

地质力学与板块构造学

比较·联系·前瞻

丘元禧 编著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

经典地质力学是我国著名地质学家李四光教授创立的大地构造学说，而板块构造说则是当今最盛行的大地构造学说。本书对这两个大地构造学说的理论体系、基本观点、研究侧重点和研究方法进行了系统的对比性研究，既从其历史渊源和现实意义的角度做了考察，又对其未来之发展做了前瞻，从科学发展史的角度探讨和阐述了这两个学说的同源、殊途而同归、相互补充、相互包容和互相融合的历史发展轨迹和未来发展趋势。

全书内容由三个主要部分组成，即地质力学与板块构造学之系统比较、构造体系与板块构造的相互关系之研究和建造与改造对立统一的研究。

书中对由作者建立的两个新的构造体系即似新华夏式伸展盆海系和新生代 NW 向压扭构造体系（新河西系）的建立依据做了系统的论证。

本书是作者多年科学研究成果的结晶，书中包含了作者多年来运用地质力学与板块构造学相结合的研究方法研究区域构造之成果，融合了作者多年来已发表的学术论文。

本书可供从事大地构造学、区域构造学教学、科学研究的综合性大学地球科学系，地质院校教师、本科生、研究生和从事大地构造科学研究、区域地质调查、矿产普查勘探的地质科学研究机构、生产单位的人员参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

地质力学与板块构造学：比较·联系·前瞻 / 丘元禧

编著. —北京：地质出版社，2006.3

ISBN 7-116-04721-2

I. 地... II. 丘... III. 地质力学 - 对比研究 - 大地构造学 IV. P5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 161158 号

责任编辑：陈 磊 刘凤仁

责任校对：王素荣

出版发行：地质出版社

社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083

电 话：（010）82324508（邮购部）；（010）82324565（编辑室）

网 址：<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱：zbs@gph.com.cn

传 真：（010）82310759

印 刷：北京印刷学院实习工厂

开 本：787 mm×1092 mm

印 张：10

字 数：250 千字

印 数：1—1000 册

版 次：2006 年 3 月北京第一版·第一次印刷

定 价：26.00 元

ISBN 7-116-04721-2/P·2645

（凡购买地质出版社的图书，如有缺页、倒页、脱页者，本社出版处负责调换）

前 言

地质力学这一学科术语的含义，在李四光身后，已有很大发展，乃至有新概念地质力学的提出，广义的地质力学包括地质静力学和地质动力学^[1]。本书所讨论的地质力学是指李四光生前所创立的以研究地质构造和地壳运动为主要对象的地质力学，亦可谓经典的地质力学。

20 世纪 40 年代，我国著名地质学家李四光在总结他和他的学生们几十年运用地质学与力学相结合的方法对中国区域构造进行研究的实践与理论成果的基础上创立了地质力学。在他的指导下，一大批中国的地质力学工作者早在解放前就对阐明中国区域地质构造特征方面做出了贡献。新中国成立以后，在党和政府的大力支持下，地质力学有了很大的发展，对我国的国民经济建设做出了很大的贡献。众所周知，根据时任地质部部长李四光提出的在我国东部新华夏系沉降带蕴藏有丰富的油气资源的科学论断，我国油气资源勘探工作作了战略东移的部署，从而找到了大庆、胜利等一系列油气田；同样，也是根据李四光关于南岭纬向构造带燕山期花岗岩带是铀矿成矿带的科学论断，并在他的亲自部署和指导下，在南岭地区找到了一系列花岗岩型铀矿床。20 世纪 70 年代李四光发表了《地质力学概论》，对地质力学的理论和实践进行了科学的总结与概括。中国广大地质工作者运用地质力学的理论与方法在许多重要的国民经济领域包括工程与水文地质、地震地质、地热勘测等方面做了大量工作，取得很大成绩。这一段历史时期堪称是地质力学上升和辉煌的时期。遗憾的是，正当地学革命在全球范围内进行之际，我国却处在文化大革命之中，与外界几乎完全隔绝，地质力学未能汲取当代地质学界的最新研究成果。加上文化大革命时期左的路线的干扰，地质力学在发展道路上遭遇过挫折。但广大的地质力学工作者无论在理论战线上还是在实践领域里仍然坚持工作，使地质力学继续向前发展和继续为我国的国民经济做出自己的贡献。李四光是我国地质事业的奠基人之一，是杰出的科学家，是我国爱国知识分子的一面光辉旗帜，作为中国地质事业的继承人和后辈，我们始终对他怀着崇高的敬意。

20 世纪 80 年代改革开放之初，经由尹赞勋、李春昱、郭令智、朱夏等地质界前辈介绍，板块构造学理论得以在我国迅速传播。板块构造学理论一经引入，我国学者以极大的热情学习和运用，这是科学的进步和学习外国先进科学理论的要求，无可非议；但与此同时，经典的地质力学理论观点却开始受到冷落。自然科学与社会科学、人文科学不同，随着科学技术的迅猛发展，旧科学内容很快为新时代的科学内容所更替是一个普遍规律，作为自然科学工作者不应抱残守缺，而应与时俱进，勇于创新科学思想。板块构造学说代表人类认识地球岩石圈构造的新阶段，因而它取代以前的构造学说是历史的必然。但同时我们还应该看到，地质学是区域性实践性很强的科学，中国地质学什么时候都离不开中国的区域地质实际，我国地质前辈所写下的反映中国区域地质实际的科学论著和提出的科

学学说对于我国晚辈的地质工作者仍然有传承的意义，何况李四光及其地质力学对地球地壳运动整体论、系统论的科学思维和对与构造地质学有关的若干领域（如地热、地震、构造相变等）尚有创新、开拓和前瞻性思考，至今对我们仍有指导和实践的意义，遗憾的是，年轻一代的中国地质工作者们已经不太了解他们的先辈在中国区域地质研究中的建树了。最近有一位同行建议我不要再像“追踪张”这一类地质构造术语，因为年轻的读者看不懂。这个意见本身没有错（以致在本书中不得不加大对地质力学基本内容的介绍，以便青年读者能看懂这本书），我感慨的是李四光等老一辈地质学家创造了一些非常反映事物本质的地质术语，这些地质术语不仅科学而且非常民族化，为什么传承不下去？是不是我们在提倡与国际接轨、学习国外先进科学技术理论的同时，也应该提醒国人不要妄自菲薄，要保留和发扬我国优秀的民族科学遗产？特别像地质学这样实践性、区域性很强的科学，我们更应该让年轻一代传承中国地质学的优秀遗产，在这方面，我们这一代人，尤其是在大学地质系执教的地质教育工作者有义不容辞的职责，这是作者写这本书的一个主要动因。

我想起了 20 世纪 90 年代初期，我在无锡聆听了朱夏先生在其有生之年最后一次学术报告“活动论构造历史观”^[21]的发言。他说：“在李四光诞生一百周年的大会上，上海地质学会叫我讲话。我说，当年板块来的时候，地质力学似乎与其不能相容，现在板块上升了，有些人不理睬地质力学了。现在看来这是不对的，地质力学与板块相比有五点共同的：①地质力学无疑是活动论，重视相对水平运动；②改造与建造的关系，提出改造是在建造基础上的改造，建造是改造背景上的建造；③地质力学提出压、张、扭，这种东西有序、有级别，彼此互换；④都讲的是中生代以来的情况；⑤提出旋转型“歹字型”、“多字型”，李先生讲得清清楚楚，太平洋相对欧亚大陆剪切，剪切以后再对冲”。既然如朱夏所说两者有如此多的共同点，为什么一个扶摇直上，推崇备至；一个却被打入冷宫？无论是受到推崇还是受到冷落，都有其应该追究的原因，无论是成功还是失败都应该予以总结，这对科学的发展都是重要的，如果我们这样做了，我们就变自在为自觉。文化大革命前后的人为社会因素对于一种学说来说，只是一种暂时的外因；对于一个学说的未来，决定这个学说的命运归根结底是这个学说是否代表着科学的真理，是否对社会发展有益。翻开一部科学史，各种学说的兴衰此起彼伏，屡见不鲜。这里有几种不同的情况：一是一些所谓的学说并没有包含多少科学真理，虽曾时髦一阵，但却经不起客观事实的检验，因而很快地退出了历史舞台；另一种情况是学说本身包含部分相对真理，虽然不够完善，但经过补充修正后仍然屹立于科学舞台之上，或者被更为先进的科学理论所包容和代替，后者如大地构造学中之槽台说为板块构造学说所包容和代替；还有一种情况是该学说本身一开始基本上就是正确的，但由于历史条件，当时暂时无法证明其正确性而遭到冷落或者被误认为是异端邪说，但随着科学的进步终于证明其正确性而被确认为科学真理，哥白尼的日心说和魏格纳的大陆漂移说就是这方面的最好例证。那么，地质力学究竟属于哪一种情况？这也是本书想要弄清楚的另一个重要问题。

在科学史上还有一种现象就是学术思潮或学术潮流，这种学术思潮往往带有时代的特点。在某一个科学发展阶段，往往某种学术思潮占有统治地位。例如 19 世纪中末叶由于传统地质学首先是在地层学的基础上发展起来的，人们首先是从地层建造中寻找地质构造和地壳运动的历史记录，因而垂直运动备受关注，从垂直方向去研究地壳的运动和变迁

成为那一时代主要的思维方式，这也就是为什么那一个时期固定论占统治地位的客观原因。但是随着人们对地质构造现象的深入研究，诸如大规模逆冲推覆构造的发现，地质学家们开始发现地壳不仅有垂直运动，而且有水平运动，不仅有水平运动，而且有大规模的水平运动，大到大陆开裂和漂移，于是魏格纳提出了大陆漂移说。如果我们翻开 20 世纪最初 20 年的地质文献，可以说大陆漂移说成为那一时期的学术潮流和学说时尚，但曾几何时，大陆漂移说又因动力机制一时无法解决而几乎在科学舞台上被人们遗忘了几十年，直到海底扩张被证实才重新复活。由此可见，看一个学说正确不正确并不能以某一个时期有多少人拥护来衡量，而在于它是否拥有科学真理，它的研究思路和研究方法是否真正代表科学发展的前进方向。真理有时是掌握在少数人手里的，某些拥有真知灼见、掌握科学发展方向的科学家开始往往是少数派。对于科学家的这种命运，真正的科学家应该有一种辩证和历史唯物主义的态度，即实事求是的态度：一方面要看到科学家们限于当时的历史条件，其学说往往有需要完善的部分而敢于加以补充修正；另一方面要敢于坚持和发扬其符合真理的部分。

我个人在 20 世纪 70 年代开始学习地质力学。李四光学术思想中的整体论、系统论、活动论以及学以致用与辩证发展的自然科学观、求实创新和理论与实践统一的科学方法论^[3]，对我的科学研究实践有深远的指导意义。原来意义上的地质力学理论受到冷落难免使我陷入沉闷，但也促使我思考其低落的原因和未来的发展前途。它的未来将会是科学史上的那一种情况？朱夏^[2]关于板块构造与地质力学的共同点的论述启迪了我进一步去研究这两个学说在理论上的渊源、形成和发展过程，从而发现它们之间不仅有共同点，而且也有相异处，这种相异不仅表现在研究对象上（虽然两者都是研究地质构造，但板块构造学侧重于构造块体的研究，地质力学侧重于构造共生组合及其成生联系的研究），而且也表现在研究思路上的不同，这种差异性处理好了可以互补，处理不好就相互排斥。遗憾的是，在过去的岁月里它们曾经未能成为互补，相反地，如朱夏所指出的却成为互不相容的东西，这无疑对于科学家们更全面地认识真理、对科学的发展是有害的。值得庆幸的是，已经有科学家走上把它们融合的道路，例如马宗晋^[4]把全球构造系统划分为大洋中脊系统、环太平洋俯冲系统和大陆构造系就体现了把板块构造和构造体系结合起来的思路。本书作者也注意到这种互补性，尽管两种学说在理论上都存在其地球动力学机制尚未解决的问题，但板块构造和构造体系都是客观存在的构造实体，形成动力机制虽然尚未解决，并不妨碍我们对这两个构造实体及其相互关系和成生组合规律的研究。自 20 世纪 90 年代以来，我开始用地质力学与板块构造理论相结合的观点和方法研究中国大陆的中、新生代区域构造，先后在《地质力学学报》上发表了近十篇学术论文。文章发表以后得到一些同行的认可和鼓励，建议在前述论文的基础上能进一步有所深化，于是有了这本册子。本书所阐述的内容可归纳为：前言，问题的提出；第一篇地质力学与板块构造学在理论渊源、形成过程和各自特点的比较（包括第一章、第二章、第三章）；第二篇板块构造与构造体系（构造型式）在地壳运动和地质历史过程中的相互联系、相互作用的研究（第四章、第五章、第六章），第三篇古构造研究（第七章、第八章），第四篇是作为它们的物质记录——建造与改造的对立统一的研究（第九章）；最后是前瞻地质力学与板块构造学未来的发展前景和它们之间在未来可能的融合（结束语）。由于要对这两个学说进行比较，本书在地质科学术语方面，尽量保持经典地质力学和经典板块构造学原作者的原

意，在阐述问题时尽可能采用该学说已使用的术语。至于根据新发现的地质事实需要对原有某些概念作出某些补充修正，也会在文中予以说明。就本书作者的主观愿望而言，是想通过本书的写作和出版能与地质同行切磋研究在引进和学习国外先进理论时如何能扬其长避其短，有所为、有所不为；对我国地质先辈们根据中国的区域地质实践和对地质科学的创新所创立的地质理论（不仅是地质力学，也包括黄汲清先生的多旋回说、陈国达先生的地洼说、张文佑先生的断块说、张伯声先生的波动镶嵌说等，本书只是以地质力学为例），如何传承创新、发扬光大，为我国民族科学在国际科学舞台上争得一席之地，为我国年轻一代的地质工作者学习老一辈中国地质学家的优良传统和科学业绩创造更有利的条件。但限于作者的科学历史知识和理论素养，恐难于达到预期目的。不当之处，尚祈同行们，特别是地质力学工作者和板块构造工作者的批评指正。

鸣谢：本书在酝酿成书过程中得到地质同行好友刘昭蜀研究员、夏法教授、杨树康研究员、梁致荣教授、林树榆教授的支持与切磋。成文以后，马文璞教授、覃慕陶教授、孙岩教授审阅了全稿，提出了许多宝贵的修改意见，对全书质量水平的提高有很大帮助。本书基础性论文的发表得到地质力学学报编辑部和崔盛芹教授、邓乃恭研究员的支持与帮助，马宗晋院士为本书写序，周蒂研究员为本书改写英文摘要。作者在此一并表示热忱的谢意。

序

人类对地球的认识，有史以来，一直是多视角、多地域、多目标的，因而不免有这样或那样的局限性、强化各自的观点论。就先人对地球构造运动认识来说，“固定论”和“活动论”主导地位之争，升降运动与水平运动的主次之争；地球膨胀与收缩之争；全球大陆南向运动与北向运动之争；构造运动的动力学要素主导地位之争等等。随着人类对资源、灾害、环境的需求而推进的地学研究和伴随地球基础科学对大气、海洋和固体地球的认识和技术探测的深化，时而争出另一侧面的发展，反反复复，曲曲折折。地学的灿烂辉煌，就是在这种争辩之中前进的，但是相对认识的深化和逼近于“正确”和“精准”的地学目标，还有相当长的争辩过程。然而，一个时代的地学人总会要站在他所推崇或创新的立脚点，哪怕他的科学生涯中立脚点有所固定或前进。

我的地学构造观是“兼容并蓄”的，如果说地球表壳的运动是以水平运动为主，那么地幔的热运动、重力均衡运动就是以垂向运动为主控，这是固态地球兼而有之，必然的运动全过程。大气和海洋的运动全过程或许也是如此。

丘元禧先生编著的“地质力学与板块构造学”从比较、联系与前瞻的角度，加以分析，其宗旨即在于并联魏格纳的科学视角与李四光的科学视角，而以地质力学的全球构造解析，如全球的纬向和经向构造的力学背景；全球独有的巨大“康藏 - 印度尼西亚”歹字形构造弧的成因；由亚欧大陆东向与美洲大陆西向的运动差探索与地球自转的动力学联系等，扩展板块构造学的内涵，这是极其有益于现今全球地壳运动构造学发展的优势集成。前瞻这一大胆集成的走势，丘先生提出了由地核至行星地球整体各圈层的理论与应用的分支发展，实际上这就是当今广义地球系统科学的目标，可以预计，这无疑就是地球与人类相互作用的宏大科学领域，希望能引起地学人摆脱把地球系统科学偏置于环境研究的局限性，而在整体地球各圈层跨越性相互作用的基础上，开创地球整体系统科学宽广的分支研究和集其大成。

马宗晋

(中国科学院院士)

2005 年 10 月于北京

目 录

前 言	(1)
第一篇 地质力学与板块构造学之比较	(5)
第一章 地质力学理论的历史渊源、形成的科学背景和发展过程	(5)
第二章 板块构造学理论的历史渊源、形成的科学背景和发展过程	(13)
第三章 地质力学和板块构造学理论与研究方法之比较	(20)
第二篇 板块构造与构造体系（构造型式）的相互关系	(26)
第四章 星球级构造体系对板块构造的控制	(26)
第五章 板块间的相互作用产生区域性构造体系	(42)
第六章 板块构造与构造型式的相互关系	(62)
第三篇 古构造研究	(72)
第七章 关于古板块的研究	(72)
第八章 古构造形迹和古构造型式的研究	(90)
第四篇 地质构造与建造、改造的关系	(115)
第九章 地质构造是建造与改造的统一	(115)
结束语——前瞻	(135)
参考文献及内部参考资料	(144)

Contents

Preface	(1)
Section I Comparison of geomechanics and plate tectonics	(5)
Chapter 1 Scientific background and evolution history of geomechanics	(5)
Chapter 2 Scientific background and evolution history of plate tectonics	(13)
Chapter 3 Comparison of geomechanics and plate tectonics	(20)
Section II Connection between plate tectonics and tectonic system (tectonic pattern)	(26)
Chapter 4 Plate tectonics controlled by global tectonic system	(26)
Chapter 5 Regional tectonic system generated by interaction of plates	(42)
Chapter 6 Connection between plate tectonics and tectonic pattern (type)	(62)
Section III Studies of paleo-tectonics	(72)
Chapter 7 Studies of paleo-plates	(72)
Chapter 8 Studies of paleo-structural trace and paleo-tectonic pattern	(90)
Section IV Relation is ship between structure and formation as well as deformation ...	(115)
Chapter 9 Geological structure is the unity of formation and deformation	(115)
Conclusion——Foresight	(135)
References	(144)

Geomechanics and plate tectonics: Comparison, Connection, and Foresight

Qiu Yuanxi (Zhongshan University, Guangzhou, 510275, China)

Abstract

Geomechanics is a tectonic theory founded by famous Chinese geologist J. S. Lee in the 40s of the twenty century. Plate tectonics is a tectonic theory that is dominating the present geological community. This book made a comparative study on the logic, viewpoints, arguments, and methods of these two theories, reviewed their background and history, and predicted their future development.

Geomechanics inherited from conventional structural geology the concepts of formation and deformation, but emphasize the association and genetic connection between geological structures, advocates the concepts of tectonic type (tectonic pattern) and tectonic system. Plate tectonics inherited from conventional tectonic geology the concepts of historical analysis, but emphasize the division, movement, and interaction of plates. Both believe mobilism and continental drift, believe that the horizontal movement of the Earth crust is the major force of lithosphere deformation. Major difference between the two theories is in the driving force of crustal movement, geomechanics suggest the change of Earth's rotational velocity while plate tectonics suggest the mantle convection.

As the objects of study, tectonic systems for geomechanics while plates for plate tectonics, are real entities in the nature and do not change with researchers' believing, we may compare the two theories through the study of these real entities. From this point of view the author discussed in the book how the global tectonic systems controlled the tectonic framework of the plates, how the second-order (regional) tectonic systems were generated by the movement and interaction of plates, and what tectonic patterns were formed by various assemblages of continental and/or oceanic plates.

Formation and deformation are materialized records of crustal movements and studied by both geomechanics and plate tectonics. Tectonic facies are the patterns of formation and deformation. This book discussed the concepts of the tectonic facies, the series of tectonic facies, and the sequence of tectonic facies, and established criteria for their classifications.

The author believes that a good combination of geomechanics and plate tectonics will lead to a thorough understanding of geological structures and global tectonics.

The book may serve as a reference book for university teachers and students in departments of geology, structural geology, geomechanics and tectonics.

为了弄清楚经典地质力学（下文简称地质力学）与板块构造学在理论体系和研究方法上的区别，不仅要对其基本理论、学术观点、研究思路和主要的研究方法进行系统的对比性研究，而且还需要把它们放在地质学和大地球构造学发展的历史长河中对其历史渊源、形成过程进行考察，这样才比较容易弄清楚它们各自的来龙去脉和科学的历史的必然。

19 世纪是传统地质学形成和发展的时期，古典地质学是建立在矿物学、地层古生物学、岩石学、构造地质学这些基础学科之上的。人们认识地壳运动最初是从火山地震和地层简单的褶皱、断层、不整合等现象开始的。大量的地壳运动记录首先是从地层建造中获取的。于是，历史分析的方法和垂直运动的记录受到优先重视，历史大地构造学派成为 19 世纪最盛行的大地构造学派，他们用历史分析法帮助我们认识了诸多的历史构造记录，如地槽向地台转变的地壳演化规律。在历史大地构造学派形成和发展过程中涌现出一大批杰出的大地构造学者，诸如美国的丹纳、霍尔（地槽学说的创始人），德国的施蒂勒，前苏联的卡宾斯基、阿尔汉格尔斯基、沙茨基、乌索夫、别洛乌索夫、纳里夫金，我国的黄汲清等，他们对槽台的演化历史分析做出了杰出的贡献。从这些学者的论述中可以鲜明地感受到垂直运动论和大陆固定论是那一时期的主要学术思潮。

区域地层古生物的划分对比和沉积岩相古地理的研究是历史分析法的重要组成部分，是历史大地构造学派研究和重建大陆构造和地质演化历史的主要方法。19 世纪中叶到 20 世纪初，地质学从各大洲积累的地层古生物资料，已经开始认识到非洲、南美洲、印度、澳大利亚大洋洲等的晚古生代—早中生代地层、古生物群可以对比，它们原来可能同属一个古老的冈瓦纳大陆，以后才分裂成现在的各大洲。

否定之否定是自然法则也是科学发展的规律。正是垂直运动论和固定论的学术研究为水平运动论和活动论的出现准备了事实依据。在某种意义上说，活动论是从固定论脱胎而来的叛逆。进入 20 世纪的最初 20 年，大陆漂移说的兴起，活动论正式登上科学舞台。地质力学和板块构造学都是活动论，以后的历史分析表明大陆漂移说是它们的共同的重要理论渊源。

第一章 地质力学理论的历史渊源、形成的科学背景和发展过程

李四光的地质力学（Geomechanics）是地质学与力学相结合的一门科学，它把解决地壳运动的起因作为自己的总体科学任务。地质力学从建立构造体系和构造型式来反演地壳运动的程式，李四光把全球构造体系划分为纬向构造体系、经向构造体系和扭动构造体系

三大构造体系，认为它们是地球自转速率变化过程中所产生的经向切向力、纬向切向力及由于它们的不平衡而导致的剪切力所产生的（图1 - 1），同时认为地球自转速率的变快或变慢是地壳发生大规模水平运动的动因（大陆车阀说，详见后述）^[5]。

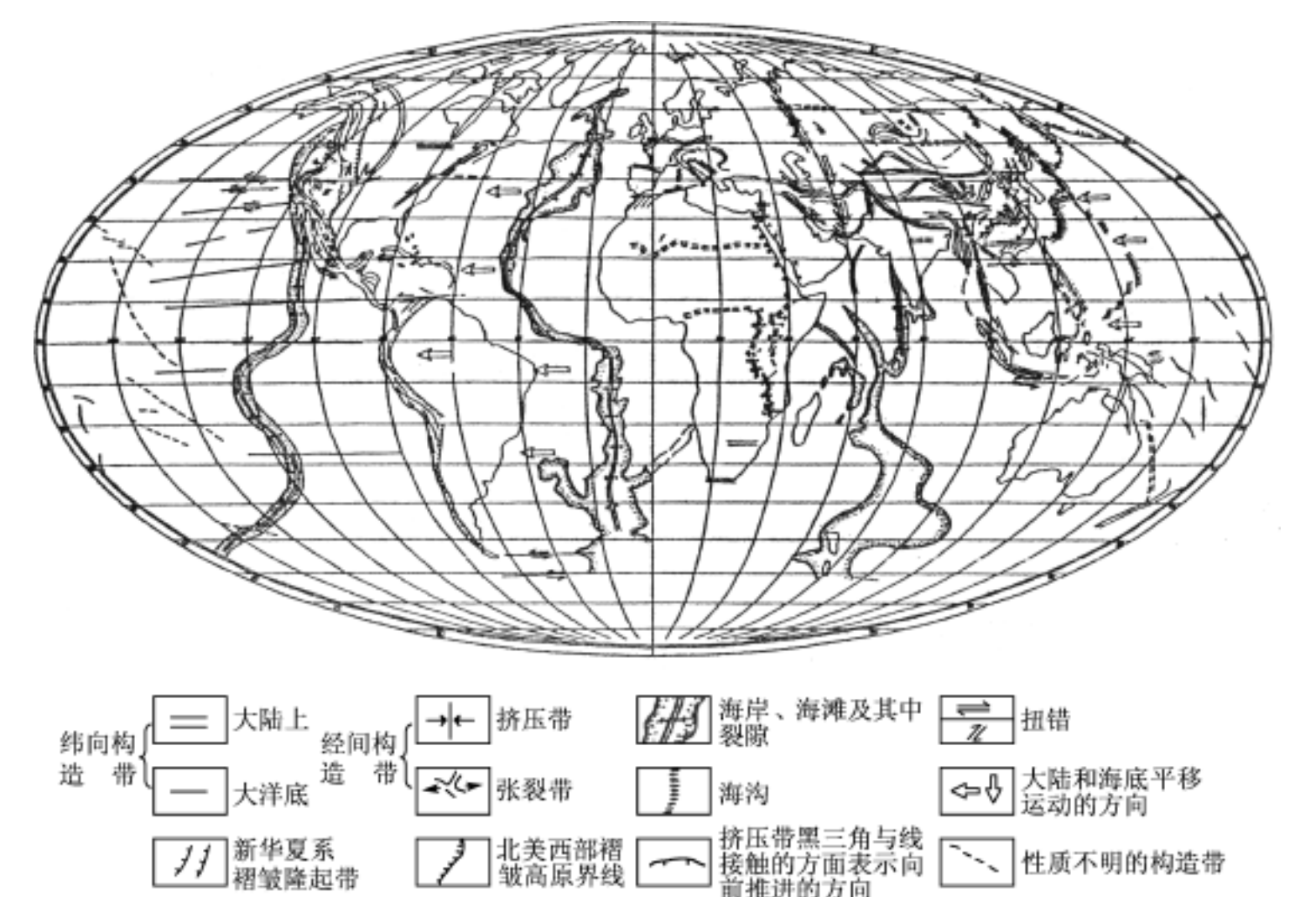


图 1 - 1 全球构造体系和地壳运动方向
(据李四光, 1973)

Fig. 1 - 1 The global tectonic systems and the earth's crustal movement directions
(After J. S. Lee, 1973)

谈到地质力学的形成和发展，不能不追溯到 20 世纪初至 20 年代期间世界地质学，特别是构造地质学和大地构造学的发展情况。正是从这些追述中可看出地质力学理论形成的一些历史背景。

1908 年美国地质学家泰勒 (F. C. Taylor) 提出“巨型大陆大规模地朝向赤道滑动，从而形成褶皱山脉”的观点 (1910 年著文论述)。他认为亚洲大陆第三纪山脉的形成导源于地球自转所产生的离心力，致使北半球大陆向南滑动，南半球大陆向北滑动，在滑动过程中遇到障碍物，乃在山脉中形成凸出的顶部。他描述原始劳亚大陆有如大陆的硅铝壳，从极区向赤道方向扩张，颇似陆地上的冰层一样，形成环状向外流动，在前面形成山环和岛弧。20 世纪 10 ~ 20 年代是大陆漂移提出和盛行的时代。魏格纳 (1915) 在《大陆和海洋的起源》一书中认为大陆由较轻的刚性硅铝层组成，它漂浮在较重的黏性硅镁质洋底上，地球自转离心力所产生的离极力驱使大陆从高纬度向低纬度赤道移动，同时认为向西漂移是日、月吸引所产生的潮汐摩擦使地球的自转速度减慢，从而使地球表层各大陆相对于地球自转 (自西向东) 有落后的趋势而导致大陆缓慢地向西移动。当移动的大陆前缘遇到大洋底的阻力时，因遭受挤压而形成褶皱山脉，美洲海岸山脉便是这样形成的^[6]。

大陆漂移说主张存在大规模的水平运动，而固定论则只承认相对固定于某一位置的垂直运动。显然，李四光是活动论者。我们从李四光早年的论著和李四光科学思维的形成发展过程中可以看到这一时期世界地质科学对他的重要影响，也可以看到这一时期大地构造学的一些理论思维，特别是大陆漂移说后来成为地质力学理论的重要历史渊源。

构造地质学（大地构造学）在历史上是从两方面即从物质组成方面（也就是建造方面）来研究地质构造的和从结构方面（也就是形变方面）来研究地质构造的。前人这两方面的研究成果自然也就成为地质力学理论基础和研究方法的一种渊源。但应该说地质力学更着重传承了传统构造地质学对构造形变的研究成果和研究方法，只是摒弃了其单纯形态论的部分而加强了地质构造形迹间成生联系和力学本质的研究。

李四光在总结地质力学的形成发展过程时，认为地质力学是经过两个阶段发展起来的。为了正确地表述他的认识，这里我们尽可能引述他的原文^[7]：

第一阶段从1921年研究中国北方石炭纪—二叠纪的沉积物开始。关于太原系的时代有过长期的争论。李四光等人对地层古生物的研究证明：中国南部占主要地位的晚石炭世和一部分石炭纪—二叠纪过渡的海相层与中国北方以陆相为主夹有若干海相地层的太原系是同时代的产物。

获得这一研究成果后给自己提出的问题是：当时的海侵海退为什么有这样南北的差异？这个问题牵涉到当时大陆局部的升降运动和海面全面的升降运动，以及在低纬度和高纬度地区存在着海面差异运动等可能性。他经过对地球上其他地区当时的海侵海退现象的初步比较，特别是对古生代以后大陆上海水进退规程的初步探索，得到一种假说，这就是：大陆上海水的进退不完全像著名奥地利地质学家徐士所提出的那样，即海面的升降是全球性的，而是可能还有由赤道向两极又反过来由两极向赤道的方向性的运动。这个假说又引发一个问题，为什么海洋会发生这种具有方向性的运动？当时初步设想，这可能是由于地球自转速度在漫长的地质时期中反复发生过时快时慢的变化。这种设想是否正确，当然还存在很多问题。不过它对地质力学工作的开端起了相当重要的启发作用。它的作用在于：提出了这样一个问题，即大陆运动包括区域性的构造运动是不是也会受到这种地球自转速度变化的影响？如果是，即如果构成大陆的岩石受到长期地质力活动的作用而它具有一定刚性和塑性的话，那么当大陆和海洋发生南北向的方向性的运动以后，在大陆上也应该留下相应的形迹，人们有时说地质力学不管沉积，这是不符合事实的。

在20世纪20年代，关于大陆运动起源的问题，各个学派都提出了自己的看法。李四光^[6]发表了《地球表面形象变迁的主因》一文。此文在批判一些传统学派的同时，根据大陆上大规模运动的方向，推论了那些运动起源于地球自转速度的变化，提出了“大陆车闸”自动控制地球自转速度的作用。从一个局部性的科学研究成果提升到对全球构造问题的思考，这正是李四光这位大科学家不同于一般区域地质实际工作者之处。但是李四光在回顾以往的科学研究进程时，却以自我批评的精神谈到这一时期学术研究的缺点。他写道：这一套理论（指大陆车闸说——引者注）不是没有一点实践的基础；但是，这种立论，大体上说，也和其他各派的学说一样，在方法论上存在着很大的缺点，主要的缺点在于：用的资料不够广泛、不够细致、不够落实，而是片面地抓住一些事实或者若干现象，参考一些第二手资料，就急急忙忙地提出大的理论来。实际上，这些所谓理论，是很低级的，也是很粗糙的。它们所依靠的证据，往往可以这样解释也可以那样解释，这是一

个很深刻的教训，同时也积累了一些粗略而不是没有益的经验。特别是让我们对大陆运动的方向性有所认识，这是地质力学发展过程的第一阶段。

如前所述，李四光不是不研究建造，而是在研究建造的过程中进一步研究大地构造和地壳运动的。也正是在这个阶段，他从建造形成的多解性认识到任何有关构造地质与大地构造的假说，其正确与否必须经过严格的检验，这就是能否解释现存的地壳变形记录。正是由于这种思考，他毅然决然地把科学研究的主攻方向从对建造和地层古生物的研究转向形变的研究。他写道：地质力学发展过程的第二阶段，不是从结束了第一阶段才开始的，而是在第一阶段后期已经开始了一些零星的工作。那些工作主要是针对区域性构造现象之间的相互联系。必须说明这里所说的构造现象是指大型、小型、单式、复式的褶皱和各种断裂而言。这些形变形象是当地地壳运动的陈迹，是实实在在的东西。要了解当地所经历的地壳运动的程式，就必须对它们各自的本质、形成过程和它们彼此之间可能存在的联系有所认识。这样来看问题，就和第一阶段中，只注重大块大陆的运动有所不同了。

李四光对构造现象本质的探索是从认识一些个别的和特殊的现象起始的。起初，他看到像乌拉尔那样褶皱强烈的山脉在东西两面广大平原之间突起而思考为什么有这样一条山脉？光说它是由南北向地槽在回返阶段中转变而成的，只是把问题向后推了一步而没有最终解决问题。李四光认为乌拉尔这条在晚古生代经过一次巨大的构造运动而形成的山脉，很难设想它是孤立的。实际上，在它的东西两侧的广大平原——俄罗斯地台和西伯利亚地台以南，还存在着一套相当复杂的弧形山脉。西边从高加索以西，东边到阿尔泰山系都属于这套弧形山脉穿插的地带。当时知道这些弧形山脉中有些是大致和乌拉尔大致同时产生的。虽然它们之间相隔很远，走向也不同，但它们之间是不是有什么成生联系呢？李四光说这是他认识山字型构造的开端，李四光说光靠当时所掌握的事实，当然还不能作出任何结论。李四光回顾这段经历时说，不在于这个设想正确不正确，而是想揭露当时如何冒着很大的危险打开一条思路，到实践中去认真检验这种构造型式或构造体系的概念究竟行不行得通？

1928年前后在南京镇江一带初次发现了宁镇山脉这个大致东西向的弧形构造，它的弧顶位于镇江一带，向北凸出，在它南面相当辽阔的平原中，出现了一条茅山山脉，这条山脉的伸展方向大致成南北向，它和宁镇山脉一起形成了一个构造体系。这个构造体系的特点，基本上与乌拉尔山脉及其以南的复杂弧形山系所形成的构造体系相符合，不过方向相反罢了。这时对山字型构造体系的认识就进了一步，但还不够落实，还需要扩大范围。在野外进行大量观测，看看是否在我国境内还存在这种类型的构造体系。当时为了方便工作，把这种南北向的组成部分，称为脊柱，把它前面的弧形构造带称为前弧。以后，又先后提出和确定了广西弧、淮阳弧等。在过了若干年以后，由于找到了脊柱，才确定了广西山字型和淮阳山字型（后者至20世纪50年代才确定）。但是在这个时候，从地盾、地台等观点来分析地质构造和从构造体系的观点来分析地质构造，还存在分歧。

在20世纪20年代末期，除肯定了几个山字型构造以外，还发现了其他一些不同类型的构造体系。对这些不同类型构造体系的认识，模拟实验起了一定的作用。就当时所认识的构造类型和它们的分布范围、规律，以及它们在地壳运动问题上的含义，李四光在1929年作了一次总结。这个总结概括了不同类型构造的特殊本质，明确了构造体系的概念，测定了与每一类型构造体系有关地区的构造运动的方向和方式，推断了大陆和海洋运

动的主因，这些都为地质力学的建立打下了实践和理论基础。

20 世纪 30 ~40 年代初期是地质力学在上述基础上继续发展的时期，也是以构造体系概念为指导，继续向着尚未研究过或尚未深入研究过的各种具体的构造类型进行研究，找出它们各自独特的本质，修改、补充和丰富构造体系这个概念的时期。李四光认为在这个时期地质力学才开始走上自己的道路。在地质学的领域中，逐步扩大了自己的活动范围，在越来越多的地区，发现了许多构造体系的定型性、定位性、定时性和在同一地区不同构造体系之间互相交错、部分重叠的关系，亦即复合的关系。诸如东西向复杂构造带、华夏系、新华夏系等多字型构造都是在这一时期确定的。到了这个阶段，地质力学已经不光是停留在描述构造体系的特点上了，而是要求对它们的起源提出合理的解释。例如多字型构造显然反映了力偶的作用，山字型构造通过模拟实验和初步理论分析，它的特征可以和平板在平面上受到弯曲而发生的形变相比拟。诸如此类，其他类型的构造型式也都要求说明在有关的地块中地应力活动的方式。这就提出了一系列有关岩石力学性质的问题。根据野外观测，岩层和岩块在地应力的作用下有时表现弹性反应，也有时表现程度不等的塑性反应，究竟是什么条件决定了同样的岩体显示这种不同的反应？在这里，地质力学不得不进入弹性和非弹性力学的领域。这样又进一步引起了一系列复杂的理论问题。要解决这些问题，很清楚，需要从事实验工作，也需要把实验所获得的资料和实际的构造现象结合起来，对岩石在自然界的力学性质和应力场进行分析。李四光写道：“在明确了上述地质力学工作的方向以后，在四十年代初期地质力学这个名称才被正式提了出来。也就是说只是到这个时候，地质力学这门边缘学科才算正式形成和诞生，这是因为经过几十年的探索，地质力学终于明确了自己的研究对象和研究任务，有了自己独特的研究思路和解决问题的方法步骤”。如地质力学在解决形变问题上提出了一系列有别于传统构造地质学与大地构造学的方法学原理，其中重要的如对各项变形构造的筛分，有别于构造层分析方法的从新到老、层层剥皮的构造复原方法等。

从以上李四光对地质力学形成过程的阐述中，我们可以相当清晰地看到地质力学是怎样依照它的创始人的思路和科学实践的发展而发展，最终形成地质学与力学相结合的边缘学科——地质力学。但是只从这方面来论述地质力学是不够的，还不能科学地说明地质力学为什么在 20 世纪 40 年代在中国诞生的缘由。本书作者认为地质力学之所以能在 20 世纪 40 年代在中国诞生其社会和科学背景有三：①当时国际地质学从传统地质学转向现代地质学的历史进程要求地质学（构造地质学）与力学结合产生新的边缘学科；②固定论与活动论在世界范围的争论，特别是大陆漂移说揭开了认识大规模水平运动的序幕，要求解决大规模水平运动的力学机制问题；③因为构造地质学是区域性很强的学科，正像北美和俄罗斯因发育完好的地槽和地台而成为槽台说的故乡一样，中国本土的区域构造发育众多完美的种类齐全的构造型式和构造体系，它非常有利于建立地质力学的科学体系。正是上述时代和科学的社会区域地理背景再加上李四光本人对地质学、力学、数学、物理学等方面深厚的科学素养，才使中国成为地质力学的故乡，李四光成为地质力学的创始人。

本书是要对地质力学与板块构造理论进行对比性研究，我们除了对各自形成的历史渊源、形成过程和产生的科学社会背景有所了解 and 认识以外，还应该对各自的优势和特点有所了解。而要认识这一点，还必须把它们放回到各自产生时的科学技术条件和社会环境中加以考察。

从地质力学的理论体系来看是有它的独到之处。尽管李四光的大陆车闸说中关于地球自转速率的变化通过角动量转换产生地壳运动的机理尚有待进一步论证，尽管由地球自转产生的离极力 and 水平切向力足以形成纬向和经向构造系的认识已经受到质疑，但把地壳运动问题与地球的整体运动及其变化相联系（在这以前已经有与地球的自转相联系，李四光创新和前进之处在于与地球自转的历史变化相联系）则自李四光始。

正如马宗晋所指出的：地球自转变化是诸多地球动力因素中的一个主要的和基本的因素，迄今为止还没有人像李四光那样全面系统地研究过地球自转对地壳运动的动力作用并形成一整套学说^[4]。这是李四光学说在理论上的优势。为了说明这一点。在这里我们还得比较多地引用李四光对学说阐述的原文。

李四光所提出的地球自转动力学理论基于全球巨型构造体系的定向性即纬向构造体系、经向构造体系和扭动构造体系（后者被认为是前两者因运动不平衡而产生的变种）。李四光指出：……不同方式的运动，在地壳的许多部分和地壳的上、下层中，虽然各自都有区域性的特点，表现出不同的运动方式，但是归根到底，它们总的方向都是一致的。换句话说，从构造体系分布和排列的规律来看，地壳的区域性运动的方向和地壳整体运动的大方向，是统一的，是一致的，即不是经向的水平错动，就是纬向的水平错动。经向的水平错动，有把地壳上层的物质，从高纬度向低纬度推动的趋势；纬向的水平错动，有把大陆向东西两方面分裂，南北大陆相对扭动和大陆西部边缘挤压为褶皱山岭地带的趋势^[5]。

为什么大陆上的物质有向低纬度方向推动的趋势？为什么南亚大陆向印度洋方面水平错动？为什么非洲大陆相对欧亚大陆向西水平错动？为什么南、北美大陆向太平洋方面水平错动，而北美大陆较南美大陆错动更大？为什么太平洋洋底的西边，特别是它的北段有向亚洲大陆以下的深部楔入的现象？为什么在低纬度，特别在地壳下层和太平洋底纬向平错断裂特别发育？为什么地壳上层的构造，在许多地区比它下层的构造更为复杂？这许多问题，都牵涉到构成地壳上、下层物质的性质和它存在的条件（主要是压力和温度），而更重要的决定因素是推动地壳运动的力量。

是什么力量按照前述方式推动了地壳运动？适合于前述地壳运动方式的要求，看来只是一种力量，就是在重力控制下的地球自转的离心力^[5]。不过为了寻找上述基本规律的根源，我们应该注意到，决定地壳运动的因素是一回事，让地壳各部分有发动周期性水平运动和伴随而来的垂直运动的可能又是一回事。这两个方面必须同时加以考虑，才不致陷于片面地寻找问题的答案。如果上述东西向和南北向的构造运动简单地起源于地球自转作用的话，那么在地球自转几十亿年的过程中，为了适应固定的重力和离心力联合力场的要求，它的外形和它的表层内部结构应该早已达到平衡状态，大规模地壳运动就不会时起时歇，也不会迟到第三纪乃至第四纪还会沿上述那样两种方向发生运动。这样在论到决定地壳运动方向的因素时，我们应当考虑的不是地球自转，而是地球自转速度变更的问题^[5]。

李四光继续写道：当地球角速度加大到一定强度时，地壳，特别是它的上层，在等温面上升的条件下，就会沿着某些纬度和某些经度发生主要是挤压性或张裂性的大规模构造运动。同时在某些个别地区又会发生水平扭动，这些运动的总的主要趋向，是使地壳的扁度稍稍加大，让地球的形状适应它加大的自转速度。一旦这些大规模的构造运动发生跟不上随着基底往东加速前进的大陆部分，不免有整体稍微向西错动的趋势，例如，南、北美洲可能就是这样的大陆块。当比较坚硬的由基性岩组成的大洋底阻挡它们趋向西滑动

时，就有可能在南、北美洲西部边缘发生大规模的褶皱或凹褶。科迪勒拉和安第斯地向斜以及在这两个地向斜中继起的褶皱山脉很可能就是这种作用形成的。由于这种运动在某些趋于向西错动的大陆基底和前面受到阻碍，发生摩擦，又由于大规模较重的岩浆向地球表层侵入或向地壳流出以及由于大规模区域变质等作用的影响，还由于潮汐论者认为这种影响大部分是“弹性”的，地球的角速度又会稍稍变慢。角速度变慢的结果又有可能发生与上述情况类似但方向相反的构造运动。这样，我们可以提出一个简单的推断：即在全球性大规模构造运动发生以前，地球角速度应该在一个时期中逐渐加大，而在大规模构造运动期间及其以后，它的角速度就会显著变小，并且继续变小，直到它的角速度又重新加大。有人认为这样产生的动力，不够强大到把像喜马拉雅、落基山、安第斯那样的山脉抬高到它们所达到的高度。这是把两种造山作用混为一谈。水平推动的力量只是使地壳发生凹褶或褶皱。至于把褶皱的地带抬高起来成为山岳地带的这一现象，是与重力有关的均衡作用的必然结果。……根据上述看法，我们可以说，地壳的构造运动是控制地球自转速度的自动机制……^[5]。

李四光学术思想的第二个长处是他抓住了地质构造的本质，即它的力学本质。虽然传统的构造地质学在分析构造变形时已经运用应变椭球体的应力 - 应变分析，地质力学分析方法则进一步具体分析各种具有成生（成分和生因）联系的构造形迹的共生组合及其所反映的构造变形场和构造应力场，也就是建立构造型式和构造体系，再由构造体系和构造型式反演地壳运动的程式，再由地壳运动的程式探求地壳运动的力源。这是地质学的反序法在构造地质学中的成功实践。其中心环节是建立构造体系和构造型式，李四光建立了严密的研究工作逻辑步骤，包括野外观察、室内模拟实验、岩石力学研究、数理论证等一整套工作内容和方法。虽然在建立构造系统分析方法的同时，难免同时带来对复杂自然地质现象简单化处理的弊端^[4]，而在实际工作中，也确实有一些同行走上了先入为主模式化的道路，加上受当时测试技术水平和经费的限制，可信度受到怀疑，这也正是在构造学界地质力学所提出的概念和某些构造型式至今未能得到普遍认可的一个重要原因，但它毕竟开创了一条认识地质构造的崭新的道路，而从构造地质学所要解决的科学任务来说，这条道路是终归要走的，这也就是地质力学从长远来说的根本优势所在。不过，科学是不断向前发展的，经典地质力学是李四光根据他生前当时的地质研究事实作出的概括。而在他身后，许多新的地质事实又发现了，如新的构造体系和构造型式，新的构造实体和构造复合关系的发现，要求在理论上作出新的概括。地质力学提出的有些概念本身具有相对性，如果我们不注意这种相对性，把它绝对化也会阻碍地质力学的发展，例如关于构造迁移和构造型式的定向性、定型性和定时性就只具有相对性。众所周知，构造活动的迁移和构造运动的穿时性使构造运动的定时性只具有相对性；而构造型式的定型式也由于边界条件的变化（特别是构造边界形态的变化）、构造发展阶段的变化（萌动期、壮年期和衰亡期）、后期构造的复合改造等而发生变化。正因为如此，马宗晋^[4]指出，构造体系的概念提供了一个对地壳变形进行总体分析的方法，但它的定型、定位、定向性又把复杂的地质现象简单化。当然，本书作者认为构造体系和构造型式的基本概念还是能够成立的，经典地质力学的工作方法也是基本科学的，只是要强调对于如此丰富多彩的地质变化，如果我们不加以注意，就有可能使我们的地质力学研究思维陷于僵化。显然，这对地质力学的发展是极端有害的。

新中国成立前我国是一个长期处于半封建半殖民地地位的国家，在列强的科学技术面

前，相当一部分人怀有民族自卑感。20 世纪 80 年代以来，国内构造界掀起了一股追赶国外现代构造地质学先进水平的热潮，其中包括滑脱构造、基底析离、韧性剪切变形、递进变形的研究等。其实国外这些现代构造地质学的新水平和新内容有些在我国 20 世纪 40 年代地质力学创立之初已经开始研究。众所周知，强调大陆表层对于基底的滑移是李四光一贯的思想，地质力学中构造序次的概念也就是递进变形的概念，岩石力学性质随深度、温压条件的变化而变化的概念早在地质力学创立之初就已经开始研究了……。

但是地质力学这些在 20 世纪 40 年代已经提及和开始研究的领域在中国构造地质学的发展过程中我国并没有因为在这些方面研究比较早而走在前面，相反，却在几十年后反过来还要向国外学习。这其中的原因是值得深究的，当然尔后我国科学技术的总体水平和国力状况对于我国构造地质学的发展有严重制约也是一个重要的原因。

以上论及我国地质力学的发展过程和可能影响我国地质力学发展的一些因素问题，本书作者丝毫没有想低估我国地质力学几十年来所取得的重要成就和发展，相反应该强调指出的是，在李四光生前指示要开展工作的地质力学研究领域在他身后有了重要的进展，他们都直接或间接地受到李四光学术思想的启迪和传承，如马杏垣、索书田的构造解析学，王嘉荫、刘瑞珣的应力矿物，谭忠福、熊成云、汤吉方等的复合构造体系及控岩控矿构造研究、沈淑敏、宁崇质等对区域构造的构造应力场和模拟实验的研究，孙岩的断裂构造带的划分和构造地球化学，杨开庆、董树文的动力成岩成矿作用和地壳物质调整研究，吕古贤等的构造超压的物理化学作用的研究，吴磊伯、覃慕陶的构造体系、构造序次控制花岗岩型铀成矿带矿床和矿体研究，崔盛芹的古构造研究，林潜、马醒华的古地磁研究，王小凤、刘瑞珣等的显微构造研究，姜光熹等的 X 光岩组研究，马宗晋的地球构造和动力学的研究，胡海涛、陈庆宣、孙叶、易明初等对活动构造体系、安全岛现今构造应力场、区域稳定性评价和构造预测、地质灾害预报研究和王成金、吴珍汉、钱维宏等对地球自转动动力作用的研究，等等（上述这些研究成果曾先后以专著或以学术论文的形式在《地质力学论丛》《地质力学研究》《地质力学文集》《地质力学学报》等刊物上发表）。

我们还应特别注意到地质力学在为国民经济建设、环境保护、地质灾害防治等与人民生活密切相关的实践领域的优势。由于地质力学侧重具体的构造变形的研究，而构造型式、构造体系的展布及其成生发展规律对于有用矿产的时空展布、工程地基的稳定、地下水的分布、地质灾害等都有着控制的意义，因而系统研究构造体系和构造型式不仅对研究地壳运动有重要的理论意义，而且对指导生产实践有重要的实践意义，更重要的是，在实际工作中具有非常大的可操作性，地质力学工作方法易为从事实际工作的广大地质工作者所运用。许多地质勘测报告仍然大量记录着用地质力学方法所获得的各项工作成果，这正是地质力学有强大生命力的一个佐证。因此，地质力学工作者无论从理论上还是在实际工作中都不应因目前信奉经典地质力学理论观点者不多而气馁，应该看到一门科学能否站得住脚并能不断向前发展，归根结底，取决于这个学科在理论上能解决什么科学问题，在实践上能为国民经济建设、环境保护和生命财产安全带来什么益处。

以上所提到的只是经典地质力学在我国的发展情况。事实上，时至今日，地质力学已经发展成为广义的地质力学或新概念地质力学，其在理论领域和实践领域都有着极其广阔的前景，但这已不是本书所要阐述的范围。

第二章 板块构造学理论的历史渊源、形成的科学背景和发展过程

板块构造学在理论渊源上与早期的大陆漂移说有着密切的传承关系。大陆漂移说的起源可上溯至 17 世纪。1820 年，F. BaCon 曾提出大西洋两岸大陆边缘严格平行的原始观点。1858 年，A. Sinder 提出过与魏格纳相似的联合古陆的说法。魏格纳则是公认的大陆漂移说的创始人，他开始时本来是想用大陆漂移来解释大陆古气候变化的原因，后来大陆上这些古气候带的展布的变动便成了大陆漂移的重要证据。在南美洲、非洲、印度、澳大利亚和南极洲广泛分布着石炭纪—二叠纪冰川沉积，其中一些位于现代赤道地区或其附近；而许多古代蒸发岩和红层则出现于现代潮湿或者寒冷的中、高纬度地区。虽然现代珊瑚都限于纬度 30° 内的暖水环境里，但古生代的礁体却曾于较高纬度的格陵兰、加拿大的斯匹茨卑根发现。魏格纳还认为，大陆漂移对现代由深洋分隔的各大陆上的动物群和植物群的显著相似提供了最好的解释。例如大西洋东、西两侧的早古生代海相无脊椎动物化石非常相似；属于二叠纪的舌羊齿植物群种子蕨化石见于所有南方各大陆和印度；南极洲的三叠系中也发现其他南方大陆所具有的陆生爬行动物化石等。在地层特征上，魏格纳注意到在印度次大陆上发育的石炭纪—三叠纪的冈瓦纳群在南美、非洲、澳洲等大陆同样发育，并可对比；而支持大陆漂移说的最初证据是大西洋两岸地形的拟合（图 1 - 2）。魏格纳首先提出应该运用海底等深线进行大陆复原。魏格纳所用的这些方法也就是传统地质学采用的地质历史分析方法，或者说是侧重从物质组成、建造沉积、古地理方面来研究大地构造；而这些方法是在今天的板块构造，特别是古板块的研究中所经常采用的方法。因此，可以说板块构造学不仅从大陆漂移说中传承了大陆漂移活动论的思路，而且从大陆漂移说的研究方法中传承了大地构造的历史分析法。

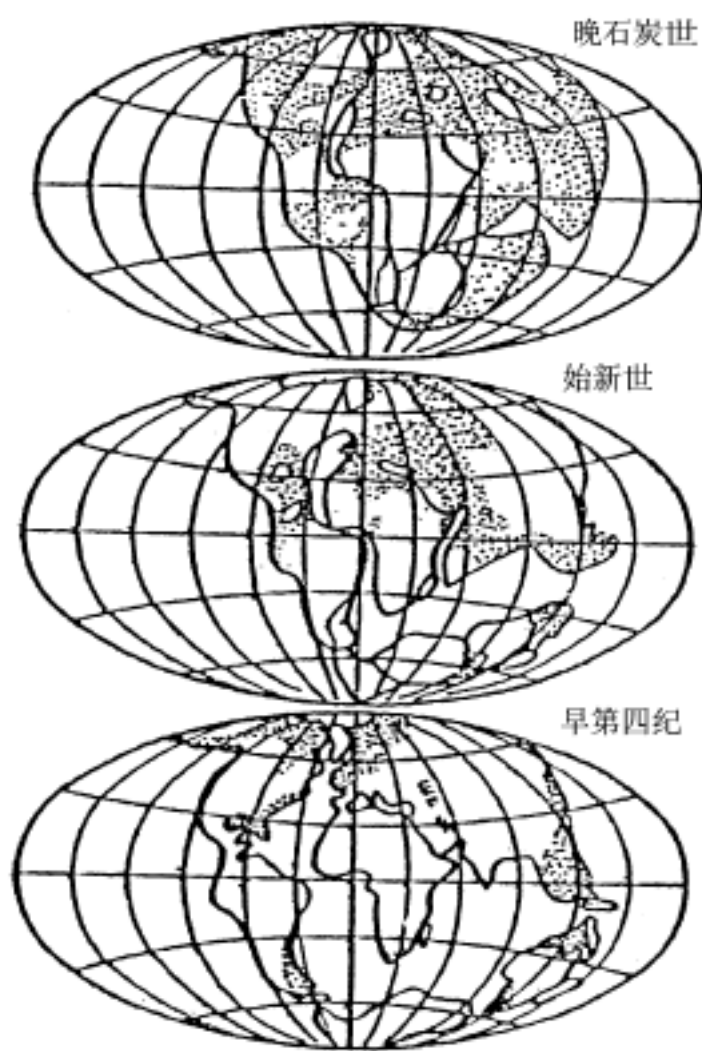


图 1 - 2 大陆漂移的过程

(据 Wegener, 1922)

Fig. 1 - 2 The process of continental drifting

(after Wegener, 1922)

但是我们应该看到，板块构造学在理论渊源上虽然与早期的大陆漂移说有联系，但大

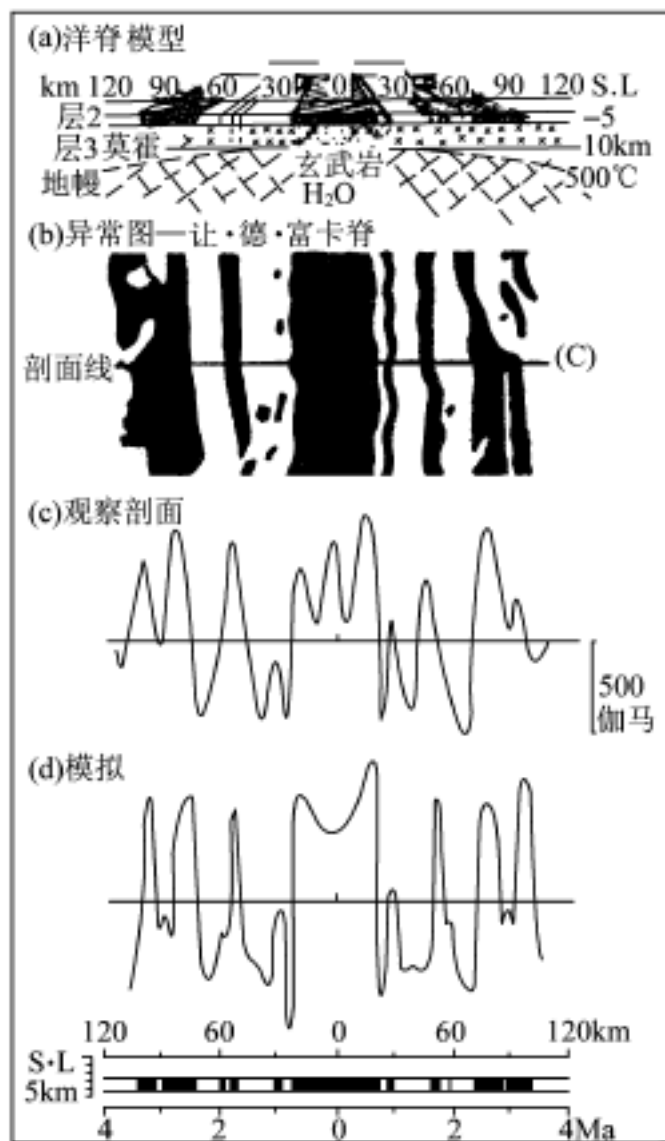


图 1 - 3 F. J. Vine (1968) 综合的海底扩张记录传递模式
(据 F. J. Vine, 1968)

Fig. 1 - 3 The comprehensive transfer model of the record of seafloor-spreading
(According F. J. Vine, 1968)

(a) 温哥华岛西南让·德·富卡洋脊的扩张模式，层 2 中有阴影的表示正常磁化，无阴影的表示反向磁化；(b) 让·德·富卡洋脊磁异常记录综合图片段；黑色，正异常区；白色，负异常区；(c) 沿 (b) 图所示剖面线的实测磁异常曲线；(d) 按假定模式计算的理论曲线，S. L = 海平面；有效磁化敏感度定为 ± 0.01 ，仅脊峰的中心部分为 ± 0.02

坡水深 915m 深处匹配得最好，为验证大陆漂移说提供了最形象的证据。1963 年剑桥大瓦因 (F. J. Vine) 和马修斯 (D. H. Mathews) 提出有关海底磁条带异常形成假说。大洋异常的显著特点是正负磁异常条带相间排列，并平行洋中脊延展，每一条带长约数百公，宽约数十公里。瓦因和马修斯明确指出这种异常条带不是由磁化强弱不均引起的，而在地磁场转向的背景下，海底逐渐新生、不断扩张所造成的。地幔物质不断自大洋中脊出，形成新的洋底。当它冷凝到居里点温度以下时，便按当时的地磁场方向磁化。随着底扩张，先形成的洋底向两侧推开，洋脊顶部不断涌出新的洋底。假若这时地磁场发生转形成的洋底便构成一条反向磁异常条带，若地磁场反复转向，乃在洋底留下了一系列化方向正反相间的磁异常条带 (图 1 - 3)，有称为“录音磁带”。每次地磁场转向都在时期形成的洋底打下标记，实际上磁异常条带就是地球磁场不断转向的历史记录。瓦因马修斯断言：“若海底发生扩展，则磁化方向正反交替的岩石地块就会由中脊轴部向外

陆漂移说由于其动力机制在当时未能解决曾沉寂一时。后来它之所以复活，并在此基础上形成板块构造学，则主要与 20 世纪中叶海洋地质学、古地磁学和地球物理学的发展密切相关。20 世纪 50 年代，海洋学家利用声学测深法测绘海底深度图，发现了几条巨大的大洋中脊。1956 年美国学者尤因 (M. Ewing) 和希曾 (B. C. Heezen) 广泛收集回声测深资料编绘出世界大洋底地形图，表明世界大洋面积为 $360 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，平均水深为 3726m。他们首先提出世界大洋洋底纵贯一条连续延伸长达 64000km 的大洋中脊 (mid-ocean ridge)。大西洋和印度洋的洋中脊高出两侧盆地 2 ~ 4km，宽约几百乃至几千千米，甚至可达 5000km (如南太平洋洋隆)，其面积占大洋面积的 30%，几乎相当

整个陆地的面积。显然，洋中脊是界上最大的环绕全球的海底山系。

1962 年美国普林斯顿大学赫斯 (H. H. Hess) 在他著述的《海底的历》一文中提出海底扩张并从洋中脊两侧移动的海底扩张假说。1962 年国剑桥大学地球物理学家 E. C. Bullard 成功地完成了大西洋两岸大陆廓的电子计算机拼合。拼合表明大

移，并平行于洋脊顶峰延伸。”（图 1 - 4）1965 年，海兹勒（J. R. Heirtzler）发表了大洋雷克雅内斯洋脊（冰岛南面）的磁测结果，那里的磁条带沿洋脊走向延伸，对称分布于洋脊轴的两侧，这就有力支持了瓦因 - 马修斯假说。据赫斯提出的海底从大洋中脊向侧扩张的模式，预示离洋脊越远，沉积从无到有，厚度渐大，时代变老。格洛马挑战者（Glomar challenger）考察船从南大西洋取得大量深海钻探资料，能在深于 6000m 的深海打深于 600m 的深钻，取样长度可达 10m。A. E. 麦克斯韦尔等于 1970 年发表了这个成果。根据大量钙质微体化石测定出最底部沉积物的年龄与对称的玄武岩古地磁年龄数字颇相符合，从而充分证实了海底扩张说的正确性。自然也要指出海底扩张说的诞生也并非一帆风顺，在大洋调查中也发现了一些单纯用海底扩张所无法解释的地质事实，这些地质事实后来成为反板块论者（如前苏联的别洛乌索夫，中国的谢继哲）的论据。但是除了由水平运动所产生的一些地质现象，也还存在由垂直运动所产生的地质现象，两者常常并存，因此不能用这些现象来反对水平运动和海底扩张的存在。

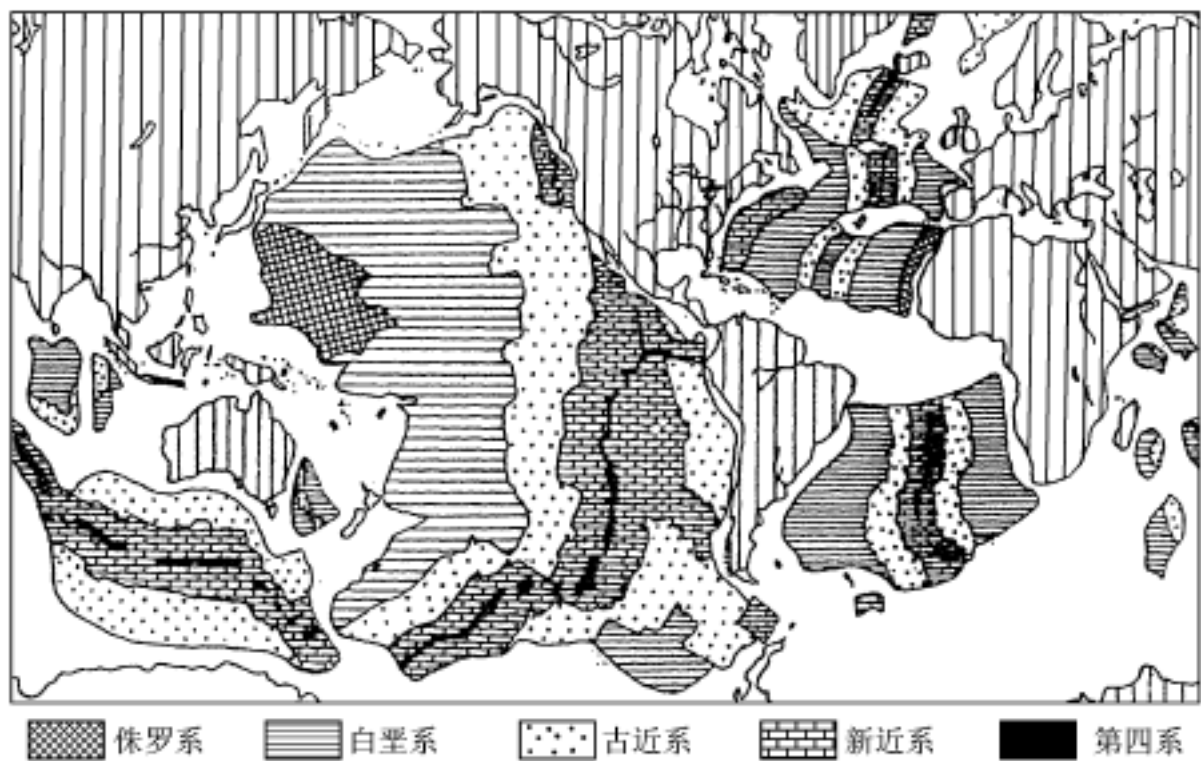


图 1 - 4 海底扩张与海底磁异常年龄
(据 W. C. Pitman 等, 1994)

Fig 1 - 4 spreading of sea-floor and the age of magnetic anomals of sea-floor
(after W. C. Pitman et al. , 1994)

20 世纪 50 年代地震折射资料表明大洋壳厚度无例外只有几公里，与平均 35km 厚的大陆壳截然不同，1954 年 Benioff 根据环太平洋地震带震源深度从太平洋向大陆方向有规律地增大，提出在海沟下面有一个向大陆倾斜的地震带，即贝尼奥夫带。大陆块上古地磁数据的整理把每一时期古地磁极的平均位置标记在图上。1954 年和 1956 年 Runcorn 分别发表了来自欧洲和北美洲样品测出的两条古地磁极视移曲线，结果发现它们形状相似但并不重叠，只有使大陆块间相互移动才能使两条曲线重合。

以上海洋地质学、地球物理学和古地磁学几个方面的新成就和新发现，不仅使大陆漂移说在新的形势下复活，而且新产生了岩石圈被分裂成板块构造的概念（图 1 - 5）。

1968 年由 H. H. Hess, R. Dietz, F. J. Vine, D. Mathews, J. L. Wilson 和 R. Burk 的新活动论思想，补充并发展了“大陆漂移说”和“海底扩张说”，这就为更加完善的新的大地

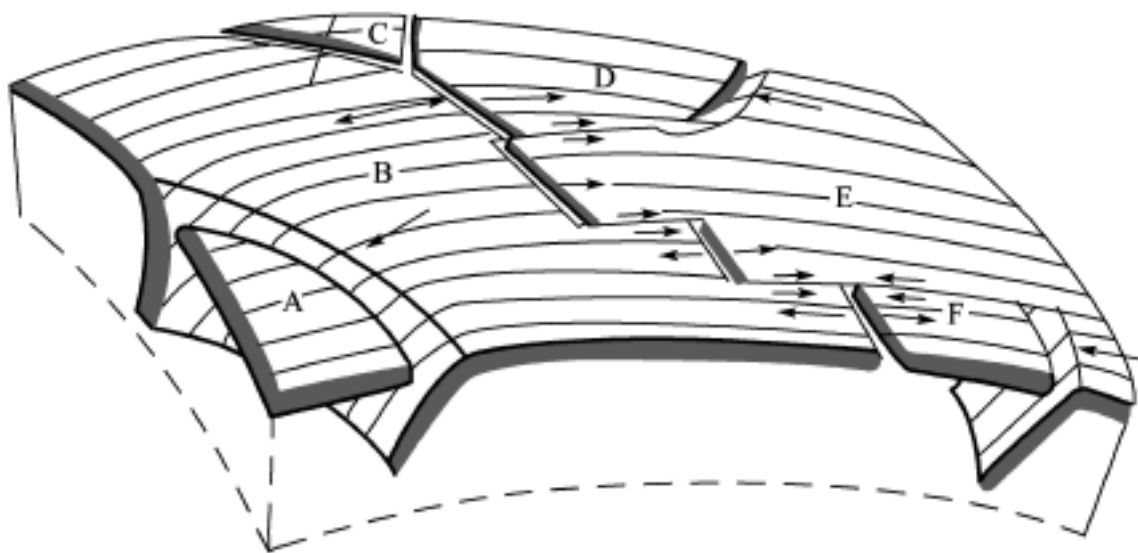


图 1 - 5 板块边界的三种类型和三联点

(据 Isacks 等, 1968)

Fig. 1 - 5 Diagram showing Three types of the boundary of plates and the point of three connection

(after Isacks et al., 1968)

箭头指示板块运动方向和速度; A-B 为海沟; B-C、D、B-F 为洋脊; D-E 为右行转换断层向右转换为海沟; E-F 为左行转换断层; B-C-D 交汇处为三联点

构造学说, 即为板块构造说的诞生奠定了基础。同年, Morgan 和 Le Pichon 两人各自独立地提出板块构造说, 这说明板块构造说的提出是世界大地构造学发展的必然结果。

板块构造说 (plate tectonics) 把全球岩石圈划分为六大板块, 即欧亚板块、非洲板块、印度 - 澳大利亚板块、美洲板块、太平洋板块和南极洲板块 (图 1 - 6)。板块构造说把地幔对流机制作为板块运动的动力机制, 认为在大洋中脊的地方是板块的扩张边界, 地幔流从这里上升, 然后拖曳大洋板块——新生洋壳向海沟方向下降俯冲 (图 1 - 7)。俯冲带和碰撞带是板块的挤压边界, 而在大洋中脊和大陆边缘则发育转换边界 (图 1 - 5)。威尔逊 (J. L. Wilson) 认为由大陆裂谷开始, 经过小洋盆逐步发展成大洋, 然后又因大洋板块向海沟处俯冲而使大洋面积逐步缩小, 最终大洋关闭而陆陆对接碰撞, 进而形成板缘从洋陆俯冲形成的岛弧造山带到陆陆碰撞的碰撞造山带, 构成一个完整的海陆演化旋回, 后人将其称为威尔逊旋回。板块构造的经典理论认为板块是岩石圈的刚性板体, 这种块体只在其边缘地带当板块与板块俯冲对接碰撞时才发生强烈变形, 因此褶皱带和造山带都围绕板块边缘分布。地球上的造山带按经典板块构造理论可划分为安第斯型造山带和阿尔卑斯型造山带。

从上述板块构造说的形成过程, 我们可以看到与地质力学不同: 板块构造学说最初来自海洋。支持板块构造学说主要有三大支柱, 即海洋地质学、古地磁学和深部地球物理学。板块构造学说不是由某一个学术带头人根据他的学术思想的实践发展而成的学说, 它是由一群地球科学家集成的科学理论, 其主要内容由三部分组成, 即大陆漂移、海底扩张和地幔对流结合而成的一个相互联系的理论体系。

板块构造理论的基本内容可归结为以下几点: ①岩石圈被划分为若干板块构造, 每一板块构造都有三种不同力学性质的边界, 即扩张边界、聚敛边界和剪切转换边界; ②岩石圈板块以刚性和弹性与下伏软流圈相区别并在其上运动; ③岩石圈板块在大洋中脊处拉开, 而在海沟处俯冲, 在转换断层处剪切走滑; ④地幔对流被确定为板块开合的动力学机

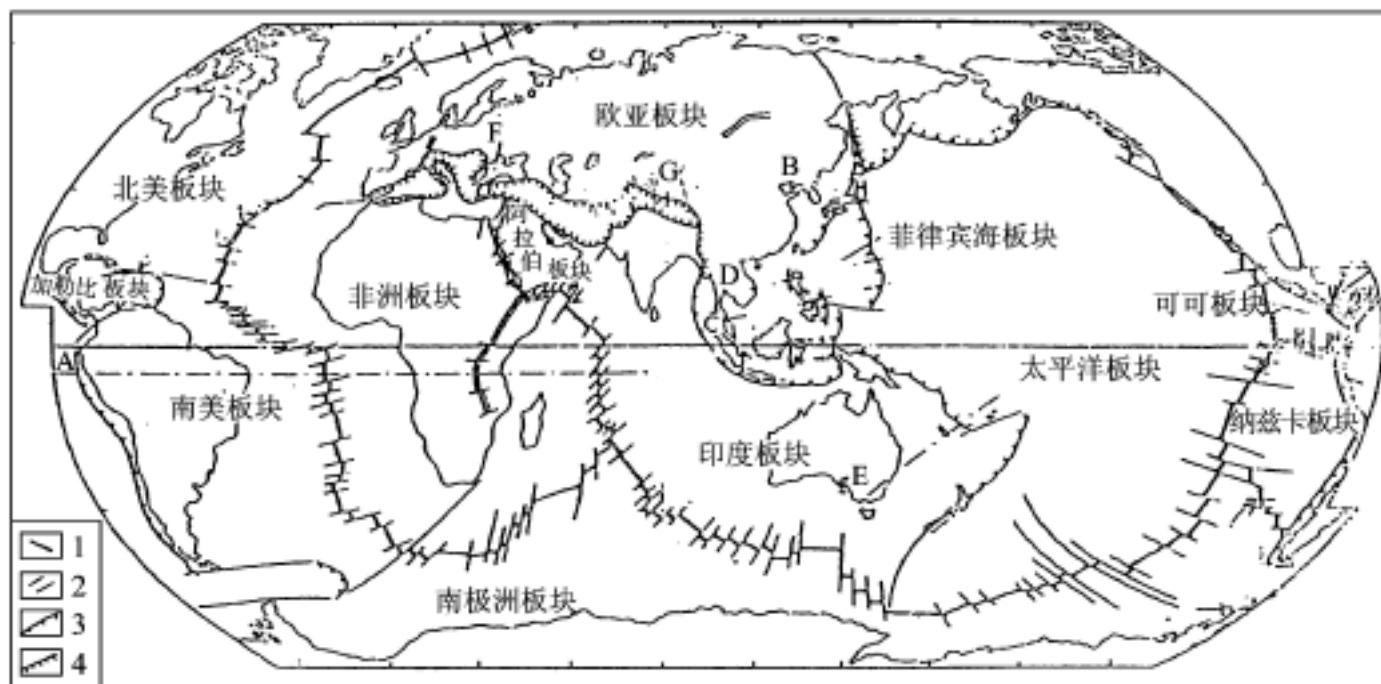


图 1 - 6 全球主要板块的分布

(转引自金性春, 1984)

Fig. 1 - 6 The global distribution of major plates

(According to Jin Xingchun, 1984)

1—洋中脊; 2—转换断层; 3—俯冲带; 4—碰撞带

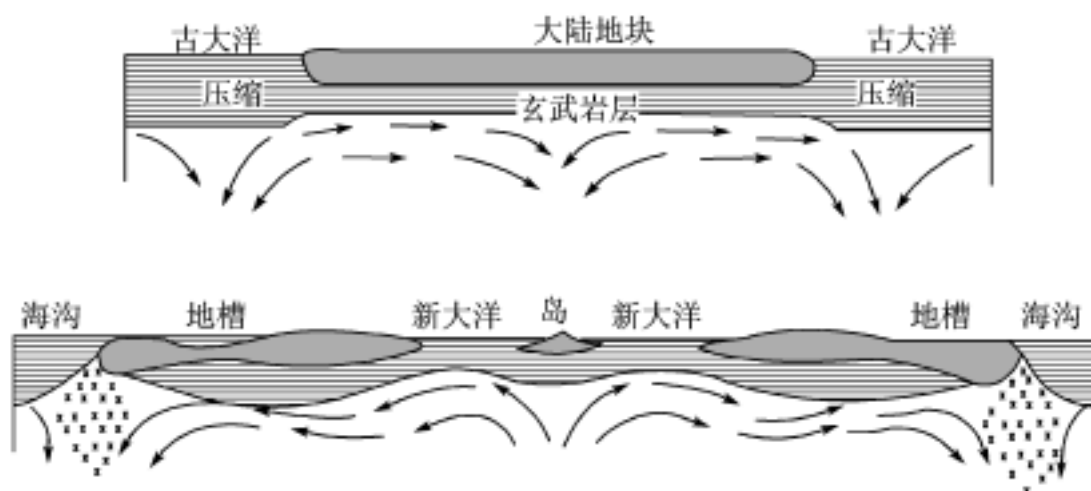


图 1 - 7 早期的地幔对流假说

(据 A. Holmes, 1931)

Fig. 1 - 7 Hypothesis of mantle convection of early stage

(According to A. Holmes, 1931)

制，即在洋中脊由上升地幔流拉开并新生洋壳，在海沟处下降地幔流拖曳大洋板块俯冲消亡；⑤板块沿地球表面的运动按欧拉几何定理，由此假定地球体积保持恒定，全球范围内板块间的运动应该是互补的；⑥板块构造间的相互作用和运动不仅使地球表面的地貌、构造和自然地理格局不断发生变化，而且使地壳和岩石圈的物质成分不断得到更新，一方面在大洋中脊处新的洋壳不断在产生，另一方面老的洋壳在海沟处不断俯冲消亡并使洋壳物质不断消减转化为岛弧物质和不成熟的陆壳，再转化为成熟岛弧和陆壳。

板块构造说的提出使地质学的面目为之一新。它的全球性和统一性使人们意识到这也许就是整个岩石圈构造形成和运动的统一模式。许多地球科学家认为板块构造的理论模式不仅适用于海洋，也适用于大陆；不仅适用于中生代而且也适用于古生代、前古生代乃

至整个地球历史。板块构造说的确立为地质科学找到了统一的理论模式，用这种理论模式不仅可以使传统的大地构造学，而且可以使传统的岩石学、地史学、地貌学和构造地质学的理论观点得到统一。例如一些板块学者认为传统大地构造学中的地盾区、地台区是刚性板块区，造山带则是板缘区的洋陆俯冲带或碰撞带。不仅沉积建造，而且岩浆建造、变质岩带也受板块构造单元的控制。各大地构造单元（裂谷、岛弧、造山带、大洋盆地、海底高原等）无一不受板块构造的控制。有些板块构造学者（如 K. C. Condie）甚至认为不仅中生代构造的历史是板块构造的历史，而且古生代、前古生代的构造历史也是板块运动和演化发展的历史^[8]。岩石圈板块构造可追溯至前寒武纪，地壳演化的历史就是板块演化的历史。认为地球上的成矿带都是受板块构造控制的，不同的板块构造单元及其边界由于发育有不同的建造，因而有不同的矿产资源。例如沿南美板块西缘长达数千公里的斑岩铜矿带就是受控于板块前缘由于板块俯冲作用机制而成矿的。这样，板块构造理论就用统一的理论模式去统一和概括地质学各个学科迄今为止所取得的理论成就，使地质学和地质学的各个学科在理论观念上发生了深刻的变化和变革，因而板块构造理论模式的出现被称为是一次地学革命。

但是板块构造理论在它形成以后的进一步发展过程中也不是一帆风顺的。众所周知，板块构造理论的形成始于海洋地质学的研究，但浩瀚的现今世界大洋最老的岩石的年龄不超过侏罗纪，侏罗纪以前的古海洋已经成为化石地壳在岩石圈中消减，只在造山带中留下有限的残片，而占现今地球面积只有 1/3 的大陆地质却保留了几十亿年的地质记录。大陆构造的极端复杂性给板块构造理论运用于大陆带来了极大的困难和严重的挑战。用从海洋总结出来的简单的板块构造理论模式如何解释大陆地质是一个至今仍在不断探索，并是极具理论性与挑战性的课题。在地质历史中板块构造理论模式能适用于什么时代，至今仍是地质学家们争论的问题。但是从 20 世纪 70 年代，板块构造说问世以来至今的 30 多年间，板块构造说在进军大陆地质和研究、复原古板块构造方面仍然取得巨大的进展。归纳起来，主要有以下几点。

（1）大陆板内地质学的研究极大地丰富了板块构造学，修改了经典板块构造学所认为的板块的强烈活动和强烈变形只发生于板缘地区、板内是铁板一块的不变形地块的模式概念。从而形成和发展了板内构造学，提出了板内或陆内造山带的理论模式，在我国有众多的构造学者（如张国伟、任纪舜、崔盛芹、葛肖虹、张长厚、丘元禧等）著文论述。

（2）大陆地质学、区域地质学与板块构造学的结合使板块构造学在研究古板块方面取得了长足的进步。尽管古板块存在的时限问题至今仍未解决，但却形成了一整套关于复原古板块的方法，特别是鉴别和复原板块边界的方法。在这方面应该提到我国几位著名的大地构造学者，如李春昱对亚洲板块构造单元的划分；郭令智对古板块边界性质的确定方法，特别是鉴定古岛弧的方法；王鸿祯对古大陆边缘的研究等。这些对阐明大陆地质和板块形成、演化历史无疑是十分重要的。

（3）板块构造学与岩石学、古地理学、古生态学、古生物学等学科的结合而形成了板块岩石学、构造古地理学、古生物地理学等富有板块构造理论色彩的地质学分支学科。它不仅使各地质学分支学科在理论观点上发生了根本性的变革，而且使板块构造学获得各学科源源不断的新资料和新成果，从而进一步丰富了板块构造学。板块构造学在理论与实

践上得到众多学科的广泛支持与坚实的科学基础是任何其他大地构造学说所不可比拟的。因而使板构造说成为当今最盛行的、在地质学中起主导作用的大地构造学说，它的发展与当今地质学的发展息息相关。

(4) 地体 (Terrane) 构造概念及其研究方法的提出: 20 世纪 70 年代末至 80 年代初, 由北美 Coney、Jones、Monger J. W. Howell 等一批构造学者基于对北美西海岸科迪勒拉山脉一群外来移置地体的研究, 提出了地体的概念及其系统的研究方法。这一学说丰富了板块构造的理论, 是板块构造理论的进一步发展。

(5) 板片构造学说 (Flake Tectonics) 的提出进入了“陆壳析离滑移”的新板块构造理论阶段^[9]。

(6) 对板块构造的几何学、运动学和动力学的研究不断深化: 在板块构造学形成和创立之初, 只是根据海底磁条带的研究作出判断和计算。应该说对大洋板块的运动学的研究是比较粗线条的。但是随着各种研究方法的开拓和资料的积累, 形成和发展了岛弧造山带和碰撞造山带的板块构造学, 对板块的几何学、运动学和动力学的研究已经越来越深入了。例如, 用 GPS 和 INSAR 卫星激光测距可以监测现今板块的运动, 通过板块边缘的构造形迹, 特别是构造线理反演板块的运动, 通过岩石地球化学记录反演板块俯冲和碰撞过程, 通过变质岩 pTt 轨迹的研究复原古板块的运动, 等等。最近一二十年, 我国青藏高原和大别山成为世界构造研究的热点。在这两个地区, 我国学者和外国学者用多学科综合研究的方法研究板块的运动和演化历史, 取得了举世瞩目的高水平的研究成果。

(7) 对板块次一级构造单元 (板条) 和板块分段性的研究: 大洋中脊被众多的转换断层切成许多板条, 这些板条以不同的速度俯冲于聚敛边界的俯冲带, 其前缘形成许多板舌, 板条和板舌是大洋俯冲板块的次级构造单元。对这些次级构造单元的研究深化了大洋板块构造的几何学和运动学的研究^[4], 对相应大陆板内构造的研究也取得相应的进展。

(8) 当前板块构造说正在向地幔柱的研究方向发展。地幔柱的研究不仅成为板块运动寻求深部动力学机制, 使地幔动力学和地幔热力学、地幔岩浆岩石学结合起来 (热地幔柱学), 而且使板块构造突破岩石圈的局限而走向壳、幔、核相结合的研究, 从而使板块构造说成为真正的全球构造说。在实现这一飞跃的过程中, 地震层析图像的深部地质研究方法起着极其重要的作用, 它揭示出板块的动力作用起源于核幔边界的运动。由于地震层析图像解析的发展, 俯冲板块在地球内部的情况及其动力学机制得到进一步的追踪和阐明, 从而形成和发展了冷地幔柱构造学。

有关上述方面的研究, 本书后续章节相关部分还要进一步阐述。尽管当代板块构造学取得了如上所述的一些成就, 但是仍然存在许多理论和实践问题需要解决。特别是板块运动的动力学机制和形成演化问题。诸如, 地球上为什么有板块? 何时形成板块? 它是怎样形成和发展的? 它为什么有这样的展布? 它的动力学机制是什么? 但应该指出的是, 伴随地幔动力学的发展, 板块构造学对动力学机制的研究已经比它建立之初深化了许多, 已经走上现代地球动力学的研究道路。

第三章 地质力学和板块构造学理论与研究方法之比较

通过比较研究，我们可以体会到两者有许多共同点，如都强调水平运动、都坚持力学性质的研究、都重视建造与改造的研究、目前都只能说明中生代以来的地质构造问题等（朱夏，1990）^[2]。但是，我们也看到了它们之间有许多不同，特别是在研究思路 and 理论体系方面存在许多不同，其中重要的有如下几点：

（1）地质力学从大陆构造开始研究，所以有人又称其为大陆动力学。它强调地壳的表层滑动；而板块构造则是从海洋构造开始研究，强调岩石圈深部带动表层构造的运动。

（2）地质力学重视构造形变研究，认为只有构造形变是不存在多解性的地壳运动的历史记录。它研究地壳运动的思路是从构造形迹的共生组合确定构造型式和构造体系，从构造型式和构造体系反演地壳运动的程式，再从地壳运动的程式探求地壳运动的力源。这是一条严谨的认识路线。这条认识路线是李四光及其科研集体经过艰辛探索才形成的，它有别于传统大地构造学只研究大块体的运动，而有很大的优越性。从某种意义上讲，它代表着构造地质学未来的发展方向，因为只要是研究地质构造就必须研究其力学的本质，追究其力的来源。但也有它的局限性，即主要只强调大陆构造和表层构造的研究，对于海洋构造和深部构造的研究比较薄弱；而地壳和岩石圈的运动既有来自天体方面的原因，也有来自地球自身的原因，单纯强调地球自转速率的变化，就显得不够全面。板块构造理论重视块体的运动，通过古地磁纬度记录、古生物地理的变化来反演块体的水平运动，通过各种岩石学标志和构造遗迹来确定古板块的边界和古板块的地质运动。板块构造学说所运用的这些方法虽然有些本身还存在理论论证问题（如古地磁学）或存在多解性（如某些建造分析方法），但以其方法的多样性和综合性能够最大限度地引用当代地学各分科的最新科学技术方法和手段，使其能够解决许多在这以前无法解决的地质构造问题，特别是使其能够进入地学和构造地质学许多前缘课题的研究，如岩石圈深部的研究，借助岩石圈探针和地球物理学、同位素地质学等许多最新研究手段向岩石圈深部软流圈乃至地核进军。如前述及的地幔柱等方面的研究已经成为板块构造研究的前缘课题，它显示板块构造学开始突破岩石圈的范围，而与地球的核、幔、壳演化研究结合起来。

（3）地质力学与板块构造学的理论体系存在很大的不同：地质力学创始人非常明确学科要解决的理论问题是地壳运动问题，为了解决地壳运动问题，科学地探索出解决这一理论问题的方法学和认识路线，由此形成了自己的理论体系。如果我们回顾地质力学大陆车阀说的形成过程，我们就不难看出它是从总结区域和全球构造型式和构造体系的空间展布规律发现全球构造格局的纬向、经向和扭动构造型式的展布所反演的全球水平构造力的作用，再进而追索这些构造力的来源与地球自转速率变化的关系。这样就形成了一个从地球的整体运动—地球的自转—控制和发动地球的表层—地壳的运动，再由地壳的运动形成各种构造体系和构造型式的严谨的科学和理论认识体系。事实上，总结全球构造格局的基

本特征，不仅全球规模的经向和纬向构造与地球自转轴有严格的几何关系，而且极区的同心圈状、放射性断裂系，大陆内部的共轭剪切断裂系，EW 向的大洋中脊转换断层与地球纬度带（愈近赤道，走滑断距愈大）也都表现出与地球自转轴有严格的几何关系、与地球的自转有成因联系。

但是，由这样一个理论认识体系所提出的地球动力机制如同当年的大陆漂移说一样碰到了极大的困难，即计算表明，李四光所认为的地球自转速率变化所产生的经向惯性离心力和纬向惯性力就其强度和数量级而言，都不足以发动一场大规模的构造运动和全球规模的构造形变。王仁等^[10-12]曾按分层均质流变体模型（缓变模型）计算分析了地球自转速率变化所致的全球构造应力场。结果表明，地球自转速率变化所导致的构造应力的量级（ $10^{-2} \sim \text{nPa}$ ）与现今不同方法实测所得的古、今构造应力量级（MPa）相比，都显得太小，几乎可以忽略不计（快速模型所获得的量级更小）。很难想像，如此小的构造应力能驱动地壳与岩石圈块体的水平运动。因此，王仁等^[10-12]、李东旭（1986）、高庆华（1996）都曾先后认为实际地球体在长时间尺度内表现出流变特性，用缓变模型描述更为合理，且在缓变模型中，应考虑应力随时间的长期积累效应。若地球在 10Ma 内长期保持加速或减速，则自转速率变化所致的应力积累至 MPa 量级这样的构造应力就足以产生显著的构造效应^[10-12]。但对于构造应力能否随时间加大而积累的问题，尚缺乏实验依据，许多地质、地球物理与力学专家对此尚持否定态度^[13]。

李四光提出的地球自转速率变化所引起的地球动力学机制遇到了重大的挑战，这种挑战推动了对地球自转动力作用的研究，地球科学界在否定过高估计地球惯性力（经向离心惯性力和纬向惯性力）的同时，对其他作用力进行了科学评估。

已经提出的驱动岩石圈地壳运动的动力有地幔对流、重力和热动力、洋脊推力、板块负浮力、碰撞挤压力、地球自转所致惯性离心力、周期性引潮力、西向引潮力、科里奥里力等。

科里奥里力的数量级非常小，对地壳构造运动几乎不起作用，可以忽略不计。理论计算分析表明，地幔对流能产生 MPa 量级的构造应力，但地幔对流模式存在很多问题，难于说明地球内部特别是大陆内部的动力学过程，而且受到地幔分层性、大陆巨厚山根等新研究成果的反对和制约。板块俯冲或陆陆碰撞所产生的构造应力属于次一级的构造应力场，而非驱动板块运动的构造应力。热动力和重力是重要的构造力量，但在驱动板块运动时主要表现在洋脊推力和地幔对流之中。看来能够对板块的拉张与挤压起到驱动作用的主要是西向引潮力和周期性的引潮力，两者所致的构造应力都能达到 $10^4 \sim 10^5 \text{ Pa}$ 的量级，而且这两种应力都属于交变应力。周期性引潮力应力大小与方向都随时间变化作周期性变化，属于对称循环交变应力；西向引潮力仅应力大小随时间作周期性变化，而应力方向始终向西，属于脉动交变应力。如前所述，交变应力能降低岩石强度和疲劳极限，而且这两种交变应力的循环次数均达 10^{10} 次的量级，因此这两种构造动力的实际动力学效应相当于 $10^5 \sim 10^6 \text{ Pa}$ 以上的静态构造动力，有显著的构造动力学意义。但周期性引潮力所致的应力，由于其方向也随时间作周期性变化，所以对构造过程仅有触发作用，而无驱动作用；而西向引潮力仅应力大小作周期性变化，应力方向是基本恒定的以西向为主，所以对驱动岩石圈水平运动有重要意义，是导致岩石圈总体西向运动的主要动力，属全球构造运动的基本驱动力之一^[13]。

由此可见，驱动构造运动的基本动力仍然与地球自转有关，只不过不是李四光原来意义上的离心惯性力而是西向引潮力，它可以很好地解释经向大洋中脊的展布及洋脊推力的产生。

王仁等^[11]指出，日、月引潮力，钱德勒摆动和地球自转速率的短期变化所引起的地应力，在一个范围内正负交替作用周期性变化不能积累。因此尽管引潮力所引起的应力较大（ 10^{-1} N/cm 的量级），最多只能起到触发构造运动的作用。要推动构造运动必须依靠非周期性的力，造成应力的积累。有人认为地球自转轴可能有过大范围的移动，地轴只要有 20° 左右的移动，就足以积累所引起构造运动的应力了。王仁曾采用缓变地球模型（厚度为 80 ~ 400km 的线性黏弹性壳体，内部为不可压缩流体）进行计算，约在 10^6 年左右可将地壳看成完全弹性的，进行应力叠加，将应力积累到 10MPa 的数量级，它足以引起拉张破裂和垂直于压应力的褶皱。按王仁的分析，若地球自转速度在 10^6 年内保持同一加速率变化，将在中低纬度产生足够的东西向拉应力造成洋中脊和全球性剪切破裂网络，同一时期的减速率将可造成极圈的同心弧和放射状断裂。问题在于会不会有这样的加速率时期^[14]。交变应力对构造形变的意义是一些构造学者所关注的。众所周知，滴水可以穿石，岩石在长时间的交变应力作用下会减低强度而易于变形。一方面是客观上存在着全球性的纬向构造，另一方面形成这种构造的力量又不够大。这个矛盾看来也只有借助于长期的岩石流变了。张文佑等^[14]从天文地质和地球表面形态、构造形迹等方面进一步系统论证地质力学的理论观点。他指出，月球、水星、火星等表面反射光像图所显示的线状构造和环形山、火山的排列，也大多为经向和纬向两种方位，一个旋转着的天体，其表面构造与其旋转轴之间必定有很大的联系。离极力的量级虽小，但在漫长的地质历史期内，我们不应该用常温常压常速条件下岩石力学的概念来理解地质历史中的岩石在特殊温压条件下的长期蠕变。另一方面，地球各圈层的物理、化学性质有差异，可使应力在不均一处集中，离极力的量级可以增大，这一点不容忽视。现在已经确定，有许多纬向构造带具有平移性质，而且有愈近赤道，平移距离愈大的趋势。南极大陆有逆时针旋转的现象，而北冰洋周围的大陆，又略似有顺时针旋转的现象。李四光早年曾提出由于地球自转速率变化所引起的岩石圈与水圈之间的相对扁率的变化，张文佑认为这种相对扁率的变化不仅可发生在岩石圈与水圈之间，而且还可能发生在岩石圈与软流圈之间，地幔与地核之间，以及一切具有不同密度和粘滞系数的地球各圈层界面之间。这种相对扁率的变化对岩石圈构造变形会发生什么样的影响是很值得研究的。李四光认为，在角动量基本守恒的前提下，地球内部物质向地心运动，这将使地球转动角动量矩变小，从而使自转角速度加快；反之，若地球内部物质向外运动，地球转动量矩则变大，从而导致自转角速度变慢。在这种质量再分配过程中（同时加上外部天体的影响），地球自转轴也可能发生一定程度的偏转。地球自转速度与自转轴的摆动又将导致离极力、科里

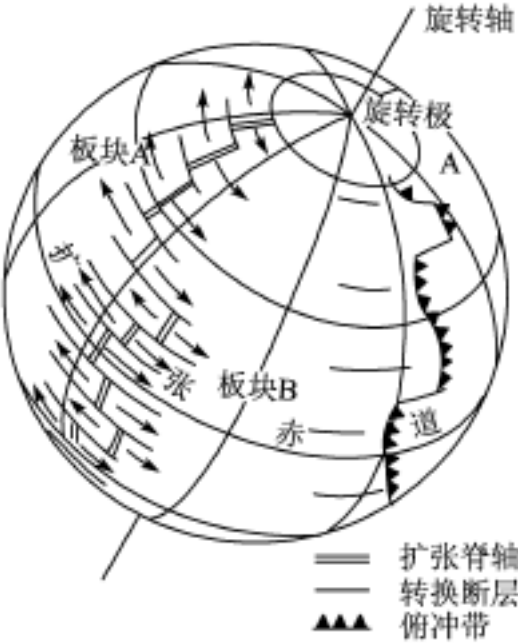


图 1 - 8 板块沿球面的旋转运动

(据 F. Press et al., 1978)

Fig. 1 - 8 The rotational movement along the globe surface

(after F. Press et al., 1978)

奥里力、旋转速度不均一效应的变化与极移应力的产生，以及地球内部各圈层间相对扁率的变化和滑动。地球表面南极为大陆，北极为海洋，其形态如鸭梨状，而重力均衡则呈倒置鸭梨型；洋脊扩张带和海沟消灭带大致均呈经向和纬向；极扩张轴与旋转轴相交，又大致与地球赤道面和黄道面夹角相等（图 1 - 8）。约为地轴摇摆角的倍数，这些现象都似乎与地球自转有关^[14]。

西向引潮力的存在只能解释经向构造的形成，而离极力和经向切向力量级又太小，不足以形成纬向构造，看来形成纬向构造的构造动力只有另找答案。马宗晋等^[15]提出全球表层构造架具有 N/S 半球与 0°/180° 半球双重胀缩耦非对称性，本书作者认为从中可能找到形成纬向构造的动力：正是由于南半球地球的膨胀大于北半球，形成环南极洲的大洋中脊，南半球成为水半球；北半球收缩相对大于南半球，从而大陆块聚集于北半球，成为陆半球，并在北半球形成挤压性的纬向构造。李四光在他的大陆车阀说中也谈到在角动量等恒定律的支配下，当地球自转速率加快时，地球会相对收缩；当自转速率减弱时，地球会相对膨胀，因此地球的胀缩除了地球内部能量的集散和重力、热力的原因以外，地球自转速率的变化也是一个可能的诱发因素。

近年来积累起来的一些对地质构造现象规律性的认识也进一步揭示地球自转动力作用的意义，例如 Meyerhoff 等^[16]通过对全球许多构造带的调查，总结出 54 种朝东定向的构造现象，其中如火山弧和弧后盆地集中在西太平洋，弧顶指向东方，许多褶皱带中 SN 向火山深成岩带随时间向 E 迁移，SN 向褶皱带和盆地中心随时间向 E 迁移等。还有，按李四光的说法，大规模的地壳运动发生在地球自转的加速期和减慢期，但地球自转速度变化的总趋势是长期减慢，因而学者们提出是否存在能够积累应变的长期加速段值得怀疑。不过，地质历史上的地质陈迹揭示出地球确实存在相对的不均匀膨胀和收缩，这是否可以间接论证地球自转速率有过周期性的加速与减慢？当代固体地球科学的一个重要发现是地球内部内核、外核、地幔的自转速度是不等的。并由此产生了一系列重要的地球动力现象，诸如地磁场及其极性倒转，地幔柱、热点的移动，地球内部一系列径向构造和圈层构造等。结合地球内部物质结构等新资料，充分考虑岩石圈的自转、核幔自转和岩石圈不同块体间自转的差异性，看来是推动地球自转动力说的一条途径^[17]。Raralli 等^[18]论证了地幔与液态外核之间的角速度差可以解释所观测到的地磁场中心长期缓慢向西漂移。

综上所述可知，随着科学的进步和对地球自转动力作用的深入研究，尽管李四光原来的一些观点和结论受到质疑和修正，但就其理论体系的核心——地球自转及其变化的动力作用学说来说不仅没有削弱，反而得到加强。全球构造型式和构造体系的展布与地球旋转轴有严格的几何关系则是不容置疑的客观事实，其成生与地球的自转有关，暂时不能阐明并不等于这种客观的生因不存在，这就是地质力学理论体系的优越之处。它的优越性不只是表现在它的整体论和系统论的科学观方面，而且还在于它是建立在对（或深刻揭示出）自然界对立统一的法则认识之上。

地质力学除了在动力学机制问题上受到挑战外，在解释地质构造的演化历史方面也受到严重的挑战。李四光一再申明，他所建立的构造体系是中生代以来的，也就是说他的全球构造格局也主要是中生代以来，他的全球构造格架与地球自转轴有严格的几何关系，一旦地球自转轴发生变动，全球构造格局也就会发生变动，地质力学对地质历史上发生的超级大陆的形成与裂散、大洋的形成与消减和陆块的漂移至少在目前还无能为力加以合理的

解释。

至于谈到板块构造的理论体系，如前所述，板块构造说是在海底扩张和大陆漂移等地质事实的基础上总结出来的。板块构造的开合机制，是根据岩石圈板块的开合推导出地幔流是其动力学机制。近年来对热点的研究和地幔柱构造学的发展，似乎为岩石圈板块的开合找到了深层的动力学机制。如前文曾经提到的，岩石圈地壳运动的原因既有来自宇宙天体运动方面的原因，也有来自地球内部的原因，板块说侧重从地球内部寻找岩石圈地壳运动的原因，应该说这也是一个重要的方面，这方面正是地质力学考虑不够之处。诚然，20世纪70年代，人造卫星的空间重力测量已经证实在地幔深处确实存在地幔流。但是由于地球内部的多层结构，这种对流体的规模究竟能有多大？特别值得提出质疑的是那些长达上万公里的洋中脊如果是由深处地幔流推开的，那么又是什么力量能造成地幔内部有如此长的定向性非常强的地幔流圈？卫星激光测量已经可以测出现今板块的运动速率，它远远大过地幔流的运动速率。极其缓慢的地幔流如何能使驮托其上的板块以较快的速度运移？以上只是涉及板块开合的地幔流机制还不能得到科学的阐明，更不要谈到板块在形态上和空间展布上有哪些规律，以及支配这些空间分布规律的动力学机制。

上述这些板块构造论者解释不了的问题会不会隐藏着因果倒置的问题？如果反过来，用表层构造运动来解释板块的运动问题可能迎刃而解。张文佑就用表层一对共轭剪切断裂受到EW向的拉张应力而形成近南北向的洋中脊^[14]。拉张减压从而造成深处处于潜在状态的地幔物质转化的液态而上涌，由于表层构造的定向性从而诱发深部地幔流的定向性。较快运动的表层板块拖曳导致深部地幔发生缓慢的蠕变流动。这样看来，板块构造的空间展布及其运动规律恐怕还要借助于地质力学的理论和方法才能解释清楚。近来，地幔动力学的研究趋向于认为对流拖曳在板块运动中不是重要的驱动力。一些新的观测资料又重新引起对地球自转动力作用的重视，地球自转的动力作用还可能是岩石圈板块运动变化的原因^[4]。Doglioni (1990) 从地球自转的角度对板块运动提出了这样一种解释：岩石圈与下伏地幔间去耦程度的差异，可能是板块运动变化的原因。他根据世界不同地区板块运动方向的数据绘制了软流圈向东流动和板块朝西运动的流线图来说明岩石圈与软流圈相对运动的结果。流线的全球性大起伏可能是由于地球自转轴不稳定的摆动引起的（转引自马宗晋，2003）^[4]。但是，板块的扩张和俯冲机制也不是凭空想像出来的，它是根据地壳岩石圈的构造形变、地震和建造记录反演的，特别是它能很好地说明幔壳是如何演化的，洋壳是如何形成的，如何通过俯冲机制和碰撞机制实现陆壳与洋壳各自物质的各自循环与更新；洋壳物质如何转化为陆壳物质；洋陆壳物质之间如何转化；大陆如何裂解和增生，等等。在地质历史方面，即便是在前中生代，对海陆变迁、超级大陆的聚合和分裂、沉积盆地的开合和造山带的形成用板块构造的理论模式仍然能够得到很好的解释。一句话，在阐明岩石圈物质的演化和大陆、海洋构造的演化历史方面，至少在目前板块构造学是远胜于地质力学的。

综上所述，通过以上地质力学与板块构造学理论体系、研究方法的系统比较，我们不仅了解到它们之间的异同，更重要的是了解到它们之间有较强的互补性。为了更全面地认识地质构造，对于我们，它们不应该成为互相排斥的学说，而应该互相融合，这方面将在本书的后述章节中做进一步的阐述。

(4) 为生产实践、国民经济、环境保护服务方面：地质力学强调构造体系和构造型

式的研究，而这些地质构造实体对矿产资源的展布、工程地基的稳定性、地质灾害的预报与防治等都具有控制和启示意义。因而尽管地质力学在理论上还有动力机制问题尚未解决，但产业部门如地质勘探和工程地质、水文地质等部门仍照用不误，这也说明地质力学在指导生产实践和服务于生产实践和国民经济、人民生活方面有极大的优势；而板块构造学由于它的研究对象是大的地质块体（板块），因而它对生产实践和国民经济的意义往往是战略性和方向性的，不能太具体到每一个微细的地质构造。例如，地震主要发生在活动板块的板缘地带，如俯冲带和碰撞带，这些地带就成为地震的多发区。目前，许多国家也多用板块构造理论来研究地震和预报地震（地质力学则用活动体系来预报地震），而沿板缘地带常是金属成矿带，因而这些地带也就成为找矿勘探优选的地区。总的说来，由于板块构造学研究的是大块体的运动，因而它在地质找矿、工程地质勘测与环境保护方面没有地质力学那样具体实用，但是，由于板块构造对区域构造的控制，因而在地质找矿、环境保护和防灾减灾方面往往具有区域规划方面的战略意义。

总而言之，板块构造学是战略性的，在战术性或可操作性方面较弱；地质力学则既有战略性又有战术性。

但是，尽管地质力学与板块构造学在为实践服务的领域里在研究思路和所能解决的问题方面有这些差异，我们都无妨让它们按照各自的研究思路对各自的研究对象进行研究并由此为生产实践、国民经济和环境保护方面做出贡献，而同时求得互补，我想这对全人类和地球科学都是有益的。

如前所述, 板块构造学说认为岩石圈是由许多板块构造构成的, 而每一块板块都是由三种力学性质不同的边界所围限的, 即伸展边界 (大洋中脊和大陆裂谷)、挤压边界 (洋陆俯冲带或碰撞造山带) 和剪切边界 (转换边界) 所圈定的 (图 1 - 4)。地质力学则认为无论是大陆构造还是大洋构造, 也无论是表层构造还是深部构造, 其形成和发展都不是单一孤立的, 而是具有成生联系的共生组合, 都是受到一定的构造应力场所控制的不同的构造群体, 并被划分和确定为不同的构造体系。

无论是板块构造还是构造体系都是客观存在的构造实体, 与之相应的板块构造和构造体系的科学概念也是能够成立的。它们存在的客观性及反映它们存在的科学概念并不因为研究者是信奉板块构造理论还是信奉地质力学而有所改变。板块构造和构造体系这两个科学术语已在构造学界广泛流传和使用, 为板块构造学者和地质力学工作者所采用。这里要特别说明构造体系这一术语, 尽管地质学界对李四光构造体系的划分还有各种不同意见, 但地质构造是成系统或成体系的基本概念还是为地质学界所采用, 如翟裕生提出岩浆岩体与围岩相互作用所形成的接触构造体系, 郭令智提出沟、弧、盆体系, 马宗晋将全球构造系划分为大洋中脊构造系、环太平洋俯冲系和大陆构造系等。

因此, 尽管板块构造说和地质力学理论体系不同, 对地壳运动的地球动力学机制认识不同, 而且其动力机制假说能否成立至今都尚未解决, 但并不因此影响我们对这两个构造实体作对比性的研究, 毕竟这两个构造实体都是通过大量地质事实总结出来的。正是通过对这两个构造实体作对比性的研究, 我们才发现它们之间存在着一定的相互联系和相互依存的关系, 或许能进一步去挖掘这两个理论体系之间客观存在的内在联系与异同, 进而为我们把这两个理论体系、两种研究思路结合起来, 从而找到一个很好的切入点, 为地球动力学机制的探索开辟新的途径。

第四章 星球级构造体系对板块构造的控制

板块构造论者认为他们研究的岩石圈板块具有全球规模, 全球岩石圈被划分成六大板块 (图 1 - 6), 所以, 板块构造理论被称为全球构造理论。地质力学认为他们所划分的星球级构造体系 (纬向构造体系、经向构造体系和扭动构造体系) 同样具有全球规模, 也称为全球构造。他们都按自己的理论体系和学术观点各自编绘了自己的全球构造图 (图 1 - 1、图 1 - 6)。

显然, 具有全球规模和具有全球构造格局的构造可称得上全球构造, 但全球构造的含义不应仅限于此。从更深层的意义上说, 全球构造应理解为那些受控于全球动力机制的圈

层构造（核、幔、壳）；在地球准周期性发生的相对膨胀和相对收缩过程中形成的辐射状径向构造；因地球旋转而产生的旋扭构造（主要发育于极区）；在地球自转控制下，所产生的经向构造、纬向构造和全球性的 NE 向、NW 向剪切走滑断裂系都应该属于全球构造。当然，那些受全球构造应力场控制的具有洲际规模的板块构造、洋中脊和造山带都应该属于全球构造或属于全球构造格局中的组成成员。

如果我们研究全球板块构造的形状和展布，就会发现各大板块的边界或者近于 EW 向，或者近于 NS 向，最醒目的是各大洋中脊的走向，如大西洋和太平洋中脊都是近 SN 向的；而特提斯洋脊（已关闭）和环南极洲洋中脊的走向都是近 EW 向的，而被围限于其中的板块的空间排列也是近 SN 向的（如南、北美洲板块和非洲板块）或近于 EW 向的（如印度 - 澳大利亚板块、南极洲板块和欧亚板块）。这些板块的边界或为挤压性的（如南北美洲的海岸山脉），或为张性的（如非洲板块的 EW 两侧，南极洲的北侧），而横过洋中脊或斜切大陆边界的则为转换或走滑边界。这种规律性表明各大板块的边界受不同力学性质的构造控制，虽然它们与地质力学所划分的纬向构造体系、经向构造体系和扭动构造体系在走向上大体一致（准确地说，是控制大洋中脊展布的地球扩张轴与地球旋轴之间有一个角度相交）。它反映出受地球自转控制的经纬向构造体系和受地球扩张轴控制的板块伸展边界具有同受地球整体运动控制的一致性，这种一致性使地质力学工作者认为全球性或星球级构造体系是控制板块构造展布的；但反过来，板块构造论者也可认为是板块的运动产生了这些近 EW 向、近 SN 向的挤压或伸展性洋中脊及斜向的剪切走滑边界，因而，板块边界的展布与星球级构造体系的空间展布相一致。因此，从某种意义上讲，还不能最终说明板块构造与构造体系谁控制谁的问题。要解决这一问题，要进一步追问：板块构造也好，构造体系也好，它们的全球展布为什么有这样强的方向性？而其展布的一致性和全球性使我们自然而然地想到它们必然共同受控于某种同一起源的东西，这就是全球构造运动和由它所产生的全球构造应力场。正是全球构造运动和全球构造应力场控制了不同级别、不同规模、不同等级的块体（板块和亚板块、地体和地块）和构造体系的展布和运动。

第一节 星球极 EW 向构造应力场控制 全球性 EW 向构造

一、全球规模的 EW 向构造

现位呈 EW 向展布的 EW 向构造在地质力学和板块构造学问世以前已经为地质学家们、大地构造学家们所描述和注意了。例如 EW 走向的阿尔卑斯山脉和喜马拉雅山脉、特提斯构造带、蒙古洋和古亚洲构造域等（图 2 - 1）。但作为纬向构造体系来研究，则自李四光始。李四光^[1]在中国大陆境内划分出三条纬向构造体系，即阴山纬向构造体系、秦岭纬向构造体系和南岭纬向构造体系，他认为这三条纬向构造带具有全球规模的展布，属于星球级纬向构造体系，现将其具体展布阐述如后。

（1）阴山 - 天山纬向构造体系：位于北纬 $40^{\circ}30'$ ~ $42^{\circ}30'$ 之间，其区域走向在中国境内往西略有偏向西北伸展的趋势，往东走，微微有向 NE 延伸的趋势，主要由古老变质岩系、震旦系、一部分古生代与中生代岩层的紧密褶皱和片断的逆掩断裂构成，有些花岗岩

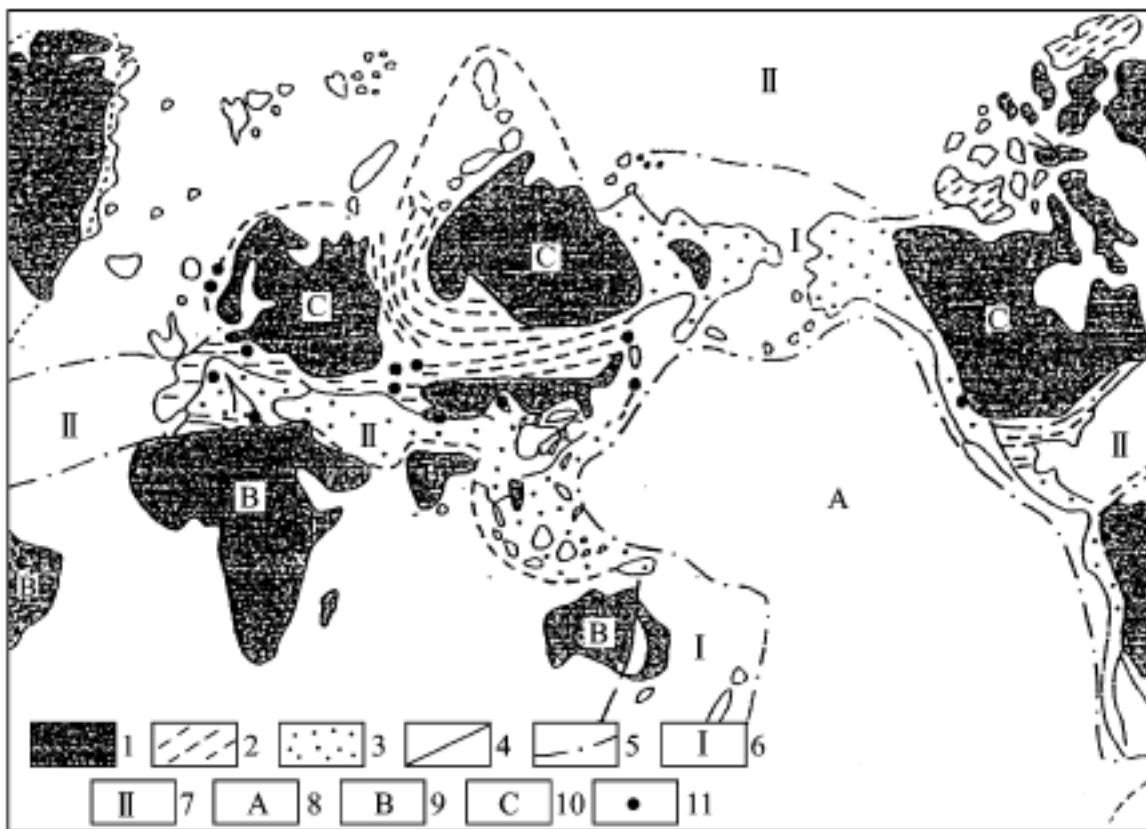


图 2 - 1 受星球级构造体系控制的构造带和地块

(转引自杨巍然, 2000)

Fig. 2 - 1 Map showing the tectonic belts and blocks controlled by the global tectonic systems
 1—前寒武纪地块; 2—古生代褶皱带; 3—中生代褶皱带; 4—构造单元界线; 5—全球构造带界线;
 6—环太平洋构造带; 7—特提斯构造带; 8—太平洋构造区; 9—冈瓦纳古陆区; 10—劳亚古陆区;
 11—含柯石英榴辉岩分布地点

体和超基性岩带掺杂其中, 有压性的劈理和扭压性、张裂性、扭性断裂伴随。李四光认为至少从古生代以来, 肯定反复经过多次强烈的构造运动, 其中最晚的一次大约在侏罗纪的末期或侏罗纪以后。这一巨型纬向构造体系的展布不限于中国境内, 地球上其他地区也断断续续出露, 譬如在中亚细亚北纬 $39^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间, 有几条横亘东西的剧烈构造带 (包括费尔纳干、列宁纳巴德以南的阿拉依什克、土耳其斯坦、札拉依什克及斯大林纳巴德以北的二叠纪、三叠纪岩层所组成的紧密褶皱带) 出现。由此往 W, 这个 EW 向构造带受到了欧亚山字型构造前弧顶部的干扰, 在地面不见它的痕迹, 但到了土耳其北部濒黑海地带, 剧烈的纬向构造带又出现了, 即阿纳托利亚带, 横亘保加利亚中部普藏尼亚纳和巴尔干半岛的巴尔干诸山脉, 包括罗多彼山脉, 看来也属于这个纬向构造带的范畴。在地中海西部北纬 $40^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 之间, 比利牛斯山脉和坎塔布连山脉的褶皱走向虽然不是严格的 EW 向, 但那是由于受到地中海地区大规模扭动的影响。在大西洋底, 也有一些迹象显示横亘 EW 的构造带, 在北美东部古老的 NE 向阿巴拉契亚褶皱带在纽约与波士顿两地之间的纬度, 突然发生转折成走向 EW 的奇异现象, 即使在北美西缘走向 NW 的科迪勒拉山脉中, 也存在 EW 向延伸的深部重力异常带 (- 200 ~ - 240 毫伽), 并出现了一条走向 EW 向的尤因他山脉, 它是由前寒武纪的巨型背斜构成的。

(2) 秦岭昆仑带纬向构造体系: 位于北纬 $32^{\circ} 30' \sim 34^{\circ} 30'$ 之间, 往西其区域走向略偏向 NW, 在秦岭地段可分出两个亚带: 北亚带由古老变质岩系组成, 挤压现象极为强烈, 南亚带主要由古生代海相岩层组成, 挤压现象也相当强烈, 有花岗岩和超基性岩带掺杂其中, 并存在压性的劈理及扭压性、扭性断裂伴随。这个构造体系至少自古生代以来, 肯定反复经过

多次强烈的构造运动，其中最晚的一次，大约在侏罗纪的末期或侏罗纪以后。

这一纬向带向东到日本九州北、本岛关东和四国北部，又明显地显示出来，往西在我国西北走向稍偏西北，在阿富汗的北部出现了走向 EW 向的柯依巴巴褶皱山脉，往西在地中海南岸、非洲北部，有几条统称为阿特拉斯山脉，它是由古生代和中生代岩层组成的近 EW 向的褶皱，近年来，发现了越来越多的与走向平行的平移断裂，摩洛哥相对往 W·突尼斯相对往 E 移动了 150km 以上。在美国南部，在北纬 35°左右，有一条走向大致 EW 向的鸟奇塔山脉，往 W 去，在美洲南部 NW 走向的山脉地带中突然出现一个奇异的现象，即从北纬 40°左右起，一直向 SE 方向伸展的这条山脉，在洛杉矶附近突然向 E 转折，形成圣伯纳迪诺山脉，而在太平洋岸以西，在同一纬度上又出现了圣搭巴巴拉等一系列的岛屿，大致与摩勒大断裂纬度上一致。

(3) 南岭纬向构造体系：南岭构造带的主体大致位于北纬 24°~25°30' 之间，在个别地区可散布至北纬 26°左右，其东段和中段主要由古生代和中生代岩层的褶皱和大批花岗岩，以及分布面积不大的广泛变质岩系构成。它的西部即桂北、滇北地带，主要由古生代岩层局部褶皱或走向 EW 向的隆起带反映出来。在中国西南部，南岭构造带受到其他构造体系的干扰极为强烈，但仍可断续见其踪迹，如广西中部就有一些走向 EW 向的褶皱，东起富川、钟山、贺县，西达宜山、河池，在滇北紧密褶皱区中，北起鹤庆，南至安宁以南，也夹杂着 EW 向褶皱的分散片段。

在印度中部有一个隆起带，包括凯姆系丘陵及其东南地带，在这个地带，古老复杂岩系伴随冈瓦纳系（石炭二叠纪至侏罗纪）上升，形成一个 EW 方向延伸的地带，它的位置在北纬 24°左右。在阿拉伯海湾的北部海底，有人曾发现走向 EW 向的山脉，形成一个 EW 方向延伸的地带，在位置上也与南岭相当。在澳大利亚中部南纬 25°左右，有由古老岩层组成的近于 NW 向的马斯格雷山脉（以上资料取自《天文地质古生物》一书）^[19]。

除了上述三条李四光认为具有全球展布规模的星球级纬向构造带外，还提到一些区域性的 EW 向构造带，如位于北半球高纬度区的通古斯 EW 向构造带和我国海南岛 EW 向构造带。在南纬 25°~26°之间，有一条极特殊的岩浆活动带，EW 向长 400 km，SN 向宽约 90 km，称布什维尔德复杂岩带，有酸性、碱性、基性、超基性，其活动时期很长，有间歇性，大约到中生代初期基本停止。应该说在两条星球级的纬向构造体系之间弥散有区域性的 EW 向构造带。从李四光对于 EW 向构造体系的论述来看，可看出以下几点：

(1) 主要论述的是现位的 EW 向构造，他认为现位的 EW 向构造主要是中生代以来的构造，但他也认为这些全球规模的纬向构造体系是长期发展反复活动的，新老构造呈重接复合，其成生活动时间很可能自远古时间即已开始。

(2) 着重阐述的是 EW 向的压性构造，对于历史上存在的和现今存在于南半球的具有全球规模的 EW 向张性构造体系尚未给予应有的注意，而在他述及 EW 向构造形迹时，提及许多大陆上的 EW 向扭性构造和大洋中的 EW 向断层，实际上是其他构造体系成分的复合叠加，或是大洋中脊上的转换断层。

(3) 李四光所总结的具有全球规模的 EW 向压性构造，主要分布于北半球，虽然对零星分布于南半球的 EW 向压性构造也提及，但 EW 向压性构造带只见于北半球，而具有全球规模的纬向张性构造却主要见于南半球（如围绕南极大陆北侧的 EW 向环球洋中脊）。李四光没有注意到南北半球纬向构造的这种差别，未对其作出合理的解释。

从区域地质和地质历史看,至少有下列几点是应该予以补充的:

(1) 古纬向的张性构造和压性构造带是作为古地块、古板块、古大陆分界线的构造带而存在的,如存在于安加拉古陆、西伯利亚地台与华北-中朝地台之间的蒙古洋和阿尔泰-大兴安岭海西褶皱带,存在于北方大陆与南方大陆(冈瓦纳古陆)之间的特提斯构造带和陆间带(图2-1)。

(2) 欧亚板块与特提斯-印度-澳大利亚板块之间的边界和开合机制是受EW向构造带的控制的。

(3) 北半球EW向的现位构造是压性构造并伴生有一系列弧顶朝南的山字型构造,而南半球的EW向构造则主要是张性构造,至今未发现有前弧朝北的山字型构造。

(4) 历史上的古、中、新特提斯的开合随时间的推移更新并有自北向南迁移的规律,南半球的大陆板块随时间的更新不断向北漂移,从而使北半球大陆汇聚成陆半球,南半球则随洋中脊拉开、海底扩张而成为水半球。

二、实例解析——特提斯构造带东段及其与板块、构造体系的关系^[20]

(1) 青、藏、滇、川及缅、泰、印支半岛等地的地质记录表明,古特提斯是由一系列相对稳定的地块、洋岛及其间的洋盆、分支洋盆组成的。主洋盆的遗迹在藏东碧土、滇西昌宁-孟连一带,其西侧(原位为南侧)为亲冈瓦纳的地体群;其东侧(原位为北侧)为亲扬子的微陆块(芒康、兰坪、思茅、义敦等地块)。分支洋盆则有金沙江-墨江-甘孜-理塘、南昆仑-阿尼马卿小洋盆,它们分别位于亲扬子的微陆块之间,总的表现为一个多岛洋的古构造地理格局^[21]。

经过构造复位的构造古地理表明,其时古特提斯洋、该洋SN两侧之分支洋盆、地块群及其所代表的被动大陆边缘均呈EW向展布。多岛洋的总体格局受纬向构造体系控制,它们是受纬向构造的张裂作用而打开,在原特提斯被动陆缘的基础上发展成多岛洋的。

(2) 古地磁记录显示亲冈瓦纳的保山地体,泥盆纪时的古纬度为42°S、34°S,而亲扬子的微陆块,石炭纪时的古纬度为10.7°S,早二叠世时为9.3°N,晚二叠世时为2.1°N。这种情况不仅表明每一历史时期亲扬子微大陆的陆块群和亲冈瓦纳的陆块群分别位于古特提斯洋之北、南两侧,而且表明南、北两侧之陆块群均随时间的推移向北漂移。

(3) 按古生物地理的记录,黄汲清等^[22]划分出北特提斯和南特提斯(图2-2)。其中:北特提斯(NT)为暖热水特提斯(位于欧亚大陆),其标志性的动物化石为笔类(*Verbeekina*, *Neoschwagerina*, *Sumatrana*)、珊瑚(*Waagenophyllum*, *Wentzelella*, *Iranophyllum*, *Ipciphyllum*, *Kepingophyllum*)、腕足类(*Richthofenia*, *Leptodus*, *Oldhamina*)等。南特提斯(ST)标志性动物群其下层为冷凉水动物群(如小个体珊瑚、小个体腕足类)和其上层位覆盖有含暖热水带之特提斯的动物化石群和植物化石群,这标志着南特提斯随时间推移向北漂移。

(4) 沉积盆地和构造带的地质记录反演可知,伴随古特提斯洋的关闭,由冈瓦纳裂解出来的地块群向北漂移最终拼贴在扬子微大陆的边缘而使古亚洲增生;同时中特提斯洋在其南侧打开,冈瓦纳陆块群再次北漂并最终也拼贴于亚洲大陆的边缘形成中生代的地体群,使亚洲再次增生;与此同时,在其南侧又打开新特提斯大洋,冈瓦纳大陆北缘再次裂离出陆块群,当新特提斯关闭时,陆块群拼贴到亚洲大陆边缘,成为最后一批增生地体。其总体规律

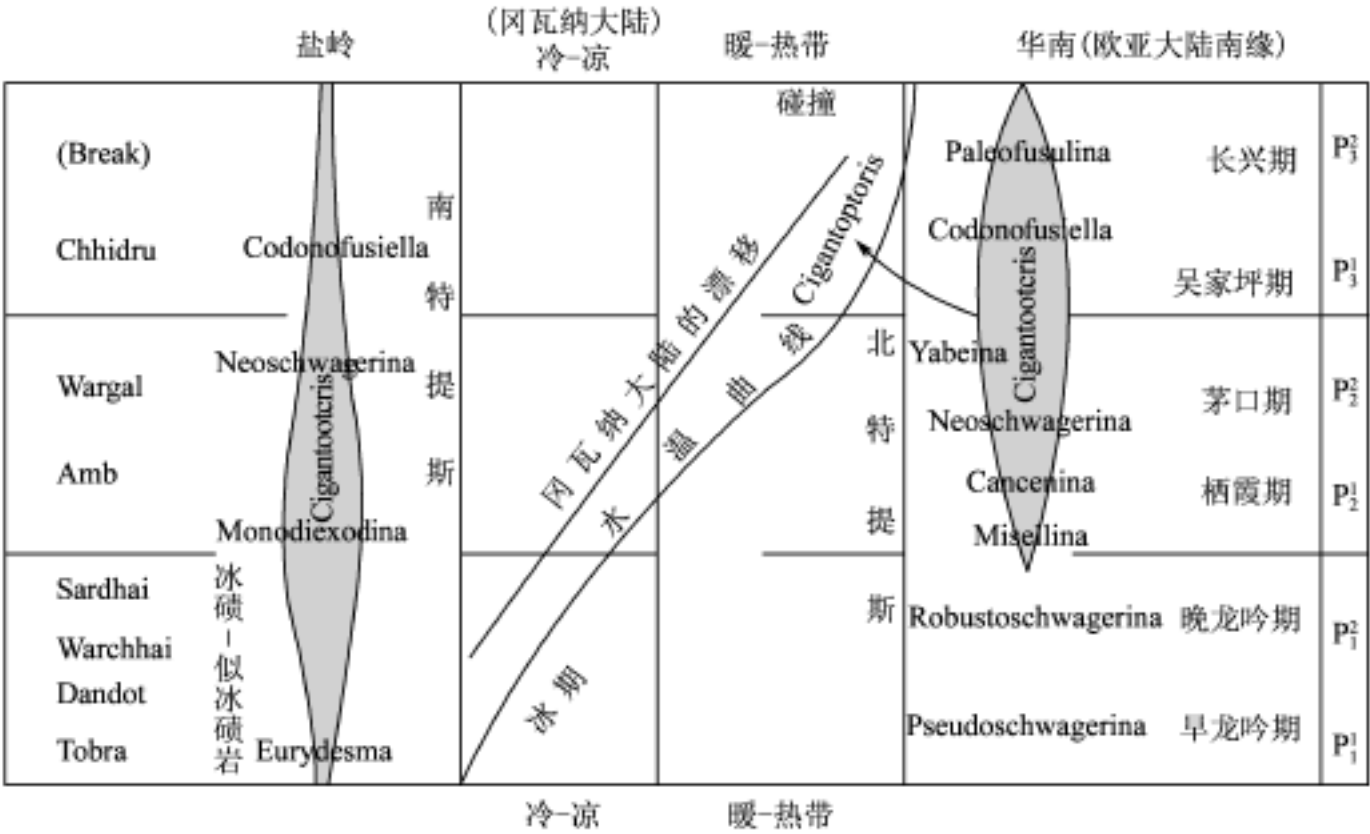


图 2 - 2 南特提斯、北特提斯动物群、植物群比较和海水温度对动物群分布之影响
(据黄汲清等, 1987) [22]

Fig. 2 - 2 Diagram showing the correlation of faunas and floras in North Tethys and South Tethys and the influence of the temperatures of sea water on the distribution of faunas
(after Huang Jiqing et al., 1987) [22]

任纪舜^[23]表述为：冈瓦纳裂离、地幔深部物质涌带（板块分裂带）向南跃进，陆块北移，首尾碰撞，褶皱带（造山带）南迁，亚洲向南增生。显然，这种运移规律反映出冈瓦纳的裂离、亚洲的增生和特提斯的演化都受控于星球纬向构造体系和全球构造应力场。

第二节 不同级别的 SN 向构造应力场控制 不同级别的 SN 向构造

最早对我国境内的 SN 向构造进行论述的是吴磊伯^[24]，李四光后来把它提升为一种构造体系和构造型式，称为经向构造体系。李四光当时所提及的 SN 向经向构造体系除美洲西部的海岸山脉褶皱带和 SN 向的大洋中脊外，大部分被我们划分为区域性 SN 向构造带。之所以要划分这两类 SN 向构造带，是因为它们受着不同级别的 SN 向构造应力场控制，它本身控制着不同级别的块体和构造体系的展布。

经向构造体系在李四光鉴定划分的构造体系中是研究得比较晚的、研究程度较低的一个构造体系。自地质力学概论发表以后，崔盛芹、沈淑敏、王治顺、刘德良等又进一步对其进行研究并发表了论述。新的地质事实的发现和积累要求我们严格区分区域性 SN 向构造带和经向构造体系，因为它们所代表的地球动力学意义和对地质构造和矿产资源、地质灾害的控制是不同的。下文对这两类 SN 向构造进行论述。

一、区域性 SN 向构造^[25]

无论在我国境内还是在世界范围内都有许多区域性展布的 SN 向构造（图 2 - 3），如

作为欧亚两洲地理分界的乌拉尔山脉便是一条最著名的区域性 SN 向构造带，它是欧亚板块内部的一条构造带。从其南端再往 S 追溯就不见其踪迹了，也就是说虽然乌拉尔山脉本身很雄伟，但它并不具有全球展布的规模。类似于乌拉尔区域性 SN 向构造带，在北半球还有中蒙中轴构造带、喀尔巴阡东端以东穿过黑海西部和希腊与西土耳其之间的南北向重力异常带，以及北美大陆中部南北向的落基山构造带^[26]（图 2 - 4）。区域性 SN 向构造带在我国北方尤其是华南有广泛的分布，据统计，大约每 4° 的经度区域内就有一条区域性的 SN 向构造带，这些区域性的 SN 向构造带可一直追溯至东北亚和西太平洋——菲律宾有其强烈的展布，世界上最深的海沟马里亚纳海沟和南海东侧的马尼拉海沟都是 SN 向的（图 2 - 3），而且它们多是挤压性的。在我国大陆及邻近岛屿分布的区域性 SN 构造带自 W 向 E 依次有滇藏三江 SN 向构造带（即著名的横断山脉），川滇 SN 向构造带，川黔 SN 向构造带，湘、桂、粤、琼、SN 向构造带和闽台 SN 向构造带，在华北自西向东有贺兰山 SN 向构造带、吕梁山 - 太行山 SN 向构造带、冀鲁皖 SN 向构造带和佳木斯 SN 向构造带（图 2 - 3）。这些过去曾划为经向构造体系，本书作者之所以把它们划入区域性 SN 向构造带，不只是因为其展布据目前所掌握的资料多只具有区域性而不具有全球性展布的规模，而且还因为其成因受控于区域性构造应力场。区域性 SN 向构造带有各种成因类型，对其表现形式和成因类型的鉴别可帮助我们把它与经向构造体系区分开来。

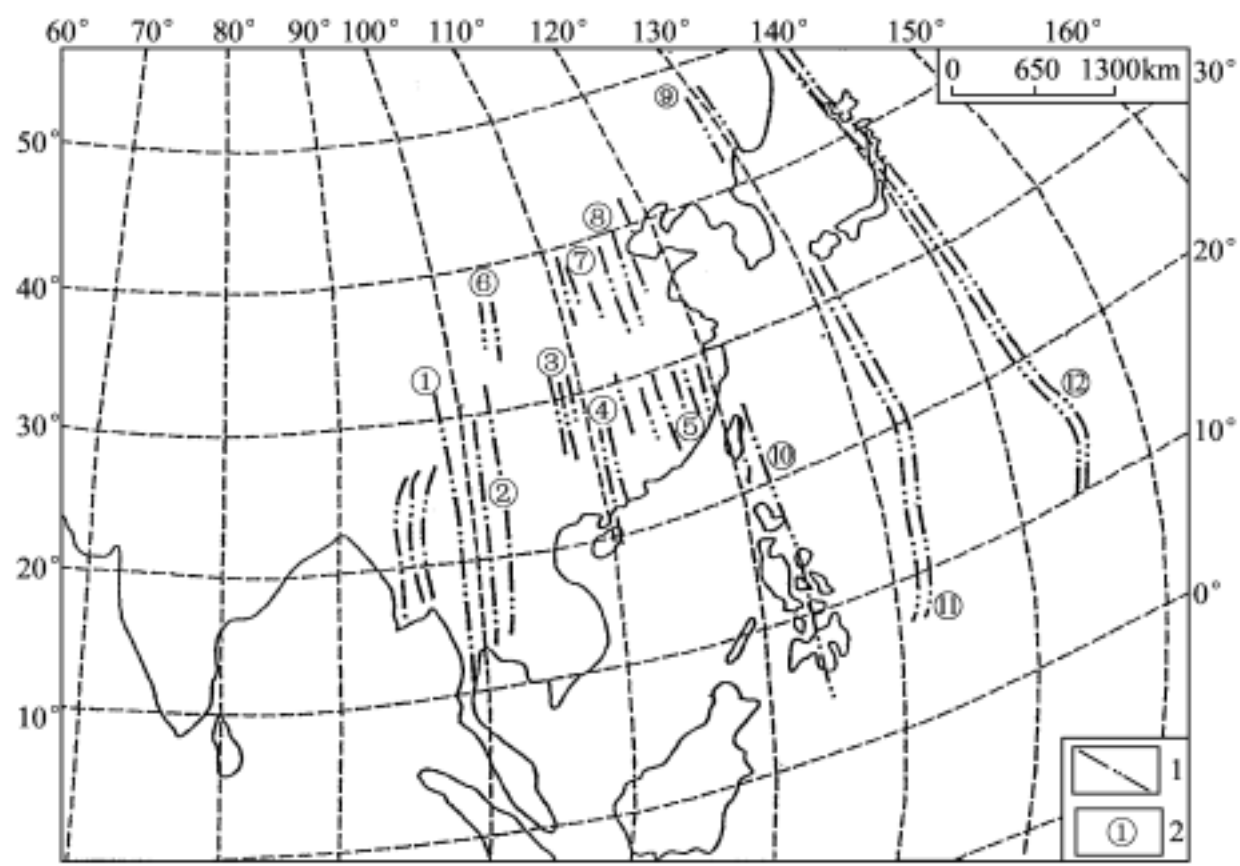


图 2 - 3 中国及其邻国区域性南北向构造带展布示意图^[25]

Fig. 2 - 3 Sketch map showing distribution of the regional North - south Trending Tectonic Belts in China and its adjacent area

1—区域性南北向构造带；2—构造带编号

- ①—滇芷三江 SN 向构造带；②—川滇 SN 向构造带；③—川黔 SN 向构造带；④—湘桂粤琼 SN 向构造带；⑤—闽台 SN 向构造带；⑥—贺兰山 SN 向构造带；⑦—吕梁山、太行山 SN 向构造带；⑧—冀鲁皖 SN 向构造带；⑨—佳木斯 SN 向构造带；⑩—菲律宾 SN 向构造带；1 — 西菲律宾海与帕里西维拉断块之间的 SN 向构造带；2 — 伊沃季玛、马里亚纳 SN 向构造带

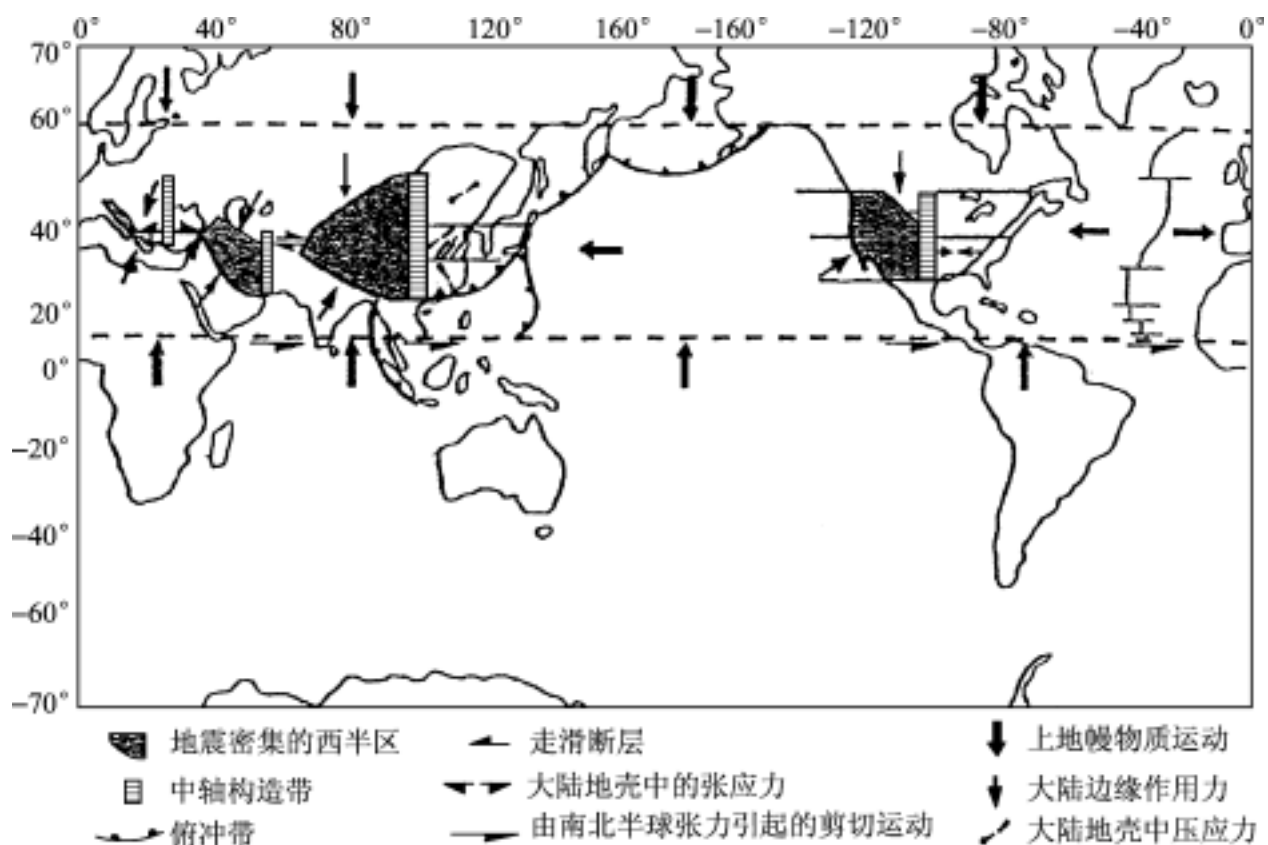


图 2 - 4 全球南北向中轴构造带的展布^[4]

Fig 2 - 4 Map showing the distribution of north-south trending tectonic axial belts along the world

(一) 区域性 SN 向构造带的表现形式

区域性 SN 向构造带是指其现位是南北向展布的构造带，它以各种建造和构造形迹的形式表现出来。通常最常见的形式是以现位呈南北向的沉积相带、古地理地貌边界、岩浆岩带、火山地震带、深部重磁异常带、构造形迹带等表现出来。这种现位呈南北向展布的形迹不仅存在于具有新的年龄值的建造和形迹带中，而且存在于老的地质建造与构造形迹之中。例如，在阿尔丹地盾和我国冀东的太古宙片麻岩中就存在现位呈南北向展布的卵形褶皱穹窿。在一些构造带中常常表现出各个时期的建造（沉积岩建造、岩浆岩建造和变质岩条带）和形迹（褶皱、断裂）其现位都呈南北向展布，甚至于山川形势和地震震中都呈南北向展布（如我国的川滇带等）。这些南北向构造带究竟是新南北向构造带和古南北向构造带复合的构造，还是不同历史时期不同构造方位的构造带经多期构造变动和方位变化最后都呈南北向展布，是一个需要专门研究的问题。还有一种展布形式容易被人们忽略的构造，它常以一对共轭剪切断裂的形式表现出来。笔者在粤东开展地质研究时，发现粤东北古生界中的 SN 向褶皱和断裂往往止于佛岗 - 丰良 EW 向构造带。但近年笔者在粤东沿海工作时，发现在燕山期的花岗岩和火山岩中东西向的挤压仍然很强烈，但它是以 NNW—NW 向（左行）和 NNE—NE 向（右行）一对共轭断裂系的形式表现出来的。苏、豫地区的一组东西向弧顶指向东西的对顶的弧形构造实际上也是这种南北向构造受共轭剪切断裂作用的结果，它是每遇一条 SN 向构造带时出现的形式（图 2 - 5）。在我国南岭地区，呈 EW 向展布的褶皱和断裂每遇一条 SN 向构造带时往往出现弧形构造，其弧顶朝南或朝北，同时山字型构造的前弧加大它的曲度都是这种南北向构造带叠加复合的表现，南北极地区的放射状张性断裂则是 SN 向张性断裂组合形态的表现（图 2 - 6）。

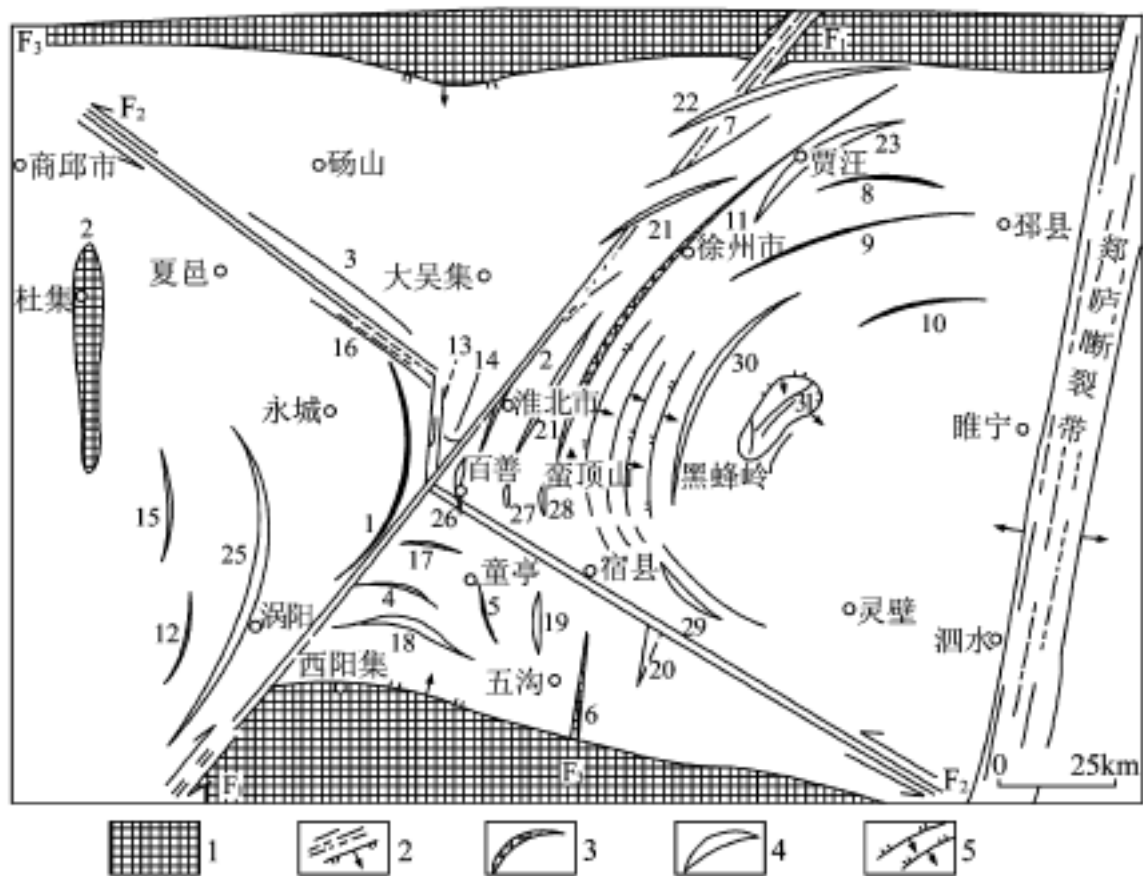


图 2 - 5 与南北向构造有关的弧形构造^[27]

Fig. 2 - 5 Arc-shaped structure related to the North-South trending structure

1—隆起区；2—断裂；3—背斜；4—向斜；5—蛭顶山断层带

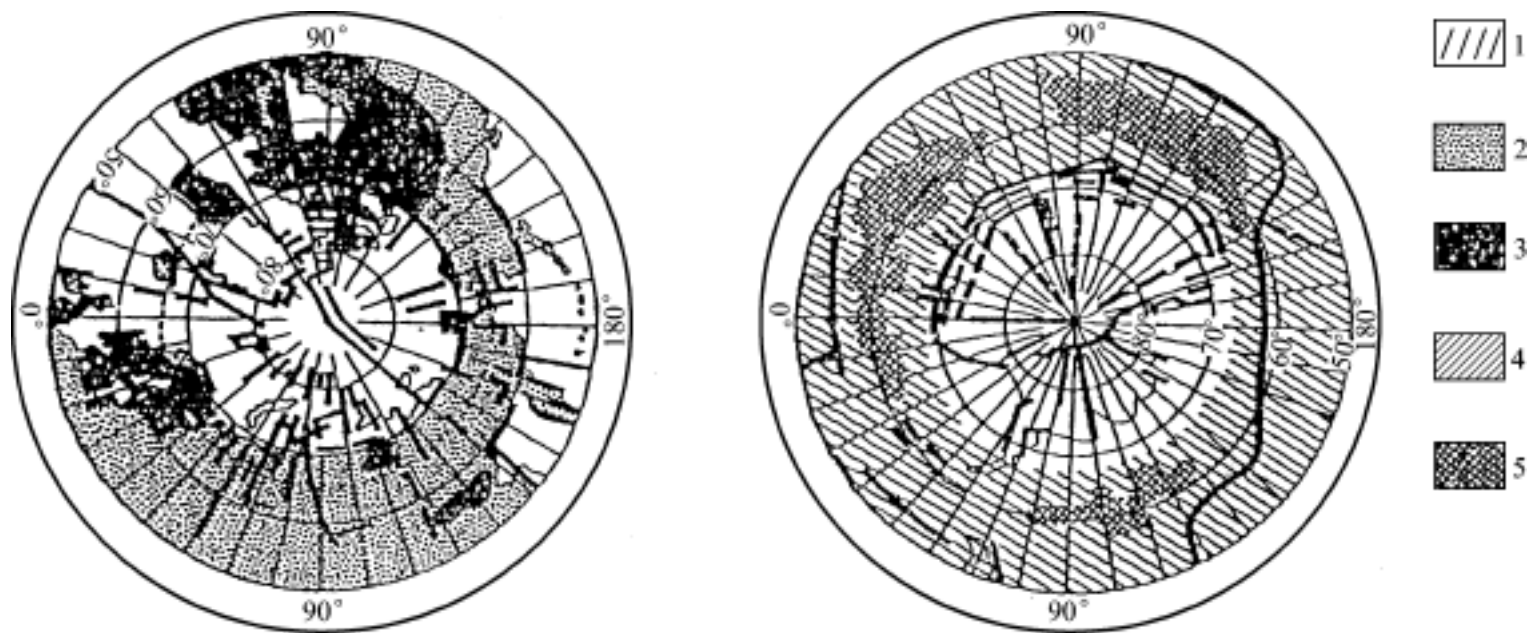


图 2 - 6 北极圈、亚北极圈（左）和南极圈、南极亚圈（右）的辐射状和同心弧形大断裂体系^[5]

Fig. 2 - 6 Radiational and concentric arc faults system in the north and the south pole circle

1—中生代—新生代断裂体系；2—北半球以陆块为主的陆环；3—陆环中的结晶地带（据沃洛诺夫）；4—南半球以陆块为主的陆环；5—海环中的海底槽地（据沃洛诺夫）

（二）区域性 SN 向构造带的成因类型

区域性 SN 向构造带除了可能是全球性经向构造体系的一个片断外，尚可能由下列原因形成：

1. 纬向构造体系中的横向张裂配套构造

纬向构造体系经常发育一组南北向的横向张裂带。由于巨型纬向构造带的长期反复活

动，它的配套张裂南北向构造带也反复活动，当其切割至莫霍面并达上地幔时这里便成为岩浆活动叠次出现的地带。南岭地区的万洋山 - 诸广山南北向构造岩浆带（图 2 - 7）至少自印支期以来可能是作为南岭纬向构造带的横向张裂出现的^[28]。巨型纬向构造带中的配套横向张裂带，由于它的张性活动，又经常控制着南北向地块的隆升和沉陷，因而它又是长期隆升和沉积断陷之所在。川滇 SN 向构造带中南段与南岭纬向构造带呈反接复合。

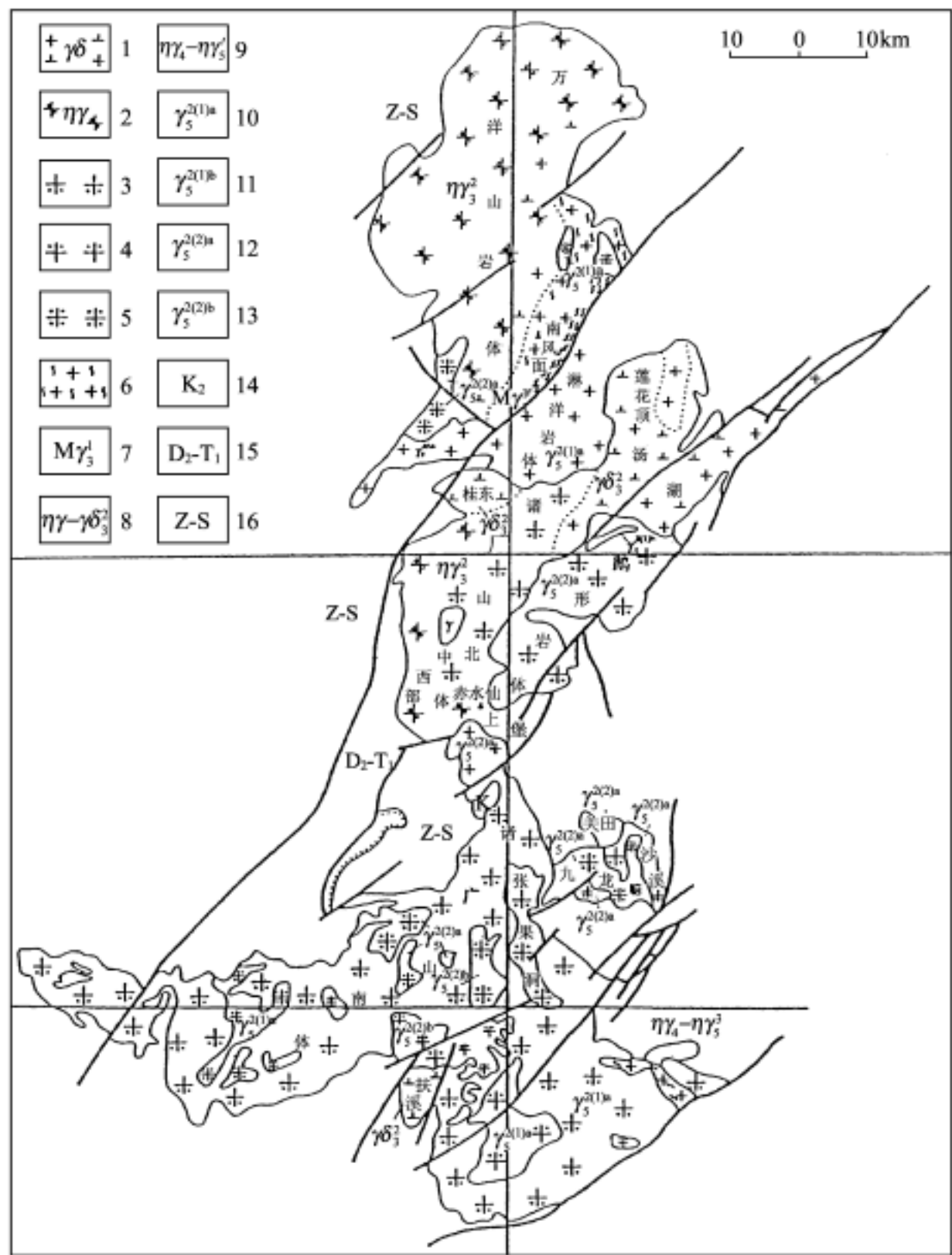


图 2 - 7 万洋山—诸广山复式岩带各期次岩体分布图^[28]

Fig. 2 - 7 Geological map shows the distribution of granites (each stage s) along Wanyangshan—Zhuguangshan composite plutonic belt

1—花岗闪长岩；2—二长花岗岩；3—黑云母花岗岩；4—白云母花岗岩；5—二云母花岗岩；6—混合花岗岩质杂岩；7—早古生代早期岩体；8—早古生代晚期岩体；9—晚古生代—三叠纪岩体；10—侏罗纪第一阶段第一期岩体；11—侏罗纪第一阶段第二期岩体；12—侏罗纪第二阶段第一期岩体；13—侏罗纪第二阶段第二期岩体；14—上白垩统红层；15—中泥盆统—早三叠统地层；16—震旦纪—志留纪地层

作为纬向构造横向张裂的南北向张性断陷分别控制了西昌和元谋—楚雄的白垩纪沉积盆地，云南剑川鹤庆的 SN 向张性断陷控制了第四纪沉积（图 2 - 8）^[29]。

2. 主干构造旁侧的低序次构造

哀牢山红河大型走滑断裂两侧发育一系列小等级、低序次的 SN 向褶皱和 SN 向张扭性断陷，它们和滇藏三江 SN 向构造带叠加复合在一起。这些低序次、小等级的 SN 向褶皱、逆冲断层和张扭性断陷是哀牢山红河断裂系走滑时形成的并与主干断裂构成了入字型构造。当其作左行走滑时，形成了 SN 向的褶皱和压扭性断裂；当其作右行走滑时，形成了 SN 向的张扭性断陷（图 2 - 9）^[21]。

我国境内及其邻区扭动构造体系极为发育，不仅在 NW 向走滑断裂的旁侧会形成这种低序次的区域性 SN 向褶皱带或断陷，而且那些 NE—NNE 向华夏系、新华夏系的主压面的旁侧也可以直线型张性断陷或总体呈南北向的压扭性帚状构造型式出现。不仅在左行压

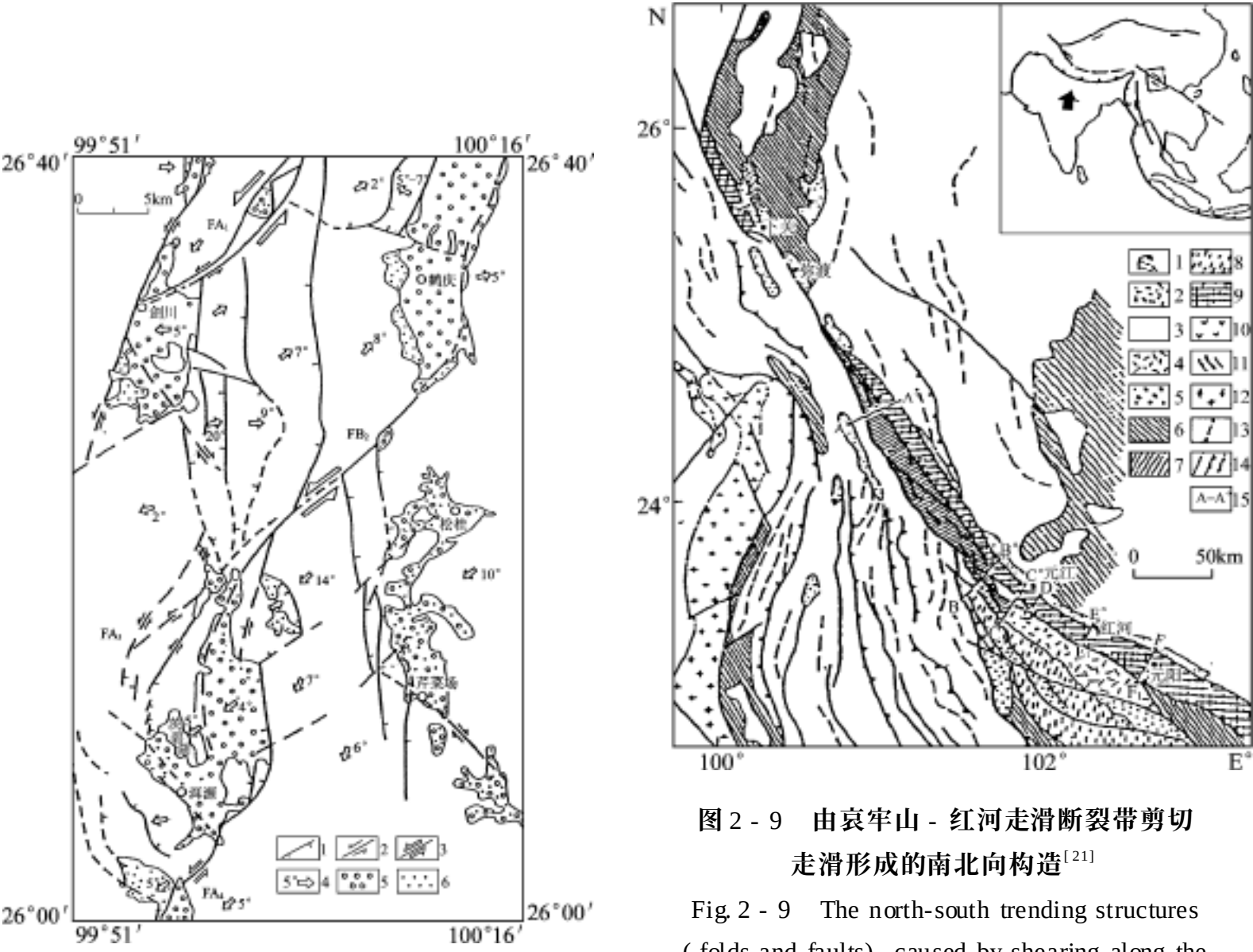


图 2 - 8 受纬向构造带控制的横向张裂盆地^[29]

Fig. 2 - 8 The North-south Trending Tensional Basins Controlled by the Latitudinal Tectonic System

- 1—正断层；2—剪切断层；3—主要转换断层；
- 4—断块倾斜方向及倾斜角；5—晚更新世—全新世地层；6—早—中更新世地层

图 2 - 9 由哀牢山 - 红河走滑断裂带剪切走滑形成的南北向构造^[21]

Fig. 2 - 9 The north-south trending structures (folds and faults) caused by shearing along the strike of Honghe (Red river) fault belt

- 1—湖泊；2—新近纪盆地沉积；3—中生代红色地层；
- 4—晚三叠世火山—沉积岩；5—晚三叠世磨拉石沉积；
- 6—台地边缘沉积（扬子地块，晚二叠世—三叠纪）；
- 7—浅变质岩（石炭纪—二叠纪大陆斜坡沉积）；8—浊积岩（志留纪—泥盆纪）；9—哀牢山深变质岩（元古宙）；
- 10—二叠纪岛弧火山岩；11—蛇绿混杂岩；12—花岗岩；13—褶皱轴；14—断裂；15—剖面位置

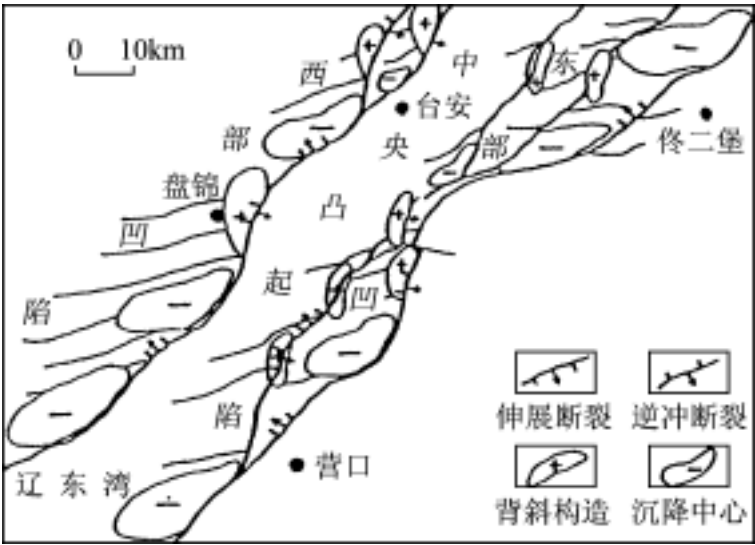


图 2 - 10 辽河盆地渐新世晚期郯庐断裂带构造古地理图^[30]

Fig. 2 - 10 Shetch map of tectonic paleogcography in Liao he Basin along Tan-lu fault zone during late Oligocene

扭构造带的旁侧可以出现，而且在那些大型长期发育的右行张扭性断陷中更应该注意，那些南北向的长垣状同沉积背向斜有可能是两侧主干断裂在作右行扭动时沉积层的扭动形成的。辽河凹陷中的 SN 向背斜可能是这样形成的（图 2 - 10），松辽平原中的 SN 向大庆长垣也可能是这样形成的^[30]。

3. 某种构造型式的一个组成部分

最常见的例证就是作为山字型脊柱的 SN 向构造带。我国境内的山字型构造大多前弧顶朝南，因而其脊柱呈南北向展布，主要为压性构造带。有时也发育南北向脊柱构造上的二次纵张断裂，其主要特点是不穿切前弧。此外，如前所述，区域性南北向构造也常常作为人字型构造型式的一个组成部分，

或者作为旋扭构造的一部分，如青藏缅印尼歹字型构造中的南北向构造段。

4. 板块、地块、地体的拼贴边缘

这种类型的南北向构造极为常见。如前所述，贺兰山 SN 向构造带中的贺兰山六盘山 SN 向断裂带是鄂尔多斯 - 华北地台与祁连山 - 柴达木地块的拼贴边界；台湾、吕宋群岛中的 SN 向挤压带是菲律宾板块与中国华南板块的俯冲边界；佳木斯 - 布列亚地块东缘的 SN 向构造带是一个大陆边缘的地体拼贴带，其东侧的那丹哈达 - 比金地体是一个异位复合地体。作为异地地体，据邵济安等^[31]研究，具有下列主要证据：①作为外来岩块的二叠纪地层中所含的笔类、腕足类和珊瑚等底栖动物群化石属于低纬度古特提斯古生物地理区。②古地磁研究表明：佳木斯 - 布列亚地块晚侏罗世—早白垩世时古纬度为 48.6 °N (Uchimura, 1989)，而那丹哈达岭地体晚石炭世时处于南纬 19.4 °，早二叠世处于南纬 10.3 °，晚三叠世处于 12.2 °N，与日本美浓地体晚三叠世的古纬度 10.9 °N 相近。该异地体南端的兴凯地体也是一个异地体。古地磁研究亦表明晚三叠世—早二叠世亦处于低纬度，与古大陆边缘拼贴前后不断迁移。晚三叠世时为 22.9 °N，早侏罗世为 29.4 °N (杨惠心等, 1993)。东面的锡霍阿林地体晚白垩世古纬度为 41 °N，晚白垩世—古近纪时为 42.1 °N，新近纪为 46.5 °N (图 2 - 11)。

上述异地体是通过近南北向的左行走滑而拼贴至古亚洲域大陆边缘的。拼贴以后，由于 42Ma 以来太平洋板块的改向，上述南北向拼贴边缘遭受东西向

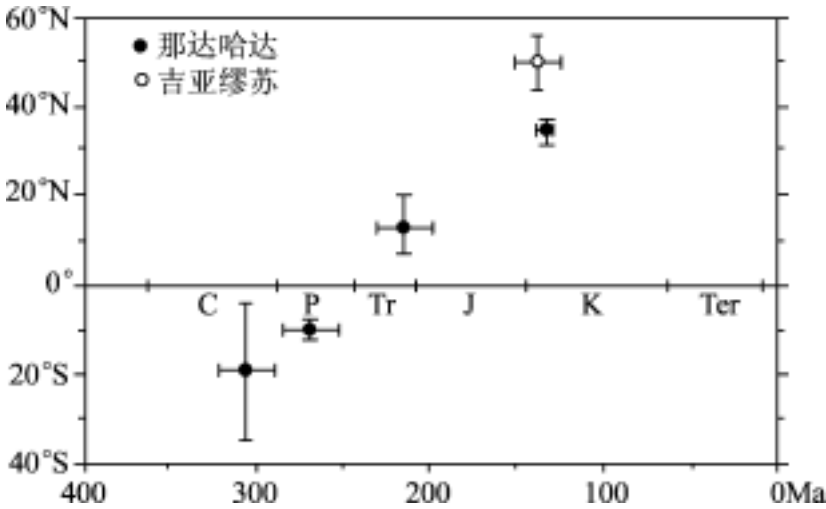


图 2 - 11 东北亚那丹哈达岭地区古地磁记录^[31]

Fig. 2 - 11 Diagram showing the paleo magnetic records of the terrance of Nadanhadalin in north-eastern Asia

挤压叠加，从而又改造成 SN 向压性构造带。

由上述可知，区域性南北向构造带有不同的类型和性质，不管其成因类型如何，它都属于该区域局部构造应力场控制，它既可以属于纬向构造体系的一种配套构造，也可以属于其他构造体系的一种配套构造，当然也可属于经向构造体系的低等级构造，因而不能未经详细研究就将它们归入经向构造体系，就把它形成的动力学机制和全球性的纬向切向力直接联系。它们对于全球性的巨型板块一般也不具控制其展布的作用，而是对次一级的亚板块、地块、地体、沉积盆地和山脉走向具有一定的控制作用。

二、全球性的经向构造体系及其与某些区域性 SN 向构造带的成生联系

（一）全球经向构造体系

至于谈到经向构造体系，它应该是受全球性的纬向切向力（挤压力或引张力）所控制而形成的，例如沿北美洲和南美洲大陆边缘呈 SN 向展布的海岸山脉挤压褶断带、沿大西洋中轴分布的大西洋洋中脊张裂带和沿东非大裂谷至印度洋近 SN 向的张裂带。此外，在地球的南、北极分布着一些辐射状的张裂带（图 2 - 12），每一条张裂带都平行地球的

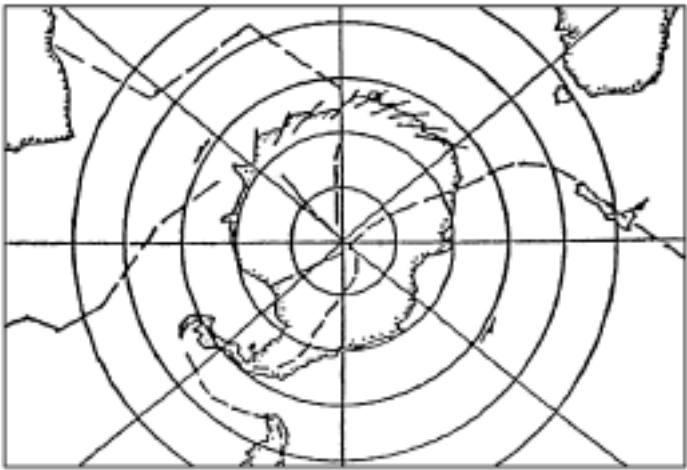


图 2 - 12 南极大陆反时钟旋转^[27]

Fig. 2 - 12 Anti-o clock rotation of Antarcitics

经向线，虽然不具有全球规模的分布，但显然也受全球构造应力场控制，其形成的动力学机制与地球的整体旋转有关，因而也可归入全球经向构造体系。

地球上形成的东西向挤压力和引张力除因地球自转而产生的纬向切向力（如前章述及的西向引潮力）外，在地质历史上尚可能与地球体本身形状的演化有关。李鸿业^[32]根据许多天体演化的天体比较学和地质演化中的地质事实提出地球的原始形状是长椭球形的。据此他提出了两极挤压说，认为地球由原来长椭球体演化成球形体的过程中两极不断向赤道产生挤压，从而产生南北向的张裂，由此诱发受经向构造控制的岩浆

喷发，并示意性地复原了侏罗纪开始时的古硅镁壳的展布（图 2 - 13）^[32]。循此思路，追溯不同时期全球性基性岩浆带的展布是可以复原同时期的张裂带的。

地球表面的纬向切向力尚与地球在演化过程中的膨胀收缩有关。在地球演化过程中，其初期阶段可能以收缩为主（能量积累阶段），后期阶段则是以膨胀为主（能量耗散阶段）。两者的转化时间据刘粤等^[33]计算，估计在 3000Ma 前后，无论是膨胀还是收缩都可以产生经向系（挤压型或引张型）。相对地膨胀和收缩可能在地球的不同历史阶段都可产生，李四光^[5]指出地球自转角速度加快的时候，地球质量有向心收缩的趋势（可形成经向系的褶皱和断裂——引者注）；当地球自转角速度变慢时，则地球质量有向外扩散的趋势（亦可形成张性的经向系——引者注）。

（二）经向构造体系与某些区域性 SN 向构造的成生联系

总观我国及其邻区的 SN 向区域性构造带的展布及其成因类型，除部分属于其他构造体系的配套或低序次派生构造或某种构造型式的一个组成部分以外，就它们的多数和总体

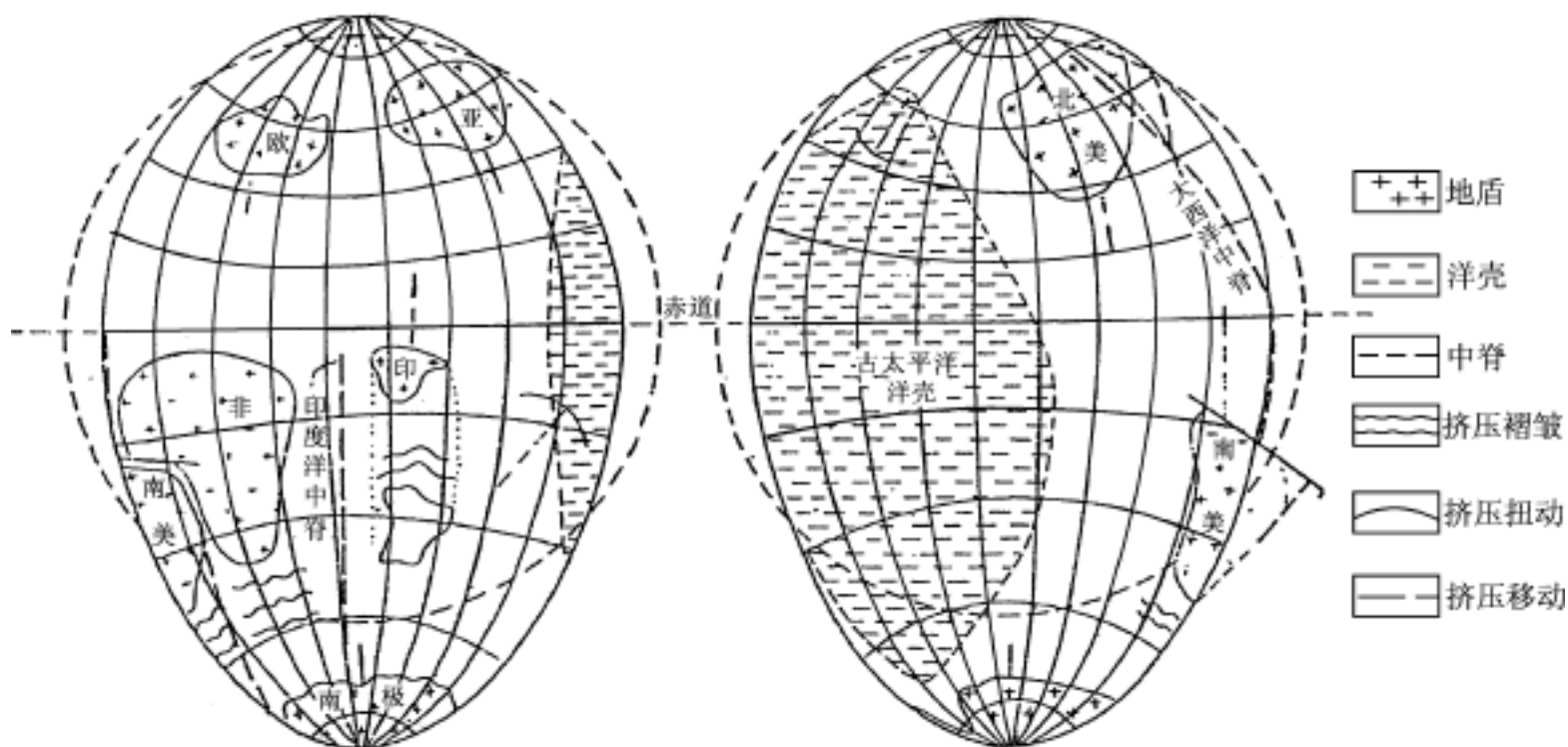


图 2 - 13 由于两极挤压引起的地球形状变化和南北向张裂

(改自李鸿业, 1993) ^[32]

Fig. 2 - 13 Changing of Earth's feature and the genesis of north-south trending tensional faults caused by the compression from the Earth's poles

以及就它们与板块的运动和相互作用的关系来看，不难发现如下几点规律。

(1) 陆地上的区域性 SN 向构造带与海域里的海沟（如马尼拉海沟和马里亚纳海沟）平行。

(2) 无论是陆地上的区域性 SN 向构造带还是海域中的 SN 向海沟挤压带，它们都与特提斯板块和伊泽奈崎 - 库拉板块的转换断层相平行或近平行。印度板块正是沿着右行近南北向转换断层与澳大利亚板块分离并快速向北漂移的（图 2 - 14）。

(3) 中国大陆上区域性 SN 向构造带广泛而深远的变形期之一发生在新生代，它与印度板块向北推挤所产生的向东的侧向压力（45 ~ 30Ma 之间）和太平洋 - 菲律宾板块自 42Ma 以来运动方向改成向 NWW、5Ma 左右菲律宾板块俯冲于台湾岛弧之下形成台湾 - 吕宋反向岛弧的侧向挤压应力有关。正是这一板块运动格局的重大变革，使原来呈 NNW 向或近 NS 向的转换断层的力学性质改变为挤压性质。它们之间的挤压和碰撞，在中国大陆板内的效应便造就了许多新生代区域性南北向挤压构造带。

如果我们进一步追问为什么在 42 Ma 前后中国大陆东缘西太平洋板块的运动格局会发生如此大的转变？进一步的研究告



图 2 - 14 距今 100 万年时西太平洋和印度洋区大洋板块扩张脊及转换断层 ^[34]

Fig. 2 - 14 The figure shows spreading ridges and transform faults of oceanic plates in the area of West Pacific Ocean and Indian Ocean

诉我们，特提斯洋脊属于纬向系，而大西洋和现今的太平洋中脊则属于经向系（据张文佑^[27]研究，原因之一是科里奥里力使洋脊的走向与子午线有一个小的交角）。这两个星球级的洋中脊的存在反映出地球表面存在着全球性的经向切向力和纬向切向力，经向切向力形成纬向构造体系，纬向切向力形成经向构造体系。但在经向切向力和纬向切向力之间在时间上存在相互消长的情况（南北向切向力大于或小于东西向切向力），这就导致了受它控制的板块运动在一定历史时期会由一个方向转变为另一个方向，也就是说，区域构造应力场的变化是与全球构造应力场的变化联系在一起的，而这种联系也就决定了全球规模的经向系与区域性 SN 向构造带之间的成生联系。库拉或伊泽奈崎大洋板块洋脊走向 NEE，属于纬向系，洋脊扩张时，它们向 NNW 向运动；42Ma 起新太平洋中脊走向 NNE，洋脊扩张时，西太平洋板块运动方向改成向 NWW 向，原来作为特提斯 - 库拉洋脊的 NNW—SN 向转换断层便转换为压性、压扭性构造带；无独有偶，与此同时，印度板块此时亦已靠近欧亚板块发生对接碰撞，因而形成板内一系列碰撞构造体系。这表明全球构造体系应力变化可引起区域构造应力场的变化，从而形成区域性构造体系；中国及其邻区的新生代区域性 SN 向构造带，正是在印度板块向北推挤所引起的向东侧压和新太平洋中脊扩张使西太平洋 - 菲律宾板块近于向西的运动这样的区域应力场作用下形成的。

第三节 全球构造应力场与构造体系、板块之间的内在联系

前文分别论述了全球性的 EW 向构造和 SN 向构造，总结由它们所构成的全球构造格局，可以归纳出以下几个特点：

- (1) 整个地球受重力场控制，北极凹下成海，南极突出成陆，整体如梨状。
- (2) 大陆集中于北半球，由于近 SN 向的张裂，把聚集于北半球的大陆撕裂成大陆瓣。
- (3) 全球性的 EW 向构造和 SN 向构造带与 EW 向排列和 SN 向排列的板块构造相平行，EW 向构造在北半球以挤压性构造为主，发育弧顶朝南的山字型构造（主要分布在北半球的东半球），在南半球则发育了张性构造。SN 向构造在西半球大西洋及其两岸发育张性构造，在东半球太平洋沿岸则发育挤压性构造。

地质力学利用构造体系和构造型式反演地壳运动程式，得出地壳在全球范围内的水平运动方向主要为 SN 向和 EW 向，从两极向赤道的运动形成南北向挤压和纬向构造体系；EW 向切向力的对接或拉伸则形成经向构造体系；由于 SN 向或 EW 向力的不平衡则形成各种扭动构造体系，并由此演绎出地壳运动的力量根源于地球自转速率的变化，提出了大陆车闸学说。但是地质力学对全球构造的成因也还有许多不及阐明和解释之处。诸如：为什么 EW 走向的挤压性构造和弧顶朝南的山字型构造主要出现于北半球的欧亚大陆，而在南半球很少出现？如何解释现今主要出现于南半球的近纬向构造是伸展性的洋中脊和在地质历史上出现于北大陆内部的伸展性的蒙古洋（亚洲洋）和南北大陆之间 EW 向的特提斯洋中脊？为什么古、中、新特提斯洋中脊随时间变新向 S 推移？为什么伸展性的近经向构造体系或洋中脊主要出现于大西洋和印度洋，而挤压性构造或近 SN 向的海沟带主要出现于太平洋东西两岸？根据古地磁记录，白垩纪以来许多陆块诸如印度板块、澳洲板块、非洲板块和中国大陆都以不同的速度向北漂移，亚洲大陆不断向 S 增生，这是为什么？当代地学有两个重要发现：一是地球处于不均匀的膨胀之中，全球构造研究已经揭示全球表

层构造格局具有 N/S 向半球与 $0^{\circ}/180^{\circ}$ 半球双重胀缩耦合非对称性^[26]；二是地球内部的不同圈层具有不同的转速 (Steanbeck et al., 1975; Gubbinbs, 1981; Szeto et al., 1984; Glatzmaier et al., 1995; 宋晓东等, 1996)。在地质学历史上有过收缩说、膨胀说和脉动说的提出。如用地质事实来检验, 全球性的造山旋回和裂陷旋回的存在说明地质历史上存在着周期性的收缩和膨胀。最近刘粤等^[33] 提出地球能量补偿的理论, 论证了地球在天文演化阶段即太古代早期阶段是物质和能量的聚集阶段, 中太古代至今则处于能量发散的膨胀阶段。他们用地球整体膨胀的思想解释了全球性的纬向和经向大洋中脊的形成, 但未能解释为什么北半球欧亚大陆发育挤压性的纬向构造, 而南半球却发育张性的纬向构造。本文作者认为地球南北半球不均匀的膨胀 (南半球的膨胀远大于北半球) 可以解释上述现象。正是南半球的膨胀大于北半球, 才使南半球的南大陆裂解后向北漂移并与北半球的大陆汇聚挤压, 结合 EW 方向的拉张, 从而形成北半球的大陆瓣, 并使北半球的大陆在 SN 方向上处于相对收缩和挤压状态并向南增生。如果这种不均匀的膨胀随着时间的推移不断向 S 推移的话, 就会发生古、中、新特提斯洋中脊随时间变新依次向 S 迁移的现象。

本文作者在支持刘粤等的能量补偿理论的同时, 认为在他们所划分的地球膨胀阶段里存在着相对的收缩期和相对的膨胀期, 否则就无法解释特别是显生宙以来多次出现的构造演化的周期性, 以及在地质历史上出现的超级大陆的周期性裂解和再汇聚。据莫宣学统计, 三大洋残余最老的磁条带时代相同, 说明侏罗纪晚期岩石圈的开裂是全球同时性的突出事件, 整个大洋区在 157Ma、130Ma、58Ma 等时期都显示了全球性裂解的同步性^[35]。事实上每一次深部物质的上涌都意味着地球能量的散发, 启示着下一阶段地球的收缩和能量的再聚集。本文作者还认为在同一时间里, 在地球的不同地区能量补偿处于动态平衡之中。同一时期存在此处收缩挤压、彼处膨胀伸展的动态平衡。

用不均匀膨胀、收缩和相对膨胀、收缩来解释前述现象并不排斥由于地球自转而产生的经向切向力和纬向切向力的存在。北半球由于处在由北极向赤道的经向水平切向力与南半球向北半球相对膨胀产生向北运动的力的叠加和对挤之中, 因而 EW 向的挤压性构造特别发育。

由以上的分析, 我们已经可以看到真正的全球构造不能限于平面分析而必须进入三维构造乃至四维的地球构造演化历史分析。因此日本学者丸山茂德等^[36] 根据地震层析图像所做出的地球三维构造解析是值得重视的。他们提出的新的全球构造学说是在总结地幔柱研究成果基础上, 依据地震层析成像、超高压实验、计算机模拟地球的板块构造演化历史和比较行星学的结果提出的一种新的大地构造和地球动力学假说。

以往地球科学在研究地球三维构造时比较注意核、幔、壳的圈层构造及其相互关系的研究, 而对地球内部由于地球膨胀所形成的聚集于地心的径向构造注意不够, 对于固体地球内部因圈层之间的相对运动所形成的构造也注意不够, 而这些都是广义的全球构造所应包含的内容, 它对正确地解释地幔柱的成因、板块构造的运动和演化、基底析离和盖层滑脱, 乃至地球内部的射气作用, 水圈、大气圈、岩石圈的成分和构造的演化都具有重要意义。有关这方面的内容, 本书在后述章节中还要述及。

综上所述, 板块构造也好, 构造体系也好, 都受控于构造应力场。但是构造体系是指构造形迹 (及其所挟裹的地块) 的共生组合, 是构造应力场的物质表现, 从这个本质意义上讲, 它们是同义词。因此, 我们也可以说是全球性或星球级的构造体系控制裹挟其中的块体 (板块、地块、地体) 的展布、运动、演化与发展。

第五章 板块间的相互作用产生区域性构造体系

板块构造与构造体系的相互关系，一方面表现为巨型星球级构造体系控制板块构造的展布与运动，另一方面又表现为板块构造的运动与作用产生具有成因联系的一套共生组合的地质构造（形迹与建造），即形成低等级、低序次的构造体系。由于这些构造体系只具有区域性展布，即只分布在板块与板块能够相互作用的地带，本书作者称其为区域性构造体系，以示与全球性的星球级构造体系相区别。当然，区域性构造体系并不一定是板块相互作用的产物。例如，由于某些岩体或结晶岩地块的存在，以致边界条件在这里发生改变，岩块受力以后产生的区域性应力活动方式也会形成区域构造体系，如某些旋扭构造或山字型构造等。

板块与板块的相互作用不仅可波及广大空间（例如印度板块、太平洋板块与欧亚板块的相互作用几乎波及整个亚洲地区），而且经历了较长时间的发展。这样，与板块构造相互作用相互联系的往往就不单是一个构造体系而是多个构造体系的形成与发展。例如，由李四光厘定的华夏系和新华夏系实际上是自印支期以来，滨西太平洋地区由于老、新太平洋板块（前者称为伊佐奈奇板块）向 NNW 向或 NWW 向斜向俯冲，亚洲大陆板块向 SSE 或 SEE 斜向逆冲长期作用的产物。总体表现为太平洋板块向 N、亚洲大陆向 S 形成左行 SN 向对扭的平面构造应力场，这就是李四光所确定的多字型构造体系。黄汲清把这套 NE 向构造称为太平洋式构造，意指它们是太平洋构造域的产物。我们不妨把它称为华夏方向构造序列（华夏系、新华夏系、华夏式），它代表在左行对扭作用下华夏方向构造连续发展的序列，是伴随两大板块相互作用连续发展的序列（图 2 - 15）。同样，在我国西部，特提斯板块与中国大陆或欧亚大陆板块相互作用产生了区域性 EW 向构造及以后右行南北向扭动而形成 NW 向的西域系或古河西系。在新生代期间，印度板块向 N、中国大陆中部向 S 的右行产生了 NNW 向河西系、北西向左行压扭性构造（即本书所命名的新河西系）和青藏缅泰马印尼歹字型构造，它们也构成一个连续发展序列（图 2 - 15）。它是特提斯 - 喜马拉雅构造域的产物，黄汲清曾称之为“特提斯式构造”。

板块构造的相互作用还应该区分是两个板块间的相互作用还是三个板块间的相互作用。前者如现今的太平洋板块与北美板块之间的相互作用，后者如印度板块、欧亚板块与太平洋板块之间的相互作用。显然，两个板块间相互作用所产生的板块构造变形相对要简单一些，而三个板块之间的相互作用所产生的板块构造变形相对要复杂一些。例如，太平洋板块与美洲板块相互作用所产生的构造变形主要是呈南北向展布的海岸山脉、山弧与盆岭构造，而整个南北美洲内部的板内变形相对是比较简单的；与之相比，亚洲大陆处在三大板块（欧亚板块、菲律宾 - 太平洋板块、印度 - 澳大利亚板块）相互作用之中，板内存在多个构造域的复合，因而板内变形是极其复杂的，并表现出各种复合构造的特点。

下文将以印度板块、欧亚板块与太平洋板块相互作用为例，说明板块相互作用所产生的区域构造体系。

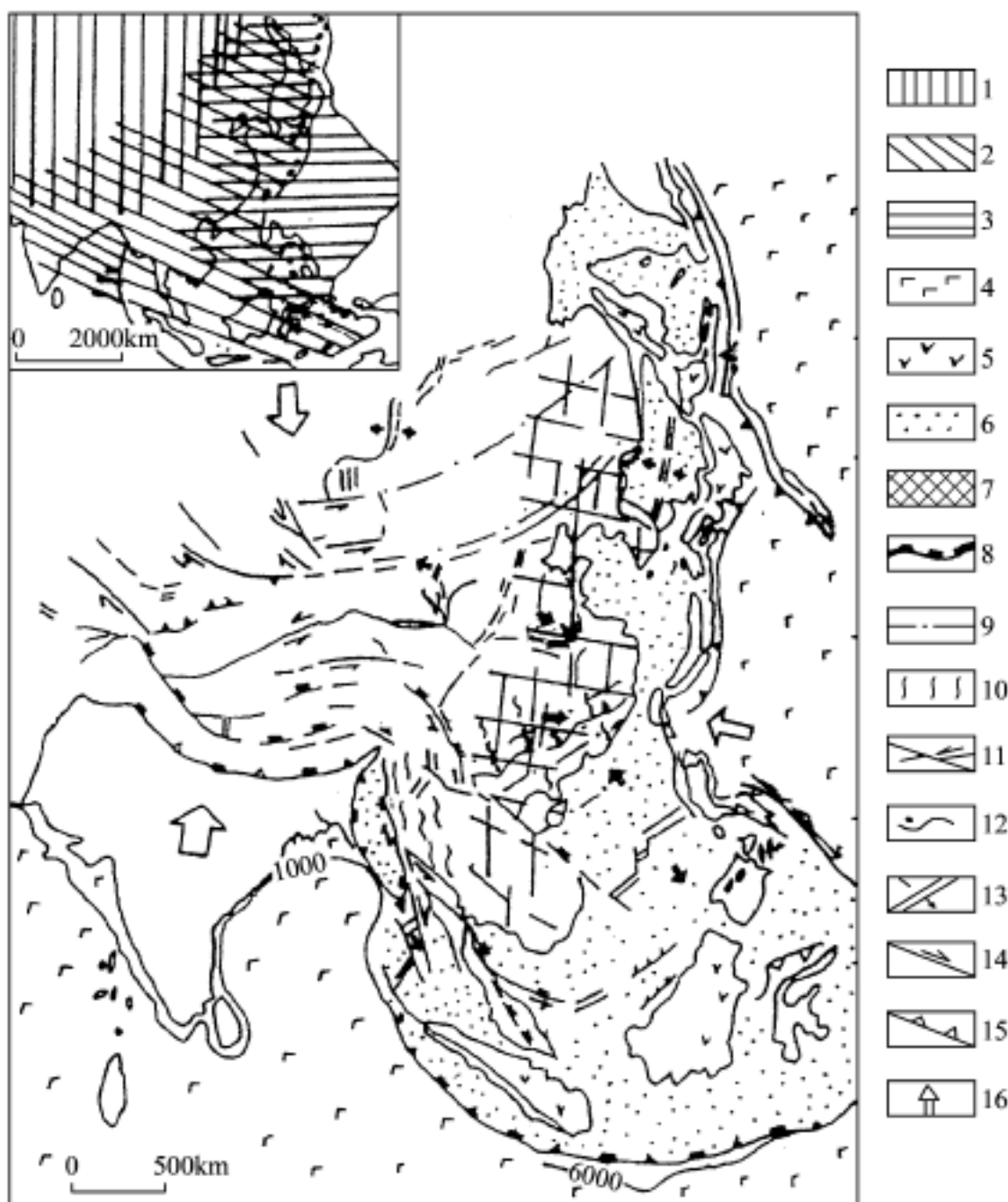


图 2 - 15 亚洲东部复合构造域与复合构造型式展布示意图

(底图据 Tapponnier. P, 1986) [37]

Fig 2 - 15 Sketch map of compounding tectonic domains and compounding tectonic type in East Asia

1—古亚洲构造域；2—喜马拉雅 - 特提斯构造域；3—库拉 - 太平洋构造域；4—大洋分布区；5—大陆边缘弧（岛弧）复合构造带；6—大陆边缘陆表海和边缘海（裂谷盆地）复合构造带；7—大陆边缘多字型复合构造带；8—歹字型复合构造带；9—EW 向复合构造带；10—SN 向复合构造带；11—X 型复合构造带；12—山字型复合构造带；13—伸展构造和扩张轴；14—走滑断层；15—地缝合带（空心）与俯冲带（实心）；16—板块运动方向

李四光生前建立了华夏方向的构造序列（华夏系、新华夏系和华夏式构造）和河西系 - 古河西系构造序列。本书作者根据李四光身后新发现的地质事实，建立了两个构造体系即似新华夏式伸展盆海系和新生代 NW 向扭动构造体系。在本章中，将对这些构造体系作系统的论述。

第一节 华夏方向构造序列

华夏方向（即指 NE 向）的构造早在 1929 年发表的《东亚一些构造型式及其对大陆

运动问题的意义》一文中即已为李四光所论述，当时李四光用震旦式 (sinoid) 褶皱来称呼这些广泛分布于中国东部的 NE 向褶皱^[38]。震旦是古中国的简称。可能是由于地层上有震旦系的称呼，为了避免将 NE 向褶皱误会成震旦纪时形成的，后来李四光把 NE—NNE 向构造改称为华夏方向的构造。

一、华夏系、新华夏系和华夏式构造体系

在新中国成立后发表的《地质力学概论》中，李四光划分出华夏系、新华夏系和华夏式构造，他写道：“中国境内，尤其是中国东部和东南部，乃是东亚濒太平洋区，经常出现属于多字型的两种褶皱带，其一走向东北，称华夏系构造；另一走向北北东（一般由北 18 到 25 °东或偏大）为新华夏系构造”。华夏系构造一般是比较古老的构造体系，在某些地区的白垩纪或第三纪的地层中有时也出现这一类型的构造，为了把这一类型的构造和古老的华夏系构造分开，李四光称它为华夏式构造。新华夏系构造肯定是较新的构造体系。李四光还会划分出中华夏系褶皱，其区域走向朝着北 30 °~40 °东左右方向展布。他同时指出中华夏系与新华夏系存在逐渐过渡的情况，因而中华夏系能否成立仍需进一步研究^[5]。大概是不易准确划分，在后来发表的《天文、地质、古生物》一书中就再也没有提中华夏系了^[19]。

由于华夏系、新华夏系和华夏式构造及其 NW 向配套构造在区域平面上组成左行平行雁列的多字型展布，李四光据此反演地壳运动的程式，认为它们是中国大陆向 S、太平洋向 N 作左行 SN 向水平扭动的产物。由于华夏系、新华夏系的构造方位有随时代变新逐渐向 N 偏转的趋势，于是在一些地质力学工作者中间形成一种华夏系、中华夏系、新华夏系是由于一对左行 SN 向扭动的水平构造应力场逐渐扭动递进变形的模式。按照这种力学模式，时代越新其构造方位应该越偏北，但新生代才形成的华夏式构造其构造方位是更偏东而不是更偏北，与上述模式不符。

在李四光建立华夏方向构造体系的那个时代，板块构造理论尚未出现或刚刚出现而尚未系统地传入中国。当时在中国地质学界尚未有太平洋板块向中国大陆俯冲的概念。虽然李四光用构造型式的平面展布格局来反演中国东部、西太平洋的地壳运动方向与太平洋板块、亚洲大陆板块相互在平面上的运动方向相一致，但却未能进一步揭示大陆构造与大洋构造及其运动在三维空间、时间演化进程中的相互关系。随着太平洋洋中脊和太平洋板块格局、活动历史的查明，现在应该有条件运用太平洋板块中新世代以来的运动历史来对东亚大陆构造体系的形成与演变作进一步的科学解释。

图 2 - 16 为古太平洋地区侏罗纪以来的古构造复原图^[39]，从左上图可知侏罗纪末伊茨奈崎板块是朝着 NWW 方向向亚洲大陆俯冲的，它在大陆上相应地形成 NNE 走向的挤压性构造，早燕山期亚洲大陆东部新华夏系 NNE 向巨型隆起和凹陷应该是这一时期太平洋板块俯冲挤压的产物；至于它在平面上的左行雁列，则是太平洋板块相对向北，亚洲大陆相对向南左行水平扭动的结果。进入白垩纪末—古近纪初即新生代开始的时候，伴随太平洋 NEE 向洋中脊的扩张，太平洋板块向 NNW 方向运动和俯冲，中国及亚洲东部出现了 NEE 走向的挤压性构造（褶皱和断裂）（图 2 - 16），使白垩系和古近系卷入了变形，这就是华夏式构造。45Ma 以后，由于近 NS 向（NNE 向）的太平洋洋中脊的扩张（图 2 - 16 左下图），太平洋板块的运动方向改为向 NWW 时，这时在东亚大陆边缘再次出现 NNE 向

的褶皱和逆冲断裂，这就是晚近时期的晚期新华夏系。由于在平面上亚洲大陆仍然相对向 S、太平洋板块仍然相对向 N，因而晚近新华夏系仍然在平面上呈左行平行雁列展布。

这样，把亚洲大陆东部的华夏方向构造序列的产生、演化与太平洋洋中脊扩张的历史变化、太平洋板块运动方向（即挤压方向）的变化联系起来，就解释了华夏方向构造序列其构造方位随时间而变化的原因，克服了过去用平面 SN 向力偶水平扭动所产生的递进变形所不能解释的问题。也就是说，华夏方向构造序列确是东亚大陆与太平洋板块自印支期以来长期相对作用（剖面上的俯冲、仰冲、挤压和平面上的左行水平扭动）和演化的产物。大陆上构造体系的构造方位（主压面的方位）是随着大洋中脊的扩张方向和大洋板块对大陆的挤压运动方向的变化而变化的，而不是水平扭动递进变形的产物。

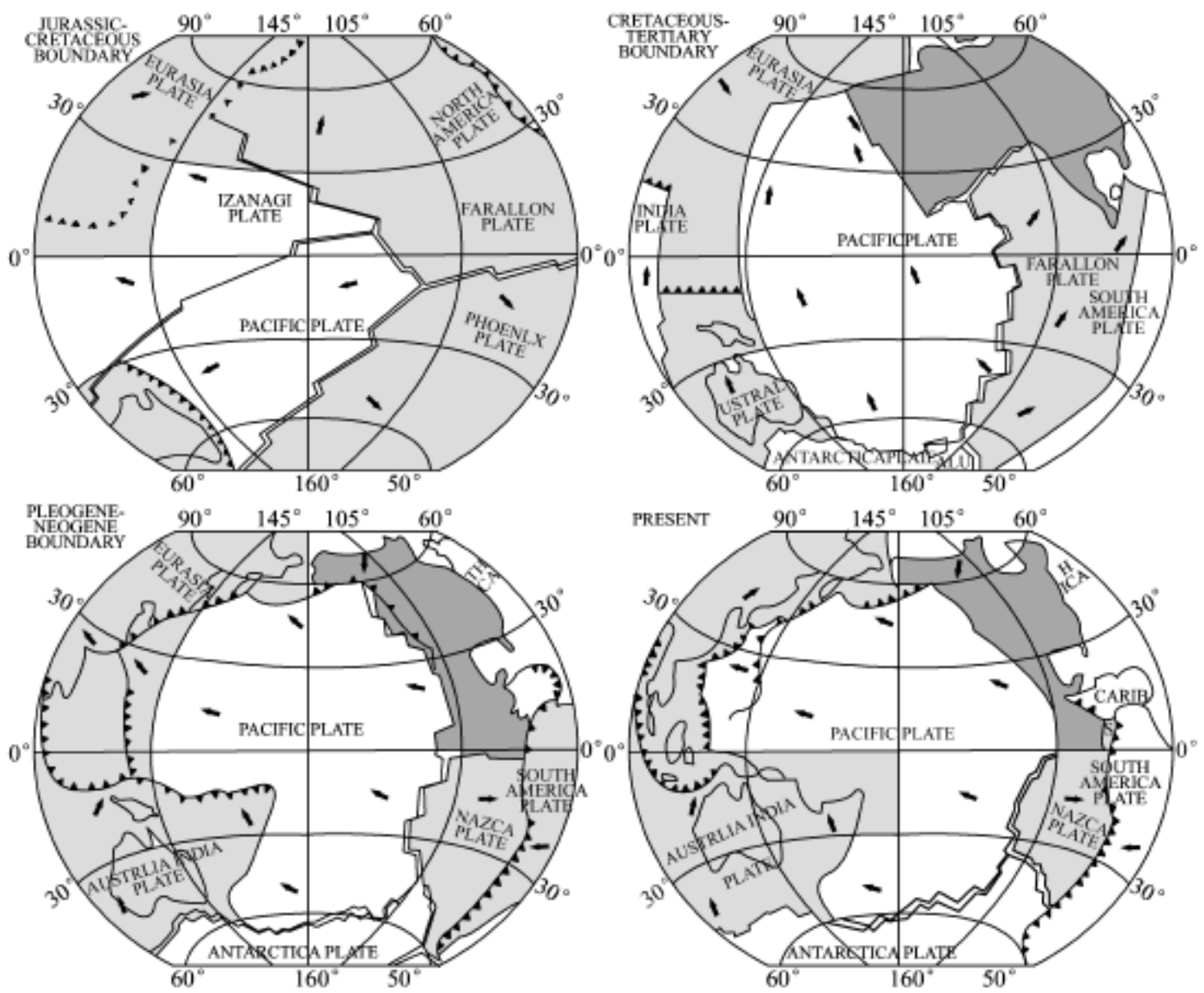


图 2 - 16 古太平洋地区侏罗纪以来的古构造复原图^[39]

Fig. 2 - 16 Maps showing the paleo-tectonic reconstruction of paleo - pacific region since Jurassic period
左上角为侏罗纪—白垩纪分界时期（Jurassic-Cretaceous Boundary）；右上角为白垩纪—第三纪分界时期（Cretaceous—Tertiary Boundary）；左下角为古近纪—新近纪分界时期（Paleogene—Neogene Boundary）；右下角为现代（Present）Eurasian Plate—欧亚板块；Australia-India Plate—澳大利亚 - 印度板块；Antarctica Plate—南极洲板块；South America Plate—南美洲板块；Nazca Plate—纳兹卡板块；Izanagi Plate—伊佐奈岐板块；Pacific Plate—太平洋板块；Phoenix Plate—凤凰板块；Coco Plate—可可板块；North America Plate—北美洲板块；Farallon Plate—法拉龙板块；Caribbean Plate—加勒比板块

二、似新华夏式伸展盆海系

晚中生代（白垩纪）以来，中国东部及西太平洋大陆边缘发育的一系列 NNE 向、NE 向乃至 NEE 向的巨型右行张扭性断裂（地堑、半地堑）在平面上组成平行雁列的多字型构造，其深部发育同走向的上地幔隆起和基底拆离，地表常出现变质核杂岩和大型低缓倾角的伸展剥离断层。这一套构造以其张扭性质而无法作为主压面归入新华夏系或华夏构造体系，但其 NNE—NE—NEE 间的区域走向都可归入华夏方向构造系列，这是李四光生前未能加以确定的一个新的构造体系。本文作者^[40]根据新发现的地质事实，考虑其构造组合和形成的力学机制自成体系而将其独立建系，并命名为似新华夏式伸展盆海系。

1948 年李四光在他的《新华夏海之起源》一文中把渤海、黄海、东海都归入新华夏系海，意指这些海盆都受新华夏系控制^[41]。自 20 世纪 60 年代以来，地质地球物理调查表明：第一、第二、第三新华夏系沉降带自晚白垩世末至第三纪以来都是一些巨型张扭性断陷，并非挤压性凹陷盆地，这已是我国地质界的共识^[42~44]。许多地质力学工作者曾用巨型新华夏系二次纵张来解释其成因，但是它在中国东部及西太平洋的区域性展布、发育的构造部位（并不限于复式背斜隆起轴部）和等级规模都无法用新华夏系的二次纵张来解释，它们在空间上的展布远及东亚的内部也无法都用洋陆俯冲的弧后扩张来解释。它们主要是东亚及西太平洋大陆边缘陆缘扩张的产物，与新华夏系有着完全不同的区域构造应力场和地球动力学机制。它是一个复合叠加在原来新华夏系之上的独立的区域构造体系，它的主要构造成分都继承了原来新华夏系的构造成分，它的平面构造组合型式也极似新华夏系，但均已发生了力学性质和应力活动方式的改变，特别是原来压剪性的新华夏系主压面改变为伸展性张剪性断面，控制着中国东部及西太平洋晚白垩世—古近纪以来的许多巨型断陷盆地、陆表海和边缘海（图 2 - 17）。为了说明它与新华夏系的区别和联系，也考虑与李四光已明确这些海盆受新华夏系控制的概念相衔接，本文作者建议把这一独立的区域构造体系命名为“似新华夏式伸展盆海系”（Paraneocathaysian extensional basins and seas system）^[40]。下文着重阐述这一新建立的区域构造体系的基本特征及其形成演化的力学机制，并指明建立这一区域构造体系的理论与实践意义。

（一）新华夏式伸展盆海系的基本特征

（1）平面上总体呈 NNE—NEE 向平行雁列展布着一系列右行张扭性断陷盆地，它们除追踪原先的新华夏系主压面以外，有时也沿新华夏系的 NNW 向大义山式构造、NEE 向泰山式构造和 NWW 向横向张裂开裂，因而整个构造型式保持了原新华夏系的多字型构造式，但其主体虽仍呈 NNE—NE 向展布，其力学性质已发生张性改变（图 2 - 17）。

（2）在这些张扭性断陷盆地中，自晚白垩世末期—古近纪以来，在陆内及陆缘沉积了一套河湖相、冲洪积相沉积。在陆表海及边缘海则沉积了一套滨海相、浅海相、半深海相乃至深海相沉积（后两者常见于日本海和南海海域）。这些陆缘碎屑沉积层中，夹有多层火山岩，其时空分布大体有如下特征：晚中生代主要为中酸性钙碱性火山岩，晚白垩世末至古近纪则变为亚碱性乃至碱性玄武岩；空间上在陆内裂谷和陆缘多为多层多旋回的碱性玄武岩和拉斑玄武岩。在这些玄武岩中不乏深源地幔包体，它们多半由二辉橄榄岩或辉岩所组成，反映出深源物质沿断陷盆地上涌。在岛弧的一侧分布有高铝玄武岩和岛弧拉斑玄武岩^[42~44]。

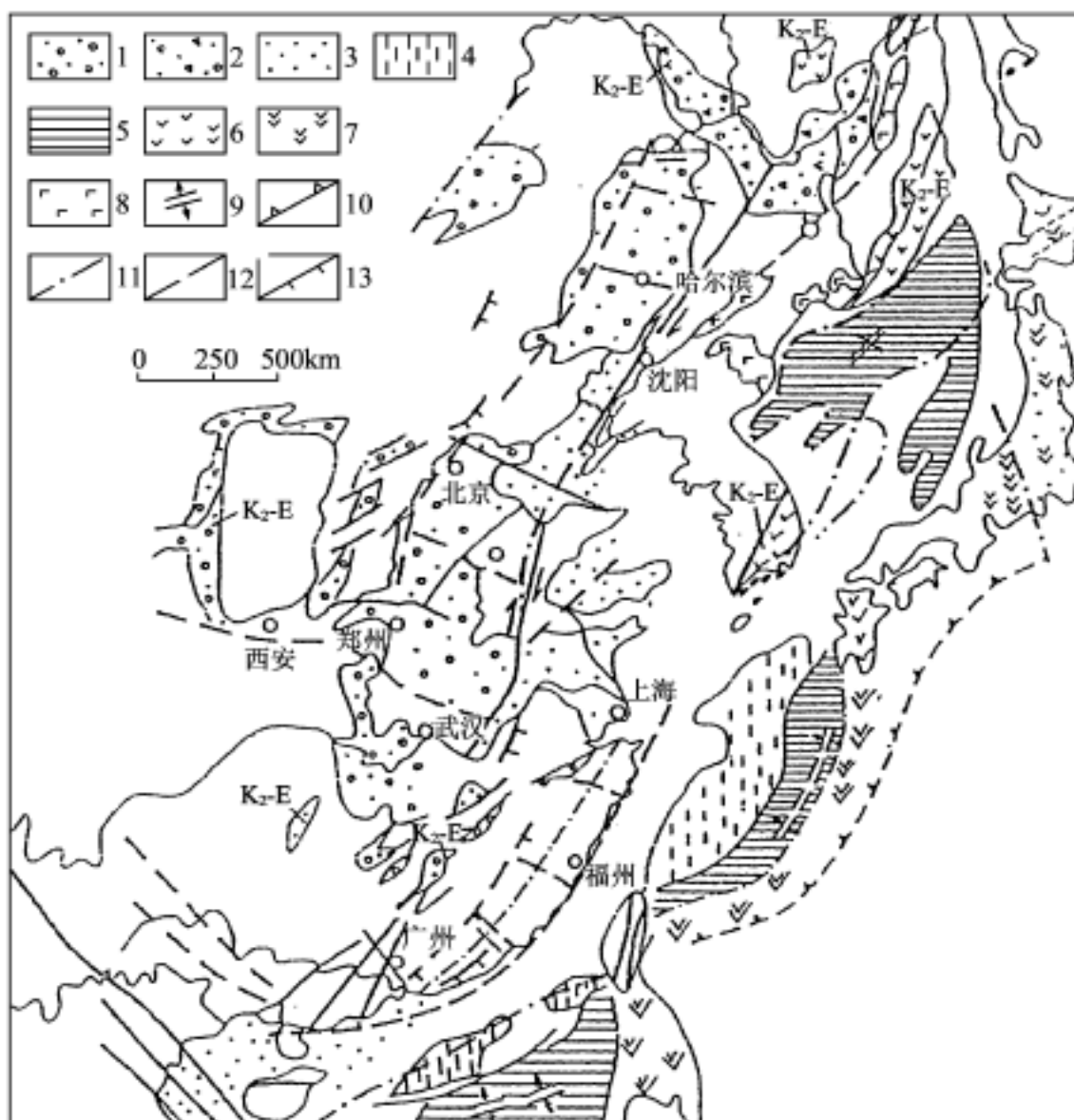


图 2 - 17 中国东部及邻区晚白垩世以来新华夏式伸展盆海系展布图^[40]

Fig 2 - 17 Map showing the distribution of the Paraneocathaysian extensional Basins system in East China and its adjacent area

1—新近纪 - 第四纪陆相沉；2—晚白垩世 - 古近纪陆相沉积；3—新近纪 - 第四纪近海沉积；4—大陆架坳陷带；5—洋壳增生张裂区；6—晚白垩世 - 古近纪碱性中酸性火山岩；7—岛弧玄武岩；8—碱性玄武岩（晚白垩世以来）；9—微型扩张轴；10—俯冲带；11—物探推测断裂；12—张剪性断裂；13—伸展剥离断层

(3) 对应于地壳表层，每一个陆内或陆缘裂谷盆地，岩石圈深部常存在一个上地幔隆起，上地幔顶部常有一个异常的地幔垫^[42]。在异常地幔垫的上方则有一个由张性正断层或张扭性平移 - 正断层阶梯式断层组成的地堑或半地堑箕状断陷裂谷盆地（图2 - 18），这些张扭性断裂大多是长期发展的同沉积断裂，不仅控制着巨厚的断陷盆地沉积，而且沿断裂活动的上下盘形成一系列滚动背斜、牵引构造和花状构造等。所有这些构造组合反映出它们之间具有成生联系。近年来，在中国东部陆续发现了一些 NNE—NE 乃至 NEE 向的隆起，隆起的轴部经常是变质核杂岩，其翼部则发育了低缓倾角的伸展剥离断层，形成时代多在白垩世至古近纪，如内蒙古赤峰姜子店 - 大城子拆离断层^[45]、辽南金州 - 金石滩伸展剥离断层^[46]、北京东北部的云蒙山变质核杂岩及河防口伸展剥离断层^[47]、江苏茅山伸展构造^[48]。根据作者近年的研究，珠江口盆地的 NEE 向地堑、半地堑箕状盆地实质上也是华南大陆边缘自晚白垩世—古近纪以来隆升和基底拆离的产物。地震剖面揭示在大陆坡上存在近水平的剪切带（图 2 - 19）。中国东部这些地堑、半地堑断陷至少有一部分是

深部 NNE—NEE 向大型基底伸展拆离构造上盘的低序次低等级构造，它们一致地反映出受控于一个具有垂向挤压应力和 NW—SE 向水平伸展引张应力的区域构造应力场。

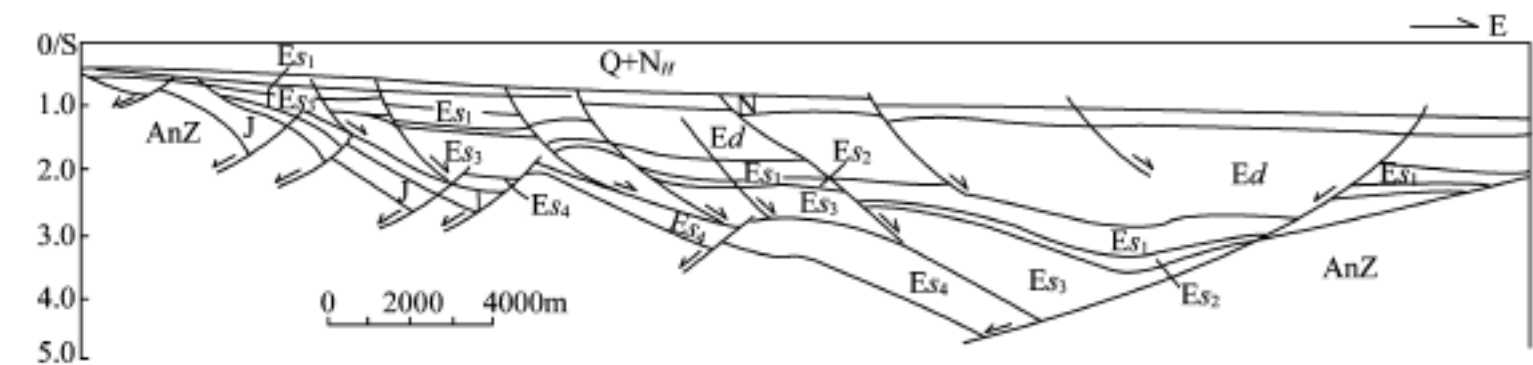


图 2 - 18 华北地堑系中的半地堑箕状断陷^[42]

Fig. 2 - 18 The profile showing the fault depression in a shape like winnowing basket or half - graben located in the graben system of North China

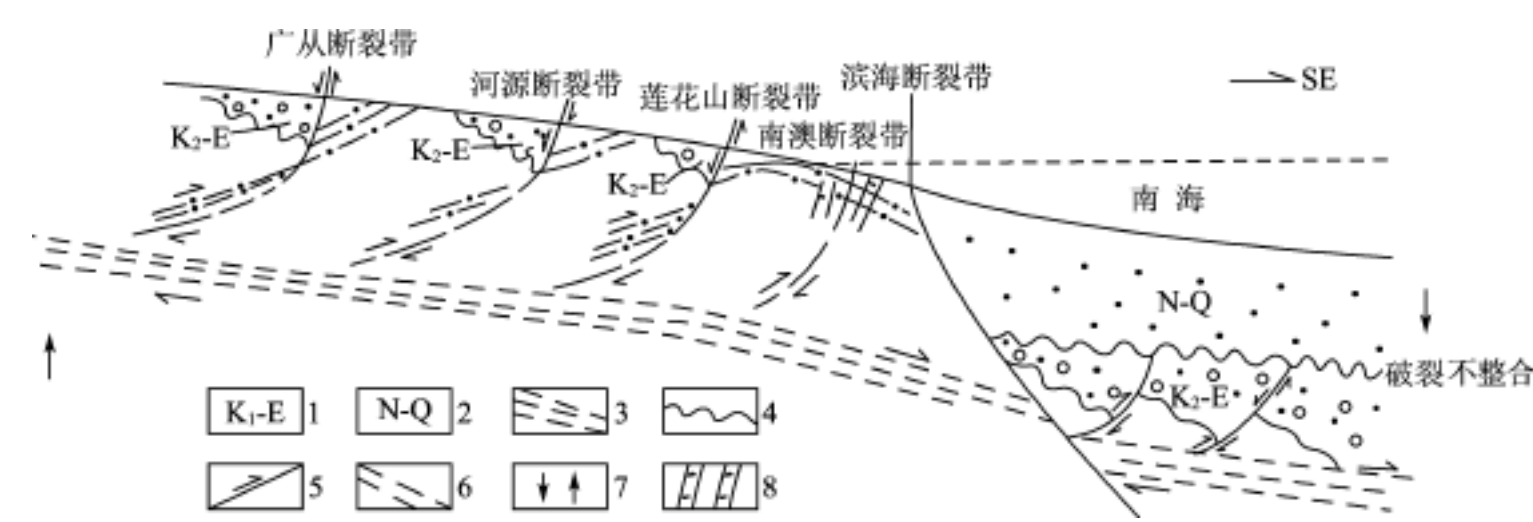


图 2 - 19 南海北部陆缘受似新华夏式陆隆掀斜控制的基底拆离伸展剥离和地堑、半地堑盆地形成示意图^[40]

Fig. 2 - 19 Sketch profile showing the grabens, half-grabens and basement detachment controlled by continental uplifting in the north continental margin of the South China Sea

1—晚白垩世末 - 古近纪陆相断陷沉积；2—新近纪 - 第四纪海相沉积；3—基底拆离（据广州海洋地质调查局物探资料测得在大陆坡处存在一近水平剪切带）；4—不整合面；5—脆性断裂；6—韧性剪切带（糜棱岩带）；7—升降运动；8—基性岩脉

（4）新华夏式伸展盆地自晚白垩世—古近纪以来经历一个由彼此孤立的断陷发展到成面成带的巨型沉降带。由西向东由陆向海扩张伸展，由陆内断陷发展成出现陆表海、边缘海的演化过程：晚白垩世—古近纪时主要为彼此孤立但已经排列成行的陆内断陷所组成，新近纪时在现今的鄂霍次克海、日本海、渤海、黄海、东海和南海开始沉陷为海。在这些陆表海和边缘海中多有沉沦的陆块，自北而南有中鄂霍次克隆起、大和隆起、东海前寒武纪基底、西沙、南沙地块等。

（二）新华夏式伸展盆地形成演化的动力学机制

东亚 - 西太平洋大陆边缘构造带由陆缘扩展造成的内带和由太平洋 - 菲律宾板块洋壳俯冲带组成，具有内张外挤的双带构造^[49]。新华夏式伸展盆地位于其内带，是内带的主要构造组成。它具有比较复杂的区域构造背景和地球动力学机制。通过整个晚中生代—

新生代亚洲 - 西太平洋区域构造背景和地球动力学系统的分析，新华夏式伸展盆海系是由以下两种区域地球动力系统形成的：

1. 大陆动力学系统

现今东亚 - 西太平洋边缘自晚白垩世即开始了陆缘扩张式（刘昭蜀、杨树康，1987）的区域性裂解作用^[50]，任纪舜等^[51]称其为裂解性大陆边缘。这一区域性裂解标志的地质表现主要有：①在我国东部许多张性断陷中，上白垩统和古近系是连续沉积的；②闽粤沿海这一时期的 NNE 走向的晶洞碱长花岗岩（同位素年龄值为 106.8 ~ 73Ma）^[52]向东北延伸可及上海郊区和韩国（洪大卫面告），向南尚可见于珠江口外大陆架的钻孔中（广州东部石油公司钻孔和测年资料），依据陆缘带白垩系、古近系、新近系、第四系依次自北西南东展布，可知在时间上陆缘扩张形成的断陷盆地自陆向洋依次变新，并一直延续至新近纪、第四纪。显然，它的起始时间早于印度板块与欧亚板块汇聚碰撞的时间——始新世，而空间上远及东北亚的白令海和整个西北太平洋，因而它不可能一开始就是印度板块与欧亚板块碰撞时所产生的挤出效应的产物，应该是亚洲独立的大陆动力作用的产物（图 2 - 20）。再者，由于古太平洋板块的俯冲，早燕山期东亚大陆边缘曾是一个挤压性的大陆边缘。在造山期后，即晚燕山期后的白垩世末—古近纪初，大陆造山期后陆壳加厚后向洋一侧产生张力，燕山期强烈的岩浆活动也使陆壳热膨胀向洋一侧产生侧向张力，以及燕山期加厚的岩石圈和山根产生拆沉和地幔顶蚀作用而产生陆壳隆升和侧向伸展等地球动

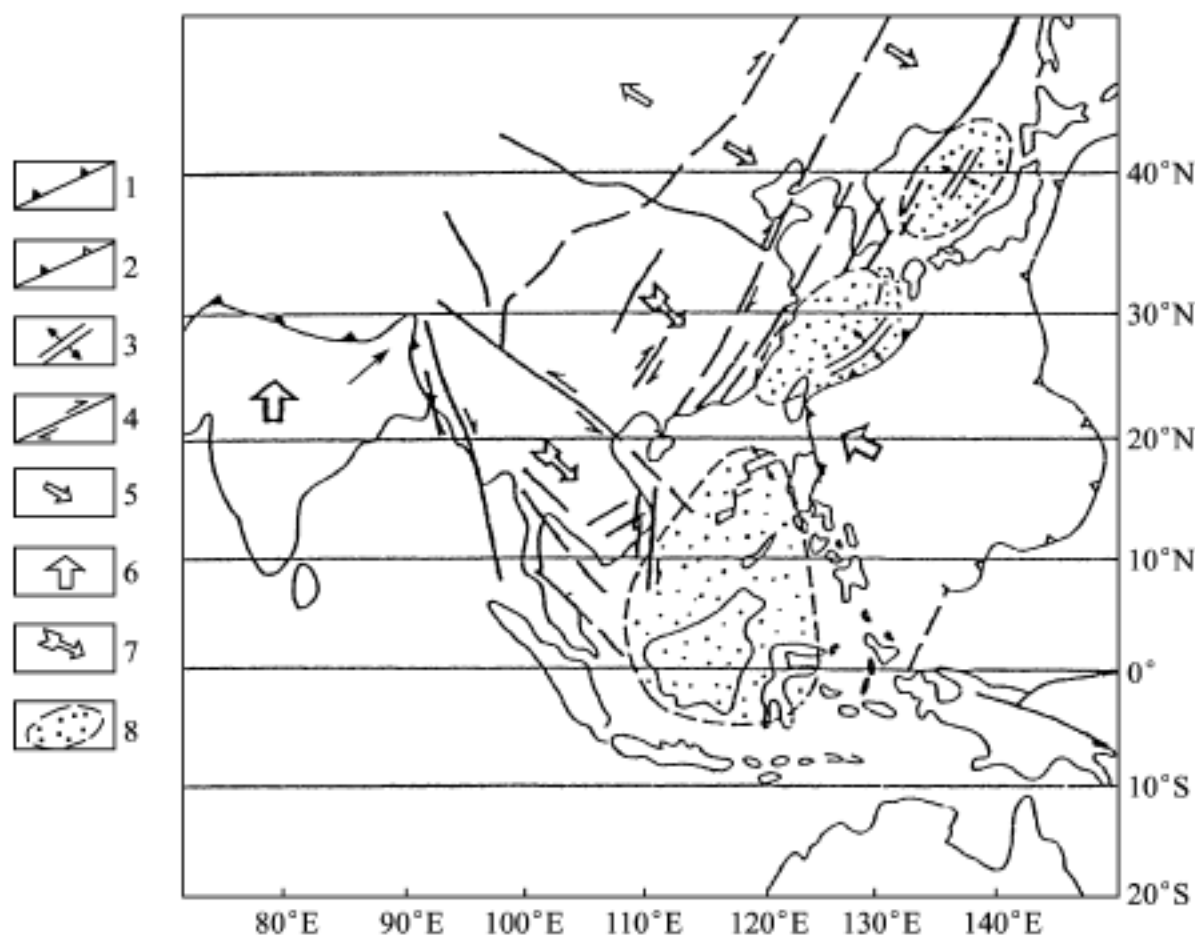


图 2 - 20 形成似新华夏式伸展盆海系的地球动力系统
(据 Tapponnier, Fukao 等资料编制, 1986)

Fig. 2 - 20 Map showing the geodynamic system of the formation of Paraneocathaysian extensional basins system
1—地缝合线；2—俯冲带；3—扩张轴；4—右行张剪性断裂；5—燕山期后造山侧向张力系统；6—板块运动方向；7—叠加的板内碰撞效应——挤出方向；8—地幔柱边缘海盆

力学因素，导致由陆向洋的陆缘扩张^[40]。这是似新华夏式伸展盆海系形成的第一个地球动力学机制。

2. 由印度板块与欧亚板块汇聚碰撞所产生的地球动力学系统

自始新世以来开始的印度板块与欧亚板块的汇聚碰撞在东亚地区引起的挤出效应确实存在。它除形成区域性的北东向和北西向两组剪切走滑的滑移场外，亦沿 NNE 向发生右行张剪性断陷，以及由于剪切走滑性断裂，南海受控于剪切拉分断陷，都说明这种由于板块会聚碰撞所产生的板内挤出效应的存在。除了区域构造应力场上的空间联系以外，前述伸展盆海系的成盆时间和印度板块与欧亚板块碰撞时间也存在一个因远离印度板块而推后的规律：古菲律宾海（即西菲律宾海）原在南海的东南侧，形成于古新世—始新世（60~35Ma），南海形成于渐新世—早中新世（32~17Ma），日本海形成于晚渐新世—中中新世（25~15Ma）^[53]，鄂霍次克海形成于古近纪末^[54]，边缘海的这种时空上的分布规律可能是一种板块碰撞效应（图 2-20）。也是新华夏式伸展盆海系形成和演化的重要地球动力学机制。

综上所述，前述两种动力机制其总体效应都表现为 NW—SE 方向上的水平伸展，具有统一的 NE—SW 方向挤压的区域构造应力场。其叠加的总体构造效应表现为亚洲东部向西太平洋扩张。

（三）似新华夏式伸展盆海系与新华夏系构造带的区别和联系

从上文我们可以进一步归纳出新华夏式伸展盆海系与新华夏系区域构造带的区别和联系。

（1）两者形成的区域构造背景和地球动力学系统完全不同：在现今千岛弧 - 马里亚纳弧 - 汤加弧以东的西北太平洋存在侏罗纪的古洋壳（其热流值一般为 $41.87 \sim 54.43 \text{ mW/m}^2$ ）^[54]，其东界为皇帝海岭 - 夏威夷海岭，这是古太平洋洋壳，它并非是由新生代东太平洋中脊向西扩展的产物，而是晚古生代 - 中生代古太平洋的残留洋壳。而新华夏系是古太平洋板块沿 NWW 方向向东亚大陆俯冲，从而沿 NNE 走向的断裂发生斜向俯冲和 45Ma 以来菲律宾 - 太平洋板块沿 NWW 方向向东亚大陆俯冲所产生的。整个东亚 - 西太平洋在燕山期是一个挤压性大陆边缘，新华夏系构造带是一个左行压剪性构造。笔者对广东几条著名的断裂带，诸如长乐 - 南澳断裂带、政和 - 大浦（莲花山）断裂带、河源断裂带、恩平 - 开平断裂带、吴川 - 四会断裂带和罗定 - 广宁断裂带的研究成果表明，其早期（侏罗纪）为低缓倾角的韧性剪切带，晚燕山期以来的脆性压剪带叠加其上，它们都是左行压剪性构造（图 2-18）。这个时期所形成的一些巨型沉降带是挤压性拗陷（尽管这些挤压性拗陷的边缘和腹地也常常为同走向的断裂所切割），是新华夏系构造带的重要组成部分和负向构造单位，也有一张性断陷，多发育在新华夏系的横向张裂配套构造和隆起带的二次纵张之中，整个新华夏系可以说是在洋陆俯冲的同时，陆盘居于主导地位，由大陆内部腹地推波助浪式地仰冲到古太平洋板块之上。这一挤压性的大陆动力学系统造成以新华夏系为主体并与纬向构造相联合的向东南凸出的岩浆岩带，它们的时代由北西向南东变新和由地球物理深部探测指出的深入到大陆内部具层状产出的花岗岩板状体都很难用洋陆俯冲大洋板块是主动盘的模式来解释，而用大陆为主要变形机制、陆壳仰冲、顺层剪切变形机制解释则较合理，陆壳中低速层的存在则可进一步证明深层次的剪切深熔的可能性。总而言之，新华夏系形成的区域构造背景是陆内的区域性挤压，陆

壳的滑移体制是新华夏系形成的主要机制^[55]；而晚白垩世末—古近纪开始的似新华夏式伸展盆海系列有着完全不同的区域构造背景和力学机制。如前所述，它是在燕山期后后造山期区域构造背景已经由区域性挤压改变成区域性陆缘扩张的情况下发生的。

燕山期的陆缘挤压造成的陆壳加厚、岩浆热膨、岩石圈山根的形成等因素才导致后造山期的陆壳隆升、向洋扩张和拉伸减薄，这就是前后两个地球动力学过程之间的联系。

(2) 新华夏系是左行压扭性构造带，具有多字型构造型式；似新华夏式伸展盆海系是右行张扭性构造带，虽然也有多字型的构造型式，但属于张性的多字型构造型式，除了北西向断裂常转化为压扭性结构面外，几乎所有其他构造成分的力学性质都发生了张性改变，这就是两者在结构面力学性质方面的区别。但是两者有一个互相转化、力学性质互换的演化历史，这就是它们之间的联系。新华夏式伸展盆海系继承、追踪、归并了原来燕山期的新华夏系的构造成分，特别表现出它的控盆构造原来都是新华夏系的构造成分（图 2 - 17）；但是，它不仅仅是继承了原来新华夏系的构造成分、构造型式并使它们发生了张性改变，而且在它的伸展过程中还产生了一系列新生的构造，特别是同沉积的准同生构造（褶皱构造和断裂构造），这些新生的共生构造组合具有成生联系。同时似新华夏式伸展盆海系又受到晚于它的晚近时期的新华夏系的叠加改造，表现为这些似新华夏式伸展盆海系的盆缘或盆内常被后期的新华夏系左行压扭性断裂所逆冲切割。新华夏系与似新华夏式在时空上的互换反映了喜马拉雅构造域和太平洋构造域在时空上的互换。

(3) 在形成时间上，新华夏系既存在于燕山期，也存在于喜马拉雅期和新构造时期，而似新华夏式伸展盆海系主要形成于晚白垩世末—古近纪以来。由于中国东部长期处于欧亚板块、特提斯 - 印度板块与库拉（伊泽纳茨） - 太平洋 - 菲律宾板块的相互作用之中，特提斯 - 印度板块的向北推挤所导致的东亚大陆向东挤出的构造逸脱可能并不限于喜马拉雅期，当古、中特提斯关闭的时候，中国东部可能也存在陆缘扩张和由此产生的 NNE 向右行张扭性断陷，它们叠加在已存在的印支期华夏系和早期新华夏系的主压面之上，由此可追踪似新华夏式伸展盆海系的形成演化历史，它有可能周期性，最早两次发生于后印支—早燕山期的晚三叠世末—早侏罗世初和早燕山期造山期后的晚侏罗世末—早白垩世初。

综上所述，似新华夏式伸展盆海系与新华夏系是两个既有联系又有区别的独立的区域构造体系。无论从区域构造背景、区域构造应力场，还是从组成构造体系变形场的构造成分的结构面力学性质、共生组合和成生联系来看，似新华夏式伸展盆海系都是自成体系的，把它作为一独立的区域构造体系从原来的新华夏系中筛分和独立出来是有充分的科学依据的，笔者之所以建议用似新华夏式伸展盆海系来命名这一新的构造体系，是考虑到它与新华夏系既有区别又有联系（是由原来的新华夏系经后造山期的伸展作用演变而来的，继承了原来新华夏系的构造型式）这一特征的。

众所周知，似新华夏式伸展盆海系是我国东部新生代主要控盆构造，也是油气盆地的所在，是寻找新生代油气资源的主要目的地，详细准确地研究似新华夏式伸展盆海系的地质地球物理特征，对石油天然气和地热、地下水资源的勘探开发具有重要意义。它的区域构造背景及伸展性质对我国东部，特别是沿海地区及海域的环境水文地质、环境工程地质、地震地质和地质灾害也具有不同的控制意义，因而把它作为一个独立构造体系来加强研究，也具有重要的环境地质和防灾减灾的意义。

第二节 西域系序列

在我国西部及邻近地区，由于印度板块对中国大陆的碰撞挤压，印度板块向北，中国大陆中部相对向南，从而形成一个构造体系的演化序列，即由 NNW 向的河西系、NW 向扭动构造体系和青藏滇缅泰马印尼歹字型构造体系组成一个演化序列。由于它主要发育于我国西部地区，在这里借用张文佑命名的西域系名称，称这个演化序列为西域系序列。

一、河西系

李四光将发育于河西走廊—陇西地区的一套 NNW 向的构造体系命名为河西系，它们由走向 $N15^{\circ}\sim 30^{\circ}W$ 的褶皱、冲断面和其他挤压构造形迹及其配套的张扭性构造组成，也构成多字型构造型式。它们在祁连山区以斜接的关系与古老的祁连山褶皱（古河西系）相复合。它们在祁连山以东地区，则在白垩系及可能属于第三纪的岩层中形成紧密褶皱和逆掩断层，走向仍然在 $N15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的范围内。这一构造体系，连同由张掖民乐槽地、亶源槽地、西宁槽地、循化槽地及其之间的隆起带所雁行排列的凹褶，李四光认为它们与中国东部的新华夏系褶皱和祁吕弧东翼所包容的雁行排列遥相呼应，彼此形成对称的形势。但河西系的等级规模和分布的广袤性都无法与中国东部的新华夏系相比拟。如果说它们分别是由左行水平扭动（东部）和右行水平扭动（西部）所形成的，扭动的范围和规模是极不相等的。如果我们注意到中国西部印度板块向 N 的推移，根据印度洋海底磁条带宽度的计算，它已经向北嵌入 2000 km 以上，也就是说中国西部处在巨大的水平压缩之中，中国东部所受到的缩短要少得多，中国西部印度板块与青藏的接触是 EW 走向的南北挤压，中国东部与西太平洋则主要是 SN 向的对扭。这大概就是中国东西部的扭动构造体系呈不对称的规模和不同等级的动力学上的原因。

二、青藏滇缅泰马印尼歹字型构造体系

其头部影响青海、西藏东部、川滇间的“横断山脉”地区、云南西北部和缅甸北部与印度接触地带，头部外围褶带散布在昆仑山以北，包括阿尔金山脉、祁连山西南接近柴达木盆地的部分、库库诺尔岭和昆仑山脉往东南转折部分。头部的主要组成部分分布在昆仑山以南，包括可可西里、巴颜喀拉、唐古拉、念青唐古拉、冈底斯山脉东段、伯舒提岭、帕特凯等山脉。这些巨大复杂的弯曲褶带一般褶皱幅度甚大，并有成对大型垂直断裂和横冲断裂伴随，它们大致成相似的弧形，在昌都、玉树地区转弯颇为显著，在帕特凯一带转折尤为剧烈。从云南西北和缅甸北部往南，褶皱走向逐渐转向正南，成为这个歹字型构造的中部，往南从此分为东西两支：东边一支的主干为金沙江与澜沧江之间的宁静山脉。它以东的沙鲁里山、大雪山和以南的无量山、哀牢山都属于这一支。这一支逐渐转向东南伸展，进入越南和老挝北部，直达海边。西支是主要的一支，包括怒山、高黎贡山以及其以西走向南北的诸山脉，直至缅甸西部的阿拉干约马。这些 SN 向的山脉都显示在晚近地质时代遭受过强烈的东西向挤压，同时也有与褶皱平行的大断裂。更南，它们之中有一条掠过泰国南部，一直到达马来半岛，这一支与东支之间夹着呵叻高原，三叠纪和侏罗纪岩层平覆其上。

三、中国及西南邻区的新生代 NW 向扭动构造体系

不仅在中国西部而且在中国东部也发育一套成生时代很新的 NW 向压扭性断裂带。关于这套构造，最早吴磊伯在讨论大义山式构造时曾提及有些地区也具压扭性。后来在区调普查和地质力学研究中，在我国东部陆域和海域陆续发现了 NW 向褶皱和压扭性断裂，其中不少对矿产、地震有重要的控制意义，但又难于归入其他构造体系之中，从而引起地质力学工作者的广泛关注。许多地质同行对其进行了研究和论述^[57~59]。20 世纪 80 年代吴磊伯来广东工作时指示本书作者要研究这套构造体系的归属和动力学机制。20 多年过去了，随着资料的积累和区域研究程度的加深，本书作者终于明确地认识到它是印度板块与中国大陆碰撞在板内所产生的构造体系，主要展布于中国西部，也扩展至中国东部。本文作者著文论述其作为一个构造体系存在的科学依据及其成生发展和形成的力学机制^[60]，现将主要论据阐述于后。

(一) 晚白垩世末、新生代 NW 向扭动构造体系的区域性展布特征

1. 中国西中部：自北而南依次有如下构造带（图 2 - 21）

(1) 阿尔泰 NW 向扭动构造带。卷入褶皱和断裂变形的地层主要为上古生界和侏罗白垩系，与褶皱带平行的 NW 向压扭性断裂带为古近系不整合覆盖而又断切了古近系。断裂带由 NNW 向（右行）和 NWW 向（左行）一对共轭剪切断裂所组成，以 NWW 向压扭性断裂为主，NWW 向压扭性断裂又叠加在蒙古弧的西翼上。

(2) 北天山、祁连山 NW 向扭动构造带。在新疆境内自西疆温泉往南东一直伸向库鲁克塔格山脉。卷入的地层主要是古生界，多数 NW 向压扭性断裂为古近系所不整合覆盖，说明前新生代已有该断裂带，但在沿塔里木盆地北缘则见其切断新近系，说明它控制了新近系沉积又断切新近系。进入甘肃省，NW 向扭动构造体系沿祁连山展布，~~晚~~近时期主要沿柴达木盆地南缘活动，断裂带所经之处，既控制了新近系、古近系的沉积又断切了新近系、古近系。断裂总体走向 NWW，在天水北部呈左行压扭并将古近系断切，与纬向构造一组 NW 向剪切断裂（右行）重接复合。

以上两个构造带共同组成一系列 NW 向复式隆起与沉降带，主要由①东准噶尔山财至合黎、龙首山区；②准噶尔盆地至河西走廊；③婆罗科努山至祁连山；④塔里木盆地至柴达木和库木库里盆地 4 个带组成。它们在 1: 250 万中国构造体系图（李述靖主编）中以斜列式分布的 NW 向新生代盆地及盆地中沉积等厚线的展布表现出来。此外，塔里木盆地西南缘的多字型构造也是~~晚~~近时期成生的。

(3) 昆仑、秦巴、桐柏、大别山 NW 向扭动构造带。西经新疆和田，往东南至青海格尔木，东连大巴山、秦岭至大别山，全长近万里。该构造带为一长期反复活动的构造带，沿断裂发育挤压性构造和入字型分支褶皱，显示强烈压扭，并使老地层逆冲于较新地层之上。该构造带有许多段落都控制了白垩纪—古近纪断陷，又断切了白垩纪—古近纪或新近纪沉积，根据断裂旁侧发育的低序次构造判断存在过右行走滑和左行走滑的活动。

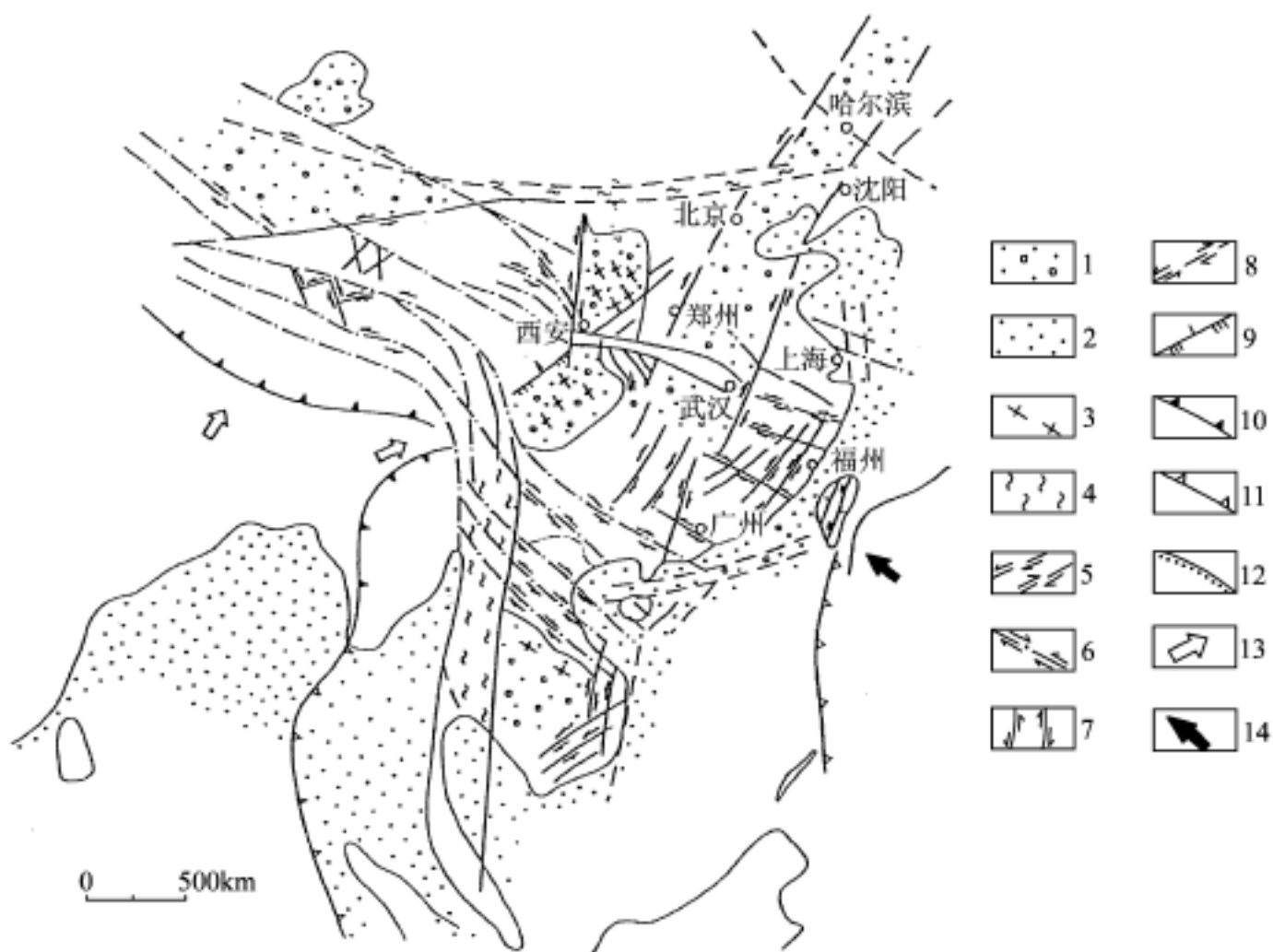


图 2 - 21 中国大陆及西南邻区新生代 NW 向扭动构造体系示意图^[60]

Fig 2 - 21 Sketch map showing distribution of the NW trending shearing tectonic system in China and its south-western adjacent area

1—陆相中新代盆地沉积；2—近海海相沉积；3—晚白垩世末—新生代 NW 向褶皱；4—区域性挤压带；5—NE 向断裂（左行及右行）；6—NW 向压扭性断裂（左行及右行）；7—SN 向剪切断裂（左行，右行）；8—NEE 向断裂（左行及右行）；9—逆掩断裂；10—地缝合线；11—俯冲带；12—不整合线；13—印度板块碰撞挤压运动方向；14—菲律宾板块运动方向

(4) 青藏弧形断裂带总体是向北东凸出的弧形断裂束。自北东而南西依次由祁连山 - 海原断裂带、昆仑山南缘断裂带、鲜水河断裂、金沙江断裂带及喀喇昆仑断裂、嘉黎断裂带组成，除最南部一条作右行走滑外，其他均做左行走滑。

(5) 黔西系。发育于黔西南，由一系列 NW 向褶皱和压扭性断裂组成，构造带长 350km，宽约 150km，卷入的地层主要为上古生界，并切断了下中侏罗统。其主压面为一列雁列、短轴或弧形褶皱和平行轴向的压扭性断裂组成，展布方位总体呈 NW 向。其南东段弯曲构成一个复式反 S 形构造型式，平行褶皱冲断层作右行顺扭，与其伴生的配套构造尚有 NW 向扭压性断裂（切割主压面，水平断距远大于垂直断距，旁侧低序次构造和地层水平错位均显示左行反扭）、近南北向以水平错位为主作右行顺扭的扭张性断裂和走向 NE50°~60°作左行反扭的压扭性断裂。黔西系的东南端与广西山字型构造西翼斜接，进入广西境内称巴马、昆仑、清湖 NW 向构造带，全长约 300km，由数条 NW320°走向的斜冲断裂组成，其中断续分布有燕山期花岗斑岩、辉长岩、辉绿岩脉，沿线见断层切割古生界、第三系和燕山晚期岩体，并见广泛发育的糜棱岩、片理化、构造透镜体、牵引褶皱和低序次旋扭构造，断裂带作多期活动，乐业、凌云一带断裂旁侧低序次 S 形构造表明有

新的左行反扭（喜马拉雅期）叠加在早期的右行顺扭（印支—燕山期）之上，其晚期反扭可使北东盘向 NW 方向错移 3 ~6km。

（6）右江系。由右江复向斜和断裂带组成，总体走向 NW315°；长约 300km，宽约 20 ~50km，卷入右江系的地层主要为中上三叠统，并控制了百色红色盆地的展布，平行褶皱轴的断层切断上古生界和三叠系，个别为古近系、新近系所覆盖而又切断了古近系、新近系，古近系、新近系沉积前旁侧低序次构造指示作右行顺扭滑动，古近系、新近系沉积后则呈左行反扭走滑，沿断裂带地震活动频繁，显示近期的活动性。

（7）中越边境 NW 向压扭性构造带。沿滇、桂边境的富宁、那坡、龙州一带自北西而南东，由一系列 NW 向断裂和少数褶皱组成宽大的褶断带，那坡 - 龙州断裂带为其重要组成部分，往东南进入越境，往高平、谅山达北部湾海域，全长 400 多公里，卫星照片上反映十分清楚，略呈反 S 形展布向 NW 追索，进入云南境内见其迂回曲折切过寒武系和第三系，沿线普遍见地层直立倒转和破碎，在富宁—那坡一带见有众多的印支期基性侵入体，近中越国境线上，NW 向构造推覆体以 10°的倾角倾向北东，使泥盆石炭系逆掩于中上三叠统之上，沿线 NW 向同斜褶皱、层间弯曲、片理、劈理、糜棱岩屡见不鲜，部分断裂在龙州附近为下白垩统所不整合覆盖，但多数则断切了第三系，其多期活动显示不同的扭动方向。如富宁入字型构造由第三系组成的小褶曲，其轴与主干断裂相交的锐角指向 NW，凭祥帚状构造外旋呈左行反扭并断切白垩系、第三系，表明那坡断裂于喜马拉雅期作左行走滑；而其他旋扭构造由泥盆系—中三叠统组成，形成于印支末期或燕山期，断裂作右行顺扭。

上述 NW 向扭动构造带是我国西部 NW 向压扭性构造带向中东部地区的延伸，都具有长期反复活动的历史，对建造有明显的控制作用，印支—燕山期有过右行顺扭走滑和左行反扭走滑。喜马拉雅期古近纪时有过右行顺扭走滑，新近纪以来（红河断裂带为 37 ~5Ma 以前）则为强烈左行反扭时期。

（8）印支半岛上的 NW 向扭动构造体系。自北而南主要表现为由哀牢山 - 红河断裂带（北）至王昭（Wang chao）断裂（南）等五条 NW 向压扭性断裂带，就断裂的滑移方向和所归属的构造应力场可分析如下：

王昭断裂：30Ma 以前作左行走滑，属于近 EW 向构造应力场共轭剪切中的一组剪切走滑断裂；30Ma 以后作右行走滑，属于近 SN 向构造应力场共轭剪切中的一组剪切走滑断裂^[61]。

哀牢山 - 红河断裂：其西北端进入滇藏三江地区，中段在越南境内，东南段进入北部湾并控制莺歌海盆地，在云南和越南北部宽 10 ~20km，沿线发育线性变质带，从洱海延至河内长约 800km，Rangin 等和钟大赉等的研究证明，自 37 ~17Ma 期间有过大规模左行走滑，5Ma 以来又转为右行走滑^[61, 62]。在印支半岛的北、中、南部均可见到挤压应力指向 NE—SW 和 NEE—SWW 之挤压应力场，表现为走向 NWW 向左行和近 NS 向右行共轭剪切^[62]。

应该强调指出，当王昭断裂在 30Ma 以后作右行走滑时，其北侧的哀牢山 - 红河断裂带均作左行走滑，由此使两断裂所夹之地块自北西向南东挤出，当鲜水河 - 金沙江、哀牢山 - 红河断裂带在 5Ma 作右行走滑时，其北侧之青藏高原北东部分之弧形断裂仍作左行走滑，由此使夹于其中的滇藏三江地块自 NW 向 SE 逸脱。

上述由 SW 向 NE 扩展的构造逸脱反映了印度板块不断向北推进时，南北缩短、东西伸展的变形亦自南向北发展，从而使地块自 NW 向 SE 逸脱、挤出的现象也自 SW 向 NE 发展。这是一个递进变形过程，说明 NW 向扭动构造体系的形成与发展是印度板块与欧亚板块碰撞挤压在板内的持续效应，随板块碰撞的发展而发展。

2. 中国东部

自大兴安岭、太行山至北部湾一线以东也发育晚白垩世末—新生代的 NW 向压扭性构造带，但规模较小，断续相循，并以断裂为主。据不完全统计，主要发育于中国东部陆缘带。这类构造据目前掌握的资料，北自黑龙江、吉林、大小兴安岭，经太行山麓东南至海南岛，向东乃至渤海、黄海、东海仍有其踪迹可寻，其中较具规模者自北而南依次叙述如下。

(1) 扎鲁特旗 - 扶余 - 辉春 NW 向构造带。分布于吉林省和内蒙古境内，斜贯松辽盆地及其两侧，由扎鲁特旗 - 科左后旗、科右中旗 - 辽源、扶余 - 崇善和春阳 - 珲春 4 条断裂带组成，其总体走向呈 $NW320^{\circ}\sim 300^{\circ}$ ，大体每隔 100 ~150km 出现一条密集的构造带，长度可达 130km，一般几十公里，破碎带宽度数十米至几公里。构造带的组成除部分地区发育褶皱，总的以断裂为主。这些断裂以其夹持有近平行的褶皱，沿线发育强烈压碎岩、挤压片理、构造透镜体、逆冲断层旁侧入字型构造、斜冲擦痕而显示强烈压扭。有过右行顺扭，是否有后期左行反扭的叠加，尚需进一步工作。切过的地层为侏罗系、白垩系和第三系，有时控制第四纪玄武岩喷溢、第四系沉积和地震活动。就其展布范围和连续性而言，NW 端接近蒙古弧斜切大兴安岭，松辽平原、张广才岭乃至朝鲜半岛的东北侧仍有其踪迹可寻，其规模等级居东北三省之首。

(2) 苏南 NW 向逆掩推覆构造带。西段由秦岭 - 大别山及其南侧河南嵩山一带向 SEE 入溧水、无锡、常熟、太湖一带，在古生界及三叠系中见有 NW 向褶皱横跨于北东向基底之上，并有平行的走向 $NW320^{\circ}\sim 300^{\circ}$ 的逆掩断层和直立岩带伴生^[58]，其构造透镜体状岩块也由张性构造角砾岩组成，显示先张扭后压扭的特点，其后期压扭，断裂旁侧的牵引褶皱（如常熟虞山）指示作左旋反扭滑移。在浙北地区常见 NW 向左行压扭断裂切过 NE—NNE 向断裂。

(3) 东海、南黄海的 NW 向扭动构造。东海的 NW 向构造主要分布于东海海域新华夏系西部隆起带和东部凹陷带的中部，以横跨形式出现于第三系中。据地震勘探资料，平行于褶皱轴向的断裂具有斜冲性质，既有右旋顺扭走滑也有左旋走滑，在南黄海也存在 NW 向和 NNW 向的压扭性构造。

(4) 闽粤琼沿海：福建北部的宁德 - 松溪断裂带控制了侏罗系和第三系的展布，据福州大学施满堂在闽北 570 矿区实地考察，NW 向构造发育在上侏罗统火山杂岩之中，表现为三条走向 $320^{\circ}\sim 330^{\circ}$ 、呈右行斜列的压扭性断裂，破碎带宽数米，镜下石英斑晶被挤压成透镜体，波状消光强烈，并见大量构造透镜体为千糜岩所包裹，断裂作左行反扭滑移。该组构造在沿海火山岩及侵入体中极为发育。闽中的清流 - 安溪构造带是闽省最主要的 NW 向扭动构造体系，沿断裂带地层产状陡立、地层强烈扭曲倒转、劈理化、糜棱岩、片理化岩屡见不鲜，断裂旁侧的牵引褶皱指示作右行顺扭走滑，是否存在后期的左行反扭尚需进一步工作。在闽中泉州—永安一线，NW 向断裂控制了红色小盆地和燕山期小岩体。闽西南的上杭至闽南漳州也分布有 NW 向扭动构造体系，对白垩系和第三系有明显的

控制作用，喜马拉雅期小岩体也沿其中分布。

广东境内及海南岛的 NW 向扭动构造体系，在 1:50 万地质力学编图时，本文作者曾将其划分为七个构造带，其中成生活动时期很新的就占 6 个，近年（1997~2000）本文作者承担省重点科研项目《广东沿海环境地质与灾害防治》中的广东沿海区域构造专题研究，对 NW 向构造问题的研究又有了一些新进展，就粤琼两省境内成生活动时期较新的 NW 向扭动构造体系的基本特征概述如下。

（1）以断裂为主，主要为脆性断裂，陡倾、缓倾均有，沿断裂带常发育压碎岩、糜棱岩化岩、硅化岩和构造角砾岩，其主压面为 NW 走向，常见的配套构造有 NNW 向右行扭压面、NWW 向左行压扭面和 NE—NEE 向右行张扭面。

（2）多有左行反扭之压扭性逆冲断层复合叠加在早期张性或张扭性断裂之上，但在近期又经常有后期张性或张扭性断裂叠加其上，反映出与新华夏系横向张性构造在时间上的互换。

（3）断裂成生活动时期很新，叠加在燕山晚期花岗岩上和切割白垩系、古近系、新近系，其中呈左行反扭的压扭性断裂成生活动时期当在晚新生代以来，其时代标志除切断古近系、新近系外，尚切断新生代基性岩脉（基性岩脉 K—Ar 同位素年龄为 $52.62\text{Ma} \pm 1.05\text{Ma}$ ）。

（二）晚白垩世末、新生代 NW 向扭动构造体系的构造组合型式和体系归属

1. 具有多字型的构造共生组合型式

其主要构造成分为 NW 走向的褶皱和逆冲断面，近 SN 向或 NNW 向与 NWW 向共轭剪切系以及 NEE 向的横向张裂。从区域上看，自阿尔泰山、北天山、祁连山乃至昆仑、秦巴、大别，NW 向扭动构造体系自 NW 向南东呈右行斜列，与中国东部的新华夏系左行雁列正好相反。应该指出的是，它的一对共轭剪切系并非势均力敌地发展，而是 NWW 向一组得到强大的发展，即属于偏共轭剪切^[4]。虽然总体呈多字型构造型式，但由于边界条件的变化和发展阶段的不同，这种多字型、共轭剪切系的具体表现形式还有诸多变化：例如在新疆塔里木盆地南北两侧，NWW 向左行反扭扭动构造体系是叠加和利用了原纬向构造带的一组 NW 向扭裂或古河西系；进入青藏高原由于受到原地块边界条件的制约、印度板块的碰撞挤压，形成了围绕青藏地块具有反 S 形特征的 NW 向弧形压扭旋回构造面；中国东部的 NW 向扭动构造体系则多呈直线型、规模变小、断续相循，远没有中西部地区那样连续和强大，而且形迹比较散漫。

然而，尽管这一时期的 NW 向扭动构造体系在不同地区有这些差异，但仍然有其共性，即构造共生组合总体反映其现位呈 NE—SW 向的挤压构造变形场。

2. 构造应力场特征

NE—SW 向挤压的构造应力场不仅表现在上述 NW 向扭动构造体系及其共轭剪切系的存在，而且反映在整个区域构造变形场上。万天丰等^[59]搜集了 275 幅区域地质调查资料，根据白垩系、古新统、下始新统及其下伏岩系与四川期褶皱资料，统计了 1806 个大中型

广东省地矿局区域地质调查队，广东省 1:50 万构造体系图及其说明书，1981。

《广东沿海区域构造》专题组，广东省沿海环境地质与灾害防治研究报告。

纵弯褶皱和 271 个节理观测点，将整个中国分成 38 个地区进行研究（图 2 - 21），求出中国东部在这一时期（K—E₂，135 ~52Ma）构造应力场的最大压应力轴（ σ_1 ）的优选产状为 NE29°∠20°，中间应力轴（ σ_2 ）为 NW301°∠20°，最小主压应力轴（ σ_3 ）为 SW209°∠88°，这就显示了白垩纪—古近纪时 NW 向构造变形场（现位）的区域性展布。

3. 成生时间

区域上这套 NW 向扭动构造体系自晚白垩世末、古近纪以来可划分出前后两期构造：其主压面早期呈右行走滑，在区域上常控制古近系的断陷沉积（如右江盆地等）；晚期发生在古近系沉积之后，断裂呈左行压扭并断切了古近系红层。

综上所述，晚白垩世末、古近纪以来的 NW 向扭动构造体系不仅在空间上具有区域性展布和多字型的构造型式，而且继承原有的构造成分，偏共轭剪切的现象十分突出，使 NW 或 NWW 向的扭动构造体系得到特别强大的发展；时间上在华南区表现为先期为右行顺扭、压扭或张扭（东部地区因与新华夏系横向张裂复合常表现为张扭），后期为左行反扭，在中西部地区它继承了原先已有的古河西系或西域系，在东部地区则经常与新华夏系横向张裂相复合，或与纬向系、南北向构造的一组扭裂相复合。在印支半岛和滇藏三江地区，由于靠近印度板块，印度板块的碰撞与挤压所造成的后期构造逸脱十分显著，NW 向扭动构造体系随着递进变形的发展，走滑方向可能发生多次（左行或右行）转换，构造逸脱和挤出的现象十分显著，这种现象甚至波及我国华南和东部地区。

根据上述时空特征、构造组成和构造应力运动方式，NW 向扭动构造体系无法归属于我国东西部地区已经鉴定出来的任何一个构造体系，应该是拟议中的一个独立的构造体系。考虑到它大体具有与我国西部地区古河西系相同的构造走向，但其形成活动时期很新，建议命名为新河西系。

（三）晚白垩世末、新生代 NW 向扭动构造体系形成的力学机制

1. 反演力学机制根据构造形迹反演其形成的力学机制是我们的基本思路，现反演如下

（1）NW 向扭动构造体系的多字型排列反映其形成的力学机制是右行水平南北向力偶（剪切扭动）作用，由此形成了区域性的 NW 向右行扭动构造体系，它们是由 NW 向右行压扭性褶皱和右行斜冲断层组成的（图 2 - 22a）。

（2）NW—NWW 向左行剪切和 NNW—NS 向右行剪切共轭系的存在反映存在 NE—NEE 和 SW—SWW 向挤压的区域构造应力场，说明 NS 向右行扭动形成了 NE—SW 向区域挤压应力场，后阶段的 NWW 向左行扭断裂叠加在早期的主压面斜冲右行压扭断裂和右行多字型构造之上，区域上后期的 NWW 向左行扭动构造体系由此而产生（图 2 - 22b）。

（3）在递进变形过程中，后期发生的 NW—NWW 向扭动构造体系转化为以走滑为主的构造带，走滑方向亦由原来的左行转变为右行，反映了由于印度板块持续向北碰撞挤压，由南北缩短转化为东西方向的伸展、由逆冲转化为走滑，伴随碰撞挤压由南向北发展，构造挤出亦由南向北转换为走滑和右行。印度板块与欧亚板块的碰撞体系后期发展为旋扭构造体系，即青藏滇缅印尼歹字型旋扭构造体系，此时的新河西系在歹字型展布地区已为其所归并（图 2 - 22c）。

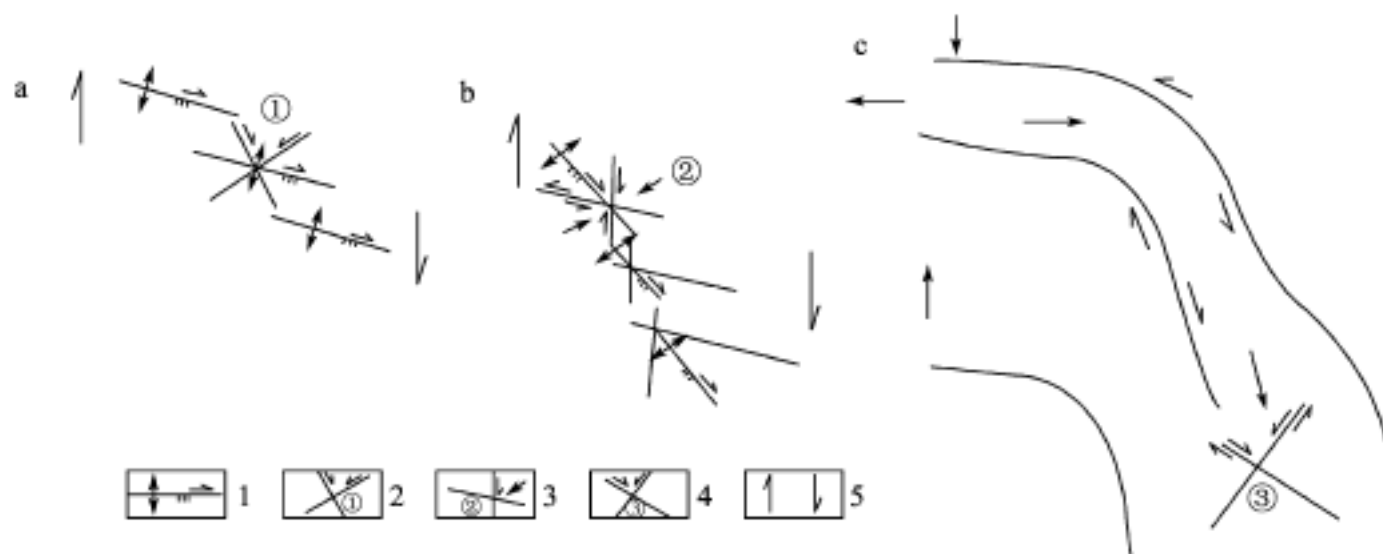


图 2 - 22 右行南北向对扭递进变形过程中各阶段的构造生成与发展^[60]

Fig. 2 - 22 Sketch map showing each stage of the tectonic formation and tectonic evolution in the progressive deformation caused by dextral couple in north-south direction

1—右行压扭性斜冲断层和褶皱；2—递进变形第一阶段共轭剪切系；3—递进变形第二阶段共轭剪切系；
4—递进变形第三阶段共轭剪切系；5—右行 SN 向对扭

2. 力源之追溯

晚白垩世末—古近纪以来印度板块与欧亚板块之碰撞挤压为新河西系形成之力源，根据印度洋大洋中脊之磁条带可以重建印度板块自 60Ma 以来之运移方向。45Ma 以来印度板块向欧亚板块运动之方向虽然有时趋于南北向，但总体是向 NE—NNE 向前进（图 2 - 23a、b），这正是中国大陆在这一历史时期形成 NE—SW 至 NEE—SWW 向挤压之力源，也就是形成新河西系的力源。

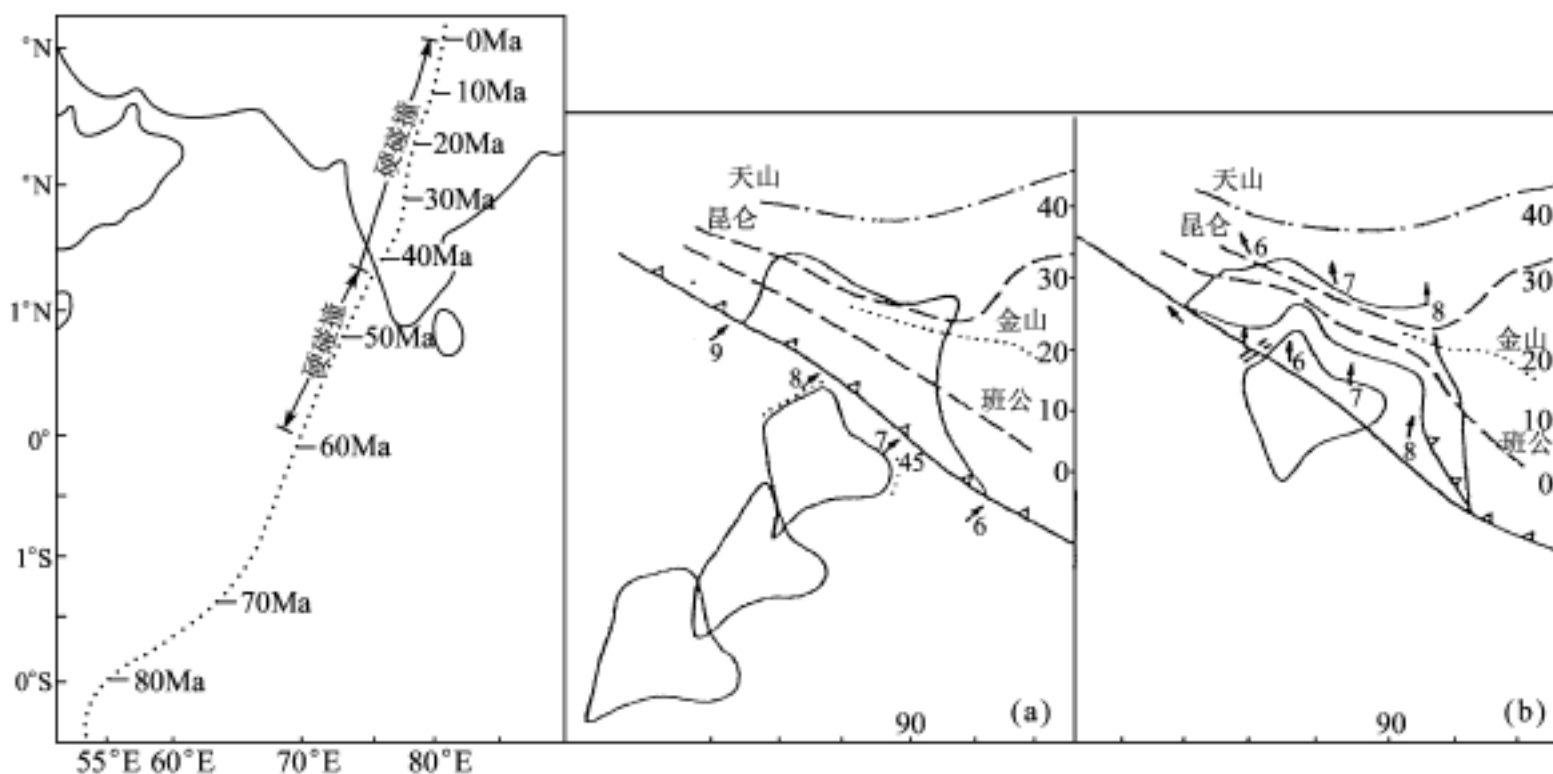


图 2 - 23 印度板块白垩纪至新生代运动方向^[62]

Fig. 2 - 23 Map showing the movement direction of India plate since the Cretaceous

(a) 前中始新世；(b) 晚渐新世 (30Ma)

3. 模拟实验之检验

最早进行这一模拟实验的是 P. Tapponnier，他用长方形钢板嵌挤入塑性很大的实验材

料中，实验分两个发展阶段，初始的对接挤压阶段（代表印度板块刚刚与欧亚板块对接），在模拟材料中可见在对挤的北侧发育一对共轭剪切的 NW 向（右行）和 NE 向（左行）裂隙（图 2 - 24）。李思田等也做了模拟实验，实验表明，只要模型底部存在可以滑动的软层，原来已有的 NNE 向断裂就可发生右行张扭性裂隙，结合中国区域地质条件，只要存在软流层或允许基底滑移，印度 - 欧亚大陆碰撞就可影响到中国东部并沿着中国东部的先存 NNE 向断裂发生右行滑动^[63]。这和中国东部 NNE 向断裂作右行张扭性活动相符。Tapponnier 模拟实验的第二阶段，引起 SWW—NEE 向的挤压应力而形成 NEE 向的右旋张扭和 NWW、NNW 向一对共轭剪切，NWW 向剪切作左旋压扭，NNW 向作右旋扭压。要说明的是，按照 Tapponnier 的模拟设计，模型的东面完全是自由面，因而实验材料可以自由地被挤出并可使地块作大规模的顺时针旋转。按照他的模拟实验，原先第一阶段的 NEE 向左旋走滑断裂（相当于阿尔金山式断裂）经地块作大角度的顺时针旋转后，在第二阶段可转成 NW 向，因而仍然是左旋走滑，Tapponnier 认为红河断裂系始终作左旋走滑可能与此模拟实验有关^[37]。但是，实际上在它的东面由于菲律宾板块的存在，印支半岛的向东南挤出是受到限制的，还有他没有考虑到受挤压后的隆起，很大一部分沿走向的挤出已为隆升所补偿，从而也影响到走滑挤出的分量。如果我们对 Tapponnier 的模拟实验的边界条件作适当的修改，那么印支地块就不可能作那么大的转动和有那么大的走滑挤出量，这样就可能导致后期的 NW 向左行反扭叠加在早期 NW 向右行顺扭之上，这和前文中所述及的整个中国东部新生代 NW 向扭动构造体系的前后两期构造及其滑移方向是完全一致的。而这个时候的压应力方向先是近南北向，后是 NEE—SWW 向，这与前文已述及的实际上存在于华南的早期 NNE 向右行张扭，后期 NEE 向右行张扭，特别是 NEE 向张扭性的南海系、52Ma 以来沿 NEE 向的基性岩脉侵入和震源机制解所反映的区域构造应力场也是完全一致的。

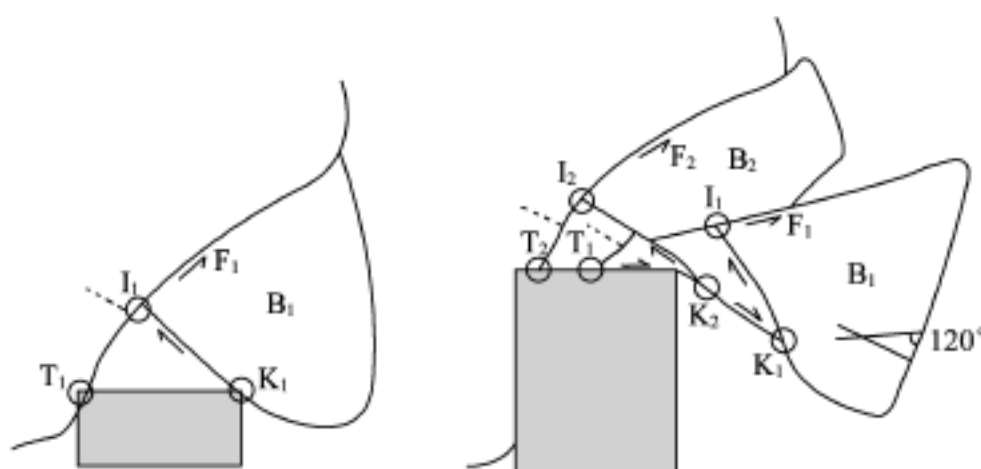


图 2 - 24 挤入实验中断层的逐渐发展^[37]

Fig 2 - 24 Figure showing the progressive development of faults in the compressional model
按 P. Tapponnier 的意见，F₁ 经挤出和地块旋转至 NWW 方向时仍作左行走滑

综上所述，我们可以说晚近时期中国东西部这组 NW 向压扭性构造带是印度板块与欧亚板块碰撞时在板内所产生的碰撞构造体系，应该独立建系。对中国西部这套构造，李述靖（1985）曾命名为新西域系^[64]，徐新（1985）命名为中亚系^[64]，周济源（1989）命名为中河西系^[64]。考虑到它的生成活动时代很新，建议命名为新河西系。但我们命名的新河西系不限于我国西北部地区，而涉及整个中国，并扩展到印支半岛，在中国东中部

则断续分布，在西部它常常叠加复合在原来的古河西系或西域系之上。就其形成的力学机制和构造背景而言，它们是一个统一体、东西部是一脉相承的，但是东西部又是有差异的：东部地区 NW 向扭动构造体系之所以没有西部那样的规模和连续，主要是因为板内的碰撞效应在东部地区碰到了已有的强大的新华夏系和似新华夏式伸展盆海系的阻挡^[40]，应力的传播受到了限制，因而表现为断续相循；而自南西向北东（自印支滇藏三江地区向我国华南华北地区）其形迹发育强度和构造应力场的势态逐渐减弱则与距离力源的远近和碰撞效应的减弱有关。

最后，在本篇行将结束的时候，作者认为有两点必须强调指出：一是新生代北西向扭动构造体系是一个活动构造体系，它不仅在中国西部而且在中国东部的许多地方都是控制地震的地震构造带，加强对它的研究，对地震预报、城市工程建设和区域构造稳定性的评价具有重要的意义。受它控制的地震构造带不仅发育于中国西部而且发育于中国东部，就作者对中国东部大陆边缘构造带所掌握的资料，如河北磁县北西西向南山村 - 岔口活动断裂^[65]、华北东南部介休 - 新乡 - 溧阳北西向新生地震构造带^[66]、闽粤台北西西向最新构造带^[67]，在新生代以来某一历史时期都可能属于新河西系，都控制了历史和现今地震的展布和发展^[60]。二是在远离印度板块的我国东北地区，NNE 向的右行张扭断陷和 NW 向压扭扭动构造体系在一些地区反而得到较强大的发展，而且其成生时期远在印度板块与欧亚板块对接以前即已开始而持续至新生代，应该说这些 NNE 向右行断陷的形成与发展以及由此而派生的低序次的 NW 向压扭扭动构造体系与印度板块的碰撞是没有关系的，而与早期形成的新华夏系陆缘造山带在后造山期（即似新华夏系）的伸展与右行扭动有关。

第六章 板块构造与构造型式的相互关系

构造型式（构造图案，Tectonic Type）这一科学术语在我国是由李四光在 1929 年首先提出来的^[38]，意指具有成生联系的地质构造共生组合形态。他和他的学生们在我国广大疆土上发现、厘定和命名了一系列构造型式诸如山字型、歹字型、入字型、帚状、棋盘格式、莲花状、涡轮状等。建国后，对国内外发现和鉴定的构造体系和构造型式所进行的第一次系统总结集中反映在《地质力学概论》一书中^[5]。在这以后的几十年间，广大地质力学工作者在自己的科研生产实践中在国内外又发现和鉴定出许多新的构造型式，对这些研究成果的第二次系统总结集中反映在由地质力学研究所根据李四光生前遗愿所主持编写的地质力学的方法与实践第二篇——《构造体系各论》（王治顺等编著的中国典型构造体系分论）中^[64]。这两本专著的发表反映出中国地质力学科学实践的历程和发展阶段。几十年来，在李四光学术思想科学体系的指引下所发现和鉴定的这些构造体系和构造型式不仅使地质力学的理论向前发展，而且在指导找矿勘探、地热开发、地震预报、地质灾害预测防治、环境保护等各个方面发挥着重要的作用。

构造体系和构造型式是地质力学的精髓。李四光之所以如此致力于构造型式的发现和鉴定，是基于这样一种科学思维——他认为：地质构造的形成与发展是受构造应力场控制的；在构造应力场的控制下，地质构造有其共生组合，有其内在的成生联系，是自成体系的；而不同的构造体系有其特定的共生组合形态，有它的标型，这就是构造型式。

本书作者追求“板块构造学”与“地质力学”的结合与融合，很自然会思考构造型式的概念能否用于板块构造，也追问各种构造型式的形成与板块的互相作用有何联系。作者发现李四光所厘定的各种型式，许多是板块间相互作用和运动的产物；而板块构造的各种组合又是受构造型式控制的。

本章分三个问题论述：即控制板块构造的构造型式、板块构造相互运动所产生的构造型式和构造型式在地质剖面中的表现。

第一节 板块构造的构造型式

李四光在 20 世纪 50 年代槽台说和垂直运动观在中国盛行的时候说过一段话。他说，我们有权追问：为什么某一地槽在它作为一个地槽而存在的期间，恰好存在于它所存在的地方，恰好按某一定的方位伸展，恰好形成某一定的形状？^[68]同样在今天板块学说盛行的时候，我们是否也有权追问：为什么在某一板块在它作为一个板块存在的期间，恰好存在于它所存在的地方，恰好按某一定的方位伸展，恰好形成它某一定的形状？而研究构造体系和构造型式正是为了解决这一类问题。

下文无妨以大洋板块为例来探讨大洋板块受什么构造型式控制。众所周知，大洋板块的扩张边界是大洋中脊，如果我们追索一下全球海底大洋中脊的组合形式，可发现两个普

遍存在的规律：①世界上所有的大洋中脊在横过其扩张轴的方向上都发育转换断层，所构成的构造型式笔者称之为鱼脊骨型。可参阅图 1 - 6，具剪切走滑的转换断层和扩张脊两者间具有成生联系：转换断层正是在洋中脊扩张的过程中由于扩张速率的差异而形成的（关于大洋中脊形成的力学机制，板块学者已有详细论证，这里不再赘述）。马宗晋^[4]则把被转换断层所围限的大洋板块称为板条，把俯冲于俯冲带之下的板条前缘称为板舌。它们是大洋板块的次一级构造单元，是组成鱼脊骨型的构造成分。②洋中脊与洋中脊组合的最普遍的构造型式是三叉式或三联式（可参阅图 1 - 6），即三条不同走向的洋中脊联结于一点。如太平洋中脊、印度洋脊，大西洋中脊虽总体呈 S 形，但如考虑其中段与现今地中海（曾是新特提斯洋中脊所在），其南端与南极大陆北侧的洋中脊系统联结也呈三叉式。于是，似乎可以得出结论，即三叉式或三联式是大洋板块最普遍的组合形式。板块交界除 RRR 式外，还有脊 - 沟 - 转换断层 RFT 交接等 10 种基本类型，由此引发的思考是为什么大洋板块都以这些方式相联结。

板块构造的经典模式是，洋中脊的上升地幔流从洋中脊处散开，然后在两侧海沟处变成下降的地幔流，拖曳着洋壳向大陆板块俯冲，三联式的平面构造型式启迪我们应该用三维的有如花状或喷泉式的构造型式或构造样式来补充习以为常的二维模式。

这些构造型式可能为我们提供板块形成和开裂演化的成因信息。

地质力学不仅追求具有成生联系的构造型式，而且关心它们的应力活动方式。如深入研究板块扩张方式，不难发现在不同条件下不同的时空尺度里，其扩张方式又各不相同。至少有如下几种不同扩张方式：

- (1) 大洋呈对称地由洋向陆的扩张，如大西洋中脊的扩张；
- (2) 由洋向陆的扩张和俯冲，如太平洋中脊；
- (3) 一侧由陆向海的扩张，一侧由海向陆俯冲，如南海北侧是华南大陆陆缘扩张，南侧是南沙向加里曼丹沙捞越俯冲；
- (4) 继承性的开合（如秦岭）；
- (5) 迁移式的开合，如古、中、新特提斯，其扩张中心随时间变新向南迁移。

地质力学关心为什么有这些不同的扩展方式。

大陆裂谷系的构造型式：大陆裂谷是大陆边缘常见的构造，当大陆裂谷进一步发展成大洋盆地和洋中脊时，就成为控制大洋板块的构造。因此研究大陆裂谷的构造组合形态即构造型式有助于我们研究板块的构造型式。大陆裂谷是切至上地幔的深断裂系，裂谷内有上地幔物质上涌，深部有一个上地幔隆起和异常地幔垫，与表层的地堑系呈镜像关系，在平面上，裂谷系的组合形态多呈平行雁列或 Y 形，前者如俄罗斯的贝加尔地堑、中国东部的大陆边缘裂谷系，后者如东非裂谷系（图 2 - 25）^[69]。

东非裂谷带从红海北端到赞比西河下游，全长 4000 多公里（图 2 - 26）。就不同部位而言，具有不同构造组合形态，但如总体观之，其主导的构造型式为三叉式。这一裂谷系实际上是由长 100 多公里、宽 30 ~ 60km 的一系列中小裂谷组成的，伴有火山活动，坐落在近 SN 向的东非陆隆带的背景上，以埃塞俄比亚为中心，从始新世到渐新世开始隆起，渐新世至中新世喷溢了碱性玄武岩（亚丁湾，红海则有深海拉斑玄武岩），最大厚度可达 3.5km，裂谷内沉积了中新世陆相沉积，说明裂谷最晚至中新世已经形成^[70]。

对于裂谷系的剖面（即表层的地堑系和深部的上地幔隆起两者呈镜像特征）形成的

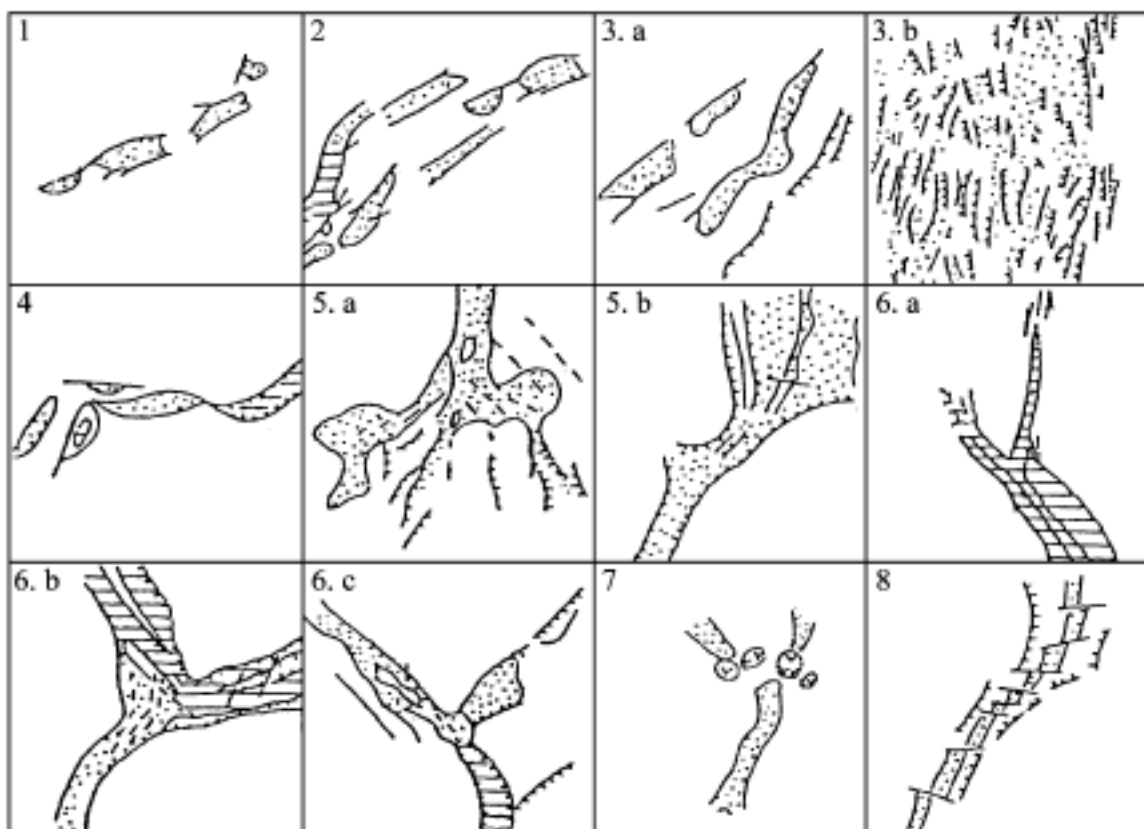


图 2 - 25 常见大陆裂谷组合类型平面图^[69]

Fig. 2 - 25 Plane figures showing the types of continental rifting association^[69]

1—串珠状（贝加尔裂谷带东北端）；2—边幕式（同前，东北部）；3—相互平行（a—东非的鲁阿哈 - 鲁菲吉断裂；b—山地 - 盆地区裂谷带）；4—肘状（贝加尔裂谷带西南端）；5—分叉状（a—肯尼亚裂谷南端；b—埃塞俄比亚裂谷东北端）；6—成不同角度的直接接合（a—红海、苏伊士及近东裂谷；b—埃塞俄比亚、亚丁湾及红海裂谷；c—鲁夸湖、马拉维湖裂谷及鲁阿哈 - 鲁菲吉裂谷带）；7—成不同的角度互相接近但未直接结合（莱茵地堑北部）；8—沿横平移断层、斜平移断层或正—平移断层的分离位移（埃塞俄比亚裂谷的轴部）

力学机制，地球物理学家多强调其深部原因，认为上地幔隆起是原因，裂谷和洋中脊是结果；一些构造学者则强调表层的先期拉开是原因，深部上地幔隆起是结果。事实上两者是互为因果、互相促进、相互制约、互相响应的。以东非裂谷系为例，它处于阿尔卑斯碰撞造山带的南侧，南北向的区域挤压应力造成了 NE 向和 NW 向两组共轭剪切断裂和南北向的横向张裂，由于南北向的追踪张，诱发了南北向的上地幔隆起，而深部的上地幔隆起引起了东非的南北向陆隆带，在陆隆带的背景上逐渐形成了东非裂谷系。可见深部构造与表层构造是互为因果、互相响应的。

海底高原（海台）是大洋板块中重要的构造单元。对于这样大型的大洋板块构造单元的构造型式也是我们追究的问题。大洋海底调查和钻探表明，它是一种面积广大、具有异常厚度洋壳的区域，其岩石组成主要为镁铁质到超镁铁质，岩石类型主要为拉斑玄武岩，它们是一期或两期大规模集中喷发的岩浆活动的产物。洋底高原的岩浆岩出露面积在 10^6 a 的时间尺度上可以达到大于 10^5 km^2 的覆盖面积，体积可达几百万到几千万立方公里，其地壳厚度可达 20 ~ 30 km 或更大^[71]。与阿拉斯加大小相当的位于西南太平洋底的翁通 - 爪哇洋底高原是过去 200 Ma 以来最大规模岩浆喷发事件的代表^[72]。大洋钻探海底调查揭示，凯尔盖朗是另一个海底高原，近来的 ODP 指示该海底高原的组成物质，一部分喷发于大陆环境，它随着冈瓦纳大陆的裂解在印度洋扩张过程中形成和熔化，因而其玄武岩的化学成分分析表明是软流圈来源的岩浆和大陆岩石圈复杂作用的产物，其 Sr、Nd 同位素

成分不同于印度洋中脊玄武岩（MORB）的成分^[73]，它具有 120Ma 岩浆活动的历史，其中有两次增强期发生在 115Ma 和 85Ma 前^[73]。在历史上，大陆高原和洋底高原具有很大的相似性。目前多数学者认为两者都是由巨大的地幔柱球状顶冠（地幔羽）引起的熔融作用形成的（图 2 - 27）^[74]。

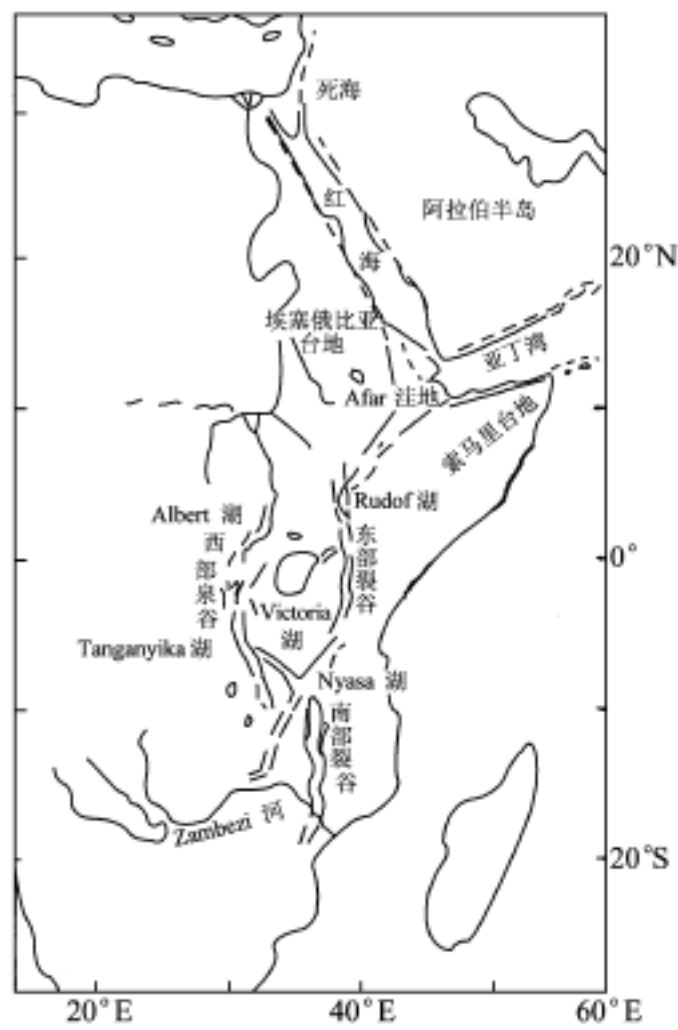


图 2 - 26 东非大裂谷带^[70]

Fig. 2 - 26 The Continental rift zone in east Africa

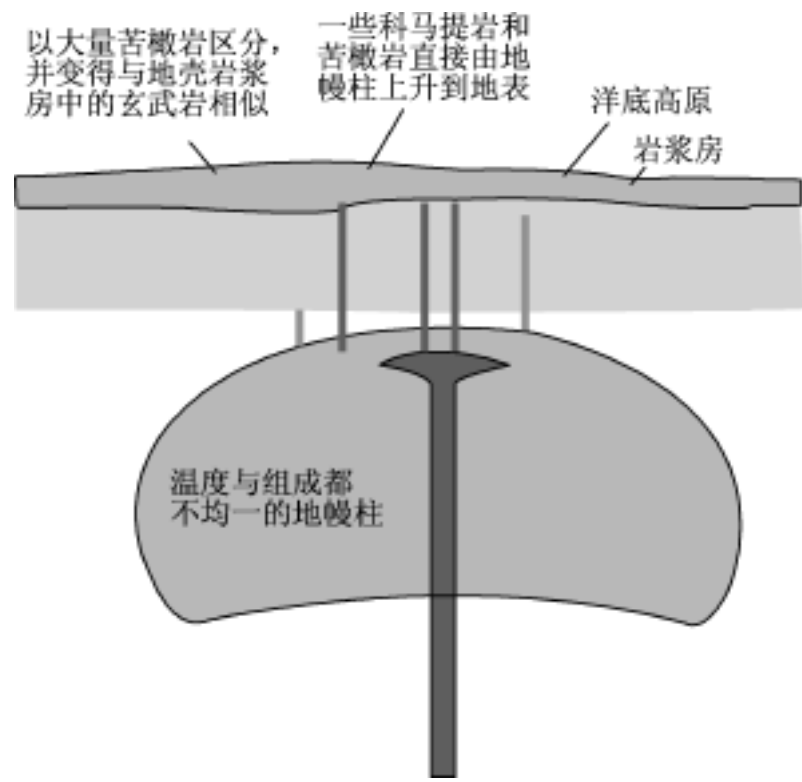


图 2 - 27 地幔柱与洋底高原关系图解^[71]

Fig. 2 - 27 Sketch of a mantle plume feeding an oceanic plateau

地幔柱由内向外温度逐渐降低，成分也发生变化。其部分熔融形成不同成分的苦橄岩浆，这些岩浆有的直接喷发，有的则在巨大的岩浆房中继续演化，最终喷发出均质的玄武岩

尽管大洋钻探工作者、板块构造学者和岩石学家们，对海底高原的研究已经取得了重要进展，我们仍然感到不满足：所说的地幔柱球状顶冠（地幔羽）究竟是受怎样一种构造型式控制的？又是什么地球动力学机制形成这种类似蘑菇云状的构造型式，它们在时空上有什么分布和演化规律？和整个地球内部的物质和能量的演化有什么内在的联系？显然这些都是地质力学和板块构造理论今后应该回答的问题。20 世纪 90 年代地幔柱构造学的发展已经使我们看到解决这一问题的前景。目前一般认为它的产生要求地幔中存在一个高温低粘度的热边界层，其温度要高出周围地幔物质的温度 300 ~400℃，粘度却比周围物质低几个数量级，这个高温低粘度层具有极不稳定的物理性质，一旦受到某种热扰动，就会在浮力作用下呈柱状上升^[75]。因此地幔柱羽的形成与上升至少要有两个因素，即核幔边界层（D”层）和径向构造的通道。

第二节 板块构造相互作用所产生的构造型式

前文所提到的洋中脊和大陆裂谷也包含了板块相互作用的因素，只不过它们是板块伸展作用的产物，本节所讨论的是板块相互挤压和相互剪切（剪压或剪张）所产生的构造型式。

一、板块挤压性边界的构造型式

有两种类型的挤压性边界即洋陆俯冲的挤压性边界和陆陆碰撞的挤压性边界。后者如阿尔卑斯造山带和喜马拉雅造山带，形成各种复杂多样的碰撞构造体系和构造型式，以印度板块与欧亚板块的碰撞边界为例形成了诸如呈双弧式、歹字型、多字型和棋盘格式等多种构造型式（参阅图 2 - 15）。前者也形成许多大陆边缘构造型式诸如亚洲东部的华夏方向多字型构造、大陆边缘弧，美洲西部大陆边缘形成阿拉斯加 - 科迪勒拉歹字型构造、南北向山弧和巴西山字型等。有关内容前人已有论述，这里只对环太平洋构造带为何东侧不发育边缘海而形成山弧式构造，西侧则发育边缘海，形成由沟、弧、盆构造组成的边幕式大陆边缘弧的构造型式作一探讨。

一些板块学者曾用东西两侧的板块俯冲倾角大小来解释，他们认为沿美洲西部大陆边缘之所以不发育边缘海是因为板块俯冲倾角缓而不易形成弧后微型扩张，亚洲东部大陆边缘之所以发育边缘海是因为板块俯冲倾角陡而容易形成弧后扩张^[70]。但是亚洲东部的边缘海并非都是弧后扩张形成的（如我国南海），俯冲倾角陡的并非都是弧后扩张（如 Scotia 海），有弧后扩张的其俯冲倾角也并非都陡（如冲绳海槽）。这种用弧后扩张来解释边缘海的成因的思路阻碍了他们从广阔的区域地质背景和地球动力学来阐明问题。显然亚洲东部新生代的陆缘扩张^[50]是使西太平洋产生边缘海的主因；陆缘扩张之所以发生又与亚洲东部晚燕山期后造山期岩石圈的拆沉拉伸减薄作用^[76]及后来印度板块对欧亚板块的碰撞产生向东南方向的构造逸脱有关^[37]；美洲西部的山脉总体处于受挤压的状态，虽有造山后的伸展性盆岭构造，却尚未能或尚来不及拉开成为边缘海。三个板块相互作用（印度板块与欧亚板块及太平洋板块）和两个板块的相互作用（东太平洋板块和美洲板块），其区域地质背景和地球动力学是不相同的，这才是问题的根本。

西太平洋、亚洲东部大陆边缘构造型式的另一个特点就是那些沟、弧、盆往往具有向 S 或向 SE 方向突出的弧形构造形态，关于岛弧 - 海沟系向洋侧呈弧形突出的问题，Lepichon 等^[77]曾用俯冲角与岛弧 - 海沟系半径之间存在球面几何学上的制约来解释。但是在中国东部大陆上同样存在向 SE 方向突出的大陆边缘弧，这就需要寻求另外的解释。板块构造工作者总是强调俯冲，其实，俯冲和仰冲同时并存，是一个事物的两个方面或两种提法。但在不同的情况下，有时俯冲是主要的，有时则仰冲是主要的。在中国及亚洲东部新生代陆缘扩张和表层易于滑动和构造逸脱的情况下，逆冲比俯冲更易实现，更易成为运动的主导方面，一系列大陆边缘弧向 SE 方向的突出正是大陆向洋运动最有力的标志。而这种强调大陆运动及表层滑动的思想早见于李四光的论著^[1]，重温这些区域地质论著应该不是没有意义的。

其实，不止是构造型式方面，而且在建造方面也反映出大陆向海洋方向的仰冲和递进的运动，并且从中生代便开始了这种历程：我国华南特别是东南沿海自印支期以来即发育陆壳重熔花岗岩，其岩浆活动的时期自 NW 向 SE 依次变新（图 2 - 28）^[39]。这种时空展布无法用大洋板块向大陆板块俯冲来解释其形成机理，有些学者企图用太平洋板块俯冲带后撤来解释，但至今仍未有充足的证据。华南地球物理勘探显示，华南深部的花岗岩体呈板状体深入到大陆内部数百公里，向深部发育剪切深熔的同构造花岗片麻岩，花岗岩的形成时代自 NW 向 SE 变新^[39]，新华夏系构造年代由 NW 向 SE 变新^[55]，用大陆表壳深层次的自 NW 向 SE 的逆推覆剪切重熔则较好解释。翁世劼等也指出粤赣晚中生代火山岩系岩石地球化学所揭示

的地质背景是一种仰冲碰撞体系^[78]。当然这并不排斥太平洋板块同时向亚洲大陆俯冲，在这里，只是强调在形成构造型式和岩浆构造中，哪一方更主导些。

然而，也正因为限于当时的条件，其时中国学者对大陆构造的研究就有些与大洋构造、深部构造隔离起来，这种情况自 20 世纪 70 年代板块构造理论传入我国之后开始发生了根本性的变化。最早介绍板块构造理论的尹赞勋、李春昱、郭令智、朱夏开始用板块构造理论重新解释中国的区域构造。陈国达用幔壳演化的思想阐述中国的地洼构造，张文佑则是把板块构造理论与地质力学理论结合起来的先驱，晚一辈的任纪舜等及一大批至今仍活跃在学术舞台上的中国构造学者们则把中国大陆地壳演化和大陆边缘构造的研究推进到一个全新的水平，这就为我们今后深入地研究大陆边缘的种种构造型式创造了条件。

二、边缘海的构造型式

边缘海主要位于挤压性或剪切性的大陆边缘（参阅图 2 - 15），但由于它都有一个微型扩张和洋壳为本质特征，故把它列为单项进行论述。全球的边缘海主要分布于西太平洋（白令海、鄂霍次克海、日本海、冲绳海槽、南海、西菲律宾海、班达海、美拉尼西亚海等）。

（1）H 型右行剪切拉分型边缘海盆：这种边缘海东西两侧各有一条近 SN 向或 NNE 向的右行走滑边界断裂，在两个边界断裂之间则有一近 EW 走向的微型扩张轴，从而构成 H 型右行剪切拉分型，属于这种构造型式的边缘海已证实的有安达曼海和日本海^[79]。现今的南海其 EW 两侧的边界也是 SN 向的断裂，南海扩张轴总体走向近 EW 向。周蒂等^[80]提出南海是由于 EW 两侧的 SN 向右行剪切走滑形成的拉分海盆。虽然其西侧的印支半岛东缘的越东断裂确是一条区域性的 SN 向右行走滑断裂，但其东部边界马尼拉海沟却是一条挤压性边界断裂。菲律宾板块约在 5Ma 时才与台湾岛弧拼贴，使南海东部与西太平洋分割。周设想在这以前也应有一条右行剪切走滑的边界断裂。南海如确是 H 型右行剪切拉分海盆，其东部边界需要满足两个条件：一是在南海拉开以前它的东面曾是一片陆地或陆壳，二是现今马尼拉海沟的前身应该是一条右行剪切走滑断裂。前人工作已证明：在马尼拉海沟以 E，九岭 - Patu 海岭及其以 W 的现今菲律宾海所在地存在成生于 48 ~ 37Ma、现已沦为海的由花岗质和安山质岩石所构成的古岛弧（Remant arc，据 Karig 统计这种沉沦于水下的古岛弧在太平洋不下 30 个）^[81]；任纪舜等^[51]从西太平洋众多沉沦的古陆块提出了存在一个西太平洋古陆的设想；自伊豆小笠原

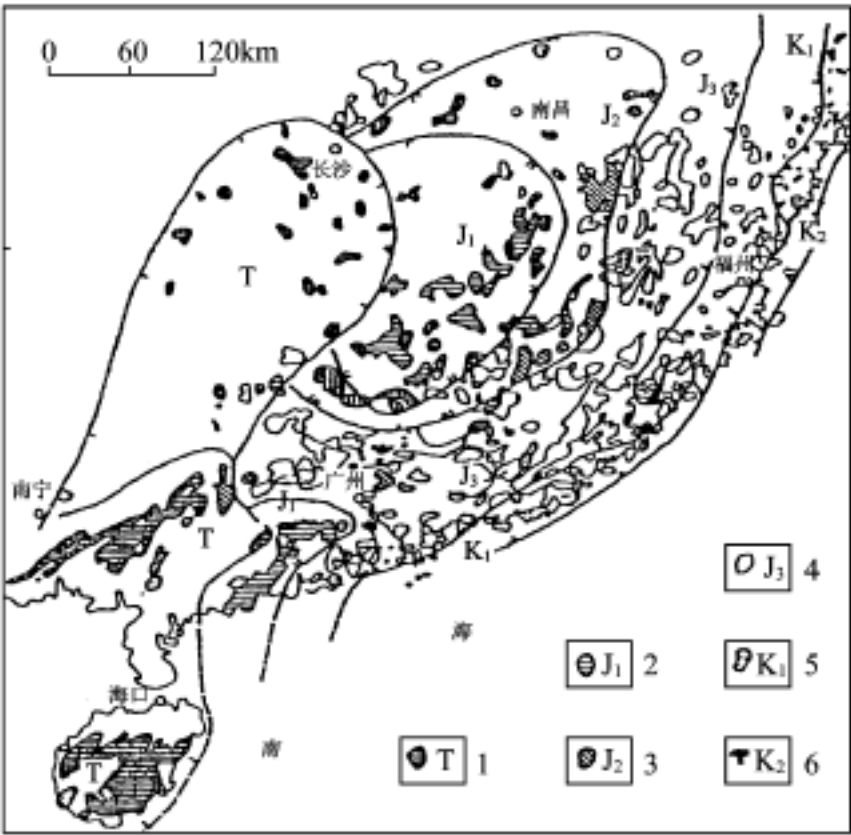


图 2 - 28 三叠纪—白垩纪华南花岗质侵入岩的分布^[39]
Fig 2 - 28 Distribution of the Triassic-Jurassic granitic intrusive bodies in south China

1—三叠纪岩体；2—早侏罗世岩体；3—中侏罗世岩体；
4—晚侏罗世岩体；5—早白垩世岩体；6—晚白垩世岩体

- 马利亚纳海沟至马尼拉海沟在 45Ma 以前都曾是大洋板块 NEE 向洋脊的一组 NNW 向、近 NS 向转换断层，其运移方向呈左行走滑。可以想像其时现今菲律宾海盆所在地的一片陆地（或陆壳）还在现今南海的东南侧，随着菲律宾板块向北西移，当时在现今南海东侧的陆地（或陆壳）已俯冲于日本琉球岛弧带之下或沉沦于水下。在中国东部大陆边缘，据本文作者对中国东部 20 几幅分省区域地质图上表示的 60 条 SN 向区域性剪切走滑断裂的解析统计，晚燕山期以来，SN 向断裂有两期剪切走滑：前期左行，后期右行^[82]；在台湾海峡、澎湖列岛，地球物理探测也指示存在 SN 向的右行张扭性正断层，台湾的海岸山脉总体呈 NNE 向，但在台南地区则转成近 SN 向，迁就利用了早期存在的 SN 向断裂^[83]。因此，从区域构造背景上来说是在近 SN 向右行剪切走滑的，马尼拉海沟在俯冲以前可能曾是一条右行剪切走滑断裂。如果上述两条依据能够成立，南海就属于 H 型右行拉分型边缘海盆。

（2）弧形边缘海盆：如白令海、鄂霍次克海、冲绳海槽、四国海槽、帕斯维拉海盆和马利亚纳海盆（参阅图 2 - 15 或图 1 - 6）。

白令海是一个弧顶朝南的边缘海盆，被认为是一个被新的岛弧 - 海沟系圈闭的海盆（Entrapped basin），阿留申岛弧的年龄属于古近纪，而白令海和 Bowers 海盆的磁条带却属于中生代^[70]。但如考虑其西侧边界断裂呈近 SN 向，而中国东部的陆缘扩张从晚白垩世已经开始，那么它的早期是陆缘扩张的产物，后来在阿留申岛弧向南仰冲、太平洋板块向北俯冲下才转化成弧形海盆。

冲绳海槽是一个弧顶朝向 SSE 的弧形海槽，它是陆缘扩张和弧后扩张综合作用的产物。实际上它的 EW 两边也存在 NNE 向、近 NS 向的右行剪切走滑断裂。

考虑到整个亚洲东部大陆边缘在晚白垩世末—古近纪以来统一的区域构造背景^[51, 40]，白令海、鄂霍次克海、日本海和冲绳海槽在形成边缘弧形构造以前，可能都有一个边界断裂（近 SN 向）作右行走滑拉张的早期阶段和陆缘扩张导致裂解的陆块向 SE 仰冲从而形成弧形海盆的后期阶段，统一的区域地质背景有可能使这些边缘海具有相同或相似的构造型式和演化发展阶段。

四国海盆、帕斯维拉海盆和马利亚纳海盆与前述弧顶朝向 S 或 SE 方向的弧形海盆不同，其弧顶朝东，成因属弧后扩张。

（3）旋扭构造型边缘海盆：属于这一类的有班达海、美拉尼西亚海、加勒比海、地中海（参阅图 2 - 15 或图 1 - 6）。它们皆发育于 EW 向走滑（左行或右行）剪切边界断裂的旁侧，由于主干断裂的剪切走滑而在其旁侧形成低序次的旋卷构造，除了环状的海沟和岛弧以外，在中央部位形成很深的漩涡，在李四光等^[5]的地质力学专著中已有论述，不再重复。

第三节 在剖面中表现的构造型式

李四光所厘定的构造型式主要指共生构造在平面上的组合型式，但事实上他所厘定的一些构造型式也见于地质剖面中，如多字型、入字型、帚状和旋卷构造等，也就是说构造型式具有三维性。应该特别指出：地震层析图像的应用为我们研究地球深部面上的构造型式提供了前所未有的良好条件。钻探、物探，特别是地震剖面揭示了诸如花状构造、阶梯状地堑、地垒构造、穹状构造等。最近我国地质地球物理工作者利用地震层析解析技术对我国青藏高原、天山、秦岭 - 大别山、龙门山等地的深部构造研究取得了很大的进展，提出诸如印度次

大陆俯冲于青藏高原呈分叉状（赵文津，2002，图 2 - 29）^[84]，川滇三江地区深部具有岩石层多向层架构造（图 2 - 30，钟大赉，2000）^[85]，秦岭地区具楔形构造（张国伟等，图 2 - 31）^[86]，龙门山地区具鳄鱼式构造（图 2 - 32，蔡学林等，1995）^[87]等观点，说明深部的构造型式也是丰富多彩的。不过，要注意的是地质力学对构造型式的要求强调其构造组分的同源性、同时性和具有成因联系。因此，上述地震层析图像的资料只有确认它们的同源性和同时性才能确定为某种构造型式，但这只是说明三维构造型式研究的难度，并非没有研究的前景。

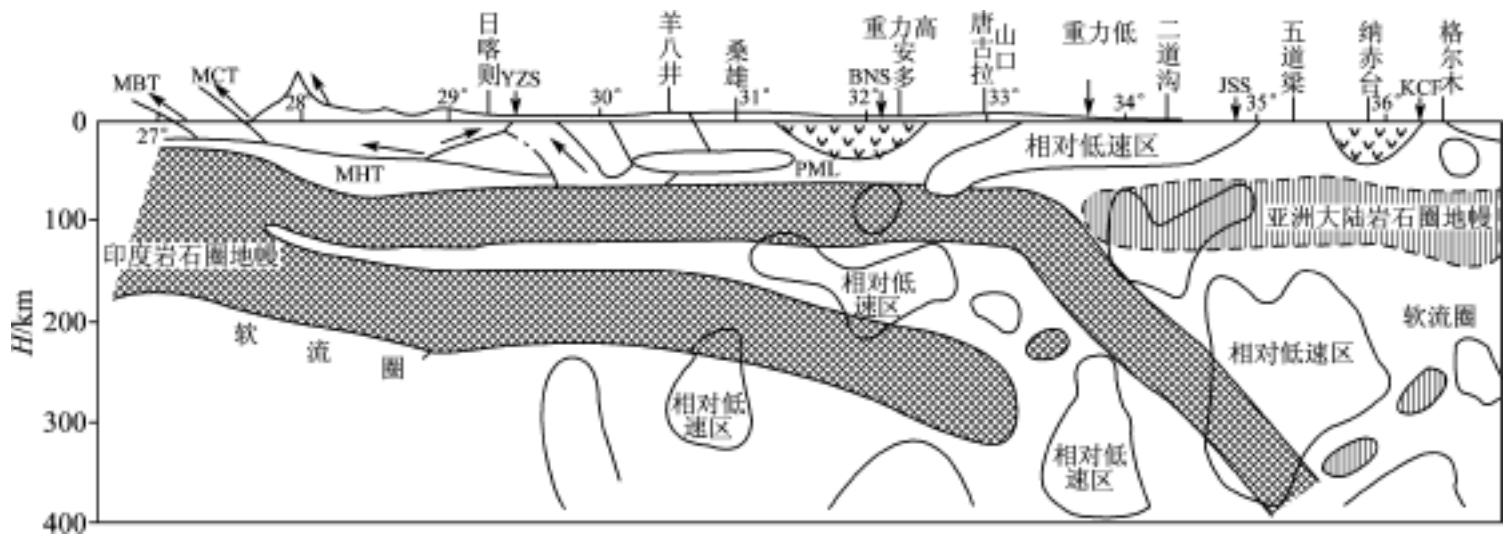


图 2 - 29 青藏高原中南部高分辨率地震层析成像构造解释图^[84]

Fig. 2 - 29 Tectonic interpretation of high-resolution seismic tomographic images of the eastern Qinghai-Tibet Plateau

PML—部分熔融层； BNS—班公湖—怒江缝合带； JSS—金沙江缝合带； KCF—昆中断裂

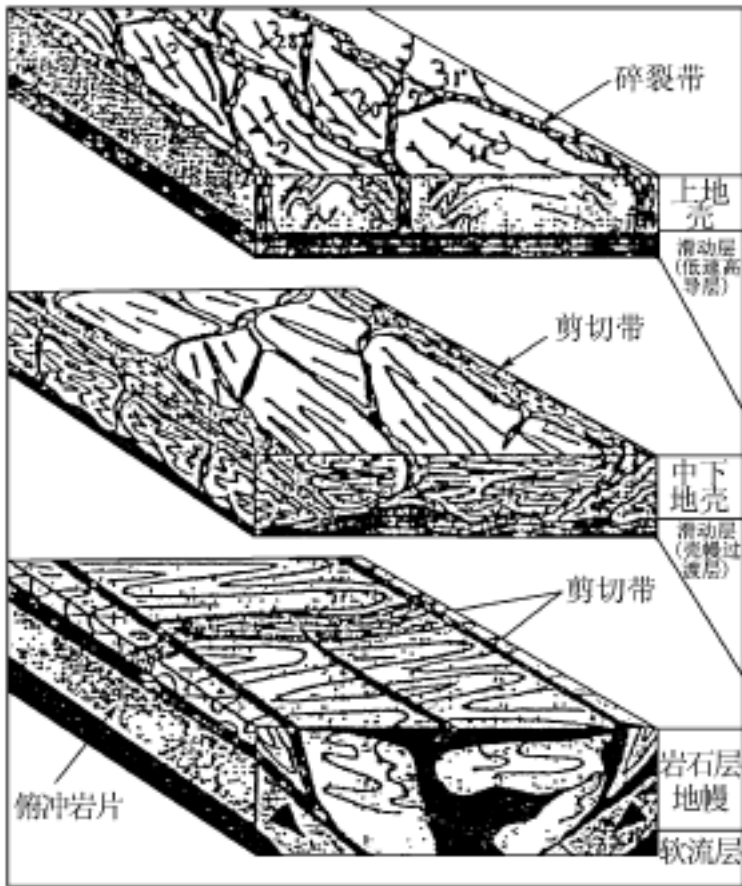


图 2 - 30 研究区上地壳、中下地壳、岩石层地幔、软流层地幔构造变异示意图^[85]

Fig. 2 - 30 The three dimensional diagrams showing the tectonics of the upper, middle, lower parts of earth's crust and the mantle's tectonic change in the area of eastern bounding of Tibet plateau

本图给出的是示意性框架，造山带壳内构造要复杂得多；各个圈层间的滑脱面在空间上也不是一个连续平面，因此不可能是水平叠合的；地球物理与地质上确定界面的对应问题还需今后研究中细化

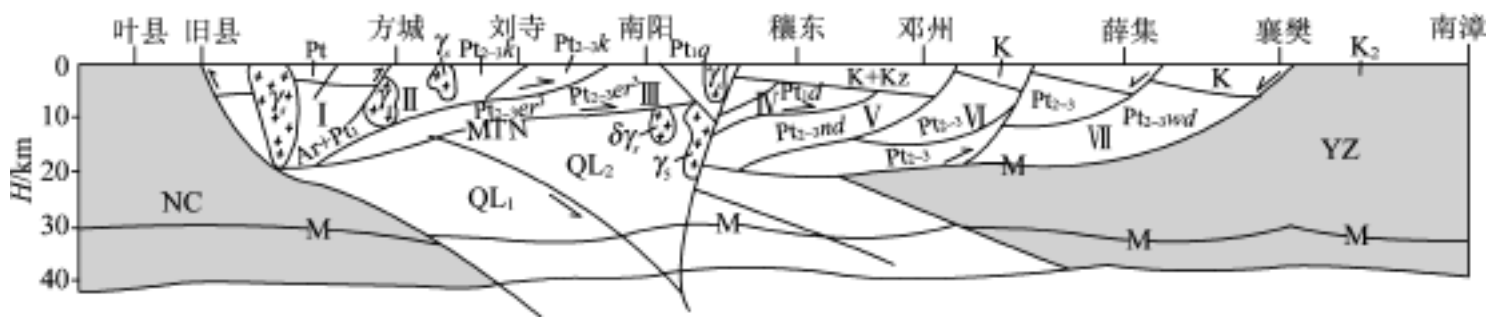


图 2 - 31 秦岭河南旧县至邓州地壳与上地幔构造^[86]

Fig. 2 - 31 The seismic profile showing the “wedding or crocodile” tectonic type of shinning mountain area
 NC—华北地壳（左侧灰色部分）；YZ—扬子地壳（右侧灰色部分）；QL₁—秦岭地壳（源区为华北克拉通）；QL₂—秦岭地壳（源区为扬子克拉通）；北秦岭推覆系：I—栾川推覆体；II—瓦穴子推覆体；III—二郎坪推覆体；南秦岭推覆系：IV—陡岭推覆体；V—新野推覆体；VI—枣阳推覆体；VII—襄樊推覆体；Kz—新生界；K—白垩系；Pt₂₋₃er—二郎坪群；Pt₂₋₃k—宽坪群；Pt₃yl—跃岭河群；Pt₂₋₃m—毛堂群；Pt₁d—陡岭群；Pt₂₋₃w—武当群；Pt₁q—秦岭群；Ar₃ + Pt₁—太华群与登封群；γ₃—加里东期花岗岩；γ₅—印支期与燕山期花岗岩；δγ₅—印支期与燕山期闪长花岗岩；M—莫霍面；MTS—主逆掩断层南部；MTN—主逆掩断层北部

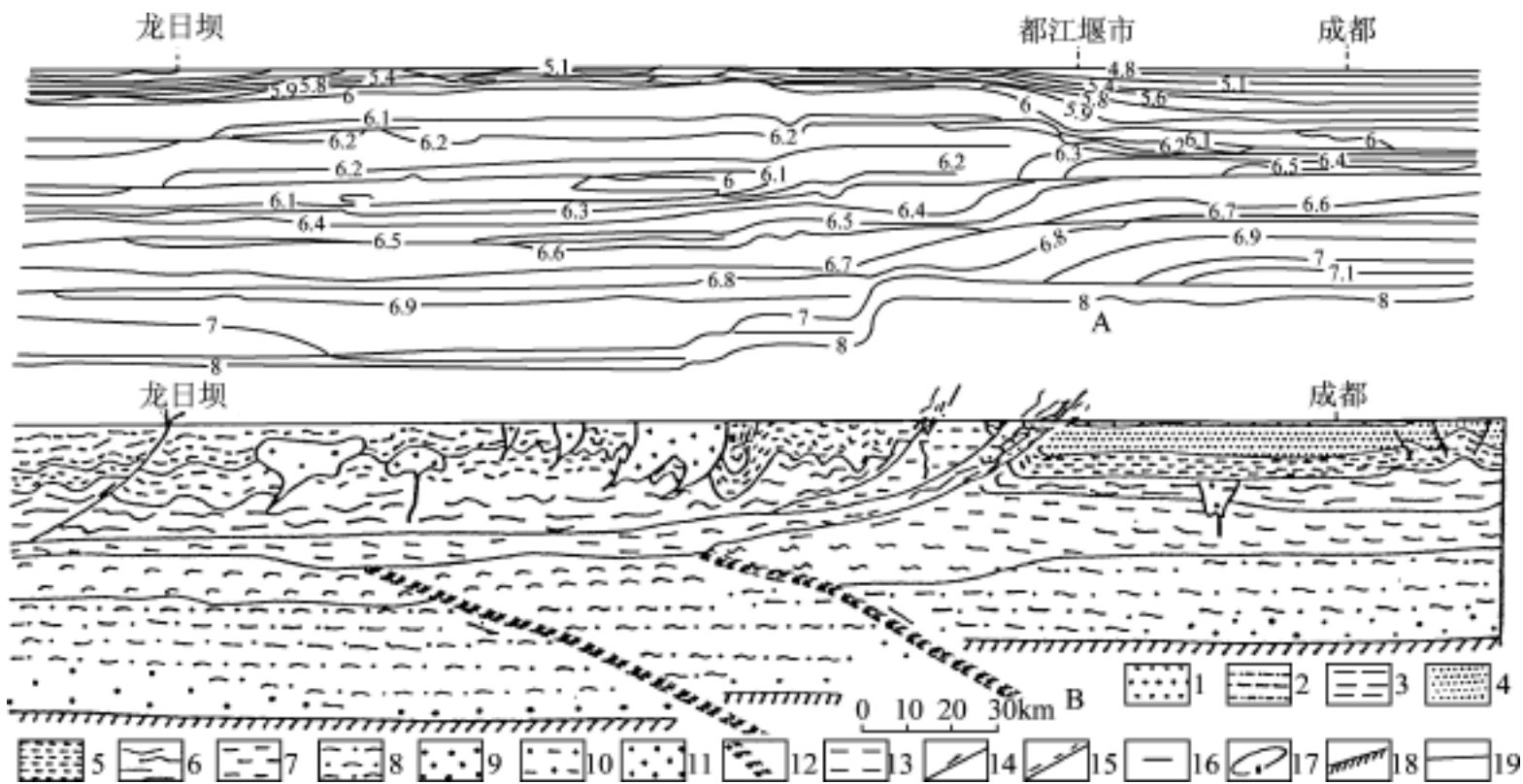


图 2 - 32 龙门山碰撞带的岩石结构（示鳄鱼构造）^[87]

Fig. 2 - 32 The seismic profile and its geological explanatory diagram showing the lithospheric texture and the crocodile structure of Lonman shan area

A—地震测深剖面；B—地质解释剖面；1—新生界；2—须家河群；3—三叠系浅变质岩系；4—中生界；5—震旦系和古生界；6—元古宙中浅变质岩系；7—太古宙中深变质岩系；8—下地壳变质岩系；9—麻粒岩系；10—前震旦纪花岗岩体；11—中生代花岗岩体；12—壳幔韧性剪切带；13—壳内低速层；14—逆掩断层带；15—早期逆掩断层、晚期正断层；16—块体运移方向；17—层速度等值线（单位：km/s）；18—莫霍面；19—速度界面

地球物质在地球旋转和重力场的支配下，由于重力分异作用而形成比重、密度分异的物质层，这就是固体地球内部的圈层构造（大到核、幔、壳，小至其内部的进一步分层）。这种分层应该理解为地球内部物质最重要的一种分配形式，也可理解为地球内部最普通的一种构造型式。固体地球在其旋转运动的过程中由能量的集散会产生周期性的不均

匀膨胀和收缩，由于地球自转速度的变化在角动量守恒法则的支配下，也会产生地球物质周期性的膨胀和收缩。这种地球的整体膨胀和收缩所产生的最普遍的地球内部构造是一种径向辐射状的构造。由前述的同心圆状的圈层构造和这种辐射状的径向构造，组成了地球内部有如车轮式的构造（图 2 - 33）。它可以被理解为地球内部最高一级的具有全球规模的三维构造型式。

由固体圈层的差异运动亦可形成构造型式。当代地学已证明地球内部（核、幔、壳）的旋转速度是不同的^[13, 17]。无论是地核、地幔，还是地壳内部还可进一步分层，各层之间的运动速度是有差异的，圈层构造之间这种差异运动会使各圈层内部变形从而形成次一级低序次的构造形迹和物质运动，形成各种构造型式，其中最普遍的型式应该是各种入字型、多字型和旋扭构造（在纵剖面上）。

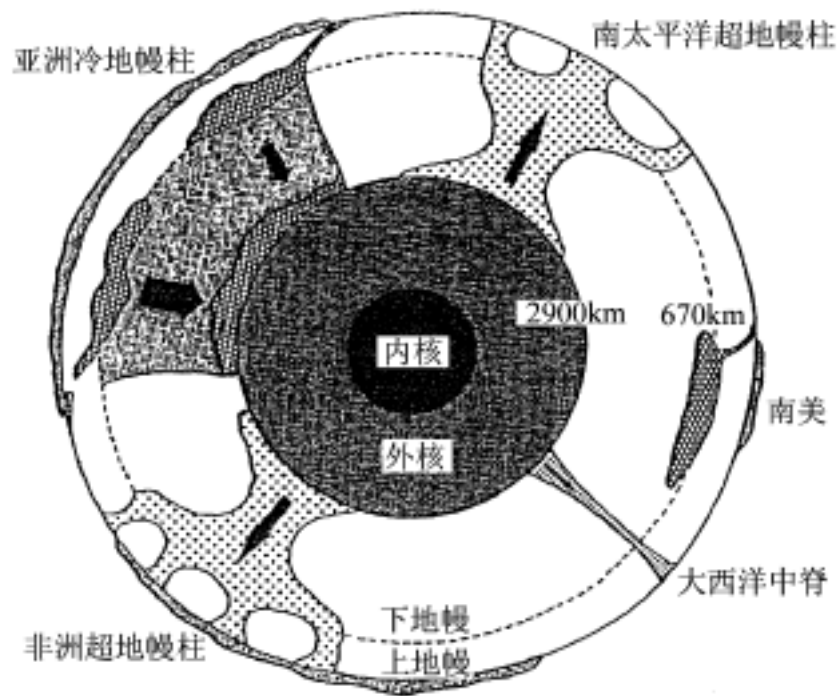


图 2 - 33 现代地球中主要的物质和热对流方式示意图
(转引自马宗晋, 2003)^[4]

Fig. 2 - 33 Mode of major material and thermal convection in the modern Earth

第三篇 古构造研究

无论是地质力学还是板块构造学，中生代以前的古构造都是尚未解决的问题，而且解决问题的思路和途径各不相同，地质力学侧重于古构造形迹和古构造型式的研究，由此涉及古构造形迹的筛分和复位；板块构造学则侧重于古地块的运移和复位，由此涉及古地磁、生物古地理和构造古地理的复位，本篇将分章讨论。

第七章 关于古板块的研究

现今所划定的全球六大板块系指中生代以来的板块，虽然这些板块的地质组成有的很古老，甚至包括前寒武纪的变质基底，但其成型为板块并且有今日板块之边界是中生代以来的事。以欧亚板块为例，其西部边界为大西洋中脊，出现于白垩纪，其东部边界滨太平洋为三叠纪—侏罗纪印支期的古俯冲带，其南部边界为新特提斯的碰撞造山带。学者们从中生代以来板块在开合过程中所形成的建造和形迹特征总结出一套认识和鉴定板块边界的方法和标志。

中生代以前形成的板块称为古板块。板块在地质历史上开始出现的时间也就是古板块的时限，是一个地质学界仍有争论的问题。有的学者（在国外如 K. C. Condie）^[8] 认为板块是岩石圈构造普遍存在的形式，即无论在前寒武纪还是古生代都有板块构造。有的学者则认为板块不是盘古开天地时就有的，是后来岩石圈构造发展过程中才产生的^[88]，有的学者^[2] 甚至认为中生代起才有板块构造。本书作者认为板块构造的出现应以岩石圈开始有刚性板体为前提，大陆壳经历了陆核、地台的发展过程，世界上各古陆台出现结晶基底和沉积盖层的分野一般在元古宙中后期，古陆台的出现标志着岩石圈开始有刚性的板状体存在，可视为板块构造开始出现的时期。当然，由于岩石圈构造发育的不平衡，有些地区形成刚性板块的时间早些，有些地区会晚些，因此全世界板块构造形成和发育的时间并非完全一致。

第一节 古板块的划分方法

板块构造是以其三种不同力学性质的边界与相邻板块相区划的，因此古板块的划分与复原是与古板块边界的确定与鉴别密切联系的。然而，恰恰在这个基本问题上存在着需要审视的地方。由于所确定的所谓边界并非真正的板块边界，以致所划分出来的块体并非真正的板块而是亚板块、次级板块乃至断块、岩块。因此在研究古板块时，首要的问题是要

鉴定出真正的板块边界——地缝合线、俯冲带、扩张边界和转换边界。

板块构造学在划分板块的上述边界时是通过一系列地理、地质、地震、地球物理等标志确定的；而对于古板块边界的确定，地貌学、地球物理学、地震学的方法和标志就由岩石学、构造地质学、古地理学和古地磁学的方法所代替，其中岩石学的标志具有特别重要的意义。下文专就确定古板块边界的岩石学标志作专门的进一步的讨论。

一、关于古俯冲带和古洋盆的岩石学标志

板块构造学者通常以是否存在蛇绿岩套、混杂岩带和蓝闪石片岩带作为是否为一古俯冲带的重要岩石学标志，如我国学者肖序常就在青藏地区对蛇绿岩套及其所代表的古洋盆的研究做出了贡献。岛弧型花岗岩和火山岩系的存在也是俯冲挤压边界重要的岩石学标志。但经过这些年来板块岩石学的研究，发现了一些新情况。例如，自从达兹（Dietz, 1963）首先提出蛇绿岩套代表古洋壳的碎片以来，诚然有许多学者支持这种观点，但都城秋穗（1975, 1977）提出了不同的意见，他指出许多消减带之内的蛇绿岩套并不显示假地层层序。相反，消减带之外，特别是岛弧中，许多镁铁质和超镁铁质岩组合却显示假地层层序。而被多数研究者认为代表古洋壳的一些典型的蛇绿岩套如塞浦路斯的特罗多斯和希腊的沃里诺斯蛇绿岩套都类似于现今岛弧火山岩系，而不类似于大洋拉斑玄武岩系^[89]。因此，蛇绿岩套和大洋壳之间并不能简单地划等号。

在都城秋穗这一研究思路和认识的启示下，本书作者在黔桂地区开展课题研究时就前人有争论、曾被认为是洋壳残片的四堡群和梵净山群中的蛇绿岩套，组织课题组成员冯国荣同志（1990）带领研究生重新做了多项岩石地球化学同位素测试，结果也表明它们并非是古大洋洋壳残片，而是岛弧盆地的小洋盆记录，下文及有关图表是该研究成果，曾收录于《雪峰山的构造性质和演化》一书中^[90]。

梵净山群的回香坪组和四堡群的文通组、鱼西组，以发育细碧岩 - 角斑岩组合和超镁铁岩 - 镁铁岩组合为特征。该群火山岩的 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{K}_2\text{O})$ 图解（图 3 - 1）投影点落入拉斑玄武岩系列和高铝玄武岩系列区间； $w(\text{SiO}_2) - w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 图解投影点落入拉斑玄武岩系列及高铝玄武系列之间，FAM 图解（图 3 - 2）和 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{FeO})/w(\text{MgO})$ 图解（图 3 - 3）投影点落入拉斑玄武岩系列和钙碱性玄武岩系区间。

火山岩的稀土元素配分曲线显示轻稀土元素富集而重稀土元素贫化，出现 Eu 负异常。梵净山群的细碧岩 $\delta_{\text{Eu}} = 0.75$ ，说明岩浆曾发生过斜长石的分离结晶作用；而四堡群细碧岩 $\delta_{\text{Eu}} = 1.05$ ，说明斜长石分离结晶作用不明显。两群超镁铁岩镁铁比（ m/f ）显示以富铁种属为主。从梵净山群稀土元素配分曲线图（图 3 - 4）看出，轻稀土略富集而重稀土略贫化，呈向右倾型式，有明显的负 Eu 异常，表明岩浆曾发生过斜长石的分离结晶作用；四堡群的超镁铁质岩也有类似的特征。

在野外火山岩剖面观察中，四堡群除见具有枕状构造的细碧岩、玄武岩外，尚见相当数量的火山碎屑岩（凝灰岩、火山角砾岩和火山集块岩）和浊积岩，它们与围岩产状一致，并一起同步褶皱。其岩石地球化学数据作出的大多数图解证明高铝玄武岩和钙碱性系列岩石的存在，表明该火山岩形成的大地构造背景具有岛弧的性质。

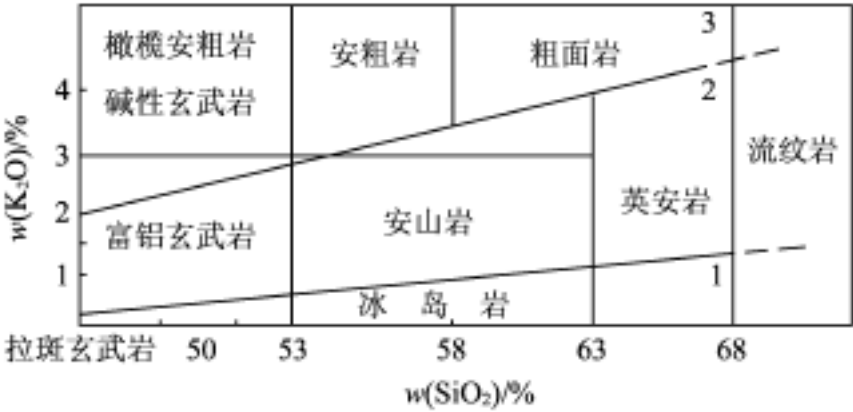


图 3 - 1 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{K}_2\text{O})$ 图解^[90]

Fig 3 - 1 Diagram of $w(\text{SiO}_2) - w(\text{K}_2\text{O})$
1—拉斑玄武岩系；2—钙碱岩系；3—钾质岩系

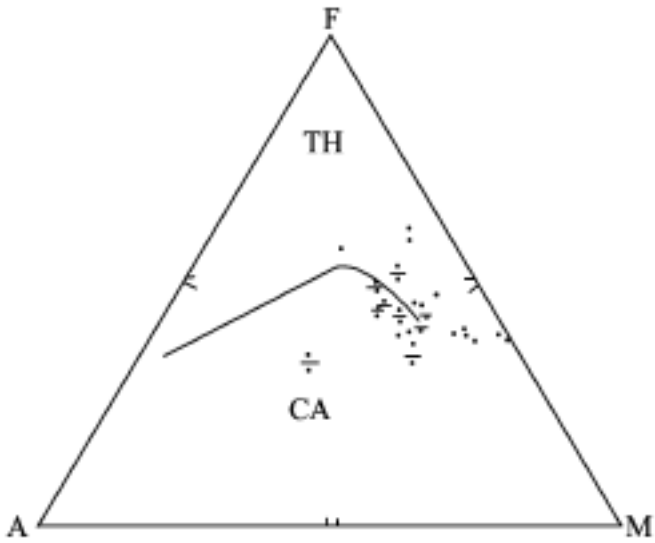


图 3 - 2 FAM 图解^[90]

Fig 3 - 2 Diagram of FAM
TH—拉斑玄武岩系列；CA—钙碱性玄武岩系列；
· — 四堡群火山岩；+ — 梵净山群火山岩

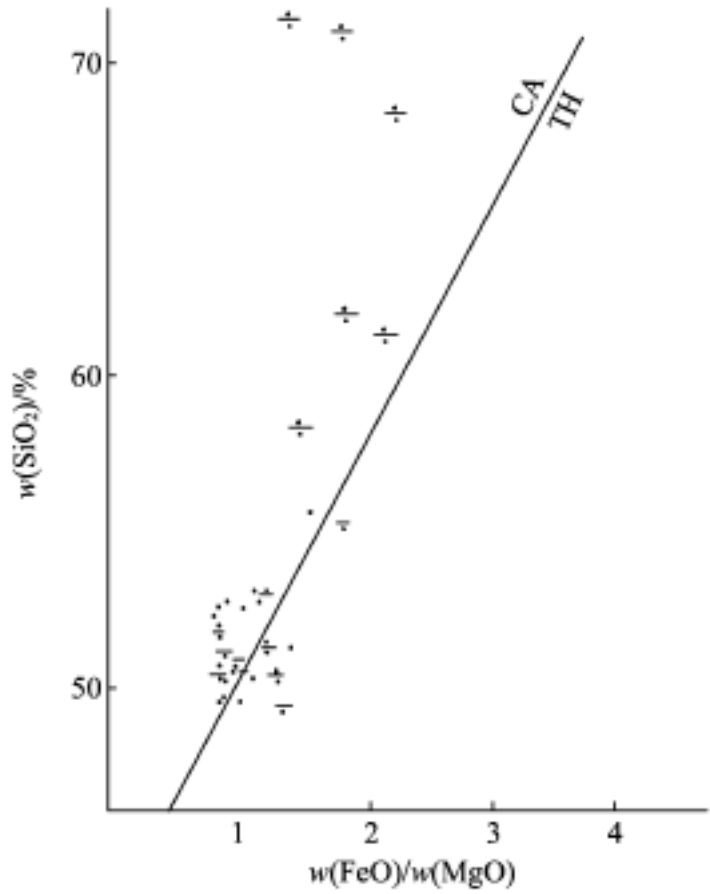


图 3 - 3 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{FeO})/w(\text{MgO})$ 图解^[90]

Fig 3 - 3 Diagram of $w(\text{SiO}_2) - w(\text{FeO})/w(\text{MgO})$
CA—钙碱性岩系列；TH—拉斑玄武岩系列；
· — 四堡群火山岩；+ — 梵净山群火山岩

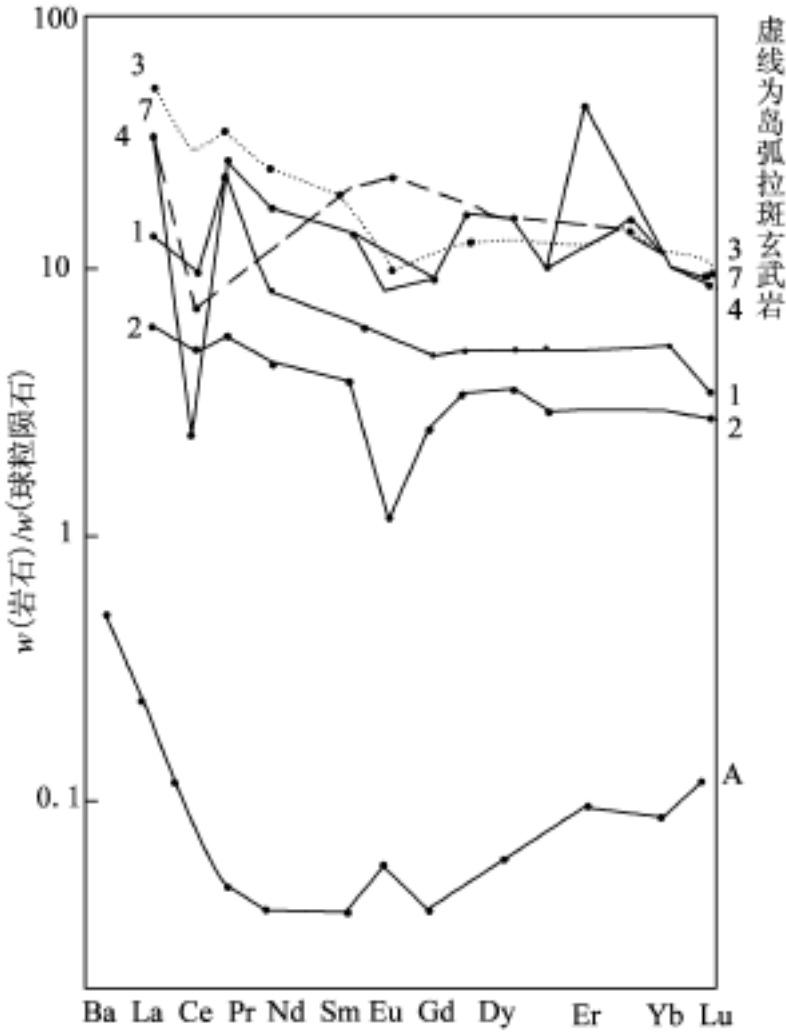


图 3 - 4 稀土元素配分曲线^[90]

Fig 3 - 4 Diagram showing the distribution curve of REE
1—梵净山群富镁辉橄岩；2—梵净山群富铁辉橄岩；3—梵净山群辉绿岩；4—梵净山群细碧岩；7—四堡群细碧岩；A—蛇绿岩套橄榄岩

还应该提到的是，在四堡群中还发育玄武质科马提岩。据杨丽贞^[92]研究，在文通组上段，自下而上分为堆晶带、鬣刺带和冷凝带，分别由辉石质科马提岩、玄武质科马提岩和拉斑熔岩组成（Rb-Sr 等时线年龄值为 (1667 ± 247) Ma），化学成分属超镁铁质—镁铁质岩，形成环境为岛弧区弧后拉张型大陆边缘海区。

无论是梵净山区还是九万大山区都可以看到一套为板溪群（下江群、丹州群）所不整合的基性—超基性岩床、岩墙，它们为四堡期科马提岩同期的次火山岩^[93]。

古俯冲带另一些岩石学标志还有混杂岩和蓝闪石片岩，但董申保等^[94]对我国蓝片岩带进行研究以后，认为一些深断裂带也可形成蓝闪石片岩，而不是一定要在洋壳俯冲带的构造环境中才能形成。

混杂岩带虽然是俯冲带中特有的一种岩石类型，但是人们极易将重力滑塌岩和构造角砾岩误认为是构造混杂岩。例如在桂东南岑溪—博白断裂带的志留系中发育重力滑塌沉积，而不是构造混杂岩。前者本质上仍属于沉积岩，只是在断裂活动影响下沉积不稳而滑动塌陷而成的沉积层，在野外尚可辨认出沉积构造和层理、层序；但后者本质上是一种构造岩，是一种大的构造块体相互运动时所产生的规模比较大的构造岩带，这种构造岩带不是一般板内的构造岩带，而是在大洋板块俯冲带中所形成的构造岩带，因而混杂岩中经常可以找到蛇绿岩的碎块，故又称为蛇绿混杂岩。陈海泓^[95]的论文中曾报道过在雪峰山东侧的板溪群中分布有蛇绿混杂岩。本书作者曾亲临现场考察，发现他所认定的构造混杂岩实际上是一条走向 NNE 向的基性、超基性岩脉挤压成断续分布的挤压构造透镜体。陈氏把它误认为构造混杂岩，但两侧的板溪群仍然井然有序。这本非很难辨认，但在有主观模式然后再去野外求证的思维方式支配下却很容易出错。

近年在江西弋阳一带原定为元古宙的蛇绿混杂岩带中发现了含二叠纪放射虫化石的硅质岩碎块，一时掀起了一股认为古特提斯洋从钦防海槽向粤北、赣中南东延的研究思潮，这实际也涉及如何识别古洋壳、古洋盆的问题。

关于古特提斯洋盆的识别标志，从已发表的文献来看，主要采用了以下一些标志：作为古洋壳残迹的蛇绿岩套和蛇绿混杂岩；存在具有大洋中脊地球化学特征的拉斑玄武岩；具有 Ce 负异常的深海沉积物；具有远洋生态环境的放射虫微体古生物化石；具有深海沉积相的硅质岩建造和盆地两侧的古生物地理和古地磁记录。但是正是这些形迹所代表的深海或洋盆的构造性质和环境还存在多解性，而且有时出现相互矛盾的形迹同时存在，这就难免仁者见仁、智者见智，莫衷一是，只有通过科学研究的实践逐步求得统一。

马文璞^[96]为了论证古特提斯洋的一个分支从两广—闽浙通过，列举了迄今为止已经发现的可作为古特提斯洋存在依据的各种建造的记录。他认为：华南层位相同的晚二叠世早期沉积，实际上是在不同的地形台阶上形成的^[96]。湘、赣、苏、皖等地华南主体部分的龙潭组多为滨海相，西南部钦防至曲仁一带则为远海深水盆地，两者之间存在大陆斜坡……大陆斜坡是向南倾斜的。笔者支持马文璞关于当时的华南存在一个向南倾斜的大陆斜坡的提法，也支持沿这个大陆边缘的南缘存在深水盆地的判断。但是这些深水盆地究竟是什么性质的盆地？它们是不是首尾相贯的大洋盆地则尚需进一步研究。为了研究这个问题，有必要对这些深水盆地的沉积物，特别是喷溢其中的火山岩的岩石化学性质及其形成的大地构造环境作进一步的审议。下文我们将自西向东列举有关盆地的资料进行讨论。

桂西南南盘江盆地二叠纪玄武岩，秦建华等^[97]曾做过岩石化学分析，确定为橄榄玄

武岩，具有接近大洋斜长玄武岩的化学成分指数，因而当时可能是一个洋盆。但是对同是那坡地区，同是早三叠世的玄武岩，不同学者所做的测试数据不同，得出的结论不同。秦建华等^[97]所作的稀土元素分析和标准化曲线，其特征为 $REE = 76.85 \times 10^{-6} \sim 102.85 \times 10^{-6}$ ， $Eu = 0.84 \times 10^{-6} \sim 1.05 \times 10^{-6}$ ，不具或仅有微弱的 Eu 亏损，稀土分配曲线具有微弱的轻稀土富集特征，并与大洋玄武岩分配曲线相似，说明玄武岩具有大洋玄武岩的成因，早三叠世时存在狭窄的小洋盆。而钟白云等^[98]对粗玄岩、细碧玄武岩所作的化学分析表明，它与峨眉山玄武岩相似，其岩石化学属性属板内大陆裂谷型。如果秦与钟所采的玄武岩来自不同的层位，则可把它们理解为不同演化阶段的产物。很可能南盘江盆地早期是一个陆内裂谷盆地，晚期出现了有限小洋盆。

从红河拼贴带向东南可分成两支追溯古特提斯洋的踪迹。南支沿红河拼贴带东南进入海南岛，在海南岛西北部军营一带曾在石炭系泥硅质岩中发现玄武岩，郑俊章曾认为它是近于大洋中脊的拉斑玄武岩，但缺乏充分依据。夏邦栋^[99]对分布于昌江县区溪，东经军营、芙蓉田、八一农场、大洋等地止于松涛水库长约 80km 的石炭纪火山岩作了详细的岩石化学研究。这套火山岩是由玄武岩和流纹岩两个端员火山岩组成的，缺乏安山岩和英安岩。具双峰式特征， SiO_2 含量为 52% ~ 72%，流纹岩的 SiO_2 含量绝大部分大于 76%，含量大于含钙量，玄武岩属深海拉斑玄武岩。夏邦栋进一步研究了玄武岩中稀土和微量元素含量的特征，其中，甘洋和芙蓉两地玄武岩的 $\Sigma REE = 51.27 \times 10^{-6} \sim 103.29 \times 10^{-6}$ ， $REE/HREE = 3.87 \sim 16.62$ ， $Eu/Eu^* = 0.93 \sim 1.27$ ，轻稀土明显富集，玄武岩中大离子石元素则显示富集特征，说明本区玄武岩不属于正常扩张性洋脊玄武岩，本区没有存在真正的大洋环境。另外，它与阿法尔裂谷玄武岩的地球化学特征很相似，两者的稀土配模式基本相似， δEu 不亏损，曲线呈平直右倾。夏邦栋^[99]最后认为该玄武岩是陆内裂向陆间裂谷过渡阶段的产物。这样看来，晚古生代的雷琼盆地仍具有陆缘裂谷的性质，粤西和海南之间并不存在一个大洋，古特提斯洋的分支并不从这里经过。但是，海南岛北和现今的雷州半岛之间确实存在一个次深海盆地^[100]。在海西期该盆地关闭并使海南岛大陆拼贴^[101]。

红河古特提斯洋的北支伸向广西的钦州—防城一带，习称钦防海槽。晚古生代的深水硅质岩目前沿钦州以西的大直—坂城、灵山—石南和玉林市南郊 3 个条带出露，长度超过 300km，走向北东东，原来应属同一盆地^[96]。吴浩若等^[102]从硅质岩地层剖面中获 11 个放射虫组合，确定其时代跨度为晚泥盆世至晚二叠世，其中所含二叠纪放射虫 *Folliculus*, *Pseudoallailiella* 等属可与滇西及日本等地很好地对比。我们在玉林近郊做调查时确定这些黑色薄层硅质岩富含 Mo、Ni、Co 等元素，应是一种深水沉积。张伯友等^[103]在钦防海槽最东段广西岑溪县安平白板至大爽一带发现二叠纪玄武岩，其同位素年龄为 261Ma，岩石化学性质属钙碱性和岛弧玄武岩，与深海含放射虫硅质岩共生，说明钦防海槽早二叠世时期为一弧后（弧间）盆地。

在钦防海槽的东北桂东—湘南一线，二叠系中上部的堰桥组和上二叠统下部斗岑组都含有鲍马层序的斜坡相浊积岩^[104]，位于以北同时代的含砾碎屑岩和以南的硅质岩系之间，代表三角洲外缘的碎屑斜坡环境^[96]。由此再向东北进入赣中萍乐拗陷，在乐平新大地等地茅口组中发现了纯放射虫硅质岩及有关火山熔岩^[105]。在弋阳登山和樟树墩等地原定为元古宙的弋阳蛇绿混杂岩与细碧岩共生的硅质岩中发现了早石炭世维宪阶和早二叠世

栖霞阶的放射虫海绵骨针和藻类等化石，包括 *Pseudoaillaillella* 和 *Follicuculus* 等，与钦防地区的属种相同。虽然在混杂岩中发现了二叠纪的硅质岩并不足以说明该蛇绿混杂岩带是二叠纪的，但是，含有二叠纪放射虫化石硅质岩碎块的存在则至少说明该带有一个深水盆地通过。

广东梅县玉水至福建龙岩马坑一带的火山岩，王尔康等^[106]曾对其岩石化学性质进行研究，结果表明具双模式，Rb - Sr 等时线年龄为 364 ~206Ma，Sr 初始值为 0.707 8 ~0.709 7，表明其形成环境为大陆边缘裂谷。在福建，晚二叠世长兴组和早三叠世溪口组从永安—龙岩向东，从浅海泥岩、粉砂岩相变成钙硅浊积岩和平流岩，显示当时为向东倾斜的大陆边缘^[107]。

从上面所引述的资料可见硅质岩在重建古沉积盆地中的重要性。但是恰恰是硅质岩所代表的古地理古构造环境，由于它的成因和沉积地球化学特征的不同而有所不同。在华南的二叠系中存在着不同成因和不同类型的硅质岩，对此我们不能不谨慎地予以区分。对华南二叠纪硅质岩形成的古地理研究存在着不同的认识：吴浩岩等^[102]根据其中所含的放射虫化石认为是开阔海盆。而在华南扬子地台内部，无论上扬子还是下扬子，金以钟等^[108]、夏邦栋等^[109]都提到在大陆板内由于断陷沿断裂热液上涌在海里形成硅质岩。沿断裂的火山活动使放射虫和硅质海绵生物繁殖，形成生物硅质岩。夏邦栋还指出，这些硅质沉积中心的位置与一些重要断裂带或断裂交会处相吻合，这些断裂大多已被证明具有长期活动的历史。本文作者认为由于这些堆积硅质岩的凹地范围较小，孤峰组层状硅质岩作为开阔海洋盆地沉积的可能性较小。近来，邓希光、李献华、陈志刚等（2003）对广西钦州小量 - 板城地区 O₃ - P₂ 含放射虫硅质岩进行了主量元素、微量元素和稀土元素分析。表明这些硅质岩形成于大陆边缘与深海台地之间的过渡地带。说明其时在钦防地区不存在大洋，古特提斯洋没有从这里通过^[110]。还有，在这些深水盆地的南北两侧所获得的古地磁纬度和古生物地理的资料都无法证明中间有大洋通过。

因此，我们只能说，在华南的南部（扬子地块的南缘，大体相当于现今的南岭及其以南地区），自西向东，确实分布有一系列晚古生代至早中三叠世的深水盆地，但这些深水盆地并不是大洋，而是一系列彼此不一定相连的大陆边缘裂谷盆地和弧后盆地。

后期构造对于前期古地理古构造的复原是重要的。持古特提斯洋盆自钦防海槽向东延伸的见解者的一个重要考虑是后期自北向南的逆掩推覆把古特提斯洋的遗迹给掩盖了。

这未尝不是一种可能。但是，若当时确实存在一个横贯东西的大洋，何至于今日在数千公里以内未见有确实年代依据的古特提斯洋壳碎片（蛇绿岩套），而它却断断续续地出露于龙木错—双湖—丁青—碧土—昌宁—孟连—程逸至马来半岛的文冬—劳勿，乃至爪哇、帝汶和菲律宾一带，形成一个大 U 字形，正是这条古缝合带分野了冈瓦纳古陆和华南 - 印支古陆两个古生物地理区。在这条缝合带的两侧，古地磁纬度有很大的差异^[111]。对于这样一个大 U 字形的古特提斯洋的通道，人们总觉得不好理解，总想从两点之间以直线为最短这样一个简单的几何原则去寻找古特提斯洋东延的捷径。事实上，古特提斯洋这条主缝合带今日之所以呈一个大 U 字形是后期构造变位的结果^[112]。因此，我们需要采用构造筛分、逐次复原的方法来再造古特提斯洋原始的展布面貌，这对确定古特提斯洋东延的主渠道是十分重要的。

二、关于碰撞造山带和仰冲碰撞体系的岩石标志

板块构造学中的碰撞构造学中总结了许多在碰撞对接的大陆块中碰撞期和碰撞期后的岩石学标志，在这方面可以举出的著名实例有阿尔卑斯山造山带和喜马拉雅山造山带的碰撞造山带岩石学，特别是碰撞期和碰撞期后的花岗岩石学和火山岩石学。如在高喜马拉雅山脉带，有 10 个或更多的深成岩体沿高喜马拉雅延伸达 1900km，覆盖面积达 8000km² (LeFort, 1973, 1981)。它由二云母（白云母多于黑云母）浅色二长花岗岩组成，总成分稳定。这些浅色的岩石富含铝、长石和碱（钠），矿物成分和主元素成分稳定，但 Rb/Sr 同位素成分很不均一，其全岩等时线年龄为 18.3Ma (Deniel 等, 1983)。野外观察表明，浅色花岗熔体极可能是由西藏板片下的下伏混合岩产生的 (LeFort, 1973) 热的板片（西藏）仰冲到轻微变质的内陆建造之上，提供了热流释放的条件，由此导致了过热的板片部分深熔而产生浅色花岗岩。马纳斯鲁花岗岩的 Sr、Pb、Na 和 O 同位素资料 (Vidal, 1978; Leport, 1981; Vidal 等, 1982, 1984) 进一步证实它们来自地壳沉积源，并表明西藏板片的建造 I 片麻岩代表了最可能的来源。另一些深成岩体，如石丹 (Dictrich 等, 1981)、埃佛勒 (Vital 等, 1984) 和洛札格 (Lhozhaq) (Debon 等, 1983; Skeppard 等, 1983) 等岩体的数据都很相似，都支持这一模式^[37]。在北喜马拉雅带，据 Debon 等 (1982, 1983) 的研究同样分布有同成因的新生代碰撞花岗岩带。

在花岗岩带之北是藏南地区的新生代火山岩带，可能自古新世以来，广泛发育酸性到中性火山作用 (Gansser, 1980; Zhou 等, 1981; Maluski 等, 1982)，安山质和英安质熔岩占多数。随着年龄变新，火山作用变得更酸性（和更碱性）并向北迁移 (Jin, 1981; Zhou 等 1981)。这些火山岩绝大多数是在碰撞期喷发的，紧接着在外喜马拉雅深成作用末期转向北部。

在藏北地区，在青藏高原中部，羌塘地区也有数量惊人的火山岩流及火山，几乎从南部的班公 - 怒江缝合线到北部的昆仑山脉，这些熔岩流中玄武质比安山质多，并且与碱性火山岩有关 (Deng, 1978; Jin, 1981; Zhou 等, 1981; Coulon 等, 1983)，除了北喜马拉雅地区有许多镁铁质岩体切割了绝大多数地层和构造外，碰撞后的这种镁铁质岩浆作用仅局限在藏北^[37]。近年邓万明^[113]在青藏高原及邻区进一步考察了新生代火山岩，查明西昆仑喷发了钠质熔岩，其他地区则为钾质熔岩类；甘肃省礼县新生代盆地主要以超镁质熔岩为主；云南金沙江、腾冲和滇东南地区的火山岩则基性岩成分明显增高，还常见一些幔源捕虏体，说明该地火山岩系源于原始地幔。

与此同时，莫宣学等^[114]对西藏冈底斯地区的新生代火山岩进行了研究，认为它们是印度 - 亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应：该地区的林子宗火山岩及其与下伏地层间的区域性不整合提供了大陆碰撞的构造 - 火山岩新证据；岩石学、主元素、微量元素、稀土元素及 Nd-Sr-Pb 同位素地球化学研究表明，林子宗火山岩早期具有较明显的陆缘弧火山岩特征，中期开始出现标志陆内岩浆活动的钾玄岩，晚期更多显示了加厚陆壳条件下火山岩的特征；系统的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年确定林子宗火山岩的年龄区间为 40.84 ~ 64.47Ma，底部年龄为 65Ma。

以上这些是新生代时期碰撞造山带中发育的碰撞期、碰撞期后所形成的花岗岩和火山岩，利用这种碰撞造山带中的岩石学标志可以去研究古板块中的古碰撞造山带。如我国的天山 - 兴蒙褶皱系和大别 - 秦岭 - 祁连 - 昆仑褶皱系都是西伯利亚地台与华北地台（前者）、

华北地台与扬子地台之间（后者）的古生代至中生代陆陆碰撞造山带，都有碰撞造山带的岩石学记录。^[29] 中国东部燕山期的华夏山系，任纪舜等^[51]曾认为是一个碰撞造山带，广泛发育于中国东南沿海的S型重熔花岗岩应该属于碰撞期产生的花岗岩，而沿东南沿海福建长乐—广东南澳分布的晚白垩世的晶洞碱性花岗岩（同位素年龄值为 $106.8\text{Ma} \pm$ ）^[52]则是华夏造山带造山期后伸展阶段，即碰撞期后的岩石学记录。东南沿海晚中生代的火山岩系许多学者把它们与太平洋板块俯冲作用挂钩，认为它们是俯冲作用的产物，但翁世劫等^[78]在研究了粤赣等地的火山岩岩石地球化学以后，认为它们是仰冲挤压碰撞动力体系的产物。

从以上对板块边界的岩石学标志的研究和讨论中，我们可以看到涉及到两方面的问题：一是所依据的岩石记录是否确是该板块边界的科学反映。研究表明，蛇绿岩套、蓝闪石片岩、硅质岩等都可在各种地质环境中形成，这样我们在利用它们来复原古环境古构造时首先要鉴别清楚它代表的是哪一种地质环境的记录。另一个问题则涉及岩石学或古生物记录本身所具有的地质演化问题。众所周知，无论是古生物界还是无机界的物质记录都具有其自身的地质演化问题，例如某些古生物在其自身演化过程中有迁移的特征，因而古生物化石所代表的古地理环境就和现今所看到该类生物所处的地理环境有所不同。在无机界，随着地球在演化过程中水圈、大气圈和岩石圈的进化，一些岩石建造的形成具有不可逆的前进发展，因而也就不能将中生代形成的一些岩石建造所代表的古地理古构造环境不加改变地套用在古生代乃至前古生代的古地质环境的复原上。例如前寒武纪的白云岩建造和后寒武纪的白云岩建造在形成环境上就有很大的不同。有关岩石圈岩石本身的地质演化问题在关于古板块运动演化的复原反演一节中还要进一步探讨。

第二节 关于大陆边缘的研究

大陆边缘虽然不就是板块的边界，但它接近板块的边界，因此对大陆边缘的研究，依据大陆边缘的性质可以帮助确定板块边界的性质。在研究古板块时，古板块的真正边界往往已被掩盖或已消失，这时研究古大陆边缘的性质和演化历史对于复原古板块就具有特别的意义。

王鸿祯等^[115, 59]对于研究古大陆边缘特别是华南古大陆边缘做出了突出的贡献，他的历史大地构造学为古大陆边缘的研究提供了系统的方法。任纪舜等^[23]在IGCP321（冈瓦纳的裂散——亚洲的增生与特提斯的演化）项目中系统地研究了古生代时期亚洲大陆边缘和冈瓦纳古陆的大陆边缘，研究了冈瓦纳古陆北部大陆边缘是如何裂散、亚洲大陆的南缘是如何增生的，系统总结了它们之间的相互消长和演化关系。钟大赉等^[21]《滇川构造带构造演化》一书则系统总结了特提斯构造带（东段）是如何演化的。他们为我们提供了系统的研究工作方法，使古大陆边缘的研究上了一个新台阶。

本书作者在参加IGCP321项目的过程中也对亚洲东部南部大陆边缘系统地发表了自己的研究心得和见解，虽然讨论的主要是中新生代的大陆边缘^[49]，但也涉及古生代的大陆边缘，两者有一定的继承性，特别是分析研究方法基本一致。现将本书作者的主要论点系统论述于后。

关于我国东部及邻区中生代大陆边缘的性质，国内外学者有许多认识上的分歧，一些学者认为是增生的大陆边缘^[116]；另一些学者则认为现今的东亚大陆边缘是裂解的大陆

边缘^[51]；还有些学者认为是转换剪切走滑边缘^[117]；由于中生代特别是燕山期广泛发育的中酸性火山岩带和花岗岩带，不少学者认为是安第斯型大陆边缘^[116, 50]；近年随着对这些岩浆岩岩石化学和构造形成机理、构造环境的研究，发现其中不乏碰撞仰冲体系的产物^[78]。长期以来，我国东部及邻区被划入太平洋构造域，但近年来，越来越多的学者强调特提斯域的意义^[118]。对于东亚中生代大陆边缘增生的模式也存在不同的认识，一些学者强调洋陆俯冲，另一些学者则强调地体拼贴。

新发现的地质事实表明我国东部及邻区中生代大陆边缘的性质是相当复杂的。有些学者在论及华南中生代大陆边缘时，曾使用过复合型大陆边缘一词，意指由挤压型大陆边缘和拉张型大陆边缘的复合^[50]；徐嘉炜^[117]也表达了类似的思想。本文把这一名词运用于整个东亚中生代大陆边缘，但其含义又有所不同，试图从已揭示出的客观事实对这一复合大陆边缘的性质、基本特征及形成机制作一探讨。

本文所称的复合型大陆边缘有两层含义：其一是指东亚中生代大陆边缘含有多个晚古生代至早中生代古陆块的古陆缘，中国东部乃至整个东亚是由这些古陆块复合而成的，中生代的大陆边缘对于古生代的大陆边缘有一定的继承性，特别是中新特提斯在构造走向上与古特提斯具有很强的继承性；其二是指出东亚中生代大陆边缘是由许多不同性质和类型的大陆边缘复合而成的。

一、复合型大陆边缘的基本特征

（一）由多个古陆块古陆缘复合而成的大陆边缘

亚洲大陆是一个复式大陆，是由多个大小不等的陆块拼合而成的。就晚古生代至早中生代这一段历史时期而言，它是在印支期才由这些碎块拼贴在一起，在侏罗纪—白垩纪时才焊合成一个统一的亚洲大陆的^[29]。在我国东部及邻区则是由中朝地块、北侧的东北亚诸地块、日本的飞驒地块、扬子—华南地块、印支地块等在印支期拼合而成的。这些地块有各自的陆缘，拼合时造就了东亚大陆内部复杂的陆缘造山带，使得东亚大陆边缘和陆缘造山带不同于世界上一些巨型单一式大陆那样——大陆边缘和陆缘造山带只分布于大陆的外围，而是同时还分布于拼合后的大陆内部（图3-5），这对印支期的东

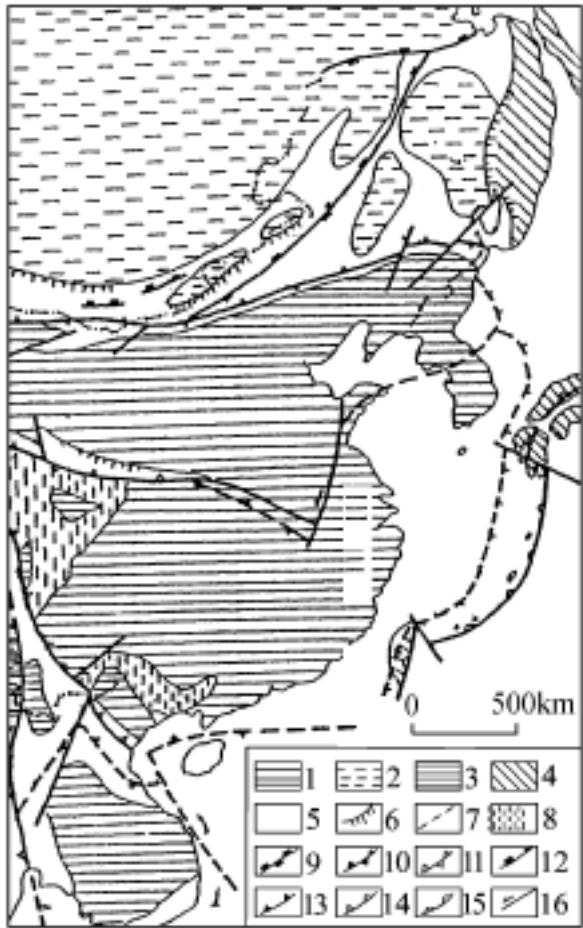


图3-5 中国东部及邻区海西—印支期古构造图
(据王鸿祯图改编, 1990)

Fig. 3-5 Hercynian-Indosinian paleostructures
in eastern China and its adjacent areas
(after Wang Hongzheng, 1990)

1—华夏区系诸构造域；2—安加拉赫斯坦构造域；3—冈瓦纳构造域；4—后印支期异地体增生带；5—海西 - 印支期褶皱带；6—陆坡；7—推测断裂；8—印支期浊积岩盆地；9—早海西期对接消减带；10—晚海西期对接消减带；11—印支期对接带；12—早海西期叠接消减带；13—晚海西期叠接消减带；14—印支期叠接消减带；15—海西 - 印支期俯冲带；16—后期平移断裂；本文的陆缘造山带为5中的近陆缘部分

亚大陆边缘来说是独具一格的。

(二) 裂解的大陆边缘与增生的大陆边缘在空间上的并列和时间上的复合

自贺兰山—横断山脉一线以东至西太平洋陆缘岛弧带，新生代期间存在一个裂解的大陆边缘，表现为一系列以北北东走向为主体的伸展性断陷断隆、陆内裂谷、陆缘裂谷和边缘海，其地壳类型自陆壳型转变为过渡型，其地壳厚度自大于 33km 减薄至约 10km（南海中央海盆）。根据近年在陆缘带邻近海域上所获得的老地层资料，具元古宙变质基底的早前寒武纪的陆壳碎块在日本海、东海陆架、海南岛、西沙、南沙等地仍有踪迹可寻；就是陆缘岛弧（日本、琉球、台湾、巴拉望、加里曼丹等地），其基底也多属成熟陆壳，大部是伴随边缘海的扩张自大陆离散出去并仰冲于海沟带之上的，但陆缘岛弧同时又是增生的大陆边缘之一部分，在太平洋—菲律宾板块沿日本—琉球—菲律宾海沟俯冲机制下，形成新生代的火山岛弧（多组成内弧火山脊）叠加在原先由大陆离散出去的陆壳块体之上。

自陆缘岛弧带向东到日本海沟—小笠原海沟—马里亚纳海沟之间是菲律宾海和洋内不成熟的岛弧带（伊沃季玛岛弧带与马里亚纳岛弧带），并含若干微陆块、海山和海底高原，应属于东亚最年轻的增生大陆边缘和未来行将成为大陆边缘的构造域。因此，陆缘岛弧带是裂解的大陆边缘内带和增生的大陆边缘外带的过渡域或叠加复合构造域。

历史分析表明，上述裂解的大陆边缘内带与增生的大陆边缘外带并存的构造格局并非新生代所特有。例如在侏罗纪末期至早白垩世初期，中国东部也曾发育一系列以北北东走向为主体的拉张性红色断陷盆地，组成了裂解的大陆边缘内带；与此同时，在东亚大陆边缘外带，北起东北亚的锡霍特阿林—那丹哈达岭—西南日本，经琉球群岛，南至北巴拉望和婆罗洲则有一个超级裂解地体群和增生的大陆边缘^[119]。

一些学者强调中生代期间东亚存在剪切（转换）性质的大陆的边缘^[120]，多指侏罗纪—白垩纪时存在于中国东部及东亚的北北东向左行平移断裂系并使东亚陆壳与太平洋直接接触。作者也认为在某些地段某一时期存在着剪切性质的大陆边缘。但是有几点存疑：库拉或伊泽奈崎（Izanagi）板块的洋脊走向为北东东向，其转换断层应为北北西走向而不是北北东向，它主要发育于洋壳中而不是在陆壳中；中国东部北北东走向的新华夏系主压面是压剪性的，并不是转换断层；但是在侏罗纪末—白垩纪初期，当库拉或伊泽奈崎板块走向呈北东东向的洋脊斜向俯冲于东亚大陆之下时，与大陆形成左行南北对扭的构造应力场，从而形成中国东部呈雁行排列的北东向早期新华夏系。此时除形成北东走向的左行压剪性褶皱和逆冲断裂外，还形成一组北北东向左行走滑的剪切平移断裂，于是导致断裂系东侧一些地块北移而成为移置地体。但它们仍然不能称为转换断层，因为同经典定义的转换断层有本质的区别，不能称为转换边界或转换型的大陆边缘。

考虑到无论是挤压性的增生期还是拉张性的裂解期都必然伴生有剪切走滑，因此我们没有把剪切走滑作为独立类型的大陆边缘。

如前所述，在同一时间内，中国东部及邻区可见到增生的大陆边缘（外带）与裂解的大陆边缘（内带）并存，同时在时间演化的进程中，在同一地点又可看见挤压性的增生型大陆边缘为伸展性的裂解型大陆边缘所取代或反之，这已为中国东部及邻区的中新生代大陆边缘演化历史所证实。

(三) 安第斯型大陆边缘和阿尔卑斯型大陆边缘的复合

从东北亚的楚科奇半岛经锡霍特阿林、朝鲜半岛到我国东南沿海，长达 5000km 以上

的大陆边缘发育着以中生代陆相火山岩和花岗岩为主的构造岩浆带，濒临库拉（伊泽奈崎）板块并与其活动时期相同，因而许多学者都认为它是在伊泽奈崎板块俯冲消减于亚洲大陆之下的产物，与南美安第斯大陆边缘极为相似，而称之为安第斯型大陆边缘。但是近年来获得的地质资料对这种简单的解释提出了质疑，主要有如下几点。

（1）整个中国东部中生代岩浆活动的时间有自北西向南东变新的规律，很难用伊泽奈崎自东南向北西的俯冲来解释。如果假定存在多个俯冲带并不断自北西向东南迁移后撤，又找不到这种证据。

（2）整个中国东部中生代火山岩岩区界线总体呈北东东向^[121]，虽然与伊泽奈崎板块的洋脊走向一致，但中国东部的北部岩区为壳源钙碱性系列，中部岩区为幔源碱性系列，南部岩区又为壳源钙碱性系列^[122]，都很难用单一的伊泽奈崎板块自南向北俯冲来解释。翁世劼等^[78]对浙闽粤沿海燕山期火山岩化学成分的研究表明，与日本火山岩有重大区别，特别是粤东赣南区，从岩石投影图上看，其特征属钙碱性双模式，与典型双模式有些不同，各带成分显示的极性和指向与板块俯冲模式的效应正好相反，而与陆陆碰撞或仰冲机制的指向和极性相似。

因此，尽管我国东北长白山和鲁、苏、皖、浙、闽等地的中生代钙碱性火山岩系列和燕山期花岗岩确有部分属于伊泽奈崎板块俯冲消减的产物，但同时又存在陆陆碰撞型的产物，反映出安第斯型大陆边缘与阿尔卑斯型大陆边缘的复合。

二、复合型大陆边缘形成的区域构造背景

中国东部及邻区中新世代大陆边缘所以具有比较复杂的性质，以致我们不得不称其为复合型，与其所处的区域大地构造背景有关，即与处于黄汲清等^[123]所提出的三大构造域的复合构造域有关。近年来，随着对特提斯的深入研究，东亚中新世代大陆边缘是特提斯（喜马拉雅）域、库拉（伊泽奈崎）-太平洋域和古亚洲域复合的大陆边缘的提法越来越受重视。其证据主要来自以下几个方面。

（一）古生物地理区方面

复原构造古地理^[59]、古生物地理区研究能提供重要依据。近年来对滇藏三江地区的研究业已查明：大抵沿龙木错—玉树—澜沧江（昌宁—孟连）一线两侧晚古生代分属不同的古生物地理区，其北东侧和东侧属北特提斯区，分布着暖水型动物化石群（牙形刺、珊瑚、~~笔~~科等）和华夏植物群（大羽羊齿等）；其西南或西侧则属冈瓦纳区，分布有冷水动物群（Eurgdesma）、小型珊瑚、腕足类等、舌羊齿植物群和以含砾板岩为主的冰水砾物。由上述古特提斯印支期的主缝合带向南沿缅泰马印尼古特提斯主缝合带的两侧也存在上述两大古生物地理区的分野。我国东部（北起内蒙古—吉黑地区，南至华南）和印支半岛都位于古特提斯域之中。再往东北，白令海峡沿岸科里亚克地区出现特提斯型暖水动物群，西南日本前侏罗纪地体内的石炭系—二叠系中所含纺锤虫组合和晚二叠世的腕足类组合亦具有北方型和特提斯型混生的现象，说明当时的日本已处于古特提斯和原太平洋（Proto-Pacific）域的联结过渡地带（据 Ichikawa 面告，1991）。

晚三叠世印支运动后，海域大大向西退缩，扬子海消失，东部乌苏里、湘赣粤等地局部海侵，海水来自古太平洋。这些地区的双壳类化石与日本、西伯利亚东部等地亲近，属

北极 - 太平洋区系^[124]。当时在日本发育的双壳类化石以日置内贝壳蛤为代表并有成羽植物群 (Dictyophyllum, clathopteris), 均与粤北湘赣同类化石特征相同。在西南加里曼丹的古晋带同时代地层中也见有成羽植物群化石, 说明当时它们属于统一的亚洲大陆边缘和太平洋生物省。但是, 进入早侏罗世后情况比较复杂。中新特提斯是否进入东南亚与太平洋域联合、复合, 至今仍存在不同的认识: 一部分学者认为中特提斯伸向华南、印支半岛和东南亚早侏罗世的闽粤边缘海中, 发育有具地方色彩的特提斯型分子香港菊石 (Hongkongnites) 和白羊石 (Arietes)。据陈金华^[124]的研究, 中国东部这一时期的海相双壳类化石十分丰富, 达 40 余属 150 余种, 其主体面貌近于古地中海系, 与古太平洋区系有一定联系; 中侏罗世青藏地区的海相古地中海系向东南延伸当进入东南亚。晚侏罗世, 据 Fontaine 等^[125]在 Ccop 与 Eslop 技术报告中所提到的, 在南部沙捞越、民都洛、北巴拉望、苏门答腊等地, 上侏罗统海相沉积中所含的生物化石群完全可以与欧洲中东部的西特提斯动物化石相对比, 故认为在晚侏罗世时中特提斯海延向了东南亚。白垩纪中晚期和晚白垩世中特提斯海水曾达南部新疆—青海中部、川藏交界和云南思茅一带, 似应向中南半岛、南海和东南亚延伸。近来周蒂等^[126]进一步研究后明确指出, 中特提斯自我国川滇三江南下之后, 经 Woyla 线穿越苏门答腊岛, 绕加里曼丹岛南缘至 Maratus, 向北经沙马即 Lupar 线, 在沙捞越北部进入古南海。粤北南雄盆地曾发现有孔虫化石的海相白垩系 (夹层), 台湾北港钻井中曾获海相白垩系, 南海北部陆缘自北西向南东, 晚白垩世至始新世时出现自陆内断陷—陆缘三角洲边缘浅海至半深海相—浅海相的对称沉积体系, 揭示当时的北部海陆边界位于东沙隆起附近, 其南侧为古南海。Metcalf^[127]认为白垩纪时中特提斯一直伸向澳大利亚的西北侧和西南太平洋以转换断层相接, 遗憾的是没有提出古生物地理区方面的证据。另一些学者则认为中生代以来, 中国东部及东南亚已属于太平洋构造域, 中特提斯并没有向东延伸。其证据也来自古生物地理方面, 如加里曼丹古晋带上侏罗统中含有与日本上侏罗统相同的双壳类化石, 暗示当时其与日本同属太平洋生物区系^[124]。

中特提斯关闭以后, 从札格罗斯到喜马拉雅, 在印度板块尚未与欧亚大陆对接碰撞以前, 存在早新生代的新特提斯洋。雅鲁藏布江以南古近系灰岩中所含的许多海相化石属古新世至早始新世, 与巴基斯坦、印度、缅甸等地可以对比, 属典型的特提斯型分子^[122]。台湾古近系—中新统下部也发现有 Nummulites, Lobigerina, Discocyclus 等化石, 与喜马拉雅区极为相似。在东海海域钻井中也发现有 Nummulite。因此有人推测古近纪时新特提斯是东延的, 可能从现今沙捞越南部通过, Metcalfe 也认为在澳大利亚北侧存在一个宽阔的新特提斯洋。但是另一部分学者 (如 Charles, Hutchison 等) 根据著名的华莱士生物线 (Wallace line) 所划定的生物地理区界线 (位于苏拉威西 Sularwesi, 该线以西动植物化石具有亚洲亲缘性, 其东南动植物化石具有澳大利亚亲缘或亲洋的特点), 认为印支半岛和东南亚总的属于亚洲太平洋生物省, 新特提斯并没有伸向东南亚^[128]。

作者根据中新生代中国东南部与南海海域及其邻区的构造对比, 比较倾向于中新特提斯曾伸向东南亚, 然后在巴拉望以东与太平洋域联合、复合 (详见后述)。

(二) 古地磁与古气候方面

三叠纪以前, 现有的古地磁资料都表明华北和扬子地块的古纬度较低 ($<30^{\circ}$), 冈瓦纳古陆古地磁数据也表明早古生代期间东冈瓦纳古陆 (澳大利亚、印度和东南极大陆) 也位于相似的低纬度区, 故华北和华南两陆块在早古生代期间可能靠近冈瓦纳古陆北东部; 石炭

纪时，东冈瓦纳古陆离开赤道向南漂移，与华南、华北陆块之间存在一个增生的特提斯洋（方大钧，1991），海南岛位于南纬 $4.6^{\circ} \sim 4.9^{\circ}$ ^[129]；西南日本美浓带和丹波带二叠纪时分别位于北纬 3.5° 和南纬 19° - 北纬 19° 之间^[130]。说明均位于古特提斯海之中，这与古生物地理及古生态、气候资料所揭示的华南等地当时位于热带、亚热带^[131]是一致的。

现有的古地磁资料都揭示从二叠纪起至三叠纪时，华南地块相对于华北地块有较大的相对运动^[132]，华南陆块、印支地块有较大幅度的快速北移^[133]，从中侏罗世起才没有显著的相对运动，因而华北与华南之间的运动应发生在早中三叠世，即相当于印支运动；而至白垩纪时亚洲东部才出现古地磁极视移动曲线的一致^[134]，说明只有在这时通过陆块间的进一步焊接和联合^[51]才使整个亚洲东部完全焊合起来。古地磁的资料帮助我们说明中国东部中生代的复合型大陆边缘是由多个古陆块陆缘复合而成的，并且存在着特提斯域与太平洋域的复合。

（三）构造格局方面

出现在我们面前的东亚和西太平洋海陆构造的形变图像是复杂而丰富多彩的。海陆构造是一个统一的整体，应该联系对比研究。磁条带揭示无论是印度洋还是西太平洋，其洋脊总体呈东西向和北东东向展布。而那些南北向的海沟和俯冲带则是由 45Ma 以来太平洋板块运动改向在原来的北北西向或近南北向转换断层的基础上发展起来的。与此相对应，在中国东部横贯着五条纬向构造带（黑龙江、阴山、秦岭、南岭和海南），其形变主体是由褶皱和压性断裂带所组成的。近年来在中国大陆板内发现一系列走向东西的薄皮叠瓦逆冲推覆构造，如华北地台北缘经涿鹿、昌平、密云到喜峰口近东西向、长达 300km、自南向北推掩的叠瓦推覆构造带，华北地台南缘呈北西西向、从陕县至舞阳长 300km、宽 30km 向南倾的逆冲断层带，江西九岭山南缘逆冲构造带使中元古界逆掩于白垩系和第三系之上，南岭地区也发育一系列走向东西的逆冲叠瓦构造带。这反映了南北向或近南北向挤压应力场的存在，与呈东西向展布的特提斯洋脊扩张是遥相呼应的。

自青藏地区的龙木错—玉树—澜沧江至緬、泰、马、印尼的特提斯主缝合带呈反 S 形展布，这就是李四光所厘定的青藏緬泰印尼歹字型构造体系。由于古特提斯的闭合时期在印支期，因而许多人把这一体系的成生时期定为印支期。但是考虑到印度板块自晚白垩世以来已经北移约 50 个纬度（根据印度洋洋底磁条带所作的计算），约相当于 2100km 的平距，根据这一洋底扩张距离的反演，古近纪时古欧亚大陆南部边缘的边界应位于现今印度次大陆的南端^[37]）。南海洋壳扩张，南北向最大宽度约为 1000 km。如把印度板块拉回到古近纪末与亚洲碰撞前的位置，将南海剔除并把加里曼丹、北巴拉望与华南大陆合拢，那么，我们会发现这一巨大的反 S 型构造不复存在，古中新特提斯的蛇绿岩带的反 S 形现行展布也不复存在，而变成在华南大陆边缘的南侧（其位置应在现今的南海及加里曼丹，沙撈越、巴拉望一带）呈 EW 向连续展布的洋壳残迹，一个自西向东由北西西向转成近东西向乃至北东东向的连线，再向东则和北东东向的大陆边缘形成一个微微向南东方向凸出的大陆边缘弧。这正是亚洲大陆向南、特提斯—印度洋脊向北扩张所要求的。

沿着緬泰马特提斯南北向主缝合带分布着印支期—燕山期的碰撞型 S 型花岗岩带和世界著名的锡矿带。当构造复原成近东西向时，它们与华南南岭花岗岩带相平行。近年来在粤^[5]、闽（边效增，1989；陆人雄，1993）发现了一些海西—印支期碰撞型的花岗质岩

石。如前所述，赣南粤东的火山岩带也显示了碰撞型的指向和极性分带^[78]。

在南海北部海域东沙隆起的南侧下部陆坡区，物探揭示区内重磁异常由东部的北东向向西转成北东东向或东西向。重磁异常特征表明该区沉积层下部为成片的基性、超基性岩分布区。通过声纳浮标、地震波和磁性体极性期的测定判断，该基性、超基性岩带的时代为侏罗纪，从而认为沿东沙隆起陆坡下部可能是燕山早期俯冲碰撞之位置（图3-6）。考虑到东沙以南还有陆块，真正的特提斯洋可能还在南面，因而前述基性、超基性岩有可能代表一个已经俯冲消亡的带有弧后或弧间盆地性质的小洋盆，它在侏罗纪时俯冲消亡于陆壳之下，并导致了南岭地区一系列走向东西的盖层滑脱褶皱和逆冲推覆。这样，我们不妨把南岭地区自早古生代以来的区域沉积盆地、岩浆岩带和褶皱断裂带的展布做一个归纳，它们是：早古生代变质基底中的褶皱在泥盆系不整合面以下，其现位展布呈NE向或NW向，被称为古NE向构造和古NW向构造，经构造复原后，这些古NE向构造和古NW向构造实为EW走向的W型构造的片断（参阅本书构造复原章节），晚古生代时期南岭地区的沉积古地理，马文璞等^[96]已证明存在EW走向的大陆边缘向南倾斜的斜坡和呈EW向展布的深水盆地；南岭地区晚古生代沉积盖层广泛发育印支—燕山期EW走向的褶皱和逆冲推覆；南岭地区的花岗岩带总体也呈EW向展布等等……所有这些都说明，华南及东南亚自古生代至中生代确实存在一个开始是被动大陆边缘，然后是洋陆俯冲、弧陆碰撞，最后是陆陆碰撞的呈EW向展布的地中海型或阿尔卑斯型的大陆边缘。

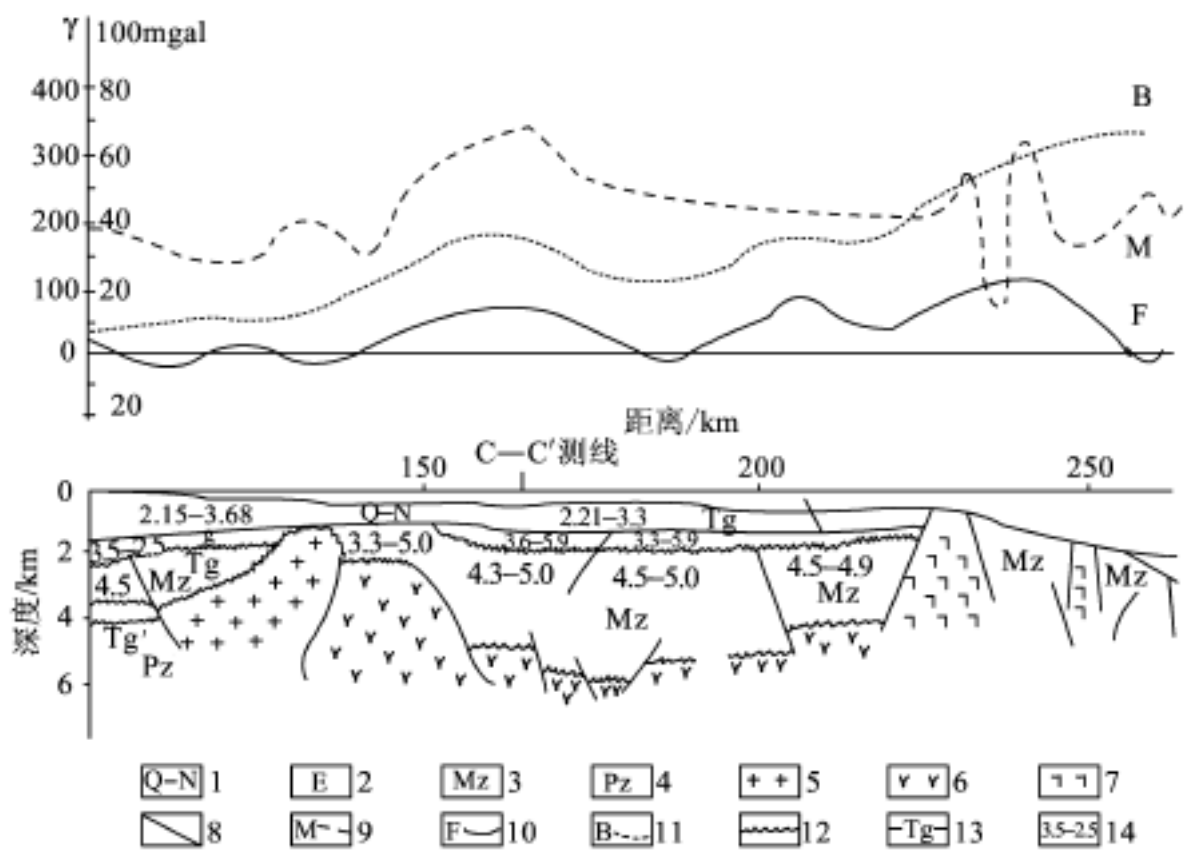


图3-6 中国南海陆坡区A-A'测线中段综合地球物理剖面

Fig. 3-6 Integrated geological—geophysical section in the central sector of profile A-A' in the continental slope area in the South China Sea

1—第四系 - 新近系；2—古近系；3—中生界，4—古生界；5—中酸性侵入岩；6—燕山期基性岩；7—新生代玄武岩；8—断层；9—磁力异常曲线；10—自由空间重力异常曲线；11—布格重力异常曲线；12—前新生代基底弧间盆地基层；13—地震反射层及编号；14—层速度（km/s）

亚洲东部最醒目的构造是由李四光所厘定的北东—北北东向—北东东扭动构造体系，即华夏系、新华夏系和华夏式，是印支期以来伊泽奈崎 - 太平洋板块与亚洲板块俯冲挤压和平面上相互左行扭动的产物。但是，与此同时，存在于中新生代不同历史时期的北东向、北北东向张性、张扭性断陷盆地可从大陆边缘深入到大陆内部 1000km 以上，无法用弧后扩张来解释其形成机理，显然是由于挤压力来自北东—南西方向的北西—南东向区域性拉张所造成的。近年来，在中国东部东北三省至海南岛，都发现了一系列北西走向的褶皱和压剪性断裂，成生时间分属于中晚侏罗世、晚白垩世—始新世和新近纪（万天丰，1990）^[59]（本文作者将后者归属于新河西系）。这些北西向构造就其规模而言，虽不及我国西部地区的北西向构造，但从伴生构造组合和应力场的力源分析，应属特提斯（喜马拉雅）构造域的产物。

三、形成机制的初步探讨

燕山中晚期，东亚内部各陆块已经焊接合成一个整体时，巨型板块之间的俯冲或碰撞机制已经起主要作用。但是三大板块的相互作用和两大板块之间的相互作用是不同的，中国东部及邻区与美洲西部及大西洋两岸的区域构造背景是不同的。由于三大板块存在着不均衡的相互作用^[136]，因而产生了复合型大陆边缘的许多特征。不过，应指出的是，如果仅仅由于印度板块与亚洲大陆的碰撞挤压导致北西—南东方向表层的拉张，从而形成北北东走向的伸展断陷和双模式火山岩流喷溢，那么它首先应该发生在近板缘地区。但这些北北东向的伸展性断陷和火山岩盆地却常发育在远离板缘的板内，本书作者在论述中国东部 NNE 向似新华夏式伸展盆地系时会强调后造山期岩石圈山根的拆沉作用和陆壳拉伸减薄作用的意义，读者可参阅本书相关部分的论述。

还有，中生代期间广泛发育于中国大陆板内的构造变形、岩浆活动和断裂变质作用也很难用三大板块在板缘的俯冲或碰撞机制来全部予以解释。是否存在与大洋板块俯冲机制并存的陆内机制是值得探索研究的，它和大洋板块俯冲机制共同受控于一个更高级的全球性动力学机制是可能的。这是全球构造学所应该解决的。

因此，从区域地质实际出发，中国东部及邻区中新生代大陆边缘的性质和类型不一定要去套用已有的模式，或许它就是独立于安第斯型或阿尔卑斯型之外的另一种大陆边缘，可称之为东亚型或本文所称的复合型大陆边缘。在这一复合型大陆边缘的演化过程中，我们可以看到东亚大陆边缘的演化与东特提斯的演化、东冈瓦纳的裂散和亚洲的增生密切联系在一起：伴随着古、中、新特斯洋的开合，东冈瓦纳古陆不断裂散，其碎块漂移并拼贴增生于欧亚大陆的边缘；与此同时，在中新生代时期，伴随伊泽奈崎、菲律宾 - 太平洋板块的俯冲，东亚东部亦有一系列地体群增生于大陆边缘^[31]。

谈到研究古今大陆边缘不要非去套用现今已有的模式时，在这里我们无妨也提及关于南海新生代大陆边缘性质的讨论。板块构造学者把大陆边缘分为两类，即活动大陆边缘和被动大陆边缘，前者系挤压性的大陆边缘，后者系伸展性的大陆边缘，南海北部大陆边缘因其伸展性和有裂解不整合、离裂系的沉积而被认为是被动大陆边缘。

但本书作者等^[137]提出质疑，再与典型的被动大陆边缘大西洋两岸做了系统的地质对比后（表 3 - 1）认为，新生代沉积断陷中有活动陆缘的火山沉积物和周边环境都为挤压性的活动陆缘应归为活动陆缘较合适。事实上从印度板块与欧亚板块的碰撞边界一直沿印

支半岛—马来亚至加里曼丹沙捞越，东侧太平洋 - 菲律宾板块俯冲边界都为活动陆缘，南海北部陆缘的伸展性质是在印度板块碰撞过程中衍生的，因而不能因为局部性的伸展性质而将其定为被动陆缘，南海北部陆缘仍应属活动陆缘的一个组成部分，其消减作用由于南海的扩张发生在加里曼丹—沙捞越一带^[137]。南海北部陆缘性质的讨论虽然涉及的是新生代的陆缘，但其思路仍然适用于古大陆边缘的研究。

表 3 - 1 大西洋两岸大陆边缘与南海北部大陆边缘地质特征对比^[137]

大西洋两岸大陆边缘	南海北部大陆边缘
<div>1. 区域构造背景是两大板块的扩张边界，其主体构造环境是岩石圈大规模伸展；</div> <div>2. 岩石圈进入裂后阶段后趋于稳定；</div> <div>3. 其形成机制是在扩张边界上，软流圈地幔流上升导致洋中脊扩张，岩石圈洲际性地拉伸变薄、裂解和沉降；</div> <div>4. 出现典型的大洋壳，喷溢的玄武岩为大洋中脊玄武岩；</div> <div>5. 西侧大陆边缘并无岛弧和强烈地震、火山活动；</div> <div>6. 东、西两侧均处于拉伸之中，即总体处于大洋增生之中；</div> <div>7. 在威尔逊旋回中处于鼎盛的发展期。</div>	<div>1. 是两大板块的聚敛边界的复合地带，主体构造背景是挤压性的；</div> <div>2. 进入裂后阶段后仍表现出具有多幕次的运动和频繁的断裂活动；</div> <div>3. 聚敛边界上的碰撞挤压，诱发出深部地幔流蠕散和过剩堆积隆起，引起次级表层拉伸，岩石圈局部变薄、裂解和沉降；</div> <div>4. 出现由陆向洋的过渡性地壳，属于边缘海性质，带有次生小洋盆和海岛的特点；喷溢的火山岩除陆内 - 陆缘裂谷双模式火山岩外，尚有岛弧火山岩；</div> <div>5. 邻侧存在火山岛弧，沿滨海断裂带有强烈地震活动，是环太平洋地震活动带之一部分；</div> <div>6. 北边拉伸，南边和东边俯冲，西边剪切，各部分处于不同的发展阶段，既有裂解，又有增生；</div> <div>7. 属于陆陆碰撞（印度板块和欧亚板块）和弧陆碰撞（菲律宾板块与欧亚板块）后期阶段，即威尔逊旋回之结束阶段。</div>

第三节 古板块运动及其演化记录的反演

古板块运动可解析为垂直运动和水平运动。垂直运动的反演主要靠地层建造（沉积建造和岩浆岩建造）的记录来反演，其研究方法基本上传承了历史大地构造学的分析方法，包括沉积古地理、沉积厚度和构造层的分析方法，通过这些方法尚可进一步划分由垂直运动所形成的各级隆起和凹陷，包括台背斜和台向斜，断隆和断陷，以及根据岩浆岩带、变质岩带和狭长突变的沉积相、沉积厚度确定的断裂带。

对于古板块的古水平运动的反演虽然也可通过一些大规模的逆掩推覆构造和剪切走滑断裂来认识，但涉及到像板块这样大型块体的长距离的水平运动，主要依据古地磁和古生物地理的记录来反演。例如，在我国滇川构造带中这两方面的记录均可反演晚古生代时期古特提斯东段在晚古生代时期的古水平运动。

具有冈瓦纳亲缘的保山地体泥盆纪时的古纬度为 42 °S、34 °S，而扬子的微陆块石炭纪时的古纬度为 10.7 °S，早二叠世时为 9.3 °N，晚二叠世时为 2.1 °N^[31]，表明每一历史时期扬子微大陆陆块群和冈瓦纳陆块群分别位于古特提斯洋之北、南两侧，而且南、北两侧之陆块群随时间的推移向 N 漂移；而古生物地理记录也显示北特提斯（NT）为暖热水特提斯，位于欧亚大陆，其标志性动物化石为笔类、珊瑚和腕足类，南特提斯标志性动物群其下层为冷凉水动物群（小个体珊瑚和小个体腕足类）和其上层位覆盖含有暖热水带之特提斯动物化石群和植物化石群，标志南特提斯随时间向北漂移^[22]。

此外，根据古板块的视极移曲线，还可以反演古板块的旋转开合运动：大西洋开裂前后，北美洲与欧洲的两条磁极视移动曲线（图 3 - 7），开裂前两条磁极视移动曲线重合，开裂后两者不重叠。

20 世纪 70 年代，北美以 Coney 和 Jone 为首的一批地质学家在仔细研究了科迪勒拉山脉地区的古地磁和古生物地理的历史记录以后，认为北美西部大陆边缘是由一批来自太平洋古陆和古特提斯域的微地块经远程运移至北美西部大陆边缘后拼贴组成的，从而提出了地体（Terrane）的概念。

移置地体概念的提出是板块构造理论的进一步发展。移置地体的古水平运动的复原反演也要依据古地磁记录和古生物化石所反映的古生物地理来反演。如在我国东北那丹哈达岭地区，据邵济安等^[31]的工作，在晚石炭世—早二叠世时期全球处于 Kiaman 磁反极性期时，那丹哈达地区的古地理位于南半球，晚石炭世时处于南纬 19.4 °，早二叠世时处于南纬 10.3 °（图 3 - 8），同时在那丹哈达岭地区的外来岩块中含有古特提斯生物群，其生物种属可与黔南地区对比，而黔南地区晚石炭世—早二叠世的古地磁数据恰巧也处于南纬 10 °~20 °之间。

那丹哈达采石场含晚三叠世放射虫燧石岩所测得的古地磁数据表明当时的古纬度为 12.2 °N，与日本美浓地体晚三叠世的古纬度 10.9 °N 比较相近，美浓地体中二叠世时古纬度为 0.7 °±3.4 °（N 或 S）^[31]。

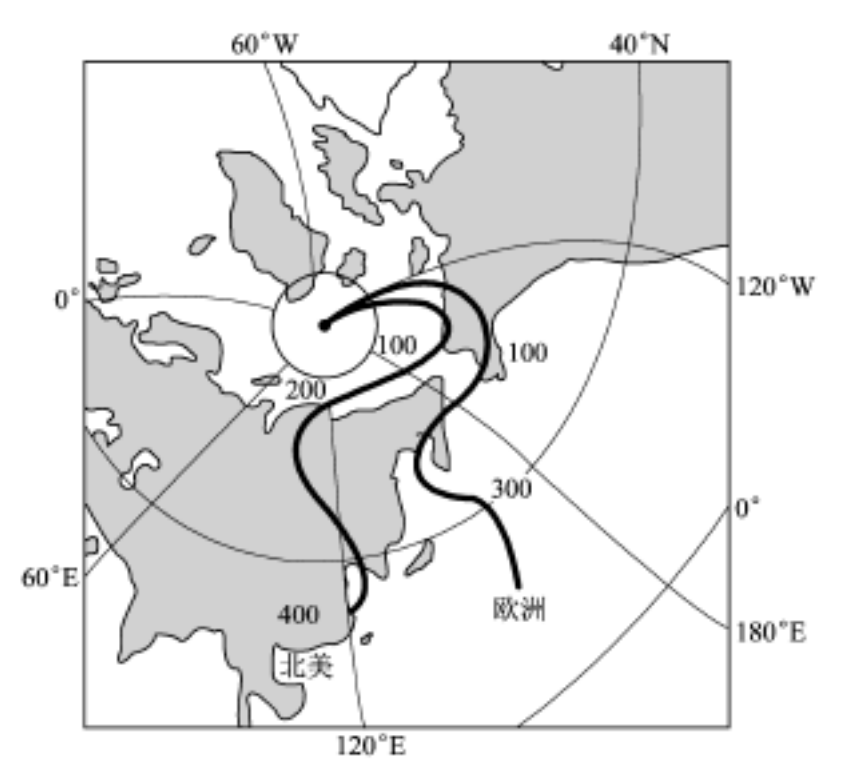


图 3 - 7 北美洲和欧洲 5 亿年来视极移轨迹
(据 M. M. Mcelhinny, 1973)

Fig. 3 - 7 The wandering path of appantent pole migration of north America and Europe since 500 millions years
(after M. M. Mcelhinny, 1973)

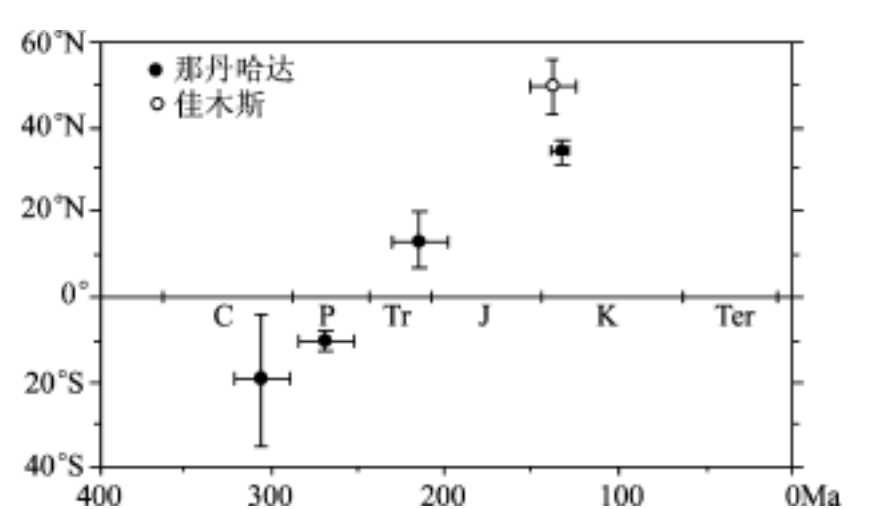


图 3 - 8 据古地磁研究得到的那丹哈达地体的古纬度
(邵济安等, 1995) ^[31]

Fig. 3 - 8 The paleo latitude of Nan dahaling terrane according the redearch of paleo megneton

那丹哈达地体在东安镇含 Buchian 北方区双壳动物群的早白垩世沉积盖层的古纬度为 33.6°N，早白垩世美浓地体早已完成与飞驒地体的拼贴，它们都被晚侏罗世—早白垩世的非海相碎屑岩所覆盖^[31]。

地体是由古大陆边缘裂散出来的块体经远程漂移而当大洋关闭时拼贴于另一大陆边缘的移置体，因此其离裂前、运移中和拼贴后的地层沉积、岩浆岩建造和变形构造及变质带的发育都不一样，这就产生了对移置地体的特殊分析法。移置地体的研究方法成为板块构造学的专门章节。

无论是板块构造还是移置地体都要复原其地质演化历史。从以上的阐述中，我们可以看到板块构造学在古板块的运动和历史的研究中主要传承了历史大地构造学的方法，但是在现代科学技术成就的基础上（诸如层序地层学、微体古生物学、同位素年代学、地球化学同位素示踪、构造地层学、古海洋地质学、古地磁学、地震层析图像分析等）进行的。它的综合程度和科学性是前所未有的，但是涉及古板块研究的方法学方面却并非不存在问题，概括起来有如下几点。

(1) 所确定的复原古板块边界的岩石学标志是否确是某种古板块边界（聚敛边界或伸展边界或剪切走滑边界）所特有的而不存在多解性。

(2) 岩石本身具有不可逆的演化，某种岩石只是特定地质历史条件下特殊构造环境的产物，例如太古宙时期形成的岩石主要是绿岩带和麻粒片麻岩带。构成绿岩带的火山岩主要是贫 K_2O 的低碱玄武岩，硅铁建造主要形成于元古宙早期，在 25 亿年前的太古宙与元古宙之间，现在的上地壳以富钾花岗岩为主，而这一时期以前，地壳由玄武岩和富钠花岗岩组成，构成了 TTG 岩套（英云闪长岩 - 奥长花岗岩 - 花岗闪长岩）这种岩石目前只在较年轻的海洋地壳消减的地方形成和出现（如智利南部海岸）。上述这些岩石的形成，其地质构造环境与板块构造或前板块构造体制有何关系，利用它们的成因如何来反演板块或前板块构造体制的历史是一个需要进一步研究的问题。

(3) 板块构造本身有一个地质演化过程和演化历史，朱夏等^[2]提出过前中生代前板块构造体制为手风琴开合方式的微陆块的软碰撞。虽然我们不会接受这种结论，把板块构造体制和前板块构造体制的界限定在中生代和前中生代，但他的这种思路对我们有启示。我们应该坚信板块也不是自盘古开天地之初即太古宙就有的，前文我们已经述及可以元古宙出现古大陆、古地台作为板块构造开始出现的时限，在这以前为非板块构造体制，在非板块构造体制的时期应该有一个由陆核到微陆块到微板块的演化过程，在这个过程中其运动方式也应该不同于板块构造的运动方式。它们是怎样运动和怎么生长的，最后如何质变成板块构造？这是一个重大的研究课题。

(4) 传统的大地构造历史分析法几乎不太考虑后期改造对前期建造和前期构造形迹的改造，往往把后期叠加上去的物质成分和构造形迹当成与建造同时的成分和构造，并以此来反演地壳运动的历史。这种方法学上的谬误往往也见于对古板块演化历史的反演，正是由于上述方法学上存在的问题，使本书作者对已有的某些古板块历史复原和反演持保留态度。

第八章 古构造形迹和古构造型式的研究

地质力学对于古构造的研究，与板块构造理论不同：后者如前章所述，侧重于古板块的划分、古板块的运动和演化的研究；而地质力学则侧重于古构造形迹及其形变共生组合即古构造体系和古构造型式的研究。

对古构造的概念，不同学者有不同的理解和应用：一种是广义的概念即相对于某一时期较老的构造，诸如前新生代的构造、前中生代的构造和前古生代的构造等等；一种是具有特定含义的理解，如李四光^[5]所指的前燕山期的构造。李四光一再申明他所鉴定出来的构造型式和构造体系是燕山运动以来形成的，至于燕山运动以前形成的古构造型式是什么样子，需要进一步研究才能知晓。李四光虽然来不及在他生前系统地开展古构造型式的研究，但他在实际研究工作中，诸如对广西台地和西北陇西系的研究中运用复合形变分析方法筛分出一些古构造体系的构造成分^[138, 68]，更重要的是他提出了研究古构造型式的一些思路。崔盛芹^[139]和他的科研集体开展了燕辽地区现位古构造体系的研究，以后他又对国内外有关古构造的研究现状进行了综述^[140]。

本书所采用的古构造的概念是广义的概念，即包括中新生代构造，只要它相对于较新的构造是较老的构造。

某些古成矿时期形成的矿产资源受控于该时期的古构造，要掌握这些矿产资源的分布规律，就要弄清控制该矿产资源分布的古控矿构造的现位展布。因此，现位的古构造虽然还不是已复位的古构造，但在建立构造的形成演化顺序和指导找矿勘探方面仍然具有十分重要的意义。至于复位的古构造在研究地史方面的意义是不言而喻的，例如冈瓦纳古陆的复原；而利用已错失或分裂的古地块的复原启迪我们去阐明某些具洲际或区域规模的矿带的分布规律，并借此发现新的古成矿带也不乏其例。

关于古构造的研究方法，从地质学的角度大体可归纳为两种研究思路和研究方法：一是从地层建造方面去研究，用这种方法研究古构造，可以一下子直接进入很古老的地质时代的古构造研究，例如前寒武纪的古构造；但用这种研究思路和方法所能阐明的古构造是建造方面的形成与发展的古构造，至于该构造层中的变形构造是该时期形成的还是后期叠加的变形构造尚需慎重地予以审定，即便它是那一古老的地质时期形成的变形构造，其构造位置和构造方位也多经过后期变动的，因而仍然只是一种现位的古构造。另一种方法就是李四光所倡导的从形变分析入手，由新到老、层层剥皮、逐次复位的方法。大量的研究实践表明，要全面地认识古老构造的形成和发展，需要把这两方面的研究有机地结合起来。

物质组成、建造的展布和变化往往涉及比较大的面积，因此物质组成、建造的性质和展布所反映的往往是一个地块的所处环境、位置和运动的变化，因而用这种古构造的研究方法往往涉及的是地块的运动和演化历史；而从形变入手的研究方法则往往涉及古构造型式及其形成和演化。其实这两方面都是客观存在，都是需要研究清楚的。

尽管古地磁学本身还有许多理论和方法上的问题受到质疑，但它毕竟是古构造研究中最主要的一种方法和手段。用古地磁学研究古构造在国内外都主要用于两个领域：一是用于大地构造和历史构造，主要从古磁倾角和古磁偏角的记录去复原古地块、古大陆的古构造位置（古纬度）、地块发生过的旋转，利用不同地块的古地磁极视移动曲线是否重合研究地块间的拼合和开裂的历史；另一是用于形变构造，主要利用磁偏角和古地磁极视移动曲线研究旋转和扭动构造，复原旋转或扭动前的古构造。在我国，林潜、邢玉秋和李普、马醒华运用地质力学的研究思路，利用古地磁记录去研究 S 形扭曲构造和环状构造。从地质力学研究工作考虑，上述两个方面都需要，不可偏废。

本章主要讨论形变方面的古构造研究，构造形变在自然界一般都是多期复合，因此从形变方面研究古构造首先要对多期复合的形变构造进行构造筛分，然后才能进行自新及老的逐次的复原工作。

本书所述及的构造筛分和构造复原，就其研究思路和研究方法而言，虽起源于地质力学的创始人李四光，但本书作者的研究思路却是要把地质力学与板块构造学结合起来。因而，与原始的地质力学的构造筛分和构造复原比较，本书中的构造筛分和构造复原方法则企图综合以往构造解析和构造形变历史研究的积极成果。由于古构造型式的研究难度很大，地质力学工作者仍未能拿出一个可真正称为古构造型式的研究成果，而古构造形迹的研究难度相对小些，对古构造形迹研究好了，也就为进一步的古构造型式研究奠定了基础，故本章重点是古构造形迹的研究。

第一节 构造筛分

一、构造筛分的定义和内涵

构造筛分一词最初见于 20 世纪 40 年代李四光先生的《广西台地构造之轮廓》^[138]一文。他在探索古构造时写道：“在现代构造型式的格架中尚保存的古构造遗迹，可以从现存型式的构造单元的总体中筛分出来”（着重点是引者加的）。李四光在这里说的“筛分”是指把老构造从复合构造中分离出来。

崔盛芹等^[139]在《区域构造学》第一篇中所作的论述，可说是系统地总结了 20 世纪 80 年代以前传统地质学和区域构造解析所作的古构造研究方法，并列举了许多区域古构造研究的分析实例，帮助我们理解和运用这些研究方法。但是，自那以后，有关这方面的研究和论述又有了许多新进展，特别是许多新的科技测试方法用于构造研究，给构造筛分提供了许多新的信息、新的方法与手段，使我们有可能对其进行新的总结与概括。

古构造研究的难度在于要通过一系列手段逐渐复原其本来面貌，因此，古构造研究的第一步是先对各种复合构造进行筛分，筛分出来的构造仍保持现位，尚未复原到原始状态。作者建议，把构造筛分定义为对复合构造进行现位的历史解析，把复原工作留待下一步去完成。当然，筛分工作不仅仅是把复合构造（建造和形迹）筛分为不同时序的构造，而且还应筛分出不同物质组分（建造）、不同产状要素、不同力学性质、不同滑移方向、

本节内容取材于“论构造筛分”一文，该文发表于地质力学学报，2000 年 6 卷 1 期，P33 ~43.

不同变形行为（脆性、脆韧性、韧性）、不同含矿性和不同稳定性或活动性的构造；不仅对单个复合构造进行筛分，而且还应对复合的构造带、构造型式、构造体系和复合地块、巨型复合构造域乃至全球复合构造体系进行筛分，弄清楚其组合群体的成生联系及空间分布，建立不同年代的区域构造格架并在筛分出来的该时代古构造变形场的基础上建立其现位的古构造应力场。

二、构造时序的筛分

构造筛分首先要确定复合构造中各个构造组分的相对年代，即构造时序。前后两个时序的构造既可以分属两个互不相干的构造演化序列，也可以同属一个构造演化序列。作为现位的构造解析，我们首先要解决构造时序问题，把确立构造序列放在构造演化中去解决。现将确定构造时序的方法分述于后。

（一）传统地质学方法

包括地层古生物学、岩石学、构造学、地貌学等方法，贯穿于这些方法之中的一些基本原理或原则，我们把它抽象为下述定律。

（1）叠置律：指建造与建造、形迹与形迹、建造与形迹之间的叠置。在正常情况下，无论是建造还是形迹，被叠置者发生在前，叠置者发生在后。李四光总结的追踪、重叠、重接等构造复合形式也是一种先后构造的叠置关系。当然，对于建造来说，如果发生倒转，那就要恢复正常产状后才能使用这一定律。近年来构造地层学的进展证明，一些岩性层实际上是构造岩，一些层面实际上是构造面，岩性层与岩性层之间实际上是构造接触，是一种假层序，从而从根本上推翻了原来所建立的地层层序和地层划分。这种情况在前寒武系深变质地层构造的研究中屡见不鲜，由此发现了前寒武纪地层中新的复合构造样式。假层序是复合构造的一种重要表现形式，正确识别对构造筛分具有重要意义。以前认为，在不整合面以上的构造是新的构造，不整合面以下的构造是老构造。层滑构造的研究表明，在不整合形成以后，如果下伏为软弱岩性层，沿不整合面层滑时，下伏岩性层强烈变形而上覆岩层可基本不变形，这时易误认为下伏变形层先于不整合面而发生，这是要注意的。

（2）切割律：指建造与建造、建造与形迹、形迹与形迹切割与被切割的情形。一般情况下，被切割者在前，切割者在后。但是，相互切割也可以是同期的（如共轭剪切节理的互相切割，主压面和同期配套构造等），也可以是多期的（如二次切割的三期构造），还有一种貌似切割的关系（如主干断裂与旁侧低序次断裂或裂隙的关系）。最后，还有一种限制与被限制的关系，即由于前期断裂的存在给后期断裂造成一种边界条件，从而使后期断裂受到限制，如图 3 - 9d 所示，先发生了南北向的断裂，后来又发生了南北向的挤压，从而形成东西走向的逆掩断层，但是由于沿走向存

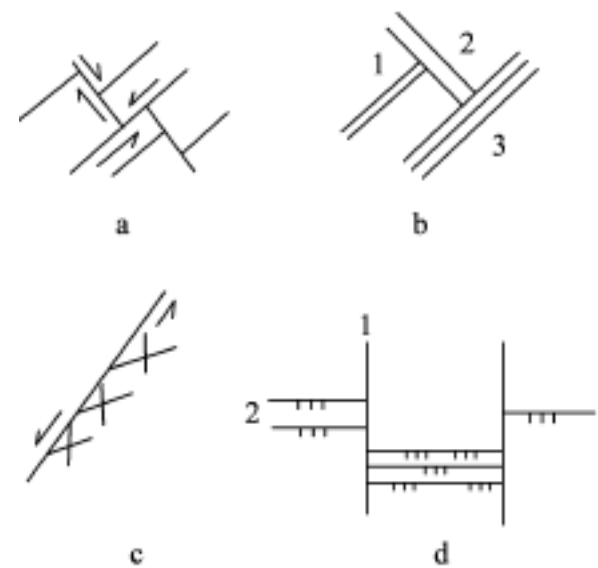


图 3 - 9 几种切割和似切割表象

Fig. 3 - 9 Appearances of some dissection and like-dissection

a—共轭剪切，同期相互切割；b—二次切割的三期构造；c—貌似切割的序次关系；d—限制与被限制的关系（图中 1、2、3 是构造时序）

在南北间断裂的限制，东西向断裂只发生于南北向断裂之间，而且在不同区段之间，东西向断裂条数不同。从时序上说，限制者发生在前，被限制者发生在后，但在外貌上极似切割与被切割的关系，所有这些都应通过确切的鉴别标志予以区别，否则就会在时序上搞错。

(3) 置换律：被置换的构造发生在前，置换的构造发生在后。有时强烈的构造置换伴随着同步构造地球化学作用，导致伴随构造置换的同时，发生物质成分的置换。在发生这种强烈构造置换的地区，前期构造往往不易辨认，后期构造叠加形成的面理和假岩性层往往又造成假层序，这就使得在该区从事构造筛分很困难。为了解决时序，有几种方法：一是由强烈置换区向弱构造置换区追溯，先后关系当逐步明朗；二是在构造置换带中细心寻找残留构造，诸如钩形转折端、无根褶皱、微层理、包络面等；三是通过镜下研究，因为在显微构造域内常常保留原先被置换的老构造。至于物质成分的置换则要通过一系列变形与变质、矿物世代、应力矿物与微区化学成分的变化、动力成岩成矿作用与构造地球化学作用的研究来辨别。简言之，要通过野外和室内一系列的观察和测试才能解决。

(4) 包容律：无论建造还是形迹都存在包容与被包容构造。一般说来，多数情况下，在包容构造中被包容构造发生在前。各种形迹中的包容构造，大到巨型构造带中被包容的古老地块，小至显微构造域旋转变斑晶中被包容的残缕构造。值得强调指出的是，无论是宏观构造还是微观构造，无论是在建造还是在形迹中，都常有一些假象使人们误认它是一个包容构造，从而对构造时序作出错误判断。例如在粤北大瑶山，上古生界组成的 SN 向构造带中，由于剥蚀袒露出一块 NNW 走向的震旦系—寒武系，曾被错划为被包容构造，其实它与围岩是一种叠置的不整合关系。在确定包容与被包容关系时，被包容的构造有没有后期包容构造的插入或叠加，即被包容的早期构造有没有受包容的后期构造的改造是一个很重要的标志。

(5) 成因律：指受成因控制由成生联系所决定的地质构造的同时性和顺序性（不同同时性）规律。受同一区域构造应力场控制而形成的各种配套构造具有同时性，如新华夏系主压面及其配套的大义山式和泰山式构造；而在一系列变形序幕中，一连串挨次控制的构造是顺序发生的，具有准同时性。如一个纵弯褶皱变形过程中，从最初遭受水平挤压应力形成的初次构造——前期共轭剪切，到褶皱拱起在褶曲轴部形成纵向张裂和后期剖面共轭剪切节理等一连串不同序次的构造，它们具有准同时性。不仅这些小型或显微构造在时间上的同时性和准同时性受成因律的控制，而且区域大地构造也受这种成因律的控制。例如，大洋中脊的扩张、俯冲边界的挤压和转换边界的剪切就具有准同时性。

(6) 增减律：构造在复合过程中常要发生增减作用，在增减作用以前形成的构造发生在前，在增减过程中及以后发生的构造在后。增生和削减通常有两种形式：一种是拼贴或裂解，一种是转化。前者如地体、板块的拼贴和地块的开裂；后者如板块俯冲中洋壳的消亡或陆壳的增生（通常洋壳的削减被消亡，岛弧的形成——由不成熟的岛弧经成熟岛弧转化为陆壳）。在宏观构造复合过程中有增减现象，在显微构造复合过程中同样也有增减现象，如亚颗粒和新晶的形成，动态重结晶的细粒化和静态重结晶粒径的增长，元素的带入和带出，被压溶矿物的体积减少和压力影新生矿物的生长，等等。

运用以上定律，关键在于如何正确地鉴别，以便剔除各种假象，正确地确定复合构造的时序。

(二) 广义地学方法

1. 遥感构造解译方法

遥感构造影像是电磁波场对地质构造的客观反映，不仅能在空间上给我们提供清晰的构造轮廓，而且对不同期次的构造叠置（有时对物质置换）也有清楚地反映。20 世纪 70 年代我们正是从卫星遥感影像上看到区域上 NNE 向线性构造叠置在 NE 向区域性构造之上而得到启示，进而将新华夏系划分为早、晚两期（图 3 - 10）。在粤北的地质图和卫片上，燕山期大东山岩体可见清楚地侵入到上古生界之中。该岩体位于 SN 向构造带和 EW 向构造带的复合带，在岩体的南北两侧都可以清楚地看到 SN 向褶皱带的延伸，奇怪的是，这种 SN 向褶皱带在岩体中隐隐约约仍有显示（图 3 - 11）。这种信息反映了该花岗岩可能是一种混合交代型花岗岩，外貌虽然是花岗岩，但却保留原沉积层的褶皱构造。从图 3 - 11 中还可清楚地看到花岗岩体中叠加有后期 EW 向线性构造，因此，可以至少筛分出两期构造，即岩体侵入前和侵入后的两期构造。

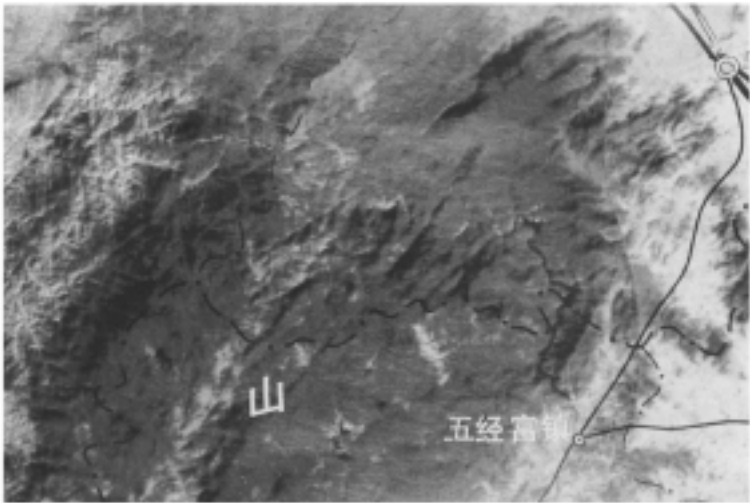


图 3 - 10 粤东丰顺五经富地区地质构造卫片影像
(据广东省地质研究所, 1990)

Fig. 3 - 10 Satellite photograph of tectonics of Wu
Jingfu area in Fongson county, eastern part of
Guangdong Province, south China.

After Geological reacearch in stitute of Guangdong Province, 1990)

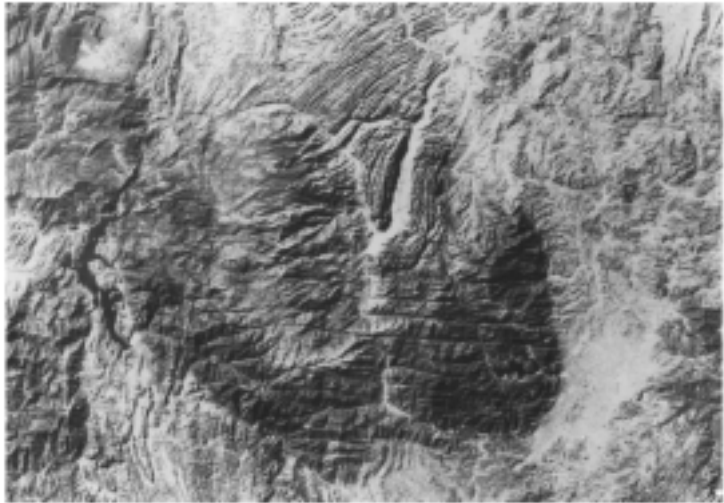


图 3 - 11 粤北大东山岩体卫片影像
(据广东区调队, 1981)

Fig. 3 - 11 Satellite photograph of Dadongshan rock
body in northern Guangdong

(After Geological survey Team of Guangdong Province, 1981)

照片中深色部分为花岗岩体，岩体中尚有褶皱构造和
后期叠加构造的形迹

2. 古地磁学方法

古地磁学研究能为构造筛分提供非常重要的依据，主要有以下几方面。

(1) 由古地磁的极性反映出来的正向期和反向期被用来划分和对比地层、确定层序，为构造筛分确定建造的时序提供基础。最新研究表明：磁性倒转事件可能起因于地核流体对流的紊乱，地磁偏极性则可能反映核幔边界条件的长期变化^[141]，它们与地球自转速率的变化存在相关性^[142]；2800Ma 以来的偏极性存在 530 ~640Ma 的周期，与联合古陆的周期基本一致^[143]。因此，全球古地磁这种正向期和反向期交替的磁极倒转事件可能对筛分不同时期的全球构造运动、地球动力学和由它们形成的全球构造有重要意义。

(2) 利用不同时期古纬度差或大洋磁条宽度筛分不同时期的伸展构造。如林进峰等^[144]在综合了东亚大量中生代古地磁古纬度资料后，确定东亚大陆在侏罗纪至始新世和渐新世初由北往南漂移 8°~15°，渐新世以来又由南往北回漂了大致相同的纬度到达现今位置，确定了前后两次区域性水平运动和挤压伸展构造。前者反映了白垩纪时中新特提

斯的关闭，大陆向南与巽他大陆的闭合；后者反映了南海的 SN 向扩展。马宗晋等^[35] 根据 S. C. Cande 等 1989 年发表的第 3 代全球洋底磁条带图，确定了全球三大洋从距今 160Ma 的中侏罗世开始，分别在约 137Ma、97Ma、58Ma、36Ma 和 10Ma 依次经历了 6 个增生期，从而筛分出 6 期洋底增生构造。

(3) 由古地磁视极移曲线所提供的移动和旋转可确定出前后构造时序。最为经典的例证是三叠纪潘基亚古陆裂解前后古地磁视极移曲线的不一致。各板块在联合古陆时的磁视极移曲线在寒武纪至三叠纪时的完全重合，表明各板块壳体的聚合；三叠纪以后磁视极移曲线的不重合表示古陆的解体和特提斯的打开。

(4) 利用前后不同时期磁偏角之偏转方向和角度，确定地块旋转之方向与角度，从而筛分出不同时序的构造。例如菲律宾吕宋岛白垩系火山岩中的古地磁磁偏角，揭示自中、晚渐新世至今 SN 向的吕宋岛曾有过 70° 的反时针旋转和 20° 的纬度差才定位于现今位置^[145]，如果顺时针旋转复原 70°，在现今纬度 20° 的位置上可筛分出一期古构造（中、晚渐新世）；如果没有古地磁资料，我们看到的是吕宋岛 SN 向构造的重接复合。它是中、晚渐新世的古 N70°E 构造旋转至 SN 向时，再叠加晚近时期菲律宾板块向西仰冲时的 SN 向构造（图 3 - 12、图 3 - 13）。

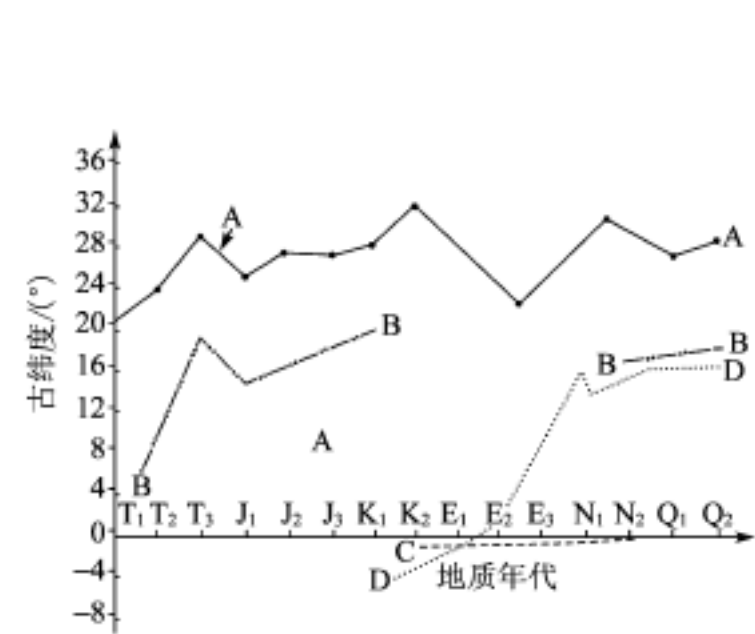


图 3 - 12 南海周缘各块体中、新生代古纬度变化曲线^[145]

Fig 3 - 12 Variations of paleolatitudes of various blocks surrounding the South China Sea during the Meso-Cenozoic

A— 华南微板; B— 印支微地板;
C— 加里曼丹岛弧; D— 菲律宾岛弧

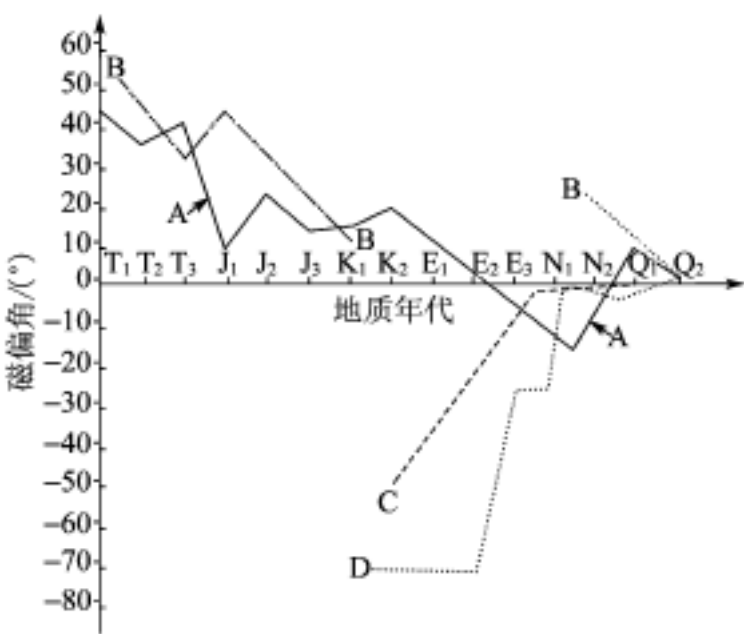


图 3 - 13 南海周缘各块体中、新生代磁偏角变化曲线^[145]

Fig 3 - 13 Variations of magnetic declination of blocks surrounding the South China Sea during the Meso-Cenozoic

A— 华南微板; B— 印支微地板;
C— 加里曼丹岛弧; D— 菲律宾岛弧

3. 同位素年代学方法

同位素年代学的迅速发展为构造历史学解决地层、岩石、构造、矿床及各种地质作用的时标、时限、时序提供了较为精确的方法与手段。最近 20 年在古老年龄和最新年龄的测定方法方面取得重大进展，为我们筛分前寒武纪时期和新构造期的构造提供了方法和依据。

各种同位素测年方法已可测出各种岩石矿物的成岩成矿年龄，从而可测出与构造相联

系的岩浆活动、沉积作用、变质作用、成矿作用的年龄，测定这些与构造运动相联系的地质事件的年龄，能提供对构造筛分极为有用的信息。如粤西罗定 - 广宁断裂带中的海西—印支期岩体，用 K - Ar 法测年获得不少早燕山期年龄，这些年龄与印支期岩体成岩后普遍发育的一次早燕山期构造变形事件的时间是一致的；又如胡世玲等^[146]在安徽歙县堇青石花岗岩和江西德兴钠长花岗岩中对白云母和青铝闪石进行⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄测定，共测得 6 个阶段的频谱年龄，分别给出了洋壳存留年龄、蛇绿岩套形成年龄、花岗岩浆活动年龄、俯冲高压变质年龄、蛇绿岩套构造侵位年龄和晚期热扰动年龄。

现代同位素年代学不仅可以测出各年龄段地质体的年龄，而且借助不同矿物不同的封闭温度可以测定地壳隆升的年龄，从而筛分不同期次或不同阶段的隆升运动和隆起构造，可以测定新构造活动的年龄，也可以算出由地幔分异转化成地壳的年龄，即模式年龄，为筛分不同年龄段的新老地壳构造提供了条件。但是，同位素年代学方法必须与地质研究密切结合才能成功。

一个同位素测年数据的形成涉及许多方面的问题。首先，同位素测年的数据与所采样品的地质部位有关，不同地质部位所采的地质样品代表不同的地质意义，其测年数据往往不同。其次，采样的方法和样品的选择不同，所获测试数据也会不同。样品在运输途中是否流失乃至实验室中的保存环境、采用什么方法用什么流程做测试乃至计算方法都会影响测试数据的准确性。最后，要正确区分各种测年数据所代表的意义，对数据做出正确的解释等。因此如何用正确方法取得正确数据和对数据做出正确解释具有十分重要的意义。

4. 地球化学方法

地球化学方法用于构造筛分可有以下几个方面：①依据克拉克值地球化学背景场或地球化学异常，筛分不同的地层建造或岩体。②把地球化学研究与相对年代和同位素年代学结合，为不同时序的建造和构造筛分提供信息。如陈江峰等^[147]对华夏地块的研究表明，浙东南火山岩的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 有较大的变化范围，这些火山岩可能相当于建瓯群、陈蔡群或其物源区岩石部分熔融的产物。这就使我们可从火山岩建造的物源追溯中去筛分出深埋地下的组成基底构造的古老建造。③地球岩石圈地壳构造的演化本质上是物质组成与结构的演化，伴随每一场大规模的运动必定伴随物质成分与结构的调整^[148]。因此，从根本上说，研究地球和岩石圈不同物性层的地球化学，配合同位素年代学，将为我们筛分出不同历史发展阶段的岩石圈地壳构造奠定基础。孙大中等^[149]根据中条山地区古老岩石系的年代学、地球化学和地质学所获得的深部地壳信息，综合出中条山前寒武纪年代地壳结构模式（图 3 - 14），为我们提供了一个很好的例证。从该剖面所代表的年代地壳结构模式可知，越下层的地壳形成年代越老，而每一层地壳的岩石地球化学组成不同，这说明新老地壳经历了地质地球化学作用而分异成不同的地球化学岩石层，利用同位素年龄和地球化学分层可筛分出不同地质时代的地壳。孙大中等所建立的中条山古元古代地壳结构模式则是这一地区地壳年代结构的具体体现，为地球化学方法筛分新老地壳提供了一个例证。

5. 地球物理方法

地球物理方法一般用来研究三维深部构造，现在的问题是能否用它来研究地质构造的时间维和进行构造筛分。本书作者认为，地球物理信息反映的是地球深部物质组成的物理性质和结构现状，一般不能直接提供时间维的概念，但它同时又是地球岩石圈物质与结构历史发展的综合，包括多期构造复合的综合，要从现有的地球物理记录中解析筛分出不同

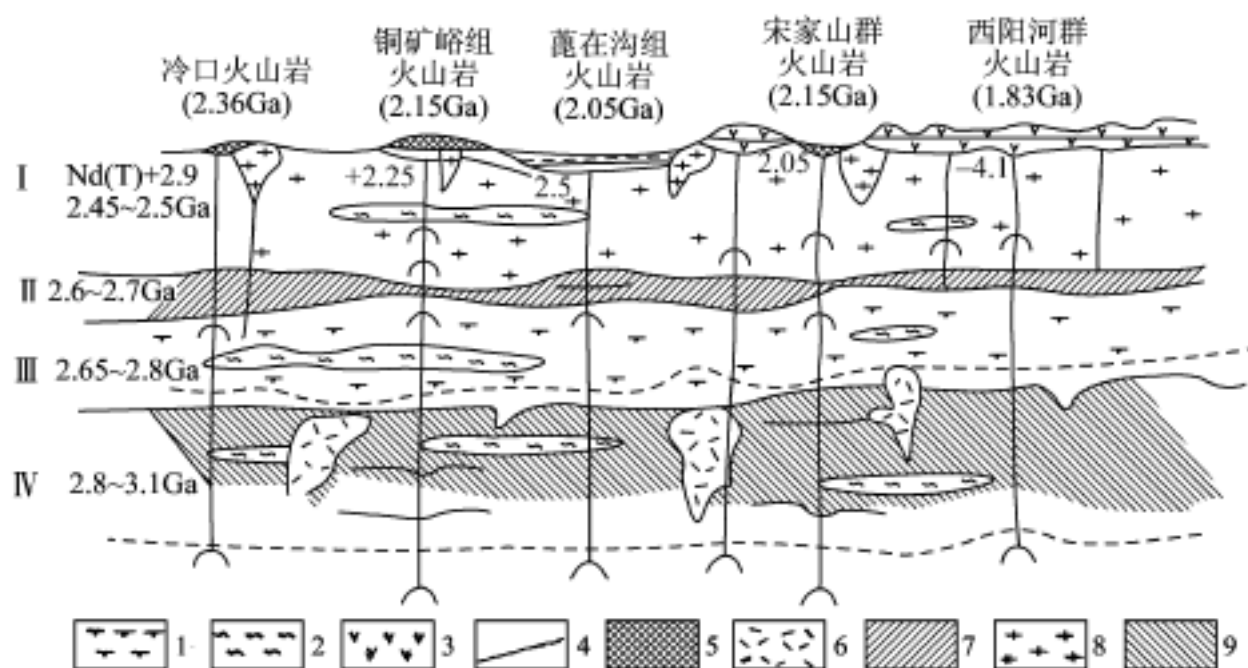


图 3 - 14 中条山古元古代地壳结构模式^[149]

Fig. 3 - 14 Profile showing the model of Paleo—proterozoic crustal texture of Zhongtiaooshan

1—云英闪长岩；2—副片麻岩；3—火山岩；4—沉积岩；5—喷出熔岩；6—紫苏花岗岩；7—角闪岩和条带状铁建造；8—过铝花岗岩；9—基性麻粒岩

时序的构造，一般需要其他方法的配合。其一是与地质研究结合，从已知推广到未知。如根据地质研究确定该地球物理场或异常是某时代某种岩石组成的构造的反映，可以根据地表已知构造的先后时序进而解析该区深部地球物理异常所代表的构造时序，在此基础上再利用它对与之相邻的相同地质背景地区的各类地球物理异常所代表的构造时序作出筛分。例如：根据地震层析技术和剪切波的分析，在北美南部和加勒比海区深 660km 上下存在几个板块碎块，结合该区板块构造历史记录的研究，认为它们是法拉隆古板块向美洲板块俯冲时解体分成的各个独立的小板块，进入地幔后更分解成许多小碎块^[150]。其二是综合各种地球物理方法并结合同位素年代学相互补充和校正，从而对它所代表的时间维作出解析。以雪峰山及其邻区为例，在该区进行了地表重、磁、大地电流测深等各种地球物理测量，从而作出凤凰 - 茶陵地学断面图（图 3 - 15）^[151]。其中，在涟源—邵阳一线东西两侧可以看到岩石圈厚度存在巨大差异（相差 140km），显然存在一个由东向西的俯冲带，而在表层 20km 左右则存在着区域性的韧性滑脱面，并发育一系列由东向西的逆掩叠瓦构造。对这个俯冲带的形成时代有两种意见：其一认为是一个中新生代以来的俯冲带，依据是其东侧岩石圈底界渐渐抬升，最终与台湾 - 菲律宾板块相接，显然受到菲律宾板块向西的推挤，而且只有年代较新的构造才会使相邻岩石圈的厚度差异没能来得及因重力均衡而消失；其二认为它代表一个古俯冲带，其依据在于岩石圈厚度有巨大落差的雪峰山东缘，沿北至北东方向存在有同位素年龄依据的晋宁期的断裂、裂谷碱性玄武岩和岛弧火山岩，反映该区存在晋宁期的边缘海和岛弧。事实上，若综合重、磁、大地电流测深、同位素年代学和区域地质方面的资料，比较合理的解释是一条古今复合的俯冲带。地学断面所提供的综合信息反映出至少两期俯冲，即晋宁期的古俯冲和中生代以来的俯冲，前者有晋宁期的燕山—喜马拉雅期构造岩石学记录可以说明，后者则有一系列盖层的 NW 向逆冲推覆和深部构造作为佐证，它是板块在陆内俯冲所形成的陆内造山带的主要构造形式^[90]。现今深层次俯冲断距并不是一次形成的，可能是两次洋陆俯冲和多次陆内俯冲甚至有逆向仰冲

的总和。

总起来说，地球物理学方法向时间维发展是大有可为的，它不仅为构造筛分提供信息和手段，更重要的是它使地球物理学成为动态的历史的科学，并真正进入地球动力学历史过程的研究。

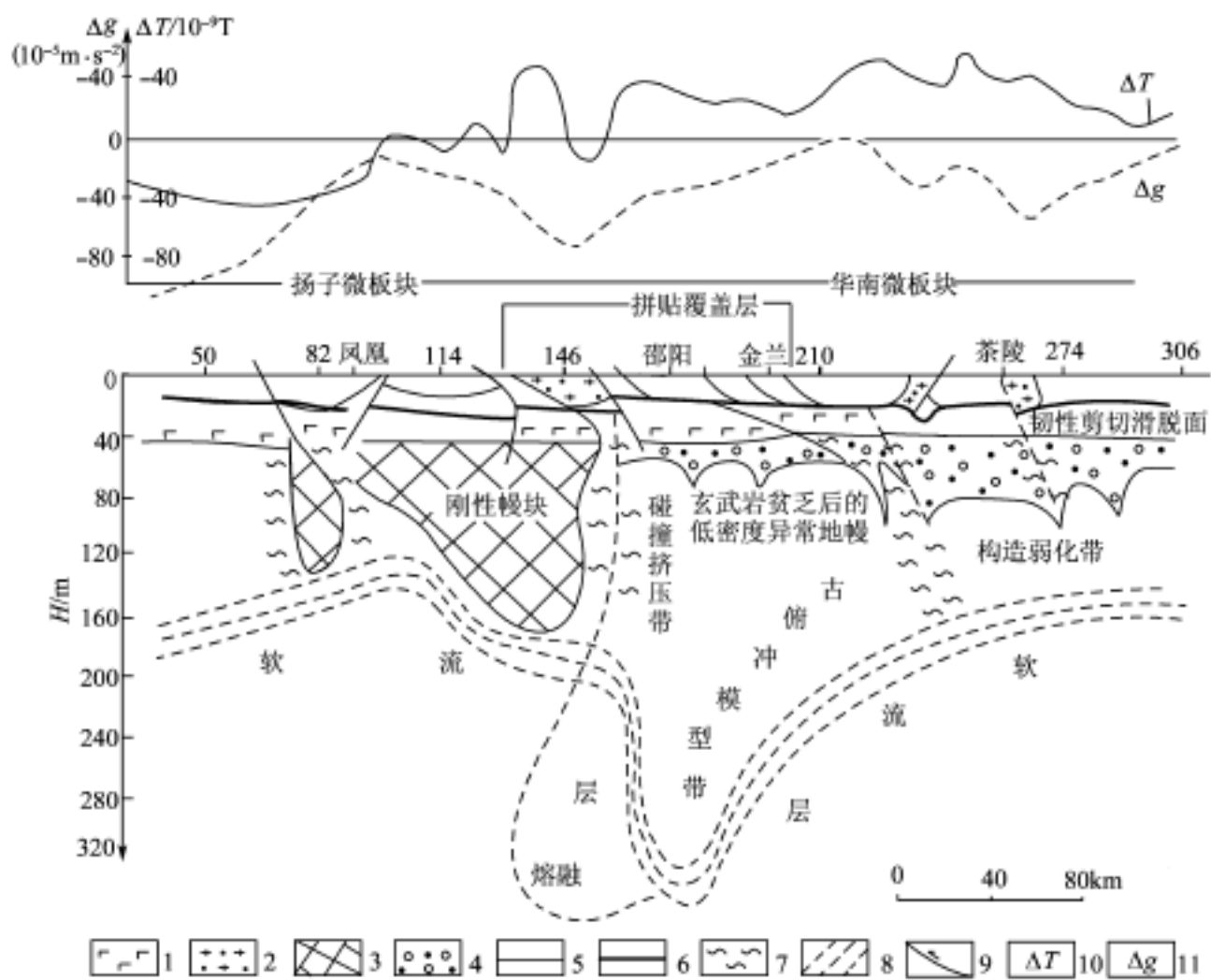


图 3 - 15 雪峰山及其邻区（凤凰—茶陵）地学断面图^[151]

Fig 3 - 15 Geoscience profile of Xuefeng mountains and its adajacent area (Fenghuang-Chaling)

1—下地壳；2—花岗岩；3—刚性慢块；4—低密度异常地幔；5—莫霍面；6—韧性剪切带；7—构造
弱化带；8—软流层；9—逆冲断层；10—航磁异常/ $10^{-9}T$ ；11—重力异常/ $10^{-5}m \cdot s^{-2}$

三、构造时序的区域性对比

构造时序对比的实质是对筛分出来的建造和形迹进行时空定位，通过时空定位才好建立起构造时序的纵横向对比系统。对比地质构造进行时空定位主要有以下几种方法。

(1) 利用建造与建造、建造与形迹、形迹与形迹、地貌单元与地貌单元之间的相互关系，建立相应地区的构造形成和活动的先后顺序即构造时序；在这基础上，再利用大的区域性不整合面、岩浆热事件、变质热事件与构造形迹的相互关系，将已建立起来的构造时序再划分出大的时间段落，被筛分出来的建造和形迹按其形成和活动的相对顺序纳入较大的时间段落里，可进一步划分出次一级的时间段落，再将相应的建造和形迹纳入其中，等等。要做到这一点，需要建立起一个地区比较准确的构造时序表，除了准确地确定地层和建造的地质时代和同位素年龄以外，在一些具有重要时限意义的地段取得第一性资料是非常重要的。在那些多个构造层叠置的多期复合变形区，通过不同构造层的变形期次的对比和剔除，可以筛分出各构造期的变形期次和它们的时序。赵国春等^[152]对我国东南部基

底构造筛分出吕梁期、晋宁期和加里东期的变形幕次和时序便是一例。他们对每一构造层 (吕梁期变质构造单元、晋宁期变质构造单元、加里东期变质构造单元) 中的变质矿物世代、构造面理 (S_1 、 S_2 ……)、叠加褶皱变形类型和期次进行了研究, 在此基础上划分变形幕次: 在吕梁期构造层中有 5 次叠加变形, 晋宁期构造层中有 3 次叠加变形, 加里东期构造层中只有一次构造变形, 由此筛分出吕梁期有二次变形, 晋宁期有三次变形, 加里东期只有一个变形幕 (表 3 - 2)。

表 3 - 2 中国东南部变质基底构造演化关系一览表 (赵国春等, 1994)^[152]

	吕梁运动		晋宁运动			加里东运动
	第 I 幕	第 II 幕	第 I 幕	第 II 幕	第 III 幕	
加里东期变质岩石构造单元						脆性变形 D_1 、 F_1 , 宽缓开阔褶皱 S_1 , 破劈理 L_1 , 褶皱线理
晋宁期变质岩石构造单元			塑性变形 D_1 、 S_1 , 片理, 其他构造形迹已消失	塑性变形 D_2 、 F_2 , 紧闭同斜褶皱 S_2 , 轴面片理 L_2 , 石香肠、窗棂、石杆	塑性—脆性变形 D_3 、 F_3 , 陡倾斜歪褶皱 S_3 , 轴面应变滑劈理 L_3 , 矽线石等 b 轴线理	脆性变形 D_4 、 F_4 , 宽缓开阔褶皱 S_4 轴面破劈理
吕梁期变质岩石构造单元	塑性变形 D_1 、 S_1 , 轴面片理, 其他构造形迹已消失	塑性变形 D_2 、 F_2 , 紧闭同斜褶皱、无根黏性褶皱 S_2 , 区域性轴面片麻理、片理 L_2 , F_2 的褶轴 b 线理 - 矽线石、角闪石定向线理		塑性变形 D_3 、 F_3 , 紧闭同斜褶皱 S_3 , 局部应变滑劈理 L_3 , F_3 的褶皱枢纽拉伸线理, 糜棱线理	塑性—脆性变形 D_4 、 F_4 , 陡倾斜歪褶皱 S_4 , 局部应变滑劈理 L_4 , b 型石香肠	脆性变形 D_5 、 F_5 , 宽缓开阔褶皱共轭褶皱、膝折带 S_1 , 破劈理 S_5 , 轴面破劈理

(2) 对要筛分的地质构造需确定它所处的构造部位并追溯其空间展布范围, 这对确定该时序构造的地质意义和区域对比是很必要的。如我们在广东莲花山断裂带中, 开始在上三叠统一下侏罗统中见到片岩系, 再沿走向追溯进入燕山期花岗岩 ($\gamma_5^{2(3)}$) 中又变成宽厚的糜棱岩带, 而后进入围岩上侏罗统高基坪群火山岩系时, 沿走向又变成片理化岩石、千糜岩或构造片岩。当我们追溯到下白垩统官草湖群红色地层时则不见其踪迹, 却能清晰地看到红层不整合其上。这就使我们终于认识到这一韧性剪切带发生于晚侏罗世与早白垩世之间, 并且认识到它具有的区域构造意义^[160]。

应该指出, 在进行构造时序横向对比时, 越是在大区域上都能见其踪迹、都能进行对比的才越具有区域构造幕次的意义, 而那些只见于某些局部构造的形迹往往只具有低序次的意义。可见在进行构造筛分时, 区域追溯是很重要的。

(3) 进行构造时序区域对比时要注意构造的地域性和构造的穿时性。例如, 在桂东南的钦防海槽, 上、下二叠统之间表现为造山运动的角度不整合。但对华南广大地区而言, 主要是造陆运动, 即表现为平行不整合, 即便同是造陆运动所波及的范围, 由于所处的构造部位不同, 表现形式仍有所不同。如在粤北隆起区, 上、下二叠统表现为平行不整

合和局部的角度不整合，在拗陷中心则常表现为整合或局部的沉积间断；在粤中的台山、开平、恩平地区则表现为超覆不整合。这就是晚二叠世时同一时序的构造地域性。

一场构造运动在小区域里表现为等时性，在这种情况下构造运动所造成的不整合面可作为等时面来看待，从而为构造时序的划分找到一个划分对比面。但在大范围内构造运动具有穿时性，伴随构造运动的穿时性，沉积作用、岩浆作用、变质作用和变形事件也具有穿时性，这在进行大区域性构造时序对比时是必须加以注意的。

四、区域复合构造的筛分

1. 复合建造的筛分

复合建造表现为后期建造对前期建造的包含、包容、转化、穿插、切割。通过对建造的沉积学、岩浆岩石学、变质岩石学、矿物学、地球化学、显微构造学、同位素地质学、年代学的研究，特别是对建造的物质组成或包体进行上述多方面的研究将可以从复合沉积建造、复式岩体、复合变质带、复合矿床中筛分出先期建造，并通过早期建造追踪早期深层次的构造及其转化为后期建造的机制。

现以华南南岭地区和东南沿海的复合沉积建造、复式岩体、复合变质带、火山岩建造为例说明复合建造的筛分。粤西云开大山的云开群以深变质岩、基性火山岩及变质磷、铁矿床为特征。其原岩建造为一套沉积火山岩建造，三个海侵海退序列仍可辨认，因此是一套典型的沉积、火山、变质复合建造。广西十万大山是南岭地区最大的沉积盆地之一，梁新权与本文作者开展国家自然科学基金课题时曾在该盆地上二叠统中上部采样作沉积学分析，表明该沉积层来源于云开大山及华夏古陆，是变质基底经剥蚀再沉积的沉积复合建造，而印支期大容山岩体经对其岩石地球化学成分进行研究后表明，其成因为沉积岩区的砂质岩夹少量泥质岩经重熔形成花岗岩浆再冷凝而成的^[110]。浙东南的中生代火山岩经陈江峰等^[147]对其 Sr、Nd 同位素组成进行研究，也表明其物源来自深部的前震旦纪基底岩石或古陆壳。它们都可理解为一种复合型的建造。通过对建造的物源、成因和地质作用过程的追溯和研究，就可以了解老建造转化为新建造的复合建造的形成过程，并由此筛分不同阶段的建造。

2. 复合形迹的筛分

包括对各种原生、次生复合构造要素（面理、线理）、叠加褶皱、复合断裂（含各种同生变形、准同生变形、成岩变形和成岩后构造变形）的筛分。通过构造解析、有限应变测量、力学性质和运移方向、显微构造、应力矿物、矿物世代、构造地球化学、同位素年代等多方面的研究，从复合形迹中筛分出不同时序的各种不同产状、不同组分、不同构造层次和变形行为（韧性、韧脆性、脆性）、不同序次、不同排列组合和运移方向的构造形迹，然后根据筛分出来的构造形迹的成生联系和组合规律，建立现位的该时序的构造变形场，并由此确定不同时序的 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 现位展布，确定不同时序构造的古应力场（现位）。

应该强调指出，上述两项筛分工作即建造的筛分和形迹的筛分是区域构造筛分的基础，只有做好这两项才能进入区域构造的筛分。

3. 复合构造带和复合构造体系的筛分

通过区域上的路线观察与研究，可在复合的构造带中筛分出古构造带。作者（1990—1993）在雪峰山地区进行课题研究时，在黔阳、怀化、辰溪一线的雪峰山区见一

组 NNE 向的构造带极为醒目。对横穿雪峰山走向几条区域性剖面的构造研究发现，在区域上 NNE 向构造带里普遍包容有 NEE 向之构造片理（ S_1 ）和由下古生界组成之 NEE 向褶皱岩带，NNE 向的构造劈理（ S_2 ）叠加和密集穿插，形成强烈的构造置换，由此筛分出 NEE 走向之加里东期古构造带（现位），正是这一古构造带组成了加里东期雪峰山地区的古构造骨架（现位）^[90]。

在复合构造带筛分的基础上，可进入复合构造体系的筛分。对于复合构造体系的筛分，李四光在他的一系列著作中作了详细的分析，对我们筛分复合构造体系有重要的指导意义。在他身后，中国及东亚—西太平洋地区，复合构造体系的建立又有了许多新进展。如广泛分布于中国东、西部的 NW 向构造，亚洲东部及西太平洋的 NNE 向伸展盆海系（似新华夏式伸展盆海系）和华南的 SN 向构造带，都是在复合构造体系筛分的基础上新建立的构造体系或构造带。这里要强调的是复合构造体系的筛分方法，主要有以下几点：①在路线和观察点所筛分出来的构造（形迹和建造）在区域上必须广泛出现并与前期构造存在某种固定的复合关系；②这些被筛分出来的同时序构造群体彼此具有成生联系，受同一构造应力场支配；③这些同时序、彼此有成生联系的构造共生组合群体构成一定的构造型式，并且在大区域虽然经受不同程度的改造和变形但仍以稳定的方式重复出现。

4. 复合地块的筛分

地块按地块本身复合前后是原地的还是异地的可分为原地复合地块和异地复合地块。前者在复合前后地块基本上仍处于原地，如某些板内开合的地块；后者则指复合前两地块相隔遥远，如拼贴于大陆边缘的地体。前者可举出我国的扬子地台和华夏古陆两者之间的华南加里东褶皱带和钦防海西褶皱带都是陆内造山带；后者如滇藏三江地带的羌塘地块、冈底斯地块、保山地块和中缅地块。近年来都发现了冈底斯冰水杂砾岩、舌羊齿和南半球低纬度古地磁记录，因而这些地块被确认是由冈瓦纳古陆离裂出来并向北漂移拼贴到华南地块上的增生地体^[21, 22]。

5. 巨型复合构造域的筛分

指板块或大型陆块间相互作用所形成的复合构造域。在前述各项复合构造筛分的基础上可进入巨型复合构造域的筛分，其方法可简要归结以下几点：①准确地确定各个区域构造体系（构造型式）的力学性质、形成活动时限、展布范围、联合及复合关系；②按时限（构造期）筛分复合的各个区域构造体系及其展布范围；③确定每一时限（构造期）各项区域构造体系的成因、运动方式及其构造域归属和展布范围。

十五期间，我们先后与中国科学院南海海洋研究所、上海地震局、上海同济大学海洋地质与地球物理系合作开展课题研究，在这基础上本书作者与张珂采用地质地貌的方法对我国东部新生代复合构造域开展了太平洋板块与印度板块两大构造域的筛分工作，现将该研究成果简述于后。

中国东部及邻区新生代陆缘构造格架，除 EW 向和 NS 向构造外，最为宏伟和显目的就是 NNE 向构造，在区域地貌格架上表现为 NNE 向的地貌台阶，自大兴安岭—太行山—武陵山一线的地貌台阶下降为中国东部陆缘山地乃至海平面以下的大陆架。这些 NNE 向

的山脉和盆地受着 NNE 向的断隆和断陷所控制，从断裂面的力学性质和滑移方向而言，为左行压扭性断裂和右行张扭性断裂的复合性断裂，前者属于新华夏系的主压面，后者则为似新华夏式伸展盆海系的张扭裂面，同时也是北西向压扭构造系的横向张裂面，因而是一个复合断裂构造体系。

除了 EW 向构造体系外，还有 NE 向构造体系，其主压面为左行 NEE 向压扭性断裂，被李四光称为华夏式构造。它经常断切了白垩系和古近系，因而也是新生代的构造。再就是 NW 向构造体系，其主压面是 NW—NWW 向左行压扭性断裂，它经常断切白垩系和古近系，NW 向左行压扭性断裂经常和 NW 向右行张扭性断裂复合。形成一些 NW 向断陷盆地，盆地边缘又经常为 NW 向左行压扭性断裂所断切。

除了上述构造体系的复合外，我们还可以看到，NNE 向构造体系、NW 向构造体系与 EW 向构造体系、SN 向构造体系复合，当它们的主压面与 NNE 向构造体系和 NW 向构造体系复合时，这些构造体系的构造组分也跟着发生力学性质的改变（参阅图 2 - 15）。

我们正是从复合构造形迹和复合构造体系的解析中建立和筛分复合构造域的。

从新生代构造体系形成的力源和构造应力场构造域归属，我们明确地认识到新华夏系、华夏系、似新华夏式构造属于太平洋构造域，其力的来源与作用力的方向与太平洋洋中脊的扩张及造山期后岩石圈山根的拆沉有关；而 NW 向左行压扭性构造体系即新河西系则与印度板块向 NNE 方向的挤压碰撞有关，从而得出中国东部新生代同时存在太平洋构造域与喜马拉雅特提斯构造域相互的重叠与复合。

以上是从构造形迹的历史记录中解析中国东部喜马拉雅特提斯构造域与太平洋构造域复合构造域的存在。从现今地震震源机制解所反映出来的中国大陆现今构造应力场可以看出，喜马拉雅域的构造应力场和太平洋域的构造应力场在空间上有一个由前者逐渐转换为后者的变化（图 3 - 16），我们在浙北地区对新构造期构造应力场的记录所作的解析也反演出两个构造应力场在空间上的过渡（图 3 - 17）；而在时间上则有一个两者相互消长的过程。

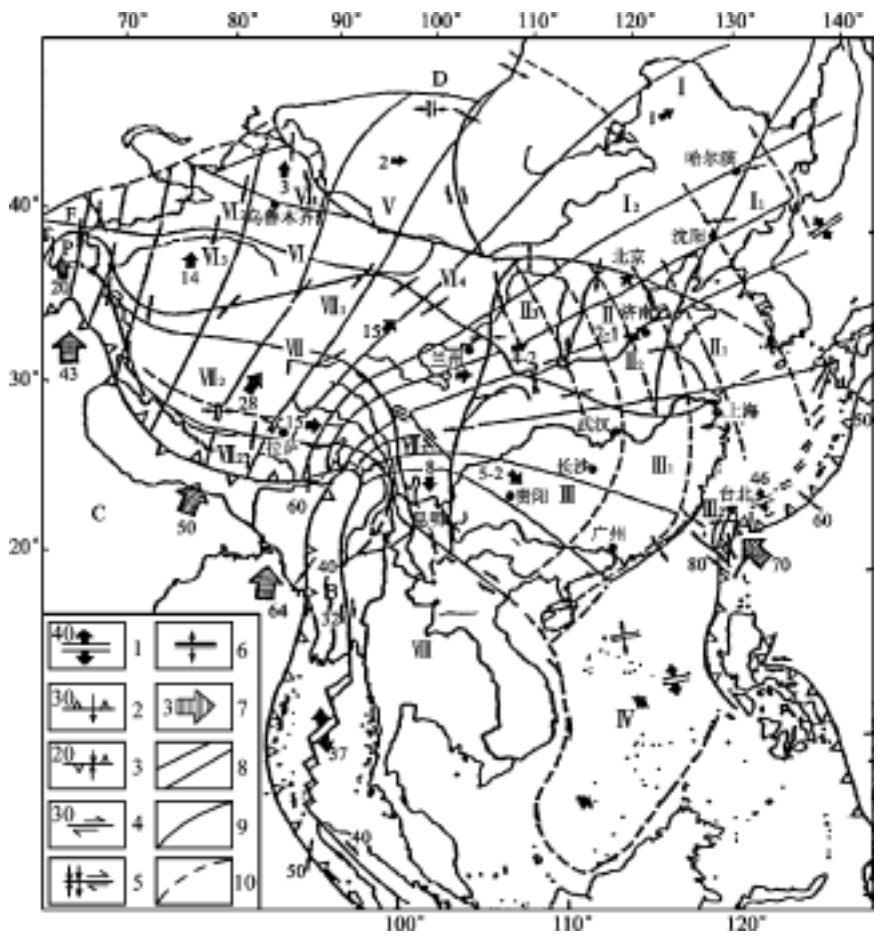


图 3 - 16 中国及邻区现代构造应力场^[153]

Fig. 3 - 16 Current tectonic stress field of China and its adjacent areas

1 - 4—活动断块边界及其相对运动矢量及速度，mm/a；1—分离边界；2—俯冲边界；3—碰撞边界；4—走滑转换边界；5—亚板块，板块相对运动矢量；6—板内地堑、裂谷；7—板块的绝对运动和亚板块、块体相对欧亚（西伯利亚）的运动矢量及速率，mm/a；8—亚板块、块体边界；9—最大主压应力轴迹线；10—最小主应力（张性）轴迹线

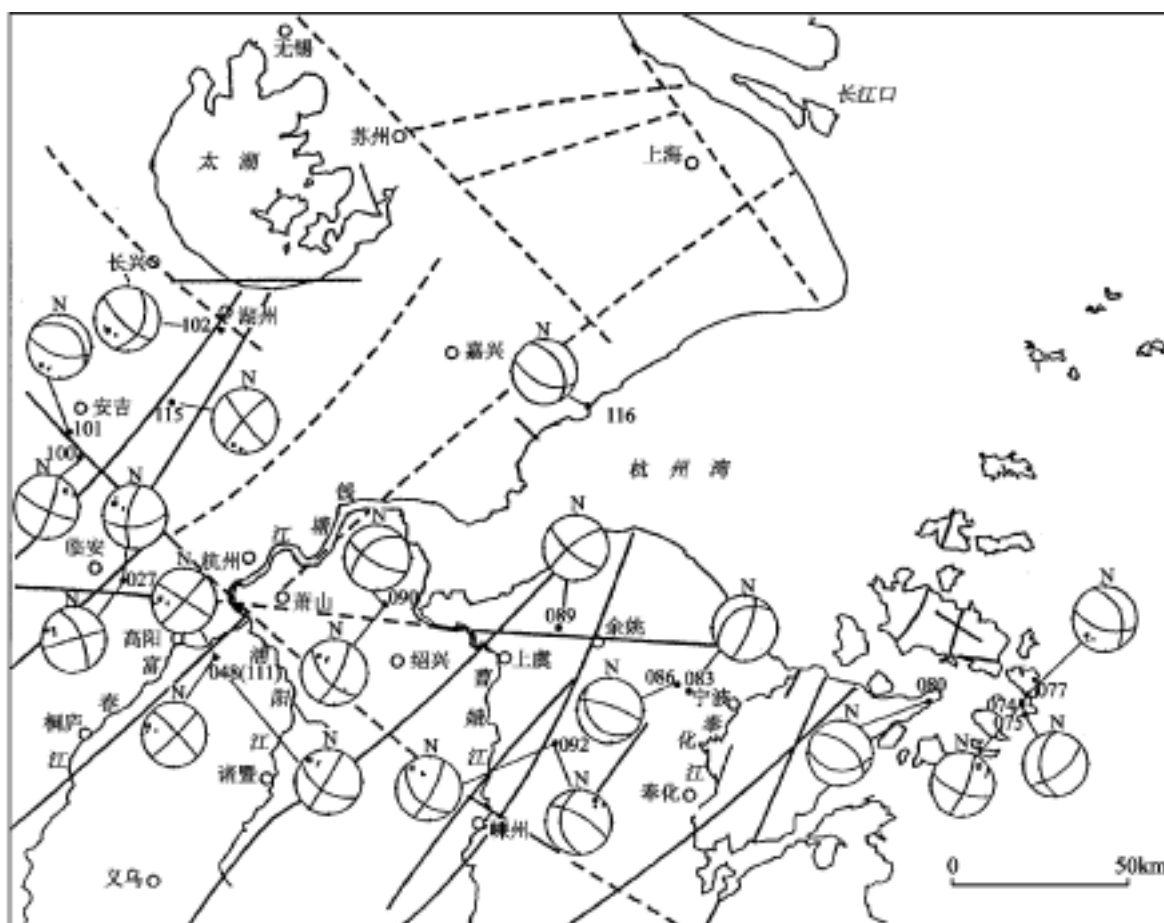


图 3 - 17 浙北地区现今构造应力场

Fig 3 - 17 Current Tectonic stress field in the north part of Zhejiang province, China

6. 全球复合构造的筛分

在全球各个区域巨型复合构造域筛分的基础上，综合有关全球复合构造体系的资料，对全球复合构造体系进行筛分，目前已经积累了一些有关全球构造带和构造体系的资料。如有关全球特提斯构造带、有关太平洋洋底构造的研究。对全球复合构造体系进行构造筛分是一项艰巨而复杂的工作，它不仅涉及各大陆大区域构造筛分资料的综合，而且还涉及各大洋和卫星各项空间仪器的测定、全球地震层析图像和行星比较学等研究手段和研究成果。目前虽然有的科学家已经开始着手此项研究，如马宗晋等人对洋底增生的构造筛分，但就总体而言，目前还处于资料积累阶段。

第二节 构造复原

构造筛分只是把各期复合构造筛分为不同期次的构造，这些不同期次的构造并没有恢复原状。因此，构造筛分对于古构造研究只是第一步，下一步则是把筛分出来的古构造，逐次考虑后期构造变形对它的改造，逐次恢复它的原状，这就是构造复原的工作。

谈到构造复原，所涉及的内容甚广，诸如岩层产状的复原、原始构造方位的复原、原始构造形态和构造型式的复原，乃至构造变形场的复原和变形前原始构造位置、体积的复原等。对于建造来说，还包括原始物质成分的复原等。对于新构造期的古构造复原，还包括古构造地貌的复原等。

一、构造筛分与构造复原的联结

构造复原和构造筛分虽属两个阶段的工作，但是并非截然分开。实际上，在构造筛分阶段已经开始了古构造的研究工作。构造筛分为古构造复位奠定了基础，主要表现在以下两个方面：一是筛分出所要研究的那一期的古构造形迹和建造，根据它们之间的成生联系和同时性，组成现位的古构造体系和古构造型式；二是分析后期构造变动对该期古构造所产生的改造。这里先论述后者。

对复合构造体系的形变分析常能帮助我们认识后期构造对前期构造的改造。为了说明这一点，无妨举出一些例子：在华南南岭地区赣、湘、粤、桂几省区，泥盆系不整合面之下，在加里东期变质基底中常分布有现位展布呈 NNE—NE 或 NEE 走向和 NNW—NW—NNW 走向的褶皱，常称为古 NW 向构造和古 NE 向构造。但与此同时，在上古生界沉积盖层中每隔一定的经度分布有一条有下古生界乃至中生界卷入的南北向褶断带^[25]，它叠加复合在加里东变质基底之上，与这些“古 NE 向构造”和“古 NW 向构造”呈斜接或反接复合。如果我们把泥盆系不整合面之下的加里东变质基底中的古 NE 向构造和古 NW 向构造连贯起来，那么这些古 NE 向构造和古 NW 向构造实际构成一个 W 型的古构造型式（现位），不过它并非是一个规则对称的 W 型褶皱，而是呈不对称的 W 型，而且通常可以看到古 NE 向和古 NW 向之间呈逐渐过渡并形成向 S 或向 N 突出的弧形构造，每靠近盖层中的 SN 向褶断带时，则往往在基底中形成古 NNE 向或古 NNW 向的褶皱。这就清楚地告诉我们，基底中这些“古 NE 向”或“古 NW 向”构造是后期盖层遭受 EW 向挤压形成 SN 向褶皱时，基底也遭受 EW 向的挤压而卷入后期的变形之中（图 3 - 18）。如果我们按其后期所遭受的压缩率反演，沿 EW 方向展开，那么不仅盖层中的 SN 向褶皱会消失，而且变质基底中的 W 形构造型式、古 NE 向构造和古 NW 向构造也就会消失。这就暗示原来的古构造型式并非古 NE 向和古 NW 向，也非 W 型，而是 EW 向褶皱。无独有偶的是，在南岭地区不少地段仍然保留了正取 EW 走向的基底褶皱，成为前述解释的极好旁证。如果我们再注意到南岭地区在盖层与基底之间常发生滑脱而形成侏罗山式的梳状褶皱，突出表现为上古生界沉积盖层形成隔槽式或隔挡式的褶皱，也就是说，在这种情况下

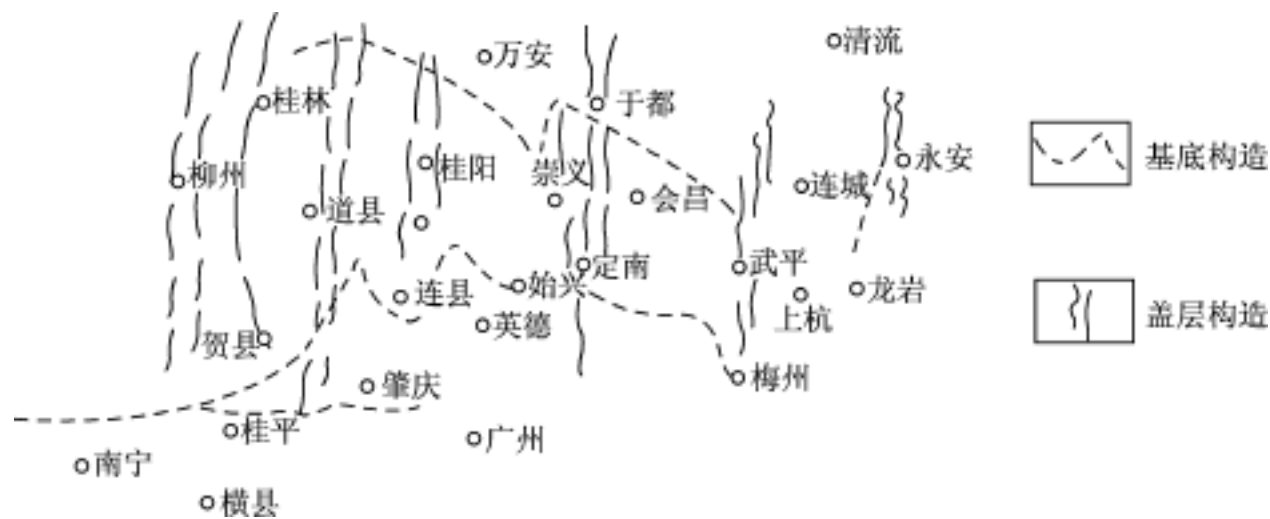


图 3 - 18 华南南岭地区南北向构造带与加里东基底构造的复合

Fig. 3 - 18 Sketch map showing the composite Tectonics of North - south trending Tectonic belts with the Caledonian basement structures in Nanling area of south china

下，变质基底并未卷入后期盖层褶皱，因而保留了加里东基底原有的 EW 向褶皱，而在那些变质基底也卷入后期 EW 向挤压而形成 SN 向褶皱时，便形成 W 型褶皱。图 3 - 18 是华南南岭地区 SN 向构造与 EW 向构造复合的示意图，只要我们认真仔细地阅读华南南岭地区的区域地质图，就会发现自 E 向 W 分布着几条 SN 向挤压带，它们是永安 - 龙岩 SN 向构造带、武平 - 蕉岭 SN 向构造带、于都 - 定南 SN 向构造带、桂阳 - 连县 SN 向构造带、道县 SN 向构造带和柳州 SN 向构造带等。这些构造带大致等距分布，每靠近这些 SN 向构造带，组成加里东期变质基底的前泥盆系往往也跟着曲折成 NE 向和 NW 向的片段，说明它们跟着上古生界沉积盖层一起卷入褶皱，但也有仍沿 EW 向驰骋的基底构造，如广东肇庆至广西贵港、南宁、西大阴山一线所见。

以上这些解析是根据中、小比例尺的区域地质图所作出的分析，应该说是比较粗略的。不过由于后期断裂的切错，要比较准确精细地复原几乎是不可能了。或许摒弃一些细节，从宏观上把握反而可窥视其大致的原貌，李四光在论南岭纬向构造带时曾指出它是一个长期存在而反复活动的构造带，南岭构造带加里东期 EW 向构造的复原，为前述论点进一步提供了证据。

在南岭地区自东向西分布着一系列大小山字型构造，这些山字型构造是否都存在，不是没有争议的。除了脊柱是否存在外，那些称为前弧褶皱的 EW 两翼多极为不对称，不仅它的弧度和曲率往往超过一般正常山字型前弧所能允许的范围，而且它的前弧的弧度和曲率是越往 W 越大，到了云南弧曲率大到其内侧几乎近于闭合的程度（图 3 - 19）。这种情况显然不能用山字型的正常的形成方式来解释。作者不想在本文中讨论这些山字型构造是否都存在的问题，而是想从构造体系的复合和后期变形的改造来说明这种现象的成因。南岭纬向构造带向西可追溯到川滇南北向构造带，在这条南北构造带可看到它与东西向构造带呈反接复合。在南岭纬向构造带中，自西向东每隔一定经度可看到一条南北向构造带。它们多由南北向花岗岩带、南北向侏罗系—白垩系沉积盆地、南北向压性或张性断裂或褶皱带所组成，这些南北向构造带就其力学成因而言，最初可能属东西向构造带之横向张性配套构造从而控制了诸如康滇、诸广山等南北向岩浆岩带和南北向沉积盆地之展布，后来则叠加了南北走向的挤压构造带。这些南北向构造带自横断山脉起，自西向东其构造带的宽度和长度依次变小，其挤压褶皱的强度也越来越小，还有一个值得注意的记录是，南岭纬向带中的山字型构造自东向西由小变大，它们依次为龙岩山字型、粤北山字型、广西山字型和昆明（云南）山字型。我们注意到自从印度板块 45 Ma 以来开始向北碰撞嵌入欧亚



图 3 - 19 华南南岭地区南北向构造与山字型构造复合

Fig. 3 - 19 sketch map showing the compounding of north - South trending tectonic belts with the latitudinal trending Tectonic belts

大陆，同时它的 E 部边界向 E 俯冲和对接碰撞形成向 E 的侧向压力，以及菲律宾 - 太平洋板块自 45Ma 改向 NWW 向运动和俯冲以来，华南地块就遭受了 EW 向的强烈挤压，从而形成每隔一定经度的新生代南北向的挤压带^[25]，并使原先已经形成的 EW 向褶皱遭受再褶，形成了向 N 或向 S 突出的弧形构造。如果原先存在一个山字型的前弧或反射弧也会遭受再褶而使其弧度和曲率加大，之所以会越向 W 其弧度和曲率越大，显然和越往 W 越多来自印度地块的阻抗和向 E 的强大侧压有关（图 3 - 19）。

南海西、南、东周边残留的古、中、新特提斯蛇绿混杂岩带总体展布呈 U 形，它是古特提斯构造带的现位构造型式。在我们对它进行构造复位以前，首先对南海周边的复合构造体系进行了仔细的构造筛分，筛分出三套具有成生先后顺序的构造序列，即印度板块与欧亚板块碰撞前的构造序列、印度板块与欧亚板块碰撞形成的构造序列和菲律宾 - 太平洋板块在 5Ma 左右与台湾岛弧俯冲拼贴的构造序列（图 3 - 20）。由于上述的构造筛分，明确地认识到南海西、南、东三边古特提斯蛇绿混杂岩带之所以呈 U 形展布是由上述三种构造作用造成的。这就为复原新特提斯关闭时的古构造复原明确了方向——按上述三种作用反演，为下一步根据古地磁和形变记录作定量复原奠定了基础^[20]。

上述例证提示我们，构造筛分和复合构造解析对古构造研究是极其重要的。构造筛分和构造复原是相互联结、相辅相成的。

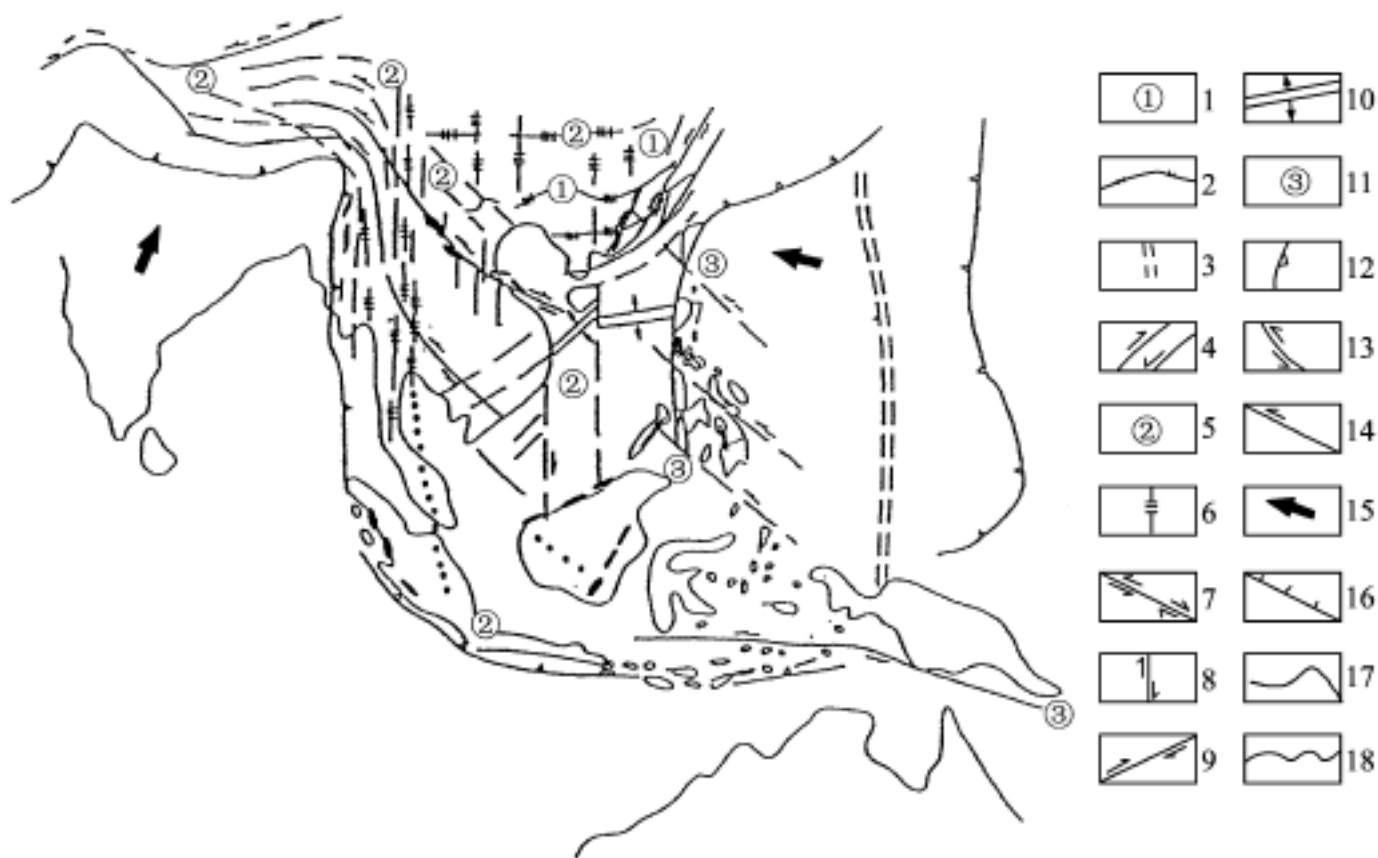


图 3 - 20 南海及其周边区域构造示意图^[20]

Fig. 3 - 20 Sketch map showing the regional tectonics of the South China Sea and its surrounding areas

1—印度板块与欧亚板块碰撞前南海北部大陆边缘构造序列；2—EW 向挤压带；3—SN 向构造带；4—华夏方向构造及大陆边缘弧；5—印度板块与欧亚板块碰撞产生之构造序列；6—SN 向挤压带；7—NW 向剪切走滑（左行或右行）；8—SN 向右行走滑；9—NE 向右行张扭性走滑；10—南海扩张轴；11—菲律宾 - 太平洋板块向西俯冲所产生的构造序列；12—海沟俯冲带；13—NNW 向左行走滑；14—近 EW 向左行走滑；15—板块运动方向；16—地缝合线；17—蛇绿岩套混杂岩带（点线为推测）；18—地理边界

二、关于形变与形成、建造和改造相关关系的分析

众所周知，改造控制建造的一层含义是指建造的成生展布往往受前期已形成的巨型形变的控制。例如地向斜控制着地槽相和地槽型建造的展布等。正因为这样，地质力学工作者往往利用这一原理来确定构造型式的成生定型的时间，岩相古地理的分析方法成为古构造研究的重要方法。但是人们常常忽略了改造控制建造的另一层含义，即强烈的后期变形可以改变已经形成的建造和沉积相带的展布，甚至可以使已经形成的建造和相带发生大幅度的扭转。广东的清远—四会 S 形构造在林潜、邢玉簌未开展古地磁的研究以前，人们普遍认为 S 形构造形成于晚古生代以前，因为 D₂ 的沉积相带的展布与现存的 S 形构造的展布相一致，设想它受控于已经形成的 S 形构造；同一地区同一时期古地磁记录（磁偏角和磁倾角）应该是一致的，现今所获古地磁的测量记录的不一致是因为经过后期构造变动所致。因此当我们把现今的古地磁记录（古地磁矢量）扭转至同一方向时，该方向应代表古地磁记录形成时之古地磁矢量（图 3 - 21），这代表古地磁记录形成时的古构造倾向，此时地层的沉积条带是 NE 走向而不是 S 形时，这使我们意识到现在所有看到的 S 形构造是后期扭动造成的；同时，只有当把古构造复原为 NE 向构造时，视极移曲线才重合一致，由此也证明泥盆系沉积时其古构造呈 NE 走向，而不是现在见到的 S 形构造（图 3 - 21、3 - 22）^[140]。

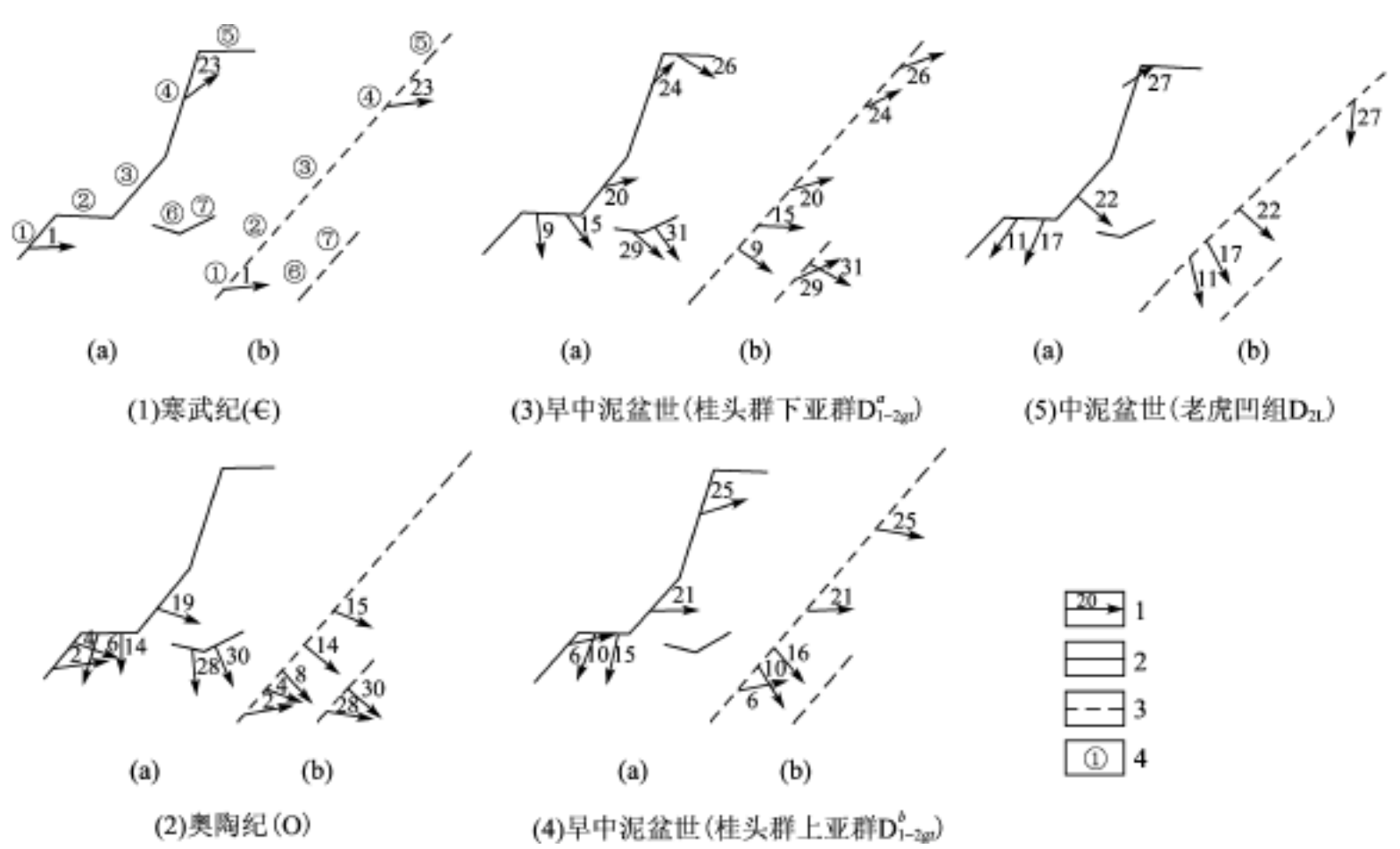


图 3 - 21 广东省高要 - 四会 - 清远 S 形挠曲带与其剩磁偏角 D 的正、反演示意图^[140]
Fig 3 - 21 Digrams showing gao-yao-shi-hui-Qing-yuan deflectional belf (in “ s ” figure) and it s
magnatic dechinationl deduction as well as recovery. Guangdong province, south China.
1—剩磁偏角 D 的方向及顺序号；2—S 形挠曲构造轴线（图 a）；3—反演为 NE40° 后的构造轴线（图 b）；
4—构造轴线分段编号

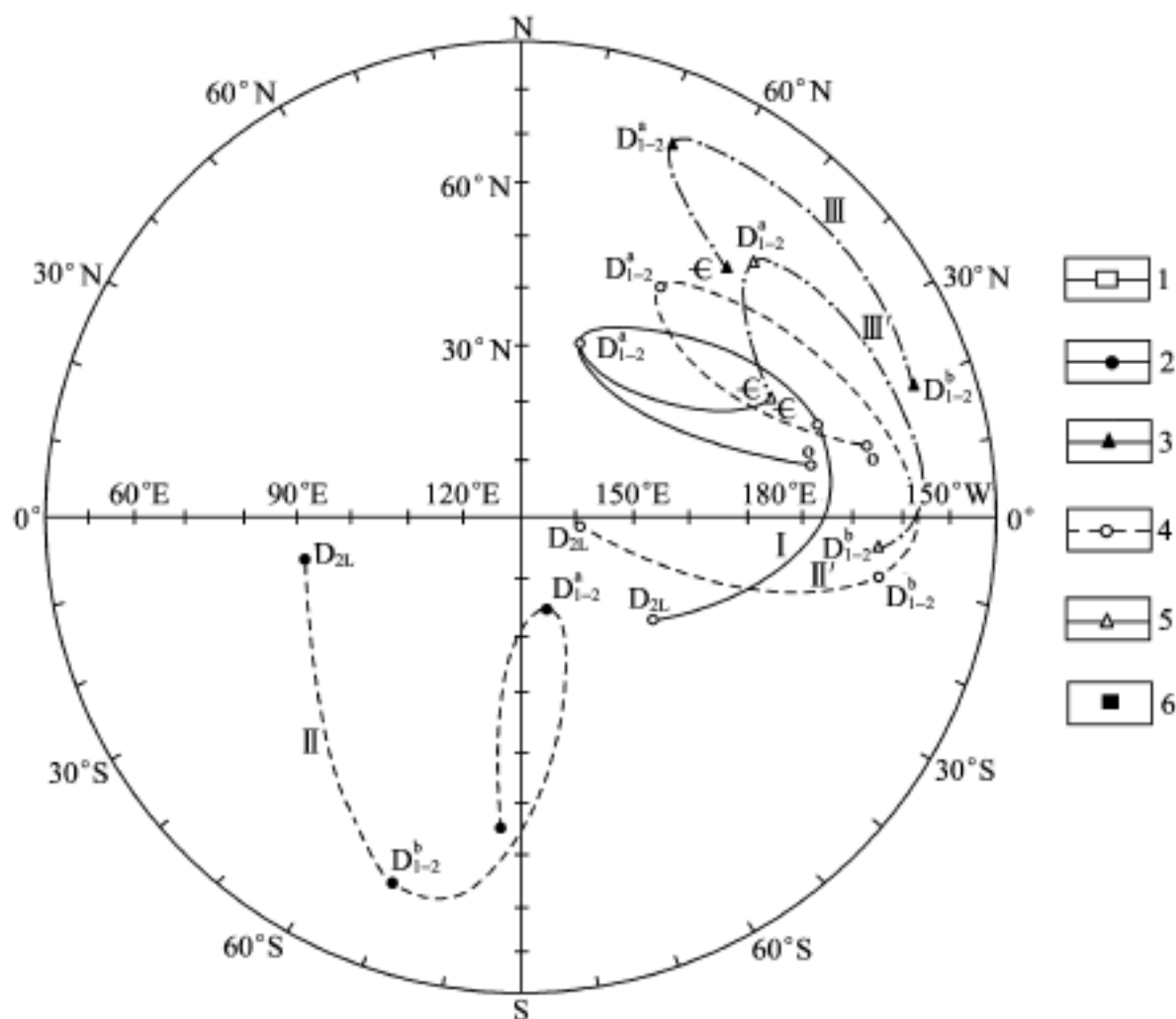


图 3 - 22 示图 3 - 21 中构造轴向不同三组剖面的古地磁极位置图^[140]

Fig 3 - 22 Diagram Showing the paleomagnetic poles position of different tectonic axes in Three sections of the figure 3 - 21

1—构造轴向 NE40° 各剖面的综合数据 (I); 2—构造轴向为 EW 各剖面的综合数据 (II); 3—构造轴向 NE15° 各剖面的综合数据 (III); 4—II 组数据逆时针旋转 99°44' 的结果 (II'); 5—III 组数据顺时针扭转 25°33' 的结果 (III'); 6—标本采样地

广东清远 - 四会 S 形构造所涉及的范围还不够大, 充其量不过是几个县的范围。如果说这还比较容易让人们相信的话, 那么面积幅员波及我国青藏三江地区乃至整个东南亚近 10 个国家的巨型歹字形构造, 把原来呈 EW 向展布的古、中、新特提斯建造扭转成一个巨型反 S 型的现位展布 (如图 3 - 20 所示), 在未仔细地做复原工作以前, 那是难以置信的, 但是地壳运动确有如此天翻地覆的神奇力量。

下文我们具体介绍古特提斯构造带东段的构造复原工作。

(1) 根据古地磁记录进行构造复原: 根据印度洋的磁条带记录, 至少自 65 Ma 以来, 印度板块已经向北漂移了 2000 km 以上, 古近纪初期印度板块北缘的地理位置应位于现今印度次大陆南端的纬度上。而分布于印支半岛西侧的来自中国西南三江南北向构造带及夹裹其中的也呈南北向展布的 Shan 蛇绿混杂岩带、uttaradit Nan 蛇绿混杂岩带一直伸向马来半岛和加里曼丹, 也跟着印度板块的北缘南移 2000 km, 将会逆时针旋转成近 EW 向 (图 3 - 23)。另据 Hsu 对吕宋岛白垩纪火山岩所作的古地磁研究, 古菲律宾群岛自白垩纪以来曾发生过约 70° 的逆时针旋转和约 20° 纬度的向北漂移 (图 3 - 12、图 3 - 13); 据 Robert Hall 等的研究, 它是通过一组 NNW 走向的断层作左行走滑而实现的^[145]。反演复原表明, 菲律宾群岛晚白垩世时一套海西—印支期蛇绿岩建造可能围绕一些海西期的大陆残块

形成于加里曼丹岛弧东边稍南的位置上，构成了近 EW 向的早期古菲律宾群岛（图 3 - 23）。这样，自西（印度次大陆南端）经加里曼丹北侧向东至早期菲律宾群岛展布着一条近 EW 向的海西—印支期的蛇绿岩套混杂岩带，它就是晚白垩世末、古近纪初期时古特提斯缝合带展布的位置；而在其南侧，又断续分布有近于 EW 向断续相循、较新年龄的蛇绿岩带^[20]，虽然它们由于后期构造错失已经很难完整地复原，但大体仍可判断出可能是中特提斯和新特提斯洋壳的残迹。



图 3 - 23 晚白垩世末印度板块与欧亚板块碰撞前（>65Ma）东特提斯东段南部大陆边缘展布示意图^[20]
（经现位复原；据 P. Tapponier, Hsu, Robert 及陈忠提供的古地磁资料复原）

Fig. 3 - 23 Schematic map showing the ditribution of the southern continantal margin in the eastern segment of East Tethys before collision of the Indian plate and the Eurasian plate by the end of the Late Cretaceous (>65Ma)

（2）根据形变和建造方面的记录来进行构造复原：展布于藏、滇、缅、泰、马的歹字型构造带，断切了越南北部的前中生代 EW 向变质基底和呵叻盆地中呈 NWW 向展布的白垩系褶皱，卷入这一歹字型构造体系中段南北向构造带的有中生代和古近纪的花岗岩，同位素测年表明形成于 30Ma 以前^[37, 61]，而印度板块正是在 45Ma 以来这段时间与欧亚板块对接硬碰撞的，正是它持续向北推挤所产生的 EW 向侧向压力所形成的，并由此控制了印度板块东侧横断山脉山前南北向渐新世—中新世磨拉石建造的展布。

据钟大赉等^[21]研究，在藏滇三江近 SN 向构造带中前寒武纪澜沧群变质基底岩系可构造解析出 3 个世代的褶皱。前 2 个世代的褶皱走向都呈 EW 向，发育透入性构造面理，属共轴叠加变形，只有第 3 世代的褶皱呈 SN 向横跨复合在 EW 向的变质基底之上，而区内第 3 世代的褶皱则发育于盖层中，其中的炭质岩和薄层硅质岩是区域性滑脱层，自 W 向 E 滑脱，逆掩断层自 W 向 E 推覆。

以上两方面的地质记录客观地论证了印度板块向北推挤时引起了原来是 EW 向展布的盖层扭转成 SN 向展布和引起一系列由 W 向 E 滑脱和逆冲推覆的认识是正确的。

（3）根据这种认识进行构造复原的方法步骤是：①根据印度洋磁条带的年代和宽度由北向南拉开，复位原来古近纪时的印度板块北部边缘的位置；②相应的盖层根据褶皱挤压方向和收缩率，由 N 向 S 和由 E 向 W 地展开。经过构造复原，现今印度次大陆北缘和印支半岛、马来半岛、苏门答腊一带的特提斯构造带在古近纪初印度板块尚未与欧亚板块碰撞前应为近 EW 向展布，往东在加里曼丹地区，把现今南海完全关闭，衔接华南大陆边缘与巽他大陆边缘之间的特提斯构造也是近 EW 向，加里曼丹以东，现今菲律宾群岛顺时

针 70° 复原后，古菲律宾群岛也是近 EW 向（图 3 - 23）。应该说明的是，我们的构造复原只进行到晚白垩世末至古近纪初，也就是新特提斯关闭的时候，但是由于古、中、新特提斯的拉开和挤压闭合都是 SN 方向的，也就是说多次的开合是同方式运动（由它们彼此呈重接复合反演得知），因而可以认为复原后的构造方位同时也可以代表古特提斯的展布方位。另外，华南在古生代和中生代时都属于北特提斯域，南岭纬向构造带的长期存在及其向西的延伸，不同时代的纬向构造带呈重接复合并无显著斜接^[5]，以及根据古地磁资料，华南地块中、新生代以来主要是 SN 方向的漂移，虽有近 10°~20° 的顺时针或逆时针旋转，但总效应相当于无大的水平旋转，这些都可旁证特提斯构造带的原始展布是呈 EW 向的。

上述两个实例都提示我们，在对一张区域沉积古地理图作建造与改造的相关分析时，我们要思考一下：它到底是先有变形然后控制了后期形成的建造，还是先有建造后期的形变把它改造成现在的展布？一般来说，在那些构造稳定的地区，前期的基底构造控制后期建造的情形居多；在那些构造活动区或活化区，特别是后期强烈变形的地区，则后期变形改造了先期的建造展布而成现位展布居多，即在那些构造复合区，构造的基本面貌是由最强烈的构造变形事件所决定的。

因此，弄清楚形变与形成、建造与改造的相互关系对确定古构造型式的成生时期和古构造型式的复原有重大意义。如果不弄清楚这种情况，我们就难免犯下把马车系在马的前面的错误。从这里，我们似乎意识到只研究物质成分及其相变、完全不研究形变的古地理图编图方法隐藏着重大的方法学问题。

三、关于构造的成生时期和定位时期的区别

一个构造形成的时间称为成生时期，形成以后经历后期变动而定位于后来所在位置的时间称为定位时期，相应也就有了成生年龄和定位年龄之分，两者是有区别的。对于构造的成生时期和成生年龄通常用区域不整合面和构造岩的同位素年龄来确定；但是区域不整合面也可连同其上的新老建造和形迹一起卷入后期变形的一个新的构造型式之中而定位于一个新的构造方位，比如定位于一个新的南北向构造带而成南北向展布，这样老的不整合面的形成时代就很容易被当成新的南北向构造的成生时代。老的构造岩同样被卷入新的构造带之中，它的同位素年龄就很容易被当成这个时期的南北向构造的成生年龄。尽管现代的同位素测年（例如 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ）坪谱年龄可以提供多阶段多期的构造年龄，但它并不能提供成生时期和定位年龄的分划。这样本来是很新时期才定位成南北向的构造带就变成了一个成生时期很老的南北向构造。为了说明上述谬误，无妨列举两个实例。

一是特提斯构造带，众所周知，在全球范围内，它是呈 EW 向或近 EW 向展布的，古、中、新特提斯构造带分别成生于海西—印支期、燕山期和中生代末新生代初，这已为大范围各类受其控制的建造和区域性不整合面的形成时期所限定。但是自 65Ma 印度板块与欧亚板块的对接碰撞以来，上述东特提斯的东段，它的晚古生代以来的沉积覆盖层和前新生代的构造形变，包括印支期和燕山期的各类区域性不整合面统统被卷入一个新生代才形成的超巨型的青藏缅泰印尼的歹字型构造体系之中，使老、中、新特提斯构造带都大幅度地被扭转而定位于现今的构造位置（图 3 - 20）^[20]。因此就它们的定位而言，它们的定位时期是喜马拉雅期，它们的定位年龄是 45 Ma 以来。但是如果根据其中不整合面的形成时代和老构造岩的同位素年龄，我们甚至可误认这一巨型歹字形构造或三江南北向构造

带成生于印支期。

第二个例子是粤西河台金矿的韧性剪切带，该带叠加于古生代的混合片麻岩、重熔花岗岩和变粒岩之上而又为早燕山期的花岗岩体所侵入，花岗岩体（伍村）同位素年龄在 264 ~180Ma 之间。其成生时期应为海西—印支期，这和区域上钦防海槽的关闭及沿罗定 - 广宁断裂带的断裂变质带的成生时期是一致的^[155]。但是，罗定 - 广宁韧性剪切带的构造岩的年龄却普遍为 180 ~150Ma ±。这一年龄值显然与后期的热扰动有关，事实上，燕山期的后期逆冲推覆，才把海西印支期形成的深构造位的逆掩推覆和韧性剪切带定位于后来的韧—脆性乃至脆性构造位，再经后期的隆升剥蚀才使深构造位的海西—印支期韧性剪切带定位于现今的浅构造位并被剥蚀于地表。因此，海西印支期是它的成生时期，而燕山期和喜马拉雅期则是该韧性剪切带的定位时期，180 ~150Ma ±是它燕山期的定位年龄。

由上述两个实例引发一个重大的问题：在那些燕山期特别是喜马拉雅期遭受强烈变形改造的地区，一些构造型式由于没有严格区分成生时期和定位时期、成生年龄和定位年龄，原先确定的成生时期和成生年龄可能需要重新审视。

与构造的成生时期（年龄）、定位时期（年龄）密切相关或者说这一类问题进一步延伸的是构造组分的形成时代（年龄）与构造体系、构造型式的形成时代（年龄）之间可能存在的差别。组成构造体系或构造型式的构造组分，可以是一个老的构造体系或构造型式中的一部分，在新的构造应力场中被卷入了新的构造体系与构造型式中，这样某些构造组分的形成时代（年龄）就老于包容、卷入和归并它的构造体系和构造型式的成生时代（年龄）。例如在秦岭 - 大别造山带或者特提斯造山带中都可以找到它所包容的比较古老的地块。一条长期活动的断裂带中可有多期活动的年龄。例如粤东的南澳断裂带和莲花山断裂带，我们采构造岩样作⁴⁰Ar/³⁹Ar 测年，获得 6 个单矿物的⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄谱数据，可分为三组：151 ~162Ma、117.5 ~129.7Ma、66 ~97Ma。第一组年龄代表较深层次逆冲、褶皱和动热变质的年龄，第二组年龄（2/3 样品⁴⁰Ar/³⁹Ar 坪年龄值集中于这一组范围内）代表强烈韧性剪切、左行平移兼逆断层活动的时代，即韧性剪切带的形成时代，第 3 组年龄代表活动热扰动即韧—脆性转化、右行平移 - 正断层活动和地壳伸展的时代^[156]。上述不同期次的构造年龄一般都作为新华夏系的多期活动来看待。其实只有其中的左行压扭和韧性断裂才代表新华夏系的主压面，其构造年龄才代表新华夏系的活动年龄，其中最后一期的右行平移正断层活动已是我国东部开始进入伸展期的“似新华夏式伸展盆海系”的一个组成部分，已经不是新华夏系的活动年龄，而是另外一个构造体系的活动年龄。这种现象在我国东部很普遍，例如我们在浙北地区开展课题研究时，在 NNE 向的晚期新华夏系左行压扭断裂带上常常叠加有右行走滑断层，在断层面上发育极为宏大壮观的右行水平擦痕和压痕，它在区域上常与 NWW 走向的左行走滑或压扭性斜冲断层共轭，实际上这些 NNE 向右行正 - 平移断层在晚近时期已归属于新生的 NW 向左行扭动构造系。因此这一期活动的构造年龄也不能代表新华夏系晚期活动的年龄，而代表 NW 向左行压扭性构造体系的活动年龄。老的构造组分的年龄和它定位于其中的构造体系和构造型式的年龄的不一致本质上也是一种成生年龄和定位年龄的区别。

以上我们进行了几个方面的分析，中心的思想都是想说明后期形变对于前期构造（包括建造和形迹）的改造意义。为了正确地认识古构造，正确地对古构造进行复原，就必须剔除后期形变对前期构造的改造。古构造型式的复原要求在古构造形迹的配套以前，

首先做好基础性的前期工作，诸如古构造形迹的筛分、复位，成生年龄的确定和古构造形迹力学性质、应力活动方式的分析，然后才能建立复原了的古构造型式。李四光虽然提出了古构造型式的问题，也运用构造筛分的方法从复合变形带筛分出一些古构造型式的构造成分，但生前还来不及通过系统工作建立一个可作为样板的前燕山期的古构造型式。我们的工作则表明通过系统的筛分复原工作，古构造型式是有可能被认识的，如我们对南岭地区泥盆系不整合面以下 W 型褶皱经剔除后期改造后复原为直线型 EW 向褶皱应为加里东期南岭基底构造的古构造型式，而不是现在看到的 W 型褶皱。

以上我们是从地质力学强调后期改造的思路来阐述构造复原。但构造复原或构造重建工作的内容远不止古构造型式的复原，诸如山脉、盆地的重建和古大陆、古大洋的复原都属于古构造复原工作的范畴。一般地说，对比较小范围小尺度的构造复原主要是构造形变方面的复形和复位，诸如体积的复原和挤压、伸展、剪切变形之复形、复位，而随着所研究的古构造对象时空尺度的扩大，它所涉及的区域地质方面越来越广泛，构造复原的含义也就逐渐过渡到具有广义的性质，而越出了侧重于形变研究的范畴并逐渐将研究重点转移到建造和地块、海陆复位的研究上，但并不是不对形变进行复形和复位的研究，而是通过广大空间建造和地貌研究进入到一个更大时空尺度的形变复位研究。

四、地壳大规模变形和海陆边界的复原

近年来，青藏高原成为全世界构造研究的一个热点，对青藏高原的变形过程、隆升、走滑和构造滑脱进行了系统的研究，为我们对青藏高原在印度板块碰撞下所发生的各种变形过程进行反演提供了扎实的基础。这里我们无妨用它来进一步复原变形前的古地理古构造面貌。

从原理上讲，可利用 65 ~45 Ma 以来青藏高原所遭受的变形和隆升来反演复原 65 ~45 Ma 以前的古地理和古构造。但实际做起来困难很多，原因不仅因为其制约因素太多，而且对变形机制本身就存在不同的认识，至少有俯冲模式、缩短模式、走滑模式等。实际资料表明，这些模式都是客观存在的，具有互补意义。借此，我们对喜马拉雅高原自始新世以来的缩短量、地壳增厚量和挤出量有一个粗略的估计。

(1) 南北方向的缩短量的估计：主要考虑始新世以来印度板块向北漂移的距离减去青藏北缘向北漂移的距离应为始新世以来青藏高原南北方向的缩短量，始新世以来，青藏高原的南界——印度板块向北推移了 2200 ~2500 km，而北缘的塔里木地块也向北位移了 1000 km，因此，始新世以来青藏高原南北方向的平均缩短量约为 1400 km^[4]。

(2) 地壳增厚量的估计：Dewey 等^[157]认为青藏高原地壳平均厚度为 65 km，印度地盾的地壳厚度约为 33 km，因此，可以认为青藏高原垂直方向的地壳增厚约为一倍。

(3) 东西方向挤出量的估计：P. Tapponnier 等^[37]估计走滑挤出承担陆内变形的 40% 以上，但 Dewey 等^[157]认为 45 ~30 Ma 的幕一几乎是一种纯冲断的垂直面应变，包括南北向的缩短和垂向的增厚；30 ~5 Ma 的幕二表现为走滑断层作用的水平面应变；最后 5 Ma 的幕三亦以走滑和伸展为特征，他们估计幕三和幕二挤出总量不超过 200 km，或青藏高原西长度的 15%。

有了上述几个方面的数据就可以据此大致反演 65 ~45 Ma 印度板块尚未与欧亚板块碰撞以前古中国大陆西南边陲的古地理位置了。按印度洋磁条带宽度推算，古近纪时印度板块的北缘应位于现今印度次大陆的南端（图 3 - 23），这也就是当时古中国大陆西南边陲

大致的古地理位置。至于古地貌，当时高峻的喜马拉雅山是不存在的，是一片与印度次大陆隔岸相望的滨海平原的大陆边缘。

现今的青藏高原的构造格局表现为青藏缅泰马印尼歹字型构造体系包容了青藏高原内部的 EW 向构造，新生代的 NW 向扭动构造体系（碰撞构造体系）斜接、重接复合在西域系之上，剔除这些由于印度板块与欧亚板块碰撞所产生的构造体系，被包容和斜接复合的 EW 向构造应该是印度板块与欧亚板块碰撞前就已经有的古构造，复原其原有的古地理位置，其北缘应该与天山、阴山 EW 向构造带及秦岭 EW 向构造带相连，其南缘则应与南岭纬向构造带相当。

至于中国及亚洲东部，则没有像中国西部和西南边陲那样由于印度板块的碰撞而产生巨大的压缩，而是由于印度板块的向北压缩而产生向东和东南方向的伸展、挤出和构造逸脱。不过，在中国及亚洲东部大规模的伸展并非自印度板块碰撞始，而是早在白垩纪时当亚洲东部华夏山系造山期后由于岩石圈山根的拆沉（Delamination）就已经开始了地壳的拉伸减薄作用。由于这些地壳的拉伸减薄作用，在中国及亚洲东部形成一系列平行雁列的区域上总体呈 NNE 走向的伸展断陷盆地，中国、亚洲东部一系列陆表海、边缘海也受其控制（即本书作者所厘定的似新华夏式伸展盆海系）。如果我们能计算出其总的伸展量，据此进行反演，也可以复原白垩纪时期和 65 ~45 Ma 印度板块碰撞前中国东部及亚洲大陆东部陆缘的原始边界和当时的古地理位置。现在只能根据西太平洋边缘海残存的古陆块来复原当时的古大陆边缘。任纪舜等曾报道过日本地质学家们对黑潮古陆和新潮古陆的研究成果^[51]：

在西南日本外带的四万十带、中新世花岗岩中有麻粒岩捕虏体（Pitcher, 1983），说明四万十带的基底并非一般所认为的大洋地壳，而是大陆地壳；在菲律宾海大东群岛，含大量有孔虫的浅海始新世石灰岩不整合于前古近纪变质基底之上（Tanaka. et al., 1977）；

四万十带纪伊半岛南部渐新世—早中新世复理石中的正石英碎屑物质来自东南方向；奄美大岛始新世和野组夹砾石的浊流，其古流向亦明显来自东南方向，砾石成分含有花岗岩和花岗质片麻岩等；宫古近海基准井早中新世八重山群中砂岩物质来自片麻岩、花岗岩组成之陆地，砂岩之陆源区应在南边的菲律宾海（丹谷博明等，1985），说明当四万十地槽沉积时，其东南方向的菲律宾海地区确曾存在一个古陆块，所谓的黑潮古陆（Kuroshio Paleoland）（Tokuola et al., 1982）即该古陆的一部分（图 3 - 24），位于菲律宾海东南侧的

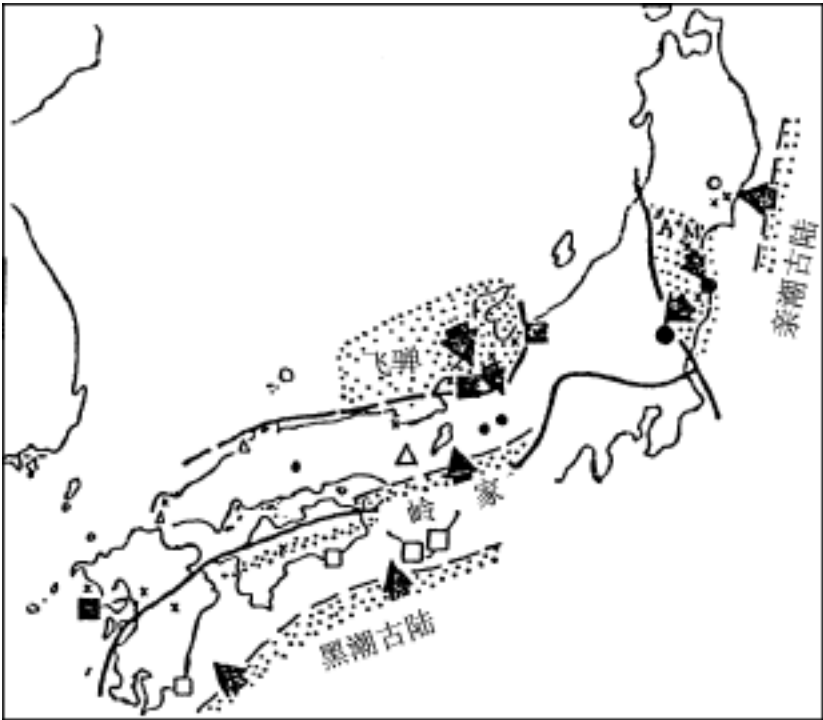


图 3 - 24 日本正石英岩碎屑的可能来源^[51]

Fig 3 - 24 Possibe Rource of the orth-Quartgitic fragments in Japan^[51]
AM—北上山；空心圓圈。古生界；黑色圓点。三叠系—侏罗系；空心方框。古近系；圓形（符号）的大小大致代表正石英岩碎屑含量之多少；x 代表推测的日本列岛基底岩石

雅浦岛上，早就在前中新世砾岩中发现花岗岩、片麻岩和结晶片岩砾石（Minato et al., 1985）也为此提供了旁证。

在东北日本的北上山海岸以东，日本地质学家还推断存在另一古陆即亲潮古陆（图 3 - 24），位于北上山海外 170km，距日本海沟 80km 的海沟斜坡上，深海钻探已查明那里的古近纪—早中新世地层之陆相和浅海相沉积，而且碎屑物质不是来自西边的北上山区，而是来自更东的现今海洋的方向，这就意味着在现今的海沟及其以东地区，确实有过陆块，Minato 等（1985）推测，那里可能存在古元古代和新太古代的变质基底。在千岛 - 勘察加海沟斜坡上有同位素年龄为 500Ma 的变质岩，在海沟之东的奥布鲁切夫海隆、北海道大洋边缘海岭获各种花岗岩和变质岩样（Kro Sny, 1984; Wulou Tye30h, 1985）等也证明紧挨日本 - 千岛 - 勘察加海沟的西太平洋洋底确实存在古大陆的残块。

在现今的西太平洋洋底，海底高原、海山星罗棋布，地球物理探测表明，西太平洋海底磁异常具有方向多变、呈多轴扩张的特点，一些海底高原的地壳厚度比一般大洋地壳厚得多，而且上部 10 ~ 15km 的 P 波速度为 6.0 ~ 6.3km/s，具大陆地壳的特点（如翁通爪哇、沙茨基等海隆，Nur et al., 1978）。据任纪舜等^[51]的研究，在西太平洋深水海盆及块盆中的大陆残块尚有襟裳海山、鹿岛海山、大和隆起、郁陵岛、大东群岛、本汉姆海台、雅消岛、西沙群岛、中沙群岛、南沙群岛、加罗林海底隆起等。

对于上述西太平洋陆块群或陆源剥蚀区存在不同的解释：一种是设想存在过一个太平洋古陆，它们后来裂散成的地体拼贴于西太平洋的大陆边缘；另一种解释则认为是原来的欧亚大陆在新生代沉沦为海洋，也就是说，白垩纪末始新世初中国及亚洲东部的大陆边缘至少应该推至现今的堪察加 - 日本 - 马里亚纳海沟东侧一带，现今西太平洋的边缘海（鄂次克海、日本海、菲律宾海、南海）当时尚不存在，都仍然是中国及亚洲大陆东缘的一部分。

这样，综合中国大陆东西部晚白垩世末—古近纪初特别是 65 ~ 45Ma 印度板块与中国大陆碰撞以前的古构造古地理复原，我们可以获得当时古中国及邻区的古地理范围的轮廓，这个古地理古构造的轮廓可归纳为以下几个要点：

（1）古中国大陆的西南边陲位于现今印度次大陆的南端，其西南大陆边缘与印度次大陆的北部陆缘遥遥相对，隔洋相望。

（2）古中国或东亚大陆的东部边缘位于现今西太平洋俯冲带以东仍有古陆残块分布的地区。

（3）晚白垩世末—古近纪初，古中国或东亚大陆的古地势东高西低，在东部大陆边缘分布着陆缘造山带——华夏山系，向西地势减低河流水系自 E 向 W、SW 注入印度洋^[158]。

（4）晚白垩世末—古近纪初，古中国或东亚大陆的地壳厚度东厚西薄。

（5）古中国大陆区域构造轮廓的基本特征是东部的 NE—NNE 向构造与中西部的 EW 向纬向构造联合，形成了向 SE 方向突出的大陆边缘弧。

第九章 地质构造是建造与改造的统一

如前所述，地质力学和板块构造学都研究形成与形变、建造与改造，都承认地质构造是建造与改造的统一，但思路和侧重点有所不同。为了进一步说明地质构造是形成与形变、建造与改造的对立统一这一命题，本书作者表述以下三个方面的内容：①地质构造是不同级别、不同方式的地壳运动的历史记录；②建造与改造（形成与形变）的相互联系与相互转化；③构造相是地质构造形成环境与动力机制的物质表现，是形成与形变、建造与改造的综合反映。

第一节 地质构造是不同方式、不同级别的构造运动的历史记录

地质构造可分为建造和改造两大方面。建造是在构造运动的支配下形成的，例如在构造运动作用下可发生全球性的海进海退，从而影响到水圈的运动进而影响地层建造的形成。李四光认为地球自转速率的变化首先会在水圈的运动上得到灵敏的反应，从而引起高纬度的海水涌向低纬度或反过来低纬度的海水涌向高纬度，也就是说，岩石圈地壳自北向南或反来自南向北的水平运动也会伴随着海进和海退，也可形成海进层序和海退层序的地层建造。^[5]

岩石圈地壳运动不仅形成建造，而且使建造发生形变。岩石圈、地壳的运动有不同的级别，因而可形成不同规模和级别的建造和形迹。

在建造方面，从元素的共生组合（矿物）→矿物的共生组合（岩石）→岩相的共生组合（建造）→建造的共生组合（建造系列），组成了一个由简单到复杂、由低级到高级的物质共生组合序列。

不同级别和规模的岩石圈、地壳运动可使不同级别和规模的建造卷入变形，这些变形通常以不同规模和等级的建造面作为变形面，形成不同规模和等级的变形构造。例如最低等级和最小规模的晶格之间的位移变形以最小规模的晶格架和晶格面为运动变形面，形成晶格位错显微构造；再进一步是沿着露头级别的层面变形面而发生的构造变形，一般称为小型构造；进而以区域不整合面和区域滑脱层面为区域变形面而发生的区域构造变形（例如区域性逆掩推覆构造、滑覆构造、区域性拆离构造）；再进而就是以核、幔、壳的

界面为运动面而发生的地球各圈层之间的运动从而形成各圈层之间的变形构造。

板块构造学在建造与改造的研究方法上基本上传承了传统的构造地质学与大地构造学，但把它纳入了板块构造学的理论框架，特别强调壳幔演化、深部物质运动演化和板块运动的动力学过程对于建造、形变的控制；而地质力学则更侧重于形变的研究，并强调改造对建造的控制，从形变和结构的演化来反演地壳运动的方式和程式，有它的独到之处。晚年的李四光结合自己的科学实践非常深刻地领会“实践论”和“矛盾论”的真谛，并把它运用到自己的科学研究之中。我们从下文所引述的他晚年的论著，可以感受到字里行间充满着唯物辩证法的思想光辉。

任何一个岩块，都在组成它的矿物质料的组织形态和构成它的岩石的结构形态中写下了它自己的历史；任何一个地块，也都同样地在构成它的岩层、岩体的构造形态中记载着它自己形成与变形的经过。……了解地块的结构形态乃是站在地质构造学，特别是地质力学的立场去寻找解决地质构造问题，从而解决地壳运动问题的重要途径之一^[68]。

结构要素是表征岩层、岩体结构形态的重要因素……当我们从地质力学的观点来分析构造问题的时候，结构面结合着构成它的岩石的性质，便成了我们的主要研究对象……岩块、地块的机械性质不同，因之，它们对同样应力作用的反应也不同……广泛的野外经验和一些实验结果证实了某些类型的结构面与另外一些类型的结构面，经常保持一定的成生关系；它们的出现，也大都有一定的程序。通过它们彼此之间的联系，并且通过被它们所卷入的或穿插的岩层、岩体各自展布的关系来确定所有互相关联的部分组合的规律、构成的形式以及扩展的范围——综合起来说，构造体系——是符合于逻辑的要求的。

在上述的基础上建立起来的构造体系这个概念，显然涉及空间的范畴，同时也涉及时间的范畴^[68]。

由于每一个构造体系都涉及三度空间和时间的范畴，而不是一举成就的，我们分析一个构造体系，必须确定它发生的时期，明确它发展的阶段，然后在这个基础上去了解它在哪个阶段中形成了怎样的组合形态，这样才能够从发生、发展、稳定、复活乃至僵化等一系列的变化的角度来处理问题，才能够充分地考虑到在它发展的各个阶段中，由于它的各个组成部分发生了变化而引起的整个组合形态的变化才能够同时考虑到因为整体形态的发展和范围的扩大而引起的各个组成部分的形体或甚至形质的变化^[68]。

不用说，地质构造体系是与地壳中所发生过的相对运动的方式分不开的。因此，我们不应该把一个大地构造区域仅仅当作具有一定构造形态或构造形质的一个地块，或具有不同构造形质的若干地块的集合体看待，而应该把它当作代表形成它的统一构造形态以及形成它的各个组成单位的各自构造形态的运动方式的总和^[68]。

由于同一地壳运动，在它涉及的范围内所产生的一切构造成分的鉴定、比较和联系，是导致我们正确地认识构造体系的关键^[159]。一个构造体系既然起源于在一定范围内某种方式的运动，它的产生必属于一定的时代。同一地块中某一时代发生的地壳运动的方式，可以与另一时代的地壳的方式相同或不同。在相同的场合较新的运动，名曰复活运动；在这种情况下两次发生的构造体系，或者完全一致，或者大同小异。在运动方式前后不同的场合，那么，两次发生的构造体系，便完全不同了，因此，产生了构造不整合的现象^[159]。

显然的，这样建立起来的一个构造体系可能一部分或全部建立在另一个构造体系的基

底之上，这就意味着，一个构造体系的某一部分中可能出现与它格格不入的构造成分，也可能包括比较庞大的自成一个构造体系的地块，更可能由于受到其他构造体系的干扰或牵制，以致或多或少地变更了它正常的形态。所有这些都说明一个构造体系，是具有一定的历史意义的。从这一方面去阐明大陆上每一地块的构造形态不断演变的历史，就是构造地质学前进的大道^[159]。

一个构造体系，正如一项结构要素一样，不管它出现于地壳的哪一部分，不可能是孤立的现象。因此，一个大陆，或一个大陆的某一部分，同一时期所产生的各个构造体系，不管它们是属于一个地块，或穿插到几个毗连的地块，如果在它们的力学含义上互相应证，一致地表征了同一动态的地壳运动，就是说，表征了大陆运动在某一方面的统一性的话，那么，一方面对那些有关的构造体系的客观存在的真实性来说，就等于经历了一次很大的考验，而同时另一方面对解决有关的大地构造问题来说也提供了一种有力的帮助^[159]。

从前述的观点来研究大地构造，我们有理由可以说：地球上各个区域构造发展的内在的原因和规律不应该仅仅在各个区域自身中单独地孤立地去寻找，而应该联系着其他区域特别是邻近的区域，或构造单位去寻找。不应该仅仅就每一个区域某一时代，也就是某一发展阶段的特殊构造形式去寻找，而应该在旧的构造形式基础上去了解新的构造形式发展的程序和规律。一个构造体系在它的逐步发展过程中，它的构造形式必然逐渐地发生一些变化，但那些变化不会超出它的基本形式的范围，也就是说它的体系基本上没有变更。但是到新的构造体系起而代替旧的构造体系的时代所遗留下来的构造现象被证实了的时候，我们才认识到在地壳中发生了大地构造革命运动^[159]。

以上我们之所以大段地引用李四光的原文，是因为只有李四光的原文才能如此正确深刻地表述李四光的科学思想。正如李四光所正确地指出来的，这是构造地质学未来发展的正确方向，但同时也是一条难度非常大、前进中布满荆棘的道路。与板块构造学比较起来它所碰到的困难要多得多。如前所述，板块构造学主要研究块体的运动和演化，它可以传承传统大地构造学的历史分析法，地史学百年来所积累起来的全世界各大洲和大洋的地质历史资料、研究成果基本上可以为板块构造学所传承和运用，用板块构造学新的理论框架可以相对比较顺利地顺理成章地做出新的科学阐述。但是，在构造体系这个全新的研究领域里，以往的科学积累并没有为地质力学准备充分发展的条件，相反，残破的构造遗迹和叠次运动的叠加改造，使古构造体系和古构造型式的复原工作变得极其困难……大概正是这些客观原因使地质力学的某些领域在发展的道路上停滞下来，也许当新的科技手段和新的地质发现，给地质力学准备了比较充分的条件以后，地质力学才能沿着这条道路继续前进。

第二节 建造与改造的相互联系与相互制约

我们可以根据以下几个方面的实际资料和典型实例来说明两者之间的相互联系、相互制约及相关的基本概念。

(1) 建造是地质构造组成物质的形成阶段，而改造则是该地质体遭受形变的阶段，小到晶格位错构造，大到区域构造乃至全球构造都必经这两个阶段，即形成其物质组成的

阶段和物质组成遭受形变改造的阶段，地质构造这一含义既适用于沉积岩区的地质构造，也适用于岩浆岩区和变质岩区的地质构造，它们总要先形成建造，然后才能接受改造。

进一步的地质考察告诉我们：建造阶段常是地质构造形成的渐变阶段，改造阶段则常是地质构造形成与发展的质变阶段。

在地质学的发展史上有过渐进论与突变论之争，在构造地质学上则有褶皱的长期性与造山幕的突变性的争论。事实上，褶皱作用是经过长期的量变的准备才发生的；在固结的地台区，同沉积作用的褶皱作用的长期性是举世公认的，造山带相对短暂的突变性的造山幕也是举世公认的。在岩浆岩区和变质岩区都有同构造的岩浆岩和变质岩，现代构造地质学已证明以前认为是原生的流动构造即所谓的流线和流面构造，相当一部分是岩浆岩建造侵入流动过程中岩浆尚未固结阶段受到挤压变形的产物，这实际上是一种同构造，即一边岩浆岩侵入建造在形成，一边也同时发生形变构造，如我们在粤东大埔 - 海丰断裂带的莲花山花岗岩体（ $\gamma_5^{2(3)}$ ）中所看到的那样^[160]，就是在厚大的喷出岩流建造的中下部常见的已被压扁拉长的气孔状构造，也是一种同生变形构造。可见，关于形成常是渐变、形变则常是质变阶段的划分具有相对性，总体说来，同构造阶段形成同生变形，成岩以后则是后构造的叠加变形。下文引用我们在广东莲花山断裂带的研究成果^[160]：

广东大埔 - 海丰断裂带中莲花山花岗岩体位于断裂带的中南段，在 1:5 万海丰公平高潭幅区域地质调查时将其划分为两个侵入阶段（ $\gamma_5^{2(3)a}$ 及 $\gamma_5^{2(3)b}$ ，广东区调队）（图 4 - 1）。在此基础上我们对岩体作了进一步的构造研究，我们的结论是：早期岩体（ $\gamma_5^{2(3)a}$ ）为同构造阶段，岩石作为二长花岗岩，与围岩多呈渐变过渡的和谐关系，常见边缘混合岩化现象，花岗质脉体注入围岩片岩之片理之中，在边缘混合岩中常见褶皱，石英压扁拉长现象普遍，混合岩中常见围岩残余片理，多保持其原来的区域构造走向，与侵入体长轴基本一致，岩体内同化混染现象显著，整个岩体内部岩相分带极差，岩体中遍布原生片麻状定向构造，它们系由暗色包体、正长石斑晶、条带状黑云母等定向排列构成（图 4 - 2）。这种原生定向构造只分布于早期岩体（ $\gamma_5^{2(3)a}$ ）内，而中止于第二阶段的岩体边沿，与后期叠加定向构造的走向常有一明显交角。在显微构造领域，不同矿物表现出不同的原生变形特征。

石英表现为细长条状条带状集合体，颗粒边界接触线多呈波浪状，带状消光极为显著。长石呈圆化斑晶和自形斑晶，均定向，基质钾长石多为圆化柱状，常见原生碎裂长

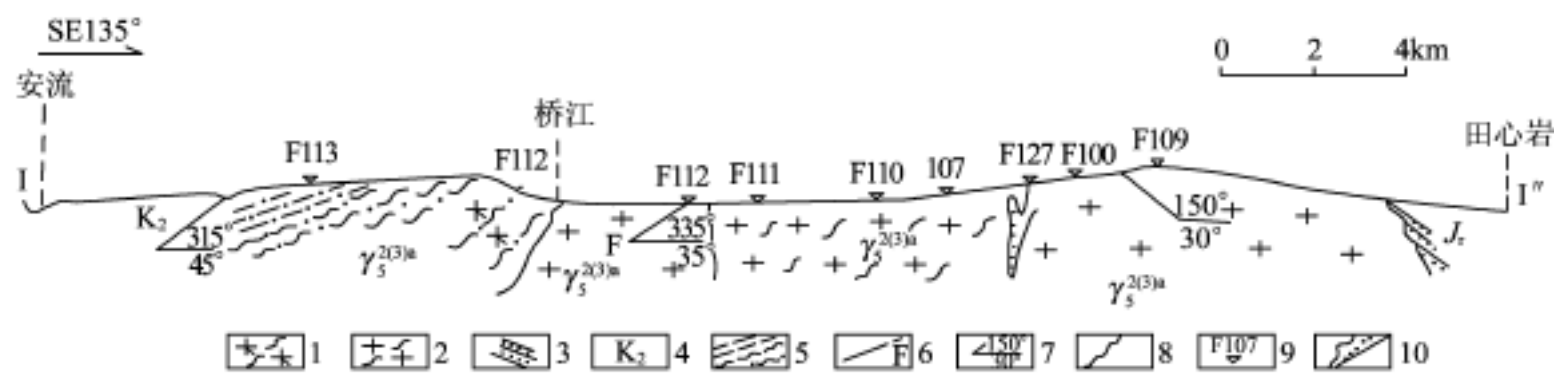


图 4 - 1 安流 - 桥江区域构造剖面^[160]

Fig. 4 - 1 The structural profile along the Henlu - Qiao - jiong area

- 1—第一阶段中粗粒斑状二长花岗岩；2—第二阶段粗粒黑云母花岗岩；3—下侏罗统片岩；4—上白垩统红层；
5—韧性剪切带；6—后期断裂；7—产状；8—侵入接触界线；9—观察点及编号；10—中细粒冷凝边

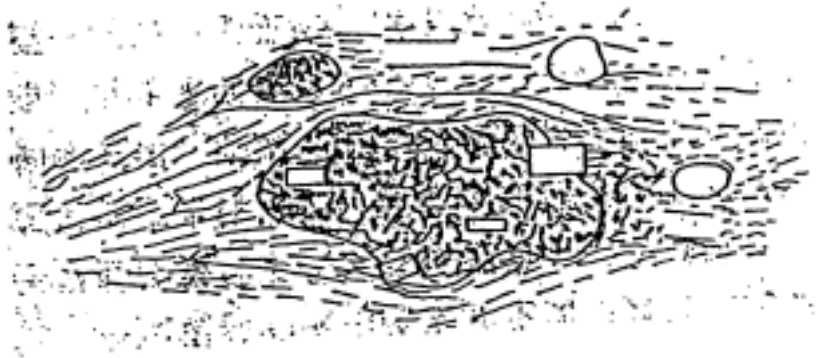


图 4 - 2 暗色包体、钾长石斑晶与黑云母条带关系示意图^[160]

Fig. 4 - 2 Sketch showing the relation ship between the darke enclaves、potassium orthoclase and the biotite

相同。在岩石化学方面，为氧化铝过饱和类型， $Al_2O_3 > Na_2O + K_2O + CaO$ （分子数）， $Na_2O + K_2O/SiO_2$ 含量较低， $Al_2O_3 \cdot MgO/CaO$ 含量较高， $CaO / (Na_2O + K_2O) \cdot Fe_2O_3 + FeO / Fe_2O_3 + FeO/MgO$ 低，属钙碱性岩石，本阶段岩体的固结指数 S_1 ，基性度（G）较高。本阶段稀土分析数据表明，除个别无 Eu 异常的轻稀土（LREE），其他五个具 Eu 负异常的轻稀土密集型与围岩的标准化曲线同，反映本阶段岩体与围岩关系密切，同化混染强烈。

（2）前期建造为后期改造（形变）提供边界条件和制约因素：形变或改造以建造为对象或物质基础；而参与形变的建造以其物性（脆性、柔性、细密、疏松、厚薄、均一不均一、相间成层或块状等）而影响其参与变形的能力和特征。例如光弹实验证实岩石的褶皱是由于在较软弱的介质中较强的主导岩层弯曲造成的，褶皱波长和主导岩层的厚度呈线性关系，主导岩层的厚度及其有关岩层的物理性质控制早期褶皱的波长，又如一些折劈理的发育与所在岩层的力学性质有关。不仅中小型构造如此，就是区域构造或大地构造中大型构造也如此。例如，板块与板块的相互作用往往产生板内形变，板内变形的强弱一般容易归因于板块间相互间的作用力的大小而不太考虑板内受变形的岩块、地块本身的特性如何。欧亚板块与非洲 - 印度 - 澳大利亚板块的相互碰撞作用，在不同的地域其板内变形的强烈程度是很不一致的：俄罗斯地台部分受变形的强度很弱，而在中国大陆，大陆板内变形是很强烈的，这固然和作用力的大小有一定关系，但很大程度上与受变形的地块内部是否是均一性的结构很有关系。俄罗斯地台板内变形微弱与板内基底和盖层比较均一稳定有关；而中国大陆是一个复式大陆（任纪舜，1993；马文璞，1993）即是由许多大小不一的陆块拼合而成的，由于“碎块”的不均一性，以及各处的沉积盖层厚薄不一……这一切都使板内的边界条件复杂多变，易于变形而使板内变形复杂多样，极不均一。

（3）巨型形变控制建造的展布：后期的建造是前期形变的基础上形成和发展的。从小到像方解石脉那样的先期裂隙控制后期充填其中的含矿建造，大到地向斜控制地槽建造，稳定的基底控制后期地台盖层沉积都证明这一客观规律的存在，但对后期大区域建造的形成与展布，有控制意义的还是那些前期巨型形变，因而前期巨型形变就成为后期建造形成和展布的背景条件。但是，不要认为后期形变对于前期建造的展布无所作为，后期形变改造前期建造，常常改变前期建造的展布，后期强烈的变形事件甚至可把原来的建造弄得天翻地覆，不仅把地层层序搞颠倒了，而且有些远程推覆可制造一系列飞来峰，其断距可在上百公里以上，最生动的实例是横贯纬向带的特提构造带，在印度板块持续向北推进

碰撞过程中把特提斯构造带（东段）扭曲成青藏缅泰马印尼歹字型构造系，伴随着南海的扩张和菲律宾板块向西推进而定位于现今的位置。

前期构造不仅是控制后期建造形成的支配因素，而且是后期构造继承性发展的重要基础。原有建造中已有的构造（断裂、节理、褶皱、不整合面等）对于后来的形变往往具有继承性或控制作用。许多后期褶皱和断裂往往在已有的褶皱和断裂的基础上进一步发展。一些地壳、岩石圈中长期反复活动的深大断裂往往是地壳 - 岩石圈已有的断裂经过长期继承性活动而逐步形成和发展的，一些剥离断层和滑脱构造往往是在区域性不整合面和滑脱层的基础或背景上发展起来的。前者如粤西的吴川 - 四会断裂带，加里东期为一剪切走滑断裂，印支 - 燕山期发展成为逆冲断裂，喜马拉雅期又成为张性正断层，随着时间的推移，断裂不断向纵深和宽度发展，最终成为今日所见之深大断裂。沿断裂带发育一系列基、中、酸性岩浆岩建造，韧、脆性断裂变质带和 Cu、Fe 含矿建造。

在板块构造中，不同的构造单元发育不同的岩石共生组合。例如，大陆裂谷区发育碱性岩系列，岛弧区发育钙碱性系列，前陆盆地发育磨拉石建造，洋陆俯冲带发育混杂岩带、蓝片岩带和双变质岩带等。迪肯森^[161]将表征板块边界或板块内部环境的岩石组合称为岩石构造组合（Petro tectonic assemblages）。他根据现代板块构造的环境，识别出以下四类岩石构造组合：①离散边界组合如大洋中脊；②会聚边界组合如岛弧（活动陆缘）→海沟系和大陆地缝合线；③被动大陆边缘组合；④大陆裂谷组合。

不仅沉积岩和火山岩的共生组合（即建造）^[162, 163]，不同变质相系的变质岩共生组合也受控于一定的大地构造单元^[164]，而且岩浆岩侵入体的岩石共生组合也受控于板块构造单元。Pitcher^[165]提出了花岗岩建造组合，各类花岗岩（I 型、M 型、S 型、A 型）的成生展布与板块构造单元关系一览表，系统地阐述了花岗岩建造的形成展布与板块构造单元的关系。都城秋穗^[166]则总结了双变质带的变质岩岩石共生组合和变质相系的展布也受板块单元的俯冲机制所控制。

以上总结虽然都系统地阐述了板块构造与岩石共生组合（建造）的关系，但是，只是阐明形变与形成、建造与构造（改造）在空间上和成分上的联系，还未涉及建造形成的机理或动力学机制，即并没有或并没有完全进一步说明为什么在这些构造单元会出现这些建造。例如，迄今为止，并没有在科学上回答为什么在大陆裂谷的构造环境里会产生碱性岩系列，其具体的地球化学动力学的机理是什么，等等。这一类问题只有进一步开展构造地球化学作用和构造物理化学作用的研究才能解决。在下一节段的论述中我们可以看到中国的地质力学工作者在李四光学术思想的指引下，在相变研究的几个重要领域里（应力矿物学或构造矿物学、构造地球化学、构造物理化学等）已经取得了重要进展，弥补了板块构造学在这些领域里的不足。

（4）在强烈的构造变形过程中产生新的建造：在强烈的构造变形中，伴随构造置换作用的过程，老的建造可被新的组分所置换而形成新的建造。最常见的例证如在大的挤压性或剪切性断裂带中，由于强烈的剪切挤压和构造动力分异作用在断裂带中形成硅化岩带。

这种一边变形一边通过构造置换、动力热液、动力变形变质作用，使原来受变形的建造发生矿物、岩石、地球化学成分和结构、构造改变，产生新矿物成分、结构和构造，变成新的岩石类型和新的岩石共生组合即新的建造类型。这种在动力作用过程中形成的岩石建造，一般称为同构造或同造山建造。同构造或同造山建造的出现最好地说明了巨型构造

变形在强烈变形过程中控制同期建造形成新的建造。

为了说明在构造形变过程中如何通过相变，最后形成新的建造，即动力成岩成矿过程，我们从以下几个层面来说明形变、相变在形成新的建造过程中的作用。

应力矿物的形成：在构造作用下会形成应力矿物和应力矿物现象，王嘉荫的《应力矿物学概论》系统地阐述了这方面的内容。刘瑞珣写了《显微构造学》一书，随着动力变质作用和断裂变质作用研究的深入，特别是近年对韧性剪切带的研究，应力矿物学或构造矿物学和显微构造学得到很好的发展。本书作者在 20 世纪 80 年代广东莲花山断裂变质带的课题研究中也指导自己的研究生开展了相关的矿物学和显微构造学研究，下文引述本书作者的研究生李建超的研究成果^[160]：

广东莲花山断裂带分布有几条断裂动力变质带（表 4 - 1、图 4 - 3），其横向上分带明显，常呈 2 ～3 条近平行延伸的狭长带状十字石片岩间夹石榴子石片岩、云母石英片岩构成变质中心带，向两侧过渡为石榴子石片岩、石英云母片岩或直接突变为浅变质的千枚岩（如海丰黄羌——丁家田一带），显微镜下常可见到原岩特征，如石榴子石、十字石变斑晶内包体常保留砂状（基质）结构、层状构造。千枚岩、云母石英片岩是绢云母片岩带的主要岩石类型、变质浅、应力迹象明显，具构造片岩，顺片理常见一些变质分异成因的不规则石英脉体或团块，矿物组合简单，以大量出现显微鳞片状绢云母为特征，宏观上可根据矿物粒级识别原始层理，泥质高含量的原岩的千枚理多为迁就层理而成；而砂质含量较高时，则千枚理（片理）多与层理呈小角度斜交。随着变质程度的加深，相应出现黑云母、石榴子石、十字石和蓝晶石等典型矿物，变质斑晶内常残留旋转构造，石英、云母等长宽比差很大，定向明显、片理清晰。变质斑晶内残缕包体、不同矿物的分层和沉积成因的炭质、磁铁矿等暗色矿物的定向所反映的原始层理构造，表明片理与层理的置换关系主要依据片岩所处的构造部位不同而不同，两者交角从 0 °～90 °不等，说明变形与变质作用密切相关。由于变质带主要是泥砂质原岩，又形成于地热流较高的应力较强的特殊构造环境，因此，除了形成以泥质变质矿物为主的矿物共生组合外，亦不同程度地反映了变质期间的变形变质过程。

表 4 - 1 变质温度、压力、地热梯度

变质岩带	白云母 Si 离子数		矿物组合及地 质温度计确定 的温度 / °C	据白云母 Si 值 和温度推算的 压力 / MPa	地热增温数 (°C · km ⁻¹)	变质相
	样品数	平均数				
梅县 - 五华变质岩带	3	3. 327	300 ～400	260 ～400	38 ～33	绿片岩相
揭西 - 海丰变质岩带	4	3. 16	550 ～630	380 ～700	48 ～30	绿帘角闪岩相
淡水 - 深圳变质岩带	4	3. 26	500 ～560	470 ～660	35 ～28	绿帘角闪岩相

石英：见于不同类型的变质岩中，在千枚岩中以残余砂状、微粒状为主，但结晶不十分显著，长宽比一般为 1: 1 ～1. 5: 1；在绢云母石英岩中石英含量高，为残余砂状变晶，呈现球状透镜状，长宽比 1: 2；个别 3: 1，是变质分异即动力分异中常见的分异产物，在进入黑云母带以上的较深变质岩中，则多为粒状变晶，呈透镜状、压扁拉长状，定向明显，长宽比为 2: 1 ～4: 1，个别为 6: 1，表明其形态特征与变质温度、压力、侧向压应力密切相关。

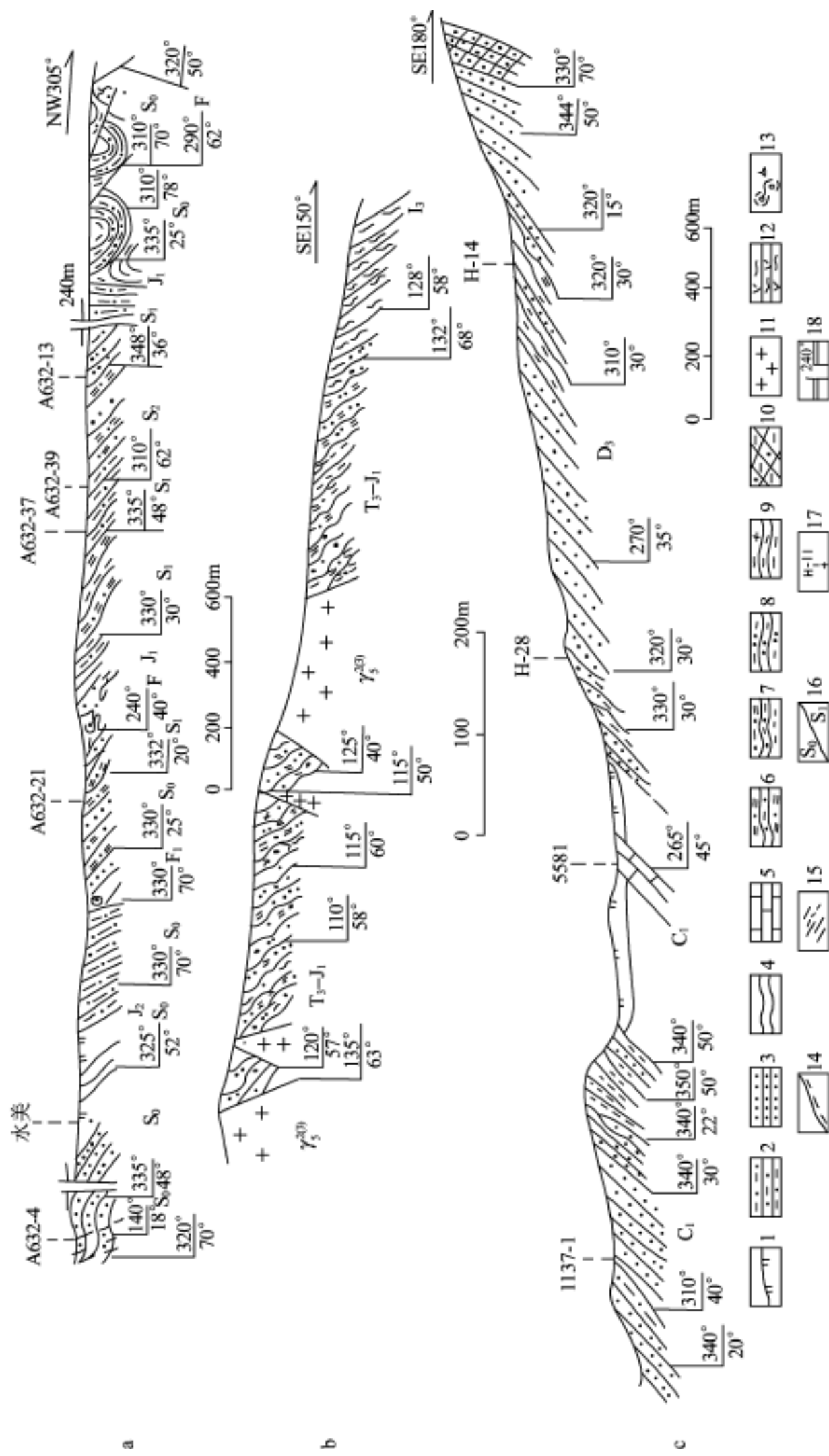


图 4-3 梅县梅南水美实测剖面 (a)、揭西五云变质岩剖面 (b)、深圳横岗变质岩剖面 (c)^[100]
 (根据广东区测队二分队实测剖面图修编)

Fig 4-3 (a) surveyed section in Same area of south Machou; (b) profile of meta morphic rocks in yuyun area of jiese county;
 (c) profile of meta morphic rocks in Herry gong area of Shen shen
 (According The profiles surveyed by regional geological surveyed team of Guang dong province)

1—浮土; 2—泥质砂岩; 3—砂岩; 4—页岩; 5—石灰岩; 6—砂质粘土岩; 7—含砂砾粘土岩; 8—长石质砂页岩; 9—长石质粘土页岩; 10—角岩;
 11—花岗岩; 12—千枚岩; 13—硅化带; 14—粘土页岩; 15—褶皱; 16—层面 (S₀) 与片理面 (S₀) 与片理面分段点; 17—剖面分段点; 18—剖面与剖面间平距

白云母 (绢云母): 属显微鳞片状绢云母, 仅有少量白云母雏晶, 定向排列形成千枚理和片理, 长宽比为 $1:1 \sim 2:1$; 在中深变质片岩系中, 则以白云母为主, 为片状变晶, 定向显著, 长宽比 $3:1 \sim 6:1$, 最大达 $3:1$ 以上, 据 X 光衍射分析结果, 白云母 (绢云母) b_0 值均在 $8.976 \sim 9.021$ 之间, 随形成压力的增大而增大, 压力类型相当于低压过渡型, 化学成分分析结果表明, 绢云母带中的 Si 含量比中深变质带中的要高, 属典型的多硅白云母, 即典型的应力矿物, 而中深变质带中云母 Al 相对较高而 Si 较低, 表明白云母 (绢云母) 的形成与应力强弱和变质温度密切相关, 与 Velde (1967) 得出的多硅白云母的 Si^{4+} 值与温度呈反比, 而与压力呈正比关系的研究结果一致。

黑云母: 黑云母带的典型变质矿物, 呈片状变晶, 长宽比一般为 $2:1 \sim 5:1$ 不等, 最大达 $8:1$ 。黑云母中 Ti 的含量随深变质带温度升高而升高。

石榴子石: 少量开始出现于云母石英片岩带中, 在石榴子石十字石片岩中大量出现, 含量可达 15% 以上, 根据变斑晶内包体的粒度、排列方式及与基质片理的关系, 有两种型的特征: 一是基本保留原岩的原始粒度和层理构造, 中心无显著变形旋转, 往边缘则较典型的旋转扭动, 与基质中同期片理基本呈连续相循; 二是包体颗粒已明显重结晶, 粒级与基质矿物粒级无大差别, 包体明显呈 S 型、呈滚雪球状重结晶, 旋转角度达 180° 以上, 与同期片理 (Si) 和谐一致, 而变斑晶边缘包体渐趋减少。以上两种现象表明石榴石变斑晶萌发于变质作用初期, 此时剪切应力作用相对较弱, 随着变质作用的加强, 剪应力作用不断加强, 温度升高, 变斑晶生长与基质结晶同时进行, 边旋转边生长, 化学分析也表明石榴子石具有化学分带趋势。

从中心向边缘, Mn 降低, Fe 增高, 表明石榴子石变斑晶是在升温过程中逐渐生长而成的。

此外, 十字石等变质矿物实验与分析数据同样表明随压力、温度的变化而变化, 随动热变质作用的强度而变化, 岩石组构也随应力作用的加强而定向组构逐步加强。

动力成岩成矿作用过程中的构造地球化学作用: 孙岩在 20 世纪 80 年代对国内十几条韧性压扭性断裂带详细进行形变研究和构造带划分的基础上, 进行系统的构造岩采样和化学成分定性定量分析, 从而获得该类断裂构造剖面构造化学成分变化规律的第一性资料, 在此基础上进一步探讨了若干构造地球化学作用, 在《断裂构造地球化学导论》^[167] 一书中他把断裂构造地球化学作用归纳划分为动力分异作用 - 化学亲合作用、前进变质作用 - 退化变质作用、还原作用 - 氧化作用、脱水作用 - 水解作用和吸附 - 渗散作用, 并认为这些作用是断裂带中化学元素分散聚集和运动迁移的主导制约因素, 亦可谓断裂构造地球化学作用的基本类型^[167]。孙岩这一开创性的工作虽然只限于韧性断裂带, 但是它的意义并不限于此, 为我们提供了在形变过程中如何发生成分变化而形成新的建造的化学机理。

动力成岩成矿作用过程中的构造附加力的构造物理化学意义: 动力成岩成矿作用是在地壳内一定深度范围内, 一定的温度、压力和化学流体参与下进行的。但现行地质作用深度测算的理论与方法是一种流体静力学的模型, 即地下某处的深度等于该处压力除以岩石的比重。都城秋穗在他的双变质带理论中曾明确提出, 高温带和高压带变质作用的深度比用正常的地温和压力梯度去计算的深度都要浅。20 世纪 90 年代, 吕古贤等^[168] 开展了对“构造附加静水压力的探索, 十几年来, 这一研究取得重大进展, 并出版了《超高压变质

的构造附加压力与形成深度》专著，以“构造附加静水压力”的理论分析和测算方法为基础，实测出大别山地区英山县北超高压带中的含柯石英榴辉岩形成深度可能仅为 32km^2 ，而不是 100km 或更深（吕古贤等，1998），大别山超高压变质作用发育在壳内 $20\sim 30\text{km}$ 深处（马昌前等，1999；汤加富，2003），建立了大别山 - 苏鲁造山带陆 - 陆碰撞环境下构造增压壳内成因的概念模式，书中还反映了实验模拟成果，数学模拟在高温高压实验室演示了构造力产生围限压力即产生构造附加静水压力的过程。

在差应力和大应变条件下，发现柯石英稳定存在的压力远小于只有静水压力的条件，在 $1.2\sim 1.25\text{GPa}$ 围压下即发生石英 - 柯石英转化（Tullis 等，1994；周永胜等，2002），通过静态与有差应力叠加的动态条件下的岩石熔融实验对比（马瑞等，2004），表明差应力每增加 5MPa 相当于通过构造附加静水压力而提高 1.67MPa 的围压，这一增压与温度升高 20°C 的熔融效果一样……研究表明，地下岩石的压力是非均一的，构造附加压力是普遍存在的，在构造附加压力等作用下，地壳内局部形成高压，甚至超高压的环境是可能的^[168]。

20 世纪 80 年代末本书作者在粤东莲花山断裂带、粤西河台金矿开展断裂变质和构造相的课题研究时也曾经指出，其韧性剪切带形成深度远小于 Sibson 所规定的 15km ，是由于当时广东莲花山断裂带和河台金矿区分别位于莲花山构造岩浆带和粤西罗定 - 广宁逆掩推覆构造带的前锋，处于构造岩浆热异常和构造超压带中的缘故。

以上几方面的研究成果说明，在形变过程中通过相变可形成新的建造，这是改造与建造可以相互转化的重要方面和重要例证。

（5）在新的建造中复合有老的建造：如同在新的构造变形中常含有老的构造成分一样，在新的建造形成过程中，老的建造成分或多或少或迟或早会被带入新生的建造之中，成为新生的建造的一个组成部分。这种老的建造被卷入到新的建造成分之中通常是通过老的建造的成分被风化剥蚀搬运沉积作用或经过重熔作用、交代作用等自然地质作用被转移到新的建造的复合建造。

复合建造的研究对反演岩石圈地壳物质组分的演化有着重要的意义。例如在复合建造中沉积物的同位素比值示踪记录往往能使我们了解陆壳的演化过程。在浙江东南部有两个燕山期的属地壳较深部岩石派生岩浆形成的花岗岩（梁弄岩体和龙皇堂岩体）， $\text{Sm} - \text{Nd}$ 同位素计算出模式年龄约为 $1200\sim 1600\text{Ma}$ 及富集因子 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}} < 0.2$ ，表明浙东南火山岩区较深部同样存在前震旦纪基底岩石或古陆壳^[147]。另外，据江博明研究，台湾大鲁阁花岗岩（ 90Ma ）锆石 $\text{U} - \text{Pb}$ 上交点年龄为 1668Ma ，推测是经过再循环的锆石，其来源可能来自中国大陆^[169]。上述两地的燕山期花岗岩中都含有古老岩石矿物成分，说明这些花岗岩是古老陆壳重熔的产物。在新的花岗岩建造中包含了古老基底的成分，或者说前者是由后者转化而来的，反映了古陆所经历的后期运动的改造作用。

在云开大山西侧广西博白黄陵中、下奥陶统下部，有一套厚达 4000 多米的花岗岩质碎屑岩，其中长石砂岩的长石含量达 $30\%\sim 50\%$ ，在郁南一带下奥陶统的层间砾岩中也大量花岗斑岩和脉石英的砾石。这说明在奥陶纪以前本区已有花岗质岩石，由于构造运的抬升剥蚀，这些花岗质物质才转入新的建造之中，它是郁南运动的物质记录^[28]。

南岭地区广泛发育燕山期花岗岩体，通常构成复式岩体。这种复合的花岗岩建造反映了多期次多阶段的构造运动和岩浆物质运动。在华夏地洼区燕山期的内生金属矿床往往具

有多源复成矿床成矿物质多次转移逐步富集的特点^[170]。这种复合的含矿建造的形成和发展也伴随地壳构造演化、构造运动而发展，正是这些建造的复合作用深刻地反映出构造运动过程中地质结构与物质组分的调整作用^[148]。在形变过程中常常要发生矿物的相变，形成新的应力矿物，通过电子探针可获得显微构造域中伴随形变发生的微区化学成分的变化（如糜棱岩显微构造域中的核幔构造由核至幔微区化学成分的变化）。新老变形时期形成的新老矿物、新老化学成分的复合也是一种建造的复合，这种微区物质成分的演化也记录了地质构造的演化。总而言之，建造的复合反映了前后构造状况的更迭和转化，反映运动或构造的形成过程和发展序列。

（6）与结构系列（序列）相匹配的建造系列共同反映区域构造格局与区域构造运动序列（我们把空间上的共生组合称为系列，把时间进程中前后出现的不同的共生组合称为序列）：在地壳与岩石圈中，同时并存有从低级到高级、由简单到复杂的建造系列与结构（变形）系列。形变的共生组合自成体系，称为构造体系。在区域构造中可以由一个或多个构造体系，组成区域或全球构造体系系列或构造格局，我们就把那些在同一时间或准同时存在的彼此在空间上不同等级但具有成生联系的构造体系群组成构造体系系列，例如喜马拉雅期的纬向构造体系、经向构造体系、NW向构造体系、NE向构造体系和旋扭构造体系组成的全球构造体系系列或由喜马拉雅期的西太平洋沟、弧、盆体系，亚洲东部伸展构造体系，郯庐剪切走滑构造系，东太平洋 - 美洲西部海岸盆山构造系，圣安德列斯剪切走滑系和太平洋洋中脊体系组成的环太平洋板块构造体系系列。

在时间进程中，构造体系在其发展过程中也组成了具有不同等级规模、具有成生联系的发展序列，称为构造体系序列，例如在中国东部中新世代随时间推移，太平洋洋中脊在不同时期扩大了，因而在太平洋板块运动方向发生改变的情况下，中国大陆受到挤压而形成华夏系、新华夏系和华夏式构造，被称为华夏方向构造序列，它是自中生代以来欧亚板块持续向南、太平洋板块持续向北扭动作用的产物。

同样，在我国西部地区，自喜马拉雅期印度板块与欧亚板块对接碰撞以来，由于中国中部与西部之间也存在右行剪切对扭的作用，因而形成了新生代NW向扭动构造序列，如此等等。它们都属于区域构造序列。

从板块构造角度考虑，无论是区域还是全球构造，都有它的板块构造格局、板块构造序列（如新老太平洋板块构造序列和特提斯 - 印度、澳大利亚板块构造序列）。

从全球规模角度考虑，地球在其发展进程中存在着有限膨胀和有限收缩的周期性（或节律性）的更替，这样，在全球的构造演化进程中就存在相对膨胀期和相对收缩期的全球构造体系或全球构造格局的更替。我们称之为全球构造体系序列。在区域构造中，诸如一个盆山系中，有它的伸展期或造盆期的构造体系序列和造山期或收缩期的构造体系序列，这些都属于区域构造体系序列。

每一场区域构造运动铸造成每一期的区域构造运动格局，顺序发展的区域构造运动就组成了区域构造运动序列，区域构造运动序列的地质记录保存在区域建造序列和相匹配的区域构造体系序列之中。因此，要建立区域构造运动序列就必须深入研究、建立区域构造序列和区域构造系列，而每一个区域构造系列和区域构造序列的研究和建立则是由区域建造系列（序列）和区域形变系列（序列）所组成的。

第三节 构造相——地质构造形成环境与动力学机制的地质表现

本书作者和董树文^[171]曾以《试论构造相、构造相系和构造相序列》一文对构造相的概念及其历史发展作了全面的讨论，在收入本书时，本书作者作了补充和增删。

一、历史的回顾

20 世纪初，桑德（Sander, 1921）曾提出构造岩相（Tectonic facies）一词，意指由构造运动所造成的岩石特征，并以糜棱岩、千枚岩为例，分别代表一种构造岩相。斯劳士（Sloss, 1949）从沉积物的岩性特征可反映沉积时的构造环境的概念出发提出了构造相（Tectofacies）的概念，这一名词以后逐渐见于地层学和沉积学的一些文献中，如“台相”“槽相”等。70 年代初期，韩森（E. Hansion）提出应变相（Strain facies）的概念，并以小型褶皱的样式作为划分应变相的主要依据。陈国达（1978）提出构造型相的概念，用以反映构造反差强弱不同的构造样式^[172]。傅昭仁^[173]提出过构造群落的概念。后几个名词所反映的概念大体是类似的。

在前苏联追随桑德，有不少学者（B. C 米列耶夫、A·N 普罗科品科、E. U. 帕塔拉哈等）从事构造相的研究，认为构造相乃是特定构造共生组合的变形程度不同的岩石的自然系列（E. W. 帕塔拉哈，1987），并根据褶皱类型和温压条件的关系划分了浅变质带、中变质带、深变质带及其相应的变质岩石学类型和褶皱类型^[174]。马托埃（M. Mattauer）^[175]所划分的深、中、浅构造位，木村敏雄等人对深部构造所做的研究工作，大体与上述前苏联学者相似，虽然马托埃等人并未使用构造相一词。

大量地质事实表明建造和改造、形成和形变并非截然分开。在形成中有形变，在改造中有建造，两者是相辅相成的。

李四光^[176]很早就强调要开展与形变同步的矿物相变的研究，总结性地提出形成与形变是辩证的统一的概念。涂光炽、张文佑、陈国达对构造地球化学作用的意义有过重要的论述。杨开庆^[177]提出动力成岩成矿作用的概念。马杏垣^[178]提出构造转化与再造、得失与增减、改组与分异的概念。上述论述反映了我国学者的基本观点。

杨开庆^[179]系统地提出了地壳物质的构造动力调整和组分调整，也就是说，地壳物质的构造动力调整作用记录在结构和组分之中，这给我们以启示，构造相应包括形成与形变两方面。与此同时，我们还注意到构造相在空间上不是孤立单一存在的，在时间上是演化发展的。本文试图提出有关构造相、构造相系和构造相序列的三位一体的系统概念，用以反映地壳或岩石圈物质成分与结构的同步发展与演化。近年，许靖华^[179]提出大地构造相，但没有给出确切的定义和明确的概念。李继亮^[180]发展了这一概念，将碰撞造山带划分六个大地构造相类和 15 个相，为了直观地表达这些大地构造相的岩石构造特点，把若干实例（如我国东南沿海造山带）综合成大地构造相模式，在这个相模式中他分出仰冲基底相类、混杂相类、前陆褶皱带相和活化盖层相，而每一个大地构造相的相标志包含岩石组合和变形两大方面的特点。

对上述构造相的研究历史和概念研究方法的变迁可做出如下的评述：①不同学者对构

造相的概念的表述不同，既反映不同学者对构造相这一客观事物的理解和认识不同，也反映了学术界对构造相这一客观事物研究程度和综合程度的由浅入深、由片面到比较全面的认识过程。如从构造岩的特征认识构造相，从沉积建造的岩性特征认识大地构造环境，从形变相、形变相的组合和系列认识构造相，乃至从岩石共生组合至形变共生组合及其结合来认识构造环境和大地构造，可以说从研究构造岩相进而研究构造相乃至大地构造相，反映了这个研究领域由片面到全面、由低级到高级、由单一到综合的进步过程。②本文作者与董树文^[17]在90年代与李继亮大体同时，在总结前人研究工作的基础上系统地提出了自己的关于构造相、构造相系、构造相序列三位一体的系统概念。与李继亮的大地构造相对比，我们的构造相的概念既包括一般的构造相，也包括大地构造相，我们强调下述几点：

(1) 地质构造是地壳运动、构造应力的产物，它的力学性质应当成为构造相划分的基础之一，构造相既应该着重考虑形变方面的相标志，又不能局限于形态相。众所周知，由于受变形岩石的岩性不同，而有不同的形变特征，单纯的形变特征、形变相并不能准确地反映地应力的性质和构造环境；物质组成方面的特征应当成为划分构造相的重要相标志，但是物质组成方面不只是岩石的共生组合或建造特征，还应该包括其地球化学特征，而且应该透过物质组成方面的相标志注意其在构造作用过程中的动态特征，即组分在构造作用过程中的迁移活动规律。在我们所划分的挤压相、伸展相和剪切相中，都把组分在其中的迁移活动规律作为相标志和成分方面的主因。这使我们所划分的构造相不仅在动力成岩方面有重要意义，而且在动力成矿方面也有重要意义。前文已经提到孙岩对构造岩带构造地球化学的研究。这些构造岩带的划分不仅有其构造形变的特征，而且有其相变和构造地球化学组分的特征，以及组分迁移活动规律的标志。像这样详细而扎实的工作所提供的相标志完全能够满足构造相的要求，虽然孙岩在他们的论述中并没有专门讨论构造相的划分和构造相标志问题。

(2) 构造相和任何其他自然事物一样，它们在空间展布和时间进程中并不是单一的孤立的，而是成群、共生组合地有序地出现的。为了表示构造相相应地在时空上的这种特征，我们提出了构造相系（在同一时间或准同时有成生联系的构造相在不同空间上的组合）和构造相序列（在同一时间发展进程中不同构造相的有序出现）的概念。

(3) 构造相、构造相系列和构造相序列既适用于显微构造相和小型构造相的时空研究，也适用于区域构造相和大地构造相的时空研究。考虑到可以从不同角度来研究构造相（例如从力学性质、形成深度、形成阶段、强度级等方面来研究），提出了不同的构造相的分类原则。

(4) 我们所提出的构造相、构造相系和构造相序列三位一体的研究是高度综合的。就以往的研究程度，许多地区尚不具备开展此项研究的条件，它要求有系统的多方面和综合程度很高的研究工作，它代表未来构造相的研究方向。这一研究方向如能实现，必将大大地提高构造相的研究工作在理论和实践方面的作用。

当然，应该承认的是，我们的工作也没有达到我们对构造相研究所要求的那种程度。下文中我们只从理性概念上进行划分和讨论，还不是在论述每一具体概念时都能提出合乎自己要求的研究成果和例证来。

二、构造相

构造相可定义为在构造动力作用下岩石在形成过程中或成岩后结构调整和组分调整的各种形迹和踪迹的总和，它是构造环境和构造作用的物质体现。

构造相既然反映的是岩石在形成过程中或形成后所处的构造环境和构造作用，其分类的基础应该是其所处的形成阶段、形成环境和作用力的性质，而反映构造调整作用的形迹、踪迹特征就成为主要的相标志。构造相（以下构造相简称相）按下列三个方面进行分类。

（一）力学分类

1. 挤压相

（1）压扁亚相：①形迹特征：在三维应变中形成单轴扁球（富林系数 $K=0$ ）或压扁形椭球。X、Y轴均伸长或缩短，Z轴则从不变化（ $K=0$ 到 $1 > K > 0$ ），X轴方向为最大伸长轴，XY面为压扁面理，无旋转轴和旋转现象。②组分迁移踪迹特征：其组分调整主要取决于压扁率，压扁率（X/Z值）越大，组分调整越明显，不仅表现为矿物的旋转、定向、拉长，而且反映出沿X方向新生矿物的生长、形成矿物生长线理和沿Z方向发生的压溶作用，形成压力影。在中深构造位的条件下矿物流变，特别是石英矿物表现为强烈的组分流，致使不同结构的硅酸盐矿物分化为成分各异的岩性层。

（2）褶皱亚相：①有上自由面褶皱次亚相：属于浅位的壳层变形，以弯曲机制为主，其基本特点是层面在弯曲过程中相互平行滑动和调整，其相标志如下：第一变形特征：在中和面上为扩张区，轴部发育纵张及虚脱，两翼剪切；中和面以下为收缩区（含剖面剪切），中和区则为相对无应变区。第二组分迁移踪迹特征：物质以顺层迁移、横向流动为主。对应三个应变区其组成调整不尽相同：上部引张区，物质在层间滑动面和翼部剪切面流出，向枢纽带的纵张裂隙和虚脱空间集中，形成明显的组分流趋向，体现出物质的非均一化调整作用；在压缩区岩石和矿物处在高度的压缩状态，物质强烈地向轴部流动、压密，不同的组分被迫混杂和混合，表现为物质的均一化调整作用；而中和面以下则无明显的组分调整，构成典型的物理、化学屏蔽层，其结构和组分可作为分析上、下区的参考系。②无自由面褶皱次亚相：一般形成于垂向负载相当大的深构造位。第一相标志的形迹特征：以剪滑褶皱、流褶皱为主，常形成相似褶皱，轴面劈理发育，劈理类型依其形成深度不同可有滑劈理和流劈理。第二组分迁移踪迹特征：组分迁移主要为垂向流动（平行褶皱轴方向），层状硅酸盐矿物和架状硅酸盐矿物分离形成面理，含水矿物亦会集中于轴面劈理上。在高温高压、具有长期负载和水参与条件下，岛状结构的石英表现出极高的流变性，呈条带状围绕长石残斑组成“眼球”或“透镜体”构造。

（3）压性断裂亚相：也可按其深浅构造位分为两个次亚相，但深构造位次亚相的变形习性和组分迁移特征与韧性剪切相近似（是剖面上的韧性剪切），有关相特征将在韧性剪切相中叙述。①形迹特征：由于断裂带中心向两侧应力梯度减少，各种伴生构造（次级褶皱和断裂）自断裂带中心向两侧变化，并平行断裂走向作带状分布。孙岩等^[181]将压性断裂横向分带划分为断层磨砾岩带（断层泥砾岩带）→糜棱岩带-挤压片理带→粒化岩带-构造透镜体带→碎裂岩带-密集裂隙带。总地说来，压性断裂带的形迹特征具有分带性、定向性强，自断裂中心向两侧形变强度逐步减弱的特征。②组分迁移踪迹特征：造成

组分迁移的作用主要是压溶和动力分异，其组分流垂直于挤压面方向而沿着伸展方向流动。压性断裂带内定向的应力梯度、定向的物理化学环境必然导致和控制组分迁移、交换的方向和定向性。在无变质或浅变质岩中，压溶作用主要表现为出现挤压面理和压溶缝合线， SiO_2 、 CaCO_3 等被溶解带出，Fe、Mg、Al质则残留成残积层。压扭性断裂带由带内往带外分异的结果是Si、Fe、Mg、Mn、Al、Ca、Na、K，即离子半径小、比重大的元素惰性稳定，羁留原地；离子半径小、比重小的元素活泼轻浮，散离逸去^[182]。

2. 剪切相

可分为脆性剪切、脆韧性剪切和韧性剪切^[183]，故亦可相应分为三个亚相，限于篇幅，下文重点阐述韧性剪切亚相。韧性剪切亚相的相标志可归结如下。

(1) 形迹特征：为一狭长的高应变带，变形具连续递变的特点，无明显的破裂面，两盘位移明显，发育拉伸线理（a型线理）、糜棱面理、叶理或滑劈理、流劈理、片理和鞘褶皱（a型褶皱），矿物以粒内应变（位错、变形带、亚颗粒和动态重结晶）为主，颗粒拉长呈带状或线状，动态重结晶的新晶具明显的优选方位，并由这些亚晶和矿物组成了糜棱岩面理（Se），它几乎平行于剪切带边界的定向，而由滑劈理、片理等的优选方位构成剪切带内面理（Se），这种面理受剪切带内连续应变的主拉伸轴方位变化所控制，与剪切带边界交角自边界（约45°）向中心逐渐变小而趋于平行。上述特征表明韧性剪切带内的结构调整完全依靠岩石剪切面上的塑性变形和流动而实现，并随应力梯度而变化。马托埃（Mttauer, 1980）将韧性剪切带分为平移韧性剪切带和推覆韧性剪切带，后者属于压性断裂带，是压性断裂深位相，相当于Sibson双层断层模式的下部，即犁式断裂的底部^[183]，其形迹特征除具有前述剪切变形之共性外，最突出的特征是变形带的原始产状平缓、具有宽厚的（有时可达千米乃至几公里）高应变带和构造岩带，广东莲花山韧性剪切带即具上述特点^[160]（图4-4）。

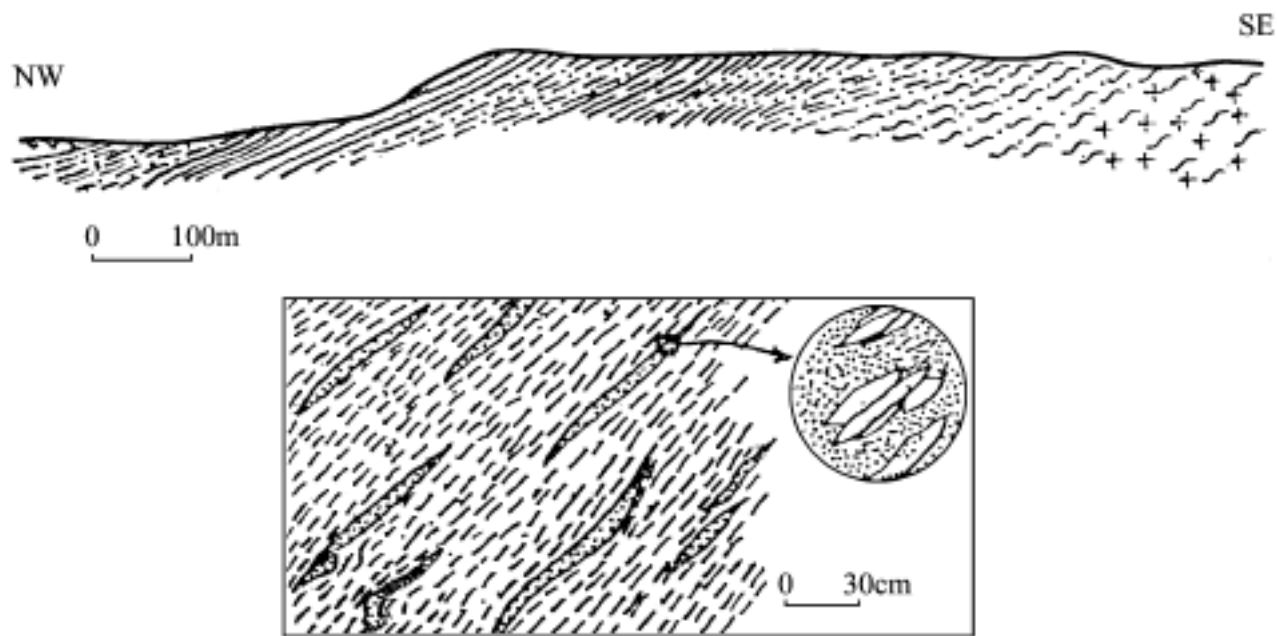


图 4 - 4 广东莲花山韧性剪切带剖面^[160]

Fig. 4 - 4 Section of the Lianhuashan ductile shear zone, Guangdong South China

剖面反映了剪切带糜棱岩面理产状，下图为剖面图中糜棱岩局部放大，无根硅包中亚颗粒和动态重结晶现象

(2) 组分迁移踪迹特征：韧性剪切带内的组分调整和韧性变形是同步的。对于硅酸盐岩来说总是表现为长石含量不断减少，石英含量不断增加，富含水和挥发分的矿物

(如绢云母、多硅白云母、金云母、绿泥石等) 增加; 在剪切带的中心地带伴随超糜棱岩常有许多无根硅包。在矿物的微区化学变化中也有明显的反映, 在莲花山韧性剪切带中对长石的核幔结构, 自里向外所做的电子探针和 X 射线分析揭示, 随形变加强, 斜长石中的 Ca、钾长石中的 K 含量明显减少, 相应地 Na 含量明显增多, 在同一个长石斑晶中其边缘的 K 和 Ca 含量较核心减少, 而 Na 含量则大大增加, 同时钾长石有序度减低^[160]。

董树文^[184]研究皖南花岗闪长岩内的韧性剪切带, 其组分变化的特征如图 4 - 5 所示。丘元禧等^[160]在广东莲花山二长花岗岩韧性剪切带内对硅包与糜棱岩的分析表明平均成分大体相当于糜棱岩的成分, 显然其中硅包 (SiO₂) 是从糜棱岩中动力分异出来的。

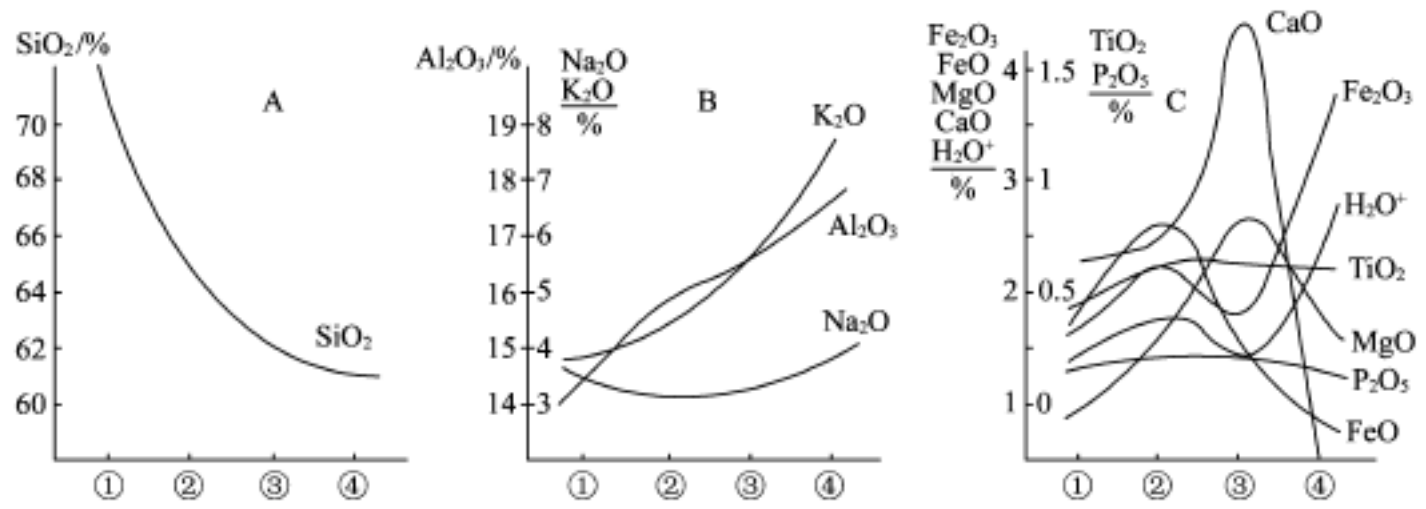


图 4 - 5 皖南青阳—柯村韧性剪切带剖面岩石化学成分变化图^[184]

Fig. 4 - 5 Variation in petrochemical composition at the section of the Qingyang-Kecun ductile shear zone, southern Anhui, east China

① 未变形花岗闪长岩; ② 初糜棱岩化花岗闪长岩; ③ 糜棱岩化花岗闪长岩; ④ 粗糜棱岩 (花岗闪长岩)

3. 扩张相

由引张应力场形成的构造相称为扩张相。其构造形变在浅部由小自张性小裂隙大至裂谷盆地、张性正断层系组成, 在深部则由近水平的拉张剪切所形成的韧性剪切带所组成。其组分调整则表现为同构造的各种充填 (沉积的、岩浆的或变质分异的)。伸展相按其所形成的构造位可进一步划分为浅位亚相和深位亚相。今以中浅位亚相说明其相标志。

(1) 形迹特征: 在张性正断层带中自断裂带中心向两侧也存在构造形迹的横向分带。孙岩等^[181]就其形变和构造岩带划分出两个带: 角砾岩带 (断层泥砾岩带) 和张性碎裂岩带 - 张裂隙带。前者以大小混杂、无定向性、无磨圆性为特点, 后者则常表现为时宽时窄、忽隐忽现、不规则、不稳定的特点。

(2) 组分迁移踪迹特征: 在伸展的浅位环境里一般不产生组分变质。因此一般认为在浅构造位的脆性张裂带中与形变同步的组分调整是比较微弱的。但是, 如果考虑到张裂所造成的扩容空间给邻区 (旁侧或深部) 的挤压区剪切物质的挤出或剪切流动带使物质带入以空间, 那么这种同构造的组分调整, 无论在微观还是在宏观世界里都是普遍存在的。

Ramsay^[185]在研究递进变形时曾注意到同构造脉体中许多纤维状同构造矿物垂直张性裂隙生长, 测试不仅表明它们随张性脉的张开和扭动而生长 (用以测量其增变量), 而且表明其成分与围岩有关, 与围岩受到压溶而侧分泌有关。在宏观世界里, 主要表现在裂谷

盆地的组分调整上。裂谷盆地的沉积建造具有由粗到细再由细到粗的二元结构，或由陆相、海相再到陆相，这种结构反映出裂谷形成初期的上拱、沉陷和最后的封闭。裂谷盆地的另一种典型建造是碱性玄武岩系列和拉斑玄武岩系列，它们是上地幔物质部分熔融上溢的产物。

（二）按深度环境分类

随着深度的变化，温度、压力条件发生变化。因而在不同的深度上，岩石变形习性和组分调整是不同的，表现为不同的构造相。

（1）浅位相：以脆性变形和具有上自由面褶皱为主，几乎无变质作用或仅有碎裂变质。断裂为剪切破裂机制，断层岩为角砾岩和断层泥。褶皱为弯曲机制，层面为主滑动面，主要为同心圆状等厚褶皱，构造透入性不强，存在整体不均性。在显微变形中，在一些脆性的压性、压剪或剪性断裂带的构造岩石中虽也可以见到波状消光、位错、变形褶皱等现象，但普遍的动态重结晶则属少见。在某些特殊部位也可局部出现某些中深部位的构造相的形变特征，如花岗岩底辟构造侵位机制所产生的周边接触带韧性变形，巨型推覆片体滑脱面附近的面状构造，某些大型压、剪性断裂带中的浅位糜棱岩、片理化岩等。孙岩认为它们是脆性断裂带中局部的韧性相变域，他称为 B 型糜棱岩，意指脆性带中的糜棱岩，考虑到凡是糜棱岩都应是韧性变形，本书作者称浅位糜棱岩。

在浅位相中物质的组分调整相对于中深构造位是较弱的，但在某些伸展相中可以有由邻区挤压或剪切流动带出的物质在扩容带中同构造沉积，在岩浆就位和矿床沉淀于浅位时，在构造应力作用下往往表现出较明显的组分调整（详见后述），对成岩成矿都具有一定的意义。

（2）中位相：发生脆—韧性变形，无自由面褶皱和浅变质作用（以绿片岩相为主），以劈理（板劈理、滑劈理、流辟理）出现为特征。断层岩为糜棱岩系列或构造片岩系列。褶皱属压扁的弯滑（剪切）机制的被动褶皱。轴面劈理成为最醒目的面状构造。构造透入和构造置换性较强，且均一性增强。在显微变形构造方面：大量普遍出现位错、亚颗粒、动态重结晶、机械双晶、扭折、变形纹、压力影等现象。由于处在相对较高的温度和压力下，由于压力、温度和溶液的蠕散作用，其组分调整相对于浅位相要强得多^[160]，某些在浅位相中表现为相对稳定的组分，如 Si，在中深位相中转化为活动组分，其行为和 K、Na 相近^[185]。Sibson^[183]认为糜棱岩属韧性变形域，其形成深度在 15km 之下，但本书作者认为广东莲花山断裂带中韧性剪切带的形成深度不会超过 6km，其确定依据是发育于上侏罗统火山岩中的韧性剪切带，该处上侏罗统陆相火山岩的最大厚度为 6000m，叠加其上的韧性剪切带最大深度只能小于 6000m 而不能大于 6000m。之所以能在 Sibson 所说的 15km 以上的浅构造位形成韧性变形显然与该构造岩浆带处于高温热异常带有关。

（3）深位相：为下地壳至上地幔上部的流动变形，高级变质作用（角闪岩相至榴辉岩相），以结晶片理、流劈理或叶理的普遍存在为特征，断层和褶皱均属流动机制所产生。其构造样式常以各种肠状褶皱、不规则的形态复杂的流褶皱和混合花岗岩穹隆等为主。显微构造出现各种高温高压下形成的位错类型和滑移系。组分调整非常强烈，构造熔融作用所产生的活动组分导致混合岩、花岗岩和再生花岗岩的形成，不仅构成了深位相的特殊组合，也明显地影响中浅位的构造相。

(三) 按形成阶段分类

构造相可以发生在成岩过程中，也可以发生在成岩以后，它们都是在构造应力作用下形成的。前者称为建造型构造相，后者称为改造型构造相。虽然从形变相和同步的物质成分的变化特征这一含义出发，以往文献中所指的构造相主要是指后者，但是任何岩石的形成都是在一定的构造环境下发生的，都可以说是构造动力作用下地壳物质组分调整的一种表现，而且随着构造地质学的深入研究，后来已发现越来越多的成岩阶段中的同生变形，它们反映出成岩过程中构造动力的作用和成岩阶段的构造环境。虽然，如同在某些改造型构造相中组分的调整也并不明显一样，某些建造型构造相中结构的调整也并不明显，但这并不影响它作为一种构造相的存在，所不同的只是其形成的构造环境不同而已。

因此，不仅那些建造或构造 - 岩石组合的研究内容应该包括在建造型构造相的研究内容之中，而且应该包括同生变形的研究内容。

属于建造型的构造相可以举出很多，如山前磨拉石构造相和同构造花岗岩构造相，以及都城秋穗所总结的高压和低压双变质带变质相系所代表的俯冲构造相和仰冲构造相，等等。

最后介绍构造相的强度级：鉴于构造应力作用无论在平面上还是垂向上都存在递进变化的特点，以及构造作用在各处强度的不均一性和应力的传播性，在同一构造相中还可以进一步分出不同的强度级。应当指出，这种强度级的现象不仅见于改造型构造相，而且见于建造型的构造相，不仅表现为形变强度方面，还表现在组分调整的程度方面。

三、构造相系

为在同一次构造事件中统一构造体系的应力场内各相之间在平面或垂向上的空间系列。因此，构造相系不仅反映结构调整的相互关系，也必须反映组分调整的空间演变。

根据上述定义和概念，可建立各种构造相系类型。如沟 - 弧 - 盆构造相系、裂谷构造相系、推覆体构造相系、巨型走滑断裂带构造相系等。对于一个巨型断裂带，也可建立垂向的由浅位相、中位相、深位相组成的构造相系，等等。

在滨西太平洋和中国东部海域，郭令智、施央申对沟、弧、盆构造体系，徐嘉炜对郯庐走滑断裂系都作了详细的研究，是建立这两类构造相系的理想地区。下文仅就作者的研究成果对推覆体构造相系和裂谷构造相系阐述之。

1. 推覆体构造相系

通过董树文、徐树桐等近年对大别推覆体及其相邻地区的构造研究^[184]，可建立下列构造相带，由它们组成了推覆体构造相系。

(1) 前陆冲断 - 褶皱带和磨拉石盆地：大型推覆舌状体，其推铲作用往往使基底前沿盖层缩短、断拗，形成一系列相互平行的挤压构造相系和前陆盆地，为推覆体前缘强烈剥蚀的堆积场所（磨拉石建造）。

(2) 根部剪切带和变质带：巨型推覆体的根带往往是地壳强烈缩短带或剪切带。根带主要表现为韧性剪切相，其中 XY 面较陡或近于直立，根部带变质（达角闪岩相），相当于中深位构造相。

(3) 推覆体内应变：表现为叠加变形，先存的褶皱、面理和断面在推覆过程中被再变形，尤其在推覆体至浅部时，发育一系列叠瓦状冲断层，使原先的变质带在叠加部位出

现退化变质（角闪岩相退化为绿片岩相）。

（4）后缘拉张盆地火山岩建造：大别地块后缘的北淮阳盆地和合肥盆地是推覆体后缘裂陷槽，在这个裂陷槽中沉积了晚侏罗世—早白垩世及第三纪火山岩（双峰式火山岩）。

综上所述，大别推覆体构造相包括了挤压剪切和扩张构造相的组合，也包括了不同构造位的组合：既有改造型构造相，也有建造型构造相，综合为一个构造相的空间组合系列，反映出推覆构造事件所造成的结构调整、组分调整及其空间演变。

2. 裂谷构造相系

丘元禧等^[186, 187]近年对我国东南陆缘带及其邻近海域的新生代裂谷系进行了研究，建立了相应的裂谷构造相系。自陆缘向海域划分出如下构造相：

（1）具有大陆裂谷萌芽性质的断陷相：以广东三水盆地、河源盆地、福建明溪、浙江江山断陷为代表。以三水盆地为例，其地壳类型属陆壳，深部存在上地幔隆起，先成断裂为压性、压剪性，裂谷期转化为张性，沉积以古近系陆相为主，有暂短的海相沉积，具大陆裂谷式的二元沉积结构，出现碱性玄武岩系列、双峰式火山岩或碱性岩建造和幔源包体。在平面上呈孤立的串珠状分布，说明尚未全线拉开成为条带状裂谷。

（2）陆内裂谷相：以雷琼断陷、珠江口外坳陷和闽、浙滨海陆架断陷为代表。以雷琼断陷为例，地壳类型仍为陆壳，深部有上地幔隆起，断裂拉张和上地幔被拉开成条带状裂谷，沉积了古近系、新近系和第四系，沉积相依次为陆相、海陆交互相以至陆相组成，具二元结构，玄武岩流喷溢达 59 次，出现碱性系列和拉斑系列，但仍以碱性系列为主，具负重力异常和高热流值。

（3）陆坡裂谷：以冲绳断槽、已关闭的台西断槽和西沙断槽为代表，其空间位置位于大陆坡与洋壳过渡地带，其地壳属过渡型，常缺失上地壳花岗岩质层或上地壳很薄，深部有上地幔隆起，地壳厚度拉薄，虽有碱性玄武岩系列，但以拉斑系列为主，沉积物以深海沉积相为主。

（4）大洋裂谷相：以南海中央海盆为代表，水深可达 4000m 以上，地壳为洋壳，地壳拉薄至 6km，玄武岩喷溢纯为拉斑系列，沉积物以深海沉积为主。盆地中常具高热流值（363HFU），具高值重力异常。

上述裂谷相系在空间上反映自陆缘向海域伸展，其裂陷规模不断加大加深。

四、构造相序列

（一）构造相序列的定义和概念

不同时期（或不同构造事件）的构造相、构造相系的叠加、干扰及联系，称为构造相序列。构造相序列主要反映构造相的时间演化。

构造相序列的建立是一种难度更大的工作，不仅要建立在构造相和构造相系鉴别的基础上，而且首先要把复合叠加在一起的分属于不同时期、不同构造域相系的形迹和组分进行正确的筛分和复原。

（二）构造相序列的类型和等级

不同的构造类型或构造事件可以有不同的构造相的发展序列，例如不同类型的造山带

有其不同的构造相的发展序列，阿尔卑斯型造山带和安第斯造山带的构造演化模式是不尽相同的，因而其形变历史和同步的物质演化历史，即构造相序列也不尽相同。不同的构造事件其构造相序列也不相同，如碰撞事件的构造相序列和裂解事件的构造相序列不同等。

构造相序列既然是反映构造相在时间上的演化，而时间是有尺度的，因而构造相序列也有一个级别问题，可小自递进变形的不同增量阶段，可大至全球巨旋回。不同级别的构造相序列的综合，描绘出不同级别的构造运动和物质演化的历史画卷。

(三) 构造相序列实例分析

据董树文^[29]的研究结果，长江中下游盖层构造相序列如下。

1. 中生代碰撞事件构造相序列

长江中下游前陆带形成由华北和扬子地台中生代碰撞事件构造相系组成。

(1) 印支期—燕山早期 ($T_3 - J_{1-2}$) 前陆褶皱相系：盖层地层发生强烈的褶皱缩短，缩短达 35%，包括各种复杂的褶皱构造相。

(2) 燕山中期 ($J_3 - K_1$) 前陆冲断相系：冲断层和小规模的推覆体成群成束状密集产出。缩短量约 10%，伴随冲断和基底裂隙活动，岩浆作用、火山作用和成矿作用发育。

(3) 组分调整主要表现为在华北地台和扬子地台碰撞过程中，两大地块基底逐渐发生重熔，形成燕山期广泛的岩浆作用，华北基底形成闪长岩为主的成铁岩浆系列；扬子基底形成以花岗闪长岩为主的成铜岩浆系列。两种重熔岩浆产物构成了长江中下游混合物质场。

2. 新生代裂解事件裂谷相序列

晚白垩世末，该区地幔上隆，地壳减薄拉裂，形成盆岭构造，陆间红层盆地相间产出并含有陆相盐建造，碱性玄武岩喷溢，构成了中国东部裂解事件构造相序列的一部分。

五、研究意义

(1) 构造相、构造相系、构造相序列三位一体概念的提出和对其定义概念较全面的讨论与厘定，目的在于为构造运动和地壳岩石圈物质演化的研究提供更大的信息量。

使构造地质学、矿物岩石学、构造地球化学等学科间的联系和渗透更加紧密，使形成与形变、建造与改造辩证统一，岩石圈地壳在构造动力作用下物质调整作用的理论得到更具体的体现。

(2) 成矿作用的成矿规律是岩石圈地壳物质调整作用的特殊表现形式，成矿物质常赋存于特定的构造相中，成矿物质的演化，特别是那些多期变质再造矿床和一定的构造相序列的发展有关。不言而喻，构造相、构造相系和构造相序列三位一体的研究将有利于成矿规律和矿产预测研究。

(3) 单纯的只反映形变的构造图已不能满足找矿工作和研究物质演变需要，能够反映形变及其同步物质组分变化的构造相图的编制已提到议事日程上来^[148]。不只反映二维空间，而且反映三维空间乃至加上时间轴的四维性的有关构造相、构造相系和构造相序列图件的编制必将使构造图件的内容得到补充和发展。

结束语——前 瞻

第一节 当代地质学的主要进展和前沿研究

进入 21 世纪,回顾过去,可以清楚地看到 20 世纪下半叶,特别是最后 20 年,地质学取得了很大的成就和长足的进步,以致我们一下子很难准确地把握它的全貌,肖庆辉等^[188]对此有一个概述,但已是距今十余年前的事,其中所列的重大前沿领域和研究课题许多已取得重大成就。总地说来,本书作者认为地质学在 20 世纪所取得的重大成就或进步包括以下几个方面。

- (1) 与天体演化学密切联系的行星地球起源理论(星子吸积说)。
- (2) 地质历史和若干重大事件的探讨与厘定,包括联合古陆的拼合与裂解、古地磁极倒转事件、地质历史上生物演化过程中爆发及灾变事件、古气候突变等。
- (3) 板块构造说的深化及后板块构造说(板片构造说、地幔柱构造学等)。
- (4) 固体地球各圈层(内核、外核、软流圈、岩石圈)、自转速率差异的发现、地核动力学、核幔动力学及地幔动力学的形成与发展。
- (5) 全球变化研究和地球复杂系统科学的建立。
- (6) 环境地质学、灾害地质学及其服务于人类的可持续发展研究。
- (7) 各种测试技术(测年、空间、定位、大地测量、物质成分研究、深部地球物理探测、高温高压实验等)的发明。

本节仅就与构造地质学、大地构造学关系比较密切的学科领域和前缘课题作一概述。

一、地层古生物学及年代学

随着地层学的发展,其研究内容扩大了,一方面研究地层体的各种性质及分类对比,如岩石地层学、生物地层学、年代地层学、磁性地层学、旋回地层学等;另一方面是综合地层体的各类客观特征,着重解释地质演变和生物历史的生态地层学、事件地层学、层序地层学等。这两方面的内容使地层学成为信息量极其丰富的综合地层学。

古生物地层学的进一步发展使相对地层年代学得到进一步的完善,特别是层序地层学的提出,把层序旋回与全球海平面变化联系起来,为全球范围的地层划分对比提供了一个可供探索的理论框架。区域性乃至全球性的地层划分对比工作的改善与进步无疑为构造地质学与大地构造学的研究奠定了良好的基础;而同位素年代学的长足进步使各年龄段(特别是前寒武纪的古老地质年龄和第四纪新地质年龄)都有了确定的年龄,而且不止一种方法可供对比和选择。毫无疑问,年代学的进步使编制区域乃至全球构造年表成为可能,并开始有了良好的基础。

随着矿物封闭年龄确定方法的发明,测年理论的进一步完善,热构造年代学得以进一步完善,构造的隆升和冷却历史得到进一步阐明。

应该特别提到微体古生物学的进展对构造学的意义。近 20 多年来, 以放射虫化石为主体的微古生物学的形成与发展对板块构造学的地体研究的意义非常突出。它们常是一些构造复杂、唯一可借助于确定地层年代和进行区域地质对比的古生物依据。近数十年来放射虫研究在国际上的蓬勃发展, 使这类化石不仅成为可靠的鉴别地层年代的手段, 而且在恢复古生物地理区系和古生态、古海洋环境中发挥独特的作用。随着板块构造说的问世, 古生物地理学把古生物分布应用于板块构造的研究, 其代表作如 Robert^[189] 主编的 palaeontology and plate tectonics, 对古生物地理分布与板块构造的关系, 从寒武纪以来的各个地质时代, 作了概略的论述以供进行古大陆与古海洋的再造。

还应该提到新兴的构造地层学。在前寒武纪地层发育区、地体拼贴区和造山带复杂构造区, 地质构造复杂, 一些岩性层序实际上是假地层层序。在这些地区要建立地层层序, 首先要研究构造, 从而形成了构造地层学^[190]。

二、矿物学、岩石学和地球化学

20 世纪 70 年代以来, 成因矿物学、矿物物理学和矿物材料科学得到进一步的发展。随着地质学向地球深部进军, 高压矿物学也就应运而生。高压矿物学主要研究高压下矿物的形成、相变、物性和熔融等方面的问题, 对矿物在高压下进行热导率和电导率的测定, 研究矿物在高温高压下弹性、破裂、流变、蠕变等方面的变化。对陨石冲击变质形成的矿物也进行了研究。

板块构造学理论问世以来, 岩石构造组合研究成为区域岩石学研究的核心, 而火成岩石的构造组合是了解地球深部过程与板块构造的纽带, 亦是追索内生成矿作用与深部过程的关键。地球的圈层结构是全球动力学的物质记录, 又是地球内部动力学的边界条件, 岩石学的研究已是地球动力学不可缺少的篇章, 因而花岗岩岩石学、变质岩石学、火山岩石学已成为地球动力学研究的对象。随着地球物理学与岩石学研究相结合的进展, 传统的双层陆壳的模型 (上部花岗岩质层, 下部玄武岩质层) 已被三层陆壳模型所代替, 目前已广泛采用 Fountain 等^[191] 的模型: 上地壳为绿片岩相岩石, 中地壳为角闪岩相岩石, 下地壳为麻粒岩相岩石, 陆壳平均组成相当于安山岩或英云闪长岩 (Tonalite); 上地幔上部尖晶石橄榄岩相向石榴子石橄榄岩相转变的深度随橄榄岩中 Cr_2O_3 的含量的增高而加深。

20 世纪 80 年代, England 等^[192] 提出压力 - 温度 - 时间轨迹 (pressure temperature-time path) 的研究方法, 是变质岩石学的一个新的生长点。压力 - 温度 - 时间轨迹是依据变质反应的化学动力学过程留下的记录 (一般是变斑晶环带构造和不同世代的包体) 复原的, 因此与岩石的成分和结构在变质作用中的演化密切相关。从变斑晶的边缘到核部, 组分和光学性质有规律地变化就形成环带构造。它记录下某一时间段一定深度的温度 - 压力变化。如石榴子石、角闪石等变斑晶矿物是很好的压力 - 温度演化探测器, 对阐明岩石圈板块运动及其所产生的地质作用有重要意义。

20 世纪 80 年代以来, 在板块构造理论的影响和油气勘探工作的推动下, 沉积学也取得了巨大的进展。随着全球沉积地质研究计划的实施, 沉积学跨入了全球时代, 沉积学的重点转向盆地分析、层序地层学、全球环境变化的沉积记录分析等领域。其中特别是对全球沉积旋回和韵律的研究, 注重全球性沉积旋回成因规律的研究, 诸如海平面升降旋回、米兰诺维奇旋回、全球沉积物通量和全球地球化学循环, 以及旋回、韵律对岩石圈、大气

圈、水圈、生物圈的相互作用和对宇宙事件的响应等已成为沉积学中的前沿课题^[193]。

矿物学、岩石学、地球化学已经成为一个综合性很强的地球物质研究学科系列，矿物学、岩石学与地球化学的密切结合，运用地球化学同位素示踪技术研究矿物学和岩石学是当代矿物学、岩石学研究工作的特点。现在已经能够利用地壳地球化学填图把地幔直接生成的原始地壳添加区与由先存地壳经过改造的添加区区别开来，以探索地壳的生长与演化。因此同位素地质学对上地幔（成分）的不均一性、岩浆源区的研究，同位素示踪板块俯冲，沉积岩主要同位素模式年龄及陆壳增生、花岗岩 Nd 同位素模式年龄，壳幔作用和再循环研究等已成为当代物质成分和岩石圈演化研究的前缘课题。

三、构造地质学及大地构造学

20 世纪 70 年代以来，构造地质学取得了一系列成就。Ramsay 等把定量研究引进构造地质学，在构造地质学诸多领域诸如递进变形、有限应变测量等方面取得了突破性进展，使构造地质学进入现代地质学行列。美国阿巴拉契亚地区，由于实施大陆测深部面（Co-corp），发现了远程推覆体，在世界范围内掀起了新一轮的推覆构造与滑脱构造研究热潮。由于透射电镜和电子探针等一系列新技术的应用，显微构造学和构造矿物学（应力矿物学）得以形成与发展。配合岩石圈深层次韧性剪切变形的研究，流变、蠕变、松弛等岩石力学性质的进一步研究，与深部地幔流的研究的综合得以进一步探讨板块构造深部过程和动力学机制。

在大地构造学领域里，层块构造作为岩石圈构造的一种普通形式被广泛认同，配合着对深部岩浆活动的研究，迈耶霍夫等^[194]提出涌流构造作为一个新全球构造和地球动力学模型，他们认为大多数地表构造包括板块构造不能解释的一些构造现象可用软流圈的涌动来解释。软流圈涌动的驱动机制是地球收缩引起的岩石圈塌陷，当冷却凝固了的岩石圈块段塌陷到软流圈中时，部分岩浆按重力法则上涌，一直达到岩浆密度与周围岩石密度基本平衡的位置上，才会稳定下来。他把岩浆涌流的通道称为涌流通道，它是岩石圈中最基本的构造单元，强的岩浆涌动对构造运动起决定作用^[194]。

随着地震层析技术的应用，人类对地球内部的整个构造有了进一步的了解。Kumagawa 等^[36]提出整体构造说（The whole earth tectonics）。他们认为地球的整体构造在空间上包括核、幔、壳、圈层构造、地幔构造和板块构造，在时间演化上，包括地球形成初期的生长构造、地幔构造、板块构造、后板块阶段的收缩构造和热构造（图 1）。通过行星比较学的研究他们认为，火星、水星正处于收缩构造阶段，而月球和小行星则已进入热构造阶段，地球目前还处在板块构造阶段，尚未进入后板块构造阶段^[36]。

上述日本学者所提出的整体构造说是一种比较超前的大地构造学说，还没有被地学界所普遍接受，在板块构造理论提出后与板块构造理论和动力学机制研究相衔接的是地幔柱构造说。目前地质学界一般趋向于认为地幔柱是自核幔边界上升的物质，当其汇聚成圆柱状并具有温度更高、活动性更强、粘度更低而能上升到壳幔边界时，于是演化成具有宽厚的冠状构造和细长尾部构造的地幔柱。按其形成深度，目前将地幔柱分为起源于核、幔边界的深源地幔柱和起源于上、下地幔边界的浅源地幔柱。在地质历史上，有许多大规模的岩浆活动形成大火成岩省（如我国四川峨眉山玄武岩流），它们是地幔柱活动的历史记录。

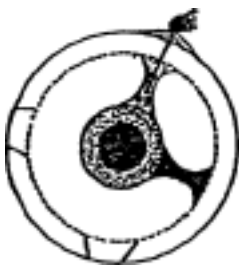
生长构造	地幔柱构造	板块构造	收缩构造	热构造
				
形成具分层结构的星体	来自边界层的柱状和岩浆团迁移所形成的对流	由转换断层补给的线状汇和线状源所产生的对流	伴随沉降的水平挤压，很少岩浆运移的排放口	脆性断裂作用喷气主要的外部因素
广泛熔融和重力分馏	在 SBL 和 MBL 处由部分熔融引起的分馏和混合	在 SBL 处分馏，在 MBL 处断续混合	分馏熔融产生巨型盾形火山	因凝固释放挥发物潮汐生热
岩浆洋	无板块	多板块	一厚壳	脆性圈
在 4.6Ga 时的所有类地行星	金星冥古宙地球	地球	火星，水星	月球，小行星

图 1 行星从生长构造经地幔柱构造、板块构造、收缩构造到达终端构造的构造演化示意图
(据 Kumazawa 等，1994)^[36]

Fig. 1 Planetary evolution of tectonic style with time is illustrated schematically. It starts from growth tectonics, through plume tectonics, plate tectonics, and contraction tectonics to the terminal tectonics
(after kumazawa et al. , 1994)
SBL 为星球表面边界层；MBL 为环绕上、下地幔边界的地幔边界层

四、地球物理学和地球动力学

20 世纪地球物理学取得了巨大的成就，有关地球内部构造和地壳岩石圈构造方面，主要有以下几方面的重大成就^[9]。

(1) 在人工源地震深部探测地壳低速层、壳幔边界、深部滑脱构造、地幔盖层和地幔低速层及其属性方面做了大量富有成效的工作。

(2) 全球范围完成了 175 条地学断面，中国境内有 11 条，通过全球大陆地学断面的研究，对大陆构造有了进一步的认识。

(3) 地震波（地球内部）走时表的建立对地球内部物理学的发展起到举足轻重的作用。

(4) 利用地震面波、体波和自由振荡资料研究地球内部的速度结构，此项研究发展很快，而且给出了众多的地球模型。基于地球物理学的发展，观测技术与分辨率的提高和地震学方法，从 20 世纪初至今已发现了一系列的物理界面。

(5) 加速了地球内部深部过程的研究，80 年代“岩石圈计划”开展以来，对地壳与地壳结构及其横向不均一性的研究取得了重大进展，特别是宽角反射与折射波法和近垂直波法给出了详细的分层、速度结构、界面结构及性质^[196]。正是这些深层过程的研究奠定了板块构造的基础，并通过地震源断层面解对板块运移的力源机制进行了有益的探索。

(6) 高新技术的应用促进了对地球内部精细结构的研究，提出了壳、幔的层块结构和物质组成。以美国地球物理学为代表，地球物理层析成像方法的应用从宏观上揭示了地球内部的结构、物质组成及深层过程并获得一系列新认识^[197, 198]，包括岩石圈的精细结构、地幔盖层、地幔低速层、410km 间断面、670km 的间断面，核 - 幔边界层（D'）的

全球分布与动力学效应，地球内核的各向异性，内核的自转速率比外核、地幔和地壳快，对圈层耦合、地磁场起源的发电机理论乃至全球变化的响应，以及地幔热柱的发现等^[199,200]。显然，核幔边界层（D^{''}）是一个动力边界，是深部物质与能量强烈交换的场所，是地幔热柱的源区（图1）。

（7）研究壳 - 幔边界（Moho）结构与属性的成就显著，认识到它是一个厚度1 ~ 5 km，最厚可达15 km的过渡带^[201,202]，这一界带是与深浅物质交换、重力均衡补偿和地球内部圈层耦合密切相关的地域。

根据以上地球物理学对地球内部构造研究所取得的进展，可以认为20世纪地球内部动力学的成就主要来源于地球物理学所取得的新认识。

地球动力学包括固体地球内部动力学和天体动力学两大部分。

固体地球内部动力学又可分为地幔动力学、核幔边界动力学和地核动力学几个方面，20世纪最后20年均取得了重要的进展，80年代是地幔对流研究大发展的时期，以Hager等^[203]为代表，运用先进的计算机技术，结合地震波层析、地幔粘滞研究的最新成果，开始大规模地研究实际地幔流的结构，展示了地幔对流所产生的各种地表异常，如重力及大地水准面异常，热流分布与地表形变，包括垂直形变和与板块运动相吻合的水平运动^[204,205,206]。

地球的核幔边界（CMB）是地球内部最重要的物理和化学界面之一，是地球热演化、化学演化和地核与地幔相互作用的基本场所，是地幔对流和地幔柱的主要发源地。在地核与地幔之间必然产生各种相互作用或核、幔耦合作用，从而产生各种运动学和动力学问题。这方面的研究在20世纪最后20年取得了很大的进展，从而形成了核幔动力学。在核幔动力学中讨论最多的是电磁耦合、地形耦合和热耦合，研究表明地球自转速率的变化、地球内部不同圈层（内、外核、幔）旋转速度的差异与地球内部角动量交换存在着相互影响和转化的关系。

在庞加莱 poin care 理论的基础上，Pekeris 等^[207]提出了地球液核的多层模型理论，使液态动力学的研究又深入一步；Smaglie 等更严格地从理论上讨论了外核动力学、内核旋转动力学和内核、外核的电动力学^[208]；Melchier^[209]则系统论述了地核的热动力学和流体动力学。但是自20世纪80年代以来，高技术的迅速发展与高精度的天文实测值相比，理论计算已显示不出其优势。由于地球内部结构组成的复杂性，到目前为止，还未见到考虑横向不均匀性的地球模型，当然也无法见到考虑横向不均匀性的液动力学和章动理论^[210]。进入90年代，更多关注如甚长基线干涉测量（VLBI）和超导重力仪等高精度观测结果在地核结构、性质和动力动态等方面所能提供的信息和相应的理论解释^[4]。地核动力学除探讨日、月引潮力的效应外，近年也开始探讨地核中的对流问题。

地核动力学的研究对阐明地磁场的起因、地磁场的西漂和磁极倒转都极为重要。地磁倒转形态学和地磁场倒转机制是20世纪90年代以来地球科学研究的热点之一。Valet 等^[210]首次发表了最近4 Ma以来连续分布的地磁场古强度记录，其最重要的特征是多数地磁极性转换前地磁场强度逐渐减小，而转换后则迅速增加，与衰减的恢复过程相关的时间常数为100年的倍数，表明地球磁场极性倒转可能受控于地球液态流体对流及其强度的结果；而磁场倒转事件发生的时间及准周期与联合古陆的裂解、拼合在时间上的吻合，使地磁历史研究与大地构造学的研究结合了起来。

地球自转所产生的地球动力学对于岩石圈构造运动具有重要的意义。廖德春等^[211]总

结了地球自转矢量变化的三个主因：①地外天体（主要是日、月的引力作用改变地球系统的总角动量；②地球表面和地球内部的物质迁移与固体地球的负载形变改变地球的惯性张量；③地球表面和地球内部的物质相对运动引起地球的相对角动量变化。深入探讨地球自转与地质、地球物理现象之间的关系和作用机制（诸如地球自转与地震、火山活动、海平面变化的关系）是地球动力学关注的课题。

推而广之，地球自转动力学是天体动力学的一部分。地球作为一个天体在太阳系和银河系中运动，太阳系的公转和银河系的公转也影响到地球上地壳和岩石圈的运动。例如，地球公转时对地球自转速率的影响^[26]、银河效应（太阳 - 银心距、旋臂结构、麦哲伦星云）、米兰柯维奇效应等。最近马宗晋等^[4]提出天文地球动力学，定义为将天文学方法特别是空间技术方法用于监测和研究地球的运动变化及其机制的新的地学分支。

现代地壳运动观测方面的成就：20 世纪最后 20 年，空间对地观测技术（如全球定位系统 GPS，人造卫星激光测距 SLR，甚长基线干涉测量 VIBI，精密重力测量和干涉合成孔径雷达 INSAR）等高新技术的应用，使人类可以以过去未曾有过的精度探测地表内部结构和当代地壳运动。

综上所述，现代地质学在各方面所取得的新成就，对地球构造、地球动力学的新认识和各项新的科学技术方法手段的应用（主要是同位素地质年代学、物质成分研究、地球及地壳运动观测、大地测量观测、地球物理测深、地震层析等方法），为板块构造学、地质力学在解决自己的科学问题时提供了空前有利的条件，使许多过去想解决而未能解决的科学问题的解决成为可能。这就为板块构造学和地质力学建立了施展才能的前所未有的科学舞台，也为这两个科学的未来发展打开了前所未有的前景。

这里要特别提到近期马宗晋等发表的科学著作《地球构造与动力学》^[4]。在这本论著中，他系统概括总结了 20 世纪 80 年代以来大地构造学与地球动力学所取得的主要最新成就，将科学思维的系统观和地球系统科学交叉融合，把地球构造学和地球动力学相互结合，地球构造的双重非对称性和全球构造系的观点贯穿全书，提出了自己的“热涌构造模型”和地球非对称胀缩结构、地球动力学分析，划分了全球构造系统，在论述地球构造和地球动力学时，体现了地球各圈层的相互响应和地球的整体论观点，重点分析了地球自转动力学效应和天文因素对地球构造运动变化的影响，将地球放在宇宙中考察，具有前瞻性。在吸收地质力学与板块构造的精华的基础上，提出了自己的理论观点和理论体系，是我国大地构造与地球动力学领域一个最新的研究成果。

第二节 地质学未来的发展趋势和地质力学、 板块构造学可能的融合

科学的发展总是一方面分科越来越细，另一方面又越来越综合。

从上节所述可见，当代地质学的发展也遵循这一客观规律，其未来的发展也离不开这条规律。但是在发展的长河中各个不同的阶段又各有其特点。地质学发展到今天，可以概括出以下几个重要的特点。

（1）地球的超宏观概念正在代替或突破过去局限的区域性概念，整体观在当代地质学研究中占有重要的位置。

(2) 从定性走向定量, 从假设走向学说验证。由于先进的现代化观测技术、系统的监测结果, 从定性走向定量正在地质学的各个研究领域逐步发展。

(3) 物质成分、构造、地质历史是地质学研究的三大方面, 现代地质学已经从三者相对分立走向紧密结合。三者的研究工作和研究成果往往是互相结合、互相交叉、互相验证和互相补充的。

(4) 地质学已从孤立地研究地壳或岩石圈走向研究地球各圈层之间的相互作用、研究地球科学复杂系统中各子系统间的相互关联。

(5) 现代地质学不仅深化研究过去和阐明地球的历史, 同时面向未来、预测未来, 为人类的生存、环境保护、防灾减灾、可持续发展服务。

以上五个方面正深刻影响地质学及其分科的发展方向和发展趋势, 当然也会深刻地影响到板块构造学和地质力学未来的发展趋势和发展方向。但由于板块构造学和地质力学各自研究对象的特殊性和要解决的具体科学问题不同, 又有若干具体的发展方向, 对此我们不妨做一些展望。

一、板块构造学

(1) 地震层析图像解析技术的不断精确化和对地球深部构造的正确解读使碰撞造山带、岛弧造山带、大陆裂谷带、大洋中脊带等的岩石圈结构和动力学机制得以正确阐明。配合着空间技术、大地测量定位技术对现今板块运动的精确测量, 现实主义原理在板块构造学中的运用正在进一步提升, 从现今全球板块运动中所总结出来的规律性, 必将大大验证和发展已有的板块构造学理论。因此研究当今正在进行的全球板块构造运动就成为板块构造学优先发展方向。

(2) 除了继续系统研究和深化已有的两类板缘造山作用理论外, 板内变形和陆内造山作用的进一步研究和完善将是修正经典板块构造理论的重要研究课题和发展方向。

(3) 发挥板块构造学与历史地质学紧密联系的优势, 发展古板块构造的研究方向, 探索板块构造自身的形成与演化。

(4) 坚持板块构造学向深部核、幔进军的发展方向, 涌动构造、地幔柱构造学、地幔动力学乃至地球整体构造学正是这一发展方向的体现。

(5) 进一步发展板块构学的实用方向, 加强板块构造学与国民经济发展和环境保护方面的联系, 在解决全球气候变化预测研究中, 加强板块构造运动与海平面变化、沙漠化、冰川融化、温室效应、火山、地震相关性的研究。

二、地质力学

从中国的地质力学在李四光身后几十年间的发展可以看出两个非常明显的发展轨迹或发展方向: 其一是扩大地质力学的含义使地质学与力学在各个方面(包括静力学和动力学两个方面)的结合开展起来, 提出了新概念地质力学^[1]。力学的原理方法正在不断地在地质学的各个领域里与地质学结合, 它对地质学及其在科学和国民经济建设领域里的发展将起着越来越重要的作用; 其二是原来的经典地质力学在板块构造学说盛行潮流的面前遭遇严重的挑战, 但由此经典地质力学理论得到许多补充和修正, 地球自转动力作用学说得到进一步的发展。经典地质力学在未来的发展中仍然会坚持李四光生前所确定的发展方

向，如本书前文所述在下列方向已取得了重大进展，但有新的历史条件下结合新的科学发展，要求有新的研究内容、研究思路与要解决的问题。

(1) 海水进退规程的研究：这是世界性的难题，李四光和孙殿卿分别对中生代和晚古生代的海水进退规程作过研究。它要求不仅要剔除冰川作用所引起的海平面变化，还要剔除垂直振荡运动所引起的海进海退。在地质历史时期需要综合全球同时代的地层建造、海进海退层序和古气候古地理的研究后才能得出结论。在现代科学精密仪器测试的条件下，利用地球自转速率变化、全球海平面变化、高低纬度陆地海洋面积的变化和冰川进退的中长期全球性观测资料的综合对比研究或许能够科学验证这一世界性科学假说。因此地质力学工作者应该积极参与当前方兴未艾的全球变化和水圈、大气圈、岩石圈相互作用的前缘课题的研究，它不仅能使我们参与全球性环境保护与可持续发展的研究，而且可能有助于全球海水进退规程理论问题的解决。

(2) 构造体系与构造型式的研究工作的补充完善并向世界范围和三维空间扩展，构造体系与构造型式的研究工作是地质力学工作的精髓，李四光生前及身后，中国的地质力学工作者都做了大量的工作，但是这条研究道路和研究方法无论在国内还是国外都尚未达到普通认可和采用的程度。限于当时的条件，有关构造体系构造成分的同时性和同源性，有些尚缺乏严密的科学论证，而现今的测试手段诸如同位素测年、构造地球化学和古地磁测量等新学科的发展已经可以更好地论证这些问题。因此就过去已经厘定的构造体系和构造型式作进一步的补充论证，充实各项测试、模拟和数理论证的工作，特别要克服模式化、将自然界复杂的构造作用简单化的弊端，这对于地质力学的进一步发展和国内外交流都是极为重要的。在这个基础上，地质力学要克服过去局限于国内、区域性过于狭隘的弱点，争取在世界范围内开展此项工作并取得国际同行的认可与接受。

构造体系与构造型式的研究工作还应向地球的三维空间扩展，厘定存在于地球内部和深部空间的各种构造体系和构造型式。

(3) 进一步开展矿物相变、构造地球化学、动力成岩成矿作用和超高压动力变质作用的研究工作，其深远的科学意义不仅仅是开辟了成岩成矿作用新的机理的研究，还在于把物质成分的演化、构造演化、地质物理化学环境变化的研究真正统一起来，使它具有地球化学动力学、地球物理动力学的重要内容，因而是地球动力学不可分割的一部分，对于正确全面地阐明地球物质的调整、结构的调整和整个地球物质成分的演化历史具有重要意义。

(4) 进一步开展现今构造运动观测、地应力测量、现今构造应力场、活动构造体系和安全岛的研究，坚持和发展在区域稳定性评价、构造预测和环境保护中有独特思路的地质力学研究方向。面向未来，在发展预测科学中进一步坚持和完善这一研究方向，同时也通过现实主义原理的提升进一步发展地质力学的理论。

(5) 进一步发展岩石力学性质的非线性力学研究，一方面通过蠕变、松弛等流变现象和水岩作用及其机制、机理的研究，使岩石力学性质变化监测为大型工程的安全监护和预警未来可能发生的各种工程地质变化、延长工程寿命服务；另一方面通过岩石力学性质变化的理论研究进一步发展地质力学。

(6) 结合当代地质学、地球科学和天体动力学进一步验证、修改、补充李四光的大陆车闸学说并将其发展为地球自转动力作用学说。近年来，国内外有越来越多的学者注意地球自转作用及其速率的变化对地球构造和地球动力学的意义，越来越多的学者关注并参

与这一重大课题的研究。从目前的进展情况看，至少有以下几个方面^[211~228]：①地球自转速率变化对地球形体和海陆分布的意义，包括在地球转动控制下形成的构造体系对于地球形体的意义；②地球自转速率变化对于全球构造格局和板块运动的意义；③地球不同圈层转速不同的地球动力学及其对地球内部构造的意义；④地球自转速率的历史变化、地球角动量变化与地球膨胀收缩的关系的研究；⑤地球自转速率变化与火山、地震的触发。因此，从国内外学者们对于地球自转速率变化的研究的关注和研究论证，说明李四光的自转动力作用学说具有强大的生命力和远大的发展前景。值得我们组织力量大力发展和完善，使李四光的科学思想得到验证和发展。

综上所述，可知板块构造学和经典地质力学将根据自己学说发展的需要，在未来强化自己需要的发展方向。在它们各自发展的过程中，我们将可以看到两个重要的结果：其一是一方的成就往往为另一方的发展铺平了道路，例如地质力学的构造地球化学和动力成岩成矿作用的研究为板块构造学的岩石构造组合的形成机理的阐明铺平了道路；板块构造学、地幔柱构造学、整体构造学的研究成果为地质力学研究径向构造和三维空间的构造体系和构造型式准备了条件……。其二是它们之间的互相交叉、互为利用、互相融合是必然的。虽然它们各自的研究思路不同，对地质构造研究的侧重面有所不同，但最终互相融合是不可避免的，它们最终都将融合在地质学、大地构造学和地球动力学这个大熔炉里，即所谓殊途而同归，共同为阐明地球构造和地球动力学机制做出自己的贡献。

不过，应该指出的是，在不同历史时期，它们之间融合的重点或主要方面有所不同。如果我们回顾一下大地构造学的发展历史，不难看到随着人类从认识地壳的构造扩展到岩石圈的构造，槽台说也为板块说所取代或者说槽台说为板块说所融合。随着人类对地球内部构造认识的深化，目前已经从岩石圈向深处扩展到软流圈和地核，板块构造说正在被地幔柱构造说、整体构造说所深化或取代。但是人类认识地球的构造不能只是孤立地研究地球内部的构造，事实上地球作为一个天体，它的物质成分、能量、运动和演化无时无刻不在与其外部空间处在密切的交换和转化之中。一句话，它是一个开放系统而不是封闭系统，因此，随着人类不断扩展对宇宙空间及其运动、演化认识的深化，必定越来越趋向天体演化和天体动力学的研究。正是从这个历史进程可以预言，地球构造学和地球动力学将成为天体构造学和天体动力学的专门篇章，而板块构造学和地质力学则成为它们的有机组成部分。我们正是从这一点看到经典地质力学理论的发展前景。李四光限于当时的历史条件，还不能像今天的学者们那样对地球内部的物质、构造、形体与地球自转速率变化之间的关系认识得那么清楚，但是他已经深刻地把握住地球自转速率变化与地球形体及内部物质胀缩、角动量转换之间的辩证关系。显然，他的这种科学思维即使在今日仍然是超前的。

因此，作为中国的地质力学工作者，绝不应该因为目前经典地质力学理论研究尚未取得重大突破而气馁，应该清楚地看到未来地球科学发展的前景和规律，坚定不移地继续为地质力学的发展做出自己不懈的努力。

最近，美国科学院地学部发表了题为《New Departures in Structural Geology and Tectonics》^[9]的构造白皮书。该文献中所列的未来十年构造地质学和大地球构造学研究的新航向包括了大陆造山作用和流变学、地震和构造作用、气候和地球表层作用之间的相互动力作用，可以看出这些研究内容是板块构造学也是地质力学未来所要研究的内容，是它们共同为地球科学在地球构造和地球动力学研究方面所需要完成的科学任务。

参考文献及内部参考资料

- [1] 毕思文. 新概念地质力学. 北京: 地质出版社. 2001
- [2] 朱夏. 活动论构造历史观. 上海地质. 1991, (2): 1~38
- [3] 孙殿卿, 崔盛芹, 王泽九. 李四光学术思想探讨. 中国地质科学院地质力学研究所所刊. 1993, (15): 1~8
- [4] 马宗晋. 地球构造与动力学. 广州: 广东科技出版社. 2003. 131~269
- [5] 李四光. 地质力学概论. 北京: 地质出版社. 1973
- [6] 李四光. 1926. 地球表面形象变迁之主因. 中国地质学会会志, 5 (3~4): 209~262 (英文), 转载于地质力学方法 (中文版). 北京: 科学出版社. 1976. 1~28
- [7] 李四光. 1965. 地质力学发展的过程和当前的任务. 在地质力学研究所举办的第三期地质力学进修班上的讲话稿. 刊于《地质力学方法》, 北京: 科学出版社. 247~266
- [8] K. C. Condie 著. 杜宽平等译. 板块构造与地壳演化. 武汉: 中国地质大学出版社. 1984. 217~246
- [9] New departures in structural geology and tectonics White paper by Tectonics Program, Earth Sciences Division and National Science Foundation (GEO/EAR), 2003
- [10] 王仁, 何国琦, 王永法. 地球动力学简介——现状与展望. 见: 构造地质学进展. 北京: 科学出版社. 1982. 166~173
- [11] 王仁, 何国琦, 王永法. 地球自转速率变化推动全球构造运动的可能性. 见: 国际交流学术论文集. 北京: 地质出版社. 1988
- [12] 王仁, 丁中一. 轴对称情况下地球自转速率变化及引潮力引起全球应力场. 地质力学论丛, 1982, (6) 193~198
- [13] 吴珍汉. 旋转地球动力学. 北京: 地质出版社. 1997. 95~138
- [14] 张文佑, 钟嘉猷. 介绍断裂与断块大地构造学说的理论发展与实际意义. 见: 构造地质学进展, 北京: 科学出版社. 1982. 12~25
- [15] 马宗晋, 杜品仁, 高祥林. 全球构造研究的思考. 地学前缘. 2003, 10 (特刊): 1~4
- [16] Meyerhoff A A, Toner I. Morris A E L, et al. Surge tectonics: a new hypothesis of Earth dynamics. In: Chatterjees, et al. eds. New Concepts in Global Tectonics. Lubbock: Texas Tech. Univ. Press, 1992
- [17] 杨学祥, 陈震, 刘淑琴等. 地球内核快速旋转的发现与全球变化的轨道效应. 地学前缘, 1997, 4 (2): 187~193
- [18] Raralli & Murphy D C. Rheological Stratification of the Lithosphere. Tectonophysics, 1987. 132: 281~295
- [19] 李四光. 天文·地质·古生物. 北京: 地质出版社. 1972. 120~123
- [20] 丘元禧. 特提斯构造带和星球级纬向构造体系. 地质力学学报, 2003, 9 (3): 220~230
- [21] 钟大赉等. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社. 1998. 200~202
- [22] 黄汲清, 陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化. 北京: 地质出版社. 1987. 54~55
- [23] 任纪舜. 新编 1: 500 万中国及邻区大地构造图说明书. 北京: 地质出版社. 1997
- [24] 吴磊伯等. 大别山区域构造并着重论述其中南北向构造与其他构造体系的复合现象. 见: 旋转和一般扭动构造及其他地质构造体系问题 (第二辑). 北京. 科学出版社. 1958
- [25] 丘元禧. 区域性南北向构造带和全球性经向构造体系. 地质力学学报, 2002, 8 (1): 1~13
- [26] 马宗晋, 杜品仁, 高梓林. 全球构造研究的思考. 地学前缘. 2003. 10 (特刊): 1~4
- [27] 张文佑. 断块构造导论. 北京: 石油工业出版社. 1984. 80
- [28] 莫柱孙等. 南岭花岗地质学. 北京: 地质出版社. 1980. 188
- [29] 马文璞. 区域构造解析. 北京: 地质出版社. 1992. 45~46
- [30] 李宏伟, 许坤. 郯庐断裂走滑活动与辽河盆地构造古地理格局. 地学前缘. 2001. 8 (4): 468~470
- [31] 邵济安, 唐克东. 中国东北地体与东北亚大陆边缘演化. 北京: 地震出版社. 1995. 141~157
- [32] 李鸿业. 两极挤压说. 北京: 科学出版社. 1993. 57~69
- [33] 刘粤, 刘学尧. 能量补偿论. 东南大学学报 (地球科学专辑). 1995. 25 (4): 21~29
- [34] Hilde T W C. Uyeda S, Kroenke L. Tectonic history of the Western Pacific C. L. Drake eds. Geodynamics: Progress and Prospects. AGU. 1976

- [35] 马宗晋, 莫宣学. 地球韵律的时空表现及动力学问题. 地学前缘. 1997, 4 (3-4): 211 ~222
- [36] Kumazawam, Maryyamas whole earth tectonics. Jour. Geol. Soc. Japan. 1994, 100: 81 ~102
- [37] Tapponnier P, Armijo R. 印度和亚洲之间的碰撞机制. 见: M. P 考茨德, A. C 里斯主编. 碰撞构造. (中译本). 北京: 地质出版社. 1986. 52 ~53
- [38] 李四光. 1929. 东亚一些构造型式及其对大陆运动问题的意义. 见: 地质力学方法. 北京: 科学出版社. 1976 年重印. 65 ~108
- [39] 万天丰. 中国大地构造纲要. 北京: 地质出版社. 2004. 146
- [40] 丘元禧. 似新华夏式伸展盆海系的基本特征及其形成演化的力学机制. 地质力学学报, 2001, 7 (1): 1 ~8
- [41] 李四光. 新华夏海之起源. 见: 区域构造分析. 北京: 科学出版社. 1974. 49 ~58
- [42] 马杏垣, 刘和甫, 王维襄等. 中国东部中生代裂陷作用和伸展构造. 地质学报, 1983, 57 (1): 22 ~32
- [43] 王鸿祯. 中国东部及邻区中生代盆地发育及大陆边缘区的构造发展. 地质学报, 57 (3): 213 ~223
- [44] 崔盛芹, 李锦蓉. 东亚及太平洋地区喜马拉雅期构造演化. 地质学报, 1990, 64 (1): 1 ~12
- [45] 王玉芳, 崔文元, 张承志. 内蒙古赤峰南部娄子店、大城子拆离断层及其构造演变. 见: 钱祥麟主编. 伸展构造研究. 北京: 地质出版社. 1994. 99 ~106
- [46] 许志琴, 李海兵, 郭光鹤. 动态重熔及地壳收缩与伸展的转化——辽南古才变质体的上隆机制探讨. 见: 钱祥麟主编. 伸展构造研究. 北京: 地质出版社. 1994. 107 ~119
- [47] Davis G A, 于浩, 钱祥麟等. 中国变质核杂岩——北京云蒙山地质简介及地质旅行指南. 见: 钱祥麟主编. 伸展构造研究. 北京. 地质出版社. 1994. 144 ~154
- [48] 徐学思, 胡连英. 茅山伸展构造. 见: 钱祥麟主编. 伸展构造研究. 北京: 地质出版社. 1994. 59 ~70
- [49] 丘元禧, 夏亮辉. 中国东部及邻区中生代大陆边缘性质的讨论. 中国区域地质, 1994, (12): 258 ~267
- [50] 中国科学院南海海洋研究所构造室. 南海地质构造与陆缘扩张. 北京: 科学出版社. 1988. 380 ~392
- [51] 任纪舜, 陈廷愚, 牛宝贵等. 中国东部及邻区大陆岩石圈的构造演化与成矿. 北京: 科学出版社. 1990. 100
- [52] 吴克隆, 严炳铨等. 福建晶洞 (钾长) 花岗岩一般特征及成因初步探讨. 福建地质, 1982, 1 (2): 1 ~28
- [53] Tamakik, Honga E. Global tectonics and formation rock of the western Pacific. Episodes, 1991, 14 (3): 224 ~229
- [54] 张文佑等. 中国及其邻区海陆大地构造. 北京: 科学出版社. 1986. 331 ~468
- [55] 谭忠福, 张启富. 中国东部新华夏系的演化规律及其成因机制的初步探讨. 地质学报, 1983, 57 (1): 43 ~50
- [56] 邵云惠. 试论我国东部的北西向构造及其理论意义. 中国地质科学院 562 综合大队集刊, 1980, (1): 19 ~27
- [57] 丘元禧. 广东的北西向构造. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1982, (3): 179
- [58] 孙岩. 苏南地区北西向压性构造的确定. 中国地质科学院 562 综合大队集刊, 1977, (6): 105 ~126
- [59] 王鸿祯主编. 中国及邻区构造古地理及生物古地理. 武汉: 中国地质大学出版社. 1990
- [60] 丘元禧. 中国及其西南邻区新生代北西向扭动构造体系的生成发展和形成机制. 地质力学学报, 2001. 7 (4): 335 ~345
- [61] Rangin P H, Huchon. X. Lapichon et al. Cenozoic imformation of Central and South Vitnam. Tectonophysics, 1995. 251: 179 ~196
- [62] Tung Yi-Lee, Lawrence A lower. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia. Tectonophysics, 1995, 251 (1-4): 85 ~138
- [63] 李思田, 路凤香, 林杨松等. 印度—欧亚大陆碰撞效应模型分析. 中国东部及邻区中生代盆地演化及地球动力学背景. 武汉: 中国地质大学出版社. 1997. 213 ~223
- [64] 王治顺等. 构造体系各论. 北京: 地质出版社. 1999. 195 ~208, 210
- [65] 江娃利, 张英礼. 河北磁县 NWW 向和南山村 - 岔口活动断裂带活动特征与 1830 年磁县地震. 地震地质, 1996, 18 (4): 349 ~556
- [66] 徐杰, 王若柏, 王春华等. 华北东南部介休 - 新乡 - 溧阳北西向新生地震构造带. 地震地质, 1997. 19 (2): 125 ~133
- [67] 毕福志, 袁又申, 范国胜. 闽粤台北西西向最新构造带与大震构造背影. 地震地质, 1990, 12 (2): 183 ~192
- [68] 李四光. 旋转和一般扭动构造及地质构造体系复合问题 (第一辑). 北京: 科学出版社. 1955. 96, 1 ~9
- [69] 张宝政. 板块构造学. 北京: 地质出版社. 1993. 30

- [70] 小田诚也, 佐藤任弘, 小林和男等. 海洋地板块构造 (中译本). 北京: 地质出版社. 1986. 99 ~102
- [71] 徐斐, 周祖翼. 海底高原: 了解地球内部的窗口. 地球科学进展, 2003, 18 (5): 746
- [72] Ship doad scientific party leg 192 Summary. In: Brends Bed. Proceedings of Dope Initial Reports. 1992. Texas: Texas & University. 2000
- [73] Amdt N. Weids D. Oceanic plumtauo as windows to the Earth interiow: An opp success story. Joedeo Journal 2002. 28
- [74] White Rs, Mekenzie D. Mantle plumes and flood basalts. Journal of Geophysical Research, 1995, 100: 17543 ~17586
- [75] Campbell I H, Griffiths R W. Implications of mantle plume structure for the evolution of plod basalts. Earth and Plane-tory Science Letters. 1990, 99: 79 ~93
- [76] 邹和平. 南海北部陆缘张裂——岩石圈拆沉的地壳响应. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 40 ~43
- [77] Le Pichon X. Franchetan, J and Bonnin, J: Plate tectonics. Elsevier. Amsterdam, 1973, 300
- [78] 翁世劫, 孔庆寿, 黄海. 浙闽赣粤中生代晚期火山. 北京: 地质出版社. 1987, 255 ~259
- [79] Joliet L, Davy P, Cobbold PR. Right leteral shear along the north west Pacific margin and the India, Eurasia collision. Tectonics, 1990, 9: 1409 ~1419
- [80] 周蒂, 陈汉宗, 吴世敏等. 南海的右行陆缘裂谷成因. 地质学报, 2002, 76 (2): 180 ~190
- [81] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific. J. Geophys., 1971, 76: 2542 ~2561
- [82] 中国地质科学院主编. 中华人民共和国地质图集. 北京: 地图出版社. 1974
- [83] 福建省海洋地质研究所. 台湾及其邻区构造特征. 北京: 海洋出版社. 1989. 86 ~87
- [84] 赵文津, 薛光琦, 吴珍汉等. 西藏高原上地幔的精细结构与构造——地震层析成像给出的启示. 地球物理学报, 2004, 47 (3)
- [85] 钟大赉, 丁林, 刘福田等. 造山带岩石层多向层架构造及其对新生代岩浆活动的制约——以三江及邻区为例. 中国科学 (D 辑 30 卷增刊), 2000, 12, 1 ~8
- [86] 袁学诚, 左愚. 秦岭造山带地球物理岩石圈剖面. 北京: 科学出版社. 1996
- [87] 蔡学林, 石绍清, 吴德超等. 武当山推覆构造的形成与演化. 成都: 成都科技大学出版社. 1995. 200
- [88] 钱祥麟, 崔元, 王时麒等. 冀东前寒武纪铁矿地质. 石家庄: 河北省科技出版社. 1985. 255 ~261
- [89] Akiho Miyashiro and Fumiko Shido Tholeiitic and calc-alkalic series in relation to the behaviors of titanium, vanadi-um, chromium, and nickel. American Journal of Science 275: 265 ~277, 1975, 265 ~277
- [90] 丘元禧, 张渝昌, 马文璞. 雪峰山的构造性质与演化. 北京: 地质出版社. 中山大学出版社. 1999. 25 ~35
- [91] 汪品先. 亚洲形变与全球变冷——探索气候与构造的关系. 第四纪研究, 1998, (3): 213 ~239
- [92] 杨丽贞. 桂北中元古代的科马提岩. 中国区域地质, 1990, (1): 21 ~24
- [93] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志. 北京: 地质出版社. 1985. 314 ~320
- [94] 董申保等. 中国变质作用及其地壳演化的关系. 北京: 地质出版社. 1986. 202 ~203
- [95] 陈海泓. 雪峰山大地构造的基本特征探讨. 地质科学, 1993, (3): 201 ~210
- [96] 马文璞. 华南陆域内古特提斯形迹、二叠纪造山作用和互换构造域的东延. 地质科学, 1996, 37 (2): 105 ~111
- [97] 秦建华, 吴应林, 颜仰基等. 南盘江盆地海南—印支期沉积构造演化. 地质学报, 1996, 70 (2): 99 ~107
- [98] 钟自云, 柳淮之, 姚明等. 右江裂谷带早三叠世玄武岩的特征. 桂林冶金地质学院学报, 1989, 9 (1): 45 ~55
- [99] 夏邦栋. 海南岛晚古生代裂谷作用. 地质学报, 1991, 65 (2): 103 ~115
- [100] 陈耀钦, 陈培权, 黄宇辉. 广东海南石炭纪沉积相古地理及层控矿产预测. 武汉: 中国地质大学出版社. 1991. 10
- [101] 刘光鼎. 中国海区及邻区地质地球物理特征. 北京: 科学出版社. 1992
- [102] 吴浩郭, 邝国敦, 盛向阳等. 桂南晚古生代放射虫硅质岩及广西古特提斯的初步探讨. 科学通报, 1994, 39 (9): 809
- [103] 张伯友, 石满全, 杨树锋等. 古特提斯造山带在华南两广交界处的新证据. 地质论评, 1995, 41 (1): 1 ~6
- [104] 赵时久, 张伯友, 郭令智等. 中南地区二叠纪岩相古地理及沉积矿产远景预测. 见: 岩相古地理文集. 北京: 地质出版社. 1993, 51 ~98
- [105] 马长信, 刘荣贵. 赣东北前震旦纪地质. 北京: 地质出版社. 1992
- [106] 王尔康, 刘聪等. 闽西南—粤东北晚古生代的火山作用. 见: 李继亮主编. 东南大陆岩石圈结构与地质演

化. 北京: 冶金工业出版社. 1993. 27 ~33

- [107] 侯泉林, 李继亮等. 闽西南前陆褶皱冲断带初步研究. 北京: 冶金工业出版社. 1993. 27 ~33
- [108] 金以钟, 赵锡奎, 乐光禹等. 上扬子地台峨眉地裂运动对含油气盆地形成的控制意义. 见: 江南—雪峰地区的层滑作用及多期复合构造. 北京: 地质出版社. 1993. 1 ~38
- [109] 夏邦栋, 钟立荣, 方中等. 下扬子地区早二叠世孤峰组层状硅质岩成因. 地质学报, 1995, 69 (2): 125 ~137
- [110] 邓希光, 李献华, 陈志刚等. 广西钦州板城晚泥盆世硅质岩地球化学特征及环境探讨. 地质科学, 2003 (4): 460 ~469
- [111] Metcalfe I. Gondwana dispersion, amalgamation and accretion of Southeast Asian terranes: Progress, problems and prospects. In: Proceedings of first international symposium on Gondwana dispersion and Asian accretion-geological evolution of Eastern Tethys. Kunming, China, 1991. 199 ~204
- [112] QIU Yuan-xi et al. The contorted sutured belt of East Tethys in Gondwana dispersion and Asian accretion. In: Proceedings of third international symposium on Gondwana dispersion and Asian accretion-geological evolution of Eastern Tethys. Kuala Lumpur Malaya, 1993. 24 ~26
- [113] 邓万明. 中国西部新生代火山活动及其大地构造背景. 地学前缘, 2003, 10 (2): 471 ~478
- [114] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福等. 印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应. 地学前缘, 2003, 10 (3): 135 ~147
- [115] 王鸿祯, 杨巍然, 刘本培. 华南地区古大陆边缘构造史. 武汉: 中国地质大学出版社. 1986, 1 ~15
- [116] 郭令智, 施央甲, 马瑞士. 西太平洋中生代活动大陆边缘和岛弧构造的形成及演化. 地质学报, 1983, 57 (1): 11 ~21
- [117] 徐嘉炜. 关于东亚大陆边缘演化的若干新认识. 地质科技情报, 1990, (11)
- [118] 朱夏, 陈焕疆等. 中国中、新生代构造与含油气盆地. 地质学报, 1983, (3): 235 ~242
- [119] 水谷伸治郎、邵济安等. 那丹哈达岭地体与东亚大陆边缘中生代构造的关系. 地质学报, 1989, 63 (3): 204 ~216
- [120] 徐嘉炜等. 论东亚大陆边缘中生代左行平移断裂作用. 海洋地质与第四纪地质, 1985, 5
- [121] 吴利仁等. 中国东部中生代火山岩. 地质学报, 1982, 56 (3): 223 ~234
- [122] 徐志刚. 从构造应力场特征探讨中国东部中生代火山岩成因. 地质学报, 1985, 59 (2): 109 ~126
- [123] 黄汲清, 任纪舜等. 中国大地构造及其演化. 北京: 科学出版社. 1980. 110 ~114
- [124] 陈金华. 中国中生代海水进退和双壳类区系. 地质学报, 1982, 56 (4): 334 ~346
- [125] Fontaine H, David P, Suwarna N et al. The Jurassic in Southeast Asia united nations Escap, ccop Technical Bultetin. 1983, (16): 1 ~28
- [126] 周蒂, 颜佳新, 丘元禧等. 南海西部围区中生代岩相古地理及中特提斯东延通道. 见: 李象彪, 高抒主编. 中国边缘海岩石层结构与动力过程. 北京: 海洋出版社. 2003. 150 ~169
- [127] Metcalfe I. Gondwana dispersion, amalgamation and accretion of southeast Asian terranes, progress, problems and prospects. In: Proceedings of first international symposium on Gondwana dispersion and Asian accretion—geological evolution of Eastern Tethys. 1991. 199 ~204
- [128] C. S. Hutchison Geological Evolution of southeast Asia, Oxford Monographs on Seology and geophysics No. 13 Clarendon press, Oxford. 1989
- [129] 莫宴情等. 海南岛地体及其毗邻陆缘晚中生代—新生代古地磁研究和构造演化. 南京大学学报 (自然科学版), 1987, 23 (3): 521 ~532
- [130] 霍岛贞雄. 据古地磁资料来阐述东亚大陆成长的理论. 见: 亚洲变动带. 上海海洋地质调查局, 1987. 146 ~156
- [131] 王乃文. 板块构造与古生物地理、古生态气候. 见: 板块构造基本问题. 北京: 地震出版社. 1986. 307 ~328
- [132] 林金录. 华南地块的地极移动曲线及地质意义. 地质科学, 1987, (4): 306 ~315
- [133] 张福祥, 何礼章, 王安德等. 1993. 扬子区东南缘晚志留世古地磁及浙西拗陷构造演化与沉积特征. 江南—雪峰地区的层滑作用及多期复合构造. 江南—雪峰科研专题组编. 北京: 地质出版社, 89 ~119
- [134] M. W. McElhimy, et al., 1981. Fragmentation of Asia in the Permian. Nature, 1981, (293): 212 ~216
- [135] 陆人雄等. 云开地块碰撞拼贴带中的那蓬岩体特征研究. 见: 云开大山及其邻区地质构造论文集. 北京: 地质出版社. 1993, 53 ~59

- [136] 李思田等. 中国及邻区中生代裂陷作用的大地构造背景. 见: 中国及邻区构造古地理和生物古地理. 武汉: 中国地质大学出版社. 1990. 109 ~119
- [137] 丘元禧, 李平鲁, 梁慧娴. 南海北部及台湾海峡晚白垩世—新生代大陆边缘构造演化和构造性质. 广东地质, 1996, 11 (3): 10 ~16
- [138] 李四光. 广西台地构造之轮廓. 见: 区域地质构造分析. 北京: 科学出版社. 1974. 25 ~37
- [139] 崔盛芹, 杨振升, 周南硕. 古构造分析的理论与方法. 见: 长春地质学院地质力学教研室区域构造组编. 区域构造学. 北京: 地质出版社. 1979. 7 ~8
- [140] 崔盛芹. 古构造研究现状综述. 见: 构造地质学进展. 北京: 科学出版社. 1982. 174 ~189
- [141] Con A V. Magneto stratigraphic time scale. In: Garhand W B, Armsrong R L, Con A V et al. eds. A geologic time scale. Cambridge University Press, 1982. 63 ~84
- [142] Whyte M A. Turning points in Phanerozoic time. Nature, 1977, (267): 679 ~682
- [143] 张世红. 偏极性现象研究及其动力学意义. 地学前缘, 1998, 5 (增): 175 ~183
- [144] 林进峰, 陈雷, 汤贤赞. 从东亚大陆中、新生代的运动探讨南海的形成演化. 热带海洋, 1997, B (4): 73 ~80
- [145] 陈忠, 刘昭蜀, 陈森强等. 南海围区中、新生代古地磁特征与南海地质构造演化. 热带海洋, 1987, 6 (3): 21 ~29
- [146] 胡世玲, 邹海波, 周新民. 安徽歙县堇青石花岗岩和江西德兴钠长花岗岩中白云母和青铝闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其意义. 见: 李继亮主编. 东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京: 冶金出版社. 1993. 141 ~174
- [147] 陈江峰, 周泰禧, 李学明等. 中国东南地区中生代岩浆岩的 Sr、Nd 同位素组成及其大地构造意义. 见: 李继亮主编. 中国东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京: 冶金出版社. 1993. 119 ~130
- [148] 杨开庆, 董树文. 论地壳物质的构造动力调整作用. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1986, (7): 15 ~22
- [149] 孙大中, 胡维兴. 中条山前寒武纪年代构造格架和年代地壳结构. 北京: 地质出版社. 1993. 118 ~131
- [150] 陆现彩, 胡文渲, 顾连兴. 地幔对流及其对地壳表层拉张盆地的影响. 地学前缘, 1998, 5 (增刊): 184 ~190
- [151] 饶家荣, 王纪恒, 曹一中. 湖南深部构造. 湖南地质, 1993, 7 (增刊): 50
- [152] 赵国春, 孙德有, 贺同兴. 中国东南部变质基底变质作用和地壳演化. 北京: 地震出版社. 1994. 11 ~27
- [153] 丁国瑜等. 中国岩石圈动力学概论. 北京: 地震出版社. 1991
- [154] Rangin P H, Laepichon X et al. Cenozoic information of central and South Vitnam. Tectonophysics, 1995, (251): 179 ~196
- [155] 丘元禧, 陈焕疆主编. 云开大山及其邻区地质构造论文集. 北京: 地质出版社. 1993. 1 ~27
- [156] 邹和平, 王建华, 丘元禧. 广东南澳和莲花山韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其地质意义. 地球学报, 2 (4): 356 ~364
- [157] Dewey et al. 青藏高原的构造演化. 见: 青藏高原地质演化. 北京: 科学出版社. 1990
- [158] 汪品先. 亚洲形变与全球变冷——探索气候与构造的关系. 第四纪研究, 1998, (3): 213 ~239
- [159] 李四光. 关于地质构造的三重基本概念. 地质学报, 33 (4), 233 ~260
- [160] 丘元禧, 邱津松, 李建超等. 广东莲花山断裂带中生代多期复合变形变质带的基本特征及其形成机制. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 1991, (14): 93 ~102
- [161] Dickinson WR. Am. Jour. Sci. 1971. 551 ~576
- [162] 李继亮. 全球构造中的沉积作用. 见: 构造地质学进展. 北京: 科学出版社. 1982. 201 ~213
- [163] 从柏林. 全球构造格局中的火成岩组合. 见: 构造地质学进展. 北京: 科学出版社. 1982. 190 ~200
- [164] 从柏林. 全球构造格局中的变质作用. 见: 构造地质学进展. 北京: 科学出版社. 1982. 214 ~222
- [165] Pitcher W S. Granite type and tectonic environment. In: Hsu K et al. (eds). Mountain building processes. Academic Press, London, 1983. : 19 ~40
- [166] Miyashiro A. Metamorphism and metamorphic rocks. New York: McGraw-Hill, 1972
- [167] 孙岩, 徐士进, 刘德良等. 断裂构造地球化学导论. 北京: 科学出版社. 1998. 33 ~73
- [168] 吕古贤, 王方正, 齐瑞珣. 超高压变质的构造附加压力与形成深度. 北京: 科学出版社. 2003

- [169] John B M, Martineau F, Peucat J J et al. Geochronology of the tananao, schist complexes, Taiwan and its regional tectonic significance. *Tectonophysics*, 1986, vol 125 (3): 87 ~102
- [170] 陈国达. 成矿构造研究法. 北京: 地质出版社. 1978. 270 ~280
- [171] 丘元禧, 董树文. 试论构造相、构造相系和构造相序列. *中国区域地质*, 1991, (3): 262 ~271
- [172] 陈国达. 广东境内燕山运动的构造型相. *地质论评*, 1937, 2 (1): 45 ~47
- [173] 傅昭仁, 单文琅, 葛梦春. 变质岩层构造的形变相分析. *地球科学*, 1983, (3): 63 ~72
- [174] E. U. 帕塔拉哈. 构造相分析: 产生与发展. *国外地质科技*, 1987, (5): 1 ~11
- [175] Mattauer. 地壳变形 (中译本). 北京: 地质出版社. 1984. 120 ~129
- [176] 李四光. 关于改进构造地质工作的几点意见 (第一届全国构造会议上的讲话). 李四光遗著整理. 1965, 323 ~340
- [177] 杨开庆. 关于构造控岩控矿与成岩成矿问题. *地质力学论丛*, 1982, 第6号. 9 ~18
- [178] 马杏垣. 解析构造学刍议. *地球科学*, 1983 (3): 1 ~9
- [179] 许靖华. 大地构造相. 中国科学院青岛海洋研究所 (内部报告). 1990
- [180] 李继亮. 中国东南地区大地构造基本问题. 见: 李继亮主编: 中国东南海陆岩石圈结构与演化研究. 北京: 中国科学技术出版社. 1992. 3 ~17
- [181] 孙岩等. 断裂构造岩带的划分. 北京: 科学出版社. 1985
- [182] 孙岩, 徐士进, 刘德良等. 断裂构造地球化学导论. 北京: 科学出版社. 1998. 33 ~73
- [183] Sibson R G. Fault rocks and fault mechanism. *J. Geol Soc. Lond.* 1977, (133): 191 ~213
- [184] 董树文. 长江中下游地壳物质的构造动力调整作用. *地质学报*, 1989, (2): 97 ~110
- [185] Ramsay J G. Shear zone geometry: a review. *J. struc. Geol.* 1980. 2 (1/2): 83 ~99
- [186] 丘元禧等. 中国东南陆缘带及其邻近海域中生代晚期、新生代的裂陷作用. *热带海洋*, 1986, (2): 3 ~11
- [187] Qiu Yuanxi, Wu Qijun, Ji Xiong et al. 1991 Meso-cenozoic taphrogeny and dispersion in the continental margin of southeast China and adjacent seas. *Tectonophysics* 1997: 257 ~269
- [188] 肖庆辉, 李晓波, 刘树臣等. 当代地质科学前沿概述. 见: 当代地质科学前沿. 武汉: 中国地质大学出版社. 1993. 3 ~6
- [189] Robert M West. *Palaeontology and plate tectonics*. 1997
- [190] 吴根耀. 造山带地层学. 成都: 四川科学技术出版社. 2000. 1 ~20
- [191] Fountain D M et al. EPSI, Exposed cross sections through the continental crust: implications for crustal structure, petrology and evolution. , 1981, (56): 263 ~277
- [192] England P C, Thompson A B. Pressure-temperature - time paths of regional metamorphism. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 894 ~955
- [193] 刘树臣. 沉积学与油气地质学概述. 见: 当代地质科学前沿. 武汉: 中国地质大学出版社. 1983. 420
- [194] Meyerhoff A A, Joner I, Morris A E L et al. Surge tectonics: a new hypothesis of earth tectonics. In: Chatterjee S et al. *New concepts in global tectonics*. Lubbock: Texas Tech. Univ. Press, 1992
- [195] 滕吉文. 20 世纪地球物理学的重要成就和 21 世纪的发展前沿. *地学前缘*, 2003, 10 (1): 117 ~140
- [196] Dziewonski A M, Woodhouse J H. Global image of the Earth's interior. *Science*, 1987, (236): 37 ~48
- [197] Dziewonski A M, Alessandro M F, Su Weigang et al. Seismic tomography and geodynamics relating geophysical structures and processes. In: *The jeffreys volume*. Washington DC: American Geophysical Union, 1993, 16, 76
- [198] Knittle E, Jeanloz R. Earth's core-mantle boundary. *IUGG*, 1991, (16): 53 ~66
- [199] Wilson J T. Mantle plumes and plate motions. *Tectonophysics*, 1973, (19): 149 ~164
- [200] Morgan W J. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 1971, (230): 42 ~43
- [201] Prodehl C. The structure of the crust - mantle boundary beneath North America and Europe as derived from explosion seismology. In: Hencok J Ged. *The earth's crust*. Am. Geophys Union Monogr, 1997, (20): 349 ~369
- [202] Braille W, Ching C S. The continental mohorovicic discontinuity results from near-vertical and wide angle seismic reflection studies. *Geodynamics Services*, 1986, (13): 257 ~272
- [203] Hager B H. Lower mantle heterogeneity, dynamic topography and the geoid. *Nature*, 1985, 313 (14): 541 ~545

- [204] Hong H J et al. Effect on surface deformations and geoid anomalies from equation of state and the styles of viscosity parameterization, Terra. Cognita, 1986, (6): 6
- [205] Hong H J David A Yuan Dynamical influence on Topography and Geoid from recent high-pressure experiment: Variations of $\ln V/d\ln p$ with depth. EOS., 1989, 70: T51A ~7
- [206] Hong H J et al. Dynamical effects from equation of state on topographies and geoid anomalies due to internal loading. Jour. Geophys. Res., 1990, 95 (B12): 1993 ~1994
- [207] Pekeris C L, Accad Y. Dynamics of the liquid core of the earth. Phil. Trans. Roy. Soc. A, 1972, 273: 1233
- [208] Smolje M L. The scale equations of infinitesimal elastic-gravitational motion for a rotating, slightly elliptical Earth. Geophys. Jour. Roy. Astr. Soc., 1974, 37: 491 ~526
- [209] Melchior P. The physics of the Earth's core: An introduction. Oxford: Pergamon Press, 1986
- [210] Valet J. P, Meynadier L. Geomagnetic field intensity and reversals during the past four million years. Nature, 1993, 366: 234 ~238
- [211] 廖德春, 郑大伟. 地球自转研究新进展. 地球科学新进展, 1996, 11 (6): 543 ~548
- [216] 吴锡浩, 蒋复动, 肖华国. 地球公转轨道偏心率变化的构造运动响应. 地质力学学报, 1995, 1 (1): 8 ~14
- [217] 吴淦国. 继往开来·发展地质力学. 地质力学学报, 1996, 2 (1): 1 ~5
- [218] 地质力学学报编辑部. 创中华牌. 走自己路——贺地质力学研究所建所 40 周年. 地质力学学报, 1996, 2 (1): 6 ~7
- [219] 吴珍汉. 大陆动力学研究的若干趋势. 地质力学学报, 1996, 2 (3): 1 ~2
- [220] 吴珍汉. 全球构造运动与地球自转相关性的新证据. 地质力学学报, 1995, 1 (3): 46 ~54
- [221] 张永鸿. 地球圈层耦合扭转机制及其成因. 地质力学学报, 1999, 5 (2): 29 ~37
- [222] 钱维宏. 南半球大陆及岛屿的分布与地球自转长期减慢. 地质科学, 1992 (3): 305 ~308
- [223] 任振球. 天文因素对火山爆发的调制、触发作用. 第四纪研究, 1993 (1): 56 ~65
- [224] 叶淑华等. 现代地壳运动和地球动力学研究. 见: 天地之间—天文地球动力学论文集. 上海: 上海科技教育出版社, 1997
- [225] 赵铭. 地球自转速率变化与中国大陆地震韵律的关系. 科学通报, 1990 (18): 1402 ~1405
- [226] 郑大伟, 周永宏. 地球自转变化与全球地震活动关系的研究. 地震学报, 17 (1): 25 ~30
- [227] 郑大伟, 陈剑利, 华美敏等. 地球自转速率对海平面纬向变化影响的初步研究. 天文学报, 1996, 37 (1): 97 ~104
- [228] 周永宏, 郑大伟. 地球自转变化与中国大陆地震活动关系的初步分析. 中国科学院上海天文台年刊, 1994, (15): 1 ~8