

构造地貌及其分析方法述评

王 岸^a, 王国灿^b

(中国地质大学 a. 研究生院; b. 地球科学学院, 武汉 430074)

摘 要:构造地貌是指受构造内动力作用控制,通过内外地质动力的相互作用所奠定的能够反映一定构造特征的地貌形式。构造地貌学的研究内容为:地貌与构造的关系、构造地貌发生和发展过程以及构造地貌过程所揭示的地球内部构造动力过程;其分析方法可归纳为构造地貌格局分析法、构造地貌形态分析法、构造地貌相关沉积分析法和构造地貌年代分析法。构造地貌学从地形地貌的角度来分析构造过程,涉及不同圈层间的相互作用,响应了当前地球系统科学的研究思路,可以预见,构造地貌学将在圈层作用研究中发挥重要作用,同时朝着信息化、量化的方向发展。

关键词:构造地貌;构造地貌学;分析方法

中图分类号: P541

文献标识码: A

文章编号: 1000-7849(2005)04-0007-06

1 构造地貌及构造地貌学发展历史

构造地貌是指受构造内动力作用控制,通过内外地质动力的相互作用所奠定的能够反映一定构造特征的地貌形式。最近吴珍汉等^[1]把地球内动力、构造运动与内外动力耦合所导致的地壳表部的不同形态、不同规模、不同特点的地貌都称为构造地貌。由于构造地貌在外动力作用下随着时间的推移会变得越来越模糊,因此不少学者强调构造地貌主要是新构造活动控制下的地貌^[2,3]。这里,笔者强调构造地貌是由构造作用和其他各种外动力综合作用形成的地貌或地形,它不囿于某种特定的性质,既可以是实体性质的地貌,例如断陷盆地、隆起的山脉、火山地貌等,也可以是构造作用的地貌形态或地形,例如断层线、断层面、地垒、古夷平面等,重要的是它能够反映一定的构造特征,Ufimtsev^[3]也曾强调构造地貌实际上是构造的第三副面孔。虽然,新构造运动的构造地貌表现得更为清楚,但构造地貌不应只限于新构造运动时期的地貌,一切能够体现构造特征的地貌形式都应归结为构造地貌的范畴。

构造地貌学是一门介于地貌学、地球动力学、构造地质学之间的边缘学科^[2,4]。其研究内容是:地貌与构造的关系、构造地貌发生和发展过程以及构造地貌过程所揭示的地球内部构造动力过程。地貌学产生的早期就已经涉及到了构造地貌这一术语,但是直到20世纪中期新构造运动研究的广泛开展

以及20世纪60年代板块构造理论的诞生,构造地貌学才作为一门独立的学科从地貌学中分化出来。构造地貌研究经历了早期的静态构造地貌研究和20世纪60年代以后的动态构造地貌研究2个阶段^[2,5]。早期的静态构造地貌研究主要局限于老地质构造在外动力作用下被侵蚀剥露而显现于地表的地貌的研究,侧重于岩性、产状与地貌间关系的阐述,例如反映地貌与地质构造形态之间关系的背斜山(谷)、向斜山(谷)等。动态构造地貌研究则强调通过地表地貌的研究来揭示岩石圈的构造运动,强调地貌的内动力作用过程,并力图排除外动力作用的干扰。一般而言,动态构造地貌研究主要涉及的是由岩石圈不同规模、层次的各种构造运动所形成的地表地貌形态,由于它受地球内部物质运动(内动力)主导,所以有人也称为内动力地貌。然而,构造地貌学的研究对象并不仅仅局限于内动力地貌,地壳表层的地貌形态纷繁芜杂,但它们主要是在内、外动力及其相互作用下形成的,单一动力成因的地貌很少,更多的是2种作用的综合产物。因此构造地貌学的研究任务就是通过分析地貌的特征,包括相关沉积,揭示地貌在内、外动力作用下的产生与发育规律,探寻构造地貌塑造过程中的构造制约因素。

中国最早涉及构造地貌研究的学者应属李四光。他很早就注意到中国大陆的三大地貌阶梯,并结合中国大陆及全球宏观地貌(山盆地貌)展布的空

收稿日期:2005-02-20

编辑:黄秉艳

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40372104;40072062);中国地质调查局项目“青海1:25万库赛湖幅(I46C001002)、不冻泉幅(I46C001003)区域地质调查”(200313000005)

作者简介:王 岸(1980—),男,现正攻读构造地质学专业博士学位,主要从事构造地貌研究。

间规律性,提出了构造体系的概念,以此解释中国及全球构造地貌特征。20世纪70年代国内学者开始以板块构造理论为指导研究中国大陆宏观地貌特征,并取得了许多重要进展。金性春等^[6]依据板块边界性质对板块边界地貌进行了类型划分和实例分析;杨怀仁^[7]提出了造貌运动的概念,认为形成中国中东部“地貌波”的造貌运动具有断块波状运动的特点。20世纪80年代以后(特别是90年代)构造地貌学的研究对象和方法都发生了变化,学科本身也出现了分支学科(例如大地貌学^[8,9]),研究对象不再局限于地质构造对外动力作用适应的静态构造地貌和宏观(山脉、盆地)地貌格局,而扩展到包括断裂地貌、构造盆地、水系地貌、山脉形态以及相关沉积体系等各种规模和类型的地貌;研究方法也逐渐系统化,引入了统计学、地形测高等新方法。

2 构造地貌分析方法

构造地貌学的分析方法可以归结为构造地貌格局分析法、构造地貌形态分析法、构造地貌相关沉积分析法和构造地貌年代分析法4种类型。

2.1 构造地貌格局分析法

构造地貌格局是指由于地壳构造运动形成的各种地貌体(山脉、台地、盆地、谷地、新隆起、新凹陷、水系等)在三维空间上的规律排列组合^[2],例如山脉和盆地的定向间隔展布;火山岛屿、地震鼓包、湖泊等的线性排列;河流的各种空间分布规律(放射状、向心状、倒钩状、格状等各种水系形式)等,这种空间规律性的本质在于存在统一的构造环境,而构造地貌格局的分析旨在阐明这种构造环境。水系格局往往反映的是流域内地质构造和活动构造的综合作用,例如东昆仑地区存在东西向和南北向2种形式的水系,分别是在早期东西向的断裂活动和后期盆地快速差异隆升作用下而形成的^[10,11];山西地堑系中一系列北北东向、北东向的雁列式断陷盆地地貌格局是在北北东向、北东向的右行平移断层作用下形成的^[12];Scheidegger^[13]详细统计了大西洋 Macaronesia 群岛诸岛屿的构造地貌参数[包括2组火山岩熔岩节理、2组水系(河谷)方位、2组山脊方位],这些构造地貌参数在加那利群岛和马德拉群岛之间的同一性说明二者成因的一致性(图1),而从亚速尔群岛经马德拉群岛、加那利群岛到佛得角群岛之间,上述构造地貌参数具有逆时针旋转的特点,反映的是大洋板块的拖拽旋转及其导致的非洲板块以马德拉群岛西部为轴心的逆时针旋转特征。

以上的例子足以说明,构造地貌格局在三维空

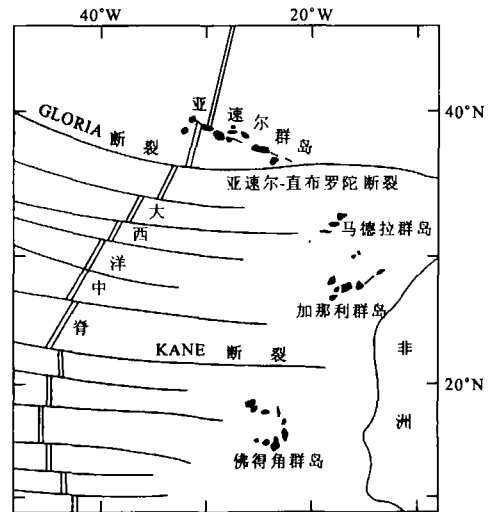


图1 大西洋 Macaronesia 群岛及其与中大西洋中脊和相关水下断层线的相对位置图^[13]

Fig. 1 Map of Macaronesia in Atlantic, including its setting with regard to the mid-Atlantic ridge and pertinent submarine fault lines

间上排列组合的规律性是在统一的构造因素(地质构造、活动构造或应力场)作用下的客观地貌表现,这种规律性的揭示常常是解决动力问题的突破口,因此构造地貌格局的分析作为一种方法应该得到充分重视。但是构造地貌格局反映了地壳表层地貌分布的特征或规律,控制其形成的动力条件往往是多层次的,壳内不同流变性质的多层圈可以在不同层次上塑造地壳表层的构造地貌,同时动力条件也会随时间而发生演变。全球洋陆分布、大型山脉展布、洋中脊、俯冲带和北半球纬向造山带等构造系统在南北半球以及东西半球的不对称性^[14]等宏观构造地貌格局蕴藏着全球动力的内在联系,而全球动力的复杂性也是显而易见的,因此只有结合圈层构造系统对刚性岩石圈表层形态作用进行研究,同时注意浅部与深部作用的差异性,才能解决宏观构造地貌格局的动力问题。

2.2 构造地貌形态分析法

地壳表层的各种地貌单元是在一定的地质基础之上由内、外力综合作用的结果,形态作为地貌的主要方面蕴含着地质构造和近期构造活动的丰富信息。构造地貌的形态分析法一般对地貌地形的形态特征进行分析,从中识别和区分出地质构造及活动构造等内动力和各种外力因素的作用。易行、有效的手段主要有水系结构形态分析和地形形态分析2个方面。

2.2.1 水系结构形态分析 水系结构形态对流域

内构造作用的反映不仅极为敏感,而且是多方面的,所以河流结构形态分析在构造地貌研究中是一种使用频率较高且较有效的方法。河流的平面结构形态受地质构造、活动构造影响的表现非常明显,例如昆仑山北坡的河流多处表现为“丁”字形水系,李长安等^[10]和王岸等^[11]的研究表明,这种水系结构形态是昆仑山脉隆升导致南北向河流袭夺构造控制的東西向河流的直接结果;Spitz 等^[15]对密西西比河的研究表明,局部的河流曲度、走向等平面形态的异常与断层、岩体等构造存在很好的相关性。河流的纵横剖面形态同样也会因构造因素而发生变形和自身调整,甚至河型都会发生改变^[16]。

根据理论推算,当流域物质均匀,且理论上发育达到均衡时,河流纵剖面呈凹形曲线(图 2),均衡河流在纵剖面上的河高(h)与距河源的河流长度(l)呈线性对数关系^[17]:

$$h = c - klg l$$

式中: c 为截距常数; k 为河床梯度指数。

然而,实际的河流受地质构造、气候等因素的干扰, $h-l$ 线性对数关系在整个河流流域是分段拟合的,这就使得河高(h)—对数河流长度($lg l$)剖面(以下称 Hack 剖面)呈折线形,河床梯度指数剖面呈起伏不规则的阶梯状。河段梯度指数的异常与河段岩层的抗蚀性、构造作用等有关^[18],一般认为河床梯度异常与河段岩层的强抗蚀性或断层活动相对应。Chen 等^[19]对台湾西部诸多河流形态的调查结果也显示,河段地层的抗蚀性、小型地质构造,包括向斜、背斜、断层等对河流的河床梯度指数都有不同程度的控制作用(图 3);Brookfield^[18]对喜马拉雅及

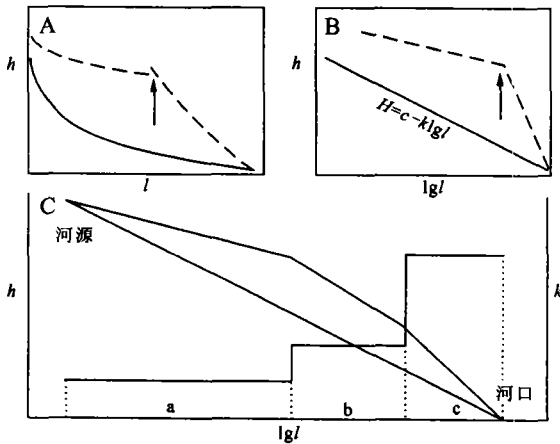


图 2 河流均衡剖面对河床抬升的响应模型
(据文献[7]修改)

Fig. 2 Responsive model of graded river to river bed uplift
A. 纵剖面; B. Hack 剖面; C. 实际河流的 Hack 和 k 剖面综合图
(a, b, c 三段分别拟合)

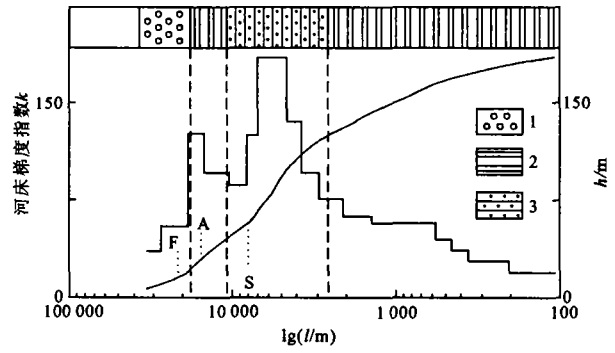


图 3 台湾西部 Kwechuong 河流的 Hack 和 k 剖面综合图
(据文献[19]修改)

Fig. 3 Hack and k profiles of Kwechuong river in eastern Taiwan
1. 砾石相; 2. 页岩; 3. 砂岩; F. 断层; A. 背斜; S. 向斜

邻区调查发现,河流的 Hack 剖面均为上凸曲线,显示该区为典型的强烈构造抬升地区。

水系结构形态作为最常见的流域构造分析手段,其优势和潜力是显而易见的。水系的形态异常,特别是河床梯度指数、Hack 剖面的异常能够很好地反映不同规模和性质的构造因素的作用。需要说明的是无论是河床梯度指数剖面还是 Hack 剖面的异常都有一个对应的河段尺度,局部的异常一般是断层、岩性等小型构造因素所致,而流域性质的异常则可能是流域整体隆升所致。

2.2.2 地形形态分析 内动力作为内因对现今地壳表层的高山、高原、深谷等地貌形态的形成起着根本的作用,外动力作为外因对地形地势进行改造。随着时间的累积,外动力作用效果会越来越明显,并向降低地势、形成夷平面的方向发展。年轻内动力作用形成的地形地貌,由于外动力作用时间相对较短,改造作用有限,内动力作用的特点在地形上的表现相对明显,因此通过对年轻地形地势的恢复和分析可以得到内动力作用性质和过程的重要信息。Ufimtsev^[3]分析了西伯利亚地区山脉、贝加尔裂谷等地形横剖面的特征,考虑外动力因素的影响,很好地识别了一系列的拱曲抬升、地垒、裂谷等构造地貌。Magnus^[20]通过数字高程模型(DEM)对前寒武纪的夷平面进行了识别,并在此基础上对受后期断块抬升的散裂夷平面进行了趋势面回归分析,得到了与散裂夷面对应的断块的几何运动特征。

地形测高(hypsometry)方法是分析地形的构造信息的有效方法,近年来得到广泛应用^[19,21,22]。常用的地形测高方法有测高曲线^[23]和测高积分(hypsometric integral)2种。测高曲线反映的是流域内某一高度以上的面积与整个流域面积的比值,即相对面积比例随高度变化的规律;测高积分为测高曲

线以下的面积,反映的是流域内未被剥蚀的物质体积比例。通常,测高积分与构造隆升速率呈正相关^[19],反映的是内、外动力相对强弱的关系,如果构造隆升微弱,外动力的剥蚀效果就会显著,从而降低测高积分;反之如果构造隆升强烈,在外动力作用得到加强的同时,占主导地位的隆升作用仍会导致测高积分的增高。

地形测高反映的是区域上的地形特征,而河流纵剖面、地形剖面等反映的则是剖面线上的地形信息,二者可以相互补充;地形特征是构造作用和剥蚀作用的共同结果,因此在利用上述方法时,要在对外动力作用深刻认识的基础上分析构造因素的作用。例如在同一区域,冰川区的冰蚀作用和冰缘区的冰水侵蚀作用对测高曲线有不同程度的影响^[21]。在比较测高曲线时,要考虑外动力作用的差异性,而不能将其简单归结为构造因素的作用;此外,测高曲线以及上述的河床梯度指数等都是依赖于空间尺度的参数,即不同的流域面积或不同河段测高曲线及河床梯度指数可能是不同的,因此在比较这些参数时要注意它们是否具有可比性,这也是在形态分析方法运用中应注意的一个重要问题。

2.3 构造地貌相关沉积分析法

在地表地形地貌的塑造过程中,内动力作用的结果一般趋向于增高地形地势,而地形地势的增高则促进了外动力的作用;与内动力作用相反,外动力作用增强的直接结果是降低地形地势,同时形成相关的沉积体系,因此相关沉积与内动力作用在地形地势方面是一种耦合的关系,例如山前磨拉石沉积反映的是相邻山脉的隆升和地势的加剧。构造地貌相关沉积分析旨在通过对与地貌发育过程相关的沉积体系进行相分析和沉积动力分析,结合沉积物的年代测定,探究地貌的变迁和构造过程信息。例如断层的多期活动会在断层崖下形成楔状沉积物,这种楔状沉积物的沉积特征可以作为断层多期活动的证据。同样,盆地的形成不仅仅是形态过程,盆地内部的充填序列与盆地及边缘山脉的构造活动是息息相关的。青藏高原北部垭口盆地^[24]第四纪以来的沉积相演变完整地记录了盆地的形成与消亡过程,反映了相邻昆仑山脉的隆升信息。最近的调查研究^[24,25]显示,昆仑山东段的第四纪沉积地层的空间分布、沉积物源与第四纪成山作用过程具有很好的耦合性。

毫无疑问,负地貌区发育的相关沉积相及沉积特征(碎屑粒度、分选、物源等)能够给邻区构造活动提供重要信息,但是相关沉积不一定是构造作

用的结果,气候具有部分甚至全部的等同作用。例如山前地带的洪积地貌体不一定代表山脉的隆升,河流阶地的堆积也不一定完全是构造作用所致。所以运用相关沉积分析时,首先要区分是构造沉积还是气候沉积,必要时还要在大区气候背景的基础上对气候的作用程度进行分析^[26]。

2.4 构造地貌年代分析法

20世纪80~90年代以来,一些针对年轻地质体系年代的测定技术得到了长足发展,并日趋成熟,在很大程度上赋予了构造地貌学新的活力。如磷灰石裂变径迹或(U-Th)-He等低封闭温度测年体系使我们能够直接确定年轻山系的抬升速率或年轻构造的活动时间,¹⁰Be、²⁶Al等宇宙核素测年方法使我们能确定地表基岩的暴露年龄和剥蚀速率,这些方法的合理、有效使用为构造地貌发育过程的研究提供了很好的时间坐标。这里并不对年轻地质体系的测年技术进行赘述,而是侧重于测年体系在构造地貌结构分析方面的应用。构造地貌的结构是指在多时期或多阶段的构造运动作用下形成的,同一地貌体内新、老地层之间,或者新、老地貌体之间的层次组合。地貌结构的本质在于地貌体各物质单元的形成存在先后关系,因而,构造地貌的结构分析是构造地貌年代测定的基础,以下结合实例说明之。一般认为河流阶地是构造抬升、气候变化或侵蚀基准面下降等作用的产物,实际情况往往是上述3种作用的交替和叠加的综合作用,使得阶地结构和类型变得复杂。图4为昆仑河5级阶地结构图,5级阶地均属堆积性质的阶地,其上堆积了自身的冲积物,T4-T1阶地与T5阶地均为上叠的关系,即T4-T1每级阶地都代表了切割其他先成阶地和T5沉积物以及堆积自身冲积物2个过程,各沉积单元的形成序列及年龄数据^②如图4所示。图5为中欧喀尔巴阡山区气候控制下的阶地结构剖面,根据侵蚀和切割关系同样可以判断各沉积单元的形成序列。

有时构造地貌不能直接测年,这类构造地貌一般没有或极少有同构造的沉积体,这时需要对地质背景进行具体分析,通过相关沉积、切割关系和其他同期地质体来限定构造地貌的年代。夷平面的年代研究是最好的例子,崔之久等^[29]采用裂变径迹方法测定了与青藏高原主夷平面同期发育的溶洞再生方解石的形成年龄(19.0~7.0 Ma);李吉均等^[30]对覆盖在青藏高原主夷平面上的玄武岩进行了同位素年龄测定,限定了青藏高原主夷平面形成的上限年龄

② 青海省地质调查院. 1:5万青办食宿站幅区域地质调查报告[R]. 2003.

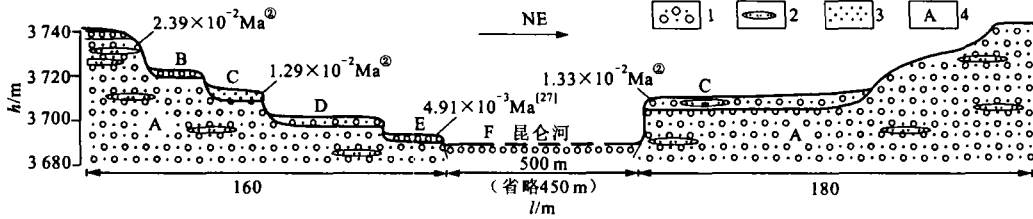


图 4 昆仑河阶地结构

Fig. 4 Structure of Kunlun river terraces

1. 河道砂砾沉积, 2. 砂质透镜体, 3. 河漫滩沉积, 4. A-F 沉积单元形成次序

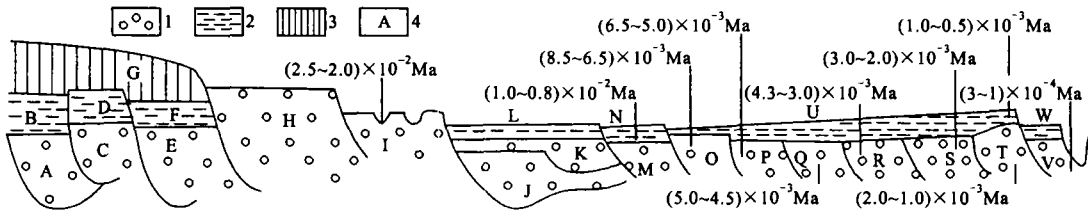


图 5 中欧喀尔巴阡山区气候阶地结构图(据文献[28]修改)

Fig. 5 Structure of climatic terraces in Carpathian Mountains, Central Europe

1. 河道沉积, 2. 河漫滩沉积, 3. 黄土, 4. A-W 沉积单元形成次序

(3.8~3.4 Ma);李炳元等^[31]通过被夷平的火山岩的同位素年龄测定,确定了青藏高原可可西里东部地区夷平面发育的下限年龄(9.90~6.95 Ma)。

构造地貌体或地貌相关沉积的形成往往与洪积、冲积、冰碛、火山岩等彼此交错叠加,形成复杂的地貌结构,因此必须根据沉积特征和交切关系以及分布位置对构造地貌进行结构分析,识别各地貌单元的形成序列,在此基础上借助释光、同位素等测年技术才能对构造地貌的年代作出符合客观实际的解释。

3 构造地貌研究发展趋势

20 世纪 90 年代以来构造地貌学研究呈现以下三大趋势。

(1) 圈层作用的研究 在地球系统科学概念的引导下,地质科学的研究越来越重视地球各圈层的演化和相互作用的规律,地球多圈层间的相互运动与作用是 21 世纪初地质学的前瞻性领域,而构造作用和各种内、外力耦合作用下形成的地球表层的各种构造地貌是各圈层相互作用的重要场所^[13]。因此,构造地貌研究具有广阔的发展空间。大时空尺度的构造地貌如高原隆升、洋陆变迁等构造地貌变迁的气候、生态效应是构造地貌学研究的一个重要方面^[32]。

(2) 信息数据的开发利用 20 世纪 90 年代以来,地理信息系统(GIS)的发展和数字高程模型

(DEM)的建立使得过去的一些计算方法得到了复活,从现在的研究^[19~22,33~36]看,特别是数字高程模型(DEM)以其数据获取便捷、可计算性等优点在构造地貌学研究中已经不可或缺,例如 Florinsky^[33]从数字高程模型(DEM)数据中提取地形线性特征数据,对不同性质断层的识别都取得了很好的效果;此外,遥感(RS)、全球定位系统(GPS)等信息技术的发掘利用也是至关重要的,因此信息数据的开发利用将存在极其广阔的前景。

(3) 定量化发展 构造地貌学的研究方法正向着定量化的方向发展。Keith 等^[37]利用多种地形相关参数和统计学方法将不同时代和岩性地层的抗蚀能力相对量化,探讨了地貌和构造的关系,尽管这方面还存在诸多问题,但是这种将定性描述定量化的尝试必将得到更广泛的发展和运用。此外,常规的热年代学方法及近年发展起来的宇宙核素、(U-Th)-He 等新测年技术,以及上述的信息数据的开发利用都将在构造地貌学定量化研究中发挥重要作用。

参考文献:

[1] 吴珍汉,吴中海,江万,等. 中国大陆及邻区新生代构造—地貌演化过程与机理[M]. 北京:地质出版社,2001,1—5.
 [2] 韩慕康. 构造地貌学[J]. 地球科学进展,1992,7(5),61—62.
 [3] Ufimtsev G F. The Third Face of Tectonics—Tectonic Analysis of Relief[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(1—2): 9—18.
 [4] 严钦尚,曾昭璇. 地貌学[M]. 北京:高等教育出版社,1985:1—

- 4.
- [5] 王乃樑,韩慕康. 构造地貌学的理论、方法、应用与动向[A]. 见:中国地理学会地貌专业委员会. 中国地理学会第一次构造地貌学术讨论会论文集[C]. 北京:科学出版社,1984;1-9.
- [6] 金性春,莫惠林. 板块和地貌[A]. 见:中国地理学会地貌专业委员会. 中国地理学会第一次构造地貌学术讨论会论文集[C]. 北京:科学出版社,1984;207-209.
- [7] 杨怀仁. 中国造貌运动与地貌学基本理论问题[A]. 见:中国地理学会地貌专业委员会. 中国地理学会1977年地貌学术讨论会文集[C]. 北京:科学出版社,1981;334-339.
- [8] Summerfield M A. Tectonic Geomorphology; Macroscale Perspectives[J]. *Progress in Physical Geography*, 1986, 10(2): 227-238.
- [9] 程绍平,杨桂枝. 大地貌学研究进展综述[J]. *地球科学进展*, 1994, 9(1): 1-7.
- [10] 李长安,殷鸿福,于庆文. 东昆仑构造隆升与水系演化及其发展趋势[J]. *科学通报*, 1999, 44(2): 211-213.
- [11] 王岸,王国灿,向树元. 东昆仑山东段北坡河流阶地发育及其与构造隆升的关系[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2003, 28(6): 675-679.
- [12] Li Youli, Yang Jingchun, Xia Zhengkai, et al. Tectonic Geomorphology in the Shanxi Graben System, Northern China[J]. *Geomorphology*, 1998, 23(1): 77-89.
- [13] Scheidegger A E. Morphometric Analysis and Its Relation to Tectonics in Macaronesia[J]. *Geomorphology*, 2002, 46(1-2): 95-115.
- [14] 马宗晋,杜品任,卢苗安. 地球的多圈层相互作用[J]. *地学前缘*, 2001, 8(1): 3-8.
- [15] Spitz W J, Schumm S A. Tectonic Geomorphology of the Mississippi Valley Between Osceola, Arkansas and Friars Point, Mississippi[J]. *Engineering Geology*, 1997, 46(3-4): 259-280.
- [16] Holbrook J, Schumm S A. Geomorphic and Sedimentary Response of Rivers to Tectonic Deformation; A Brief Review and Critique of a Tool for Recognizing Subtle Epeirogenic Deformation in Modern and Ancient Settings[J]. *Tectonophysics*, 1999, 305(1-3): 287-306.
- [17] Hack J T. Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index [J]. *Journal of Research of the U. S. Geological Survey*, 1973, 1(4): 421-429.
- [18] Brookfield M E. The Evolution of the Great River Systems of Southern Asia During the Cenozoic India-Asia Collision; Rivers Draining Southwards[J]. *Geomorphology*, 1998, 22(3-4): 285-312.
- [19] Chen Yenchieh, Sung Quocheng, Cheng Kuangyu. Along-Strike Variations of Morphotectonic Features in the Western Foot-hills of Taiwan; Tectonic Implications Based on Stream-Gradient and Hypsometric Analysis[J]. *Geomorphology*, 2003, 56(1-2): 109-137.
- [20] Magnus J. Analysis of Digital Elevation Data for Palaeosurfaces in South-Western Sweden[J]. *Geomorphology*, 1999, 26(4): 279-295.
- [21] Michael P B, John F S J, Radoslav B, et al. Geomorphic Change in High Mountains, A Western Himalayan Perspective [J]. *Global and Planetary Change*, 2002, 32(4): 311-329.
- [22] Jamieson S S R, Sinclair H D, Kirstein L A, et al. Tectonic Forcing of Longitudinal Valleys in the Himalaya; Morphological Analysis of the Ladakh Batholith, North India[J]. *Geomorphology*, 2004, 58(1-4): 49-65.
- [23] Strahler A N. Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography[J]. *Geological Society of America*, 1952, 63(11): 1117-1142.
- [24] Wu Yongqiu, Cui Zhijiu, Liu Gengnian, et al. Quaternary Geomorphological Evolution of the Kunlun Pass Area and Uplift of the Qinghai-Xizang Tibet Plateau[J]. *Geomorphology*, 2001, 36(3-4): 203-216.
- [25] 王国灿,吴燕玲,向树元,等. 东昆仑东段第四纪成山作用过程与地貌变迁[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2003, 28(6): 583-592.
- [26] Molnar P, England P. Late Cenozoic Uplift of Mountain Ranges and Global Climate Change; Chicken or Egg? [J]. *Nature*, 1990, 346(6279): 29-34.
- [27] 吴锡浩,钱方. 格尔木河水系河谷地貌[A]. 见:地质矿产部青藏高原地质文集编委会. 青藏高原地质文集(4)[C]. 北京:地质出版社,1982;71-86.
- [28] Leszek S. Climatically Controlled Terraces in Uplifting Mountain Areas[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2003, 22(20): 2189-2198.
- [29] 崔之久,高全洲,刘耕年,等. 夷平面、古岩溶与青藏高原隆升[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(4): 378-386.
- [30] 李吉均,方小敏,潘保田,等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 381-390.
- [31] 李炳元,潘保田,高红山. 可可西里东部地区的夷平面与火山年代[J]. *第四纪研究*, 2002, 22(5): 397-405.
- [32] 卢苗安,马宗晋. 晚新生代全球构造地貌与环境变化研究进展[J]. *地学前缘*, 2003, 10: 45-49.
- [33] Florinsky I V. Quantitative Topographic Method of Fault Morphology Recognition[J]. *Geomorphology*, 1996, 16(2): 103-119.
- [34] Kühni A, Pfiffner O A. The Relief of the Swiss Alps and Adjacent Areas and Its Relation to Lithology and Structure; Topographic Analysis from a 250-m DEM [J]. *Geomorphology*, 2001, 41(4): 285-307.
- [35] 詹云军,薛重生. 长江荆江河段古决口扇遥感专题分析及成因研究[J]. *地质科技情报*, 2002, 21(4): 55-59.
- [36] 李江凤,刘吉平,汪华斌. 基于遥感技术的地质地貌旅游资源调查与研究——以清江流域为例[J]. *地质科技情报*, 1999, 18(2): 101-104.
- [37] Keith C, Nadhim S. A New Approach to the Relief of Great Britain(II); A Classification of Rocks Based on Relative Resistance to Denudation[J]. *Geomorphology*, 1998, 25(3-4): 155-171.

(下转第20页)

- 212.
- [60] 王砚耕, 王尚彦. 峨眉山大火山岩省与玄武岩铜矿——以贵州二叠纪玄武岩分布区为例[J]. 贵州地质, 2003, 20(1): 5-11.
- [61] Parsons B, Daly S. The Relationship between Surface Topography, Gravity Anomalies, and the Temperature Structure of Convection[J]. *J. Geophys. Res.*, 1983, 88: 1 129-1 144.
- [62] Fleitout L, Moriceau C. Topography and Geoid Anomalies due to Density Heterogeneities at the Base of Thermal Lithosphere; Application to Oceanic Swells and Small-Wavelength Geoid Lineations[J]. *Geophys. J. Int.*, 1991, 107: 265-277.
- [63] 王登红, 刘凤山, 楚萤石, 等. 峨眉地幔柱与杨柳坪铜镍铂族元素矿床[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [64] Orovetskii Y P. *Mantle Plumes* [M]. Vermont, USA: A. A. Balkema Publishers, 1999: 244.
- [65] Pirajno F. *Ore Deposits and Mantle Plumes* [M]. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 2000: 556.

Advances in the Numerical Simulation of the Mantle Plume

LI Jian-kang^{1,2}, WANG Deng-hong²

(1. School of Earth Sciences and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;
2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: Numerical simulation is an important method in the research of mantle plume. The math model consists of density and continuity equation, momentum conservation equation and energy conservation equation mainly. Many researches by numerical simulation overseas showed that mantle plume is driven by thermal buoyancy. While the fluid viscosity is crucially responsible for the shape and composition of the mantle plume. As the mantle plume can cause the thinning, thermal corrosion and surface elevation, it is possible to calculate quantitatively the velocity of the plume movement, melting volume and melting temperature in lithosphere. But these researches without focus on physical processes, without coupling with chemical dynamics. In China, Li Jiankang has developed software-MantlePlume1.0, and carried out a preliminary research on E'mei mantle plume. Although in this research some basic problems are solved, many problem remained to be resolved by advanced numerical simulation. These problems include the forming mechanism of E'mei plume, the basalt magma source of the basalt, the active center of basalt magma eruption, the time limitation of basalt magma eruption, the scale of the basalt magma eruption, the swelling and denuding level of lithosphere, temperature and pressure of the E'mei plume, and the forming mechanism of ruptures in the volcanic province.

Key words: mantle plume; numerical simulation; E'mei

(上接第12页)

Review on Morphotectonic and Its Analytical Methods

WANG An^a, WANG Guo-can^b

(a. Graduate School; b. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Tectonic landforms (or morphotectonics) are landforms that can reflect special tectonic characteristics. They are dominated by endogenic processes and are established by endogenic along with exogenic processes. Morphotectonics studies the occurrence and development of tectonic landforms as well as the relationship between landforms and tectonics, with an aim to reveal the dynamics in the earth. Four main analytical methods are identified in this paper: morphotectonic framework analysis, morphotectonic figure analysis, related sediment analysis and morphotectonic chronology analysis. Morphotectonics research relates to multi-sphere interaction of the earth from the viewpoint of geomorphology and is responsive to the Earth's system science. It can be foreseen that morphotectonics research will play an important role in the multi-sphere interaction research, and will trend towards digitalization and quantification.

Key words: tectonic landform; morphotectonics; analytical method