

文章编号: 1001-8166(2001)02-0153-10

# 地球化学省与地球化学边界\*

朱炳泉, 常向阳

(中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

**摘要:** 根据中国大陆各种类型壳、幔源岩石和矿石的大量铅—铀—钍同位素资料, 及全球特别是东亚大陆块体广泛的同位素与元素体系对比, 发展了地球化学块体划分的同位素地球化学指标和填图方法。在此基础上开展了中国大陆的大尺度铅同位素矢量填图, 确定了中国大陆主要地球化学省和地球化学急变带(边界)。地球化学边界的形成与板块的斜结合以及结合以后岩石圈结构调整产生的克拉通边界密切相关。地球化学边界与重力正异常梯度带、莫霍面梯度带以及正负磁异常转换带存在平行和交错两种关系。研究表明地球化学急变带控制了中国大陆 90% 以上的超大型金、铜、锡、银、镍、铅—锌、铀、钾盐、硼、镁、磷等(33 个)和 10 个以上的大型矿集区。地球化学省划分制约着全球油气资源分布, 而地球化学边界则具体控制着克拉通边缘前陆盆地中产油气位置。陆内六级以上强破坏性的浅源地震与克拉通边界——地球化学边界关系十分密切。喀斯特溶洞奇观的出现与地球化学边界关系同样相当密切。根据铅同位素地球化学填图确定的区域背景值可以对铅污染作出快速的定量评价。

**关键词:** 地球化学急变带; 地球化学省; 资源勘探评价; 环境与灾害

**中图分类号:** P59 **文献标识码:** A

## 1 地幔和地壳体系不均一性研究与地球化学省划分

20 世纪 70 年末许多学者通过洋岛玄武岩(OIB)、洋中脊玄武岩(MORB)与岛弧玄武岩(IAB)的 Nd、Sr、Pb 同位素研究, 发现了他们之间存在着明显的差异, 并提出了地幔垂向不均一的模型。根据板块构造演化模型, 认为 MORB 来自强亏损的上地幔, OIB 来自略亏损的下地幔, 而 IAB 代表了再循环的俯冲带地幔。80 年代初, 随着观察资料的增多, 地球化学家进一步发现同样的 OIB、MORB 或 IAB 在南半球与北半球, 在太平洋与印度洋存在着明显的差异。因此逐渐形成了地幔不但存在垂向不均一性, 而且存在横向不均一的概念。Zindler 等<sup>[1]</sup>不少学者提出了地幔存在若干端元组分的见解。这些组分端元包括 MORB、HIMU(高 $\mu$ )、EM 1、EM 2(富集

地幔 1 与 2) 与 PREMA(流行地幔)等。Dupre 等<sup>[2]</sup>进一步将“地幔端元”的概念扩展成“地幔域”的概念, 提出了南大洋存在 DUPAL 域异常。Hart<sup>[3]</sup>则进一步阐明了北半球参考线(NHRL), 并用与 NHRL 的相对偏差来定量描述 DUPAL 异常的铅同位素特征值。在这一基础上 Castilo<sup>[4]</sup>应用等值线处理描述了南半球 DUPAL 异常的分布范围与特征, 并将它解释为地幔上涌区。80 年代末至 90 年代, 一些研究者<sup>[5~11]</sup>致力于大洋玄武岩的详细的同位素体系填图, 修正了南半球异常这一不全面的认识, 提出了太平洋与印度洋地球化学省(域)的见解。这两个大洋地幔省在 Pb、Sr、Nb 同位素组成上存在明显的区别: 对于相近的<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 值, 印度洋比太平洋具有相对高的<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 与低的<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd。同时他们还发现两个省之间存在同位素组成的急剧变化, 称为地球化学急变带(geochemical discordance), 即地

\* 收稿日期: 2000-09-13; 修回日期: 2000-10-22.

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“大型矿集区分布规律和综合预测”(编号: G1999043213) 和攀登计划项目等联合资助。  
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net  
作者简介: 朱炳泉(1940-), 男, 浙江长兴县人, 研究员, 主要从事同位素地球化学等方面的研究工作。E-mail: bqzhu@gig.ac.cn

球化学边界。关于全球在主成分上大规模横向不均一方面有说服力的证据主要来自深部地震层析成像的研究。全球资料表明地幔中 S 波存在大尺度横向不均一性(1 000 ~ 2 400 km 范围),而且波速的变化与地幔部分熔融产生的玄武岩的 Fe 与 Na 含量之间存在明显的相关性。Humlér 等<sup>[12]</sup>统计了全球洋中脊玄武岩样品的主元素化学组成,经 MgO 标准化为 8% 后表明 Na 与 Fe 含量在南—北半球之间以及各大洋之间存在着显著差异,并存在着反相关。

同类型的大陆玄武岩各地区的差异也十分明显。80 年代中国东部与西南地区新生代玄武岩的 Nd、Sr、Pb 同位素与微量元素研究取得了大量资料<sup>[13~22]</sup>,发现了中国大陆地幔具有南亏损北富集的总规律和 4 种地幔端元组分(EM1、EM2、PM 与 PREMA),数据在多元同位素体系拓扑投影图上表现出明显的地域区分。在这一基础上进一步提出了地幔的地球化学区划。区划表明地幔分区(东北、华北、渤海、扬子与华南)与不同的大陆块体是相联系的,特别是不同大陆块体地幔与地壳的铅同位素组成几乎是同步变化的。

张本仁等<sup>[23,24]</sup>通过对秦巴地区华北、扬子块体上不同时代地幔派生岩石的大量主、微量元素与同位素体系研究,确定了上地幔平均值。不同方法确定的上地幔平均值均表明华北与扬子地幔的许多元素存在着明显的差异。扬子块体地幔铜含量是华北块体的 8~9 倍,铅含量为 3~4 倍;而金含量仅为华北块体的 1/3。同位素体系填图也表明华北、北秦岭、扬子是明显相区别的地球化学省。

近 10 年多来国内许多学者积累了中国大陆大量花岗岩长石铅同位素数据<sup>[25~27]</sup>。结果发现不同块体上同时代花岗岩长石铅同位素组成存在着非常明显的差异。张理刚据此提出了中国东部铅同位素构造省的划分。当对比中国大陆不同块体新生代火山岩(反映了上地幔源区)与中、新生代花岗岩长石铅同位素组成(代表上地壳组成)时则发现壳、幔之间铅同位素组成存在着明显的同步耦合变化,具有明显的块体效应<sup>[28,29]</sup>。因此地壳也表现出大尺度的横向不均一性。这些成果为研究地球块体的化学不均一性提供了重要的依据。总之,人们对于地幔与地壳体系的不均一性认识正像大地构造从槽台说(垂向运动)到板块说(横向运动)的发展一样,经历了从垂向不均一性的认识发展到对横向不均一的认识。它大体分成 3 个阶段:

早期阶段,通过现代大洋与大陆玄武岩的同位素组成研究已发现地幔中存在不同的端元组分。这些地幔端元同时包含着垂向与横向的不均一性的含义,但对于它们在地球三维空间的分布特征与大小并不是十分清楚。

(2) 地球化学域(domain)的确立。随着资料的积累增多,对地幔不均一性的认识逐渐有了区域性的概念。我们常把存在特定端元组分的区域称为“域”;但对于它的范围大小与边界不是十分清楚,或者本身就具有模糊分布的概念。如关于“低温成矿域”“DUPAL 异常域”等的提法均是这一范畴。

(3) 地球化学省(province)的划分。当地球化学域进一步研究得比较详细时,它的边界可以按一定的定义而被确定时,可称为地球化学省。这些地球化学域可以是综合的区域地球化学指标,也可以是单一特征地球化学指标。如严格区别于其它区域的特定成矿省、同位素与年龄省等。但是划分地球化学省的指标一般不是以水系或表土化探资料建立的化探异常图为基础,也不以地表岩石组合的化学成分分布图为基础(一般只作为参考资料),而是以能综合反映岩石圈层圈构造与化学演化,并记录与反映在现存状态中的地球化学资料为基础进行三维到四维空间填图。

地球化学示踪研究表明,同位素体系比元素体系更能抗地质干扰和保持稳定性,并具有很高的测量精度。地球化学填图实质上是区域性的大面积地球化学示踪。因此填图指标在有条件许可的情况下,首先必须选择同位素体系。铅同位素在不同块体的地壳与地幔之间的差异性远大于是 Nd、Sr 同位素体系。在不同块体的大洋与大陆地幔中, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的差值均在 2% 以上,有时可达到 20%,而 Sr 同位素一般在 0.7‰ 左右, Nd 同位素在 0.4‰ 左右。虽然 Nd、Sr 同位素比值的分析精度(十万分之几)要比 Pb 同位素比值(万分之几)高 1 个数量级,但由于铅同位素的变化度是 Nd、Sr 同位素的 2~3 个数量级,因此总的显示度铅同位素仍比 Nd、Sr 同位素高 1~2 个数量级。铅同位素有 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 与 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  3 个同位素比值,代表了 U-Pb 与 Th-Pb 两三个同位素体系。因此应用 3 个同位素比值的综合矢量在三维空间判别不同块体分辨率更高,填图可以更好地区分出块体的地球化学边界<sup>[29,30]</sup>。铅同位素在不同块体的地幔与地壳中存在明显的同步变化,可以进行壳幔体系的综合填图。目前已获得的同位素测量数据,铅同位

素要比其它同位素多得多, 而且广泛分布于各种幔源岩、壳源岩与矿床中, 分布面大、密度高。因此有可能在大面积范围内进行填图与等值线处理, 而其它同位素目前还不具备这一条件。

用于铅同位素填图的数据包括: ①中、新生代火山岩铅同位素组成; ②显生宙花岗岩长石与低U/Pb比全岩的铅同位素组成; ③主矿体的矿石铅同位素组成; ④麻粒岩相岩石铅同位素组成; ⑤前寒武纪泥质岩铅同位素组成的峰值(几何平均值)或最低值; ⑥原油与沥青的铅同位素组成。

根据中国大陆铅同位素平均值资料填图与等值线处理图, 将中国大陆划分成若干地球化学块体——铅同位素地球化学省: 暂时命名为华夏、青藏—印支、扬子、辽胶渤、中朝、佳木斯、兴安、中蒙古、北

疆—南戈壁、塔里木。这些块体的边界均存在着铅同位素急变带(图 1)。根据现有的资料与认识, 地球化学急变带可以初步作这样的定义: 不同块体结合带地段的两侧同时代(准同时代)、相同成因类型, 并与深部壳幔相互作用有关的岩石、矿床、流体的同位素与微量元素体系存在显著差异, 在边界地段则表现出短距离的急剧变化。我们称这些地段为“同位素地球化学急变带”。它标志着具有重要构造与成矿作用含义的地球化学省边界。

2 地球化学省及其边界与大地构造域的关系

根据地球化学与大地构造的综合研究, 地球化学省及其边界主要产生于以下两种情况:

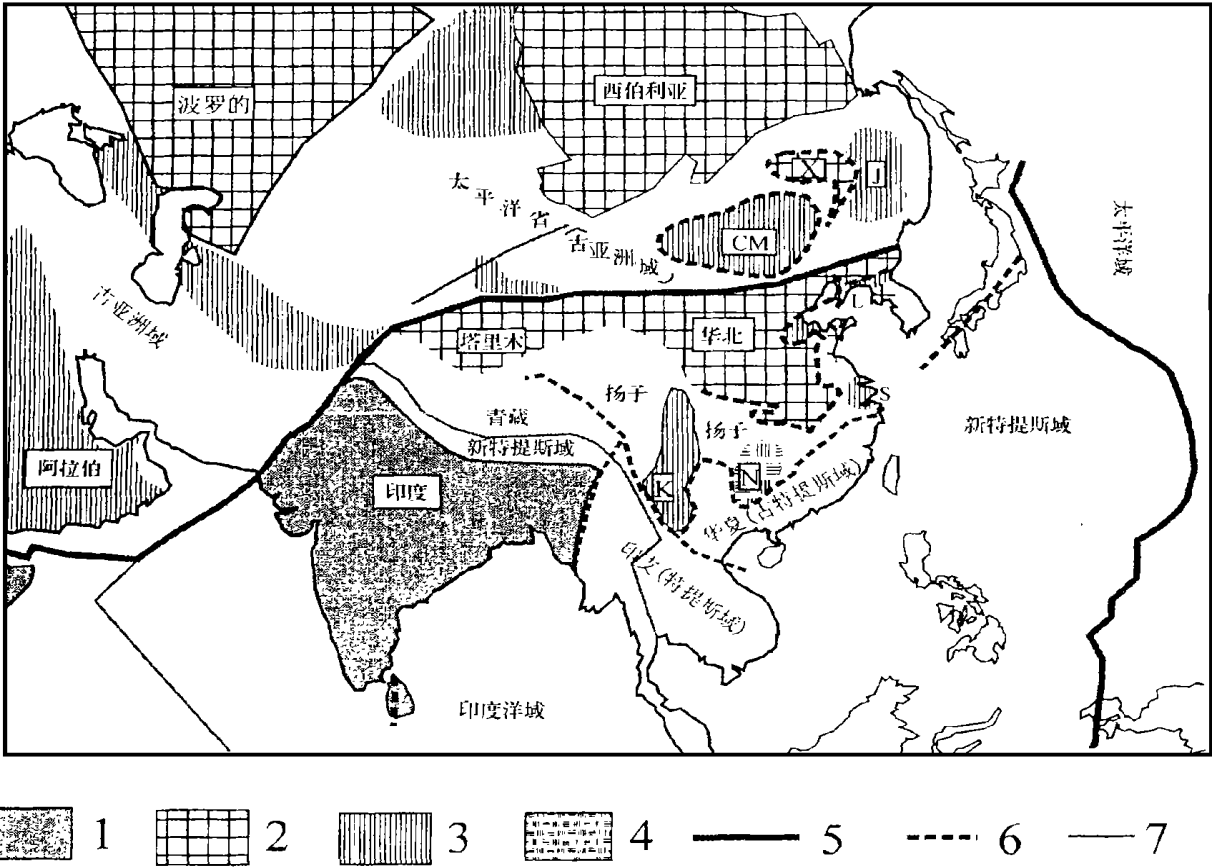


图 1 亚洲地区地球化学省划分与属性的简要构造

Fig. 1 A sketch tectonic map of geochemical province divisions and block affinities in Asia.

- 1. 东冈瓦纳型块体; 2. 劳亚型块体; 3. 太平洋型微古陆; 4. 属性不明的古陆块; 5. 一级构造线—地球化学边界; 6. 主要地球化学边界; 7. 主要断裂; CM—中蒙古块体; J—佳木斯块体; X—兴安块体; L—辽胶块体; S—苏南块体; K—康滇古陆; N—江南古陆
- 1. Eastern Gondwana; 2. Laurasia; 3. blocks of the Pacific type; 4. the blocks with unclear affinity; 5. giant tectonic-geochemical boundaries; 6. major geochemical boundaries; 7. major tectonic lines; CM—central Mongolia; J—Jiamusi block; X—Xin'an block; L—Liaojiao block; S—Sunan block; K—Kongdian block; N—Jiangnan block

## 2.1 板块结合过程产生地球化学边界

不同块体之间的结合带若广泛存在大规模的板块俯冲和推覆碰撞造山作用, 则两块体的地壳与地幔物质将在大范围内发生不均一混合, 使难于形成梯度很陡的地球化学急变带。大陆造山带常介于科迪勒拉型与阿尔卑斯型之间。大陆块体的结合往往正交俯冲形成碰撞造山带结合(阿尔卑斯型、板块运动方向与结合线垂直)的可能性较小, 完全的平行结合(科迪勒拉型, 板块运动方向与结合线平行)也少见, 而斜交、走滑剪切和插入的结合面较普遍。同时斜交结合可进一步分解成正交俯冲与平行走滑的分段组合。例如, 太平洋—考克斯(Cocos)板块与法拉隆(Farallon)—北美大陆板块的结合是以圣安德列斯断裂为界; 板块运动方向与结合面方向在开始时呈低角度的斜交俯冲( $\sim 20^\circ$ ), 而后来变成平行走滑, 并且斜交结合时也分解为与法拉隆的正交俯冲和与北美大陆的平行走滑。菲律宾海板块与太平洋板块同时沿小笠原—玛利亚纳弧的结合也是斜交结合。扬子板块与青藏—印支板块的结合, 正交结合面只出现在龙门山的 NW 向俯冲, 而在红河—金沙江断裂形成长距离的 NW 方向左旋剪切结合作为扬子块体的边界。青藏羌塘与塔里木块体的拼接也是明显的斜结合。这一斜结合同样分解为俯冲与走滑两种形式; 即出现于喀拉昆仑与柴达木的俯冲带和出现于中间的大规模走滑断层(200 km 以上)——阿尔金断裂<sup>[31]</sup>。西伯利亚与华北具有相一致的同位素体系特征, 表明曾为同一块体, 在里非期后插入了大量外来块体(北太平洋型陆块), 形成增生弧, 块体之间的结合也以长距离的剪切带结合为主<sup>[32]</sup>。劳亚型(北大西洋型)陆块一般均被外来块体的插入而被动离散, 因此没有相应的大洋同位素省与其对应。在上述的斜交、剪切和和插入的结合面上则可出现陡梯度的构造显性地球化学边界。

## 2.2 块体克拉通化产生的地球化学边界

克拉通边界是块体拼合以后由于不同块体在岩石圈物理与化学结构上的差异而产生的块体之间调整边界。这种调整是通过底板垫托和折层作用来完成。如秦岭造山带与华北块体之间岩石圈物质成分上明显的差异已解释成是这样一种作用。大陆在形成、增长阶段, 岩石圈的厚度是随着大陆地壳的增厚而增厚。在造山带由于地壳—岩石圈挤压增厚, 导致温度梯度增加, 使岩石圈底部熔融、折层返回软流圈, 同时由于岩石圈厚度与密度的减小导致静压隆升。这种作用在青藏高原表现得最不明显。另外一

种机制是岩石圈增厚后深部可出现高密度的榴辉岩相, 由于重力下沉而出现岩石圈下部折层。克拉通边界一般以近于垂直的超壳断裂为中心。由于折层作用, 使它的两侧岩石圈化学组成与厚度存在明显差异。岩石圈厚度调整产生的沉降导致形成稳定而宽阔的后造山前陆盆地。这时可形成构造隐性的克拉通化地球化学边界。同时后期还可以发生大体沿克拉通边界的离散, 形成裂陷槽(特别是后晋宁期与泥盆—早石炭), 并再汇聚, 再次产生新的造山带。这时则形成构造显性的克拉通化地球化学边界。这种离散与再结合在原有的基础上进一步加强了壳幔相互作用。在消减带形成的壳幔再循环富集地幔源, 也导致成矿元素的富集, 并成为后期超钾质与高生热火成岩源区。因此在地球化学边界可形成一条特征的地球化学异常带。

## 3 地球化学边界与地球物理场的关系

地球化学边界两侧岩石圈地震波速与热结构上常存在明显差异。地球化学急变带在许多地段常与重力正异常梯度带、莫霍面梯度带以及正负磁异常转换带有较好的吻合(平行位), 但在重要的成矿密集区则形成明显的交错位。中国大陆布格重力异常图与地震测深莫霍界面深度图表明大陆内明显存在着沿大陆块体边界和切穿块体的梯度带。大陆上规模最大的重力梯度带是大兴安岭—太行山—武陵山—苗岭至越南北部长山的北东向梯度带, 其次是贺兰山—龙门山—云南东部近南北向的梯度带和东南沿海北东向的天台山—雁荡山—戴云山梯度带; 同时还存在沿克拉通边界的近东西向梯度带<sup>[33~35]</sup>。在显性急变带, 常与莫霍面梯度带呈交错, 而在隐性急变带则与莫霍面梯度带相平行。地球化学急变带及其转折端也是强浅源地震的多发地段。

在几条切过华夏—扬子之间的地球化学边界地球物理剖面上均可见到地球物理场的急剧变化与地球化学急变带吻合性。在黄山—温州断面上可见, 出现于 15~20 km 左右的中地壳低速层(波速 $< 5.9$  km/s)在龙游—遂昌地区也随着消失。同时华夏一侧地震 P 波波速从下地壳底界 6.8 km/s 变化至上地幔顶界为 8.3 km/s, 而扬子一侧从 6.8 km/s 变化至 7.5~7.8 km/s 左右。其它地震剖面也表明在华夏块体下没有出现近于 6.9~8 km/s 的速度层。这表明华南与扬子具有明显不同的岩石圈结构<sup>[36]</sup>; 华夏块体下麻粒岩相的下地壳或偏基性的下地壳可能没有广泛出现。区域性 Pb 同位素矢量 V1 值填图

表明在天台北也存在急变带, 显示出华南—扬子边界也位于北纬 29.1° 左右。因此华南—扬子地幔边界在龙游以东基本呈东西向, 沿德兴—龙游—三门断裂。根据该地区中生代花岗岩的 Nd 模式年龄填图可知, 华夏块体的基底形成时间普遍老于 2.0 Ga, 而扬子陆块总体上小于 1.9 Ga。地球物理剖面上的磁异常变化曲线也明显反映出溪口以北为负异常, 而以南为正异常<sup>[37]</sup>。

随县—湖口—宁德剖面的湖口—宁德段在铅山地区穿过地球化学边界。在这一地区出现了北东向的重力梯度带(20~50 mGal)。地球化学边界以南出现明显的重力负异常, 而以北略显正异常<sup>[38]</sup>。上地幔顶界波速南高北低的特征与黄山—温州剖面是相对应的。

黑山—泉州地质断面经衡阳—茶陵—遂川通过扬子—华夏地球化学边界。茶陵正好位于地球化学急变带的中心线。这一位置也是莫霍面的梯度带, 地壳厚度从茶陵东南的 30 km 向西北急增至 35 km<sup>[39]</sup>, 该区莫霍面同样表现出一定的抬升。

滇黔地区地壳厚度变化在 44~50 km, 表现为西北厚, 而东南薄。在新平—元江—建水一带莫霍面梯度带的急剧转折与地球化学急变带的急剧转折是几乎完全相一致的<sup>[40]</sup>。该地区地球物理层析确定的大陆深俯冲位置<sup>[41]</sup>与地球化学急变带有相当的一致性。

## 4 地球化学省划分与地球化学边界确定的重要应用价值

### 4.1 为地球科学研究提供了新的方法论

地球化学省的确定揭示了块体在全球古大陆格局中的属性。如 Rodinia 主要由 3 部分组成: ①西冈瓦纳, 包括非洲与南美; ②东冈瓦纳, 包括东南极、澳洲、印度等; ③劳亚(Laurasia), 包括劳伦(Laurentia)、波罗的、格陵兰与西伯利亚。3 个主体古陆正好代表了 3 个基本的地球化学省域(图 2)。它们较完整的构形也反映了地球化学的省域的基本区分在晚元古以前就形成了。地球化学属性要比古生物、构造与地层属性更有定量性和可对比性。因此已为全球大地构造区划和古板块、泛大陆重建研究的重要手段<sup>[42]</sup>。

地球化学边界揭示了块体边界壳幔相互作用的地球化学关系。它不仅将区域地球化学研究与大地构造、地球物理研究有机结合起来, 更重要的是它可以揭示岩石圈不同层次时空演化, 不但反映了不同

块体的拼接关系, 而且进一步揭示了块体结合以后岩石圈经过调整后的克拉通边界, 这是一般地质研究不能做到的。因此地球化学填图已成为在构造证据不足地区确定板块拼接边界的新方法。在滇东—黔西地区扬子—华夏块体边界的确定已得到了成功的应用<sup>[40, 43, 44]</sup>。

### 4.2 地球化学急变带对于大型—超大型矿集区分布的制约

大陆边界的大型矿集区在空间不均一分布明显受到地球化学急变带—克拉通边界的控制。但大型矿集区在地球化学急变带上并不是广泛均一出现, 而进一步受到急变带的急剧转折端与收缩处的控制, 并具有等距性出现的宏观特征(300~400 km 左右)。研究表明地球化学急变带控制了中国大陆 90% 以上的超大型金、铜、钼、锡、银、镍、铅—锌、铀、钾盐、硼、镁、磷等矿床约 33 个<sup>[45~47]</sup>。地球化学急变带与地球物理重力梯度带之间存在平行与交错两种关系。中国大陆上典型的大型矿集区常与交错位密切相关(近 10 个; 图 3)。

(1) 北秦岭栾川矿集区: 金、钼、银成矿作用出现在元古界地层中, 成矿时代以中生代斑岩活动有关, 出现 3 个超大型矿床。

(2) 西秦岭西和—成县矿集区: 以铅—锌为主, 为泥盆纪的热液沉积, 出现一个超大型矿床。

(3) 内蒙狼山—白云鄂博矿集区: 铜、铅—锌、稀土; 成矿时代中元古、晚元古、加里东, 出现两个超大型矿床。

(4) 云贵边界东川—昭通矿集区: 铜、铅—锌、银; 成矿时代中元古、晚元古、石炭纪, 出现 3 个超大型矿床。

(5) 滇南红河矿集区: 锡、银、铜、金; 成矿时代中元古、晚元古、二叠纪、中生代, 出现 2 个超大型矿床。

(6) 南岭矿集区: 锡、钨、铀、铜、铅、锌; 成矿时代中生代(花岗岩活动与动力变质)、泥盆—石炭纪(热液沉积), 出现 2 个超大型矿床。

(7) 赣东北德兴—相山矿集区: 铜、银、金、铀; 成矿以中生代为主, 出现 5 个超大型矿床。

(8) 长江中下游矿集区: 铜、铅、锌、金; 成矿时代以中生代为主, 有准超大型矿床出现。

(9) 黔桂边境独山—河池矿集区: 锡、锑、铅、锌; 成矿时代泥盆、寒武纪、中生代, 出现 1 个超大型矿床。

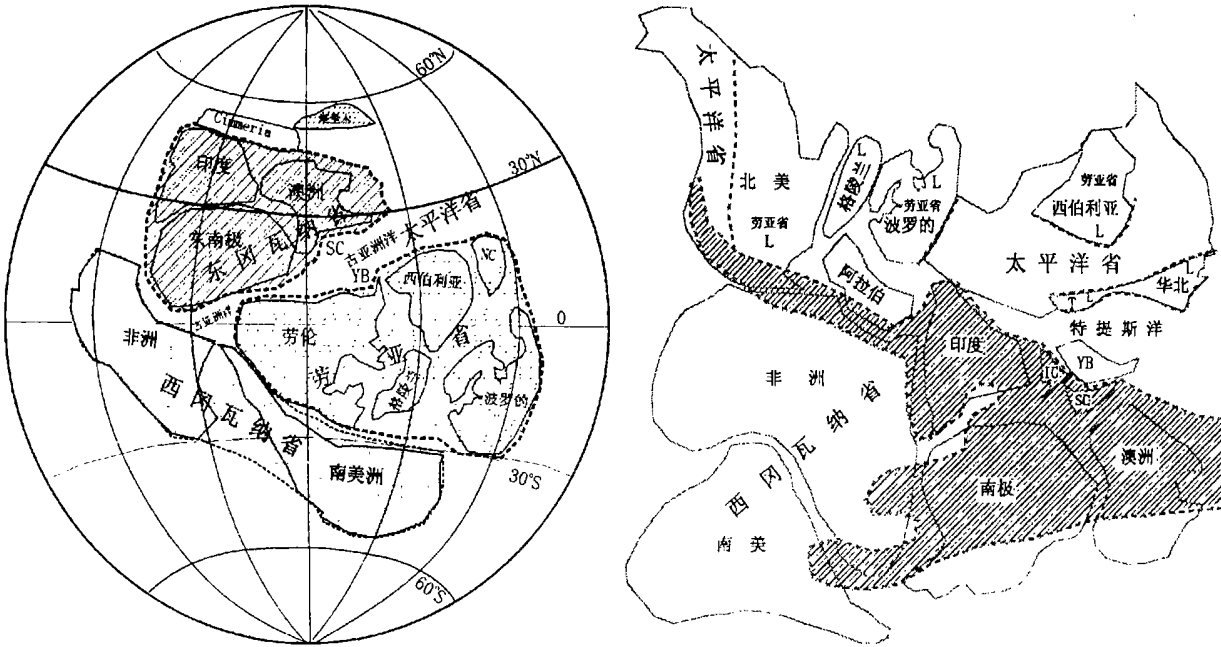


图 2 晚元古 Rodinia 泛大陆(左)和古生代冈瓦纳大陆(右) 构形与 4 个地球化学省域的分布简图

Fig. 2 A Sketch map showing the distribution of four major geochemical provinces (or domains) and the configuration of Rodinian (left) and Gondwana(right) continents during Late Proterozoic and Paleozoic

斜线为东冈瓦纳省分布区; L- 劳亚型块体; NC- 华北; SC- 华夏; YB- 扬子; T- 塔里木  
L-blocks with Laurasian affinity; NC-North China; SC-Cathaysia; YB-Yangtze; T-Tarim

(10) 胶东矿集区: 金、钼; 成矿时代中生代为主, 出现 3 个超大型矿床。

4.3 隐伏矿深度与规模预测应用

隐伏矿深度与规模预测是当前化探中亟待解决的难题。地球化学省的划分确定了区域的地幔、地壳铅同位素背景值, 为不同区域开展隐伏矿深度与规模预测提供了基本的模型参数。在云南地区铜、金矿的勘探评价中我们建立的预测模式已得到成功的应用<sup>[48, 49]</sup>。这些参数的确定也为不同块体建立各自的铅同位素增长线和更正确地计算铅同位素模式年龄提供了必要条件。

4.4 地球化学省属性与急变带对大型油气田分布的控制

地球化学省划分和全球油气资源分布资料表明太平洋型微陆块的边界与油气资源关系更加密切。北半球典型太平洋型陆块, 如中东、滨里海、西西伯利亚、南加洲与海湾地区均是特大型油田产区。中国的辽胶渤和佳木斯块体周边存在丰富的油气资源。中蒙古块体是东亚最大的太平洋型块体, 应具有大的潜在油气资源。克拉通边缘前陆盆地中靠近克拉通边界的地段是重要的产油气位置。全球仅占 4%

的克拉通边缘前陆盆地中探明了 34% 的油气储量, 地球化学急变带反映了克拉通边缘的地球化学特征, 比地质观察更有效地揭示了克拉通边界的位置。因此大型油气田的分布则明显受地球化学边界的控制, 特别是高产的潜山油藏。渤海周边地球化学急变带控制了辽河、渤海、大港、华北、中原与胜利油田主油气场的定位。地球化学急变带也控制着中国南方油气资源分布和有希望的勘探区<sup>[50]</sup> (图 3)

4.5 地球化学边界对强破坏性浅源地震的制约

大陆内 6 级以上强破坏性的浅源地震与克拉通边界—地球化学边界关系十分密切。近 30 年来发生了位于辽胶渤块体边界的邢台、唐山、海城的大地震。通海、昭通、丽江、姚安大地震发生于扬子—印支—华夏地球化学边界。位于云南建水地区地球化学边界的急剧转折历史记载表明曾发生了 15 次 6 级以上的地震。河北张北—尚义之间的 7 级地震位于华北块体北缘地球化学边界。回顾历史上发生于西北地区海源、古浪、民勤、民乐、玉门、华县等地的 7~8 级地震均位于华北与扬子之间的西部地球化学边界。因此从地球化学边界的角度来中、长期浅源地震是值得重视的。

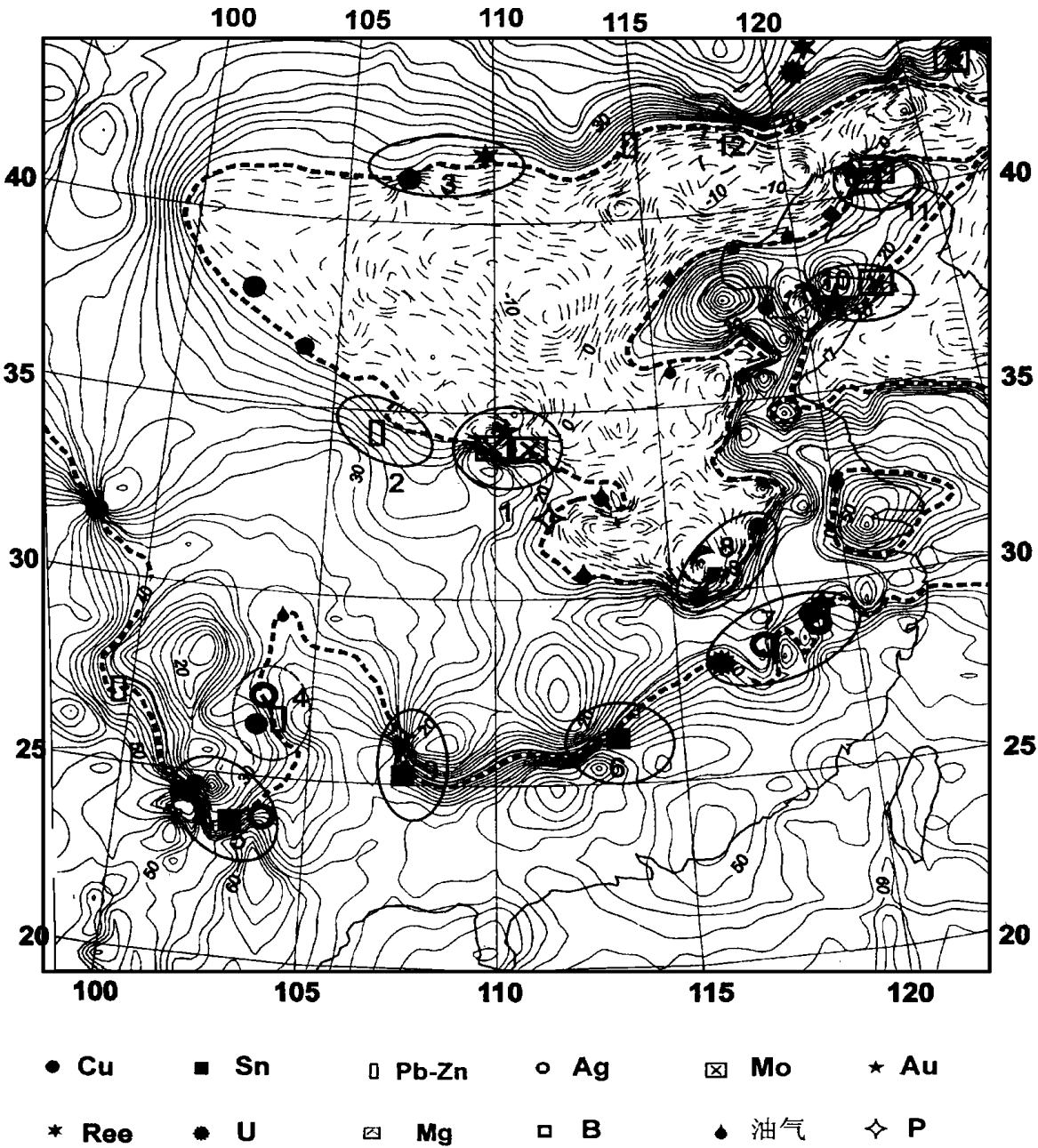


图 3 中国大陆主体区的大型矿集区

Fig. 3 Distribution of large concentrated mineralization areas in the major part of China

图中圆圈为大型矿集区(所标数字号码与文字叙述对应), 虚线圆圈(12)为预测大型矿集区, 图中符号所标的矿种为超大型矿床  
The numbers marked in the figure are in order as mentioned in the text episode 2. Black circles are large concentrated mineralization districts. Dashed circles are forecasting districts of concentrated mineralization

4. 6 地球化学省划分与地球化学边界的确定在环境评价中的重要作用

铅同位素背景在一个地球化学省内部十分稳定, 因此根据铅同位素地球化学填图确定的区域背景值可以对铅污染作出快速的定量评价。汽车尾气的铅同位素组成与位于华夏块体内部广东地区的背

景有明显差别。因此很容易用同位素方法将汽车尾气污染铅鉴别出来。地表和大气飘尘取样与铅同位素组成分析表明明显偏离于华夏地球化学省的背景值。广州市郊铅同位素组成与汽车尾气铅已相当接近。同位素组成表明佛山地区的铅污染主要是工业用铅(凡口铅锌矿)。地球化学边界存在着丰富的资源, 矿业的发展

以及无计划、不科学的开采提炼也使地球化学边界成为严重的有毒、有害元素的无机污染源。如滇、黔边境地球化学边界具有丰富的汞、锑、金、砷、铊资源,这一带的微细粒卡林型金矿由于提取技术的提高,开采利用规模正不断扩大。地球化学边界正是大河流及其支流的发生地(如珠江),使污染通过洪水和水生食物链快速传递到下游。地球化学省划分为正确评估这些污染的传布情况提供了重要手段。

#### 4.7 溶洞旅游资源开发

中国的喀斯特溶洞奇观在世界上享有盛名。实际上沿地球化学边界及其附近才有大规模的喀斯特溶洞出现。桂林地区这一世界上最早闻名的喀斯特岩溶地貌分布区恰好位于华夏—扬子地球化学边界上。在滇黔地区沿建水—弥勒—兴仁—安顺北东方向的华夏—扬子地球化学边界上出现了大规模的喀斯特溶洞群,如著名的阿卢古洞、燕子洞、路南石林风景区、龙宫洞与织金洞、黄果树瀑布群等。在华东沿地球化学边界溶洞分布数量也相当多。中国北方大溶洞出现较少,但仍分布于地球化学边界,如著名的栾川鸡冠洞,从卢氏至方城沿地球化学急变带有着溶洞开发的巨大潜力。

#### 参考文献(References):

- [1] Zindler A. Nd, Sr and Pb isotopic systematics in a three component mantle, a new perspective[J]. *Nature*, 1982, 289: 519 ~ 523.
- [2] Dupre B, Allehre C J. Pb-Sr isotope variations in Indian Ocean basalts and mixing phenomena[J]. *Nature*, 1983, 303: 142 ~ 146.
- [3] Hart S R. A large-scale isotope anomaly in the southern hemisphere mantle[J]. *Nature*, 1984, 309: 753 ~ 757.
- [4] Castillo P R. The Dupal anomaly as a trace of the upwelling lower mantle[J]. *Nature*, 1988, 336: 667 ~ 670.
- [5] Klein E M, Langmuir C H, Zindler A, *et al.* Isotope evidence of a mantle convection boundary at the Australian-Antarctic discordance[J]. *Nature*, 1988, 333: 623 ~ 628.
- [6] Mahoney J J, le Roex A P, Peng Z, *et al.* Southwestern limits of Indian Ocean ridge mantle and the origin of low  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  mid-ocean ridge basalt: isotope systematics of the central Southwest Indian Ridge (17 ~ 50 °E)[J]. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97: 19 771 ~ 19 790.
- [7] Mahoney J J, Frei R, Tejada M L G, *et al.* Tracing the Indian ocean mantle domain through time: Isotopic results from old west Indian, East Tethyan, and South Pacific seafloor[J]. *J. Petrology*, 1998, 39: 1 285 ~ 1 306.
- [8] Pyle D G, Christie D M, Mahoney J J. Resolving an isotopic boundary within the Australian-Antarctic discordance[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1992, 112: 161 ~ 178.
- [9] Hickey-Vargas R. Origin of the Indian Ocean-type isotopic signature in basalts from Philippine Sea plate spreading centers: An assessment of local versus large-scale processes[J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(B9): 20 963 ~ 20 979.
- [10] Dosso L, Bougault H, Langmuir C, *et al.* The age and distribution of mantle heterogeneity along the mid Atlantic ridge (31 ~ 41 °N)[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, 170: 269 ~ 286.
- [11] Hofmann A W. Origin of the Hawaiian mantle plume[J]. *China Sci. Bull.*, 1998, 43(Supp.): 52.
- [12] Humler E, Thiriot J L, Montagner J P. Global correlations of mid-ocean-ridge basalts chemistry with seismic tomographic image[J]. *Nature*, 1993, 364: 225 ~ 228.
- [13] Zhu B Q, Mao C X, Lugmair G W, *et al.* Isotopic and geochemical evidence for the origin of Plio-Pleistocene volcanic rocks near Indo-Eurasian collisional margin at Tengchong, China[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1983, 65: 263 ~ 275.
- [14] Zhu B Q, Li X H, Liu B L. Three-component mixing and four system recycling models for explaining Nd-Sr-Pb isotopic correlation of suboceanic and subcontinental mantles[J]. *Science in China (B)*, 1990, 33: 757 ~ 768.
- [15] Zhu B Q, Wang H F. Geochronology of and Nd-Sr-Pb isotopic evidences for mantle source in the ancient subduction zone beneath Sanshui Basin, Guangdong Province, China[J]. *Chinese J. of Geochemistry*, 1989, 8(1): 65 ~ 71.
- [16] Zhu B Q. Evidence of isotopic systematics from crust and mantle for chemical heterogeneities of terranes[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(15): 1 279 ~ 1 282.
- [17] Peng Z C, Zartman R E, Fuda E, *et al.* Pb-, Sr-, and Nd-isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, Eastern China[J]. *Chemical Geology*, 1986, 59: 3 ~ 33.
- [18] Basu A R, Xie G H, Huang A K, *et al.* Major element, Rb, and Pb, Nd and Sr isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks of eastern China: implications for their origin from suboceanic-type mantle reservoirs[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1991, 105: 149 ~ 169.
- [19] Zhu Bingquan, Wang Huifen. Nd - Sr - Pb isotopic and chemical evidence for the volcanism with MORB-OIB source characteristics in the Leiqiong area[J]. *China, Geochimica*, 1989, (3): 193 ~ 201. [朱炳泉, 王慧芬. 雷琼地区 MORB-OIB 过渡型地幔源的 Nd-Sr-Pb 同位素证据[J]. *地球化学*, 1989, (3): 193 ~ 201.]
- [20] Zhu Bingquan, Zhang Yuquan, Xie Yingwen. Nd, Sr and Pb isotopic characteristics of Cenozoic ultra - potassic volcanic rocks from eastern Erhai, Yunnan and their implications for subcontinent mantle evolution in southwestern China[J]. *Geochimica*, 1992, (3): 201 ~ 212. [朱炳泉, 张玉泉, 谢应雯. 滇西洱海第三纪超钾质火成岩系的 Nd-Sr-Pb 同位素特征与西南大陆地幔演化[J]. *地球化学*, 1992, (3): 201 ~ 212.]
- [21] Zhu Bingquan, Wang Huifen, Zou Liping, *et al.* Discussion on mantle geochemistry and division of Cathaysian-Yangtze mantle boundary in Zhejiang-Fuzhou areas. In: Li Jiliang,

Beijing: Metallurgic Industry Press, 1993. 60 ~ 68. [朱炳泉, 王慧芬, 邹丽萍, 等. 浙闽地幔地球化学与华南—扬子地幔边界划分讨论[A]. 见: 李继亮主编. 东南大陆岩石圈结构与地质演化[C]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 60 ~ 68.]

- [22] Liu Beiling, Chen Yuwei, Zhu Bingquan. Genesis of Cenozoic basalts in Jinbo Lake, N-E China, and its chemical feature of mantle, Nd, Sr, Pb isotopic and trace elemental evidence[J]. *Geochimica*, 1989, (1): 9 ~ 19. [刘北玲, 陈毓蔚, 朱炳泉. 东北镜泊湖新生代玄武岩的成因及其地幔化学特征——Sr、Nd、Pb 同位素与微量元素证据[J]. 地球化学, 1989, (1): 9 ~ 19.]
- [23] Zhang Benren, Lao T C, Gao S. Geochemical study of the lithosphere, tectonism and metallogenesis in the Qinling-Dabashan region [M]. Wuhan: China Univ Geosci Press, 1994. [张本仁等. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994.]
- [24] Zhang Benren, Zhang Hongfei, Zhao Zhidan, *et al.* Geochemical subdivision and evolution of lithosphere in East Qinling and adjacent regions—Implication for tectonics [J]. *Science in China(D)*, 1996, 39(3): 245 ~ 255. [张本仁, 张宏飞, 赵志丹, 等. 东秦岭及邻区壳、幔地球化学分区演化及其大地构造意义[J]. 中国科学(D), 1996, 26(3): 201 ~ 208.]
- [25] Yu J, Gui X. Isotope geochemistry of granitoids [A]. In: Tu G, Chow T. *Isotope Geochemistry Research in China* [C]. Beijing: Science Press, 1998. 137 ~ 161.
- [26] Li Shi, Wang Dang. Geochemistry of Granitoids in Tongbaishan-Dabishan, Central China [M]. Wuhan: China Univ Geosci Press, 1991. [李石, 王丹. 桐柏山—大别山花岗岩类地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.]
- [27] Zhang Ligang, *et al.* Block Geology of Eastern Asia Lithosphere [M]. Beijing: Science Press, 1995. [张理刚等. 东南岩石圈块体地质[M]. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [28] Zhu B Q. Geochemical evidences for the southern China block being a part of Gondwana [J]. *J S Asian Earth Sci*, 1994, 9: 319 ~ 324.
- [29] Zhu Bingquan. The mapping of geochemical provinces in China based on Pb isotopes [J]. *J Geochem Exploration*, 1995, 55: 171 ~ 181.
- [30] Zhu Bingquan. Tri-dimension spatial topological diagrams of ore lead isotopes and their application to the division of geochemical provinces and mineralizations [J]. *Geochimica*, 1993, (3): 210 ~ 216. [朱炳泉. 矿石 Pb 同位素三维空间拓扑图解用于地球化学省与矿种区划[J]. 地球化学, 1991, (3): 210 ~ 216.]
- [31] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 2000, (in press).
- [32] Sengor A M. Evolution of the Altiid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364: 298 ~ 306.
- [33] Wang Qianshen, Wu Chuazhen, Liu Hongchen, *et al.* Discussion on distribution pattern of orustal thickness and crustal structure of Asian continent [J]. *Seismic Geology*, 1982, 4(3): 1 ~ 9. [王谦身, 武传真, 刘洪臣, 等. 亚洲大陆地壳厚度分布轮廓及地壳构造特征的探讨[J]. 地震地质, 1982, 4(3): 1 ~ 9.]
- [34] Liu Guangding. Discussion on Earth Sciences [J]. *Earth Science Frontiers*, 1998, 5(1): 1 ~ 8. [刘光鼎. 论地球科学[J]. 地学前缘, 1998, 5(1): 1 ~ 8.]
- [35] Yuan Xuecheng. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model [J]. *Science in China(D)*, 39(3): 235 ~ 244. [袁学诚. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型[J]. 中国科学(D), 1996, 26(3): 209 ~ 215.]
- [36] Xiong Shaobai, Lai Minghui, Liu Hongbin, *et al.* Lithosphere structure and velocity distribution in Tunxi-Wenzhou areas [A]. In: Li Jiliang. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1993. 250 ~ 256. [熊绍柏, 赖明惠, 刘宏宾, 等. 屯溪—温州地带的岩石圈结构与速度分布[A]. 见: 李继亮主编. 东南大陆岩石圈结构与地质演化[C]. 北京: 冶金工业出版社, 1993. 250 ~ 256.]
- [37] Yan Yafen, Ren Guotai, Zheng shuanggen. The relationship between geomagnetic field feature and crustal structure for lithosphere in Southeast China [A]. In: Li Jianged. Beijing: Metallurgic Industry Press, 1993. 238 ~ 241. [闫雅芬, 任国泰, 郑双根. 东南大陆岩石圈的地磁区域场特征与地壳结构的关系[A]. 见: 李继亮主编. 东南大陆岩石圈结构与演化[C]. 北京: 冶金出版社, 1993. 238 ~ 241.]
- [38] Jin Wenshan, Sun Dazhong. Deep crustal structure of South China continent and its evolution [M]. Beijing: Geological Press, 1996. [金文山, 孙大中. 华南大陆深部地壳结构及其演化[M]. 北京: 地质出版社, 1993.]
- [39] Wang Maoji. Gravity and geomagnetic illustration of Heshan-Quanzhou profile [J]. *Geophysics Acta*, 1994, 37(3): 321 ~ 329. [王懋基. 黑山—泉州地质断面的重磁解释[J]. 地球物理学报, 1994, 37(3): 321 ~ 329.]
- [40] Zhu B-Q, Dong Y-P, Chang X-Y, *et al.* Relation of isotopic geochemical steep zones with geophysical fields tectonics in the junction area of the Cathaysian, Yangtze and Indochina plates [J]. *Acta Geol Sinica*, 2000, 74(2): 236 ~ 240.
- [41] Zhao Yonggui, Zhong Dalai, Liu Jianhua, *et al.* Principle of geological illustration of seismic tomography and its application to study on deep structure in western Yunnan [J]. *Geological Science*, 1992, (2): 105 ~ 113. [赵永贵, 钟大赉, 刘建华, 等. 地震层析地质解释原理及其在滇西深部构造研究中的应用[J]. 地质科学, 1992, (2): 105 ~ 113.]
- [42] Zhu B Q. Discussion on geochemical division and affinity of East Asia blocks: Implications for tectonic framework [A]. In: Metcalfe I, ed. *Gondwana Dispersion and Asian Accretion—Final Result of IU GS IGCP 321* [C]. Netherland, A A Balkema Pub, 1998. 211 ~ 227.
- [43] Dong Y P, Zhu B Q, Chang X Y. Tectonic implications of the isotopic geochemical steep zone in eastern Yunnan, China [J]. *Chinese Sci Bull*, 1999, 44(Supp. 2): 195 ~ 196.
- [44] Dong Y P, Zhu B Q. Characteristics of the island—Arc pillow lavas from southeast Yunnan Province, and its tectonic impli-

cations for paleo-tethys in south China[J]. Chinese Sci Bull, 2000, 45(8): 753 ~ 758.

- [45] Zhu B Q, Chang S Y, Wang H F. The geochemical boundary between South China and Yangtze blocks and its constraint on the formation of super large deposits[J]. Science in China (D), 1996, 39(1): 58 ~ 65.
- [46] Zhu B Q, Chang X Y, Qiu H N, *et al.* Characteristics of Proterozoic basements on the geochemical steep zones in the continent of China and their implications for setting of super large deposits[J]. Science in China (D), 1998, 41(Supp.): 54 ~ 64.
- [47] Zhang Z W, Zhu B Q, Cai K Q, *et al.* Lead isotopic steep-dipping zone and mineralization—An example from mineral deposits contracted area in East Oinling China[J]. J China Univ Geosci, 2000, 11(1): 287 ~ 294.
- [48] Chang X Y, Zhu B Q. Lead isotopic exploration intersecting

mineralization zones for the depth forecast of concealed deposits—A case from Longbohe Cu deposit, Jinping, Yunnan Province, China[J]. Science in China(D), 2000, 43(1): (in press).

- [49] Chang Xiangyang, Zhu Bingquan, Sun Dazhong, *et al.* Isotope geochemistry study of Donghuan copper deposits in Middle Yunnan Province, SW China: I. Stratigraphic chronology and application of geochemical exploration by lead isotopes[J]. Geochimica, 1997, 26(2): 32 ~ 38. [常向阳, 朱炳泉, 孙大中, 等. 东川铜矿同位素地球化学研究: I. 地层年代与铅同位素化探应用[J]. 地球化学, 1997, 26(2): 32 ~ 38.]
- [50] Zhu Bingquan, Zhang Jinglian. A study on distribution regularities of large-and medium size oil and gas fields in China mainland[J]. Petroleum Explorationist, 1999, 4(1): 12 ~ 17. [朱炳泉, 张景廉. 中国大陆大中型油气田分布规律探讨[J]. 勘探家, 1999, 4(1): 12 ~ 17.]

## GEOCHEMICAL PROVINCES AND THEIR BOUNDARIES

ZHU Bing-quan, CHANG Xiang-yang

(Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Based on great quantity of Pb-Sr-Nd isotopic data from various mantle and crust-derived rocks and ores in Continental China, and global comparison of isotopic and element systematics, especially for the blocks in the eastern Asia, we developed the indexes and mapping methods of isotopic geochemistry for the division of geochemical provinces. The major geochemical provinces in Continental China and their geochemical steep zones, i. e. boundaries, have been established through large scale mapping of Pb isotopic vectors(the values in three dimensions space of  $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$  and  $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ). The generation of geochemical boundaries was tightly related to inclined combination of plates, as well as craton boundaries resulted in adjustment of lithosphere structure after plate collision. There are parallel or cross relationships between geochemical boundaries and gravity, Moho and magnet gradisnts. The division of geochemical provinces and establishment of their boundaries not only provide important basis for the paleo-continent reconstruction and ascertaining plate boundaries, but also can be widely applied to exploration and evaluation of resources, establishment of environment background and pollution sources, as well as calamity forecasting. It is indicated from our study that the giant Au, Cu, Mo, Sn, Ag, Ni, Pb-Zn, U, K salt, B, Mg and P deposits of about 90%, and more than 10 large concentrated mineralization districts in Continental China was controlled by the geochemical steep zones. The geochemical provinces constrained on distribution of global oil-gas resources, whereas geochemical boundaries particularly controlled the sites of oil-gas fields at the craton margins. There are tight relationships between strong destroying earthquakes with shallow sources and craton-geochemical boundaries. The occurrence of karst caves and collapses is also closely related to the geochemical boundaries. As background values of Pb isotopes within a geochemical province is quite stable, based on the background values established by geochemical mapping, fast quantitative evaluation for Pb pollution level can be made.

**Key words:** Geochemical steep zone; Geochemical Province; Resource exploration and evaluation; Environment and calamity.