

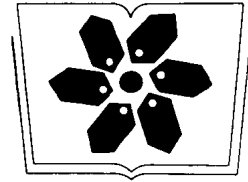
地球化学省

与地球化学急变带

朱炳泉 著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

地球化学省与地球化学急变带

朱炳泉 著

科学出版社

2001

内 容 简 介

本书根据全球地幔和地壳大规模横向不均一性,揭示了地球化学急变带,并论述了其构造、地球物理场的关系,以及对矿集区和油气田分布的制约及其资源环境综合效应。

本书可供从事地球科学基础与应用研究的科研人员、教师和学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

地球化学省与地球化学急变带/朱炳泉著. -北京:科学出版社, 2001
ISBN 7-03-008701-1

I. 地... II. 朱... III. 地球化学-研究 IV. P59

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 66225 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2001 年 2 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2001 年 2 月第一次印刷 印张: 8

印数: 1—1 200 字数: 175 000

定价: 20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

地球科学的发展历史表明,地质、地理、化探异常、年代学与地球物理场等等的区划、编图是地球科学理论建立与发展最基本的事实依据,也是观察科学、进行归纳分析与总结的最基本的方法论。例如,大地构造、岩相古地理与古生物区系的区划与编图为槽台学说、板块运动与大陆漂移学说的建立提供了最基本的事实依据。近来关于上地幔区划、大陆增长与古大陆重建的讨论,除了依据上述的区划与编图资料外,地球化学的区划填图起了十分重要的作用。地球化学填图在资源勘探、环境评价、灾害防治、农牧业与国土规划等方面均具有重要的应用价值。

地球化学学科的建立首先是从元素的丰度与分布研究着手。丰度是平均值的概念,而分布包含着区划的含义。20世纪80年代以前,化探异常图的编制已成为找矿勘探必不可少的重要手段,但关于元素分布的研究,主要侧重于元素含量和同位素比值的变化范围与变化规律的统计学研究,而较少去探讨区域分布特征和大地构造含义,因此,当时地球化学的发展是一个相对独立的体系,而对于整个地球科学的发展贡献较少。20世纪80年代由于同位素与微量元素体系理论的发展,建立了地球化学示踪与地球化学探针(Geochemical probe)的研究方法。这一研究方法使地球科学家能通过地表岩石(派生于地幔和中、下地壳)的同位素与微量元素体系研究,来揭示地幔与下地壳的化学组成特征与时空结构。通过大量高精度同位素与微量元素观察资料的积累,发现了地球的地幔与地壳体系存在大规模的垂向与横向不均一性,从而大大促进了地球科学的发展,使地球化学真正能与地质学、地球物理学相并立,成为地球科学发展的三个强大支柱之一。

一、地球化学省划分的认识发展过程

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性的认识。它大体分成三个阶段:

1. 对地球化学端元(End member)的认识

在早期阶段,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,并确定至少五个以上的地幔端元。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是不十分清楚的,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”、“特提斯域”等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。如严格区别于其他区域的特定成矿省、同位素省与年龄省等。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。

我们研究中所取得的成果也是遵循这一轨迹前进的。在获得中国大陆各种类型壳源与幔源岩石和矿石的大量铅-铈-钨同位素资料的基础上, 许多学者进行了中国大陆壳、幔多元同位素体系的综合分析研究, 揭示了地幔与地壳的多元同位素体系演化规律和确立了中国大陆地幔的主要端元组分和区划特征。然后通过全球, 特别是东亚大陆块体广泛的同位素与元素体系对比, 我们确定了地球化学块体划分的同位素地球化学指标和填图方法。在中国东南地区作地壳与地幔的分别铅同位素和钨模式年龄填图过程中, 发现了华南-扬子边界存在铅同位素急变带, 证明可以用地球化学方法确定块体边界, 即严格定量确定地球化学省及其边界。在这一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), 并进而发现了地球化学边界对超大型矿床和油气田分布的重要制约关系。

二、地球化学省划分的基本原则与方法论

根据我们的研究经验, 在进行地球化学省划分时应注意以下的基本原则与方法论:

1) 必须根据不同块体中相同时代 (或准同时代)、相同类型 (在成因上为同一范畴), 并与深部作用有关的岩石、矿床、流体的同位素体系与元素组成体系的比较, 同时在块体边界存在显著差异, 表现出短距离的急剧变化。这时才有可能划分出不同的地球化学省。

2) 由于同位素体系受到表生与叠加地质作用的干扰比元素体系小得多, 因此地球化学省的划分应以多元同位素体系为基础。同时, 在应用多元同位素体系资料时, 必须进行同位素多维空间的拓扑分析, 合理地使用同位素矢量, 以使不同时代、不同类型的样品可调整到同一尺度上进行填图与比较。

3) 在应用主、微量元素体系作为地球化学省划分指标时, 必须在较大范围取大样本的平均值才能反映区域地球化学特征。同时最好应用元素比值或经过以特定主元素 (如 MgO , SiO_2 等) 为基准的标准化处理的元素含量作为划分的指标, 消除岩石形成时结晶分异与部分熔融程度差异产生的影响。

4) 必须注意研究问题的尺度。地球化学省的划分应着眼于具有一定大地构造尺度

的块体不均一性，从全球背景比较着手。因此在方法论上力求排除如岩浆过程，矿化区与非矿化区，以及表生与人为过程带来的不均一性等的影响，而要突出具有大地构造意义并具有显著性差异的地球化学指标。在讨论地球的横向化学不均一时，应注意到均一与不均一、正常与异常都是相对的概念，是以讨论问题的尺度与角度，以及数据的精确度为前提的。如对一个大型矿床来说，它的内部从矿化前沿到主矿体铅同位素组成会有相当大的变化范围，是很不均一的。但是它的主矿体铅同位素组成又相当均一，而且与同一块体内其他大型矿均相一致，因此地球化学省的划分必须应用主矿体的同位素组成。

5) 为了从定性的地球化学域发展成定量的地球化学省，严格的地球化学填图和等值线处理是重要的研究方法。但填图必须要有较多数量和均匀分布的数据点。如目前铅同位素积累的数据较多，分布也相对较均匀，而且不同块体之间相差的显示度大，因此是确定地球化学省的重要填图方法。

三、地球化学省划分的主要资料依据

根据上述原则与方法，在具体进行地球化学省划分时可以选择以下的地球化学资料：

1) 地幔派生岩石，特别是玄武岩的铅-铈-钕同位素与微量元素组成特征与分布规律；某些主元素组成（如 Fe, Na, Mg, Ti 等）有时也可以被应用。这些资料为地幔区划提供了最基本的依据。

2) 显生宙花岗岩的同位素组成与微量元素组成，特别全岩的钕模式年龄、长石铅同位素组成与继承锆石的铀-铅年龄。这些数据可以区别出地壳形成的时间、大陆增长模式和地壳的结构。

3) 大中型矿床主矿体的矿石铅同位素组成，小型铅-锌矿及其矿化点的方铅矿铅同位素组成一般也可以被利用。大中型矿床的形成均存在着不同程度的壳幔相互作用，因此矿石铅同位素组成包含着岩石圈与造山带化学区划的综合信息。

4) 区域基底地层泥质沉积岩的微量元素组成、钕模式年龄与同位素组成初始值（在没有初始值情况下可以用一组样品的峰值或最低值）。它们可以为不同基底与地壳的对比提供重要参考资料。

5) 太古宙麻粒岩的同位素体系特征，特别是从铅同位素组成计算出的变质前 μ 值对于确定块体的古陆属性有重要的定量指示意义。

6) 区域新生代地幔包体与玄武岩的钐-钕与铅-铅地质等时线（Geo-isochron），它们可以反映岩石圈的形成时间和不同块体岩石圈演化上的显著差异。

7) 区域化探异常图中具有明显特征的元素或元素组合异常区，特别是通过偏提取技术（如地气、水溶液等）获得的能反映深部元素运移信息的化探异常区。这些异常区可以作为地球化学省划分及其边界确定的重要参考资料。

8) 与壳幔相互作用有关的深源流体（包括包裹体、原油、沥青、卤水、热泉等等）的同位素体系特征。这些资料对于大的前陆盆地覆盖区进行地球化学区划将是特别重要的资料。

9) 区域最老基底、主要地质事件(包括岩浆作用、区域与动力变质以及块体碰撞)的年代学资料。通过区域年龄填图和年龄分布柱状图对比,获得地壳地球化学区划和边界确定的重要资料。

10) 陨石学与天体化学的对比资料。比较行星学的研究方法为查明地球形成时可能出现的不同天体组分区(即原始不均一性)提供了可能。

在进行地球化学省划分时,还应充分注意大地构造的区划及其边界。如块体拼接的板块缝合线,岩石圈结构经过调整后的克拉通边界,大规模的走滑断层与韧性剪切带。地球物理场的特征及其梯度带常常与地球化学场的变化有相当的同步性。如地壳与岩石圈的厚度,重力异常与磁异常的正、负转换带,热流的分布图,六级以上浅源大地震的分布,以及各种地震波谱的三维层析成像图等等。

四、地球化学省划分及其边界确定的重要应用价值

地球化学省的划分与边界的确切厘定不但在地球科学理论发展上具有重大的意义,而且同时对于资源与能源的寻找、开发,环境背景与污染源的确定,灾害的预测,区域名优产品,防伪物质指纹的建立均具有十分重要的应用价值。这里对它的理论意义与应用价值概括叙述如下:

1) 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。地球化学属性要比古生物、构造与地层属性更具有定量性和可比性。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。

2) 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关系。这是一般地质研究不能做到的。

3) 地球化学急变带(边界)及与超大型矿床的分布有着密切的关系,急变带的重大转折端常是大型-超大型矿床分布的密集区。因此详细厘定急变带的位置与走向不仅对于预测与寻找超大型矿床具有现实意义,而且为深入研究急变带上的壳幔相互作用以及超大型矿床的形成机理起着关键作用。

4) 地球化学急变带比地质观察更精确地揭示了克拉通边界的位置。克拉通边缘前陆盆地靠近克拉通边界地段是重要的产油气位置。因此厘定克拉通边界的确切位置将会大大提高油气勘探效率。全球同位素省划分与填图已揭示出太平洋省(北半球参考线区)微块体的边界与油气资源关系更加密切。因此地球化学省的划分与边界确定对油气勘探、定位也有重要的应用价值。

5) 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。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。

6) 区域的元素与同位素的背景值的确定也是环境背景值的确定。通过同位素与元素比值的示踪可以快速和低成本地定量评价某些无机污染的程度,并为污染源追踪与判断提供了可能。

7) 根据地球化学省可以建立特定产品与特定产地相联系的同位素与微量元素指纹指标,即以物质成分为基础,也是极难仿制的“防伪标记”。这种方法也为鉴定古文物的产地提供了依据。

本书中有关的研究成果是原国家科学技术委员会攀登计划(A)(与超大型矿床有关的基础研究中专题——我国元古宇特征及赋存超大型矿床可能性研究)、攀登计划(B)(找寻难识别及隐伏的大矿、富矿的新战略、新方法、新技术基础性研究中专题——华南—扬子边界铅同位素急变带 Cu, Au 隐伏大矿同位素化探研究)与攀登预选(超大型矿床基础研究中的专题——岩石圈地球化学边界)、国家科学基金会重大项目(中国东南岩石圈中的地球化学课题)与面上基金(地球化学省划分的指标与格局,华北、扬子区太平洋型微块体的同位素体系剖析),中国科学院重大B(华南地球化学急变带及其与板块构造的关系)等项目资助取得的。有关项目和专题的完成得到了涂光炽院士、刘光鼎院士、谢学锦院士与孙大中院士的指导与帮助。涂光炽院士、欧阳自远院士、张本仁院士以及蒋志、周新华、夏毓亮、易善峰研究员等对本书有关内容进行了评审,给予了很高的评价,并推荐了本书的出版。参加这些项目研究和为本书的编写提供了资料与帮助的主要人员有王一先、王江海、王慧芬、邓尚贤、李献华、陈多福、陈毓蔚、邹日、张正伟、张海祥、邱华宁、涂湘林、常向阳、董云鹏、郭丽芳、朱旭宇等。同时本书的内容也与国内外许多地球化学家、地球物理学家和地质学家取得的成果密切相关。作者在此向有关专家表示最深切的感谢。

目 录

第一章 岩石圈地球化学不均一性与分区主要证据 ·····	(1)
一、关于地幔横向不均一性的证据与地幔化学区划·····	(2)
二、地壳横向不均一性的地球化学证据·····	(6)
三、矿石铅同位素组成·····	(11)
第二章 地球化学急变带-地球化学省边界 ·····	(14)
一、地球化学急变带的定义·····	(14)
二、大洋与大陆板块上的地球化学急变带·····	(14)
三、中国大陆上典型地球化学急变带区段的发现·····	(17)
第三章 铅、钷、铯同位素填图与等值线处理 ·····	(24)
一、铅同位素填图的优越性·····	(24)
二、数据选择与数据处理方法·····	(25)
三、 V_1 与 V_2 值等值线处理图解·····	(26)
四、岩石圈不同层次与不同同位素体系填图比较·····	(30)
五、中国大陆主要地球化学省边界铅同位素矢量值与属性判别标准·····	(33)
第四章 地球化学急变带的地质特征及其与主构造线的关系 ·····	(35)
一、地球化学边界与板块构造的关系·····	(35)
二、中国大陆主要地球化学急变带的位置及其相关的主构造线·····	(39)
三、克拉通边缘元古宙基底特征·····	(45)
第五章 地球化学急变带与地球物理场的关系 ·····	(48)
一、华夏—扬子—印支地球化学边界·····	(48)
二、华北块体边界·····	(58)
第六章 地球化学急变带对大型-超大型矿床分布的制约 ·····	(62)
一、超大型矿床产出与地球化学急变带的密切关系·····	(62)
二、地球化学边界大型-超大型矿床产出的主要特征与规律·····	(69)
第七章 地球化学急变带对油气资源的制约 ·····	(73)
一、块体性质对油气资源的制约·····	(73)
二、地球化学急变带-克拉通边界对油气田的制约·····	(74)
三、沿地球化学边界的碳矿床·····	(78)
四、辽河油田研究实例·····	(80)
第八章 地球化学省归属性与古大陆重建 ·····	(91)
一、中国大陆地球化学省与全球地球化学省的比较·····	(91)
二、劳亚大陆的被动离散与太平洋型微陆块的插入·····	(93)
三、东亚陆块在 Rodinia 泛大陆中的位置·····	(96)
四、冈瓦纳的离散与特提斯—印度洋域·····	(99)

第九章 地球化学边界-人类文明的“轨迹线”	(101)
一、经济命脉线	(101)
二、天然与人为的灾害线	(102)
三、地球化学省与古文物产地考证	(106)
四、自然景观的旅游热线	(108)
五、人类起源与重要文明发源地的“轨迹线”探索	(109)
主要参考文献	(112)

第一章 岩石圈地球化学不均一性与分区主要证据

地球的横向与垂向化学不均一性程度一直受到国内外地球化学家的关注与研究。从宏观上看，南、北半球就存在明显差异，如大陆主要集中于北半球，而南半球的超大型矿床又明显比北半球多。晚古生代以来冈瓦纳大陆不断离散，而北半球大陆产生强烈汇聚与挤压变形。直到现在北半球的高应力场使地震释放的能量比南半球高近一个数量级(图 1-1)。这很难完全归因于地球外作用力场的结果，而应由地球内部的化学与物理不均一性所引起。

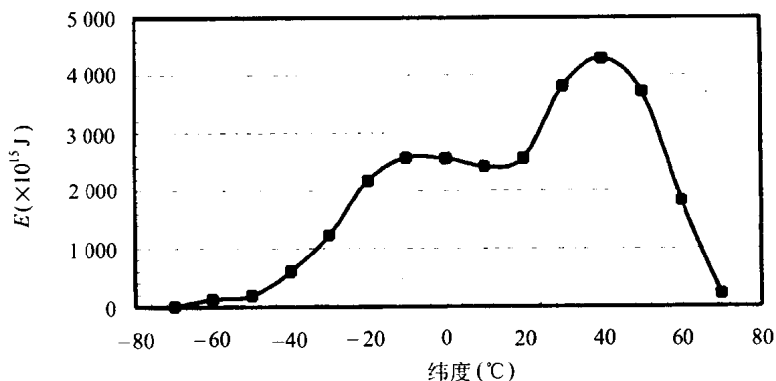


图 1-1 全球 20 世纪地震能量释放纬向分布图
(宋贯一, 1992)

在 20 世纪 70 年代末~80 年代初，在整个地球科学范围内，国际上由于上地幔与岩石圈计划的实施，因此地球科学家从三个途径来定量研究地球的大规模横向与垂向运动与不均一性。地质学家则侧重板块构造与大陆漂移研究，较定量地确定了全球不同古陆块各自特定的构造样式、地层组合、古地磁的极移曲线及相互结合与离散的时空关系。地球物理学家则在岩石圈横向与垂向物理不均性方面，以及在地幔对流圈与热柱分布上取得了大量资料。而地球化学家注重于全球地幔的横向与垂向化学不均一性，以及壳、幔物质通过俯冲带的再循环作用。国际上通过广泛的大洋玄武岩同位素体系研究，发现了大洋地幔存在着多个不同的地幔组分端元和大规模的横向与垂向化学不均一性；与此同时在北美西部则发现了大陆上的同位素分区现象。这一期间我国地球化学家也取得了壳、幔垂向与横向不均一的大量资料，并注意到中国大陆作为冈瓦纳大陆与劳亚大陆，特提斯域与太平洋域的重要结合部位，应是研究大陆地幔与地壳横向与垂向不均一性的极关键地段。

全球各大陆块大体可分成东冈瓦纳、西冈瓦纳、劳亚与北太平洋陆块。这些陆块

具有不同的地理域和时间域演化历史,同时又发生过多 次离散和重新组合形成泛大陆,如新元古代时期陆地域泛大陆 (Rodinia) 的形成与离散;古生代以来冈瓦纳大陆的形成与离散等。全球大洋的演化与各陆块的汇聚与离散密切相关,主要涉及特提斯—印度洋域与古亚洲—太平洋域的演化。由于地球各区域演化时间与空间上的差异,引起了化学组成在横向与垂向上存在大规模的不均一性。同时地球形成以前和地球演化早期的核幔分异阶段也会造成地球的大规模的不均一性。这些不均一性将给不同陆块和大洋的地壳与地幔带上了明显的同位素与元素地球化学标记。

地球的不均一性一方面是太阳系与地球演化的产物,另一方面又是地球演化动力的源泉。根据经典热力学的熵增加原理,体系的演化如只从不均一性变向均一性,将导致“宇宙热死”,没有演化的动力。地球内部放射性生热元素分布的不均一性引起了大规模的地幔对流,变化着的地幔对流导致了大陆的漂移、离散与汇聚。不同的离散与汇聚构造环境,导致不同类型的岩浆作用、变质作用与岩石圈层析作用。这将进一步导致不同块体岩石圈的化学不均一性。因此地球的演化应同时存在着从均一性到不均一性和从不均一性到均一性的两重过程。

一、关于地幔横向不均一性的证据与地幔化学区划

1. 大洋地幔横向不均一性的同位素观察

20 世纪 70 年代末通过 OIB, MORB 与 IAB 的铅-铀-钍同位素研究,首先发现了它们之间存在着明显的差异,因此 DePaolo 等 (1976) 提出了地幔垂向不均一性的模型。根据板块构造演化模型,多数学者认为洋中脊玄武岩 (MORB) 来自强亏损的上地幔,洋岛玄武岩 (OIB) 来自略亏损的下地幔,而岛弧玄武岩 (IAB) 代表了再循环的俯冲带地幔。20 世纪 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,或者是同样的 MORB 与 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。而同类型的大陆玄武岩各地区的差异也十分明显。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性的概念。Zindler 等 (1982) 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 μ), EM₁, EM₂ (富集地幔 1 与 2) 与 PREMA (流行地幔) 等等。Allegre 和 Dupre (1983) 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 [即具有高的铅同位素 μ 值、 $n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 与 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$]。Hart (1984) 则进一步阐明了北半球与南半球大洋地幔的大规模不均一性,确定了铅同位素的北半球参考线 (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 (1988) 则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。为了进一步确定全球大洋地幔地球化学省的划分,20 世纪 80 年代末至 90 年代,一些研究者 (Klein et al., 1988; Mahoney et al., 1989, 1992, 1998; Pyle et al., 1992; Hickey-Vargas, R., 1998) 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铅-铀-钍同位素组成上存在明显的区

别；对于相近的 $n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 值，印度洋比太平洋具有相对高的 $n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 与低的 $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})$ (见图 1-2)。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)，即地球化学边界。

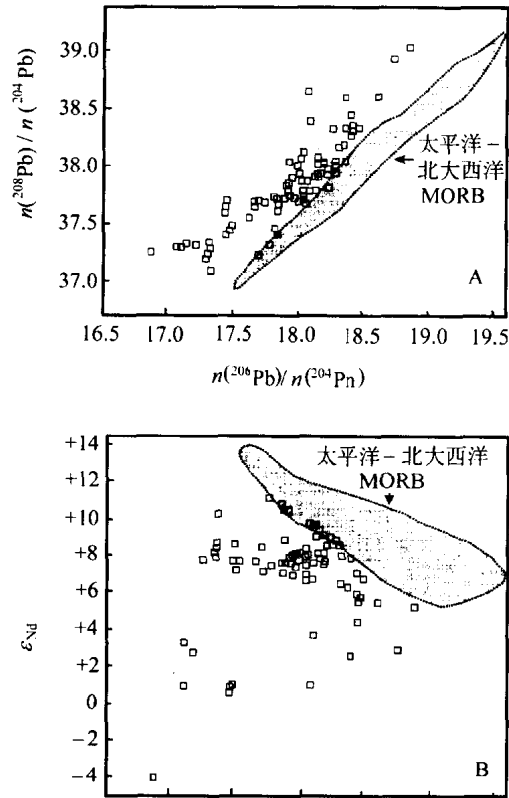


图 1-2 印度洋与太平洋玄武岩同位素体系在 $n(^{208}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb}) - n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ (A) 与 $n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd}) - n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ (B)

图解上的明显差异

方块点为印度洋域；虚线区为太平洋域

(Mahoney et al., 1998)

2. 大洋玄武岩主成分差异及其含义

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 400km 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。Humler 等 (1993) 统计了全球 398 个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 (图 1-3)，而其他主元素无明显差异。同时在大洋地幔 100~170km 深的范围内 S 波速与 Fe 含量呈反相关，而与 Na 含量呈正相关 (图 1-4)。在图 1-3 可看到北印度洋的两个点落在北太平洋与北大西洋的高 Fe 低 Na 端。近来同位素

填图的证据也表明北印度洋区存在太平洋域 (Mahoney et al., 1998)。对于这一关系存在两种解释：一种认为是地幔热状态的大规模横向差异所引起；较热的地幔区固相线较浅，部分熔融产生的岩浆 Na 含量较低，Fe 含量较高，同深度上的波速也较低，而较冷的地幔区情况则相反。另一种解释是将地幔波速的变化直接归因于地幔在主成分上的大

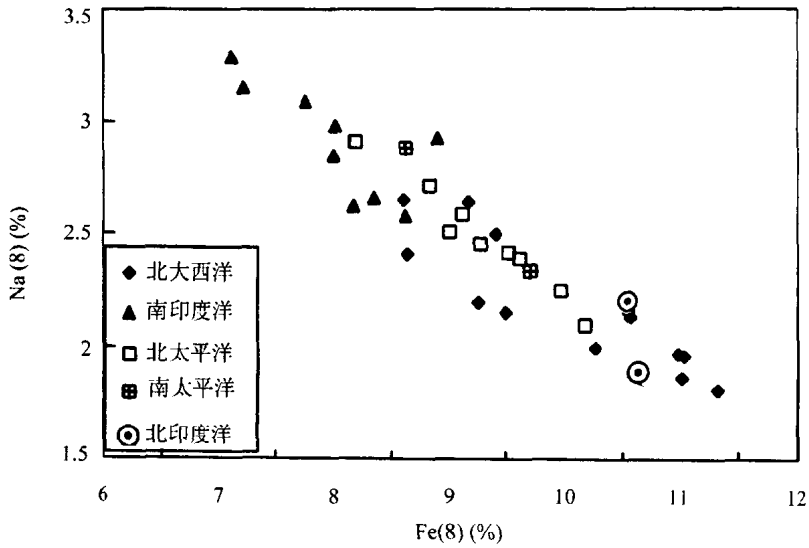


图 1-3 全球大洋 MORB 的 Na_2O 与 FeO 经标准化到 $\text{MgO}=8\%$ 时的 $\text{Na}(8)$ - $\text{Fe}(8)$ 相关图 (Humlér et al., 1993)

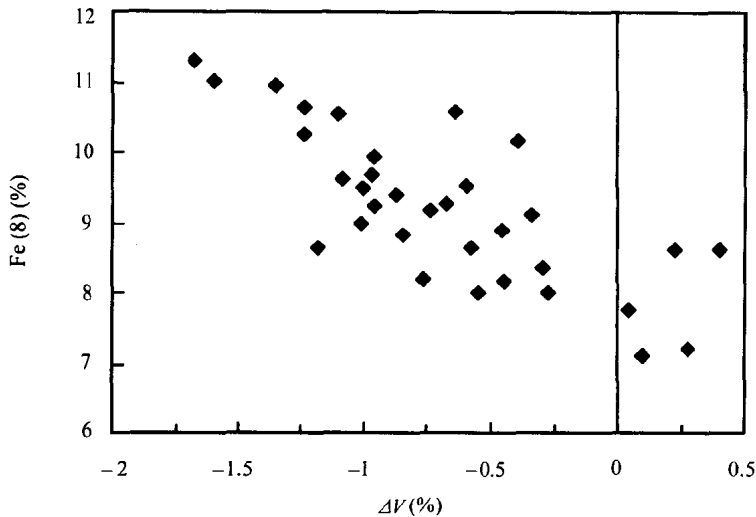


图 1-4 全球大洋 MORB 的 $\text{Fe}(8)$ 与 110km 深 S 波速相对偏差相关图 (Humlér et al., 1993)

规模横向不均一性。但无论哪种解释正确与否，这两种因果关系均可以产生岩石圈在化学组成上的大规模横向不均一性；它们的差别只是前一种可产生新生的块体不均一，而

后一种块体不均一性具有历史的继承性。同时地幔热状态的差异本身也包含着潜在的化学组成上的差异（特别是生热元素含量差异）。

3. 中国大陆地幔横向不均一性

20 世纪 80 年代中国东部与西南地区新生代玄武岩的铅-铈-钕同位素与微量元素研究取得了大量资料 (Zhu et al., 1983, 1989, 1990; 朱炳泉等, 1989, 1992; Peng et al., 1986; 刘北玲等, 1989), 发现了中国大陆地幔具有南亏损北富集的总体规律和四种地幔端元组分 (EM_1 , EM_2 , 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。有关地幔区划方面的同位素证据已在《地球科学中同位素体系理论与应用》第四章中作了详细讨论 (朱炳泉等, 1998)。

作者根据中国大陆 500 多个玄武岩 (SiO_2 % 在 40~55) 的岩石化学分析资料按 SiO_2 含量 1% 为间隔统计 FeO 含量的平均值。结果发现在 SiO_2 % 相同时华北块体 Fe 含量普遍比华夏低 2% 左右。从图 1-5 SiO_2 -FeO 相关图可见, 华北与华夏构成两条不同的相关线 (Zhu, 1994)。华北块体 Fe 含量水平与北半球 MORB 相当, 而华夏块体与南半球 MORB 相当。

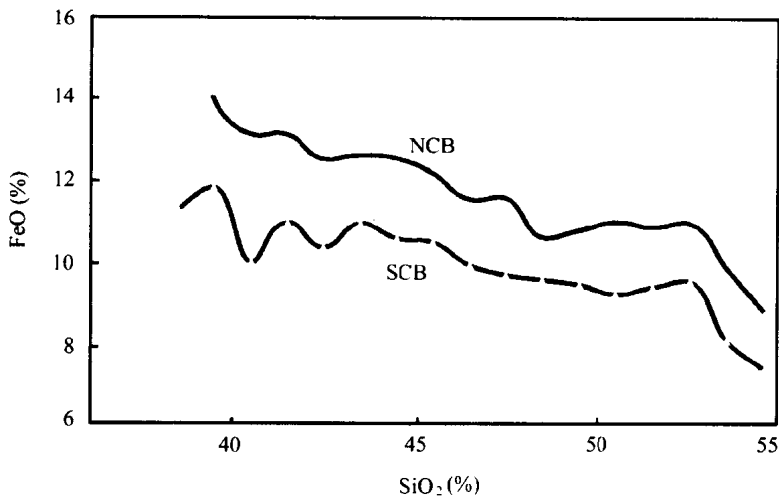


图 1-5 华北与华南新生代玄武岩 FeO- SiO_2 统计平均变化曲线

(以 1% SiO_2 间隔对 FeO 作统计平均)

NCB. 华北; SCB. 华南 (Zhu, 1994)

张本仁等 (1994, 1996) 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 (见表 1-1)。扬子块体地幔 Cu 含量是华北块体的 8~9 倍, 铅含量为 3~4 倍, 而 Au 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。

在中国西南的滇、黔、桂、川地区喷发了大面积的二叠纪溢流玄武岩。从这些玄武岩的主成分可以看到位于扬子块体上的玄武岩具有明显的高钛 (TiO_2 为 3.5 (%) ~ 4.5%) 和低镁 (MgO 为 4% ~ 4.5%); 而位于红河断裂与建水—弥勒—师宗—瓮安断裂以南的玄武岩则表现出高镁 ($\text{MgO} \geq 5.5\%$) 低钛 (TiO_2 为 $\leq 2.5\%$)。这表明两个区域的构造环境与上地幔化学与物理结构存在明显的差别。

Hofmann (1986) 曾指出, 大洋玄武岩 (主要以南大洋的资料为基础) 具有十分稳定的 $m(\text{Ce})/m(\text{Pb})(24)$, $m(\text{U})/m(\text{Pb})(0.5)$, $m(\text{Nb})/m(\text{U})(53)$ 等比值, 但与球粒陨石有明显的差异。作者对中国东南地区新生代碱性玄武岩中的上述元素进行了较精确的同位素稀释法测定, 结果表明华夏区新生代碱性玄武岩这些元素的比值也十分稳定, 且与上述数据相一致 [$m(\text{Ce})/m(\text{Pb}) = 24 \pm 1$ 、 $m(\text{U})/m(\text{Pb}) = 0.47 \pm 0.02$] (朱炳泉等, 1993, 见图 1-6)。但华北区新生代碱性玄武岩这些元素的比值明显低于上述数值 ($m(\text{Ce})/m(\text{Pb}) \approx 10$, $m(\text{U})/m(\text{Pb}) \approx 0.12 \sim 0.30$), 但相近于球粒陨石值。这表明不同大陆块体的地幔在微量元素比值上也具特定的指纹标记。

表 1-1 华北与扬子上地幔化学组成具显著性差异元素的含量*
(张本仁等, 1994)

	Cu	Pb	Au	Zr	Ba	W	Na_2O	K_2O	A_2O_3
华北	7~12	13	2.4~2.6	1.1~1.4	10~17	0.3~2.2	0.22~0.24	0.06~0.13	4.6~9.5
扬子	60~93	41~47	0.7~0.9	6.5~18.2	31~73	0.03~0.06	0.71~0.83	0.18~0.36	3.4~3.6

* 微量元素为 10^{-6}g/g , 主元素为百分浓度, Au 为 10^{-9}g/g , 含量范围为不同计算方法结果。

二、地壳横向不均一性的地球化学证据

现代地壳的大规模横向化学不均一性从地壳厚度、波速结构与热流的区域性明显差异已得到证实。然而地球化学家恰恰长期以来以均一组分模式来研究地壳演化, 认为地壳成分主要表现垂向的变化, 与地壳演化的成熟度有关。例如在研究全球花岗岩的 S 型、I 型等的分类时; 在进行上地壳与下地壳物源示踪时均希望能获得统一的同位素与微量元素划分指标。但是这种努力是不成功的; 在不同的构造块体上存在很大的差别。

1. 全球下地壳麻粒岩铀-铅体系比较

Zartman 等 (1981) 曾以北美、澳洲等地的铅同位素资料为主建立了“全球”统一的下地壳、地幔、造山带与上地壳铅同位素增长线, 即铅构造模式。麻粒岩相岩石被普遍认为是下地壳的组成, 并在发生麻粒岩变质作用以后铀已大量丢失 ($\mu \leq 2$)。然而从全球麻粒岩测得的铅同位素组成变化范围很大, 从中计算出麻粒岩相变质作用前的 μ 值在 7~10 左右 (涂湘林等, 1992; 表 1-1; 图 1-7), 超越了 Zartman 铅构造模式图上从下地壳、地幔、造山带到上地壳的所有范围, 并表现出南半球高 (> 8.4) 而北半球低 (< 7.8) 的总体趋向, 具有很强的大陆块体特征 (Zhu, 1994)。这种变化与南、北半球地幔的变化是近于同步的。

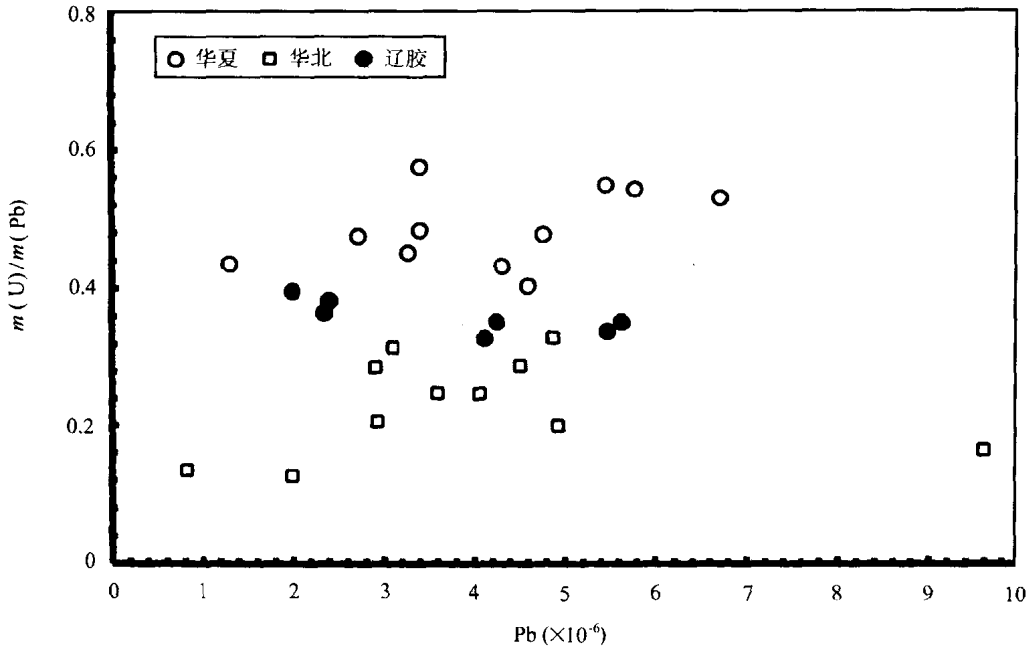


图 1-6 华南、扬子与华北新生代玄武岩 $m(U)/m(Pb)-m(Pb)$ 图解

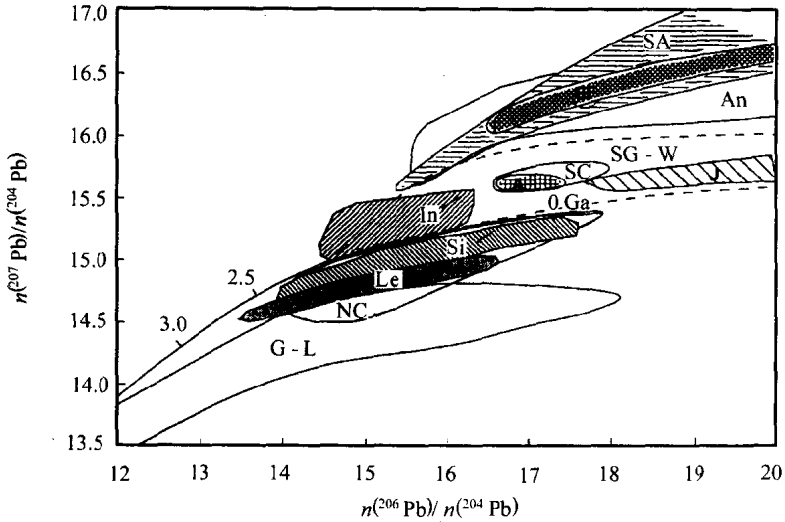


图 1-7 全球不同大陆块体麻粒岩相岩石

$n(^{207}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb}) - n(^{206}\text{Pb})/n(^{204}\text{Pb})$ 变化图解

G-L. 格陵兰—拉布拉多; Le. 苏格兰路易斯; In. 印度; A. 澳洲;
Si. 西伯利亚; An. 南极; SF. 南非; SA. 南美; NC. 华北; SC. 华南;
SG-W. 南戈壁乌拉山群; J. 佳木斯麻山群

2. 大陆增长时限的差异

铍模式年龄的大小与变化范围反映了不同大陆块体地壳增长的历史。Allegre 等