

中国大陆大规模成矿作用 油气田形成——来自岩石圈的约束

邱瑞照^{1,2} 李廷栋^{3,4} 邓晋福⁵ 周 肃⁵ 肖庆辉⁶ 叶天竺¹
耿树方² 陈秀法¹ 王翠芝⁵ 刘 勇⁵

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
3. 中国地质科学院, 北京 100037; 4. 吉林大学地球科学学院, 130061;
5. 中国地质大学, 北京 100083; 6. 国土资源部信息中心, 北京 100812)

摘要:由克拉通、造山带、裂谷、边缘海洋壳和岛弧等 5 大岩石圈类型构成的中国大陆, 由于不同类型岩石圈对应的动力学机制及其效应不同, 岩石圈不同类型之间的连接带必定是不连续带, 与大陆成矿作用有密切的联系。中国大陆已知的绝大多数金属矿床分布于岩石圈不连续和再活化不连续处, 表明岩石圈不连续为大型矿床(矿集区)形成提供有利的运-储空间。中国大陆西北、中国东部和西南地区构造-岩浆-成矿事件序列对比表明, 一个地区岩石圈的壳-幔岩石学结构、大规模成矿作用, 取决于最强的、最后一次的岩浆作用, 大规模成矿作用的发生起始于造山岩石圈根失稳、去根和大规模软流圈上涌时期, C 型埃达克岩的出现是其标志之一。分布于中国内陆的扬子、鄂尔多斯、塔里木和准噶尔盆地等地表热流值低的“冷盆”, 深部属于克拉通型岩石圈背景, 在构造上往往为造山带的前陆盆地, 克拉通型岩石圈构造上的稳定性决定了这些克拉通盆地不断被周围造山带吞食、掩埋、改造的格局, 虽然在这些盆地内如今都已发现油气田, 但在盆地外那些现今被造山带前缘逆冲体覆盖的区域, 也应该是油气田产出的有利区域, 即盆地外造山带花岗岩下依然是寻找油气田的重要远景区。分布于中国东部的平原区和黄海、东海及南海等陆缘海区, 属于地表热流值高的“热盆”, 这些盆地下对应的是裂谷型或洋壳型岩石圈, 它们是在新生代时期中国东部沿海地区进入了新的构造演化阶段——大陆裂谷作用下形成的, 以伴随广泛的玄武岩喷发为标志, 对流地幔物质和热输入使盆地热流值升高成为“热盆”、大陆裂谷型岩石圈, 乃至洋壳岩石圈(如南海中央海盆); 伴随裂陷作用及伸展构造普遍发育的幔源玄武岩浆大量喷发, 以及大量沉积物的快速沉积、埋藏有利于油气田的形成, 其中的组分, 如 CO₂ 气田中的 CO₂ 可能主要源于地幔。中国东部平原及边缘海区域是最具前景的油气田分布区之一。

关键词: 岩石圈不连续; 大规模成矿作用; 油气田形成; 岩石圈约束; 中国大陆

中图分类号: P618.130.2; P618.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2006)04-0852-14

对于金属矿床的成矿作用, 20 世纪 90 年代以来地质学家们普遍认识到它们与壳-幔相互作用, 特别是下地壳、岩石圈地幔/软流圈系统变迁对其有重要的控制作用, 把成矿作用与成矿物质供给-传输-集聚过程和大陆形成演化联系起来^[1-3], 从壳-幔相互作用和物质-能量交换传递新视角研究大陆成矿作用过程已成为重要方向^[1,25-9], 其中岩石圈不连续可能是把大

陆成矿作用与壳-幔相互作用、岩石圈演化等深部过程联系起来的重要纽带^[5,9]。盆地与能源矿产关系密切, 不同类型盆地在空间上的分布差异反映了不同地区深部过程、深部地球动力学背景的差异^[10-11], 如 Burke 等^[10]把裂谷看作是岩石圈在拉伸过程中破裂了的地区形成的狭长凹陷。这样, 无论金属矿产, 还是能源矿产可能都与岩石圈演化有密切关系。对于

收稿日期: 2006-06-12; 改回日期: 2006-06-28

基金项目: 国土资源部科技专项计划项目(200010103); 国家自然科学基金项目(NSFC402344048, No.40572063); 中国地质调查局地质大调查项目(1212010561502, 1212010661315, 1212010561501)、中国地质大学“岩石圈构造、深部过程及探测技术”教育部重点实验室开放课题(2003009, 2003010)项目联合资助。

作者简介: 邱瑞照, 男, 1963 年生, 博士, 岩石矿物矿床专业, 现主要从事境外地质矿产研究; E-mail: qjurrzz@yahoo.com.cn。



图 1 中国大陆不同类型矿床分布示意图

Fig.1 Distribution of different types of deposit in continental China
(图 1a,b 中矿床资料据中国地质调查局发展研究中心“全国矿产数据库”)

经历了多次造山作用、由多个小陆块镶嵌而成的中国复杂大陆,可以区分出克拉通、造山带、裂谷、边缘海洋壳和岛弧等 5 个类型岩石圈^[2],笔者试图以此为基础,探讨这些不同类型岩石圈与大规模金属成矿作用、油气田形成的关系。

1 岩石圈不连续与中国大陆金属成矿作用

岩石圈不连续带为岩石圈块体之间,或者说不同类型岩石圈之间的壳-幔结构、岩石组成、地热、陆壳和岩石圈厚度等岩石圈成分和结构要素的不连续,它不同于一般意义上的深断裂或超壳断裂等,而是地质、地球物理意义上的综合不连续概念^[9]。经历了漫长的地质历史、多次造山拼合过程形成的复杂中国大陆,初步可以区分为克拉通、造山带、裂谷、边缘海洋壳和岛弧等 5 大岩石圈类型,以及造山型岩石圈亚类,它们可以作为岩石圈角度划分的中国大地构造单元^[12]。不同岩石圈类型的动力学性质不同,如造山带根具有密度大、温度低(冷)和保留时间短而活动的特点;克拉通岩石圈具有长期稳定性的特点;裂谷型岩石圈与岩石圈伸展、地幔热柱对应,因此不同岩石圈类型对应的动力学效应差异必然制约着相关地质事件的性质及其过程。这样,从不同岩石圈类型对应的动力学机制及其效应上看,不同岩石圈类型之间的连接带必定是岩石圈构造薄弱带或岩石圈不连续带,而且必定是构造-岩浆-成矿活动的主要场所,必然与大陆成矿作用具有密切的关系^[9]。

中国大陆主要金属矿床(图 1-a)、矿床类型(图 1-b)绝大多数分布在岩石圈不连续或再活化不连续的事实(图 1-c),说明岩石圈不连续确实为大型矿床形成提供有利储矿空间。

2 中国大陆造山带型岩石圈与成矿作用的关系

众所周知,造山带是壳-幔相互作用最强烈的地区,绝大多数的金属矿床成矿作用与造山带的岩浆作用有关。从岩石圈角度,中国大陆造山带型岩石圈按时代可以分为以额济纳旗为代表的古生代岩石圈;以大兴安岭、燕山—太行山、湘中赣中为代表的燕山期岩石圈;以羌塘、冈底斯、喜马拉雅、昆仑山、祁连山、三江等为代表的新生代岩石圈;如果依据造山过程(或者造山相),造山带型岩石圈又可以划分为:已拆沉或正在拆沉去根的造山带;额济纳旗、冈底斯、大兴安岭、燕山—太行山、南岭中段、秦岭;拆沉又被加厚的造山型岩石圈;羌塘、昆仑山、祁连山、天山、阿尔泰山等^[12];如何认识和联系这些造山带型岩石圈与成矿作用的关系?

2.1 中国大陆区域成矿特点

2.1.1 中国西北地区

中国西北地区属于中亚造山带西段,位于西伯利亚和中朝—塔里木地台之间的中亚造山带,形成背景是古亚洲洋。伴随古亚洲洋发育、消亡产出的岩浆活动,在时间上可分为在加里东期和华力西期两个造山旋回,其中以华力西晚期的

岩浆活动最强烈(图 2-a)。根据已有的矿床同位素年龄^[13-17],在中亚造山带虽然晚元古代(例如内蒙古白乃庙铜矿)和早古生代(例如哈萨克斯坦的科克塔斯扎尔铜金矿、博谢库利铜钼矿、库斯莫龙铜锌矿、阿克巴斯套铜钼矿、热依桑铜钼矿等)就已有成矿活动,但成矿作用的高峰期或大规模成矿时期却为古生代末期(晚石炭世和二叠纪)(图 2-a),显示大规模成矿时期与区域花岗岩浆活动的高峰完全一致特征(图 2-b)。

花岗岩和矿石的 Sr、Nd 等同位素^[18-19]研究结果表明,该区岩石圈主要是显生宙形成的,它与新元古代晚期→古生代早期的蛇绿岩建造同时形成^[20-23],古亚洲成矿域的地壳主要由俯冲—增生杂岩构成^[21,24];Sengor 等^[24]认为该区显生宙的地壳生长达 50%。鉴于古生代花岗岩和矿石的 Sr、Nd 同位素普遍具有低 Sr、 ϵ_{Nd} 为正值的特点^[18-19],成岩成矿物质大量来源于地幔,该区也称为“地幔成矿域”^[19]。

2.1.2 中国西南地区

中国西南的青藏高原地区,总体上地质和矿产的研究程度较低。已有矿床、矿点反映的信息表明,矿产的产出与火成岩分布空间相对应,成岩成矿时代自北向南变新;青藏高原北部被造山系卷入后具有“老物质新结构”特点的祁连山和昆仑山造山带,成矿主要是古生代的;中生代主要在冈底斯南北两侧产出与蛇绿岩有关的铬铁矿(东巧、罗布莎等);在三江、冈底斯东段产出的矿床主要是新生代(图 3)。

在三江地区,虽然经历了自元古代—新生代以来漫长的地质演化历史,且古生代至新生代火成活动也都比较强烈,形成了一定数量的矿床,但目前发现的大多数大型矿床主要是喜马拉雅期的(图 3)。研究表明,沿金沙江—哀牢山断裂带出露的剑川碱性火山岩体群(粗面岩盖在渐新统宝相寺组上面)、老君山正长岩(侵入于渐新统砂砾岩层中)、沿兰坪—思茅断裂出露有永平卓潘碱性岩体、巍山岩体群,它们属于受到地壳物质混染的幔源富钾的碱性岩,其中发现较多的幔源富碱超基性—基性岩包体^[25],可以作为喜马拉雅期该区一次重要的对流地幔输入事件的标志。矿床的成矿时代与富碱斑岩的侵入时代基本对应,峰值都集中在 30~50 Ma(图 4),且与羌塘地块的成矿年龄 26~64 Ma(峰值 41 Ma)吻合,说明该区大规模成矿作用主要与班公湖—怒江带闭合事件形成的造山带型岩石圈演化相关。

在冈底斯东段是近年发现的铜多金属远景区,该区大规模成矿作用主要与雅鲁藏布江带闭合事件形成的造山带型岩石圈演化相关。根据芮宗瑶等^[26],冈底斯斑岩、矽卡岩型铜钼金矿带的年龄为 14~18 Ma,如曲龙和冲江二长花岗岩斑岩的锆石 SHRIMP 年龄分别为 (17.58±0.74) Ma 和 (15.60±0.52) Ma,冲江不含矿闪长玢岩锆石 SHRIMP 年龄为 (14.54±0.65) Ma;曲龙和冲江含矿岩体钾长石的 K-Ar 年龄分别为 (16.43±0.31) Ma 和 (15.77±0.45) Ma;其辉钼矿 Re-Os 等时线年龄分别为 (15.99±0.32) Ma 和 (14.85±0.69) Ma。另外,该带内的邦布斑岩型 Cu-Mo-Pb-Zn 矿床的辉钼矿

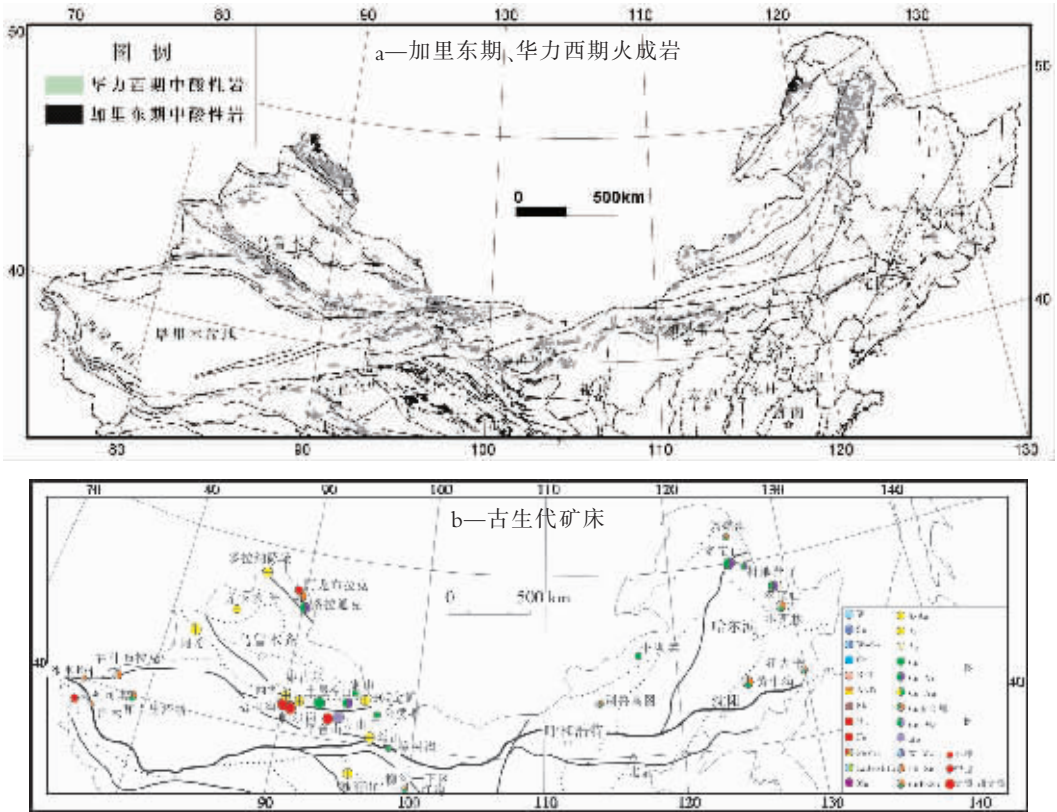


图 2 中国大陆西北地区古生代火成岩、矿床分布图

Fig.2 Distribution of Paleozoic igneous rocks and mineral deposits in northwestern continental China

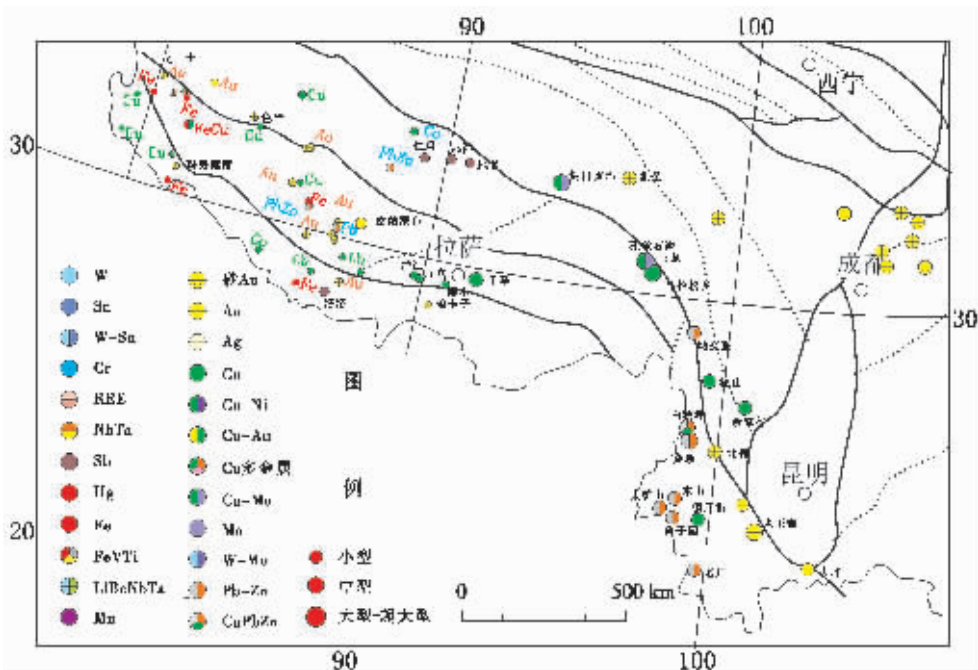


图 3 青藏高原南部新生代矿床分布图

Fig.3 Distribution of Cenozoic mineral deposits on the southern Qinghai-Tibetan Plateau

Re-Os 等时线年龄为 $(15.32 \pm 0.79) \text{ Ma}$ ^[27]。通过大量火山岩(图 5-a)和侵入岩(图 5-b)年龄统计,冈底斯地区新生代岩浆活动主要在 10~25Ma^[28],这个时间也是冈底斯的主要伸展时期。上述矿体、含矿岩体的年龄均在主要伸展时期(10~25 Ma)岩浆活动的范围(图 5),即该区主要成矿时期与该区最晚的岩浆活动时期一致。

2.1.3 中国东部地区

中国东部火成岩活动时间长、分布广、岩类多,但分布不均一。前寒武纪侵入体分布局限,加里东期是中国北方大

陆拼合时期,以华南加里东褶皱带岩浆活动最为强烈,秦岭和东北次之;华力西期—印支期花岗岩主要分布于华北、华南的南北边界。燕山期是中国东部花岗岩形成的最主要时期(图 6-a),以华南花岗岩最发育,次为华北,东北最少,多集中于狭义的东部地区(即太行山、武陵山以东地区)。随着时间推移,岩浆活动具有由西向东迁移的趋势,即白垩纪的侵入体多集中分布于东南沿南的浙东、闽东以及山东半岛东部。

虽然伴随地质演化,中国东部有不同时期的成矿作用发生,但已有资料表明燕山期是中国东部成矿最主要时期(图6-

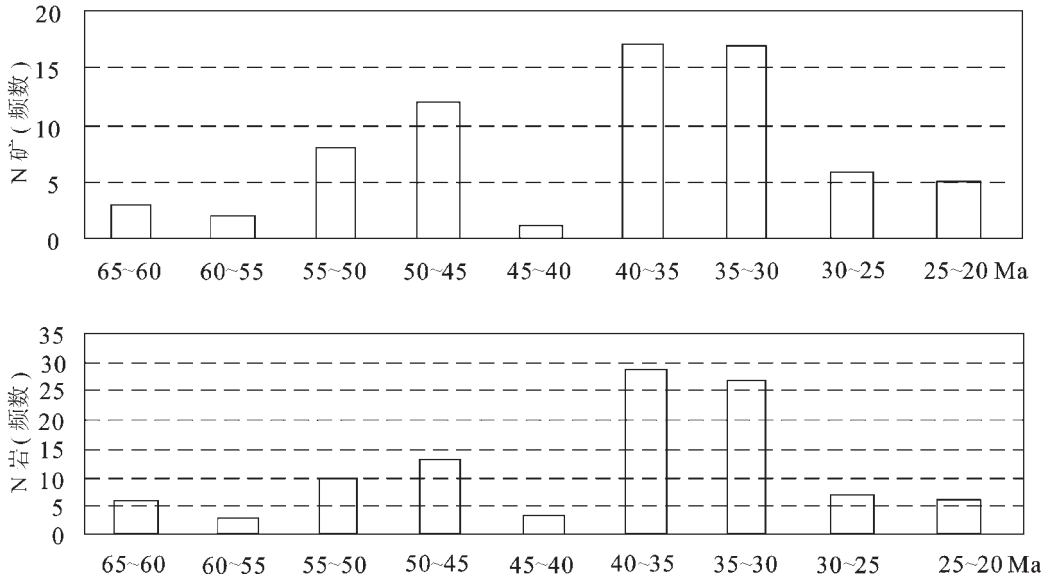


图 4 三江富碱斑岩与成矿时间分布特征(转引自李文昌等^①)

Fig.4 Distribution characteristics of high-alkali porphyry and mineralization ages in the Sanjiang area (quoted from Li Wenchang et al.)

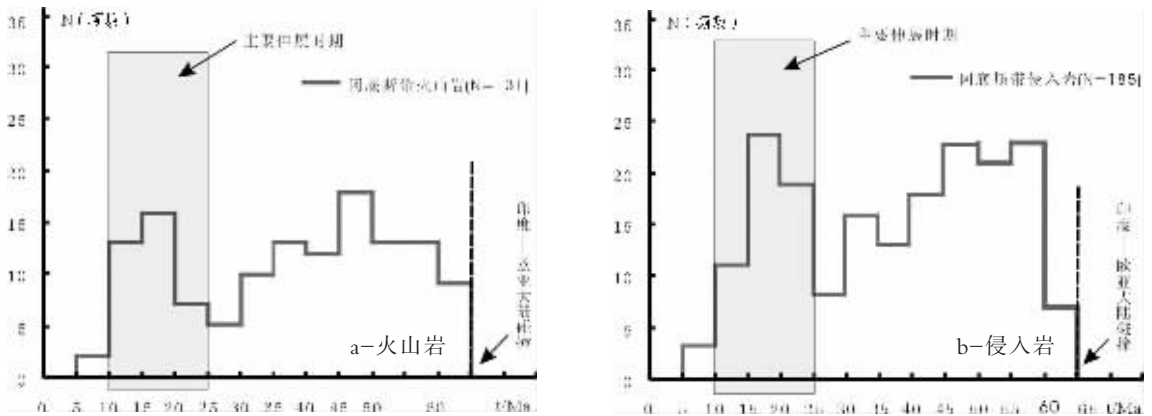


图 5 青藏高原冈底斯新生代火成岩年龄分布特征^[28]

Fig.5 Distribution characteristics of ages of Cenozoic igneous rocks in Gangdise of the Qinghai-Tibetan Plateau^[28]

①李文昌,陈永清,陈建国,等.西南三江南段成矿规律及找矿方向综合研究(地质调查项目报告),2003.

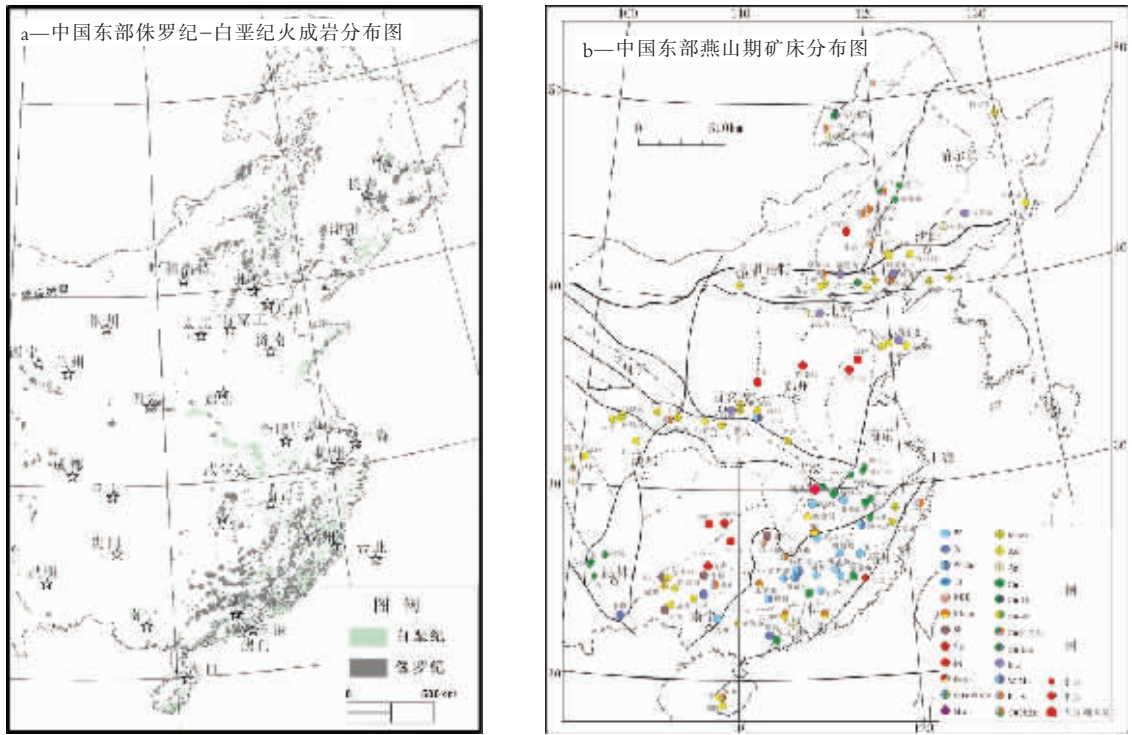


图 6 中国东部燕山期火成岩、矿床分布图

Fig.6 Distribution of Yanshanian igneous rocks and ore deposits in eastern continental China

b),在全国范围内统计 85%以上的大型、特大型矿床都分布在中国东部,时代主要为中生代^[29]。同位素年龄统计表明,中国东部花岗岩和矿床的年龄高峰值都在 120~140 Ma,即最强烈的岩浆活动(图 6-a)与成矿作用的主要时期一致(图 6-b)。

中国东部的燕山期花岗岩形成于中国大陆拼合之后,大地构造环境可能为靠近大陆一侧的岩浆弧^[30],它们是在统一中国大陆动力学背景下岩石圈/软流圈系统与太平洋板块俯冲联合作用的产物^[31-32],但是由于改造前岩石圈深部物质组成和性质差异,导致东北、华北和华南地区的燕山期花岗岩岩石组合、矿产组合各不相同(表 1),反映了深部物质组成(源区)对火成岩组合、矿产组合的约束^[33],同时也与燕山期造山型岩石圈的形成密切相关。

2.2 造山带型岩石圈演化与大规模成矿作用

2.2.1 造山带型岩石圈演化基本过程

根据造山带成因一般可以分为两类^[34]:一类是与大洋发育、消亡有关的(包括大大小小的洋)造山带,另外一类是与洋无关的陆内或板内造山带。从中国大陆形成历史、蛇绿岩记录和造山带中花岗岩的形成时代与形成环境来看^[35],中亚造山带形成于古生代,秦祁昆、三江造山带主要形成于古生代,延续到早中生代,青藏高原冈底斯造山带形成于新生代。这些造山带在形成环境上都属于与大洋发育相关的造山带,在空间上分布于中国大陆西部(属于中亚造山带东段的东北

在中生代已被改造^[36]);而中国东部的东北、华北、华南燕山期造山带花岗岩,形成于中国大陆拼合之后,大地构造环境可能为靠近大陆一侧的岩浆弧^[30];喜马拉雅造山带属于陆内俯冲形成的、无大洋发育历史的造山带。

不论是那一种类型的造山带,它们都是在挤压机制下形成的,因此,它们具有相同的形成过程。图 7 为展示青藏高原现今岩石圈不均一的图件,并代表了现今该区造山岩石圈动力学演化的几个主要阶段^[34]。实际上它也代表了造山带岩石圈形成、演化的一般过程(图 7-a-b-c)。在造山挤压机制下,强烈构造变形会使大陆壳被破坏;对流地幔物质和热输入大陆后,玄武岩的底侵也会导致刚性的地壳加热而弱化,弱化诱发的流变学条件有利于陆壳收缩变形和加厚(图 7-a);收缩构造环境有利于底侵岩浆封存使地壳加热熔融形成花岗岩上侵,从而使原来的陆壳成分趋酸性;随着壳内分异残留的榴辉岩堆积,其高密度诱发造山带岩石圈根失稳,导致岩石圈大规模去根减薄和构造、热失去平衡,从而促使大量对流地幔物质和热输入大陆,使岩石圈地幔部分熔融、软流圈物质上涌,大规模的壳幔相互作用致使岩浆活动达到峰期、形成大规模成矿作用发生(图 7-b)。造山带岩石圈大规模去根带动下伏残留的克拉通岩石圈地幔一起拆沉后,输入大陆的对流地幔物质,在分出玄武质岩浆后的冷却物形成新的岩石圈地幔(图 7-c)。因此,对流地幔物质和热输入会使原有的陆壳和岩石圈

表 1 中国东部燕山期造山带花岗岩岩石化学成分特征值

Table 1 Characteristic values of the petrochemical composition of granitic rocks in the Yanshanian orogenic belt in eastern Continental China

地区	华北(N=23)			华南(N=31)			东北(N=110)		
	特征值/%	平均	最小	最大	平均	最小	最大	平均	最小
SiO ₂	60.42	45.19	75.98	71.16	55.53	76.62	68.75	50.64	78.53
K ₂ O+Na ₂ O	7.40	1.81	9.66	8.04	5.12	10.71	7.82	4.12	10.01
Na ₂ O/K ₂ O	2.65	0.73	21.48	0.68	0.29	1.23	1.46	0.58	6.52
K ₂ O	2.96	0.29	4.80	4.61	0.20	6.71	3.50	0.67	6.30
DI	67.39	14.06	97.83	83.74	48.94	93.23	65.35	28.99	83.42
A/CNK	0.89	0.34	1.29	1.07	0.72	1.53	0.97	0.75	1.11
σ ₄₃	3.75	0.60	11.31	2.40	1.02	4.88	0.54	0.10	1.48
AR	2.61	1.25	5.51	3.33	1.76	4.94	1.50	1.08	1.99
岩石组合	I+S 型			S 型, 过铝			A 型, 富钠		
矿产组合	Mo, Cu, Au			W, Sn, Mo, Bi, Nb, Ta, Be, Sb			Cu, Au		

地幔组成均受到强烈改造。

2.2.2 大规模成矿作用标志 —— C 型埃达克岩

从造山带岩石圈演化的基本过程来看, 造山带过程中岩石圈根失稳、去根(图 7-b), 才促使大量对流地幔物质和热输入大陆, 而大规模软流圈物质上涌、强烈的壳幔相互作用致使岩浆活动达到峰期、形成大规模成矿作用, 大规模岩浆活动和大规模成矿作用是相互依存的深部过程产物。因此, 岩石圈根失稳、去根(图 7-b), 对于大规模成矿作用发生具有决定性的作用。那么, 如何判别是否经历了这个过程, 或者达到了哪个阶段? 下面笔者从近年倍受关注和争议的埃达克岩来探讨这一问题。

Defant 等^[30]厘定出一种新的火成岩——“adakite (埃达克岩)”与绝大多数来自于地幔楔(受俯冲大洋板片流体交代过)的火山弧火成岩^[30]不同, 具有如下特征: 岩石类型为中酸性钙碱性岩石, 缺失基性端员, 岩石组合为岛弧安山岩、英安岩、钠质流纹岩及相应的侵入岩; 主要矿物组合为斜长石+角闪石±黑云母±辉石±不透明矿物; SiO₂≥56%, Al₂O₃≥15%, MgO 通常<3%(很少>6%); 与正常的岛弧安山岩-英安岩-流纹岩相比, 低重稀土元素和 Y (如 Y≤18×10⁻⁶, Yb≤1.9×10⁻⁶)、高 Sr (大多数>400×10⁻⁶)、高场强元素(HFSEs)含量相似。近来有研究表明, 在增厚(>40 km)的下地壳环境中, 底侵玄武质下地壳的熔融也可形成与埃达克岩的地球化学特征类似的岩石。即埃达克岩的成因类型可能有两种: 由俯冲板片的熔融形成的 O 型埃达克岩和由底侵玄武质下地壳或加厚下地壳熔融形成的 C 型埃达克岩。对于根据地球化学特征分类的埃达克岩来说, 确定其是否具有这些特征并不难, 困难的是进一步区分是属于 O 型还是 C 型埃达克岩, 由于受源岩、部分熔融程度、岩浆上升通道混染等因素影响, 仅仅根据地球化学特征往往难以区分。建议对埃达克岩的研究除了地球化学特征外, 还需要关注: 如果是 O 型埃达克岩, 需要证实此前曾经有洋壳, 确实发生过俯冲, 且俯冲深度达到 40~45

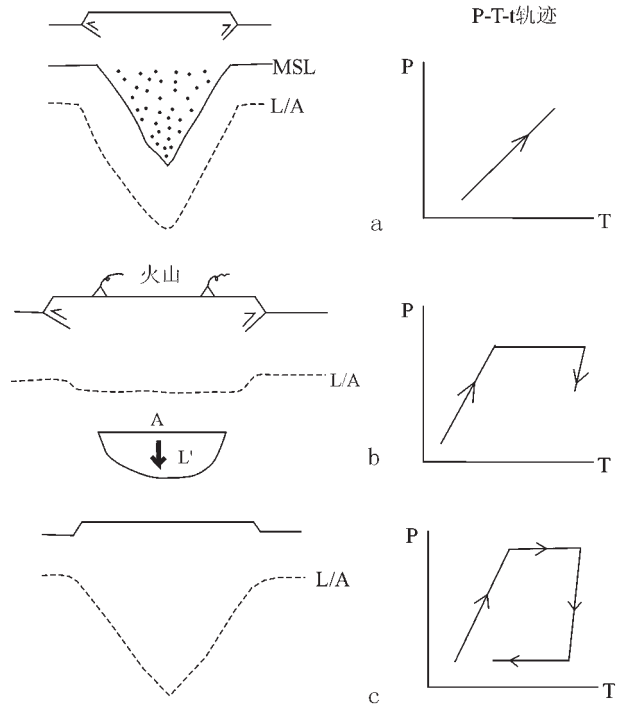


图 7 造山带岩石圈演化过程(据邓晋福等^[34])
MSL—强的力学岩石圈边界(黑点示中源地震); L/A—热学岩石圈边界; L—拆沉的岩石圈; A—软流圈; a—早期相: 帕米尔型岩石圈冷根; b—中期相: 念青唐古拉型减薄岩石圈; c—晚期相: 羌塘型“热”岩石圈

Fig.7 Three-stage model for the evolution of the lithosphere beneath the orogenic belt (after J. F. Deng, et al^[34])
MSL—boundary of the strongly mechanical lithosphere (black dots represent intermediate-focus earthquakes). L/A—boundary of the thermal lithosphere; L—delaminated lithosphere; A—asthenosphere a—early phase: Pamirs-type lithospheric cold-root; b—middle phase: Nianqingtanggula-type thinned lithosphere; c—late phase: Qiangtang-type “hot” lithosphere

km 发生熔融;对于 C 型埃达克岩,需要证实该区地壳确实发生过造山作用,地壳曾经加厚,并由深达 50 km 的下地壳部分熔融形成;这样,才能更好地厘定其形成机制和地球动力学意义。

埃达克岩因与岛弧正常的钙碱性火山岩具有明显不同的地球化学特征,才成为一类新岩石^[53],她不仅起源于年轻热洋壳部分熔融,也起源于老洋壳、加厚陆壳等的部分熔融。玄武质岩石的高温高压熔融实验^[37-38]证实板片熔融可以产生埃达克岩浆;而对紫苏花岗岩和淡色花岗岩在 1.5~2.5 GPa 压力条件下的熔融实验^[39],也可获得特征类似于埃达克岩的部分熔体(其残留组合为酸性高压麻粒相)。高压熔融实验结果似乎表明只要岩石达到某种深度(压力)和具有足够的热能,几乎所有常见的地壳岩石(从酸性岩到基性岩)的部分熔融,都可以产生类似于埃达克岩特征的岩浆。从岩相平衡来看,在中高压(1.2~4 GPa)和中等程度(熔体分数为 25%~35%)部分熔融的各类源岩,残留部分必然是偏基性的,融出的熔体也必然具有高铝、轻稀土富集、重稀土极度亏损、高铯、不发育明显的富铯异常等特征^[37-38,40-41],因为榴辉岩相条件下,高铝、高铯、重稀土和 Y 的极度亏损与显著的石榴子石固相残留有关,轻稀土的富集与其强不相容性有关,不发育负铯异常与大量斜长石分解进入熔体有关,如邓晋福等^[40]所论证:无负铯异常的中酸性火成岩,是其起源于加厚下地壳的标志;至于部分熔融熔体中富钠或富钾可能更多地反映源岩的特征。因此,具有类似于埃达克岩地球化学特征的岩石,与其说是受形成机制的制约,不如说是元素配分行为受岩石矿物相约束的结果。

综上所述,埃达克岩形成要求偏基性的源岩或榴辉岩相岩石,它可以由达到榴辉岩相深度的俯冲洋壳(O 型埃达克岩)或加厚下地壳(C 型埃达克岩)的部分熔融形成。在造山带岩石圈演化过程中,陆壳加厚引起的壳内分异残留的是偏基性的榴辉岩相岩石,高密度的榴辉岩相岩石堆积将导致其下的造山带岩石圈失稳、去根。如果在壳底残留有榴辉岩相岩石的话,上涌的软流圈物质和热导致去根后残留的榴辉岩相岩石部分熔融将产生 C 型埃达克岩浆,从这个意义上说 C 型埃达克岩是造山带岩石圈根拆沉去根的记录^[5,32]。这样,对于一个地区而言,只要证实在某一时期有 C 型埃达克岩出现(并不要求都是埃达克岩),即说明该区造山带型岩石圈演化已经到达或者经历过造山带岩石圈失稳、去根阶段(图 7-b)。

以青藏高原为例,欧亚-印度板块碰撞发生于 65 Ma 左右^[42-44],由林子宗火山岩反映出岩浆性质经历了由中钾钙碱性→高钾钙碱性-钾玄岩质的过程,即林子宗火山岩记录了从初始碰撞→碰撞→碰撞后这一过程的完整信息,新获得的林子宗火山岩年龄框架为 64.43~43.93 Ma^[43],这一年龄区间与冈底斯岩基深成岩主体活动年龄区间大致相同(65~40 Ma),即岩浆活动伴随岩石圈加厚而在 40 Ma 左右停歇,但是随着印度板块持续向北俯冲,南北向地壳大量缩短、东西向伸展形成南北向裂谷系,不断被加厚的冈底斯岩石圈,因

造山带型岩石圈山根拆沉、软流圈上涌,而使岩浆活动在 10~25 Ma^[28]期间重新活跃起来。在已报道的青藏高原 C 型埃达克岩中,总体上羌塘 C 型埃达克岩早于冈底斯,说明造山带岩石圈去根首先是羌塘,然后是冈底斯^[5,30],这与成矿作用峰年龄羌塘早(41 Ma),冈底斯晚(15.5 Ma)(表 1)一致。由此说明,冈底斯地区 10~25 Ma 主要伸展时期^[28]是该区成矿作用发生的主要时期,也是该区造山带型岩石圈壳-幔物质结构形成的主要时期(图 7-b)。

对于中国已发现的埃达克岩及其与成矿的关系,张旗等^[45]进行了很好的总结。从与埃达克岩有关的矿床产出时代来看,中亚造山带中段、西段主要为古生代,并以晚古生代为主,中国东部除华北地台北缘为早侏罗纪外,其余绝大多数为早白垩纪,藏南主要为新生代,这与前面讨论的最后、最强烈的岩浆活动是成矿作用的主要时期一致。从埃达克岩所揭示的动力学意义来看,晚古生代时期在中国北方大陆中亚造山带中东段、白垩纪时期在中国东部、新生代时期在藏南冈底斯地区,均发生过造山带型岩石圈的大规模拆沉、去根作用。

综合不同地区的岩浆活动峰期与大规模成矿时期,结合中国大陆岩石圈物质、结构及形成时代(表 2),可以得出:一个地区的大规模成矿作用、岩石圈的壳-幔岩石学结构,取决于最后、最强一次的岩浆作用;换句话说,最后、最强一次的岩浆活动时期,是一个地区岩石圈结构、物质结构形成和成矿作用发生的主要时期。从造山带型岩石圈演化过程来看,还可以得出这样的认识:一个地区大规模成矿作用的发生起始于造山带岩石圈根失稳、去根和大规模软流圈上涌时期,C 型埃达克岩的出现是其标志之一。

3 中国大陆克拉通型、裂谷型和边缘海洋壳型岩石圈与油气形成的关系

盆地往往是油气资源聚集的重要场所。中国大陆的盆地大致可分为两类:一类是分布于内陆的扬子、鄂尔多斯、塔里木和准噶尔盆地等,这些盆地下属于克拉通型岩石圈,在构造上往往为造山带的前陆盆地,属于地表热流值低的“冷盆”;另外一类是分布于中国东部第二、第三沉降带的裂谷盆地,这些盆地下对应的是裂谷型乃至洋壳型岩石圈,地表热流值高,属于“热盆”^[46]。东西部两类不同性质的盆地都是中国油气资源的重要产地。

3.1 中国大陆克拉通型岩石圈与油气形成的关系

研究表明^[47-48],构造流体大规模运移聚集有利于油气田的形成。其原理如图 8 所示,前陆盆地的碎屑楔可以被前进式的逆冲带前缘所超覆,构造(加上原有的沉积物负荷)载荷效应有助于生物成分烃的成熟,和其他流体的排出(图 8 中的①和③),流体的迁移可以导致前陆盆地内金属矿床的形成,烃的迁移和圈闭形成有价值的油气田。Oliver^[47]指出,岩脉与造山带逆冲体下的大陆边缘沉积物由于构造加载排出流体(图 8 中的①),这些流体携带热、矿物、石油(petroleum)

表 2 中国大陆不同地区壳-幔物质结构形成、大规模成矿与岩浆活动时间对比

Table 2 Comparison of the times of the formation of crust-mantle material structures, large-scale metallogenesis and magmatic activities in different areas of continental China

地区	壳-幔结构形成时期	壳-幔物质形成时期	岩浆活动峰期	大规模成矿时间	
				年龄范围(数据数)/Ma	峰年龄/Ma
中国东部	燕山晚期	燕山晚期	燕山晚期	70~250(755)	120~140
东北地区	燕山晚期	燕山晚期	燕山晚期	90~220(243)	120~140
燕山-太行山	燕山晚期	燕山晚期	燕山晚期	97~187(168)	110~140
东秦岭-大别	燕山晚期	燕山晚期	燕山晚期	80~190(75)	120~145
长江中下游	新生代	燕山晚期	燕山晚期	60~180(135)	100~140
华南	燕山晚期	燕山晚期	燕山晚期	80~200(134)	110~155
天山	新生代	晚古生代	晚古生代	230~325(45)	280~320
羌塘	新生代	新生代	新生代	26~64(32)	41
冈底斯	新生代	新生代	新生代	8~22(42)	15.5
三江	新生代	新生代	新生代	16.5~64.9(49)	30~50

注:壳-幔结构物质形成时期见参考文献[12]。

或造油气的煤岩成分(ingredients for petroleum)进入前陆盆地和地台的可渗透地层,当它运移过程中,可使流经的沉积物加热和活化某些物质,当流体沸腾冷却时,可形成有用元素沉淀,形成如美国中部和东部的密西西比河谷型Pb-Zn矿;在有圈闭处被圈闭的烃可形成油气田,如中东的油气田等。鄂尔多斯中部大气田含气砂岩内大面积比较均匀的石英周边的再生加大,高岭石和方解石等自生矿物的广泛发育,以及磷灰石裂变途径的年龄(150~70Ma)年轻于地层的年龄,均与J-K时期太行-五台-吕梁造山带和贺兰山造山带向鄂尔多斯盆地逆冲的时期大体上相同,暗示大气田的形成可能与造山带-前陆盆地之间的不连续的形成过程,以及被排出的烃类沿岩石圈不连续大规模运移进入前陆盆地有成生联系。

分布于中国大陆内陆的扬子、鄂尔多斯、塔里木和准噶尔盆地等“冷盆”,深部背景属于克拉通型岩石圈,克拉通型岩石圈构造上的稳定性决定了这些克拉通盆地不断被周围造山带吞食、掩埋、改造的格局。如侏罗纪之前的中朝克拉通岩石圈,如今只残留了鄂尔多斯,鄂尔多斯克拉通在燕山期时是东部造山带的前陆盆地,新生代时期其西部成为青藏高原的逆冲边界;扬子克拉通四周缘被不同时代的造山带所包裹;塔里木和准噶尔盆地在古生代是天山、昆仑山造山带的前陆盆地,就现今昆仑山、天山、阿尔泰山仍然受挤压不断升高而言,塔里木和准噶尔盆地仍然属于造山带的前陆盆地的范畴,在这些盆地内如今都已发现油气田。而根据这些稳定的克拉通盆地不断被吞食、掩埋的格局推断,现今盆地外那些被造山带前缘逆冲体覆盖的区域,也应该是油气田产出的有利区域,即造山带花岗岩下依然是寻找油气田的重要远景区。

3.2 中国东部裂谷型、边缘海洋壳型岩石圈与油气田的关系

中国东部裂谷型岩石圈,包括中国东部的平原区和黄海、东海及南海等陆缘海区,分别属于中国东部的第二、第三

沉降带,具有地壳和岩石圈厚度小,热流值高的特点。它们是在新生代时期,中国东部沿海地区进入了新的构造演化阶段——大陆裂谷作用下形成的,在拉张应力作用下,导致黄海、东海及南海等陆缘海、边缘海以及大陆上众多断陷盆地和裂谷的形成^[49-52]。这些盆地的形成以伴随广泛的玄武岩喷发为标志,对流地幔物质和热输入使盆地热流值升高成为“热盆”、大陆裂谷型岩石圈,乃至洋壳岩石圈(如南海中央海盆)。

地球物理探测显示^[53]的自内陆盆地向海区地壳厚度变薄,而地壳厚度的变薄与地形变低、沉降幅度增大、海水加深相吻合,表明地壳厚度的薄化过程实际上就是沉积盆地的形成过程。

华北盆地研究表明^[54],该区盆地具有拉张断块活动强烈、断陷多、沉降幅度大、沉积速率大的特点;数值模拟结果^[55],古近纪以来总的沉降量为7.75 km,考虑到沉积物的填充,沉降量大约在10 km。该区在古近纪岩石圈减薄前的平均厚度为133 km,减薄后的岩石圈厚度50 km,新近纪—第四纪岩石圈减薄前的平均厚度123 km,减薄后的岩石圈厚度65 km,岩石圈的减薄与岩石圈尺度伸展、减薄、裂开、软流圈上涌密切相关;伴随裂陷作用及伸展构造的普遍发育,幔源玄武岩大量、频繁地喷发,以及大量沉积物的快速沉积、埋藏有利于油气田的形成,其中的组分,如CO₂气田中的CO₂可能主要源于地幔。因此,中国东部平原及边缘海区域是最具前景的油气田分布区带之一。

4 讨论

一般认为有关岩石圈研究是纯基础研究,但从笔者上述的概略讨论来看,岩石圈与金属矿产、能源关系密切,并且能够对一些关键地质矿产问题提供约束。

地质学与地球物理学科在深度维上存在明显差异。各种地球物理学方法是了解岩石圈深部结构的主要手段,如天

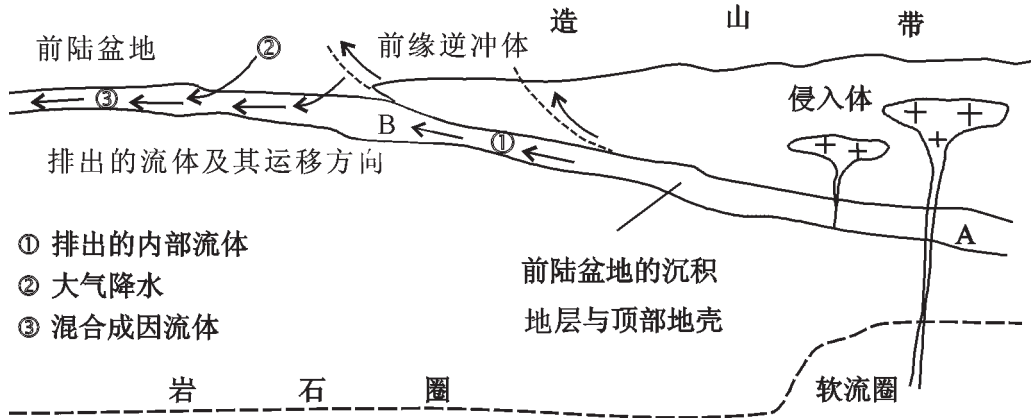


图 8 造山带与前陆盆地之间的不连续示意图

A—B 是造山带与前陆盆地两个构造单元之间的不连续 (discontinuity)

Fig.8 Schematic map of the lithospheric discontinuity between the orogenic belt and foreland basin

A—B shows the discontinuity between two tectonic units—orogenic belt and foreland basin

然或人工地震可以深达数千米乃至穿透整个地球,从而大大拓展人们对地球深部的了解;而目前人所能获得的深部岩石样品只有 180 km 左右。在时间维上,地球物理探测是对当今地球的“快照”,所反映的只是现今的深部结构状态,对其解释存在不确定性(有多种可能的解释);而地球上已获得的最老岩石达 38 亿年,各种不同的地质记录虽然残缺不全,但是延续至今。可能正是由于时间维、深度维等多方面的差异,使地质学与地球物理学这两个学科程度不同地长期分离,中外皆然。把地质与地球物理结合起来,是 20 世纪 80 年代以来的重要趋势,正引起越来越多学者的认同和重视,《中国大陆根-柱构造》^[9]是其中的代表性成果之一。笔者注意到,有些学者在分析某一地区或矿床成矿背景或规律时往往能够结合该区是“幔隆”或“幔凹”等深部背景进行分析,这无疑非常重要,但也不难发现在不少文献中只是停留在“引用”地球物理成果上,往往缺乏对这些深部物质、结构所代表的时代进行分析、判别,这样,难免容易出现偏差乃至错误。因为各种地球物理方法实际上只是对现今岩石圈的“快照”,所获得的岩石圈结构、Moho 和 L/A(岩石圈与软流圈边界)深度只是反映现今的状态,并不一定代表地质历史时期或成矿作用发生时就是这样的结构状态和物质组成;特别是对多次拼合形成的复杂中国大陆来说,多次造山作用可以使某一地区的岩石圈、岩石圈不连续受到多次“改造”,并且对于造山带型岩石圈而言,其 Moho、L/A 深度和形态均有随时间变化的特征。因此,将现今地球物理场运用于解释区域成矿作用有关的规律时应特别小心,一个最好的途径是,尽量结合地质演化历史,特别是岩浆构造事件的分析,才可能对地球物理场的形成过程给予一个比较合理的地质解释。以西北地区为例,该区是古亚洲洋背景下形成的古生代中亚造山带,中新

生代缺乏火成岩浆活动,说明无对流地幔物质输入;在新生代北部阻挡、南部挤压的动力学背景下,包括阿尔泰山、天山、祁连山和昆仑山等在内的造山带“重新崛起”,才成为现今具有山根的造山带型岩石圈,显然不能用现今的结构去解释或作为该区古生代成矿时期的深部背景。实际上该区的造山带型岩石圈具有“老物质新结构”特点,即壳-幔物质主要是古生代形成的,但结构是新生代形成的^[10]。只是就找矿而言,在这些地区仍然以寻找古生代矿床为主。从洋壳富集 Cu 元素推测,这些经历过大洋发育的中亚造山带、秦祁昆造山带、西藏冈底斯造山带等将是中国寻找大型-超大型 Cu 矿最有潜力的地区之一。

综上,现今地球物理探测获得的岩石圈不连续、Moho、L/A 深度和形态、物质结构、热状态等,并不能简单地直接运用或看作某一地区成矿作用时的状态,需要结合具体地区的地质演化过程、岩浆起源和演化机理等来反演成矿作用发生时的 Moho 和 L/A 的深度和形态、岩石圈结构、物质结构、热状态等,才能获得比较准确的成矿作用发生时的深部成矿背景,更好地判别现今壳-幔物质结构所代表的时代、辨析成矿作用发生时的深部背景和所经历深部过程,从而为资源潜力评价、总量预测、成矿规律总结等提供有效约束。

参考文献(References):

[1] 邓晋福,莫宣学,赵海玲,等. 中国岩石圈-软流圈系统大灾害与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999, 18(4),309~315.
Deng Jinfu, Mo Xuanyue, Zhao Hailing, et al. The Yanshanian lithosphere-asthenosphere catastrophe and metallogenic environment in east China[J]. Mineral Deposits, 1999,18(4): 309~315(in Chinese with English abstract).

- [2] 邓晋福, 吴宗絮. 下扬子克拉通岩石圈减薄事件与长江中下游 Cu-Fe 成矿带[J]. 安徽地质, 2001,11(2):86~91.
Deng Jinfu, Wu Zongxu. Lithospheric thinning event in the lower Yangtze craton and Cu-Fe metallogenic belt in the Middle and lower Yangtze river reaches[J]. Geology of Anhui, 2001, 11(2): 86~91(in Chinese with English abstract).
- [3] 杜建国, 戴圣潜, 莫宣学, 等. 安徽沿江地区燕山期火成岩成矿地质背景[J]. 地学前缘, 2003,10(4): 551~560.
Du Jianguo, Dai Shengqian, Mo Xuanxue, et al. Petrogenic and metallogenic settings of area along Yangtze River in Yanshanian, Anhui Province[J]. Earth Science Frontiers, 2003,10(4): 551~560(in Chinese with English abstract).
- [4] 肖庆辉, 邢作云, 张昱, 等. 当代花岗岩研究的几个重要前沿[J]. 地学前缘, 2003,10(3):221~229.
Xiao Qinghui, Xing Zuoyun, Zhang Yu, et al. The major frontiers of the recent studies of granite [J]. Earth Science Frontiers, 2003,10(3):221~229(in Chinese with English Abstract).
- [5] 邱瑞照, 邓晋福, 李廷栋, 等. 岩石圈不连续与大陆成矿作用[J]. 矿床地质, 2004,23(增刊):32~40.
Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, Li Tingdong, et al. Lithospheric discontinuity and continental metallogenesis [J]. Mineral Deposits, 2004, 23(Supp.): 32~40(in Chinese with English abstract).
- [6] Kutina J. Metallogeny of mantle-rooted structure extending across the western edge of the Proterozoic North American craton [J]. Glob. Tect. Metall., 1991,4(1~2):21~51.
- [7] Kutina J. Regional mantle-rooted discontinuities extending transversely to the margins of cratons and adjacent mobile belts [J]. Glob. Tect. Metall., 1995,5(1~2):7~18.
- [8] 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(4):289~299.
Mao Jingwen, Zhang Zuoheng, Yu Jinjie, et al. Geodynamic settings of Mesozoic large-scale mineralization in North China and adjacent areas—implication from the highly precise and accurate ages of metal deposits[J]. Science in China(Ser. D), 2003,46(8): 838~851.
- [9] 邓晋福, 邱瑞照, 吴宗絮, 等. 中国大陆深部作用与成矿 [J]. 矿床地质, 2004, 23(增刊):24~31.
Deng Jinfu, Qiu Ruizhao, Wu Zongxu, et al. Input of material and heat from convective mantle into continent and continental metallogenesis [J]. Mineral Deposits, 2004, 23 (supp.): 24~31(in Chinese with English abstract).
- [10] 马杏垣. 解析构造学[M]. 北京:地质出版社, 2004.
Ma Xinyuan. Analytic Tectonics [M]. Beijing: Geological Publishing House. 2004(in Chinese).
- [11] Burke M M, Fountain D M. Seismic properties of rocks from an exposure of extended continental crust—new laboratory measurements from the Ivrea Zone [J]. Tectonophysics, 1990,182: 119~146.
- [12] 邱瑞照, 李廷栋, 邓晋福, 等. 中国大地构造单元新格局——从岩石圈角度的思考[J]. 中国地质, 2006,33(2):401~409.
Qiu Ruizhao, Li Tingdong, Deng Jinfu, et al. A new pattern of tectonic units of China considered in the light of lithosphere [J]. Geology in China, 2006,33 (2):401~409 (in Chinese with English abstract).
- [13] 赵一鸣, 毕承思, 邹晓秋, 等. 黑龙江多宝山、铜山大型斑岩铜(钼)矿床中辉钼矿的铼-钨同位素年龄[J]. 地球学报, 1997, 18(1): 61~67.
Zhao Yiming, Bi Chengsi, Zhou Qiu Xiaochu, et al. The Re-Os isotopic age of molybdenite from Doubaoshan and Tongshan porphyry copper (molybdenum) deposits [J]. Acta Geoscientia Sinica, 1997,18(1): 61~67(in Chinese with English abstract).
- [14] 陈衍景. 中国区域成矿研究的若干问题及其与陆-陆碰撞的关系[J]. 地学前缘, 2002,9(4):319~328.
Chen Yanjing. Several important problems in study of regional metallogenesis in China: Their relationship to continental collision [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9 (4):319~328 (in Chinese with English abstract).
- [15] 陈华勇, 陈衍景, 刘玉琳, 等. 新疆额尔齐斯金矿带的成矿作用及其与中亚型造山作用的关系[J]. 中国科学(D 辑), 2000, 30(增刊):38~44.
Chen Huayong, Chen Yanjing, Liu Yulin, et al. Metallogenesis of the Erxiz gold belt, Xinjiang and its relationship to Central Asia-type orogenesis [J]. Science in China (Series D), 2001,44(3): 245~255(in Chinese).
- [16] 李华芹, 谢才富, 常海亮, 等. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学[M]. 北京:地质出版社. 1998.
Li Huaqing, Xie Caifu, Chang Hailiang, et al. Geochronology of mineralization of nonferrous and precious metallic deposits in Northern Xinjiang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998(in Chinese).
- [17] 张增杰, 陈衍景, 陈华勇, 等. 天山海西期不同类型花岗岩类岩石化学特征及其地球动力学意义[J]. 矿物岩石, 2002,22(2):13~21.
Zhang Zengjie, Chen Yanjing, Chen Huanyong, et al. The petrochemical characteristics of the Hercynian granitoids in Tianshan and its geodynamic implications [J]. J Mineral Petrol, 2002,22(2) :13~21(in Chinese with English abstract).
- [18] 洪大卫, 王式光, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 ϵ_{Nd} 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地学前缘, 2000, 7(2):441~456.
Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, et al. Genesis of positive ϵ_{Nd} granitoids in the Da Hinggar Mts-Mongolia orogenic belt and continental crustal growth [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(2): 441~456 (in Chinese with English abstract).
- [19] 洪大卫, 王式光, 谢锡林, 等. 试析地幔来源物质成矿域——以中亚造山带为例[J]. 矿床地质, 2003,22(1): 41~55.
Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, et al. Metallogenic province derived from mantle sources: a case study of central Asian orogenic belt [J]. Mineral Deposits, 2003,22(1):41~55 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李锦轶, 肖序常, 汤耀庆, 等. 新疆北部金属矿产与板块构造[J]. 新疆地质, 1992,10(2):138~146.

- Li Jinyi, Xiao Xuchang, Tang Yaoqin, et al. Metal deposits and plate tectonics in Northern Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 1992,10(2):138~146(in Chinese).
- [21] 王鸿祯, 郑同鞠, 王训练. 中国及邻区石炭纪构造古地理及生物古地理[J]. *现代地质*, 1989,3(2):137~154.
Wang Hongzhen, Zheng Luiren, Wang Xunlian. The tectono-palaeogeography and biogeography of China and adjacent regions in the Carboniferous Period[J]. *Geoscience*, 1989,3(2):137~154(in Chinese with English abstract).
- [22] 李春昱. 中国板块构造的轮廓[J]. *中国地质科学院院报*, 1980, 2(1):11~20.
Li Chunyu. A preliminary study of plate tectonics of China of geological sciences [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1980,2(1):11~20(in Chinese).
- [23] 唐克东. 中朝陆台北侧褶皱带构造发展的几个问题 [J]. *现代地质*, 1989, 3(2):195~204.
Tang Kedong. On tectonic development of the fold belts in the North margin of Sino-Korean Platform[J]. *Geoscience*, 1989, 3(2): 195~204(in Chinese with English abstract).
- [24] Sengor A M C. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Eurasia[J]. *Nature*, 1993,364:299~307.
- [25] 吕伯西, 钱祥贵. 滇西新生代碱性火山岩、富碱斑岩深源包体岩石学研究[J]. *云南地质*, 1999,18(2):127~143.
Lü Boxi, Qian Xianggui. A petrographic study on the hypogenic enclaves in Cenozoic alkalic volcanics and rich alkali porphyry of west Yunnan[J]. *Yunnan Geology*, 1999,18(2):127~143(in Chinese with English abstract).
- [26] 芮宗瑶, 侯增谦, 曲晓明, 等. 冈底斯斑岩铜矿成矿时代与青藏高原隆升[J]. *矿床地质*, 2003, 22(3): 217~225.
Rui Zongyao, Hou Zangqian, Qu Xiaoming, et al. Metallogenic epoch of Gangdese porphyry copper belt and uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Mineral Deposit*, 2003,22(3):217~225 (in Chinese with English abstract).
- [27] 孟祥金, 侯增谦, 高永丰, 等. 西藏冈底斯成矿带驱龙铜矿 Re-Os 年龄及成矿学意义[J]. *地质论评*, 2003,49(6):660~666.
Meng Xiangjin, Hou Zengqian, Gao Yongfeng, et al. Re-Os dating for molybdenite from Qulong porphyry copper deposit in Gangdese metallogenic belt, Xizang and its metallogenic significance [J]. *Geological Review*, 2003, 49 (6):660~666 (in Chinese with English abstract).
- [28] 周肃. 青藏高原中-新生代构造岩浆事件的同位素年代学约束(博士后报告)[D]. 北京:中国地质大学, 2004.
Zhou Su. Geochronology Constranit for the Tectonic-magmatic Events in Mesozoic-Cenozoic at Tibetan Plateau (Postdoctoral Report) [D]. Beijing:China University of Geosciences, 2004 (in Chinese).
- [29] 陈毓川. 中国主要成矿区带矿产资源远景评价 [M]. 北京:地质出版社, 1999.
Cheng Yuchuan. Mineral Resources Assessment of Major Metallogenic Provinces in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999 (in Chinese).
- [30] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根—柱构造—大陆动力学的钥匙[M]. 北京:地质出版社, 1996.
Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. Continental Root-Plume Tectonics of China—Key to the Continental Dynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese with English abstract).
- [31] 邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 等. 华北地区岩石圈类型:地质与地球物理证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 2004,34(8):689~711.
Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, Zhou Su, et al. Lithosphere types in North China—Evidences from geology and geophysics [J]. *Science in China(Ser. D)*, 2005,48(11):1809~1827.
- [32] Qiu Ruizhao, Zhou Su, Deng Jinfu, et al. Discussion on the dynamic system of China continent in Mesozoic-Cenozoic [J]. 19HKT Workshop Special Issue. *Himalayan Journal of Science*, 2004,2(4):236~238.
- [33] 肖庆辉, 邱瑞照, 邓晋福, 等. 中国花岗岩与大陆地壳生长方式初步研究[J]. *中国地质*, 2005,32(3):336~343.
Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, et al. Granitoids and continental crustal growth modes in China [J]. *Geology in China*, 2005, 32(3):336~343(in Chinese with English abstract).
- [34] 邓晋福, 莫宣学, 罗照华, 等. 青藏高原岩石圈不均一性及其动力学意义[J]. *中国科学(D)*, 2001,31(增刊):55~60.
Deng Jinfu, Mo Xuanxue, Luo Zhaohua, et al. Inhomogeneity of the lithosphere of the Tibetan Plateau and implications for geodynamics[J]. *Science in China (Series D)*, 2001,44(supp.):56~63.
- [35] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347: 662~665.
- [36] Gill J B. *Orogenic Andesite and Plate Tectonics* [M]. Berlin: Springer, 1981.
- [37] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8~32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *J. Petrol*, 1995, 36: 891~931.
- [38] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D, et al. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: experimental constraints at 3.8 GPa [J]. *Chemical Geology*, 1999,160:335~356.
- [39] Litvinovsky B A, Steele I M and Wickham S M. Silicic magma formation in overthickened crust: melting of charnockite and leucogranite at 15, 20 and 25 kbar[J]. *Journal of Petrology*, 2000,41(5): 717~737.
- [40] Sen C, Dunn T. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: implications for the origin of adakites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,1994,117: 394~409.
- [41] Sen C, Dunn T. Experimental modal metasomatism of a spinel lherzolite and the production of amphibole-bearing peridotite [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*,1995, 119:394~409.
- [42] 周肃. 西藏冈底斯岩浆岩带及雅鲁藏布蛇绿岩带关键地段同位

- 素年代学研究[D]. 北京:中国地质大学, 2002.
- Zhou Su. Study on the Geochronology of Several Key Regions of Gangdese Magmatic and Yarlung Zangpo Oophilitic Belts, Tibet [D]. Beijing:China University of Geosciences, 2002(in Chinese).
- [43] 周肃,莫宣学,董国臣,等. 西藏林周盆地林子宗火山岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代格架[J]. 科学通报, 2004,49(20):2095~2103.
- Zhou Su, Mo Xuanxue, Dong Guochen, et al. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications [J]. Chinese Science Bulletin, 2004,49(18):1970~1979.
- [44] 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[J]. 地学前缘. 2003,10(3):135~148.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, et al. Response of volcanism to the India—Asia collision [J]. Earth Science Frontiers, 2003,10(3):135~148(in Chinese with English abstract).
- [45] 张旗, 秦克章, 许继峰, 等. 中国与埃达克质岩有关的矿床分布、找矿方向及找矿方法刍议[J]. 华南地质与矿产, 2004,3(2):1~8.
- Zhang Qi, Qin Kezhang, Xu Jifeng, et al. Discussion of distribution, prospecting principle and method for deposits related to adakites in China [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2004,3(2):1~8(in Chinese with English abstract).
- [46] 汪集旸, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编[J]. 地质科学, 1988, 2:196~204.
- Wang Jiyang, Huang Shaopeng. Compilation of heat flow data in the China continental area [J]. Scientia Geologica Sinica, 1988,2:196~204 (in Chinese).
- [47] Oliver J. Fluids expelled tectonically from orogenic belts: Their role in hydrocarbon migration and other geologic phenomena [J]. Geol., 1986,14:99~102.
- [48] National Research Council (NRC). Solid—Earth Science and Society[M]. Washington D C, National Acad. Press, 1993,47~83.
- [49] 程裕淇. 中国区域地质概论[M], 北京:地质出版社, 1994.
- Cheng Yuqi. An Introduction to the Regional Geology of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994(in Chinese).
- [50] 黄汲清, 任纪舜, 姜春发, 等. 中国大地构造及其演化[M]. 北京:地质出版社, 1980.
- Huang Jiqing, Ren Jishun, Jiang Chunfa, et al. Geotectonic Evolution of China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1980(in Chinese).
- [51] 张文佑, 张抗, 杨树康. 中国东部及相邻海域中、新生代地壳演化与盆地类型[J]. 海洋地质研究, 1982,2(1):1~15.
- Zhang Wenyu, Zhang Kang, Yang Shukang. On the evolution of crust and the classification of Mesozoic and Cenozoic basins in the eastern China and adjacent sea area[J]. Marine Geological Research, 1982,2(1):1~15(in Chinese).
- [52] 张文佑, 张抗, 赵永贵, 等. 华北断块区中、新生代地质构造特征及岩石圈动力学模拟[J]. 地质学报, 1983,57(1):33~42.
- Zhang Wenyu, Zhang Kang, Zhao Yonggui, et al. The Mesozoic and Cenozoic geotectonic characteristics and dynamical model of the lithosphere in North China faultblock region[J]. Acta Geologica Sinica, 1983,57(1):33~42(in Chinese with English abstract).
- [53] 袁学诚. 中国地球物理图 [M]. 北京:地质出版社, 1996.
- Yuan Xuecheng. Atlas of Geophysics in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996(in Chinese).
- [54] 邓晋福, 肖庆辉, 邱瑞照, 等. 华北地区新生代岩石圈伸展减薄的机制与过程, 中国地质, 2006,33(4):751~761.
- Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Qiu Ruizhao, et al. Lithospheric extension of North China in Cenozoic: Mechanism and processes, Geology in China, 2006,33(4):751~761 (in Chinese with English abstract).
- [55] 刘翠. 华北地区构造岩浆活动的数值模拟[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文. 2004.1~105.
- Liu Cui. Simulation to the Structure and Magmatic Activity of North China [D]. Beijing: China University of Geosciences. 2004,1~105 (in Chinese).

Large-scale metallogensis and petroleum field formation in continental China—constraints from the lithosphere

QIU Rui-zhao^{1,2}, LI Ting-dong^{3,4}, DENG Jin-fu⁵, ZHOU Su⁵, XIAO Qing-hui⁶, YE Tian-zhu¹, GENG Shu-fang¹, CHENG Xiu-fa¹, WANG Cui-zhi⁵, LIU Yong⁵

(1. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;*

2. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

3. *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

4. *College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China;*

5. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

6. *Information Center, Ministry of Land and Resources, Beijing 100812, China)*

Abstract: Continental China consists of five types of lithospheres, namely, cratonic, orogenic, rift, oceanic, marginal sea crust and island-arc. As different types of lithospheres have different dynamic mechanisms and effects, the junction zones between the different types of lithospheres are bound to be discontinuity zones and have close relationship with continental metallogensis. The greater majority of known metallic mineral deposits in continental China are distributed along the lithospheric discontinuities or reactivated discontinuities, indicating that the lithospheric discontinuities provide favorable spaces for migration and accumulation of large ore deposits (deposit clusters). A comparison of the sequences of the tectono-magmato-metallogenic events in the northwestern, eastern and southwestern regions of continental China indicates that the lithospheric crust-mantle petrological structures and large-scale metallogensis depend on the latest and strongest magmatism, and that large-scale metallogensis was initiated in the period of instability and de-rooting of the orogenic lithosphere and large-scale upwelling of the asthenospheric material. The occurrence of C-type adakite may be regarded as one of their indications. The Yangtze, Ordos, Tarim and Junggar basins distributed in China inland, which are called "cold basins" due to their low surface heat flow values, belong to the setting of the cratonic type lithosphere and tectonically are usually foreland basins of orogenic belts. The tectonic stability of the cratonic type lithosphere determined that these basins were swallowed, buried and modified continuously by their surrounding orogenic belts. Although many oil-gas fields have been found in these basins now, the areas outside these basins which are now covered by the front thrust sheets of orogenic belts should also be favorable areas for occurrence of oil-gas fields, i.e., those areas under granites of orogenic belts outside the basins are still important potential areas for oil-gas field finding. The plains and epicontinental seas such as the Yellow Sea, East China sea and South China sea in eastern China, which are called "hot basins" due to their high surface heat flow values, correspond with the rift- or oceanic-type lithosphere. They were formed when the coastal areas of eastern China entered a new tectonic evolution stage—the continental rifting stage—during the Cenozoic, which is marked by extensive eruption of basalt. The input of convective mantle material and heat resulted in the increase of terrestrial heat flow values in basins and thus the basins became "hot basins" with the corresponding rift-type lithosphere and even oceanic-type lithosphere (e.g. the Central basin of the South China Sea). The large-scale eruption of mantle-derived basaltic magma occurring concomitantly with rifting and tectonic extension and rapid deposition and burial of abundant sediments are favorable for the formation of oil-gas fields, in which some components, such as CO₂ in CO₂ fields, might be mainly derived from the mantle. It is suggested that the plains and epicontinental sea areas in eastern China are one of the most potential oil-gas fields.

Key words: lithospheric discontinuity; large-scale metallogensis; oil-gas field formation, constraint of the lithosphere; continental China

About the first author: QIU Rui-zhao, male, born in 1963, doctor and associate senior researcher, now mainly engages in the study of geology and mineral resources in foreign countries; E-mail: qiurrzz@yahoo.com.cn.