

黔东—湘西早古生代岩石圈热状态 与高产热率 HHPRM 型地幔源区

方维萱^{1,2},胡瑞忠¹,苏文超¹,漆亮¹,蒋国豪¹

(1. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学开放研究实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 有色金属矿产地质调查中心, 北京 100814)

摘要:岩石圈热结构和热状态的研究对于大陆裂解、变质作用及活化构造形成机制等大陆动力学问题的研究十分重要。通过地球化学、构造地质学和综合分析,以贵州省镇远地区金伯利岩-钾镁煌斑岩和黔东—湘西一带的晚元古代地层为例,研究了扬子地块东南缘早古生代岩石圈热结构与热状态。提出高放射性元素产热率的 HHPRM 型地幔源区,进一步讨论 HHPRM 型地幔源区形成与演化的大陆动力学机制。认为古富集地幔(HHPRM 型地幔源区)是镇远一带的早古生代钾镁煌斑岩-金伯利岩的岩浆源区,镇远地区金伯利岩-钾镁煌斑岩岩浆源区深度(H)在 208 ~ 244 km,形成温度在 1 547 ~ 1 403℃间,该温度和深度范围属软流层,具有形成金刚石矿床的地质条件。建议在贵州—湖南—广西三省交界区的金伯利岩和钾镁煌斑岩岩群中应进一步开展金刚石矿床研究与勘查工作。

关键词:岩石圈热状态;放射性元素高产热率;HHPRM 型地幔源区;金刚石矿床;扬子地块东南缘

中图分类号:P168.51;P617 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1552(2002)04-337-08

1 引言

Vacquier(1998)认为重力起源的热能提供了足够的能量保持整个地幔对流,可能由席状地幔热柱的粘滞磨擦、核幔边界处轻物质上升底辟引起的大洋岩石圈板块增长、运移及造山运动等机制产生重力热能;地幔热柱的上升是由于相对于地核有铁的丢失,并导致地震及火山喷发。地球的热来源于放射性元素的衰变及初始高温物质的长期冷凝,岩石圈板块运动是通过其下处于塑性软流层的对流而实现,软流层是上地幔与下地幔之间的熔融体,是地幔中重要的热储量,随着软流层物质运移,发生物质和能量的传输。若忽视富含放射性产热元素的地幔流体(软流层物质)在地球内部热能起源的作用[1998,

Vacquier],就不能全面的认识和探索软流层与上地幔、大陆地壳之间的热能转换、循环和传输等方面的问题。然而在地球化学研究方面,至今仍未有人提出关于软流层物质是高放射性元素产热率的地幔模型。岩石圈热结构和热状态的研究对于大陆裂解、变质作用及活化构造形成机制等大陆动力学问题的研究十分重要。从大陆热流角度研究大地构造运动机制[1977,1989,陈国达]、壳体运动与地幔蠕动关系[1992,陈国达]是一个重要的发展方向,陈胜早(1993)认为在印度板块俯冲碰撞过程中,因可能板块俯冲引起构造能量转换为热能量,在喜马拉雅山体之下形成岩石圈热柱体;匡耀求等(2001)也提出地球深部天然核反应堆可能是山脉隆升动力源的新认识。

王良书等(2000)认为中国东部拉张盆地的地幔

收稿日期:2001-08-20

基金项目:国家杰出青年科学基金(49925309)、国家重大基础研究规划项目(G1999043200)联合资助。

作者简介:方维萱(1964-),男,博士,教授级高级工程师,从事矿产勘查、沉积盆地与地质流体研究。

热流为 35 ~ 41.3 mW/m² 之间, 中国西部塔里木盆地中塔中地区的热流值最高达 60 mW/m², 地幔热流为 15 ~ 24 mW/m², 与中国东部盆地相比明显偏低, 地表热流大部分来源于地壳内放射性物质生热的贡献; 中国东部中生代盆地地幔热流值高, 导致弧后拉张盆地的岩石圈处于较热状态。浙江省新生代上地幔的温度高达 900 ~ 1 295℃ [1998, 林传勇, 等], 而鄂尔多斯盆地莫霍面的热流平均值为 14.2 mW/m² [1996, 孙少华, 等], 二者对比证实地幔热流高区的大陆岩石圈活动性强 [1993, 徐青, 等]。新生代华南岩石圈处于高热状态, 与稳定大陆明显不同, 而与大陆裂谷相似 [1993a, 范蔚茗, 等], 较热的新生 (MORB + OIB) 地幔不同程度的置换先存古岩石圈地幔 [1993b, 范蔚茗, 等], 上述研究成果揭示了华南地区岩石圈在新生代时热状态和热传输。早古生代是华南地区超大型重晶石矿床集中区的主成矿期, 但对该区早古生代岩石圈热状态和热传输仍然不明。吴根耀 (1990, 2000) 认为华南的格林威尔造山带经历了两次重要的坍塌, 岩石圈的拆沉作用形成的坍塌裂谷起始于 950 Ma, 与陆 - 陆碰撞的高峰期一致, 反映了碰撞造山带快速坍塌; 其后发生的江南碰撞高原剥蚀夷平显示造山带缓慢坍塌过程。后者可能是该区早古生代江南碰撞高原向沉积盆地的转换过程, 因此, 该区早古生代岩石圈热状态和热传输对于认识该时期的这些大陆动力学过程有重要的意义。本文以贵州省镇远地区金伯利岩 - 钾镁煌斑岩和黔东 - 湘西一带的晚元古代地层为例, 研究扬子地块东南缘早古生代岩石圈热结构与热状态, 进一步讨论高产热率古富集地幔 (HHPRM) 与大陆构造演化关系。

2 地质特征

扬子地块基底岩系有两类不同性质, 即晚太古代 - 早元古代结晶基底变质杂岩系和中元古代变质沉积 - 火山岩系组成的过渡性基底, 现今以残余岩块的形式位于哀牢山、川西、南秦岭及本区。在黔东 - 湘西元古代变质火山沉积岩系之下可能存在太古代结晶基底 [1993, 饶家荣, 等], 现今位于地球化学急变带附近 [1991, 2000, Zhu, *et al.*]。格林威尔 (Grenville) 在华南地区形成了扬子地块周缘造山带 [2000, 吴根耀], 晚元古代的火山沉积岩系为大陆裂谷体制转换为板块构造的初始阶段, 形成晚元古代板溪群和下江群的火山沉积岩系, 此时有大量的幔

源物质涌入地壳 [1996, 李献华]。在震旦 - 志留纪, 扬子地块南、东缘上普遍接受了巨厚的被动陆缘沉积体系, 最有特点是发育陆缘主动裂谷型深水沉积体系 (富碳硅质岩)。

贵州镇远钾镁煌斑岩类主要有金伯利岩、金云母煌斑岩、角砾状金云母橄榄岩及碳酸岩等, 以岩墙 (群) 形式侵位于下寒武统明心寺组至清虚洞组和中寒武统高台组的白云岩与碳酸盐岩中。镇远马坪金伯利岩长从几米至二百多米, 宽 0.05 ~ 2.6 m, 走向主体为 80°, 呈陡倾斜岩墙或缓倾斜岩床, 沿白云岩中的密集节理带、断层及层间剥离带侵位。与围岩的接触部位以断层接触为主, 断层角砾岩不发育, 显示了伸展构造环境中的侵位特点。岩石具有斑状结构, 斑晶以橄榄石假象和镁铝榴石为主, 镁铝榴石呈浑圆状斑晶, 粒径约 1 ~ 10 mm, 含量为 1% ~ 3%。基质以细粒橄榄石假象 (白云石) 和金云母为主。少量磷灰石、金红石、铬尖晶石、锐钛矿等。镇远县溪头角砾状金云母橄榄岩 (群) 走向为 40° ~ 60°, 单岩墙 (床) 长 20 ~ 220 m, 宽 0.1 ~ 6.5 m。岩石具有斑状结构, 角砾状构造。斑晶为橄榄石假象和金云母组成, 橄榄石已被蚀变交代为蛇纹石及碳酸盐矿物; 金云母呈板状自形晶, 长 0.5 ~ 1.5 mm。基质成分主要为金云母, 锐钛矿、磁铁矿常见。镇远地区金云母煌斑岩 (群) 在思南塘新修建公路揭露出了较好基岩露头, 金云母结晶颗粒大 (> 5 mm × 2 mm), 含量可达 70% 以上, 与中心相有明显界线, 中心相由粗粒金云母煌斑岩组成, 边缘相由细粒金云母煌斑岩组成。扬子地块的南东缘 (黔东 - 湘西南) 发育加里东期钾镁煌斑岩 - 金伯利岩, 暗示震旦 - 寒武纪被动大陆边缘上裂谷盆地是在深部幔源热物质垂向上涌作用下形成的主动裂谷盆地。

3 早古生代岩石圈热状态与结构

3.1 早古生代岩石圈热状态

Rybach (1976) 岩石产热率经验公式为: $A = \rho[9.52U + 2.56Th + 3.48K] \times 10^{-2}$ 。A 为岩石产热率, ρ 为岩石密度 (g/cm³), U 和 Th 单位为 10⁻⁶, K 单位为 %。岩石密度取值为: 元古界为 2.71 g/cm³ [1993, 饶家荣, 等]; 超基性岩为 2.70 g/cm³; 地壳为 2.78 g/cm³; 上地幔为 3.4 g/cm³; 下地幔为 5.62 g/cm³; 地核为 13 g/cm³。石英中流体包裹体按 1.0 g/cm³ 估计。黔东 - 湘西晚元古代地层和镇远地区金伯利岩 - 钾镁煌斑岩中 K、Th、U 含量 (表 1) 及产热率 (表 2) 表明: 钾镁煌斑岩的产热率仍有 8.09

表 1 黔东—湘西晚元古代地层和镇远地区金伯利岩—钾镁煌斑岩中 K、Th、U 含量表
Table 1 Contents of K, Th, and U in kimberlite and lamprophyre of Zhenyuan area and in the Late Proterozoic strata in northeastern Guizhou and western Hunan Province

地区与岩性	样号	K ₂ O(%)	Th($\times 10^{-6}$)	U($\times 10^{-6}$)	地区与岩性	样号	K ₂ O(%)	Th($\times 10^{-6}$)	U($\times 10^{-6}$)
镇远钾镁煌斑岩	ZY-1	1.23	71	23.1	天柱变余凝灰岩	BDG-14	3	11.3	1.84
镇远钾镁煌斑岩	ZY-2	2.42	36	8.56	天柱变余凝灰岩	BDG-15	3.89	10.2	1.71
镇远钾镁煌斑岩	ZY-3	2.71	34.2	14.2	天柱变余凝灰岩	BDG-17	2.96	9.10	1.81
镇远钾镁煌斑岩	ZY-4	1.04	44	13.4	天柱变余凝灰质砂岩	BDG-20	4.54	12.4	2.50
镇远钾镁煌斑岩	ZY-5	2.04	84.4	17.3	天柱变余凝灰岩	BDG-21	3.87	10.8	1.95
镇远钾镁煌斑岩	ZY-6	0.85	66.7	23.9	天柱变余凝灰岩	BDG-22	2.07	9.85	2.03
镇远钾镁煌斑岩	ZY-7	1.93	50.2	12.5	天柱变余凝灰岩	BDG-23	2.54	9.72	1.93
镇远金伯利岩	ZY-8	0.09	28.8	4.58	天柱变余凝灰岩	BDG-24	2.88	12.8	1.41
镇远金伯利岩	ZY-9	0.09	30	5.59	天柱变余凝灰岩	BDG-25	3.2	11.2	2.29
镇远金伯利岩	ZY-10	0.09	27	6.49	天柱变余凝灰岩	BDG-26	2.54	8.40	1.85
镇远金伯利岩	ZY-12	0.1	20.3	3.67	天柱变余凝灰岩	BDG-27	3.39	8.51	1.62
镇远金伯利岩	ZY-13	0.79	29.2	4.06	锦屏变余凝灰岩	BDG-28	1.99	9.04	1.74
镇远金伯利岩	ZY-14	0.14	18.8	3.4	锦屏变余凝灰岩	BDG-29	3.76	7.98	1.57
镇远凝灰质板岩	BDG-1	3.13	15.3	3.58	锦屏凝灰质板岩	BDG-30	3.06	13.8	2.83
三穗凝灰质板岩	BDG-4	2.71	12.8	2.34	黎平凝灰质板岩	BDG-31	3.31	11.3	1.79
三穗凝灰质板岩	BDG-5	3.45	13.3	1.60	黎平凝灰质板岩	BDG-32	3.75	13.5	2.13
三穗变余粉砂岩	BDG-6	2.96	8.43	1.96	黎平绢云母绿泥石板岩	BDG-33	3.09	13.6	2.34
三穗变余杂砂岩	BDG-7	3.22	10.8	2.22	黎平绢云母绿泥石片岩	BDG-34	2.37	11.9	2.44
三穗变余杂砂岩	BDG-8	2.35	7.58	1.54	榕江绿泥石板岩	BDG-35	2.76	12.8	2.50
三穗变余粉砂岩	BDG-10	0.82	6.30	1.36	榕江绿泥石板岩	BDG-36	2.81	15.3	2.95
三穗变余凝灰岩	BDG-11	2.81	10.3	2.20	榕江绿泥石板岩	BDG-37	3.23	14.3	2.63
三穗变余凝灰质砂岩	BDG-13	3.01	11.2	1.91	榕江凝灰质板岩	BDG-42	2.87	11.1	2.09

表 2 黔东—湘西早古生代岩石圈岩石产热率及对比表

Table 2 Heat production of radioactive elements of the Early Palaeozoic lithosphere and their comparisons

岩石圈层	岩性	样数	K ₂ O(%)	Th($\times 10^{-6}$)	U($\times 10^{-6}$)	A(mWm ⁻³)	资料来源
黔东—湘西大陆地壳	变火山沉积岩	31	2.98	11.1	2.09	1.54	本文
黔东—湘西软流层	钾镁煌斑岩	7	1.75	55.2	16.1	8.09	本文
	金伯利岩	6	0.22	25.7	4.13	2.83	本文
	金伯利岩	1	0.31	32.7	4.3	3.36	据梅厚均(1990)计算
津巴布韦	石英中流体包裹体	3	8.47	793	94.5	29	据 Buhn (1999)计算
陆壳			3.4	3.5	0.91	0.77	据黎彤等(1990)
地壳			0.34	5.8	1.7	0.9	据黎彤等(1990)
洋壳			1.1	3.1	0.51	0.45	据黎彤等(1990)
上地幔			0.71	0.75	0.13	0.18	据黎彤等(1990)
下地幔			0.095	0.005	0.003	0.018	据黎彤等(1990)
地核			0.012	0.024	0.003	0.016	据黎彤等(1990)
上地壳			0.34	10.7	2.8	1.54	据 Taylor, et al. (1985)
下地壳			3.3	1.06	0.28	0.42	据 Taylor, et al. (1985)
澳洲	角闪岩—麻粒岩相		2.5	17.5	2	1.99	据 Taylor, et al. (1985)

mWm⁻³,金伯利岩的产热率仍有 2.83 mWm⁻³,估计在它们形成时岩浆源区的热流值应高于现代残存的放射性元素计算出的岩石产热率,这种产热率反映当时地幔热状态明显高于现今的地幔热流和地表热

流值。镇远钾镁煌斑岩—金伯利岩的产热率明显高于华北地块南缘(A为0.9~1.10 mWm⁻³)、北秦岭(A为1.17~1.54 mWm⁻³)、南秦岭(A为1.08~1.79 mWm⁻³)和扬子地块北缘(A为0.76~1.79

mWm^{-3}) 等大地构造单元岩石圈各圈层的放射性元素产热率 [1994, 张本仁, 等; 1996, Gao, *et al.*], 而黔东—湘西晚元古代地层产热率 ($1.54 mWm^{-3}$) 与它们大致相近。

3.2 扬子地块东南缘岩石圈结构与金伯利岩—钾镁煌斑岩侵位关系

据饶家荣等 (1993) 研究, 扬子地块东南缘岩石圈结构 (图 1) 表明在深部残存有弧形分布的古板块俯冲碰撞带, 可能是太古代微地块边缘构造带的拼合部位。现今地表一系列 NE、NNE、NNE 和 NW 向弧形超岩石圈断裂带与深部残存有弧形分布的古板块俯冲碰撞带密切相关, 它们是在古板块俯冲碰撞时形成。这些超岩石圈断裂带对区内后期构造演化有十分重要的控制作用, 具有多期活动的特点, 如常德—黔阳 NE 向—凯里—都安 NNE—NNW 向弧形超

岩石圈断裂带的南端在都安有新生代超基性岩—钾镁煌斑岩岩群, 凯里—都安 NNE—NNW 向弧形超岩石圈断裂带的南段控制滇黔桂地区大面积低温成矿域的东部边界。

鄂湘黔 NNE 向超岩石圈断裂带在镇远一带与黔中近东西向超岩石圈断裂带 [1995, 王砚耕, 等] 交汇, 这种两组超岩石圈断裂带交汇区是软流层物质上涌侵位的岩石圈高渗透构造带, 即镇远含 II 型金刚石金伯利岩和钾镁煌斑岩岩群的定位构造。湖南宁乡等地的钾镁煌斑岩岩群定位明显受这些超岩石圈断裂带控制 [1993, 饶家荣, 等], 在都安有新生代超基性岩—钾镁煌斑岩岩群定位明显受常德—黔阳 NE 向—凯里—都安 NNE—NNW 向弧形超岩石圈断裂带的南端控制。

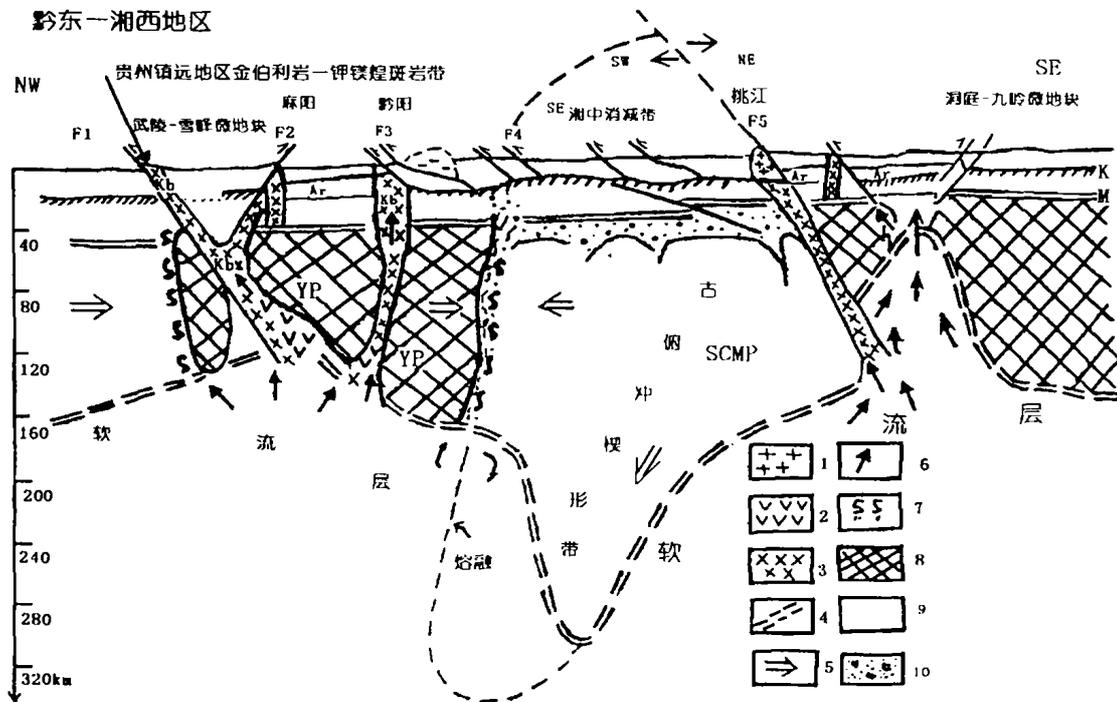


图 1 扬子地块东南缘岩石圈结构与金伯利岩—钾镁煌斑岩侵位关系图 (据饶家荣等修改)
 Fig. 1 Relationship between emplacement of kimberlite-lamprophyre and deep tectonics of lithosphere in southeastern margin of the Yangtze massif

F1—鄂湘黔 NNE 向超岩石圈断裂带 (在镇远一带与黔中近东西向超岩石圈断裂带交汇, 这种两组超岩石圈断裂带交汇区是软流层物质上涌侵位的岩石圈高渗透构造带, 即含 II 型金刚石金伯利岩—钾镁煌斑岩岩群的定位构造); F2—沅陵—麻阳 NNE 向超岩石圈断裂带; F3—常德—黔阳 NE 向—凯里—都安 NNE—NNW 向弧形超岩石圈断裂带 (在都安有新生代钾镁煌斑岩岩群); F4—城步—新化古板块俯冲碰撞带 (缝合带); F5—常德—安仁 NW 向转换构造带; K—大陆地壳内韧性剪切滑动面; M—莫霍面; SCMP—华南微板块; YP—扬子地块南缘上武陵—雪峰微地块; Kb—金伯利岩; Ar—太古代结晶基底; 1—花岗岩; 2—基性岩带; 3—钾镁煌斑岩岩群; 4—推测软流层顶面位置; 5—板块 (微地块) 古运动方向; 6—软流层热物质运动的可能方向; 7—岩石圈内高渗透构造带 (软流层热物质的上涌构造通道); 8—相对刚性的上地幔块体; 9—具塑性流变特点的上地幔块体; 10—玄武岩贫化后的异常上地幔

4 HHPRM 型富集地幔的大陆动力学分析

4.1 高放射性元素产热率古富集地幔 (HHPRM) 的形成机制

镇远金伯利岩—钾镁煌斑岩中现今残存的放射性元素产热率明显较高,暗示曾存在一个高放射性元素产热率古地幔 (HHPRM, high heat production of radioactive elements of mantle-source),为什么会形成这种古地幔?这是值得进一步深入研究和探索的大陆动力学问题,下面对这种古地幔的形成机制进行初步讨论:

前寒武纪岩石中在下地壳环境和经历高温高压变质后形成麻粒岩,产于麻粒岩中的流体包裹中富集 CO_2 而相对含 H_2O 少 [1988, Touret],麻粒岩中矿物形成温度大大超过了含水熔融温度,麻粒岩中亏损大离子亲石元素是它的主要地球化学特征 [1988, Vielzeuf]。我国大别和胶南超高压变质带中也有明显的 U、Th 和 K 亏损和丢失 [2001, 匡耀求,等],这些地区发现的含石英和金刚石的榴辉岩表明它们可能曾进入到 100 km 深处的地幔中,而这些岩石是地壳物质曾进入地幔后而经构造作用抬升循环进入陆壳 [1991, 徐树桐,等]。为什么相对富集 U、Th 和 K 的大陆地壳岩石进入下地壳—地幔中后有 U、Th 和 K 大量丢失?这些被丢失的 U、Th 和 K 被富集到什么地方?这是两个值得进行研究的物质平衡与迁移问题,然而,亏损大离子亲石元素及大量 U、Th 丢失的机制仍然在探索之中。

Bulanova (1998) 对金刚石中心包裹体的研究表明,金刚石的核化发生在液相环境中,这种液相可能富集挥发分、大离子亲石元素 (LIL) 和高场强元素 (HFSE) 的硅酸盐熔体,可能还含有不相容 Fe—Ni 硫化物熔体和不相容碳酸岩熔体。金刚石中流体包裹体研究证明 [1988, 1991, Navon, *et al.*] 通常含有 SiO_2 、 K_2O 、 CaO 、 FeO 等成分,包裹其中的子晶矿物有碳酸盐矿物、石英、硅酸盐矿物和磷灰石。这种地幔流体以 C—H—O 为主要组分,而且以 CO_2 为主,其次为 H_2O 。金刚石包裹体中气相成分以 CO_2 为主,含有 H_2O 、 H_2S 和 CH_4 [1994, Zheng, *et al.*; 1996, 郑建平,等],气相成分可以以 CO_2 — CO — H_2O 为主的相对氧化流体,或为 CH_4 — $\text{H}_2\text{C}_2\text{H}_6$ 为主的强还原性流体两种类型存在。这种以 CO — H_2O 的地幔流体 (可能与超临界流体相近) 具有强烈的萃取能力,可

能使下地壳—上地幔的岩石中 K、U、Th、Rb 等大离子亲石元素从岩石中萃取,从而导致亏损大离子亲石元素和 U、Th 大量丢失。经过强烈的地幔流体交代作用富集形成交代地幔,在矿物学上,以云母—角闪石—金红石—钛铁矿—透辉石—锆石 (MARID) 组合,或钛金云母 (富钛镁黑云母)—磷灰石—榍石—钛铁矿—钛磁铁矿组合为物征;在地球化学上,以大离子亲石元素 (LILE: K、Rb、Sr、Ba, LREE: La、Ce) 和高场强元素 (HFS: Ti、Nb、Zr、P、U、Th) 强烈富集为特征。这种地幔流体交代作用具有 K、U、Th 富集的特征,可能亏损大离子亲石元素和 U、Th 大量丢失的下地壳—上地幔岩石是经过了这种地幔流体的交代作用而富集于地幔流体中,形成了富集 K、U 和 Th 的交代富集地幔源区,它具有高放射性元素产热率的特点,这种交代富集地幔源区可称为 HHPRM 型地幔 (high heat production of radioactive elements of mantle)。在岩石学上,HHPRM 型地幔 (软流层) 形成的岩石组合为碳酸岩—金伯利岩—钾镁煌斑岩—碱性岩,这种岩石组合中 K、U 和 Th 含量均较高,如 Böhn (1999) 发现津巴布韦碳酸岩体的围岩中,石英岩的石英中流体包裹体强烈富集 K、U 和 Th,据 Böhn (1999) 测定的数据估算的放射性元素产热率高达 29 mWm^{-3} (表 2)。

4.2 本区 HHPRM 型富集地幔的形成时限与大陆动力学机制

刘观亮等 (1993) 在湖北大洪山获得的紫色单颗粒锆石 Pb—Pb 年龄为: 彭家旁 7 号岩体中 $t_1 = 2610 \text{ Ma}$, $t_2 = 2040 \text{ Ma}$; 向冲岩体中 $t_1 = 2450 \text{ Ma}$, $t_2 = 1900 \text{ Ma}$ 。马大铨等 (1980) 获得镇远马坪含 II 型金刚石金伯利岩中的磷灰石 U—Pb 年龄为 2410 Ma 、 867 Ma 、 438 Ma 、 402 Ma , 镇远溪头金伯利岩中钛金云母形成时代为 654 Ma (早期钛金云母) ~ 536 Ma (晚期钛金云母)。这些岩石所含异源角砾成分一般为源区岩石的形成时代,而不能指示它们的侵位时代,锆石和磷灰石较老的同位素年龄值不是从钾镁煌斑岩岩浆中结晶年龄,而是由基底或源区带上来的深源捕掳晶的形成年龄,暗示金伯利岩和钾镁煌斑岩岩浆的源区可能属晚太古代—元古代地层。由于钛金云母是地幔流体交代形成的,以地幔残斑晶形式产于金伯利岩中,可能代表地幔流体交代事件的时限 ($867 \sim 536 \text{ Ma}$)。笔者 (2001) 获得贵州镇远县思南塘地区钾镁煌斑岩类的形成时代为: Sm—Nd 等时线年龄 (t) = $(503 \pm 17) \text{ Ma}$, Rb—Sr 等时线年龄 (t) = $(501.2 \pm 4.6) \text{ Ma}$ 。贵州镇远县马坪和溪头金伯

利岩 Sm-Nd 等时线年龄 $(t) = (502 \pm 27) \text{ Ma}$, Rb-Sr 等时线年龄 $(t) = (497 \pm 20) \text{ Ma}$ 。暗示深部地幔热物质在寒武纪末-奥陶纪初 (503 ~ 497 Ma) 上涌侵位。岩浆-构造热事件(在地层中)的冷却终止时间为 (442.67 ~ 435.54 Ma), 认为镇远一带的早古生代钾镁煌斑岩-金伯利岩的岩浆源区可能来自交代富集地幔源区。

晚元古代以来, 地幔的循环机制由地壳板底垫托作用转为板块的俯冲作用, 大陆增生模式也由垂直向增生向水平增生过渡。在晚元古代扬子地块南缘的沉积岩石中有大量新的幔源物质加入[1996, 李献华], 吴根耀(2000)认为晚元古代起华南的格林威尔造山带及其发生快速坍塌, 尽管贵州榕江有少量钾镁煌斑岩[1998, 孙士军, 等], 但该时期可能不是软流层热物质大规模上涌侵位的时期。洋壳俯冲作用过程中, 大洋岩石圈俯冲板块近俯冲带一侧, 因俯冲作用而发生弯曲形成构造盆地, 诱导深海沉积物及洋壳玄武岩进入俯冲带, 一般洋壳俯冲深度在 100 ~ 125 km, 最深可达 700 km 软流层, 大洋板块俯冲发生脱水脱气作用是形成地幔流体的主要化学地球动力学机制之一。但因大洋沉积物一般含 K、Th、U 较低, 可能大陆地壳俯冲会带给地幔更多 K、Th、U。据饶家荣等(1993)研究, 在扬子地块内部贵州赤水一带岩石圈厚约 80 km, 从 NW→SE, 在贵州松桃-镇远一带岩石圈突然增厚到 150 km, 在湘西一带增厚到 200 km(图 1), 贵州-湖南-广西三省交界区的金伯利岩和钾镁煌斑岩位于岩石圈增厚区, 现今仍有厚约 120 ~ 180 km 的岩石圈残存(图 1), 这种残存的岩石圈可能与华南的格林威尔造山带[1990, 2000, 吴根耀]有密切关系, 板块持续俯冲发生脱水脱气作用形成地幔流体, 且演化为富集 K、U 和 Th 地幔流体, 它可能具有高放射性元素产热率 HHPRM 型地幔。在 867 ~ 536 Ma, 富集 K、U 和 Th 地幔流体交代形成交代富集地幔源区, 震旦纪-早寒武世可能是富集 K、U 和 Th 地幔流体交代事件的时限。本文认为早古生代的构造演化是软流层热物质上涌侵位的主控因素, 也是金伯利岩和钾镁煌斑岩侵位的主要时期。在桂东南-粤西北云开地区不但有中-晚元古代基底构造层(2 494 ~ 1 713 Ma, 颗粒锆石 U-Pb 年龄, 而且是加里东期重熔花岗岩 428 ~ 404 Ma, 颗粒锆石 U-P 年龄)的源区物质[2001, 黄圭成, 等], 在加里东期, 华夏板块与华南大洋板块在桂东南-粤西北云开地区发生俯冲碰撞, 影响本区由陆缘裂谷盆地转化为同碰撞裂谷盆地,

由于大陆岩石圈从伸展体制转化为挤压收缩体制。华夏板块远程岩石圈俯冲碰撞时, 大陆岩石圈低部发生粘滞性拖曳作用导致软流层热物质自 SE→NW 向流动。在地幔流体交代作用下, 本区大陆地壳仍维持伸展体制, 由于软流层热物质自 SE→NW 向流向本区, 必然发生软流层热物质沿岩石圈高渗透构造带向上垂向运移, 形成金伯利岩和钾镁煌斑岩侵位事件(图 1)。

4.3 岩石圈结构与高产热率古富集地幔(HHPRM)的起源深度

金伯利岩浆形成时的压力及温度, 与其岩石化学成份中 H_2O^+ 、 CO_2 、 SiO_2 的分子数有关。计算其压力、温度的方程式[1982, 赵磊; 1985, 邱家骧]如下:

$$(1) \text{ 压力 } P (108 \text{ Pa}) = 56.61 + 7.73 (\text{H}_2\text{O}^+ / \text{SiO}_2)$$

$$(2) \text{ 温度 } T(^{\circ}\text{C}) = 1550.65 - 623.98 [\text{CO}_2 / (\text{CO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}^+)]$$

式中 $\text{H}_2\text{O}^+ / \text{SiO}_2$ 、 $\text{CO}_2 / (\text{CO}_2 + \text{SiO}_2 + \text{H}_2\text{O}^+)$ 为分子数比, 计算出它的压力以后, 则可按 $108 \text{ Pa} \approx 3.3 \text{ km}$, 估算出其来源深度。镇远地区金伯利岩-钾镁煌斑岩岩浆源区深度(H)在 208 ~ 244 km, 形成温度在 1 547 ~ 1 403 $^{\circ}\text{C}$ 间, 该温度和深度范围属软流层。镇远地区金伯利岩-钾镁煌斑岩中石榴子石平衡温压估算的岩浆起源深度大于 170 km, 沉水砂矿金刚石包裹体估算的岩石圈厚度接近 200 km[1998, 孙士军, 等], 与前人推测的形成深度基本一致[1993, 饶家荣, 等; 1998, 孙士军, 等]。暗示在贵州-湖南-广西三省交界区的金伯利岩和钾镁煌斑岩可能具有形成金刚石矿床的地质条件, 应进一步开展研究与勘查工作; 尤其需重视广西都安一带形成时代较晚的钾镁煌斑岩-超基性岩形成地质背景和金刚石含矿性调查。

参考文献:

- 1976 Rybach L. Radioactive heat production and its relation to other petrophysical parameters [J]. Pure and Appl Geophys, 114: 309-317.
- 1977 陈国达. 中国大地构造概要[M]. 北京:地震出版社.
- 1980 马大铨. 贵州镇远马坪金伯利岩及外围岩体岩石特征[R]. 宜昌地质矿产研究所, 1-34.
- 1982 赵磊. 山东金伯利岩岩管岩石学、矿物学及其含金刚石性[D]. 中国地质大学.
- 1985 Taylor S R and McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution—An examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks

- [M]. [S. L.] Blackwell Scientific Publications, 46 - 92.
- 1988 Navon O, Hutcheon I D, Rossman G R, *et al.* Mantle-derived fluids in diamond micro-inclusions[J]. *Nature*, 355: 784 - 789.
- 1989 陈国达. 地洼学说编图的指导思想[J]. *大地构造与成矿学*, 13(4):1 - 21.
- 1990 邱家骧. 岩浆岩岩石学(第二版)[M]. 北京:地质出版社, 220 - 222.
- 1990 吴根耀. 川西康定—泸定地区前寒武纪大地构造演化[J]. *大地构造与成矿学*, 14(3):239 - 246.
- 1990 黎彤,倪守斌. 地球和地壳的化学元素丰度[M]. 北京:地质出版社, 25 - 95.
- 1990 梅厚钧. 中国金伯利岩与超钾岩的过渡关[C]. 见:开拓、创新、奋进—庆贺涂光炽教授从事地学工作五十一周年[M]. 重庆:中国科学文献出版社重庆分社, 54 - 68.
- 1991 Zhu B Q. Evidence of isotopic systematics from crust and mantle for chemical heterogeneities of terranes [J]. *Chinese Science Bulletin*, 36(15): 1279 - 1282.
- 1991 Navon O. High internal pressures in diamond fluid inclusions determined by infrared absorption [J]. *Nature*, 353: 746 - 748.
- 1991 Xu Shutong, Su Wen and Liu Yican. The diamond from the ultrahigh-pressure metamorphic rocks of eastern Dabie Mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 36(7): 1318 - 1321.
- 1992 陈国达. 历史—因果论大地构造学刍议[J]. *大地构造与成矿学*, 16(1), 1 - 71.
- 1993 徐青. 历史—因果论大地构造驱动力地幔蠕动能聚散说的地热学研[J]. *大地构造与成矿学*, 17(1): 13 - 22.
- 1993a 范蔚茗,尹汉辉,郝新才,等. 中国东南沿海深部岩石圈的性质和深部作用过程初探[J]. *大地构造与成矿学*, 17(1):23 - 30.
- 1993b 范蔚茗,陈欣. 中国东部 I 型地幔包体主要元素的区域性变化及其与地壳/岩石圈年龄、厚度的关系[J]. *大地构造与成矿学*, 17(3):221 - 228.
- 1993 陈胜早. 喜马拉雅山及其邻区的重力异常、岩石圈构造与板块动力模型[J]. *大地构造与成矿学*, 17(4): 315 - 334.
- 1993 饶家荣,曹一中,王纪恒. 湖南深部构造[J]. *湖南地质*, 7(增刊):17 - 80.
- 1993 刘观亮,汪雄武,吕学森. 湖北大洪山地区钾镁煌斑岩岩石学、矿物学特征及含矿性研究[M]. 北京:地质出版社, 51 - 114.
- 1994 Zheng J P, Lu F X, Guo H, *et al.* Studies of fluid inclusions in diamonds [J]. *Chinese Science Bulletin*, 39(3): 253 - 256.
- 1995 王砚耕,索书田,张明发,等. 南盘江地区浅层地壳结构与金矿分布模式[J]. *贵州地质*, 12(2): 91 - 175.
- 1996 郑建平,路凤香,赵磊,等. 华北地台古生代金伯利岩(包括金刚石)中流体及其在地幔演化中的作用 [J]. *大地构造与成矿学*, 20(2): 105 - 118.
- 1996 李献华. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 12(3):359 - 369.
- 1996 Gao Shan, Zhang Benren and Zhao Zhidan. Radioactivity and thermal state of the lithosphere in the Qinling orogenic belt and adjacent margins of North China and Yangtze Cratons: Constraints on interpretations of geophysical profilings [J]. *Continental Dynamics*, 1(1): 56 - 63.
- 1998 孙士军,杨松平. 贵州金刚石成矿条件初探[J]. *贵州地质*, 15(1):1 - 8.
- 1998 林传勇,史兰斌,朝韩玲,等. 浙江省上地幔的热结构及流变学特征[J]. *中国科学(D)*, 28(2):97 - 104.
- 1998 Bulanova G P. The formation of diamond[J]. *Mineral Magazine*, 62: 409 - 419.
- 1998 Vacquier V. A theory of the origin of the Earth's internal heat [J]. *Tectonophysics*, 291: 1 - 7.
- 1999 Böhn B and Rankin A H. Composition of natural, volatile-rich Na-Ca-REE-Sr carbonatitic fluids trapped in fluid inclusions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63: 3781 - 3797.
- 2000 梅厚钧,唐春景,李荪蓉,等. 中国的富钾超镁铁岩与金刚石成矿条件[C]. 见:涂光炽,等著,中国超大型矿床(I)[M]. 北京:科学出版社, 220 - 248.
- 2000 吴根耀. 华南的格林威尔造山带及其坍塌:在罗迪尼亚超大陆演化中的意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 24(2):112 - 123.
- 2000 王良书,李成,刘福田,等. 中国东、西部两类盆地岩石圈热—流变学结构[J]. *中国科学(D)*, 30(增刊): 116 - 121.
- 2001 黄圭成,汪雄武,杨世义,等. 两广云开隆起区存在中—古元古代基底的年代学证据 [J]. *中国区域地质*, 20(2):194 - 199.
- 2001 匡耀求,张本仁,欧阳建平. 深部天然核反应堆——一种可能的山脉隆升动力源[J]. *地质论评*, 47(2): 119 - 127.
- 2001 Zhu B Q, Dong Y P, Chang X Y, *et al.* Relation of isotope geochemical steep zones with geophysics and tectonics in the junction area of the Cathaysian [J]. *Acta Geologica Sinica*, 74(2): 236 - 240.
- 2001 方维萱,胡瑞忠,苏文超. 贵州镇远地区钾镁煌斑岩类的侵位时代[J]. *科学通报*, 47(4):307 - 312.

EARLY PROTEROZOIC HEAT STATE OF LITHOSPHERE AND HHPRM-TYPE MANTLE-SOURCE AREA IN NORTHEASTERN GUIZHOU AND WESTERN HUNAN, CHINA

FANG Wei-xuan^{1,2}, HU Rui-zhong¹ and SU Wen-chao¹,
QI Liang¹ and JIANG Guo-hao¹

(1. *Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*; 2. *Northwest Geological Exploration Bureau, CNNC, Xi'an 710054, China*)

Abstract: Research on heat state and structure of lithosphere is important to better understand continent breakup, metamorphism and reactive tectonics mechanism. Based on geochemistry, structural geology and comprehensive analysis on kimberlite and lamprophyre in Zhenyuan area and the Late Proterozoic strata in northeastern Guizhou and western Hunan Provinces, heat state of lithosphere in southeastern margin of the Yangtze massif in the Upper Palaeozoic has been discussed in this paper. The kimberlite and lamprophyre in Zhenyuan area are still of high heat production of radioactive elements, respectively 2.83 mWm^{-3} and 8.09 mWm^{-3} , as imply that there is a high heat production of radioactive elements derived from the earth mantle. It is estimated that kimberlite and lamprophyre are probable derived from the depth from 208 to 244 km at temperature 1 547-1 403°C, which might be attached to asthenosphere, i. e., radioactive elements of mantle-source area (HHPRM-type mantle-source, Fig. 1) have a high heat production. On the other hand, heat production of radioactive elements in the Late Proterozoic strata in northeastern Guizhou and western Hunan Provinces is 1.54 mWm^{-3} . The relative cold paleo-mantle plume that might be formed by after-image of continental subduction during Grenville orogeny from 1200 to 950 Ma. HHPRM-type mantle-source may be closed related to melting of the relative cold paleo-mantle plume by the CO-H₂O-rich of mantle-fluid metasomatism that may extract K, U and Th from the lower crust and mantle. At least, three main evolutionary processes can be recognized as followings: Firstly, the magma-source of kimberlite and lamprophyre in southeastern margin of the Yangtze massif may be derived from the Archaeozoic-Proterozoic strata. It is suggested 2 410 Ma by U-Pb ages of apatite in the Zhenyuan area and from 2 610 to 1 900 Ma by Pb-Pb isochronous ages of zircon in the Dahongshan area, Hubei Province. Zircon and apatite belong to mantle-capture-type, and their ages may indicate the magma-source of kimberlite and lamprophyre. Secondly, that K-Ar ages of Ti-phlogopite in the Zhenyuan kimberlite and lamprophyre are from 654 to 536 Ma, which may be time limits of mantle-fluid metasomatism. The CO-H₂O-rich mantle-fluid metasomatism may extract K, U and Th from the lower crust and mantle, resulting in HHPRM-type mantle-source in asthenosphere in the earth mantle. Finally, when the studied area was transformed into a type of syncollision-rift basin in the Lower Palaeozoic, the CO-H₂O-rich mantle-fluid with high heat production of radioactive elements was intruded in the Zhenyuan area from 503 to 497 Ma and this event of tectonic magma ended in the Zhenyuan area from 442.67 to 435.54 Ma.

Key words: Heat state of lithosphere; High heat production of radioactive elements; HHPRM-type mantle-source area; Diamond deposit; Southeastern margin of Yangtze massif, China