

幔源岩浆活动过程中的去气作用

——以云南老王寨金矿煌斑岩为例

黄智龙

(中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

摘要: 本文以云南老王寨金矿煌斑岩为例, 从岩石产出的构造环境、源区地幔交代富集作用、岩浆演化中硅酸盐熔体-碳酸盐熔体液态不混溶作用、岩石中 CO_2 的来源、蚀变流体特征、与成矿的关系以及高温高压实验等方面分析了幔源岩浆活动过程中的去气作用。

关键词: 幔源岩浆; 去气作用; 煌斑岩; 老王寨金矿

中图分类号: P594⁺. 1; P618. 510. 74 文献标识码: A

文章编号: 1007-2802(2001)01-0001-05

地幔中存在大量流体已被下列事实所证实: 大量的深源岩石(如金伯利岩、碳酸岩、钾镁煌斑岩、碱性玄武岩、拉斑玄武岩等)中幔源捕虏体(如二辉橄榄岩、方辉橄榄岩等)的流体包裹体的存在, 火山喷气, 近代大洋中脊、大陆裂谷、深大断裂区的喷气活动, 无机天然气及高温高压实验研究结果。目前对地幔流体的化学组成的认识还有很大分歧, 但这种流体富含 CO_2 和 H_2O 的看法却比较统一。地幔流体不仅对地幔的交代作用、幔源碱性岩浆的形成、大陆地壳演化有重要意义, 而且其活动过程中排放的气体(去气作用)是岩浆作用、大地构造、变质作用、热液作用、热沉积作用, 以及有关成矿作用产生的根本控制因素和表现形式, 对全球环境变化也有深远影响^[1, 2]。幔源岩浆产生的构造环境、源区地幔交代作用、岩浆形成与演化、与成矿作用的关系等方面均记录了去气作用的信息, 是研究去气作用最为理想的对象。本文以云南老王寨金矿煌斑岩为例, 根据岩石产出的构造环境、源区特征、岩浆演化、岩石中 CO_2 的来源、蚀变流体特征及与成矿的关系等方面的研究结果, 结合高温高压实验资料, 分析了幔源岩浆活动过程中的去气作用。

1 煌斑岩基本特征及形成的构造环境

云南老王寨金矿位于哀牢山断裂带北段, 由冬瓜林、老王寨等多个矿段组成。矿区煌斑岩广泛分布, 侵入区内所有地层和岩浆岩走向近北西, 明显受北西向哀牢山断裂带控制。岩石的 Rb-Sr 同位素年龄为 28.8 ~ 49.0 Ma^[3], 裂变径迹年龄为 22.7 ~ 27.2 Ma^[4], 为喜马拉雅期幔源岩浆活动产物。岩石类型以云煌岩为主, 主要矿物组合为辉石+云母+钾长石; 少量云斜煌岩, 主要矿物组合为辉石+云母+斜长石。岩石普遍遭受蚀变, 常见有碳酸盐化、绢云母化、硅化等; 部分经历了矿化作用, 硫化物化(黄铁矿化、辉锑矿化、毒砂化等)尤甚。根据蚀变的强弱和是否具矿化, 本区煌斑岩可分为新鲜(弱蚀变)、蚀变、矿化 3 种。

区域地质、遥感和地球物理资料表明, 控制老王寨金矿煌斑岩的哀牢山断裂带具有极其复杂的构造活动过程, 虽然目前对该断裂带的形成时代、演化规律及演化阶段的力学性质等的认识有较大分歧, 但对其在喜马拉雅期表现为拉张构造环境有比较一致的看法^[5~8]。也就是说, 老王寨金矿煌斑岩是拉张构

收稿日期: 2000-10-10 收到, 11-28 改回

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999043203)和国家攀登计划预选项目(95-预-39)联合资助

作者简介: 黄智龙(1967—), 男, 研究员, 矿床地球化学专业, 获第八届侯德封奖。

造环境下幔源岩浆活动的产物。区域拉张构造环境为幔源岩浆活动过程中去气作用提供了有利通道。

2 煌斑岩地球化学及源区特征

黄智龙等^[4] 系统分析老王寨金矿煌斑岩主要元素、微量元素、稀土元素和同位素地球化学资料。主要元素显示本区煌斑岩为富钾钙碱性煌斑岩; M 值 [Mg/(Mg+Fe²⁺)] 和过渡元素(Sc、Cr、Co、Ni)含量均表明岩石具有原生岩浆性质; 岩石与 MORB^[9] 相比, 富集大离子亲石元素、高场强元素, 稀土分配模式(以球粒陨石标准化)为轻稀土富集型, 不相容元素分配模式(以 MORB 标准化)为不相容元素强烈富集型; 岩石的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)₀ 值(0.70644 ~ 0.70895) 高于原始地幔现代值(0.7045)、(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd)₀ 值(0.512436 ~ 0.512524) 低于原始地幔现代值(0.512638); 这些均表明本区煌斑岩来源于交代富集地幔。模拟计算结果^[4] (图 1) 表明, 本区煌斑岩的源区地幔岩石为富集稀土元素(尤其是轻稀土元素), 进一步证实了上述结论。线性规划计算结果^[4] 表明, 地幔去气作用形成的流体和俯冲进入地幔楔中的地壳物质脱水形成的流体与早期亏损地幔相互作用是形成本区交代富集地幔的主要机制。

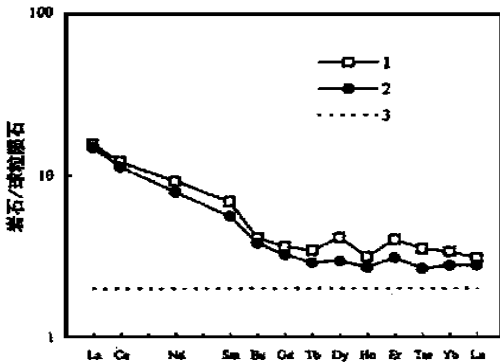


图 1 老王寨金矿区煌斑岩源区稀土模拟计算结果 样品 YD-20 (采自冬瓜林矿段的煌斑岩) 和 LW-21 (采自老王寨矿段的煌斑岩) 的 M 值和 Sc、Cr、Co、Ni 的含量均具原生岩浆特征, 模拟计算^[4] 出两样品分别是地幔部分程度 7.5% 和 15% 的产物 以此计算出本区煌斑岩源区稀土元素含量。该图是计算结果的分配模式。1 为样品 YD-20 的计算结果; 2 为样品 YW-21 的计算结果; 3 为两倍于球粒陨石的原始地幔^[10]。球粒陨石据文献^[11]

3 煌斑岩岩浆演化过程中的去气作用

世界各地许多煌斑岩中出现的碳酸盐球粒是岩浆演化过程中发生硅酸盐熔体-碳酸盐熔体液态不

混溶作用的结果^[12-13], 也是岩浆演化过程中去气作用的重要表现形式之一。笔者在老王寨金矿及位于哀牢山金矿带北段的北衙金矿发现 3 条含碳酸盐球粒煌斑岩脉。岩脉中球粒为主要由白云石和方解石组成的碳酸盐, 稀土元素和碳同位素组成具岩浆碳酸盐(即碳酸岩)特征; 基体的主要矿物组合、主要元素和稀土元素均与矿区无碳酸盐球粒煌斑岩脉相似, 为来源于交代富集地幔的钙碱性煌斑岩。地质、地球化学研究结果表明, 本区含碳酸盐球粒煌斑岩脉为区内喜马拉雅期煌斑岩岩浆演化过程中硅酸盐-碳酸盐液态不混溶作用产物, 含碳酸盐球粒煌斑岩脉中球粒的碳、氧同位素组成变化证实了岩浆演化过程中存在 CO₂ 和 H₂O 为主去气作用(图 2)。

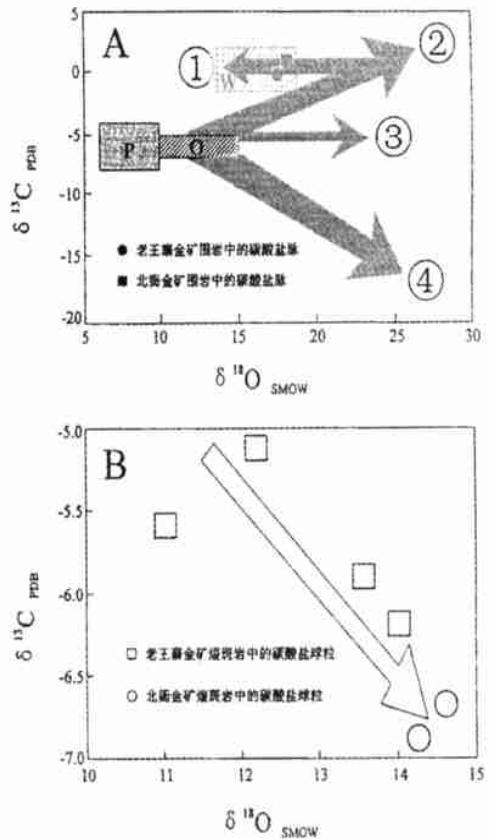


图 2 含碳酸盐球粒煌斑岩脉的 $\delta^{13}C_{(PDB)}-\delta^{18}O_{(SMOW)}$ 图 A: P 区为原生碳酸岩^[14], W 区为老王寨金矿区碳酸盐地层及碳酸盐脉^[3], O 区为含碳酸盐球粒煌斑岩脉中的球粒(本文), ①、②、③、④为匈牙利中生代碱性玄武岩和煌斑岩中碳酸盐的碳、氧同位素的变化趋势^[15], 其中①为沉积碳酸盐同化混染作用, ②为沉积碳酸盐的活化作用, ③为岩浆岩的低温蚀变作用, ④为岩浆流体的去气作用 B: A 中 O 区的放大图, 箭头为含碳酸盐球粒煌斑岩脉中球粒碳、氧同位素的变化趋势

4 煌斑岩中 CO₂ 的来源

全岩化学成分分析结果^[4]表明,老王寨金矿相对新鲜煌斑岩 CO₂ 的含量(5.10%~9.56%,平均为 7.45%)明显高于目前公认能代表原生岩浆(蚀变极弱)煌斑岩中的 CO₂ 含量(一般 0.5%左右^[16])。本区煌斑岩中的 CO₂ 主要以碳酸盐形式出现,岩石中碳酸盐的产出形式和种类为:原生矿物橄榄石、辉石及云母等的蚀变产物;呈脉状出现的碳酸盐;呈基质产出的碳酸盐;呈球粒形式出现的碳酸盐。4 种产状的碳酸盐相对数量为第一类大大多于第二类,而第三类与第四类含量相近。Huang 等^[17]分析了不同产状碳酸盐碳同位素组成,结果表明:1)暗色矿物蚀变形成碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-1.98‰~-3.17‰(平均值-2.55‰)、呈基质产出的碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-4.13‰~-4.71‰(平均值-4.45‰)、呈球粒形式出现的碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 为-5.10‰,均在地幔 $\delta^{13}\text{C}$ 范围(-2‰~-9‰)之内,表明形成这些碳酸盐的 CO₂ 主要来源于地幔;2)呈脉形式出现的碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 为+0.73‰~-2.29‰(平均值-1.00‰),与矿区碳酸盐地层的碳同位素组成^[3]相似;3)暗色矿物碳酸盐化形成的碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 略低于矿区矿石的 $\delta^{13}\text{C}$ ^[3,18],表明本区蚀变流体和矿化流体中 CO₂ 总体来源相似,主要由地幔提供,但矿化流体中可能有更多其它来源 CO₂ (如矿区围岩等)的参与。据此, Huang 等^[17]认为引起本区煌斑岩碳酸盐的 CO₂ 主要由煌斑岩岩浆活动过程中以 CO₂ 为主的去气作用(包括地幔去气作用和岩浆去气作用)提供,实际上是一种“自交代作用”过程。

5 煌斑岩的蚀变流体特征

前已述及,老王寨金矿煌斑岩普遍遭受以碳酸盐化、绢云母化、硅化等为主的多种蚀变作用, Huang 等^[19]以区内新鲜煌斑岩和蚀变煌斑岩的主要元素、微量元素、稀土元素及成矿元素地球化学为基础,质量平衡计算表明,引起本区煌斑岩蚀变的流体为一种含过渡元素(Sc、V、Cr、Co、Ni)、亲石元素(Rb、Sr、Ba、U、Th、Nb、LREE、HREE)、挥发性元素(CO₂)和亲硫元素(或成矿元素)(Cu、Zn、As、Sb、Au、Ag)的富硅

铝(SiO₂、Al₂O₃)碱性(K₂O)流体。Huang 等^[19]从多方面论证了这种蚀变流体可能是本区煌斑岩岩浆演化到晚期分异出来的产物,去气作用在形成这种流体过程中具有重要意义。

6 煌斑岩岩浆活动与成矿

铅、硫、碳、氢、氧和氦同位素组成特征^[3,18,20,21]表明,老王寨金矿床成矿物质(主要指金)主要由区域变质地层和早期形成的基性-超基性岩提供,成矿流体主要为深部来源(具岩浆热液性质,也可能有少量变质热液和大气降水等的参与)。老王寨金矿煌斑岩与金矿化时间上(同位素年龄证实均为喜马拉雅期^[20])、空间上(煌斑岩型金矿石占冬瓜林矿段金属总储量的 50%±^[22])密切共生很具典型性。黄智龙等^[4]对该区煌斑岩与金矿化的关系进行了深入研究,结果表明,煌斑岩在金矿化过程中本身不具有提供大量成矿物质(主要指金)和成矿流体的潜力,但伴随岩浆活动过程中的去气作用(包括地幔去气作用和岩浆去气作用)形成的流体为成矿流体的主要来源,岩石本身起“地球化学障”的作用。

7 高温高压实验

幔源岩浆活动过程中的去气作用在煌斑岩熔融实验(实验方法和过程见文献^[4])结果主要表现为:1)地幔去气作用形成的富含碱质和不相容元素(大离子亲石元素、高场强元素、稀土元素等)的 C-H-O 流体参与形成煌斑岩的源岩——交代富集地幔岩;2)实验过程中黄铁矿脱硫形成的硫在实验产物边缘相对低温区聚集;3)实验过程中碳酸盐的变化及实验产物中 CO₂ 的含量变化。本文重点讨论第三种表现形式。

实验初始物配制过程中在原岩中加有 1%(重量百分比,下同)方解石,初始全岩成分中 CO₂ 含量为 3.01%,但镜下观察和电子探针分析均未在实验产物中发现碳酸盐,暗示这种矿物在实验条件下发生了分解,即 $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$, 生成的 CO₂ 或是存在于熔体中,或以气态形式进入石墨样品管,后者便是岩浆去气作用的表现形式之一。从煌斑岩全熔玻璃的化学分析成分(表 1)可见,3.0 GPa 时玻璃中 CO₂ 的含量为 3.09%,与初始物中 CO₂ 的含量(3.01%)相似,

表明初始物中碳酸盐分解形成的 CO_2 大部分进入熔体; 2.0 GPa 时玻璃中 CO_2 的含量为 1.40%, 初始物中碳酸盐分解形成的 CO_2 进入熔体的量和岩浆去气作用散溢的量相当。1.5 GPa 时玻璃中 CO_2 的含量

为 0.61%, 暗示初始物中碳酸盐分解形成的 CO_2 大部分以岩浆去气作用散溢。由此可见, 压力对煌斑岩岩浆去气具有控制作用, 表现为压力降低岩浆去气作用越明显。

表 1 煌斑岩干体系全熔玻璃的化学分析成分(%)

序号	压力	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	CO_2	烧失量	总量
1	1.5 GPa	55.61	0.71	11.09	2.13	3.68	0.10	12.31	5.90	1.49	3.87	0.47	0.61	1.54	99.51
2	2.0 GPa	54.59	0.65	10.66	2.44	3.13	0.13	12.89	6.17	1.44	3.91	0.46	1.40	1.56	99.43
3	3.0 GPa	54.31	0.69	10.52	2.41	3.53	0.15	12.17	5.09	1.38	4.06	0.45	3.09	1.55	99.40

分析者: 中国科学院地球化学研究所李荪蓉

8 总结

综上所述, 去气作用贯穿整个幔源岩浆活动过程, 区域张性构造环境为去气作用的有利通道, 地幔交代富集作用、岩浆演化过程中出现的硅酸盐熔体-富挥发分熔体(如碳酸盐熔体等)液态不混溶作用、岩石的“自交代作用”以及有关矿产成矿流体的来源等均是去气作用的表现形式。以云南老王寨金矿煌斑岩为例, 岩浆活动过程中的去气作用可描述为: 地幔去气作用形成富含碱质和不相容元素(大离子亲石元素、高场强元素、稀土元素等)的 C-H-O 流体(主要由 CO_2 和 H_2O 等组成)部分加入煌斑岩的源岩——交代富集地幔岩, 部分形成 CO_2 (和其它挥发分, 下同)气团(或流体); 在富集地幔部分熔融形成岩浆过程中, 部分 CO_2 溶解于岩浆, 形成含碳酸盐的煌斑岩初始岩浆。在岩浆演化过程中发生液态不混溶作用形成相对独立的碳酸盐熔体和硅酸盐熔体。岩浆继续演化, 碳酸盐熔体不稳定, 大部分分解形成的 CO_2 以岩浆去气作用的形式脱离岩浆, 少部分 CO_2 或重新溶解于岩浆, 或以未分解碳酸盐熔体的形式存在于岩浆中。在岩浆演化晚期, 岩浆中的 CO_2 (含量较少)部分呈基质碳酸盐出现, 部分呈球粒出现, 还有部分形成晚期分异流体。值得一提的是, 幔源岩浆过程中去气作用形成的气体沿深大断裂上升, 除以气体的形式散溢外, 还参与形成蚀变流体和成矿流体。

参考文献:

[1] 杜乐天, 王驹. 气体动力学——一个重要的研究方向[J]. 地球科学进展, 1993, 8(6): 66-73.

[2] 杜乐天, 刘若新, 邓晋福. 地幔流体与软流层(体)地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 1996.

[3] 胡云中, 唐尚鹤, 王海平, 等. 哀牢山金矿地质[M]. 北京: 地质出版社, 1995.

[4] 黄智龙, 刘丛强, 朱成明, 等. 云南老王寨金矿区煌斑岩成因及其与金矿化的关系[M]. 北京: 地质出版社, 1999.

[5] 张玉泉, 谢应雯, 涂光焱, 哀牢山—金沙江富碱侵入岩及其与裂谷构造关系初步研究[J]. 岩石学报, 1987, (1): 17-25.

[6] 陈胜早. 下扬子中生代裂谷带的地球物理-地质特征[J]. 地质学报, 1990, 64(2): 107-120.

[7] 从柏林, 吴根耀, 张旗, 等. 中国滇西古特提斯构造带岩石大地构造演化[J]. 中国科学(B辑), 1993, 23(11): 1201-1207.

[8] 杨开辉, 莫宣学. 滇西南晚古生代火山岩与裂谷作用及区域构造演化[J]. 岩石矿物学杂志, 1993, 12(4): 297-311.

[9] Sun S S, McDonough W. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implication for mantle composition and processes[J]. Geol. Soc. Spec. Pub., 1989, 42: 313-345.

[10] Frey F A. Rare earth abundances in upper mantle rocks [A]. Henderson P eds. Rare Earth Element Geochemistry [M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1984 153-203.

[11] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[J]. Dev. Geochem., 1984, 2: 63-114.

[12] Foley S F. Liquid immiscibility and melt segregation in alkaline lamprophyres from Lapbrados[J]. Lithos., 1984, 17: 127-137.

[13] Rock N M S. LAMPROPHYRES[M]. Glasgow: Blackie, 1990.

[14] Taylor H P, Frechen J, Degens E T. Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites from the Laacher See district, West Germany, and the Alno district, Sweden[J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1967, 31: 497-430.

[15] Demeny A, Harangi S. Stable isotope studies and processes of carbonate formation in Hungarian alkali basalts and lamprophyres: evolution of magmatic fluids and magma-sediment interactions[J]. Lithos., 1995, 37: 335-349.

[16] Bergman S C. Lamproites and other potassium-rich rocks: a review of their occurrence, mineralogy and geochemistry[J]. Geol. Soc. Spec. Publ., 1987, 30: 103-190.

- [17] Huang Z L, Liu C Q, Xiao H Y. The source of CO₂ in lamprophyres from Laowangzhai gold orefield, Yunnan Province, China [J]. Chinese Sci. Bull., 1999, 44(suppl): 201—203.
- [18] 何明友, 胡瑞忠. 深源流体——老王寨金矿床含矿流体来源的一种可能性[J]. 地质地球化学, 1996 (2): 27—31.
- [19] Huang Z L, Liu C Q, Xiao H Y. Mobility of elements during lamprophyre alteration and altered fluid Characteristics in the Zhenyuan gold deposit [J]. Chinese Sci. Bull., 1999, 44(suppl): 254—257.
- [20] 唐尚鹑, 李经典, 何叔欣, 袁牢山北段金矿成矿带成矿规律初探[J]. 云南地质, 1991, 10(1): 44—70.
- [21] Hu R Z, Bi X W, He M Y, *et al* Mineralizer constraint on gold mineralization of Ailaoshan gold belt[J]. Sci. China(D), 1998, 41(suppl): 74—82.
- [22] 何文举. 镇沅金矿田煌斑岩特征及其与金矿成矿的关系[J]. 云南地质, 1993, 12(2), 148—158.

Degassing in the processes of Mantle-Derived Magmatism: As Exemplified by Lamprophyres in Laowangzhai Gold Deposit, Yunnan Province

HUANG Zhi-long

(The Open Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

Abstract: As exemplified by lamprophyres in Laowangzhai gold deposit, Yunnan Province, this paper discussed the degassing in the processes of mantle-derived magmatism based on the study results of the regional tectonic setting, mantle metasomatism, liquid immiscibility of silicate-carbonate melts during magmatic evolution, the source of CO₂ in rocks, the characteristics of altered fluids, the relationship between rocks and gold mineralization, and experiments at high pressure and temperature etc.

Key words: mantle-derived magmatism; degassing; lamprophyres; Laowangzhai gold deposit