

文章编号: 1000- 6524 (2003) 02- 0119- 06

低¹⁸O 碱性花岗岩成因讨论 ——以内蒙巴尔哲碱性花岗岩为例

袁忠信, 张敏, 万德芳

(中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要: 巴尔哲花岗岩是一个罕见的亏损¹⁸O 的碱性花岗岩体, 其中的石英、长石、钠闪石、锆石以及全岩的氧同位素含量都是国内碱性花岗岩中最低的。根据其氧同位素资料, 结合岩体地质地球化学特征, 讨论了该岩体以及我国东部低¹⁸O 碱性花岗岩的成因, 认为用岩石与大气降水间同位素交换和开放体系下的岩浆去气作用解释该类岩石成因较为合理, 但也有缺陷, 有待进一步研究。

关键词: 氧同位素; 低¹⁸O 碱性花岗岩; 岩石成因; 巴尔哲; 内蒙古

中图分类号: P588. 12⁺ 1; P597⁺ . 2

文献标识码: A

A discussion on the petrogenesis of ¹⁸O_{low} alkali granite ——A case study of Baerzhe alkali granite in Inner Mongolia

Yuan Zhong xin, Zhang Min and Wan De fang

(Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, china)

Abstract: Baerzhe granite in Inner Mongolia is a rare rock depleted in ¹⁸O. This paper gives the oxygen isotopic values of quartz, feldspar, riebeckite, zircon and whole rock of Baerzhe alkali granite, which seem to be the lowest among these isotopic values in all the alkali granites of China. In the light of isotopic data, this paper deals with geological and geochemical characteristics, the origins of Baerzhe rock body and the ¹⁸O_{low} alkali granites in eastern China. The authors consider that two arguments are relatively reasonable for illustrating the petrogenesis: one is isotope exchange between the rock and the meteoric water, and the other is magmatic degassing of the rock in an open system. The problem of petrogenesis deserves further researches.

Key words: oxygen isotope; ¹⁸O_{low} alkali granite; petrogenesis; Baerzhe; Inner Mongolia

近年来国内相继发表了不少论述我国碱性花岗岩贫重氢(D)及重氧(¹⁸O)同位素的文章(洪大卫等, 1987; 桂训唐等, 1989; 李培忠等, 1989, 1992, 1994; 陈辉, 1995, 1996; 王一先等, 1997), 对引起岩石氢氧同位素贫乏的原因及岩石成因各说不一。内蒙巴尔哲岩体是国内 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低、最具代表性的碱性花岗岩, 本文以此为例, 在已有氧同位素数据资料基础上补充数据, 讨论了低¹⁸O 碱性花岗岩的成因。

1 岩体地质概况

巴尔哲碱性花岗岩位于大兴安岭南缘内蒙古哲里木盟扎鲁特旗境内, 大地构造上属于内蒙兴安褶皱系内蒙优地槽

褶皱带。区内中生代断裂及火山活动强烈发育。北东向黄岗梁-甘珠尔庙-乌兰浩特断裂带是区内中生代主要的控岩控矿构造。矿区北侧有次一级的近东西向霍林河断裂通过。区内侏罗纪呼日格组碱性流纹质晶屑岩屑凝灰岩发育, 为巴尔哲碱性花岗岩的围岩。岩体与围岩间呈侵入接触关系, 二者的岩性及氧同位素值相近, 可能为同源不同产状或不同期次的岩浆活动产物。巴尔哲碱性花岗岩呈岩瘤产出, 主要有东、西二岩体, 其中东岩体出露面积 0.3 km², 西岩体出露面积 0.11 km², 二岩体向下均向外缓倾并连为整体。西岩体晶洞发育, 主要组成矿物为微斜条纹长石、正长条纹长石、石英、钠闪石、霓石、钠长石及磁铁矿。东岩体主要组成矿物有微斜长石及微斜条纹长石、石英、钠长石、钠闪石、霓石、锆

收稿日期: 2002- 05- 09; 修订日期: 2002- 11- 29

作者简介: 袁忠信(1931-), 男, 研究员, 从事稀土元素和矿床地质地球化学研究。

石及磁铁矿。东岩体晶洞不如西岩体发育,但钠长石化及硅化作用强烈,可见强烈稀有稀土金属矿化。全岩 Rb- Sr 等时线年龄 127.2 Ma, ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i = 0.7071; 全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) =$

+ 1.88~ + 2.40(王一先等, 1997)。二岩体的岩石化学成分列于表 1。

表 1 巴尔哲碱性花岗岩体及其围岩的岩石化学成分

w_B/%

Table 1 Petrochemical composition of the Baerzhe alkali granite and its country rocks

序号	采样点	样品深度 (m)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	ZrO ₂	总计
1		3号孔 50~ 60	74.63	0.66	9.48	3.82	0.90	0.12	0.03	0.10	3.66	2.35	0.43	0.28	3.25	99.71
2		3号孔 90~ 100	74.40	0.69	9.93	4.09	0.72	0.06	0.05	0.16	3.50	3.48	0.44	0.32	3.40	99.24
3	东岩体	3号孔 135~ 145	72.84	0.24	11.51	1.70	3.14	0.08	0.059	0.10	4.20	4.16	0.44	0.12	1.45	100.039
4		3号孔 180~ 190	73.30	0.24	11.28	1.92	2.66	0.09	0.066	0.25	4.20	4.08	0.32	0.12	1.23	99.756
5		3号孔 330~ 350	73.23	0.15	11.85	1.19	2.46	0.05	0.099	0.70	4.60	4.40	0.34	0.10		99.945
6		8号孔 20	72.92	0.11	11.85	1.81	2.53	0.05	0.048	0.27	4.56	5.00	0.28	0.14	0.24	99.808
7	西岩体	1号孔 32	73.38	0.16	10.26	3.19	2.57	0.09	0.037	0.005	4.34	4.16	0.26	0.12	0.75	99.332
8		1号孔 73~ 83	73.44	0.15	10.07	4.13	2.33	0.09	0.044	0.008	4.11	4.56	0.28	0.04	0.82	100.072
9		1号孔 255~ 265	73.06	0.23	9.87	3.94	2.39	0.09	0.044	0.12	4.20	4.34	0.14	0.12	0.95	99.494
10	东岩体	地表	70.16	0.20	12.76	0.13	2.53	0.049	0.25	0.88	6.89	2.27	0.88	0.37		99.707
11	围岩	地表	72.91	0.22	13.23	0.30	1.43	0.32	0.36	1.08	3.78	5.03	0.05	0.43		99.14
12	西岩体	地表	70.69	0.18	13.41	0.34	1.77	0.29	0.24	0.95	8.62	2.56	0.29	0.03		99.37
13	围岩	地表	69.37	0.22	14.93	1.03	1.55	0.10	0.24	1.20	5.05	5.83	0.29	0.05		99.94

分析单位: 国家地质实验测试中心; 分析方法: 常规化学法; 1~ 2 为强钠长石化硅化碱性花岗岩; 3 为弱钠长石化硅化碱性花岗岩; 4~ 5、7~ 9 为中粒钠长石碱性花岗岩; 6 为细粒钠闪石碱性花岗岩; 10~ 13 均为碱流质晶屑岩屑凝灰岩。

2 氧同位素特征

由中国地质科学院矿产资源研究所同位素室分别测定了东西二岩体及其围岩的全岩和单矿物氧同位素值。单矿物

样品均在双目镜下严格挑选, 纯度在 98% 以上。用过量 BrF₅ 作氧化剂在高温下提取矿物和全岩中的氧。同位素比值在 MAT- 251 质谱计上测定, 每次做样 6 个, 其中一个是标准样品。样品分析精度为 0.07%。岩体及其围岩的氧同位素值列于表 2, 主要矿物的氧同位素值列于表 3。

表 2 巴尔哲碱性花岗岩及其围岩的氧同位素值

Table 2 Oxygen isotopic values of the Baerzhe alkali granite and its country rocks

采样点	样号	采样深度/m	岩性特征	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\%$
	I006	1号孔, 119.0	强钠长石化硅化碱性花岗岩	- 3.63
	I009	1号孔, 138.0	弱蚀变钠闪石碱性花岗岩	- 1.82
	I022	1号孔, 302.0	中粒钠闪石碱性花岗岩	- 0.90
	B84- 7	2号孔, 42.8	强钠长石化硅化碱性花岗岩	- 3.47
	B84- 12	2号孔, 74.5	强钠长石化硅化碱性花岗岩	- 3.02
东岩体	B84- 22	2号孔, 131.0	弱蚀变钠闪石碱性花岗岩	- 1.32
	B84- 29	2号孔, 171.0	弱蚀变钠闪石碱性花岗岩	- 4.64
	B84- 38	2号孔, 227.0	中粒钠闪石碱性花岗岩	- 5.18
	B84- 49	2号孔, 297.0	中粒钠闪石碱性花岗岩	- 0.14
	F- 012	4号孔, 117.0	伟晶状钠闪石碱性花岗岩	+ 2.87
	F- 014	4号孔, 129.0	强钠长石化硅化碱性花岗岩	- 5.61
西岩体	B84- 90	地表	中粒钠闪石碱性花岗岩	- 2.10
	B84- 52	地表	碱流质晶屑岩屑凝灰岩	+ 1.37
东岩体	F- 003	地表	碱流质晶屑岩屑凝灰岩	- 4.10
围岩	F- 007	地表	碱流质晶屑岩屑凝灰岩	- 2.66
	F- 010	地表	碱流质晶屑岩屑凝灰岩	+ 2.91
	B84- 74	地表	钠闪石碱性花岗岩脉	- 3.61
西岩体	B84- 80	地表	碱流质晶屑岩屑凝灰岩	- 7.18
围岩	B84- 76	地表	花岗斑岩	- 3.63

表 3 巴尔哲碱性花岗岩主要矿物的氧同位素值
Table 3 Oxygen isotopic values of main minerals in the Baerzhe alkali granite

采样点	样号	采样深度(m)	岩性特征	$\delta^{18}\text{O}_{\text{石英-长石}} / \text{‰}$			锆石	钠闪石
				石英	长石	$\Delta^{18}\text{O}_{\text{石英-长石}}$		
东岩体	I003	1 号孔 51.7	强钠长石化硅化碱性花岗岩	4.16	- 10.82	14.58		
	I006	1 号孔 119.0	强钠长石化硅化碱性花岗岩	5.93	- 8.53	14.46		
	I009	1 号孔 138.0	弱蚀变钠闪石碱性花岗岩	5.95	- 7.58	13.53		
	I024	1 号孔 180.0	弱蚀变钠闪石碱性花岗岩	5.59	- 4.81	10.40		
	I014	1 号孔 239.0	中粒钠闪石碱性花岗岩	5.67	- 8.14	13.81		
	I022	1 号孔 302.0	中粒钠闪石碱性花岗岩	6.00	- 5.70	11.70		
	I016	7 号孔 380.0	中粒钠闪石碱性花岗岩	5.16	- 8.74	13.90		
	RH- 5(6)	3 号孔 14~ 24	强钠长石化硅化碱性花岗岩				- 10.9	
	RH- 9(51)	3 号孔 50~ 60	强钠长石化硅化碱性花岗岩				- 10.6	
	RH- 14(9)	3 号孔 320~ 350	细粒钠闪石碱性花岗岩					1.8
	RH- 15	地表	细粒钠闪石碱性花岗岩					3.0
	RH- 12(1)	1 号孔 90~ 100	细粒钠闪石碱性花岗岩					2.6
	西岩体	B84- 77	地表	细粒钠闪石碱性花岗岩	5.15	- 7.92	13.07	
B84- 78		地表	细粒钠闪石碱性花岗岩	5.09	- 7.89	12.98		
B84- 90		地表	细粒钠闪石碱性花岗岩	5.03	- 7.86	12.89		

3 岩石成因讨论

碱性花岗岩多属 $\delta^{18}\text{O} < + 6\text{‰}$ 的花岗岩, 低¹⁸O 和 D 是这类岩石的共同特征。国外对低¹⁸O 或低 D 花岗岩成因最常见的解释有: ① 岩石与大气降水间的同位素交换 (Taylor, 1971); ② 岩浆去气或脱水作用 (Nabelek, 1982; Taylor, 1983); ③ 正常¹⁸O 岩浆与¹⁸O 贫化围岩间的同位素交换 (Taylor, 1978); ④ 原有的低¹⁸O 岩石或大气降水浸泡过的岩石熔融 (Taylor, 1978)。国内对碱性花岗岩的¹⁸O 和 D 也做了很多工作。表 4 为我国东部一些代表性碱性花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。苏州岩体, 按其岩石、矿物等特征不应归属于碱性花岗岩, 国内一些学者将其称为 A 型花岗岩 (张兴隆等, 1987; 汪建明等, 1993; 魏春生等, 1999, 2001), 并将其与碱性花岗岩并列讨论, 本文也将其列于表中。由表中资料得知, 我国东部碱

性花岗岩均属低¹⁸O 花岗岩。对碱性花岗岩¹⁸O 和 D 亏损的原因, 国内学者大致有如下几种认识: ① 岩石与大气降水进行同位素交换 (张敏等, 1988; 魏春生等, 1999); ② 来自于地幔深处的贫¹⁸O 岩浆 (李培忠, 1994; 陈辉, 1996); ③ 经历过高温海水热液交换的再循环下部洋壳的部分熔融 (魏春生等, 2001); ④ 开放体系下岩浆去气作用或岩浆脱水作用 (李培忠, 1992; 陈辉, 1995; Qin Zhenwei, 1987)。这里主要以巴尔哲岩体为例讨论整个低¹⁸O 碱性花岗岩的成因。

了解岩石成因要从多方面入手, 除根据同位素微量元素资料外, 还需要结合岩体所在地的构造、岩体产状、岩石结构构造、岩石矿物组成、岩石化学等很好地来认识。碱性花岗岩常沿深断裂分布, 岩石的 (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i 多小于 0.708 (表 4), 巴尔哲岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = + 2.21$ (王一先等, 1997), 碾子山岩体的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = + 4.4$ (李培忠等, 1994), 说明岩石具深源特征。这类岩石多呈岩株、岩瘤、岩枝等小岩体产出, 中、细粒结构, 普

表 4 我国东部碱性花岗岩的氧同位素值
Table 4 Oxygen isotopic values of alkali granites in eastern China

岩体名称	岩石年龄 (Ma)	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _(t)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}} / \text{‰}$		资料来源
			范围	平均	
福建魁岐	91.3	0.7059	+ 5.5~ + 9.5	+ 7.5	洪大卫等, 1987
江苏苏州	128	0.7109	+ 3.5~ + 9.2	+ 7.6	魏春生等, 1999, 2001
山东崂山	134	0.7064	+ 5.7~ + 8.2	+ 7.1	桂训唐等, 1989
河北山海关	118	0.703	+ 1.6~ + 6.7	+ 4.4	李培忠等, 1989
黑龙江碾子山	123		+ 2.0~ + 5.0(弱蚀变岩石)	+ 3.3	李培忠等, 1992
			- 1.2~ + 1.6(强蚀变岩石)	- 0.04	
内蒙巴彦温都尔	286	0.7053	+ 3.4~ + 7.8	+ 5.94	靳满元, 1991
内蒙祖横得楞	291	0.703	+ 4.4~ + 8.3	+ 6.02	
内蒙扎拉乌拉	277	0.708	+ 1.5~ + 5.6	+ 2.3	
内蒙巴尔哲	127	0.707	- 5.61~ + 2.87	- 2.44	本文

遍有晶洞、气孔构造,具有浅成特征。从岩石化学成分看,这类岩石富硅碱、贫钙镁、富氟贫水,在矿物组成上的最大特征是不含云母,含碱性暗色矿物,有大量碱性长石而无钠长石以外的斜长石。这些地质构造、岩石矿物方面的特征是认识岩石成因的最重要依据。

岩石的深源特征使低 ^{18}O 碱性花岗岩可能是大气降水或地下水浸泡的岩石经部分熔融而形成的说法遭到质疑。目前,除已知极少数浅成或喷出的小岩体外,已知的沉积岩、变质岩以及火成岩中还未发现其他低 ^{18}O 的岩石。因此,浅成或喷出生成的低 ^{18}O 岩石重新回到地下深处,熔融生成碱性花岗岩的可能性极小。岩石的深源特征使某些学者将碱性花岗岩的源岩归属于地幔岩,包括大洋深处的镁铁质岩石。但由于地幔岩在矿物组成和岩石化学成分上与碱性花岗岩差异太大,这种可能性应不大。

已知在岩浆温度下,硅酸盐熔体与共存矿物间的平衡 ^{18}O 分馏系数非常小,一般正常花岗岩近于平衡的 $\Delta^{18}\text{O}_{\text{石英-长石}}$ 为 $1.0\text{‰}\sim 1.5\text{‰}$ (Taylor, 1978)。从表3可看出,巴尔哲岩体 $\Delta^{18}\text{O}_{\text{石英-长石}}=10.40\text{‰}\sim 14.58\text{‰}$,显著大于岩浆结晶分离的同位素分馏值,所呈现的氧同位素特征不能用正常岩浆结晶分离作用来解释。无论深部低 ^{18}O 岩石或被大气降水浸泡过的岩石的熔融产物,都应遵循上述岩浆分离结晶的同位素分馏原则。巴尔哲岩体石英、长石间异常大的氧同位素分馏系数显然有其他原因。

另一种认识是岩石与大气降水间的同位素交换导致岩石 ^{18}O 贫化。为证实这种认识,笔者做了锆石氧同位素测定。用于测定的矿物呈无柱面的双锥体产出,不含水,密度 4.2 g/cm^3 ,紫外光下发黄色光,新鲜,无风化或水蚀痕迹。锆石是十分稳定的矿物,如果围岩遭受后期熔融,在新生岩石中它仍能以残余矿物形式产出,即使在高温热液蚀变条件下,也能保持 $\delta^{18}\text{O}$ 值不变(魏春生等,2001)。巴尔哲岩体两个锆石的氧同位素值为很大的负值, $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -10.6‰ 和 -10.9‰ ,与同在华北的崂山、碾子山、山海关碱性花岗岩岩体中锆石的氧同位素值相比,差别很大。后者锆石的 $\delta^{18}\text{O}$ 分别为 $4.80\text{‰}\sim 5.12\text{‰}$ 、 $3.12\text{‰}\sim 4.14\text{‰}$ 和 $4.07\text{‰}\sim 4.71\text{‰}$ (魏春生等,2001)。很难设想,巴尔哲碱性花岗岩锆石异常低的 $\delta^{18}\text{O}$ 纯粹是岩石与大气降水或地下水热液间同位素交换的产物。另外,花岗岩的造岩矿物中石英通常是与 ^{18}O 亲和力最强的矿物,它不轻易与外界进行氧同位素交换。巴尔哲岩体石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 普遍偏低,在 $+6\text{‰}$ 以下,因此碱性花岗岩贫 ^{18}O 可能还有其他原因。

大气降水与岩石间的氧同位素交换,在巴尔哲东岩体的上部表现明显。东岩体上部钠长石化和硅化作用发育,岩石蚀变多有地下水热液参与。由表2可看出,东岩体297 m和302 m深处的两个样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -0.14‰ 和 -0.90‰ ,在227 m深处以上的样品均有较大的负值,而且大小不一,可能反映热液蚀变的不均一性。位于129 m以上的4个强钠长石化硅化样品,其 $\delta^{18}\text{O}$ 负值都较大,从 -3.02‰

到 -5.61‰ 。这些现象很可能是岩石与大气降水或地下水热液间氧同位素交换的结果。

大气降水的影响还表现在巴尔哲岩体的围岩——碱流质晶屑岩屑凝灰岩的贫 ^{18}O 上。由表2可知,围岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 多为较大的负值。另外,内蒙东部大兴安岭南段已知有很多贫 ^{18}O 的小岩体。黑龙江碾子山碱性花岗岩强蚀变岩石的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -0.04‰ (李培忠等,1992),内蒙巴林左旗白音诺与铅锌成矿有关的石英正长斑岩和花岗闪长斑岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -4.3‰ 和 -1.6‰ (赵一鸣等,1997),浩布高与铅锌成矿作用有关的石英二长岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -8.0‰ 和 -8.3‰ (盛继福等,1999)。区域上有这样多的中生代不同岩性的贫 ^{18}O 小岩体,说明不是局部现象,更不是一种深部岩石熔融上侵的产物,而可能是浅成或近地表岩石与大气降水间氧同位素相互交换的结果。

如上所述,用大气降水说明整个巴尔哲岩体,尤其是其下部贫 ^{18}O 岩石的形成机制,不尽完善。对岩体下部岩石的贫 ^{18}O 的另一种解释是岩浆的去气作用或脱水作用。碱性花岗岩的深源浅成有利于水、气自深处向上的长距离而且充分的排泄至近地表自岩浆中逸出。岩浆温度下,游离水与熔浆水或矿物水之间的氢同位素分馏实验证实了岩浆去气作用可使岩石的D的 H_2O 含量相对贫化(Graham, 1984; Richet, 1986; Dobson, 1989)。我国东部地区的碱性花岗岩贫D,且大多贫 ^{18}O ,很有可能也与岩浆去气作用有关。但目前还未见到与上述氢同位素分馏类似的氧同位素实验结果。 ^{18}O 是否能像有的学者认为的那样,能随同D一道离去,或者随岩浆去气单独逸出,还有待进一步研究。

关于低 ^{18}O 碱性花岗岩的成因,还需从这类岩石的地质地球化学特征方面去寻求。碱性花岗岩贫水,既使 ^{18}O 能伴随D逸出,量也极为有限。碱性花岗岩富含F和K、Na等易挥发元素,稀有稀土元素含量通常较高。F是促使氧从矿物中游离出来的有效剂。K和稀有稀土元素在自然界存在多种轻重同位素。岩浆中成矿流体向岩体顶部运移及岩浆去气作用,能否促使氧同位素分馏,从而促使更大量的 ^{18}O 从岩体中逸出,值得探索。已有资料表明,国内F、K、Na及稀有稀土元素含量高的碱性花岗岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值多数相对较低。

在已发表的文献中,笔者还没有见到有关钠闪石的氧同位素分析数据。花岗岩共存矿物 ^{18}O 值增大的顺序为磁铁矿-黑云母-角闪石-白云母-斜长石-碱性长石-石英(Taylor, 1978)。张理刚(1985)指出,含OH根的矿物具有异常低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。巴尔哲碱性花岗岩中的钠闪石是岩体中唯一含 H_2O 或 OH^- 的矿物,矿物分子式为 $\text{Na}_{2.5}(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_4\text{Si}_{18}\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{F})_2$,但岩体中钠闪石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $1.8\text{‰}\sim 3.0\text{‰}$ (表3),仅次于石英而远较碱性长石高,用于测试样品的纯度及分析测试精度应该不存在问题。巴尔哲岩体钠闪石相对较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值究竟是个别情况,还是其他什么原因,值得进一步研究。另外,花岗岩类岩石共存矿物 ^{18}O 值序列中还未见有锆石的报导。锆石是难熔的极有示踪意义的矿

物,收集更多锆石的氧同位素资料,了解其与¹⁸O的亲合力,有助于了解花岗岩类岩石的成因与起源,建议今后加以关注。

4 结 语

内蒙巴尔哲碱性花岗岩是国内知名的稀有稀土金属成矿岩体,也是一个罕见的亏损¹⁸O的岩体。对于国内低¹⁸O碱性花岗岩,用低¹⁸O岩石或大气降水浸泡过的岩石熔融、正常¹⁸O岩浆与¹⁸O贫化围岩间的同位素交换以及深处地幔岩浆的上升都难以解释其成因。岩石与大气降水间的同位素交换可说明地表或浅部岩石的贫¹⁸O,但对深部岩石缺乏说服力。开放条件下的岩浆去气作用可用以解释深部岩石的贫¹⁸O,但缺乏直接的重氧逸出的实验依据,有待进一步研究。

致 谢:丁悌平同志与笔者就论文有关问题进行过有益的探讨,在此表示衷心的感谢!

References

- Chen Hui. 1995. A comment on hydrogen isotopic composition and related problems of alkaline granites [J]. *Geochemica*, 24 (2): 193~195 (in Chinese with English abstract).
- Chen Hui. 1996. Hydrogen isotope fractionation in the evolution of the earth [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 31 (3): 238~249 (in Chinese).
- Ding Tiping. 1980. *Geochemistry of Hydrogen and Oxygen Isotope* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 86~102 (in Chinese).
- Dobson P P, Epstein S and Stolper E M. 1989. Hydrogen isotope fractionation between coexisting vapor and silicate glasses and melts at low pressure [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 53: 2723~2730.
- Graham C M, Harmon R S and Sheppard M F. 1984. Experimental hydrogen isotope study: Hydrogen isotope exchange between amphibole and water [J]. *Am. Mineral.*, 69: 128.
- Gui Xuntang, Cheng Zhongli, Yu Fuji, *et al.* 1989. Isotopic geochemistry of Laoshan miarolitic alkaline granite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 37~44 (in Chinese with English abstract).
- Hong Dawei, Guo Wenqi, Li Gejing, *et al.* 1987. The petrology of the belt of miarolitic granites in the southeast coast of Fujian Province and their generation [M]. Beijing: Scientific and Technological Press, 94~98 (in Chinese).
- Li Peizhong, Yu Fuji, Liu Deping, *et al.* 1992. The relationship between δD and magma, degassing of the Nianzishan miarolitic alkaline granite, Heilongjiang [J]. *Geochemica*, (1): 70~76 (in Chinese with English abstract).
- Li Peizhong and Yu Jinsheng. 1989. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of the Shanhaiguan miarolitic alkaline granite [J]. *Chinese Science Bulletin*, (1): 51~52 (in Chinese).
- Li Peizhong and Yu Jinsheng. 1994. Isotopic geochemistry of the Nianzishan miarolitic alkaline granite [A]. *Isotopic Geochemistry* [C]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 269~286 (in Chinese).
- Nabelek P I, O'Neil J R and Rapike J J. 1982. Vapor phase exsolution as a controlling factor in hydrogen isotope variation in granitic rocks: the Notch Peak granitic stock, Utah [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 66: 137~150.
- Qin Zhenwei, Yu Fuji and Yu Jinsheng. 1987. D/H evidence for magmatic degassing of miarolitic alkaline granites in Quiqi and Qindao, China [J]. *Geochemica*, 21: 149~157.
- Richet P, Roux J, Pineau F, *et al.* 1986. Hydrogen isotope fractionation in the system H₂O-liquid NaAlSi₃O₈: new data and comments on D/H fractionation in hydrothermal experiments [J]. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 78: 115~120.
- Sheng Jifu and Fu Xianzheng. 1999. *Geological Features of Copper-poly-metallic Deposits and Metallogenic Environment in the Intermediate Section of the Da Hinggan Mountains* [M]. Beijing: Seismological Press, 132~138.
- Taylor B E, Eichelberger J C and Westrich H R. 1983. Hydrogen isotope evidence for rhyolite magma degassing during shallow intrusion and eruption [J]. *Nature*, 306: 541~545.
- Taylor H P J. 1971. Oxygen isotope evidence for large scale interaction between meteoric ground water and Tertiary granodiorite intrusion, Western Cascade Range, Oregon [J]. *Geophys. Res.*, 75 (32): 7855.
- Taylor H P J and Forester R W. 1971. Low-¹⁸O igneous rocks from the intrusive complexes of Skye, Mull and Adnamuchan, West Scotland [J]. *J. Petrol.*, 12: 485~497.
- Taylor H P J. 1978. Oxygen and hydrogen isotope studies of plutonic granitic rocks [J]. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 38 (1): 177~210.
- Wang Jianming, Yang Nianqiang, Li Kangqiang, *et al.* 1993. The metallogenesis and magmatic differentiation of Suzhou A-type granite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9 (1): 33~43 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yixian and Zhao Zhenhua. 1997. Geochemistry and origin of the Baerzhe REE-Nb-Be-Zr superlarge deposit [J]. *Geochemica*, 26 (1): 24~35 (in Chinese with English abstract).
- Wei Chunsheng, Zheng Yongfei and Zhao Zifu. 1999. The hydrogen and oxygen isotope geochemistry of the Suzhou A-type granite [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (2): 224~236 (in Chinese with English abstract).
- Wei Chunsheng, Zheng Yongfei and Zhao Zifu. 2001. Nd-Sr-O isotopic geochemistry constraints on the age and origin of the A-type granites in Eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17 (1): 95~111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ligang. 1985. *The Application of the Stable Isotope to Geology* [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Publishing House, 10~14 (in Chinese).
- Zhang Min and Yuan Zhongxin. 1988. Oxygen isotopic geochemistry of "801" REE alkali granite in the Inner Mongolia Autonomous Region [J]. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits, CAGS*, (1): 139~146 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Xinglong, Wang Jiabing and Shen Bochun. 1987. A study on the nature of A-type granites in Suzhou [J]. Acta Petrologica Sinica, (2): 1~ 15(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yiming, Zhang Dequan, *et al.* 1997. Metallogeny and Prospective Evaluation of Copper-Polymetallic Deposits in the Da Hinggan Mountains and Its Adjacent Regions [M]. Beijing: Seismological Press, 131~ 135(in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 陈 辉. 1995. 关于碱性花岗岩 H 同位素组成及其有关问题的讨论 [J]. 地球化学, 24 (2): 193~ 195.
- 陈 辉. 1996. 氢在地球演化过程中的同位素分馏[J]. 地质科学, 31(3): 238~ 249.
- 丁梯平. 1980. 氢氧同位素地球化学[M]. 北京:地质出版社, 86~ 102.
- 桂训唐, 成忠礼, 虞福基, 等. 1989. 青岛崂山晶洞碱性花岗岩同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 3: 37~ 44.
- 洪大卫, 郭文歧, 李戈晶, 等. 1987. 福建沿海晶洞花岗岩带的岩石学和成因演化[M]. 北京: 科学技术出版社, 94~ 98.
- 靳满元. 1991. 内蒙古中部巴彦温都尔碱性花岗岩的岩石学与地球化学[D]. 北京: 中国地质科学院.
- 李培忠, 虞福基, 刘德平, 等. 1992. 黑龙江碾子山晶洞碱性花岗岩氢同位素组成与岩浆去气作用[J]. 地球化学, (1): 70~ 76.
- 李培忠, 于津生. 1989. 山海关晶洞碱性花岗岩氢氧同位素组成[J]. 科学通报, (1): 51~ 52.
- 李培忠, 于津生. 1994. 碾子山晶洞碱性花岗岩同位素地球化学 [A]. 同位素地球化学研究[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 269~ 286.
- 盛继福, 傅先政, 等. 1999. 大兴安岭中段成矿环境与铜多金属矿床地质特征[M]. 北京: 地震出版社, 132~ 138.
- 汪建明, 杨年强, 李康强, 等. 1993. 苏州 A 型花岗岩的岩浆分异与成矿作用[J]. 岩石学报, 9 (1): 33~ 43.
- 王一先, 赵振华. 1997. 巴尔哲超大型稀土铈铍错矿床地球化学和成因[J]. 地球化学, 26(1): 24~ 35.
- 魏春生, 郑永飞, 赵子福. 1999. 苏州 A 型花岗岩氢氧同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 15 (2): 224~ 236.
- 魏春生, 郑永飞, 赵子福. 2001. 中国东部 A 型花岗岩形成时代及物质来源和 Nd- Sr- O 同位素地球化学制约[J]. 岩石学报, 17 (1): 95~ 111.
- 张理刚. 1985. 稳定同位素在地质科学中的应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 10~ 14.
- 张 敏, 袁忠信. 1988. 内蒙“八〇一”稀有元素碱性花岗岩氧同位素地球化学[J]. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊, 1: 139~ 146.
- 张兴隆, 王家炳, 沈波春. 1987. 苏州 A 型花岗岩性质的研究[J]. 岩石学报, (2): 1~ 15.
- 赵一鸣, 张德全, 等. 1997. 大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价[M]. 北京: 地震出版社, 131~ 135.