

大别-苏鲁造山带大理岩碳氧同位素地球化学研究*

冯伟民 郑永飞** 周建波

FENG WeiMin, ZHENG YongFei and ZHOU JianBo

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2002-12-10 收稿, 2003-06-25 改回.

Feng WM, Zheng YF and Zhou JB. 2003. Carbon and oxygen isotope geochemistry of marbles from the Dabie-Sulu orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3):468-478

Abstract Marbles are widely outcropped in the Dabie-Sulu orogenic belt, but they experienced different grades of metamorphism during the Triassic collision between Sino-Korean and Yangtze Cratons. Carbon and oxygen isotope analyses were carried out for marbles from Beihuanyang, Sujiahe, Tongbo and Susong in the Dabie region, and from Zhangbaling, Wulian and Pingshang in the Sulu region. The results show that only the samples from Zhangbaling are characterized by significantly positive $\delta^{13}\text{C}$ values, the other samples have $\delta^{13}\text{C}$ values close to $0 \pm 2\%$ (PDB). There is no correlation between $\delta^{13}\text{C}$ value and metamorphic grade. The variations in marble $\delta^{13}\text{C}$ are considered to mainly reflect the features of the age and environment of protolith precipitation, in which the positive $\delta^{13}\text{C}$ values can be related to global glaciations during the Neoproterozoic. All the marbles show decreased $\delta^{18}\text{O}$ values relative to marine limestones, with the lowest one at 4.5‰ (SMOW). The regional decrease in $\delta^{18}\text{O}$ is consistent with hydrothermal alteration during the middle Neoproterozoic, resulting in the very low $\delta^{18}\text{O}$ values. The fluid involved was mainly composed of surface water without significant amounts of carbon, and thus is derived from the meteoric water relevant to deglaciation.

Key words Carbon isotope, Oxygen isotope, Marble, Metamorphism, Plate subduction

摘要 大别-苏鲁造山带的大理岩分布非常广泛,在三叠纪的陆-陆碰撞中,经受了不同程度的变质作用。本文对分布在大别地区北淮阳、苏家河、桐柏、宿松和苏鲁地区张八岭、五莲和坪上等地区的浅变质大理岩进行了碳氧同位素分析。结果发现,除了张八岭大理岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现明显正异常(1‰~8‰)外,其他地区大理岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值均处于 $0 \pm 2\%$ (PDB)范围之内。所有地区大理岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值都有不同程度的降低,最低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值达到 4.5‰(SMOW)。与前人对大别-苏鲁超高压大理岩碳氧同位素研究结果相对比,我们发现大理岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布与岩石是否经过超高压没有联系,而主要反映了其原岩沉积的时代和环境,并且其特征可以与发生在新元古代的冰川事件相关联。区域性的 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低则说明,大部分岩石都经过了流体交换,并且流体的主要成分是水,含碳很少或者不含碳,因此流体的来源是大气降水,可能与新元古代冰川消融有关。

关键词 碳氧同位素; 浅变质岩; 大理岩; 变质作用; 板块俯冲

中图法分类号 P597.2; P588.313

大理岩在大别-苏鲁造山带广泛出露,范围遍及高压、超高压变质带及浅变质地区,与榴辉岩、片麻岩和片岩等共生(e.g., Wang *et al.*, 1995; Cong *et al.*, 1996; Zhang *et al.*, 1998; Wallis *et al.*, 1999; Carswell *et al.*, 2000; Liou *et al.*, 2000)。自大别山发现超高压矿物柯石英以来,人们已从主量元素、微量元素、稳定同位素、放射成因同位素等各个方面

对大别-苏鲁造山带的超高压榴辉岩、片麻岩及其共生大理岩等进行了大量的同位素年代学和地球化学研究(e.g., Ames *et al.*, 1996; Hacker *et al.*, 1998, 2000; John, 1998; Zheng *et al.*, 1998a, 1998b, 1999a, 2000, 2001; Fu *et al.*, 1999, 2001, 2002; Li *et al.*, 1999, 2000; Liou *et al.*, 2000; Ma *et al.*, 2000; Xiao *et al.*, 2000, 2002; Sassi *et al.*, 2000)。

* 国家科技部 973 项目(G01999075503)和中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-107)资助成果.

第一作者简介: 冯伟民,男,1977年生,硕士,同位素地球化学专业.

** 通讯作者: E-mail: yfzheng@ustc.edu.cn

相比较而言,对于浅变质地区的大理岩研究稍有欠缺。由于大理岩在大别-苏鲁地区的广泛存在,其碳氧同位素组成对于其原岩形成环境和后期改造作用具有重要的指示作用。因此,对大别-苏鲁大理岩进行系统的碳氧同位素研究,有助于整体理解大别-苏鲁造山带形成时的构造格局以及超高压变质的动力学过程。

Zheng *et al.* (1998b)、傅斌等 (1998) 和 Rumble *et al.* (2000) 已经对大别-苏鲁变质带中与超高压榴辉岩共生的大理岩进行了详细的碳氧同位素研究,所得到的 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现明显显著异常 (1.7 ~ 5.7‰), $\delta^{18}\text{O}$ 值则表现出明显的降低 (<20‰)。但是, Rumble *et al.* (2000) 对苏鲁东部荣城大理岩的分析得到,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值则接近于 0‰,与正常海相沉积灰岩的碳同位素组成一致。这两个地区的大理岩都经受过高压-超高压变质作用,因此在碳同位素组成上的差别可能反映了其原岩沉积环境在不同时间和空间上的变化。本文把研究地区的范围扩大到包括大别-苏鲁造山带内的一些高压变质带和浅变质带中的大理岩,旨在结合对超高压大理岩的分析数据,对大别-苏鲁造山带大理岩原岩灰岩的碳氧同位素特征及其所反映的地质意义等进行探讨。

1 地质背景

大别-苏鲁造山带呈东西向位于中国中东部,是南部的扬子板块与北部的华北板块碰撞的产物 (Wang *et al.*, 1995; Cong *et al.*, 1996)。目前大多数学者认为这次剧烈的大陆板块碰撞发生在距今约 220 ~ 240Ma 的三叠纪 (Li *et al.*, 1999, 2000; Ayers *et al.*, 2002; Zheng *et al.*, 2002a), 碰撞过程中扬子板块向华北板块下部俯冲超过 100 公里的深度并迅速折返出露地表。

大别地体从北到南可以分为四个构造岩石单元,即北淮阳构造带、北大别高压混合岩带、中大别超高压变质带和南大别高压变质带。在三叠纪板块碰撞过程中各个构造单元的俯冲行为有所不同,形成了代表不同温压条件的变质矿物集合体。在四个构造带中,中大别单元俯冲最深,超过 100 公里并达到了上地幔的深度,结果在极高的压力条件下形成了柯石英和金刚石等特征矿物。北大别和南大别俯冲深度较浅,是否经过超高压变质尚存在争议。而北淮阳可能仅仅是板块碰撞过程中刮下来的陆壳残片,并没有深俯冲下去 (周建波等, 2001a)。

尽管前人对大别山超高压岩石 (包括榴辉岩、片麻岩等) 积累了大量的同位素定年资料,基本可以确定这些岩石的原岩年龄和变质时间,但对大别-苏鲁地体大理岩的定年工作却由于难度较大而进展甚小,至今并没有给出确定的年龄数据。Zheng *et al.* (1997) 曾在中大别大理岩中获得了 $435 \pm 45\text{Ma}$ 的 U-Pb 等时线年龄,但这个年龄有可能是受到后期热事件扰动而导致同位素体系重置的结果。根据碳-铍同位素组成随时代变化的相关曲线进行盲区定年 (blind dating) 的

方法 (Melezhik *et al.*, 2001), 一定程度上可以对这个问题作出间接回答。

前人对大别-苏鲁造山带中大理岩的碳氧同位素研究表明,北大别高压大理岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-1\text{‰} \sim 3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $15\text{‰} \sim 25\text{‰}$; 中大别超高压大理岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $1\text{‰} \sim 6\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $11\text{‰} \sim 19\text{‰}$ (Zheng *et al.*, 1998b; Rumble *et al.*, 2000)。考虑到最高的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值可能保存了原岩值 (O'Neil, 1987), 大别山超高压大理岩高达 6‰ 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与在扬子板块震旦系沉积层中发现的富 ^{13}C 灰岩 (Yang *et al.*, 1999) 相一致。因此, Rumble *et al.* (2000) 认为这指示两者年龄一致,并且其沉积时代与大别山超高压榴辉岩的原岩侵入时代相近,均为新元古代。

2 样品采集

本文研究样品包括大别-苏鲁造山带内各种未经受超高压变质的大理岩,具体采样点位置如图 1 所示,有关地质概况简述如下:

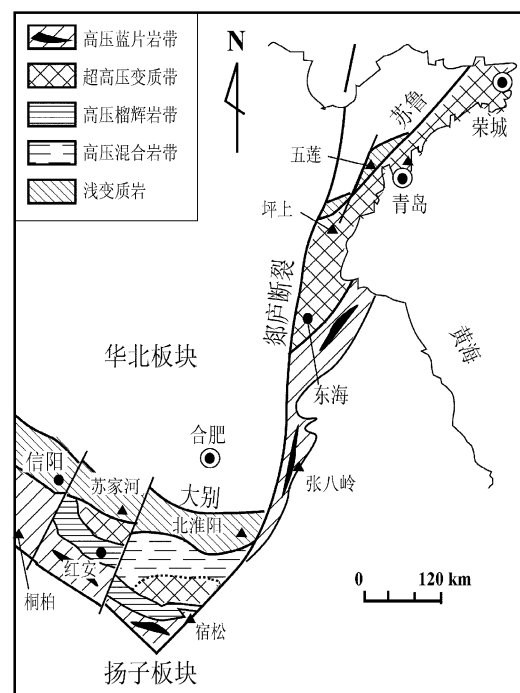


图 1 大别-苏鲁地质构造和采样位置草图。三角符号为采样点位置。

Fig. 1 Sketch map of geology in the Dabie-Sulu Mountains. Triangles denote sample location.

在安徽境内,大别造山带北缘的北淮阳带包括佛子岭群浅变质岩和梅山群变形沉积岩,主要由石英岩、石英片岩、千枚岩、板岩和大理岩等岩石组合构成,其中变沉积岩主体为绿片岩相变质复理石系。佛子岭群含有丰富的震旦纪扬子

型微古生物化石,指示佛子岭群原岩的沉积年龄是在新元古代和早古生代(郑文武,1964)。本文研究的9个北淮阳样品中,00HY35-A、00HY35-B、00HY35-C、00HY58-A、00HY58-B和00HY58-C则属于佛子岭群,而00HY08、00HY09和00HY13属于晚古生代梅山群。

北淮阳带西部的苏家河地区主要为片岩、片麻岩和大理岩等组合。自叶伯丹等(1991)发现早奥陶的动物化石以来,张仁杰等(1998)进一步发现了早奥陶世的微体化石 *Desmochitina* sp., *Rhabdochitina* sp., *Lophosphaeridium* sp., *Acanthodiaerodium* sp. 等,因此苏家河群大理岩原岩沉积年龄现在基本确定是在奥陶纪。本文研究的样品01SJH22和01SJH23属于苏家河群;与先前傅斌等(1998)采样地点有所不同,01SJH27-1、01SJH27-2和01SJH27-3则属于秦岭群。

大别以西的桐柏地区出露岩石有片岩、片麻岩、千枚岩、闪长岩、灰岩和大理岩等。本文样品采自信阳-随州-三里岗路线,多为侏罗纪砾岩中的灰岩砾石。

南大别宿松群广泛出露大理岩、石英云母片岩、片麻岩等组合。宿松群的时代长久以来认为属于早中元古代,其主要根据是宿松群对于原先的晚太古代大别群之间厘定为不整合接触和一些早期年代学数据。但侯金明等(1995)撰文指出,根据他们对宿松群的研究,重新认定其与大别群之间应为过渡关系,并且根据孢粉组合、地层序列等方面认定宿松群的时代应该为震旦纪。宿松群中发现了高压蓝片岩,并存在记录三叠纪碰撞事件的同位素年代学证据(Hacker *et al.*, 2000),说明宿松群岩石在板块碰撞-俯冲-折返过程中变质程度较高。Chen *et al.* (2003)对宿松群北部变质花岗岩和变质石英岩中的锆石 U-Pb 定年得到,它们的岩浆侵位和变质作用时间分别为 $785 \pm 7\text{Ma}$ 和 $205 \pm 12\text{Ma}$ 。

苏鲁高压-超高压变质带被北边的五莲-威海断裂、南边的嘉山-响水断裂和西边的郟庐断裂所夹。一般认为,苏鲁地体原本与大别地体连为一体,三叠纪碰撞以后发生左旋的郟庐断裂,苏鲁地体开始沿郟庐断裂左行平移,使得其现在相对于大别地体向北错动大约500公里(Xu *et al.*, 1987)。其主体分为两个部分,界线由东西向的连云港-泗阳断裂控制。以北为超高压变质带,其中发现大面积的含柯石英变质岩。超高压带主要由花岗片麻岩、角闪岩、大理岩组成,一些花岗片麻岩和大理岩中含有大量榴辉岩夹层或岩块。超高压带中也有少量浅变质岩石出露(董树文等,1996;周建波等,2001b),本文中采自坪上的大理岩就属此列。

连云港-泗阳断裂以南属于高压变质带,称为张八岭群(或海州群),主要出露岩石为石英白云片岩、硬绿泥石-兰晶石白云石英片岩以及少量绿片岩的组合。本文样品采自苏鲁高压带的张八岭地区,大多为陡山沱组灰岩,其中01ZBL39A、01ZBL39B、01ZBL39C和01ZBL40等四个样品为更早沉积的北将军组灰岩。

通过对以上所述各个区域的灰岩、大理岩样品所进行的锶同位素分析(实验室待发表数据),我们发现五莲及张八岭地区大理岩的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值均 <0.7072 。这样的低值在

地质历史上并不多见,指示他们的沉积时代要么是在120~280Ma之间,要么就是早于600Ma(Jacobsen *et al.*, 1999; Miller *et al.*, 2003)。这个信息对我们后面对这些大理岩碳氧同位素分析结果的解释具有重要的参考价值。

3 同位素分析

本文分析大理岩样品共96件。将岩石粉碎后与 $>100\%$ 的磷酸在 25°C 反应4小时,提取出方解石中的 CO_2 ;抽真空后在 50°C 继续反应8小时,提取出白云石中的 CO_2 。收集得到的 CO_2 在中国科技大学化学地球动力学实验室Delta+质谱仪上测量,氧同位素比值以SMOW为标准,碳同位素比值以PDB为标准,分别记为 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$,单位为‰,分析精度优于 $\pm 0.2\%$ 。分析中使用的碳酸盐参考标准为GBW04417方解石标准,其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分别是 -6.10% 和 -24.12% 。所有分析结果均列于表1。

4 讨论

4.1 碳氧同位素数据特点

在 $\delta^{13}\text{C}-\delta^{18}\text{O}$ 相关图上,大别-苏鲁造山带大理岩和灰岩的碳氧同位素组成可分为四个特征区域,分别对应两组 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 特征值(图2)。 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要分布在两组特征值的范围内: $0 \pm 2\%$ 和 $2\% \sim 8\%$ 。 $\delta^{18}\text{O}$ 的两组特征值范围分别是 $18\% \sim 30\%$ 和 $<18\%$ 。这两组特征值的地质意义主要在于其所反映的灰岩沉积环境和后期变化不同(稍后详细讨论)。

对于大别地体的四个区域北淮阳、苏家河、桐柏和宿松,其中宿松大理岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值范围是 $20.9\% \sim 26.3\%$ (图2a);桐柏地区样品除了两个较低之外(00DB16-13: 17.6% ; 00DB17-15: 13.2%),其它所有样品均落在 $19.0\% \sim 27.2\%$ 范围内(图2b)。北淮阳大多数样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值落入 $<18\%$ 的范围内(图2c),其中佛子岭群中大理岩样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低达到 5.9% (变化范围在 $5.93\% \sim 23.01\%$)。本文研究的苏家河地区三个样品均具有较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,范围在 $23.2\% \sim 24.1\%$ (图2d),这与傅斌等(1998)对苏家河大理岩的氧同位素研究结果存在差异。但是数据分析可以发现,本文研究大理岩样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与傅斌等(1998)所研究大理岩具有相同的变化范围,并且傅斌等(1998)所研究样品中最高 $\delta^{18}\text{O}$ 值也达到了 23% 。本文苏家河地区样品数量虽然较少,但采集地点较为集中,且与傅斌等(1998)采样地点不在一起,因此是对傅斌等(1998)数据范围的一个合理补充。三个秦岭群大理岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $17.9\% \sim 22.9\%$ (图2d),似乎受到一定蚀变。在本文研究的大别地区样品中,未经受超高压变质大理岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值均落在 $0 \pm 2\%$ 之间。其中 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高的三个样品属于秦岭群,为 $3.2\% \sim 5.0\%$ 。

表 1 大别-苏鲁造山带大理岩碳氧同位素组成

Table 1 Carbon and oxygen isotope compositions of marbles from the Dabie-Sulu terranes

地点	样品号	方解石		白云石		地点	样品号	方解石		白云石	
		$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}(\text{‰})$			$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}(\text{‰})$
宿松	00SS10	0.5	26.3	0.3	25.6	五莲	00SD-11	-1.5	14.6	-1.2	15.7
	01SS21	1.0	25.3	0.3	24.6		00SD-13	-1.6	6.4	-2.0	7.1
	00SS12	-0.3	22.6	1.3	23.0		00SD-20	-0.1	4.5	-0.8	5.9
	00SS07	-0.9	21.5	-1.5	21.1		00SD-24	-1.2	5.3	-1.5	5.6
	00SS06	0.2	21.4	-1.4	21.3		00SD-25	0.2	15.8	0.9	22.2
	00SS05	0.2	21.4	-1.6	21.4		00SD-27	-0.5	19.0	-0.7	19.5
	00SS04	-1.4	20.9	-1.1	21.6		00SD-28	1.9	22.5	2.1	23.0
	00SS01	-0.6	23.7	-1.9	22.1		00SD-30	1.2	22.1	1.4	22.2
桐柏	00TB-03	0.1	26.3	2.3	26.9		00SD-31	0.4	20.2	0.7	22.4
	00TB-04	0.6	26.0	0.6	24.8		00SD-32	-1.0	11.4	-1.3	14.4
	00TB-05	-0.3	27.2	-0.3	26.2		00SD-33	0.0	17.4	0.6	20.7
	00TB-06	0.9	25.8	1.1	25.2		00SD-34	1.4	23.7	1.7	25.2
	00TB-07	0.2	25.1	0.3	24.7		00SD-35	0.2	17.1	0.7	19.4
	00TB-08	2.6	25.3	4.1	24.5		00SD-36	0.9	24.3	1.1	24.6
	00TB-13(A)	0.2	19.0	0.3	19.7		00SD-37	0.9	26.4	1.5	27.7
	00TB-14	2.8	26.0	3.7	26.8		00SD-38	1.2	26.8	1.5	27.2
	98DB01-20	0.8	24.4	0.9	24.2		00SD-39	1.5	25.9	1.8	26.9
	98DB01-5	0.4	22.8	0.4	22.2		00SD-40	1.9	25.9	2.6	28.6
	00DB16-13	0.3	17.6	-0.2	15.0		00SD-41	0.5	18.3	0.5	18.2
	00DB17-15	-0.1	13.2	-0.2	15.0		00SD-43	1.3	19.4	1.5	25.5
	00DB17-9	0.9	20.6	1.4	26.0		00JN-06	-0.4	21.7	-0.3	22.2
	00DB17-10	1.0	21.5	1.2	25.8		00JN-07	0.0	23.7	0.2	24.5
北淮阳	00HY-08	0.9	16.5	1.5	21.7		00JN-08	-1.0	11.5	-0.9	12.2
	00HY-09	-1.0	11.7	-1.9	9.5		00JN-09	-2.7	24.7	-2.5	24.9
	00HY-13	-0.3	17.3	0.2	18.9		00RZ-09	0.8	24.7	1.2	24.8
	00HY-35(A)	-2.2	9.7	-2.9	8.5		97SL33	-0.3	24.2		
	00HY-35(B)	-2.4	5.9	-4.8	1.6		97SL34	-0.7	14.2		
	00HY-35(C)	-2.2	6.0	-1.9	4.5		97SL35	-1.4	10.6		
	00HY-58(A)	-0.1	22.4				97SL36	0.2	18.9		
	00HY-58(B)	2.0	17.6	0.7	15.2		97SL 37	2.1	21.5		
	00HY-58(C)	0.2	23.0	0.4	25.1		97SL 38	2.9	21.0		
						97SL 39	2.9	19.7			
苏家河	01SJH22	0.0	24.0	0.3	24.1	97SL 40	2.5	22.1			
	01SJH22-1	-3.2	23.2	-1.7	22.7	97SL 42	3.8	22.1			
	01SJH23	-3.0	23.2	-2.1	22.6	97SL 43	4.7	24.0			
						97SL 44	3.4	32.4			
秦岭群	01SJH27-1	3.2	17.9			97SL 45	3.9	20.6			
	01SJH27-2	4.9	19.4			97SL 46	4.1	21.5			
	01SJH27-3	5.0	22.9			97SL 47	1.4	20.6			
坪上	00PS-01	0.8	24.4	1.0	24.0	97SL 75	5.5	19.1			
	00PS-02	0.9	24.9	1.1	24.4	张八岭	01ZBL-18	8.1	18.0		
	00PS-04(1)	0.9	24	1.0	24.1	01ZBL-23	5.6	14.9			
	00PS-04(2)	-0.6	18.8	0.2	20.5	01ZBL-25	7.2	17.1			
	00PS-05(1)	0.9	24.9	1.2	25	01ZBL-26	7.1	17.0			
	00PS-05(2)	1.0	12.5	-1.1	14.2	01ZBL-28	6.0	16.6			
	97SL 76	0.0	19.6			01ZBL-39C	8.0	19.5			
	97SL 77	0.3	21.1			01ZBL-39B	7.9	18.7			
	97SL78	0.9	21.4			01ZBL-39A	7.7	16.4			
						01ZBL-40	1.3	10.8			
						01ZBL-66	3.7	23.2			

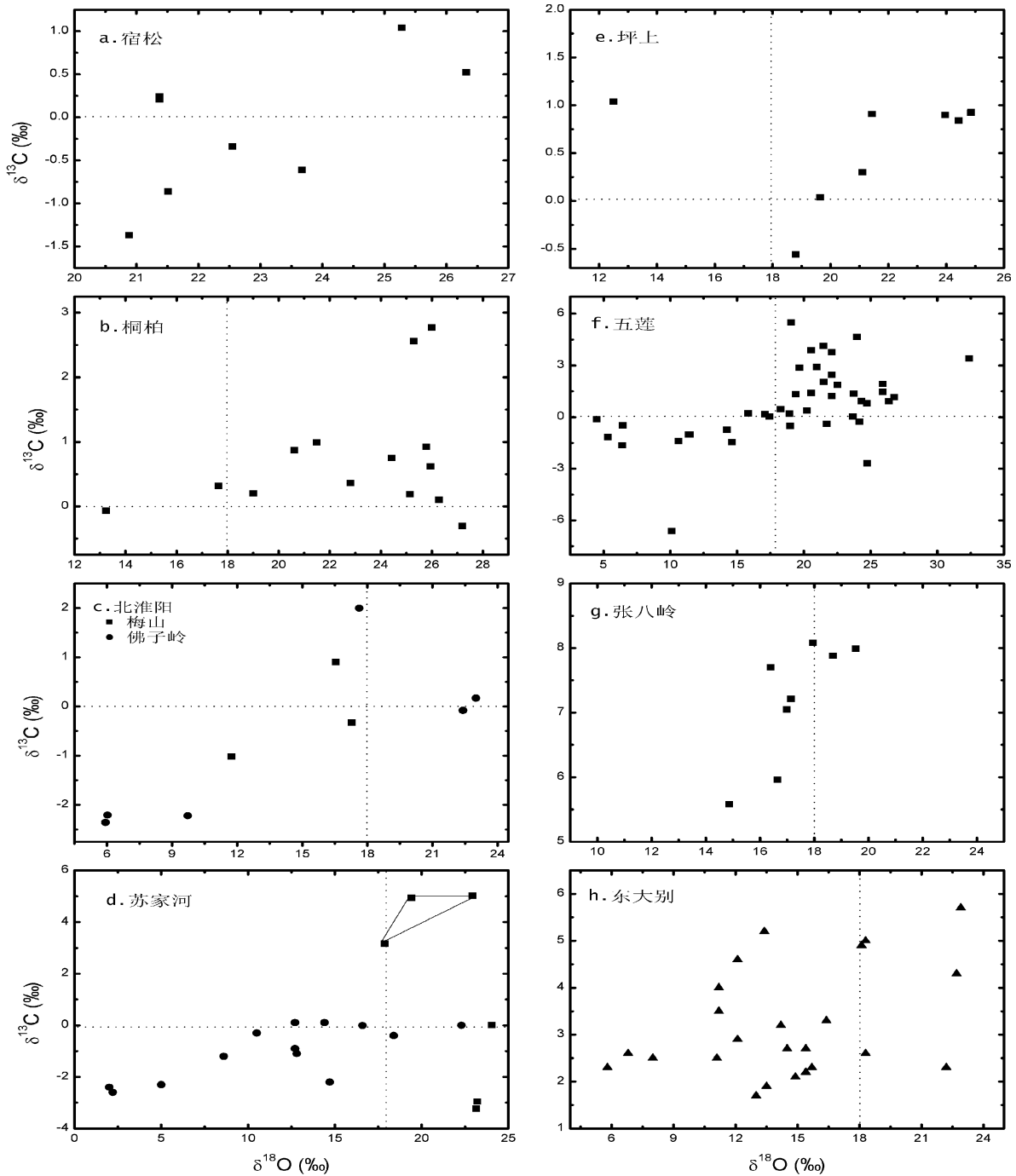


图2 大别-苏鲁浅变质大理岩中方解石 $\delta^{18}\text{O} - \delta^{13}\text{C}$ 图解。

采样点位置见图1中,数据来源参阅表1。点线代表了 $\delta^{13}\text{C} = 0\text{‰}$ 和 $\delta^{18}\text{O} = 18\text{‰}$ 两个特征阈值, $\delta^{13}\text{C} = 0\text{‰}$ 为正常的海相灰岩值, 而 $\delta^{18}\text{O} = 18\text{‰}$ 代表了未受蚀变的最低 $\delta^{18}\text{O}$ 值。2-d 中圆点样品来自傅斌等(1998), 实线包围的样品属于秦岭群。2-h 中所有样品均来自 Zheng *et al.*, (1998b)。

Fig. 2 $\delta^{18}\text{O} - \delta^{13}\text{C}$ diagram of calcite from the Dabie-Sulu marbles.

Sample locations refer to Fig. 1, and data source is listed in Table 1. Dotted line denotes the threshold $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ value for unaltered carbonates, $\delta^{13}\text{C} = 0\text{‰}$ and $\delta^{18}\text{O} = 18\text{‰}$. For oxygen, the $\delta^{18}\text{O}$ value below it is considered as altered. Circles in Fig. 2-d represent the data which come from Fu *et al.*, (1998), data enclosed by solid line come from Qinlin groups. All data in Fig. 2-h come from Zheng *et al.*, (1998b).

苏鲁地区的大理岩样品主要来自超高压变质带内部的坪上浅变质岩和五莲浅变质岩以及高压变质带张八岭群。除了坪上大理岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值落在 $18\text{‰} \sim 30\text{‰}$ 范围内(图 2e), 其他两个研究地区都覆盖了 $<18\text{‰}$ 的范围(图 2f 和 2g), 其中五莲大理岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值最低达到了 4.5‰ (五莲: $4.5\text{‰} \sim 32.4\text{‰}$; 张八岭: $10.8\text{‰} \sim 23.2\text{‰}$)。坪上大理岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围落在 $0 \pm 2\text{‰}$ 之内, 为 $-0.6\text{‰} \sim 1.0\text{‰}$ (图 2e)。五莲大理岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值则同时覆盖了两个部分, 变化范围在 $-1.6\text{‰} \sim 5.5\text{‰}$ (图 2f); 张八岭地区大理岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值明显高于其他所有研究地区, 范围在 $1.3\text{‰} \sim 8.1\text{‰}$ (图 2g)。

4.2 碳同位素异常

大理岩的碳同位素组成对于恢复其原岩沉积环境和沉积时代等信息具有一定的指示意义。地质历史上大部分时期海相灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都稳定在 $0 \pm 2\text{‰}$, 但是在古元古代(2.4 ~ 2.0Ga)和新元古代(900 ~ 570Ma) 以及一些主要世代地层边界发生偏离 (Melezhik *et al.*, 2001)。其中新元古代的海相灰岩碳同位素正异常已经在全世界范围的相近地质层位出现(图 3), 并且在其上下地层以及一些岩石学和同位素特征等方面都具有相似性, 是全球性的事件 (Hoffman *et al.*, 1998)。部分大别-苏鲁大理岩的原岩沉积于新元古代, 所以应将其同位素特征纳入全球性碳同位素异常事件来考虑。新元古代灰岩的全球性碳同位素正异常在中国的扬子板块也已发现。Yang *et al.* (1999) 研究了属于震旦纪和早寒武世时期扬子板块的海相灰岩和磷灰石等, 分析了碳、锶同位素组成和 Ce 异常在整个时期的变化趋势, 给出了震旦纪海水 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化曲线。

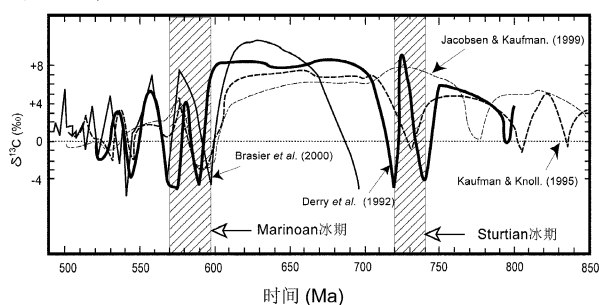


图 3 新元古代冰期 $\delta^{13}\text{C}$ 值随年代变化曲线 (据 Melezhik *et al.*, 2002)。

尽管不同作者给出的曲线存在差别, 但变化的上下限和基本趋势是一致的, 阴影区域分别对应 Marinoan 和 Sturtian 两次冰期的年代。

Fig. 3 Carbon isotope records of glacial events at Neoproterozoic (redrawn from Melezhik *et al.*, 2002).

Although different authors gave different curves, but they all are characterized by the approximately same range and trend. Two shadow areas denote the time scale of Marinoan and Sturtian glaciations, respectively.

由图 3 中可以看出, 在新元古代时期地球上曾经历过二次冰川事件, 碳同位素随着冰期的发育相应显著变化。第一次 Sturtian 冰川发生前, 灰岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值已经为正 (达 $3\text{‰} \sim 6\text{‰}$); 冰期到来之时 $\delta^{13}\text{C}$ 值急剧下降, 冰川覆盖期间维持低值 ($\delta^{13}\text{C} < -5\text{‰}$); 解冻后到下一个 Marinoan 冰川期到来之前的间冰期里, $\delta^{13}\text{C}$ 值开始回升到高值 ($\delta^{13}\text{C} = 5\text{‰}$); Marinoan 冰期到来之时, $\delta^{13}\text{C}$ 值又下降到 $-3\text{‰} \sim -5\text{‰}$; 解冻后又恢复到 $0\text{‰} \sim 2\text{‰}$ 。

深入探讨冰期海相灰岩碳同位素比值的降低, 发现其与海洋生物产率密切相关, 而生物产率又受到各种地质条件诸如风化速率、沉积作用、海水氧化还原态、热事件等等的影响 (Hoffman *et al.*, 1998)。新元古代冰川时期, 陆源有机物质供给近乎于零, 生物产率主要由海洋生物来控制, 缺少陆壳风化物质提供养分等条件就会使得海洋中有机物大量死亡。影响海水碳同位素比值的另一个因素是有机物的沉降速率和保留程度, 两者的增高都有利于海水中碳同位素比值的正向偏移。冰期到来之前由于温度的急剧降低, 生物数量剧减, 有机物沉降速率同时降低, $\delta^{13}\text{C}$ 值随之降低; 解冻之后, 随着全球气温和海平面的升高, 海洋沉积速率迅速增加、大陆风化速率大幅度上升, 有机物大量繁殖, 其光合作用优先吸收 ^{12}C , 使得海水中 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高。

Zheng *et al.* (1998b) 对大别山中部与超高压榴辉岩共生大理岩的碳同位素进行了研究, 结果发现这些大理岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $1\text{‰} \sim 5.7\text{‰}$ 之间(图 2h)。Rumble *et al.* (2000) 对于双河大理岩的研究证实了这个结果。考虑到灰岩沉积之后的变质作用只会引起脱碳酸盐作用导致 $\delta^{13}\text{C}$ 值的稍微降低 (Valley, 1986), 因此这种高 $\delta^{13}\text{C}$ 值只能归结于灰岩沉积时的特征。虽然目前没有得到可靠的年代学证据, 但是根据碳同位素组成特征, 可以把大别-苏鲁大理岩的原岩灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化与新元古代时期扬子板块的二次冰期联系起来。对大别山与大理岩共生超高压榴辉岩和花岗片麻岩中的锆石 U-Pb 定年也得到, 其岩浆侵位时代为新元古代中期 (Ames *et al.*, 1996; Rowley *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998; 2000; 郑永飞等, 2003)。

Rumble *et al.* (2000) 研究了北大别和苏鲁荣城的大理岩, 发现除了一个样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $+3\text{‰}$ 外, 其余样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值都在 $-1\text{‰} \sim 1\text{‰}$ 之间。这两部分经过不同俯冲过程的岩石具有相同的碳同位素组成, 从另一方面说明三叠纪的陆壳深俯冲对于岩石碳同位素组成几乎没有影响。结合前人对大别-苏鲁地区高压-超高压带大理岩的碳同位素研究结果以及本文对浅变质大理岩的碳同位素分析数据, 可以大体得到大别-苏鲁大理岩碳氧同位素分布图(图 4)。

从图 4 中可以看出, 大别-苏鲁大理岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分布与是否经过超高压变质无关, 而与其原岩灰岩的沉积时代/环境相关。除原岩沉积时代为古生代的苏家河群大理岩、桐柏大理岩和北淮阳梅山群大理岩均具有正常海相灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值

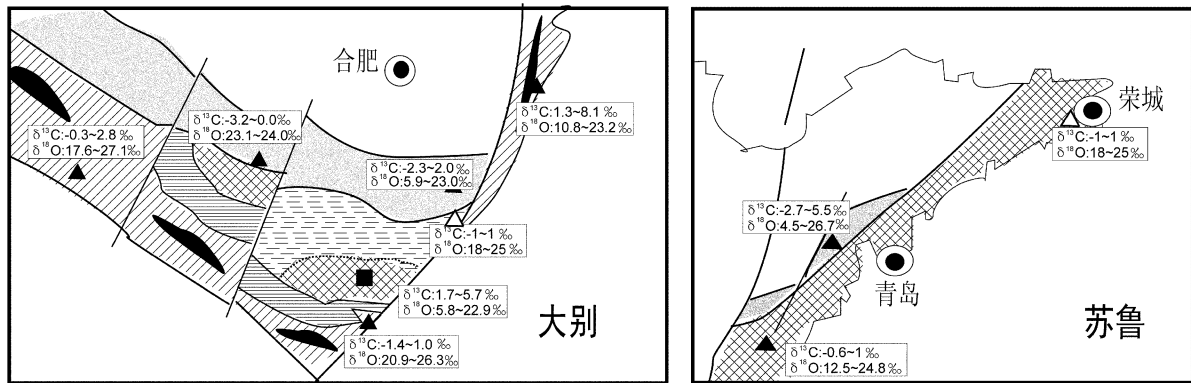


图4 大别-苏鲁大理岩碳氧同位素分布简图。

三角符号为本文样品点位置,实心方块所代表地区的数据来自 Zheng *et al.* (1998b),空心三角所代表地区的数据资料引自 Rumble *et al.* (2000),地名等均与图1相同,略去。

Fig. 4 Carbon and oxygen isotopic distribution of the Dabie-Sulu marbles.

Triangles denote sample locations, data for the locality of filled rectangle is after Zheng *et al.* (1998b), and data for the locality of hollow triangle are after Rumble *et al.* (2000)

($0 \pm 2\%$)的变化范围外,其他地区大理岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以与新元古代的冰川事件相关联。特别是 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 2% ~ 8% 的正异常可能与冰川事件中的间冰期相关 (Jacobsen and Kaufman, 1999)。间冰期期间,表层冰雪融化,生物产率大幅度上升;在冰期造成的还原态水体中,有机物的沉积和埋藏速率加大, $\delta^{13}\text{C}$ 值迅速升高。新元古代短时间内发生二次冰川事件使得沉积环境发生快速振荡,从而造成灰岩碳同位素组成的大幅变化,并在后期变质过程中保存了下来。我们对本文讨论的五莲、张八岭大理岩进行了锶同位素分析中,发现保存原始锶同位素信息的大理岩样品具有低于 0.7072 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(待发表数据),这个结果和正异常的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一起可以指示这些大理岩原岩的沉积时代是在 600Ma 之前稍早的时代,进一步确证了其与新元古代冰川事件在时代上的相关性。另一方面,在我们的研究中并没有发现极负的 $\delta^{13}\text{C}$ 值,而这种负值(低至 -5%)普遍出现在世界范围内发现的冰川事件结束时所沉积的碳酸盐帽中。对此,我们认为,在大别-苏鲁造山带,完整的地层沉积序列已经被后期强烈的碰撞造山运动所破坏。虽然在一个区域出露完整记录 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势的连续地层较为难得,但是我们所分析的样品中还是有一些相似的变化趋势:五莲地区样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围是 -1.6% ~ 5.5% ,张八岭地区样品 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围在 1.3% ~ 8.1% ,变化幅度均达到 7% 左右,可能对应于冰期-间冰期时代沉积灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值的迅速变化。

4.3 氧同位素分布

氧同位素组成对于灰岩成岩及后期变质具有灵敏的指示作用 (Hudson, 1977)。灰岩从海水中沉淀出来时,其氧同位素组成符合海水温度下水与碳酸钙之间的氧同位素分馏。根据分馏系数的计算结果 (Zheng, 1999),灰岩初始 $\delta^{18}\text{O}$ 值应为 25% ~ 30% ,之后在成岩过程中的流体作用和变质去气

作用一般会降低灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值到 18% ~ 20% (Hoefs, 1997),但倾向于保留原始 $\delta^{13}\text{C}$ 值。因此,在 $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{13}\text{C}$ 图上出现的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间的相关变化一般是由于后期变质作用,而非相关性的 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低则解释为成岩过程中的流体交换 (Guerrera *et al.*, 1997)。在大别-苏鲁地区,无论是超高压的双河大理岩 (Zheng *et al.*, 1998b; Rumble *et al.*, 2000) 还是未经受超高压变质的北淮阳、五莲、张八岭等地区的大理岩(本文),其 $\delta^{18}\text{O}$ 值都有不同程度的降低,其中最低值达到了 4.5% ,对应的 $\delta^{13}\text{C}$ 值也较低(图2),表明经受过强烈的水-岩反应。宿松、桐柏等其他地区的样品大多没有表现出 $\delta^{18}\text{O}$ 值的强烈降低 ($\delta^{18}\text{O} > 18\%$),其是否经过流体交换需要通过方解石-白云石分馏关系图来检验(图5)。达到热力学平衡时,白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值均略高于方解石约 0.5% (Zheng, 1999)。而在图5中,宿松、桐柏等地区大部分样品中白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值低于方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}$ 值,说明白云石与方解石之间存在氧同位素分馏不平衡,指示他们都经受了-一定程度的流体蚀变。由此可以推断,大别-苏鲁地区大理岩曾经遭受过大范围但不同程度的流体作用。

超高压变质作用虽然也可能使得硅酸盐含量较高的灰岩发生比较强烈的脱碳酸盐化作用 (Valley, 1986),但这并不是大别-苏鲁大理岩亏损 ^{18}O 的主要原因。Rumble *et al.* (2000) 观察到,大理岩中硅酸盐矿物含量与 $\delta^{13}\text{C}$ 值之间没有相关性。如果出现大规模的脱碳酸盐化作用, ^{13}C 也会有一定程度的损失。根据 Rumble *et al.* (2000) 对苏鲁东部荣城超高压带中大理岩样品的分析结果,其 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 18% ~ 25% 之间,与同样经过超高压、而 $\delta^{18}\text{O}$ 值却低达 5% 的大别超高压大理岩明显不同,说明超高压变质过程中的脱碳酸盐化并不是造成大理岩 ^{18}O 亏损的主要因素。Zheng *et al.* (1998b) 指出,这种 ^{18}O 亏损是由于三叠纪陆-陆碰撞之前大

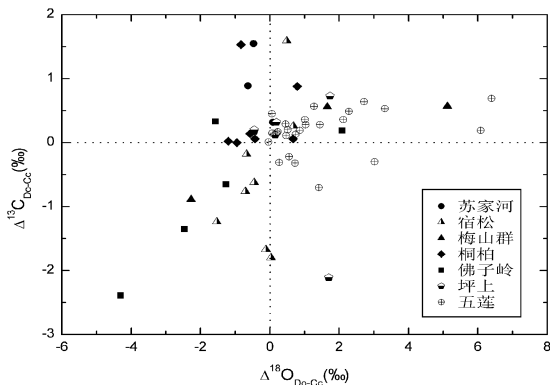


图5 大别-苏鲁浅变质大理岩中的白云石-方解石碳-氧同位素分馏图解

Fig. 5 Carbon and oxygen isotopic fractionations between dolomite and calcite in marbles from the Dabie-Sulu terranes.

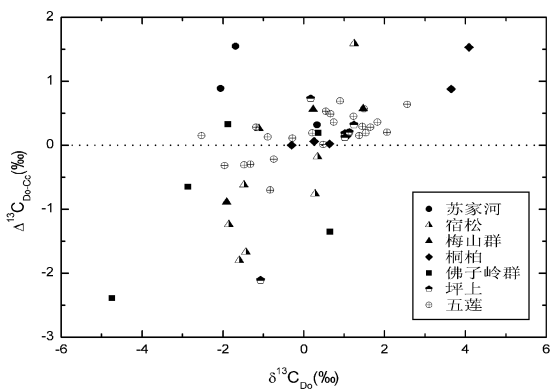


图6 大别-苏鲁大理岩的 $\Delta^{13}C_{Do-Cc} - \delta^{13}C_{Do}$ 图解

Fig. 6 Diagram of $\Delta^{13}C_{Do-Cc} - \delta^{13}C_{Do}$ for low-grade marbles from the Dabie-Sulu terranes.

大理岩原岩与低 $\delta^{18}O$ 值的地表水发生交换的结果。根据既得的碳氧同位素数据,可以对交换流体的同位素组成和交换方式进行限定。

分析图2中的数据点,可以发现部分样品 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 值的变化存在相关性。对于 ^{18}O 亏损最明显的五莲、北淮阳地区的样品,当 $\delta^{18}O$ 值从 30‰ 变化到 5‰ 时,对应的 $\delta^{13}C$ 值也分别变化了 4‰ 和 6‰。另一部分样品虽然也受到过流体交换,但是 $\delta^{13}C$ 值几乎不随 $\delta^{18}O$ 值的大幅度变化而发生变化,仅仅在 $0 \pm 2\%$ 的正常范围内小幅度波动。图6中在 $\Delta^{13}C_{Do-Cc}$ 与 $\delta^{13}C_{Do}$ 之间也没有发现任何相关性,说明与灰岩发生氧同位素交换的流体必定不含或很少含碳,从而在不影响原岩 $\delta^{13}C$ 值的情况下大幅度改变其 $\delta^{18}O$ 值。在图7中,样品随着 $\Delta^{18}O_{Do-Cc}$ 的增加,白云石 $\delta^{18}O_{Do}$ 值没有对应的降低加剧的趋势。由于在低温流体交换过程中,方解石的氧扩散

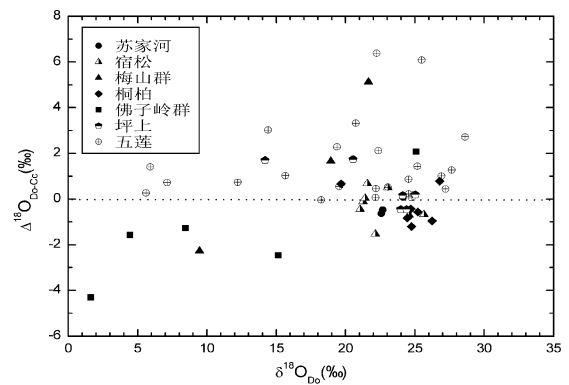


图7 大别-苏鲁大理岩的 $\Delta^{18}O_{Do-Cc} - \delta^{18}O_{Do}$ 图解

Fig. 7 Diagram of $\Delta^{18}O_{Do-Cc} - \delta^{18}O_{Do}$ for low-grade marbles from the Dabie-Sulu terranes.

速率远大于白云石 (O'Neil, 1987), 而温度较高 ($> 300^{\circ}C$) 的流体则会缩短这个差距,因此图7中没有相关性说明其与流体交换的温度较低。

结合我们前面对大理岩 $\delta^{13}C$ 值的分析以及碳与锶同位素联合对大理岩原岩沉积时代的制约,可知苏鲁地区的五莲、张八岭的大理岩原岩沉积是在新元古代,大别地区的北淮阳佛子岭群、宿松群等地的大理岩原岩也在这一时代沉积。这样在解释它们的 $\delta^{18}O$ 值的普遍但不同程度的降低时,发生在新元古代的二次冰川事件可以是一个很好的流体来源。大气降水来源的冰川在解冻时融化,或是受到岩浆侵位时所散发的热量发生融化 (Zheng *et al.*, 2002b; 郑永飞等, 2003), 都能够提供大量很少含碳的流体,从地表向下渗滤,使得大别-苏鲁地区的各种岩石 (包括灰岩) 发生蚀变,导致不同程度的 ^{18}O 亏损。Rumble *et al.* (2000) 曾对双河超高压岩石中的方解石脉体进行了研究,结果表明脉体与围岩之间没有达到氧同位素平衡,说明流体的运动方式很有可能是沟道式而非弥散式。苏家河和梅山群大理岩原岩的沉积时代为古生代,其 $\delta^{18}O$ 值降低可能与古海水蚀变有关 (傅斌等, 1998)。

5 结论

对大别-苏鲁地区不同变质程度大理岩的碳氧同位素研究表明,其 $\delta^{13}C$ 值分布与岩石是否经过超高压没有关系,而主要反映了原岩灰岩沉积的时代和环境。较高的 $\delta^{13}C$ 值 (3‰ ~ 8‰) 同时出现在苏鲁的高压变质带 (张八岭) 和大别的超高压变质带 (双河等), 而正常海相灰岩 $0 \pm 2\%$ 的 $\delta^{13}C$ 值也在其他地区存在。由于北淮阳佛子岭群、双河、宿松、张八岭等这些地区的副变质岩原岩沉积时代大约都是在新元古代,如果这些地区的沉积年代相距不远的話,张八岭和双河大理岩的 $\delta^{13}C$ 值正异常可以与发生在新元古代的二次冰

川事件相联系,说明其原岩沉积在新元古代的间冰期,而宿松、北淮阳佛子岭群的大理岩具有正常的海相灰岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值也可以解释为其原岩沉积在冰期到来时。

大理岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值记录了原岩灰岩在成岩和变质过程中可能经历的地质事件。大别-苏鲁地区大理岩大都发生了程度不同的 ^{18}O 亏损,样品白云石-方解石同位素分馏关系指示大部分岩石都经历了流体交换,并且流体的主要成分是水,含碳很少或者不含碳。因此,流体的来源主要是大气降水,可能与新元古代冰川溶融有关。

致谢: 实验室分析工作得到龚冰的协助。

References

- Ames L, Zhou G Z, Xiong B C. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for the collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 15: 472 – 489
- Ayers J C, Dunkle S, Gao S and Miller C E. 2002. Constraints on timing of peak and retrograde metamorphism in the Dabie Shan ultrahigh-pressure metamorphism belt, east-central China, using U-Th-Pb dating of zircon and monazite. *Chem. Geol.*, 186: 315 – 331
- Carswell D A, Wilson R N, Zhai M G. 2000. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultra-high pressure eclogites in the Dabieshan of central China. *Lithos*, 52: 121 – 155
- Cong B L. 1996. Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China. Beijing: Science Press, 224pp
- Chen F K, Siebel W, Guo J H, Cong B L, Satir M. 2003. Late Proterozoic magmatism and metamorphism recorded in gneisses from the Dabie high-pressure metamorphic zone, eastern China: evidence from zircon U-Pb geochronology. *Precamb. Res.*, 120: 131 – 148
- Dong Shuwen, Wang Xiaofeng and Huang Dezhi. 1996. Discovery of low-grade metavolcanic rock sheets within UHP belt in Dabieshan and its implications. *Chinese Sci. Bull.*, 41(9): 815 – 820 (in Chinese)
- Fu B, Zheng Y F, Xiao Y L, Li Y L, Gong B, Li S G, Sun W D, Zhang S Q and Zhang Z H. 1998. Geochemical Studies of Eclogites and Marbles from Sujiahe in the Western Dabie Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 72(4): 323 – 339 (in Chinese with English abstract)
- Fu B, Zheng Y F, Wang Z R, Xiao Y L, Gong B, Li S G. 1999. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of gneisses associated with ultrahigh pressure eclogites at Shuanghe in the Dabie Mountains. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134: 52 – 66
- Fu B, Touret J L R, Zheng Y F. 2001. Fluid inclusions in coesite-bearing eclogites and jadeite quartzite at Shuanghe, Dabie Shan, China. *J. Metamor. Geol.*, 19: 529 – 545
- Fu B, Zheng Y F, Touret J L R. 2002. Petrological, isotopic and fluid inclusion studies of eclogites from Sujiahe, NW Dabie Shan (China). *Chem. Geol.*, 187: 107 – 128
- Guerrera A, Peacock S M, Knauth L P. 1997. Large ^{18}O and ^{13}C depletion in greenschist facies carbonate rocks, western Arizona. *Geology*, 25: 943 – 946
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D, Dong S. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 161: 215 – 230
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, McWilliams M O, Ireland T, Calvert A, Dong S, Wenk H R, Chateigner D. 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic – Early Jurassic tectonic unroofing. *J. Geophys. Res.*, 105B: 13339 – 13364
- Hoefs J. 1997. *Stable Isotope Geochemistry*. 4rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 214pp
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, Shrag D P. 1998. A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science*, 281: 1342 – 1346
- Hou Jinming, Tang Jiafu, Gao Tianshan and Jing Yanren. 1995. Reconsider the Susong Group. *Geology of Anhui*, 5: 41 – 49 (in Chinese)
- Hudson J D. 1977. Stable isotopes and limestone lithification. *J. Geol. Soc. London*, 133: 637 – 660
- Jacobsen S B, Kaufman A J. 1999. The Sr, C and O isotopic evolution of Neoproterozoic seawater. *Chem. Geol.*, 161: 37 – 57
- Jahn B-m. 1998. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen: Implications for continental subduction and collisional tectonics. In: *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-pressure Rocks* (eds. Hacker B R and Liou J G). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 203 – 239
- Li Renwei, Jiang Maosheng, Li Zhong, Sun Shu, Jin Fuquan and Zhang Wenhua. 1999. Carbon and oxygen isotopic compositions of the marble conglomerates of Jurassic age in the margin of Dabie Mountains, China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 623 – 629 (in Chinese with English abstract)
- Li S G, Jagoutz E, Lo C H, Chen Y Z, Li Q L, Xiao Y L. 1999. Sm/Nd, Rb/Sr, and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic systematics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu belt, Central China: A retrospective view. *Intern. Geol. Rev.*, 41: 1114 – 1124
- Li S G, Jagoutz E, Chen Y Z, Li Q L. 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 1077 – 1093
- Liou J G, Zhang R Y, Eide E A, Wang X M, Ernst W G, Maruyama S. 1996. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultra-high-pressure belts in the Dabie-Sulu region, China. In: *The Tectonics of Asia* (eds. M. T. Harrison and A. Yin), Cambridge University Press, Cambridge, 300 – 344
- Liou J G, Zhang R Y, Jahn B M. 2000. Petrological and geochemical characteristics of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu terrane, east-central China. *Intern. Geol. Rev.*, 42: 328 – 352

- Ma C Q, Ehlers C, Xu C H, Li Z C, Yang K G. 2000. The roots of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic terrane: constraints from geochemistry and Nd-Sr isotope systematics. *Precamb. Res.*, 102: 279 – 301
- Melezhik V A, Gorokhov I M, Kuznetsov A B, Fallick A E. 2001. Chemostratigraphy of Neoproterozoic carbonates: implications for blind dating. *Terra Nova*, 13: 1 – 11
- Melezhik V A, Roberts D, Gorokhov I M, Fallick A E, Zwaan K B, Kuznetsov A B, Pokrovsky A B. 2002. Isotopic evidence for a complex Neoproterozoic to Silurian rock assemblage in the North-Central Norwegian Caledonides. *Precamb. Res.*, 114: 55 – 86
- Miller N R, Alene M, Sacchi R, Stern R J, Conti A, Kroner A, Zuppi G. 2003. Significance of the Tambien Group (Tigray, N. Ethiopia) for Snowball Earth events in the Arabian-Nubian Shield. *Precamb. Res.*, 121: 263 – 283
- O'Neil J R. 1987. Preservation of H, C and O isotopic ratios in the low temperature environment. In: *Short Course in Stable Isotope Geochemistry of Low Temperature Fluids* (ed. Kyser T K). MAC Short Course Handbook, vol. 13, pp. 85 – 128
- Rowley D B, Xue F, Tucker R D, Peng Z X, Baker J, Davis A. 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the Central Dabie Shan; U/Pb zircon geochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 151: 191 – 203
- Rumble D, Wang Q C, Zhang R Y. 2000. Stable isotope geochemistry of marbles from the coesite UHP terranes of Dabieshan and Sulu, China. *Lithos*, 52: 79 – 95
- Santos R V, Clayton R N. 1995. Variations of oxygen and carbon isotopes in carbonatites: A study of Brazilian alkaline complexes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 1339 – 1352
- Sassi R, Harte B, Carswell D A, Han Y J. 2000. Trace element distribution in Central Dabie eclogites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 139: 298 – 315
- Valley J W. 1986. Stable isotope geochemistry of metamorphic rocks. *Rev. Mineral.*, 16: 445 – 489
- Wallis S, Enami M, Banno S. 1999. The Sulu UHP terrane: a review of the petrology and structural geology. *Intern. Geol. Rev.*, 41: 906 – 920
- Wang X M, Zhang R Y, Liou J G. 1995. UHPM terrane in east central China. In: *Ultrahigh Pressure Metamorphism* (eds. R. Coleman and X. Wang). Cambridge University Press, Cambridge, 356 – 390
- Xiao Y L, Hoefs J, van den Kerkhof A M, Fiebig J, Zheng Y F. 2000. Fluid history of UHP metamorphism in Dabie Shan, China: a fluid inclusion and oxygen isotope study on the coesite-bearing eclogite from Bixiling. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 139: 1 – 16
- Xiao Y L, Hoefs J, van den Kerkhof A M, Simon K, Fiebig J and Zheng Y F. 2002. Fluid evolution during HP and UHP metamorphism in Dabie Shan, China: constraints from mineral chemistry, fluid inclusions and stable isotopes. *J. Petrol.*, 43: 1505 – 1527
- Yang J D, Sun W G, Wang Z Z *et al.* 1999. Variations in Sr and C isotopes and Ce anomalies in successions from China: evidence for the oxygenation of Neoproterozoic seawater? *Precamb. Res.*, 93: 215 – 233
- Ye Bodan, Xu Junwen, Li Zhichang, Cui Fang, Jian Ping. 1991. Discovery of Palaeozoic fauna in the Sujiahe group, Tongbo-Dabieshan area and its significance. *China Geology*, (3): 28 – 29 (in Chinese)
- Zhang R J, Chen X H. 1998. The discovery of early Ordovician microfossils from the Sujiahe group of Tongbo-Dabie orogenic belt, and its significance. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 15(2): 125 – 133 (in Chinese)
- Zhang R Y, Liou J G. 1998. Ultrahigh-pressure metamorphism of the Sulu terrane, eastern China: A prospective view. *Continental Dynamics*, 3: 32 – 53
- Zheng Wenwu. 1964. The problem of carve up and age about eastern Dabieshan's Foziling group. *Geological Review*, 22(5): 338 – 347 (in Chinese)
- Zheng Y F, Fu B, Gong B and Li S G. 1996. Extreme ^{18}O depletion in eclogite from the Su-Lu terrane in East China. *Eur. J. Mineral.*, 8: 317 – 323
- Zheng Y F, Fu B, Gong B, Xiao Y L, Ge N J. 1997. U-Pb dating of marble associated with eclogite from the Dabie Mountains, East China. *Chinese J. Geochem.*, 16: 193 – 201
- Zheng Y F, Fu B, Li Y L, Xiao Y L and Li S G. 1998a. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of ultrahigh pressure eclogites from the Dabie Mountains and the Sulu terrane. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 155: 113 – 129
- Zheng Y F, Fu B, Gong B and Wang Z R. 1998b. Carbon isotope anomaly in marbles associated with eclogites from the Dabie Mountains in China. *J. Geol.*, 106: 97 – 104
- Zheng Y F. 1999. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals. *Geochem. J.*, 33(2): 109 – 126
- Zheng Y F, Fu B, Xiao Y L, Li Y L and Gong B. 1999. Hydrogen and oxygen isotope evidence for fluid-rock interactions in the stages of pre- and post-UHP metamorphism in the Dabie Mountains. *Lithos*, 46: 677 – 693
- Zheng Y F, Gong B, Li Y L, Wang Z R and Fu B. 2000. Carbon concentrations and isotopic ratios of eclogites from the Dabie and Sulu terranes in China. *Chem. Geol.*, 168: 291 – 305
- Zheng Y F, Fu B, Li Y L, Wei C S and Zhou J B. 2001. Oxygen isotope composition of granulites from Dabieshan in eastern China and its implications for geodynamics of Yangtze plate subduction. *Phys. Chem. Earth (A)*, 26: 673 – 684
- Zheng Y F, Wang Z R, Li S G and Zhao Z F. 2002a. Oxygen isotope equilibrium between eclogite minerals and its constraints on mineral Sm-Nd chronometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66: 625 – 634
- Zheng Y F, Gong B, Li L and Feng W-M. 2002b. A large scale of meteoric-hydrothermal alteration at Neoproterozoic in the Yangtze craton of China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66: A874
- Zheng Y F, Chen F K, Gong B, Zhao Z F. Protolith nature of UHP metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: evidence from zircon oxygen isotope and U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 48: 110 – 119 (in Chinese)

- Zhou J B, Zheng Y F, Li L. 2001a. Accretionary wedge of the subduction of the Yangtze plate. *Acta Geologica Sinica*, 75: 338 - 352 (in Chinese with English abstract)
- Zhou J B, Zheng Y F, Li L, Xie Z. 2001b. On low-grade metamorphic rocks within Dabie-Sulu ultrahigh pressure metamorphic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 39 - 48 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 董树文, 王小凤, 黄德志. 1996. 大别山超高压变质带内浅变质岩的发现及其意义. *科学通报*, 41(9): 815 - 820
- 傅斌, 郑永飞, 肖益林, 李一良, 龚冰, 李曙光, 孙卫东, 张四清, 张宗恒. 1998. 大别山苏家河地区榴辉岩和大理岩的地球化学研究. *地质学报*, 72(4): 323 - 339
- 侯金明, 汤加富, 高天山, 荆延仁. 1995. 重新认识宿松群. *安徽地质*, 5: 41 - 49
- 李任伟, 江茂生, 李忠, 孙枢, 金福全, 张雯华. 1999. 大别山北麓侏罗系大理岩砾石的碳-氧同位素组成及地质意义. *岩石学报*, 15(4): 623 - 629
- 叶伯丹, 徐俊文, 李志昌, 崔放, 简平. 1991. 桐柏-大别山地区苏家河群动物化石的发现及其意义. *中国地质*, (3): 28 - 29
- 张仁杰, 陈孝红. 1998. 桐柏-大别造山带苏家河群早奥陶世微体化石及其意义. *微体古生物学报*, 15(2): 125 - 133
- 郑文武. 1964. 大别山东段“佛子岭群”的划分和时代问题. *地质论评*, 22(5): 338 - 347
- 郑永飞, 陈福坤, 龚冰, 赵子福. 2003. 大别-苏鲁造山带超高压变质岩原岩性质: 锆石氧同位素和 U-Pb 年龄证据. *科学通报*, 48(2), 110 - 119
- 周建波, 郑永飞, 李龙等. 2001a. 扬子板块俯冲的构造加积楔. *地质学报*, 75: 338 - 352
- 周建波, 郑永飞, 李龙, 谢智. 2001b. 大别-苏鲁超高压变质带内部的浅变质岩. *岩石学报*, 17(1): 39 - 48