

新疆准噶尔与华南湘中法门期碳同位素特征的对比研究

宗普¹ 马学平^{2,†} 张美琼² 张宇波² 吕丹²

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

† 通信作者, E-mail: maxp@pku.edu.cn

摘要 针对新疆准噶尔盆地西北缘洪古勒楞组下段是否存在弗拉-法门阶界线的问题, 对比研究布龙果尔剖面该段地层以及湖南中部锡矿山剖面上泥盆统法门阶中下部碳酸盐岩的碳同位素特征, 并结合已有的生物地层学证据, 重新讨论洪古勒楞组下段的时代。结果表明, 布龙果尔剖面洪古勒楞组下段碳同位素的变化趋势与国内外诸多典型剖面弗拉-法门期之交的 $\delta^{13}\text{C}$ 偏移明显不同: 未见到显著正偏移; 布龙果尔剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 在0~1‰范围内变化, 小于国际上目前已知的弗拉-法门期之交 $\delta^{13}\text{C}$ 正偏移的幅度(2‰~3‰)。布龙果尔剖面洪古勒楞组下段可能不存在弗拉期地层, 甚至可能缺失法门阶底部(牙形石*Pa. triangularis*带)。法门早中期, 布龙果尔剖面碳同位素曲线可与湖南锡矿山剖面同时期地层进行较好的对比, 分为3个阶段: 2个完整的正偏—负偏旋回以及之上的小幅正偏。主量元素特征表明, 布龙果尔剖面第3-1层的下半部受陆源物质影响较大, 推测可能与区域构造活动变强烈有关。

关键词 准噶尔; 湘中; 晚泥盆世; 法门期; 碳同位素

中图分类号 P52

Comparative Study of Famennian Carbon Isotope Characteristics of Junggar, Xinjiang and Central Hunan, South China

ZONG Pu¹, MA Xueping^{2,†}, ZHANG Meiqiong², ZHANG Yubo², LÜ Dan²

1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: maxp@pku.edu.cn

Abstract In order to clarify the position of the Frasnian/Famennian (F/F) boundary in the Lower Member of the Hongguleleng Formation of northwestern Junggar Basin, Xinjiang, carbon isotope characters were comparatively studied for the carbonates from the Lower Member of this formation in the Bulongguoer section of Junggar and the interval (lower-middle Famennian of the Upper Devonian) at the Xikuangshan section of central Hunan. The age of the Lower Member of the Hongguleleng Formation is re-investigated, on the basis of its integrative biostratigraphical evidence, carbon isotope features, and a comparison with carbon isotope data from the Xikuangshan section. The carbon isotopic trend from the Lower Member of the Hongguleleng Formation does not show any prominent positive excursion and is distinctly different from the $\delta^{13}\text{C}$ oscillation pattern across the F/F boundary recorded in several typical sections around the world; the $\delta^{13}\text{C}$ values at Bulongguoer vary from 0 to 1‰, which is lower in amplitude than the currently known positive shift (2‰–3‰) across the F/F boundary in the world. The Lower Member of the Hongguleleng Formation probably may not contain Frasnian deposits, or even lacks the basal part of the Famennian (*Pa. triangularis* conodont Zone). For the early-middle Famennian interval of the studied sections, the carbon isotope trend seems to be well comparable; and this trend can be divided into three phases: two positive-negative oscillation cycles, followed by a weak positive excursion. The characteristics of major elements

indicate that the lower part of Unit 3-1 in the Bulongguoer section was affected by terrigenous supply, which is inferred to probably be related to strong regional tectonic activities.

Key words Junggar; central Hunan; Late Devonian; Famennian; carbon isotope

新疆准噶尔盆地西北缘的洪古勒楞组是我国北方晚泥盆世法门期的代表性地层,前人已从生物地层学、腕足动物组合、遗迹化石和地球化学等方面开展大量研究。例如, Suttner 等^[1]综合研究了布龙果尔剖面洪古勒楞组的岩性、沉积相、牙形石生物地层及地球化学特征,并获得碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化曲线; Zong 等^[2]研究了洪古勒楞组及上覆黑山头组的 5 个腕足动物组合带; Fan 等^[3]建立了布龙果尔剖面的遗迹化石相。

Suttner 等^[1]认为洪古勒楞组底部存在弗拉-法门阶界线,界线附近的碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 表现为幅度达 6‰ 的正偏移。Carmichael 等^[4]详细分析了该剖面朱鲁木特组顶部及洪古勒楞组底部的地球化学指标,认为 $\delta^{13}\text{C}$ 在洪古勒楞组底部灰岩层中表现为“约 2‰ 的正偏移”,代表弗拉-法门期之交的事件(简称 F/F 界线或 F/F 事件)。上述研究对地层时代的认识与许多前人的观点存在较大分歧。例如,赵治信等^[5]认为洪古勒楞组下段的时代相当于法门期早中期,即牙形石 *Palmatolepis crepida* 带至 *Pa. marginifera* 带;夏凤生^[6]则认为洪古勒楞组下段大致相当于弗拉阶 Upper *Pa. rhenana* 带至法门阶 Upper *Pa. crepida* 带;马学平等^[7]沿用赵治信等^[5]的观点,认为这与底栖生物的分布比较一致,因为 F/F 界线发生了地质历史中五大绝灭事件之一,界线上下底栖生物面貌有巨大差别^[8],而洪古勒楞组下段的珊瑚及腕足类面貌与法门期一致。此外,在距离布龙果尔剖面以西约 100 km 的乌兰柯顺地区, Wang 等^[9]研究了洪古勒楞组下段碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势,认为与 Suttner 等^[1]和 Carmichael 等^[4]揭示的变化趋势极为相似,但是依据 Wang 等^[9]建立的 polygnathid 牙形石带,洪古勒楞组底部(第 18 层)大致对应 *Neopolygnathus huijunae* 带至 *Neo. communis communis* 带底部,并可与标准牙形石 *Pa. triangularis* 带及 *Pa. crepida* 带的中下部对比^[9],因此难以确定洪古勒楞组底部是否存在 F/F 界线。上述研究中还存在以下问题:由于洪古勒楞组下段的地质时代存在争议, $\delta^{13}\text{C}$ 的变化曲线无法建立在确切的生物地层框架上,所以区内 $\delta^{13}\text{C}$ 在横向不

同剖面间的对比也无法解决 F/F 界线的位置。鉴于此,洪古勒楞组下段的 $\delta^{13}\text{C}$ 不仅要与 F/F 界线附近的地层进行对比,还要与法门期 *Pa. crepida* 带至 *Pa. marginifera* 带进行对比,通过与不同时间段同位素特征的比较,才能更客观地得出最合理的对应层段。

湖南中部晚泥盆世地层发育良好,是研究上泥盆统的首选之地。其中,锡矿山剖面是华南晚泥盆世法门期浅水相区的典型剖面。经前人长期深入研究,该剖面生物地层划分比较清楚,可为其他地区的地层对比提供一定的依据。锡矿山剖面的 F/F 界线位于老江冲组与长龙界组之间, F/F 之交碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 表现为约 4‰ 的正偏移^[10]。然而, F/F 界线之上的地层序列(长龙界组、锡矿山组),即法门期早-中期主体部分的碳同位素特征还未研究。

本文在文献[11]的基础上,首次对锡矿山剖面的碳、氧同位素数据进行研究。准噶尔盆地西北缘的布龙果尔剖面在晚泥盆世位于哈萨克板块的东延部分^[12],锡矿山剖面位于华南板块中部^[2,13],沉积相区属于潮下带混积岩相区。对比研究这两个剖面法门期的地球化学特征,有助于比较当时位于不同板块的两个地区稳定同位素的变化趋势。

1 地质背景、剖面与地层

本文研究的布龙果尔剖面位于新疆和布克赛尔蒙古自治县和什托洛盖镇以北约 30 km 的布龙果尔水库以北,地理位置见图 1(a)。该剖面晚泥盆世地层连续,出露良好。Hou 等^[14]将该剖面的洪古勒楞组划分为下、中、上三段,分别以碳酸盐岩、杂色碎屑岩、黄/灰色钙质泥质粉砂岩为特征。Ma 等^[15]将该剖面分为 16 层,第 1 层为朱鲁木特组顶部(目前属于哈尔段,详见文献[16]), 2~9a 层为洪古勒楞组,其上的 9b~15 层为黑山头组。本文着重研究洪古勒楞组下段(第 2~3 层)。其中,第 2 层(厚 17 m)为薄层生屑灰岩夹薄层灰绿色钙质泥页岩、介壳泥灰岩,向上介壳泥灰岩逐渐增多。根据岩性的差异,第 3 层(厚 71.8 m)可分为下、中、上及顶部:下部(3-1 层)为泥页岩夹灰岩;中部(3-2 层)以粉砂岩、

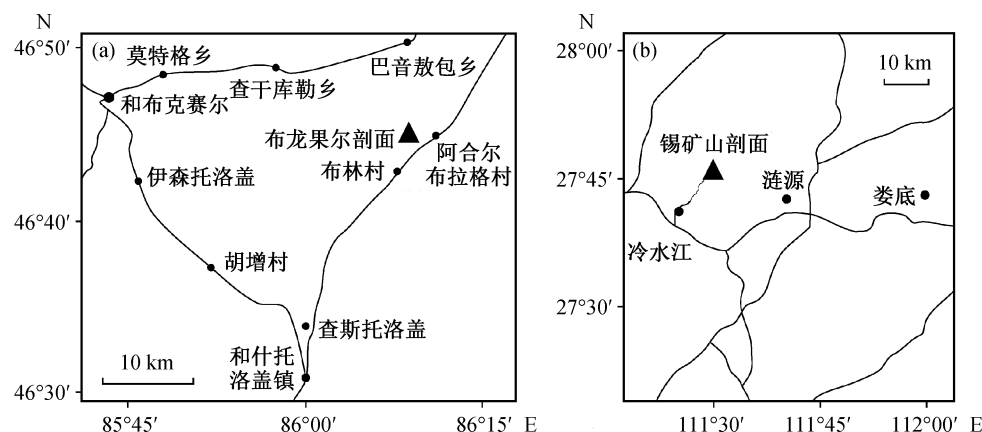


图1 布龙果尔剖面(a)及锡矿山剖面(b)地理位置

Fig. 1 Locations of the Bulonguoer section (a) and Xikuangshan section (b)

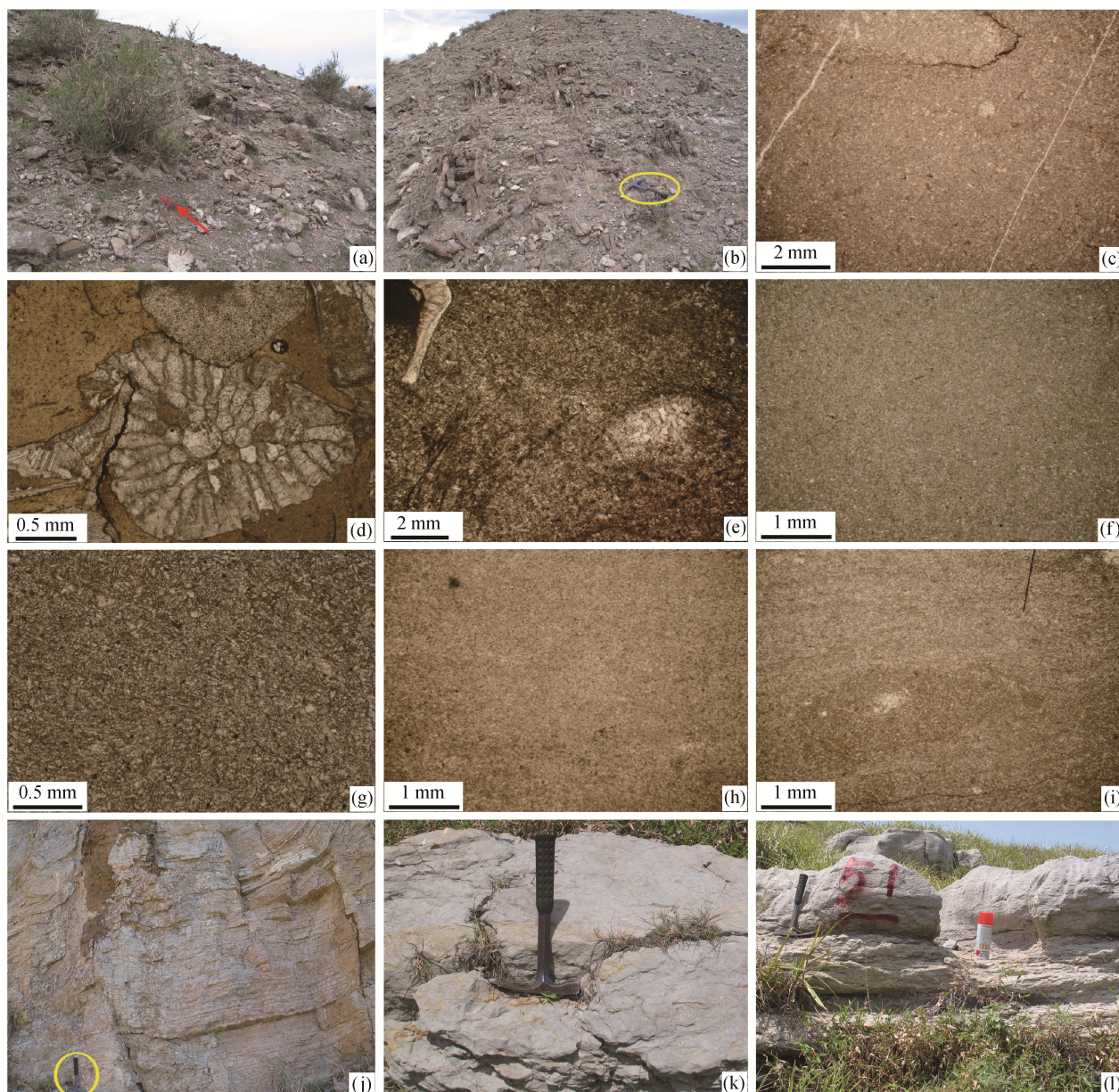
页岩为主,灰岩夹层很少并变薄;上部(3-3层)灰岩层增多,粉砂岩、页岩与灰岩互层;顶部(3-4层)灰岩夹层又变少(图2和3)。之上,第4~6层为洪古勒楞组中段,主要为紫红色疙瘩状灰岩、紫红色及灰绿色钙质泥岩以及钙质粉砂质泥岩等。

除布龙果尔剖面外,洪古勒楞组广泛发育于沙尔布尔提山地区内的多个剖面中,如七里湾、哈沙图等剖面^[17],也见于布龙果尔剖面以西约100 km的乌兰柯顺地区^[9]。该组下段为一套稳定的浅水碳酸盐岩,代表一次广泛的海侵事件。以往对这段地层的时代存有很大争议。Chen等^[18]及Suttner等^[1]认为布龙果尔剖面洪古勒楞组跨越了F/F界线,此界线位于该组底部之上2.7 m处(两研究者均未提供相关牙形石图片)。赵治信等^[5]在布龙果尔剖面洪古勒楞组下段分析出的牙形石以polygnathids和icriodontids为主,含少量其他类型,包括*Ancyrognathus bifurcates*, *Polygnathus semicostatus*, *Icriodus cornutus*和*Palmatolepis minuta minuta*。我们在洪古勒楞组下段发现*Icriodus alternatus alternatus*, *Ancyrognathus cf. bifurcatus*和*Polygnathus normalis*?。此外,在该剖面第5-2层产出菊石类*Sporadoceras impressum* Becker and Zong, *Prionoceras frechi* (Wedekind)和*Platyclymenia subnauti lina* (Sandberger)等,可对应于法门晚期标准菊石第IV带(相当于标准牙形石带Upper *Pa. rugosa trachytera*至Lower *Pa. gracilis expansa*)^[19]。综合牙形石及菊石证据,我们认为洪古勒楞组下段的时代大致相当于*Pa. crepida*带至*rhomboidea*带或*marginifera*带^[17]。

锡矿山剖面位于湖南省中部冷水江市以北约20 km处(图1(b))。该剖面包括弗拉阶上部至下石炭统下部,由两部分组成:1~47层位于老江冲村旁的乡间路北侧路旁及南侧山坡,剖面出露良好;第47层以上位于欧家冲至竹山煤矿乡道(第47层起点经纬度:27°47'26"N, 111°30'24"E)。该剖面为华南晚泥盆世法门期浅水相区的典型剖面,前人已开展大量研究,地层序列、生物组合及时代比较清楚^[20-28]。其中,1~8层为老江冲组最上部,时代为弗拉期,相当于牙形石*Pa. linguiformis*带(部分);9~26层为长龙界组,主要为页岩夹薄层灰岩,时代大致相当于牙形石*Pa. triangularis*-Lower *Pa. crepida*带;27~76层为锡矿山组,自下而上可分为三段:兔子塘灰岩段、泥塘里铁矿层段和玛牯脑灰岩段(图2和3)。锡矿山组相当于牙形石*Pa. crepida*带至*Pa. marginifera*带,玛牯脑段的顶部仍位于*Pa. marginifera*带之内。*Pa. crepida*带和*Pa. rhomboidea*带的顶界分别位于第37层顶部和第67层下部^[28-29]。锡矿山组之上为欧家冲组,主要为砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩及泥岩等(图3)。

2 材料与方法

布龙果尔剖面共采集78个碳酸盐岩样品,锡矿山剖面共采集79个碳酸盐岩样品,用于地球化学分析。此外,布龙果尔剖面的78个样品分别制作岩石薄片,锡矿山剖面共有59个薄片,用于岩性观察。布龙果尔剖面的样品采自洪古勒楞组下段,即该剖面的2~3层,地层厚度为88.8 m。下部样品(0~40 m)的采样间隔为0.5~1.5 m,上部样品



(a)~(i) 布龙果尔剖面; (j)~(l) 锡矿山剖面; 地质锤长 29 cm。(a) 第 2 层底部, 箭头处为剖面起点; (b) 第 2 层, 洪古勒组底部之上 10~14 m; (c) 第 2 层底部(洪古勒组底部), 灰泥岩; (d) 第 2 层中部, 距 2 层底之上 8 m, 粒泥灰岩, 含生屑苔藓虫等; (e) 第 2 层上部, 距 2 层底之上 13.5 m, 生屑灰泥岩; (f) 3-1 层下部, 距 2 层底之上 26.8 m, 灰泥岩; (g) 3-1 层中部, 距 2 层底之上 34.4 m, 灰泥岩; (h) 3-1 层上部, 距 2 层底之上 54.8 m, 灰泥岩; (i) 3-3 层, 距 2 层底之上 74.6 m, 灰泥岩; (j) 15~19 层; (k) 第 45 层; (l) 50~51 层

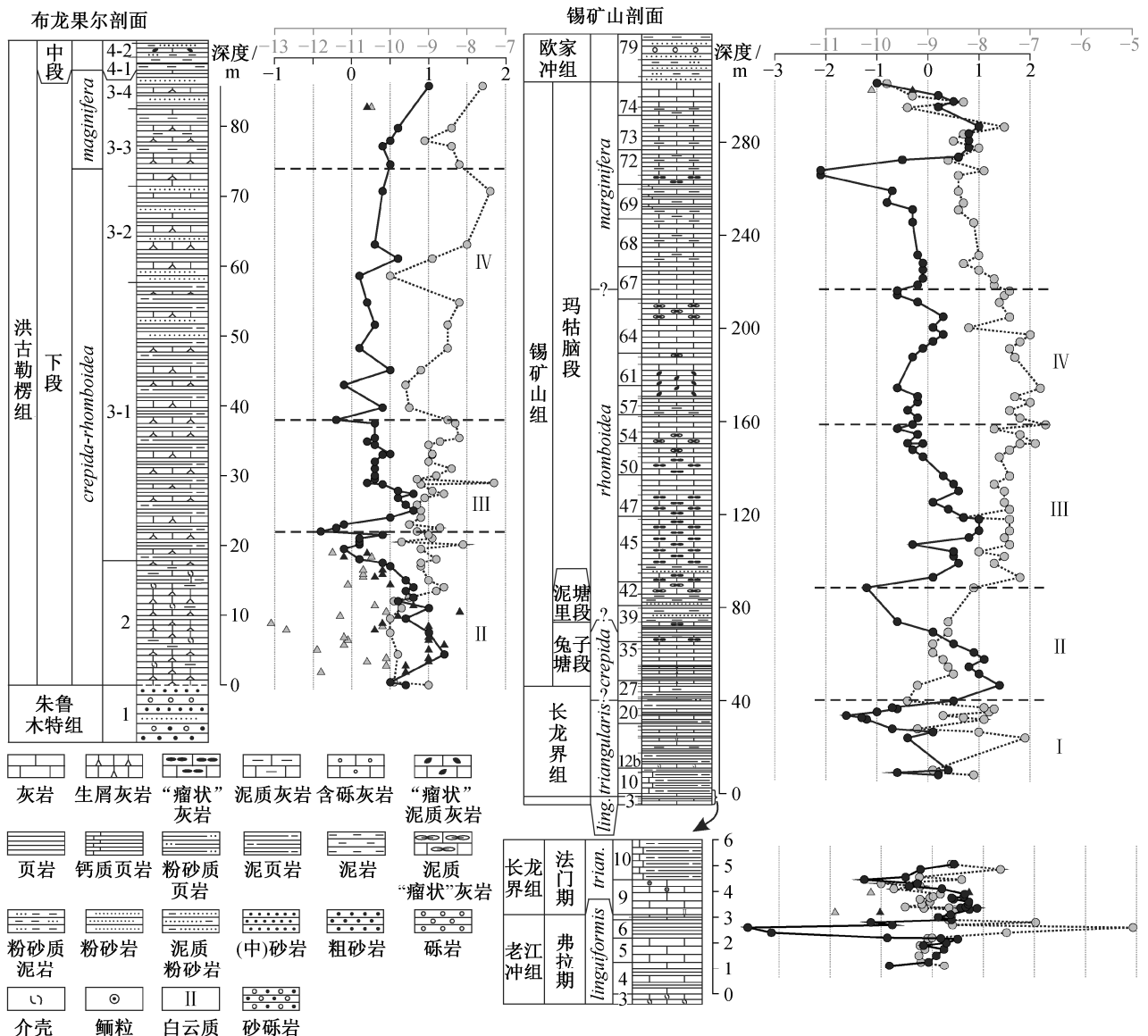
图 2 布龙果尔剖面和锡矿山剖面野外及显微照片

Fig. 2 Outcrops and photomicrographs of rock samples from the Bulongguoer section and Xikuangshan section

(40~88.8 m) 采样间隔约 3 m (图 3)。上部样品的采样密度较小, 是由于上部灰岩含量减少, 泥质粉砂岩等碎屑岩夹层增多。第 3 层之上以碎屑岩为主, 无法按一定间隔获得碳酸盐岩样品, 因此本文未涉及。锡矿山剖面的样品采自 10~76 层, 地层厚度为 305.8 m, 涵盖长龙界组和锡矿山组。在该剖面的 79 个样品中, 下部 12 个样品采样间隔约 1 m, 上

部 67 个样品采样间隔约 3 m, 采样层位详见图 3。此外, 在锡矿山(老江冲)剖面 F/F 界线附近, 马学平^[10]测试了采自 4~10 层 35 个样品的碳、氧同位素, 地层厚度共计 5.1 m。为了较完整地揭示锡矿山剖面 F/F 之交及法门早中期的同位素变化趋势, 本文将上述 35 个样品的数据也纳入分析讨论。

碳、氧同位素测试在核工业北京地质研究院分



黑色圆点和坐标代表 $\delta^{13}\text{C}$ (‰), 灰色圆点和坐标代表 $\delta^{18}\text{O}$ (‰), 灰色及黑色三角形分别代表 $<-10\text{‰}$ 样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 及 $\delta^{13}\text{C}$, 数据均以 V-PDB 为标准; 锡矿山剖面 F/F 界线附近的数据依据马学平^[10]。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的单位以及岩性图例下同

图 3 布龙果尔剖面和锡矿山剖面弗拉期至法门早中期碳、氧同位素曲线对比

Fig. 3 Stable carbon and oxygen isotope geochemistry from the Frasnian to early-middle Famennian strata in the Bulongguoer section and Xikuangshan section

析测试中心完成。将样品破碎至厘米级, 挑选泥晶含量最高的部分, 避免裂隙、方解石脉及生物碎片, 粉碎成 200 目粉末。按照 McCrea^[30] 的方法生成 CO_2 气体, 用 MAT253 稳定同位素质谱仪进行无机碳和氧同位素分析, 标样采用国家同位素标准物质 GB04416。测试结果以国际 V-PDB 为标准, 记为 $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$ 和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}$, 分析精度分别优于 $\pm 0.1\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$ 。在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成主量元素测试。将样品粉末与四硼酸锂、偏硼酸锂混合并压实, 用顺序式 X 射线荧光光

谱仪 (ARL ADVANTXP+) 进行主量元素含量测试, 标样采用 GSR-6 和 GSR-13。CaO 和 SiO_2 的标准误差小于 2%, 其他氧化物的标准误差为 10%。

3 结果

3.1 稳定同位素特征

3.1.1 锡矿山剖面长龙界组-锡矿山组碳、氧同位素特征

锡矿山剖面长龙界组-锡矿山组碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围在 -2.1‰ ~ 1.4‰ 之间 (表 1), 平均值

表 1 锡矿山剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果
Table 1 Results of carbonate $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of the Xikuangshan section

样品号	层位/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样品号	层位/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
L10/7.9	7.90	0.2	-8.1	11L40C	154.37	-0.2	-7.2
L11	8.90	-0.6	-8.8	11L41C	156.77	-0.6	-7.7
L12/0.7-0.8	9.95~10.05	0.4	-8.9	11L42C	158.62	-0.3	-6.7
L13/t10	23.85	-0.4	-7.1	11L43C	161.48	-0.2	-7.2
L15/1.7	26.40	0.1	-8.0	11L44C	164.74	-0.4	-7.4
L17/0.3	27.75	-0.7	-9.2	11L45C	168.23	-0.2	-7.0
L20/1.7-2.0	31.70~32.00	-1.2	-7.9	11L46C	170.70	-0.2	-7.3
L20/2.6	32.60	-1.3	-8.3	11L47C	174.35	-0.6	-6.8
L21	33.50	-1.6	-8.7	11L48C	187.53	-0.3	-7.3
L21/1.5	35.00	-1.0	-7.8	11L49C	191.25	-0.1	-7.4
L22/0.05	36.35	-0.6	-7.7	11L50C	194.25	0.1	-7.2
L22/0.6	36.90	-0.7	-7.9	11L51C	197.25	0.3	-7.0
11L1C	39.80	0.5	-9.4	11L28C	200.25	0.1	-8.2
11L2C	46.50	1.4	-9.2	11L29C	204.85	0.3	-7.4
11L3C	51.35	1.0	-8.5	11L30C	211.17	-0.2	-7.6
11L4C	54.40	0.8	-8.6	11L31C	214.17	-0.6	-7.5
11L5C	57.60	1.1	-8.7	11L32C	216.02	-0.6	-7.4
11L6C	60.60	0.9	-8.9	11L33C	218.52	-0.2	-7.7
11L7C	64.30	0.5	-8.9	11L34C	221.32	-0.1	-7.7
11L8C	69.34	0.1	-8.6	11L35C	225.02	-0.1	-8.0
11L9C	73.72	-0.6	-8.6	11L36C	227.91	-0.1	-8.3
11L10C	88.38	-1.2	-8.1	11L37C	231.41	-0.2	-8.0
11L11C	92.85	0.1	-7.2	11L38C	245.48	-0.3	-8.1
11L12C	98.91	0.6	-7.7	11L52C	250.98	-0.3	-8.4
11L13C	101.91	0.5	-7.5	11L53C	253.98	-0.8	-8.3
11L14C	103.91	0.5	-8.0	11L56C	258.99	-0.7	-8.4
11L15C	106.91	-0.3	-7.4	11L54C	265.84	-2.1	-8.4
11L16C	109.91	0.8	-7.5	11L55C	267.84	-2.1	-7.9
11L17C	112.91	1.0	-7.4	11L57C	272.34	-0.5	-8.6
11L18C	117.86	1.0	-7.4	11L58C	273.65	0.6	-8.4
11L19C	118.66	0.7	-8.3	11L59C	277.65	0.8	-8.0
11L20C	122.16	0.4	-7.4	11L60C	280.65	0.8	-8.5
11L21C	125.16	0.1	-7.5	11L61C	283.65	0.8	-8.3
11L22C	129.95	0.6	-7.5	11L62C	286.65	1.0	-7.5
11L23C	132.95	0.5	-7.7	11L63C	294.94	0.2	-9.4
11L24C	136.45	0.3	-7.4	11L64C	297.31	0.5	-8.3
11L25C	144.76	-0.1	-7.6	11L65C	299.97	0.2	-9.3
11L26C	147.76	-0.3	-7.4	11L66C	302.62	-0.3	-10.1
11L39C	150.37	-0.1	-7.2	11L67C	305.27	-1.0	-9.8
11L27C	150.51	-0.4	-6.9				

说明:“层位”指向下至第 10 层底的距离。

为 0.4‰。在牙形石 *Palmatolepis triangularis* 带(10~22 层), $\delta^{13}\text{C}$ 从 0.4‰递减至 -1.6‰ (阶段 I)。至 *Pa. crepida* 带(22~37 层), $\delta^{13}\text{C}$ 升至 1.4‰, 之后逐渐回落至 0.1‰。至 42 层, $\delta^{13}\text{C}$ 降至 -1.2‰ (阶段 II)。锡矿山组玛牯脑段下部(43~55 层), $\delta^{13}\text{C}$ 先表现为正偏移, 升至 1.0‰, 后降至 -0.6‰ (阶段 III)。玛牯脑段中部(55~69 层), $\delta^{13}\text{C}$ 较稳定, 在 -0.2‰ 上下波动, 其中 60~65 层有约 1‰ 的正偏移(阶段 IV)。玛牯脑段上部(69~76 层), $\delta^{13}\text{C}$ 先急剧地负偏移至 -2.1‰, 又增加至 1‰, 后又降至 -1‰。第 72 层存在快速负偏移(表 1 中样品 11L54C 和 11L55C), 因样品数目太少, 其真实性有待后续工作验证。

锡矿山剖面, 牙形石 *Pa. triangularis* 带 $\delta^{18}\text{O}$ 分布范围为 -9.2‰~-7.1‰。*Pa. crepida* 带 $\delta^{18}\text{O}$ 表现为正偏移, 从 -9.4‰升至 -8.5‰。至 42 层, $\delta^{18}\text{O}$ 升至 -8.1‰。玛牯脑段下部(43~55 层) $\delta^{18}\text{O}$ 表现为小幅正偏移, 升至 -6.7‰。玛牯脑段中上部(56~76 层) $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势与 $\delta^{13}\text{C}$ 几乎一致: 56~71 层逐渐降低至 -8.4‰, 72~73 层下部在 -8.6‰~-7.5‰ 之间波动, 往上逐渐降低至 -10.1‰ (该剖面仅样品 11L66C 的 $\delta^{18}\text{O}$ 小于 -10‰)(图 3)。

3.1.2 布龙果尔剖面洪古勒楞组下段的碳、氧同位素特征

布龙果尔剖面洪古勒楞组下段碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布范围在 -0.4‰~1.4‰ 之间(表 2), 平均 0.47‰, 可划分为 3 个阶段(图 3)。第 2 层中下部 $\delta^{13}\text{C}$ 分布于 0.5‰ (样品 XZ420C-2, 距 2 层底之上 0.4 m) 与 1.2‰ (样品 XZ421C-3, 距 2 层底之上 4.4 m) 之间; 往上 $\delta^{13}\text{C}$ 持续下降, 在第 3 层底部降至最低值 (-0.4‰, 样品 XZ427C-4, 距 2 层底之上 22 m), 降幅达 1.6‰ (阶段 II)。第 3-1 层的下部可识别出 $\delta^{13}\text{C}$ 的正偏移(从 -0.4‰ 升至 0.8‰), 第 3-1 层的中部 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现缓慢的下降趋势, 并基本上稳定在 0.3‰, 向上降至 -0.2‰ (阶段 III)。第 3 层的其余部分 $\delta^{13}\text{C}$ 表现为缓慢的小幅正偏移, 偏移量为 1‰ (阶段 IV)。

布龙果尔剖面 $\delta^{18}\text{O}$ 总体上呈现正偏移趋势, 但其间多次波动。在第 2 层及第 3 层底部, $\delta^{18}\text{O}$ 在 -13.1‰~-8.1‰ 之间宽幅波动, 其中 20 个样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 小于 -10‰。第 3-1 层下部偏移幅度变小, $\delta^{18}\text{O}$ 从 -9.5‰ (样品 XZ427C-5, 距 2 层底之上 23 m) 升至 -7.3‰ (样品 XZ428C-5, 距 2 层底之上 29 m)。

往上, 除一个样品(XZ437C-1, $\delta^{18}\text{O} = -10.5‰$)外, $\delta^{18}\text{O}$ 在 -10‰~-7.4‰ 之间波动, 但总体上呈现为增大趋势(图 3)。

3.2 布龙果尔剖面与锡矿山剖面的主量元素特征

布龙果尔剖面样品的 CaO 含量分布于 21.8%~53.21% 之间, SiO₂ 含量分布于 4.14%~52.43% 之间(有 16 个样品高于 20%)。MgO 含量的变化范围为 0.36%~2.55%, 平均值为 1.07% (样品数为 78, 下同)。陆源元素的氧化物(如 Al₂O₃ 和 TiO₂)含量相对较低, Al₂O₃ 含量的变化范围为 0.32%~7.37% (平均 2.1%), TiO₂ 含量分布在 0.015%~0.3% 之间(平均值为 0.085%)。Fe₂O₃ 含量分布在 0.45%~2.62% 之间(平均 1.226%), Mn 含量分布于 0.059%~0.408% 之间(平均值为 0.177%)。K₂O 和 Na₂O 含量的分布范围分别为 0.01%~1.34% (平均 0.26%) 和 0.04%~0.72% (平均值为 0.24%) (表 3)。

锡矿山剖面样品的 CaO 含量分布于 10.32%~61.79% 之间, SiO₂ 含量介于 1.5% (距 67 层底之上 6.0 m) 与 53.3% (距 72 层底之上 6.5 m) 之间(有 11 个样品高于 20%)。MgO 含量为 0.54%~2.38%, 平均 1.02% (样品数为 67, 下同)。Al₂O₃ 含量分布于 0.21%~16.4% 之间(平均 2.8%), TiO₂ 含量为 0.01%~0.57% (平均 0.142%)。Fe₂O₃ 含量分布于 0.12%~4.48% 之间(平均 1.19%)。K₂O, Na₂O 及 P₂O₅ 含量相对较低, 分别为 0.03%~4.48% (平均 0.571%), 0~1.57% (平均 0.185%), 0.005%~0.315% (平均 0.089%)。MnO 含量低, 分布于 0.005%~0.181% 之间, 平均 0.048% (表 4)。

4 讨论

4.1 成岩改造的评估

碳酸盐岩成岩过程中, 如果有孔隙水、大气水等流体的作用, 原始碳、氧同位素的组成会发生改变, 导致碳酸盐岩样品不能准确地代表原始海水的同位素值^[31-32]。因此, 在分析和对比碳、氧同位素特征之前, 需要评估样品是否受到后期成岩作用的改造。与碳同位素相比, 碳酸盐岩中的氧同位素更易受到后期改造, 原因如下: 1) 孔隙水中的氧库会直接影响成岩过程(如交代、重结晶)中析出方解石的氧同位素组成; 2) 氧同位素对温度更敏感。碳酸盐岩中的碳同位素温度效应极小, 另外, 尽管成岩

表 2 布龙果尔剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 及 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果
Table 2 Results of carbonate $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of the Bulongguoer section

样品号	层位/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	样品号	层位/m	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$
XZ420C-1	0	0.7	-9.0	XZ427C-4	22.0	-0.4	-9.3
XZ420C-2	0.4	0.5	-9.9	XZ427C-1	22.5	-0.2	-8.7
XZ420C-3	2.0	0.7	-11.8	XZ427C-5	23.0	-0.1	-9.5
XZ420C-4	2.9	0.7	-10.1	XZ427C-6	24.0	0.5	-9.2
XZ421C-1	3.5	1.0	-10.6	XZ427C-7	25.0	0.8	-9.2
XZ421C-2	4.0	1.0	-10.1	XZ427C-2	25.8	0.7	-9.3
XZ421C-3	4.4	1.2	-9.8	XZ427C-8	26.8	0.6	-9.1
XZ421C-4	5.2	1.0	-11.9	XZ428C-2	27.4	0.8	-8.6
XZ421C-5	5.9	1.2	-11.2	XZ428C-3	27.8	0.6	-8.9
XZ422C-1	6.6	1.0	-11.1	XZ428C-4	28.8	0.4	-9.2
XZ422C-2	7.0	1.0	-11.2	XZ428C-5	29.0	0.2	-7.3
XZ422C-3	7.5	1.0	-10.0	XZ428C-1	29.5	0.3	-9.3
XZ422C-4	8.0	0.3	-12.7	XZ428C-6	30.0	0.3	-8.8
XZ422C-5	8.5	1.0	-10.2	XZ428C-7	31.0	0.3	-8.4
XZ422C-6	9.0	0.4	-13.1	XZ428C-8	32.0	0.3	-9.0
XZ423C-1	9.5	0.7	-10.0	XZ428C-9	33.0	0.4	-8.9
XZ423C-2	10.0	0.6	-11.3	XZ429C-1	33.1	0.5	-8.9
XZ423C-3	10.6	1.4	-10.1	XZ429C-2	34.4	0.3	-9.0
XZ423C-4	11.0	1.0	-9.7	XZ429C-3	34.9	0.2	-8.7
XZ423C-5	11.5	0.8	-10.4	XZ429C-4	35.4	0.3	-8.2
XZ423C-6	12.0	0.6	-9.9	XZ429C-5	37.5	0.3	-8.3
XZ424C-1	12.5	0.8	-9.5	XZ429C-6	38.0	-0.2	-8.5
XZ424C-2	13.5	0.7	-8.8	XZ430C-2	39.8	0.4	-9.5
XZ424C-3	14.0	0.8	-8.6	XZ430C-1	43.0	-0.1	-9.6
XZ424C-4	14.5	0.5	-11.1	XZ431C-2	45.1	0.5	-9.2
XZ424C-5	15.0	0.7	-9.0	XZ431C-1	48.3	0.1	-8.5
XZ425C-1	15.6	0.3	-10.7	XZ432C-2	51.6	0.3	-8.5
XZ425C-2	16.0	0.4	-10.7	XZ432C-1	54.8	0.2	-8.2
XZ425C-3	16.6	0.4	-10.7	XZ433C-1	58.6	0.1	-10.0
XZ425C-4	17.0	0.5	-9.2	XZ433C-2	61.1	0.6	-8.9
XZ425C-5	17.5	0.4	-9.2	XZ434C-1	63.1	0.3	-8.0
XZ425C-6	18.0	0.1	-8.8	XZ435C-1	70.8	0.4	-7.4
XZ426C-1	18.5	-0.1	-10.5	XZ435C-2	74.6	0.5	-8.2
XZ426C-4	19.0	0.2	-11.5	XZ436C-3	77.2	0.4	-8.4
XZ426C-2	19.5	-0.1	-9.2	XZ436C-1	78.0	0.5	-9.1
XZ426C-3	20.1	0.1	-8.1	XZ436C-2	79.8	0.6	-8.4
XZ426C-5	20.5	0.1	-9.7	XZ437C-1	82.9	0.2	-10.5
XZ426C-6	21.0	0.1	-8.9	XZ437C-2	85.8	1.0	-7.6
XZ427C-3	21.5	0.4	-9.0				

说明:“层位”指向下至第 2 层底的距离。

表 3 布龙果尔剖面主量元素分析结果
Table 3 Results of major elements of the samples from the Bulongguoer section

样品号	层位/m	元素含量/%									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
XZ420C-1	0	17.46	1.82	1.20	43.25	0.80	0.22	0.27	0.306	0.107	0.051
XZ420C-2	0.4	14.08	1.96	0.97	44.72	0.81	0.30	0.27	0.291	0.091	0.340
XZ420C-3	2.0	38.67	3.77	2.03	28.95	1.27	0.56	0.37	0.180	0.166	1.298
XZ420C-4	2.9	4.14	0.34	0.64	53.21	0.36	0.02	0.09	0.527	0.020	0.171
XZ421C-1	3.5	32.39	3.76	2.48	32.10	1.57	0.55	0.23	0.134	0.116	0.206
XZ421C-2	4.0	8.85	0.66	0.96	49.98	0.61	0.05	0.06	0.358	0.027	0.084
XZ421C-3	4.4	10.61	0.69	1.01	48.84	0.64	0.07	0.09	0.295	0.041	0.094
XZ421C-4	5.2	7.10	1.21	1.30	50.31	0.78	0.08	0.08	0.276	0.029	0.060
XZ421C-5	5.9	16.20	1.36	1.41	45.39	0.74	0.16	0.10	0.197	0.048	0.090
XZ422C-1	6.6	13.79	0.83	1.26	47.53	0.64	0.08	0.07	0.274	0.041	0.060
XZ422C-2	7.0	23.36	1.34	1.47	41.65	0.74	0.11	0.17	0.199	0.066	0.196
XZ422C-3	7.5	16.08	0.85	1.29	46.50	0.64	0.09	0.10	0.284	0.038	0.110
XZ422C-4	8.0	52.43	2.66	2.24	21.80	1.25	0.26	0.22	0.129	0.113	0.202
XZ422C-5	8.5	13.52	1.34	1.87	45.57	0.97	0.07	0.07	0.264	0.035	0.209
XZ422C-6	9.0	12.68	1.21	1.74	48.28	0.76	0.08	0.12	0.375	0.056	0.084
XZ423C-1	9.5	15.99	1.45	1.58	43.43	0.75	0.14	0.15	0.208	0.066	0.113
XZ423C-2	10.0	40.37	1.99	2.25	29.98	1.12	0.12	0.14	0.165	0.078	0.066
XZ423C-3	10.6	14.16	1.35	1.00	46.09	0.73	0.19	0.12	0.188	0.058	0.094
XZ423C-4	11.0	15.60	1.34	1.52	46.07	0.77	0.11	0.20	0.274	0.069	0.249
XZ423C-5	11.5	17.66	1.86	1.39	43.62	0.91	0.23	0.26	0.223	0.070	0.312
XZ423C-6	12.0	9.84	0.61	1.11	49.61	0.55	0.03	0.11	0.323	0.030	0.038
XZ424C-1	12.5	10.51	1.19	1.63	47.99	0.87	0.07	0.11	0.309	0.039	0.052
XZ424C-2	13.5	5.82	0.68	1.18	50.78	0.71	0.03	0.09	0.302	0.029	0.037
XZ424C-3	14.0	6.69	0.87	1.25	50.18	0.86	0.06	0.11	0.216	0.024	0.068
XZ424C-4	14.5	5.24	0.63	1.16	51.36	0.59	0.02	0.12	0.284	0.033	0.056
XZ424C-5	15.0	8.51	0.75	1.22	49.67	0.71	0.06	0.08	0.299	0.024	0.043
XZ425C-1	15.6	21.21	1.63	1.59	42.24	0.83	0.18	0.18	0.212	0.065	0.096
XZ425C-2	16.0	15.04	1.34	1.54	45.74	0.85	0.12	0.14	0.213	0.053	0.096
XZ425C-3	16.6	26.05	3.06	2.33	37.12	1.34	0.45	0.26	0.149	0.119	0.245
XZ425C-4	17.0	19.28	2.43	2.22	40.69	1.39	0.27	0.19	0.176	0.081	0.205
XZ425C-5	17.5	9.39	1.27	1.32	48.40	0.83	0.09	0.17	0.329	0.045	0.121
XZ425C-6	18.0	6.67	0.32	1.08	50.49	0.48	0.01	0.04	0.389	0.015	0.107
XZ426C-1	18.5	45.65	4.44	3.00	23.35	1.77	0.59	0.44	0.106	0.175	0.248
XZ426C-4	19.0	7.53	1.42	2.00	47.80	1.04	0.11	0.10	0.319	0.051	0.055
XZ426C-2	19.5	6.38	0.39	0.88	50.33	0.50	0.03	0.06	0.364	0.019	0.085
XZ426C-3	20.1	7.35	1.13	1.42	49.61	0.73	0.08	0.11	0.269	0.046	0.103
XZ426C-5	20.5	9.31	1.58	2.09	46.89	1.12	0.09	0.19	0.311	0.066	0.044
XZ426C-6	21.0	7.83	1.71	1.87	47.71	1.11	0.15	0.25	0.323	0.083	0.083
XZ427C-3	21.5	17.94	4.27	2.60	38.64	1.61	0.66	0.45	0.172	0.197	0.128

续表

样品号	层位/m	元素含量/%									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
XZ427C-4	22.0	16.15	4.05	3.36	39.67	1.93	0.40	0.51	0.213	0.176	0.072
XZ427C-1	22.5	11.95	2.83	2.00	43.76	1.30	0.41	0.34	0.269	0.110	0.110
XZ427C-5	23.0	18.22	2.32	3.43	41.11	1.51	0.12	0.16	0.311	0.098	0.173
XZ427C-6	24.0	28.05	7.28	3.74	28.99	2.34	1.20	0.72	0.193	0.300	0.077
XZ427C-7	25.0	15.03	3.96	2.90	40.22	1.75	0.53	0.32	0.172	0.138	0.046
XZ427C-2	25.8	6.92	1.48	1.51	48.73	0.79	0.17	0.24	0.327	0.068	0.060
XZ427C-8	26.8	17.15	4.28	3.41	38.46	2.02	0.53	0.38	0.185	0.149	0.104
XZ428C-2	27.4	11.88	3.30	2.72	42.90	1.59	0.42	0.26	0.196	0.112	0.086
XZ428C-3	27.8	15.30	3.05	2.63	41.63	1.44	0.38	0.36	0.284	0.133	0.059
XZ428C-4	28.8	10.80	2.87	2.05	44.55	1.41	0.39	0.29	0.152	0.104	0.252
XZ428C-5	29.0	8.07	1.77	1.72	47.63	1.09	0.20	0.16	0.216	0.067	0.071
XZ428C-1	29.5	10.47	2.15	2.10	46.58	1.10	0.14	0.47	0.296	0.116	0.096
XZ428C-6	30.0	36.74	7.37	3.36	24.40	2.29	1.34	0.72	0.085	0.298	0.358
XZ428C-7	31.0	26.18	5.20	3.26	30.06	2.08	0.80	0.46	0.115	0.204	0.063
XZ428C-8	32.0	22.77	4.64	2.81	35.25	1.93	0.68	0.48	0.120	0.176	0.074
XZ428C-9	33.0	12.49	2.05	1.70	45.06	1.02	0.23	0.29	0.213	0.089	0.046
XZ429C-1	33.1	7.21	1.66	1.48	48.20	0.97	0.22	0.23	0.239	0.070	0.045
XZ429C-2	34.4	18.08	3.04	1.78	40.92	1.15	0.46	0.49	0.152	0.141	0.069
XZ429C-3	34.9	30.49	4.75	2.41	31.30	1.78	0.84	0.45	0.099	0.190	0.163
XZ429C-4	35.4	6.86	0.67	0.81	50.45	0.61	0.11	0.09	0.266	0.032	0.064
XZ429C-5	37.5	16.43	2.17	1.36	43.19	0.94	0.28	0.42	0.237	0.109	0.054
XZ429C-6	38.0	13.37	1.75	1.64	45.20	1.04	0.22	0.16	0.311	0.063	0.073
XZ430C-2	39.8	11.06	1.57	1.23	47.14	0.89	0.20	0.25	0.167	0.083	0.076
XZ430C-1	43.0	5.86	1.17	1.37	51.11	0.71	0.03	0.46	0.264	0.105	0.062
XZ431C-2	45.1	17.81	2.89	1.84	41.34	1.30	0.43	0.40	0.103	0.131	0.051
XZ431C-1	48.3	13.00	1.66	1.27	47.36	0.89	0.26	0.20	0.170	0.065	0.042
XZ432C-2	51.6	6.85	0.82	1.12	49.12	0.71	0.10	0.13	0.250	0.035	0.024
XZ432C-1	54.8	5.62	0.81	0.86	50.92	0.68	0.10	0.18	0.168	0.044	0.032
XZ433C-1	58.6	8.46	1.31	1.06	48.95	0.78	0.15	0.25	0.159	0.060	0.064
XZ433C-2	61.1	8.75	1.18	1.06	51.34	0.64	0.14	0.27	0.196	0.051	0.062
XZ434C-1	63.1	23.50	3.20	2.16	37.22	1.63	0.48	0.30	0.077	0.114	0.085
XZ434C-2	67.0	9.44	1.71	1.29	47.91	0.98	0.20	0.38	0.171	0.087	0.050
XZ435C-1	70.8	6.38	0.70	0.69	51.84	0.60	0.12	0.16	0.160	0.038	0.048
XZ435C-2	74.6	18.33	2.43	1.51	41.90	1.19	0.40	0.32	0.106	0.093	0.044
XZ436C-3	77.2	8.09	0.70	0.73	50.87	0.52	0.06	0.30	0.282	0.054	0.070
XZ436C-1	78.0	43.47	5.26	3.51	23.39	2.55	0.75	0.37	0.085	0.122	0.048
XZ436C-2	79.8	15.11	1.58	1.38	44.85	0.97	0.21	0.12	0.208	0.045	0.042
XZ437C-1	82.9	45.06	1.72	1.38	30.63	0.99	0.09	0.34	0.120	0.031	0.047
XZ437C-2	85.8	7.08	1.25	0.94	49.54	0.81	0.20	0.20	0.228	0.045	0.083

说明:“层位”指向下至第 2 层底的距离。

表 4 锡矿山剖面主量元素分析结果
Table 4 Results of major elements of the samples from the Xikuangshan section

样品号	层位/m	元素含量/%									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
11L1C	0	7.59	2.85	3.91	44.53	1.86	0.26	0.06	0.181	0.098	0.205
11L2C	6.70	4.15	1.23	1.98	49.37	1.02	0.06	0.02	0.139	0.050	0.077
11L3C	11.55	5.11	1.09	1.84	49.04	1.01	0.13	0.02	0.093	0.037	0.057
11L4C	14.60	6.30	2.08	1.45	48.48	0.86	0.29	0.06	0.032	0.080	0.015
11L5C	17.80	12.62	4.91	1.50	43.07	0.84	0.92	0.16	0.032	0.194	0.056
11L6C	20.80	6.90	1.81	0.73	48.74	0.81	0.24	0.04	0.024	0.077	0.018
11L7C	24.50	2.14	0.36	1.09	54.04	0.73	0.03	0.00	0.024	0.014	0.005
11L8C	29.54	6.47	1.85	1.56	49.69	0.91	0.22	0.04	0.069	0.096	0.033
11L9C	33.92	5.53	1.71	1.19	50.82	0.59	0.32	0.04	0.101	0.079	0.042
11L10C	48.58	21.57	8.89	2.21	34.11	0.64	1.80	0.37	0.054	0.332	0.068
11L11C	53.05	21.91	2.28	2.61	41.37	1.49	0.23	0.09	0.120	0.123	0.295
11L12C	59.11	7.76	2.94	1.10	47.72	0.69	0.56	0.11	0.049	0.103	0.049
11L13C	62.11	8.30	3.03	1.38	47.53	0.76	0.54	0.12	0.052	0.107	0.057
11L14C	64.11	7.46	2.52	1.27	48.14	0.72	0.48	0.11	0.050	0.104	0.057
11L15C	67.11	16.20	6.27	2.14	40.31	0.83	1.15	0.28	0.043	0.280	0.072
11L16C	70.11	13.23	3.23	1.30	46.34	0.79	0.51	0.16	0.039	0.190	0.072
11L17C	73.11	8.77	1.05	0.83	51.23	0.76	0.10	0.05	0.030	0.091	0.067
11L18C	78.06	4.62	1.23	0.51	50.98	0.64	0.21	0.05	0.021	0.047	0.020
11L19C	78.86	6.09	1.96	0.90	47.90	1.16	0.24	0.03	0.022	0.071	0.012
11L20C	82.36	12.94	5.38	1.41	42.12	0.86	1.07	0.29	0.027	0.209	0.053
11L21C	85.36	14.51	3.91	1.10	44.44	0.81	0.76	0.12	0.030	0.198	0.087
11L22C	90.15	5.89	1.60	0.55	49.35	0.94	0.28	0.01	0.018	0.054	0.019
11L23C	93.15	3.90	0.72	0.40	52.33	0.74	0.12	0.02	0.012	0.032	0.013
11L24C	96.65	6.87	0.85	0.43	50.02	0.64	0.15	0.00	0.016	0.037	0.061
11L25C	104.96	5.35	1.25	0.59	50.69	0.71	0.24	0.02	0.020	0.053	0.015
11L26C	107.96	4.88	1.04	0.84	51.01	0.72	0.17	0.02	0.023	0.049	0.028
11L39C	110.57	16.16	4.57	1.29	43.19	0.97	1.00	0.15	0.027	0.222	0.064
11L27C	110.71	7.68	1.32	1.09	48.96	0.68	0.24	0.05	0.029	0.069	0.049
11L40C	114.57	23.09	4.48	1.45	40.32	1.10	0.98	0.17	0.033	0.254	0.129
11L41C	116.97	24.18	3.93	1.02	41.52	0.88	0.89	0.16	0.027	0.232	0.136
11L42C	118.82	20.37	3.43	1.04	41.93	1.73	0.71	0.24	0.022	0.238	0.069
11L43C	121.68	16.71	3.07	0.99	45.23	1.10	0.66	0.20	0.027	0.246	0.121
11L44C	124.94	9.20	3.28	1.12	47.31	0.98	0.74	0.10	0.030	0.137	0.051
11L45C	128.43	10.53	4.36	1.51	44.03	1.06	0.95	0.13	0.026	0.147	0.034
11L46C	130.90	10.44	3.25	1.02	47.05	0.86	0.72	0.10	0.025	0.165	0.049
11L47C	134.55	13.89	2.62	1.05	45.96	1.59	0.53	0.13	0.023	0.175	0.020
11L48C	147.73	7.55	2.13	1.18	48.83	1.20	0.42	0.07	0.030	0.124	0.038
11L49C	151.45	7.45	2.56	0.79	48.94	0.78	0.58	0.05	0.027	0.117	0.059
11L50C	154.45	3.54	0.79	0.35	51.95	0.75	0.24	0.07	0.025	0.031	0.092

续表

样品号	层位/m	元素含量/%									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
11L51C	157.45	6.39	1.80	0.57	46.88	2.15	0.47	0.05	0.022	0.065	0.046
11L28C	160.45	4.33	1.13	0.29	51.32	0.54	0.33	0.00	0.020	0.036	0.060
11L29C	165.05	12.63	3.01	1.31	46.12	1.20	0.71	0.10	0.063	0.144	0.077
11L30C	171.37	51.81	3.57	1.27	23.86	1.17	0.34	1.25	0.059	0.379	0.315
11L31C	174.37	19.92	1.31	1.20	45.90	0.95	0.14	0.27	0.109	0.079	0.283
11L32C	176.22	11.81	0.76	0.93	49.01	0.87	0.16	0.07	0.103	0.067	0.153
11L33C	178.72	1.50	0.21	0.12	61.79	0.65	0.07	0.02	0.005	0.010	0.018
11L34C	181.52	13.18	1.28	0.80	48.81	0.86	0.21	0.32	0.067	0.129	0.090
11L35C	185.22	7.81	1.15	0.84	50.70	0.89	0.20	0.12	0.070	0.091	0.087
11L36C	188.11	7.22	1.17	0.81	50.48	0.91	0.25	0.09	0.078	0.096	0.077
11L37C	191.61	30.39	4.99	1.67	33.27	1.48	1.09	0.81	0.060	0.394	0.244
11L38C	205.68	30.03	2.49	0.97	37.89	0.81	0.42	0.80	0.086	0.329	0.276
11L52C	211.18	9.95	1.68	0.85	49.04	0.82	0.37	0.15	0.061	0.147	0.045
11L53C	214.18	44.26	5.31	1.72	26.78	1.13	0.80	1.20	0.067	0.326	0.257
11L56C	219.19	48.92	16.40	4.48	10.32	2.38	4.48	0.35	0.036	0.570	0.296
11L54C	226.04	1.74	0.28	0.38	57.14	0.66	0.07	0.00	0.058	0.012	0.010
11L55C	228.04	5.16	0.86	0.81	48.97	0.63	0.26	0.12	0.046	0.032	0.019
11L57C	232.54	53.30	5.31	1.70	21.42	1.12	0.64	1.57	0.057	0.252	0.288
11L58C	233.85	13.83	3.37	1.74	44.23	1.38	0.75	0.24	0.075	0.195	0.158
11L59C	237.85	11.03	3.03	1.01	46.02	1.40	0.78	0.15	0.040	0.121	0.070
11L60C	240.85	14.09	3.58	1.16	44.01	1.16	0.84	0.24	0.056	0.193	0.104
11L61C	243.85	12.60	4.33	1.17	42.98	1.59	1.25	0.10	0.041	0.181	0.087
11L62C	246.85	5.25	1.65	0.88	48.24	2.29	0.43	0.04	0.043	0.075	0.058
11L63C	255.14	7.28	1.99	0.87	49.13	0.89	0.52	0.03	0.042	0.084	0.053
11L64C	257.51	6.85	2.04	0.85	48.39	1.35	0.60	0.04	0.040	0.091	0.079
11L65C	260.17	8.19	1.69	0.62	47.68	1.04	0.47	0.03	0.037	0.077	0.062
11L66C	262.82	6.88	1.44	0.52	49.30	0.67	0.41	0.02	0.039	0.054	0.041
11L67C	265.47	20.68	5.77	1.69	37.28	1.35	1.43	0.31	0.061	0.338	0.132

说明:“层位”指向下至第 23 层底的距离。

过程中有次生的碳酸盐岩生成,但在水/岩比例很低的情况(对碳同位素而言,近似于封闭系统)下,分馏效应不明显^[33]。因此,对于古生代地层,一般只考虑碳同位素的变化特征。但是,在一个水/岩比例很高的系统中,碳同位素同样会受到成岩改造^[33]。例如,当碳酸盐岩受到大气水影响,碳、氧同位素组成都有可能被改造,这是由于表生环境中有机质的降解会形成大量低 $\delta^{13}\text{C}$ 的 CO_2 , 这些 CO_2 随流体与碳酸盐岩进行交互作用,会使得原岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 变

小^[34]。本文测试的样品大多泥晶含量较高(图 2(c)和(e)~(i)),全岩样品的泥晶基质可能保留了原始海水的地球化学特征^[33]。从岩石薄片来看,胶结或重结晶作用不显著。

通常,依据 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 的相关程度,可以判定碳同位素是否受到成岩改造^[32,35]。原理如下:在一个水-岩交互作用的开放系统中,碳酸盐岩可能会经历胶结作用或大气水成岩作用,由于次生胶结物或大气水携带的同位素信息与原岩不同,因此会

使得原岩的碳、氧同位素组成呈现线性或非线性的协同偏移^[33]。如果 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 相关性强,表明两者均可能受到胶结作用或大气水成岩作用的影响;若二者相关性差,则表明未发生协同变化,当氧同位素在成岩过程中发生改变时,碳同位素受到的后期改造可能较为有限。布龙果尔剖面碳酸盐岩样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 的相关系数为-0.264(样品数为 77),锡矿山剖面碳酸盐岩样品二者的相关系数仅为-0.03(样品数为 79),相关性均不显著(图 4),表明两个剖面样品的碳同位素受胶结作用或大气水成岩改造作用的影响较小。

此外,依据 $\delta^{18}\text{O}$ 可以判定碳酸盐岩样品是否遭受成岩作用蚀变。前人研究认为, $\delta^{18}\text{O}$ 小于-10‰的样品,其碳、氧同位素数据不宜使用; $\delta^{18}\text{O}$ 大于-10‰的样品,其碳同位素组成才可能代表原始特征;对于 $\delta^{18}\text{O}$ 在-10‰~-5‰之间的样品,虽然已遭受轻微蚀变,但是不足以改变其碳同位素的含量特征^[35-39]。布龙果尔剖面 56 个样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 分布范围为-9.9‰~-7.3‰,有 21 个样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 小于-10‰(集中在第 2 层),岩性以生屑灰岩为主(如图 2(d), $\delta^{18}\text{O}$ =-12.7‰)。锡矿山剖面的 $\delta^{18}\text{O}$ 主要分布在-9.8‰~-6.7‰之间,仅 1 个样品(11L66C, 76 层)的 $\delta^{18}\text{O}$ 小于-10‰。上述结果表明,布龙果尔剖面 and 锡矿山剖面的绝大多数样品可能经历了轻微的成岩蚀变作用。然而,由于本文样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 与 $\delta^{13}\text{C}$ 不存在相关性,所以我们认为 $\delta^{18}\text{O}$ 大于-10‰样品的碳同位素仍具有一定的代表性。在恢复剖面的碳同位素变化趋势时,我们剔除了 $\delta^{18}\text{O}$ 小于-10‰的样

品(图 3)。

4.2 洪古勒楞组下段的碳同位素:与前人结果的对比

Suttner 等^[1]分析了布龙果尔剖面的碳同位素变化趋势,他们将所谓的“洪古勒楞组”(相当于本文的洪古勒楞组下段)对应于牙形石 *Pa. linguiformis* 带顶部至 *Pa. marginifera* 带,并认为 *Pa. linguiformis* 与 *Pa. triangularis* 带之交(即 F/F 界线,距底部 2.7 m)处存在正偏移, $\delta^{13}\text{C}$ 的增幅约为 6‰。然而,由于洪古勒楞组底部样品数量有限,其碳、氧同位素的相关系数为 0.98, Suttner 等^[1]认为这反映样品可能遭受成岩改造,无法代表原始海水信息。同时, Suttner 等^[1]的数据中,来自洪古勒楞组底部 11.78 m 地层的 14 个样品,有 11 个的 $\delta^{18}\text{O}$ 小于-10‰,也反映底部遭受成岩蚀变作用。之后, Carmichael 等^[4]对该剖面朱鲁木特组顶部 1 m 与洪古勒楞组底部 6 m 之间(即 Suttner 等^[1]认为的 F/F 界线附近地层)重新进行地球化学分析,结果表明大部分样品都遭受强烈的成岩作用改造,仅少数几个经历过很弱后期改造样品的数据显示洪古勒楞组底部 $\delta^{13}\text{C}$ 存在小于 2‰的正偏移(见文献[4]中图 8),这与本文洪古勒楞组下段底部 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化幅度(图 5)基本上一致。但是,该段地层的碳同位素特征是否印证 Suttner 等^[1]“可与弗拉-法门阶界线附近的碳同位素进行对比”的观点,我们目前仍不敢肯定,因为不同学者对该段地层的时代认识有很大差别。下面就此问题做详细讨论。

前人对弗拉-法门阶界线附近的碳同位素特征

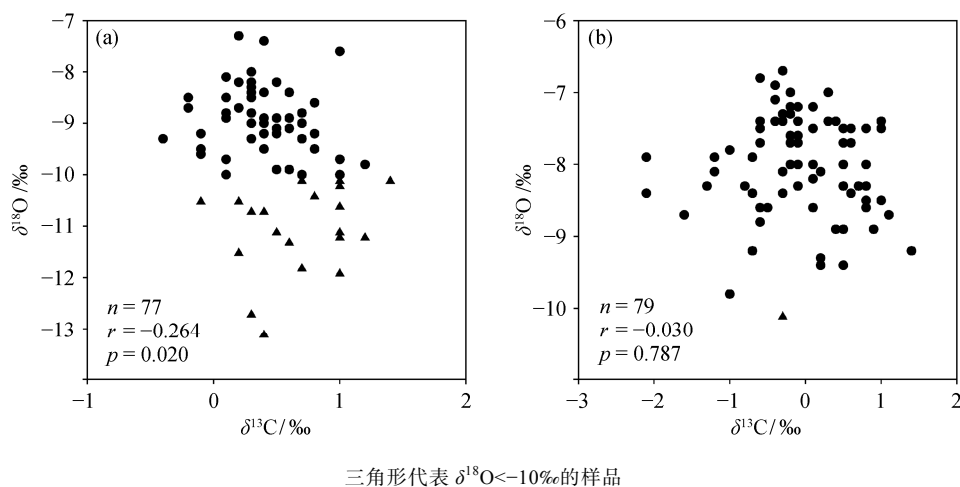
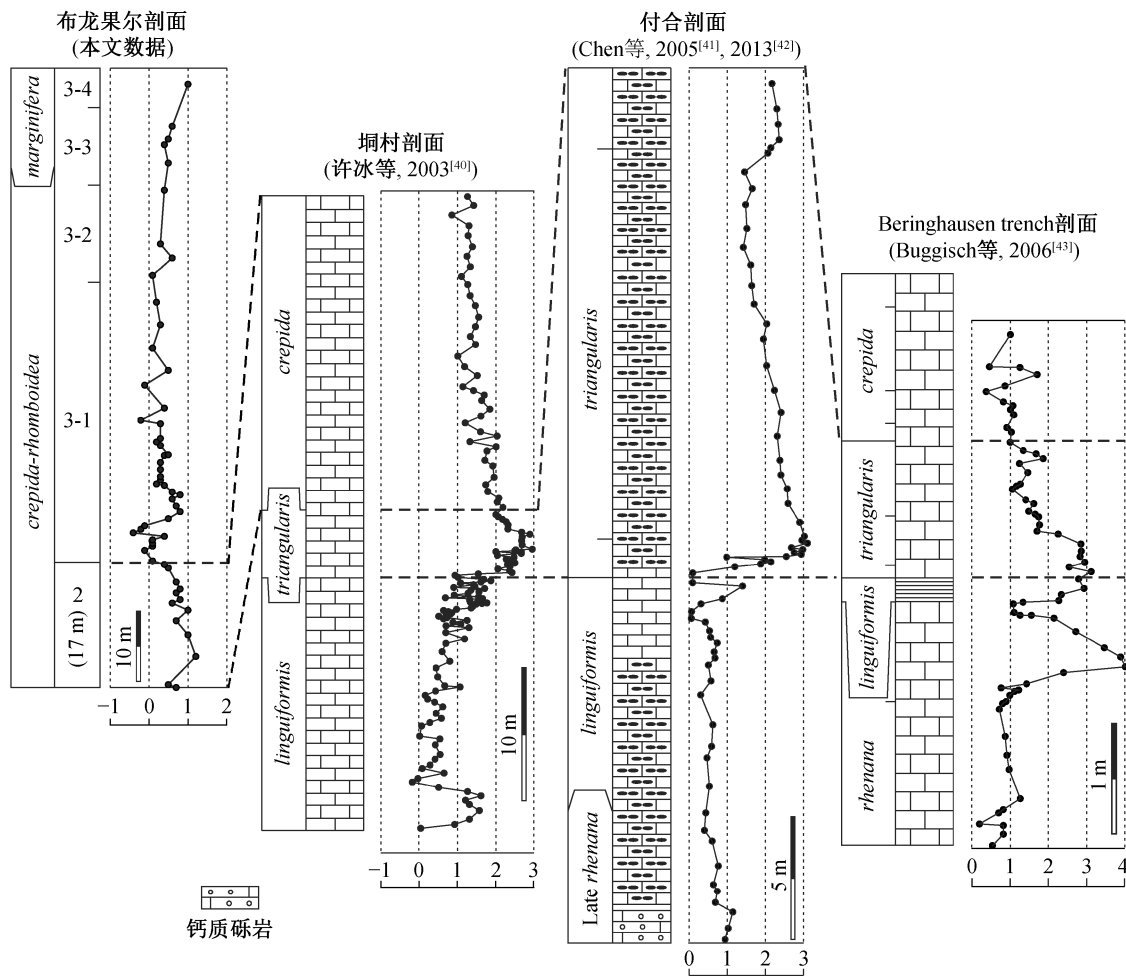


图 4 布龙果尔剖面(a)及锡矿山剖面(b)碳酸盐岩样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 散点图

Fig. 4 Crossplot of the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of carbonate samples from Bulongguoer section (a) and Xikuangshan section (b)



付合剖面及 Beringhausen trench 剖面生物带一栏的短横线表示牙形石带的亚带划分

图 5 布龙果尔剖面与其他剖面弗拉-法门阶界线附近碳同位素对比

Fig. 5 Comparison of carbon isotope curves between the Bulongguoer section and the Frasnian/Famennian boundary interval of other sections

已有大量研究,如 Joachimski 等^[44-46]在欧洲、澳大利亚、北美及北非 F/F 之交识别出 $\delta^{13}\text{C}$ 的两次正偏移,分别出现在牙形石 Upper *Pa. rhenana* 带及 *Pa. linguiformis*/*Pa. triangularis* 带界线上下,最大偏移幅度可达 4‰,并与 Kellwasser 层(岩性为暗色至灰黑色含沥青质页岩及泥晶灰岩)相对应。在我国华南上泥盆统, $\delta^{13}\text{C}$ 的正偏移在 F/F 事件层也有表现。例如,广西桂林桐村 F/F 界线附近,全岩碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 呈现两次显著正偏移^[40,47];湖南老江冲剖面腕足类方解石壳体的 $\delta^{13}\text{C}$ 在 F/F 之交表现为明显增加的趋势^[48-49];湖南锡矿山、广西六景、桂林白沙及杨堤(付合)剖面 F/F 界线附近全岩碳酸盐的 $\delta^{13}\text{C}$ 也呈现正偏移的趋势^[24,41-42,50-52]。并且,在有较好牙形石生物地层控制的剖面,这个正偏往往出现于 F/F 界线之上。因此, F/F 之交 $\delta^{13}\text{C}$ 的正偏

移被认为是全球性的特征。

这里先依据 Suttner 等^[1]建立的地层框架,详细对比洪古勒楞组下段与国内外主要剖面 F/F 之交的碳同位素特征,观察它们是否具有相似性。在牙形石 *Pa. linguiformis* 带与 *Pa. triangularis* 带之交,本文数据显示 $\delta^{13}\text{C}$ 的总体趋势为缓慢下降,大体上在 0~1‰ 范围内; Suttner 等^[1]及 Carmichael 等^[4]的综合数据表明,洪古勒楞组底部 $\delta^{13}\text{C}$ 表现为小于 2‰ 的正偏移。而在湖南锡矿山剖面、广西桐村和杨堤剖面、德国 Beringhausen trench 剖面及摩洛哥 Bou Ouenbdou 剖面, F/F 界线附近以剧烈的低—高—低旋回为特征,尽管正偏移的最大值在上述 5 个剖面出现的位置略有差别,但是偏移幅度基本上一致,皆在 2‰~3‰ 范围内(图 5)。洪古勒楞组下段 $\delta^{13}\text{C}$ 曲线与上述剖面及全球其他剖面(如德国 Benner 剖

地与锡矿山剖面 *Pa. crepida* 带至 *Pa. rhomboidea* 带的碳同位素特征对比。布龙果尔剖面洪古勒楞组下段可能不存在弗拉阶,甚至可能缺失法门早期相当于 *Pa. triangularis* 带的地层。

与德国 Köstenhof 剖面及 Beringhausen trench 剖面^[43]相比,布龙果尔剖面和锡矿山剖面法门早-中期的 $\delta^{13}\text{C}$ 略小(图 6)。锡矿山剖面和 Beringhausen trench 剖面的牙形石 *Pa. triangularis* 带,在经历了 F/F 之交的急剧正偏之后, $\delta^{13}\text{C}$ 皆呈现下降趋势。至 *Pa. crepida* 带,锡矿山剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 显示短暂正偏移,之后持续负偏移;Beringhausen trench 剖面的变化幅度较小,趋势不明显,仅在中部有一快速正偏移。锡矿山剖面 *Pa. rhomboidea* 带的 $\delta^{13}\text{C}$ 先正偏、后负偏,再往上基本不变;相对于锡矿山剖面,德国 Köstenhof 剖面的 *Pa. rhomboidea* 带的地层厚度较小,且 $\delta^{13}\text{C}$ 变化幅度小,但趋势基本上一致。汇总北美(Hackberry Grove, Buseman Quarry 等)、西班牙(Esla area)、西伯利亚(Yaya-Petropavlovskoye)以及中国(余田桥、蒋家桥等)腕足动物壳体的 $\delta^{13}\text{C}$: 在 *Pa. triangularis* 带底部急剧上升(0~3‰),与 F/F 之交变化趋势一致,但从 *Pa. triangularis* 带中部至 *Pa. rhomboidea* 带表现为缓慢下降(从 3‰降低至 1‰)^[53],与锡矿山剖面同期地层的 $\delta^{13}\text{C}$ 不同。上述各剖面 $\delta^{13}\text{C}$ 偏移幅度及持续时间上的差别,可能由开阔大洋与区域构造运动的双重耦合作用导致。

4.4 布龙果尔剖面和锡矿山剖面主量元素的指示意义

主量元素、微量元素及稀土元素组成特征可以反映沉积时水体的氧化还原情况、陆缘碎屑物质的供给情况、生物过程及有机质的来源^[54]。布龙果尔剖面样品的 Al_2O_3 、 TiO_2 和 K_2O 含量略低于锡矿山剖面, Fe_2O_3 和 MnO_2 含量高于锡矿山剖面。布龙果尔剖面 CaO 与 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 TiO_2 强烈负相关 ($r = -0.96, -0.83, -0.77, -0.74; p < 0.001$),表明碳酸盐矿物的沉淀及形成过程受陆源物质的影响较大^[55]。 Fe_2O_3 含量与陆源元素(如 Al_2O_3)正相关 ($r = 0.88, p < 0.001$),表明 Fe_2O_3 含量主要受控于陆源物质供给量^[56]。锡矿山剖面 CaO 与 SiO_2 ($r = -0.94, p < 0.001$), TiO_2 ($r = -0.89, p < 0.001$), Fe_2O_3 ($r = -0.65, p < 0.001$)以及 Al_2O_3 ($r = -0.84, p < 0.001$)强烈负相关,说明碳酸盐岩的生成过程也受到陆源物质的影响。 Fe_2O_3 含量与 Al_2O_3 正相

关($r = 0.71, p < 0.001$),表明 Fe_2O_3 含量受陆源物质的影响。

$\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 比值可以反应铝硅酸盐、Fe、Mn 和 Al 氢氧化合物等陆源沉积物输入海洋环境的程度^[54]。布龙果尔剖面 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 的变化范围为 0.138~0.618,平均 0.406,最大值集中在 3-1 层的下部,表明有较多陆源沉积物输入,这与岩石学观察^[2]一致。锡矿山剖面 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 的变化范围为 0.195~0.747,平均 0.596,总体表现为剖面自下而上, $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Fe}+\text{Mn})$ 逐渐增大,表明越向上,陆源沉积物输入越多。此外,相对于其他层位,在布龙果尔剖面第 3 层下部, $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{MgO})$ 显示更为剧烈的正偏移,表明陆源供给的急剧变化(图 7),推测可能与区域构造活动变强烈有关。

5 结论

本文系统研究了新疆准噶尔盆地西北缘布龙果尔剖面及湘中锡矿山剖面法门期地层中碳酸盐岩全岩样品的碳、氧同位素及主量元素特征,得到如下结论。1) 布龙果尔剖面洪古勒楞组底部样品受成岩改造作用强烈(本文及前人采自该段地层的多数样品 $\delta^{18}\text{O}$ 值小于 -10‰);其余样品尽管经历了轻微的成岩蚀变作用,仍可大致代表原始海水的碳同位素特征。2) 本文建立的布龙果尔剖面洪古勒楞组下段的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势,在考虑成岩作用对该组底部的改造之后,与 Suttner 等^[1]及 Carmichael 等^[4]基本上一致,均与弗拉-法门期之交的变化趋势明显不同,未见到显著正偏移;布龙果尔剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 大体上在 0~1‰范围内变化,远远小于 F/F 之交正偏移的幅度。3) 法门早-中期(牙形石 *Pa. crepida* 带至 *Pa. rhomboidea* 带),布龙果尔剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 变化趋势可与锡矿山剖面同时期进行较好的对比。布龙果尔剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 在第 2 层至第 3 层底部表现为先正偏移、后负偏移,在 3-1 层下部发生正向偏移,3-1 层中部显示小幅下降并基本上稳定,在 3-1 层上部及 3-2 层表现为小幅正偏移。锡矿山剖面与之相对应的 $\delta^{13}\text{C}$,在 *Pa. crepida* 带表现为先升高、后降低,之上在 *Pa. rhomboidea* 带下部表现为正偏移及之后的小幅下降,在 *Pa. rhomboidea* 带上部表现较为稳定。然而,两个剖面的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化趋势并不一致。4) 依据主量元素特征,布龙果尔剖面 3-1 层下部受陆源物质影响较大。

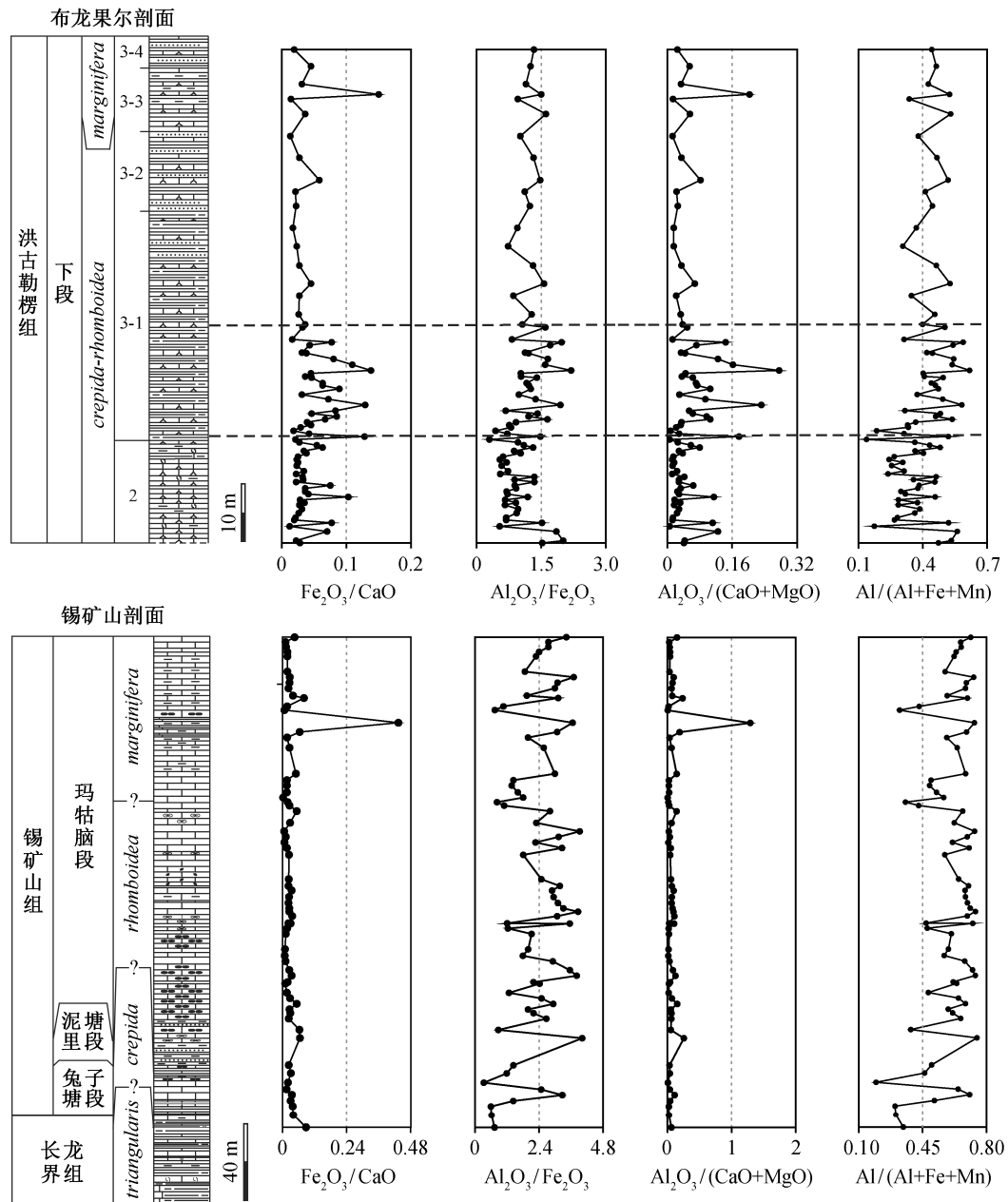


图7 布龙果尔剖面和锡矿山剖面样品的主量元素比值

Fig. 7 Ratios of major elements of the samples from the Bulonguoer and Xikuangshan sections

参考文献

- [1] Suttner T J, Kido E, Chen X Q, et al. Stratigraphy and facies development of the marine Late Devonian near the Boulongour Reservoir, northwest Xinjiang, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 80: 101–118
- [2] Zong Pu, Ma Xueping, Xue Jinzhuang, et al. Comparative study of Late Devonian (Famennian) brachiopod assemblages, sea level changes, and geo-events in northwestern and southern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 448: 298–316
- [3] Fan Ruoying, Gong Yiming. Ichnological and sedimentological features of the Hongguleleng Formation (Devonian-Carboniferous transition) from the western Junggar, NW China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 448: 207–223
- [4] Carmichael S K, Waters J A, Suttner T J, et al. A new model for the Kellwasser anoxia events (Late Devonian): shallow water anoxia in an open oceanic setting in the Central Asian Orogenic Belt. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2016, 448: 207–223

- graphy, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 399: 394–403
- [5] 赵治信, 王成源. 新疆西准噶尔盆地洪古勒楞组的时代. 地层学杂志, 1990, 14(2): 144–146, 1 图版
- [6] 夏凤生. 新疆准噶尔盆地西北缘洪古勒楞组时代的新认识. 微体古生物学报, 1996, 13(3): 277–285
- [7] 马学平, 宗普, 张宇波, 等. 新疆准噶尔盆地西北缘晚泥盆世法门期地层之划分. 地学前缘, 2013, 20(6): 255–268
- [8] Ma Xueping, Gong Yiming, Chen Daizhao, et al. The late Devonian Frasnian-Famennian Event in South China-patterns and causes of extinctions, sea level changes, and isotope variations. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016, 448: 224–244
- [9] Wang Z H, Becker R T, Aboussalam Z S, et al. Conodont and carbon isotope stratigraphy near the Frasnian/Famennian (Devonian) boundary at Wulankeshun, Junggar Basin, NW China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2016, 448: 279–297
- [10] 马学平. 湘中泥盆纪底栖相的弗拉-法门界线的生物地层和事件地层[D]. 北京: 北京大学, 1993
- [11] 宗普. 新疆西准噶尔地区晚泥盆世法门期生物地层及事件[D]. 北京: 北京大学, 2012
- [12] 何国琦, 李茂松, 刘德权, 等. 中国新疆古生代地壳演化及成矿. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1994
- [13] Scotese C R. Atlas of earth history, vol. 1, paleogeography. Arlington: PALEOMAP Project, 2001 [EB/OL]. (2002–04–20) [2014–04–22]. <http://www.scotese.com>
- [14] Hou H F, Lane N G, Waters J A, et al. Discovery of a new Famennian echinoderm fauna from the Hongguleleng Formation of Xinjiang, with redefinition of the formation // Yang Z Y. Stratigraphy and Paleontology of China, vol. 2. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1–18
- [15] Ma Xueping, Zong Pu, Sun Yunlin. The Devonian (Famennian) sequence in the western Junggar area, Northern Xinjiang, China. SDS Newsletter, 2011, 26: 44–49
- [16] 马学平, 宗普, 张美琼, 等. 新疆准噶尔盆地西北缘上泥盆统两个新地层单元. 中国地质, 2015, 42(2): 695–709
- [17] Ma Xueping, Zhang Meiqiong, Zong Pu, et al. Temporal and spatial distribution of the Late Devonian (Famennian) strata in the northwest border of the Junggar Basin, Xinjiang, northwestern China. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2017, 91(4): 1413–1437
- [18] Chen X Q, Mawson R, Suttner T J, et al. Late Devonian (latest Frasnian-Famennian) faunas from the Hongguleleng Formation and the F-F boundary in northern Xinjiang, NW China // Suttner T J, Hubmann B, Piller W E. Berichte des Institutes für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, Band 14: Paleozoic seas symposium. Graz: Institut für Erdwissenschaften, Karl-Franzens-Universität Graz, 2009: 18–20
- [19] Zong P, Becker R T, Ma X P. Upper Devonian (Famennian) and Lower Carboniferous (Tournaisian) ammonoids from western Junggar, Xinjiang, northwestern China — stratigraphy, taxonomy and palaeobiogeography. Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments, 2015, 95: 159–202
- [20] Tien C C. Devonian Brachiopoda of Hunan. Palaeontologia Sinica, New Series B, 1938, 4: 1–192
- [21] 王根贤, 景元家, 庄锦良, 等. 湘中锡矿山地区泥盆纪-早石炭世地层系统. 湖南地质, 1986, 5(3): 48–65; 5(4): 36–50
- [22] Ji Qiang. On the Frasnian-Famennian mass extinction event in South China. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 1989, 117: 275–301
- [23] 季强. 从牙形类研究论华南弗拉斯-法门阶生物绝灭事件//中国地质科学院地层古生物论文集编委会. 地层古生物论文集, 第 24 辑. 北京: 地质出版社, 1994: 79–107
- [24] Bai Shunliang, Bai Zhiqiang, Ma Xueping, et al. Devonian events and biostratigraphy of South China. Beijing: Peking University Press, 1994
- [25] Ma Xueping. The type species of the brachiopod *Yunnanellina* from the Devonian of South China. Palaeontology, 1995, 38: 385–405
- [26] Tan Z X, Dong Z C, Coen M, et al. Famennian and Tournaisian lithostratigraphy of central Hunan, South China. Mémoires de l'Institut Géologique de l'Université de Louvain, 1996, 36: 11–19
- [27] Ma Xueping, Bai Shunliang. Biological, depositional, microspherule, and geochemical records of the Frasnian/Famennian boundary beds, South China. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2002, 181: 325–346
- [28] Ma Xueping, Zhang Yubo, Zhang Meiqiong. Lithologic and biotic aspects of major Devonian events in south China. SDS Newsletter, 2014, 29: 21–33
- [29] Ma Xueping, Sun Yunlin. Brachiopod faunal successions and the subdivision of the Famennian in South China. SDS Newsletter, 2008, 23: 32–34
- [30] McCrea J M. On the isotopic chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. Journal of Chemical Physics. 1950, 18(6): 849–857
- [31] Ma X P, Wang C Y, Racki G, et al. Facies and geochemistry across the Early-Middle Frasnian transi-

- tion (Late Devonian) on South China carbonate shelf: comparison with the Polish reference succession. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, 269: 130–151
- [32] 黄可可, 黄思静, 胡作维, 等. 四川盆地宣汉渡口和重庆北碚下三叠统海相碳酸盐碳同位素组成与演化. *古地理学报*, 2016, 18(1): 101–114
- [33] Marshall J D. Climatic and oceanographic isotopic signals from the carbonate rock record and their preservation. *Geological Magazine*, 1992, 129 (2): 143–160
- [34] Heydari E, Wade W J, Hassanzadeh J. Diagenetic origin of carbon and oxygen isotope compositions of Permian-Triassic boundary strata. *Sedimentary Geology*, 2001, 143: 191–197
- [35] 孙媛媛, 刘俊, 吕涛, 等. 罗平生物群产出层位氧碳稳定同位素的初步研究. *地质学报*, 2009, 83(8): 1110–1117
- [36] Derry L A, Brasier M D, Corfield R M, et al. Sr and C isotopes in Lower Cambrian carbonates from the Siberian craton: a paleoenvironmental record during the “Cambrian explosion”. *Earth and Planetary Sciences Letters*, 1994, 128: 671–681
- [37] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Research*, 1995, 73: 27–49
- [38] Xiao Shuhai, Knoll A H, Kaufman A J, et al. Neoproterozoic fossils in Mesoproterozoic rocks? Chemostratigraphic resolution of a biostratigraphic conundrum from the North China Platform. *Precambrian Research*, 1997, 84: 197–220
- [39] 郅文昆, 张雄华, 杜远生, 等. 华南地区下石炭亚系碳同位素记录及对晚古生代冰期的响应. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40 (11): 1533–1542
- [40] 许冰, 顾兆炎, 刘强, 等. 广西桂林垌村上泥盆统碳同位素正偏移与全球一致性的记录. *科学通报*, 2003, 48(8): 856–862
- [41] Chen Daizhao, Qing Hairuo, Li Renwei. The Late Devonian Frasnian-Famennian (F/F) biotic crisis: insights from $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ isotopic systematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 235: 151–166
- [42] Chen D Z, Wang J G, Racki G, et al. Large sulphur isotopic perturbations and oceanic changes during the Frasnian-Famennian transition of the Late Devonian. *Journal of the Geological Society*, 2013, 170: 465–476
- [43] Buggisch W, Joachimski M M. Carbon isotope stratigraphy of the Devonian of Central and Western Europe. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 240: 68–88
- [44] Joachimski M M, Buggisch W. Anoxic events in the Late Frasnian — causes of the Frasnian-Famennian Faunal crisis. *Geology*, 1993, 21: 675–678
- [45] Joachimski M M, Buggisch W, Anders T. Mikrofazies, Conodontenstratigraphie und Isotopengeochemie des Frasn/Famenn Grenzprofils Wolayer Gletscher (Karnische Alpen). *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 1994, 50: 183–195
- [46] Joachimski M M, Pancost R D, Freeman K H, et al. Carbon isotope geochemistry of the Frasnian-Famennian transition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2002, 181: 91–109
- [47] 顾兆炎, 许冰, 刘强, 等. 华南泥盆纪弗拉期–法门期之交碳酸盐沉积物同位素记录 // 戎嘉余, 方宗杰. 生物大灭绝与复苏: 来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004: 457–472, 1060–1061
- [48] Hou Hongfei, Muchez P, Swennen R, et al. The Frasnian-Famennian event in Hunan province, South China: biostratigraphical, sedimentological, and geochemical evidence. *Mémoires de l'Institut Géologique de l'Université de Louvain*, 1996, 36: 209–229
- [49] 王大锐, 马学平, 董爱正, 等. 晚泥盆世弗拉斯–法门期之交海水温度变化的同位素证据. *地球学报*, 2001, 22(2): 141–144
- [50] 陈代钊, 陈其英, 江茂生. 泥盆纪海相碳酸盐岩碳同位素组成及演变. *岩相古地理*, 1995, 15(5): 22–28
- [51] Chen D Z, Tucker M E, Shen Y N, et al. Carbon isotope excursions and sea-level change: implications for the Frasnian-Famennian biotic crisis. *Journal of the Geological Society, London*, 2002, 159: 623–626
- [52] 曾雄伟, 杜远生, 张哲. 广西六景泥盆系弗拉斯阶–法门阶界线层牙形石生物地层及碳同位素组成. *古地理学报*, 2010, 12(2): 185–193
- [53] Van Geldern R, Joachimski M M, Day J, et al. Carbon, oxygen and strontium isotope records of Devonian brachiopod shell calcite. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 240: 47–67
- [54] Fio K, Spangenberg J E, Vlahović I, et al. Stable isotope and trace element stratigraphy across the Permian-Triassic transition: a redefinition of the boundary in the Velebit Mountain, Croatia. *Chemical Geology*, 2010, 278: 38–57
- [55] 周长勇, 张启跃, 吕涛, 等. 云南中三叠世罗平生物群产出地层的地球化学特征和沉积环境. *地质论评*, 2014, 60(2): 285–298
- [56] 田洋, 赵小明, 王令占, 等. 重庆石柱二叠纪栖霞组地球化学特征及其环境意义. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1035–1045