

云南保山地块香山组和丁家寨组沉积序列与碳同位素研究

罗亮¹,王冬兵¹,尹福光¹,廖世勇²,任飞¹,宁括步¹,唐渊¹

1.中国地质调查局成都地质调查中心,成都 610081

2.中国科学院紫金山天文台,南京 210008

摘要 通过对保山地块北部西邑地区下石炭统香山组和下二叠统丁家寨组详细的野外剖面实测与钻孔编录,并结合层序地层学、沉积相以及碳氧同位素分析结果认为,下石炭统香山组自下向上可分为三个岩性段,分别对应台前斜坡下部、台前斜坡上部、碳酸盐岩台地三种沉积环境。下二叠统丁家寨组为滨岸冰水沉积,下部为冰碛含砾钙质杂砂岩,发育落石构造。下石炭统香山组 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值自下而上逐渐升高,环境可能较稳定,有机质埋藏增加。综合前人古地磁、生物区系对比、大地构造学等研究成果认为早石炭世保山地块较稳定,仍属冈瓦纳大陆北缘。丁家寨组冰碛含砾钙质杂砂岩结束后 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值出现强烈负偏,与研究区冰期结束、早二叠世初次温度上升、大量玄武岩喷发等时限高度一致,共同说明了保山地块在早二叠世开始从冈瓦纳大陆北缘裂解出来,并开始向北漂移。该项研究的开展为探讨 Submasu 地块晚古生代的古海洋、古地理和气候演化具有重要意义,为全球同时期碳氧同位素数据库提供了新资料。

关键词 保山地块;碳同位素;冈瓦纳大陆;沉积序列;古地理

第一作者简介 罗亮,男,1987年生,硕士,地层学、沉积学与微体古生物学,E-mail: lianglegs@126.com

中图分类号 P534 P539 **文献标志码** A

保山地块石炭—二叠系及其生物群(牙形石、珊瑚、腕足动物群)、与之相关的冰碛岩等诸多问题,长期以来备受关注。前人对云南保山地块石炭—二叠系年代学、生物地层学、古地理、古气候等进行了大量的研究,已经取得了较多的进展,主要包括以下几方面:生物年代地层格架的建立^[1-11];古地理格局与演化^[7,11,12-16];重大突变期环境事件记录^[11,17-18]。然而通过晚古生代碳同位素特征系统性研究本区沉积序列与构造古地理演化还较少。

前人研究主要是通过古地磁和岩石年代学、地球化学资料,探讨保山地块从冈瓦纳大陆北缘分离的时期与区域构造响应,但从沉积序列变化及碳同位素响应特征上来反映这一重大事件的研究还较少。本文在对保山地块北部地区晚古生代地层进行详细地野外观测与钻孔编录的基础上,通过岩性岩相学和碳氧同位素特征变化的详细研究,并结合前人的年代学和古地磁研究成果,探讨该区石炭—二叠系沉积序列转化和同位素变化的地层学意义,为进一步深入研究 Submasu 地块石炭—二叠之交的古海洋、构造古地理和气候演化提供了新的资料。

1 地质概况

保山地块古生代—早中生代是一个相对稳定的大陆地块,沉积层序界面与沉积序列特征清晰,其中下石炭统香山组(碳质灰岩、燧石灰岩、生物碎屑灰岩)、下二叠统丁家寨组(含冰碛砾岩和特殊动物群)、下二叠统卧牛寺玄武岩分布广泛。卧牛寺玄武岩系低钾拉斑玄武岩,具有大陆溢流相喷发的特点^[19-21],与下二叠统丁家寨组关系复杂,从野外展布特征以及时代依据(古生物化石和锆石 U-Pb 测年)均指示二者为近同期的产物,卧牛寺玄武岩内部能少见丁家寨组灰岩块(图1C)。因此加强丁家寨组沉积时限与卧牛寺玄武岩喷发时间的研究对保山地块古地理恢复和构造属性具有重要意义。

保山地块位于中国西南滇西地区,东以北澜沧江断裂至柯街—南汀河断裂为界与昌宁—孟连带相邻,西以怒江断裂为界与腾冲地块相邻(图1A,B)。在保山地块内部根据地层发育情况,大体可将其分为三个小区:北部区、南部区及西南区(图1B)^[7,22],本文选择在地质发育最好且化石丰富的北部区开展研究

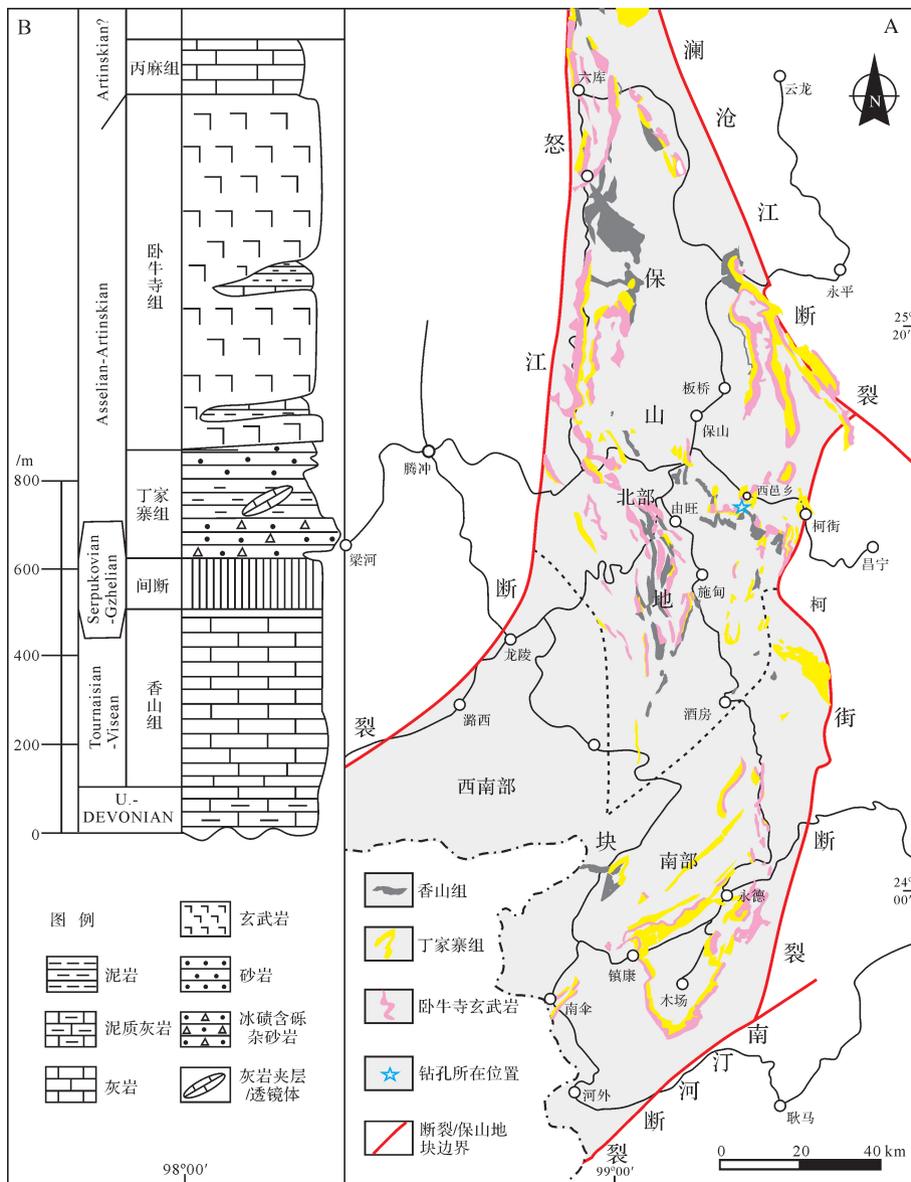


图1 云南保山地块位置及交通图

A. 保山地块香山组、丁家寨组与卧佛寺玄武岩分布略图; B. 石炭系—二叠统地层综合柱状图(据文献[21]修改)

Fig.1 Geographic map and location of Baoshan Block in Yunnan

工作,填补了前人在该区化学地层和沉积环境研究方面的空缺。近年来随着保山市隆阳区西邑乡铅锌矿的发现、大量生物化石的报道、古地磁的深入研究^[13,15],给进一步深入探讨研究区石炭—二叠纪沉积序列、碳氧同位素演化、生物古地理和构造属性等科学问题带来了新的机遇与挑战。

2 沉积特征

下石炭统香山组以含礁型复体珊瑚和高分异度的大型单体珊瑚及丰富有孔虫化石的碳酸盐岩沉积为主。对其时代前人研究较少,王增吉^[23]将香山组分为上下两段,建立了 *Rotiphyllum yudongense-Com-*

mutia crassose plata-Antinkaidia typica 和 *Thuriantha sinensis-Tachylasma shidianense* 组合带,时代应对比于早石炭世杜内—维宪期。本次工作亦在香山组中发现了 *Diphyphyllum hochangpingense* Yü, *Siphonophyllia cylindricalver regularis* Sung, *Siphonophyllia cylindrical gamma* (r) Vaughan, *Siphonophyllia cf. caninvides* (Sibly) 等珊瑚化石,综合考虑其时代应总体属早石炭世维宪期。

本文在大量钻孔编录之后发现香山组沉积在钻孔间可精细对比,区内横向上分布稳定,纵向上可细分为三个岩性段,自下向上海水深度逐步变浅局部有小幅震荡(图2)。

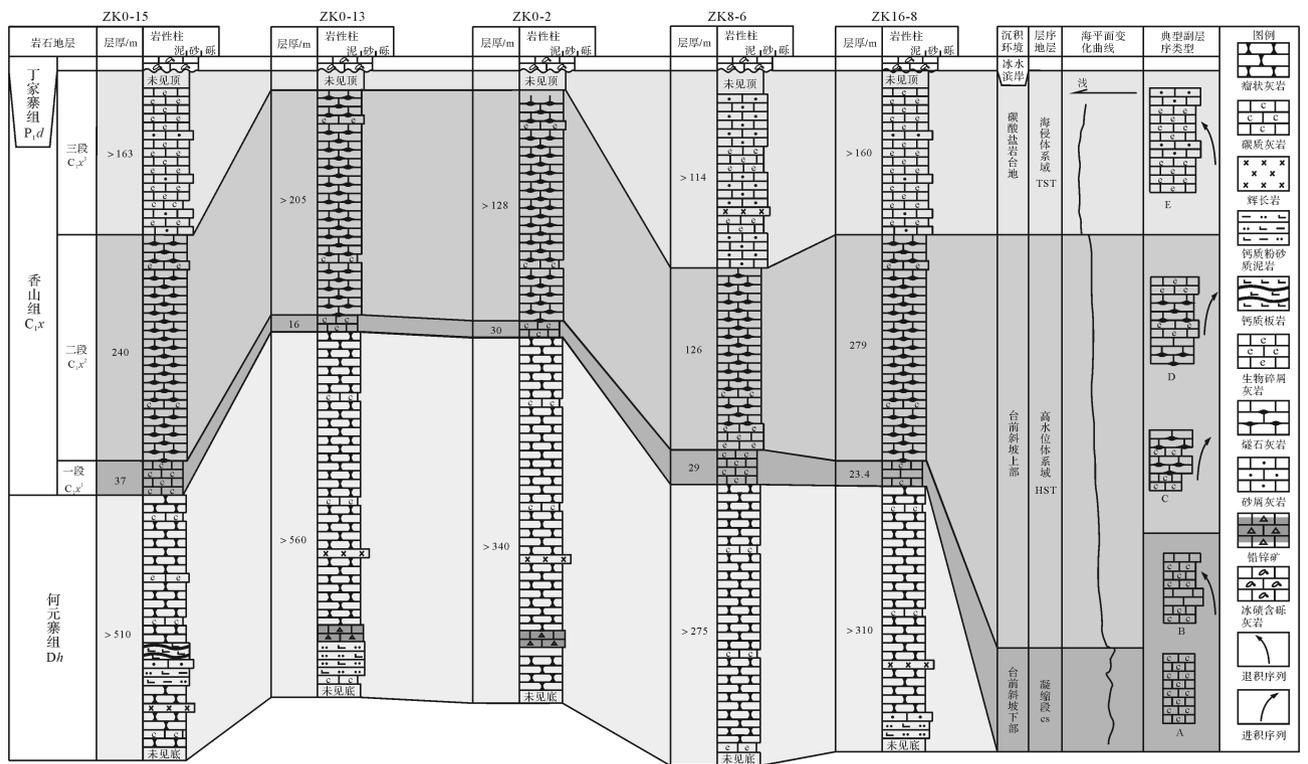


图 2 研究区何元寨组上部和香山组地层划分对比柱状图

A. 碳质灰岩组成的加积型副层序组; B. 碳质灰岩与泥晶灰岩组成的退积型副层序组; C. 碳质灰岩与燧石灰岩组成进积型副层序组; D. 燧石灰岩与生物碎屑岩组成进积型副层序组; E. 生物碎屑灰岩与砂屑灰岩组成退积型副层序组

Fig.2 Correlation of the upper Heyuanzhai Formation and Xiangshan Formation in the study area

香山组一段 (C_1x^1) 为灰黑色含碳质泥灰岩局部夹少量泥晶灰岩, 钻孔照片见图 3b, c, 总厚度约 15~40 m, 滴 5% 的稀盐酸强烈起泡。镜下呈含生屑泥晶结构, 方解石含量 50%~55%, 呈它形粒状, 与粉砂、黏土质混杂分布, 局部因有磷质混杂显黄褐色。陆源砂含量约 10%~15%, 以粉砂为主, 由石英、长石、岩屑、少量白云母等构成, 生屑可见海百合、腕足、介形虫等, 呈散状定向分布, 多被方解石充填。主要由 A 型加积型副层序组构成水体较深、沉积速率慢的凝缩段沉积, 仅在 ZK16-8 中见少量 B 型退积型副层序组夹于 A 型副层序组之间, 组成向上水体逐步变深的沉积序列。根据野外特征和镜下特征认为该段水体深度总体较大, 沉积环境应该位于台前斜坡下部 (图 2), 发育典型的滑塌变形层理 (图 3a)。

香山组二段 (C_1x^2) 为灰色含燧石泥晶灰岩, 夹碳质灰岩、生物碎屑灰岩, 厚约 120~300 m, 钻孔和野外区分标志主要为燧石灰岩 (图 3f)。燧石团块镜下观察呈隐晶状结构, 硅质含量约 85%~90%, 由隐晶—微粒状玉髓构成, 粒径一般 <0.01 mm, 多无明确的个体边界。主要发育碳质灰岩与燧石灰岩组成 C

型副层序组和生物碎屑灰岩与燧石灰岩组成的 D 型副层序组, 形成向上水体逐步变浅的高水位体系域沉积。该段沉积水体深度较一段明显要浅, 沉积环境位于台前斜坡上部 (图 2), 可见滑塌角砾岩和滑塌变形层理 (图 3d, e, g)。

香山组三段 (C_1x^3) 为灰色生物碎屑灰岩、砂屑灰岩, 见珊瑚、腕足、有孔虫等化石 (图 3i~l)。含泥质生屑泥晶结构, 方解石含量 60%~65%, 呈它形粒状, 主为粒径 <0.01 mm 的泥晶, 0.01~0.05 mm 的粉晶少量。生屑含量约 25%, 可见海百合、腕足、介形虫、藻类等 (图 3m, n, o), 呈散状定向分布, 被方解石充填。陆源砂含量约 5%, 由石英、长石、岩屑、少量白云母等构成, 主显尖棱角状、棱角状, 有的被方解石交代。该段主要由多个生物碎屑灰岩夹砂屑灰岩组成 E 型副层序组构成, 总体沉积环境应为碳酸盐岩台地, 形成向上变细的沉积序列, 体现了水体深度逐步变大的趋势, 为多个退积型副层序组构成的海侵体系域沉积。

丁家寨组时代曾存在长期争论, 在系统研究牙形石、筴类、腕足类、孢粉植物群等化石之后, 将该组冰



图3 香山组野外和显微镜下照片

a~c.香山组一段(a.滑塌变形层理;b,c.含碳质灰岩);d~g.香山组二段(d.滑塌变形沉积;e, g.滑塌角砾;f.燧石灰岩);h.香山组铅锌矿;
i~l.香山组珊瑚化石;m.香山组二段生屑灰岩镜下照片;n,o.香山组三段生屑灰岩镜下照片

Fig.3 Field and microscopic images of the Xiangshan Formation

质含砾钙质杂砂岩之上的灰岩时代限定到 Sakmarian—早 Artinskian 期,整个丁家寨组时代大致应从 Asselian 晚期—Artinskian 早期^[1-11]。

下二叠统丁家寨组根据野外剖面实测和路线地质调查可知,其下部为一套灰色—深灰色厚块状冰碛含砾钙质杂砂岩(图4a,b,c),间夹少量生物碎屑灰岩、碳质板岩、泥岩、细砂岩等。冰碛钙质含砾杂砂岩野外特征为砾石含量约5%~15%,砾石主要成分为石英、石英砂岩、灰岩、玄武岩等,呈次棱角—次圆状,分选较差,粒径0.2~35 cm不等,以0.3~1 cm居多。镜下呈含细砾生屑结构,生屑主要见海百合、腹足、苔藓虫等(图4e,f,g),个体多较粗大,直径一般0.2~

6.0 mm,具定向排列,被方解石充填。亮晶方解石呈它形粒状,粒径0.2~2.0 mm,充填于生屑之间。陆源砂砾含量45%~60%,主见石英,少见长石、岩屑等,多呈棱角状、次棱角状,大小以0.05~0.25 mm的细砂为主,滴5%的稀盐酸强烈起泡。在编录钻孔时能见到冰碛砾石压弯层理形成典型的落石构造(图4a),综上所述认为丁家寨组—中部为滨岸冰水沉积环境。

3 碳同位素地层

本次采集的样品均来自岩芯,在野外采样和室内利用牙钻取粉末样过程中尽可能避免次生裂隙、方解石脉以及后期次生作用改造的影响,共采集了10

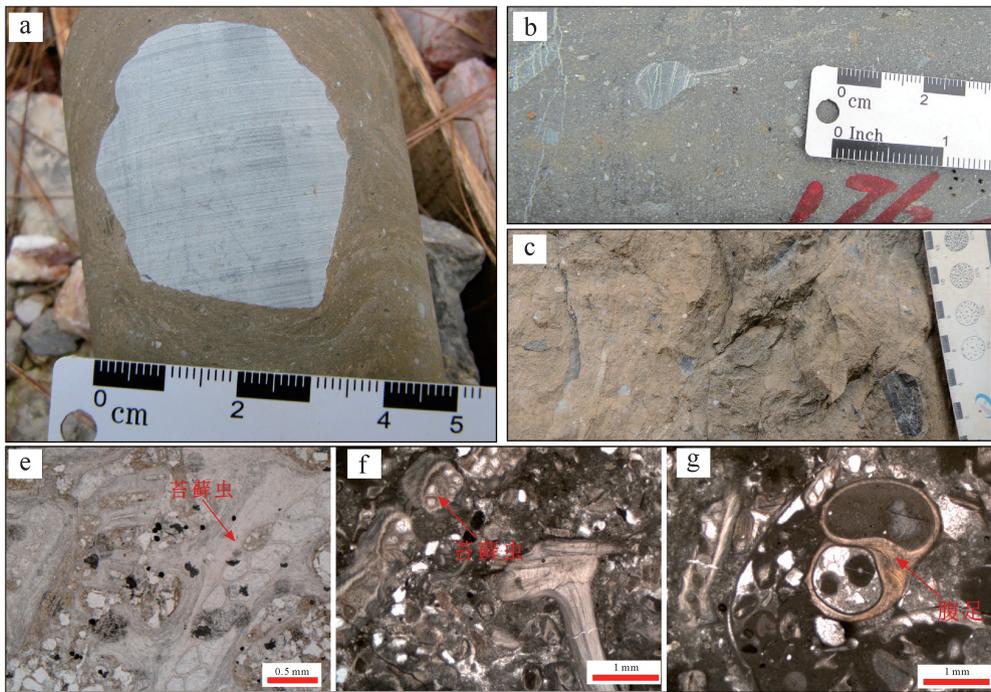


图4 丁家寨组钻孔照片以及显微镜下照片

a,b,c.丁家寨组(a:落石构造—撞击构造,冰坠石压弯层理;b,c.丁家寨组冰碛钙质含砾杂砂岩钻孔和野外照片);d,e,f.丁家寨组钙质含砾杂砂岩镜下生屑照片

Fig.4 Borehole photographs and microscopic images of Dingjiazhai Formation

炭统香山组和下二叠统丁家寨组的42块样品做碳氧同位素测试。碳氧同位素数据均在中国科学院南京地质古生物研究所国家重点实验室测得,使用的仪器为同位素质谱仪,主机:MAT-253,制样系统:Kiel IV Carbonate Device,实验室控制室温:22℃±1℃;湿度:50%RH±5%。分析精度要求为: $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 标准偏差小于0.040‰; $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 测定值标准偏差小于0.080‰。并对其中 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值迅速变化的样品进行了二次测试,以保证数据的可靠性(测试数据见表1)。

岩石中碳酸盐岩的氧同位素组成对沉积期后的变化最为灵敏,它们若与大气和热水发生同位素交换,其 $\delta^{18}\text{O}$ 数值将明显减低,一般情况下当碳酸盐岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 小于-5‰(VPDB)时表示已受蚀变作用影响,但不足以改变碳同位素的成分和含量,但当 $\delta^{18}\text{O}$ 小于-10‰时岩石已发生强烈的蚀变,样品的碳同位素可靠性较差^[24-29]。而Kaufman *et al.*^[30]则认为应当将 $\delta^{18}\text{O}$ 小于-11‰作为界值,此次42组数据中 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要分布在-10‰~0,平均为-8.34‰,仅极少数样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值小于-11‰,后面将其剔除不参与结果讨论。一般认为,如果样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值呈正相关,则表明可能受到成岩作用影响^[26,31-33]。通过建立

碳、氧同位素相关性散点图(图5),可以看出碳、氧同位素数据线性相关性极差,且香山组几乎所有样品都投在原生海水埋藏成岩胶结区,但丁家寨组部分样品既没有落在原生海水埋藏成岩胶结区也没在含膏盐等潟湖成岩区,这可能与其属冰期沉积物不无关系。

本文共获测试数据42组,其中香山组19组,香山组下伏的何元寨组顶部3组,丁家寨组20组,测试数据见表1,根据钻孔编录和测试数据绘制了ZK320-2和Zk16-8的 $\delta^{13}\text{C}$ 数值变化曲线(图6)。

ZK16-8中香山组从一段到三段碳同位素变化具有很好的规律性, $\delta^{13}\text{C}$ 值自下向上总体呈上升趋势,从最低的2.09‰上升到最高的5.52‰(图6)。其下伏的何元寨组 $\delta^{13}\text{C}$ 含量整体较低,从1.27‰到2.88‰,向上过渡到香山组一段, $\delta^{13}\text{C}$ 含量持续较低,从2.09‰到2.76‰。香山组二段 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比香山组一段有所升高,整体较为稳定,局部小幅震荡,保持在3.06‰~3.36‰之间。香山组三段 $\delta^{13}\text{C}$ 数值增大,表现为一个明显正向偏移,最大值达5.52‰(图6、表1)。但 $\delta^{13}\text{C}$ 高值并未持续到香山组顶部,在三段上部出现了急剧下降,最低值到1.42。

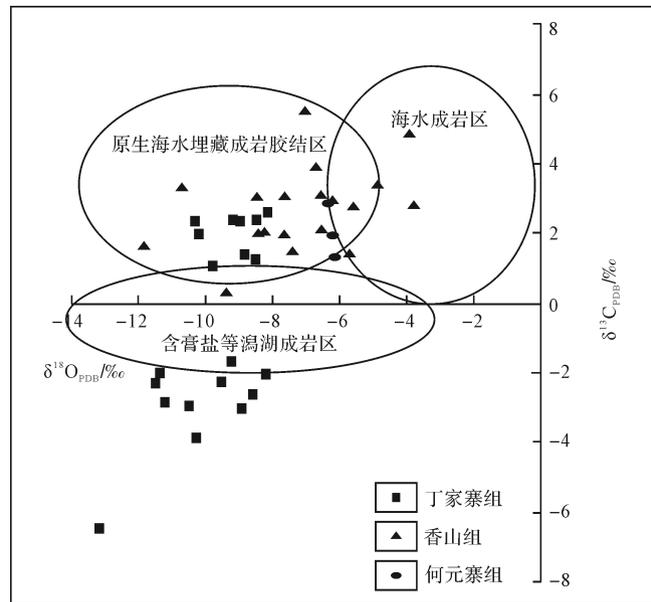
ZK320-2中下部香山组顶部 $\delta^{13}\text{C}$ 整体处于较低水平,局部波动较强,其值维持在0.36‰~3.06‰之

表1 保山西邑地区香山组、丁家寨组碳氧同位素值测试结果

Table 1 Carbon and oxygen isotope of the Xiangshan and Dingjiazhai Formations in Xiyi area, Baoshan Block

序号	地层	样品编号	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
1	丁家寨组	ZK320-2-1-01	-6.480	-13.169
2	丁家寨组	ZK320-2-2-01	-2.627	-8.594
3	丁家寨组	ZK320-2-2-02	-2.950	-10.490
4	丁家寨组	ZK320-2-3-03	-2.311	-11.487
5	丁家寨组	ZK320-2-3-04	-1.698	-9.233
6	丁家寨组	ZK320-2-4-02	-2.867	-11.211
7	丁家寨组	ZK320-2-4-04	-2.289	-9.523
8	丁家寨组	ZK320-2-5-02	-2.009	-11.353
9	丁家寨组	ZK320-2-5-03	-3.851	-10.273
10	丁家寨组	ZK320-2-6-03	1.063	-9.793
11	丁家寨组	ZK320-2-6-04	-2.041	-8.194
12	丁家寨组	ZK320-2-6-05	-3.029	-8.919
13	丁家寨组	ZK320-2-7-01	2.002	-10.191
14	丁家寨组	ZK320-2-7-03	2.375	-10.300
15	丁家寨组	ZK320-2-7-04	2.381	-9.175
16	丁家寨组	ZK320-2-7-05	2.358	-8.959
17	丁家寨组	ZK320-2-7-07	2.599	-8.157
18	丁家寨组	ZK320-2-7-08	1.244	-8.519
19	丁家寨组	ZK320-2-7-09	2.391	-8.464
20	丁家寨组	ZK320-2-7-10	1.403	-8.841
21	香山组	ZK320-2-8-01	1.513	-7.410
22	香山组	ZK320-2-8-02	2.075	-8.237
23	香山组	ZK320-2-8-04	1.971	-7.662
24	香山组	ZK320-2-8-05	1.995	-8.413
25	香山组	ZK320-2-8-07	3.057	-8.467
26	香山组	ZK320-2-8-08	0.355	-9.401
27	香山组	ZK16-8-1-02	2.807	-3.780
28	香山组	ZK16-8-2-01	1.424	-5.701
28	香山组	ZK16-8-3-03	3.910	-6.716
30	香山组	ZK16-8-4-01	5.519	-7.037
31	香山组	ZK16-8-5-02	4.844	-3.927
32	香山组	ZK16-8-6-02	1.604	-11.832
33	香山组	ZK16-8-6-03	2.955	-6.215
34	香山组	ZK16-8-6-04	3.059	-6.555
35	香山组	ZK16-8-7-01	3.308	-10.704
36	香山组	ZK16-8-7-03	3.363	-4.878
37	香山组	ZK16-8-7-05	3.055	-7.641
38	香山组	ZK16-8-7-08	2.755	-5.596
39	香山组	ZK16-8-8-01	2.093	-6.551
40	香山组	ZK16-8-9-01	1.371	-6.139
41	香山组	ZK16-8-9-02	2.875	-6.356
42	香山组	ZK16-8-9-03	1.970	-6.213

间,主体位于 1.51‰~1.99‰之间。与 ZK16-8 香山组三段上部 $\delta^{13}\text{C}$ 值基本一致。丁家寨组 $\delta^{13}\text{C}$ 变化呈现出极强的规律性,下部冰碛钙质含砾杂砂岩中 $\delta^{13}\text{C}$ 值整体较稳定,从最下部 1.40‰缓慢增加到上部的 2.0‰,其间有小幅波动。从 ZK320-2-7-01 到 ZK320-2-6-05, $\delta^{13}\text{C}$ 值发生了明显负偏,并且 ZK320-2-6-05 之

图5 保山西邑香山组、丁家寨组碳酸盐岩碳—氧同位素分布图^[34]Fig.5 Cross plot of the carbonate $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in the Xiangshan and Dingjiazhai Formations in Xiyi area, Baoshan Block^[34]

上一直到丁家寨组中上部灰岩中 $\delta^{13}\text{C}$ 值波动较大,但持续较低,主体位于 -2.0‰~-3.0‰之间。

综上所述,对香山组和丁家寨组中 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势进行总结后可以得到以下两点规律和认识: 1) 香山组从下到上 $\delta^{13}\text{C}$ 值有逐渐变大的趋势,在香山组三段下部有一个 1.60‰~5.52‰正向漂移。但到三段上部 $\delta^{13}\text{C}$ 又快速回到较低水平。2) 丁家寨组冰碛钙质含砾杂砂岩结束之后出现一个从 2.0‰~-3.03‰的负漂移。本文对其中 $\delta^{18}\text{O}$ 值小于 -11‰的 ZK320-2-1-01、ZK320-2-3-03、ZK320-2-4-02、ZK320-2-5-02、ZK16-8-6-02 样品测试结果进行了筛除。

4 讨论

保山地块石炭—二叠纪的生物地层、古构造位置、晚古生代地层序列一直是地质学研究的热点问题。笔者在钻孔岩芯编录、野外剖面实测的基础上结合前人研究报道认为保山地块下石炭统和下二叠统发育较好,其间由于受到 Namurian 抬升运动的影响,缺失了晚石炭世沉积^[7]。

部分学者认为保山地块在石炭—二叠纪时为一个独立的地块。王训练等^[14]指出石炭纪到二叠纪时保山地块作为一个中间地块远离冈瓦纳大陆,只有晚石炭世冰川规模最大时二者才能相互影响。保山地块的孢粉研究结果显示,丁家寨组的孢粉植物群并非

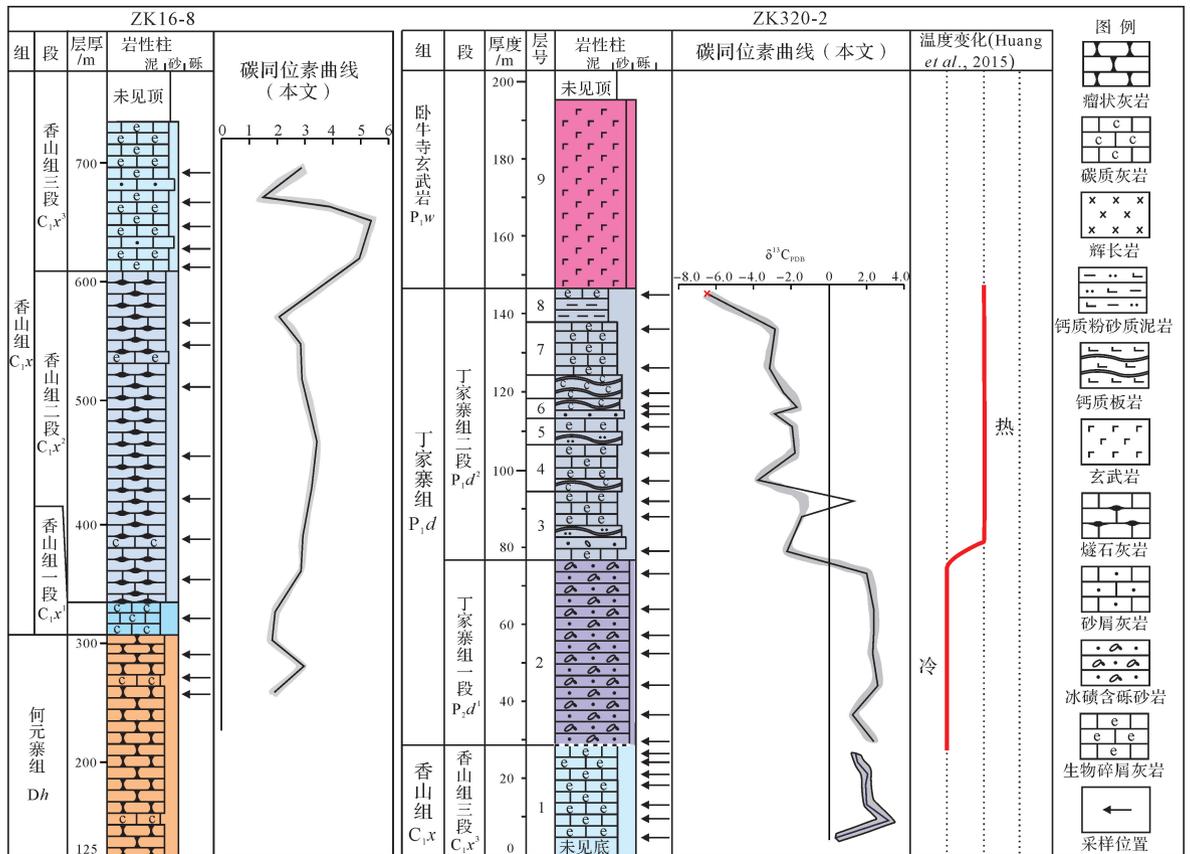


图6 钻孔 Zk16-8、ZK320-2 碳同位素变化曲线图

Fig.6 $\delta^{13}C$ profiles of Borehole ZK16-8 and ZK320-2

典型的冈瓦纳孢粉植物群,而是一个具有较浓澳大利亚色彩的混生型微古植物群,或者说是具有一定北方色彩的亲澳大利亚孢粉植物群^[6]。

另一方面,保山地块在早二叠世及以前作为冈瓦纳大陆的一部分已被广泛报道,并取得了多方面的证据。黄汲清等^[35]指出古特提斯在二叠纪时最宽,由于早二叠世和中二叠世冈瓦纳北缘地块迅速向北漂移,使楔形的古特提斯洋逐渐变窄,最后于晚二叠世消亡。保山地块石炭—二叠纪的动物群较多地显示了混合特点,故认为早二叠世研究区属冈瓦纳区,晚二叠世属热带特提斯区系^[12,35]。前人通过对保山地区下二叠统丁家寨组下部“杂砾岩”的沉积学研究和该区二叠纪早期的生物古地理研究,认为保山地块在二叠纪可能为亲冈瓦纳地块群,之后迅速北移,至晚二叠世进入赤道低纬度地区。丁家寨组上部碳酸盐岩中广义的苔藓虫—棘皮骨屑颗粒组合应为温凉水沉积环境成因,它是保山地块当时的构造古地理位置(冈瓦纳大陆北缘)以及冰川后期环境特征的反映^[17]。本文在保山市隆阳区西邑乡发现下二叠统丁

家寨组仅下部裸露冰碛钙质含砾杂砂岩其上部主体为碎屑岩,这与泰国西部和南部及澳大利亚悉尼盆地南部二叠统下部特征基本相似,都反应出由冈瓦纳相向特提斯相的转变。

Wang *et al.*^[36]亦在南亚和澳大利东北缘悉尼盆地的下二叠统中发现具有典型特征的无隔壁有皱纹的珊瑚动物群。柱状珊瑚动物群指示一种冷水或凉水的浅海环境,常被作为是一种冰海沉积或混生沉积的证据。Xu *et al.*^[15]通过古地磁测试和分析前人报到的数据,认为保山地块在早二叠世晚期古纬度位于 $38^{\circ}S \pm 3.7^{\circ}$,在与冈瓦纳大陆进行对比分析后发现保山地块位于印度北缘和澳大利亚西北缘的结合部位,在早二叠世之后从澳大利亚西缘肢解出来的。通过碎屑锆石物源示踪表明,羌塘—保山地块南缘的海相冰碛杂岩由冰伐和海相沉积物再次搬运沉积而成,他们是石炭—二叠纪冈瓦纳冰川作用的产物^[16]。

碳同位素数据变化显示下石炭统香山组从下至上 $\delta^{13}C$ 值有逐渐增大的趋势,一般解释为有机质埋藏增加,且香山组从下向上生物化石含量递增,由此

说明该时期保山地块环境较稳定,生物逐渐适应并发展壮大。晚石炭世地层缺失之后向上过渡到下二叠统丁家寨组,其 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 ZK320-2-6-05 样品附近发生了明显负偏,在该样品之上 $\delta^{13}\text{C}$ 持续较低,这与保山地块当时处于冈瓦纳大陆北缘经受了长期的冰期气候不无关系。地球上多次冰川发育之后,海洋中有机质大幅降低, $\delta^{13}\text{C}$ 值出现普遍负偏:古元古代冰期^[37]、大陆冰川 Gaskiers 冰期^[38]、Marinoan 冰期^[39-42]、南沱冰期^[43-44]。全球范围内几乎所有的冰期均与沉积岩中碳同位素负异常存在某种联系^[45-47]。

丁家寨组下部冰碛钙质含砾杂砂岩沉积期冰川发育,受到低等生物的繁盛程度以及海水含氧量变化等因素影响,造成冰碛结束时沉积的碳酸盐岩中 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低,Liao *et al.*^[21]将卧牛寺玄武岩的时限精确限定在 301~282 Ma 之间,并认为卧牛寺玄武岩省与印度冈瓦纳边缘同期的玄武岩(包括来自 Panjal Traps、波特科西河、色龙、拉萨、南羌塘等)组成同一个大的地幔柱为东基梅里陆块(包括羌塘北部、滇缅马)从冈瓦纳大陆北东缘裂解过程提供了动力源。卧牛寺玄武岩与丁家寨组的关系和时代较复杂,曾存在长期的争论,卧牛寺组命名剖上可见碎屑岩及灰岩夹层,其中的筵类等化石与丁家寨组一致^[21, 48],由此推测晚石炭—早二叠世早期大量玄武岩集中喷发,促使保山地块在早二叠世早期从冈瓦纳大陆北缘裂解出来,丁家寨组中 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现强烈负偏可能是对该过程的沉积响应。

聂飞等^[49]认为保山西邑铅锌矿床的成矿热液很可能形成于晚古生代保山地块从冈瓦纳裂离这一重大环境突变时期。Huang *et al.*^[11]指出保山地块 Sakamarian-Yakhtashian 期筵类有孔虫与所谓的冈瓦纳型 *Kalaktash* 组合具有极强的相关性,因此保山地块的大地构造位置应归属冈瓦纳区,其初次升温是发生在 Asselian 末期到 Sakamarian 初期。该升温时期应该与本文中 $\delta^{13}\text{C}$ 值在丁家寨组冰期钙质含砾杂砂岩结束后出现强烈负偏时期相对应(图6)。因此我们不难看出研究区 $\delta^{13}\text{C}$ 值突然负偏与冰期结束、海水温度上升、大面积玄武岩喷发等时限基本一致,有力地说明了保山地块在 Sakamarian 期之后逐渐从澳大利亚东北缘裂解出来。

5 结论

(1) 对保山地块北部西邑地区下石炭统香山组

和下二叠统丁家寨组进行详细地野外观测与钻孔编录的基础上,结合碳氧同位素分析测试,发现香山组沉积环境自下向上可分为三个岩性段,共识别出碳酸盐岩台地、台前斜坡上部、台前斜坡下部等三个沉积环境。下二叠统丁家寨组为滨岸冰水沉积。

(2) 下石炭统 $\delta^{13}\text{C}$ 值自下向上逐渐升高,同时香山组上部产出大量珊瑚、腕足、有孔虫等化石,说明环境较稳定,生物适应之后大量繁盛。综合前人古地磁、生物区系等研究成果认为早石炭世时保山地块较稳定,仍属冈瓦纳大陆北缘。

(3) 丁家寨组冰碛含砾钙质杂砂岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现强烈负偏,与研究区冰期结束、早二叠世初次温度上升、大量玄武岩喷发等时限一致,共同说明了保山地块在早二叠纪开始从冈瓦纳大陆北缘裂解出来,并开始向北漂移,该裂解过程很可能为保山西邑大型铅锌矿提供了热液来源。

致谢 云南省地质矿产勘查院孟付军、周育鹏等在野外和钻孔编录时给予了很大帮助;中国科学院南京地质古生物研究所国家重点实验室陈小明等在 C、O 同位素测试过程中付出了辛勤劳动,成都地质调查中心范影年研究员在珊瑚化石鉴定上作出了较大贡献;在文章构思和成文过程中曾与成都调查中心的安显银工程师、中国地质大学的徐国真博士等进行了有益探讨;审稿人提出了较多中肯意见,修改之后使文章整体质量有了很大的提高,在此一并致以衷心的感谢。

参考文献(References)

- [1] 聂泽同,宋志敏,姜建军,等.滇西亲冈瓦纳相生物群特征及地层时代的重新厘定[J].现代地质,1993,7(4):384-393.[Nie Zetong, Song Zhimin, Jiang Jianjun, et al. Biota features of the Gondwana affinity facies and review of their stratigraphic ages in the western Yunnan[J]. Geoscience, 1993, 7(4): 384-393.]
- [2] Shi G R, Fang Z J, Archbold N W. An Early Permian brachiopod fauna of Gondwanan affinity from the Baoshan block, western Yunnan, China[J]. Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology, 1996, 20(2): 81-101.
- [3] Wang X D, Tetsuo S, Fang R S. Carboniferous and Permian coral faunas in West Yunnan, Southwest China: implications for the Gondwana/Tethys divide[J]. Bulletin of Tohoku University Museum, 2001, 1: 265-268.
- [4] Wang X D, Sugiyama T. Permian coral faunas of the eastern Cimmerian Continent and their biogeographical implications[J]. Journal of Asian Earth Science, 2002, 20(6): 589-597.
- [5] Shen S Z, Shi G R, Zhu K Y. Early Permian brachiopods of Gondwana affinity from the Dingjiazhai Formation of the Baoshan Block,

- Western Yunnan, China[J]. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 2000, 106(3): 263-282.
- [6] 方宗杰,王玉净,石光荣,等. 滇西保山地区丁家寨组生物群的时代:兼评化石再沉积假说[J]. *古生物学报*, 2000, 39(2): 267-278. [Fang Zongjie, Wang Yujing, Shi Guangrong, et al. On the age of the Dingjiazhai Formation of Baoshan Block, western Yunnan, China-with a discussion on the redepositon hypothesis[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2000, 39(2): 267-278.]
- [7] 王向东, Sugiyama T, Ueno K, et al. 滇西保山地区石炭纪、二叠纪古动物地理演化[J]. *古生物学报*, 2000, 39(4): 493-506. [Wang Xiangdong, Sugiyama T, Ueno K, et al. Carboniferous and Permian zoogeographical change of the Baoshan Block, southwest China[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2000, 39(4): 493-506.]
- [8] Ueno K, Mizuno Y, Wang X D, et al. Artinskian conodonts from the Dingjiazhai formation of the Baoshan block, West Yunnan, Southwest China[J]. *Journal of Paleontology*, 2002, 76(4): 741-750.
- [9] Ueno K. The Permian fusulinoid faunas of the Sibumasu and Baoshan Blocks their implications for the paleogeographic and paleoclimatologic reconstruction of the Cimmerian Continent[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2003, 193(1): 1-24.
- [10] 王伟,董致中,王成源. 滇西保山地区丁家寨组、卧牛寺组牙形刺的时代[J]. *微体古生物学报*, 2004, 21(3): 273-282. [Wang Wei, Dong Zhizhong, Wang Chengyuan. The conodont ages of the Dingjiazhai and Woniusi Formations in the Baoshan area, western Yunnan[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2004, 21(3): 273-282.]
- [11] Huang H, Shi Y K, Jin X C. Permian fusulinid biostratigraphy of the Baoshan Block in western Yunnan, China with constraints on paleogeography and paleoclimate[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 104: 127-144.
- [12] 方宗杰. 滇缅马生物区系及其在古特提斯中的位置[J]. *古生物学报*, 1991, 30(4): 511-532. [Fang Zongjie. Sibumasu biotic province and its position in paleotethys[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1991, 30(4): 511-532.]
- [13] 叶祥华, 巩满福, 朱夔玉, 等. 保山地块晚石炭世玄武岩古地磁研究及构造归属的新认识[J]. *成都地质学院学报*, 1993, 20(1): 87-92. [Ye Xianghua, Gong Manfu, Zhu Kuiyu, et al. Paleomagnetic research on the upper Carboniferous basalt and new knowledge of the tectonic belonging of Baoshan massif in Yunnan[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1993, 20(1): 87-92.]
- [14] 王训练, 加藤诚, 王鸿祯. 论保山地区晚古生代大地构造位置[J]. *地球学报*, 1994, 15(3/4): 130-144. [Wang Xunlian, Jia Tengcheng, Wang Hongzhen. On the tectonic position of the Baoshan region during late Palaeozoic period[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1994, 15(3/4): 130-144.]
- [15] Xu Y C, Yang Z Y, Tong Y B, et al. Further paleomagnetic results for lower Permian basalts of the Baoshan Terrane, southwestern China, and paleogeographic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 104: 99-114.
- [16] Fan J J, Li C, Wang M, et al. Features, provenance, and tectonic significance of Carboniferous-Permian glacial marine diamictites in the Southern Qiangtang-Baoshan block, Tibetan Plateau [J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(4): 1530-1542.
- [17] 颜佳新, 梁定益, 伍明. 滇西保山地区二叠纪碳酸盐岩地层古气候学研究[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(11): 1076-1083. [Yan Jiaxin, Liang Dingyi, Wu Ming. Permian carbonates of Baoshan block, western Yunnan and their paleoclimatic implications [J]. *Science China Earth Sciences*, 2003, 33(11): 1076-1083.]
- [18] Yan J X, Liang D Y. Early and Middle Permian paleoclimates of the Baoshan Block, western Yunnan, China; insight from carbonates[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 24(6): 753-764.
- [19] 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 等. 云南保山卧牛寺组玄武岩成因: 地幔柱活动的产物? [J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(1): 20-28. [Xiao Long, Xu Yigang, Mei Houjun, et al. Petrogenesis of the basalts of Woniusi Formation at Baoshan area, Yunnan: Is it of mantle plume origin? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2003, 22(1): 20-28.]
- [20] 黄勇, 郝家树, 邓贵标, 等. 滇西施甸地区二叠纪卧牛寺组大陆溢流玄武岩的发现[J]. *地质通报*, 2012, 31(2/3): 314-320. [Huang Yong, Hao Jiaxiang, Deng Guibiao, et al. The discovery of terrestrial extrusive basalt of Permian Woniusi Formation in Shidian area, western Yunnan province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(2/3): 314-320.]
- [21] Liao S Y, Wang D B, Tang Y, et al. Late Paleozoic Woniusi basaltic province from *Sibumasu terrane*: Implications for the breakup of eastern Gondwana's northern margin[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2015, 127(9/10): 1313-1330.
- [22] 王小娟, 王向东, 李文忠, 等. 滇西保山、泰国西部和南部及澳大利亚悉尼盆地的冈瓦纳相二叠系对比[J]. *地层学杂志*, 2004, 28(4): 336-343. [Wang Xiaojuan, Wang Xiangdong, Li Wenzhong, et al. Correlation of Gondwana Permian strata in Baoshan of western Yunnan, western and southern Thailand, and southern Sydney basin of Australia[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2004, 28(4): 336-343.]
- [23] 王增吉. 云南施甸早石炭世早期香山组的一些珊瑚化石[J]. *中国地质科学院院报*, 1993(27/28), 155-173. [Wang Zengji. Some rugose corals from the Xiangshan Formation of the early lower Carboniferous in Shidian county, western Yunnan[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1993(27/28): 155-173.]
- [24] Derry L A, Kaufman A J, Jacobsen S B. Sedimentary cycling and environmental change in the late Proterozoic: evidence from stable and radiogenic isotopes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(3): 1317-1329.
- [25] 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[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 128(3/4): 671-681.
- [26] 张同钢, 储雪蕾, 张启锐, 等. 扬子地台灯影组碳酸盐岩中的硫

- 和碳同位素记录[J]. 岩石学报, 2004, 20(3): 717-724. [Zhang Tonggang, Chu Xuelei, Zhang Qirui, et al. The sulfur and carbon isotopic records in carbonates of the Dengying Formation in the Yangtze Platform, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004, 20(3): 717-724.]
- [27] 储雪蕾, 张同钢, 张启锐, 等. 蓟县元古界碳酸盐岩的碳同位素变化[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2003, 33(10): 951-959. [Chu Xuelei, Zhang Tonggang, Zhang Qirui, et al. Carbon isotopic variations of Proterozoic carbonates in Jixian, Tianjin, China[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2003, 33(10): 951-959.]
- [28] Zhang T G, Chu X L, Zhang Q R, et al. Variations of sulfur and carbon isotopes in seawater during the Doushantuo stage in late Neoproterozoic[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(13): 1375-1380.
- [29] Meyer M, Schifffbauer J D, Xiao S H, et al. Taphonomy of the Upper Ediacaran enigmatic ribbonlike fossil *Shaanxilithes* [J]. Palaios, 2012, 27(5): 354-372.
- [30] Kaufman A J, Jacobsen S B, Knoll A H. The Vendian record of Sr and C isotopic variations in seawater: implications for tectonics and paleoclimate[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1993, 120(3/4): 409-430.
- [31] Kaufman A J, Knoll A H. Neoproterozoic variations in the C-isotopic composition of seawater: Stratigraphic and biogeochemical implications[J]. Precambrian Research, 1995, 73(1/2/3/4): 27-49.
- [32] Kaufman A J, Konll A H, Narbonne G M. Isotopes, ice ages and terminal Proterozoic earth history[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1997, 94(13): 6600-6605.
- [33] Powell C M, Veevers J J. Namurian Uplift in Australia and South America triggered the main Gondwanan glaciation[J]. Nature, 1987, 326(6109): 177-179.
- [34] 高林志, 郭宪璞, 丁孝忠, 等. 中国塔里木板块南华纪成冰事件及其地层对比[J]. 地球学报, 2013, 34(1): 39-57. [Gao Linzhi, Guo Xianpu, Ding Xiaozhong, et al. Nanhuan glaciation event and its stratigraphic correlation in Tarim Plate, China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2013, 34(1): 39-57.]
- [35] 黄汲清, 陈炳蔚. 中国及邻区特提斯海的演化[M]. 北京: 地质出版社, 1987. [Huang Jiqing, Chen Bingwei. The evolution of Tethys in China and its adjacent areas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.]
- [36] Wang X D, Lin W, Shen S Z, et al. Early Permian rugose coral *Cyathaxonia* faunas from the Sibumasu Terrane (Southeast Asia) and the southern Sydney Basin (Southeast Australia): Paleontology and paleobiogeography[J]. Gondwana Research, 2013, 24(1): 185-191.
- [37] Mohanty S P, Barik A, Sarangi S, et al. Carbon and oxygen isotope systematics of a Paleoproterozoic cap-carbonate sequence from the Sausar Group, Central India[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2015, 417: 195-209.
- [38] Yang J, Zeng Z X, Cai X F, et al. Carbon and oxygen isotopes analyses for the Sinian carbonates in the Helan Mountain, North China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(32): 3943-3955.
- [39] 冯东, 陈多福, 刘芊. 新元古代晚期盖帽碳酸盐岩的成因与“雪球地球”的终结机制[J]. 沉积学报, 2006, 24(2): 235-241. [Feng Dong, Chen Duofu, Liu Qian. Formation of late Neoproterozoic cap carbonates and termination mechanism of “Snowball Earth”[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24(2): 235-241.]
- [40] 王家生, 甘华阳, 魏清, 等. 三峡“盖帽”白云岩的碳、硫稳定同位素研究及其成因探讨[J]. 现代地质, 2005, 19(1): 14-20. [Wang Jiasheng, Gan Huayang, Wei Qing, et al. Stable isotopes of carbon and sulfur of cap dolomite in the three gorges and its mechanism discussion[J]. Geoscience, 2005, 19(1): 14-20.]
- [41] 何金先, 张晓丽, 王兆夺, 等. 铜仁地区陡山沱期盖帽碳酸盐岩地质地球化学特征及其成因[J]. 地质找矿论丛, 2013, 28(3): 412-418. [He Jinxian, Zhang Xiaoli, Wang Zhaoduo, et al. Geological characteristics and genetic of cap carbonates of Doushantuo Formation, Tongren region[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2013, 28(3): 412-418.]
- [42] 蒋干清, 史晓颖, 张世红. 甲烷渗漏构造、水合物分解释放与新元古代冰后期盖帽碳酸盐岩[J]. 科学通报, 2006, 51(10): 1121-1138. [Jiang Ganqing, Shi Xiaoying, Zhang Shihong. Methane seeps, methane hydrate destabilization, and the late Neoproterozoic postglacial cap carbonates[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(10): 1121-1138.]
- [43] Jiang G Q, Sohl L E, Christie-Blick N. Neoproterozoic stratigraphic comparison of the Lesser Himalaya (India) and Yangtze block (south China): Paleogeographic implications[J]. Geology, 2003, 31(10): 917-920.
- [44] Wang J S, Jiang G Q, Xiao S H, et al. Carbon isotope evidence for widespread methane seeps in the ca. 635Ma Doushantuo cap carbonate in South China[J]. Geology, 2008, 36(5): 347-350.
- [45] 赵彦彦. 皖南新元古界蓝田组碳酸盐岩沉积地球化学[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009. [Zhao Yanyan. Sedimentary Geochemistry of Neoproterozoic carbonates in the Lantian Formation from southern Anhui in South China[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009.]
- [46] Shields G A. Neoproterozoic cap carbonates: A critical appraisal of existing models and the *Plumeworld* hypothesis[J]. Terra Nova, 2005, 17(4): 299-310.
- [47] Fike D A, Grotzinger J P, Pratt L M, et al. Oxidation of the Ediacaran ocean[J]. Nature, 2006, 444(7120): 744-747.
- [48] Jin X C. Permo-Carboniferous sequences of Gondwana affinity in southwest China and their paleogeographic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2002, 20(6): 633-646.
- [49] 聂飞, 董国臣, 莫宣学, 等. 云南保山西邑铅锌矿床硫铅同位素地球化学特征研究[J]. 岩石学报, 2015, 31(5): 1327-1334. [Nie Fei, Dong Guochen, Mo Xuanxue, et al. The characteristics of sulfur and lead isotopic compositions of the Xiyi Pb-Zn deposit in Baoshan Block, western Yunnan[J]. Acta Petrologica Sinica,

2015, 31(5): 1327-1334.]

Depositional Sequence and Carbon Isotope Chemostratigraphy of the Lower Carboniferous Xiangshan and Lower Permian Dingjiazhai Formations in Baoshan Block, Yunnan: Paleogeographic Implications

LUO Liang¹, WANG DongBing¹, YIN FuGuang¹, LIAO ShiYong², REN Fei¹, NING KuoBu¹, TANG Yuan¹

1. Chengdu Centre of China Geological Survey, CGS, Chengdu 610081, China

2. Purple Mountain Observatory Chinese Academy of Sciences, CAS, Nanjing 210008, China

Abstract: Better understanding of the late Paleozoic sedimentary sequences in Baoshan block were obtained by detailed field measurement, borehole logging combined with sequence stratigraphic and facies studies as well as carbon and oxygen isotopic analysis of the lower Carboniferous Xiangshan Formation and lower Permian Dingjiazhai Formation at the Xiyi area, northern Baoshan Block. Three lithologic units were recognized in the Lower Carboniferous Xiangshan Formation, which are in ascending order represent lower slope, upper slope and carbonate platform depositional settings, respectively. The Lower Permian Dingjiazhai Formation was interpreted to be glacial-marine deposits according to distinctive pebbly calcareous moraine diamictite and local development of dropstones. The $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ profile demonstrates a gradual increasing trend up section in the Lower Carboniferous Xiangshan Formation, indicating a relatively stable sedimentary environment possible due to a steady increase of organic carbon burial. Combined with previous paleomagnetic results, biotic correlation and tectonic studies, it is presumed that the Baoshan Block was in a stable setting as a part of the northern Gondwana. However, the $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ values drop dramatically on the cessation of the pebbly moraine carbonate which represents the ending of glacial period, and correspond well with the first temperature rise event as well as massive basalt eruption in the early Permian. The above collectively indicate that the Baoshan Block was separated from the northeast Gondwana and started to drift northwards in the early Permian. The present study not only sheds light on the paleoceanic, paleogeographic and paleoclimatic significance of the Paleozoic Submasu Block, but also provides new carbon isotope chemostratigraphy for the contemporary sedimentary sequences.

Key words: Baoshan Block; carbon isotope; Gondwana; sedimentary sequence; paleogeography