

西藏文布当桑二叠系—三叠系界线剖面碳酸盐岩碳氧同位素异常研究

季长军¹⁾, 吴珍汉²⁾, 伊海生³⁾, 夏国清³⁾, 赵珍²⁾, 王震⁴⁾

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100037; 2) 中国地质科学院, 北京, 1000373;

3) 成都理工大学, 沉积地质研究院, 成都, 610059; 4) 长江大学资源与环境学院, 武汉, 430100

内容提要: 华南海相二叠系—三叠系界线(PTB)剖面研究相当成熟,且滇东黔西和天山地区的陆相 PTB 剖面也取得了重大突破,但西藏特提斯域该领域研究相对薄弱。在前人建立完整二叠系—三叠系牙形刺生物地层剖面的基础上开展碳氧同位素分析,研究表明西藏文布当桑 PTB 剖面附近碳同位素明显负偏,但偏移样式与华南煤山剖面突变模式具有明显差异,表现为随时间推移逐渐变小,且变化连续,类似南阿尔卑斯地区 PTB 剖面变化样式,通过与中下扬子地区代表碳酸盐岩台地相到下斜坡相沉积环境的典型海相 PTB 地层剖面对比发现,西藏文布当桑剖面与江苏西山浅水碳酸盐岩台地相剖面碳同位素变化曲线高度一致。此外,西藏文布当桑 PTB 剖面伴随碳同位素负偏,出现了两次明显的氧同位素波动,氧同位素两次负偏对应着海水温度的增加和盐度的降低。

关键词: 二叠系—三叠系界限;碳同位素负偏;海相碳酸盐地层;特提斯域;西藏

二叠系和三叠系界限(PTB),即古生界与中生界的界线,是地质历史上的一个重要地质界线,由于它涉及到地球生命史上最大的生物灭绝事件备受科学界的关注(Sepkoski et al., 1981; Bowring et al., 1998; Jin Y G et al., 2000; Michaelsen, 2002; Sandler et al., 2006; Xie Shucheng et al., 2009; Majorowicz et al., 2014; Yin Hongfu et al., 2014)。研究灾变事件与生物劫后复苏关系,解释自然环境对生物的影响和生物对自然环境的适应,阐明二者在历史发展过程中密不可分的关系,以及人类应如何从中获得启示,保持其与大自然和谐发展,以预防和抵御自然灾害,保障可持续发展,更是该界线研究的前沿目标,已经成为研究的热点。但是长期以来,海相 PTB 剖面研究集中于华南地区,其生物地层时代、生物演化、地层层序、同位素地层研究已经相当详细(Li Yucheng, 1999; Yin Hongfu et al., 2001; Wang Yongbiao et al., 2005; Ji Chengsheng et al., 2014; Deng Baozhu et al., 2015; Liu Ping et al., 2018)。同时,滇东黔西和天山地区的陆相 PTB 研究也取得了大量进展(Chou Xincheng et al., 2016; Li Yong'an et al., 1997; Xu Guozhen et al., 2012; Zhang Liwei et al., 2014; Qiu Xincheng et al.,

2016)。然而,喜马拉雅地区 PTB 研究相对较弱,古生物学家通过牙形刺研究表明该地区不但存在晚二叠系地层,并且具有连续的二叠系—三叠系海相沉积地层,并建立了连续的牙形刺生物演化带(Yao Jianxin et al., 1987; Ji Zhansheng et al., 2007; Zhou Liqian, 2012;),这为研究喜马拉雅地区二叠系—三叠系界线奠定了基础。

文布当桑剖面是一条连续的二叠系—三叠系海相碳酸盐岩沉积剖面,且具有丰富的牙形刺化石, Zhou Liqian(2012)基于 *Clarkina* 和 *Hindeodus* 属牙形石建立了完整的二叠系—三叠系牙形刺序列,认为该剖面是迄今为止冈底斯地区最好的 PTB 剖面。本文选取该剖面为主要研究对象,进行碳氧同位素界线地层研究,并与华南同期海相地层对比,其成果既在喜马拉雅地区证实了煤山全球层型剖面与点的复现性,又为喜马拉雅地区 PTB 剖面对比提供了有利条件,建立了沟通阿尔卑斯地区和华南地区 PTB 剖面对比的桥梁。

1 地质背景

文布当桑 PTB 剖面位于西藏中西部措勤盆地,该盆地构造位置处于班公错—怒江缝合带和雅鲁藏

注:本论文为自然科学基金(编号 41602122 和 41772105)和中国地质调查局石油地质调查项目(编号 DD20160161)联合资助的成果。

收稿日期:2017-10-23;改回日期:2018-01-18;责任编辑:黄敏。

作者简介:季长军, 1986 年生,湖北孝感人,博士,助理研究员,主要从事沉积地质和石油地质研究。Email:jichangjun2007@sina.com。

布江缝合带之间的冈底斯—念青唐古拉地块中西段(图 1)。早期普遍认为措勤盆地上二叠统为陆相沉积,三叠纪和侏罗纪期间存在长达 75Ma 的沉积间断,近年来该地区地层和古生物研究取得了重大突破,发现了晚二叠世—晚三叠世诺利期完整的海相

碳酸盐岩和晚三叠世瑞替期—早侏罗世陆源碎屑沉积记录,且两者之间角度不整合。Ji Zhansheng et al. (2006)在文布当桑乡南出露的原划分为中二叠统下拉组灰岩地层中识别出上二叠统和下三叠统,且存在牙形石分带连续的二叠系—三叠系界线剖

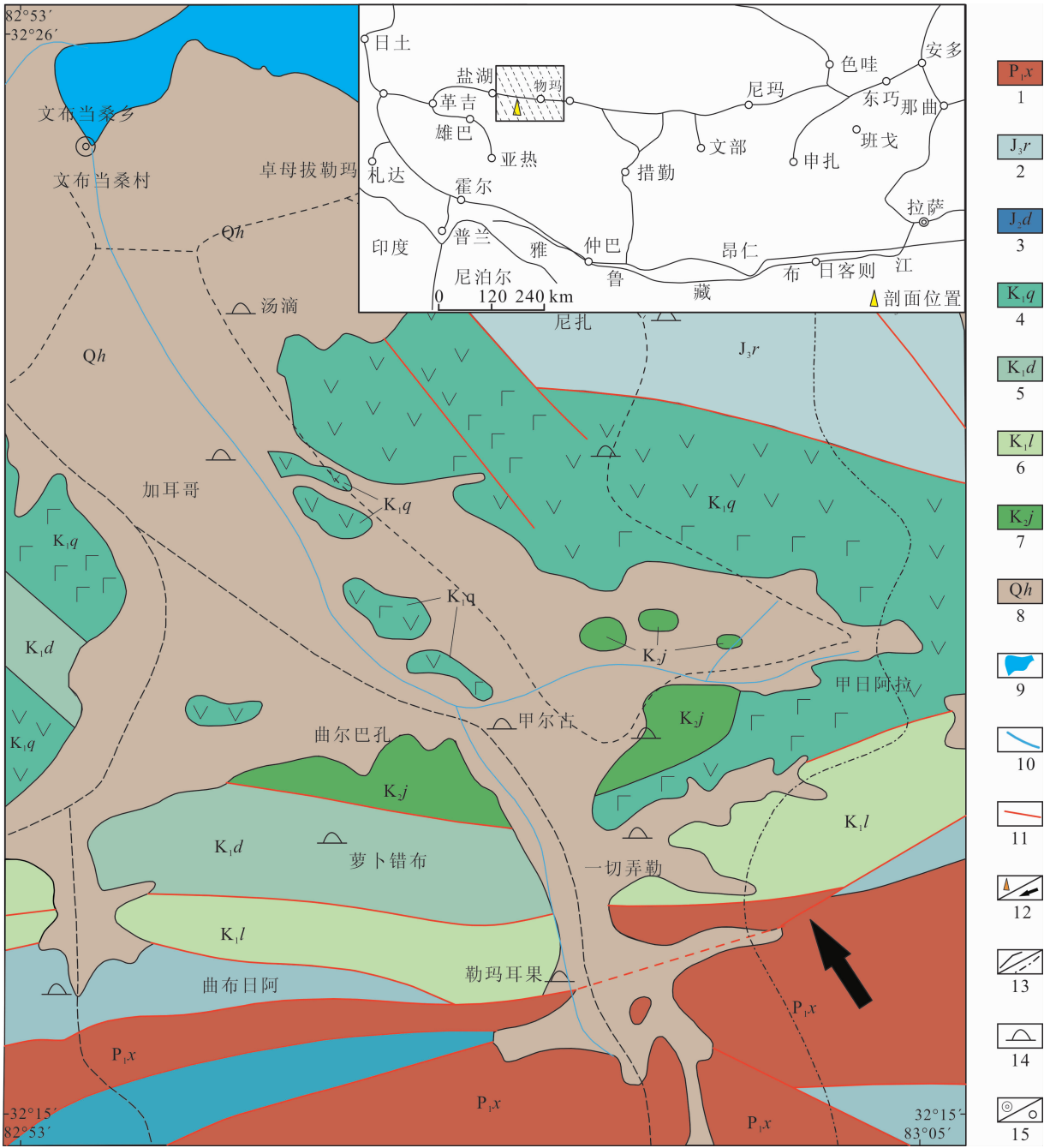


图 1 西藏文布当桑 PTB 剖面区域位置图(修改自周丽芊, 2012)

Fig. 1 Geological map of the PTB outcrop in the Wenbudangsang section, Tibet(modified from Zhou Liqian, 2012)

1—下二叠统下拉组;2—上侏罗统日松组;3—中侏罗统多仁组;4—早白垩世去申拉组;5—下白垩统多尼组;6—下白垩统郎山组;
7—上白垩统竟柱山组;8—第四系;9—湖泊;10—河流;11—断层;12—剖面;13—道路;14—居民点;15—城镇

1—Lower Permian Xiaola Formation; 2—Upper Jurassic Risong Formation; 3—Middle Jurassic Duoren Formation; 4—Early Cretaceous Qushenla Formation; 5—Lower Cretaceous Duoni Formation; 6—Lower Cretaceous Langshan Formation; 7—Upper Cretaceous Jingzhushan Formation; 8—Quaternary; 9—lake; 10—river; 11—fault; 12—section; 13—road; 14—house; 15—city

面。文布当桑 PTB 剖面底部上二叠统文布当桑组以灰色燧石结核灰岩为主;顶部下三叠统嘎仁错组下部为泥晶灰岩和粉晶白云岩,上部主要为深灰色灰岩,局部夹黏土岩;界线上下存在两层明显的黏土岩,易于识别。

2 样品与测试

为建立西藏地区 PTB 剖面碳氧同位素曲线,在文布当桑剖面界线上下逐层取样,控制在界线上下半米内 5cm 等间距取样,半米外 10cm 等间距采样,并以界限处为 0,三叠系样品距界限距离为正值,二叠系样品距界限距离为负值。所取样品皆为灰岩,包括三叠系样品 27 件和二叠系样品 19 件,合计 46 件。为避免后期成岩蚀变、方解石脉充填、黄铁矿晶体充填、节理和破碎发育,尽量采集新鲜的泥晶灰岩。首先对样品进行镜下薄片鉴定和阴极发光分析,绝大多数样品具有典型的泥微晶结构,并具有较弱的阴极发光特征,显示较低的 Fe 和 Mg 含量,反映样品古海洋信息具有一定代表性。每件样品取 10g 经玛瑙研钵碎样至 200 目,在 60 度烘烤箱烘干 4 小时后,经碳酸盐岩制备装置与 100%磷酸盐反应放出二氧化碳输送至 MAT252 型稳定同位素质谱仪分析碳同位素和氧同位素。碳、氧同位素以 PDB 为标准,分析精度皆为±0.20‰(表 1),测试分析工作在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。

3 分析结果

3.1 数据可靠性分析

海水碳氧同位素可以反映丰富的气候和环境信息,但在古海洋重建过程中由于缺乏古代海水样品,往往用保存完好的生物壳体 and 全岩等沉积物载体间接研究古海洋碳氧同位素。而生物壳体沿剖面分布往往具有不均一性,因此全岩碳氧同位素可以建立连续的地层记录,避免受到古生物样品分布的制约。通常认为低的水岩比使碳同位素在成岩演化中改变较少,全岩碳同位素对重建古海洋演化具有重要意义。此外,虽然埋藏孔隙水与沉积物可能存在氧同位素交换造成全岩氧同位素的改变,但是研究表明全岩氧同位素与保存完好的腕足壳体氧同位素具有极好的一致性,揭示碳酸盐岩沉积物在灰化过程中早成岩阶段快速完成,并且孔隙水和上覆水体仍进行部分交换,因此全岩碳氧同位素曲线依旧可以很好地重塑古海洋环境(Korte et al., 2005; Wynn et al., 2007)。

表 1 文布当桑二叠系—三叠系界线剖面碳酸

盐岩碳氧同位素

Table 1 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ and $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ of the PTB samples in the Wenbudangsang section

序 号	距离 cm	岩性	编号	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ PDB	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)PDB	$\delta^{18}\text{O}$ 校正 (‰)PDB	Z	t(℃)
1	260	灰岩	T31	1.50	-7.80	-5.80	127.48	28.61
2	250	灰岩	T30	1.60	-6.60	-4.60	128.29	22.96
3	240	灰岩	T29	1.20	-7.20	-5.20	127.17	25.74
4	230	灰岩	T28	1.00	-8.20	-6.20	126.26	30.58
5	220	灰岩	T27	0.60	-7.90	-5.90	125.59	29.10
6	210	灰岩	T26	1.00	-7.60	-5.60	126.56	27.64
7	200	灰岩	T25	0.80	-6.10	-4.10	126.90	20.71
8	190	灰岩	T24	0.80	-5.70	-3.70	127.10	18.96
9	180	灰岩	T23	1.00	-5.10	-3.10	127.80	16.42
10	170	灰岩	T22	1.00	-5.50	-3.50	127.61	18.10
11	160	灰岩	T21	0.50	-4.70	-2.70	126.98	14.77
12	150	灰岩	T20	1.10	-4.00	-2.00	128.56	11.99
13	140	灰岩	T19	0.80	-5.90	-3.90	127.00	19.83
14	130	灰岩	T18	0.90	-4.30	-2.30	128.00	13.17
15	120	灰岩	T17	0.80	-5.90	-3.90	127.00	19.83
16	110	灰岩	T16	0.70	-5.10	-3.10	127.19	16.42
17	100	灰岩	T15	1.00	-5.40	-3.40	127.65	17.68
18	90	灰岩	T14	0.70	-5.30	-3.30	127.09	17.25
19	80	灰岩	T13	0.60	-5.80	-3.80	126.64	19.40
20	70	灰岩	T12	0.80	-6.00	-4.00	126.95	20.27
21	60	灰岩	T11	1.00	-4.90	-2.90	127.90	15.59
22	50	灰岩	T10	0.70	-5.80	-3.80	126.84	19.40
23	45	灰岩	T9	1.10	-5.30	-3.30	127.91	17.25
24	40	灰岩	T8	0.70	-6.00	-4.00	126.74	20.27
25	35	灰岩	T7	0.80	-5.70	-3.70	127.10	18.96
26	30	灰岩	T6	0.80	-5.80	-3.80	127.05	19.40
27	25	灰岩	T5	0.50	-3.50	-1.50	127.58	10.08
28	20	灰岩	T4	1.20	-5.00	-2.40	128.56	14.36
29	15	灰岩	T3	1.70	-8.00	-5.40	128.09	27.64
30	10	灰岩	T2	1.60	-7.10	-4.50	128.34	23.41
31	5	灰岩	T1	2.00	-7.30	-4.70	129.06	24.34
32	0	灰岩	P0	1.50	-9.70	-7.10	126.84	36.21
33	-5	灰岩	P1	2.10	-10.30	-7.70	127.77	39.41
34	-10	灰岩	P2	2.00	-10.30	-7.70	127.56	39.41
35	-15	灰岩	P3	2.20	-9.70	-7.10	128.27	36.21
36	-20	灰岩	P4	1.90	-7.60	-5.00	128.70	25.74
37	-25	灰岩	P5	2.20	-7.50	-4.90	129.37	25.27
38	-30	灰岩	P6	2.40	-7.10	-4.50	129.97	23.41
39	-40	灰岩	P7	2.80	-8.30	-5.70	130.20	29.10
40	-50	灰岩	P8	2.70	-9.20	-6.60	129.54	33.61
41	-60	灰岩	P9	2.80	-8.80	-6.20	129.95	31.58
42	-70	灰岩	P10	2.60	-7.70	-5.10	130.09	26.21
43	-80	灰岩	P11	3.00	-6.20	-3.60	131.65	19.40
44	-90	灰岩	P12	3.40	-7.10	-4.50	132.02	23.41
45	-100	灰岩	P13	3.40	-6.60	-4.00	132.27	21.16
46	-110	灰岩	P14	3.30	-7.60	-5.00	131.57	25.74

目前尚未十分有效的方法检验成岩作用对碳酸盐岩稳定同位素的影响,但可以通过氧同位素阈值和碳氧同位素相关性等间接反映成岩作用的影响程

度,例如当 $-11.0‰ < \delta^{18}\text{O} < -5.0‰$ 时,样品已遭受一定蚀变作用,但其值仍可以代表原始沉积物碳、氧同位素组成;当 $\delta^{18}\text{O} < -11.0‰$ 时,样品严重蚀变,碳氧同位素已经不能反映古海洋信息(Kaufman et al., 1995);此外,碳氧同位素具有相关性也可以反映样品遭受成岩作用的改造(Wang Darui et al., 2002)。本次研究西藏地区文布当桑 PTB 界线 46 件样品碳氧同位素变化范围分别为 $0.5‰ \sim 3.4‰$ 和 $-10.6‰ \sim -3.5‰$, 均值分别为 $1.48‰$ 和 $-6.76‰$ 。所有样品 $\delta^{18}\text{O} > -11.0‰$, 且碳氧同位素散点图数据离散,不具有相关性(图 2),总体说明样品碳氧同位素基本上没有受到成岩作用影响,数据可靠,能够反映携带的古海洋信息。

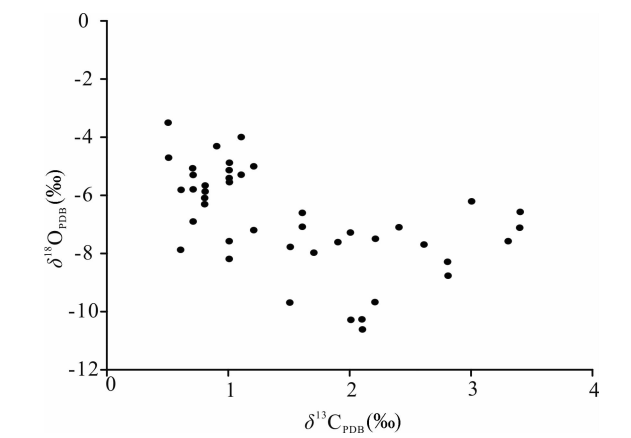


图 2 西藏文布当桑 PTB 剖面样品碳、氧同位素分布散点图
Fig. 2 $\delta^{18}\text{O}$ Vs. $\delta^{13}\text{C}$ of the samples in the PTB outcrop in the Wenbudangsang section, Tibet

3.2 碳同位素

同几乎所有的 PTB 剖面,西藏文布当桑 PTB 剖面碳同位素在界线处负偏,碳同位素变化样式为:上二叠统文布当桑组碳同位素整体较高,如 A 段碳同位素分布在 $3.3‰ \sim 3.4‰$ 之间;但在接近界线 80cm 处进入 B 段,碳同位素开始逐渐降低至 $1.5‰$ 到达 PTB;随后进入 C 段,下三叠统嘎仁错组进一步短暂碳同位素下降(最低至 $0.5‰$);进入 D 段维持较低的碳同位素值($0.5‰ \sim 1.1‰$),直到离界线 200cm 后进入 E 段,碳同位素开始逐渐升高。总之,碳同位素在 PTB 剖面出现了明显的碳同位素负偏,但变化过程是渐变的,从开始下降到升高至一个稳定值持续变化距离达 280cm(图 3)。

3.3 氧同位素

文布当桑 PTB 剖面 A 段上二叠统氧同位素变化幅度较小,集中在 $-6.6‰ \sim -7.6‰$ 之间;但进入 B 段后出现明显的两次氧同位素负偏,整体具有降

低的趋势,尤其是第二次位于 PTB 附近的一次负偏氧同位素降至 $-10.3‰$;随后进入 C 段,氧同位素开始逐渐增大至 $-3.5‰$;D 段下三叠统嘎仁错组氧同位素维持较高值,变化幅度较小($-4.0‰ \sim -6.1‰$),直到 E 段氧同位素开始降低至 $-6.6‰ \sim -8.2‰$ 变化区间(图 3)。

3.4 古盐度

通过碳氧同位素值计算出的 Z 值常常被用于指示古盐度,虽然 Z 值并非古盐度的绝对值,但是与古盐度具有正相关性,并且为了区分侏罗纪以来海相灰岩和淡水灰岩,Keith 提出 $Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$ 古盐度计算公式,当 $Z > 120$ 时为海相灰岩, $Z < 120$ 为淡水灰岩,该公式已经广泛应用于前侏罗纪灰岩古盐度的计算(Keith et al., 1964)。计算过程中,由于全岩氧同位素年代效应、古海水盐度偏差和氧的未知,而往往认为这些因素对碳同位素影响不大,因此必须对样品的氧进行校正。通常认为第四纪海相灰岩 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值为 $-1.0‰$,二叠系海相灰岩平均值为 $-3.6‰$,三叠系海相灰岩平均值为 $-3.0‰$ (Huang Sijing et al., 2008),因此二叠系和三叠系分别用 $\Delta\delta^{18}\text{O} = 2.6‰$ 和 $\Delta\delta^{18}\text{O} = 2.0‰$ 进行校正,校正后氧同位素见表 1。通过碳同位素和校正后氧同位素计算出的 Z 值见表 1,所有值均大于 120,具有海相碳酸盐岩的特征,且 Z 值跟 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的相关系数分别为 0.829 和 0.003,表明 Z 值受碳同位素的影响较大。文布当桑 PTB 剖面 A 段 Z 值较高,集中在 $131.27 \sim 132.27$ 之间;B 段开始逐渐减低至 126.84 到达 PTB 界线处;C 段略微升高,集中在 $127.58 \sim 129.06$ 之间;D 段维持在 $126.64 \sim 128.56$ 窄区间波动;E 段有逐渐增大的趋势(图 3)。

3.5 古温度

虽然文布当桑剖面氧同位素组成对海水信息的代表性仍然需要进一步评估,这也是一个非常具有争议和难于讨论的问题。全球显生宙海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的演化曲线已经建立,虽然无论从样品的结构、矿物、化学(元素和同位素)等方面都认为其具有很小的成岩蚀变,但目前仅仅只是普遍认可显生宙 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 演化曲线具有原生性,而 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线原生性一直颇受争议,主要是其表现为曲线具有年龄越老、同位素越低特征,该特征被认为是成岩蚀变的结果,更何况对于全岩氧同位素,基于本次氧同位素分析结果不能完全代表海水信息,数值可能总体偏负。虽然基于碳酸盐岩

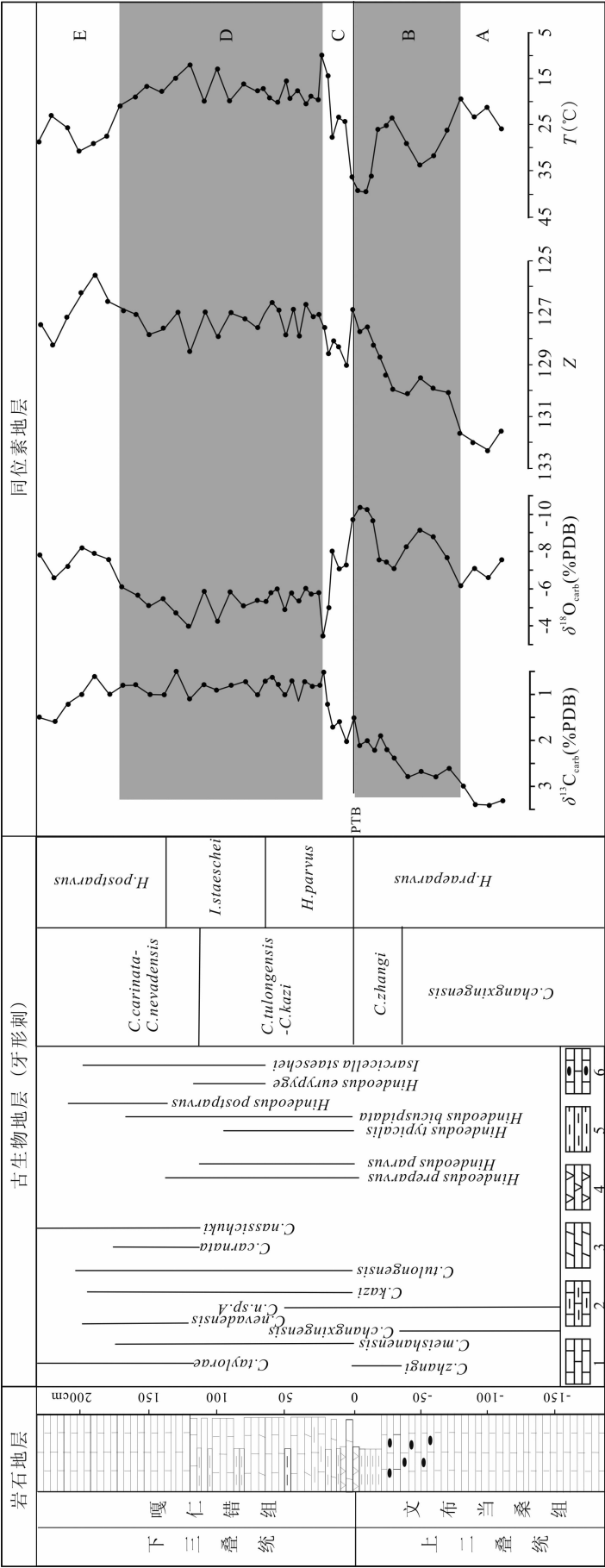


图3 西藏文布当桑剖面岩性地层、古生物地层和同位素地层综合图（其中古生物地层资料引自周丽苹, 2012）

Fig.3 Generalized litho-, bio-and isotope stratigraphy column of the Wenbudang section, Tibet (the biostratigraphy column from Zhou Liqian, 2012)

1—灰岩; 2—泥灰岩; 3—白云岩; 4—黏土岩; 5—泥岩; 6—燧石结核灰岩

1—Limestone; 2—marlstone; 3—dolostone; 4—clay stone; 5—mudstone; 6—flint-nodule limestone

氧同位素推算温度不具有绝对意义,但是其变化趋势揭示海水演化意义是肯定的。

采用二叠系和三叠系海相灰岩平均值校正后的氧同位素值,通过公式 $T = 16.0 - 4.14 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}}) + 0.13 \times (\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{seawater}})^2$ 计算古海水温度(Shackleton, 1974),并假定二叠系和三叠系海水氧同位素分别为 -2.8‰ 和 -3.0‰ , 结果见表 1。文布当桑剖面 A 段海水温度较低,集中在 $21.6\sim 25.74\text{℃}$; B 段温度震荡剧烈,存在两期明显的升温事件:第一期温度从 16.40℃ 增至 33.61℃ , 第二次温度从 23.41℃ 增加到 39.41℃ , 最高海水温度位于 PTB 处,期间存在一个快速降温过程,温度从 33.61℃ 迅速降低至 23.41℃ ; C 段是一个快速降温过程,温度从最好降至 10.08℃ ; D 段温度有所升高,仍维持在较低的温度区间,在 $11.99\sim 20.71\text{℃}$ 区间波动; E 段温度回升,集中在 $22.96\sim 30.58\text{℃}$ 之间。

4 讨论

碳同位素异常多被作为碳酸盐岩地层边界划分和区域对比的辅助标志,PTB 附近碳同位素负偏现象不仅发生在我国华南地区,而且世界其他地区也普遍存在类似现象,此外,这种与生物集群灭绝相伴生的碳同位素负偏,也见于前寒武—寒武系界线和白垩—第三系界线(Wan Xiaoqiao et al., 2005; Wang Sien et al., 2015)。碳同位素地层在全球埃迪卡拉纪—寒武纪地层划分和对比中发挥了重要作用(Ishikawa et al., 2008; Yuan Yuyang et al., 2014; Chen Lan et al., 2006); 此外,PTB 研究也将碳同位素作为事件地层对比研究的手段(Haas et al., 2006; Luo Genming et al., 2010; Magaritz et al., 1988; Song Haijun et al., 2012)。但是目前事件地层对比关注的是碳同位素异常变化趋势,而往往不考虑同位素变化幅度和样式。

PTB 地层普遍对应碳酸盐岩碳同位素负偏,实际上主要研究的是无机碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$),下降幅度 $2\text{‰}\sim 7\text{‰}$, 同时同位素变化样式也存在明显的差异性:在华南地区,如煤山剖面 and 上寺剖面,PTB 处 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 具有明显突变性,该值从下降到恢复间距小($<2\text{m}$),并且都在事件地层界线附近迅速从正值变化到负值;而奥地利 Carnic Alps 地区和巴基斯坦 Salt Ranges 地区碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 在 PTB 处随时间逐渐变小,且变化连续(Holser et al., 1991)。本次研究表明,西藏文布当桑剖面碳同位素在 PTB 处随

时间逐渐变小,且变化连续,类似南阿尔卑斯地区 PTB 剖面变化样式,而与华南煤山剖面突变模式具有明显差异。当然, Margariz et al. (1988) 等以碳同位素逐渐连续变小来推断南阿尔卑斯地区 PTB 剖面比华南连续,显然缺乏地层学和古生物学证据支撑。通过与中国中下扬子地区代表碳酸盐岩台地相到下斜坡相沉积环境的典型海相地层剖面对比, PTB 地层无机碳同位素快速负异常最显著的表现 在斜坡相的浙江煤山剖面,除了泻湖相的四川羊鼓洞剖面外,江苏西山浅水碳酸盐岩台地相(生物礁)、浙江黄芝山的台地边缘相和四川朝天的斜坡深水相都表现的微弱,西藏文布当桑剖面与西山剖面碳同位素变化曲线高度一致(图 4),显然这种同位素变化的差异不是地层缺失或高度凝缩能够解释的,更可能是泻湖相和斜坡相更有利于富轻碳同位素组分的有机质保存。

西藏文布当桑 PTB 剖面伴随碳同位素逐渐负偏,出现了两次明显的氧同位素波动,氧同位素两次负偏对应着海水温度的增加和盐度的降低。此外, PTB 界限附近无机碳同位素都表现出长期缓慢的降低趋势,该趋势与浙江煤山剖面 and 重庆中梁山 PTB 剖面附近锶同位素升高趋势呈现反向对应关系(Zhou Yaoqi et al., 1990; Huang Sijing et al., 2008), 结合陆相风化作用增强的生标证据,PTB 附近无机碳同位素负偏反映的是 Pangea 大陆聚合背景下陆地抬升产生强烈的陆地风化,并伴随构造运动密切相关的火山活动过程,该过程不仅导致海水获得大量陆地营养盐,同时火山活动造成海水扰动将下层营养盐类带到表层,海水表层富营养化,藻类生物大量爆发反作用海底缺氧和环境恶化,缺氧环境有利于死亡生物大量埋藏,导致碳酸盐岩无机碳同位素负偏,而泻湖相和斜坡相更利于有机质的富集,从而该相区碳酸盐岩无机碳同位素负偏更为显著。

5 结论

(1) 西藏文布当桑 PTB 剖面附近碳同位素明显负偏,但偏移样式与华南煤山剖面突变模式具有明显差异,表现为随时间逐渐变小,且变化连续,类似南阿尔卑斯地区 PTB 剖面变化样式,通过与中下扬子地区代表碳酸盐岩台地相到下斜坡相的沉积环境的典型海相 PTB 地层剖面对比发现,西藏文布当桑剖面与西山浅水碳酸盐岩台地相剖面碳同位素变化曲线高度一致。

- Nanjing, China. (in Chinese without English abstract).
- Chen Lan, Zhonghong, Huruizhong, Xiao Jiafei, Zou Yanrong. 2006. Early cambrian oceanic anoxic event in northern Guizhou; biomarkers and organic carbon isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 22(09): 2413~2423 (in Chinese with English abstract).
- Chou Xincheng, Tong Jinnan, Tian Li, Chu Daoliang, Song Ting, Li Dongdong. 2016. The biostratigraphic correlation of the Permian-Triassic boundary in Jinzhong section, Weining, Guizhou, South China. *Earth Science*, 41(10): 1709~1722.
- Deng Baozhu, Yu Lixue, Wang Yongbiao, Li Guoshan, Meng Yafei. 2015. Evolution of marine conditions and sedimentation during the Permian-Triassic transition in Chibi of Hubei province. *Earth Science*, 40(2): 317~326 (in Chinese with English abstract).
- Haas J, Demeny A, Hips K, Vennemann T W. 2006. Carbon isotope excursions and microfacies changes in marine Permian-Triassic boundary sections in Hungary. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoecon*, 237(2~4): 160~181.
- Holser W T, Schönlaub H P, Boeckelmann K, Magaritz M. 1991. The Permian-Triassic of the Gartnerkofel-1 Core (Carnic Alps, Austria): synthesis and conclusions. *Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 45: 213~232.
- Huang Sijing, Qing H R, Huang Peipei, Hu Zuwei, Wang Qingdong, Zou Mingliang, Liu Haonian. 2008. Evolution of strontium isotopic composition of seawater from Late Permian to Early Triassic based on study of marine carbonates, Zhongliang Mountain, Chongqing, China. *Science in China (Series D)*, 37(03): 273~283 (in Chinese with English abstract).
- Ishikawa T, Ueno Y, Komiya T, Sawaki Y, Han Jian, Shu Degan, Li Yong, Maruyama S, Yoshida N. 2008. Carbon isotope chemostratigraphy of a Precambrian-Cambrian boundary section in the Three Gorge area, South China: Prominent global scale isotope excursions just before the Cambrian Explosion. *Gondwana Res*, 14(1~2): 193~208.
- Ji Zhansheng, Yao Jianxin, Wu Guichun, Liu Guizhong. 2006. Discovery of late Triassic norian epigondolella in the Xiala Formation in the Dibu Co area, Coqen County, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 25(1~2): 138~141 (in Chinese with English abstract).
- Ji Zhansheng, Yao Jianxin, Wu Guichun. 2007. Discovery of permian and triassic conodonts in the Shiquanhe area, Ngari, western Tibet, China and their significances. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 383~397 (in Chinese with English abstract).
- Jin Chengsheng, Li Chao, Peng Xingfang, Cui Hao, Shi Wei, Zhang Zihu, Luo Genming, Xie Shucheng. 2014. Spatiotemporal variability of ocean chemistry in the Early Cambrian, South China. *Science China (Series D): Earth Sciences*, 44(5): 851~863 (in Chinese with English abstract).
- Jin Y G, Wang Yue, Wang Wei, Shang Qinghua, Cao Changqun, Erwin D H. 2000. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 289(5478): 432~436.
- Kaufman A J, Knoll A H. 1995. Neoproterozoic variations in the C isotope composition of seawater: stratigraphic and biogeochemical implications. *Precambrian Res*, 73(1/2/3/4): 27~49.
- Keith M H, Weber J N. 1964. Isotopic composition and environmental classification of selected and fossils. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 28: 1787~1816.
- Korte C, Kozur H W, Veizer. 2005. $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of Triassic brachiopods and carbonate rocks as proxies for coeval seawater and palaeotemperature. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, 226(3/4): 287~306.*
- Li Yongan, Wu Shaozu, Sun Dongjiang. 1997. Magnetic property of permian-triassic boundary in the Tianshan region, China. *Xinjiang Geology*, 15(03): 227~235 (in Chinese with English abstract).
- Li Yucheng. 1999. Gradual and abrupt shifts in carbon isotope of limestones during permian-triassic transitional period in South China. *Geochimica*, 28(04): 351~358 (in Chinese with English abstract).
- Liu Ping, Zheng Rongcai, Chang Hailiang, Liang Ning, Zhou Gang. 2018. Geological Events and Element Geochemistry Response in the PTB Section from Eastern Sichuan Area. *Geological Review*, 64(01): 29~44 (in Chinese with English abstract).
- Luo Genming, Huang Junhuang, Xie Shucheng, Wignall P B, Tang Xinyan, Huang Xianyu, Yin Hongfu. 2010. Relationships between carbon isotope evolution and variation of microbes during the Permian-Triassic transition at Meishan Section, South China. *Int J Earth Sci*, 99(4): 775~784.
- Magaritz M, Bart R, Baud A, Holser W T. 1988. The carbon-isotope shift at the Permian/ Triassic boundary in the southern Alps is gradual. *Nature*, 331(6154): 337~339.
- Majorowicz J, Grasby S E, Safanda J, Beauchamp B. 2014. Gas hydrate contribution to Late Permian global warming. *Earth and Planetary Science Letters*, 393: 243~253.
- Michaelsen Per. 2002. Mass extinction of peat-forming plants and the effect on fluvial styles across the Permian-Triassic boundary, northern Bowen Basin, Australia. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 179(3): 173~188.
- Qiu Xincheng, Tong Jinnan, Tian Li, Chu Daoliang, Song Ting, Li Dongdong. 2016. The biostratigraphic correlation of the Permian-triassic boundary in Jinzhong section, Weining, Guizhou, South China. *Earth Science*, 41(10): 1709~1722.
- Sandler Amir, Yoram Eshet, Bettina Schilman. 2006. Evidence for a fungal event, methanehydrate release and soil erosion at the Permian-Triassic boundary in southern Israel. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 242(1~2): 68~89.
- Sepkoski J, John J. 1981. A factor analytic description of the Phanerozoic marine fossil record. *Paleobiology*, 7(1): 36~53.
- Shackleton N J. 1974. Attainment of isotopic equilibrium between ocean water and the benthonic foraminifera genus *Uvigerina*;

- isotopic changes in the ocean during the last glacial. England, Colloques Internationaux du C N R S, 219: 203~209.
- Song Haijun, Wignall P B, Tong Jinnan, Bond D P G, Song Huyue, Lai Xulong, Zhang Kexin, Wang Hongmei, Chen Yanlong. 2012. Geochemical evidence from bioapatite for multiple oceanic anoxic events during Permian-Triassic transition and the link with end-Permian extinction and recovery. *Earth Planet Sci Lett*, 353(1): 12~21.
- Wan Xiaoqiao, Li Gang, Chen Piji, Yu Tao, Ye Dequan. 2005. Isotope Stratigraphy of the Cretaceous Qingshankou Formation in Songliao Basin and Its Correlation with Marine Cenomanian Stage. *Acta Geological Sinica*, 79(02): 150~156 (in Chinese with English abstract).
- Wang Darui, Fang Xiaojie. 2002. Research on carbon and oxygen geochemistry of lower Paleozoic in north China. *Acta Geologica Sinica*, 76(03): 400~408 (in Chinese with English abstract).
- Wang Sien, Gao Linzhi, Pang Qiqing, Song Biao, Li Ya. 2015. Boundary between Jurassic and Cretaceous in Chinese Non-marine Basin and with international stratigraphic correlation: a case study of biostratigraphic and isotopic dating in Luanping, Hebei Province. *Acta Geological Sinica*, 89(08): 1331~1351 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yongbiao, Tong Jinnan, Wang Jiasheng, Zhou Xiugao. 2005. Calcimicro-bialite after end-Permian mass extinction in South China and its palaeoenvironmental significance. *Chinese Science Bulletin*, 50(6): 552~558 (in Chinese with English abstract).
- Wynn T C, Read J F. 2007. Carbon-oxygen isotope signal of Mississippian slope carbonates, Appalachians, USA: a complex response to climate-driven fourth-order glacio-eustasy. *Palaeogeography, Palaeoecology, Palaeoclimatology*, 256(3-4): 254~272.
- Xie Shucheng, Yin Hongfu, Cao Changqun, Wang Jiangchun, Nai Xiulong. 2009. Episodic changes of the earth surface system across the Permian-Triassic boundary: molecular geobiological records. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48(3): 487~496 (in Chinese with English abstract).
- Xu Guozhen, Feng Fanbin, Lei Yong, Shen Jun, Feng Qinglai. 2012. Variations of the magnetic susceptibility across the P-T Boundary at Xinmin Section in Anshun, Guizhou and their paleoclimatic implications. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(5): 817~824 (in Chinese with English abstract).
- Yao Jianxin, Li Zishun. 1987. Permian-triassic conodonts from Selong Xishan of Nyalam, Tibet and permian-triassic boundary. *Chinese Science Bulletin*, (1): 45~51 (in Chinese with English abstract).
- Yin Hongfu, Jiang Haishui, Xia Wenchen, Feng Qinglai, Zhang Ning, Shen Jun. 2014. The end-Permian regression in South China and its implication on mass extinction. *Earth-Science Reviews*, 137: 19~33.
- Yin Hongfu, Zhang Kexin, Tong Jinnan, Yang Zunyi, Wu Shunbao. 2001. The global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. *Episodes*, 24(2): 102~114.
- Yuan Yuyang, Cai Chunfang, Wang Tiankai, Xiang Lei, Jia Lianqi, Chen Yan. 2014. Redox condition during Ediacaran-Cambrian transition in the Lower Yangtze deep water basin, South China: Constraints from iron speciation and $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ in the Diben section, Zhejiang. *Chin Sci Bull*, 59(23): 3638~3649.
- Zhang Liwei, Yang Wentao, Niu Yongbin. 2014. Characteristic and Geological Significance of Microbially Induced Sedimentary Structures (MISS) in Terrestrial P-T Boundary in Western Henan. *Geological Review*, 60(05): 1051~1060 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Liqian. 2012. In-situ shrimp oxygen isotopic study on conodonts from the Permian/Triassic boundary of Wenbudangsang section, Tibet. Chengdu University of Technology masters thesis, 1~70 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yaoqi, Chai Chifang, Mao Xueying, Ma Shulan. 1990. The strontium isotopic anomaly event across the Permian/Triassic boundary section in Meishan, Zhejiang, China. *Journal of graduate school, USTU*, 7(01): 83~88.

参 考 文 献

- 曹长群, 王伟, 沈树忠, 郑全峰. 2009. 二叠纪—三叠纪过渡期不同沉积相区的无机碳同位素表现和地质意义. *中国古生物学会第十次全国会员代表大会暨第 25 届学术年会论文摘要集*.
- 陈兰, 钟宏, 胡瑞忠, 肖加飞, 邹艳荣. 2006. 黔北早寒武世缺氧事件: 生物标志化合物及有机碳同位素特征. *岩石学报*, 22(09): 2413~2423.
- 仇鑫程, 童金南, 田力, 楚道亮, 宋婷, 李东东. 2016. 贵州威宁金钟二叠系—三叠系界线剖面生物地层及其对比. *地球科学*, 41(10): 1709~1722.
- 邓宝柱, 余黎雪, 王永标, 李国山, 孟亚飞. 2015. 湖北赤壁二叠纪—三叠纪之交古海洋沉积环境演化. *地球科学*, 40(2): 317~326.
- 黄思静, Hairuo Qing, 黄培培, 胡作维, 王庆东, 邹明亮, 刘昊年. 2008. 晚二叠世—早三叠世海水的锶同位素组成与演化——基于重庆中梁山海相碳酸盐的研究结果. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 38(03): 273~283.
- 纪占胜, 姚建新, 武桂春, 刘贵忠. 2006. 西藏措勤县东布错地区“下拉组”中发现晚三叠世诺利期高舟牙形石. *地质通报*, 2006(Z1): 138~141.
- 纪占胜, 姚建新, 武桂春. 2007. 西藏西部狮泉河地区二叠纪和三叠纪牙形石的发现及其意义. *地质通报*, 26(4): 383~397.
- 金承胜, 李超, 彭兴芳, 崔豪, 石炜, 张子虎, 罗根明, 谢树成. 2014. 华南寒武纪早期海洋化学状态的时空波动. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 44(5): 851~863.
- 李永安, 吴绍祖, 孙东江. 1997. 中国天山地区二叠—三叠系界线磁性特征的初步研究. *新疆地质*, 15(03): 227~235.
- 李玉成. 1999. 中国南方二叠—三叠纪过渡时期的碳同位素旋回地层与突变事件. *地球化学*, 28(04): 351~358.
- 刘萍, 郑荣才, 常海亮, 梁宁, 周刚. 2018. 川东地区二叠纪—三叠纪界线地层地质与地球化学特征. *地质论评*, 64(01): 29~44.
- 万晓樵, 李罡, 陈丕基, 于涛, 叶得泉. 2005. 松辽盆地白垩纪青山口

阶的同位素地层标志及其与海相 Cenomanian 阶的对比. 地质学报,79(02):150~156.

王大锐,冯晓杰. 2002. 渤海湾地区下古生界碳、氧同位素地球化学研究. 地质学报,76(03):400~408.

王思恩,高林志,庞其清,宋彪,李亚. 2015. 中国陆相侏罗系—白垩系界线及其国际地层对比——以冀北—辽西地区侏罗系—白垩纪年代地层为例. 地质学报,89(08):1331~1351.

王永标,童金南,王家生,周修高. 2005. 华南二叠纪末大绝灭后的钙质微生物岩及古环境意义. 科学通报,50(6):552~558.

谢树成,殷鸿福,曹长群,王春江,赖旭龙. 2009. 二叠纪—三叠纪之交地球表层系统的多幕式变化:分子地球生物学记录. 古生物学报,48(3):487~496.

徐国真,冯凡斌,雷勇,沈俊,冯庆来. 2012. 贵州安顺新民二叠系—

三叠系界线剖面磁化率变化及古气候环境意义. 沉积学报,30(5):817~824.

姚建新,李子舜. 1987. 西藏聂拉木县色龙西山二叠—三叠纪牙形刺动物群及二叠—三叠系分界. 科学通报,(1):45~51.

张利伟,杨文涛,牛永斌. 2014. 河南宜阳地区陆相二叠系—三叠系界线附近微生物成因沉积构造特征及意义. 地质论评,60(05):1051~1060.

周丽芊. 2012. 西藏文布当桑剖面二叠—三叠系界线附近牙形石 SHRIMP 微区原位氧同位素研究. 成都理工大学硕士学位论文.

周瑶琪,柴之芳,毛雪瑛,马淑兰. 1990. 浙江长兴煤山二叠、三叠系界线 Sr 同位素异常事件. 中国科学院研究生院学报,7(01):83~88.

**¹³C-¹⁸O Isotopic Anomalous Study of the Carbonate Rock
at the Wenbudangsang PTB Section, Tibet**

JI Changjun¹⁾, WU Zhenhan²⁾, YI Haisheng³⁾, XIA Guoqing³⁾, ZHAO Zhen²⁾, WANG Ting⁴⁾

1) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

3) *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;*

4) *College of Resource and Environment, Yangtze University, Wuhan, 430100*

Abstract

The research on the marine PTB in South China has been well-established, and the significant breakthrough has been made on the terrestrial PTB in eastern Yunnan Province, western Guizhou Province and Tianshan Mountains, but still poor in that of the Tibetan Tethys region. This research conducted C and O isotopic composition analysis for the complete Permian-Triassic conodonts biostratigraphy column established by the previous studies. The analysis results indicate an obvious negative excursion on the ¹³C isotopic composition at the PTB in the Wenbudangsang section (Tibet), but the excursion pattern is distinguished from that of the Meishan section in South China. To be specific, the pattern shows that its $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ decreased continuously as time passed by, which was similar to that of the PTB in South Alps. Comparison with the typical marine PTB in the Yangtze region which represents the transition of depositional environment from carbonates platform to lower shelf facies suggests that the $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ excursion pattern from the Wenbudangsang section (Tibet) is highly consistent with that of the Xishan (Jiangsu Province) shallow carbonates platform. Two events of obvious ¹⁸O isotopic negative excursion co-occurring with the negative $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ excursion at the PTB of the Wenbudangsang section (Tibet) may be related to the seawater temperature increasing and salinity decreasing during that time.

Key words: Permian-Triassic Boundary (PTB); Carbon isotopic negative excursion; marine carbonates; Tethys Region; Tibet