

江西信江盆地晚白垩世塘边组成壤碳酸盐岩碳、氧同位素特征

王凤之^{1,2}, 陈留勤^{1,2,3}, 郭福生², 李余亮²

(1. 东华理工大学省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013; 3. 山东科技大学 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590)

摘要: 利用古土壤成壤碳酸盐岩稳定同位素组成估算古代大气 CO₂ 浓度, 是当前古气候环境研究的重要手段。对采自江西信江盆地晚白垩世圭峰群塘边组的成壤碳酸盐岩碳、氧同位素测试表明, $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值在 -4.30‰ ~ -2.10‰ 之间, 平均值为 -2.84‰ 。 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值在 -6.62‰ ~ -1.14‰ 之间, 平均值为 -3.62‰ 。由 Cerling 经验公式估算出晚白垩世 Campanian 晚期约 75 Ma 的大气 CO₂ 浓度在 782 ~ 1 420 ppmv 之间, 平均值为 1 181 ppmv, 是当今大气 CO₂ 浓度的 2~4 倍。因此, 基于信江盆地塘边组成壤碳酸盐岩的大气 CO₂ 浓度估算结果, 可能指示了晚白垩世 Campanian 晚期存在一个大气 CO₂ 浓度高峰值, 反映了晚白垩世大气 CO₂ 浓度的波动性。

关键词: 成壤碳酸盐岩; 古大气 CO₂ 浓度; 晚白垩世; 塘边组; 信江盆地

中图分类号: P588.24⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)01-0143-09

Carbon and oxygen isotopic compositions of pedogenic carbonates from the Late Cretaceous Tangbian Formation in the Xinjiang Basin, Jiangxi Province

WANG Feng-zhi^{1,2}, CHEN Liu-qin^{1,2,3}, GUO Fu-sheng² and LI Yu-liang²

(1. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The isotope composition of pedogenic carbonates in paleosols is an effective approach to quantitative reconstruction of atmospheric CO₂ partial pressure. Stable isotope analysis of pedogenic carbonates from the Late Cretaceous Tangbian Formation in the Xinjiang Basin of Jiangxi Province was conducted to understand the paleoclimatic conditions. The carbon isotope compositions range from -4.30‰ to -2.10‰ (PDB) with an average of -2.84‰ , and the oxygen isotope compositions range from -6.62‰ to -1.14‰ (PDB) with an average of -3.62‰ . The CO₂ partial pressure was calculated to be from 782 to 1 420 ppmv based on Cerling's formula with an average of 1 181 ppmv during the Campanian Stage (~75 Ma), which is about 2~4 times higher than

收稿日期: 2017-01-06; 接受日期: 2017-11-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602113); 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ13438); 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室(山东科技大学)开放基金(DMSM2017011); 东华理工大学省部共建核资源与环境国家重点实验室培育基地开放基金(NRE1605); 江西省研究生创新基金项目(YC2015-S271)

作者简介: 王凤之(1990-), 男, 岩石学、矿物学、矿床学硕士研究生, E-mail: fzwang@126.com; 通讯作者: 陈留勤(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事沉积岩石学教学和科研工作, E-mail: liuqinchen@163.com。

that of the present-day level. Therefore, a marked high value of CO_2 partial pressure probably occurred during the late Campanian Stage, possibly reflecting the undulation of p_{CO_2} during the Late Cretaceous time.

Key words: pedogenic carbonate; atmospheric CO_2 partial pressure; Late Cretaceous; Tangbian Formation; Xinjiang Basin

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41602113); Research Foundation of Jiangxi Education Department (GJJ13438); Open Research Fund from the Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Mineral (Shandong University of Science and Technology) (DMSM2017011); Open Research Fund from the State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment (East China University of Technology) (NRE1605); Postgraduate Innovative Foundation of Jiangxi Province (YC2015-S271)

古土壤形成于地球表面,是地形、沉积物结构、母岩、时间、生物、水文条件、物源区位置和气候的综合产物(Retallack, 2001),蕴含丰富的原始古环境、古气候、古植被与古水文信息。因此,沉积地层中的古土壤是恢复古气候环境的重要载体(Kraus, 1999; Sheldon and Tabor, 2009)。在以古土壤为载体进行古气候重建时,常用的指标有古土壤钙积层发育深度、成壤碳酸盐稳定同位素等(Tabor and Myers, 2015)。

当前,对古大气 CO_2 浓度重建的方法有植物化石气孔指数、古土壤碳同位素和地球化学模型等几种方法。白垩纪是地史上典型的温室气候期,我国普遍发育陆相沉积,其中的古土壤为更深刻地认识该时期的古气候变化提供了重要途径。国内学者通过对松辽盆地(Huang *et al.*, 2013; Gao *et al.*, 2015)、四川盆地(黄成敏等, 2010; Huang *et al.*, 2012)、胶莱盆地(曹珂, 2014)及浙闽山区(李祥辉等, 2009; Li *et al.*, 2013)古土壤碳、氧同位素特征的研究,估算了白垩纪古土壤形成过程中的大气 CO_2 浓度,为认识该时期的气候变化提供了重要证据。国外的典型研究实例包括韩国 Gyeongsang 盆地(Lee, 1999; Hong and Lee, 2012)、日本九州岛半地堑盆地(Lee *et al.*, 2003)、加拿大阿尔伯达省南部(Nordt *et al.*, 2002)等地区的古土壤-古气候研究。与国内研究程度较高的松辽盆地和四川盆地相比,江西信江盆地白垩纪陆相红层中的古土壤较少受到关注。

针对赣东北地区信江盆地晚白垩世陆相红层,前人的研究主要集中在构造演化、沉积岩石特征和沉积体系(廖瑞君等, 2003; 陈留勤等, 2015; Chen *et al.*, 2016, 2017)及发育其中的丹霞地貌(Kusky

et al., 2010; 郭福生等, 2013)等方面。但是,对该套陆相红层中所蕴含的古气候信息研究较少。本次通过分析信江盆地塘边组中成壤碳酸盐岩碳、氧同位素特征和估算晚白垩世 Campanian 期大气 CO_2 浓度,为进一步认识华东南地区晚白垩世古气候环境提供了实际材料。

1 区域地质背景

信江盆地位于江西省东北部鹰潭市和上饶市境内,西通永丰-崇仁盆地,东接浙江金衢盆地,北与怀玉山隆起毗邻,南与武夷山隆起接壤,总面积约 3 600 km^2 ,呈近东西向延伸约 130 km。信江盆地处于扬子板块与华夏板块的结合带上,为华南地区晚中生代地壳伸展拉张背景(舒良树, 2012; 张岳桥等, 2012)下形成的陆相断陷盆地之一(图 1)。

信江盆地上白垩统包括赣州群和圭峰群,前者包括茅店组和周田组,后者包括河口组、塘边组和莲荷组,圭峰群红层是构成以龙虎山世界地质公园为代表的丹霞地貌的物质基础(Kusky *et al.*, 2010; 郭福生等, 2013)。圭峰群下部火山岩夹层 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 91 ± 3 Ma(李瑞玲等, 2010)或 93 ± 1 Ma(巫建华等, 2014)。区域地层对比表明,河口组、塘边组、莲荷组分别为 Coniacian-Santonian 期、Campanian 期、Masstrichtian 期的沉积产物(曹珂, 2013)。结合圭峰群古生物化石组合(江西省地质矿产厅, 1997),可以推断圭峰群沉积时期为 90~66 Ma,是晚白垩世中至晚期的沉积产物。

信江盆地塘边组下部为砖红色岩屑石英砂岩、细砂岩、粉砂岩,产恐龙蛋化石;中部为紫红色砾质

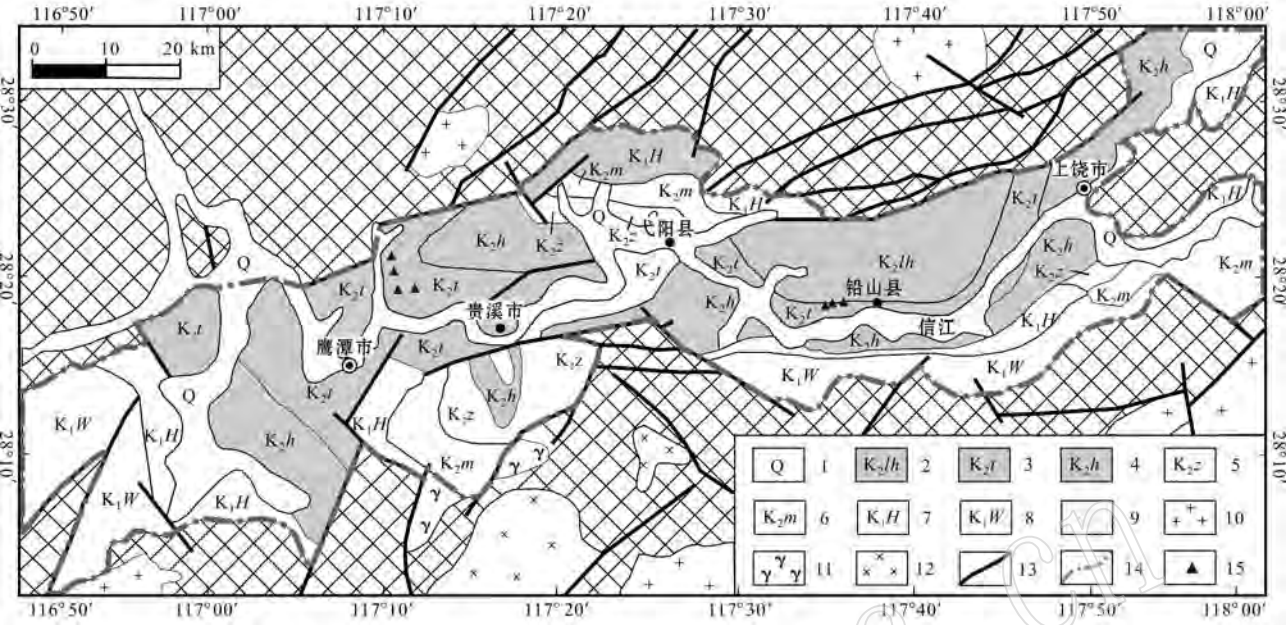


图 1 信江盆地地质简图(据郭福生等,2013 修改)和成壤碳酸盐岩样品采集位置

Fig. 1 Simplified geological map of the Xinjiang Basin (modified after Guo Fusheng *et al.*, 2013) and the sampling locations

1—第四系; 2—莲荷组; 3—塘边组; 4—河口组; 5—周田组; 6—茅店组; 7—火把山群; 8—武夷群; 9—前白垩系; 10—侏罗-白垩纪花岗岩; 11—三叠纪花岗岩; 12—志留纪花岗岩; 13—断层; 14—盆地边界; 15—采样点

1—Quaternary; 2—Lianhe Formation; 3—Tangbian Formation; 4—Hekou Formation; 5—Zhoutian Formation; 6—Maodian Formation; 7—Huobashan Group; 8—Wuyishan Group; 9—Pre-Cretaceous strata; 10—Jurassic-Cretaceous granite; 11—Triassic granite; 12—Silurian granite; 13—fault; 14—basin boundary; 15—sampling point

粗砂岩、粉砂质细砾岩及含砾中细砂岩;上部是砖红色中粗粒砂岩、含钙细砂岩、粉砂岩(图 2)。在盆地边缘塘边组发育冲积扇沉积,常见泥裂构造和钙质

结核,在横峰-弋阳地区的塘边组可见发育大型高角度交错层理的风成砂岩(江新胜等, 2006; Jiang *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2014)。因此,赣东北地区的



图 2 信江盆地上白垩统圭峰群地层柱状简图(据江西省地质矿产厅,1997 修改)及取样位置(年代地层对比据曹珂,2013)

Fig. 2 Simplified stratigraphic column of the Late Cretaceous Guifeng Group in the Xinjiang Basin (modified after Department of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province, 1997) and the sampling location (chronostratigraphic correlation after Cao Ke, 2013)

圭峰群总体上是在干旱、炎热古气候条件下冲积扇、河流、干盐湖沉积环境的产物(Chen *et al.*, 2017)。

2 样品采集和研究方法

研究区位于信江盆地中部,本次研究共选择 7 件成壤碳酸盐岩样品(图 1),分别采自贵溪剖面(4 件)和铅山剖面(3 件)。取样层位为塘边组上部的泥岩地层(图 2)。结合岩石地层对比和圭峰群下部火山岩夹层 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(李瑞玲等, 2010; 巫建华等, 2014),取样层位年龄估计为 75 Ma。

利用古土壤成壤碳酸盐岩重建古大气 CO_2 浓度,要求采样测试的碳酸盐岩样品是在成壤过程中形成的(Alonso-Zarza, 2003)。本研究中所选择的 7 件样品,按照 Alonso-Zarza(2003)提出的识别标准,判断为成壤作用过程中形成的。这些识别特征包括(图 3): ① 采集的钙质结核样品呈球形、椭球形、姜结状,伴生有圆形、椭圆形浅灰绿色、灰色晕斑; ② 钙质结核直径为 2~100 mm,质地坚硬,没有裂隙充填,碳酸钙含量高,滴稀盐酸强烈起泡; ③ 钙质结核周围的泥岩覆盖率达到 50%,可见植物根迹和潜穴。因此,本次研究选择的塘边组成壤碳酸盐岩可以反映成壤过程中的环境信息。

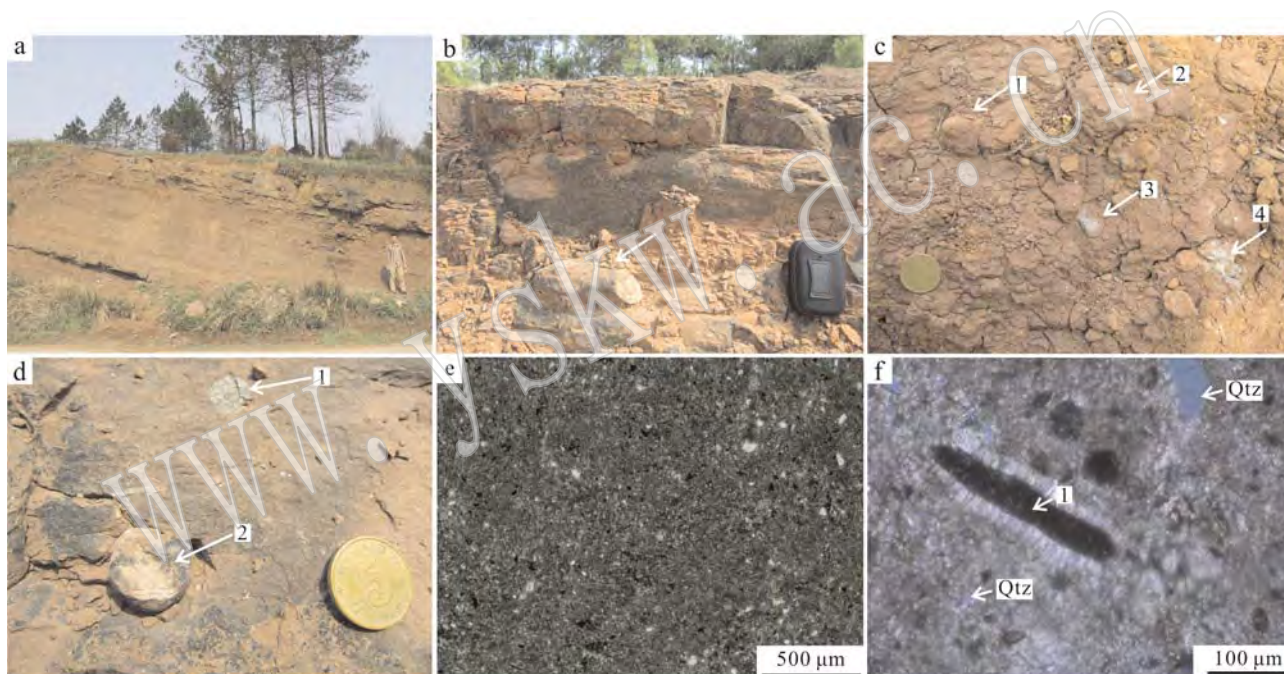


图 3 信江盆地塘边组成壤碳酸盐岩照片

Fig. 3 Photos of pedogenic carbonates from the Tangbian Formation in the Xinjiang Basin

a—古土壤露头剖面照片; b—较大的钙质结核; c1—椭圆形钙质结核; c2、c3、c4—浅灰绿色晕斑和根迹; d1—浅灰绿色杂色晕斑;

d2—球形的钙质结核; e、f—钙质结核的微观特征照片; f1—植物根系被硅质交代充填

a—overview of the paleosol outcrop; b—a large calcareous nodule; c1—oblong calcareous nodules; c2, c3, c4—light grayish green halo and root trace; d1—light grayish green mottled halo; d2—spherical calcareous nodule; e, f—microscopic photos of calcareous nodules; f1—plant roots filled with silica

从每个采样点的样品中选取新鲜、结构致密坚硬、碳酸钙含量高的钙质结核样品进行碳、氧同位素测试,实验在澳实分析检测(广州)有限公司进行。首先将样品切割,露出新鲜面,在中心位置取碳酸盐粉末 20 mg,研磨至 200 目后加入浓磷酸,在 72℃ 下反应 1 小时析出 CO_2 ,用离轴积分腔输出激光光谱仪(Los Gatos Research 908-0021)测定碳、氧同位素,

检测精度 0.1‰。

本次研究采用 Cerling(1999)的大气 CO_2 浓度公式估算 p_{CO_2} :

$$p(\text{CO}_2)_{\text{atm}} = S_{(z)}(\delta^{13}\text{C}_s - 1.0044\delta^{13}\text{C}_r - 4.4)/(\delta^{13}\text{C}_a - \delta^{13}\text{C}_s)$$

式中: $S_{(z)}$ 是深度 z 处土壤生物产生的 CO_2 浓度(单位 ppmv); $\delta^{13}\text{C}_s$ 、 $\delta^{13}\text{C}_r$ 、 $\delta^{13}\text{C}_a$ 分别是土壤 CO_2 、土壤

呼吸 CO₂、大气 CO₂ 的同位素值(单位‰); $\delta^{13}\text{C}_s = -8.98 + \delta^{13}\text{C}$, -8.98 是温度分馏系数, $\delta^{13}\text{C}$ 由实验室测出(Ekart *et al.*, 1999); $\delta^{13}\text{C}_r$ 通常用古土壤有机质碳同位素组成 $\delta^{13}\text{C}_{\text{om}}$ 代替(Cerling, 1999), $\delta^{13}\text{C}_{\text{om}}$ 可直接从 Ekart 等(1999)的模型曲线上读出, $\delta^{13}\text{C}_r$ 值为 -24.1‰ ; $\delta^{13}\text{C}_a$ 从 Ekart 等(1999)的模型曲线上读出 -6.4‰ , Arens 等(2000)将 $\delta^{13}\text{C}_a$ 校正为 $\delta^{13}\text{C}_{ac}$, 即: $\delta^{13}\text{C}_{ac} = (\delta^{13}\text{C}_r + 18.67)/1.1$; $S_{(z)}$ 取值采用 Breecker 等(2009, 2010)提议的, 在干旱沙漠气候条件下, $S_{(z)}$ 取 1 000 ppmv。

3 研究结果

塘边组成壤碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$ 值在 $-4.30\text{‰} \sim -2.10\text{‰}$ 之间, 平均值为 -2.84‰ 。 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 值在 $-6.62\text{‰} \sim -1.14\text{‰}$ 之间, 平均值为 -3.62‰ 。 $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB}) < -7\text{‰}$, 表示受到了后期成岩作用的影

响。本次的实验结果中, $\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$ 全部大于 -7‰ , 表示没有受到后期成岩作用的影响或影响很弱(表 1)。

表 1 塘边组成壤碳酸盐岩碳、氧同位素测试结果 %
Table 1 Stable isotopic compositions of pedogenic carbonates from the Tangbian Formation

样品编号	$\delta^{13}\text{C}(\text{PDB})$	$\delta^{18}\text{O}(\text{PDB})$
GX-01	-3.01	-4.00
GX-02	-2.10	-2.88
GX-03	-2.55	-2.11
GX-04	-2.37	-3.61
HF-01	-3.22	-4.97
HF-02	-2.32	-6.62
HF-03	-4.30	-1.14

利用信江盆地塘边组成壤碳酸盐岩稳定同位素测试结果, 估算晚白垩世 Campanian 期约 75 Ma 的大气 CO₂ 浓度在 782~1 420 ppmv 之间, 平均值为 1 181 ppmv(表 2)。

表 2 依据不同参数估算的塘边组大气 CO₂ 浓度结果

Table 2 Comparative estimates of p_{CO_2} using different parameters for the Tangbian Formation

样品	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_s/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_r/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_a/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{ac}/\text{‰}$	$p_{1\text{CO}_2}/\text{ppmv}$	$p_{2\text{CO}_2}/\text{ppmv}$
GX-01	-3.01	-11.99	-24.1	-6.4	-4.9	1 398	1 108
GX-02	-2.1	-11.08	-24.1	-6.4	-4.9	1 865	1 420
GX-03	-2.55	-11.53	-24.1	-6.4	-4.9	1 613	1 255
GX-04	-2.37	-11.35	-24.1	-6.4	-4.9	1 708	1 318
HF-01	-3.22	-12.2	-24.1	-6.4	-4.9	1 311	1 047
HF-02	-2.32	-10.3	-24.1	-6.4	-4.9	1 736	1 337
HF-03	-4.3	-13.28	-24.1	-6.4	-4.9	949	782

注: 为方便对比, 选取不同的参数进行了计算。 $p_{1\text{CO}_2}$ ($\delta^{13}\text{C}_a$ 未校正): $S_{(z)} = 1\,000$, $\delta^{13}\text{C}_s = \delta^{13}\text{C}_s$, $\delta^{13}\text{C}_r = \delta^{13}\text{C}_r$, $\delta^{13}\text{C}_a = \delta^{13}\text{C}_a$; $p_{2\text{CO}_2}$ ($\delta^{13}\text{C}_a$ 校正后): $S_{(z)} = 1\,000$, $\delta^{13}\text{C}_s = \delta^{13}\text{C}_s$, $\delta^{13}\text{C}_r = \delta^{13}\text{C}_r$, $\delta^{13}\text{C}_a = \delta^{13}\text{C}_{ac}$ 。参考前人的研究方法, 选取校正后的 $p_{2\text{CO}_2}$ 作为本次的研究结果。

4 讨论

赣东北地区圭峰群中的古生物化石(江西省地质矿产局, 1984)、风成沙丘(江新胜等, 2006; Chen *et al.*, 2014)、碎屑岩化学蚀变指数(CIA)(Chen *et al.*, 2016)、冲积扇沉积体系(Chen *et al.*, 2017)等总体上体现了干旱炎热的古气候条件, 与华东南地区晚白垩世亚热带干燥炎热的古气候背景(陈丕基, 1997)一致。特别是横峰-弋阳一带出露的塘边组风成砂岩指示研究区当时可能位于北半球西风带和东北信风带并受到 S-SE 和 N-NW 古季风的影响, 与晚

白垩世 Campanian 期东亚中纬度地区广泛的干旱化有关(江新胜等, 2006; Jiang *et al.*, 2008)。

信江盆地塘边组成壤碳酸盐岩的碳、氧同位素值与前人的研究成果相比, 既有相似性, 也存在差异。如: 胶莱盆地晚白垩世辛格庄组成壤碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-2.87\text{‰} \sim -1.60\text{‰}$, 平均值为 -2.13‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-11.93\text{‰} \sim -7.79\text{‰}$, 平均值为 -9.87‰ (曹珂, 2014)。四川盆地中侏罗世沙溪庙组成壤碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-9.30\text{‰} \sim -5.07\text{‰}$, 平均值为 -7.06‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-10.50\text{‰} \sim -7.78\text{‰}$, 平均值为 -9.34‰ (梁斌等, 2007)。韩国 Gyeongsang 盆地早白垩世 Hasandong 组成壤碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值为

$-9.3\text{‰} \sim -2.4\text{‰}$, 平均值为 -5.6‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-18.0\text{‰} \sim -14.2\text{‰}$, 平均值为 -16.7‰ (Lee, 1999)。日本九州岛早白垩世 Shimonoseki 亚群成壤碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $-7.0\text{‰} \sim -5.4\text{‰}$, 平均值为 -6.7‰ ; $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-22.8\text{‰} \sim -20.1\text{‰}$, 平均值为 -22.1‰ (Lee *et al.*, 2003)。信江盆地塘边组和胶莱盆地辛格庄组成壤碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差别很小, 显示它们在晚白垩世时期具有相似的沉积环境。与韩国 Gyeongsang 盆地早白垩世 Hasandong 组、日本九州岛早白垩世 Shimonoseki 亚群相比则存在明显差异, 指示晚白垩世和早白垩世大气 CO_2 浓度之间的明显差异。

信江盆地晚白垩世 Campanian 期(约 75 Ma)大气 CO_2 浓度为 $782 \sim 1420$ ppmv, 平均值 1181 ppmv, 是当今大气 CO_2 浓度(刘立新等, 2009)的 2~4 倍。Li 等(2013)对中国早白垩世大气 CO_2 浓度的研究表明, 当时的大气 CO_2 浓度是现代大气浓度的 4~8 倍。说明晚白垩世和早白垩世大气 CO_2 浓度具有继承性, 白垩纪大气 CO_2 浓度总体上呈下降趋势。曹珂(2014)计算的晚白垩世 80 Ma 时期的 p_{CO_2} 为 $3109 \sim 4437$ ppmv, 平均为 3817 ppmv, 但是计算时 $S_{(z)}$ 的取值是 2500 ppmv。而 Breecker 等(2009, 2010)提议在温带和热带半湿润气候条件下 $S_{(z)}$ 取 2500 ppmv, 在半干旱气候条件下取 2000 ppmv, 在沙漠气候条件下取 1000 ppmv。胶莱盆地当时处于中低纬度沙漠带的边缘, 属于旱-半干旱气候, p_{CO_2} 可能比 3817 ppmv 要低。Hong 等(2012)在研究韩国 Gyeongsang 盆地时, 发现 Campanian 期 83 Ma 附近存在一个较高的 CO_2 浓度值(图 4), 并且根据 Ekart 等(1999)的研究资料重新计算了美国 Montanan 地区 75 Ma 的大气浓度, p_{CO_2} 为 1412 ppmv, 与本次研究结果接近。

综上所述, 胶莱盆地、信江盆地、美国 Montanan 地区和韩国 Gyeongsang 盆地晚白垩世的大气 CO_2 浓度在 Campanian 晚期明显偏高。但是, 胶莱盆地、韩国 Gyeongsang 盆地及信江盆地的样品年龄都是根据火成岩夹层的年龄来推断, 增加了对比难度, 降低了结果的可靠性。Wang 等(2014)、王永栋等(2015)通过总结白垩纪大气 CO_2 浓度的变化趋势, 认为在 Campanian 晚期 CO_2 浓度急剧升高。万传彪等(2011)、Quan 等(2009)对黑龙江嘉荫盆地 Campanian 晚期植物化石的研究支持此观点(图 4)。虽然白垩纪全球大气 CO_2 浓度从早到晚表现为一个逐

渐降低的过程, 但是晚白垩世大气 CO_2 浓度可能存在更为复杂的变化过程。

前人利用植物化石气孔指数对 Campanian 期大气 CO_2 浓度的重建(Quan *et al.*, 2009), 指示在晚白垩世 Campanian 晚期存在一个大气 CO_2 浓度峰值(图 4), 该曲线与地球化学模型 GEOCARB II (Berner, 1994) 具有相似的趋势。但是, 地球化学模型 GEOCARB III (Berner and Kothavala, 2001) 的大气 CO_2 浓度比以上二者都要高。本次基于信江盆地塘边组成壤碳酸盐岩稳定同位素估算的大气 CO_2 浓度与地球化学模型 GEOCARB III (Berner and Kothavala, 2001) 比较接近, 部分落在 GEOCARB II 允许的误差范围之内(图 4)。

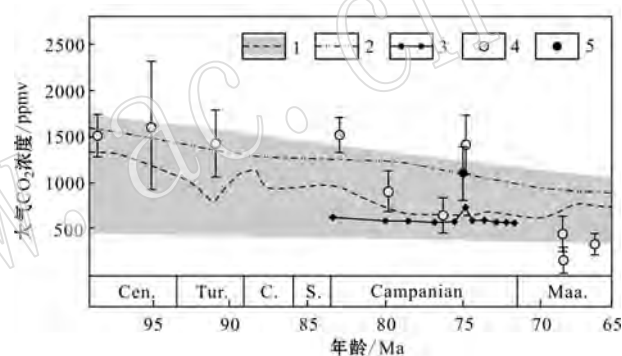


图 4 晚白垩世大气 CO_2 浓度对比图

Fig. 4 Comparative diagram of p_{CO_2} during the

Late Cretaceous

1—GEOCARB II 模型 (Berner, 1994); 2—GEOCARB III 模型 (Berner and Kothavala, 2001); 3—植物化石气孔指数计算的 Campanian 期 p_{CO_2} (Quan *et al.*, 2009); 4—古土壤成壤碳酸盐碳同位素计算的晚白垩世 p_{CO_2} (Hong and Lee, 2012); 5—本次研究成果

1—GEOCARB II (Berner, 1994); 2—GEOCARB III (Berner and Kothavala, 2001); 3— p_{CO_2} during the Campanian Stage based on stomatal index of plant fossils (Quan *et al.*, 2009); 4— p_{CO_2} in the Late Cretaceous based on carbon isotopic compositions of pedogenic carbonates (Hong and Lee, 2012); 5—research result of this work

Beerling 等(2002)曾指出, 由于不同替代指标的影响, 古土壤碳同位素法估算的大气 CO_2 浓度结果总是高于植物化石气孔指数的结果。因此, 两者无法进行定量比较。

需要指出的是, 本文研究仍然存在一些问题: ① 成壤碳酸盐岩采样位置的年代(75 Ma)是根据圭峰群下部火山岩夹层锆石 U-Pb 年龄和区域地层对比推测出来的, 这会影响部分参数的选择, 同时也增加了对比难度, 降低了结果的可靠性。② 本研究没有对造成大气 CO_2 浓度波动的原因进行讨论, 对于晚

白垩世大气 CO₂ 浓度波动的原因与同一时期地质事件之间的关系探究,需要积累更多的数据进行更深入的研究。

5 结论

在赣东北信江盆地晚白垩世圭峰群陆相红层中,塘边组总体粒度较细,古土壤特征明显。在塘边组采集到的成壤碳酸盐岩碳、氧同位素组成变化范围较小, $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) 值为 $-4.30\text{‰} \sim -2.10\text{‰}$, 平均值为 -2.84‰ 。 $\delta^{18}\text{O}$ (PDB) 值为 $-6.62\text{‰} \sim -1.14\text{‰}$, 平均值为 -3.62‰ 。利用塘边组成壤碳酸盐岩碳同位素估算的晚白垩世 Campanian 晚期约 75 Ma 的大气 CO₂ 浓度为 782~1 420 ppmv, 平均值为 1 181 ppmv, 是当今大气 CO₂ 浓度的 2~4 倍, 表明晚白垩世 Campanian 晚期存在一个大气 CO₂ 浓度的高值。因此, 虽然白垩纪大气 CO₂ 浓度显示为一个整体下降的趋势, 但是更多的细节变化还有待于进一步深入研究。

致谢 硕士研究生唐超及本科生习松、张露、余峰参加了野外工作, 匿名审稿人为论文修改提出了宝贵意见, 在此一并表示感谢。

References

- Alonso-Zarza A M. 2003. Palaeoenvironmental significance of palustrine carbonates and calcretes in the geological record[J]. *Earth Science Reviews*, 60: 261~298.
- Arens N C, Jahren A H and Amundson R. 2000. Can C₃ plants faithfully record the carbon isotopic composition of atmospheric carbon dioxide? [J]. *Paleobiology*, 26: 137~164.
- Beerling D J and Royer D L. 2002. Fossil plants in dicators of Phanerozoic global carbon cycle[J]. *Auu Rev Earth Planet Sic.*, 30: 527~556.
- Berner R A. 1994. GEOCARB II: A revised model of atmospheric CO₂ over phanerozoic time[J]. *American Journal of Science*, 294(2): 56~91.
- Berner R A and Kothavala Z. 2001. GEOCARB III: A revised model of atmospheric CO₂ over phanerozoic time[J]. *American Journal of Science*, 301: 182~204.
- Breecker D O, Sharp Z D and McFadden L D. 2009. Seasonal bias in the formation and stable isotopic composition of pedogenic carbonate in modern soils from central New Mexico, USA[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 121(3~4): 630~640.
- Breecker D O, Sharp Z D and McLadden L D. 2010. Atmospheric CO₂ concentrations during ancient greenhouse climates were similar to those predicted for A. D. 2100[J]. *PNAS*, 107(2): 576~580.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province. 1984. An Outline of the Regional Geology of Jiangxi, China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Cao Ke. 2013. Cretaceous terrestrial stratigraphic correlation in China [J]. *Geological Review*, 59(1): 24~40(in Chinese with English abstract).
- Cao Ke. 2014. Carbon and oxygen isotopic compositions of carbon nodule in the Xinggezhuang Formation of late cretaceous, Jiaozhou-Laiyang Basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 34(2): 85~90(in Chinese with English abstract).
- Cerling T E. 1999. Palaeoweathering, palaeosurfaces and related continental deposits[A]. Simon-Coincon R. Special Publication of the International Association of Sedimentologists[C]. Cambridge: 43~60.
- Chen Liuqin, Guo Fusheng and Liang Wei. 2015. Sandstone detrital composition and tectonic attributes of provenance of the Upper Cretaceous Hekou Formation in western Gan-Hang tectonic belt[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46(2): 571~578(in Chinese with English abstract).
- Chen Liuqin, Guo Fusheng, Steel R J, *et al.* 2016. Petrography and geochemistry of the Late Cretaceous redbeds in the Gan-Hang Belt, Southeast China: implications for provenance, source weathering, and tectonic setting[J]. *International Geology Review*, 58(10): 1 196~1 214.
- Chen Liuqin, Guo Fusheng and Tang Chao. 2014. Is the Cretaceous aeolian sandstones of Xinjiang Basin in Jiangxi Province the sedimentary response of the Eastern China Plateau [A]. Abstracts Book of 19th International Sedimentological Congress[C]. Geneva: University of Geneva, Switzerland: 136.
- Chen Liuqin, Steel R J, Guo Fusheng, *et al.* 2017. Alluvial fan facies of the Yongchong Basin: Implications for tectonic and paleoclimatic changes during Late Cretaceous in SE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 134: 37~54.
- Chen Peiji. 1997. Coastal mountains of SE Chinas desertization and saliniferous lakes of Central China during the Upper Cretaceous[J]. *Journal of Stratigraphy*, 21(3): 203~213(in Chinese with English

- abstract).
- Department of Geology and Mineral Resources of Jiangxi Province. 1997. Stratigraphy (lithostratic) of Jiangxi Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- Ekart D D, Cerling T E, Montoez I P, *et al.* 1999. A 400 million year carbon isotope record of pedogenic carbonate: implications for paleoatmospheric carbon dioxide[J]. *American Journal of Science*, 299: 805~827.
- Gao Yuan, Ibarra E D, Wang Chengshan, *et al.* 2015. Mid-latitude terrestrial climate of East Asia linked to global climate in the Late Cretaceous[J]. *Geology*, 43(4): 287~290.
- Guo Fusheng, Zhu Zhijun, Huang Baohua, *et al.* 2013. Cretaceous Sedimentary System and Their Relationship with Danxia Landform in Xinjiang Basin, Jiangxi[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 954~964(in Chinese with English abstract).
- Hong S K and Lee Y I. 2012. Evaluation of atmospheric carbon dioxide concentrations during the Cretaceous[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 327~328: 33~38.
- Huang Chengmin, Retallack G J and Wang Chengshan. 2010. Cretaceous calcareous paleosols: Pedogenetic characteristics and paleoenvironmental implications[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 47(6): 1 029~1 038(in Chinese with English abstract).
- Huang Chengming, Retallack G J and Wang Chengshan. 2012. Early Cretaceous atmospheric p_{CO_2} levels recorded from pedogenic carbonates in China[J]. *Cretaceous Research*, 33: 42~49.
- Huang Chengming, Retallack G J, Wang Chengshan, *et al.* 2013. Paleoatmospheric p_{CO_2} fluctuations across the Cretaceous-Tertiary boundary recorded from paleosol carbonates in NE China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 95~105.
- Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi, Xu Jinsha, *et al.* 2006. Late Cretaceous aeolian dunes and reconstruction of palaeo-wind belts of the Xinjiang Basin, Jiangxi Province, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(7): 833~837(in Chinese with English abstract).
- Jiang Xinsheng, Pan Zhongxi, Xu Jinsha, *et al.* 2008. Late Cretaceous aeolian dunes and reconstruction of palaeo-wind belts of the Xinjiang Basin, Jiangxi Province, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 257(1~2): 58~66.
- Kraus M J. 1999. Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geologic applications[J]. *Earth-Science Reviews*, 47: 41~70.
- Kusky T M, Ye Minghe, Wang Junpeng, *et al.* 2010. Geological evolution of Longhushan World Geopark in relation to global tectonics[J]. *Journal of Earth Science*, 21(1): 1~18.
- Lee Y. 1999. Stable isotopic composition of calcic paleosols of the Early Cretaceous Hasandong Formation, southeastern Korea[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 150: 123~133.
- Lee Y W, Lee Y and Hisada K. 2003. Paleosols in the Cretaceous Goshoura and Mifune groups, SW Japan and their paleoclimate implications[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 199(3/4): 265~282.
- Li Ruling and Li Zhenzhen. 2010. SHRIMP Zircon U-Pb age of late Mesozoic basaltic magmatism in the Yujiang Region, Southeastern China and its implication[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 30(2): 45~49(in Chinese with English abstract).
- Li Xianghui, Chen Sidun, Cao Ke, *et al.* 2009. Paleosols of the mid-Cretaceous: A report from Zhejiang and Fujian, SE China. *Earth Science Frontiers*, 16(5): 63~70(in Chinese with English abstract).
- Li Xianghui, Xu Wenli, Liu Weihong, *et al.* 2013. Climatic and environmental indications of carbon and oxygen isotopes from the Lower Cretaceous calcrete and lacustrine carbonates in Southeast and Northwest China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 171~189.
- Liao Ruijun, Zhong Cundi and Xiao Xiaolin. 2003. Basin-margin types and basin-fill types of Cretaceous-Neogene terrestrial red basins in Jiangxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(9): 680~685(in Chinese with English abstract).
- Liang Bin, Wang Quanwei and Kan Zezhong. 2007. Carbon and oxygen isotopic compositions of carbonate nodule in the Shaximiao Formation of the middle Jurassic, Sichuan basin[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 27(2): 54~58(in Chinese with English abstract).
- Liu Lixin, Zhou Lingxi, Zhang Xiaochun, *et al.* 2009. Variation characteristics of atmospheric CO_2 concentration in 4 national background stations in China[J]. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, 39(2): 222~228(in Chinese with English abstract).
- Nordt L, Atchley S and Dworkin S I. 2002. Paleosol barometer indicates extreme fluctuations in atmospheric CO_2 across the Cretaceous-Tertiary boundary[J]. *Geology*, 30(8): 703~706.
- Quan Cheng, Sun Chunlin, Sun Yuewu, *et al.* 2009. High resolution estimates of paleo- CO_2 levels through the Campanian(Late Cretaceous) based on Ginkgo cuticle[J]. *Cretaceous Research*, 30: 424~428.
- Retallack G J. 2001. *Soils of the Past: An Introduction to Paleopedology* (2nd edition)[M]. Oxford: Blackwell.

- Sheldon N D and Tabor N J. 2009. Quantitative paleoenvironmental and paleoclimatic reconstruction using paleosols[J]. *Earth-Science Reviews*, 95(1/2): 1~52.
- Shu Liangshu. 2012. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(7): 1 035~1 053(in Chinese with English abstract).
- Tabor N J and Myers T S. 2015. Paleosols as indicators of paleoenvironment and paleoclimate[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43: 333~361.
- Wan Chuanbiao, Wang Dehai, Zhu Zhanping, *et al.* 2011. Trend of Santonian (Late Cretaceous) atmospheric CO₂ and global mean land surface temperature: Evidence from plant fossils[J]. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, 41(7): 1 000~1 008(in Chinese with English abstract).
- Wang Yongdong, Huang Chengmin, Sun Bainian, *et al.* 2014. Paleocarbon variation trends and the Cretaceous greenhouse climate[J]. *Earth-Science Reviews*, 129: 136~147.
- Wang Yongdong, Sun Bainian, Huang Chengmin, *et al.* 2015. Variation of paleo-CO₂ and greenhouse climate in the geological history: A case study from the Cretaceous of the Mesozoic[J]. *Chinese Journal of Nature*, 37(2): 108~114(in Chinese with English abstract).
- Wu Jianhua, Xiang Yuanxin and Zhong Zhifei. 2014. SHRIMP zircon U-Pb dating and Sr-Nd-Pb-O isotope characteristics of shoshonite from Guangfeng and Yushan basins in Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 33(4): 645~656(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Li Jianhua, *et al.* 2012. The New Progress in the Study of Mesozoic Tectonics of South China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(3): 257~279(in Chinese with English abstract).
- 岩碎屑组成及物源区的构造属性[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 46(2): 571~578.
- 陈丕基. 1997. 晚白垩世中国东南沿岸山系与中南地区的沙漠和盐湖化[J]. *地层学杂志*, 21(3): 203~213.
- 郭福生, 朱志军, 黄宝华, 等. 2013. 江西信江盆地白垩系沉积体系及其与丹霞地貌的关系[J]. *沉积学报*, 31(6): 954~964.
- 黄成敏, Retallack G J, 王成善. 2010. 白垩纪钙质古土壤的发生学特征及古环境意义[J]. *土壤学报*, 47(6): 1 029~1 038.
- 江西省地质矿产局. 1984. 江西省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 江西省地质矿产厅. 1997. 江西省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 江新胜, 潘忠习, 徐金沙, 等. 2006. 江西信江盆地晚白垩世风成沙丘的发现及其古风向[J]. *地质通报*, 25(7): 833~837.
- 李瑞玲, 李真真. 2010. 中国东南部余江基性岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 30(2): 45~49.
- 李祥辉, 陈斯盾, 曹珂, 等. 2009. 浙闽地区白垩纪中期古土壤类型与古气候[J]. *地学前缘*, 16(5): 63~70.
- 梁斌, 王全伟, 阚泽忠. 2007. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组钙质结核的碳、氧同位素特征[J]. *矿物岩石*, 27(2): 54~58.
- 廖瑞君, 袁存堤, 肖晓林. 2003. 江西白垩纪-新近纪陆相红色盆地的盆缘类型划分与盆地充填样式[J]. *地质通报*, 22(9): 680~685.
- 刘立新, 周凌晔, 张晓春, 等. 2009. 我国 4 个国家级本底站大气 CO₂ 浓度变化特征[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 39(2): 222~228.
- 舒良树. 2012. 华南构造演化的基本特征[J]. *地质通报*, 31(7): 1 035~1 053.
- 万传彪, 王德海, 朱占平, 等. 2011. 晚白垩世三冬期大气 CO₂ 及全球陆表均温变化: 植物化石证据[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 41(7): 1 000~1 008.
- 王永栋, 孙柏年, 黄成敏, 等. 2015. 地史时期古大气二氧化碳变化趋势与温室气候——以中生代白垩纪为例[J]. *自然杂志*, 37(2): 108~114.
- 巫建华, 项媛馨, 钟志菲. 2014. 江西广丰、玉山盆地橄榄玄粗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年和 Sr-Nd-Pb-O 元素同位素特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 33(4): 645~656.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. *地球学报*, 33(3): 257~279.

附中文参考文献

- 曹珂. 2013. 中国陆相白垩系地层对比[J]. *地质论评*, 59(1): 24~40.
- 曹珂. 2014. 胶莱盆地晚白垩世辛格庄组钙质结核的碳、氧同位素特征[J]. *矿物岩石*, 34(2): 85~90.
- 陈留勤, 郭福生, 梁伟. 2015. 赣杭构造带西段上白垩统河口组砂