



引文格式: 王茜, 申欢, 魏正安, 等. 甘肃北山地区早白垩世古气候定量研究: 基于爬行动物 C-O 同位素分析[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 136–149. DOI: 10.12401/j.nwg.2024071

Citation: WANG Qian, SHEN Huan, WEI Zheng'an, et al. Quantitative Study of the Early Cretaceous Paleoclimate in Beishan Area, Gansu Province: Based on C-O Isotope Analysis of Reptiles[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 136–149. DOI: 10.12401/j.nwg.2024071

## 甘肃北山地区早白垩世古气候定量研究: 基于爬行动物 C-O 同位素分析

王茜<sup>1</sup>, 申欢<sup>2</sup>, 魏正安<sup>3</sup>, 李宇白<sup>4</sup>, 张治锋<sup>5</sup>

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084; 3. 深圳大学高等研究院, 广东 深圳 518060;  
4. 长安大学地测学院, 陕西 西安 710064; 5. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:** 为定量查明甘肃省北山地区早白垩世古气温、古降水量等重要古气候指标, 在酒泉盆地东北缘北山地区下白垩统采集了恐龙牙齿、鳄类牙齿和龟类背甲有效样品。笔者通过化学实验从牙釉质和龟甲中获取了生物磷灰石, 提纯并测得了磷灰石中磷酸根的  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  值(‰, V-SMOW)、碳酸根的  $\delta^{13}\text{C}_\text{c}$  值(‰, V-PDB)。禽龙类牙齿牙釉质的  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  值(‰, V-SMOW)为 14.627‰~22.137‰, 平均值为 17.634‰; 角龙类牙齿牙釉质的  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  值(‰, V-SMOW)为 15.532‰~22.668‰, 平均值为 18.225‰; 兽脚龙类牙齿牙釉质的  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  值(‰, V-SMOW)为 16.915‰~20.763‰, 平均值为 18.925‰; 鳄鱼牙齿牙釉质的  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  值(‰, V-SMOW)为 16.619‰; 龟类背甲  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  值(‰, V-SMOW)为 15.106‰~16.627‰, 平均值为 16.061‰。禽龙类牙齿牙釉质的  $\delta^{13}\text{C}_\text{c}$  值(‰, V-PDB)为 -6.477‰~-1.852‰, 平均值为 -5.274‰; 角龙类牙齿牙釉质的  $\delta^{13}\text{C}_\text{c}$  值(‰, V-PDB)为 -5.609‰~-2.495‰, 平均值为 -4.051‰。根据 O 同位素数据计算得出全年平均古气温为  $(19.5\pm 3.2)^\circ\text{C}$ , 根据 C 同位素数据计算出全年平均降水量为  $(605\pm 151)\text{mm/y}$ , 表明酒泉地区早白垩世为暖温-亚热带的干燥森林气候, 以半干旱-干旱环境为主。

**关键词:** 北山地区; 早白垩世; 古气候; C-O 同位素; 生物磷灰石

中图分类号: P532

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)06-0136-14

### Quantitative Study of the Early Cretaceous Paleoclimate in Beishan Area, Gansu Province: Based on C-O Isotope Analysis of Reptiles

WANG Qian<sup>1</sup>, SHEN Huan<sup>2</sup>, WEI Zheng'an<sup>3</sup>, LI Yubai<sup>4</sup>, ZHANG Zhifeng<sup>5</sup>

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Institute for Advanced Study, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; 4. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 5. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

收稿日期: 2022-11-08; 修回日期: 2024-07-25; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 国家科技重大专项“全球重点领域油气地质与富集规律研究”(2016ZX05029-001)资助。

作者简介: 王茜(1990-), 女, 助理研究员, 研究方向为沉积学与古环境、地球化学。E-mail: 944085175@qq.com。

**Abstract:** In order to quantitatively study important paleoclimatic indicators such as paleotemperature and precipitation of early Cretaceous in Beishan area, Gansu Province, effective samples of dinosaurs' teeth, crocodiles' teeth and turtles' carapace were collected from the Lower Cretaceous in the Beishan area of the northeastern margin of the Jiuquan Basin. Bioapatite was extracted from tooth enamel and tortoiseshell samples by chemical experiments, the  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  (‰, V-SMOW) of phosphate and the  $\delta^{13}\text{C}_\text{c}$  (‰, V-PDB) in apatite have been extracted and measured. The  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  (‰, V-SMOW) of Iguanodon tooth enamel is between 14.627‰~22.137‰, the average value is 17.634‰; The  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  (‰, V-SMOW) of ceratopsia tooth enamel is between 15.532‰~22.668‰, the average value is 18.225‰; The  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  (‰, V-SMOW) of theropod tooth enamel is between 16.915‰~20.763‰, the average value is 18.925‰; The  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  (‰, V-SMOW) of crocodiles' tooth enamel is 16.619‰; The  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  (‰, V-SMOW) of turtles' carapace is between 15.106‰~16.627‰, the average value is 16.061‰. The  $\delta^{13}\text{C}_\text{c}$  (‰, V-PDB) of Iguanodon tooth enamel is between -6.477‰~-1.852‰, the average value is -5.274‰. The  $\delta^{13}\text{C}_\text{c}$  (‰, V-PDB) of ceratopsia tooth enamel is between -5.609‰~-2.495‰, the average value is -4.051‰. Based on oxygen isotope data, the annual average paleotemperature is calculated to be  $(19\pm3)^\circ\text{C}$ , Based on carbon isotope data, the annual average precipitation is calculated to be  $(605\pm151)\text{mm/y}$ , which indicates that the early Cretaceous in Jiuquan area had a warm temperate subtropical dry forest climate, mainly semi-arid to arid environment.

**Keywords:** Beishan area; early Cretaceous; paleoclimate; carbon and oxygen isotope; bioapatite

古气候及其变化规律是当今普遍关注的科学问题(Miller et al., 1991; 王成善等, 2005; Hasegawa et al., 2012; Zhang et al., 2023)。中生代古气候地质记录保存相对完整, 成为古气候研究的全球热点(Takashima et al., 2006; Dera et al., 2011; Huber et al., 2012; Zhang et al., 2023)。尽管存在一定冷暖变化(Cavalheiro et al., 2021), 白垩纪是显生宙以来最温暖的时期(Barron et al., 1995; 胡修棉, 2004; Rey et al., 2016), 笔者针对古气温、古降水的定量研究在推动白垩纪古气候和古地理的重建方面具有重要意义。甘肃省酒泉盆地下白垩统主要动植物化石丰富, 为研究早白垩世古气候提供了良好条件, 取得了重要认识。Jin 等(2020)基于孢粉研究定性地揭示了酒泉盆地早白垩世具有温暖潮湿、多期短期干旱的古气候特征, 但缺乏定量表征。酒泉盆地下白垩统不仅植物化石丰富, 而且动物化石也非常丰富, 特别是保存了丰富的恐龙、鳄鱼、龟类化石(李大庆, 2008; 王茜, 2015; 张茜楠等, 2015)。恐龙、鳄鱼牙齿牙釉质层和龟甲相较于大部分骨骼、牙本质或牙骨质更为坚硬、致密, 抵抗后期成岩作用和风化作用能力强, 能够最大程度保留原始气候信息(Erickson et al., 1996a; Straight et al., 2004; Amiot et al., 2021)。笔者利用牙齿和龟甲样品, 提取恐龙和鳄类牙齿样品牙釉质和龟甲样品的磷灰石, 测得了磷灰石中磷酸盐的 O 同位素( $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ (‰, V-

SMOW))和碳酸盐的 C 同位素( $\delta^{13}\text{C}_\text{c}$ (‰, V-PDB)), 通过计算, 定量表征了酒泉地区早白垩世古气温和古降水量。

## 1 古气候定量计算的原理和计算公式

爬行类动物整个生命过程的生活环境局限, 处于有限的地域。其生命过程中摄入的大气水(雨水、雪水及气态水)和食物(植物、动物)。大气水和植物直接携带了能够反映当地、当时气候的化学元素同位素信息(Barral et al., 2017), 这些同位素信息通过动物体内的分馏沉淀, 赋存于动物的骨骼、肌肉、组织液中, 最终以生物磷灰石形式在骨骼中长期稳定保留下来(Koch et al., 1997; Zazzo et al., 2004a; Chenery et al., 2012)。动物牙齿的牙釉质层比大部分骨骼、牙本质或牙骨质更为坚硬、致密, 抵抗后期成岩及风化作用能力强, 最大程度保留原始气候信息(Erickson et al., 1996a; Straight et al., 2004; Amiot et al., 2021)。因此, 通过测试动物牙齿牙釉质层生物磷灰石中保存的 C、O 同位素, 能够计算获得大气水、植物同位素信息, 从而进一步计算当地、当时的古大气温度、古降水量等古气候参数。

### 1.1 古气温定量计算的原理和计算公式

生物磷灰石是生物骨骼的重要矿物组分。古

气温通过生物磷灰石中磷酸盐的 O 同位素 ( $\delta^{18}\text{O}_p$ ) 计算。

生物磷灰石的化学式为  $\text{Ca}_{10}[(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)_x](\text{OH})_2$ , 其中包含 3 种形式的氧(O): 磷酸根( $\text{PO}_4^{3-}$ )、碳酸根( $\text{CO}_3^{2-}$ )、羟基( $\text{OH}^-$ )。其中,  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{OH}^-$  为平面结构, 易受后期腐蚀作用、成岩作用及风化作用的影响, 会造成原始 O 同位素的改变; 而  $\text{PO}_4^{3-}$  具有稳定的四面体原子晶格结构, 能够有效抵抗各种后期作用对原始 O 同位素造成的改变, 因而被用作古气温研究的首选参数(Grimes et al., 2004a; Angst et al., 2014; Bojar et al., 2017)。

生物磷灰石中磷酸根的 O 同位素  $\delta^{18}\text{O}_p$  (phosphate)、与动物体液的 O 同位素  $\delta^{18}\text{O}_{bw}$  (body water) 及动物体温, 具有很好的相关性(Kolodny et al., 1983; Grimes et al., 2004b; Lécuyer et al., 2013), 而动物体液的 O 同位素  $\delta^{18}\text{O}_{bw}$  又与动物在生存环境中摄入大气水的 O 同位素  $\delta^{18}\text{O}_{mw}$  (meteoric water) 紧密相关。

由于大多数陆生脊椎动物特别是大型爬行类动物, 摄入水主要是饮水或者食物中的水, 而这些水的最终根本来源都是大气水(D'Angela et al., 1990; Straight et al., 2004)。大气水的 O 同位素  $\delta^{18}\text{O}_{mw}$  受气温、降水量两个气候指数的控制(Cormie et al., 1994; Fricke et al., 2008a)。因此, 动物体内生物磷灰石中的  $\delta^{18}\text{O}_p$ , 可以间接地指示它们生活环境的气候状况(Zazzo et al., 2004b; Royer et al., 2013)。

根据国际原子能机构-世界气象组织(IAEA-WMO, 2016)统计的大量现代动物数据, 在纬度  $0 \sim 80^\circ$  区间范围内,  $\delta^{18}\text{O}_p$  和  $\delta^{18}\text{O}_{mw}$  与纬度(L)均有一定函数关系: 公式(1)和公式(2)。

$$\delta^{18}\text{O}_p = -0.005\ 1L^2 + 0.170\ 2L + 18.578 \quad (R^2 = 0.68) \quad (1)$$

$$\delta^{18}\text{O}_{mw} = -0.005\ 8L^2 + 0.172\ 2L - 3.320\ 6 \quad (R^2 = 0.78) \quad (2)$$

两者在不同纬度都有相似的斜率, 并且, 在同一纬度,  $\delta^{18}\text{O}_{mw}$  比  $\delta^{18}\text{O}_p$  低 21.9‰(Amiot et al., 2015), 即:

$$\delta^{18}\text{O}_{mw} = \delta^{18}\text{O}_p - 21.9\text{‰} \quad (3)$$

又根据 IAEA-WMO(2016)管理的全球网络气象站的统计数据, 年平均气温 MAAT(Mean Annual Air Temperature)与  $\delta^{18}\text{O}_{mw}$  存在线性关系(Amiot et al., 2011), 即:

$$\delta^{18}\text{O}_{mw} = (0.49 \pm 0.03) \text{MAAT} - (14.18 \pm 0.52) \quad (R^2 = 0.81) \quad (4)$$

因此, 可以利用公式(3), 由生物磷灰石  $\delta^{18}\text{O}_p$  计算得到大气水  $\delta^{18}\text{O}_{mw}$ ; 再利用公式(4), 进一步由大气水  $\delta^{18}\text{O}_{mw}$  计算得到年平均气温 MAAT。

## 1.2 古降水量定量计算的原理和计算公式

生物磷灰石  $\text{Ca}_{10}[(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)_x](\text{OH})_2$  中碳酸根的 C 同位素  $\delta^{13}\text{C}_c$  (carbonate) 主要反映了动物的食性, 由于不同物种的消化系统存在生理差异, 因此不同种属的动物即便食用相同的食物, 其生物磷灰石的  $\delta^{13}\text{C}_c$  也有一定差异(Passey et al., 2005; Hyneka et al., 2012)。肉食性及杂食性动物的食性较为复杂, 植食性动物的食物主要是植物, 更便于研究分析。前人测试了大量植食性恐龙的  $\delta^{13}\text{C}_c$ , 又测试了恐龙化石沉积环境中的植物的 C 同位素, 作为恐龙食物中的  $\delta^{13}\text{C}_L$  (leaf) (Fricke et al., 2008b)。

对比研究表明,  $\delta^{13}\text{C}_L$  与  $\delta^{13}\text{C}_c$  之间存在一个分馏系数  $K$  (公式 5), 即:

$$\delta^{13}\text{C}_L = \delta^{13}\text{C}_c - K \quad (5)$$

不同动物种类的  $K$  值不同, 例如: 鸟臀目恐龙的  $K$  值约为 18‰, 而蜥脚类恐龙的  $K$  值约为 16‰, 并且  $K$  值较为固定, 不随着精确的地质时代、地理位置、沉积环境的变化而改变(Fricke et al., 2008b; Tütken, 2011)。

植物的 C 同位素组成主要受光合作用影响, 不同种类植物的  $\delta^{13}\text{C}_L$  具有一定差异。由于 C4 植物和景天酸代谢(CAM)植物在新生代才出现, 在白垩纪早期的生态环境中不存在。因此, 笔者仅讨论 C3 植物。C3 植物是最普通的一种植物, 绝大多数的树木、灌木和生长在凉爽地区的草本植物都是 C3 植物, 全球大多数地区的 C3 植物 C 同位素值相似, 其  $\delta^{13}\text{C}_L$  平均值约为 -27‰ (-35‰ ~ -27‰)。年平均降水量越小、气候越干燥,  $\delta^{13}\text{C}_L$  越高(Ehleringer et al., 1993)。

Diefendorf 等(2010)通过大量数据统计分析, 建立了全球尺度现代 C3 植物  $\delta^{13}\text{C}_L$  值与年平均降水 MAP(Mean Annual Precipitations)的关系, 即:

$$\text{Log}(\text{MAP}) = 0.080\ 2 \pm 0.010\ 2 \delta^{13}\text{C}_L + 1.372\ 6 \pm 0.187\ 5 \quad (R^2 = 0.83) \quad (6)$$

其中:

$$\Delta^{13}\text{C}_L = (\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}} - \delta^{13}\text{C}_L) / (1 + \delta^{13}\text{C}_L / 1000) \quad (7)$$

公式(7)中:  $\delta^{13}\text{C}_{\text{atm}}$  为大气中二氧化碳的 C 同位素值。

因此, 可以利用公式(5), 由测得的生物磷灰石  $\delta^{13}\text{C}_c$  计算得到植物  $\delta^{13}\text{C}_L$ ; 将计算所得  $\delta^{13}\text{C}_L$  代入公式 7 计算可得  $\Delta^{13}\text{C}_L$ , 再将  $\Delta^{13}\text{C}_L$  代入公式 6 计算得到年

平均降水量 MAP。

## 2 地质概况及样品采集

### 2.1 研究区地质背景

研究区位于酒泉盆地东北缘的北山隆起带。酒泉盆地内部除局部出露前侏罗系外, 绝大部分被新近系和第四系覆盖, 但在北山隆起带有大量下白垩统出露(图 1)。

酒泉盆地的基底为前寒武系、古生界变质岩和加里东期、华力西期岩浆岩。基底之上发育中生界。三叠系分布极为局限, 为裂谷盆地冲积相砂砾岩、砂岩, 夹紫红色泥岩。侏罗系分布有所扩展为裂谷盆地冲积相-湖泊相砾岩、砂岩、泥岩, 夹煤层。下白垩统分布最广, 为裂谷盆地冲积相-湖泊相砂岩、泥岩, 见砾岩、含砾砂岩及蒸发岩类(图 1、图 2)。上白垩统一始新统缺失。渐新统一新近系为前陆盆地冲积相砾岩、砂岩、泥岩。第四系为前陆盆地冲积相砾岩、

砂岩、泥岩, 或砾石、砂土(甘肃省地质矿产局, 1989; 玉门油田石油地质志编写组, 1989)。

甘肃省北山隆起区白垩系只发育下白垩统, 命名为新民堡群, 其底界地质年龄为 $\sim 137$  Ma, 顶界地质年龄为 100 Ma $\pm$ , 自下而上划分为赤金堡组、下沟组、中沟组(图 2)。

赤金堡组多不整合于古生界之上, 上部黄绿色泥岩、黄色粉砂岩, 下部为灰白色砂岩、灰绿色含砾砂岩, 含丰富的植物化石。底部为杂色砾岩, 为一套滨湖沉积(图 2)。植物化石研究结果(Jin et al., 2020; 李爱静等, 2021)表明, 甘肃省北山隆起区赤金堡组的地质时代为瓦兰今阶-欧特里夫阶(Valanginian-Hauterivian)。

下沟组整合于赤金堡组之上。下沟组下部主要为灰色泥岩, 夹薄层钙质砂岩、石膏, 含丰富的植物化石、双壳类、腹足类、叶肢介化石, 为一套浅湖-深湖沉积(图 2)。植物化石研究结果(Jin et al., 2020; 李爱静等, 2021)表明, 甘肃省北山隆起区下沟组下部的地

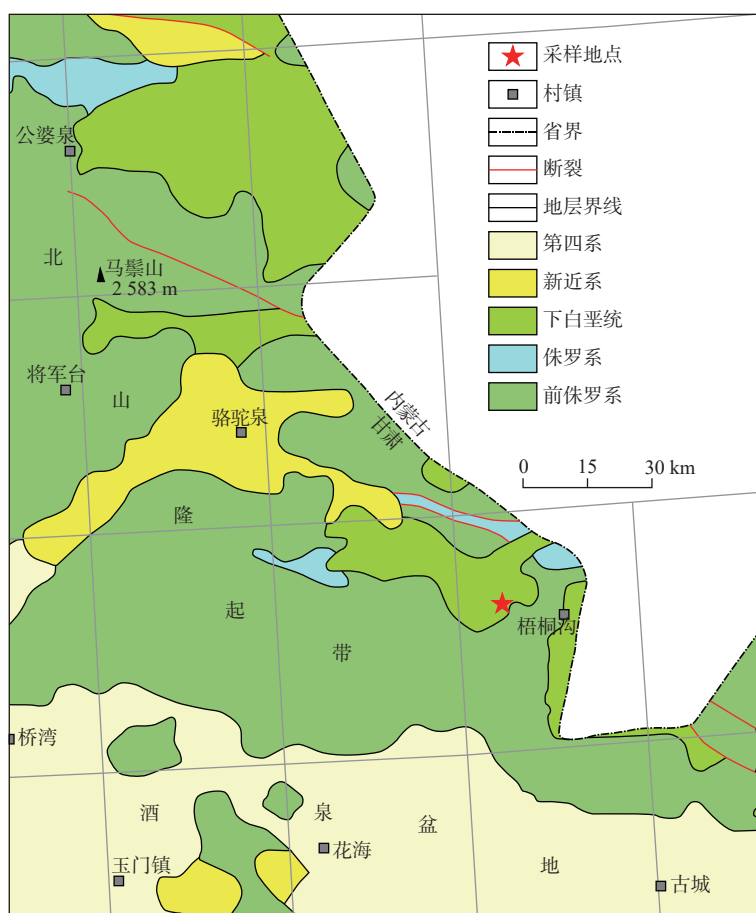


图1 酒泉盆地东北缘北山地区地质简图(据 1:50 万地质图编绘)

Fig. 1 Geological sketch map of Beishan area on the northeast of Jiuquan basin



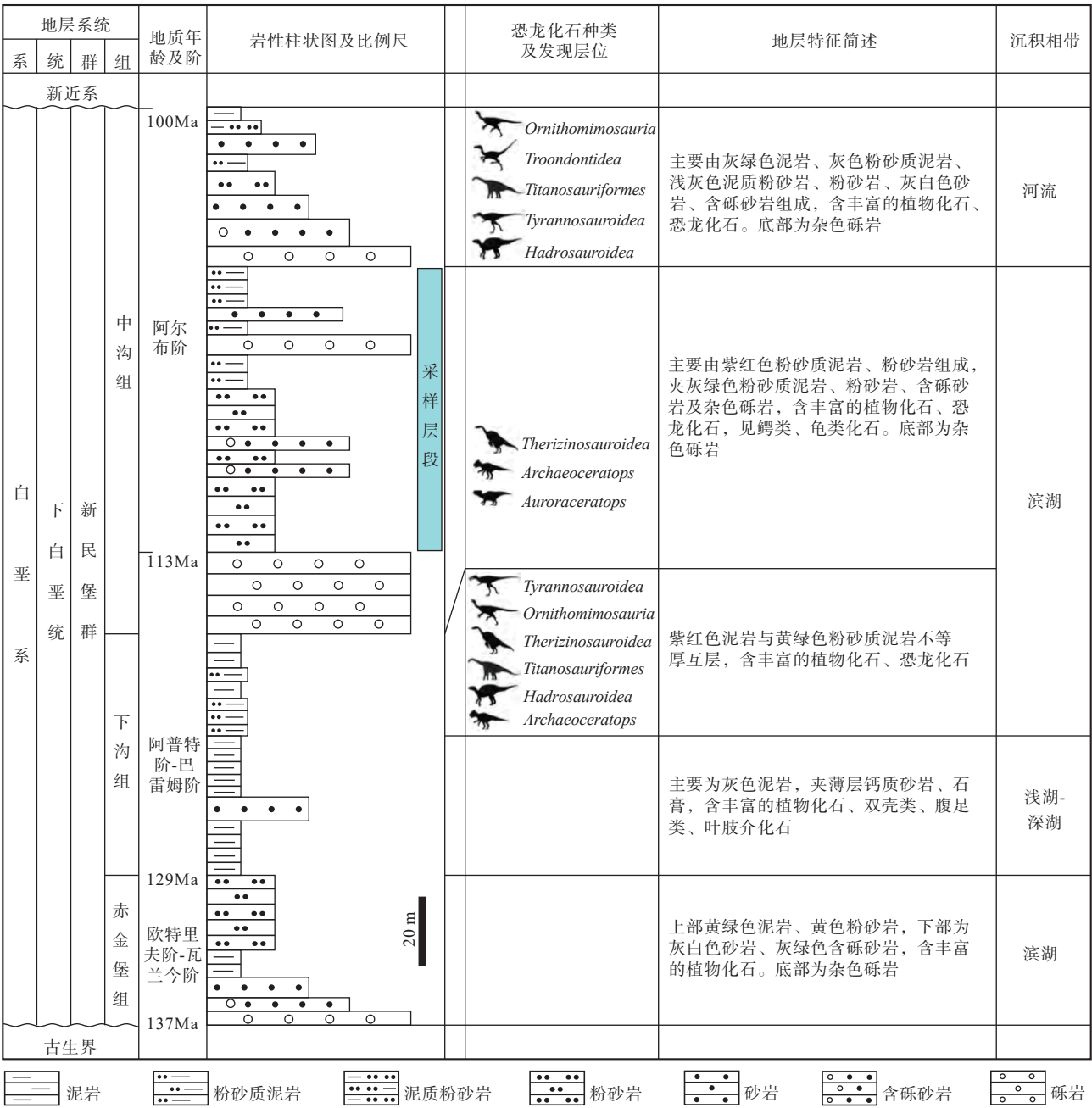


图2 北山地区下白垩统综合地层柱状图(据甘肃省地质矿产局, 1989; 张茜楠等, 2015; Jin et al., 2020; 李爱静等, 2021 编绘)

Fig. 2 Comprehensive histogram of lower Cretaceous strata in Beishan area

质时代为巴雷姆阶(Barremian)。下沟组上部由紫红色泥岩与黄绿色粉砂质泥岩不等厚互层组成，含丰富的植物化石、恐龙化石，为一套滨湖沉积(图2)。动物化石研究结果(张茜楠等, 2015)表明，甘肃省北山隆起区下沟组上部的地质时代主要为阿普特阶(Aptian)。

中沟组整合于下沟组之上。中沟组下部厚度大，在北山地区分布广，主要由紫红色粉砂质泥岩、粉砂岩

组成，夹灰绿色粉砂质泥岩、粉砂岩、含砾砂岩及杂色砾岩，含丰富的植物化石、恐龙化石，见鳄类、龟类化石。底部为杂色砾岩，为一套滨湖沉积(图2)。动物化石研究结果(张茜楠等, 2015)表明，甘肃省北山隆起区中沟组下部的地质时代主要为阿普特阶(Aptian)上部-阿尔布阶(Albian)下部。中沟组上部在北山地区范围小，新近系不整合覆盖其上，主要由灰绿色泥岩、灰色粉砂质泥岩、浅灰色泥质粉砂岩、粉砂岩、灰白色砂岩、含砾

砂岩组成, 含丰富的植物化石、恐龙化石。底部为杂色砾岩, 为一套河流沉积(图 2)。动物化石研究结果(张茜楠等, 2015)表明, 甘肃省北山隆起区中沟组上部的地质时代主要为阿尔布阶(Albian)上部。

2.2 样品采集

笔者样品采集区域位于北山隆起带梧桐沟西约 15 km 的下白垩统分布区(E 98°17', N 40°51'), 该区主要出露中沟组下部地层。在紫红色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、粉砂岩中采集了 16 件禽龙类牙齿样品、

11 件角龙类牙齿样品、7 件兽脚龙类牙齿样品和 5 件类别未知的其余蜥臀目恐龙牙齿样品。挑选处理后, 最终能够用于分析测试的有效样品禽龙类牙齿 10 件、角龙类牙齿 7 件、兽脚龙类牙齿 5 件、其余蜥臀目恐龙牙齿 2 件; 在灰绿色粉砂质泥岩、泥质粉砂岩中采集 3 件鳄鱼牙齿样品, 能够用于分析测试的有效样品 1 件; 在灰绿色含砾砂岩和粉砂岩中采集了 13 件龟类背甲样品, 能够用于分析测试的有效样品 5 件。样品的特征和相关信息见图 3。

样品类别	样品代表性照片	样品特征	样品产出岩性	样品采集数量(件)	样品实测数量(件)
禽龙类牙齿		牙齿齿冠侧扁, 边缘小锉刀齿, 齿冠中线偏后有初级棱, 齿冠的其他部分除了细小次级棱外相对光滑	紫红色粉砂质泥岩, 紫红色泥质粉砂岩, 粉砂岩	16	10
角龙类牙齿		牙齿齿冠侧扁, 边缘小叶状齿, 齿冠中线偏后有初级棱, 齿冠的其他部分相对光滑	紫红色粉砂质泥岩, 紫红色泥质粉砂岩, 粉砂岩	11	7
兽脚龙类牙齿		牙齿呈弯曲短圆锥状, 横截面呈亚圆形, 齿冠较尖, 表面覆盖较为光滑的牙釉质微弱褶皱	紫红色粉砂质泥岩, 紫红色泥质粉砂岩, 粉砂岩	7	5
其余蜥臀目恐龙牙齿		牙齿呈弯曲长圆锥状, 横截面呈椭圆形, 齿冠较尖, 表面覆盖较为光滑的牙釉质, 有竖纹	紫红色粉砂质泥岩, 紫红色泥质粉砂岩, 粉砂岩	5	2
鳄鱼牙齿		牙齿呈圆锥状, 横截面呈亚圆形, 齿冠较尖, 表面覆盖较为光滑的牙釉质明显褶皱	灰绿色粉砂质泥岩, 灰绿色泥质粉砂岩, 粉砂岩	3	1
龟类背甲		片状, 有明显龟甲纹	灰绿色粉砂岩, 灰绿色含砾砂岩	13	5

样品类别经甘肃省地质博物馆、中国科学院古脊椎动物与古人类研究所专家鉴定, 在中国科学院地质与地球物理所新生代地质与环境重点实验室确认

图3 样品特征及相关信息

Fig. 3 Sample characteristics and relevant information

3 样品处理及分析测试

获取样品中生物磷灰石, 提取生物磷灰石中的  $\text{PO}_4^{3-}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$ , 并测试  $\text{PO}_4^{3-}$  中的  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  中的  $\delta^{13}\text{C}_\text{o}$  是本研究最基础、最重要的工作。笔者全部样品处理及分析测试均在中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境国家重点实验室完成。

3.1 磷酸根提取及其中 O 同位素测试

(1) 样品处理的目的是提取生物磷灰石中磷酸根,

其关键步骤如下(图 4)。

①样品除杂及溶解: 清理样品表面污染部位, 用牙钻取约 15 mg 粉末样, 用强酸 HF 溶解, 并进行两次超声反应 24 h。

②制磷酸盐溶液: 将溶解充分的混合液离心、反复洗涤, 分离  $\text{CaF}_2$  沉淀及  $\text{PO}_4^{3-}$  溶液, 并用碱溶液 KOH 与  $\text{PO}_4^{3-}$  溶液进行中和, 使溶液的 pH 值为 7。

③吸附  $\text{PO}_4^{3-}$ : 将阴离子交换树脂加入溶液, 并置于摇床中震荡 24 h, 使  $\text{PO}_4^{3-}$  被树脂充分吸附。

④置换  $\text{PO}_4^{3-}$ : 向反复洗涤、过滤后的树脂中加入

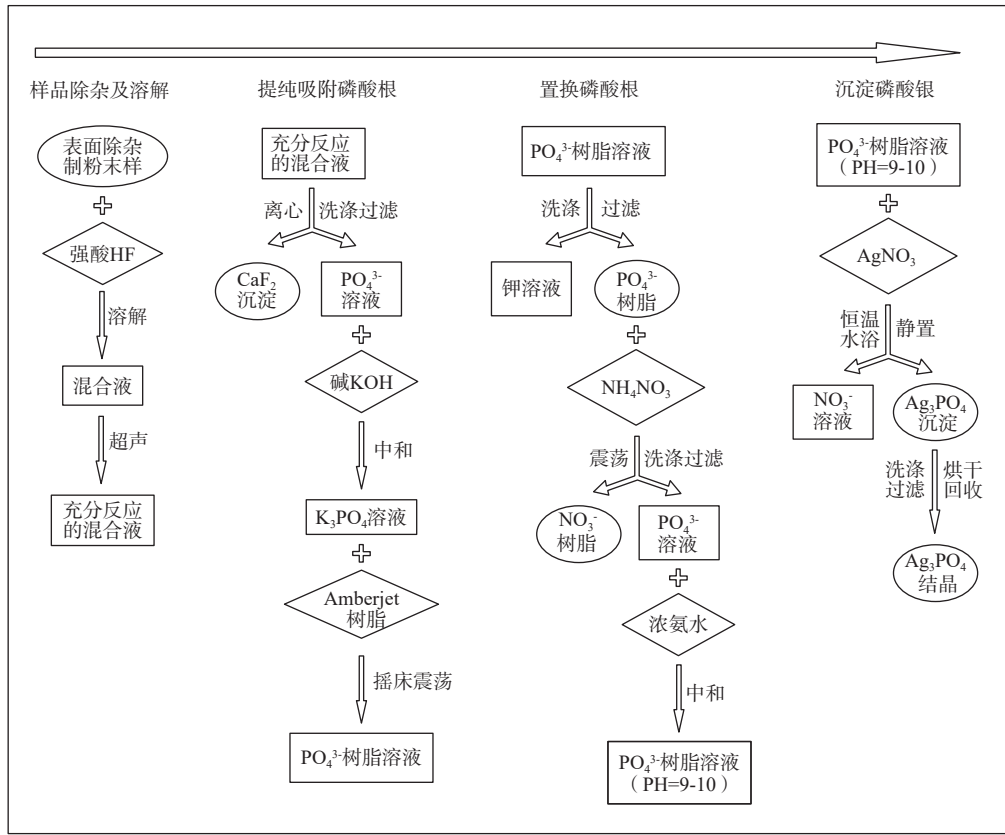


图4 磷酸根提取实验流程图(据 Lécuyer et al., 2010 修改)

Fig. 4 Flow chart of phosphate extraction experiment

$\text{NH}_4\text{NO}_3$  并震荡 4 h, 用  $\text{NO}_3^-$  将树脂中的  $\text{PO}_4^{3-}$  充分置换到溶液中, 然后分离过滤、反复洗涤。

⑤沉淀  $\text{PO}_4^{3-}$ : 向溶液中加入浓氨水将溶液调节为碱性, PH 达到 9~10, 然后加入  $\text{AgNO}_3$  充分反应, 将溶液放置 68 °C 恒温水浴中加热 6h, 再取出静置 1 h, 待  $\text{Ag}_3\text{PO}_4$  沉淀缓慢析出、结晶 24 h 以上;

⑥制样: 以过氧水反复洗涤、过滤  $\text{Ag}_3\text{PO}_4$  沉淀, 而后置于 50 °C 烘箱中烘干 24 h 并回收, 回收时注意需在双目镜下剔除杂质, 最后将样品称重计算并盛入银反应杯包样。

(2)O 同位素测试: 将完成预处理的样品放入高温裂解仪 TC/EA 中, 以石墨将  $\text{Ag}_3\text{PO}_4$  直接脱化成  $\text{CO}$ , 然后引  $\text{CO}$  气体进入 ThermoFinnigan MAT253 质谱仪进行 O 同位素分析测试。测试后的 O 同位素值用标准中新世佛罗里达磷灰石(NBS120c)进行校准。本实验的 O 同位素组成符号  $\delta^{18}\text{O}$  与维也纳标准平均海水(V-SMOW)标准相对应。

### 3.2 碳酸根提取及其中 C 同位素测试

(1)样品处理的目的是提取生物磷灰石中碳酸根。提取生物磷灰石中碳酸根采用了 Koch 等(1997)提出

的样品处理方法, 主要分为以下步骤(图 5)。

①样品除杂及溶解: 清理样品表面污染部位, 用牙钻取约 10 mg 粉末样, 用  $\text{NaOCl}$  溶液洗涤、浸泡除去有机质的影响, 并进行两次超声反应 24 h。

② $\text{CaCO}_3$  提纯: 将溶液反复洗涤、离心 5 次以上, 过滤后留下  $\text{CaCO}_3$  沉淀, 用醋酸溶液洗涤并浸泡除去受成岩作用影响的碳酸盐, 再进行两次超声反应 24 h。

③制样: 将提纯后的  $\text{CaCO}_3$  沉淀用双氧水洗涤、离心 5 次以上, 过滤后置于 50 °C 烘箱中烘干 24 h 并回收, 回收时注意需在双目镜下剔除杂质, 最后将样品称重并计算。

(2)C 同位素测试: 取预处理后的  $\text{CaCO}_3$  粉末 2 mg 放入 Thermo Finnigan Gasbench II 仪器中, 再往样品中加入 5 滴 100%正磷酸银, 在 72 °C 下反应 1 h, 将生成的  $\text{CO}_2$  气体引入 ThermoFinnigan MAT253 质谱仪进行 C 同位素分析测试。测试后的 C 同位素值用标准石灰石 NBS-19 进行校准。本实验的 C 同位素组成符号  $\delta^{13}\text{C}$  与美国南卡罗来纳州白垩纪皮狄组拟箭石化石(V-PDB)标准相对应。

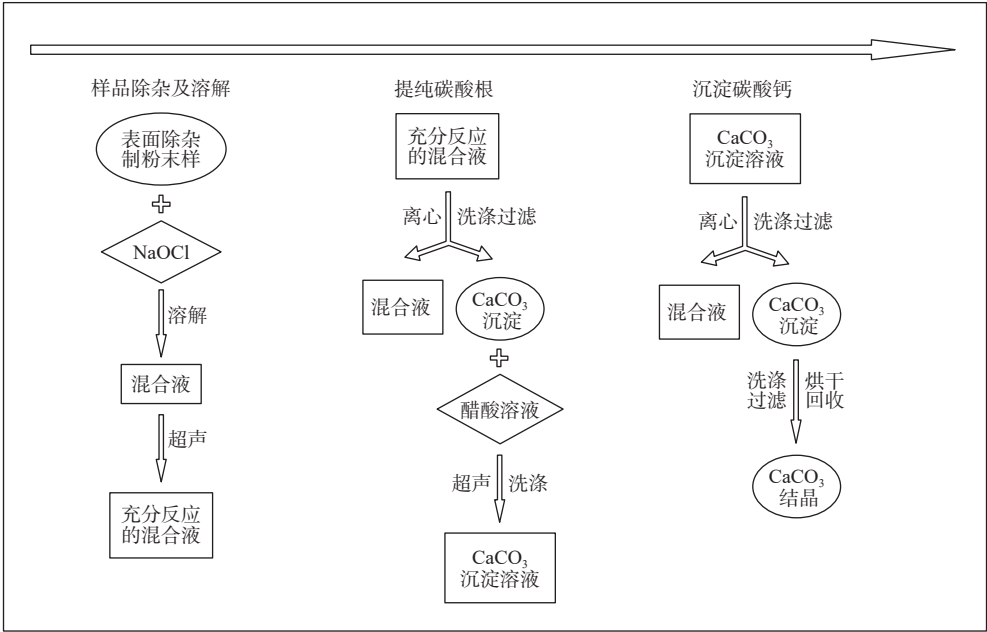


图5 碳酸根提取实验流程图(改自 Koch et al., 1997)

Fig. 5 Flow chart of carbonate extraction experiment

3.3 测试结果

笔者筛选了 30 件制备样本用于磷酸盐 O 同位素分析测试, 命名为 xmb-1~xmb-30, 分别是鸟臀目中, 禽龙类牙齿 10 件, 角龙类牙齿 7 件; 蜥臀目中, 兽脚类恐龙牙齿 5 件, 其他蜥臀目恐龙牙齿 2 件; 鳄鱼牙齿 1 件; 龟甲 5 件。由于碳酸盐 C 同位素研究样本需选择植食性动物, 因此在其中选取禽龙牙齿 7 件、角龙牙齿 6 件进行实验, 为 xmb-1~xmb-7、xmb-11~xmb-16。其中, xmb-1~xmb-3 样品从齿根、齿中、齿尖分别取样。测试样本信息及测试结果见表 1。

表 1 测试样本信息及测试结果汇总表

Tab. 1 Summary of test sample information and test results

样品 编号	样品类别	食性	习性	$\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ (‰, V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}_\text{c}$ (‰, V-PDB)	样品 编号	样品类别	食性	习性	$\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ (‰, V-SMOW)	$\delta^{13}\text{C}_\text{c}$ (‰, V-PDB)
xmb-1(1)	禽龙类恐龙齿根釉质	植食	陆生	18.883	-6.341	xmb-13	角龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	16.832	-3.312
xmb-1(2)	禽龙类恐龙齿中釉质	植食	陆生	17.870	-5.677	xmb-14	角龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	16.988	-4.077
xmb-1(3)	禽龙类恐龙齿尖釉质	植食	陆生	16.666	-5.876	xmb-15	角龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	17.094	-2.495
xmb-2(1)	禽龙类恐龙齿根釉质	植食	陆生	17.713	-6.455	xmb-16	角龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	15.523	-5.207
xmb-2(2)	禽龙类恐龙齿中釉质	植食	陆生	17.272	-6.247	xmb-17	角龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	19.373	/
xmb-2(3)	禽龙类恐龙齿尖釉质	植食	陆生	16.085	-5.605	xmb-18	兽脚类恐龙牙齿釉质	肉食	陆生	20.736	/
xmb-3(1)	禽龙类恐龙齿根釉质	植食	陆生	17.678	-6.278	xmb-19	兽脚类恐龙牙齿釉质	肉食	陆生	17.552	/
xmb-3(2)	禽龙类恐龙齿中釉质	植食	陆生	18.345	-5.605	xmb-20	兽脚类恐龙牙齿釉质	肉食	陆生	20.577	/
xmb-3(3)	禽龙类恐龙齿尖釉质	植食	陆生	16.453	-6.477	xmb-21	兽脚类恐龙牙齿釉质	肉食	陆生	18.847	/
xmb-4	禽龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	22.137	-4.035	xmb-22	兽脚类恐龙牙齿釉质	肉食	陆生	16.915	/
xmb-5	禽龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	19.335	-3.820	xmb-23	蜥臀目恐龙牙齿釉质	未知	陆生	17.895	/
xmb-6	禽龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	16.643	-4.297	xmb-24	蜥臀目恐龙牙齿釉质	未知	陆生	19.527	/
xmb-7	禽龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	19.105	-1.852	xmb-25	鳄鱼牙齿釉质	肉食	水生/半水生	16.619	/
xmb-8	禽龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	15.696	/	xmb-26	水生龟类背甲	杂食	水生/半水生	15.106	/
xmb-9	禽龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	14.627	/	xmb-27	水生龟类背甲	杂食	水生/半水生	15.982	/
xmb-10	禽龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	17.847	/	xmb-28	水生龟类背甲	杂食	水生/半水生	16.313	/
xmb-11	角龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	19.235	-3.603	xmb-29	水生龟类背甲	杂食	水生/半水生	16.276	/
xmb-12	角龙类恐龙牙齿釉质	植食	陆生	22.668	-5.609	xmb-30	水生龟类背甲	杂食	水生/半水生	16.627	/



## 4 测试结果分析及古气候定量研究

### 4.1 $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$ 及 $\delta^{13}\text{C}_\text{c}$ 结果分析

对 30 个样本的  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  测试结果分类统计分析表明, 禽龙类  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  为 14.627‰~22.137‰, 平均值为 17.634‰; 角龙类  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  为 15.523‰~22.668‰, 平均值为 18.225‰; 蜥臀目恐龙  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  为 16.915‰~20.736‰, 平均值为 18.864‰; 龟类  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  为 15.106‰~16.627‰, 平均值为 16.061‰; 鳄鱼  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  为 16.619‰ (图 6)。其中, xmb-1、xmb-2、xmb-3 等 3 件样品的牙冠、牙中、牙根样本  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  值差异不大(表 1), 证明实验测试数据准确、可靠, 不过由于恐龙牙齿的生成过程可能需要几个月甚至几年 (Erickson, 1996a), 所以从牙根到牙冠的  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  存在一些差异。此外, 能够明显发现不同生活习性的物种之间具有一定差异, 鳄类和龟类  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  平均值低于同时代的陆生恐龙(图 6), 这可能是因为半水生到水生环境的物种, 与陆生脊椎动物相比, 具有较高的环境水交换量和较低的表皮蒸发量; 并且, 由于它们的生存环境(河、湖)缓冲了季节变化给当地大气水带来的影响, 水生环境较陆地环境更均一。因此, 鳄类和龟类  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  变化范围也较陆生恐龙更窄。其中, 鳄类的  $\delta^{18}\text{O}_\text{p}$  值略高于龟类, 这可能是

因为鳄类的一些独特行为, 如阳光浴 (Erickson, 1996b)。

禽龙和角龙是研究区植食性恐龙的主要类型。禽龙类  $\delta^{13}\text{C}_\text{c}$  为 -6.477‰~-1.852‰, 平均值为 -5.274‰, 角龙类  $\delta^{13}\text{C}_\text{c}$  为 -5.609‰~-2.495‰, 平均值为 -4.051‰(图 7)。这说明虽然两者的食物来源均为 C3 植物, 却有明显区分。禽龙上下颌的前端可能覆盖着厚厚的角质, 能够咬断树枝。并且禽龙小指纤细而灵活, 可协助来勾取食物, 较大的种可能以离地面 4、5 m 以内的树叶为食, 而角龙大多以植物的嫩枝叶和多汁的根、茎为食物 (Amiot et al., 2011; 2015)。

### 4.2 研究区古气候定量计算结果

将生物磷灰石中 O 同位素实测数据代入公式(3)和公式(4), 计算出了取样层段沉积时期 (Albian) 年平均气温为  $(19.5 \pm 3.2)^\circ\text{C}$ 。其中, 陆生恐龙代表的陆地环境, 年均气温为  $(20.7 \pm 3.3)^\circ\text{C}$ ; 高于龟类和鳄鱼代表的水生/半水生环境的年均气温  $(17.6 \pm 1.2)^\circ\text{C}$ 。

将生物磷灰石中 C 同位素实测数据代入公式(5)、公式(6)和公式(7), 计算出了研究区取样层段沉积时期 (Albian) 年平均降水为  $(605 \pm 151)\text{mm}$ 。

气候分带三角图是由 Holdridge (1947) 提出, 用诸如气温、降水、潜在蒸发量等至少两个非生物因素来预测和描述气候和环境类型。将笔者得出的年均气

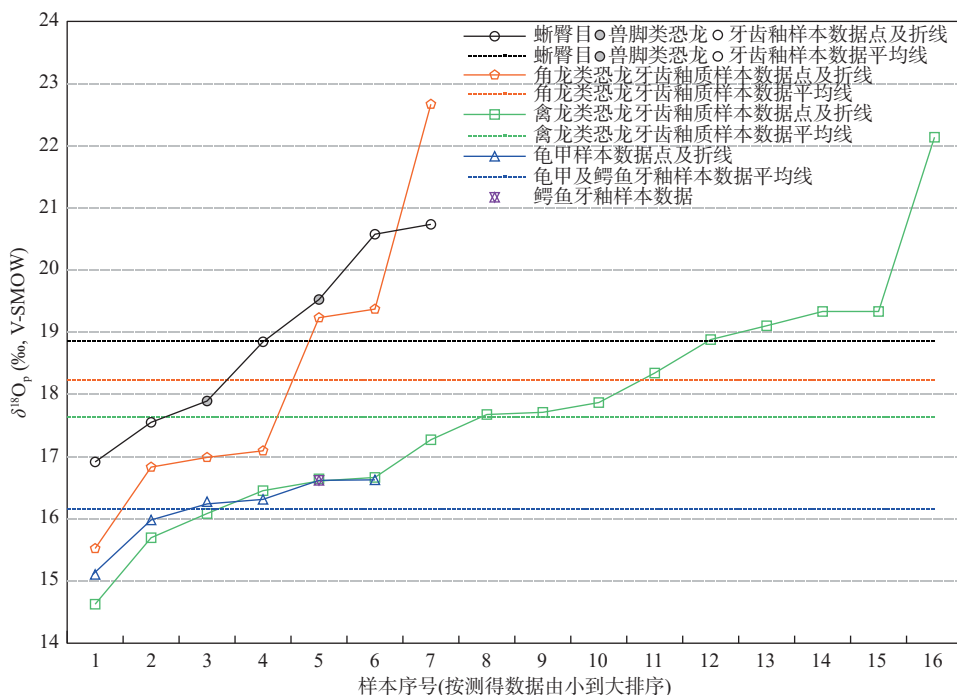


图6 不同类型样本磷酸盐 O 同位素数据分布图

Fig. 6 Distribution map of oxygen isotope of phosphate data for different types of samples

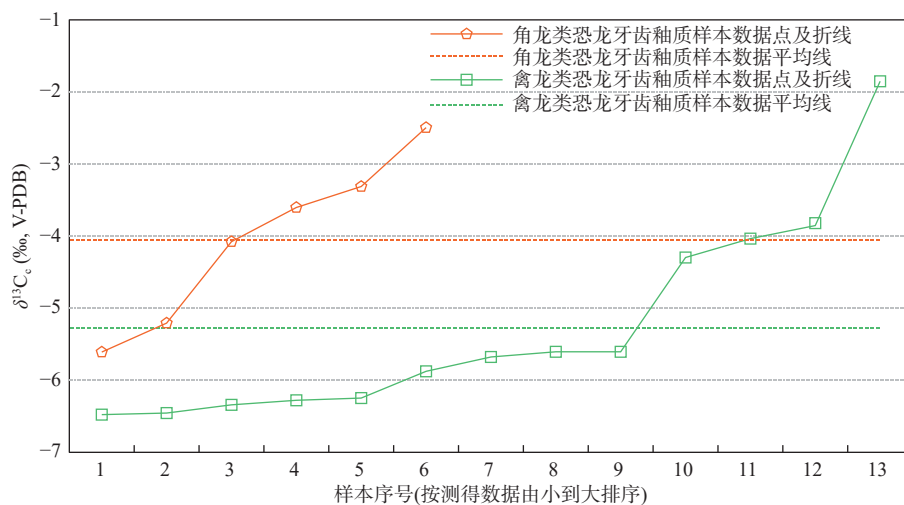


图7 禽龙类与角龙类样本生物磷灰石 C 同位素数据分布图

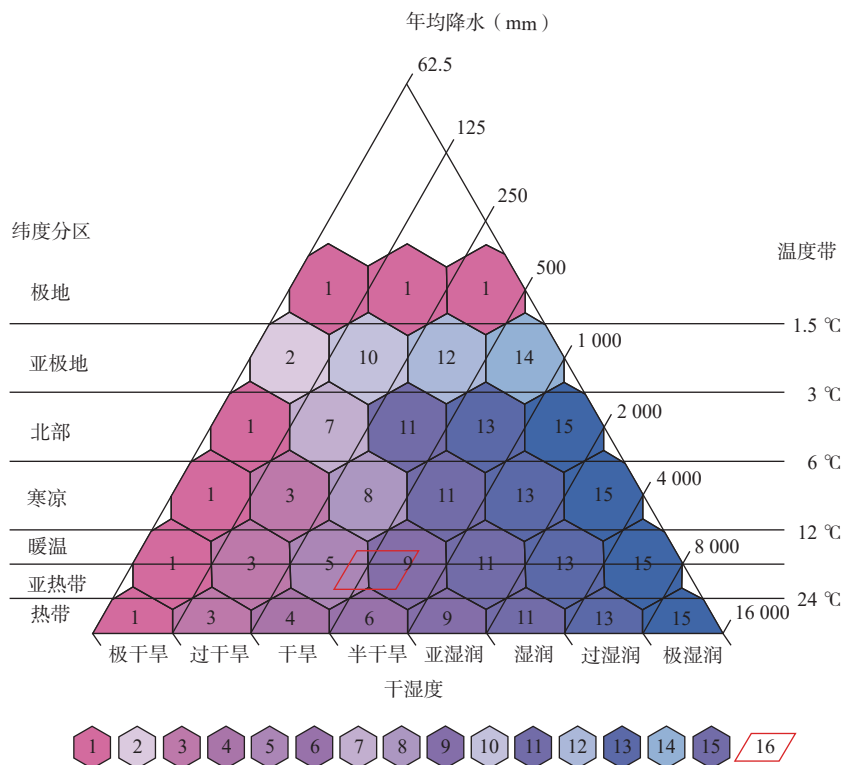
Fig. 7 Distribution map of carbon isotope data of bioapatite for iguanodon and ceratops samples

温 16.3~22.7 °C 及年均降水 454~756 mm 投影在气候分带图中(图 8), 可知甘肃省北山地区早白垩世属于暖温-亚热带的干燥森林气候, 少部分的荆棘草原/林地气候, 干湿情况以干旱-半干旱为主。Amiot 等 (2011) 根据碳 O 同位素, 重建了东亚晚 Barremian 到早 Albian 期不同纬度的古气温在 9~21 °C 之间, 年均

降雨量为 300~700 mm, 该研究成果与笔者结果基本一致。

## 5 讨论

从纵向来分析, 该地区早白垩世中期赤金堡组



1. 沙漠; 2. 干旱苔原; 3. 沙漠灌丛; 4. 荆棘林地; 5. 荆棘草原/林地; 6. 极干燥森林; 7. 干燥灌木; 8. 草原; 9. 干燥森林; 10. 潮湿苔原; 11. 潮湿森林; 12. 湿润苔原; 13. 湿润森林; 14. 雨苔原; 15. 雨林; 16. 研究区

图8 研究区早白垩世气候分带图(据 Holdridge, 1947 修)

Fig. 8 Climatic zoning figure of Early Cretaceous in the study area

(Valanginian-Hauterivian)的3个孢粉化石组合带表明,这一时期主要气候类型为亚热带半干半湿的针叶林、灌草丛到亚热带半干旱的针叶林、灌木丛、北亚热带半湿润针叶林植被类型(任文秀等, 2022),揭示了总体干热或湿热的气候特征;该地区早白垩世中晚期的下沟组(Barremian-Aptian)植物群以松柏类、银杏类繁盛,主要生活在暖温带、亚热带和热带山坡地区(杨国林等, 2022),揭示了总体湿润,有干旱或盐度较高的季节性变化的气候特征;而到了早白垩世晚期中沟组(Albian),笔者通过定量计算揭示了该区为暖温-亚热带的干燥森林气候类型,以干旱-半干旱为主, Tang 等(2001)运用孢粉学和沉积学方法也印证了这一点。据上述研究成果来看,研究区在早白垩世中晚期呈现了自下而上由温暖潮湿气候向炎热干旱气候转变的趋势和特点。

从横向来比较,同一时期的大兴安岭地区:李涛等(2023)通过孢粉化石组合研究认为其早白垩世 Aptian-Albian 期以温暖、湿润为主,并可能伴有季节性干旱气候。二连盆地:李成元等(2023)通过孢粉研究认为其在早白垩世 Aptian-Albian 期主要为湿润的亚热带气候,并且有向半干旱方向发展的趋势。准噶尔盆地:王毛毛等(2023)通过孢粉化石组合研究认为其早白垩世为亚热带半湿润气候,且有由湿润向干旱转变的特征。鄂尔多斯盆地:Shuo 等(2023)通过对古沙漠沙丘的定量研究认为其在早白垩世具有高温、大气 CO<sub>2</sub> 含量高、降水量少的气候特征。胶莱盆地:谭结(2020)通过黏土矿物分析,柳永清等(2011)通过恐龙化石研究,均认为其从早白垩世到晚白垩世,从温暖湿润的变为干旱的气候;Fluteau 等(2007)采用全球大气环流模型(GCM),研究了东亚早白垩世的气候类型,认为以亚热带干燥林地气候类型为主。通过大量的古气候研究不难发现,在早白垩时期中国乃至整个东南亚的气候整体呈温暖-炎热的特点,并且有由湿润向干燥气候转变的趋势。这是由于全球从 Aptian 到 Albian 阶全球气温逐步升高,导致了海面上升,陆地水分增加,赤道地区变得湿润(Hay et al., 2012),然而由于中国东部海岸山脉的隆起,地形复杂,盆地相隔,来自海洋的水汽在传输到内陆的过程中被阻挡,而气温在连续升高,因此导致了蒸发加剧,干旱区域扩大。

本研究区位于亚热带与北温带的分界,从 Aptian 阶湿润的气候渐渐变得干旱,到了 Albian 阶干旱区域继续扩大,湖盆不断缩减,湖水渐渐变浅,这也符

合了早白垩晚期全球性气候变化的趋势。此后,全球气候变得越来越不稳定,环境越来越恶劣,研究区内的生物种类也急剧减少,晚白垩时期的生态系统已岌岌可危。

## 6 结论

(1)恐龙牙齿的 O 同位素值(平均值为 18.071‰, )明显高于鳄类牙齿和龟甲的 O 同位素值(16.154‰),而且,前者 O 同位素值变化区间大(14.627‰~22.668‰),后者的 O 同位素变化范围更小(15.106‰~16.627‰)。反映了水生爬行动物生活在水体中,身体水与环境水交换量大,由体表被蒸发的体内水分少,而且,水体环境的水化学特征比陆地环境水化学特征更均一。

(2)植食性恐龙中,禽龙类与角龙类的 C 同位素组成有一定差异,平均值分别为-5.274‰和-4.051‰。可见植食性恐龙的食物来源有一定区别,避免了食物争夺带来的生存困境。

(3)O 同位素定量计算求得年平均气温为(19.5±3.2)℃, C 同位素定量计算求得年平均降水为(605±151)mm。在气候分带三角图中投点,得出研究区早白垩世 Albian 期的环境为半干旱-干旱,气候类型主要属于暖温-亚热带的干燥森林气候,与东南亚整体气候条件相符。

致谢:野外工作过程中得到中国地质大学(北京)张来明老师和曹硕老师、酒泉市第四矿产勘查勘察院李生栋老师、甘肃省地矿局刘建宏老师的精心指导和大力帮助;化石鉴定工作中得到甘肃省地质博物馆李大庆老师、古脊椎所尤海鲁老师的精心指导和大力帮助;在样品处理和测试工作中得到法国里昂第一大学 Amo it Romian 教授、中科院地质所新生代地质与环境重点实验室王旭老师、崔琳琳老师、孙静老师的精心指导和大力支持。在此一并致以真诚感谢。

## 参考文献(References):

- 甘肃省地质矿产局. 甘肃省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社, 1989, 5-320.
- 胡修棉. 白垩纪“温室”气候与海洋[J]. 中国地质, 2004, 31(4): 442-448.
- HU Xiumian. Greenhouse climate and ocean during the Cretace-

- ous[J]. *Geology in China*, 2004, 31(4): 442–448.
- 李爱静, 惠建国, 马国荣, 等. 甘肃马鬃山地区早白垩世 *Carpolithus* 化石的研究[J]. *地质学报*, 2021, 95(5): 1400–1413.
- LI Aijing, HUI Jianguo, MA Guorong, et al. Study of *Carpolithus* from the Lower Cretaceous of Mazongshan, Gansu Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1400–1413.
- 李成元, 薄海军, 李钢柱, 等. 川井坳陷砂岩型铀矿含矿地层孢粉组合及古气候意义[J]. *地质学报*, 2023, 97(4): 1262–1277.
- LI Chengyuan, BO Haijun, LI Gangzhu, et al. Palynomorph assemblage of ore-bearing strata for sandstone-type uranium deposit in Chuanjing depression and its paleoclimatic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(4): 1262–1277.
- 李大庆. 中国甘肃酒泉地区俞井子盆地早白垩世镰刀龙类恐龙化石[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
- LI Daqing. Therizinosauroid dinosaurs from the Early Cretaceous of Yujingzi Basin, Jiuquan Area, Gansu Province, China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2008.
- 李涛, 那玉玲, 李云峰, 等. 内蒙古大兴安岭地区下白垩统龙江组孢粉组合及其地质意义[J/OL]. *世界地质*, 2023, 42(3): 409–421.
- LI Tao, NA Yuling, LI Yunfeng, et al. Sporollen assemblage from Lower Cretaceous Longjiang Formation in Greater Khingan Range, Inner Mongolia, and its geological implications[J/OL]. *World Geology*, 2023, 42(3): 409–421.
- 柳永清, 旷红伟, 彭楠, 等. 山东胶莱盆地白垩纪恐龙足迹与骨骼化石埋藏沉积相与古地理环境[J]. *地学前缘*, 2011, 18(4): 9–24.
- LIU Yongqing, KUANG Hongwei, PENG Nan, et al. Sedimentary facies of dinosaur trackways and bonebeds in the Cretaceous Jiaolai Basin, eastern Shandong, China, and their paleogeographical implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 9–24.
- 任文秀, 胡斌, 唐德亮, 等. 北山地区中口子盆地下白垩统赤金堡组孢粉组合及其意义[J/OL]. *地球科学*, 2022: 1–29. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220708.1633.008.html>.
- REN Wenxiu, HU Bin, TANG Deliang, et al. Palynological assemblage and its significance of the Lower Cretaceous Chijinbao Formation in the Zhongkouzi Basin, Beishan[J/OL]. *Earth Science*, 2022: 1–29. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220708.1633.008.html>.
- 谭结. 白垩纪胶莱盆地沉积物源及古气候变化对中国东部海岸山脉的响应[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- TAN Jie. Responses of Sedimentary Sources and Paleoclimatic Changes of the Cretaceous Jiaolai Basin to Coastal Mountains in Eastern China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- 王成善, 胡修棉. 白垩纪世界与大洋红层[J]. *地学前缘*, 2005, 12(2): 11–21.
- WANG Chengshan, HU Xiumian. Cretaceous world and oceanic red beds[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 11–21.
- 王毛毛, 毛广振, 季兴开, 等. 准噶尔盆地北缘黄花沟地区砂岩型铀矿目的层时代、古气候及铀矿化关系[J]. *铀矿地质*, 2023, 39(4): 558–568.
- WANG Maomao, MAO Guangzhen, JI Xingkai, et al. Forming Age and Paleoclimate of the Target Layer and Its Relation to Sandstone-type Uranium Mineralization in Huanghuagou Area, Northern Junggar Basin[J]. *Uranium Geology*, 2023, 39(4): 558–568.
- 王茜. 甘肃省北山地区早白垩世爬行动物碳氧同位素对古气候的指示[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- WANG Qian. Paleoclimate inferred from oxygen and carbon isotopes of reptiles in Gansu Province Beishan area during the early Cretaceous[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.
- 杨国林, 杨帆, 李军, 等. 甘肃酒泉盆地新民堡群植物群特征及其古生态意义[J]. *甘肃高师学报*, 2022, 27(5): 13–18.
- YANG Guolin, YANG Fan, LI Jun, et al. Characteristics of the Xinminbao Group Flora in Jiuquan Basin, Gansu Province, and Its Paleoeological Significance[J]. *Journal of Gansu Normal Colleges*, 2022, 27(5): 13–18.
- 玉门油田石油地质志编写组. 玉门油田 中国石油地质志 卷十三[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989, 64–435.
- 张茜楠, 尤海鲁, 李大庆. 甘肃马鬃山地区早白垩世晚期恐龙化石[J]. *地质通报*, 2015, 34(5): 890–897.
- ZHANG Qiannan, YOU Hailu, LI Daqing. Dinosaurs from late Early Cretaceous in the Mazongshan area, Gansu Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(5): 890–897.
- Amiot R, Kusuhashi N, Saegusa H, et al. Paleoclimate and ecology of Cretaceous continental ecosystems of Japan inferred from the stable oxygen and carbon isotope compositions of vertebrate bioapatite[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, 205: 104602.
- Amiot R, Wang X, Zhou Z, et al. Environment and ecology of East Asian dinosaurs during the Early Cretaceous inferred from stable oxygen and carbon isotopes in apatite[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 98: 358–370.
- Amiot R, Wang X, Zhou Z, et al. Oxygen isotopes of East Asian dinosaurs reveal exceptionally cold Early Cretaceous climates[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108(13): 5179–5183.
- Angst D, Lécuyer C, Amiot R, et al. Isotopic and anatomical evidence of an herbivorous diet in the Early Tertiary giant bird *Gastornis*. Implications for the structure of Paleocene terrestrial eco-



- systems[J]. *Naturwissenschaften*, 2014, 101: 313–322.
- Barral A, Gomez B, Legendre S, et al. Evolution of the carbon isotope composition of atmospheric CO<sub>2</sub> throughout the Cretaceous[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, 471: 40–47.
- Barron E J, Fawcett P J, Peterson W H, et al. A “simulation” of mid-Cretaceous climate[J]. *Paleoceanography*, 1995, 10: 953–962.
- Bojar A V, Halas S, Bojar H P, et al. Stable isotope hydrology of precipitation and groundwater of a region with high continentality, South Carpathians, Romania[J]. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 2017, 12: 513–524.
- Cavalheiro L, Wagner T, Steinig S, et al. Impact of global cooling on Early Cretaceous high *p*CO<sub>2</sub> world during the Weissert Event[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5411.
- Chenery C A, Pashley V, Lamb A L, et al. The oxygen isotope relationship between the phosphate and structural carbonate fractions of human bioapatite[J]. *Rapid Commun. Mass Spectrom*, 2012, 26: 309–319.
- Cormie A B, Luz B, Schwarcz H P. Relationship between the hydrogen and oxygen isotopes of deer bone and their use in the estimation of relative humidity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58: 3439–3449.
- D’Angela D, Longinelli A. Oxygen isotopes in living mammal’s bone phosphate: Further results[J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, 1990, 86: 75–82.
- Dera G, Neige P, Dommergues J L, et al. Ammonite paleobiogeography during the Pliensbachian-Toarcian crisis (Early Jurassic) reflecting paleoclimate, eustasy, and extinctions[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 78(3–4): 92–105.
- Diefendorf A F, Mueller K E, Wing S L, et al. Global patterns in leaf <sup>13</sup>C discrimination and implications for studies of past and future climate[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, 107(13): 5738–5743.
- Ehleringer J R, Monson R K. Evolutionary and ecological aspects of photosynthetic pathway variation[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1993, 24: 411–439.
- Erickson G M. Incremental lines of von Ebner in dinosaurs and the assessment of tooth replacement rates using growth line counts[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1996a, 93: 14623–14627.
- Erickson G M. Daily deposition of dentine in juvenile Alligator and assessment of tooth replacement rates using incremental line counts[J]. *Journal of Morphology*, 1996b, 228: 189–194.
- Fluteau F, Ramstein G, Besse J, et al. Impacts of palaeogeography and sea level changes on Mid-Cretaceous climate[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 247: 357–381.
- Fricke H C, Pearson D A. Stable isotope evidence for changes in dietary niche partitioning among hadrosaurian and ceratopsian dinosaurs of the Hell Creek Formation, North Dakota[J]. *Paleobiology*, 2008a, 34: 534–552.
- Fricke H C, Rogers R R, Backlund R, et al. Preservation of primary stable isotope signals in dinosaur remains, and environmental gradients of the Late Cretaceous of Montana and Alberta[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008b, 266: 13–27.
- Grimes S T, Matthey D P, Collinson M E, et al. Using mammal tooth phosphate with freshwater carbonate and phosphate palaeoproxies to obtain mean paleotemperatures[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004a, 23(7–8): 967–976.
- Grimes S T, Collinson M E, Hooker J J, et al. Distinguishing the diets of coexisting fossil theridomyid and glirid rodents using carbon isotopes[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004b, 208(1–2): 103–119.
- Hasegawa H, Tada R, Jiang X, et al. Drastic shrinking of the Hadley circulation during the mid-Cretaceous Supergreenhouse[J]. *Clim. Past*, 2012, 8(4): 1323–1337.
- Hay W W, Floegel S. New thoughts about the Cretaceous climate and oceans[J]. *Earth-Science Reviews*, 2012, 115: 262–272.
- Holdridge L R. Determination of world plant formations from simple climatic data[J]. *Science*, 1947, 105: 367–368.
- Huber M. Progress in Greenhouse Climate Modeling[J]. *The Paleontological Society Papers*, 2012, 18: 213–262.
- Hyneka S A, Benjamin H, Passey B H, et al. Small mammal carbon isotope ecology across the Miocene–Pliocene boundary, northwestern Argentina[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2012, 321–322, 177–188.
- IAEA-WMO. Global network of isotopes in precipitation[EB/OL]. The GNIP Database, 2016. Accessible at: <http://www.naweb.iaea.org/napc/ih/index.html>.
- Jin P, Ji L, Ma B, et al. Early Cretaceous palynology and paleoclimate of the Hanxia-Hongliuxia Area, Jiuxi Basin, China[J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 281: 104259. <https://doi.org/10.1016/j.revpalbo.2020.104259>.
- Koch P L, Tuross N, Fogel M L. The effects of sample treatment and diagenesis on the isotopic integrity of carbonate in biogenic hydroxylapatite[J]. *Journal of Archaeological Science*, 1997, 24: 417–429.
- Kolodny Y, Luz B, Navon O. Oxygen isotope variations in phosphate of biogenic apatites, I. Fish bone apatite—rechecking the rules of the game[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 64: 398–404.
- Lécuyer C, Amiot R, Touzeau A, et al. Calibration of the phosphate <sup>δ</sup><sup>18</sup>O thermometer with carbonate-water oxygen isotope fractionation equations[J]. *Chemical Geology*, 2013, 347(6): 217–226.

- Lécuyer C, Balter V, Martineau F, et al. Oxygen isotope fractionation between apatite-bound carbonate and water determined from controlled experiments with synthetic apatites precipitated at 10–37 °C [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(7): 2072–2081.
- Miller K G, Wight J D, Fairbanks R D. Unlocking the ice house: Oligocene-Miocene oxygen isotopes, eustasy, and margin erosion [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96: 6829–6848.
- Passey B H, Robinson T F, Ayliffe L K, et al. Carbon isotope fractionation between diet, breath CO<sub>2</sub>, and bioapatite in different mammals [J]. *Journal of Archaeological Science*, 2005, 32: 1459–1470.
- Rey K, Amiot R, Fourel F, et al. Global climate perturbations during the Permo-Triassic mass extinctions recorded by continental tetrapods from South Africa [J]. *Gondwana Research*, 2016, 37: 384–396.
- Royer A, Lécuyer C, Montuire S, et al. What does the oxygen isotope composition of rodent teeth record? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 361: 258–271.
- Shuo C, Jing M, Laiming Z. Quantitative reconstruction of Early Cretaceous dune morphology in the Ordos paleo-desert and its paleoclimatic implications [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023. doi:10.3389/FEART.2023.1142034.
- Straight W H, Barrick R E, Eberth D A. Reflections of surface water, seasonality and climate in stable oxygen isotopes from tyrannosaurid tooth enamel [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 206: 239–256.
- Takashima R, Nishi H, Huber B T, et al. Greenhouse [J]. *Oceanography*, 2006, 19: 82.
- Tang F, Luo Z, Zhou Z, et al. Biostratigraphy and palaeoenvironment of the dinosaur-bearing sediments in Lower Cretaceous of Mazongshan area, Gansu Province, China [J]. *Cretaceous Research*, 2001, 22: 115–129.
- Tütken T. The diet of sauropod dinosaurs: implications from carbon isotope analysis of teeth, bones, and plants, in: Klein N, Remes K, Sander M (Eds.). *Biology of the Sauropod Dinosaurs: Understanding the Life of Giants* [M]. Bloomington: Indiana University Press, 2011, 57–79.
- Zazzo A, Lécuyer C, Mariotti A. Experimentally-controlled carbon and oxygen isotope exchange between bioapatites and water under inorganic and microbially-mediated conditions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004a, 68: 1–12.
- Zazzo A, Lécuyer C, Sheppard SMF, et al. Diagenesis and the reconstruction of paleoenvironments: A method to restore original  $\delta^{18}\text{O}$  values of carbonate and phosphate from fossil tooth enamel [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004b, 68: 2245–2258.
- Zhang L, Yan D, Yang S, et al. Evolution of the Middle Jurassic paleoclimate: Sedimentary evidence from coal-bearing strata in the Santanghu Basin, NW China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 242: 105495.