

文章编号:1000-0550(2020)02-0358-09

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.019

广西渐新世宁明组三种植物碳同位素与古气候分析

王秋军¹, 郑军¹, 孙柏年², 马福军³, 王振¹, 王万梅³

1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州省古生物研究中心, 贵阳 550000

2. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000

3. 贵州师范学院地理与资源学院, 贵阳 550000

摘要 渐新世代表地球一个早期的“冰室”期,是地球气候演化和生物演替过程中一段特殊的时期。渐新世植物化石的碳同位素可为研究该时期的古气候提供依据。对广西渐新世宁明组三种植物及其最近现生亲缘种的碳同位素进行分析,化石种 *Buxus ningmingensis*, *Chuniophoenix slenderifolia* 和 *Cephalotaxus ningmingensis* 的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)分别为 -29.0‰ , -28.3‰ , -28.0‰ ; 碳同位素分馏($\Delta^{13}\text{C}$)分别为 23.48‰ , 22.74‰ , 22.43‰ ; 叶内细胞间和外界大气的 CO_2 分压比($\text{C}_{\text{植物}}/\text{C}_{\text{空气}}$)分别为 0.84, 0.81, 0.80; 水分利用效率(WUE)分别为 $42.63\ \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$, $51.56\ \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$, $55.38\ \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ 。其对应的最近现生亲缘种(NLRs)的 $\delta^{13}\text{C}$ 分别为 -27.9‰ , -29.7‰ , -28.8‰ ; $\Delta^{13}\text{C}$ 分别为 20.47‰ , 22.36‰ , 21.42‰ ; $\text{C}_{\text{植物}}/\text{C}_{\text{空气}}$ 分别为 0.71, 0.79, 0.75; WUE 分别为 $72.22\ \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$, $51.28\ \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$, $61.76\ \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ 。化石种 $\delta^{13}\text{C}$ 值均落在现代 C_3 植物相应的数值范围内,其 $\Delta^{13}\text{C}$ 和 $\text{C}_{\text{植物}}/\text{C}_{\text{空气}}$ 均高于相应的 NLRs 数值;而 *Buxus ningmingensis* 和 *Cephalotaxus ningmingensis* 的 WUE 低于相应的 NLRs 数值;其中 *Chuniophoenix slenderifolia* 的 WUE 稍高于相应的最近现生亲缘种 *C. hainanensis*, 推测可能与其 NLR 标本的母本植物生长在水源充足、空气潮湿的湖溪边湿地环境有关。基于 $\Delta^{13}\text{C}$ 、 $\text{C}_{\text{植物}}/\text{C}_{\text{空气}}$ 和 WUE 结果,推测化石种可能生活在一种比现在更为温暖湿润的气候环境中;化石种及同层位化石的古气候重建支持了当前古气候分析结果。

关键词 碳同位素;古气候;植物化石;渐新世;宁明组

第一作者简介 王秋军,男,1986年出生,博士,讲师,古生物学与地层学,E-mail: wangqj06linyu@163.com

中图分类号 Q914 Q532 **文献标志码** A

0 引言

植物通过光合作用固定大气中的 CO_2 合成自身物质。由于轻、重同位素在热运动或生化反应中的活动性不同,植物在吸收 CO_2 进行光合作用时,则导致碳同位素的分馏^[1-2]。此分馏作用受到植物生长时期的气候环境因子影响,如温度、水分和 CO_2 等^[3-7]。由于陆生植物叶片是植物体与外界大气圈进行气体交换的器官,与植物光合作用、蒸腾作用和呼吸作用等诸多生理过程密切相关,因此植物倾向于通过气孔的开闭和改变叶片上的气孔数目来调节诸多生理过程^[8-10],其中叶片含有植物当时的生长生理和气候环境信息,其碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$)可以提供包括源

CO_2 碳同位素组成在内的诸多气候环境信息^[11-17]。而植物叶片表面具有由高分子形成的角质层,其耐酸、耐碱性和抗分解特性使叶片不易被降解。因此,陆相地层中的叶片容易被保存形成压型化石,其蕴含的气候环境信息是研究古气候环境的重要材料^[18-21]。

渐新世代表地球新生代一个早期的“冰室”期,是地球气候演化和生物演替过程中一段特殊的时期。在始新世—渐新世界线时期(33.9 Ma),随着全球温度迅速降低,诱发一次历时 4 Ma 的冰期(Oi-1 Glaciation, 距今约 33.7 Ma),一方面引起南极大陆冰盖快速形成和海平面下降,另一方面促使动、植物面貌发生了重大的变化,如一些哺乳动物和阔叶植物的灭绝、须鲸类动物的出现等^[22-23]。继 Oi-1 Glaciation

收稿日期: 2018-10-06; **收修改稿日期**: 2019-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(31860050); 贵州省古生物研究中心建设基金(黔科合计 Z 字[2014]4003 号); 贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5788 号); 贵州师范学院科研基金项目(2015BS014); 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字(2015)35 号) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 31860050; Construction Foundation for the Guizhou Research Centre for Palaeontology, No. QianKHZ(2014)4003; Science and Technology Foundation of Guizhou Province, No. QianKHZ(2017)5788; Research Foundation of Guizhou Education University, No. 2015BS014; Research Foundation for the Introduced Talents of Guizhou University, No. 201535]

之后,虽然全球气候变冷并一直持续到渐新世中期(27~26 Ma),但期间一些大型食肉动物以及一些哺乳动物多样性增加^[22]。在渐新世后期(26~23.03 Ma),伴随全球温度升高(即 Late Oligocene Warming 事件,距今约 25~24 Ma),生物一定程度的繁盛。而随后中新世早期的降温事件(距今约 23.03 Ma),再次诱发一次历时 2 Ma 的冰期(即 Mi-1 Glaciation),温度变化对生物面貌和多样性产生了较大的影响^[22-23]。

研究该段特殊时期的气候环境信息,对预测全球气候变化引发的生物演替提供重要的基础资料^[23]。关于渐新世古气候的研究,主要依靠来自于海相沉积中藻类的烯酮类和有机孔虫的同位素数据($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{11}\text{B}$),少部分数据来自古土壤以及陆生植物^[22-24]:如利用气孔参数进行古大气 CO_2 浓度恢复、基于共存分析法和叶相分析法的古气候重建^[25-26]。为了更深入理解渐新世古气候变化对全球生物面貌的影响,需要更多的陆生植物数据支持。全球范围内,由于渐新世植物群相对稀少,因此利用植物化石进行渐新世古气候环境分析相对较少。虽然一些学者利用化石植物群的属种及其叶相组合,以及孢粉定量恢复了一些地区的渐新世古气候^[27-30],但缺少植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 数据验证。近几年来,在广西渐新世宁明组发现保存有许多植物叶片等压型化石^[31-38],这为利用植物化石碳同位素分析渐新世古气候环境提供了不可多得的材料。本文对广西渐新世宁明组三种植物及其最近现生亲缘种(Nearest Living Relatives, NLRs)的碳同位素组成进行了分析,计算其碳同位素分馏

(Carbon isotope discrimination, $\Delta^{13}\text{C}$)和水分利用效率(Water-use efficiency, WUE);并试图探讨 $\Delta^{13}\text{C}$ 和 WUE 与植物当时生长气候环境之间的关系。

1 材料与方法

本文研究的材料为采自广西崇左市宁明县城中镇至南友高速入口公路一侧的宁明组剖面(图 1a),由兰州大学古生物学与地层学研究所(LDGSW)成员于 2013 年和 2014 年分三次采集。宁明组主要是浅湖相沉积,其岩性以灰黄色至棕灰色的薄层状泥岩为主,夹浅黄色泥质砂岩、泥质粉砂岩、细砂岩以及多层膨润土^[39-40]。在灰色、浅灰白色和棕灰色的薄层状泥岩以及泥质砂岩(图 1b)中保存有许多植物叶片和果实等压型化石以及孢粉化石^[41-43]。根据岩石地层、孢粉组合以及鱼类化石等研究结果^[39,44-48],宁明组的地质时代被认为是渐新世。

宁明组植物群保存有许多叶片、果实、叶片与果实共同保存的枝条等化石^[41-43,49],被子植物占主体,含有一些裸子植物;其中被子植物化石含有大量的樟科、壳斗科、豆科、棕榈科和黄杨科等叶片。本文选定的化石种分别是:双子叶黄杨科黄杨属的 *Buxus ningmingensis* Ma et Sun^[34],单子叶棕榈科琼棕属的 *Chuniophoenix slenderifolia* Wang et Sun^[36],裸子植物三尖杉科三尖杉属的 *Cephalotaxus ningmingensis* Shi, Zhou et Xie^[50]。通过叶片的宏观特征和角质层分析^[34,36,50],化石种的 NLRs 分别是小叶黄杨(*Buxus*

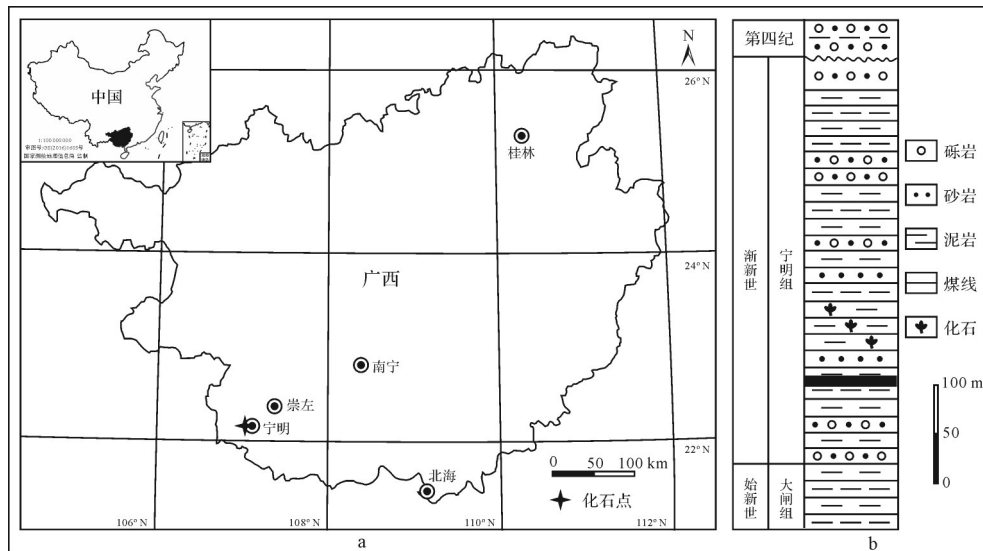


图 1 样品采集地(a)和宁明组地层柱状图(b.据宁宗善等^[39])

Fig.1 (a) Map showing sample site. (b) General stratigraphic section of the Ningming Formation (after Ning *et al.*^[39])

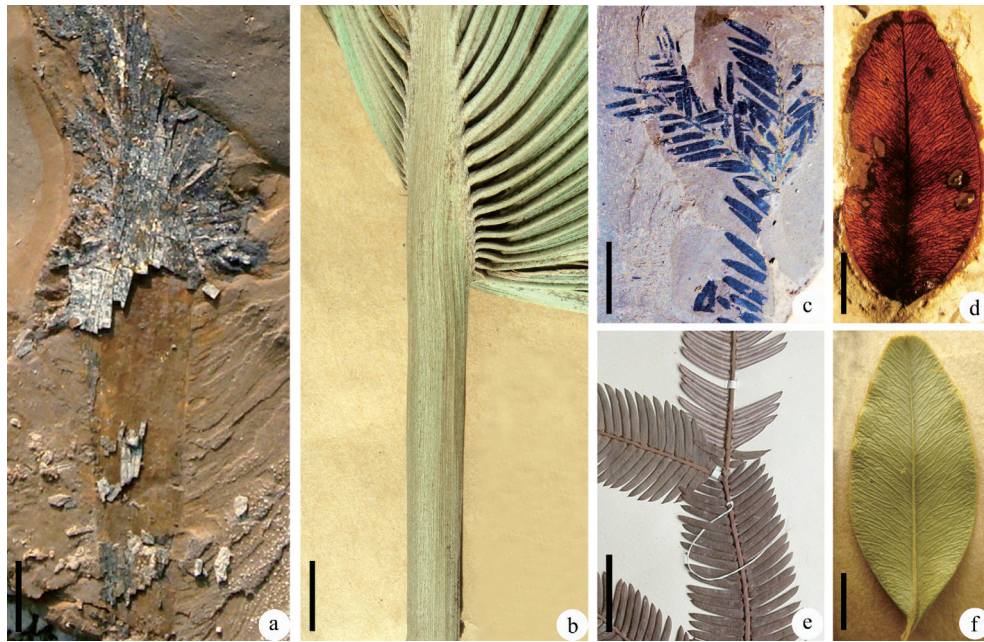


图2 化石种及其NLRs

(a) *Chuniophoenix slenderifolia*; (b) *Chuniophoenix hainanensis*; (c) *Cephalotaxus ningmingensis*; (d) *Buxus ningmingensis*; (e) *Cephalotaxus oliveri*; (f) *Buxus microphylla* subsp. *sinica*。a-b, Wang et al.^[36]和Sun et al.^[14]有描述; c-f, Sun et al.^[14]有描述。比例尺: a-c, e, 1 cm; d, f, 5 mm

Fig.2 Fossil taxa and nearest living relatives (NLRs)

(a) *Chuniophoenix slenderifolia*; (b) *C. hainanensis*; (c) *Cephalotaxus ningmingensis*; (d) *Buxus ningmingensis*; (e) *Cephalotaxus oliveri*; (f) *Buxus microphylla* subsp. *sinica*。 (a), (b) also illustrated by Wang et al.^[36] and Sun et al.^[14]; (c)-(f), also illustrated by Sun et al.^[14]. Scale bars: (a)-(c), (e) 1 cm; (d), (f) 5 mm

microphylla Siebold et Zuccarini subsp. *sinica* (Rehd. et Wils.) Hatusima)^[34], 琼棕 (*Chuniophoenix hainanensis*)^[36] 和篦子三尖杉 (*Cephalotaxus oliveri*)^[50]。 *Buxus ningmingensis* 和 *Cephalotaxus ningmingensis* 是植物群中的常见类型。虽然至今只发现 *Chuniophoenix slenderifolia* 一块标本, 但其最近现生亲缘种 *C. hainanensis* 是热带典型分子且对气候敏感, 对气候具有明显的指示作用。因此, 本文选择以上三种及其NLRs作为研究对象(图2)。

关于植物化石碳同位素样品的处理方法有两种, 第一种的处理过程如下^[14, 51-53]: 将植物化石从岩石上剥下, 用5%的H₂O₂试剂均匀的涂抹在标本上, 期间用毛刷去掉覆盖的岩石, 然后用蒸馏水清洗干净; 置于10%的HCl溶液中, 将吸附和充填在植物化石上的钙质成分完全除去, 直至浸泡试剂由黄色变成白色, 然后用蒸馏水清洗干净; 再经50%的HF溶液浸泡, 将吸附在植物化石上的硅质成分充分溶解, 清除难溶物质, 并用蒸馏水多次清洗干净。样品在烘箱中以90℃恒温烘干, 送中国科学院地质与地球物理研究所兰州油气资源研究中心用MAT-253质谱仪测定其δ¹³C。测量采用PDB标准, 误差小于0.5‰。

第二种的处理过程与第一种类似, 只是经HF溶液处理后, 再用舒氏液浸泡直至化石叶片由黑色变浅黄色或透明^[6, 42]。本文采用第一种处理过程。Farquhar et al.^[11-12]基于对现生植物的光合作用分析, 建立了C₃植物叶片的碳同位素分馏模型, 碳同位素分馏(Δ¹³C)为:

$$\Delta^{13}\text{C} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{空气}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{植物}}}{1 + \delta^{13}\text{C}_{\text{植物}}/1000} = a + (b - a) \frac{C_{\text{植物}}}{C_{\text{空气}}} \quad (1)$$

δ¹³C_{空气}为大气CO₂的碳同位素组成, δ¹³C_{植物}为C₃植物叶片的碳同位素组成, *a*指大气CO₂通过气孔扩散进入植物叶片所造成的碳同位素分馏系数(=4.4‰), *b*是指在核酮糖二磷酸羧化酶(RuBP羧化酶)的作用下, 固碳的羧化反应所引起的碳同位素分馏系数(=27.0‰), C_{植物}和C_{空气}分别代表了叶内细胞间和外界大气CO₂分压。C_{植物}/C_{空气}与外界多种气候环境因素密切相关, 它反映了植物气孔开张程度(导通性)、光合作用强度及其他生理过程^[2, 5-6]。

C₃植物叶片碳同位素分馏模型(公式1)的提出, 使得碳同位素分析成为估算植物水分利用效率(Water-use efficiency, WUE)的理论基础^[5, 11-12, 15], WUE为:

表1 化石种及其NLRs的碳同位素分馏和水分利用效率

Table 1 Carbon isotope discrimination and water-use efficiency of the fossil taxa and their NLRs

属种	$\delta^{13}C_{\text{植物}}/\text{‰}$	$\delta^{13}C_{\text{空气}}/\text{‰}$	$\Delta^{13}C/\text{‰}$	$C_{\text{植物}}/C_{\text{空气}}$	$C_{\text{空气CO}_2}$	WUE
<i>Buxus ningmingensis</i>	-29.0	-6.2	23.48	0.84	438	42.63
<i>Chuniophoenix slenderifolia</i>	-28.3	-6.2	22.74	0.81	438	51.56
<i>Cephalotaxus ningmingensis</i>	-28.0	-6.2	22.43	0.80	438	55.38
<i>Buxus microphylla</i> subsp. <i>sinica</i>	-27.9	-8.0	20.47	0.71	400	72.22
<i>Chuniophoenix hainanensis</i>	-29.7	-8.0	22.36	0.79	400	51.28
<i>Cephalotaxus oliveri</i>	-28.8	-8.0	21.42	0.75	400	61.76

注:渐新世 $\delta^{13}C_{\text{空气}}$ 引自 Zachos *et al.*^[22], 大气的 CO_2 浓度均值 ($C_{\text{空气CO}_2}$) 引自 Sun *et al.*^[14]; 现代 $\delta^{13}C_{\text{空气}}$ 和 $C_{\text{空气CO}_2}$ 引自 CDIA (http://cdiac.esd.ornl.gov/); $C_{\text{空气CO}_2}$ 单位为 ml/m^3 , WUE 单位为 $\mu mol CO_2/mol H_2O$ 。

$$WUE = \frac{C_{\text{空气CO}_2} \times \left(1 - \frac{C_{\text{植物}}}{C_{\text{空气}}}\right)}{1.6} \quad (2)$$

WUE 受到植物自身和外部气候环境的影响,是评价植物生长适宜程度的综合生理生态指标,实质上反映了光合速率与蒸腾速率之比,单位为 $\mu mol CO_2/mol H_2O$, 1.6 为水蒸气的气孔传导度与 CO_2 的比值。 $C_{\text{植物}}/C_{\text{空气}}$ 由公式(1)求得。如已知大气的 CO_2 浓度 ($C_{\text{空气CO}_2}$), 根据公式(2)可求出植物的 WUE。

2 结果

根据公式 1 和 2 计算的结果表明(表 1):化石种 *Buxus ningmingensis*, *Chuniophoenix slenderifolia*, *Cephalotaxus ningmingensis* 的 $\delta^{13}C$ 由于分别为 -29.0‰ , -28.3‰ , -28.0‰ ; 因此 $\Delta^{13}C$ 分别为 23.48‰ , 22.74‰ , 22.43‰ ; $C_{\text{植物}}/C_{\text{空气}}$ 分别为 0.84 , 0.81 , 0.80 ; WUE 分别为 $42.63 \mu mol CO_2/mol H_2O$, $51.56 \mu mol CO_2/mol H_2O$, $55.38 \mu mol CO_2/mol H_2O$ 。其对应的 NLRs 的 $\delta^{13}C$ 由于分别为 -27.9‰ , -29.7‰ , -28.8‰ ; 因此 $\Delta^{13}C$ 分别为 20.47‰ , 22.36‰ , 21.42‰ ; $C_{\text{植物}}/C_{\text{空气}}$ 分别为 0.71 , 0.79 , 0.75 ; WUE 分别为 $72.22 \mu mol CO_2/mol H_2O$, $51.28 \mu mol CO_2/mol H_2O$, $61.76 \mu mol CO_2/mol H_2O$ 。表 1, 图 3 和图 4 表明:化石种的碳同位素分馏($\Delta^{13}C$)要高于其相应的 NLRs, 而 *Buxus ningmingensis* 和 *Cephalotaxus ningmingensis* 的水分利用效率(WUE)低于其 NLRs, *Chuniophoenix slenderifolia* 的 WUE 稍高于其 NLR。

3 讨论

Kohn^[7]对全球 570 个地点的多种 C_3 植物分析表明,其 $\delta^{13}C$ 分布范围为 $-37\text{‰} \sim -20\text{‰}$, 平均值为 -28.5‰ 。基于现生植物的研究发现, $C_{\text{植物}}/C_{\text{空气}}$ 与

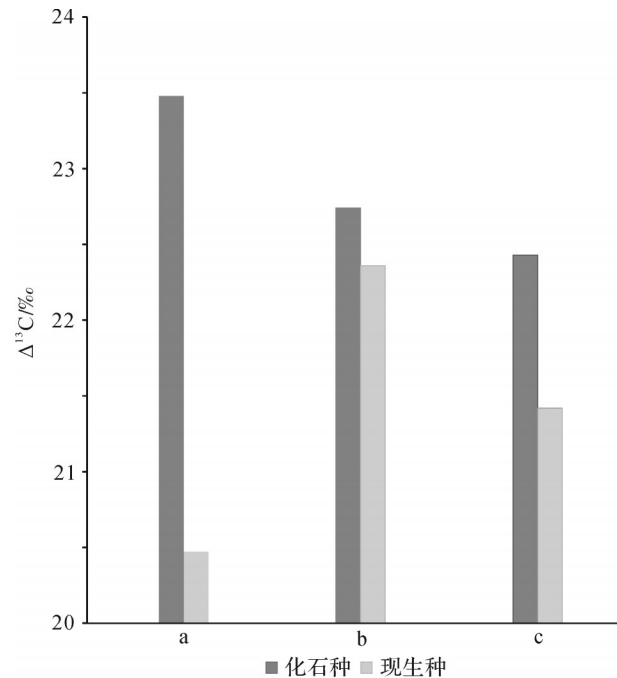


图3 化石种及其NLRs的碳同位素分馏($\Delta^{13}C$) (a) *Buxus ningmingensis* 和 *Buxus microphylla* subsp. *sinica*; (b) *Chuniophoenix slenderifolia* 和 *C. hainanensis*; (c) *Cephalotaxus ningmingensis* 和 *C. oliveri*

Fig.3 Carbon isotope discriminations ($\Delta^{13}C$) of the fossil taxa and their NLRs

(a) *Buxus ningmingensis* and *B. microphylla* subsp. *sinica*; (b) *Chuniophoenix slenderifolia* and *C. hainanensis*; (c) *Cephalotaxus ningmingensis* and *C. oliveri*

气孔传导率和光合作用速率密切相关,受到光照、水分、土壤、大气 CO_2 和温度等的影响^[6]。较高的 $C_{\text{植物}}/C_{\text{空气}}$ (> 0.7) 虽然指示植物具有较高的气孔传到率和较高的同化速率,但由于环境中水分充足,植物的水分利用效率却相对较低。此外,对我国不同气候环境中的现生银杏叶片、德国中始新世早期和云南上新世植物化石叶片的研究表明^[4-6,54],生长在温暖、湿润气候环境中的叶片具有较高的 $\Delta^{13}C$ 和 $C_{\text{植物}}/C_{\text{空气}}$ 、以及较低的 WUE,说明在水分充足、气候温暖的环境中,植物叶片具有更高的碳同位素分馏,然而其水分

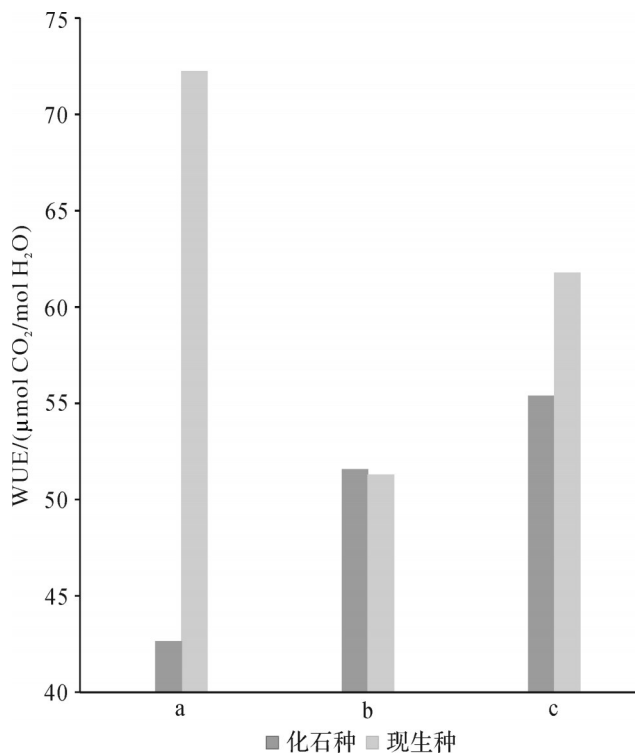


图4 化石种及其NLRs的水分利用效率(WUE)

(a) *Buxus ningmingensis* 和 *Buxus microphylla* subsp. *sinica*; (b) *Chuniophoenix slenderifolia* 和 *C. hainanensis*; (c) *Cephalotaxus ningmingensis* 和 *C. oliveri*

Fig.4 Water-use efficiency (WUE) of the fossil taxa and their NLRs

(a) *Buxus ningmingensis* and *B. microphylla* subsp. *sinica*; (b) *Chuniophoenix slenderifolia* and *C. hainanensis*; (c) *Cephalotaxus ningmingensis* and *C. oliveri*

利用却比较浪费。

表1,图3和图4表明,化石种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值(-29.0‰ ~ -28.0‰)均落在现代 C_3 植物相应的数值范围内(-37‰ ~ -20‰),其 $\Delta^{13}\text{C}$ 和 $\text{C}_{\text{植物}}/\text{C}_{\text{空气}}$ 值(分别是 22.43‰ ~ 23.48‰ 和 0.80 ~ 0.84)均高于其相应的NLRs数值(分别是 20.47‰ ~ 22.36‰ 和 0.71 ~ 0.79);其中 *Buxus ningmingensis* 和 *Cephalotaxus ningmingensis* 的WUE(分别是 $42.63 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ 和 $55.38 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$)低于其相应的NLRs数值(分别是 $72.22 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ 和 $61.76 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$);两者的 $\Delta^{13}\text{C}$ 、 $\text{C}_{\text{植物}}/\text{C}_{\text{空气}}$ 和WUE指示当时为一种比现在更为温暖湿润的气候环境。

Chuniophoenix slenderifolia 的 $\Delta^{13}\text{C}$ 和 $\text{C}_{\text{植物}}/\text{C}_{\text{空气}}$ (分别是 22.74‰ 和 0.81)虽然也高于其NLR数值(分别是 22.36‰ 和 0.79),但其WUE稍高于其NLR数值(分别是 $51.56 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$ 和 $51.28 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$)(表1、图3,4),推测可能与样品采集有关。*Buxus ningmin-gensis* 和 *Cephalotaxus ningmin-*

gensis 的NLRs (*Buxus microphylla* subsp. *sinica* 和 *Cephalotaxus oliveri*)标本都来自中国科学院华南植物园标本馆,其母本植物生长在自然生境中,能反映当时的原生气候环境。而 *Chuniophoenix slenderifolia* 的NLRs(*C. hainanensis*)标本采自华南植物园的植物迁地保护园区——棕榈园;其母本植物生长在湖溪边的湿地环境,水源充足、空气潮湿,未必能完全反映当时的原生自然气候环境^[6-7],其水分利用比较浪费,水分利用效率相对化石种的WUE低。

因此,基于化石种及其NLRs的 $\Delta^{13}\text{C}$ 、 $\text{C}_{\text{植物}}/\text{C}_{\text{空气}}$ 和WUE分析,推测化石种生活在一种比现在更为温暖湿润的气候环境中。化石种及同层位化石的古气候重建支持了当前古气候分析结果。基于植物大化石利用共存分析法(Coexistence approach, CA)定量重建了渐新世宁明地区一些古气候参数(表2、图5),化石种NLRs的气候参数引自中国气象局信息中心气象资料室^[55-56],选取1971—2000年的平均值。一些属种跨国分布和只在国外分布,其地理分布区的MAT参考了Palaeoflora Database^[57]。CA结果表明:年均温(Mean annual temperature, MAT)为 $22.8\pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 、年均降雨量(Mean annual precipitation, MAP)为 $1655.1\pm 584.6 \text{ mm}$ 、最早月均降雨量(Mean precipitation of the driest month, MPdry)为 $21.8\pm 10.0 \text{ mm}$ 。宁明地区现代的MAT为 $22.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、MAP为 1304.0 mm 、MPdry为 19.8 mm (表2,中国气象局气象信息中心气象资料室^[55-56])。由于化石点的MAT、MAP和MPdry都整体相对高于当地现在的气候值(表2),支持了当前碳同位素的分析结果。

4 结论

(1)对广西渐新世宁明组的 *Buxus ningmingensis*, *Chuniophoenix slenderifolia* 和 *Cephalotaxus ningmingensis* 及其NLRs碳同位素进行了分析,化石种的碳同

表2 化石点的古气候和现今气候对比

Table 2 Comparison of the paleoclimate and modern climate at the fossil locality

气候参数	化石点	宁明
MAT/ $^\circ\text{C}$	22.8 ± 0.8	22.2
MAP/mm	1655.1 ± 584.6	1304.0
MPdry/mm	21.8 ± 10.0	19.8

注:宁明现代气候的参数引自中国气象局信息中心气象资料室^[55-56],选取1971—2000年的地面气候值;化石点古气候参数来自图5。

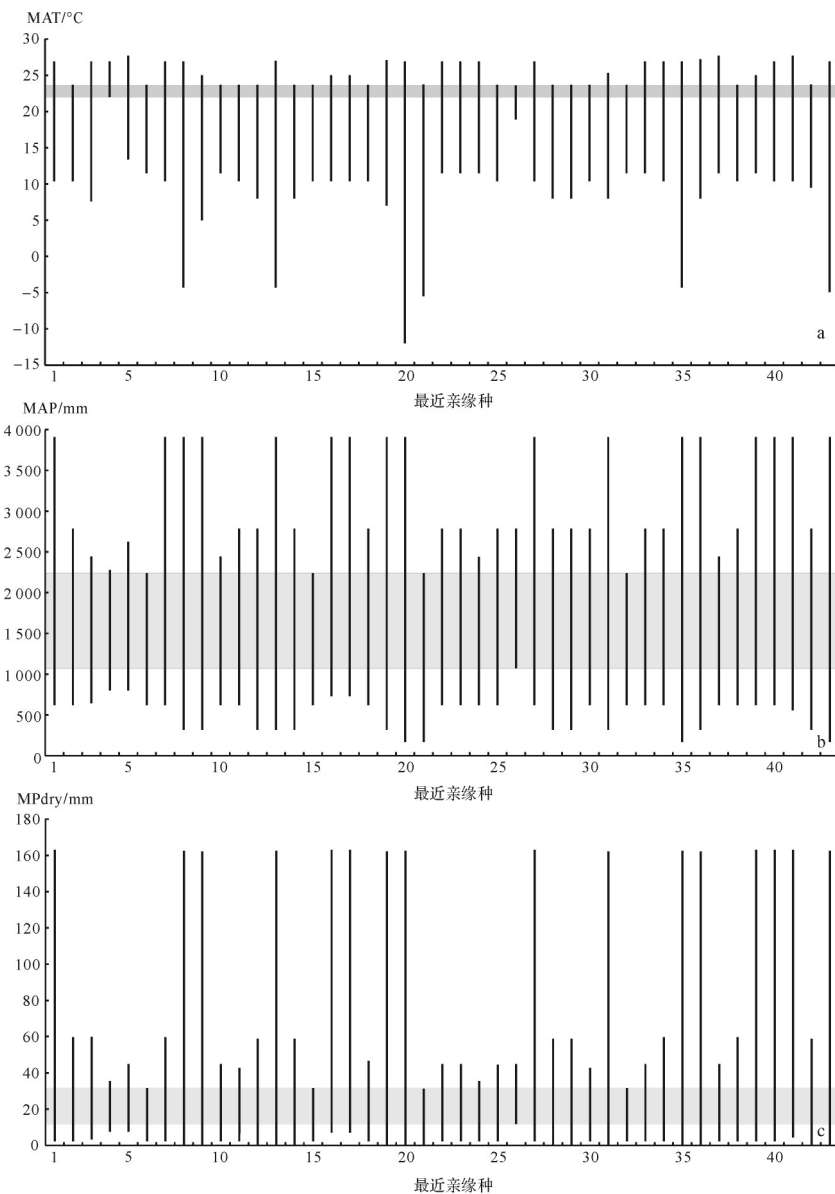


图5 基于CA重建宁明组植物群的MAT, MAP和MPdry

Fig.5 MAT, MAP and MPdry reconstructions of the Ningming Formation based on CA

(a)MAT; (b)MAP; (c)MPdry. 1. *Calocedrus macrolepis*; 2. *Cupressus funebris*; 3. *Cephalotaxus oliveri*; 4. *Chuniophoenix hainanensis*; 5. *Livistona chinensis*; 6. *Trachycarpus martianus*; 7. *Trachycarpus fortunei*; 8. *Acer*; 9. *Ailanthus altissima*; 10. *Ailanthus fordii*; 11. *Alnus nepalensis*; 12. *Quercus engleriana*; 13. *Quercus*; 14. *Cyclobalanopsis oxyodon*; 15. *Castanopsis ceratocantha*; 16. *Castanopsis sclerophylla*; 17. *Lithocarpus glaber*; 18. *Lithocarpus elizabethae*; 19. *Lithocarpus*; 20. *Prunus*; 21. *Sorbus*; 22. *Bauhinia variegata*; 23. *Bauhinia purpurea*; 24. *Bauhinia viridescens*; 25. *Bauhinia brachycarpa*; 26. *Bauhinia didyma*; 27. *Engelhardtia*; 28. *Paliurus hemsleyanus*; 29. *Berchemia polyphylla*; 30. *Burretiodendron longistipitatum*; 31. *Buxus microphylla* subsp. *sinica*; 32. *Buxus austro-yunnanensis*; 33. *Securidaca*; 34. *Exbucklandia*; 35. *Fraxinus chinensis*; 36. *Cinnamomum*; 37. *Alseodaphne*; 38. *Neolitsea levinei*; 39. *Laurus*; 40. *Beilschmiedia*; 41. *Litsea*; 42. *Zelkova schneideriana*; 43. *Ulmus*

位素组成($\delta^{13}\text{C}$)值均落在现代 C_3 植物相应的数值范围内(-37‰ ~ -20‰)。

(2) 化石种的碳同位素分馏($\Delta^{13}\text{C}$)以及叶内细胞间和外界大气的 CO_2 分压比($\text{C}_{\text{植物}}/\text{C}_{\text{空气}}$)均高于其相应的NLRs数值;而*Buxus ningmingensis*和*Cephalotaxus ningmingensis*水分利用效率(WUE)低于其相应的NLRs数值;其中*Chuniophoenix slenderifolia*的

WUE稍高于相应的NLR(*C. hainanensis*)数值,推测可能与其NLR标本的母本植物生长在水源充足、空气潮湿的湖溪边湿地环境有关。

(3) 基于 $\Delta^{13}\text{C}$ 、 $\text{C}_{\text{植物}}/\text{C}_{\text{空气}}$ 和WUE结果,推测化石种可能生活在一种比现在更为温暖湿润的气候环境中;化石种及同层位化石的古气候重建支持了当前古气候分析结果。

参考文献 (References)

- [1] 李相博,陈践发,张平中,等. 青藏高原(东北部)现代植物碳同位素组成特征及其气候信息[J]. 沉积学报,1999,17(2):325-329. [Li Xiangbo, Chen Jianfa, Zhang Pingzhong, et al. The characteristics of carbon isotope composition of modern plants over Qinghai-Tibet Plateau (NE) and its climatic information[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 325-329.]
- [2] Chakraborty S, Jana B N, Bhattacharya S K, et al. Carbon isotope composition of fossil leaves from the Early Cretaceous sediments of western India[J]. Journal of Earth System Science, 2011, 120(4): 703-711.
- [3] Farquhar G, Von Caemmerer S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species[J]. Planta, 1980, 149(1): 78-90.
- [4] Sun B N, Dilcher D L, Beerling D J, et al. Variation in *Ginkgo biloba* L. leaf characters across a climatic gradient in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(12): 7141-7146.
- [5] 解三平,孙柏年,闫德飞,等. 滇西新近纪植物气孔、碳同位素组成与古环境分析[J]. 沉积学报,2006,24(6):883-888. [Xie Sanping, Sun Bainian, Yan Defei, et al. Stomata, carbon isotopic composition of the plants from the Neogene in West Yunnan and paleoenvironmental analysis [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006, 24 (6): 883-888.]
- [6] Grein M, Roth-Nebelsick A, Wilde V. Carbon isotope composition of Middle Eocene leaves from the Messel Pit, Germany [J]. Palaeodiversity, 2010, 3: 1-7.
- [7] Kohn M J. Carbon isotope compositions of terrestrial C₃ plants as indicators of (paleo) ecology and (paleo) climate[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(46): 19691-19695.
- [8] Beerling D J, Woodward F I. Stomatal density responses to global environmental change[M]//Stanhill G. Advances in bioclimatology. Berlin: Springer, 1996, 4: 171-221.
- [9] Beerling D J, Royer D L. Fossil plants as indicators of the Phanerozoic global carbon cycle[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2002, 30(1): 527-556.
- [10] 解三平,闫德飞,韦利杰,等. 精确重建古大气CO₂浓度的气孔方法[J]. 古生物学报,2005,44(3):464-471. [Xie Sanping, Yan Defei, Wei Lijie, et al. A stomatal approach for accurate reconstruction of palaeoatmospheric CO₂ concentration[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2005, 44(3): 464-471.]
- [11] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves [J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9(2): 121-137.
- [12] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40(1): 503-537.
- [13] Sun B N, Xie S P, Yan D F, et al. Fossil plant evidence for Early and Middle Jurassic paleoenvironmental changes in Lanzhou area, Northwest China[J]. Palaeoworld, 2008, 17(3/4): 215-221.
- [14] Sun B N, Wang Q J, Konrad W, et al. Reconstruction of atmospheric CO₂ during the Oligocene based on leaf fossils from the Ningming Formation in Guangxi, China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2017, 467: 5-15.
- [15] Yan D F, Sun B N, Xie S P, et al. Response to paleoatmospheric CO₂ concentration of *Solenites vimineus* (Phillips) Harris (Ginkgophyta) from the Middle Jurassic of the Yaojie Basin, Gansu province, China[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(12): 2029-2039.
- [16] 李瑞云,王秋军,高正海,等. 甘肃中部蛇苔(*Conocephalum conicum* (L.) Dum)表皮特征与稳定碳同位素组成沿海拔的变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2012,48(2):9-14. [Li Ruiyun, Wang Qiujun, Gao Zhenghai, et al. Variation of epidermal features and stable carbon isotope composition of *Conocephalum conicum* (L.) Dum through different elevations in central Gansu province[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2012, 48(2): 9-14.]
- [17] 王秋军,毛铁,孙柏年,等. 基于共存分析法和叶缘分析法重建中国渐新世年均温[J]. 地质学报,2017,91(12):2608-2622. [Wang Qiujun, Mao Tie, Sun Bainian, et al. Quantitative reconstruction of Oligocene mean annual temperatures in China based on Coexistence Approach and Leaf Margin Analysis[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(12): 2608-2622.]
- [18] 马福军,徐小慧,李瑞云,等. 内蒙古乌尼特煤田下白垩统分散角质层研究[J]. 微体古生物学报,2013,30(3):244-262. [Ma Fujun, Xu Xiaohui, Li Ruiyun, et al. Dispersed cuticles from the Lower Cretaceous Wunite coal field in Inner Mongolia [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2013, 30(3): 244-262.]
- [19] 王秋军,徐小慧,金培红,等. 基于银杏类化石 *Baiera furcata* 气孔参数定量重建中生代古大气CO₂浓度变化[J]. 地质论评,2013, 59(6): 1035-1045. [Wang Qiujun, Xu Xiaohui, Jin Peihong, et al. Quantitative reconstruction of Mesozoic paleoatmospheric CO₂ based on stomatal parameters of fossil *Baiera furcata* of ginkgophytes [J]. Geological Review, 2013, 59 (6) : 1035-1045.]
- [20] Wang Q J, Ma F J, Yang Y, et al. Bamboo leaf and pollen fossils from the Late Miocene of eastern Zhejiang, China and their phyto-geological significance[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2014, 88(4): 1066-1083.
- [21] Ma F J, Wang Q J, Dong J L, et al. A new plant assemblage from the Middle Triassic volcanic tuffs of Pingchuan, Gansu, northwestern China and its paleoenvironmental significance[J]. PalZ, 2016, 90(2): 349-376.
- [22] Zachos J, Pagani M, Sloan L, et al. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present[J]. Science, 2001, 292 (5517): 686-693.
- [23] Pälke H, Norris R D, Herrle J O, et al. The heartbeat of the Oli-

- gocene climate system [J]. *Science*, 2006, 314 (5807): 1894-1898.
- [24] Beerling D J, Royer D L. Convergent Cenozoic CO₂ history [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(7): 418-420.
- [25] Wolfe J A. A method of obtaining climatic parameters from leaf assemblages [M]. Washington: United States Government Printing Office, 1993: 1-71.
- [26] Mosbrugger V, Utescher T. The coexistence approach—a method for quantitative reconstructions of Tertiary terrestrial palaeoclimate data using plant fossils [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 134(1/2/3/4): 61-86.
- [27] Bruch A A, Mosbrugger V. Palaeoclimate versus vegetation reconstruction – palynological investigations on the Oligocene sequence of the Sava Basin, Slovenia [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2002, 122(3/4): 117-141.
- [28] Ivanov D A, Ashraf A R, Mosbrugger V. Late Oligocene and Miocene climate and vegetation in the eastern Paratethys area (Northeast Bulgaria), based on pollen data [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 255 (3/4): 342-360.
- [29] Uhl D, Herrmann M. Palaeoclimate estimates for the late Oligocene Taphoflora of Enspel (Westerwald, West Germany) based on palaeobotanical proxies [J]. *Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments*, 2010, 90(1): 39-47.
- [30] 姚妮妮, 马福军, 闫德飞. 甘肃兰州盆地渐新世古气候参数重建 [J]. *甘肃地质*, 2010, 19(4): 20-25. [Yao Nini, Ma Fujun, Yan Defei. Reconstruction of palaeoclimatic parameters from the Oligocene in Lanzhou Basin, Gansu province [J]. *Gansu Geology*, 2010, 19(4): 20-25.]
- [31] Dong J L, Sun B N, Ma F J, et al. *Paliurus* fruits from the Oligocene of South China and their phytogeographic implications [J]. *Plos One*, 2015, 10(11): e0140653.
- [32] Dong J L, Wang W J, Deng P, et al. New material of *Palaeocarya* from the Oligocene of Ningming, Guangxi, South China [J]. *PalZ*, 2016, 90(2): 399-412.
- [33] Ma F J, Sun B N, Wang Q J, et al. A new species of *Meliolinites* associated with *Buxus* leaves from the Oligocene of Guangxi, southern China [J]. *Mycologia*, 2015, 107(3): 505-511.
- [34] Ma F J, Wang Q J, Dong J L, et al. *Buxus* leaves from the Oligocene of Guangxi, China and their biogeographical significance [J]. *Acta Geological Sinica (English Edition)*, 2015, 89(5): 1453-1469.
- [35] Ma F J, Sun B N, Wang Q J, et al. A new species of *Zelkova* (Ulmaceae, Ulmoideae) with leaves and fruits from the Oligocene of South China and its biogeographical implications [J]. *Historical Biology*, 2016, 29(1): 1-10.
- [36] Wang Q J, Ma F J, Dong J L, et al. Coryphoid palms from the Oligocene of China and their biogeographical implications [J]. *Comptes Rendus Palevol*, 2015, 14(4): 263-279.
- [37] Wang Q J, Ma F J, Dong J L, et al. New costapalmate palm leaves from the Oligocene Ningming Formation of Guangxi, China, and their biogeographic and palaeoclimatic implications [J]. *Historical Biology*, 2017, 29(5): 594-606.
- [38] 马福军, 吴媛欣, 刘松, 等. 广西南明组植物化石中黄铁矿及其沉积意义 [J]. *沉积学报*, 2018, 36(1): 33-41. [Ma Fujun, Wu Yuanxin, Liu Song, et al. Pyrites in the plant fossils from the Ningming Formation, Guangxi, and their depositional significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(1): 33-41.]
- [39] 宁宗善, 胡炎坤, 周铁明, 等. 中国油气区第三系(VII)滇桂油区分册 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1994: 13-20. [Ning Zongshan, Hu Yankun, Zhou Tieming, et al. Tertiary in petroliferous regions of China (VII) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994: 13-20.]
- [40] 广西壮族自治区地质矿产局. 广西壮族自治区区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1985: 273-274. [Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. Regional geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985: 273-274.]
- [41] 马福军. 广西南明渐新世被子植物化石及植物群古气候重建 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015. [Ma Fujun. Angiosperm fossils from the Oligocene of Ningming, Guangxi and a paleoclimatic reconstruction of the flora [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.]
- [42] 王秋军. 广西南明渐新世棕榈植物及其生物地理意义 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015. [Wang Qiujun. Palms from the Oligocene of Ningming, Guangxi and their biogeographical implications [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.]
- [43] Ma F J, Liu S, Sun B N, et al. Legume fruits from the Oligocene Ningming Formation of Guangxi, China, and their biogeographical and palaeoclimatic implications [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2017, 244: 192-202.
- [44] 王伟铭, 陈耿娇, 陈运发, 等. 广西南明盆地第三纪孢粉植物群及其地层意义 [J]. *地层学杂志*, 2003, 27(4): 324-327. [Wang Weiming, Chen Gengjiao, Chen Yunfa, et al. Tertiary palynostratigraphy of the Ningming Basin, Guangxi [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2003, 27(4): 324-327.]
- [45] 陈耿娇, 陈云发, 邝国敦, 等. 广西南明盆地第三纪鱼类化石生物地层 [J]. *古脊椎动物学报*, 2004, 42(1): 81-85. [Chen Gengjiao, Chen Yunfa, Kuang Guodun, et al. Biostratigraphy of Tertiary fossil fishes from Ningming Basin, Guangxi [J]. *Vertebrata Palasiatica*, 2004, 42(1): 81-85.]
- [46] 邝国敦, 陈耿娇, 陈运发, 等. 广西南明盆地第三纪地层研究的新进展 [J]. *地层学杂志*, 2004, 29(4): 362-367. [Kuang Guodun, Chen Gengjiao, Chen Yunfa, et al. New information on the Tertiary biostratigraphy of the Ningming Basin, Guangxi [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2004, 29(4): 362-367.]
- [47] Chen G J, Fang F, Chang M M. A new cyprinid closely related to cultrins+xenocyprins from the Mid-Tertiary of South China [J]. *Journal of Vertebrate Paleontology*, 2005, 25(3): 492-501.
- [48] Chen G J, Chang M M. A new early cyprinid from Oligocene of south China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(4):

- 481-492.
- [49] 史恭乐. 广西渐新世宁明组植物化石及植物群古气候初步重建 [D]. 南京:中国科学院研究生院, 2010. [Shi Gongle. Fossil plants from the Oligocene Ningming Formation of Guangxi, and a preliminary palaeoclimatic reconstruction of the flora [D]. Nanjing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2010.]
- [50] Shi G L, Zhou Z Y, Xie Z M. A new *Cephalotaxus* and associated epiphyllous fungi from the Oligocene of Guangxi, South China [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2010, 161 (3/4): 179-195.
- [51] Grein M, Oehm C, Konrad W, et al. Atmospheric CO₂ from the Late Oligocene to Early Miocene based on photosynthesis data and fossil leaf characteristics [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 374: 41-51.
- [52] Roth-Nebelsick A, Oehm C, Grein M, et al. Stomatal density and index data of *Platanus neptuni* leaf fossils and their evaluation as a CO₂ proxy for the Oligocene [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2014, 206: 1-9.
- [53] 肖良, 漆亚玲, 马文忠, 等. 吐哈盆地北缘中侏罗世植物化石稳定碳同位素的古环境意义 [J]. 沉积学报, 2017, 35 (3): 489-498. [Xiao Liang, Qi Yaling, Ma Wenzhong, et al. Stable carbon isotope of Middle Jurassic plant fossils in the north edge of Turpan-Hami Basin, Xinjiang and their palaeoenvironmental implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(3): 489-498.]
- [54] 解三平. 滇西新近纪翅果数值分类和被子植物叶片的古环境重建 [D]. 兰州: 兰州大学, 2007. [Xie Sanping. Numerical taxonomy of winged fruits and palaeoenvironmental reconstruction based on angiosperm leaves from the Neogene of West Yunnan [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2007.]
- [55] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 1971—2000中国地面气候标准值 [M]. 北京: 中国气象局出版社, 2004: 16-127. [Information Department of Beijing Meteorological Center. Land climate data of China (1971-2000), Part 1 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 16-127.]
- [56] 中国气象局气象信息中心气象资料室. 1971—2000中国地面气候标准值 [M]. 北京: 中国气象局出版社, 2004: 1-282. [Information Department of Beijing Meteorological Center. Land climate data of China (1971-2000), Part 2 [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 267-391.]
- [57] Utescher T, Mosbrugger V. The Palaeoflora Database [EB/OL]. (2015). <http://www.geologie.unibonn.de/palaeoflora.de> [last update: 22. 12. 2015].]

Carbon Isotope and Paleoclimatic Implications of Three Plants from the Oligocene Ningming Formation, Guangxi

WANG QiuJun¹, ZHENG Jun¹, SUN BaiNian², MA FuJun³, WANG Zhen¹, WANG WanMei³

1. Guizhou Research Centre for Palaeontology & College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550000, China

2. School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

3. School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang 550000, China

Abstract: The Oligocene represented an early “icehouse” epoch and is a significant period in which global climates and organisms had pronounced evolutions. Carbon isotope data for plant fossils from the Oligocene strata records the evolution of contemporaneous climates. Three plants from the Oligocene Ningming Formation in Guangxi were selected for carbon isotope analysis, along with their nearest living relatives (NLRs). The carbon isotope composition ($\delta^{13}\text{C}$) values of the fossil plants *Buxus ningmingensis*, *Chuniophoenix slenderifolia* and *Cephalotaxus ningmingensis* were -29.0‰ , -28.3‰ , -28.0‰ , with carbon isotope discrimination ($\Delta^{13}\text{C}$) values 23.48‰ , 22.74‰ , 22.43‰ and $C_{\text{plant}}/C_{\text{air}}$ ratios (intra-leaf CO₂ : atmospheric CO₂) 0.84, 0.81, 0.80. Their water-use efficiency (WUE) were $42.63 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$, $51.56 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$, $55.38 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$. $\delta^{13}\text{C}$ values of their NLRs were -27.9‰ , -29.7‰ , -28.8‰ , with $\Delta^{13}\text{C}$ values 20.47‰ , 22.36‰ , 21.42‰ , $C_{\text{plant}}/C_{\text{air}}$ ratios 0.71, 0.79, 0.75 and WUE $72.22 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$, $51.28 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$, $61.76 \mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$. The carbon isotope analysis shows that $\delta^{13}\text{C}$ values of the three fossil plants were within the range of $\delta^{13}\text{C}$ of extant C₃ plants, and their $\Delta^{13}\text{C}$ and $C_{\text{plant}}/C_{\text{air}}$ also showed higher values than their NLRs. The WUE values of *Buxus ningmingensis* and *Cephalotaxus ningmingensis* were lower than their NLRs; WUE of *Chuniophoenix slenderifolia* is slightly higher than its NLR (*C. hainanensis*), which may have grown in a wetland environment alongside a small stream or lake. The $\delta^{13}\text{C}$, $C_{\text{plant}}/C_{\text{air}}$ and WUE values all suggest that the fossil plants may have lived in a warmer and wetter climate. This is supported by paleoclimatic reconstruction based on the three fossil taxa and other plant fossils from the same horizon.

Key words: carbon isotope; paleoclimate; plant fossil; Oligocene; Ningming Formation