

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.075>



甘肃北山早白垩世似银杏化石的发现： 兼论甘肃侏罗-白垩纪古大气 CO₂ 变化

任文秀^{1,2,3}, 韩磊¹, 吴光涛¹, 唐德亮¹, 孙柏年^{1,3*}, 吴靖宇^{1*}

1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院, 甘肃兰州 730000

2. 甘肃省地质调查院, 甘肃兰州 730000

3. 现代古生物学和地层学国家重点实验室(中国科学院南京地质古生物研究所), 江苏南京 210008

摘要: 银杏类化石的微细构造是定量估算古大气二氧化碳浓度的良好材料。首次报道了甘肃北山中口子盆地早白垩世赤金堡组似银杏属化石, 通过宏观和微观特征对比将其鉴定为 *Ginkgoites sibirica*。利用气孔比率法定量重建 Hauterivian-Barremian 期的古大气 CO₂ 浓度为 766~1 277 ppmv。结合前人数据, 利用光合气体交换模型定量重建了甘肃早侏罗世-早白垩世古大气 CO₂ 浓度及变化趋势, 侏罗纪普林斯巴期(Pliensbachian)、阿林期(Aalenian)、巴柔期早期(Early Bajocian)、巴柔期晚期(Late Bajocian)的古大气 CO₂ 浓度分别为 1 136 ppmv、927 ppmv、643 ppmv 和 785 ppmv; 早白垩世 Hauterivian-Barremian 期的 CO₂ 浓度为 548 ppmv。结果显示早、中侏罗世二氧化碳浓度较高, 向白垩纪呈下降趋势, 早白垩世早中期达到低点后呈现缓慢波动上升; 早白垩世晚期达到顶点, 然后缓慢下降。研究表明光合气体交换模型可作为恢复古气候变化的有效手段。

关键词: 似银杏属; 古大气 CO₂; 光合气体交换模型; 定量重建; 中生代; 古气候。

中图分类号: P52

文章编号: 1000-2383(2024)01-209-15

收稿日期: 2022-01-18

Discovery of Early Cretaceous *Ginkgoites* in Beishan, Gansu Province: Also on Changes of Paleoatmospheric CO₂ in Jurassic to Cretaceous in Gansu Province

Ren Wenxiu^{1,2,3}, Han Lei¹, Wu Guangtao¹, Tang Deliang¹, Sun Bainian^{1,3*}, Wu Jingyu^{1*}

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

2. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, China

3. State Key Laboratory of Paleobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology and Center for Excellence in Life and Palaeoenvironment, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract: Epidermal features of fossil ginkgophyta are one of the good materials for estimating the paleoatmospheric CO₂ concentration. In this study, a fossil *Ginkgoites* species, *Ginkgoites sibirica* is firstly described based on leaf morphology and epidermal features from the Lower Cretaceous Chijinbao Formation in the Zhongkouzi Basin, Beishan area, Northwest China.

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察项目(No. 2019QZKK0704); 甘肃省自然科学基金项目(No. 20JR5RA039); 国家自然科学基金项目(Nos. 42362003, 41972010, 32170222, 31870200); 现代古生物学和地层学国家重点实验室(中国科学院南京地质古生物研究所)项目(Nos. 213115, 183124).

作者简介: 任文秀(1981-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 研究方向为古生物与环境变化. ORCID: 0000-0001-6935-3806. E-mail: renwx16@lzu.edu.cn

* 通讯作者: 孙柏年, E-mail: bnsun@lzu.edu.cn; 吴靖宇, E-mail: jywu@lzu.edu.cn

引用格式: 任文秀, 韩磊, 吴光涛, 唐德亮, 孙柏年, 吴靖宇, 2024. 甘肃北山早白垩世似银杏化石的发现: 兼论甘肃侏罗-白垩纪古大气 CO₂ 变化. 地球科学, 49(1): 209-223.

Citation: Ren Wenxiu, Han Lei, Wu Guangtao, Tang Deliang, Sun Bainian, Wu Jingyu, 2024. Discovery of Early Cretaceous *Ginkgoites* in Beishan, Gansu Province: Also on Changes of Paleoatmospheric CO₂ in Jurassic to Cretaceous in Gansu Province. *Earth Science*, 49(1): 209-223.

The paleo-CO₂ was 766–1 277 ppmv during the Hauterivian to Barremian based on the stomatal ratio method, which is consistent with the results of other studies. The CO₂ variation trend during the Early Jurassic to the Early Cretaceous is reconstructed based on the leaf gas-exchange model in combination with previous data. The paleo-CO₂ was 643–1 136 ppmv during the Jurassic and 548 ppmv during the Hauterivian to Barremian. The results show that the CO₂ concentration was high in the Early and Middle Jurassic, with a decreasing trend toward the Cretaceous, and then showed a significant increase during Early and Middle Cretaceous. The paleo-CO₂ reached its peak during the late Early Cretaceous, and then decreased significantly afterwards. Studies have shown that the leaf gas-exchange model can be an effective proxy for reconstructing paleoclimate.

Key words: *Ginkgoites*; paleo-CO₂; gas exchange model; quantitative reconstruction; Mesozoic; paleoclimate.

0 引言

自 20 世纪以来,温室效应所带来的全球变暖已成为当前全人类最关注的全球性环境问题之一,CO₂作为加剧全球变暖的主要温室气体,影响着全球气候的变化.因此,了解地质历史时期中CO₂浓度的变化对于预测未来气候变化至关重要(Wu *et al.*, 2016).植物是指示气候和环境变化的良好指标,通过对植物化石的研究恢复古气候、古环境和古CO₂浓度已经成为全球变化研究的重要内容之一(全成和张林,2005).银杏类植物作为“活化石”,在地质历史时期广泛分布,因其形态学上的“迟滞性”在恢复古CO₂浓度研究中受到古植物学家的青睐.

近 20 多年来,利用银杏类化石的气孔比率法重建中生代古大气CO₂浓度取得了许多的成果(Retallack, 2001; Sun *et al.*, 2007; 任文秀等, 2008; 林志成等, 2012; Wang *et al.*, 2014; Du *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2016; 李军等, 2019; 栗惠文等, 2022).由于之前在甘肃白垩系未有银杏化石的发现,故恢复古大气CO₂的研究多限于三叠–侏罗纪,利用光合气体交换模型(Franks *et al.*, 2014)恢复中生代古大气CO₂浓度变化更是少见.本次采用光合气体交换模型利用甘肃阿干镇下侏罗统(J₁dx)、窑街中侏罗统(J₂y²、J₂y⁴、J₂y⁵)(Sun *et al.*, 2008)和中口子盆地早白垩世(K₁ch)(图1)的似银杏属化石重建了中侏罗世–早白垩世古大气CO₂浓度变化,为恢复甘肃中生代古气候环境变化提供了重要依据.

1 区域地质背景及化石层位

化石银杏产出层位为甘肃阿干镇煤田下侏罗统大西沟组、窑街煤田中侏罗统窑街组和中口子盆地早白垩世赤金堡组(图1).

阿干镇煤田位于甘肃省兰州市东南部,沉积了一套侏罗纪含煤地层.下侏罗统大西沟组

(J₁dx)主要岩性为灰绿色角砾岩、砾岩、砂岩、粉砂岩和局部夹煤线.本文化石采自阿干镇下侏罗统大西沟组砂砾岩段,时代属于早侏罗世晚期,相当于Pliensbachian(Sun *et al.*, 2008).

窑街盆地位于甘肃省兰州市西部,该盆地中侏罗统的窑街组为含煤地层,主要是一套河流–湖沼–河流相沉积,可分为5个岩段,自下而上依次为砂砾岩段、含煤岩段、铝质泥岩段、油页岩段、砂泥岩段.本文3块化石分别采自窑街组含煤岩段(J₂y²)、油页岩段(J₂y⁴)和砂泥岩段(J₂y⁵),时代分别相当于Aalenian、Early Bajocian期和Late Bajocian期(Sun *et al.*, 2008).

中口子盆地位于甘肃西北酒泉市北部,盆地分布大面积的早白垩世赤金堡组沉积.赤金堡组下部岩层以灰白、黄褐色砾岩、含砾砂岩、中粗粒砂岩夹棕红色粉砂岩、细砂岩等为主,往上渐变为土黄色长石砂岩、泥质粉砂岩、泥质页岩夹砂砾岩;中部岩层以富含泥质的细碎屑岩为主,主要由灰绿色细砂岩、粉砂岩、泥质页岩、泥岩和油页岩等所组成,并夹有多层石膏薄层,岩相变化不大,含有丰富的叶肢介、介形虫、瓣鳃类和植物化石碎片;上部岩层由砖红色为主的砾岩、含砾粘土质粉砂岩、泥岩、中粗粒砂岩等组成(地质部甘肃省地质局第二区域地质测量队, 1971. 1:2万红柳大泉幅区域地质测量报告(上册)).本文化石采自赤金堡组(K₁ch)中部岩层的泥岩段,地质时代为早白垩世中期Hauterivian–Barremian(张明震, 2014).

2 方法

2.1 化石角质层处理方法

用解剖刀将化石角质层从岩石上取下,用蒸馏水浸润后,先后用10%的HCl和50%的HF溶液浸泡各24 h,稀释中性后加入舒氏液浸泡到颜色变为浅黄色时稀释至中性,加入3滴NH₄OH约1 min,在

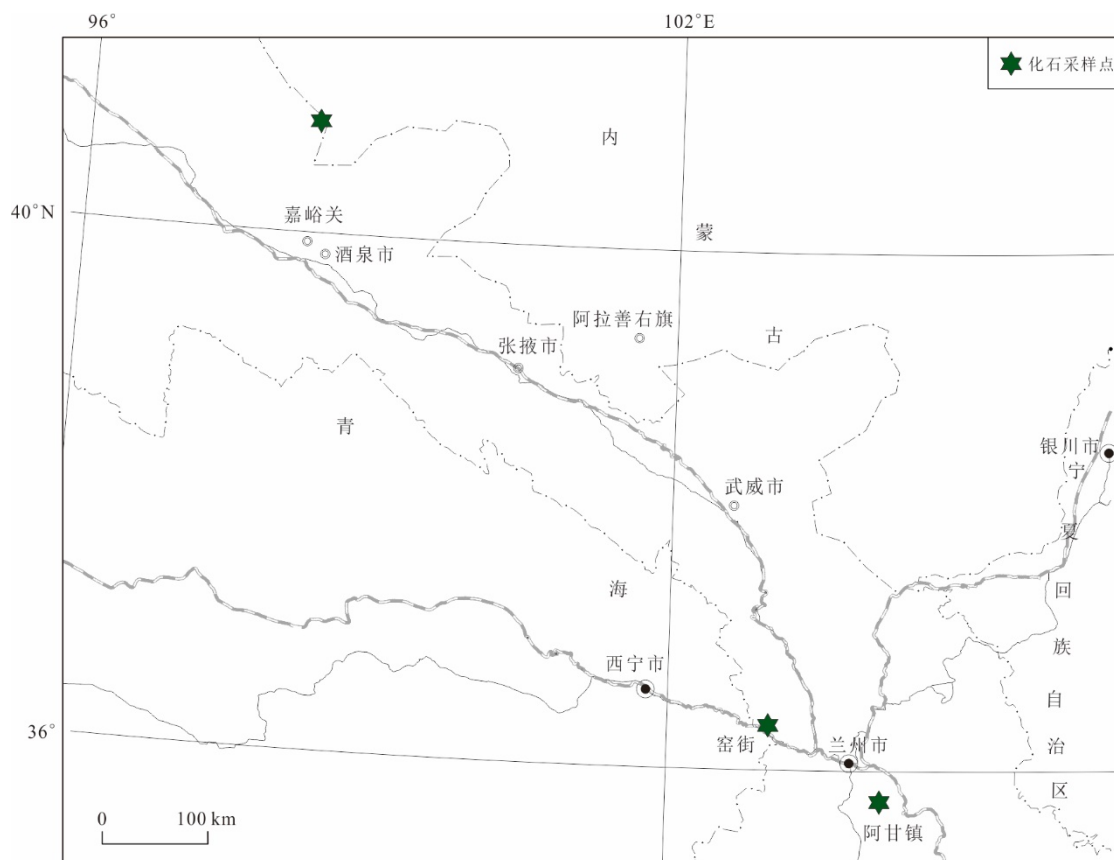


图1 化石采样位置

Fig. 1 Fossil sampling location

体视镜分离上、下表皮,一部分染色后制片在 Leica DM4000B 多功能高级生物显微镜下进行观察、拍照;另一部分角质层经酒精脱水后用导电胶粘在铜座上喷金,在 JSM-5600LV 扫描电子显微镜 (SEM) 下观察、拍照。

2.2 碳同位素分析

利用解剖刀从岩石上将角质层剥离后置入蒸馏水中浸泡约 1 h,接着将样品转移入 10% 的 HCl 中,浸泡约 24 h,用蒸馏水反复洗至中性后,放置在热恒温鼓风干燥箱中,在 70 °C 下烘干加热 5 h.取 10 mg 样品用锡纸包好,放入真空的高温反应炉内,在 1 120 °C 温度条件下,以流速为 220 mL/min 的氦气为载气恒温灼烧;最后用同位素质谱仪测定 CO₂ 的 δ¹³C 值,标样采用 PDB 标准,分析误差 < ± 0.5‰。

2.3 气孔参数计算

气孔密度 (SD, %),是指单位面积 (mm²) 内气孔的数目;表皮细胞密度 (ED),指单位面积 (mm²) 上表皮细胞数目;气孔指数 (SI, %),是指气孔数占气孔和表皮细胞总数的百分比,计算公式为:

$$SI = \frac{SD}{SD + ED} \times 100. \quad (1)$$

气孔比率 (SR),指现存最近对应种与化石种的气孔指数的比值,计算公式为:

$$SR = \frac{SI_{NLEs}}{SI_{fossil}}, \quad (2)$$

其中 SI_{NLEs} 表示现存最近对应种的气孔指数, SI_{fossil} 表示化石的气孔指数。

现生 *Ginkgo biloba* 是化石的最近亲缘种,本文采用的银杏气孔指数平均值为 11.33 (Quan *et al.*, 2009)。

2.4 光合气体交换模型

光合气体交换模型由 Franks (2014) 提出,是在假设地质历史时期的植物响应机制与现代并无二致的情况下,基于现代大气中的二氧化碳碳与植物叶片中的碳之间的转化与交换所建立的函数关系,来恢复古大气二氧化碳浓度。该模型所需要的数据为化石的气孔密度 (D)、气孔孔缝长度 (l)、气孔深度 (p)、有机碳同位素值 (δ¹³C)。该模型的主要推导过程如下。

古大气 CO_2 浓度 (C_a) 的变化影响 CO_2 从大气扩散到叶片内部固定部位 (气孔) 的速率, 而扩散速率反过来又影响 CO_2 在生物体中的生化固定速率 (同化速率 A_n). 该模型的基本公式为:

$$C_a = \frac{A_n}{g_{c(\text{tot})} \cdot \left(1 - \frac{C_i}{C_a}\right)}, \quad (3)$$

其中: A_n 是植物叶片对于 CO_2 的同化速率, $g_{c(\text{tot})}$ 是 CO_2 从大气到叶片光合作用场所的扩散总量, C_i/C_a 是叶片内 CO_2 (C_i) 和大气 CO_2 (C_a) 浓度的比值 (Franks *et al.*, 2014).

$g_{c(\text{tot})}$ 主要由 3 个部分组成: 叶片边界层 CO_2 的传导系数 g_{cb} 、运作气孔的传导率 $g_{c(\text{op})}$ 和叶肉传导率 g_m . 计算公式为:

$$g_{c(\text{tot})} = \left(\frac{1}{g_{cb}} + \frac{1}{\zeta g_{c(\text{max})}} + \frac{1}{g_m} \right)^{-1}, \quad (4)$$

其中: $g_{c(\text{op})}$ 由植物所处的环境条件控制, 介于零 (气孔闭合) 和最大值 $g_{c(\text{max})}$ (气孔开口最大) 之间, 并且可以方便地表示为 ζ 和 $g_{c(\text{max})}$ 的方程, 即 $g_{c(\text{op})} = \zeta g_{c(\text{max})}$ (Franks *et al.*, 2014); 对于在外界条件下自然生长的树木, ζ 值通常为 0.2 左右 (Franks *et al.*, 2009).

计算 $g_{c(\text{max})}$ 时需测量包括化石叶片上气孔的数量以及大小. 气孔大小由气孔的最大孔隙面积 a_{max} 和气孔孔隙深度 l (约等于保卫细胞的宽度) 决定, 其中 $g_{c(\text{max})}$ 由基本扩散方程给出 (Franks *et al.*, 2009):

$$g_{c(\text{max})} = \frac{d}{v} \cdot D \cdot a_{\text{max}} / \left(l + \frac{\pi}{2} \sqrt{a_{\text{max}}/\pi} \right), \quad (5)$$

其中: 常数 d 和 v 分别是 CO_2 在空气中的扩散系数和空气的摩尔体积, D 是植物化石叶片气孔密度, 最大孔隙面积 a_{max} 近似为直径等于气孔孔径长度 p 的圆形面积: $a_{\text{max}} = \beta(\pi p^2/4)$, 其中蕨类和裸子植物的 β 值通常为 0.5 (Franks *et al.*, 2014).

通过测量化石叶的相对碳同位素组成 ($\delta^{13}\text{C}$), 可以估算叶内部 CO_2 浓度与大气 CO_2 浓度的相对降低量 (C_i/C_a) (见公式 (3)). 来自叶片中的 $\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$ 与大气中的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{air}}(\text{‰})$ 之间的差异可测算出植物碳同位素的变化 $\Delta_{\text{leaf}}(\text{‰})$ 以及叶片生长期间的的光合速率加权的平均 C_i/C_a , 公式如下:

$$C_i/C_a = \frac{\Delta_{\text{leaf}} - a}{b - a}, \quad (6)$$

其中: a 是 CO_2 通过气孔扩散引起的碳同位素分馏 (4.4‰), b 是与 RuBP 羧化作用相关的分馏值 (在这里取为 30‰), $\Delta_{\text{leaf}}(\text{‰})$ 由下式给出 (Franks *et al.*, 2014):

$$\Delta_{\text{leaf}} = \frac{\delta^{13}\text{C}_{\text{air}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}}{1 + \delta^{13}\text{C}_{\text{leaf}}/1000}. \quad (7)$$

在当前的环境条件下, A_n 和 C_a 的参考值分别为 A_0 和 C_{a0} , 则对于任何一个给定的 C_a , A_n 可以通过以下公式求得 (Franks *et al.*, 2014):

$$A_n \approx A_0 \left[\frac{(C_a - \Gamma^*)(C_{a0} + 2\Gamma^*)}{(C_a + 2\Gamma^*)(C_{a0} - \Gamma^*)} \right], \quad (8)$$

其中: Γ^* 是不存在暗呼吸情况下的 CO_2 补偿点 (平均值为 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$).

最后通过迭代同时求解公式 (3) 和 (8), 计算获得 A_n 和 C_a 的值.

3 植物化石系统描述

银杏纲 Ginkgopsida

似银杏属 *Ginkgoites* Sewatd, 1919

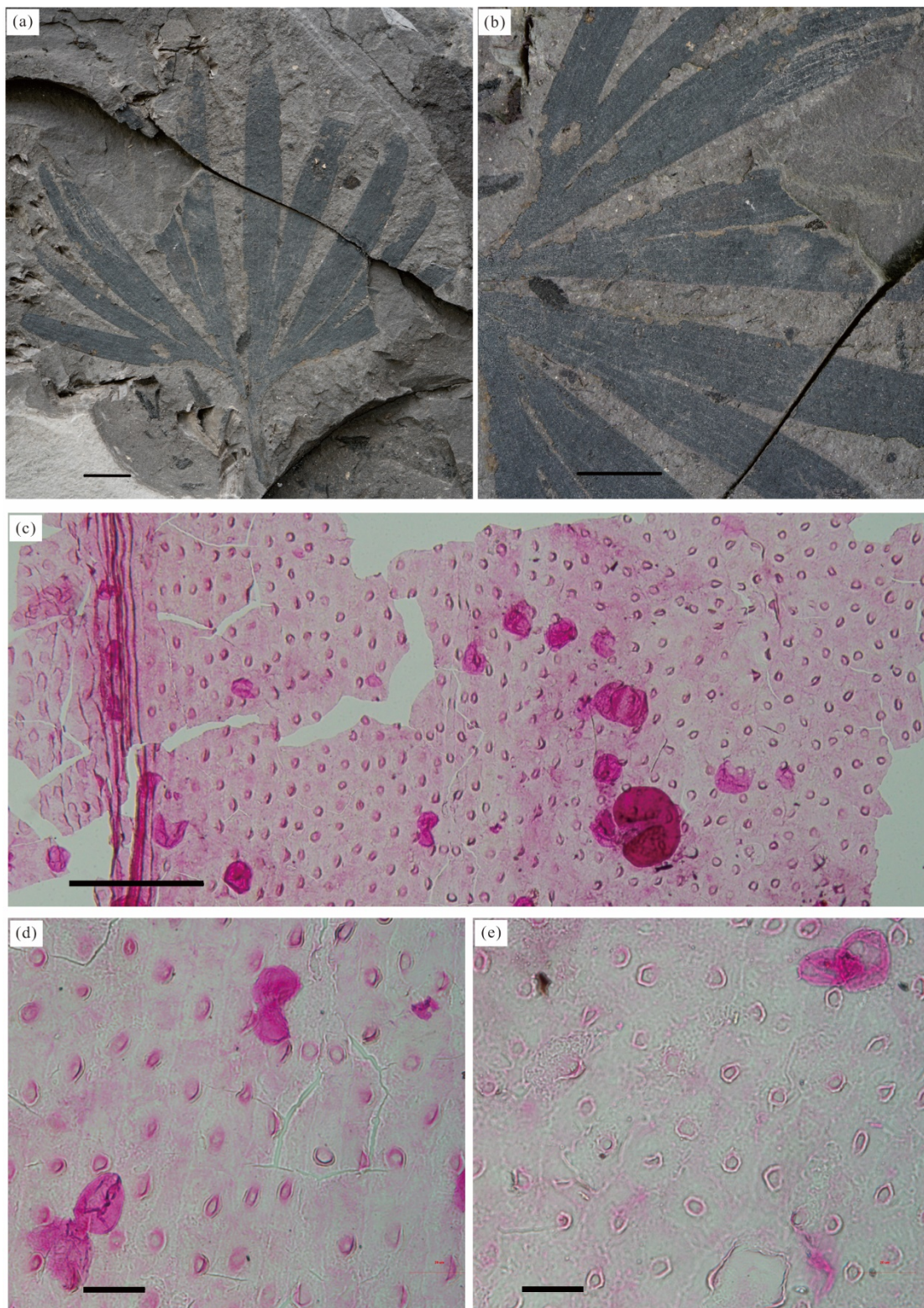
西伯利亚似银杏 *Ginkgoites sibirica* (Heer)

Seward

特征描述: 叶片扇形至半圆形, 半径为 2.6~3.9 cm, 基角 $120^\circ \sim 128^\circ$, 具叶柄, 叶柄细长, 宽为 1.7 mm, 长 > 9.9 mm (图 2a); 叶片先深裂为近对称的两半, 深裂至基部, 每个裂片又再进一步分裂 2~3 次, 第一次深裂近基部, 第二次和第三次分裂深度均为叶片半径的 2/3, 形成基本对称的 10 个裂片, 最外侧两裂片开展角度约为 140° (图 2a); 裂片披针形、剑形, 裂片基部常强烈收缩成宽约 1.7 mm 的柄状, 向上逐渐变宽, 至距基部约 3/5 处最宽, 向上渐收缩, 大部分宽约 3.7 mm, 最窄的宽 2.1 mm, 顶端钝圆或钝尖 (图 2a). 叶脉近平行排列, 每一裂片上具 5~6 条叶脉 (图 2b).

角质层中等厚度, 上表皮脉络略显, 细胞排列较为规则, 纵向垂周壁略加厚, 横向垂周壁不明显 (图 2c). 脉内细胞长条形, 长为 $48.5 \sim 58.5 \mu\text{m}$, 宽为 $9.2 \sim 18.3 \mu\text{m}$, 垂周壁具波状弯曲; 脉间细胞方形, 不规则多边形, 以四边形为主, 直径为 $13.6 \sim 38.8 \mu\text{m}$, 垂周壁大多具波状弯曲, 部分垂周壁不显 (图 2e). 上表皮外表面每个细胞均具乳突, 乳突直径为 $10 \sim 14.8 \mu\text{m}$ (图 3a、图 4a~4c); 内表面每个细胞均具孔洞, 孔洞大部分为近圆形, 个别椭圆形, 孔洞直径为 $5.9 \sim 6.9 \mu\text{m}$ (图 4d~4f). 上表皮未见气孔器.

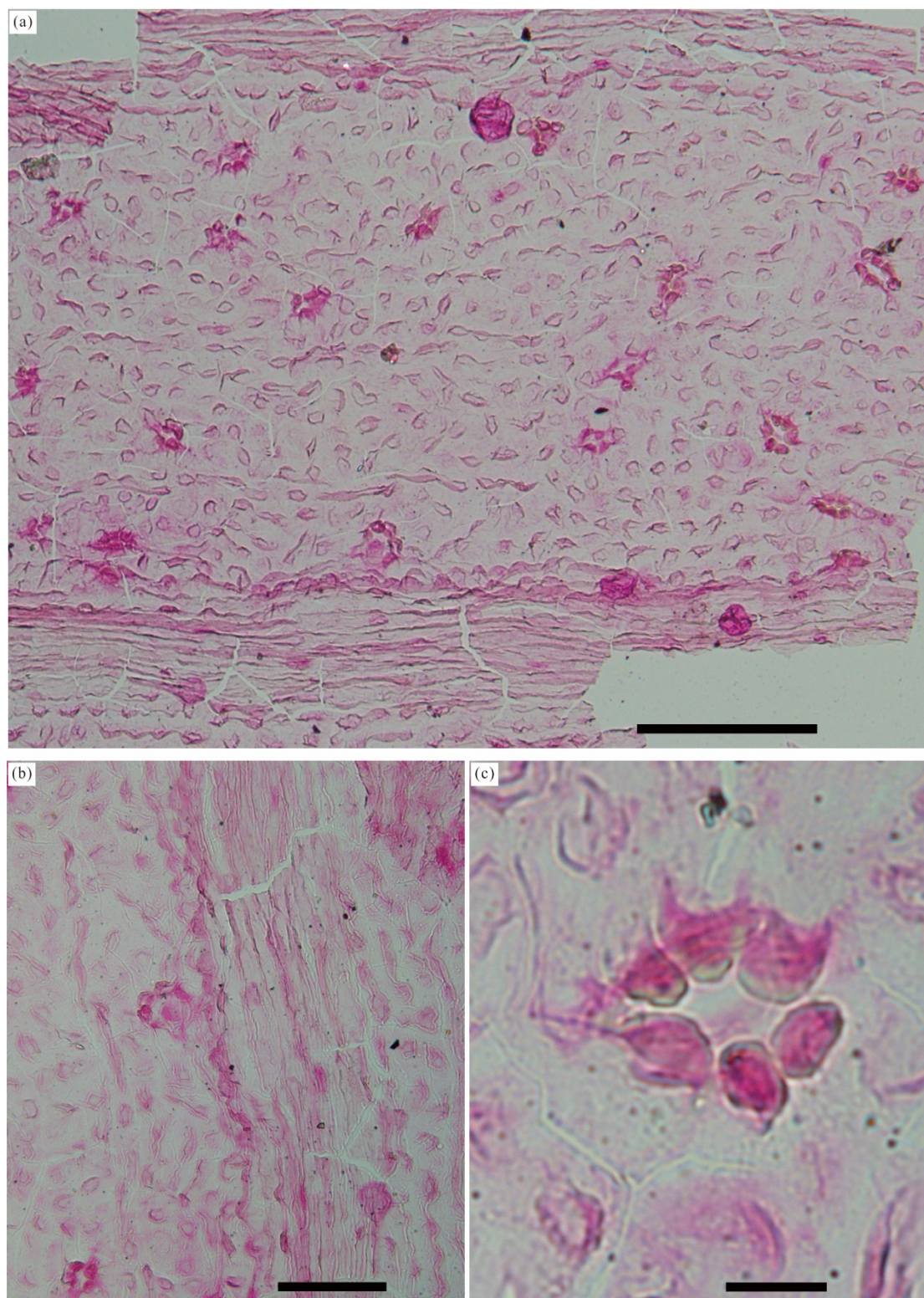
下表皮较上表皮厚, 下表皮脉络明显, 宽 $45.5 \sim 68.4 \mu\text{m}$, 由横向垂周壁不清、纵向垂周壁不规则条带状加厚的长条状细胞组成 (图 3a). 脉间区域内细

图2 *Ginkgoites sibirica* 宏观及上表皮形态Fig. 2 Macroscopic and upper epidermal morphology of *Ginkgoites sibirica*

a、b. *Ginkgoites sibirica* 化石叶的形态, 比例尺=5 mm, 标本编号: 19-K-2-1088; c、d、e. *Ginkgoites sibirica* 光学显微镜上表皮特征, 图c为上表皮整体特征, 比例尺=100 μm , 图d、e为上表皮细胞和乳突特征, 比例尺=20 μm

胞不清晰, 呈不规则形, 平周壁有强烈的条带状、乳头状、团块状等角质加厚(图3c). 气孔器下生型, 气

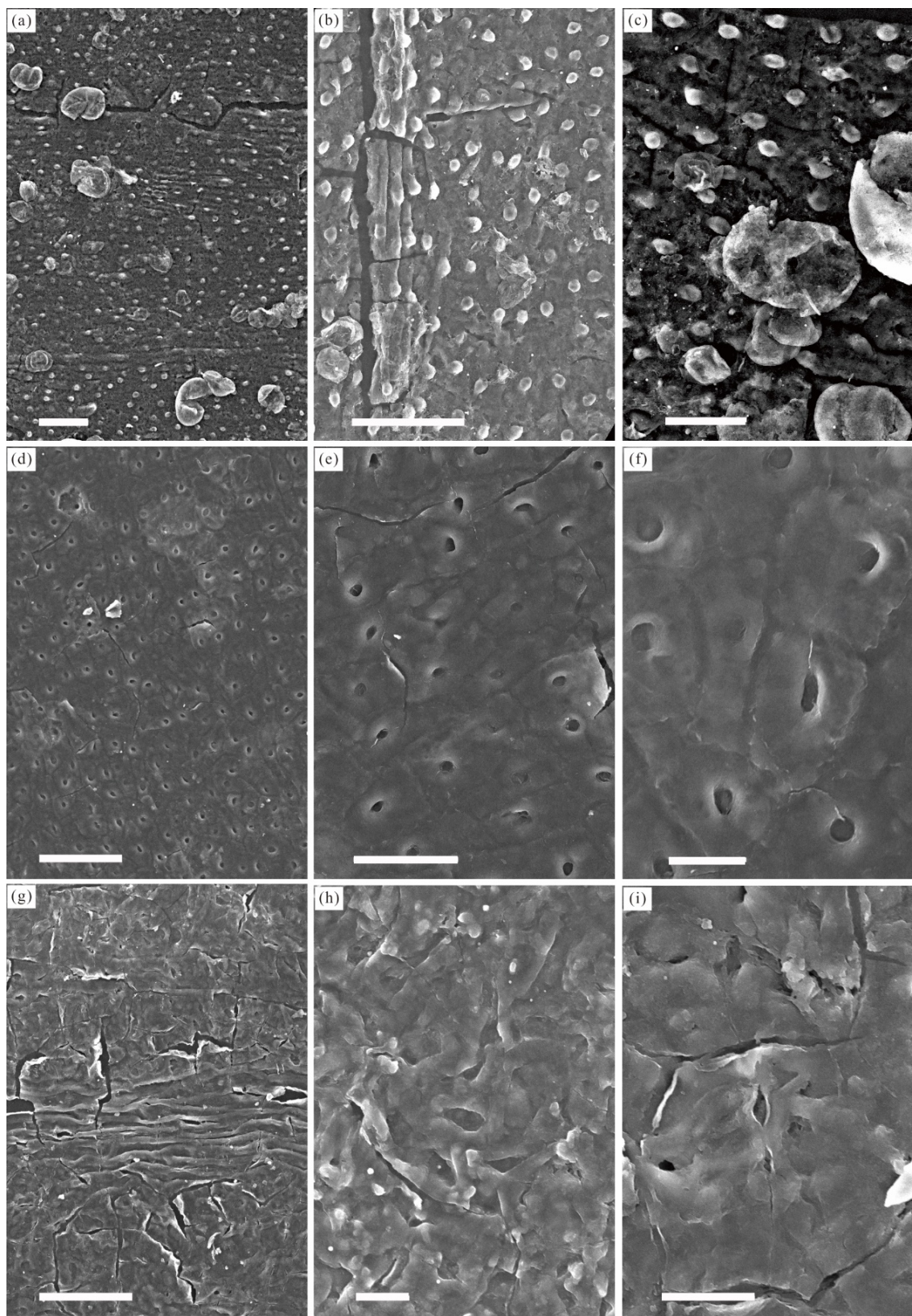
孔器散布于脉间区内. 气孔带宽 300~302 μm , 气孔器圆形、椭圆形, 下陷, 气孔器大小为(31~35) $\mu\text{m} \times$

图3 *Ginkgoites sibirica* 下表皮特征Fig.3 Characteristics of lower epidermis of *Ginkgoites sibirica*

a. *Ginkgoites sibirica* 光学显微镜下表皮特征, 比例尺=100 μm , 标本编号: 19-K-2-1088; b. *Ginkgoites sibirica* 光学显微镜下表皮非气孔带特征, 比例尺=50 μm ; c. *Ginkgoites sibirica* 光学显微镜下表皮气孔特征, 比例尺=10 μm

(37~43) μm , 气孔长度为 10.7~12.3 μm , 孔缝方向杂乱, 保卫细胞和孔口常被副卫细胞覆盖而不显,

偶见括号形孔口和肾形保卫细胞, 保卫细胞宽度为 3.6~6.7 μm (图 4h、4i). 副卫细胞 4~6 个, 6 个居多,

图 4 *Ginkgoites sibirica* 扫描电镜特征Fig. 4 Scanning electron microscopic features of *Ginkgoites sibirica*

a、b、c. *Ginkgoites sibirica* 扫描电镜上表皮外表面特征, 图 a、图 b 的比例尺=100 μm , 图 c 比例尺=50 μm , 标本编号: 19-K-2-1088; d、e、f. *Ginkgoites sibirica* 扫描电镜上表皮内表面特征, 图 d 比例尺=100 μm , 图 e 比例尺=50 μm , 图 f 比例尺=20 μm ; g、h、i. *Ginkgoites sibirica* 扫描电镜下表皮特征, 图 g 比例尺=100 μm , 图 h、图 i 的比例尺=20 μm

表 1 似银杏属化石特征对比
Table 1 Comparisons of characteristics of *Ginkgoites* fossils

种名	叶形	裂片数	是否具柄	裂片内叶脉数	裂片顶端	叶脉间树脂体	上表皮气孔器	下表皮		副卫细胞数量	乳突	毛基或毛状体	气孔密度 (mm ²)	时代	来源
								脉内细胞形态	脉间细胞形态						
<i>G.shiguanensis</i>	半圆形至扇形	4~10	是	每 5 mm 有 10~12 条	圆钝	-	少数有	-	-	4~6	有	无	-	中侏罗世	Sun <i>et al.</i> , 2008
<i>G.manchurica</i>	宽楔形、半圆形	10~20 或更多	是	4~5	钝圆或钝尖	-	偶在叶缘有或无	伸长的细胞	不显	5~8	有	-	20~25	早白垩世	斯行健和李星学, 1963; 周志炎等, 2020
<i>G.dayanensis</i>	半圆形或扇形	8 个以上	是	4~6, 最多 7	近截形	-	-	-	-	-	有	有	-	早白垩世	张武等, 1980; 邓胜徽等, 1997
<i>G.giganteus</i>	扇形, 叶片大	5 个以上	是	每厘米 10 条	-	-	稀少	细胞狭长, 两端尖	多角形、长方形	5~6	少数有	-	14~30	中侏罗世、早侏罗世	杨恕等, 1988
<i>G.lingxienensis</i>	半圆形	12	是	4~5	钝圆形	具纵纹	无	伸长的	不规则四边形或多角形	4~6	有	偶见毛状体	-	早白垩世	郑少林和张武, 1982
<i>G.myrioneurus</i>	扇形	通常 10~12, 最多可达 18	细长	每厘米达 20~30 条或更多	-	-	偶见	-	-	6~8	有	-	-	早白垩世	Yang, 2004
<i>G.taeniatus</i>	扇形至宽扇形	4~8	有	4~8, 宽达 10	钝尖至钝圆	-	-	-	-	-	-	-	-	早、中侏罗世, 晚三叠世	斯行健, 1959
<i>G.tasiakouensis</i>	扇形或纵伸的半圆形至半椭圆形	8	细长	3~5	钝圆形并具一微小的缺刻	-	多生于上表皮	矩形或长矩形	多边形	5~6	有的有	-	-	早、中侏罗世	Yang <i>et al.</i> , 2014
<i>G.chilinensis</i>	扇形	6 或更多	是	6~10	-	-	偶见	伸长的	圆形或椭圆形	5~6	有	-	-	早白垩世	斯行健和李星学, 1963
<i>G.sibirica</i>	半圆形或扇形	8~10 或 12~14, 少数 6~8	具长柄	3~8	钝圆或渐尖	-	无	伸长的多角形	方形或不规则形	5~6	有	无	70~80	早白垩世	Heer, 1876; Seward, 1919; 周志炎等, 2020
<i>G.sibirica</i>	扇形至半圆形	10	是	5~6	钝圆或钝尖	-	无	长条状	不规则形	4~6	有	无	125~155	早白垩世	本文

表 2 本文标本与西伯利亚似银杏特征对比
Table 2 Comparison of characteristics between the specimens and *Ginkgoites sibirica*

种名	<i>Ginkgoites sibirica</i>	本文
叶分裂次数	3~4	3~4
裂片数	8~10	10
裂片叶脉数	4~9	5~6
裂片顶端	钝圆或渐尖	钝圆或钝尖
上表皮气孔器	无	无
气孔器形状	圆形、椭圆形	圆形、椭圆形
气孔器大小	35 μm×42 μm	(31~35) μm×(37~43) μm
保卫细胞形状	半月形	括号形、肾形
副卫细胞数量	4~5	4~6
乳突	所有细胞均有	所有细胞均有
资料来源	Heer, 1876; Seward, 1919; 周志炎等, 2020	本文

多数为四边形、少数为三角形,各具一个乳头状突起,副卫细胞大小为 5.7~5.8 μm(图 3c、图 4h)。

比较与讨论:中生代银杏类的研究中,关于银杏属(*Ginkgo* L.)与似银杏属(*Ginkgoites* Seward)的定义和使用一直备有争议。周志炎等(2020)在总结前人 150 多年来的文献资料基础上,经过详细的系统性的整理和研究,依据化石形状特征、保存状况和研究程度的不同将银杏属与似银杏属进行了明确的区分:在无繁殖器官证据的情况下,原定为银杏属的新生代以前的叶化石均归入似银杏属(*Ginkgoites*),新生代的银杏状叶化石仍保留原分类。本文遵从该观点。

在外形上与本文化石相似的共报道有 10 种(表 1),分别为吉林似银杏(*G. chinensis*)、东北似银杏(*G. manchurica*)、石拐似银杏(*G. shiguaiensis*)、大峡口似银杏(*G. tasiakouensis*)、大似银杏(*G. giganteus*)、岭西似银杏(*G. lingxiensis*)、密脉似银杏(*G. myrioneurus*)、带状似银杏(*G. taeniatus*)、大雁似银杏(*G. dayanensis*)和西伯利亚似银杏(*G. sibirica*)。当前标本上表皮无气孔器,这与 *G. shiguaiensis*、*G. giganteus*、*G. myrioneurus*、*G. tasiakouensis*、*G. chinensis* 相区别(杨恕等, 1988; Yang, 2004; Sun *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2014); 本文裂片数与 *G. manchurica* (10~20 个或更多)不同。*G. lingxiensis* 具 12 枚裂片,每个裂片含脉 4~5 条,叶脉间具纵纹,上表皮具毛状体(郑少林和张武, 1982),这与当前标本相区别。*G. taeniatus* 叶片扇形至扇形,具 4~8 枚裂片,裂片内含 4~8 条叶脉,宽可达到 10 枚(斯行健, 1959),这与本文有区别。*G. dayanensis* 和 *G. sibirica* 与本文标本

最为相似,但大雁似银杏顶端近截形与当前标本不同。*G. sibirica* 无论在宏观还是微观都与本文标本基本一样(表 2),故将该标本定为 *Ginkgo sibirica*。

4 古大气 CO₂ 浓度分析

4.1 气孔比率法恢复结果

本文对 *G. sibirica* 植物化石的表皮气孔参数及古大气 CO₂ 浓度进行统计计算,结果如表 3 所示。利用石炭纪标准获得早白垩世早期欧特里沃-巴列姆期的 CO₂ 浓度为 1 232~1 323 ppmv,最新标准获得的浓度为 739~794 ppmv(图 5)。

本文恢复结果与 Hansen and Wallmann(2003)恢复的白垩纪以来的古大气 CO₂ 浓度曲线以及 Wallmann(2001)报道的白垩纪到新生代全球碳循环模型在 Valanginian 至 Barremian 阶段结果一致,并与 Berner(1994)和 Bergman *et al.*(2004)建立的地球化学模型 GEOCARB II 及 COPSE 获得的结果相近(图 5)。本文结果也与其他学者(Chen *et al.* 2001; Haworth *et al.*, 2005; Aucour *et al.*, 2008; 任文秀等, 2008; Passalia, 2009; Du *et al.*, 2016)通过其他类群利用该方法恢复的早白垩世古大气 CO₂ 浓度值相近(表 4)。说明 *Ginkgoites sibirica* 可以作为恢复古大气 CO₂ 的植物叶化石指标。

4.2 光合气体交换模型重建结果

本文利用甘肃省中部阿干镇早侏罗统 Pliensbachian 期的 *Ginkgoites aganzhenense* 和窑街盆地窑街组中侏罗统 Aalenian 期的 *Ginkgoites huttonii*、Early Bajocian 期的 *Ginkgoites obrutschewi*、Late Bajocian 期的 *Ginkgoites chinense*,甘肃西北部中口子盆地

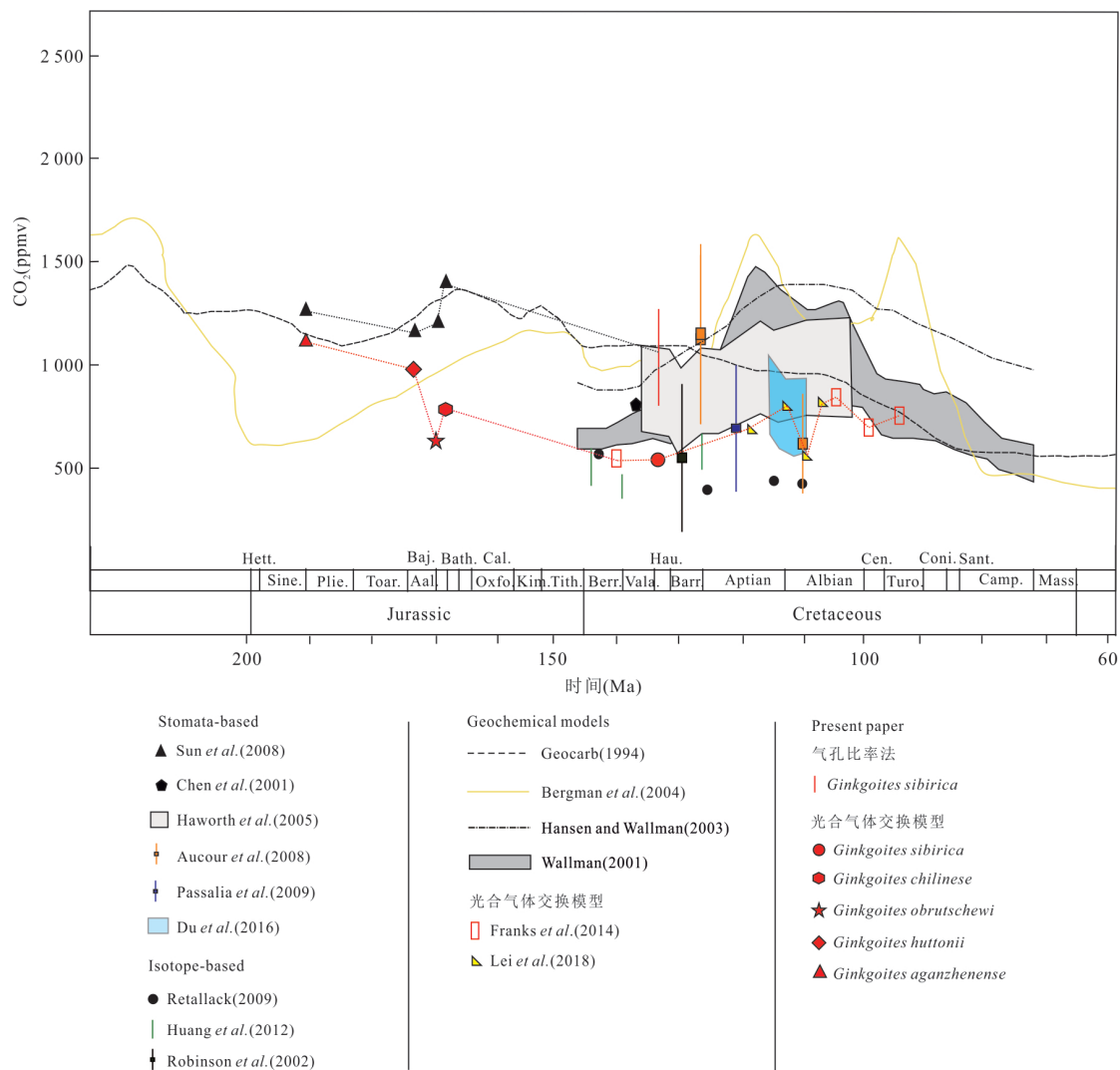


图5 侏罗纪-白垩纪古大气CO₂浓度恢复
Fig.5 Varying CO₂ concentration from Jurassic to Cretaceous

表3 *Ginkgoites sibirica* 植物气孔参数
Table 3 Plant stomatal data of *Ginkgoites sibirica*

种属	标本编号	SD (mm ²)	ED (mm ²)	SI (%)	SR	石炭纪标准		最新标准	
						RCO ₂	PCO ₂ (ppmv)	RCO ₂	PCO ₂ (ppmv)
G. sibirica	19-K-2-1088	129	2 367	5.17	2.19	4.38	1 315	2.63	789
		134	2 405	5.28	2.15	4.29	1 288	2.58	773
		142	2 431	5.52	2.05	4.11	1 232	2.46	739
		155	2 705	5.42	2.09	4.18	1 254	2.51	753
		127	2 301	5.23	2.17	4.33	1 300	2.60	780
		145	2 598	5.29	2.14	4.29	1 286	2.57	772
		133	2 312	5.44	2.08	4.17	1 250	2.50	750
	18-K-2-498	125	2 296	5.16	2.19	4.39	1 317	2.63	790
		151	2 594	5.50	2.06	4.12	1 236	2.47	741
		128	2 363	5.14	2.20	4.41	1 323	2.65	794
		148	2 571	5.44	2.08	4.16	1 249	2.50	749
		均值	138±11	2 449±143	5.33±0.14	2.13±0.06	4.26±0.11	1 277±34.15	2.55±0.07

表 4 前人与本文恢复 CO₂ 浓度对比

Table 4 Comparison of CO₂ concentration restored by predecessors and this paper

种属	时代	恢复 CO ₂ 的值(ppmv)	出处
<i>Ginkgoites</i>	Hauterivian-Barremian	766~1 277	本文
<i>Gingko</i>	Valanginian-Hauterivian	740	Chen <i>et al.</i> , 2001
<i>Pseudofrenelopsis</i>	Barremian-Aptian	560~1 200	Haworth <i>et al.</i> , 2005
<i>Pseudofrenelopsis</i>	Cenomanian	861~1 047	任文秀等, 2008
<i>Frenelopsis</i>	Late Barremian	737~1 567	Aucour <i>et al.</i> , 2008
<i>Brachyphyllum</i>	Barremian-Aptian	700~1 400	Passalia, 2009
<i>Brachyphyllum</i>	Late Aptian-Early Albian	531~1 060	Du <i>et al.</i> , 2016
<i>Pseudofrenelopsis</i>		558~959	

表 5 侏罗世-早白垩世似银杏属植物气孔解剖数据及古大气 CO₂ 浓度重建

Table 5 Stomatal anatomical data of *Ginkgoites* plants and reconstruction of paleoatmospheric CO₂ concentration during the Jurassic to Early Cretaceous

层位	统计量	$D(\text{mm}^2)$	$l(\mu\text{m})$	$p(\mu\text{m})$	$\delta^{13}\text{Cp}$	$\delta^{13}\text{Ca}$	C_i/C_a	A_n	$g_{\text{e}(\text{tot})}$	CO ₂ (ppmv)
K_1ch	15	139	12.3	5.15	-22.29	-4.50	0.53	10.71	0.04	518
	14	138	10.7	5.06	-22.08	-4.50	0.53	10.90	0.04	579
J_2y^5	9	73	18.35	4.34	-26.70	-5.60	0.68	11.43	0.04	785
J_2y^4	10	82	18.09	4.22	-25.70	-5.60	0.63	11.15	0.05	643
J_2y^2	20	67	17.77	4.12	-27.40	-5.70	0.70	11.76	0.04	927
J_1dx	4	37	11.75	5.30	-20.60	-6.10	0.41	12.01	0.02	1 136

注: J_2y^2 、 J_2y^4 、 J_2y^5 中的 $\delta^{13}\text{Cp}$ 的数据来源于 Sun *et al.*, 2008, 其他数据为本文的分析和统计数据; $\delta^{13}\text{Ca}$ 取值来自 Beerling *et al.*, 2002.

表 6 基于甘肃地区似银杏化石恢复的中侏罗世-早白垩世古大气 CO₂ 浓度对比

Table 6 Comparison of paleoatmospheric CO₂ concentration from Middle Jurassic to Early Cretaceous based on the restoration of *Ginkgoites* fossils in Gansu

地层	属种	时代	恢复的 CO ₂ 浓度(ppmv)		出处
			气孔比率法(石炭标准)	光合气体交换模型	
K_1ch	<i>Ginkgoites sibirica</i>	Hauterivian-Barremian	1 277	548	本文
J_2y^5	<i>Ginkgo chilinense</i>	Late Bajocian	1 370*	785	
J_2y^4	<i>Ginkgo obrutschewi</i>	Early Bajocian	1 231*	643	
J_2y^2	<i>Ginkgo huttonii</i>	Aalenian	1 190*	927	
J_1dx	<i>Ginkgo aganzhenense</i>	Pliensbachian	1 252*	1 136	

注: *结果出自 Sun *et al.* (2008), 其他为本文重新统计、计算得出.

早白垩世 Hauterivian-Barremian 期的 *Ginkgoites sibirica*, 基于 Franks *et al.* (2014) 光合气体交换模型重建了古大气 CO₂ 浓度(表 5, 图 5), 结果显示 J_1dx 、 J_2y^2 、 J_2y^4 、 J_2y^5 恢复的 CO₂ 浓度分别为 1 136 ppmv、927 ppmv、643 ppmv、785 ppmv, K_1ch 恢复的 CO₂ 浓度为 518 ppmv、579 ppmv, 均值为 548 ppmv.

4.3 对比分析

光合气体交换模型(Franks *et al.*, 2014)恢复中生代古大气 CO₂ 浓度的研究相对较少. 本文将恢复

结果与同种利用气孔比率法的恢复结果对比(表 6, 图 5), 结果显示利用 *G. aganzhenense* 恢复早侏罗世 Pliensbachian 期的 CO₂ 浓度比气孔比率法的低 116 ppmv; 利用 *G. huttonii* 恢复中侏罗世 Aalenian 期的 CO₂ 浓度比气孔比率法的低 263 ppmv; 利用 *G. obrutschewi* 恢复中侏罗世 Early Bajocian 期的 CO₂ 浓度比气孔比率法的低 588 ppmv; 利用 *G. chilinense* 恢复的 Late Bajocian 期 CO₂ 浓度比气孔比率法的低 585 ppmv; 利用 *G. sibirica* 恢复早白垩

世 Hauterivian-Barremian 期的 CO_2 浓度比气孔比率法恢复的低 228~729 ppmv. 金培红 (2018) 利用 *Cupressinocladus elegans*、*Pagiophyllum cf. crassifolium* 和 *Brachyphyllum obtusum* 通过光合气体交换模型重建早白垩世 (Hauterivian-Barremian) 大气 CO_2 浓度值范围为 482~571 ppmv, 比利用同种气孔比率法恢复的结果低 405~682 ppmv. Lei *et al.* (2018) 利用 *Brachyphyllum* 通过光合气体交换模型重建结果也低于气孔比率法, 重建 Aptian 晚期 - Albian 早期的古大气 CO_2 浓度为 550~808 ppmv. 以上用光合气体交换模型恢复的结果均与本文的恢复结果接近, 并且恢复出的古大气 CO_2 浓度均较气孔比率法低, 但总体符合 Franks (2014) 的模拟范围 (200~1 000 ppmv).

本文利用光合气体交换模型恢复的早白垩世结果与 Huang *et al.* (2012) 利用古土壤碳酸盐获得的 Barremian 晚期古 CO_2 浓度 (均值 530 ppmv) 相差 18 ppmv; 与 Robinson *et al.* (2002) 恢复的 Barremian 早期大气 CO_2 浓度 (约为 560 ppmv) 相差 12 ppmv, 在其误差范围内; 与 Retallack (2009) 利用古土壤碳同位素恢复的 Barremian 晚期大气 CO_2 浓度和 Wallmann (2001) 利用地球化学模型恢复的 Hauterivian-Barremian 期的大气 CO_2 浓度相近. 说明本文利用光合气体交换模型恢复的结果是可信的. 但大部分利用光合气体交换模型恢复中生代的结果明显低于气孔比率法的恢复结果, 而且本文重建结果显示出从侏罗纪 Pliensbachian 期、Aalenian 期、Early Bajocian 期、Late Bajocian 期到早白垩世 Hauterivian-Barremian 期, CO_2 浓度呈现出先降低再上升再降低的变化趋势, 这与气孔比率法恢复结果的趋势一致 (图 5). Lei *et al.* (2018) 研究认为光合气体交换模型对恢复白垩纪具有较高的准确性, 恢复的 CO_2 浓度可以反映气候变化. 本文通过对 *Ginkgoites aganzhenense*、*Ginkgoites sibirica*、*Ginkgoites chilinense*、*Ginkgoites obrutschewi*、*Ginkgoites huttonii* 的对比说明恢复中生代古大气 CO_2 浓度时, 不同属种气孔比率和光合气体交换模型模拟值之间存在差异, *Ginkgoites aganzhenense*、*Ginkgoites huttonii* 具有和 *Ginkgo longifolius*、*Ginkgoites marginatus* 一样的稳定性, 也进一步说明了利用光合气体交换模型 (Franks *et al.*, 2014) 重建中生代古大气 CO_2 浓度会受种间差异的影响, 但显示的整体趋势影响较小.

结合前人 (Franks *et al.*, 2014; Lei *et al.*, 2018)

利用光合气体交换模型的恢复结果 (图 5), 早、中侏罗世二氧化碳浓度较高 (927~1 136 ppmv), 向早白垩世整体上呈下降的趋势, 中间略有波动; 早白垩世早中期达到低点, 然后在波动中缓慢上升, 在早白垩世晚期达到顶点, 然后缓慢下降. 这与 Wang *et al.* (2014) 总结的二氧化碳浓度在早白垩世较低、早白垩世晚期和晚白垩世早期最高、晚白垩世后逐渐下降的趋势一致, 再次说明了利用光合气体交换模型重建古大气 CO_2 浓度趋势, 可以一定程度避免种间差异的影响. 产生这种现象的原因可能是: 在三叠纪末期, 中大西洋超级火山爆发, 致使古大气 CO_2 浓度迅速升高, 火山大规模爆发引起生物大规模灭绝, 进一步加剧了二氧化碳浓度的升高, 致使在早侏罗世甘肃省古大气 CO_2 浓度保持高位; 随着火山爆发的停止, 早侏罗世进入温暖湿润气候, 大量裸子植物不断繁盛, 沉积了大量的煤层, 通过植物的不断固碳过程, 使得古大气二氧化碳浓度缓慢降低, 到早白垩世中期达到相对低值; 早白垩世中期以后甘肃受阿尔金断裂活动的影响, 发生大规模的大面积的火山喷发, 灾变事件导致地表生物的大量集群死亡 (王军等, 2020; 李衣鑫等, 2023), 使得在早白垩世阿尔比期甘肃古大气二氧化碳浓度达到高点, 后随着被子植物的兴起, 古大气二氧化碳浓度又慢慢回落.

5 结论

(1) 首次报道了甘肃中口子盆地早白垩世赤金堡组中的似银杏化石, 通过宏观和微观特征对比, 将其鉴定为 *Ginkgoites sibirica*. 通过 *G. sibirica* 化石利用气孔比率法定量重建了 Hauterivian-Barremian 期的古大气 CO_2 浓度为 766~1 277 ppmv; 与其他研究结果一致, 证明了 *Ginkgoites sibirica* 可以作为恢复古大气 CO_2 的生物指标.

(2) 利用光合气体交换模型重建了侏罗纪 Pliensbachian 期、Aalenian 期、Early Bajocian 期、Late Bajocian 期的 CO_2 浓度分别为 1 136 ppmv、927 ppmv、643 ppmv、785 ppmv, 早白垩世 Hauterivian-Barremian 期的 CO_2 浓度为 548 ppmv, 定量重建了甘肃省侏罗-白垩纪古大气 CO_2 浓度的变化趋势.

(3) 对比恢复结果说明恢复中生代古大气 CO_2 浓度时, 不同属种气孔比率法和光合气体交换模型模拟值之间存在明显差异, *Ginkgoites aganzhenense* 和 *Ginkgoites huttonii* 表现出了更好的稳定性.

结合前人光合气体交换模型恢复结果显示,早、中侏罗世二氧化碳浓度较高,向白垩纪整体呈下降趋势,中间略有波动;早白垩世早中期达到低点后在不断波动中缓慢上升;早白垩世晚期达到顶点,然后缓慢下降。

致谢:两位匿名审稿人和编辑提出了宝贵的修改意见,再此表示衷心感谢!

References

- Aucour, A. M., Gomez, B., Sheppard, S. M. F., et al., 2008. $\delta^{13}\text{C}$ and Stomatal Number Variability in the Cretaceous Conifer *Frenelopsis*. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 257(4): 462–473. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.027>
- Beerling, D. J., Royer, D. L., 2002. Fossil Plants as Indicators of the Phanerozoic Global Carbon Cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 30: 527–556. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.30.091201.141413>
- Bergman, N. M., Lenton, T. M., Watson, A. J., 2004. COPSE: A New Model of Biogeochemical Cycling over Phanerozoic Time. *American Journal of Science*, 304(5): 397–437. <https://doi.org/10.2475/ajs.304.5.397>
- Berner, R. A., 1994. GEOCARB II: A Revised Model of Atmospheric CO_2 over Phanerozoic Time. *American Journal of Science*, 294(1): 56–91. <https://doi.org/10.2475/ajs.294.1.56>
- Chen, L. Q., Li, C. S., Chaloner, W. G., et al., 2001. Assessing the Potential for the Stomatal Characters of Extant and Fossil *Ginkgo* Leaves to Signal Atmospheric CO_2 Change. *American Journal of Botany*, 88(7): 1309–1315. <https://doi.org/10.2307/3558342>
- Deng, S. H., 1997. Early Cretaceous Flora of Hailar, Inner Mongolia, China. Geological Publishing House, Beijing, 251–255 (in Chinese).
- Du, B. X., Sun, B. N., Zhang, M. Z., et al., 2016. Atmospheric Palaeo- CO_2 Estimates Based on the Carbon Isotope and Stomatal Data of Cheirolepidiaceae from the Lower Cretaceous of the Jiuquan Basin, Gansu Province. *Cretaceous Research*, 62: 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2015.07.020>
- Franks, P. J., Beerling, D. J., 2009. Maximum Leaf Conductance Driven by CO_2 Effects on Stomatal Size and Density over Geologic Time. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(25): 10343–10347. <https://doi.org/10.1073/pnas.0904209106>
- Franks, P. J., Royer, D. L., Beerling, D. J., et al., 2014. New Constraints on Atmospheric CO_2 Concentration for the Phanerozoic. *Geophysical Research Letters*, 41(13): 4685–4694. <https://doi.org/10.1002/2014gl060457>
- Hansen, K. W., Wallmann, K., 2003. Cretaceous and Cenozoic Evolution of Seawater Composition, Atmospheric O_2 and CO_2 : A Model Perspective. *American Journal of Science*, 303(2): 94–148. <https://doi.org/10.2475/ajs.303.2.94>
- Haworth, M., Hesselbo, S. P., McElwain, J. C., et al., 2005. Mid-Cretaceous $p\text{CO}_2$ Based on Stomata of the Extinct Conifer *Pseudofrenelopsis* (Cheirolepidiaceae). *Geology*, 33(9): 749–752. <https://doi.org/10.1130/g21736.1>
- Heer, O., 1876. Beiträge zur Jura-Flora Ostsibiriens und des Amurlandes. *Académie Impériale des Sciences*, 22(2): 1–122.
- Huang, C. M., Retallack, G. J., Wang, C. S., 2012. Early Cretaceous Atmospheric $p\text{CO}_2$ Levels Recorded from Pedogenic Carbonates in China. *Cretaceous Research*, 33(1): 42–49. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2011.08.001>
- Jin, P. H., 2018. Early Cretaceous Plant Fossils and Paleoenvironmental Characteristics in Laiyang, Shandong Province (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Lei, X. T., Du, Z., Du, B. X., et al., 2018. Middle Cretaceous $p\text{CO}_2$ Variation in Yumen, Gansu Province and Its Response to the Climate Events. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(2): 801–813. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.13555>
- Li, H. W., Dong, M., Tian, N., et al., 2022. Paleoenvironmental Implications of the Middle Jurassic *Phoenicopsis angustifolia* Heer in Shaerhu, Xinjiang. *Earth Science*, 47(2): 532–543 (in Chinese with English abstract).
- Li, J., Yang, Q., Chen, H., et al., 2019. The Middle Jurassic *Ginkgophyte* Fossils from Huating, Gansu and Their Stomatal Parameters Responding to Paleatmospheric CO_2 . *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 55(5): 561–570 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. X., Kang, Z. Q., Xu, J. F., et al., 2023. Chronological, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Volcanic Rocks in the Late Early Cretaceous in Southeast Guangxi. *Earth Science*, 48(8): 2872–2887 (in Chinese with English abstract).
- Lin, Z. C., Sun, B. N., Wu, J. Y., et al., 2012. New Proxy for Atmospheric Paleo- CO_2 Level during Phanerozoic: Carbon Isotope Discrimination of Fossil Liverworts. *Earth Science*, 37(1): 145–155 (in Chinese with English abstract).
- Passalia, M. G., 2009. Cretaceous $p\text{CO}_2$ Estimation from

- Stomatal Frequency Analysis of Gymnosperm Leaves of Patagonia, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 273(1–2): 17–24. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2008.11.010>
- Quan, C., Sun, C. L., Sun, Y. W., et al., 2009. High Resolution Estimates of Paleo-CO₂ Levels through the Campanian (Late Cretaceous) Based on *Ginkgo* Cuticles. *Cretaceous Research*, 30(2): 424–428. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2008.08.004>
- Quan, C., Zhang, L., 2005. An Analysis of the Early Paleogene Climate of the Jiayin Area, Heilongjiang Province. *Geological Review*, 51(1): 10–15 (in Chinese with English abstract).
- Ren, W.X., Sun, B.N., Li, X.C., et al., 2008. Microstructures of Two Species of Cheirolepidiaceae from Cretaceous in Zhejiang, China and Its Paleoenvironmental Significance. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 577–583 (in Chinese with English abstract).
- Retallack, G. J., 2001. A 300-Million-Year Record of Atmospheric Carbon Dioxide from Fossil Plant Cuticles. *Nature*, 411(6835): 287–290. <https://doi.org/10.1038/35077041>
- Retallack, G. J., 2009. Greenhouse Crises of the Past 300 Million Years. *Geological Society of America Bulletin*, 121(9–10): 1441–1455. <https://doi.org/10.1130/b26341.1>
- Robinson, S. A., Andrews, J. E., Hesselbo, S. P., et al., 2002. Atmospheric pCO₂ and Depositional Environment from Stable-Isotope Geochemistry of Calcrete Nodules (Barremian, Lower Cretaceous, Wealden Beds, England). *Journal of the Geological Society*, 159(2): 215–224. <https://doi.org/10.1144/0016-764901-015>
- Seward, A. C., 1919. Fossil Plants: A Text-Book for Students of Botany and Geology. Cambridge University Press, London.
- Si, X. J., 1959. Jurassic Flora of Qaidam, Qinghai Province. *Acta Palaeontologica Sinica*, 7(1): 1–31 (in Chinese).
- Si, X. J., Li, X. X., 1963. Mesozoic Plants of China (Fossil Plants of China). Science Press, Beijing (in Chinese).
- Sun, B. N., Xiao, L. A., Xie, S. P., et al., 2007. Quantitative Analysis of Paleoatmospheric CO₂ Level Based on Stomatal Characters of Fossil *Ginkgo* from Jurassic to Cretaceous in China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 81(6): 931–939. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2007.tb01016.x>
- Sun, B. N., Xie, S. P., Yan, D. F., et al., 2008. Fossil Plant Evidence for Early and Middle Jurassic Paleoenvironmental Changes in Lanzhou Area, Northwest China. *Palaeoworld*, 17(3–4): 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.palwor.2008.09.002>
- Wallmann, K., 2001. Controls on the Cretaceous and Cenozoic Evolution of Seawater Composition, Atmospheric CO₂ and Climate. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(18): 3005–3025. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00638-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00638-X)
- Wang, J., Ren, W.X., Li, T.G., et al., 2020. Environment and Tectonic Evolution during Early Cretaceous in Yumen Basin: Evidence from Silicified Woods in Northern Margin of Tibetan Plateau. *Earth Science*, 45(11): 4143–4152 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. D., Huang, C. M., Sun, B. N., et al., 2014. Paleo-CO₂ Variation Trends and the Cretaceous Greenhouse Climate. *Earth-Science Reviews*, 129: 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.11.001>
- Wu, J. Y., Ding, S. T., Li, Q. J., et al., 2016. Reconstructing Paleoatmospheric CO₂ Levels Based on Fossil Ginkgoites from the Upper Triassic and Middle Jurassic in Northwest China. *Paläontologische Zeitschrift*, 90(2): 377–387. <https://doi.org/10.1007/s12542-016-0300-1>
- Yang, S., Sun, B.N., Shen, G.L., 1988. New Materials of Ginkgoites from Jurassic in Vicinity of Lanzhou, Gansu. *Journal of Lanzhou University*, 24(S1): 70–77 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. J., 2004. *Ginkgoites myrioneurus* sp. nov. and Associated Shoots from the Lower Cretaceous of the Jixi Basin, Heilongjiang, China. *Cretaceous Research*, 25(5): 739–748. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2004.06.006>
- Yang, X. J., Wu, X. W., Zhou, Z. Y., 2014. On the Nomenclatural Problems of Some Chinese Ginkgoalean Fossil Plants. *Acta Palaeontologica Sinica*, 53(3): 263–273.
- Zhang, M.Z., 2014. Environmental and Ecological Evolution Recorded by Sporopollen Flora in East Asia Continent in Late Mesozoic (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W., Zhang, Z. C., Zheng, S. L., 1980. Paleontological Atlas of Northeast China, II. Mesozoic Cenozoic. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zheng, S. L., Zhang, W., 1982. Fossil Plants from Longzhaogou and Jixi Groups in Eastern Heilongjiang Province. *Bulletin of the Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources*, 5: 277–349 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z. Y., Yang, X. J., Wu, X.W., 2020. *Palaeobotanica Sinica: Ginkgophytes*. Science Press, Beijing (in Chinese).

中文参考文献

- 邓胜徽, 1997. 内蒙古海拉尔地区早白垩世植物群. 北京: 地质出版社, 251—255.
- 金培红, 2018. 山东莱阳早白垩世植物化石及古生态特征 (博士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 栗惠文, 董曼, 田宁, 等, 2022. 新疆沙尔湖中侏罗世狭叶拟刺葵(*Phoenicopsis angustifolia* Heer)的古环境意义. 地球科学, 47(2): 532—543.
- 李军, 杨倩, 陈慧, 等, 2019. 甘肃华亭中侏罗世银杏类化石及其气孔参数对古大气 CO₂ 的响应. 兰州大学学报(自然科学版), 55(5): 561—570.
- 李衣鑫, 康志强, 许继峰, 等, 2023. 桂东南早白垩世晚期火山岩年代学、地球化学特征及地质意义. 地球科学, 48(8): 2872—2887.
- 林志成, 孙柏年, 吴靖宇, 等, 2012. 恢复地史时期大气 CO₂ 浓度的新指标: 苔藓植物化石. 地球科学, 37(1): 145—155.
- 全成, 张林, 2005. 黑龙江嘉荫地区古近纪早期古气候分析. 地质论评, 51(1): 10—15.
- 任文秀, 孙柏年, 李相传, 等, 2008. 浙江白垩系两种掌鳞杉科化石微细结构及其古环境意义. 地质学报, 82(5): 577—583.
- 斯行健, 1959. 青海柴达木侏罗纪植物群. 古生物学报, 7(1): 1—31.
- 斯行健, 李星学, 1963. 中国中生代植物(中国植物化石第二册). 北京: 科学出版社.
- 王军, 任文秀, 李通国, 等, 2020. 青藏高原北缘玉门红柳峡硅化木成因及其揭示的早白垩世构造及环境. 地球科学, 45(11): 4143—4152.
- 杨恕, 孙柏年, 沈光隆, 1988. 兰州地区侏罗纪似银杏属的新材料. 兰州大学学报, 24(S1): 70—77.
- 张明震, 2014. 晚中生代东亚大陆内部孢粉植物群记录的环境、生态演化(博士学位论文). 兰州: 兰州大学.
- 张武, 张志诚, 郑少林, 1980. 东北地区古生物图册(二): 中新世分册. 北京: 地质出版社.
- 郑少林, 张武, 1982. 黑龙江省东部龙爪沟群及鸡西群植物化石. 沈阳地质矿产研究所所刊, 5: 277—349.
- 周志炎, 杨小菊, 吴向午, 2020. 中国古植物志·银杏植物. 北京: 科学出版社.