

doi:10.12029/gc20230827001

鄂尔多斯盆地盐池地区拟刺葵属叶片化石的角质层特征对中侏罗世湿热气候的响应

封永泰¹, 韦一², 杨兵³, 张新智³, 雷晓婷⁴, 马婷艳⁴, 黄卓⁵, 王涛³, 谭宁²

(1. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100728; 2. 华北科技学院安全工程学院, 廊坊 065201; 3. 自然资源实物地质资料中心, 廊坊 065201; 4. 陕西省自然资源厅信息中心, 西安 710082; 5. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061)

提要: 【研究方法】植物化石是记录地质历史时期陆地气候变化, 特别是古大气CO₂浓度变化的重要材料。通过对鄂尔多斯盆地盐池地区宁东2井中侏罗世延安组产出的拟刺葵属植物化石形态研究, 鉴定其为粗脉拟刺葵(温德瓦狄叶)(比较种)*Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis*。【研究目的】对其叶片角质层进行气孔参数统计、稳定碳同位素测试, 定量建立该地区中侏罗世古大气CO₂浓度、古温度以及测算植物的水分利用率。【研究结果】结果表明, 粗脉拟刺葵(温德瓦狄叶)(比较种)平均气孔指数4.25%, 用气孔比率法获取的古大气CO₂浓度为1599 ppm, 通过古CO₂浓度和温度增量公式获取中侏罗世该地区温度为1.2°C~31.4°C。此外, 测得植物化石角质层稳定碳同位素平均值为-23.6‰, 计算出*Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis*当时的水分利用率为348.2 mmol/mol。【结论】总体而言, 鄂尔多斯盆地盐池地区中侏罗世古大气CO₂浓度处于较高水平、反映了暖温带-亚热带湿润性气候。通过对比前人数据, 中国北方地区中侏罗世古大气CO₂浓度明显高于早侏罗世水平, 可能与燕山运动大规模的火山活动有关。

关键词: 中侏罗世, 古大气CO₂浓度, 气孔参数, 古温度, 碳同位素, 水分利用率, 油气勘查工程

创新点: 通过古植物指标和地球化学指标计算出中侏罗世古大气二氧化碳浓度; 通过对比推测燕山运动对中侏罗世古大气二氧化碳浓度的增加有促进作用。

The cuticular features of the *Phoenicopsis* fossil leaves and its response to the hot-humid climate during the Middle Jurassic in Yanchi area, Ordos Basin

FENG Yongtai¹, WEI Yi², YANG Bing³, ZHANG Xinzhì³, LEI Xiaoting⁴, MA Tingyan⁴, HUANG Zhuo⁵, WANG Tao³, TAN Ning²

(1. China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing 100728, China; 2. School of Safety Engineering, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, Hebei, China; 3. Cores and Samples Centre of Natural Resources, Langfang 065201, Hebei, China; 4. Department of Natural Resources of Shaanxi Province Information Center, Xi'an 710082, Shanxi, China; 5. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, Jilin, China)

基金项目: 中石化项目鄂尔多斯盆地钻孔层型集成柱——鄂尔多斯盆地“铁柱子”的研究项目

(34550000-21-FW2099-0055)、中国地质调查局项目实物地质资料采集更新与数字化应用项目(DD20230138)、中央高校基本科研业务费(3142018004)。

作者简介: 封永泰, 男, 1973年生, 学士, 正高级工程师, 主要从事石油地质资料综合研究方面工作; E-mail:

fengyt@sinopec.com。

通讯作者: 韦一, 女, 1989年生, 博士, 副教授, 主要从古生物地层学研究; E-mail: ostracods@126.com。

Abstract: [Methods] Plant fossils are the best materials to record terrestrial climate change in geological history, especially to the change of the paleo-CO₂ concentration. *Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis* was identified due to the study of the morphology of the fossils collected from the Jurassic Yan 'an Formation in well Ningdong 2, Yanchi area, Ordos Basin. **[Objective]** In order to reconstruct the paleo-atmospheric CO₂ concentration, paleo-temperature and water use efficiency of plants during the Middle Jurassic, leaf fossils of *Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis* were selected from horizon for calculating the the epidermal stomatal parameters and their isotope carbon composition of leaf cuticles. **[Results]** The results show that the average stomatal index (SI) of *Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis* is 4.25%, The paleo-atmospheric CO₂ concentration obtained by the stomatal ratio method is 1599 ppm. The paleo-average temperature of Yanchi is about 1.2°C~31.4°C. The average value of the stable carbon isotope $\delta^{13}\text{C}$ of plant fossils is -23.6‰, and its water use efficiency (WUE) is calculated to be 348.2 mmol/mol. **[Conclusions]** In general, the Middle Jurassic of Yanchi area in Ordos Basin belongs to a warm temperate - subtropical humid climate which reflected by the high CO₂ concentration. Compared with previous data, we speculate that the paleo-CO₂ concentration of the Middle Jurassic in northern China was significantly higher than that of the Early Jurassic, which may be related to the large-scale volcanic activities of the Yanshan Movement.

Key words: Middle Jurassic; paleo-atmospheric CO₂; stomatal parameters; paleotemperature; carbon isotope; water use efficiency ; oil-gas exploration engineering

Highlights: The paleo-atmospheric CO₂ concentration in the Middle Jurassic was calculated by palaeophytic index and geochemical index. It is implied that the Yanshan movement promoted the increase of paleo-atmospheric CO₂ during the Middle Jurassic.

About the first author: FENG Yongtai, male, born in 1973, bachelor, senior engineer, engaged in the comprehensive research of petroleum geological data; E-mail: fengyt@sinopec.com.

About the corresponding author: WEI Yi, female, born in 1989, doctor, associate professor, engaged in paleontological stratigraphy research; E-mail: ostracods@126.com.

Fund support: Supported by the Project of Research on the composite stratotype core section of the Ordos Basin--the "Iron pillar"(34550000-21-FW2099-0055), Collection and digitization of physical geological data(DD20230138), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(3142018004)。

1 引言

燕山运动是中国东部及邻区显生宙以来影响最深远的、压倒一切的构造作用(任纪舜, 1989), 其本质是古亚洲洋构造系或古特提斯构造系向环太平洋主动陆缘的转变(赵越等, 1994)或以大陆碰撞构造体制转换为西太平洋陆缘俯冲构造体制为主导的陆内变形和陆内造山(董树文等, 2007)。黄迪颖 (2019)认为鄂尔多斯盆地延安组底部有时分布不等厚层砾岩可能与燕山运动A1幕对应。华北地区中晚侏罗世-白垩纪期间, 除了发育不整合、变形之外, 另一重要的地质现象是大量的火山活动以及相关的岩浆侵入作用(王瑜等, 2018)。大规模火山活动释放出大量的CO₂引起大气中CO₂浓度波动, 进而引起全球环境和气候波动。尽管对于燕山运动的过程已有丰富的研究, 但对于这一重大构造事件初期的气候背景研究还相对较少。

植物化石，特别是银杏类植物化石，是记录地质历史时期陆地气候及CO₂浓度变化的最佳材料(马军等，2019)。自Woodward(1987)首次报道了植物叶片气孔密度与大气CO₂浓度呈负相关关系后，利用植物的气孔参数重建地史时期大气CO₂浓度，已成为当前古植物学和环境变化领域的研究热点之一。随后Kothavala et al. (1999)通过总结前人研究资料建立起大气CO₂浓度与全球陆表温度增量公式，将气孔参数、古大气CO₂浓度以及古温度三者有机结合，使得植物气孔参数的应用范围更加广泛。近年来，随着生物地球化学的发展，植物叶片的稳定碳同位素对环境的响应的研究已经得到重视，由于植物化石中的碳是从大气中合成而来，其碳源可以作为有效的材料来重建古大气CO₂浓度(Hesselbo et al., 2003; 刘贤赵等，2014)。

本文通过鄂尔多斯盆地盐池地区中侏罗统延安组下部(何发岐等，2023)产出的拟刺葵属植物化石叶片气孔参数进行分析，并结合植物叶片稳定碳同位素来重建该地区中侏罗世古大气CO₂浓度和古气候特征，反映了燕山运动早期中国北方鄂尔多斯盆地的气候背景。

2 地质概况

鄂尔多斯盆地位于中国中部，是华北克拉通西部发育的一个大型多旋回叠合盆地。共有6个二级构造单元，分别是：西缘冲断带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带、渭北隆起和伊盟隆起(何发岐等，2023; Jin et al. 2020; 成科璋等，2023)。宁东2井位于宁夏回族自治区盐池县大水坑镇，构造上属于天环坳陷马家滩断褶带，该钻孔主要钻遇上三叠统延长组和中侏罗统延安组两套地层，二者之间呈角度不整合接触。其中延安组为一套煤系地层，由多个正旋回组成，旋回下部由灰白色砾岩、含砾粗砂岩、以及中、细粒砂岩组成；旋回上部通常为夹多套煤层的灰绿色细砂岩、粉砂岩、灰色泥岩、碳质泥岩。根据岩石组合特征的不同，延安组又可分为4段，由下向上，第一段下部为含砾砂岩段夹有少量泥岩或煤层，上部为大套暗色泥岩，泥岩中夹有煤层；第二段下部为石英砂岩与暗色泥岩互层，上部泥岩逐渐增多，并夹有煤层；第三段和第四段由4-6个由粗变细的旋回组成，二者以煤层为分界，且在每个旋回顶部发育煤层。

本次在延安组第一段上部(2135.6m处)两套煤层的夹层中发现大量植物化石，且化石形态相似，属种较为单一，为古环境研究提供了材料。关于本钻孔延安组的地质年代，何发岐等(2023)通过孢粉组合研究认为：延安组下部 (2176.0~2153.0 m) 以*Inaperturopollenites-Psophosphaera- Protopinus*组合为代表，地质年代为早侏罗世托阿尔期晚期；延安组上部 (2153.0~2102.6 m)以*Cyathidites- Deltoidospora- Cycadopites*组合为代表，地质年代为中侏罗世早期(阿林期-巴柔期)。

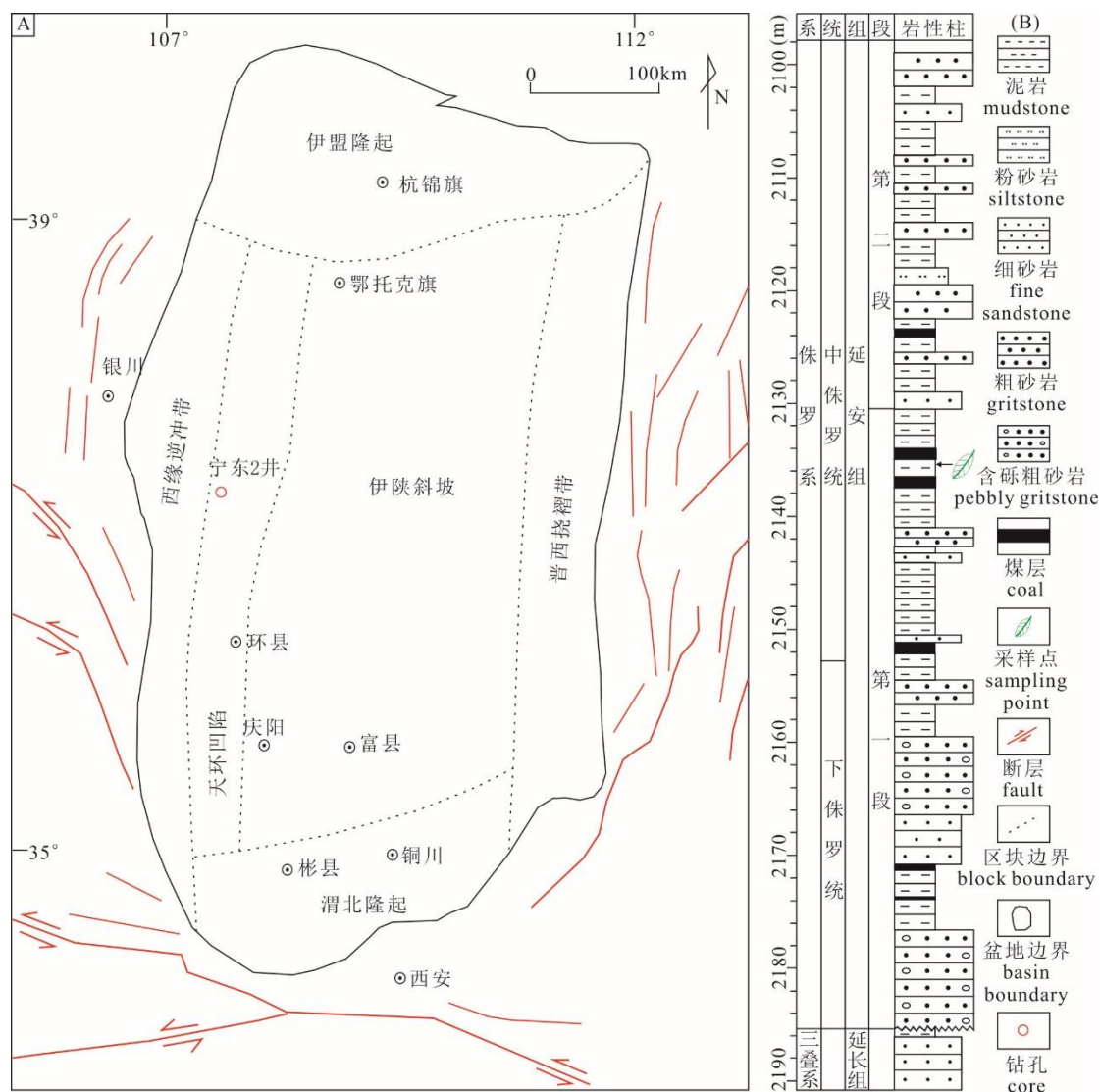


图 1 A.鄂尔多斯盆地构造单元划分; B.延安组地层柱状图

Fig.1 A. Tectonic units of the Ordos Basin; B. Stratigraphic column of the Yan'an Formation

3 实验方法

3.1 角质层样品处理

实验材料取自两块岩芯标本，保存了大量叶片压型化石，角质层完好。

荧光显微镜观察：将岩芯沿层面劈开，露出含有植物化石新鲜面，用洗耳球吹去表面颗粒，在吉林大学生物学与地层学研究中心，将化石置于带有荧光模块的Nikon AZ00V显微镜下观察，并在扫描电镜下拍照。

角质层提取：将植物叶片化石角质层用解剖刀从岩芯断面上揭下，将所获得角质层样品用10%的稀盐酸行前处理，每隔12小时换一次酸，直到充分除去钙质碎屑，盐酸液体显现为无色透明为止；用蒸馏水洗至中性；加入浓度为40%的氢氟酸，反应12小时，去除硅质；用蒸馏水水洗至中性；加入王水，并置于40°C的水浴恒温加热4小时(王雪莲等，2020)；蒸馏

水水洗至中性；置于浓度为8%的次氯酸钠溶液中并用60°C的水浴恒温加热4小时至角质层颜色变淡；加入5%的NaOH溶液，并制片在JEOL JSM-6700扫描电镜下观察、拍照(李军等, 2019)。

3.2 植物化石碳同位素测试

将植物化石角质层从岩石上揭下后，放置到10%稀盐酸中去除碳酸盐，水洗至中性，后加入40%氢氟酸，去除硅酸盐，随后用蒸馏水水洗至中性，在40°C的烘箱中烘干(耗时12h)后并用玛瑙研钵研磨至200目以下。每份称取0.2mg装入石英舟中，经氧化管(1020°C)与还原管(650°C)燃烧后分离纯化CO₂气体，在中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室的MAT-253plus同位素质谱仪进行稳定碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)分析，其计算公式为：

$$\delta^{13}\text{C}=(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}-1)\times 1000\%$$

式中： R 代表¹³C/¹²C比率，标样采用国家标准物质GBW04408，分析误差 $\leq\pm 0.1\%$ ，结果以VPDB标准表示。本次从2块岩芯中分别提取同种植物化石角质层，将其汇集为2件样品测试其碳同位素值。

3.3 气孔参数统计

气孔参数包括气孔密度(SD: Stomatal Density)、气孔指数(SI: Stomatal Index)。气孔密度(SD)是指叶片单位面积内气孔的数目；表皮细胞密度(ED: Epidermal cell Density)是指叶片单位面积内表皮细胞的数目；气孔指数是气孔数占气孔和表皮细胞总数的百分比，公式为：

$$\text{SI}=\text{SD}/(\text{ED}+\text{SD})\times 100$$

本次研究使用ImageJ软件统计气孔和表皮细胞数目，材料选取叶片宽度均大于5mm的下表皮角质层，各角质层的统计面积大于0.125mm²。

4 讨论

4.1 化石系统描述

裸子植物门 Gymnospermae

银杏纲 Ginkgopsida

茨康目 Czekanowskiales

拟刺葵属 *Phoenicopsis* Heer

温德瓦狄亚属 *Phoenicopsis (Windwardia)* (Florin) Samylna

粗脉拟刺葵(温德瓦狄叶)(比较种) *Phoenicopsis (Windwardia)* cf.
rudinervis Vladimirovich

标本编号：ND22-1A

产地、层位及时代：宁夏盐池，延安组，中侏罗世

特征描述：叶 6-7 枚，簇生于短枝之上(图 3a, b)。叶片线性，不分裂，无叶柄，叶长大于 5 cm，叶宽 1-5 mm(图 3c)，叶片边缘近平行，基部逐渐收缩。叶脉平行，无间细脉，每枚叶片有叶脉 4-6 条。表皮构造为双面气孔式。上表皮角质层较薄，外表面粗糙，脉络区一般由 6-13 列长矩形细胞组成，偶见长梭形或长三角形(图 3d, g)。脉间区细胞相对宽而短，矩形或多角形，12-18 列细胞组成。垂周壁较直或微弯，具不均匀加厚。平周壁未见明显乳突和毛状体。气孔器分散排列或呈单列排列，气孔器较小，呈椭圆形。气孔单唇式，保卫细胞肾形，有 4-6 个副卫细胞，形态不规则。副卫细胞具有乳突，局部或大部分覆盖气孔。下表皮，表皮细胞及气孔器形态与上表皮相近，但气孔器在数量远远多于上表皮，在脉间区呈条带状分布，每带由 2-5 列气孔器(图 3e, f, h)。

讨论与比较：拟刺葵属(*Phoenicopsis*)最早由 Heer 根据东西伯利亚阿穆尔州侏罗纪的植物化石标本建立(Heer, 1876)。Samylna (1972)根据 *Phoenicopsis* 的表皮构造特征，将该属划分为三个亚属，即 *Phoenicopsis(Phoenicopsis)*，*Phoenicopsis(Windwardia)* 和 *Phoenicopsis(Culgoweria)*。

当前标本可见 6-7 枚叶片簇生于短枝之上，叶片带状，基部狭窄，具平行脉，可将该化石归于 *Phoenicopsis* 属。其叶表皮构造为双面气孔式，气孔在下表皮呈带状排列，上表皮不规则或单列式排列，与 *Phoenicopsis(Windwardia)* 特征一致。到目前为止，*Phoenicopsis(Windwardia)* 共发现 22 种(Sun et al., 2015)。当前标本与发现于哈萨克斯坦西北部地区中侏罗世的 *P. (W.) rudinervis* Vladimrovich 较为接近，两者叶片均较短，叶脉数量均为 4-6 条；表皮细胞细胞壁直，不具乳突，副卫细胞具有乳突(Kiritchkova et al., 2002)。但当前标本上表皮气孔清楚，下表皮气孔器在脉间区成 2-5 列的带状分布，这些特征与 *P. (W.) rudinervis* 不同，因此暂定为 *Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis*。

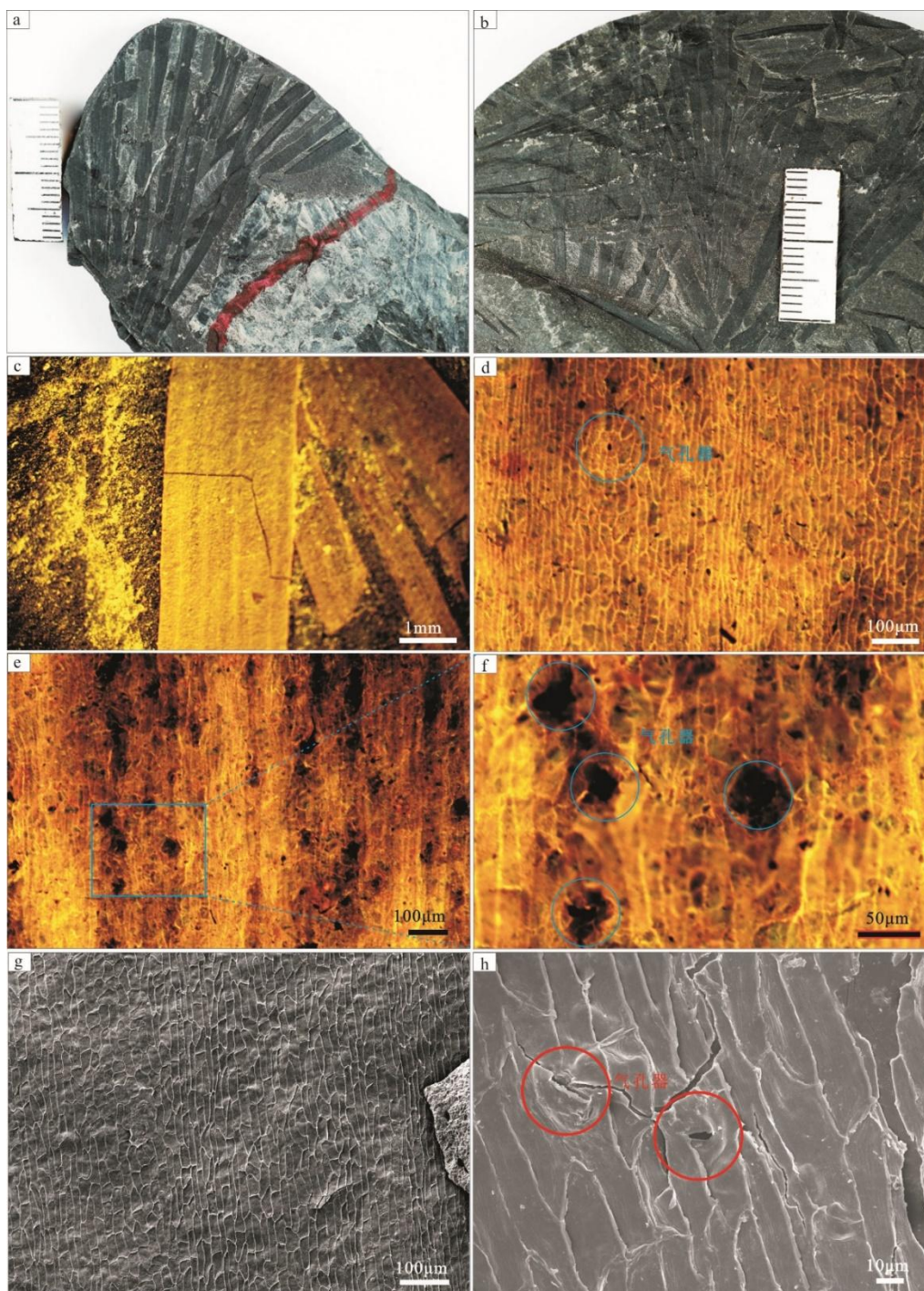


图 2 陕西盐池延安组拟刺葵属化石及其角质层微细构造

a, b. *Phenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis*, 标本号 ND22-1A, ND22-1B; c. 原位角质层的荧光显微观察, 示叶脉特征; d. 上表皮的荧光显微观察, 示气孔排列; e. 下表皮的荧光显微观察, 示气孔排列; f. 下表皮荧光显微观察, 图 e 方框区域放大, 示气孔器特征; g. 上表面内表皮的扫描电镜观察; h. 下表皮气孔器的扫描电镜观察.

Fig.2 Morphological and epidermal features of *Phenicopsis* from the Jurassic Yan'an Formation in Yanchi, Ordos Basin

a, b. *Phenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis*, specimen number ND22-1A, ND22-1B; c. cuticle *in situ* under fluorescence microscope; d. Upper cuticle under fluorescence microscope, indicating stomata arrangement; e. Lower cuticle under fluorescence microscope, indicating stomata arrangement; f. Lower cuticle under fluorescence microscope, magnifying the image of blue square in figure e; g. Inside surface of upper cuticle under scanning electron microscope; h. Inside surface of lower cuticle under scanning electron microscope.

4.2 古大气CO₂浓度重建

目前恢复古大气CO₂浓度的气孔方法有两种。一种是气孔指数法,另一种是气孔比率法。气孔指数法是通过现生种的“温室试验”结合腊叶标本和冰芯记录,运用回归分析,归纳出气孔指数与CO₂浓度关系的经验方程;再将该方程用于相应的化石种,计算出当时的大气CO₂浓度(李慧, 2018)。但该方法对于白垩纪之前的古大气CO₂浓度估算误差较大,且对高浓度CO₂具有一定的延迟性(Xie et al., 2006; 邓胜徽, 2007; 肖良等, 2014),所以针对于重建侏罗纪时期的古大气CO₂浓度大多数学者采用气孔比率法(孙柏年等, 2009; 丁素婷等, 2010; 肖良等, 2014; 刘军等, 2016; 陈应权等, 2017; 金培红等, 2017; 李军等, 2019; 栗惠文等, 2022)。

气孔比率法是建立在Berner的碳平衡模型的一种半定量估算大气CO₂浓度的方法。从上世纪九十年代开始, Berner等人基于碳通量和碳同位素平衡, 建立并逐步完善了全球碳循环的计算机模型(GEOCARB I, II, III), 构建了显生宙碳循环的基本框架(Berner, 1991, 1994; Berner and Kothavala, 2001)。而气孔比率法是将气孔比率投点到Berner的碳平衡模型(Berner, 1994)中, 把气孔比率(SR)按照一定的比例转换为Berner碳平衡模型(GEOCARB)中的 R_{CO_2} (R_{CO_2} 是指地质历史时期大气CO₂浓度与工业革命前大气CO₂浓度的比值, 一般取300ppm)(McElwain et al., 1999)。

气孔比率(SR: Stomatal Ratio)是化石植物的现存最近亲缘种(NLR: nearest living relative species, NLR)或现存最近对应种(NLE: nearest living equivalent species)与化石种的气孔指数(SI)的比值, 公式为:

$$SR=SI_n/SI_f \quad (1)$$

其中 SI_n 为目标化石种的现存最近亲缘种或现存最近对应种的气孔指数; SI_f 为目标化石种的气孔指数。

针对SR与 R_{CO_2} 的比例, McElwain and Chaloner(1995)提出的石炭纪标准: $2SR=1R(CO_2)$, (2)

$$\text{则古大气CO}_2\text{浓度公式为: } pCO_2= R(CO_2)\times 300\times 10^{-6} \quad (3)$$

利用气孔比率法恢复古大气CO₂浓度最关键是步骤在于现存最近亲缘种或对应种的选择。现存最近亲缘种指在现存植物中可以找到与化石种在系统演化上亲缘关系最近的种类。由于侏罗纪银杏类化石属的现存最近亲缘种为现生银杏(*Ginkgo biloba*), 所以大多数学者选择银杏类植物化石来恢复古大气CO₂浓度(肖良等, 2014; 金培红等, 2017; 李军等, 2018)。*Phoenicopsis*属是一种已灭绝的植物, 现存最近亲缘种无法寻找, 因此, McElwain and Chaloner (1995)提出了现存最近对应种的概念, 现存最近对应种是指与化石植物在生态环境和功能结构上相似的现生种, 而在系统发生学上不需要一定有关系。本次研究选用现生银杏(*Ginkgo biloba*)作为研究标本的现存最近对应种。近年来部分学者在中国北方地区利用拟刺

葵属(*Phoenicopsis*)来恢复古大气CO₂浓度也取得了良好效果(丁素婷等, 2010; 李军等, 2018; 栗惠文等, 2022)。

本文从宁东2井延安组下部2块岩芯中, 保存较好的6片*Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis* Vladimirovich角质层化石作为恢复该地区中侏罗世古大气CO₂浓度的材料。选择现生银杏(*Ginkgo biloba*)为其现存最近对应种, 其气孔指数一般认为是11.33%(Royer et al., 2001)。统计结果表明, 气孔密度(SD)约为47-69个/mm², 平均值为59(±3)个/mm²; 气孔指数(SI)为2.93%-6.11%, 平均值为4.25(±0.55)%。通过公式(1)可得气孔比率(SR)为2.67。通过公式(2)(3)可得出*p*CO₂为1599ppm, 将其投射于图3, 位于GEOCARBIII的置信区间内(Berner, 1994, 2001)。

表1 盐池地区*Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis*气孔参数统计表

Table 1 Stomatal parameters of in *Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis* in Yanchi

角质层 编号	气孔密度 (个/mm ²)	表皮细胞密度 (个/mm ²)	SI(%)
1-2	47	1362	3.34
1-3	52	1724	2.93
1-4	69	1060	6.11
2-3	64	1820	3.40
2-4	64	1564	3.93
2-1Y	59	966	5.76
平均值	59(±3)	1416(±143)	4.25(±0.55)

近年来不同学者在中国北方地区利用不同植物化石重建了侏罗纪大气二氧化碳浓度($\rho(\text{CO}_2)$)(图3)。丁素婷等(2010)在甘肃华亭地区通过狭叶拟刺葵恢复中侏罗世古大气CO₂浓度为1274ppm; 肖良等(2014)通过银杏类和拟刺葵为介质恢复吐哈盆地中侏罗世早期古大气CO₂浓度, 得出古大气CO₂浓度分别为1770ppm和1530ppm; 刘军等(2016)利用石拐茨康叶恢复的甘肃宝积山盆地中侏罗世古大气CO₂浓度为 1550ppm; 金培红等(2017)在内蒙古准噶尔旗利用西伯利亚似银杏恢复中侏罗世阿林期-巴柔期古大气CO₂浓度为1413ppm; 陈应权等(2017)在宝积山盆地利用阿干镇似银杏化石得出期中侏罗世古大气CO₂浓度为1823ppm; 李军等(2019)在甘肃华亭地区分别通过银杏属和拟刺葵属获取的中侏罗世古大气CO₂浓度分别为1228ppm 和1243ppm; 栗惠文等(2022)在新疆沙尔湖地区利用狭叶拟刺葵恢复中侏罗世古大气CO₂浓度为1240(±122)ppm。由此可见, 中国北方地区中侏罗世银杏、茨康材料恢复的古大气CO₂浓度范围在1228~1823ppm 之间。本次研究所获得的结果可与以上数据比较, 为中等偏高水平。

除了古生物指标外, 部分学者利用地球化学手段也建立了多个古大气CO₂浓度演化模型(见图3)。其中GEOCARBII曲线与 GEOCARBIII曲线是Berner(1994, 2001)利用古土壤碳酸盐和有机质的稳定同位素拟合的曲线; GEOCARRBSULF模型曲线是Berner(2006)基于碳和

硫在大尺度范围内循环拟合的曲线；Schaller(2015)基于北美Newark 裂谷盆地的古土壤碳酸盐和有机质的稳定碳同位素比值建立 Crustal Production模型曲线。本研究获取的古大气CO₂浓度值落在 GEOCARBII曲线与 GEOCARBIII曲线之间，且与GEOCARRBSULF模型曲线和Crustal Production模型曲线大体重合(图3)。

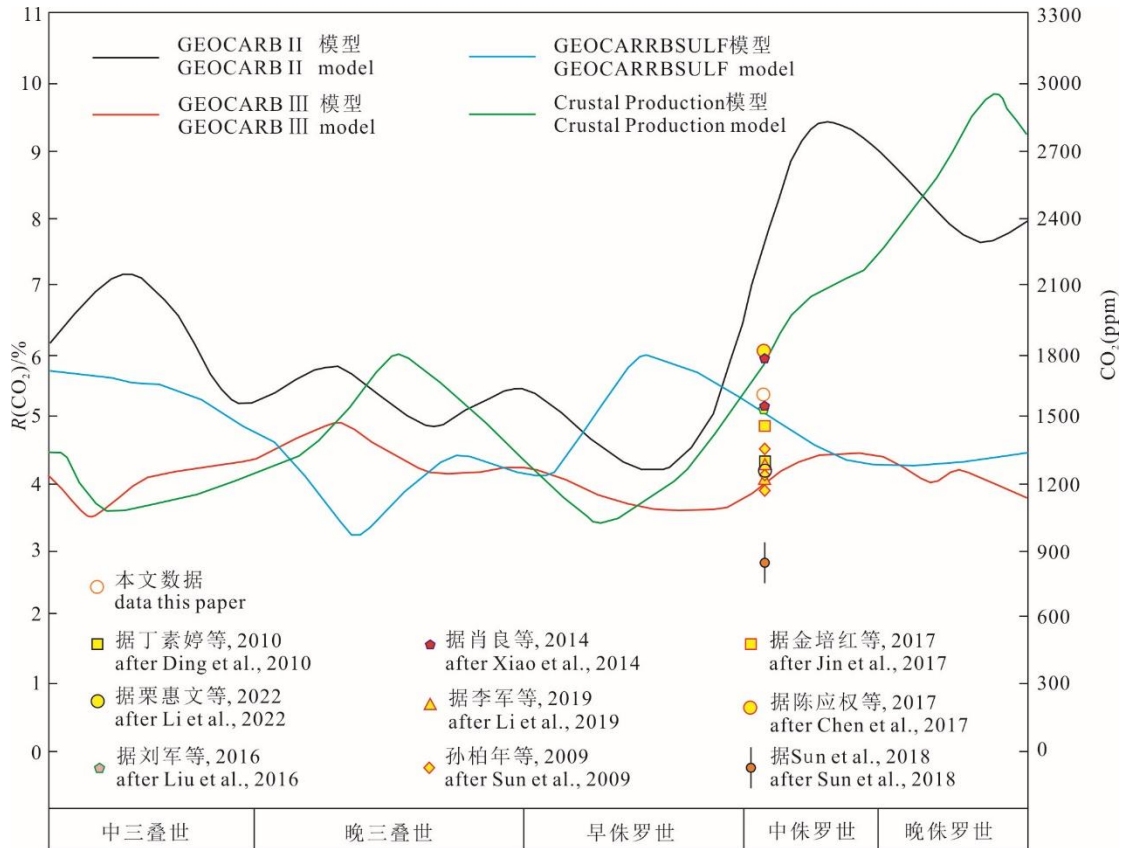


图3 气孔比率法所得盐池中侏罗世古大气 $\phi(\text{CO}_2)$ 与地球化学模型

Fig. 3 Paleo- $\phi(\text{CO}_2)$ during the Middle Jurassic in Yanchi base on the stomatal ratio and comparison with geochemical model

4.3 古温度重建

温度与大气CO₂浓度之间的耦合关系已经被多种实验所证实，并建立起二者之间的公式(Lacis et al., 2010; Cotton and Sheldon, 2012; Montañez et al., 2016)。Kothavala et al.(1999)通过总结前人资料，建立起 $R(\text{CO}_2)$ 与温度增量之间的经验公式：

$$\Delta T = 4.0 \times \ln R(\text{CO}_2) \quad (4)$$

其中 ΔT 为陆表温度的增量。由公式(2)可得 $R(\text{CO}_2)$ 为5.33，由公式(3)可得温度增量 ΔT 为6.7°C。

以上数据可以证明鄂尔多斯盆地盐池地区在中侏罗世早期处于一种高CO₂浓度、温暖的环境中，这种环境可能与高CO₂浓度导致的温度升高有关。通过统计前人数据发现，在中国

北方地区中侏罗世早期均处于高CO₂浓度和温暖的环境，各地陆表温度的增量较为一致，根据R(CO₂)计算其陆表温度的增量可知，其结果均在5.5°C-8°C之间(丁素婷等, 2010; 肖良等, 2014; 刘军等, 2016; 金培红等, 2017; 陈应权等, 2017; 李军等, 2019; 栗惠文等, 2022)。

4.4 植物碳同位素组成与P_i/P_a值

陆地植物光合作用中的碳源自大气中的CO₂，前人研究表明大气中CO₂浓度的变化能够影响植物的各项生理机能。植物对环境条件的响应主要依靠对气孔的调节，气孔导度的变化会直接影响光合作用中碳同位素的分馏过程，从而影响植物最终的碳同位素值(Beerling and Royer, 2002; 李慧, 2018)。而植物化石角质层碳膜为植物化石碳同位素的测定提供了可靠的材料，因此利用植物叶片角质层碳膜的碳同位素组成来恢复古大气CO₂浓度也成为了可能。Farquhar *et al.* (1982)通过实验建立C₃植物碳同位素分馏模型建立与古大气CO₂浓度浓度的公式如下：

$$\delta^{13}C_p = \delta^{13}C_a - a - (b-a)(P_i/P_a), \quad (5)$$

其中： $\delta^{13}C_a$ 为化石所处地质时期大气CO₂的碳同位素组成； $\delta^{13}C_p$ 为C₃植物叶片的碳同位素组成； a 表示大气CO₂从气孔扩散至叶片时的碳同位素分馏系数，约4.4‰； b 表示在在RuBP酶作用下固定无机碳的羧化反应发生的碳同位素分馏，约27‰； P_i 和 P_a 分别为叶内细胞间和外界大气CO₂浓度。由于外界大气CO₂浓度和 $\delta^{13}C_a$ 对植物 $\delta^{13}C_p$ 的影响较大，

植物光合作用在合成有机质的过程中优先吸收大气中碳的轻同位素¹²C，因此碳同位素在植物体内产生分馏，植物体内相对富集轻同位素¹²C， $\delta^{12}C$ 值相对于大气偏负。Arens *et al.*,(2000)通过数据总结出现生植物的稳定碳同位素值与大气 CO₂浓度和 $\delta^{13}C_a$ 之间的关系，并总结出C₃陆生植物的 $\delta^{13}C_p$ 值与大气 $\delta^{13}C_a$ 之间的回归方程：

$$\delta^{13}C_a = (\delta^{13}C_p + 18.67) / 1.10 \quad (6)$$

基于公式(5)和公式(6),可以通过测量植物化石角质层碳膜的碳同位素值 $\delta^{13}C_p$ ，计算出 $\delta^{13}C_a$ 与 P_i/P_a 值。本次研究中通过对标本ND22-1A中2个*Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis* Vladimrovich化石角质层碳膜测试得出 $\delta^{13}C_p$ 分别为-23.46‰和-23.74‰(表2)。

表 2 *Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis* Vladimrovich 化石稳定碳同位素组分与 P_i/P_a 值
Table 2 Stable carbon isotopic composition and P_i/P_a values of the fossil *Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis* Vladimrovich

化石序号	$\delta^{13}C_p$ (‰, VPDB)	古大气 $\delta^{13}C_a$ (‰, VPDB)	P_i/P_a 值
1	-23.46	-4.35	0.651
2	-23.74	-4.61	0.652

在使用公式(5)和公式(6)恢复古大气浓度前必须首先确定目标植物化石为C₃植物。

Deines (1980) 根据植物光合作用途径的不同将现代陆生植物分为C₃植物、C₄植物和CAM植物三种类型。其中C₃植物主要包括灌木、乔木、以及寒冷地区的草本植物，其稳定同位素值一般在-20‰~32‰之间；C₄植物主要包括热带的草本植物，如莎草科、禾本科，其稳定同位素值一般在-7‰~15‰之间；CAM植物较为少见主要包括沙漠肉质植物和热带附生植物，其稳定同位素值一般在-10‰~22‰之间 (马晔和刘锦春, 2013; 张世辉等, 2021; 栗惠文等, 2022)。因此，可使用植物的稳定同位素值来判断植物类型。从测试数据中可以看出，

Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis Vladimirovich属于C₃植物(栗惠文等, 2022)。通过公式(5)和公式(6)得出, 古大气 $\delta^{13}C_a$ 分别为-4.35‰和-4.61‰(表2), 平均值为-4.48‰; P_i/P_a 值分别为0.651和0.652(表2), 平均值为0.6515。通过Chakraborty et al.(2011)对白垩纪植物化石研究得出: 在合适的情况下植物常常会保持一个较为恒定的 P_i/P_a 值。当 $P_i/P_a > 0.7$ 时, 指示了当时环境中雨水极其充沛, 此时植物会采取非节约型水分利用方式, 该类植物主要为热带雨林的植被。数据表明盐池地区当时气候较为湿润, 但湿润度没达到现代热带雨林气候, 可能属于亚热带-暖温带湿润性气候。

4.5 水分利用效率

水分利用效率(water use efficiency, WUE)是光合作用同化的CO₂量与蒸腾作用消耗水量的比值。该指标可以反映植物生活环境中干湿程度, WUE值越大, 则反映环境越干燥。大气中CO₂进入植物体内合成物质需进行光合作用和蒸腾作用, 从而使得不同环境的植物中稳定碳同位素组分的差异(Korol et al., 1999)。而在此过程中水和CO₂均起着重要的作用。多种实验证实: 植物叶片中稳定碳同位素可用来估算植物水分利用效率, 叶片中稳定碳同位素越偏正, 植物水分利用效率就越高(Korol et al., 1999; Kohn, 2010)。Farquhar and Richards(1984)结合C₃植物碳同位素分馏模型公式得出水分利用效率公式:

$$WUE = P_a(1 - P_i/P_a)/1.6 \quad (7)$$

其单位为mmol/mol。根据研究区*Phoenicopsis (Windwardia) cf. rudinervis*化石中稳定碳同位素的平均值以及大气CO₂浓度可以算出WUE为348.2mmol/mol。

孙柏年等(2009)通过对前人数据统计表明, 胡顿银杏的水分利用率为174.4~223.5 mmol/mol, 现代银杏的水分利用率为52.6mmol/mol, 而现代大气CO₂浓度不足400ppm。从本次研究中拟刺葵属水分利用率略大于前者。对比现代大气CO₂浓度和现代银杏的水分利用率可以看出, 在高浓度大气CO₂环境中, 植物倾向于通过减少气孔数目的方式来防止水土流失, 尽量提高自身的水分利用率。该习性与Beerling et al.(1998)的“温室实验”结果一致。

4.6 古气候讨论

鄂尔多斯盆地中侏罗统延安组为该盆地主要的含煤地层, 植物化石丰富, 经统计主要有银杏纲、真蕨纲、松柏纲、楔叶纲、苏铁纲等, 其中银杏纲占主体, 与中国北方中侏罗世 *Coniopteris-Phoenicopsis*植物群组合面貌基本一致, 指示了亚热带-暖温带湿润性气候(李琪佳等, 2017; 李军等, 2019)。从孢粉资料来看鄂尔多斯盆地延安组孢粉组合以蕨类植物为主, 见有大量桫欏属, 此外还见有裸子植物苏铁属, 均为热带-亚热带喜湿或中生分子, 整体组合指示了温带-亚热带湿润性气候(尚玉珂, 1995; 尹凤娟和侯宏伟, 1999; 江德昕和王永栋, 2002; 孙立新等, 2017)。根据邓胜徽等(2017)对中国侏罗纪古气候分区图可以看出, 在中侏罗世早期(阿林期-巴柔期)鄂尔多斯盆地属于北方暖温带潮湿气候区, 该结论与本次研究中得出的结论相似。

从聚煤作用演化来看, 焦养泉等(2021)认为, 鄂尔多斯盆地的聚煤作用始于富县组沉积

末期的Toarcian 晚期, 于延安组沉积期的 Aalenian-Bajocian 期达到鼎盛, 在Bajocian 期晚期出现衰替, 结束于直罗组沉积早中期的 Bathonian 期。而从GEOCARB II碳平衡模型来看 (Berner, 1994), Toarcian期大气CO₂浓度处于相对较低水平, 但从早期到晚期处于急速上升趋势, 到了中侏罗世早期(Aalenian-Bajocian 期)大气CO₂浓度上升至峰值, 并在中侏罗世晚期处于降低趋势。由此可以看出, 侏罗纪古大气CO₂浓度演化与鄂尔多斯聚煤作用演化有着相似的趋势, 二者为协同演化关系。

4.7 鄂尔多斯盆地中侏罗世植物化石与燕山运动

黄迪颖(2019)认为, 我国侏罗纪的燕山运动可能与西伯利亚板块的俯冲和蒙古-鄂霍茨克洋的关闭有关, 我国北方普遍存在的中-晚侏罗世构造变形都与这一活动密切相关。他提出, 鄂尔多斯盆地延安组底部间断分布的厚层砾岩可能与燕山运动的A1幕(张宏仁等, 2013; 李海龙等, 2014)对应。李云峰(2016)研究了鄂尔多斯盆地中侏罗世延安组植物群, 延安组植物化石组成和角质层特征都显示了中侏罗世鄂尔多斯盆地温暖潮湿的气候特征, 这与中侏罗世全球变暖的气候条件相一致。李婷等(2021)通过统计前人资料得出, 早侏罗世普林斯巴期-托阿尔期大气二氧化碳浓度低于1269ppm, 而本文中统计的中侏罗世早期大气二氧化碳浓度范围在1228~1823ppm, 明显高于早侏罗世。王瑜等(2018)认为中侏罗世二氧化碳浓度升高可能与燕山运动大规模的火山活动有关。早侏罗世晚期鄂尔多斯盆地富县组植物群中发现植物化石17属27种, 整体面貌显示出较干旱、炎热的气候特征(黄枝高和周顺琴, 1980)。而中侏罗世延安组植物群中发育了既有低地喜湿的植物分子(如真蕨类, 占比约20%-30%), 也有高地、适宜排水良好的植物分子(如银杏类和松柏类的一些分子, 占比超过50%)(李云峰, 2016); 何发岐等(2023)通过对该钻孔孢粉组合分析认为, 在早侏罗世晚期-中侏罗世早期孢粉组合喜湿的低地植物孢粉和高山植物孢粉混生现象。孢粉化石和植物化石均显示这一现象可能与与西伯利亚板块的俯冲和蒙古-鄂霍茨克洋的关闭过程中, 挤压背景下, 地貌改变, 鄂尔多斯盆地内部地形起伏, 形成高山河谷交错的地形有关。

5 结论

通过对鄂尔多斯盆地盐池地区中侏罗世延安组粗脉拟刺葵(温德瓦狄叶)(比较种)*Pheonicopsis (Windwardia) cf. rudinervis*化石进行角质层分离、统计气孔参数, 并对其进行稳定碳同位素测试, 得出以下结论:

(1)利用气孔比率法获取的古大气CO₂浓度为1599ppm, 该值位于GEOCARBII曲线与GEOCARBIII曲线之间, 为可信误差范围;

(2)通过古CO₂浓度和温度增量公式获取中侏罗世该地区温度为1.2°C~31.4°C, 比现今该地区温度高越6.7°C; 结合古温度和古大气CO₂浓度可知, 中侏罗世该地区属于高CO₂浓度, 暖温-亚热带湿润性气候, 可与前人利用其它指标获取的结果形成很好的对比;

(3)植物化石角质层稳定碳同位素得出拟刺葵属植物当时的水分利用率(WUE)为 348.2mmol/mol、 Pi/Pa 值为 0.6515。

致谢:植物化石角质层提取、统计实验由吉林大学生物学与地层学研究中心完成。编辑部老师及匿名审稿专家对本文提出大量宝贵意见。在此表示感谢!

References

- Arens N C, Jahren A H, Amundson R. 2000. Can C3 plants faithfully record the carbon isotopic composition of atmospheric carbon dioxide [J]? *Paleobiology*, 26(1): 137-164.
- Beerling D J, Woodward F I, Lomas M R. 1998. The influence of Carboniferous palaeoatmospheres on plant function: an experimental and modelling assessment [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 353(1365): 131-140.
- Beerling D J, Royer D L. 2002a. Fossil Plants as Indicators of the Phanerozoic Global Carbon Cycle [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 30(1): 527-556.
- Beerling D J, Royer D L. 2002b. Reading a CO₂ signal from fossil stomata [J]. *New Phytologist*, 153 (3): 387-397.
- Berner R A. 1991. A model for atmospheric CO₂ over Phanerozoic time [J]. *American Journal of Science*, 291(4): 339-376.
- Berner R A. 1994. GEOCARB II: a revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time[J]. *American Journal of Science*, 294(1): 56-91.
- Berner R A. 2006. GEOCARBSULF: a combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(23): 5653-5664.
- Berner R A, Kothavala Z. 2001. GEOCARB III: a revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time [J]. *American Journal of Science*, 301(2): 182-204.
- Chakraborty S, Jana B N, Bhattacharya S K, Robertson I. 2011. Carbon Isotopic Composition of Fossil Leaves from the Early Cretaceous Sediments of Western India[J]. *Journal of Earth System Science*, 120(4): 703-711.
- Chen Yingquan, Ma Litao, Peng Lin, Liu Jun, Zhang Li, Fan Junjie, Yan Defei. 2017. The Palaeoenvironmental Significance of *Ginkgoites Aganzhenensis* Yang from the Middle Jurassic in the Baojishan Basin, Gansu Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(1): 57-66(in Chinese with English abstract).
- Cheng Kezhang, Cui Junping, Meng Zhangyong, Liu Jingjing, Kang Zhiyuan, Li Jiacheng. 2023. Characteristics of fluid inclusions and analysis of hydrocarbon accumulation stages of Yan'an Formation in Wuqi area, Ordos Basin[J]. *Geology in China*, 50(3): 692-703. (in Chinese with English abstract).
- Cotton J M, Sheldon N D. 2012. New constraints on using paleosols to reconstruct atmospheric pCO₂[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 124: 1411-1423.
- Deines P. 1980. The isotopic composition of reduced organic carbon. In: Fritz P, Fontes J(eds)[C]// Fritz P, Fontes J C (ed.). *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Vol. 1. Amsterdam: Elsevier, 329-406.
- Deng Shenghui. 2007. Palaeoclimatic implications of main fossil plants of the Mesozoic. *Journal of Palaeogeography*, 9 (6): 559-574(in Chinese with English abstract).
- Deng Shenghui, Lu Yuanzheng, Zhao Yi, Fan Ru, Yang Xiaoju, Li Xin, Sun Bainian. 2017. The Jurassic palaeoclimate regionalization and evolution of China[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 107-142(in Chinese with English abstract).
- Ding Suting, Sun Bainian, Wu Jingyu, Li Xiangchuan. 2010. Cuticular composition and carbon isotope characteristics of Jurassic *Phoenicopsis (Phoenicopsis) Angustifolia* Heer from Huating in Gansu Province, China[J]. *Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)*, 46(1): 14-21(in Chinese with English abstract).
- Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Long Changxiang, Yang Zhenyu, Ji Qiang, Wang Tao, Hu Jianmin, Chen Xuanhua. 2007. Jurassic Tectonic Revolution in China and New Interpretation of the Yanshan Movement[J]. *Acta*

- Geologica Sinica, 81(11):1449-1461(in Chinese with English abstract).
- Farquhar G, O'Leary M, Berry J. 1982. On the Relationship between Carbon Isotope Discrimination and the Intercellular Carbon Dioxide Concentration in Leaves[J]. *Functional Plant Biology*, 9(2): 121.
- Farquhar G, Richards R. 1984. Isotopic Composition of Plant Carbon Correlates with Water-Use Efficiency of Wheat Genotypes[J]. *Functional Plant Biology*, 11(6): 539.
- He Faqi, Zhang Sen, Jing Zhichao, Yang Bing, Yuan Qiong, Gong Xuejiao, Guo Caiqing, Cao Jing. 2023. Discovery of Sporopollen assemblages of Yan'an Formation in Yanchi, Ordos Basin, and its Paleoclimate Significances[J]. *Acta Geologica Sinica*, doi:10.19762/j.cmki.dizhixuebao.2023303(in Chinese with English abstract).
- Heer O. 1876. Beitrage zur Jura-Flora Ostsibiriens und des Amurlandes[J]. *Memoires de L'Academie des Sciences de Stain-Petersbourg*, 22(12): 72-74.
- Hesselbo S P, Morgans-Bell H S, McElwain J C, Rees P M, Robinson S A, Ross C E. 2003. Carbon-cycle perturbation in the Middle Jurassic and accompanying changes in the terrestrial paleoenvironment[J]. *Journal of Geology*, 111(3): 259-276.
- Huang Diying. 2019. Jurassic integrative stratigraphy and timescale of China[J]. *Science China Earth Sciences*, 62: 223-255(in Chinese with English abstract).
- Huang Zhigao, Zhou Shunqin. 1980. Mesozoic stratigraphy and paleontology in Sha'anganning Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 54-63.
- Jiang Dexin, Wang Yongdong. 2002. Middle Jurassic palynoflora and it environmental significance of Dongsheng, Inner Mongolia[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 20(1): 47-53(in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Rong Hui, Zhang Fan. 2021. Coal accumulation regularity of Zhiluo Formation and its indication to paleoclimate and uranium metallogenic environment, Ordos Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 46(7): 2331-2345(in Chinese with English abstract).
- Jin Peihong, Dong Junling, Wang Zixi, Yuan Jidong, Mao Ziqiang, LiYuyuqiong, Sun Bainian. 2017. Middle Jurassic ginkgophyte fossils from the Gucheng coal mine of the Junger Banner. Inner Mongolia and indications of the paleo-CO₂ concentration[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 53(1): 1-8(in Chinese with English abstract).
- Jin Ruoshi, Feng Xiaoxi, Teng Xueming, Nie Fengjun, Cao Haiyang, Hou Huiqun, Liu Hongxu, Miao Peisen, Zhao Hualei, Chen Lulu, Zhu Qiang, Zhou Xiaoxi. 2020. Genesis of green sandstone/mudstone from Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Dongsheng Uranium Orefield, Ordos Basin and its enlightenment for uranium mineralization[J]. *China Geology*, 3, 52-66.
- Kiritchkova A I, Travina T A, Bystritskaya L I. 2002. The *Phoenicopsis* Genus: Systematics, history, distribution and stratigraphic significance. Biochronology and correlation of Phanerozoic of oil anh gas basina of the Russia, Issue 3[M]. Saint-Petersburg: VNIGRI Publications, 1-205(in Russian).
- Kohn M J. 2010. 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*, 107(46): 19691-19695.
- Korol R, Kirschbaum M U, Farquhar G D, Jeffreys M. 1999. Effects of water status and soil fertility on the C-isotope signature in *Pinus radiata*[J]. *Tree Physiology*, 19(9): 551-562.
- Kothavala Z, Oglesby R J, Saltzman B. 1999. Sensitivity of equilibrium surface temperature of CCM3 to systematic changes in atmospheric CO₂[J]. *Geophysical Research Letters*, 26 (2): 209-212.
- Lacis A A, Schmidt G A, Rind D, Ruedy R A. 2010. Atmospheric CO₂: principal control knob governing Earth's temperature[J]. *Science*, 330: 356-359.
- Li Hailong, Zhang Hongren, Qu Hongjie, Cai Xiangmin, Wang Meng. 2014. Initiation, the First Stage of the

- Yanshan (Yenshan) Movement in Western Hills, Constraints from Zircon U-Pb Dating[J]. *Geological Review*, 60(5): 1026-1042(in Chinese with English abstract).
- Li Hui. 2018. Taxonomy of fossil conifers and quantitative reconstruction of palaeoclimate during the Permian-Triassic transition in South China[D]. China University of Geosciences (Wuhan), 57-80 (in Chinese with English abstract).
- Li Huiwen, Dong Man, Tian Ning, Chen Lin, Kai Lulu, Luo Genming, Yang Hao. 2022. Paleoenvironmental Implications of the Middle Jurassic *Phoenicopsis angustifolia* Heer in Shaerhu, Xinjiang[J]. *Earth Science*, 47(2): 532-543(in Chinese with English abstract).
- Li Qijia, Li Jun, An Pengcheng, Tang Deliang, Zhu Yuting, Ding Suting, Wu Jingyu. 2017. Fossil plant assemblage from the Middle Jurassic Yan'an formation in Huating, Gansu province and its paleoclimatic implication[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 56(1): 94-107(in Chinese with English abstract).
- Li Yunfeng. 2016. Middle Jurassic plant diversity and paleoclimate in the Ordos Basin, China[D]. Changchun: Jilin University (in Chinese with English abstract), 118-123.
- Li Jun, Yang Qian, Chen Hui, Tang Deliang, An Pengcheng, Wu Jingyu. 2019. The Middle Jurassic ginkgophyte fossils from Huating, Gansu and their stomatal parameters responding to paleoatmospheric CO₂[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 55(5): 561-570(in Chinese with English abstract).
- Liu Jun, Ma Litao, Peng Lin, Chen Yingquan, Zhang Li, Fan Junjie, Yan Defei. 2016. Cuticular of *Czekanowskia (Vachrameevia) shiguaiensis* from the Middle Jurassic in Baojishan Basin, Gansu and its paleoenvironmental significance[J]. *Global Geology*, 35(4): 909-919(in Chinese with English abstract).
- Liu Xianzhao, Zhang Yong, Su Qing, Tian Yanlin, Quan Bing, Wang Guo'an. 2014. Research progress in responses of modern terrestrial plant carbon isotope composition to climate change[J]. *Advances in Earth Science*, 29(12): 1341-1354(in Chinese with English abstract).
- Ma Ye, Liu Jinchun. 2013. Applications of $\delta^{13}\text{C}$ in plant ecological research[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 33(7): 1492-1500(in Chinese with English abstract).
- McElwain J C, Beerling D J, Woodward F I. 1999. Fossil plants and global warming at the Triassic-Jurassic boundary[J]. *Science*, 285: 1386-1390.
- McElwain J C, Chaloner W G. 1995. Stomatal density and index of fossil plants track atmospheric carbon dioxide in the Paleozoic[J]. *Annals of Botany*, 76(4): 389-395.
- Montañez I P, McElwain J C, Poulsen C J, White J D, DiMichele W A, Wilson J P, Griggs G, Hren M T. 2016. Climate, $p\text{CO}_2$ and terrestrial carbon cycle linkages during late Palaeozoic glacial-interglacial cycles[J]. *Nature Geoscience*, 9: 824-828.
- Ren Jishun. 1989. Some new ideas on tectonic evolution of Eastern China and adjacent areas[J]. *Regional Geology of China*, 4: 289-300(in Chinese with English abstract).
- Royer D L. 2001. Stomatal density and stomatal index as indicators of atmospheric CO₂ concentration[J]. *Review of Palaeobotany & Palynology*, 114: 1-28.
- Royer D L, Berner R A, Beerling D J. 2001. Phanerozoic atmospheric CO₂ change: evaluating geochemical and palaeobiological approaches[J]. *Earth-Science Reviews*, 54: 349-392.
- Samylina V A. 1972. Systematics of the genus *Phoenicopsis*[C]// Doludenko M P(ed.). *Mesozoic plants (Ginkgoales and Czekanowskiales) of East Siberia*. Moscow: Nauka, 44-81(in Russian).
- Schaller M F, Wright J D, Kent D V. 2015. A 30 Myr record of Late Triassic atmospheric $p\text{CO}_2$ variation reflects a fundamental control of the carbon cycle by changes in continental weathering[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 127(5/6): 661-671.
- Shang Yuke. 1995. Palynology of the Yanan formation the Dongsheng region, Inner Mongolia[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 12(4): 398-420(in Chinese with English abstract).
- Sun Bainian, Yan Defei, Xie Sanping, Wang Yongdong. 2009. Stomata and carbon isotope analyses of fossil

- plants and their applications[M]. Beijing: Science Press, 1-222 (in Chinese with English abstract).
- Sun Chunlin, Na Yuling, Dilcher D L, Wang Hongshan, Li Tao, Li Yunfeng. 2015. A New Species of *Phoenicopsis* Subgenus *Windwardia* (Florin) Samylinia (Czekanowskiales) from the Middle Jurassic of Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 55-69.
- Sun Chunlin, Tan Xiao, Dilcher D L, Wan Hongshan, Na Yuling, Li Tao, Li Yunfeng. 2018. Middle Jurassic Ginkgo leaves from the Daohugou area, Inner Mongolia, China and their implication for palaeo-CO₂ reconstruction[J]. *Palaeoworld*, 27(4): 467-481.
- Sun Lixin, Zhang Yun, Zhang Tianfu, Cheng Yinhang, Li Yanfeng, Ma Hailin, Yang Cai, Guo Jiacheng, Lu Chao, Zhou Xiaoguang. 2017. Jurassic sporopollen of Yan'an Formation and Zhilao Formation in the northeastern Ordos Basin, Inner Mongolia, and its paleoclimatic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 32-51(in Chinese with English abstract).
- Wang Xuelian, Xiong Conghui, Sun Bainian, Wu Jingyu, Du Baoxia. 2020. Summary and exploration of analysis experiment technology on fossil plant cuticles[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2476-2486(in Chinese with English abstract).
- Wang Yu, Sun Lixin, Zhou Liyun, Xie Yueting. 2018. Discussion on the relationship between the Yanshanian Movement and cratonic destruction in North China[J]. *Science China Earth Sciences*, 48(5): 521-535(in Chinese).
- Woodward F I. 1987. Stomatal numbers are sensitive to increases in CO₂ from pre-industrial levels[J]. *Nature*, 327: 617-618.
- Xiao Liang, Li Yong, Zhou Jianren, Li Xiangchuan, Guo Junfeng, He Wenlong. 2014. Paleatmospheric CO₂ level of the middle Jurassic in Turpan-Hami Basin, Xinjiang[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 50(2): 154-160(in Chinese with English abstract).
- Xie Sanping, Sun Bainian, Yan Defei, Xiao Liang, Wei Lijie. 2006. Leaf cuticular characters of Ginkgo and implications for paleatmospheric CO₂ in the Jurassic[J]. *Progress in Natural Science*, 16 (1): 258-263.
- Yin Fengjuan, Hou Hongwei. 1999. Middle Jurassic Sporopollen Assemblage from the Yan' an Formation in Binxian County, Shaanxi Province and Its Significance[J]. *Acta Botanica Sinica*, 41(3): 325-329(in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongren, Zhang Yongkang, Cai Xiangmin, Qu Hongjie, Li Hailong, Wang Meng. 2013. The Triggering of Yanshan Movement: Yanshan Event[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(12): 1779-1790(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shihui, Xiao Liang, Xue Jinzhuang, Meng Meicen, Qin Min, Cui Ying, Wang Deming. 2021. Characteristics of stable carbon isotope of the Early Devonian plants from Yunnan Province and its palaeoclimatic significance[J]. *Journal of Palaeogeography*, 23(5): 887-900(in Chinese with English abstract).
- Zhao Yue, Yang Zhenyu, Ma Xinghua. 1994. Geotectonic Transition from Paleasian system and Paleotethyan system to Paleopacific Active Continental Margin in Eastern Asia[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 29(2): 105-118(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈应权,马利涛,彭琳,刘军,张立,范俊杰,闫德飞. 2017.甘肃宝积山盆地中侏罗世阿干镇似银杏 (*Ginkgoites aganzhenensis* Yang)的古环境意义[J]. *沉积学报*, 35(1): 57-66.
- 成科璋,崔军平,孟张勇,刘静静,康志远,李佳诚. 2023. 鄂尔多斯盆地吴起地区延安组储层流体包裹体特征与油气成藏期次分析[J]. *中国地质*, 50(03): 692-703.
- 邓胜徽,卢远征,赵怡,樊茹,王永栋,杨小菊,李鑫,孙柏年. 2017.中国侏罗纪古气候分区与演变[J]. *地学前缘*, 24(1): 107-142.

- 邓胜徽. 2007. 中生代主要植物化石的古气候指示意义[J]. 古地理学报, 9(6): 559-574.
- 丁素婷, 孙柏年, 吴靖宇, 李相传. 2010. 甘肃华亭侏罗系*Phoenicopsis (Phoenicopsis) angustifolia* Heer 的表皮构造与碳同位素特征[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 46(1): 14-21.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 杨振宇, 季强, 王涛, 胡建民, 陈宣华. 2007. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 81(11): 1449-1461.
- 何发岐, 张森, 姜志超, 杨兵, 袁琼, 巩雪娇, 郭彩清, 曹晶. 2023. 鄂尔多斯盆地盐池地区延安组孢粉组合的发现及其古气候意义[J]. 地质学报, doi:10.19762/j.cmki.dizhixuebao.2023303.
- 黄迪颖. 2019. 中国侏罗纪综合地层和时间框架[J]. 中国科学: 地球科学, 49(1): 227-256.
- 黄枝高, 周顺琴. 1980. 陕甘宁盆地中生代地层古生物[M]. 北京: 地质出版社, 54-63.
- 江德昕, 王永栋. 2002. 内蒙古东胜中侏罗世孢粉植物群与沉积环境. [J] 沉积学报, 20(1): 47-53.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 张帆. 2021. 鄂尔多斯盆地直罗组聚煤规律及其对古气候和铀成矿环境的指示意义[J]. 煤炭学报, 46(7): 2331-2345.
- 金培红, 王姿晰, 董俊玲, 远继东, 毛子强, 李玉琼, 孙柏年. 2017. 内蒙古准格尔旗古城煤矿中侏罗世银杏类化石及其对古大气 CO₂ 的指示[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 53(1): 1-8.
- 李慧. 2018. 华南二叠纪-三叠纪之交松柏植物化石研究及古气候定量重建[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 57-80.
- 李海龙, 张宏仁, 渠洪杰, 蔡向民, 王猛. 2014. 燕山运动“绪动/A 幕”的本意及其锆石U-Pb年代学制约[J]. 地质论评, 60(5):1026-1042.
- 李军, 杨倩, 陈慧, 唐德亮, 安鹏程, 吴靖宇. 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[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 55(5): 561-570.
- 李琪佳, 李军, 安鹏程, 唐德亮, 朱玉婷, 丁素婷, 吴靖宇. 2017. 甘肃华亭中侏罗统延安组植物群组成及古气候指示[J]. 古生物学报, 55(1): 94-107.
- 栗惠文, 董曼, 田宁, 陈林, 开璐璐, 罗根明, 杨浩. 2022. 新疆沙尔湖中侏罗世狭叶拟刺葵(*Phoenicopsis angustifolia* Heer)的古环境意义[J]. 地球科学, 47(2): 532-543.
- 李云峰. 2016. 鄂尔多斯盆地中侏罗世植物多样性和古气候[D]. 长春: 吉林大学, 118-123.
- 刘军, 马利涛, 彭琳, 陈应权, 张立, 范俊杰, 闫德飞. 2016. 甘肃宝积山盆地中侏罗世石拐茨康叶表皮构造及古环境意义[J]. 世界地质, 35(4): 909-919.
- 刘贤赵, 张勇, 宿庆, 田艳林, 全斌, 王国安. 2014. 现代陆生植物碳同位素组成对气候变化的响应研究进展[J]. 地球科学进展, 29(12): 1341-1354.
- 马晔, 刘锦春. 2013. $\delta^{13}\text{C}$ 在植物生态学研究中的应用[J]. 西北植物学报, 33(7): 1492-1500.
- 任纪舜. 1989. 中国东部及邻区大地构造演化的新见解[J]. 中国区域地质, 4: 289-300.
- 尚玉珂. 1995. 内蒙古东胜延安组孢粉研究[J]. 微体古生物学报, 12(4): 398-420.
- 孙柏年, 闫德飞, 解三平, 王永栋. 2009. 化石植物气孔与碳同位素的分析及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1-222.
- 孙立新, 张云, 张天福, 程银行, 李艳峰, 马海林, 杨才, 郭佳成, 鲁超, 周晓光. 2017. 鄂尔多斯北部侏罗纪延安组、直罗组孢粉化石及其古气候意义[J]. 地学前缘, 24(1): 32-51.
- 王雪莲, 熊聪慧, 孙柏年, 吴靖宇, 杜宝霞. 2020. 植物化石角质层分析实验技术总结及探索[J]. 地质通报, 94(8): 2476-2486.
- 王瑜, 孙立新, 周丽云, 谢玥婷. 2018. 燕山运动与华北克拉通破坏关系的讨论[J]. 中国科学: 地球科学, 48(5): 521-535.

- 肖良, 李勇, 周建仁, 李相传, 郭俊锋, 何文龙. 2014. 新疆吐哈盆地中侏罗世古大气CO₂重建[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 50 (2): 154-160.
- 尹凤娟, 侯宏伟. 1999. 陕西彬县地区中侏罗世延安组孢粉植物群及其意义[J]. 植物学报, 41(3):325-329.
- 张世辉, 肖良, 薛进庄, 孟美岑, 秦敏, 崔莹, 王德明. 2021. 云南早泥盆世植物稳定碳同位素特征及其古气候意义[J]. 古地理学报, 23(5): 887-900.
- 赵越, 杨振宇, 马醒华. 1994. 东亚大地构造发展的重要转折[J]. 地质科学, 29(2): 105-118.
- 张宏仁, 张永康, 蔡向民, 渠洪杰, 李海龙, 王猛. 2013. 燕山运动的“绪动”—燕山事件[J]. 地质学报, 87(12): 1779-1790.