

文章编号: 1004—5589 (2022) 01—0001—14

河南禹州早二叠世山西组二₁煤组植物化石

张明达¹, 郭晓宇², 史骁¹

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;
2. 内蒙古煤炭建设工程(集团)总公司, 呼和浩特 010010

摘要: 报道了河南省禹州市神垕镇马垌剖面山西组二₁煤组的植物化石 21 属 42 种。该植物群以真蕨纲和种子蕨纲繁盛为特征, 楔叶纲、瓢叶目、科达纲、苏铁纲及石松纲植物亦有一定的数量, 属于华夏植物群中期组合特征, 地质时代为早二叠世亚丁斯克期。结合国内同期植物群的对比, 首次将该植物群的发育与全球气候变化及海平面升降相联系: 当气候由冰室气候转变为暖室气候、海平面上升时, 植物群演替加快, 光合效率增加引起 O₂ 剧增及 CO₂ 剧降。

关键词: 冰室气候; 温室气候; 植物群演替; 早二叠世; 华夏植物群; 山西组; 二₁煤组

中图分类号: Q914.2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1004-5589.2022.01.001

Fossil plants from II₁ coal member of Early Permian Shanxi Formation in Yuzhou, Henan Province

ZHANG Mingda¹, GUO Xiaoyu², SHI Xiao¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China;
2. Coal Construction Engineering, Inner Mongolia, Hohhot 010010, China

Abstract: 42 species belonging to 21 genera fossil plants discovered from the II₁ coal member of the Shanxi Formation at Madong section of Shenhou Town, Yuzhou City, Henan Province, were reported. The flora is dominated by filicopsids and pteridospermopsids. Sphenopsids, noeggerathiopsids, cordaitopsids, cycadopsids and lycopsida are also numerous. It has typical characters of Cathaysian flora in middle phase, and is aged in Artinskian (Early Permian). Based on the comparison between the cotemporary floras phase in China, this flora is connected to the global climate change and sea-level undulation for the first time. As the climate changing from ice-house to green-house and the sea-level rising, floral succession was enhanced and the photosynthetic efficiency was greatly improved, great amount of atmospheric CO₂ was consumed and caused a sharp arising of O₂.

Keywords: ice-house climate; green-house climate; floral succession; Cisuralian; Cathaysian flora; Shanxi Formation; II₁ coal member

0 引言

晚古生代晚期全球植物可以划分为四大区系, 包括安加拉植物区、欧美植物区、华夏植物区和冈瓦纳植物区^[1]。中国是唯一一个四大植物区系皆

具有分布的国家^[2], 也是华夏植物群的分布中心。华夏植物群的代表分子包括东方型鳞木类、瓣轮叶类、束羊齿类、带羊齿类(地方种)、齿叶类、织羊齿类、大羽羊齿类、贝叶属等^[2-3]。近年来, 前人对于华夏植物群重要分子的分类学研究、植物群

收稿日期: 2021-09-28; 修订日期: 2022-01-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(31670215, 31700183)

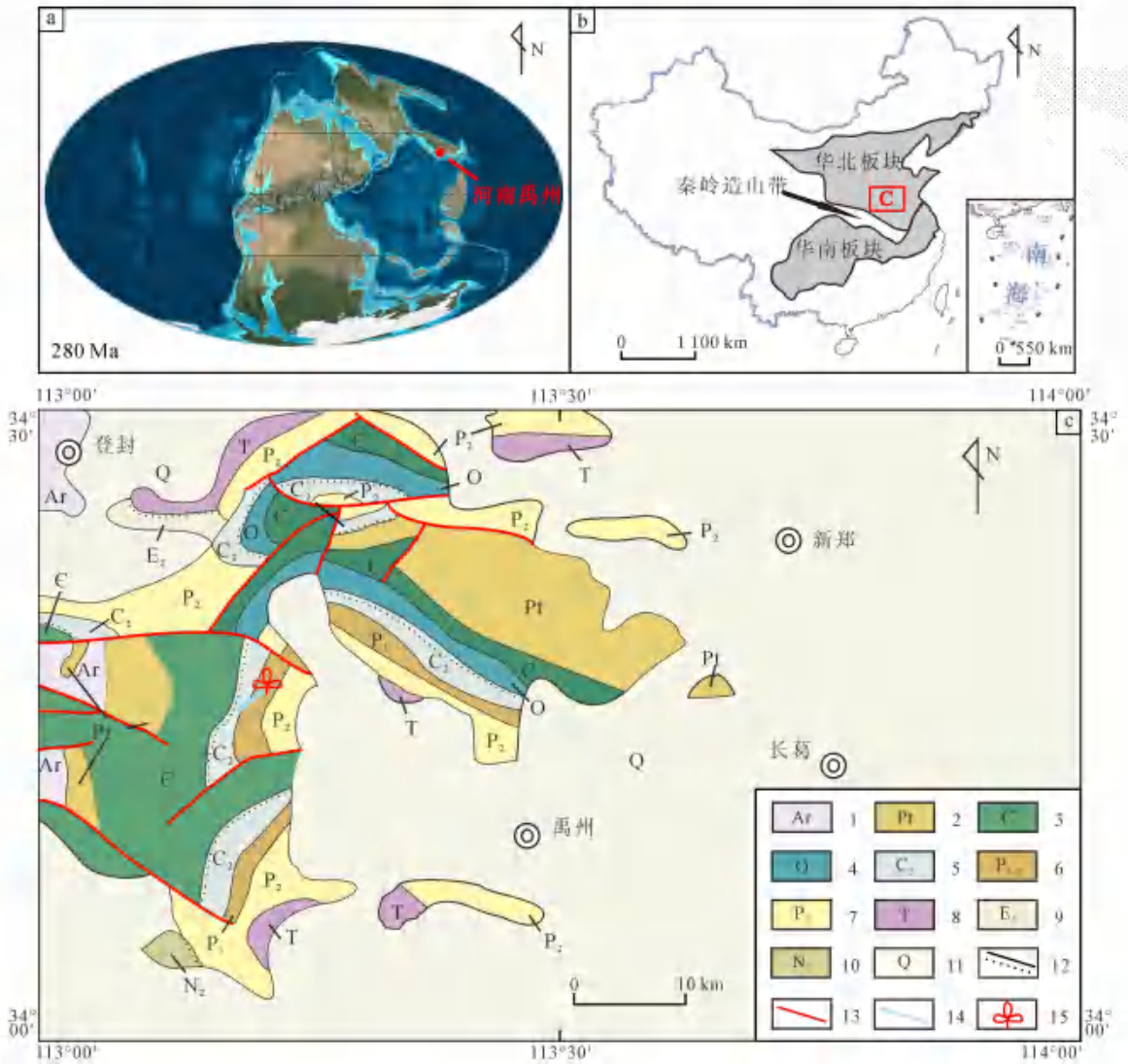
第一作者: 张明达(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事古生物学与地层学研究。E-mail: mdzhang18@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 史骁(1987—), 男, 博士, 主要从事古植物学研究。E-mail: xiaoshi@jlu.edu.cn

发育和演替研究已取得一系列进展^[4]，对于华夏植物群的生态学、埋藏学、古植物地理区系等方面的研究也取得诸多新的成果^[5-6]，但是对于华夏植物群与环境的协同演化关系还缺乏清晰的认识。石炭—二叠纪时期，地球上又一次经历了冈瓦纳极地冰川事件，并在早二叠世早期达到盛冰期，是研究显生宙植被与冰室气候相互作用的重要时期。

位于北半球低纬度地区的华北板块（图1），在中奥陶世末期整体抬升后，经历了长期风化剥蚀，地表发生准平原化，直至早石炭世末期—晚石炭世初期才下降，沉积了一套以海陆交互相、海相

为特征的煤系，并于早二叠世晚期进入陆相沉积阶段^[7-9]。华北地台南部的豫西地区，晚古生代含煤地层具有“北型南相”特征^[10-12]，石炭—二叠纪海相地层和海泛层发育，热带—亚热带暖湿气候环境下生长众多的华夏植物典型分子，构成著名的禹州植物群^[13-14]；滨海三角洲沉积体系中，植被茂盛，聚煤沼泽广布，煤层十分发育，含煤岩系最厚可达720 m^[15-16]。这些特征与华北板块主体石炭—二叠纪地层特征有所不同，显示出与华南板块有一定的相似性^[17-18]；因此，豫西地区的石炭—二叠纪植物也兼具南、北华夏植物亚区的特征^[19]。



1. 太古界; 2. 元古界; 3. 寒武系; 4. 奥陶系; 5. 上石炭统; 6. 中一下二叠统; 7. 上二叠统; 8. 三叠系; 9. 始新统; 10. 上新统; 11. 第四系; 12. 角度不整合; 13. 断层; 14. 剖面位置; 15. 化石点。

图1 河南禹州地质图
Fig. 1 Geological map of Yuzhou City, Henan Province

笔者于 2019—2021 年对河南省晚古生代及中生代植物化石调查中, 系统采集禹州市神垭镇二叠纪山西组二₁煤组植物化石 180 余块, 经鉴定计有 21 属 42 种; 在此基础上, 通过对植物群性质、时代和同期植物群的对比, 初步探讨了成煤植物与气候的相互关系。

1 地质概况

研究区位于距河南省禹州市神垭镇磨街乡大涧村—马垌村一带 (图 1), 属于栾川—固始一线以北的华北板块南部。华北晚古生代沉积盆地的形成与其南北两侧的碰撞造山作用密切相关^[20]。华北板块北缘经过早古生代的构造演化后, 随着早海西期古亚洲洋向华北地块北缘之下的俯冲, 华北板块北缘抬升形成新的增生造山带, 也称为海西期增生褶皱带^[21]。华北板块北部呈现挤压拗陷构造状态, 具有前 (后) 陆盆地性质, 又由于华北地块南缘受到古特提斯洋壳的俯冲作用而仰起, 从而形成南隆北倾的构造古地理格局, 在地形上呈现为南高北低的态势, 至晚石炭世, 华北地块北部开始下降, 接受了沉积^[22]。此时期, 海水从北东和南东方向入侵研究区, 海侵方向由东向西逐步推进; 至二叠纪, 海水逐渐退去, 研究区沉积逐步由海陆交互相

沉积向陆相沉积转换^[23]。整体来看, 晚石炭世至早二叠世研究区为一套海陆交互相沉积。

研究区出露有前寒武系至三叠系 (图 1)。前寒武系主要由太古界登封群、太华群组成, 下元古界由嵩山群等变质岩系组成, 中元古界由熊耳群、汝阳群组成, 上元古界由洛峪群及震旦系组成。下古生界由寒武系和奥陶系海相沉积构成, 缺失志留系、泥盆系及下石炭统, 上古生界包括上石炭统和二叠系, 属于海陆交互相和陆相沉积。石炭—二叠系自下而上包括由山西式铁矿、铝土矿及海陆交互相碎屑岩 (局部含煤) 构成的本溪组, 由海相碳酸盐岩及碎屑岩组成的太原组, 由海陆交互相—陆相含煤沉积构成的山西组 (含二₁煤组, 俗称大煤)、下石盒子组、上石盒子组及孙家沟组。为深入了解山西组底部二₁煤组中植物化石的特征, 笔者选取禹州市磨街乡马垌村老庄沟—老冯沟一线, 对山西组下部二₁煤组地层进行了实测, 该剖面起点坐标为: 34°10′27.41″N, 113°10′30.45″E; 终点坐标为: 34°10′31.69″N, 113°10′40.41″E (图 2)。剖面层序如下:

山西组 厚度/m
4. 土黄色厚层状细砂岩夹薄层粉砂岩 (“大占砂岩”) > 15.4



图 2 马垌剖面岩性柱状图^[1]
Fig. 2 Lithological column of Madong section

3. 土黄色中厚层状细砂岩(1.0 m), 向上为灰绿色泥岩(0.9 m)、粉砂质泥岩(0.3 m)夹灰黑色泥岩(0.2 m)。产状 $148^{\circ} \angle 26^{\circ}$ 2.4
2. 灰绿色细砂岩(1.2 m), 向上为灰绿色中厚、薄层状细砂岩夹灰绿色泥岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩及煤层(0.4 m), 含植物化石。产状 $143^{\circ} \angle 24^{\circ}$ 2.1
1. 土黄色薄层状粉砂岩夹黄绿色薄层状粉砂质泥岩(未见底), 含大量植物化石: *Lepidostrobus* sp., *Sphenophyllum emarginatum* Brongn., *S. minor* (Sterz.) Gu et Zhi, *S. verticillatum* (Schloth.) Brongn., *Bowmanites fusiformis* Wang, *Mesocalamites cistiformis* Stur, *Asterophyllites robustus* Xie, *Tingia carbonica* (Schenk) Halle, *T. ? gerardii* Stockm. et Math, *T. partita* Halle, *T. spiniformis* Wang, *Discinites orientalis* Gu et Zhi, *Sphenopteris firmata* Sze, *S. nystroemii* Halle, *S. tenuis* Schenk, *Pecopteris anderssonii* Halle, *P. candolleana* Brongn., *P. cyathea* (Schloth.) Brongn., *P. heteropinna* Gu et Zhi, *P. lativenosa* Halle, *P. marginata* Gu et Zhi, *P. moneyi* Zeill., *P. (Asterotheca) norinii* Halle, *P. (Asterotheca) orientalis* (Schenk) Pot., *P. taiyuanensis* Halle, *Cladophlebis nystroemii* Halle, *Alethopteris ascendens* Halle, *Emplectopteris triangularis* Halle, *Callipteridium*

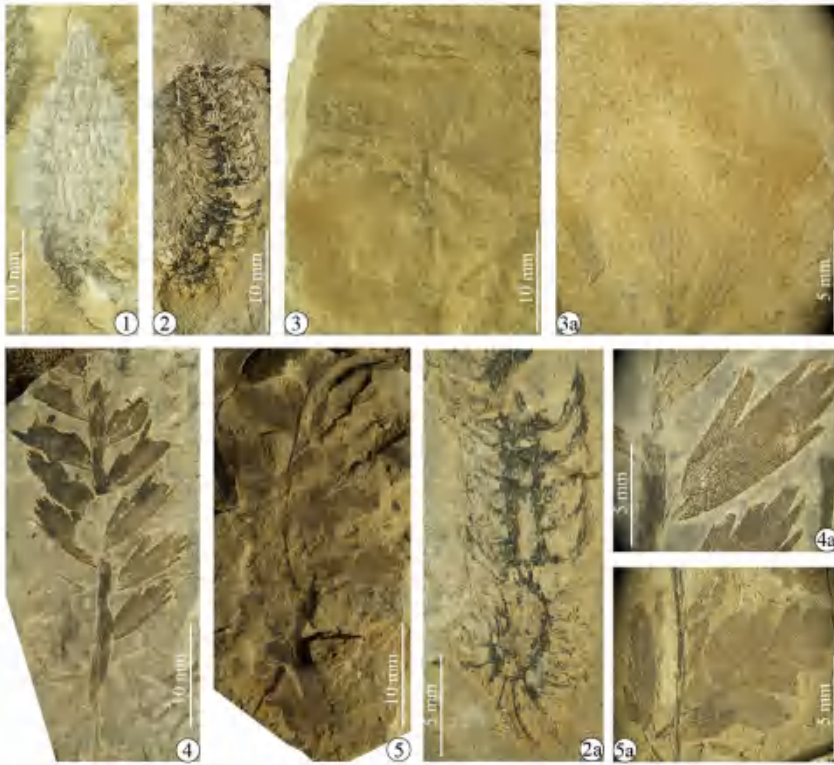
koraiense (Tok.) Kaw. *Taeniopteris tingii* Halle, *T. tongshanensis* Stockm. et Math., *T. yernauxii* Stockm. et Math., *Aphlebia* sp., *Pterophyllum cutelliforme* Sze, *P. daihoense* Kaw., *Cordaites principalis* (Germ.) Gein., *C. schenkii* Halle, *Cordaianthus volkmannii* (Ett.) Zeill., *Cornucarpus patulus* Halle, *Acanthocarpus* sp., *Samaropsis deltata* Wang, *S. wongii* Stockm. et Math., *Carpolithus taxiformis* Stockm. et Math.

>1.1

实测剖面仅出露山西组下部, 其与大风口一带的山西组下部所含化石均见于二₁煤层的底板。其下尚有黑色泥岩、粉砂岩互层, 产小个体腕足和海百合茎等海相动物化石, 说明这一段含植物化石地层属于滨海沼泽相沉积。

2 植物化石组成

河南禹州马垌村剖面早二叠世山西组二₁煤组植物化石丰富, 计有 21 属 42 种, 包括: 石松纲、楔叶纲、瓢叶目、真蕨纲和种子蕨纲、苏铁纲、科达纲、裸子植物种子等(图3~5)。化石标本全部



1. *Lepidostrobus* sp., HN19(2)-0020A; 2, 2a. *Bowmanites fusiformis*, HN19-0003; 3, 3a. *Sphenophyllum minor*, HN19(2)-0019; 4, 4a. *Tingia partita*, HN19-0124; 5, 5a. *Sphenopteris firmata*, HN19-0024.

图3 二₁煤组植物化石 (HN19(2)-0020A, HN19-0003, HN19(2)-0019, HN19-0124, HN19-0024)

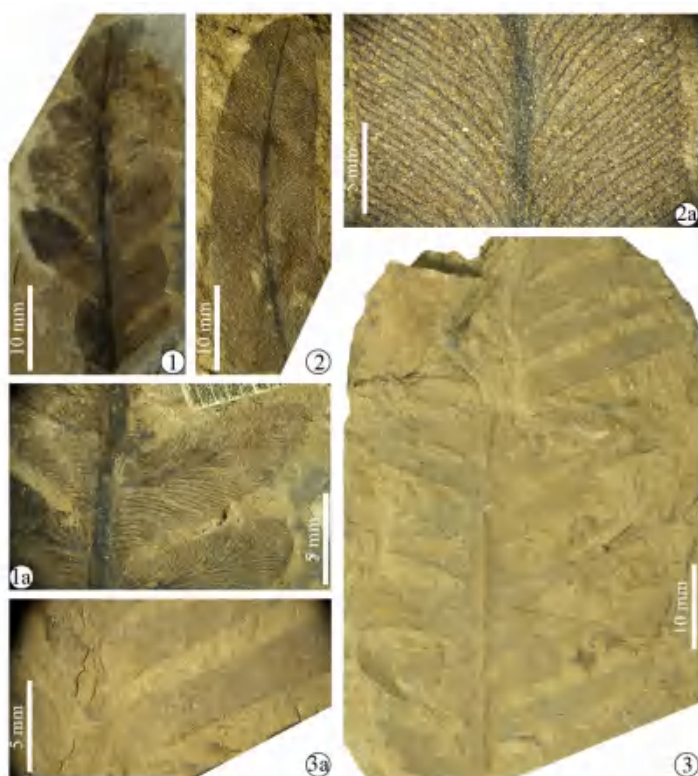
Fig. 3 Fossil plants of II₁ coal member



1, 1a. *Pecopteris taiyuanensis*, HN19-0162; 2, 2a. *Emplectopteris triangularis*, HN19-0020; 3, 3a. *Taeniopteris yernauxii*, HN19-0002; 4, 4a. *Pecopteris anderssonii*, HN19-0140。

图 4 二₁ 煤组植物化石 (HN19-0162, HN19-0020, HN19-0002, HN19-0140)

Fig. 4 Fossil plants of II₁ coal member



1, 1a. *Callipteridium koraiense*, HN19-0236; 2, 2a. *Taeniopteris tongshanensis*, HN19-0072; 3, 3a. *Pterophyllum daihoense*, HN19(2)-0060。

图 5 二₁ 煤组植物化石 (HN19-0236, HN19-0072, HN19(2)-0060)

Fig. 5 Fossil plants of II₁ coal member

保存在吉林大学古生物学与地层学研究中心。现将各类植物特征分述如下:

石松纲 1 属 1 种 仅见到繁殖器官 *Lepidostrobus* sp.。

楔叶纲 4 属 6 种 包括楔叶植物茎、叶和孢子叶穗: *Mesocalamites cistiformis* Stur, *Asterophyllites robustus* Xie, *Sphenophyllum emarginatum* Brongn., *S. minor* (Sterz.) Gu et Zhi, *S. verticillatum* (Schloth.) Brongn., *Bowmanites fusiformis* Wang。

瓢叶目 2 属 5 种 主要为茎叶和繁殖器官: *Tingia carbonica* (Schenk) Halle, *T. ? gerardii* Stockm. et Math., *T. partita* Halle, *T. spiniformis* Wang, *Discinites orientalis* Gu et Zhi。其中, *Tingia* Halle 是华夏植物群重要的代表类群之一^[2]。

真蕨纲和种子蕨纲 7 属 20 种 分异度高, 包括楔羊齿属 3 种 *Sphenopteris firmata* Sze, *S. nystromii* Halle, *S. tenuis* Schenk; 栉羊齿属 10 种 *Pecopteris anderssonii* Halle, *P. candolleana* Brongn., *P. cyathea* (Schloth.) Brongn., *P. heteropinna* Gu et Zhi, *P. lativenosa* Halle, *P. marginata* Gu et Zhi, *P. moneyi* Zeill., *P. (Asterotheca) norinii* Halle, *P. (Asterotheca) orientalis* (Schenk) Pot., *P. taiyuanensis* Halle; 枝脉蕨属 1 种 *Cladophlebis nystromii* Halle; 座延羊齿属 1 种 *Alethopteris ascendens* Halle; 织羊齿属 1 种 *Emplectopteris triangularis* Halle; 丽羊齿属 1 种 *Callipteridium koraiense* (Tok.) Kaw.; 带羊齿属 3 种 *Taeniopteris tingii* Halle, *T. tongshanensis* Stockm. et Math., *T. yernauxii* Stockm. et Math.。

苏铁纲 1 属 2 种 *Pterophyllum cutelliforme* Sze, *P. daihoense* Kaw.。

科达纲 2 属 3 种 包括茎叶和繁殖器官: *Cordaites principalis* (Germ.) Gein., *C. schenkii* Halle, *Cordaianthus volkmannii* (Ett.) Zeill.。科达纲在二₁煤组大量存在。

裸子植物种子 4 属 5 种 *Cornucarpus patulus* Halle, *Acanthocarpus* sp., *Samaropsis deltata* Wang, *S. wongii* Stockm. et Math., *Carpolithus taxiformis* Stockm. et Math.。

该植物群的总体特征是以真蕨纲和种子蕨纲植物为主体, 栉羊齿类十分繁盛, 其次为楔叶纲和瓢叶目植物, 其余占比较少。出现典型分子三角织羊

齿 *Emplectopteris triangularis* Halle, 科达纲化石数量非常丰富, 是滨海潮坪沼泽中的主要聚煤产物。

3 植物群的时代

Bowmanites 一属曾出现于内蒙古乌达苏海图的山西组以及宁夏石嘴山沙巴台的山西组, 与 *Sphenophyllum emarginatum* Brongn., *Tingia carbonica* (Schenk) Halle, *T. partita* Halle 等共存^[24]。

在晚石炭世时期, 相当一部分的欧美植物群的楔叶属种在华北及阿拉善地区都有发现, 其中包括 *Sphenophyllum emarginatum* Brongn.^[25], 因此印证了前人提出的, 在晚石炭世时期, 华夏植物群与欧美植物群的植物信息存在密切交流的观点。*Sphenophyllum verticillatum* (Schloth.) Brongn. 在华北的太原组—上石盒子组以及西北地区的太原组—大黄花组均有出现^[26]。*Sphenophyllum minor* (Sterz.) Gu et Zhi 出现在早二叠世晚期, 龙首山地区楔叶属的物种多样性达到顶峰, 而到了中二叠世至晚二叠世, 该地区没有楔叶属的化石记录^[27-28]。

Tingia 为华夏植物区特有属, *Tingia partita* Halle 曾发现于山西太原的下石盒子组, 以及朝鲜寺洞群的 D 层。到目前为止, 在国内其地质历程皆存在于下石盒子组的相当层位^[29-31]。*Tingia carbonica* (Schenk) Halle 出现在禹州大风口、方山滴水潭、平顶山煤矿的山西组 (神屋组) 和下石盒子组 (小风口组) 中^[1]。

Emplectopteris triangularis Halle 是中国华北、西北二叠纪华夏型植物群的重要组成分子, 见于太原组、山西组、下石盒子组及其相当层位^[1,32]; 但是该种主要分布于山西组及其相当层位, 其他层位远没有山西组丰富和分布广泛, 是中国北方确定地层年代的重要化石^[33]。李星学^[2]将该种作为中期华夏植物群的重要代表。

Taeniopteris yernauxii Stockm. et Math. 被记述于河北开平赵各庄群中部^[34], 在华北和西北地区山西组和下石盒子组及相当层位中分布较广^[1,24,32]; 在河北唐山^[34]、两淮地区的下二叠统^[32]、豫西下—中二叠统山西组^[1]、山东淄博等地的下二叠统^[24]均有发现, 区域上仅存于华北板块之上, 该种的出现对二₁煤组植物群性质的判定起到重要作用。

Pterophyllum daihoense Kaw. 的模式标本被记

述于朝鲜寺洞群 D 层。李星学^[2]指出: “山西组植物群和开平赵各庄群中部植物群以及朝鲜寺洞群 D 层的植物群基本一致, 它们所在的沉积都应为同一时期的产物。” 本种标本也被记述于内蒙古准格尔旗石盒子群^[35]、山东淄博山西组^[36]。*Pterophyllum daihoense* Kaw. 是华夏植物群的特征种^[37]。

Cordaites principalis (Germ.) Gein. 这个种的地质历程十分漫长, 在华北地区的产出层位自本溪组直至上石盒子组, 在西北地区则产出于太原组一大黄沟组^[38-39], 而在华南则见于茅口期—长兴期地层中^[25, 32, 40]。

上述资料表明, 当前植物群无论是仅限于早—中二叠世太原组—山西组及其相当层位的分子, 如 *Sphenophyllum emarginatum* Brongn., *S. verticillatum* (Schloth.) Brongn., *S. minor* (Sterz.) Gu et Zhi, *Bowmanites fusiformis* Wang, *Tingia carbonica* (Schenk) Halle, *Emplectopteris triangularis* Halle 等; 还是可以延伸到上石盒子组的分子, 如 *Tingia partita* Halle, *Taeniopteris yernauxii* Stockm. et Math., *Pterophyllum daihoense* Kaw., *Cordaites principalis* (Germ.) Gein. 等, 都是中国二叠纪常见的分子, 其中出现在早二叠世常见的属种就有 15 属 27 种。因此, 当前植物群产出层位可能与中国华北山西组(早二叠世亚丁斯克期—空谷期早期)下部相当。

此外, 当前植物群下伏太原组顶部海相灰岩中存在牙形刺化石 *Sweetognathus whitei*, 可以确定二煤组的时代为早二叠世亚丁斯克期^[1]。

4 植物群对比

4.1 与河南禹州大风口植物群的对比

河南禹州大风口植物群二叠纪植物群十分发育, 包括山西组、下石盒子组和上石盒子组 3 个层位, 其中采自山西组(神垕组)大占砂岩之下二₁煤组的植物化石共计 17 属 27 种^[1], 以真蕨、种子蕨和鳞木类为主。当前植物群与禹州大风口二₁煤组植物群有 10 个种相同(表 1), 分别占各自植物群属种的 1/4 和 1/3, 这些种均为华夏植物群的特征或常见分子。两者相同比例不高, 反映出两植物群在时代基本一致的前提下, 尚有所差异, 大风口二₁煤组植物含有很多鳞木类根、茎化石, 而当前植物群的鳞木类化石稀少, 显示出当时两地植物分布、埋藏有一定的分异。

大占砂岩与砂锅窑砂岩之间山西组上部含有大量植物化石, 计有 29 属 56 种, 以真蕨、种子蕨和有节类为主, 以 *Lepidodendron oculus-felis*, *Lobatanularia sinensis*, *Emplectopteris triangularis*, *Progigantonoclea henanensis* 为代表, 出现了苏铁类和大羽羊齿类。当前植物群与禹州大风口山西组上部植物群有 13 个种相同, 分别占各自植物群属种的 1/3 和 1/4, 显示出两个层位的化石既有相同的继承性特征, 也有更多的新分子出现。

4.2 与西北地区早二叠世中期植物群对比

西北地区早二叠世中期植物组合代表地层有北祁连山、河西走廊、龙首山、甘肃北山等, 植物化石以 *Emplectopteris triangularis*, *Emplectopteridium alatum* 为代表^[41]。优势植物类群为真蕨纲和种子蕨纲, 其总数达 17 属 48 种之多; 楔叶纲植物十分发育, 达 7 属 22 种之多。

两植物群相同属共有 11 个, 共有或可比较的种 13 个(表 1), 这些种均属于二叠世华夏植物群的特征或常见分子, 说明两个植物群的关系十分亲近, 反映出在早二叠世中期, 华北地区与西北地区的植物面貌十分相似。

4.3 与内蒙古乌达山西组植物群对比

内蒙古乌达山西组植物群的化石采集于内蒙古乌达地区早二叠世山西组主煤相邻地层, 共 25 属 54 种, 以大量出现的蕨类和种子蕨分子为特征^[42-43]。两植物群相同属共有 6 个, 共有或可比较的种 11 个(表 1)。*Emplectopteris triangularis* 和 *Pterophyllum daihoense* 在两植物群的共同出现, 体现了两者的时代基本一致。Schmitz et al.^[44]对乌达地区太原组顶部附近火山灰层进行同位素定年, 显示太原组时代为早二叠世阿瑟尔期。因此, 乌达地区山西组植物群时代应晚于阿瑟尔期。

4.4 与吉林汪清早二叠世和盛植物群对比

吉林省汪清县大兴沟镇和盛植物群由 18 属 31 种组成, 主要由真蕨纲与种子蕨纲以及楔叶纲分子组成, 多数属种为华夏植物群的重要和常见分子, 其中不乏标志或特有分子, 如 *Emplectopteris*, *Taeniopteris yernauxii*, *Pecopteris huichensis*, *P. marginata* 等。和盛植物群具有华夏植物群性质, 在古植物地理上属于华夏植物地理大区华北植物区^[45]。和盛组的地质时代确定为早二叠世亚丁斯克—空谷早期, 其上的大蒜沟组海相化石 *Parafusulina* 带和

Pseudodoliolina 带时代为空谷期晚期—罗德期, 其下的山秀岭组海相化石 *Triticites* 带和 *Pseudoschwagerina* 带时代为晚石炭世卡西莫夫期—早二叠世阿瑟尔期^[46-48]。此外, 和盛植物群化石夹层的碎屑锆石测年也表明其地质时代不老于亚丁斯克期^[44]。当前植物群与和盛植物共有分子有 5 属 9 种 (表 1), 共有分子较少, 可能与纬度差异有关。

4.5 与塔里木盆地北缘早二叠世植物群对比

孙柏年等^[49]与吴秀元等^[50]介绍了一个塔里木盆地欧美性质的植物群。研究结果表明, 塔里木盆

地西北缘柯坪县库普库兹满组和开派兹雷克组含有大量欧美型分子, 计 21 属 52 种。库普库兹满组化石层位大致与山西组、梁山组或栖霞组相当^[33]。其中开派兹雷克组下亚组与库普库兹满组植物化石基本相似, 而其上亚组所产植物则差异较大^[33]。可以看出, 该植物群与二₁煤组植物群属于不同植物区系, 共有或可对应比较分子有 5 属 9 种 (表 1), 均是一些广布型分子, 华夏植物群中的一些特有分子在塔里木盆地相当时代的地层中都难寻踪迹。

表 1 各植物群化石对比表
Table 1 Comparison of fossils of various floras

植物化石	植物群						
	二 ₁ 煤组植物群 (本文)	禹州大风口二 ₁ 煤组植物群 ^[1]	禹州大风口山西组上部植物群 ^[1]	西北地区早二叠世中期植物群 ^[41]	内蒙古乌达山西组植物群 ^[42-43]	吉林汪清早二叠世和盛植物群 ^[26,45]	塔里木盆地北缘早二叠世植物群 ^[49-50]
<i>Lepidostrobus</i> sp.	+	+	+				
<i>Sphenophyllum emarginatum</i>	+				+		+
<i>S. minor</i>	+	+	+				
<i>S. verticillatum</i>	+	+	+	+			
<i>Bowmanites fusiformis</i>	+						+
<i>Tingia carbonica</i>	+	+		+			
<i>T. partita</i>	+	+	+	+			
<i>Discinites orientalis</i>	+		+	+			
<i>Sphenopteris firmata</i>	+				+		
<i>S. nystroemii</i>	+				+		
<i>S. tenuis</i>	+		+	+		+	+
<i>Pecopteris anderssonii</i>	+				+		+
<i>P. candolleana</i>	+	+	+	+		+	
<i>P. cyathea</i>	+					+	
<i>P. lativenosa</i>	+				+		
<i>P. marginata</i>	+					+	
<i>P. moneyi</i>	+				+		+
<i>P. (Asterotheca) orientalis</i>	+			+		+	+
<i>P. taiyuanensis</i>	+		+		+		+
<i>Cladophlebis nystroemii</i>	+	+	+	+			
<i>Alethopteris ascendens</i>	+		+	+			
<i>Emplectopteris triangularis</i>	+		+	+	+	+	
<i>Callipteridium koraiense</i>	+	+	+				
<i>Taeniopteris tongshanensis</i>	+	+		+			
<i>T. yernauxii</i>	+					+	
<i>Pterophyllum cutelliforme</i>	+				+		
<i>P. daihoense</i>	+				+		
<i>Cordaites principalis</i>	+	+	+	+	+	+	+
<i>C. schenkii</i>	+					+	+
<i>Cordaianthus volkmannii</i>	+	+		+			

注: + 为存在植物化石。

5 讨论

石炭—二叠纪是地球历史上绿色植被经历冰室和温室环境及其两种气候环境转变的时期, 该时期植被变化对探讨植被与气候的关系、植被对大气二氧化碳浓度的影响、气候变化过程中植被的响应对策等具有重要的科学价值^[51-53]。

5.1 植物群指示的古气候

生物与环境的协同演化研究是近年来地球生物学研究的一个热点^[54-55], 而目前的研究主要集中于气候对生物时空演变的控制, 而关于生物对气候的影响或气候受生物作用的调节方面的研究较少^[56-58]。华北地区连续的石炭—二叠纪地层序列及其中丰富的植物化石, 以及其处于冰期向暖期转化的重要时间节点, 为研究地质历史时期生物对气候的影响提供了重要的窗口。

河南禹州地区山西组二₁煤组发育大量植物化石, 以真蕨类的 *Pecopteris*、种子蕨类的 *Taeniopteris*、楔叶类的 *Sphenophyllum* 及瓢叶目的 *Tingia* 高分异为特征。其中, *Pecopteris* 化石中含有不少生殖羽片, 如 *Pecopteris (Asterotheca) norinii* Halle, *P. (Asterotheca) orientalis* (Schenk) Pot., 发育聚合囊和单缝孢, 与现生莲座蕨目 (Marattiales) 植物的繁殖器官一致。现生莲座蕨目莲座蕨科 (Angiopteridaceae) 植物生长于亚洲热带和亚热带以及太平洋诸群岛; 合囊蕨科 (Marattiaceae) 仅 *Marattia* 1 属, 生长于中国台湾和菲律宾; 天星蕨科 (Christenseniaceae) 产于南洋群岛、菲律宾和亚洲热带大陆; 多孔蕨科 (Danaeaceae) 为热带美洲特有科。因此, 就蕨类植物而言, 其反映的古气候特征属于热带—亚热带, 与其古纬度一致。楔叶类植物现存仅木贼科, 湿生或浅水生草本, 分布于世界各地。瓢叶目和科达类 *Cordaites* 的个别种都是石炭—二叠纪华夏植物群的特有植物, 现已知其生长于成煤沼泽环境, *Cordaites* 被认为是重要的成煤植物。本内苏铁目 *Pterophyllum* 从晚石炭世出现到早白垩世末期绝灭, 被认为与苏铁目植物相近, 现生苏铁植物多分布于热带—亚热带地区, 为喜光植物, 生长于温暖、干燥及通风良好的地段。石松类植物在当前植物群中数量不多, 仅见有保存不好的繁殖器官 *Lepidostrobus*, 一般认为鳞木类生活于潮湿的滨海沼泽, 类似于现今的红树林生态环境。综上所述,

当前植物群所反映的古气候条件总体为热带、亚热带, 除了楔叶类植物和少量的鳞木类生活在滨海沼泽地带外, 大量的真蕨、种子蕨和苏铁类植物生活在阳光充足、透水性良好的三角洲平原地带。

位于大占砂岩之上的山西组上部植物化石组合较当前植物群对比有了较大的发展, 主要表现在种子蕨类、大羽羊齿、苏铁类的兴起, 楔叶类进化以及鳞木类的恢复。鳞木类的繁盛说明潮湿的滨海沼泽广布。楔叶类中 *Lobatannularia* 的出现说明植物的光利用率大大提高。同时, 种子蕨类、大羽羊齿类中网状叶脉的发育, 也同样说明光合效率的提高。此外, 苏铁类的兴起也是对环境改变的响应。总体来看, 山西组上部植物更为进化, 所反映的古气候较山西组下部二₁煤组时潮湿温暖, 滨海沼泽更加广泛, 光合作用也更加有效。

5.2 植物群的演化与冰室气候

山西组二₁煤组中发育的大量植物化石记录了北半球热带—亚热带暖湿气候背景下繁茂的滨海三角洲植被景观; 与此同时, 南半球冈瓦纳大陆的极地冰川广泛分布。冈瓦纳大陆石炭—二叠纪冰川首次出现于早石炭世杜内晚期, 早二叠世达到盛冰期, 仅在萨克马尔中期和亚丁斯克中期—空谷早期发育有间冰期^[55,59], 河南省早二叠世山西组的地质时代属于亚丁斯克期—空谷早期, 与冈瓦纳大陆极地冰川发育时间相对应, 植物群的演化可能经历了亚丁斯克早期的冰室气候向亚丁斯克中期—空谷早期间冰期暖湿气候的转变。山西组二₁煤组植物群中鳞木类植物化石的缺乏反映出沼泽环境的萎缩, 可能与冰期发育导致的海平面下降有关; 苏铁类等喜光中生植物的发育说明低地广布。山西组上部植物群中, 鳞木类的繁盛表明滨海沼泽环境广泛发育, 可能与海平面上升有关。种子蕨类的繁盛表明植物分异加强, 气候适宜。楔叶类 *Lobatannularia* 的出现, 表明植被的层次结构进一步分明。上述情况表明, 山西组上部在暖湿气候条件下沼泽广布、植被茂盛且结构层次分明。与此同时, 网状叶脉的发育极大地提高了植物的光合作用效率, 大量 CO₂ 被消耗, O₂ 大量产生。

石炭—二叠纪植物的固碳量可能为现代植物固碳量的几十倍, 广布的沼泽使这些被固定的碳大量埋藏, 形成丰富的煤炭并消耗了大气中大量的 CO₂^[60-61]。殷鸿福等^[56]将维管植物与冰期的关系总

结为：植物茂盛→碳埋藏剧增+风化作用加强→ O_2 剧增与 CO_2 剧降→降温与冰期。当前山西组二₁煤组中湿生的石松类和楔叶类植物属种占全部属种的16.3%，而位于大风口剖面的山西组上部植物群中，湿生种类占37.5%，显示出暖湿的气候环境；同时，种子蕨类所占比例也由二₁煤组的

4.7%上升到10.7%。这些植物群组成的变化似与气候变暖密切相关（图6）。植物群繁茂后，地球的碳埋藏量加剧，风化作用增强，大气 O_2 含量剧增与 CO_2 剧降，地球迎来了空谷期中、晚期的又一次降温。

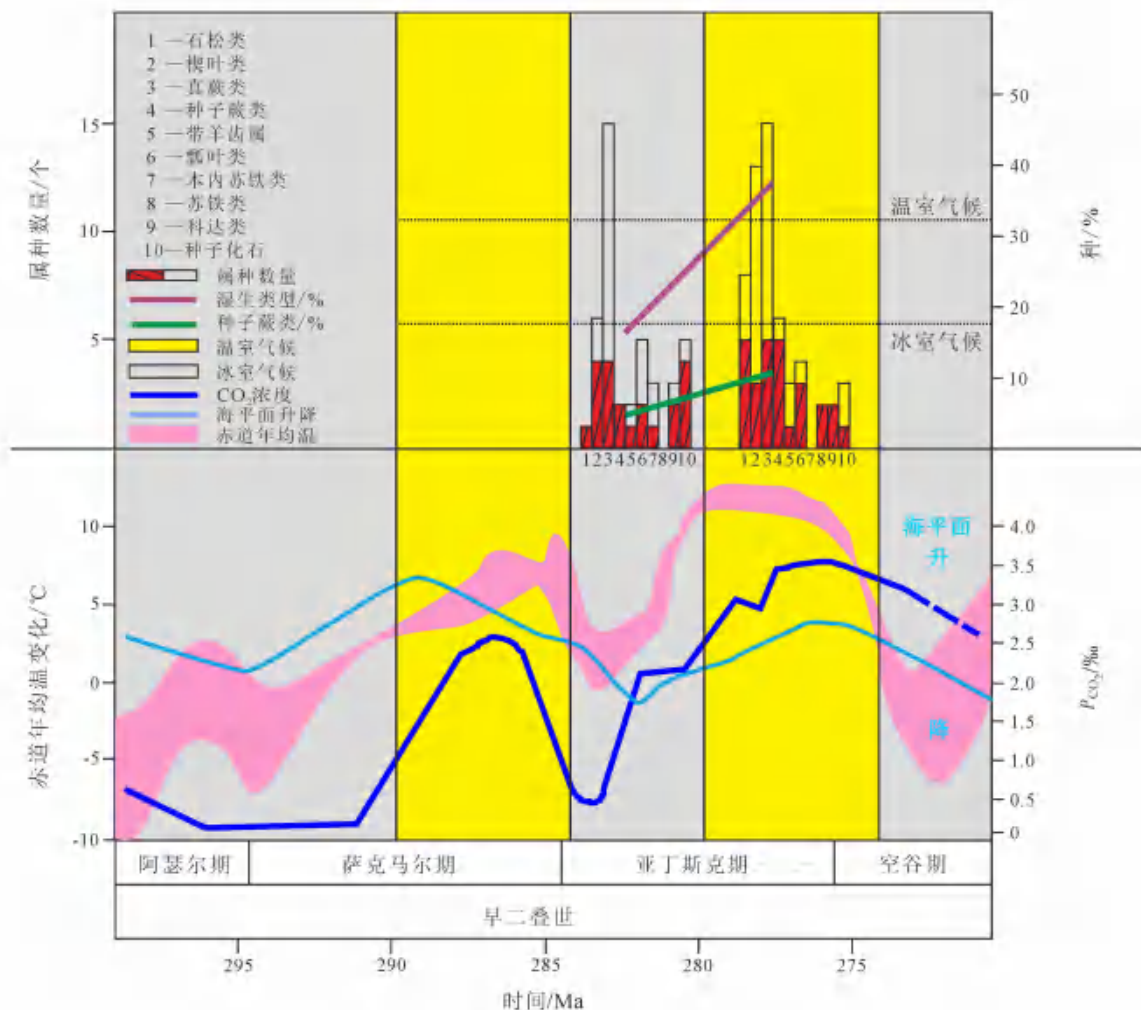


图6 植被变化和古气候的关系图^[62]

Fig. 6 Relationship between vegetation change and paleoclimate

6 结论

(1) 河南禹州神垭镇磨街乡马垌村山西组下部二₁煤组植物化石由21属42种组成，以真蕨类 *Pecopteris* 和科达类 *Cordaites* 繁盛为特征。典型分子 *Emplectopteris triangularis* Halle, *Pterophyllum daihoense* Kaw., *Cordaites principalis* (Germ.) Gein. 等的出现，表明其属于华夏植物群中期组合，时代

为早二叠世。通过下伏太原组顶部海相灰岩中牙形刺化石 *Sweetognathus whitei* 的存在，确定上覆含煤地层的时代始于早二叠世亚丁斯克期，结合与国内相关植物群的对比，将山西组的地质时代确定为亚丁斯克—空谷期早期。

(2) 通过对山西组二₁煤组植物群及山西组上部植物群组成的分析，结合同一时期冈瓦纳大陆极地冰川的发育情况，认为山西组二₁煤组发育于冰

室气候, 而山西组上部则处于亚丁斯克期中晚期—空谷期早期的暖室气候。气候变化导致石松类和楔叶类等湿生植物大量繁盛, 同时也使种子蕨类大发展。植物群繁茂后, 地球的碳埋藏量加剧, 大气成分变化, 再一次发生新的降温。

致谢 感谢吉林大学古生物学与地层学研究中心孙跃武教授在化石采集、拍照和鉴定过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 杨关秀, 谢建华, 高岩, 等. 中国禹西二叠纪华夏植物群—禹州植物群 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 77-175.
YANG G X, XIE J H, GAO Y, et al. The Permian Cathaysian flora in western Henan Province, China - Yuzhou flora [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 77-175.
- [2] 李星学. 华夏植物群的起源、演替与分布 [J]. 古生物学报, 1997, 36 (4): 411-422.
LI X X. The origin, succession and distribution of the Cathaysian flora in East Asia [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1997, 36 (4): 411-422.
- [3] 李星学. 东亚华夏植物群的鳞木类植物 [J]. 中国科学, 1980, 10 (2): 166-171.
LI X X. Lepidodendroid of Cathaysian flora in East Asia [J]. Science China, 1980, 10 (2): 166-171.
- [4] 李星学. 华北月门沟群植物化石: 中国古生物志: 新甲种 [M]. 北京: 科学出版社, 1963: 1-185.
LI X X. Fossil plants of the Yuehmenkou Series, North China: paleontologica sinica: new series A [M]. Beijing: Science Press, 1963: 1-185.
- [5] LI X X, YAO Z Q. Carboniferous and Permian floral province in eastern Asia [J]. Urbana, 1979, 9 (5): 95-101.
- [6] LI X X, WU X Y. Late Paleozoic phytogeographic provinces in China and its adjacent regions [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 1996, 90 (1/2): 41-62.
- [7] 陈世悦. 华北地块南部晚古生代—三叠纪盆山耦合关系 [J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20 (3): 37-43.
CHEN S Y. The basin-range coupling in southern North China block during the Late Palaeozoic to Triassic [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000, 20 (3): 37-43.
- [8] 张鹏飞, 邵龙义, 代世峰. 华北地台晚古生代海侵模式综述 [J]. 古地理学报, 2001, 3 (1): 15-24.
ZHANG P F, SHAO L Y, DAI S F. Discussions on the transgression model of the Late Palaeozoic in the North China platform [J]. Journal of Palaeogeography, 2001, 3 (1): 15-24.
- [9] 程克明, 熊英, 马立元, 等. 华北地台早二叠世太原组 and 山西组煤沉积模式与生烃关系研究 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32 (4): 142-146.
CHENG K M, XIONG Y, MA L Y, et al. Relationship between coal depositional modes and hydrocarbon generation of the Early Permian Taiyuan and Shanxi Formation in Huabei platform [J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32 (4): 142-146.
- [10] 杨起, 李宝芳, 李祯, 等. 河南禹县煤田晚古生代煤系的沉积模式和聚煤特征 [J]. 地球科学—武汉地质学院学报, 1982, 7 (3): 263-274.
YANG Q, LI B F, LI Z, et al. The sedimentary models and coal accumulation characteristics of the Late Paleozoic coal measures in the Yuxian [J]. Earth Science—Journal of Wuhan College of Geology, 1982, 7 (3): 263-274.
- [11] 宋建军, 董大啸, 邵龙义. 河南登封晚古生代层序地层及聚煤特征研究 [J]. 中国地质, 2010, 37 (1): 167-173.
SONG J J, DONG D X, SHAO L Y. Sequence stratigraphic analysis and characteristics of Late Paleozoic coal accumulation in Dengfeng, Henan Province [J]. Geology in China, 2010, 37 (1): 167-173.
- [12] 苏现波, 盛建海, 李元建. 河南山西组二₁煤古泥炭沼泽的类型及演化 [J]. 煤田地质与勘探, 1993, 21 (2): 11-17.
SU X B, SHENG J H, LI Y J. The type and evolution of II₁ coal swamp in Shanxi Formation in Henan Province [J]. Coal Geology & Exploration, 1993, 21 (2): 11-17.
- [13] 张淑存. 河南新郑矿区山西组测井曲线特征及沉积环境分析 [J]. 中国煤田地质, 1994, 6 (3): 101-104.
ZHANG S C. Logging curve characteristics and sedimentary environment analysis of Shanxi Formation in Xinzheng mining area, Henan Province [J]. Coal Geology of China, 1994, 6 (3): 101-104.
- [14] 姚庚云, 陈书龙, 刘植恒, 等. 豫西登封煤田白坪井田“山西组”的植物化石 [J]. 焦作矿业学院学报, 1991, 10 (4): 1-14.
YAO G Y, CHEN S L, LIU Z H, et al. Fossil plants

- from Shanxi Formation in the Baiping area of Dengfeng coalfield, western Henan [J]. *Journal of Jiaozuo Mining Institute*, 1991, 10 (4): 1-14.
- [15] 周慧堂, 王天顺, 孙红兵. 豫西陕涇煤田山西组煤层形成环境和聚煤特征 [J]. *沉积学报*, 1989, 7 (4): 121-131.
- ZHOU H T, WANG T S, SUN H B. Depositional environments and coal-forming characteristics of coal bed of Shanxi Formation in Shanmian coalfield, western Henan [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, 7 (4): 121-131.
- [16] 马庆元. 河南省平顶山一禹县煤田二叠纪含煤地层双壳类化石的分布及其意义 [J]. *煤田地质与勘探*, 1987, 15 (6): 26-78.
- MA Q Y. Distribution and significance of Bivalve fossils from Permian coal bearing strata in Pingdingshan - Yuxian coalfield, Henan Province [J]. *Coal Geology & Exploration*, 1987, 15 (6): 26-78.
- [17] 陈守民, 张璐, 胡斌, 等. 河南省上石炭统一下二叠统本溪组沉积时期古地理特征 [J]. *古地理学报*, 2011, 13 (2): 127-138.
- CHEN S M, ZHANG L, HU B, et al. Palaeogeographic characteristics during the depositional period of Upper Carboniferous-Lower Permian Benxi Formation in Henan Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13 (2): 127-138.
- [18] 盛吉虎, 张恩惠, 王家德, 等. 河南省早二叠世早期岩相古地理及聚煤作用研究 [J]. *河南地质*, 1997, 15 (3): 27-32.
- SHENG J H, ZHANG E H, WANG J D, et al. Lithofacies and paleogeography and its coal-accumulating process of the early Early Permian in Henan Province [J]. *Henan Geology*, 1997, 15 (3): 27-32.
- [19] 张士, 姚庚云, 姚兆奇. 河南西部“山西组”含大羽羊齿植物的层位 [J]. *地层学杂志*, 1991, 15 (3): 215-220, 208-244.
- ZHANG S, YAO G Y, YAO Z Q. Position contains Gigantopterid plants of the “Shanxi Formation” in western Henan Province [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1991, 15 (3): 215-220, 208-244.
- [20] 段吉业, 刘鹏举, 夏德馨. 浅析华北板块中元古代—古生代构造格局及其演化 [J]. *现代地质*, 2002, 16 (4): 331-338.
- DUAN J Y, LIU P J, XIA D X. The preliminary research on tectonic pattern and tectonic evolution of Mesoproterozoic-Paleozoic in North China plate [J]. *Geoscience*, 2002, 16 (4): 331-338.
- [21] XIAO W J, WINDLEY B F, HAO J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22 (6): 1069-1088.
- [22] 任战利, 崔军平, 史政, 等. 中国东北地区晚古生代构造演化及后期改造 [J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31 (6): 734-742.
- REN Z L, CUI J P, SHI Z, et al. The Late Paleozoic tectonic evolution and later transformation in Northeast China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31 (6): 734-742.
- [23] 王果寿, 裴振洪, 周卓明, 等. 豫西地区中、下二叠统沉积特征 [J]. *天然气工业*, 2003, 23 (6): 24-27, 175-176.
- WANG G S, PEI Z H, ZHOU Z M, et al. Depositional features of Mid-Lower Permian in West Henan area [J]. *Nature Gas Industry*, 2003, 23 (6): 24-27, 175-176.
- [24] 孙克勤, 邓胜徽. 贺兰山北段石炭纪和二叠纪植物群 [J]. *现代地质*, 2003, 17 (3): 259-267, 357-358.
- SUN K Q, DENG S H. Carboniferous and Permian flora in the northern part of Helan Mountain [J]. *Geoscience*, 2003, 17 (3): 259-267, 357-358.
- [25] 中国科学院南京地质古生物研究所, 中国科学院植物研究所. 中国古生代植物: 中国植物化石: 第一册 [M]. 北京: 科学出版社, 1974: 1-226.
- Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences. Paleozoic plants from China: Chinese plant fossils: Volume I [M]. Beijing: Science Press, 1974: 1-226.
- [26] 孙跃武, 丁海生, 刘欢, 等. 华北板块北缘中二叠统于家北沟组植物化石及其大地构造意义 [J]. *吉林大学学报 (地球科学版)*, 2016, 46 (5): 1268-1283.
- SUN Y W, DING H S, LIU H, et al. Fossil plants from the Guadalupian Yujiabeigou Formation in the north margin of North China Plate and their tectonic implications [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2016, 46 (5): 1268-1283.
- [27] 梁建德, 杨祖才, 刘洪筹, 等. 甘肃龙首山东段一条二叠纪生物地层剖面及其意义 [J]. *地质论评*, 1980, 26 (1): 7-15, 89-90.
- LIANG J D, YANG Z C, LIU H C, et al. A Permian

- biostratigraphic section in the eastern part of Longshouhan, Gansu Province and its significance [J]. Geological Review, 1980, 26 (1): 7-15, 89-90.
- [28] 刘洪筹, 梁建德, 杨祖才, 等. 龙首山石炭纪地层 [J]. 兰州大学学报, 1980, 16 (3): 104-118.
LIU H C, LIANG J D, YANG Z C, et al. Carboniferous strata of Longshouhan [J]. Journal of Lanzhou University, 1980, 16 (3): 104-118.
- [29] 斯行健. 内蒙古清水河及山西河曲晚古生代植物群 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 83-112.
SZE H C. Late Paleozoic flora of Qingshuihe, Inner Mongolia and Hequ, Shanxi [M]. Beijing: Science Press, 1989: 83-112.
- [30] 斯行健. 河南平顶山煤田植物化石的初步研究 [J]. 古生物学报, 1954, 2 (3): 289-306.
SZE H C. A preliminary study of the fossil flora of the Pingdingshan coal field in central Henan [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1954, 2 (3): 289-306.
- [31] HALLE T G. Palaeozoic plants from central Shansi [M]. Beijing: Geological Survey of China, 1927: 1-316.
- [32] 沈光隆, 吴秀元, 王军, 等. 甘肃玉门鱼儿红植物群的时代和性质 [J]. 地质学报, 1995, 69 (1): 88-96, 99-100.
SHEN G L, WU X Y, WANG J, et al. Age and nature of Yuerhong flora in Yumen, Gansu Province [J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 69 (1): 88-96, 99-100.
- [33] 黄本宏. 内蒙古镶黄旗地区早二叠世植物化石 [C] //中国北方板块构造论文集编委会. 中国北方板块构造论文集 I. 北京: 地质出版社, 1986: 115-131.
HUANG B H. Early Permian plant fossils from Xianghuangqi area, Inner Mongolia [C] //The Editorial Committee of papers on plate tectonics in northern China. Proceedings of plate tectonics in northern China I. Beijing: Geological Publishing House, 1986: 115-131.
- [34] STOCKMANS F, MATHIEU F F. La flore Paleozoique du bassin houiller de Kaiping (Chine) [M]. Bruxelles: Musee Royal d'Histoire Naturelle de Belgique, 1939: 49-165.
- [35] WANG J. Permian wood from Inner Mongolia, North China; with special reference to Palaeozoic climate change of North China block [J]. Palaeobotanist, 2000, 49 (3): 353-370.
- [36] 斯行健. 中国古生代植物图鉴 [M]. 北京: 中国科学院出版社, 1953: 1-148.
SZE H C. Atlas of Paleozoic plants in China [M]. Beijing: Chinese Academy of Sciences Press, 1953: 1-148.
- [37] 王钰, 庐衍豪, 杨敬之, 等. 辽东太子河流域地层 (II) [J]. 地质学报, 1954, 33 (2): 89-145.
WANG Y, LU Y H, YANG J Z, et al. Stratigraphy of Taizihe River basin in eastern Liaoning (II) [J]. Acta Geologica Sinica, 1954, 33 (2): 89-145.
- [38] 斯行健. 绥远古生代植物化石 [J]. 中国地质学会志, 1934, 13 (4): 593-618.
SZE H C. Paleozoic plant fossils from Suiyuan [J]. Journal of Chinese Geological Society, 1934, 13 (4): 593-618.
- [39] 孙革. 山西保德早二叠世 *Cordaites baodeensis* sp. nov. 叶表皮构造及 *Cordaites* 分类探讨 [J]. 古生物学报, 1991, 30 (2): 167-185.
SUN G. Cuticle of *Cordaites baodeensis* sp. nov. from Lower Permian of Baode, NW Shanxi, China with discussion on taxonomy of *Cordaites* [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1991, 30 (2): 167-185.
- [40] 王德有, 阎国顺, 姜瑗, 等. 河南石炭纪和早二叠世早期地层与古生物 [M]. 北京: 中国展望出版社, 1987: 243-274.
WANG D Y, YAN G S, JIANG Y, et al. Stratigraphy and palaeontology of the Carboniferous and early Early Permian in Henan [M]. Beijing: China Prospect Publishing House, 1987: 243-274.
- [41] 李星学, 周志炎, 蔡重阳, 等. 中国地质时期植物群 [M]. 广州: 广东科技出版社, 1995: 94-156.
LI X X, ZHOU Z Y, CAI C Y, et al. Flora of geological period in China [M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1995: 94-156.
- [42] 孙克勤. 内蒙古乌达地区早二叠世植物群和古生态研究 [J]. 现代地质, 2010, 24 (2): 195-204.
SUN K Q. Study on Early Permian flora and palaeoecology in the Wuda area of Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2010, 24 (2): 195-204.
- [43] 周卫明, 万明礼, 颜梦晓, 等. 内蒙古乌达煤田早二叠世山西组湿地植被群落演替序列 [J]. 古生物学报, 2015, 54 (1): 66-83.
ZHOU W M, WAN M L, YAN M X, et al. The succession sequence of Early Permian wetland vegetational communities in the Shanxi Formation of the Wuda coalfield, Inner Mongolia [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 2015, 54 (1): 66-83.
- [44] SCHMITZ M D, PFEFFERKORN H W, SHEN S Z, et al. A volcanic tuff near the Carboniferous - Permian

- boundary, Taiyuan Formation, North China; radioisotopic dating and global correlation [J]. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2021, 294: 104244.
- [45] SUN Y W, LI M S, GE W C, et al. Eastward termination of the Solonker-Xar Moron River suture determined by detrital zircon U-Pb isotopic dating and Permian floristics [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 75: 243-250.
- [46] 孙恒元. 吉林省延边地区晚石炭世的蠕类化石带 [J]. *吉林地质*, 1984, 3 (3): 38-45, 88-89.
SUN H Y. Fusulinid zone from the Late Carboniferous of Yanbian, Jilin Province [J]. *Jilin Geology*, 1984, 3 (3): 38-45, 88-89.
- [47] 孙恒元. 吉林延边地区二叠系研究的进展 [J]. *地层学杂志*, 1988, 12 (3): 202-209, 229.
SUN H Y. Research progress of Permian in Yanbian area, Jilin Province [J]. *Journal of Stratigraphy*, 1988, 12 (3): 202-209, 229.
- [48] 孙跃武, 李明松, 赵国伟. 吉林延边地区早二叠世一个新的陆相地层单位 [J]. *地层学杂志*, 2012, 36 (1): 89-96.
SUN Y W, LI M S, ZHAO G W. A new terrestrial lithostratigraphic unit of the Cisuralian (Lower Permian) in the Yanbian area, Jilin Province [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2012, 36 (1): 89-96.
- [49] 孙柏年, 沈光隆, 刘燕学. 新疆塔里木盆地北缘的陆相下二叠统 [J]. *兰州大学学报*, 1993, 29 (1): 110-115.
SUN B N, SHEN G L, LIU Y X. The Lower Permian of terrestrial facies in the northern Tarim Basin, southern Xinjiang, China [J]. *Journal of Lanzhou University*, 1993, 29 (1): 110-115.
- [50] 吴秀元, 孙柏年, 沈光隆, 等. 塔里木盆地北缘二叠纪植物群 [J]. *古生物学报*, 1998, 36 (增刊1): 3-26.
WU X Y, SUN B N, SHEN G L, et al. Permian fossil plants from northern margin of Tarim Basin, Xinjiang [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 1998, 36 (Suppl. 1): 3-26.
- [51] GASTALDO R A, DIMICHELE W A, PFEFFERKORN H W. Out of the icehouse into the greenhouse: a Late Paleozoic analog for modern global vegetational change [J]. *GSA Today*, 1996, 6 (10): 1-6.
- [52] GOUGH D O. Solar interior structure and luminosity variations [J]. *Solar Physics*, 1981, 74 (1): 21-34.
- [53] BELCHER C M, MCELWAIN J C. Limits for combustion in low O₂ re-define paleoatmospheric predictions for the Mesozoic [J]. *Science*, 2008, 321 (5893): 1197-1200.
- [54] ROSING M T, DENNIS K B, NORMAN H S, et al. No climate paradox under the faint early sun [J]. *Nature*, 2010, 464 (7289): 744-747.
- [55] LENTON T M, CROUCH M, JOHNSON M, et al. First plants cooled the Ordovician [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5 (2): 86-89.
- [56] 殷鸿福, 俞建新, 罗根明, 等. 地史时期生物对冰室气候形成的作用 [J]. *地球科学*, 2018, 43 (11): 3809-3822.
YIN H F, YU J X, LUO G M, et al. Biotic influence on the formation of icehouse climates in geologic history [J]. *Earth Science*, 2018, 43 (11): 3809-3822.
- [57] MONTANEZ I P, MCELWAIN J C, POULSEN C J, et al. Climate, pCO₂ and terrestrial carbon cycle linkages during Late Palaeozoic glacial-interglacial cycles [J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9 (11): 824-828.
- [58] BROCKS J J, JARRETT A J M, SIRANTOINE E, et al. The rise of algae in Cryogenian oceans and the emergence of animals [J]. *Nature*, 2017, 548 (7669): 578-581.
- [59] WANG X D, QIE W L, SHENG Q Y, et al. Carboniferous and Lower Permian sedimentological cycles and biotic events of South China [J]. *Geological Society*, 2013, 376 (1): 33-46.
- [60] CHRISTOPHER J C, BARRY A T. Palaeozoic tropical rainforests and their effect on global climates; is the past the key to the present? [J]. *Geobiology*, 2005, 3 (1): 13-31.
- [61] WALLACE M W, HOOD A V, SHUSTER A, et al. Oxygenation history of the Neoproterozoic to Early Phanerozoic and the rise of land plants [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 466: 12-19.
- [62] ISABEL P M, NEIL J T, DEB N, et al. CO₂-forced climate and vegetation instability during Late Paleozoic deglaciation [J]. *Science*, 2007, 315 (5808): 87-91.