

文章编号: 1671-1505(2025)04-0997-13 DOI:10.7605/gdxb.2025.070

早二叠世华北东部古野火活动及全球记录*

吕大炜 姜东旭 张之辉 杜文旭 李泽宽
王洛静 郑桂波 王 冰 李俊林

山东科技大学地球科学与工程学院, 山东青岛 266590

摘要 随着全球持续变暖, 野火发生频率和范围显著加剧。为深入理解气候变化与野火之间相互作用, 研究地质历史时期野火活动发生规律尤为重要。二叠纪是从冰室气候到温室气候时期转变的关键阶段, 尽管大量研究广泛报道了二叠纪野火活动证据, 但关于早二叠世野火活动在全球范围内的时空分布规律及控制因素尚不明确。本研究首次发现华北东部下二叠统太原组和山西组中存在大量化石木炭, 表明当时野火活动频繁发生。化石木炭反射率为 0.61%~2.76%, 反映野火活动以地面火和地表火为主。此外, 本研究系统收集并分析了 174 条公开报道的全球早二叠世野火活动数据。野火证据类型包括化石木炭、惰质组和热解多环芳烃。空间上, 早二叠世野火活动集中分布在南半球中高纬度的热带和寒温带气候区, 主要受区域气候和植被分布的影响。时间上, 早二叠世野火事件发生频率表现为先上升后下降, 可能受 CO₂ 含量变化的控制和大气 O₂ 含量影响。研究成果为进一步认识全球二叠纪野火事件分布及控制因素提供了重要依据。

关键词 野火 化石木炭 氧气含量 早二叠世 华北地区

第一作者简介 吕大炜, 1980 年生, 男, 教授, 主要从事煤地质、深时古气候方面教学和科研工作。
E-mail: lvdawei95@163.com。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Early Permian palaeo-wildfire activity in eastern North China and its global records

LÜ Dawei JIANG Dongxu ZHANG Zhihui DU Wenxu LI Zekuan
WANG Luojing ZHENG Guibo WANG Bing LI Junlin

College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Shandong Qingdao 266590, China

Abstract With the continuous warming of the global climate, the frequency and extent of wildfires have increased significantly. To gain a deeper understanding of the interactions between climate change and wildfires, it is crucial to study wildfire activity patterns throughout geological history. The Permian marks a pivotal transition from an icehouse to a greenhouse climate. Although extensive research has reported evidence of the Permian wildfires, the global spatiotemporal distribution and controlling factors of the Early Permian wildfire activity remain unclear. This study presents the first discovery of abundant fossil charcoal

* 国家自然科学基金项目 (编号: U24A202029, 42472166) 和山东省高等学校青年创新团队发展计划 (科技类) (编号: 2024KJG034) 联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (Nos. U24A202029, 42472166) and the Development Plan for Young Innovation Teams in Shandong's Higher Education Institutions (Science and Technology Category) (No. 2024KJG034)]

收稿日期: 2024-12-04 改回日期: 2025-01-13

in the Lower Permian Taiyuan and Shanxi Formations in eastern North China, indicating frequent wildfire occurrences during this period. Fossil charcoal reflectance ranges from 0.61% to 2.76%, suggesting that wildfires were predominantly surface and ground fires. Additionally, this research systematically compiled and analyzed 174 globally reported records of the Early Permian wildfire activity. The evidence includes fossil charcoal, inertinite, and pyrolytic polycyclic aromatic hydrocarbons. Spatially, the Early Permian wildfire activity was concentrated in tropical and cool temperate climate zones at mid- to high latitudes in the southern hemisphere, primarily influenced by regional climate conditions and vegetation distribution. Temporally, the frequency of the Early Permian wildfire events exhibited an initial ascending trend followed by subsequent decline, potentially influenced by variations in atmospheric CO₂ concentrations and modulated by fluctuations in atmospheric O₂ levels. This study provides critical insights into the global distribution and controlling factors of wildfire events during the Permian, contributing to a more comprehensive understanding of their patterns and influences.

Key words wildfire, fossil charcoal, oxygen content, Early Permian, North China

About the first author LÜ Dawei, born in 1980, is a professor and doctoral supervisor. He is mainly engaged in teaching and scientific research on coal geology and deep time palaeoclimate. E-mail: lvdawei95@163.com.

随着全球气候变暖的影响,野火发生的频率和强度不断加剧 (Jones *et al.*, 2020)。仅 2023—2024 年间,全球被烧毁的土地达 390 万 km² (Jones *et al.*, 2024), 加拿大的火灾规模达到历史最高。自 1990 年以来,野火已直接造成至少 1.8 万人受伤或死亡,并对生态系统的生物多样性、碳循环等产生了极大的负面影响 (Koplitz *et al.*, 2018; Jones *et al.*, 2024)。因此,研究野火与不同环境因素在空间尺度和时间尺度上的关系,有助于更好地理解全球变暖环境下野火的变化趋势并制定防治措施等。

野火燃烧的产物主要包括化石木炭、惰质组(煤中的化石木炭)和热解多环芳烃(PAHs)等 (Uhl *et al.*, 2012; Baker, 2022; Shao *et al.*, 2024; Sun, 2024)。其中存在于沉积物中的化石木炭被广泛认为是古野火的直接证据 (Scott, 2000)。已知最早的野火证据可以追溯到志留纪 (Glasspool and Gastaldo, 2022)。在地质历史时期中,野火活动的变化主要受大气 O₂ 含量、点火源、气候和植被等因素影响 (Baker, 2022; Du *et al.*, 2024)。

二叠纪是地球从冰室至温室的转变时期 (Gastaldo *et al.*, 1996; Montañez and Poulsen, 2013; 杨江海等, 2021), 大气 O₂ 含量明显高于现在水平 (Wildman Jr *et al.*, 2004; Berner, 2009;

Glasspool *et al.*, 2010), 被认为是地质历史上的一个野火高发时期 (Berner and Kothavala, 2001; Berner, 2006; Glasspool and Scott, 2010; Benicio *et al.*, 2019)。前人对早二叠世野火的研究主要集中在单个特定区域上 (Uhl *et al.*, 2004; Guerra-Sommer *et al.*, 2008; Jasper *et al.*, 2008, 2011; Murthy *et al.*, 2022, 2023a), 而且已有数据库虽然涵盖了部分早二叠世野火数据,但野火证据类型统计不完善、野火数据有待更新 (Jasper *et al.*, 2013; Yan *et al.*, 2016)。因此,重建更加完善的早二叠世野火数据,有助于更好地理解高 O₂ 含量下的野火规律。

早二叠世华北地区发育了大量的植物,野火频发,是全球野火研究的代表性区域 (Shen *et al.*, 2023)。为此,利用华北东部济宁地区 ZK-8351 钻孔下二叠统太原组和山西组沉积物中的化石木炭,通过化石木炭丰度和化石木炭反射率确定了其野火类型,具有重要的代表性意义。此外,本研究收录了早二叠世全球各地区野火活动证据,重建了早二叠世野火的时空格局。通过与大气 O₂ 含量、CO₂ 含量、区域气候与植被变化等因素相结合,评估了不同因素对早二叠世野火活动时时空演变的潜在影响,为人类正确认识全球早二叠世冰期野火发生原因提供重要的依据。

1 地质背景与方法

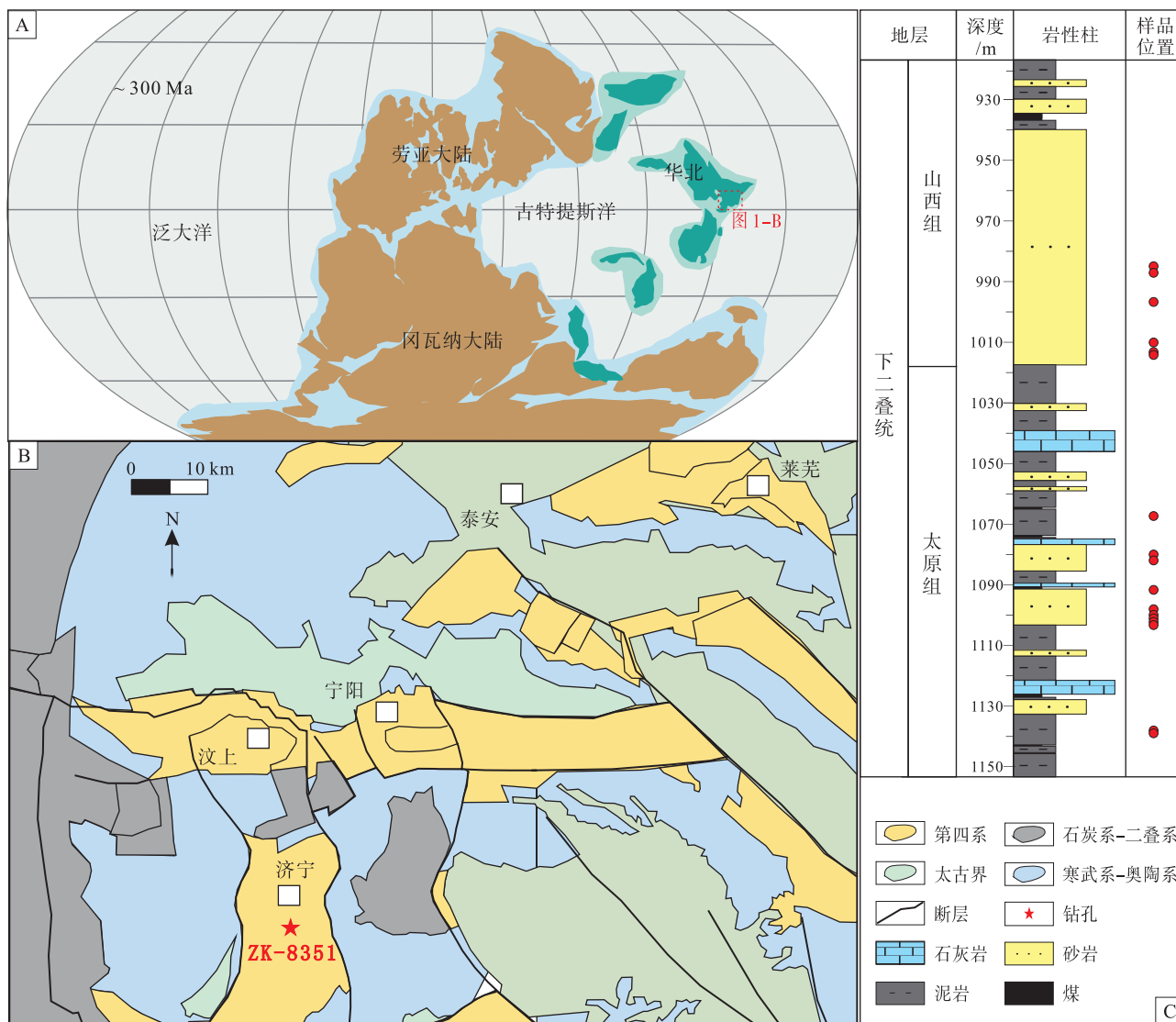
1.1 地质背景

济宁地区属于华北克拉通东部，早二叠世位于北半球低纬度地区(图 1-A)。地层发育较全，由老到新依次发育本溪组、太原组、山西组、下石盒子组等(王东东等, 2024)，其中早二叠世发育地层包括太原组和山西组下部(图 1-C)，本研究的样品取自济宁地区 ZK-8351 钻孔(图 1-B) 下二叠统太原组和山西组，主要以石灰岩、泥岩、砂岩为主，夹有厚度不一的煤层。

1.2 采样和分析方法

本研究共采集了 17 件砂岩及泥岩样品，其中山西组 6 件砂岩样品 (985 m、987 m、996.8 m、1010 m、1013.5 m、1014.5 m)；太原组 7 件砂岩样品 (1080 m、1091.5 m、1098 m、1100 m、1101 m、1102 m、1103 m) 和 4 件泥岩样品 (1067.5 m、1082 m、1138 m、1139 m) (采样位置见图 1-C)。所有样品中均保存有宏观植物碎屑(图 2)。

本研究分析方法包括岩石学分析、化石木炭反射率测量和扫描电子显微镜观察法。化石木炭根据

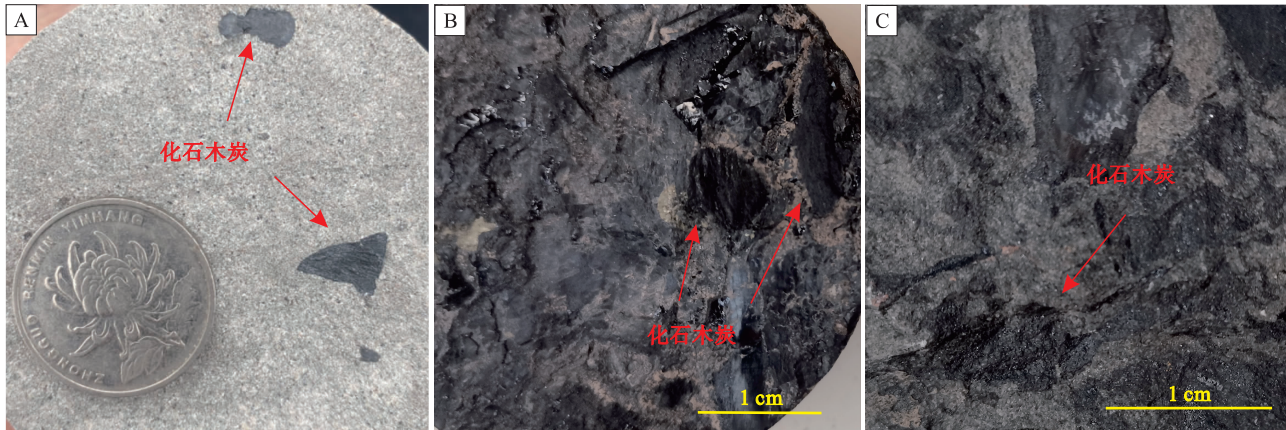


A—研究区古地理位置 (~300 Ma) (修改自 Huang 等, 2018)；B—ZK-8351 号钻孔现今地理位置 (修改自 Lü 等, 2014)；

C—济三煤矿地层岩性及样品位置

图 1 济宁地区 ZK-8351 号钻孔地理位置及地层柱状图

Fig. 1 Geographic location and stratigraphic columnar section of Borehole ZK-8351 in the Jining Area



A—山西组砂岩中化石木炭；B-C—太原组及山西组泥岩中化石木炭

图 2 济宁地区 ZK-8351 钻孔化石木炭手标本照片

Fig. 2 Hand-specimen photographs of fossil charcoal from Borehole ZK-8351 in the Jining area

Scott(2000, 2010)提供的标准进行鉴定：颜色不透明、呈黑色、反射光强、丝绸光泽，带有黑色条纹、脆性断裂、原始解剖结构保存完好、细胞壁均匀。

惰质组反射率研究方法：将未破碎的泥岩和砂岩样品制作为光片进行化石木炭反射率测定。使用 Liu 等(2018)的操作步骤和技术参数。按照 IC-CP(2001)标准对样品中的显微组分进行鉴别，利用数字煤岩分析系统(型号：Axioscope A1 Pol)，维持室温在 24 ℃，在油浸反射光显微镜下进行微观拍照并分析。使用 MSPUV-VIS2000 光度计测试样品反射率。

木炭的形态学研究方法：利用解剖刀和针将植物残骸与岩石分离，利用扫描电子显微镜(型号：Phenom prox)对木炭的解剖结构进行拍照并分析。根据 Uhl 等(2012)的方法，在真空条件下，使用 10 kV 加速电流、标准光束对样品进行观察。所有实验均在山东科技大学山东省沉积成矿与沉积矿物重点实验室完成。

1.3 数据预处理

为了建立一个可靠的早二叠世野火证据数据库，按照 Lu 等(2021)和吕大炜等(2024)的方法，从已公开发表的数据或数据库中收集。未发表的数据、个人材料不包括在本文的研究中。在 Google Scholar、Web of Science、ScienceDirect、JSTOR 和中国知网(CNKI)等平台，规定特定的关键词，包括“Early Permian wildfire”、“charcoal”、“inertinite”、“fusain”、“fusinite”“早二叠世野火”、

“化石木炭”、“惰质组”和“PAHs”等。完成文献搜索。所有文献检索工作于 2024 年 12 月完成。

数据库包括 3 种类型的野火证据：木炭类型 I(煤中惰质组)、木炭类型 II(碎屑沉积物的化石木炭)和热解多环芳烃(PAHs)。在将原始文章中的数据纳入数据库之前，为了最大限度地减少低可信度的野火数据，进行了双重检查和评估。如果多个研究报告来自同一地点(如剖面、区域或盆地)的同一地质单元的野火数据，则将这些数据视为 1 条记录。根据不同类型的证据，可以在不同的研究中识别同一研究地点的野火事件，将多个记录视为 1 次事件。记录的野火事件包括时间、样品采集位置(如国家、州/省、城市、纬度、经度)、古地理位置(如古纬度、古经度)、地层单位(如组、群)以及岩石类型(如煤、砂岩、泥岩)等。

利用 PointTrackerv7h 软件重建了早二叠世全球野火证据所处的古纬度和古经度。为了直观显示野火发生的空间分布，将野火活动位置投影到 Scotese(2014)提供的早二叠世古地图上。

2 结果

2.1 木炭形态学特征

在现代环境下，不完全燃烧产生的木炭特征包括：颜色从棕色到黑色，具有污手特性，表面可见丝绸光泽，硬度低，易碎成粉末状，并具有黑色条痕，同时保留部分植物的结构特征(Zhou *et al.*, 2024; 吕大炜等, 2024)。在华北东部济宁地区太

原组和山西组中发现了大量植物残骸，均呈现出黑色、丝绸光泽等典型的化石木炭特征。化石木炭碎片主要为宏观木炭(图 2)，其长度大于 1 mm，形状以椭圆形和长方形为主，可见三角形。大部分化石木炭碎片被压缩，在采样段中分布密集(图 1-C)。

利用油浸显微镜观察太原组和山西组化石木炭样品，存在大量丝质体和半丝质体，且具有明显的细胞壁结构。丝质体和半丝质体的孔径范围为 5~250 μm (图 3)，变化幅度较大。化石木炭反射率介于 0.61%~2.76%之间，平均值为 1.4%。

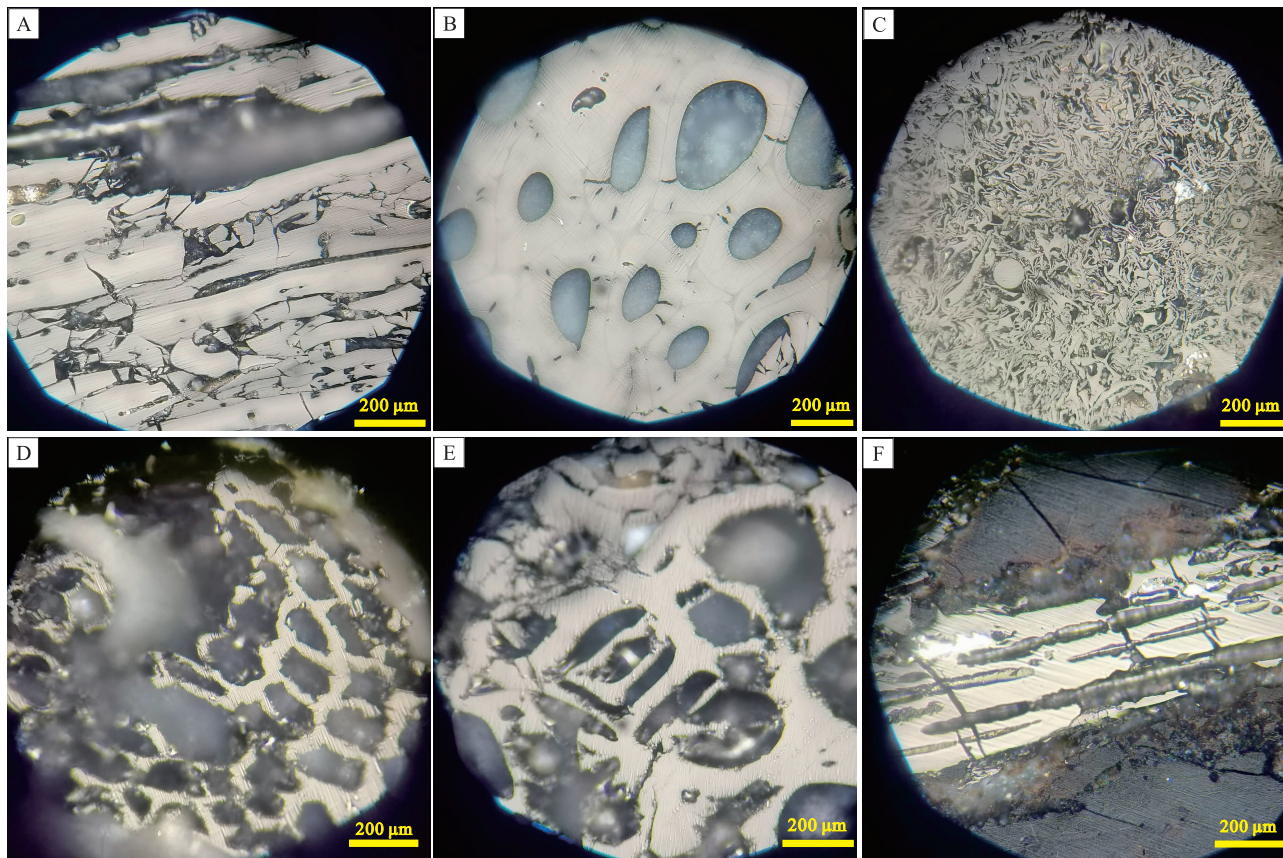
本研究利用扫描电镜观察样品的解剖结构和细胞壁的细节，发现样品的细胞壁具有明显的均质化现象(图 4)。同时可以发现纵切面可见细长的管胞，横切面上则存在典型的管胞，具有明显的植物结构特征，符合化石木炭的典型特征 (Murthy *et al.*, 2023b)。所有被研究的样品都显示出破碎的细胞壁(图 4)，这是成岩过程中压实作用的标志

(Murthy *et al.*, 2022)。

2.2 早二叠世野火活动数据库概述

本研究收集早二叠世野火证据共 174 条(图 5)，其中阿瑟尔阶 17 条，萨克马尔阶 26 条，亚丁斯克阶 78 条，空谷阶 53 条。根据证据类型，可以将其分为 5 组：木炭类型 I 共 127 例，占 73%；木炭类型 II 共 23 例，占 13%；PAHs 共 8 例，占 5%；木炭类型 I 和木炭类型 II 共 10 例，占 6%；木炭类型 II 和 PAHs 共 6 例，占 3%。数据显示，阿瑟尔阶野火事件的报道相对较少，此后野火发生频率呈上升趋势，在亚丁斯克阶达到最大值 78 次，而在空谷阶，已发布的野火发生次数减少至 53 次。

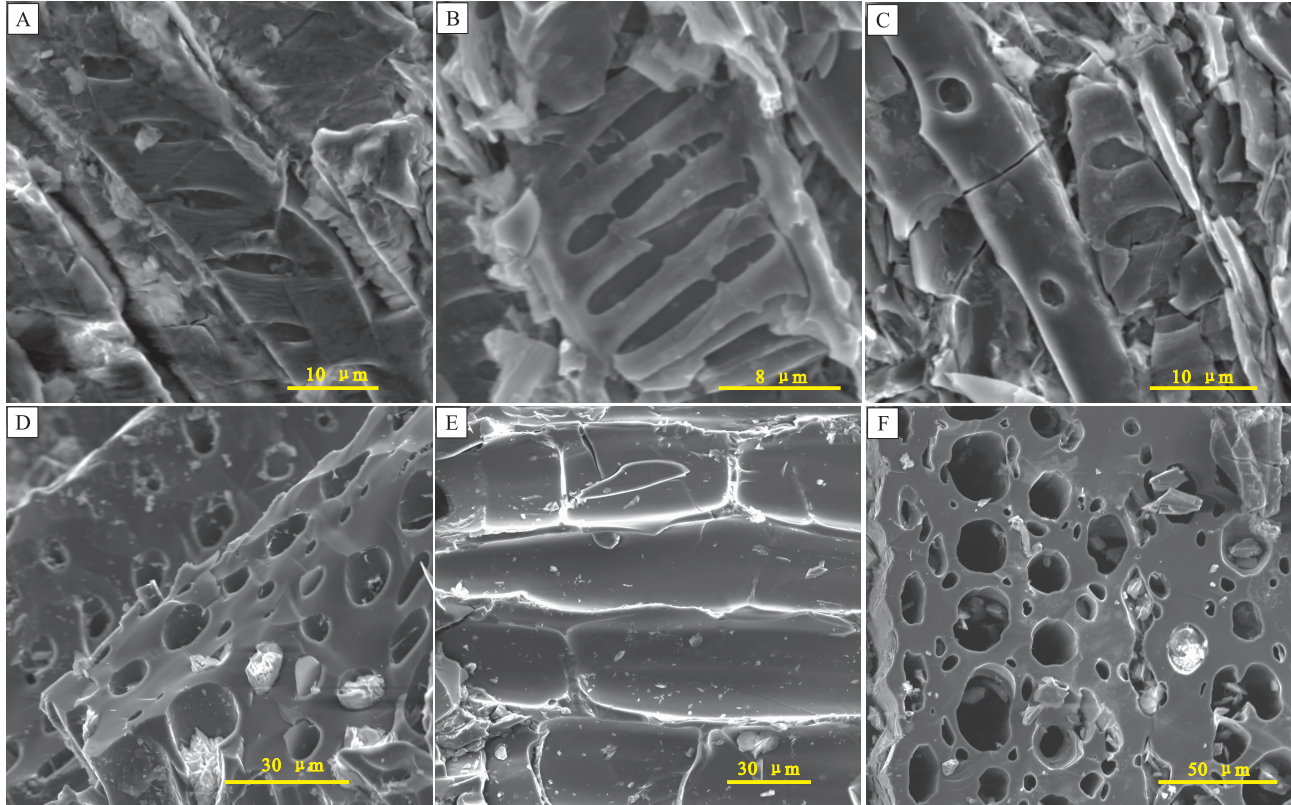
基于古纬度重建，从空间角度来看，南半球野火发生次数远高于北半球，主要分布在南半球中高纬度地区 (50°S~70°S) (图 6-C, 6-D)。二叠纪气候分为热带、干旱带、暖温带、寒温带、寒带。



A—孔深 985.0 m，丝质体碎片；B—孔深 996.8 m，丝质体，典型的细胞腔；C—孔深 1139.0 m，高温形成的丝质体；D—孔深 1102.0 m，丝质体，细胞壁中部显示点状加厚现象；E—孔深 1101.0 m，丝质体，细胞壁中部显示点状加厚现象；F—孔深 1100.0 m，丝质体碎片，可见裂隙

图 3 济宁地区 ZK-8351 号钻孔化石木炭显微图像

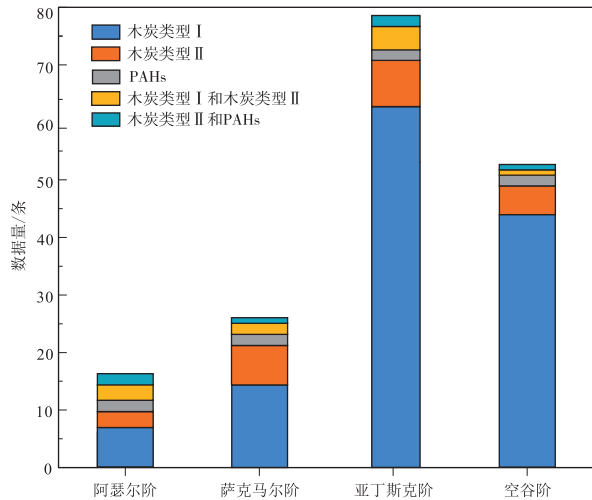
Fig. 3 Microscopic images of fossil charcoal from Borehole ZK-8351 in the Jining area



A—管胞单列，凹坑呈纺锤状，共 1 列连续且均匀，孔深 985 m；B—管胞破裂，凹坑呈扁平状，共 1 列连续且均匀，向左下角倾斜，孔深 996.8 m；C—管胞破碎，凹坑呈椭圆状，共 2 列大小不一，连续不均匀，孔深 1139 m；D、F—横切面显示细胞壁均匀，管胞多样，大小直径不一，孔深 1102 m 和 1101 m；E—细胞壁侧翼，可见交叉场，孔深 1100 m

图 4 济宁地区 ZK-8351 号钻孔化石木炭扫描电镜图像

Fig. 4 Scanning Electron Microscope (SEM) images of fossil charcoal from Borehole ZK-8351 in the Jining area



木炭类型 I 指煤中惰质组；木炭类型 II 指碎屑沉积物的化石木炭；PAHs 指热解多环芳烃

图 5 早二叠世不同时间阶段野火活动记录数据

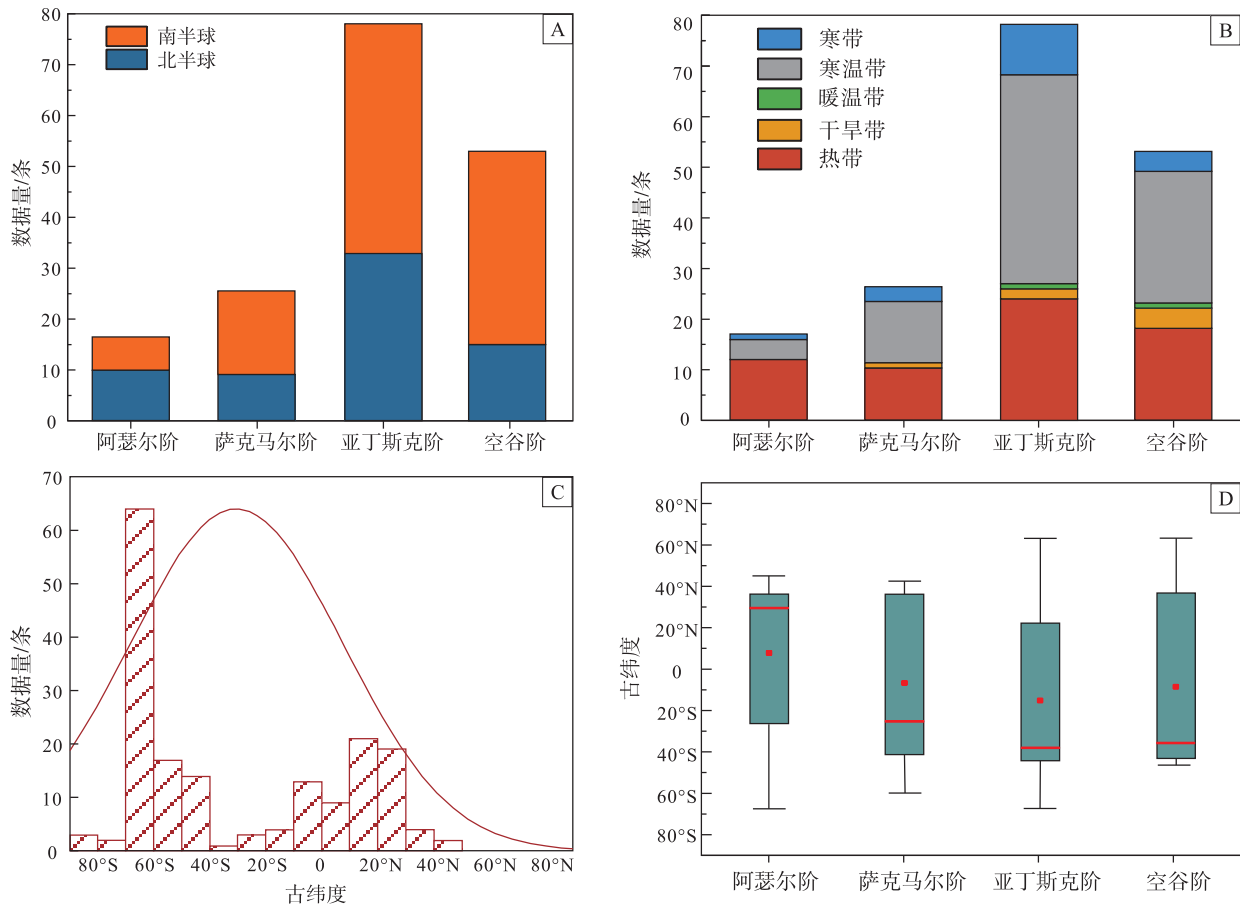
Fig. 5 Data chart of wildfire activity records during different time intervals in the Early Permian

已发表的早二叠世野火事件主要集中在寒温带地区和热带地区，分别占总数的 48% 和 37%。干旱带地区、暖温带地区和寒带地区报道的野火事件仅占总数的 4%、1% 和 10%。

3 讨论

3.1 华北东部早二叠世反复发生的野火

本研究采集样品中的植物残骸被证实为化石木炭，其细胞壁具有均质现象，解剖特征保存完好。木炭在很大程度上能够抵抗化学和生物衰变，可以很容易地被保存在化石中 (Scott, 2000; Friis *et al.*, 2006; Glasspool *et al.*, 2006; Scott, 2010)，可以作为古野火发生的直接证据 (Jones and Chaloner, 1991; Mishra *et al.*, 2022)。木炭保存完好的解剖细节可以提供野火燃烧植物类群的亲缘关系信息 (Friis *et al.*, 2006)。所研究的化石木炭碎片显



A—不同时间区间南北半球野火分布; B—不同时间区间气候带野火分布; C—野火活动纬度累积分布图;

D—野火活动纬度位置箱线图, 红色方块、红色短线分别代表数据的平均值和中位数

图 6 早二叠世野火活动空间分布综合分析

Fig. 6 Comprehensive analysis of spatial distribution of wildfire activity during the Early Permian

示出解剖特征显著, 如管胞壁上单列凹坑(图 4)。然而, 根据这些零碎的标本不能确定特定的植物群。化石木炭富集且大小及形态差异较大, 表明这一时期可能发生了不同强度的野火 (Du *et al.*, 2024)。同时基于化石木炭存在于砂岩和泥岩中, 也可能是水流搬运导致化石木炭大小及形态差异较大。一般来说, 在现代环境中, 距离燃烧地点越远, 木炭碎片的丰度和大小会减少 (Blackford, 2000)。大多数标本的边缘呈椭圆形和长方形, 且地层中化石木炭富集, 表明木炭只是被运输了较短的距离, 可能直接来自沉积地附近的野火事件 (Scott, 2000; Marynowski *et al.*, 2011)。同时岩心中化石木炭反复出现, 表明华北东部早二叠世野火活动反复发生。

3.2 华北东部早二叠世野火类型

前人研究已经证明植物的燃烧温度与反射率呈

正相关, 反射率越高, 燃烧温度越高 (Jones and Chaloner, 1991)。

反射率和温度的关系如 (1) 式:

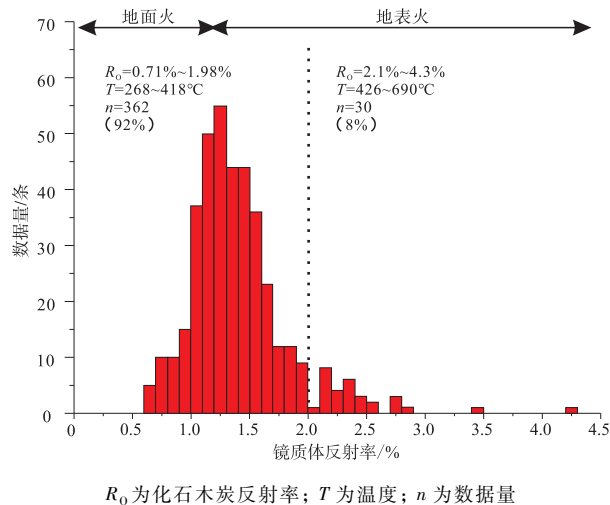
$$T = 184.1 + 117.76 \times R_0 (r^2 = 0.91) \quad (1)$$

其中, T 为燃烧温度, R_0 为测量出样品的化石木炭反射率, r^2 为公式的判定系数, 即温度 T 的变化中有 91% 是由化石木炭反射率 (R_0) 的变化导致 (Jones, 1997)。

此外, (Scott, 2000, 2010) 将古野火分为 3 种类型: (1) 地面火, 主要在低温 ($<350\text{ }^\circ\text{C}$) 的土壤腐殖层或泥炭中闷烧, 产生的木炭量最大; (2) 地表火, 主要在中温 ($400\sim700\text{ }^\circ\text{C}$) 下燃烧低矮植被或枯枝落叶等, 产生较多的木炭; (3) 树冠火, 主要在高温 ($800\sim900\text{ }^\circ\text{C}$) 下燃烧植物树冠, 只产生有限的小木炭碎片。

根据重建结果, 下二叠统太原组和山西组样品

的燃烧温度范围为 305~450℃。炭化实验表明, 温度在 230~340℃ 之间时, 会发生细胞壁均质化现象 (Jones, 1994)。在扫描电镜下, 观察到化石木炭样品的细胞壁均发生均质化(图 4), 这也侧面佐证了当时的碳化温度可能高于 230~340℃。总体来说, 华北东部早二叠世的野火活动以地面火和地表火为主(图 7)。



R_0 为化石木炭反射率; T 为温度; n 为数据量

图 7 化石木炭反射率累积直方图

Fig. 7 Cumulative histogram of fossil charcoal reflectance

3.3 早二叠世野火活动空间尺度分析

自然野火不是随机发生的, 而是受到植被、气候、地形的影响 (Krawchuk *et al.*, 2009)。本研究发现, 已发表的早二叠世野火活动在干旱带地区分布较少, 主要集中在寒温带地区和热带地区(图 6-B; 图 8)。干旱气候区降水少、炎热干燥, 通常不利于植物生长, 可能导致野火燃料短缺。并且野火证据在干旱气候条件下更易被风化, 难以保存 (Hamad *et al.*, 2012), 因此干旱气候区的野火活动记录较少。野火记录主要集中在热带和寒温带气候区。在热带气候区中, 环境更加温暖和潮湿, 有利于植物的生长。因此, 植被的繁茂发展可以产生大量的燃料, 充裕的燃料更容易引发野火。雷击是地质历史时期野火的主要点火源 (Cope and Chaloner, 1980; Du *et al.*, 2024)。现代研究发现, 在潮湿的环境下, 雷击事件更加频繁 (Veraverbeke *et al.*, 2017)。因此, 在热带气候环境下, 频繁的雷击和充足的燃料可能是导致该区域野火频发的主要因素。

寒温带气候的季节变化更为明显, 现代研究表

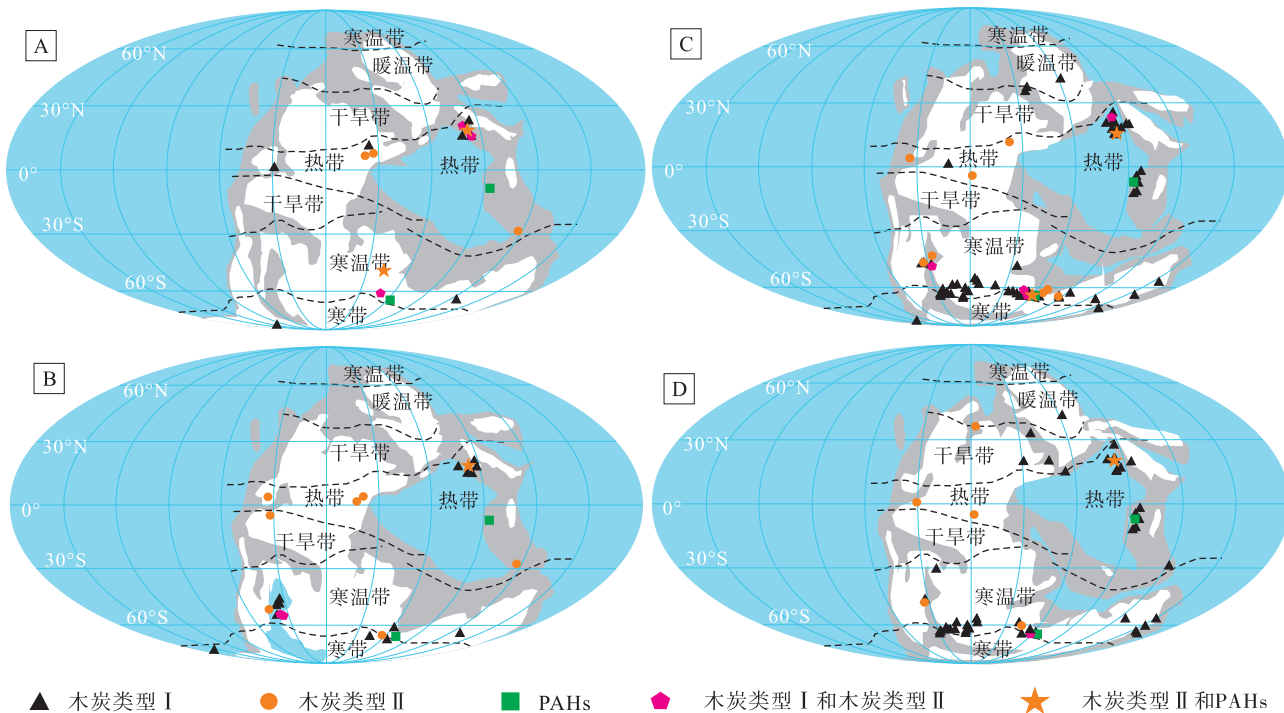
明, 干燥和潮湿变化的环境更有利于野火发生 (Lu *et al.*, 2021)。在潮湿环境下, 降水丰富, 有利于植被的发育, 积累了足够的燃料。当气候转换为干燥时, 植被中的含水量减少, 更容易被引燃, 导致野火事件的发生 (Yan *et al.*, 2016)。因此, 显著的季节性变化可能是导致该区域野火频发的主要因素。晚石炭世一早二叠世时期 (~3.25~2.8 亿年前) 是地球历史上第 1 个大陆被维管植物覆盖的阶段。南半球高纬度地区在早二叠世开始发育舌蕨植物群, 并成为优势物种 (DiMichele *et al.*, 2005)。舌蕨是一种落叶乔木 (Gulbranson *et al.*, 2014; Tewari *et al.*, 2015), 在处于南半球冬季时, 掉落大量树叶, 为野火的发生提供了丰富的燃料。

北半球暖温带和寒温带主要为安加拉古陆, 其气候在阿瑟尔阶至亚丁斯克阶期间在亚湿润和半干旱之间波动, 并在空谷阶期间变得干旱 (Boucot *et al.*, 2013)。在现代半干旱条件下, 沉积物中的木炭会迅速发生分解 (Skjemstad *et al.*, 1996)。同时不能排除其他因素, 如各种研究者的偏见, 这些因素可能不仅主要影响早二叠世沉积物中野火证据的保存, 而且还可能影响这些证据的恢复、研究和发表 (Hamad *et al.*, 2012)。虽然前文提到, 早二叠世处于野火活动高发时期, 但北半球暖温带和寒温带地区可能因为野火证据难以保存和研究者的偏见导致野火记录几乎没有。

在早二叠世北半球中低纬度和南半球中高纬度大陆架区域野火记录较多。现代研究发现, 木炭在被水浸湿之前可以漂浮相当长的时间 (数小时、数天或数周), 因此能够在沉积并融入沉积序列之前进行长距离运输。这些木炭不仅在陆地和非海洋序列中被发现, 还在近岸浅海中以及更深的海洋陆架沉积物中出现, 为野火的发生提供了记录 (Scott, 2010)。早二叠世南半球野火证据数量多于北半球, 可能是由于南半球的陆地面积比北半球大。此外, 北半球干旱气候区范围更大, 缺乏潜在燃料, 不利于野火的发生。此外干旱气候下风化强度更大, 这也可能导致野火证据未被保存下来。

3.4 早二叠世野火活动时间尺度分析

地质历史时期, 野火的发生主要受 3 种因素控制: 燃料、 O_2 和点火源 (Scott, 2000; Krawchuk *et al.*, 2009; Lü *et al.*, 2024)。野火发生的基本条件是燃料, 自然界中存在大量易燃物质, 如植被残



木炭类型 I 指煤中惰质组；木炭类型 II 指碎屑沉积物的化石木炭；PAHs 指热解多环芳烃

A—阿瑟尔阶；B—萨克马尔阶；C—亚丁斯克阶；D—空谷阶。板块重建来自 Scotese (2014)，古气候带基于 Boucot 等 (2013)

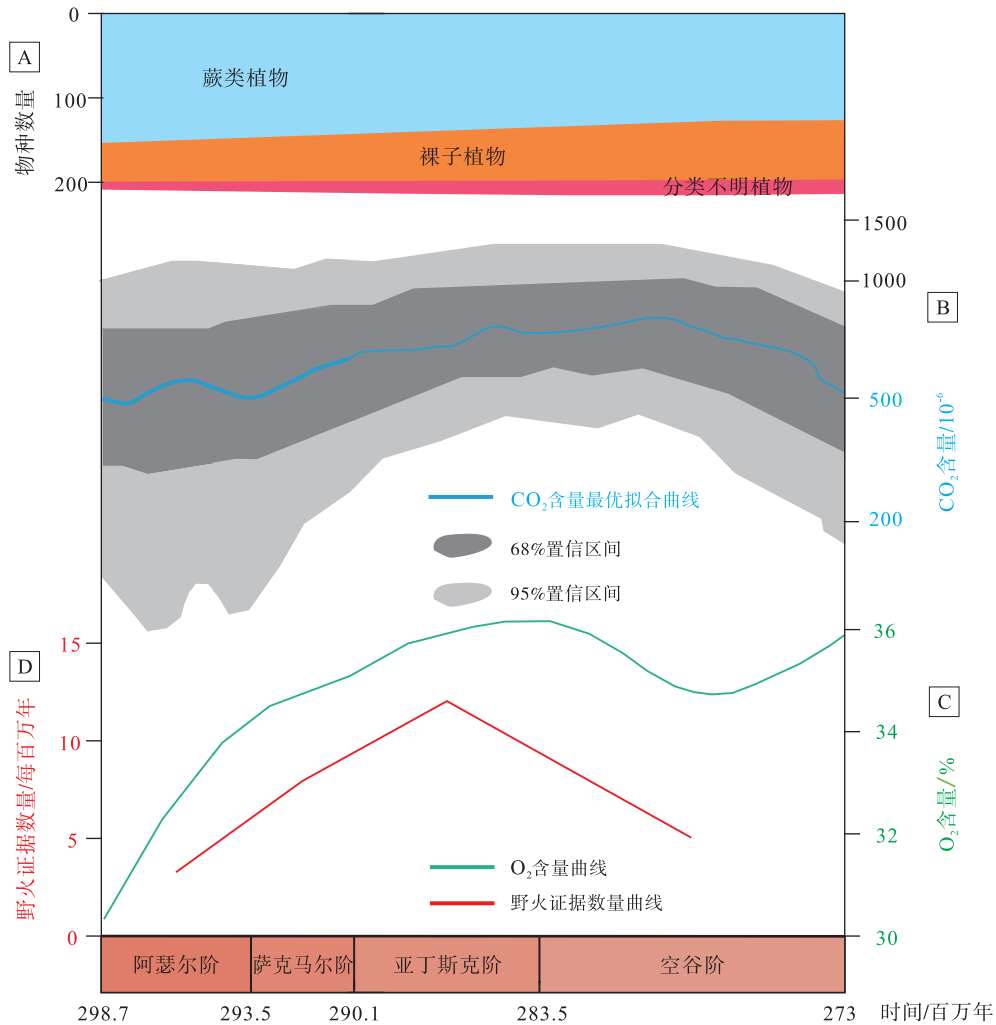
图 8 已发表的早二叠世野火事件古地理分布

Fig. 8 Palaeogeographic distribution of wildfire events during the Early Permian in published

骸、地下泄漏的石油或天然气、暴露的泥炭和煤炭，其中各种类型的植物是野火燃烧最重要的燃料 (Glasspool *et al.*, 2015)。野火发生的另一个基本条件是 O_2 。前人对以往关于大气 O_2 含量对燃烧影响的研究指出，当大气 O_2 含量低于 15% 时，燃烧不会发生；16% 的 O_2 含量可能是植物可燃性和维持长期燃烧的最低要求；而当 O_2 含量至少为 23% 时，湿润植物将持续燃烧 (Scott *et al.*, 2014)。当大气中的 O_2 含量较高时，野火活动增加，从而产生大量的燃烧产物。但研究时期的大气 O_2 含量超过了 30%，所以大气 O_2 含量对野火的影响相对减少。影响野火发生的最后条件是点火源，在人类掌握火之前，自然界中的火灾主要是由岩石坠落、陨石撞击、火山事件以及最重要的闪电产生的火花引起的 (Scott, 2000; Du *et al.*, 2024)。前人研究发现当大气 CO_2 含量增加时，会导致对流层上层水蒸气含量增加，从而导致雷击概率增加 (Belcher *et al.*, 2010; Baker, 2022)。由于缺乏早二叠世雷击的直接证据，因此本研究引用大气 CO_2 含量变化作为雷暴频率的代表。同时，大气中 CO_2 含量的变化也会导致气候的变化 (Shao *et al.*, 2024)。

当大气中 CO_2 含量增加时，全球平均气温上升，区域干旱的持续时间、强度和频率都会增加，也可能增加野火的频率。本研究整合了对早二叠世大气 O_2 水平 (Mills *et al.*, 2023)，大气 CO_2 含量 (Foster *et al.*, 2017) 和植被多样性 (Cleal *et al.*, 2014) 的研究，已发表的早二叠世野火活动的汇编 (图 9)。

阿瑟尔阶至亚丁斯克阶野火活动事件逐阶增加 (图 9-D)。从燃料角度分析，阿瑟尔阶至亚丁斯克阶期间植物的物种数量较为稳定 (图 9-A)，总体增量有限，几乎可以忽略不计，且植被组成未发生显著变化，仅裸子植物增多、蕨类植物减少，对野火活动的影响较小，并不是控制因素。同时不能忽略不同气候带和不同地区条件下植被的差异性影响 (Yan *et al.*, 2016; Hua *et al.*, 2024)。但由于缺少植物证据，作者无法对其展开研究。从点火源角度分析，阿瑟尔阶至亚丁斯克阶期间的 CO_2 含量整体偏高且持续上升，从 500×10^{-6} 上升至 750×10^{-6} (图 9-B)。作为点火源，闪电出现次数增加，这表明 CO_2 含量变化对该阶段野火活动具有重要影响。从 O_2 角度分析，阿瑟尔阶至亚丁斯克阶期



A—植物生物多样性来自 Cleal 和 Cascales-Miñana (2014); B—CO₂ 含量变化来自 Foster 等 (2017);
C—大气 O₂ 含量来自 Mills 等 (2023); D—野火活动频率

图 9 早二叠世野火记录与影响因素

Fig. 9 Wildfire records and influencing factors during the Early Permian

间的 O₂ 含量持续增长近 5%(图 9-C)。前文指出, O₂ 含量越高, 野火发生的概率越大, 阿瑟尔阶至亚丁斯克阶的野火事件也因此增加。综上所述, 阿瑟尔阶至亚丁斯克阶的野火活动增加, 主要受 CO₂ 含量升高导致的雷击频率增多的控制和大气 O₂ 含量上升的影响。

亚丁斯克阶至空谷阶野火活动事件变少(图 9-D)。从燃料角度分析, 亚丁斯克阶至空谷阶的植物生物量稳定, 裸子植物占比增加, 蕨类植物占比减少, 但变化趋势不明显, 因此燃料种类数量不是此阶段野火事件的主要控制因素。从点火源角度分析, 亚丁斯克阶至空谷阶期间的 CO₂ 含量初期小幅度上升, 但整体呈现下降趋势(图 9-B),

总体下降约 250×10^{-6} , 表明此时闪电等自然气象出现次数减少, 进而影响野火活动的发生。从 O₂ 角度分析, 亚丁斯克阶至空谷阶期间的 O₂ 含量先下降, 后小幅度上升, 但整体仍呈下降趋势; 综上所述, 亚丁斯克阶至空谷阶的野火活动变化, 主要受是 CO₂ 含量降低导致的雷击频率减少的控制和大气 O₂ 含量降低的影响。

3.5 华北东部野火记录的全球意义与研究展望

由于包括潜在的研究人员偏差及保存条件限制等埋藏学所固有的复杂性, 全球范围内诸多地区早二叠世古野火证据存在缺失的可能性无法排除 (Brown *et al.*, 2012; Du *et al.*, 2024)。在此背景

下,本研究对华北东部地区古野火记录的确证,为全球古野火数据库补充了一个关键的区域性数据点。华北东部野火事件作为全球野火活动的重要组成部分,符合全球野火集中于热带与寒温带的规律,凸显了区域气候(温暖湿润)对燃料积累的关键作用。这不仅丰富了该地质时期野火活动的区域认知,也凸显了在全球尺度上系统性地识别和整合古野火证据的必要性。因此,未来亟需在更多地区开展更深入、更广泛的研究,以期构建更为全面和可靠的全球古野火演化图景。

4 结论

1) 华北东部下二叠统沉积物中发育了较多的宏观化石木炭,在显微镜下观察到大量丝质体、半丝质体。不同地层中均发育较多的化石木炭,表明这一时期野火活动反复发生。

2) 华北东部济宁地区沉积物中化石木炭反射率为 0.61%~2.76%,其中 82%的化石木炭反射率介于 1%~2%之间。发现华北东部早二叠世野火类型主要为地面火和地表火。

3) 整理已发表的全球 174 条早二叠世野火活动记录,从空间上看主要分布在南半球、中高纬度热带和寒温带地区,主要受区域气候和植被因素影响。从时间上看阿瑟尔阶至亚丁斯克阶野火活动呈上升趋势,亚丁斯克阶至空谷阶野火活动呈下降趋势,受 CO₂ 因素控制和 O₂ 含量影响。

参考文献 (References)

- 吕大炜,徐锦程,张之辉,高洁,杜文旭,张奥聪,王东东. 2024. 石炭纪全球野火事件分布及主控因素. 地质学报, 98(6): 1893-1903. [Lü D W, Xu J C, Zhang Z H, Gao J, Du W X, Zhang A C, Wang D D. 2024. Distribution and controlling factors of the Carboniferous global wildfires. *Acta Geologica Sinica*, 98(6): 1893-1903]
- 王东东,胡鸿畅,毛强,吕大炜. 2024. 山东淄博地区太原组菱铁质结核成因及古环境意义. 古地理学报, 26(5): 1185-1200. [Wang D D, Hu H C, Mao Q, Lü D W. 2024. Genesis and palaeoenvironmental significance of siderite nodules in the Taiyuan Formation, Zibo area of Shandong Province, China. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(5): 1185-1200]
- 杨江海,王圆,刘佳,马睿,杜远生,刘超,余文超. 2021. 南华北早二叠世泥岩沉积与深时陆地古温度重建. 沉积学报, 39(3): 540-549. [Yang J H, Wang Y, Liu J, Ma R, Du Y S, Liu C, Yu W C. 2021. Early Permian mudrock deposits and deep-time land surface temperature reconstruction, southern North China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(3): 540-549]
- Baker S J. 2022. Fossil evidence that increased wildfire activity occurs in tandem with periods of global warming in Earth's past. *Earth-Science Reviews*, 224: 103871.
- Belcher C M, Yearsley J M, Hadden R M, McElwain J C, Rein G. 2010. Baseline intrinsic flammability of Earth's ecosystems estimated from paleoatmospheric oxygen over the past 350 million years. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(52): 22448-22453.
- Benicio J R W, Jasper A, Spiekermann R, Garavaglia L, Pires-Oliveira E F, Machado N T G, Uhl D. 2019. Recurrent palaeo-wildfires in a Cisuralian coal seam: a palaeobotanical view on high-inertinite coals from the Lower Permian of the Paraná Basin, Brazil. *PLoS One*, 14(3): e0213854.
- Berner R A. 2006. GEOCARBSULF: a combined model for Phanerozoic atmospheric O₂ and CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 70(23): 5653-5664.
- Berner R A. 2009. Phanerozoic atmospheric oxygen: new results using the GEOCARBSULF model. *American Journal of Science*, 309(7): 603-606.
- Berner R A, Kothavala Z. 2001. GEOCARB III: a revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time. *American Journal of Science*, 301(2): 182-204.
- Blackford J J. 2000. Charcoal fragments in surface samples following a fire and the implications for interpretation of subfossil charcoal data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164(1-4): 33-42.
- Boucot A J, Xu C, Scotese C R, Morley R J. 2013. Phanerozoic paleoclimate: an atlas of lithologic indicators of climate. *SEPM (Society for Sedimentary Geology)*, Tulsa.
- Brown S A, Scott A C, Glasspool I J, Collinson M E. 2012. Cretaceous wildfires and their impact on the Earth system. *Cretaceous Research*, 36: 162-190.
- Cleal C J, Cascales-Miñana B. 2014. Composition and dynamics of the great Phanerozoic evolutionary floras. *Lethaia*, 47(4): 469-484.
- Cope M J, Chaloner W G. 1980. Fossil charcoal as evidence of past atmospheric composition. *Nature*, 283(5748): 647-649.
- DiMichele W A, Gastaldo R A, Pfefferkorn H W. 2005. Plant biodiversity partitioning in the Late Carboniferous and Early Permian and its implications for ecosystem assembly. *Proceedings of the California Academy of Sciences*, 56: 32-49.
- Du W X, Lü D W, Zhang Z H, Lu M, Uhl D, Raji M, Wang L J, Zhang A C, Sun Y Z, Wang T T. 2024. Temporal and spatial evolution of wildfires during the Jurassic: from regional to global scale. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 650: 112359.
- Foster G L, Royer D L, Lunt D J. 2017. Future climate forcing potentially without precedent in the last 420 million years. *Nature Communications*, 8(1): 14845.
- Friis E M, Pedersen K R, Crane P R. 2006. Cretaceous angiosperm flowers: innovation and evolution in plant reproduction. *Palaeogeogra-*

- phy, *Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 232(2-4): 251-293.
- Gastaldo R A, DiMichele W A, Pfefferkom H W. 1996. Out of the ice-house into the greenhouse: a late Paleozoic analogue for modern global vegetational change. *Gas Today*, 6: 1-7.
- Glasspool I J, Scott A C. 2010. Phanerozoic concentrations of atmospheric oxygen reconstructed from sedimentary charcoal. *Nature Geoscience*, 3(9): 627-630.
- Glasspool I J, Gastaldo R A. 2022. Silurian wildfire proxies and atmospheric oxygen. *Geology*, 50(9): 1048-1052.
- Glasspool I J, Edwards D, Axe L. 2006. Charcoal in the Early Devonian: a wildfire-derived Konservat-Lagerstätte. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 142(3-4): 131-136.
- Guerra-Sommer M, Cazzulo-Klepzig M, Jasper A, Kalkreuth W, Menegat R, Barboza E G. 2008. Paleoeological patterns at the coal-roof shale transition in an outcrop of the Permian Brazilian Gondwana. *Revista Brasileira de Paleontologia*, 11(1): 11-26.
- Glasspool I J, Scott A C, Waltham D, Pronina N, Shao L Y. 2015. The impact of fire on the Late Paleozoic Earth system. *Frontiers in Plant Science*, 6: 756.
- Gulbranson E L, Ryberg P E, Decombeix A L, Taylor E L, Taylor T N, Isbell J L. 2014. Leaf habit of Late Permian Glossopteris trees from high-palaeolatitude forests. *Journal of the Geological Society*, 171(4): 493-507.
- Hamad A M B A, Jasper A, Uhl D. 2012. The record of Triassic charcoal and other evidence for palaeo-wildfires: signal for atmospheric oxygen levels, taphonomic biases or lack of fuel? *International Journal of Coal Geology*, 96: 60-71.
- Hua F H, Shao L Y, Wang X T, Jones T P, Zhang T C, Bond D P G, Yan Z M, Hilton J. 2024. The impact of frequent wildfires during the Permian-Triassic transition: floral change and terrestrial crisis in southwestern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 641: 112129.
- Huang B C, Yan Y G, Piper J D A, Zhang D H, Yi Z, Yu S, Zhou T H. 2018. Paleomagnetic constraints on the paleogeography of the East Asian blocks during Late Paleozoic and Early Mesozoic times. *Earth-Science Reviews*, 186: 8-36.
- ICCP. 2001. The new inertinite classification (ICCP system 1994). *Fuel*, 80: 459-471.
- Jasper A, Uhl D, Guerra-Sommer M, Mosbrugger V. 2008. Palaeobotanical evidence of wildfires in the Late Paleozoic of South America-Early Permian, rio Bonito Formation, Paraná basin, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 26(4): 435-444.
- Jones T P. 1994. New morphological and chemical evidence supporting a wildfire origin for fusain from comparisons with modern charcoal. *Special Papers in Palaeontology*, 49: 113-123.
- Jones T P. 1997. Fusain in Late Jurassic sediments from the Witch Ground Graben, North Sea, UK. *Inst voor Toegepaste Geowetenschappen TNO*, 58: 93-103.
- Jones T P, Chaloner W G. 1991. Fossil charcoal, its recognition and palaeoatmospheric significance. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 97(1-2): 39-50.
- Jasper A, Uhl D, Guerra-Sommer M, Abu Hamad A, Machado N T G. 2011. Charcoal remains from a tonstein layer in the Faxinal Coalfield, Lower Permian, southern Paraná Basin, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 83: 471-481.
- Jasper A, Guerra-Sommer M, Abu Hamad A M B, Bamford M, Bernardes-de-Oliveira M E C, Tewari R, Uhl D. 2013. The burning of Gondwana: Permian fires on the southern continent: a palaeobotanical approach. *Gondwana Research*, 24(1): 148-160.
- Jones M W, Smith A J P, Betts R, Canadell J G, Prentice I C, Le Quéré C. 2020. Climate Change Increases the Risk of Wildfires: January 2020. *ScienceBrief*.
- Jones M W, Kelley D I, Burton C A, Di Giuseppe F, Barbosa M L F, Brambleby E, Hartley A J, Lombardi A, Mataveli G, McNorton J R. 2024. State of wildfires 2023-2024. *Earth System Science Data*, 16(8): 3601-3685.
- Koplit S N, Nolte C G, Pouliot G A, Vukovich J M, Beidler J. 2018. Influence of uncertainties in burned area estimates on modeled wildland fire PM_{2.5} and ozone pollution in the contiguous US. *Atmospheric Environment*, 191: 328-339.
- Krawchuk M A, Moritz M A, Parisien M A, Van Dorn J, Hayhoe K. 2009. Global pyrogeography: the current and future distribution of wildfire. *PloS One*, 4(4): e5102.
- Liu B J, Zhao C L, Ma J L, Sun Y Z, Püttmann W. 2018. The origin of pale and dark layers in Pliocene lignite deposits from Yunnan Province, Southwest China: based on coal petrological and organic geochemical analyses. *International Journal of Coal Geology*, 195: 172-188.
- Lu M, Ikejiri T, Lu Y H. 2021. A synthesis of the Devonian wildfire record: implications for paleogeography, fossil flora, and paleoclimate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 571: 110321.
- Lü D W, Chen J T. 2014. Depositional environments and sequence stratigraphy of the Late Carboniferous-Early Permian coal-bearing successions (Shandong Province, China): sequence development in an epicontinental basin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 16-30.
- Lü D W, Du W X, Zhang Z H, Gao Y, Wang T T, Xu J C, Zhang A C, Wang C S. 2024. A synthesis of the Cretaceous wildfire record related to atmospheric oxygen levels? *Journal of Palaeogeography*, 13(1): 149-164.
- Marynowski L, Scott A C, Zatoń M, Parent H, Garrido A C. 2011. First multi-proxy record of Jurassic wildfires from Gondwana: evidence from the Middle Jurassic of the Neuquén Basin, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 299(1-2): 129-136.
- Mills B J W, Krause A J, Jarvis I, Cramer B D. 2023. Evolution of atmospheric O₂ through the Phanerozoic, revisited. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 51(1): 253-276.
- Mishra D P, Singh V P, Saxena A, Uhl D, Murthy S, Pandey B, Kumar R. 2022. Palaeoecology and depositional setting of an Early Permian (Artinskian) mire based on a multi-proxy study at the Jagannath coal

- mine(Talcher Coalfield), Mahanadi Basin, India. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 601: 111124.
- Montañez I P, Poulsen C J. 2013. The Late Paleozoic ice age: an evolving paradigm. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 41(1): 629–656.
- Murthy S, Uhl D, Jasper A, Sarate O S, Mishra D P. 2022. New evidence for palaeo-wildfire in the Early Permian (Artinskian) of Gondwana from Wardha Valley Coalfield, India. *Journal of the Geological Society of India*, 98(3): 395–401.
- Murthy S, Agnihotri D, Uhl D, Jasper A, Singh R K. 2023a. Palaeoenvironmental and stratigraphical implications of the palynoflora and macro-charcoal from the early Permian of the Chuperbhita Coalfield, Rajmahal Basin, Jharkhand, India. *Journal of Palaeosciences*, 72(2): 141–151.
- Murthy S, Saxena A, Khnagar R, Pillai S S K, Uhl D, Singh V P, Gupta S, Borkar N. 2023b. Palynofloristics and wildfire evidence from Permian deposits of the Satpura Gondwana Basin, India: a multiproxy approach. *Historical Biology*: 1–22.
- Scotese C R. 2014. Atlas of Permo-Carboniferous Paleogeographic Maps (Mollweide Projection), Maps 53–64, Volumes 4. The Late Paleozoic, PALEOMAP Atlas for ArcGIS. PALEOMAP Project, Evanston, IL.
- Scott A C. 2000. The Pre-Quaternary history of fire. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164(1–4): 281–329.
- Scott A C. 2010. Charcoal recognition, taphonomy and uses in palaeoenvironmental analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 291(1–2): 11–39.
- Scott A C, Bowman D M J S, Bond W J, Pyne S J, Alexander M E. 2014. Fire on earth: an introduction. *Fire Ecology*, 10: 88–91. DOI: 10.5860/choice.52–0860.
- Shao L Y, Zhou J M, Jones T P, Hua F H, Xu X T, Yan Z M, Hou H H, Wang D D, Lu J. 2024. Inertinite in coal and its geoenvironmental significance: insights from AI and big data analysis. *Science China Earth Sciences*: 1–23.
- Shen W C, Zhao Q J, Uhl D, Wang J, Sun Y Z. 2023. Wildfire activity and impacts on palaeoenvironments during the late Paleozoic Ice Age: new data from the North China Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 629: 111781.
- Skjemstad J O, Clarke P, Taylor J A, Oades J M, McClure S G. 1996. The chemistry and nature of protected carbon in soil. *Soil Research*, 34(2): 251–271.
- Sun Y Z. 2024. Review and update on the applications of inertinite macerals in coal geology, palaeoclimatology, and paleoecology. *Palaeoworld*, 162(2): 193–200.
- Tewari R, Chatterjee S, Agnihotri D, Pandita S K. 2015. *Glossopteris* flora in the Permian Weller Formation of Allan Hills, South Victoria Land, Antarctica: implications for paleogeography, palaeoclimatology, and biostratigraphic correlation. *Gondwana Research*, 28(3): 905–932.
- Uhl D, Lausberg S, Noll R, Stapf K R G. 2004. Wildfires in the late palaeozoic of central Europe: an overview of the rotliegend(upper Carboniferous-lower Permian) of the Saar–Nahe Basin (SW-Germany). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 207(1–2): 23–35.
- Uhl D, Butzmann R, Fischer T C, Meller B, Kustatscher E. 2012. Wildfires in the Late Palaeozoic and Mesozoic of the Southern Alps—the late Permian of the Bletterbach-Butterloch area (northern Italy). *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*, 118(2): 223–233.
- Veraverbeke S, Rogers B M, Goulden M L, Jandt R R, Miller C E, Wiggins E B, Randerson J T. 2017. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests. *Nature Climate Change*, 7(7): 529–534.
- Wildman Jr R A, Hickey L J, Dickinson M B, Berner R A, Robinson J M, Dietrich M, Essenhigh R H, Wildman C B. 2004. Burning of forest materials under late Paleozoic high atmospheric oxygen levels. *Geology*, 32(5): 457–460.
- Yan M X, Wan M L, He X Z, Hou X D, Wang J. 2016. First report of Cisuralian (early Permian) charcoal layers within a coal bed from Baode, North China with reference to global wildfire distribution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 459: 394–408.
- Zhou J M, Shao L Y, Jones T P, Huang Y Y, Chen M, Hou H H, Lu J, Hilton J'. 2024. Mechanisms of inertinite enrichment in Jurassic coals: insights from a big data-driven review. *Earth-Science Reviews*: 104889.

(责任编辑 郑秀娟)