

引用格式: 林溢, 张姚, 张冰冰, 等. 2026. 秦岭地区末次盛冰期以来植被动态演变及其驱动机制分析[J]. 沉积学报. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.001
LIN Yi, ZHANG Yao, ZHANG BingBing, et al. 2026. Dynamic Evolution of Vegetation and Its Driving Mechanism in the Qinling Region Since the Last Glacial Maximum [J]. Acta Sedimentologica Sinica, DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.001.
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2026.001 CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2026.001

秦岭地区末次盛冰期以来植被动态演变及其驱动机制分析

林溢¹, 张姚¹, 张冰冰¹, 贾佳¹, 周爱锋²

1. 浙江师范大学地理与环境科学学院, 浙江金华 321000

2. 兰州大学资源环境学院, 兰州 730000

摘要 【目的】秦岭地区是中国东部重要的南北地理分界带, 植被类型丰富, 对气候变化响应敏感。然而, 该区域尚缺乏系统的植被对自然与人为因素的响应机制分析, 阻碍了对秦岭地区生态环境变化和人地关系演化的理解。【方法】以秦岭主峰太白山高山湖泊大爷海岩心沉积物为载体, 基于高分辨率的孢粉和炭屑指标, 利用植物群落重建法与多样性指数定量重建末次盛冰期以来的植被动态, 并通过 CharAnalysis 软件提取了火频率与火强度序列; 结合研究区可靠的气候与人类活动记录, 辅以炭屑重建的火活动序列, 系统探讨植被对气候变化与人类活动的响应机制; 进一步采用冗余分析与相关性分析等统计方法, 揭示不同时间尺度各驱动因素对植被演变的贡献。【结果】秦岭地区植被景观在末次盛冰期是以云杉属和松属为主的针叶林, 在末次冰消期演变为针阔叶混交林, 植被多样性表现为明显波动; 进入全新世后, 植被转变为以榛属/鹅耳枥属和栎属等为主的温带落叶阔叶林, 植被多样性随之明显上升; 晚全新世以来, 随蒿属、禾本科等草本植物扩张, 土地开阔度增加, 植被多样性则转为下降趋势。而火活动在末次冰消期与晚全新世均表现为高频高强度特征, 分别受冷干气候与人类活动的干扰。【结论】末次盛冰期以来, 秦岭植被对气候变化具有显著响应。末次盛冰期至末次冰消期, 阔叶林和针叶林与温度呈现显著相关, 冗余分析结果也显示温度是其主导因素。进入全新世, 降水与温带落叶阔叶林的相关性高, 随着东亚夏季风增强, 降水成为影响植被演替的重要控制因子。自中全新世以来, 人类活动开始作为重要的第三驱动因素介入, 其影响力随时间推移不断增强。本研究阐明了秦岭地区植被对气候变化的响应模式以及人类活动的介入过程, 为理解高山地区的植被—气候—火—人类活动的长期相互作用机制提供了重要案例。

关键词 植被群落; 植被多样性; 气候变化; 火活动; 末次盛冰期; 秦岭

第一作者 林溢, 男, 2000 年出生, 硕士研究生, 孢粉与古生态, E-mail: linyi08@zjnu.edu.cn

通信作者 张姚, 女, 博士, 讲师, E-mail: zhangyao23@zjnu.edu.cn; _

周爱锋, 男, 博士, 教授, E-mail: zhouaf@lzu.edu.cn

中图分类号: 文献标志码: A 文章编号: 1000-0550 (2026) 00-0000-00

0 引言

植被作为陆地生态系统的核心组分, 在调节全球碳平衡和维持全球气候稳定方面发挥着不可替代的作用 (Liu *et al.*, 2016; Seddon *et al.*, 2016)。在全球变暖背景下, 气候因子通过直接生理胁迫与间接生态调控的方式, 深刻影响着植被的空间分布格局与生物量分配策略。

收稿日期: 2025-09-23; 收修改稿日期: 2026-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771208); 浙江师范大学科研启动基金 (YS304123993)

在时间维度上主要表现为生理过程加速，例如光合效率提升与生长季延长等适应性变化（Piao *et al.*, 2007; Andreu-Hayles *et al.*, 2011）。在空间维度上则引发地理分布格局重构（Cramer *et al.*, 2001; Cao *et al.*, 2019），如极苔原带灌丛群落的极向扩张（Frost and Epstein, 2014），山地生态系统林线海拔的显著抬升（Leonelli *et al.*, 2011; Zindros *et al.*, 2020）与喜热物种分布范围的扩散（Krishnaswamy *et al.*, 2014; Pu *et al.*, 2025）。研究表明，持续变暖将通过植被—气候反馈机制，进一步放大对地球系统的影响（Overpeck *et al.*, 1991; Jiang *et al.*, 2011）。由于植被演替存在百年及千年时间尺度的周期，而目前已有的观测数据时间尺度较短，因此，开展地质历史时期气候对陆地植被演变的影响研究，为应对当前及未来气候变暖背景下对陆地生态系统的演变提供历史借鉴。

植被对气候变化的响应过程和反馈机制一直是全球变化研究的前沿和热点（如 Levine, 2016）。近些年，学者们基于不同载体针对不同时间尺度开展了植被演化及其驱动机制研究（Xiao *et al.*, 2008; 杨肖肖, 2017; Liu *et al.*, 2020a; Xu *et al.*, 2023）。位于青藏高原东部若尔盖泥炭与东北地区镜泊湖的湖相沉积记录表明，全新世植被的长期变化可归因于夏季太阳辐射驱动的温度和东亚夏季风（East Asian summer monsoon, EASM）强度变化的影响（Li *et al.*, 2011; Sun *et al.*, 2017），而云贵高原的异龙湖孢粉指标进一步揭示，温度与降水控制植被类型的转型（Li *et al.*, 2024）。公海湖泊沉积物孢粉记录则显示，华北地区植被演替的主导因子是 EASM 引发的降水变化（Chen *et al.*, 2015）。Huang *et al.* (2023) 通过江汉平原湖相沉积物重建植被演变历史表明南方地区轨道尺度上的植被群落演替受太阳辐射调控的 EASM 强度支配，而千年尺度变化则主要受高纬冰盖/大西洋经向翻转环流触发的快速气候事件影响。阿尔泰山区全新世植被变化主要受西风带调控的湿度变化驱动，北大西洋海表温度和北大西洋涛动通过影响西风强度和水汽输送，间接控制该区植被变化（Zhang *et al.*, 2018b）。可见，气候环境中的水热条件是影响植被动态变化的主要因素（Zhu *et al.*, 2016）。

此外，火活动被认为是调控陆地生态系统植物多样性格局的关键因子（Pausas and Ribeiro, 2017; He *et al.*, 2019; Kelly *et al.*, 2020），其燃烧破坏地表植被，干扰草木平衡，长期并广泛地影响陆地生态系统中的植被类型和群落演替（Bowman *et al.*, 2009）。Bond *et al.* (2005) 认为全球多个典型植被群落的形成与火活动的生态效应密切相关。适度火干扰通过重塑植被生长环境与资源分配格局，促进物种丰富度与植被多样性（Wooller *et al.*, 2000; Caldararo, 2002）。然而，有的研究则认为高强度或频繁的火活动会对生态系统产生负反馈效应（Turner *et al.*, 2019; Whitman *et al.*, 2019）。这种争议可能源于火干扰强度、频率及

生态系统类型的差异 (Brooks *et al.*, 2004; Enright *et al.*, 2014)。而且, 越来越多的证据表明过去几千年, 人类活动一直在塑造地球表面植被, 包括刀耕火种的农业种植、砍伐森林、烧火取暖与战争等, 显著改变了陆地表层植被的组成和结构 (Steffen *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2017; Mottl *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2023)。综上, 定量重建古植被历史, 并揭示植被与气候、火活动之间的动态关系以及人类活动的影响对理解区域植被的长期演化至关重要 (Nolan *et al.*, 2018; Birks, 2019; Manzano *et al.*, 2020)。

沉积物花粉是重建过去植被变化的可靠指标, 现代表土花粉与植被调查研究表明, 花粉多样性可作为植物多样性的有效代用指标 (如: Weng *et al.*, 2006; Felde *et al.*, 2016; Xie *et al.*, 2024)。基于此, 孢粉丰富度、均匀度及多样性指数已被广泛应用于古植物多样性的定量重建 (如: Odgaard, 1999; Birks *et al.*, 2016; Cao *et al.*, 2022; Zhao *et al.*, 2025)。为从植被群落类型角度系统揭示植被演替过程, 基于孢粉数据的植被群区重建方法 (Biomisation) 逐步发展并得到应用 (如: Yu *et al.*, 2000; Ni *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2025)。通过构建孢粉类型与植物功能群之间的定量关系, 该方法实现了对历史时期主导植被群区的重建, 从而为全面理解植被动态演变过程提供了关键支撑。

秦岭由于其独特的区位和海拔成为我国东部季风区暖温带与亚热带气候的分界线, 同时对应了温带与亚热带植被群落, 塑造了该地区丰富的植被类型和生物多样性, 对气候变化高度敏感 (Liu *et al.*, 2009; Zhang *et al.*, 2021a, 2021b)。近些年, 尽管全球变暖背景下秦岭植被整体呈现“变绿”趋势, 但其丰富度和多样性却呈现下降趋势 (Zhang *et al.*, 2021a)。然而, 驱动该区域植被演替的关键气候因子尚未明确, 以及火活动对植被动态, 尤其是多样性变化中的作用仍不明确, 这制约了对秦岭植被长期演变机制的深入理解。此外, 秦岭地区经历了老关台、仰韶与龙山文化的兴衰荣枯和周、秦、汉和唐等王朝的更迭 (Hosner *et al.*, 2016), 完整的文化发展序列见证了农业起源与发展的全过程, 为长时间尺度的人地关系演变提供了独特而完整的自然—人文档案, 人类活动对秦岭地区植被演替的影响仍亟待系统评估。因此, 本研究将利用同一岩心的孢粉和炭屑指标, 并结合研究区可靠的气候与人类活动记录, 探讨该地区末次盛冰期 (Last Glacial Maximum, LGM) 以来的植被演变特征及其驱动机制, 进一步采用冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA) 和相关性分析等统计分析方法, 揭示不同时间尺度各驱动因素对植被演变的贡献, 旨在从地质历史的角度为当前及未来秦岭高山植被生态系统的保护与可持续性发展政策的制定提供科学的理论依据。

1 研究区概况

秦岭 (33°~34°30' N, 107°~110° E) 横亘于中国中东部 (图 1a), 呈东西走向, 绵延约 1 600 km, 南北宽约 300 km, 最高海拔为 3 767.2 m, 平均海拔约 1 500~2 500 m。其独特的地理位置和海拔使其成为中国南北重要的气候分界线, 冬季阻挡北方冷干气流南下, 而夏季限制南方暖湿气流北进 (Kou *et al.*, 2020), 从而塑造了南北迥异的生态系统格局。秦岭主峰太白山 (33°41'~34°10' N, 107°19'~107°58' E) 为中国大陆中东部的最高峰, 按照海拔从低到高垂直气候带谱明显, 并对应完整的植被垂直带谱, 由下而上依次为: 低山扰动带、锐齿栎林带、针阔混交林带、桦木林带、高山针叶林带和高山灌丛草甸 (张彦军等, 2020)。太白山保存有第四纪冰川遗迹, 其冰斗湖大爷海位于太白山山顶 (图 1b), 海拔约 3 615 m, 面积约为 5 000 m² (33°57'25.9" N, 107°45'38.39" E)。研究区受 EASM 控制, 气候表现为夏季短暂温暖多雨, 冬季漫长寒冷干燥 (Zhang *et al.*, 2021a)。秦岭北坡太白县气象站 (海拔 1 545 m) 1987~2010 年的观测数据显示该地年均降水和年均温度分别为 710 mm 与 8.15 °C (图 1c, 数据来源于中国气象数据网 <http://data.cma.cn/>)。湖泊主要由大气降水补给, 周围植被为高山草甸 (李永飞等, 2017), 其连续的沉积序列为研究东亚季风区古植被、古气候和山地生态系统演化提供了理想的地质档案。

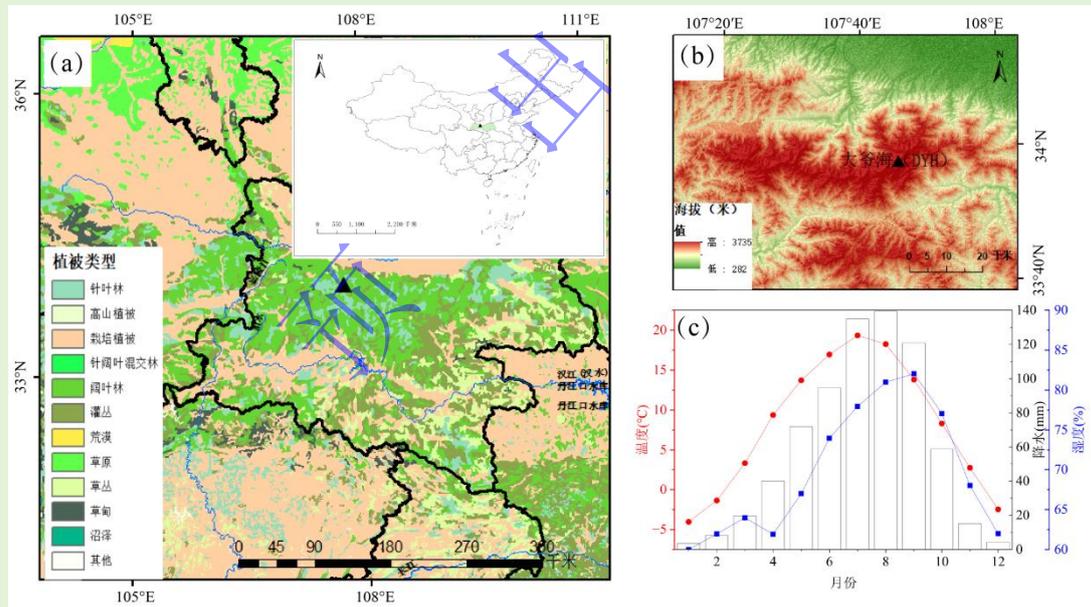


图 1 研究区概况图

(a) 秦岭地区范围及周边植被类型分布图 (底图基于自然资源部地图技术审查中心标准地图绘制, 审图号为 GS (2024) 0650, 底图边界无修改。植被类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心, <https://www.resdc.cn/>)。图中黑色三角形符号表示大爷海 (DYH) 位置, 右上角小图显示秦岭在中国的地理位置及边界范围; (b) 研究区域地形高程及采样点位置; (c) 太白县气象站 1987~2010 年气候数据 (温度、降水和湿度)

Fig.1 Overview map of study area

(a) Qinling region and the distribution of surrounding vegetation types (The base map is drawn based on the standard map of the Map Technology Review Center of the Ministry of Natural Resources (map approval number: GS (2024) 0650), with unmodified boundaries.

Data from Resources and Environmental Sciences Data Platform, Chinese Academy of Sciences, www.resdc.cn.). Black triangle indicates location of Daye Lake (DYH). Inset: Geographical location and boundary range of Qinling Mountains; (b) topographic elevation of study area and location of sampling site; (c) climate data (mean annual temperature (red); precipitation (grey columns); humidity (blue)) from Taibai County Meteorological Station, 1987–2010

2 材料与方法

2.1 化石孢粉与炭屑记录

本研究用于分析的大爷海沉积物样品是在湖泊中心位置采集的连续沉积物钻孔 (DYH16A)，该岩心总长 235 cm，均为黏土沉积。基于全有机样品和孢粉浓缩物进行 AMS¹⁴C 定年，并结合大爷海沉积物叶蜡单体氢同位素与临近的豪猪洞石笋氧同位素的降水信号，通过 QAnalySeries 软件进行匹配分析后，利用 rbacon 软件包 (版本 2.5.0) 构建贝叶斯年代—深度模型 (Blaauw and Christen, 2011)，得到底部年代为 21.6 cal ka B.P.。年代框架建立的详细信息详见 Zhang *et al.*, 2023。

DYH16A 沉积物岩心以 1 cm 为间距取样并开展孢粉分析，依次用 HCL、KOH 和 HF 处理沉积物样品，将处理好的样品加适量甘油制成临时玻片用于计数。孢粉统计在放大倍数为 400 倍的光学显微镜下进行，每个样品至少计数 500 粒陆生植物孢粉，其鉴定参考已发表的孢粉图鉴 (例：王伏雄等, 1995; Tang *et al.*, 2020)。本研究的孢粉结果使用百分比表示，并利用 Tilia 软件作图，通过 CONISS 聚类分析共分为 5 个亚区，LGM 以来的孢粉结果发表于 Zhang *et al.*, 2025，孢粉图谱见图 2。

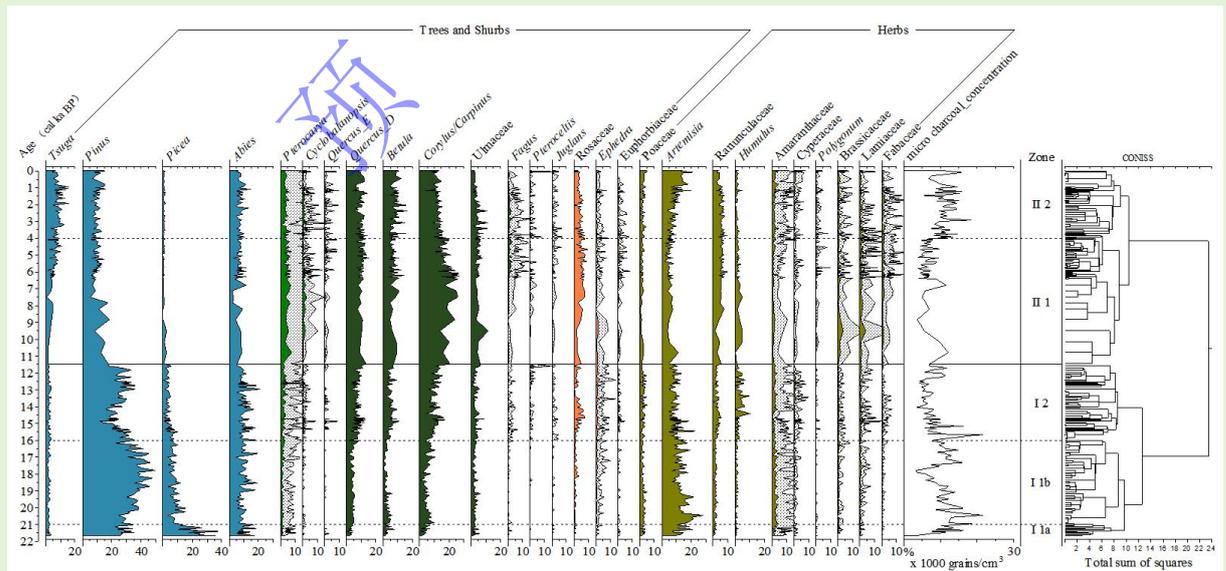


图 2 大爷海钻孔 LGM 以来孢粉百分比和微炭屑浓度结果

基于大爷海岩心 DYH16A 的 27 个主要孢粉类型绘制，同时给出微炭屑浓度和 CONISS 聚类分析结果，*Quercus_E* 为常绿栎属；*Quercus_D* 为落叶栎属

Fig.2 Pollen percentage and micro charcoal concentration record from Daye Lake since the LGM Based on

27 main pollen taxa from Daye Lake core DYH16A, including micro charcoal concentration and CONISS zonation (*Quercus_E* = *Quercus_evergreen*; *Quercus_D* = *Quercus_deciduous*)

孢粉分析的同层位样品同时开展微炭屑的统计研究, 仅对粒径 > 10 μm 的微炭屑进行计数, 每个玻片至少统计 300 粒, 详细结果参考 Zhang *et al.*, 2023。微炭屑浓度数据在图 2 展示。基于 CharAnalysis 软件, 使用 100 年移动中值估算炭屑的背景分量, 即炭屑的低频变化。对炭屑序列基于 100 年时间窗口进行局部加权回归处理后, 减去背景值, 得到火的峰值, 当该值超过第 95 个百分位数时, 可以分离噪声信号, 超过此阈值标准的峰值反映大规模火活动, 并用于重建火频率信息。

2.2 基于孢粉的植被群落重建

本研究, 我们将 Prentice *et al.* (1996) 描述的植被群落重建方法应用于大爷海的化石孢粉组合分析中。植物功能型 (Plant Functional Type, PFT) 和植被群落的分类遵循 Ni *et al.* (2010) 和 Yu *et al.* (2000) 概述的方案, 并参考了研究区现代植被分布特征。植被群落重建是利用三个矩阵 (PFT × 孢粉类群、植被群区 × PFT 和植被群区 × 孢粉类群矩阵), 包括 51 个孢粉类群、12 个 PFT 和 5 个植被群落 (表 1, 2)。最后通过重建植被群落的得分变化来评估植变动态, 我们选择了得分最高且呈现明显变化的植被群落类型进行比较分析, 上述植被群落得分的计算利用 R 软件 (版本 4.2.2) vegan 包完成。

表 1 大爷海钻孔的孢粉类型分配到植物功能型 PFTs

Table 1 Pollen type from Daye Lake assigned to plant functional types (PFTs)

缩写	PFTs	孢粉类群 (属/科)
BEC	北方常绿针叶树	冷杉属 (<i>Abies</i>)、云杉属 (<i>Picea</i>)、松属 (<i>Pinus</i>)
DF	荒漠草本/灌木	麻黄属 (<i>Ephedra</i>)、豆科 (<i>Fabaceae</i>)、白刺属 (<i>Nitraria</i>)、怪柳属 (<i>Tamarix</i>)
EC	广温性针叶林	松属 (<i>Pinus</i>)
G	草本植物	禾本科 (<i>Poaceae</i>)
H	矮生常绿灌木	杜鹃花科 (<i>Ericaceae</i>)
S	草甸	莎草科 (<i>Cyperaceae</i>) 蒿属 (<i>Artemisia</i>)、苋科 (<i>Amaranthaceae</i>)、菊科 (<i>Asteraceae</i>)、十字花科 (<i>Brassicaceae</i>)、 豆科 (<i>Fabaceae</i>)、葎草属 (<i>Humulus</i>)、百合科 (<i>Liliaceae</i>)、唇形科 (<i>Lamiaceae</i>)、蓼 属 (<i>Polygonum</i>)、蔷薇科 (<i>Rosaceae</i>)、毛茛科 (<i>Ranunculaceae</i>)、胡颓子属 (<i>Elaeagnus</i>)、 柳属 (<i>Salix</i>)
SF	温带草原/灌木	槭属 (<i>Acer</i>)、桦木属 (<i>Betula</i>)、落叶栎属 (<i>Quercus_D</i>)、蔷薇科 (<i>Rosaceae</i>)、绣线菊 属 (<i>Spiraea</i>)、椴树属 (<i>Tilia</i>)
TS	温带夏绿乔木/灌木	桤木属 (<i>Alnus</i>)、鹅耳枥属 (<i>Carpinus</i>)、大戟科 (<i>Euphorbiaceae</i>)、白蜡属 (<i>Fraxinus</i>)、 叶底珠属 (<i>Securinega</i>)、榆科 (<i>Ulmaceae</i>)、荚蒾属 (<i>Viburnum</i>)
TS1	中温带夏绿乔木/灌木	桤木属 (<i>Alnus</i>)、栗属 (<i>Castanea</i>)、朴属 (<i>Celtis</i>)、榛属 (<i>Corylus</i>)、水青冈属 (<i>Fagus</i>)、 胡桃属 (<i>Juglans</i>)、枫杨属 (<i>Pterocarya</i>)、榆科 (<i>Ulmaceae</i>)、枫香属 (<i>Liquidambar</i>)、 桑属 (<i>Morus</i>)
TS2	暖温带阔叶夏绿乔木/灌木	雪松属 (<i>Cedrus</i>)、油杉属 (<i>Ketelleria</i>)、罗汉松属 (<i>Podocarpus</i>)、铁杉属 (<i>Tsuga</i>)
WTC	暖温带针叶林	

WTE

暖温带常绿阔叶林

栲属 (*Castanopsis*)、青冈属 (*Cyclobalanopsis*)、大戟科 (*Euphorbiaceae*)、桑属 (*Morus*)、青檀属 (*Pteroceltis*)、常绿栎属 (*Quercus_E*)、无患子科 (*Sapindaceae*)、山茶科 (*Theaceae*)

表 2 大爷海钻孔植被功能型 (PFTs) 在植被群区中的分配

Table 2 Assignment of PFTs at Daye Lake to biomes

植被群区名称	缩写	PFTs
温带落叶阔叶林	TEDE	TS, TS1, TS2
针叶林	COCO	BEC, EC
温带灌丛	TESH	DF, H
草本植物	STEP	G, S, SF
常绿阔叶林/暖温带混交林	WAMF	WTC, WTE

2.3 基于孢粉的植被多样性重建

我们采用了孢粉丰富度、均匀度、香农与辛普森多样性指数以从不同角度重建秦岭地区的植被多样性变化。孢粉丰富度 (Palynological richness) 是在给定统计量的基础上, 采用稀疏化方法计算得出 (Birks and Line, 1992)。香农 (Shannon-Weiner) 多样性指数综合考虑主要植被类型的丰富度与相对丰度 (Shannon, 1948), 而辛普森 (Simpson) 多样性指数则是优势物种数量的衡量指标 (Simpson, 1949)。同时, 皮耶洛均匀度 (Pielou evenness) 指数 (Pielou, 1966) 被用于量化孢粉组合中物种丰度分布的均匀性。均匀度指数的取值范围为 0 (孢粉组合中仅有一种物种) 至 1 (孢粉组合中每种物种的丰度相同), 较低值表示孢粉类型丰度之间的高度差异, 而较高的值表示不同植被分布更均匀 (李泉和赵艳, 2018)。以上指标的计算均使用 R 软件 (版本 4.2.2) 中的 *vegan* 包进行 (Oksanen *et al.*, 2012)。

2.4 统计分析

本研究基于研究区可靠的气候与人类活动记录, 结合皮尔逊相关系数与冗余分析, 以定量揭示植被动态的驱动机制。其中, 所引用的古气候记录包括: 泾川黄土古土壤剖面中壳体动物记录重建的年均温度 (Dong *et al.*, 2022), 以及反映 EASM 强度的董哥洞 (Yuan *et al.*, 2004) 与豪猪洞石笋氧同位素记录 (Zhang *et al.*, 2018a)。人类活动强度方面, 选用中国 ^{14}C 数据的总和概率密度 (Wang *et al.*, 2014) 和历史人口数量变化 (Li *et al.*, 2009) 作为代用指标。为构建一条连续可对比的人类活动强度序列, 本研究选取 8~4 cal ka B.P. 时段, 将 ^{14}C 总概率密度与人口数量变化两个指标进行加权融合, 并以该基准序列的统计参数对所有时段数据进行整体 Z-score 标准化, 最终生成一条统一的人类活动强度曲线, 用于后续相关性分析与冗余分析。在进行统计分析之前, 本研究以孢粉年代序列为基准, 通过线性插值方法将所有环境和人类活动指标统一内插至孢粉年代点。

相关性分析是用于衡量两个或多个具备相关性的变量元素的相关密切程度 (Asuero *et*

al., 2006), 在这里主要用于探究 21.6~11.7 cal ka B.P.与全新世的植被丰度与自然变量(例: 温度与降水)和非自然变量(例: 人类活动强度)之间的线性关系。冗余分析(Ter Braak and Prentice, 2004)用于探索不同时间阶段各环境变量对植被变化的贡献程度, 主要用于厘清 LGM 以来秦岭地区植被对气候、火和人类活动的响应关系。皮尔逊相关分析和 RDA 分析则分别使用 SPSS27.0 和 Canoco5.0 软件执行。

3 结果

3.1 秦岭地区 LGM 以来的火频率与火强度

基于 DYH16A 岩心微炭屑记录重建的秦岭地区 LGM 以来的火活动(图 3)显示, 火活动强度呈现显著的阶段性变化特征, 两个火活动发生高值的时间段为 21.6~11.7 cal ka B.P.和中晚全新世(4~0 cal ka B.P.), 这两个时段分别识别出 15 次和 9 次火事件(图 3b)。21.6~11.7 cal ka B.P., 微炭屑浓度、火强度和火频率分别为 9 478.99 粒/cm³、125.48 粒/cm²/a 和 2.28 次/ka, 而且火活动存在次一级波动, 例如 21.6~21 cal ka B.P.期间微炭屑浓度、火强度和火频率较高, 分别为 9 865.65 粒/cm³、610.95 粒/cm²/a 和 4.53 次/ka。21~16 cal ka B.P.火活动整体呈现较弱的态势。海因里希事件(Heinrich Stadial 1, H1, 16~14.5 cal ka B.P.)期间火活动存在小幅上升。随后的博林阿罗德(Bølling-Allerød, BA, 14.5~12.9 cal ka B.P.)暖期, 火活动减弱, 而新仙女木事件(Younger Dryas, YD, 12.9~11.7 cal ka B.P.)的火活动则表现为高频低强度特征(火频率 3.52 次/ka 和强度 56.62 粒/cm²/a), 暗示多次小规模火活动。

进入早全新世(11.7~8 cal ka B.P.), 火活动整体表现为低值, 火强度和火频率的均值分别为 11.04 粒/cm²/a 和 1.01 次/ka, 仅识别出 3 次火事件。相较于末次冰期的火活动, 中全新世(8~4 cal ka B.P.)火活动在该时期表现为增加趋势, 微炭屑浓度、火强度和火频率的均值分别为 6 593.66 粒/cm³、55.89 粒/cm²/a 和 1.97 次/ka, 识别出 4 次火事件, 自 5 cal ka B.P.以来, 火活动呈现明显上升趋势。晚全新世火活动呈现明显高值, 微炭屑浓度、火强度和频率较高, 分别为 10 797.54 粒/cm³、185.39 粒/cm²/a 和 2.94 次/ka, 直至约 1 cal ka B.P., 火活动的发生得到抑制。

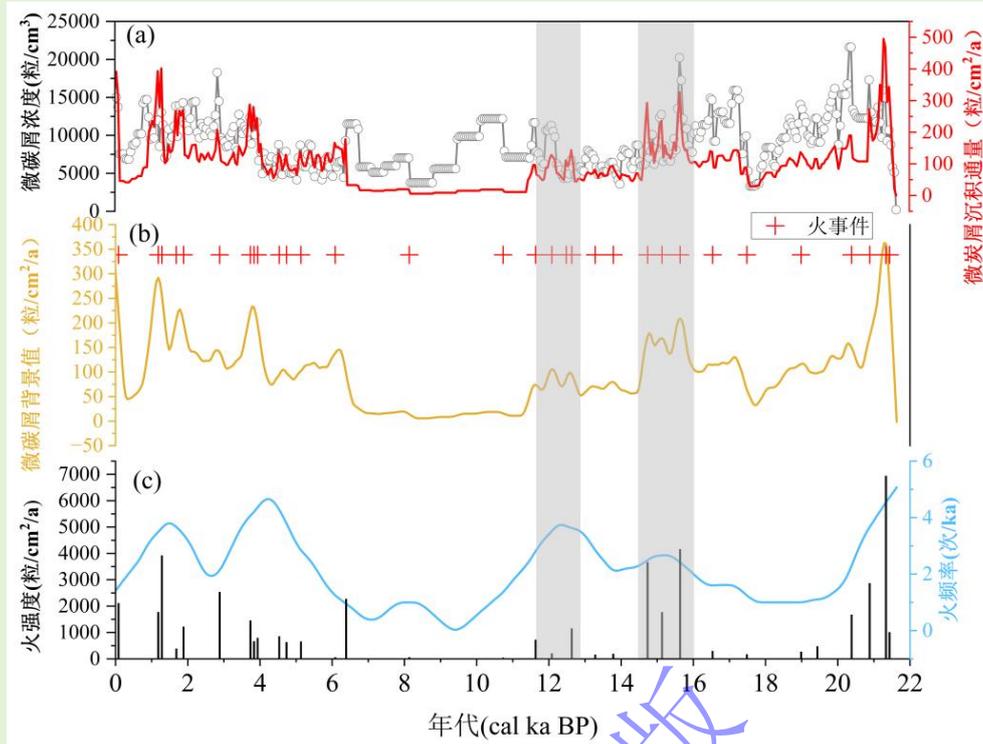


图3 大峪海钻孔微炭屑记录及其 CharAnalysis 软件分析结果

(a) 微炭屑浓度和沉积通量; (b) 微炭屑背景值和火事件; (c) 火强度和火频率

Fig.3 Micro charcoal records from Daye Lake and analysis results using CharAnalysis software

(a) micro charcoal concentration and influx; (b) micro charcoal background and fire events; (c) peak fire magnitude and fire return

3.2 秦岭地区 LGM 以来的植被群落变化

基于 DYH16A 孢粉记录重建的秦岭地区 LGM 以来的植被群落演变历史揭示该地区以森林植被为主导的生态格局,但其优势群落类型经历了显著的阶段性更替。秦岭地区植被生态演变过程中存在两个关键转型阶段: 21.6~16 cal ka B.P.以来, 针叶林在植被群落重建中始终保持着最高得分(图4), 植被景观在 16~11.7 cal ka B.P.演替为针叶林与温带落叶阔叶林的混交林。自全新世开始, 温带落叶阔叶林完全取代针叶林成为区域优势群落(图4)。

自 21.6 cal ka B.P.起, 以云杉为主的针叶林占据绝对优势, 但其优势开始持续衰减(图4)。随后的 21~18 cal ka B.P.期间, 松属取代云杉属成为针叶林的优势种。18~16 cal ka B.P., 针叶林植被群落得分进一步下降, 喜暖的落叶阔叶林和耐旱的温带灌木显著扩张。针叶林在 16~14.5 cal ka B.P.期间持续衰退, 温带落叶阔叶林则持续扩张。14.5~12.9 cal ka B.P.时期针叶林得以持续扩张, 草本植物植被延续前期趋势进一步发展, 温带落叶阔叶林相应退缩。12.9~11.7 cal ka B.P.期间的针叶林与草本植物出现小幅峰值, 温带落叶阔叶林整体维持在较低水平, 但后期逐渐显现回升趋势。

早全新世时期以落叶栎、榛属/鹅耳枥属和桦木属为主的温带落叶阔叶林成为区域优势

群落, 针叶林显著下降, 温带落叶阔叶林、常绿阔叶/暖温带混交林和草本植物 (图 4) 则实现显著扩张。中全新世温带落叶阔叶林维持高分, 常绿阔叶/暖温带混交林进入快速扩张阶段。晚全新世以来, 温带落叶阔叶林衰退, 针叶林有一定的恢复, 且耐旱的蒿属植被显著扩张。约 1 cal ka B.P. 以来, 伴随着针叶林和常绿阔叶/暖温带混交林急剧衰退, 出现温带落叶阔叶林和草本植物的短暂恢复。

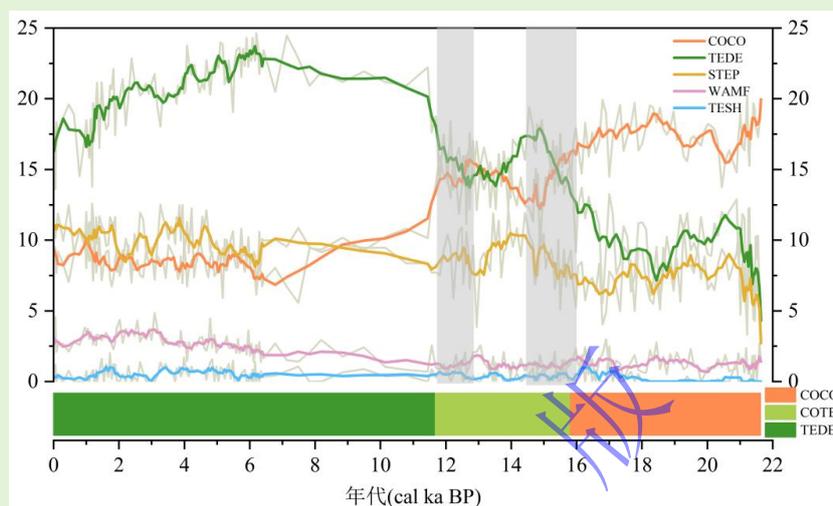


图 4 大谷海钻孔孢粉记录 biomes 分析结果

橙色、绿色、黄色、紫色和蓝色曲线分别表示冷温带针叶林 (COCO)、温带落叶阔叶林 (TEDE)、草本植物 (STEP)、常绿阔叶/暖温带混交林 (WAMF) 和温带灌木 (TESH); 并给出优势群落的变化, 其中 COTE 表示针阔混交林

Fig.4 Biome scores for pollen record from Daye Lake

Orange curve: cool coniferous forest (COCO); green: temperate deciduous broadleaf forest (TEDE); yellow: steppe (STEP); purple: broadleaf evergreen/warm temperate mixed forest (WAMF); blue: temperate shrubs (TESH). Changes in dominant community shown at bottom of figure, with coniferous and temperate deciduous broadleaf mixed forest represented by COTE

3.3 秦岭地区 LGM 以来的植被多样性变化历史

基于 DYH16A 岩心孢粉记录重建的秦岭地区 LGM 以来植被多样性、均匀度和丰富度分析结果展示在图 5, 结果显示香农多样性指数与辛普森多样性指数表现出较好的一致性 (图 5c, d), 二者与均匀度指数存在显著正相关关系 (图 5a)。LGM 以来, 植被丰富度和多样性指数总体呈上升趋势, 但存在明显的阶段性波动 (图 5b)。在 21.6~21 cal ka B.P. 时段, 植被多样性显著增加, 均匀度指数同步上升。随后的 21~18 cal ka B.P. 期间, 虽然丰富度保持稳定, 但香农指数和辛普森指数均明显降低, 且植被呈现不均匀分布, 表明此阶段植被群落中少数物种的相对丰度显著增加, 物种间数量分布更不均衡。18~14.5 cal ka B.P., 植被多样性和均匀度指数均呈现显著上升趋势。BA 暖期 (14.5~12.9 cal ka B.P.), 植被多样性和均匀度指数整体呈现高值, 但出现下降趋势。YD (12.9~11.7 cal ka B.P.) 期间, 两者整体呈现上升趋势。

进入全新世后，植被多样性指数和均匀度指数重新呈现持续增加的演化趋势。然而，上升过程在晚全新世达到峰值后开始出现明显的下降趋势，直至约 1 cal ka B.P.才再次转为上升趋势。这里需要指出，后面的多样性分析我们只使用了香农多样性指数。

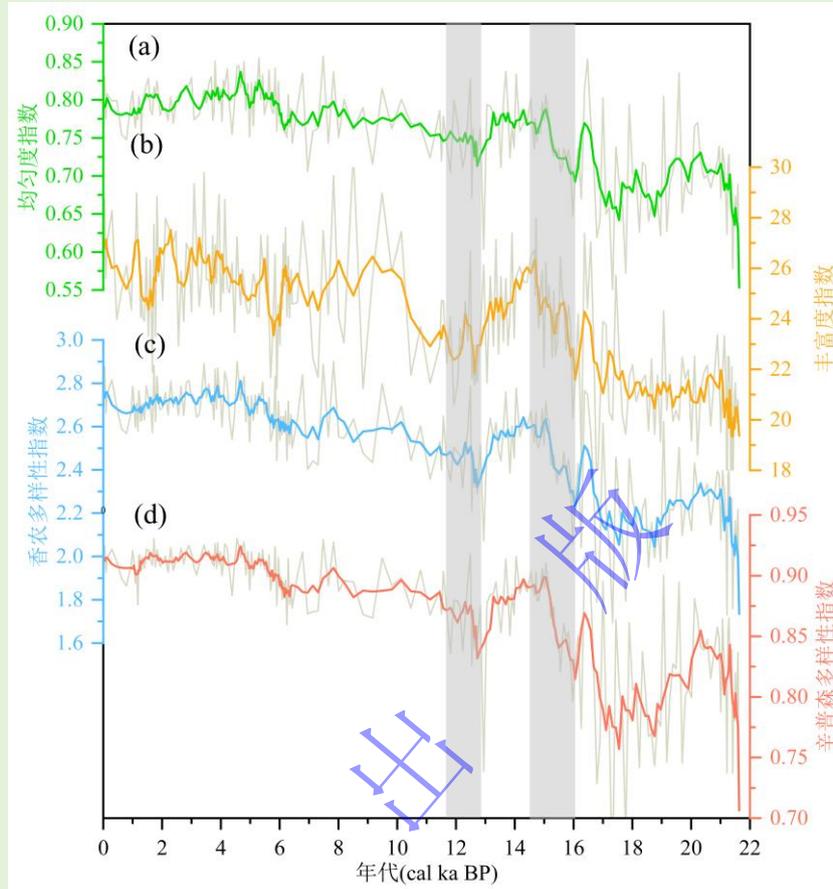


图 5 大爷海钻孔植被多样性指数变化

灰色曲线为原始数据，彩色曲线为 5 点平滑数据

Fig.5 Changes in vegetation diversity for Daye Lake

Grey curves represent the original data; colored curves represent 5-point smoothed data

4 讨论

4.1 秦岭地区 LGM 以来植被演替及其驱动因素

气候一直被认为是植被类型、分布格局及其动态变化的关键控制因素。研究表明，不同植被类型对气候变化的响应存在显著差异 (Ren *et al.*, 2023)。通常认为云杉属和松属等植被反映冷干的气候环境 (Achuff and La Roi, 1977; Liu *et al.*, 2002)，而喜暖湿的温带落叶阔叶树 (例如榛属/鹅耳枥属与栎属) 则对水热条件要求较高 (Wang *et al.*, 2018; Xu *et al.*, 2019; Trivedi *et al.*, 2020)，蒿属等草本植物的耐寒和耐旱能力表现突出 (Miao *et al.*, 2011)，此外，常绿阔叶树种广泛分布于气候温暖湿润的亚热带和热带地区 (Srivastava *et al.*, 2021)。尽管自然要素一直是驱动植被生态系统变化的主要原因，但越来越多的证据表明：过去几千

年人类活动持续充当地质力量显著改变了地球陆地表面 (Luysaert *et al.*, 2014; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022), 刀耕火种的农业生产活动、森林植被退化与水土流失加剧等, 推动地球系统演变逐渐偏离了其自然演变轨迹 (Steffen *et al.*, 2007)。鉴于植被群落、气候、火活动与人类活动之间存在复杂的相互作用, 本研究整合主要的孢粉类型、植被群落得分、香农多样性和均匀度指数, 并结合研究区可靠的气候记录、人类活动记录及大谷海微炭屑重建的火强度和火频率序列进行了比较分析 (图 6), 以揭示秦岭地区 LGM 以来的植变动态演替特征及其驱动机制。

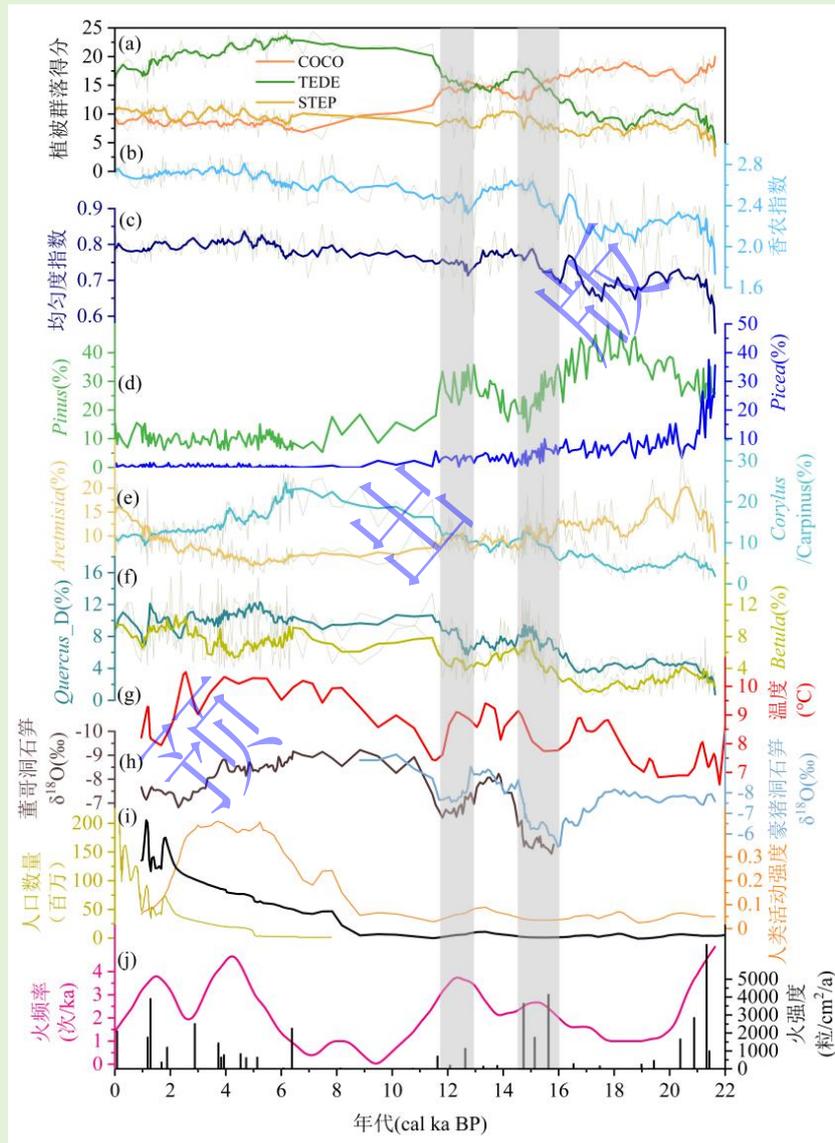


图 6 秦岭地区 LGM 以来的植被演化及其影响因素

(a) 橙色、绿色和黄色曲线分别表示冷温带针叶林 (COCO)、温带落叶阔叶林 (TEDE) 和草本植物 (STEP); (b) 香农指数; (c) 均匀度指数; (d) 松属和云杉属孢粉百分比; (e) 蒿属和榛属/鹅耳枥属孢粉百分比; (f) 桦木属和落叶栎属孢粉百分比; (g) 泾川黄土古土壤剖面软体动物记录重建的年均温度 (Dong *et al.*, 2022); (h) 董歌洞和豪猪洞石笋氧同位素记录 (Yuan *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2018a); (i) 中国 ^{14}C 数据的总和概率密度和中国人口数量变化 (Li *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2014), 黑色曲线表示标准化人类活动指数; (j) 火强度和火频率。灰色曲线为原始数据, 彩色曲线为 5 点平滑数据。

Fig.6 Vegetation evolution and influencing factors in the Qinling region since the LGM

(a) orange curve: cool coniferous forest (COCO); green: temperate deciduous broadleaf forest (TEDE); yellow: steppe (STEP); (b) Shannon-Wiener diversity index; (c) Pielou evenness index; (d) percentages of *Pinus* and *Picea* pollen; (e) percentages of *Artemisia* and *Corylus/Carpinus* pollen; (f) percentages of *Betula* and *Quercus_D* pollen; (g) average annual temperature reconstructed from mollusk records in loess and Jingchuan paleosol profiles (Dong *et al.*, 2022); (h) Speleothem $\delta^{18}\text{O}$ records from Dongge and Haozhu Caves (Yuan *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2018a); (i) summed probability distribution of calibrated radiocarbon dates in China and changes in China's population (Li *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2014); black curve shows standardized human activity index; (j) peak magnitude and fire return interval: grey curve is original data, colored curve is 5-point smoothed data

秦岭地区植被对气候变化响应敏感，冷干气候支持了针叶树的生长，而暖湿环境有利于阔叶林的扩张（Zhang *et al.*, 2021a, 2021b, 2025）。21.6~21 cal ka B.P.期间，冷干气候条件为云杉属（最高占比 37.52%）为主的针叶林提供了适宜生境，随后区域温度升高是喜低温云杉属植被急剧衰退的主要原因（图 6d），温带落叶阔叶林与草本植物呈明显扩张趋势。RDA 结果显示，温度与多样性指数、温带落叶阔叶林和草本植物植被均呈显著正相关，与针叶林为负相关关系（图 7a）。此阶段火频率和火强度均较高（图 6j），一方面归因于冷干气候有利于火活动的发生，另一方面由于云杉林在此阶段作为优势群落具有较高的可燃性（赵文伟，2012；Park *et al.*, 2024），从而为火活动提供了充足的燃料。但随着区域温度上升使云杉林急剧退缩，燃料供给减少，从而导致火活动的减少。这一结论也获得 RDA 分析结果的支持，火活动与针叶林群落呈现显著正相关关系（图 7a），进一步印证燃料减少对火的抑制作用（Scott *et al.*, 2014；Nesbitt *et al.*, 2025）。

21~18 cal ka B.P.期间，RDA 分析揭示气候因子与针叶林群落呈显著正相关（图 7b），松属取代云杉成为优势种（松属孢粉占比最高达 49.6%，图 6d）。Hao *et al.* (2018) 认为 LGM 时期，松属植被并未南迁至长江以南，而是依托黄土高原周边山地微避难所（例如秦岭、祁连山、太行山及浑善达克沙地）局部存活。由于松属主导区域植被格局，温带落叶阔叶林与草本植物在此阶段呈缓慢下降趋势，均匀度指数也处于低值，且香农指数及辛普森指数降低，可能存在松属对生态位的竞争排斥作用。而且松属凋落物分解缓慢，厚凋落层阻碍草本植物发展，同时改变土壤化学性质（如降低 pH 和减少养分有效性），对植被多样性产生影响（Duffy *et al.*, 2024）。此阶段火频率始终维持低值，可能归因于冷湿气候对可燃物燃烧潜力的直接削弱（Kampf *et al.*, 2025），这一结论得到了 RDA 结果的支持，结果表明火活动与针叶林、气候呈负相关。

在末次冰消期（18~11.7 cal ka B.P.），秦岭地区的气候逐渐转为暖湿（Zhang *et al.*, 2025），区域温度升高减弱了松属的竞争优势（Feurdean *et al.*, 2011），以松属植被的明显减少为代价，落叶阔叶林和温带灌木扩张（图 4），植被多样性指数也呈现明显增加趋势。在该时期，

研究区植被组成与群落结构发生了显著转变，RDA 结果显示，温度是该阶段植被变化的关键驱动因素（图 7c）。自 16 cal ka B.P.开始，温带落叶阔叶林的得分逐渐开始超过针叶林（图 6a），标志着植被群落向针阔混交林转型。该转变发生于 H1 事件（16~14.5 cal ka B.P.）末期，北半球在寒冷事件结束后温度回升，夏季风逐步增强（图 6；Feurdean *et al.*, 2011）。贵州草海湖孢粉记录同样显示，约 15.8 cal ka B.P.植被类群由适应冷干环境的常绿硬叶栎林转变为温带落叶阔叶林（Zhang *et al.*, 2024），揭示了中国南北气候的同步变暖信号。而且，此阶段火活动呈现高频和高强度的特点（图 6j），针叶林凋落物易燃，高频火活动为落叶树种（如桦木属和落叶栎属）及先锋草本释放生态位，进而促进植被多样性增加。然而，植被多样性指标在 14.5~12.9 cal ka B.P.（BA 暖期）期间呈现下降趋势，推测火活动在此阶段对植被产生一定的影响。火活动在 YD 时期（12.9~11.7 cal ka B.P.）出现高值（图 6j），主要受控于冷干气候（Zhang *et al.*, 2023；Hankin *et al.*, 2024）。

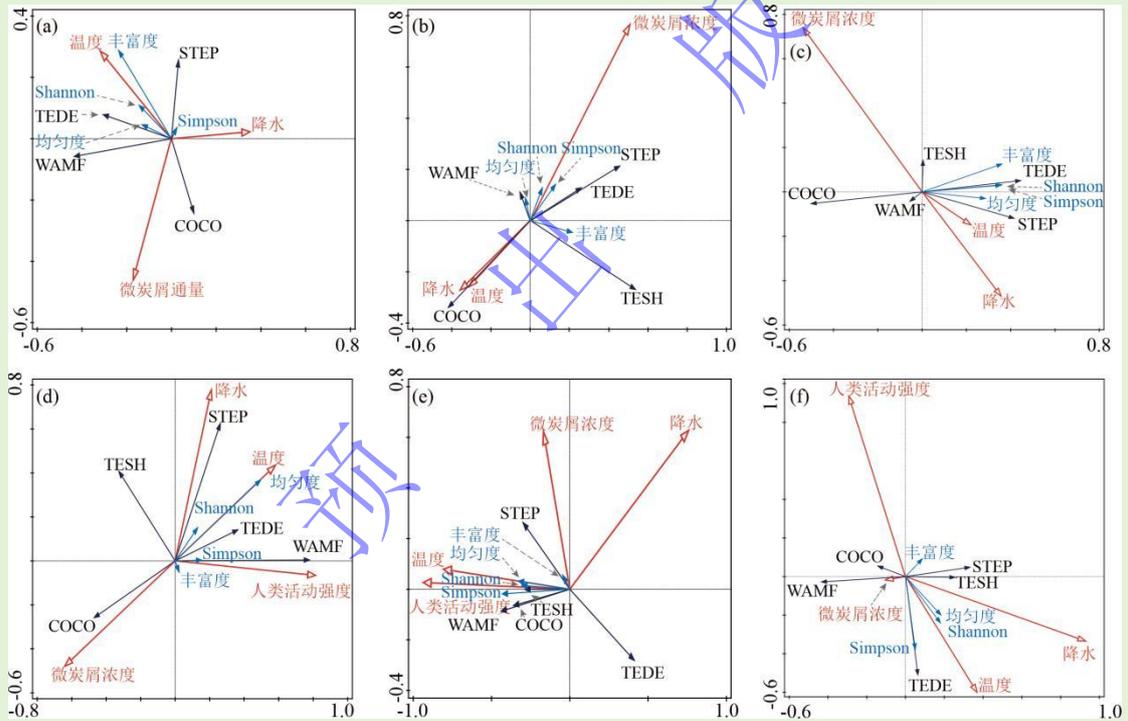


图 7 秦岭地区 LGM 以来不同时段植被群落、植被多样性及其影响因素的 RDA 分析结果

(a) 21.6~21 cal ka B.P.; (b) 21~18 cal ka B.P.; (c) 18~11.7 cal ka B.P.; (d) 11.7~8 cal ka B.P.; (e) 8~4 cal ka B.P.; (f) 4~1 cal ka B.P.; Shannon: 香农多样性指数; Simpson: 辛普森多样性指数; TEDE: 温带落叶阔叶林; COCO: 冷温带针叶林; TESH: 温带灌木; STEP: 草本植物; WAMF: 常绿阔叶/暖温带混交林

Fig.7 RDA analysis results for biomes, vegetation diversity and influencing factors during different periods in the Qinling region since the LGM

(a) 21.6~21 cal ka B.P.; (b) 21~18 cal ka B.P.; (c) 18~11.7 cal ka B.P.; (d) 11.7~8 cal ka B.P.; (e) 8~4 cal ka B.P.; (f) 4~1 cal ka B.P.; Shannon: Shannon-Wiener diversity index; Simpson: Simpson diversity index; TEDE: temperate deciduous broadleaf forest; COCO: cool coniferous forest; TESH: temperate shrubs; STEP: steppe; WAMF: broadleaf evergreen/warm mixed forest

早全新世（11.7~8 cal ka B.P.）作为末次冰消期向全新世适宜期过渡的阶段，全球气候

系统呈现显著的转型特征，主要表现为由冷干向暖湿的气候态转变（Lu *et al.*, 2025）。在全新世早期，温带落叶阔叶林完全取代针叶林成为优势类群，成为研究区的主导植被。温度和降水量的显著增加是导致植被群落组成发生转变的主要驱动力。这一时期温带落叶阔叶林和常绿阔叶/暖温带混交林同步扩张（图 4），RDA 分析显示（图 7d）植被群落和温度、降水均存在明显的正相关，反映出温暖湿润的环境条件有力促进了喜暖湿植被的发展。在此背景下，植被的香农多样性指数与均匀度指数也表现为持续上升。此外，温暖湿润的水热条件使得该阶段火频率维持在相对较低水平（图 6j），同时林木冠层密闭度增加也抑制火活动的发生。

中全新世（8~4 cal ka B.P.）时期的增温在大区域表现为一致性，而降水在我国东部季风区则表现为南北不同步的变化：我国北方温度与降水均达到最高值，进入全新世最适宜期（Chen *et al.*, 2015），而我国南方沉积记录则表现为降水的减少，与石笋氧同位素记录具有较好一致性，主要受夏季太阳辐射的影响（Liu *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2020b）。秦岭地区全新世的降水与中国北方保持一致，中全新世表现温度与降水的高值（Zhang *et al.*, 2025）。RDA 分析结果表明（图 7e），常绿阔叶/暖温带混交林扩张和温度存在正相关关系，此阶段温暖环境促使植被多样性与均匀度进一步增加，并在该时期表现为峰值。火活动在中全新世表现为增加趋势（图 6j），对应人类活动的增强，RDA 结果进一步表明，人类活动指标与微炭屑浓度之间存在明显正相关关系（图 7e）。约 5 cal ka B.P.开始呈现明显增加的趋势（图 6j），与区域人口数量的增长同步发生（图 6i），揭示该时期的火活动可能受人类活动影响，农业技术的进步使人类活动强度达到前所未有的程度，导致了该地区龙山文化的繁荣（Dong *et al.*, 2017）。Ding *et al.* (2022) 通过苟池湖孢粉重建北方地区植被演替历史同样认为自 5 cal ka B.P.人类活动对植被产生重要影响。早期人类活动强度较低，人类通过有限的用火及初步的农业开发，改造自然植被景观，这一过程打破了原有单一植被类型的优势，为更多植物物种提供生态位机会，从而在一定程度上促进了区域植被多样性的提升（王皓言等，2023）

晚全新世，温度与降水均表现减弱趋势（Feng *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2015），温带落叶阔叶林衰退，针叶林有一定的恢复，且耐旱的蒿属植被显著扩张（图 6e）。人类活动的增强和逐渐变差的气候环境可能是秦岭地区植被多样性与均匀度呈现下降趋势的主要原因（图 6f; Liu *et al.*, 2023）。同时，伴随着区域人类活动强度和人口数量的增加，刀耕火种的生产方式在该时期发挥重要作用，火频率呈现明显的高值，火强度达全新世的最高值。直至约 1 cal ka B.P.，黄土高原的南部地区，绝大多数耕地被开垦，建立了以旱作农业为主

的农业景观 (Huang *et al.*, 2006), 该时期人们的科学用火使得人为活动在一定程度上抑制了火灾的发生 (Yuan *et al.*, 2022), 秦岭地区的人类活动对植被的影响自晚全新世显著增强 (Zhou *et al.*, 2010; Ding *et al.*, 2022)。

4.2 植被群落演替的驱动机制从自然主导到人类活动影响转变

上述秦岭地区 LGM 以来的植被演替序列分析表明, 该区域植被生态系统经历了显著的阶段性演变: 从 LGM 时期以云杉和松属为主的针叶林, 经末次冰消期发展为针阔叶混交林, 直至全新世以来转变为以榛属/鹅耳枥属和栎属等为主的温带落叶阔叶林的景观。值得关注的是, 伴随植被类型的更替, 其主导驱动机制亦发生明显转变。基于这一认识, 本研究通过针对 21.6~11.7 cal ka B.P.和全新世两个特征时期, 系统开展了植被动态与关键气候驱动因素的相关性分析 (图 8), 以定量揭示不同气候背景下植被响应的异质性特征。

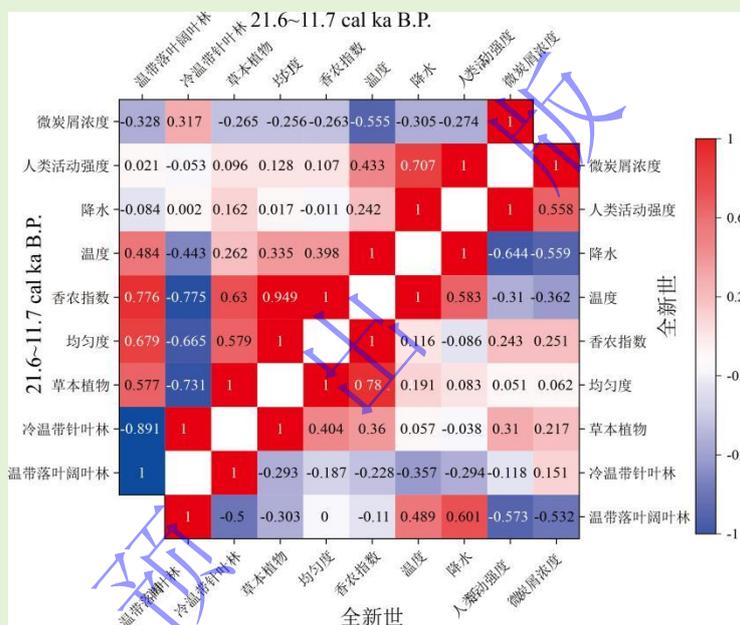


图 8 秦岭地区在 21.6~11.7 cal ka B.P.与全新世 (11.7~0 cal ka B.P.) 阶段的植物变化与其影响因素的相关性热力图

Fig.8 Heat map showing correlations between vegetation changes and influencing factors in the Qinling region during 21.6~11.7 cal ka B.P. and the Holocene (11.7~0 cal ka B.P.)

21.6~11.7 cal ka B.P., 植被群落以针叶林为主 (图 4), 阔叶林、针叶林和草本植物群落演替主要受温度变化驱动 (相关系数分别为 0.484、-0.443 和 0.262), 与降水的相关性较弱 (-0.084, 0.002 和 0.162)。针叶林与温度变化表现为负相关, 而落叶阔叶林和草本植物的扩张随温度升高而增加。该阶段的植被多样性与均匀度也主要受温度的控制, 相关系数分别为 0.398 和 0.335。此阶段的火活动表现为与针叶林的正相关 (0.317), 随针叶林增加, 火频率也呈现上升趋势, 揭示针叶林为火活动的发生提供燃料。Zhang *et al.* (2023) 的研究表明该时期大炭屑的含量较高, 主要是局地火的贡献, 进一步证明了上述结论。研究表明,

由针叶林作为主要燃料引发的火情比阔叶林更为严重 (Hély *et al.*, 2001), 推测这同样是秦岭地区在该阶段火活动呈现高频率与高强度的主要原因。相反地, 阔叶林的增多则会抑制火的发生, 这主要是由于林冠密度的增加与蒸腾作用的影响 (Bobek *et al.*, 2019)。综上所述, 21.6~11.7 cal ka B.P.期间, 秦岭地区植被演化主要由气候控制, 尤其是受温度的影响。

进入全新世, 秦岭地区的植被群落以温带落叶阔叶林为主, 降水对植被组成的影响超过温度, 成为最主要的自然因素。温带落叶阔叶林与降水和温度的相关系数分别为 0.601 与 0.489, 全新世气候向温暖湿润转型, 温带落叶阔叶林的植被生产力随年降水量增加显著上升, 表明这一时期占据主导地位的落叶阔叶林对水分条件变化有着更强的依赖性 (Fang *et al.*, 2005)。此外, 人类活动对秦岭地区植被的影响显著增强 (图 8), 全新世植被的多样性与均匀度与气候变量的关系减弱, 人类活动对植被多样性的增加与均匀分布发挥了促进作用, 同时火活动对两者的作用也转为正相关, 反映人类用火改造了秦岭地区的植被景观, Bargali *et al.* (2022) 提出中低火频率可能有利于某些草本和灌木物种的再生, 低强度火灾似乎不会对森林密度产生负面影响。但随着人类活动的增强和人口数量的增多, 人类对于植被多样性转为负向作用。前面 4.1 部分表明, 自中全新世以来火活动与气候指标解耦, 高频的火活动与温暖湿润的气候背景不匹配, 自然气候驱动已无法完全解释火活动增强现象。微炭屑浓度与人类活动强度存在明显的正相关关系 (0.558), 已有研究表明火活动可作为人类活动强度的有效代用指标 (Vannière *et al.*, 2008; Tan *et al.*, 2020)。综上, 在全新世阶段, 除气候持续发挥作用外, 人类活动也逐渐成为植被演替的重要驱动因素。未来需结合多指标对比与数值模拟等多种研究手段, 以更精确地评估人类活动和自然要素在秦岭植被演化中的贡献程度。

5 结论

(1) 自末次盛冰期以来, 秦岭地区植被对气候变化响应敏感。植被景观由末次盛冰期阶段以云杉属和松为主的针叶林, 经末次冰消期演变针阔混交林, 至全新世转变为以榛属/鹅耳枥属和栎属为主的温带落叶阔叶林, 晚全新世土地开阔度增加。植被演替的驱动机制从末次冰消期由温度控制, 转变为全新世由降水主导。同时, 火活动作为秦岭地区植被变化的关键干扰因子, 在末次冰消期主要受气候控制, 冷干环境提高火发生概率, 为草本与先锋树种释放生态位, 促进植被多样性的增加。中全新世以来, 火频率增加, 且火强度在晚全新世达到全新世最高值, 标志着自然火向人为火干扰的过渡。

(2) 秦岭地区 LGM 以来的植被驱动机制由气候主导逐渐向人类活动转变。末次盛冰

期至早全新世, 植被动态演化主要受气候条件控制。自中全新世以来, 人类活动开始作为重要的第三驱动因素介入, 火频率因人口增长和农业开发开始上升。早期人类用火和土地开垦, 打破了原有单一植被类型的优势地位, 在一定程度上提升了植被多样性。至晚全新世, 气候转向冷干, 温带落叶林衰退, 耐旱蒿类扩张, 针叶林有所恢复, 人类刀耕火种活动增强导致火频率显著升高, 植被多样性和均匀度呈现下降趋势, 直至 1 cal ka B.P. 来集约化农业景观形成, 人为控火在一定程度上降低了火的发生。

参考文献 (References)

- 李泉, 赵艳. 2018. 基于孢粉组合定量重建古植物多样性的方法与进展[J]. 第四纪研究, 38(4): 821-829. [Li Quan, Zhao Yan. 2018. Quantitative methods and progress of paleo-floristic diversity reconstruction based on pollen assemblages[J]. Quaternary Sciences, 38(4): 821-829.]
- 李永飞, 李春海, 徐柳园, 等. 2017. 太白山表土花粉和气孔器与植物类型的关系研究[J]. 古生物学报, 56(1): 108-116. [Li Yongfei, Li Chunhai, Xu Liuyuan, et al. 2017. Relationships between vegetation and stomata, and between vegetation and pollen surface soil in Taibai Mountains[J]. Acta Palaeontologica Sinica, 56(1): 108-116.]
- 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 等. 1995. 中国植物花粉形态[M]. 2版. 北京: 科学出版社. [Wang Fuxiong, Qian Nanfen, Zhang Yulong, et al. 1995. Pollen flora of China[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press.]
- 王皓言, 杨暘, 周伯睿, 等. 2023. 长期人类活动对浙江全新世植被的影响[J]. 地理学报, 78(5): 1153-1175. [Wang Haoyan, Yang Yang, Zhou Borui, et al. 2023. Long-term impacts of anthropogenic disturbances on Holocene vegetation in Zhejiang, China[J]. Acta Geographica Sinica, 78(5): 1153-1175.]
- 杨肖肖. 2017. 末次盛冰期以来黄土高原植被与多样性变化及其古气候意义[D]. 北京: 中国科学院大学. [Yang Xiaoxiao. 2017. Changes of vegetation and diversity in the Loess Plateau since the last glacial maximum and their paleoclimatic implications[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.]
- 张彦军, 郁耀闯, 牛俊杰, 等. 2020. 秦岭太白山北坡土壤有机碳储量的海拔梯度格局[J]. 生态学报, 40(2): 629-639. [Zhang Yanjun, Yu Yaochuang, Niu Junjie, et al. 2020. The elevational patterns of soil organic carbon storage on the northern slope of Taibai Mountain of Qinling[J]. Acta Ecologica Sinica, 40(2): 629-639.]
- 赵文伟. 2012. 若尔盖泥炭地孢粉和炭屑记录的全新世环境变化[D]. 兰州: 兰州大学. [Zhao Wenwei. 2012. Holocene environmental change inferred by pollen and charcoal records from the Zoige Basin[D]. Lanzhou: Lanzhou University.]
- Achuff P L, La Roi G H, 1977. Picea-Abies forests in the highlands of northern Alberta[J]. Vegetatio, 33(2/3): 127-146.
- Andreu-Hayles L, D'Arrigo R, Anchukaitis K J, et al. 2011. Varying boreal forest response to Arctic environmental change at the Firth River, Alaska[J]. Environmental Research Letters, 6(4): 045503.
- Asuero A G, Sayago A, González A G, 2006. The correlation coefficient: An overview[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 36(1): 41-59.
- Bargali H, Calderon L P P, Sundriyal R, et al. 2022. Impact of forest fire frequency on floristic diversity in the forests of Uttarakhand, western Himalaya[J]. Trees, Forests and People, 9: 100300.
- Birks H J B, 2019. Contributions of Quaternary botany to modern ecology and biogeography[J]. Plant Ecology & Diversity, 12(3/4): 189-385.
- Birks H J B, Felde V A, Bjune A E, et al. 2016. Does pollen-assemblage richness reflect floristic richness? A review of recent developments and future challenges[J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 228: 1-25.
- Birks H J B, Line J M, 1992. The use of rarefaction analysis for estimating palynological richness from quaternary pollen-analytical data[J]. The Holocene, 2(1): 1-10.
- Blaauw M, Christen J A, 2011. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process[J]. Bayesian Analysis,

- 6(3): 457-474.
- Bobek P, Svobodová-Svitavská H, Pokorný P, et al. 2019. Divergent fire history trajectories in Central European temperate forests revealed a pronounced influence of broadleaved trees on fire dynamics[J]. *Quaternary Science Reviews*, 222: 105865.
- Bond W J, Woodward F I, Midgley G F, 2005. The global distribution of ecosystems in a world without fire[J]. *New Phytologist*, 165(2): 525-538.
- Bowman D M J S, Balch J K, Artaxo P, et al. 2009. Fire in the Earth system[J]. *Science*, 324(5926): 481-484.
- Brooks M L, D'Antonio C M, Richardson D M, et al. 2004. Effects of Invasive alien plants on fire regimes[J]. *BioScience*, 54(7): 677-688.
- Caldararo N, 2002. Human ecological intervention and the role of forest fires in human ecology[J]. *Science of the Total Environment*, 292(3): 141-165.
- Cao X Y, Tian F, Dallmeyer A, et al. 2019. Northern Hemisphere biome changes (>30°N) since 40 cal ka BP and their driving factors inferred from model-data comparisons[J]. *Quaternary Science Reviews*, 220: 291-309.
- Cao X Y, Tian F, Herzsuh U, et al. 2022. Human activities have reduced plant diversity in eastern China over the last two millennia[J]. *Global Change Biology*, 28(16): 4962-4976.
- Chen F H, Xu Q H, Chen J H, et al. 2015. East Asian summer monsoon precipitation variability since the last deglaciation[J]. *Scientific Reports*, 5(1): 11186.
- Chen J H, Rao Z G, Liu J B, et al. 2016. On the timing of the East Asian summer monsoon maximum during the Holocene—Does the speleothem oxygen isotope record reflect monsoon rainfall variability?[J]. *Science China Earth Sciences*, 59(12): 2328-2338.
- Cramer W, Bondeau A, Woodward F I, et al. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: Results from six dynamic global vegetation models[J]. *Global Change Biology*, 7(4): 357-373.
- Ding G Q, Chen J H, Yan H Y, et al. 2022. Late Holocene transition from natural to anthropogenic forcing of vegetation change in the semi-arid region of northern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 287: 107561.
- Dong G H, Liu F W, Chen F H, 2017. Environmental and technological effects on ancient social evolution at different spatial scales[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(12): 2067-2077.
- Dong Y J, Wu N Q, Li F J, et al. 2022. The Holocene temperature conundrum answered by mollusk records from East Asia[J]. *Nature Communications*, 13(1): 5153.
- Duffy P J, Jacobs D F, Kabrick J M, et al. 2024. Response of understory vegetation to long-term occupancy by introduced *Pinus* species in temperate deciduous hardwood forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 572: 122310.
- Enright N J, Fontaine J B, Lamont B B, et al. 2014. Resistance and resilience to changing climate and fire regime depend on plant functional traits[J]. *Journal of Ecology*, 102(6): 1572-1581.
- Fang J Y, Piao S L, Zhou L M, et al. 2005. Precipitation patterns alter growth of temperate vegetation[J]. *Geophysical Research Letters*, 32(21): L21411.
- Felde V A, Peglar S M, Bjune A E, et al. 2016. Modern pollen–plant richness and diversity relationships exist along a vegetational gradient in southern Norway[J]. *The Holocene*, 26(2): 163-175.
- Feng Z D, An C B, Tang L Y, et al. 2004. Stratigraphic evidence of a Megahumid climate between 10,000 and 4000 years B.P. in the western part of the Chinese Loess Plateau[J]. *Global and Planetary Change*, 43(3/4): 145-155.
- Feurdean A, Tanțău I, Fărcaș S, 2011. Holocene variability in the range distribution and abundance of *Pinus*, *Picea abies*, and *Quercus* in Romania; implications for their current status[J]. *Quaternary Science Reviews*, 30(21/22): 3060-3075.
- Frost G V, Epstein H E, 2014. Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s[J]. *Global Change Biology*, 20(4): 1264-1277.
- Hankin L E, Crumrine S A, Anderson C T, 2024. Impacts of mega drought in fire-prone montane forests and implications for forest management[J]. *Forest Ecology and Management*, 564: 122010.
- Hao Q, De Lafontaine G, Guo D S, et al. 2018. The critical role of local refugia in postglacial colonization of Chinese pine: Joint inferences from DNA analyses, pollen records, and species distribution modeling[J]. *Ecography*, 41(4): 592-606.

- He T H, Lamont B B, Pausas J G, 2019. Fire as a key driver of Earth's biodiversity[J]. *Biological Reviews*, 94(6): 1983-2010.
- Hély C, Flannigan M, Bergeron Y, et al. 2001. Role of vegetation and weather on fire behavior in the Canadian mixedwood boreal forest using two fire behavior prediction systems[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(3): 430-441.
- Hosner D, Wagner M, Tarasov P E, et al. 2016. Spatiotemporal distribution patterns of archaeological sites in China during the Neolithic and Bronze Age: An overview[J]. *The Holocene*, 26(10): 1576-1593.
- Huang C C, Pang J L, Chen S E, et al. 2006. Charcoal records of fire history in the Holocene loess-soil sequences over the southern Loess Plateau of China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 239(1/2): 28-44.
- Huang X Z, Liu S S, Dong G H, et al. 2017. Early human impacts on vegetation on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau during the middle to Late Holocene[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 41(3): 286-301.
- Huang Z H, Ma C M, Feng S, et al. 2023. Vegetation, hydrology, and quantitative monsoon precipitation since the Last Glacial Maximum in Central China[J]. *Global and Planetary Change*, 231: 104298.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022. Climate change and land: IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jiang D B, Zhang Y, Lang X M, 2011. Vegetation feedback under future global warming[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 106(1/2): 211-227.
- Kampf S K, Stevens-Rumann C S, Nunes L, et al. 2025. Fire, fuel, and climate interactions in temperate climates[J]. *AGU Advances*, 6(2): e2024AV001628.
- Kelly L T, Giljohann K M, Duane A, et al. 2020. Fire and biodiversity in the Anthropocene[J]. *Science*, 370(6519): eabb0355.
- Kou Z X, Yao Y H, Hu Y F, et al. 2020. Discussion on position of China's north-south transitional zone by comparative analysis of mountain altitudinal belts[J]. *Journal of Mountain Science*, 17(8): 1901-1915.
- Krishnaswamy J, John R, Joseph S, 2014. Consistent response of vegetation dynamics to recent climate change in tropical mountain regions[J]. *Global Change Biology*, 20(1): 203-215.
- Leonelli G, Pelfini M, Morra di Cella U, et al. 2011. Climate warming and the recent treeline shift in the European Alps: The role of geomorphological factors in high-altitude sites[J]. *AMBIO*, 40(3): 264-273.
- Levine J M, 2016. A trail map for trait-based studies[J]. *Nature*, 529(7585): 163-164.
- Li C H, Wu Y H, Hou X H, 2011. Holocene vegetation and climate in Northeast China revealed from Jingbo Lake sediment[J]. *Quaternary International*, 229(1/2): 67-73.
- Li K, Liao M N, Ni J, 2024. Vegetation response to climate change and human activity in southwestern China since the Last Glacial Maximum[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 636: 111990.
- Li X Q, Dodson J, Zhou J, et al. 2009. Increases of population and expansion of rice agriculture in Asia, and anthropogenic methane emissions since 5000 BP[J]. *Quaternary International*, 202(1/2): 41-50.
- Liu H Y, Tang Z Y, Dai J H, et al. 2002. Larch timberline and its development in North China[J]. *Mountain Research and Development*, 22(4): 359-367.
- Liu J B, Chen J H, Zhang X J, et al. 2015. Holocene East Asian summer monsoon records in northern China and their inconsistency with Chinese stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records[J]. *Earth-Science Reviews*, 148: 194-208.
- Liu S S, Stoof-Leichsenring K R, Kruse S, et al. 2020a. Holocene vegetation and plant diversity changes in the north-eastern Siberian treeline region from pollen and sedimentary ancient DNA[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8: 560243.
- Liu X C, Tang Q H, Zhang X J, et al. 2016. Modeling the role of vegetation in hydrological responses to climate change[M]//Tang Q H, Oki T. *Terrestrial Water Cycle and Climate Change: Natural and Human - Induced Impacts*. Washington: American Geophysical Union, 193-208.
- Liu X K, Liu J B, Chen S Q, et al. 2020b. New insights on Chinese cave $\delta^{18}\text{O}$ records and their paleoclimatic significance[J]. *Earth-Science Reviews*, 207: 103216.
- Liu Y, Linderholm H W, Song H M, et al. 2009. Temperature variations recorded in *Pinus tabulaeformis* tree rings from the southern and

- northern slopes of the central Qinling Mountains, central China[J]. *Boreas*, 38(2): 285-291.
- Liu Y, Xiao L, Cheng Z J, et al. 2023. Anthropogenic impacts on vegetation and biodiversity of the lower Yangtze region during the mid-Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 299: 107881.
- Lu W Y, Oppo D W, Liu Z Y, et al. 2025. Warmer shallow Atlantic during deglaciation and early Holocene due to weaker overturning circulation[J]. *Nature Geoscience*, 18(8): 787-792.
- Luyssaert S, Jammot M, Stoy P C, et al. 2014. Land management and land-cover change have impacts of similar magnitude on surface temperature[J]. *Nature Climate Change*, 4(5): 389-393.
- Manzano S, Julier A C M, Dirk C J, et al. 2020. Using the past to manage the future: The role of palaeoecological and long-term data in ecological restoration[J]. *Restoration Ecology*, 28(6): 1335-1342.
- Miao Y F, Meng Q Q, Fang X M, et al. 2011. Origin and development of *Artemisia* (Asteraceae) in Asia and its implications for the uplift history of the Tibetan Plateau: A review[J]. *Quaternary International*, 236(1/2): 3-12.
- Mottl O, Flantua S G A, Bhatta K P, et al. 2021. Global acceleration in rates of vegetation change over the past 18,000 years[J]. *Science*, 372(6544): 860-864.
- Nesbitt L V R, Pisaric M F J, Moser K A, et al. 2025. Reconstructing the interactions between climate, fire, and vegetation dynamics during the Holocene, North Slave Region, Northwest Territories, Canada[J]. *Quaternary Science Reviews*, 350: 109158.
- Ni J, Yu G, Harrison S P, et al. 2010. Palaeovegetation in China during the late Quaternary: Biome reconstructions based on a global scheme of plant functional types[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 289(1/2/3/4): 44-61.
- Nolan C, Overpeck J T, Allen J R M, et al. 2018. Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change[J]. *Science*, 361(6405): 920-923.
- Odgaard B V. 1999. Fossil pollen as a record of past biodiversity[J]. *Journal of Biogeography*, 26(1): 7-17.
- Oksanen J, Blanchet F G, Friendly M, et al. 2020. *Vegan: Community ecology package version 2.5-7* November 2020[Z].
- Overpeck J T, Bartlein P J, Webb III T, 1991. Potential magnitude of future vegetation change in eastern North America: Comparisons with the past[J]. *Science*, 254(5032): 692-695.
- Park J, Moon M, Green T, et al. 2024. Impact of tree species composition on fire resistance in temperate forest stands[J]. *Forest Ecology and Management*, 572: 122279.
- Pausas J G, Ribeiro E, 2017. Fire and plant diversity at the global scale[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 26(8): 889-897.
- Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, et al. 2007. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the northern Hemisphere over the past 2 decades[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(3): GB3018.
- Pielou E C, 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 13: 131-144.
- Prentice C, Guiot J, Huntley B, et al. 1996. Reconstructing biomes from palaeoecological data: A general method and its application to European pollen data at 0 and 6 ka[J]. *Climate Dynamics*, 12(3): 185-194.
- Pu G, Han L Y, Chen L L, et al. 2025. Elevational dynamics of vegetation changes in response to climate change on the Tibetan plateau[J]. *Scientific Reports*, 15(1): 9813.
- Ren H Y, Wen Z M, Liu Y Y, et al. 2023. Vegetation response to changes in climate across different climate zones in China[J]. *Ecological Indicators*, 155: 110932.
- Scott A C, Bowman D M J S, Bond W J, et al. 2014. *Fire on earth: An introduction*[M]. Chichester: Wiley Blackwell, 2014.
- Seddon A W R, Macias-Fauria M, Long P R, et al. 2016. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability[J]. *Nature*, 531(7593): 229-232.
- Shannon C E, 1948. A mathematical theory of communication[J]. *The Bell System Technical Journal*, 27(3): 379-423.
- Simpson E H, 1949. Measurement of diversity[J]. *Nature*, 163(4148): 688.
- Srivastava J, Manjunatha B R, Balakrishna K, et al. 2021. Quantitative pollen-based reconstruction of the vegetation diversity in response to the late-Holocene climate change near Karwar, south-west coast of India[J]. *Quaternary International*, 599-600: 95-106.
- Steffen W, Crutzen P J, McNeill J R, 2007. The anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature?[J]. *Ambio*,

- 36(8): 614-621.
- Sun X H, Zhao Y, Li Q, 2017. Holocene peatland development and vegetation changes in the Zoige Basin, eastern Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 60(10): 1826-1837.
- Tan Z H, Wu C, Han Y M, et al. 2020. Fire history and human activity revealed through poly cyclic aromatic hydrocarbon (PAH) records at archaeological sites in the middle reaches of the Yellow River drainage Basin, China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 560: 110015.
- Tang L Y, Mao L M, Shu J W, et al. 2020. Atlas of Quaternary pollen and spores in China[M]. Singapore: Springer.
- Ter Braak C J F, Prentice I C, 2004. A theory of gradient analysis[J]. *Advances in Ecological Research*, 34: 235-282.
- Trivedi A, Tang Y N, Qin F, et al. 2020. Holocene vegetation dynamics and climatic fluctuations from Shuanghaizi Lake in the Hengduan Mountains, southwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 560: 110035.
- Turner M G, Brazunas K H, Hansen W D, et al. 2019. Short-interval severe fire erodes the resilience of subalpine lodgepole pine forests[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(23): 11319-11328.
- Vanni re B, Colombaroli D, Chapron E, et al. 2008. Climate versus human-driven fire regimes in Mediterranean landscapes: The Holocene record of Lago dell'Accesa (Tuscany, Italy)[J]. *Quaternary Science Reviews*, 27(11/12): 1181-1196.
- Wang C, Lu H Y, Zhang J P, et al. 2014. Prehistoric demographic fluctuations in China inferred from radiocarbon data and their linkage with climate change over the past 50,000 years[J]. *Quaternary Science Reviews*, 98: 45-59.
- Wang X, Yao Y F, Wortley A H, et al. 2018. Vegetation responses to the warming at the Younger Dryas-Holocene transition in the Hengduan Mountains, southwestern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 192: 236-248.
- Weng C Y, Hooghiemstra H, Duivenvoorden J F, 2006. Challenges in estimating past plant diversity from fossil pollen data: Statistical assessment, problems, and possible solutions[J]. *Diversity and Distributions*, 12(3): 310-318.
- Whitman E, Parisien M A, Thompson D K, et al. 2019. Short-interval wildfire and drought overwhelm boreal forest resilience[J]. *Scientific Reports*, 9(1): 18796.
- Wooller M J, Street-Perrott F A, Agnew A D Q, 2000. Late Quaternary fires and grassland palaeoecology of Mount Kenya, East Africa: Evidence from charred grass cuticles in lake sediments[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 164(1/2/3/4): 207-230.
- Xiao X Y, Shen J, Wang S M, et al. 2008. The plant diversity and its relationship with paleoenvironment since 2.78 Ma revealed by pollen records in the Heqing deep drilling core[J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(23): 3686-3698.
- Xie S Q, Li K H, Li F R, et al. 2024. Modern pollen-plant diversity relationships for reliable pollen-based reconstruction of past plant taxonomic and functional diversity: A case study in southwest Shandong, China[J]. *Ecological Indicators*, 167: 112739.
- Xu D K, Lu H Y, Chu G Q, et al. 2019. Synchronous 500-year oscillations of monsoon climate and human activity in Northeast Asia[J]. *Nature Communications*, 10(1): 4105.
- Xu D K, Lu H Y, Chu G Q, et al. 2023. Fast response of vegetation in East Asia to abrupt climatic events during the last deglaciation[J]. *PNAS Nexus*, 2(3): pgad061.
- Yu G, Chen X, Ni J, et al. 2000. Palaeovegetation of China: A pollen data - based synthesis for the mid - Holocene and last glacial maximum[J]. *Journal of Biogeography*, 27(3): 635-664.
- Yuan D X, Cheng H, Edwards R L, et al. 2004. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian Monsoon[J]. *Science*, 304(5670): 575-578.
- Yuan Z J, Wu D, Wang T, et al. 2022. Holocene fire history in southwestern China linked to climate change and human activities[J]. *Quaternary Science Reviews*, 289: 107615.
- Zhang H B, Griffiths M L, Chiang J C H, et al. 2018a. East Asian hydroclimate modulated by the position of the westerlies during Termination I[J]. *Science*, 362(6414): 580-583.
- Zhang X, Huang K Y, Cheng J, et al. 2024. Vertical biome shifts and climate changes since the last glacial maximum in the southeastern margin of the Tibetan plateau, Southwest China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 324: 108441.
- Zhang Y, Cui Q Y, Blockley S, et al. 2023. Fire history in the Qinling Mountains of east - central China since the last glacial maximum[J].

- Geophysical Research Letters, 50(10): e2023GL102848.
- Zhang Y, Cui Q Y, Huang Y L, et al. 2021a. Vegetation response to holocene climate change in the Qinling Mountains in the temperate–subtropical transition zone of central–east China[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9: 734011.
- Zhang Y, Cui Q Y, Liang C, et al. 2025. Quantitative pollen reconstruction of temperature and precipitation in the subtropical–temperate climate transition zone of East-Central China since the Last Glacial Maximum[J]. *Quaternary Science Reviews*, 367: 109528.
- Zhang Y, Marquer L, Cui Q Y, et al. 2021b. Holocene vegetation changes in the transition zone between subtropical and temperate ecosystems in eastern Central China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 253: 106768.
- Zhang Y, Yang P, Tong C, et al. 2018b. Palynological record of Holocene vegetation and climate changes in a high-resolution peat profile from the Xinjiang Altai Mountains, northwestern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 201: 111–123.
- Zhao Y, Qin F, Cui Q Y, et al. 2025. Three-and-a-half million years of Tibetan Plateau vegetation dynamics in response to climate change[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 9(7): 1153–1167.
- Zhou A F, Sun H L, Chen F H, et al. 2010. High-resolution climate change in mid-late Holocene on Tianchi Lake, Liupan Mountain in the Loess Plateau in central China and its significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(20): 2118–2121.
- Zhou S F, Long H, Xing H, et al. 2023. Human activities facilitated the decline of forest ecosystem in East Asia after 5000 a BP[J]. *Earth-Science Reviews*, 245: 104552.
- Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, et al. 2016. Greening of the Earth and its drivers[J]. *Nature Climate Change*, 6(8): 791–795.
- Zindros A, Radoglou K, Milios E, et al. 2020. Tree Line Shift in the Olympus mountain (Greece) and climate change[J]. *Forests*, 11(9): 985.

Dynamic Evolution of Vegetation and Its Driving Mechanism in the Qinling Region Since the Last Glacial Maximum

LIN Yi¹, ZHANG Yao¹, ZHANG BingBing¹, JIA Jia¹, ZHOU AiFeng²

1. College of Geography and Environmental Sciences, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321000, China

2. College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: [Objective] The Qinling Mountains serve as a crucial north–south geographical boundary in eastern China, characterized by diverse vegetation types that respond sensitively to climatic changes. However, only a limited number of systematic analyses of vegetation responses to natural and anthropogenic influences have been carried out in this region, hindering a comprehensive understanding of ecological changes and human–environment interactions in the Qinling area. [Methods] This study is based on a sediment core from Daye Lake, an alpine lake on Mount Taibai, which is the highest mountain in the Qinling Mountain range. Using high-resolution pollen and charcoal records, vegetation dynamics were quantitatively reconstructed for the period from the Last Glacial Maximum (LGM) to the present day from biomisation and diversity indices, and fire frequency and intensity sequences were extracted using CharAnalysis software. Reliable climate and human activity records were combined with fire activity sequences reconstructed from charcoal records to systematically examine vegetation responses to changes in climate and to human activities. In addition, statistical methods (e.g., redundancy analysis and correlation analysis) were adopted to reveal the contributions of various drivers of vegetation evolution in different time frames. [Results] Findings indicate that the vegetation landscape in the

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41771208; Scientific Research Foundation of Zhejiang Normal University, No. YS304123993

Corresponding authors: ZHANG Yao, E-mail: zhangyao23@zjnu.edu.cn; ZHOU AiFeng, E-mail: zhouaf@lzu.edu.cn

Qinling region evolved from a coniferous forest dominated by *Picea* and *Pinus* genera during the LGM to a mixed coniferous–broadleaf forest during the last deglaciation, accompanied by pronounced fluctuations in vegetation diversity. During the Holocene, the vegetation transitioned to temperate deciduous broadleaf forests dominated by *Corylus/Carpinus* and *Quercus* genera, accompanied by a marked increase in vegetation diversity. The late Holocene saw the expansion of herbaceous plants such as *Artemisia* and Poaceae along with land openness, and vegetation diversity tended to decline. Highly frequent fire activity is evident in both the last deglaciation and the late Holocene, driven by both a cold, dry climate and human activities. **[Conclusion]** Since the LGM, vegetation in the Qinling Mountains has shown a significant response to climatic change. From the LGM to the last deglaciation, the occurrence both of broadleaf and coniferous forests shows a significant correlation with temperature. Redundancy analysis confirmed that temperature was the dominant factor, while fire activity promoted vegetation diversity by altering interspecies competition patterns and niche availability. However, precipitation is strongly correlated with temperate deciduous broadleaf forests in the Holocene, and became a key controlling factor in vegetation succession with the intensification of the East Asian summer monsoon. Since the mid-Holocene, human activities have emerged as a third significant driving factor, and this influence has steadily increased over time. The investigation reveals the response patterns of Qinling vegetation to changes of climate and human intervention, and provides a crucial case study for understanding the long-term interaction between vegetation, climate, fire and human activities in alpine regions.

Key words: biomes; vegetation diversity; climate change; fire activity; Last Glacial Maximum; Qinling Mountains

