



黄河下游东平湖炭屑记录的近1500年以来火演化历史

陈影影, 吉谚语, 赵琳, 侍晓颖, 杨丽伟, 段诗静, 陈诗越

Fire history over the past 1 500 years revealed by charcoal record from the Dongping Lake in the Lower Yellow River

CHEN Yingying, JI Yanyu, ZHAO Lin, SHI Xiaoying, YANG Liwei, DUAN Shijing, and CHEN Shiyue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024020501>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

火的历史重建及其与气候变化和人类活动关系研究进展

Research progress on fire history reconstruction and its implications for climate change and human activities

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(2): 185-197

气候变化和人类活动对鸭绿江流域入海水沙通量的影响

Variations in water discharge and sediment load in the Yalu River catchment induced by human activities and climate changes

海洋地质与第四纪地质. 2018, 38(1): 52-61

过去5万年来珠江流域火历史的南海沉积记录

FIRE HISTORY IN PEARL RIVER BASIN SINCE 50 KAP: SEDIMENT RECORDS FROM THE SOUTH CHINA SEA

海洋地质与第四纪地质. 2017, 37(3): 47-57

西沙群岛东岛湖泊沉积记录的近1 000年来热带降雨与人类活动历史

Tropical rainfall variations and human activities of last 1 000 years recorded by lake deposits on the Dongdao Island, Xisha Islands

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(3): 182-192

巴丹吉林沙漠南缘高台盐湖记录的中晚全新世气候变化

Mid-to-Late Holocene climate changes on the southern margin of the Badain Jaran Desert: Evidence from the Gaotai Lake sediments

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(4): 192-203

南海琼东上升流区过去1 900年海洋生产力记录

A 1 900-year record of marine productivity in the upwelling area of east continental shelf of Hainan Island, South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(5): 97-106



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈影影, 吉谚语, 赵琳, 等. 黄河下游东平湖炭屑记录的近 1 500 年以来火演化历史 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(2): 33-45.
CHEN Yingying, JI Yanyu, ZHAO Lin, et al. Fire history over the past 1 500 years revealed by charcoal record from the Dongping Lake in the Lower Yellow River[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(2): 33-45.

黄河下游东平湖炭屑记录的近 1 500 年以来火演化历史

陈影影^{1,2}, 吉谚语¹, 赵琳³, 侍晓颖¹, 杨丽伟¹, 段诗静¹, 陈诗越¹

1. 江苏师范大学地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116
2. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061
3. 湖南师范大学地理科学学院, 长沙 410084

摘要: 东平湖是黄河下游地区最大的蓄洪湖泊, 其沉积物蕴藏着流域地质历史时期丰富的环境信息。本研究以东平湖沉积岩芯 (DPK 岩芯, 161 cm) 为研究对象, 利用该岩芯的炭屑记录, 并结合粒度、烧失量等古环境指标, 重建了东平湖地区近 1 500 年以来的古火演化历史, 探讨了火事件与气候变化、人类活动之间的关系。研究结果表明: (1) 516—1254 AD, 黄河下游东平湖地区为冷干转暖湿气候, 火事件较频繁, 但约 1000 AD 之后有降低趋势; (2) 1254—1922 AD, 气候寒冷, 旱涝交替频繁, 气候变化和人类活动共同影响下导致火事件较之前明显加频加剧; (3) 1922—1962 AD, 气候相对暖湿, 受气候变化及黄河改道影响, 火事件频率显著减少且趋于稳定; (4) 1962 年以来, 在暖干气候条件及人类活动加剧扰动的背景下, 火事件明显增加, 尤其是 $>100\text{ }\mu\text{m}$ 炭屑浓度急剧攀升至整个剖面的最高峰, 粒度迅速粗化, 表明人类活动干扰进一步加强。进一步分析认为, 气候变化是促进该地区火活动的重要因素, 而人类活动 (如刀耕火种、毁林开荒、战争等) 的加强可能是导致东平湖流域火事件频发的主因。研究结果对于未来全球变暖背景下区域森林火灾的防护与治理具有重要的科学意义, 进而更好地服务于黄河流域生态保护与高质量发展国家战略。

关键词: 炭屑; 火历史; 气候变化; 人类活动; 东平湖

中图分类号: P941.78; P532 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024020501

Fire history over the past 1 500 years revealed by charcoal record from the Dongping Lake in the Lower Yellow River

CHEN Yingying^{1,2}, JI Yanyu¹, ZHAO Lin³, SHI Xiaoying¹, YANG Liwei¹, DUAN Shijing¹, CHEN Shiyue¹

1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China
2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
3. School of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410084, China

Abstract: Dongping Lake is the largest flood storage lake in the lower reaches of the Yellow River, and its sediment contains rich environmental information from the geological history of the basin. This study focuses on the sediment core (Core DPK, 161 cm) from Dongping Lake, in Dongping County, Shandong, China and utilizes the charcoal records from this core. Combined with grain size and loss on ignition (LOI), we reconstructed the paleo-fire evolution history in the Dongping Lake region over the past 1 500 years to explore the relationship among fire events, climate change, and human activities. Results indicate that: (1) during 516—1254 AD, the Dongping Lake region experienced a transition from cold/dry to warm/humid climate. Fire incidents were frequent, but there was a decreasing trend after around 1000 AD; (2) during 1254—1922 AD, the climate was cold, with frequent alternations between droughts and floods. The combination of climate change and human activities led to a significant increase in the frequency and intensity of fire incidents; (3) during 1922—1962 AD, climate was relatively warm and humid. Due to climate change and the diversion of the Yellow River, the frequency of fire events significantly decreased and stabilized; (4) since 1962, under the background of a warm and dry climate and increased human activities, fire incidents have increased

资助项目: 国家自然科学基金“东平湖沉积物源示踪及黄河洪水事件判识”(41701101), “历史时期黄河下游湖泊消亡过程与机制及沉积碳埋藏量估算”(41871073); 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金“东平湖沉积物中的黄河洪水事件判识”(SKLLQG1902); 江苏师范大学大学生创新创业训练计划项目“东平湖浮游植物群落演变及其驱动因素”(XSJCX14013); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 陈影影 (1984—), 女, 博士, 从事湖泊沉积与环境演变研究, E-mail: chenyingying@jsnu.edu.cn

通讯作者: 陈诗越 (1969—), 男, 教授, 从事湖泊沉积与环境演变研究, E-mail: chenshiyue@jsnu.edu.cn

收稿日期: 2024-02-05; **改回日期:** 2024-03-11. 文凤英编辑

significantly. Particularly, the concentration of charcoal fragments ($> 100\ \mu\text{m}$) rose sharply to the highest peak in the entire profile, accompanied by rapid coarsening of grain size, indicating intensified human interference. Further analysis suggests that climate change is a significant factor promoting fire activity in the region, while intensified human activities (such as slash-and-burn agriculture, deforestation, wars and so on) may be the primary cause of frequent fire incidents in the Dongping Lake basin. The results have important scientific significance for the prevention and management of regional forest fires under the background of global warming, and shall contribute to better serving the national strategy of ecological conservation and high-quality development of the Yellow River basin.

Key words: charcoal; fire history; climate variation; human activity; Dongping Lake

火在自然界普遍存在,是生态系统中极为重要的生态环境因子,火活动演化规律与气候、植被以及人类活动等具有密切而复杂的联系。近几十年来,随着人类活动加剧,全球气候呈现持续变暖的态势,火灾事件的发生频率及其强度大幅上升^[1]。频繁发生的火灾事件导致生物多样性、人类健康以及社会经济的严重损失。炭屑作为火发生的直接证据,忠实记录了地质历史时期火活动发生的强度和频率,是研究流域植被、生态、人地关系的重要依据,也是反映气候变化的重要指标^[2-5]。在全球增温背景下,火活动演化规律与气候、植被以及人类活动的关系已经成为当今的一个研究热点。国内外已有众多研究者利用炭屑记录来恢复地质历史时期火活动演化规律,探讨其与气候、植被以及人类活动的关系,并取得了丰富的研究成果^[6-10]。

炭屑是植物有机体不完全燃烧时产生的,广泛保存在不同时期的沉积物中,常被风和流水从源地带到沉积地保存下来。湖泊是流域物质的最终储存库,其沉积物蕴藏着流域地质历史时期丰富的环境信息。湖泊沉积物中的炭屑是区域用火或火灾直接作用的产物,火的发生受当时当地的气候环境与人类活动的共同影响,通过炭屑的定量统计和形态分析等手段,可以恢复地质历史中火发生的频率、强度及其演化过程^[10-12]。因此,炭屑也是古湖沼学研究中重建古气候、探寻人类活动信息的重要指标之一。

东平湖是目前黄河下游仅存的天然湖泊。作为国家南水北调东线重要的调蓄湖,由于气候变化和人类活动的影响,近年来流域生态环境发生了很大变化。东平湖湖水依赖地表径流与湖面降水补给,大汶河为主要入湖河流,只有一条出水通道小清河与黄河相连,构成一个相对封闭的系统,使得湖泊沉积物保存完好,记录了区域环境演化的连续信息,为区域环境演变研究提供了良好素材。近年来,许多学者对东平湖形成演化、富营养化、物源等做了大量工作,并取得了丰富的研究成果^[13-16]。但利用炭屑记录探讨流域较长时间尺度火事件问

题的研究还尚未开展。因此,本研究以东平湖沉积岩芯(DPK岩芯,161 cm)为研究对象,利用该岩芯的炭屑记录,结合粒度、烧失量等古环境指标,重建了研究区古火演化历史,探讨了火事件与气候、人类活动之间的关系,揭示了人类活动和气候变化对区域生态环境变化的影响,对于未来全球变暖背景下区域森林火灾的防护与治理具有重要的科学意义,进而更好地服务于黄河流域生态保护与高质量发展国家战略。

1 研究区概况

东平湖($35^{\circ}30'\sim 36^{\circ}20'\text{N}$ 、 $116^{\circ}00'\sim 116^{\circ}30'\text{E}$)位于山东省东平县西部,东连大汶河,北通黄河,是山东省第二大淡水湖泊,也是黄河下游仅存的天然湖泊^[17](图1)。处于鲁中山区西部向平原过渡的边缘地带,总面积 627 km^2 ,常年平均水面为 124 km^2 。湖水依赖地表径流与湖面降水补给,大汶河为主要入湖河流,向北经小清河泄湖水入黄河。

本地区气候属暖温带大陆性季风气候,四季分明,降水较为充沛,光照充足,年均气温 13.3°C ,1月平均气温 -6.3°C ,7月平均气温 31.6°C 。年均降水量 640.5 mm ,降水主要集中在夏季,仅7、8两个月份的降水量就占全年的50%以上^[17]。流域周围的地带性植被属暖温带落叶阔叶林,在海拔较低的丘陵及平原地区是果树和农田。湖区水生及湿生植物分布广泛,主要有菱角(*Trapa*)、睡莲(*Nymphaea*)、香蒲(*Typha*)、马来眼子菜(*Potamogeton*)、浮萍(*Lemna*)、莎草(*Cyperus*)等。

2 材料与方

利用奥地利产水上采样平台,在东平湖湖心($35^{\circ}59'11.6''\text{N}$ 、 $116^{\circ}11'35.3''\text{E}$)水深 3.85 m 处,采集了长 161 cm 的沉积岩芯DPK(图1)。岩芯剖面按沉积物颜色及物质组成可分为7段:0~4 cm为棕黄色淤泥;4~10 cm为灰黑色淤泥;10~70 cm为

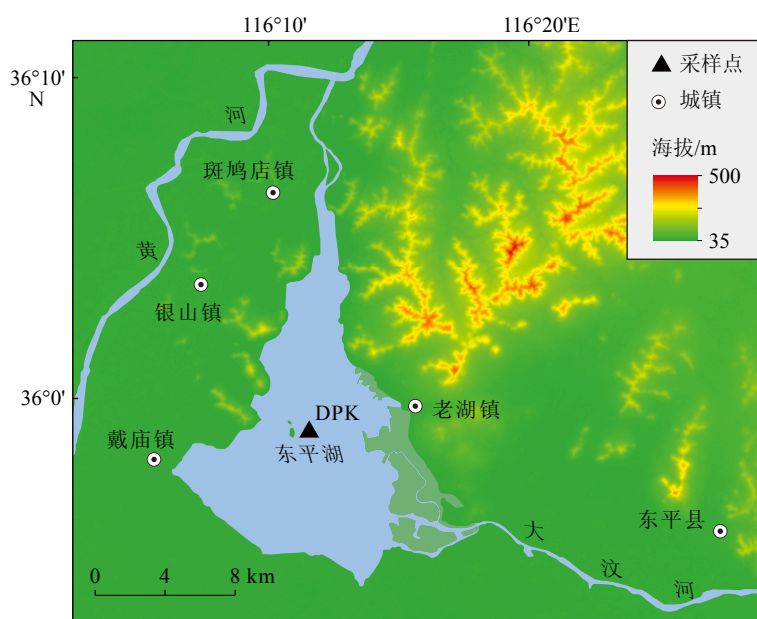


图 1 研究区及采样位置示意图

Fig.1 Locations of the Dongping Lake and the drill core DPK

棕黄色粉砂质黏土, 其中 46~53 cm 为淡灰色粉砂质黏土; 70~90 cm 为团粒状灰黄色黏土质粉砂; 90~120 cm 为棕黄色粉砂质黏土; 120~161 cm 为灰黄色粉砂夹棕黄色黏土(图 2)。对 DPK 岩芯 69 cm 以上按 0.5 cm 间距分样, 69 cm 以下按 1 cm 间距分样, 用于烧失量、粒度和炭屑等指标的分析。在 DPK 岩芯柱 13、28、38、72、119、144 cm 处取样进行¹⁴C 测年。另用重力采样器在附近采得长为 60 cm 的短岩芯柱 DP, 密封保存, 用于²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 测年。

本研究沉积物粒度、烧失量的分析测试在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境国家重点实验室进行。其中, 228 个样品粒度分析采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪测定, 分别测试 3 次, 取其平均值; 利用烧失量法测定 111 个样品中有机质含量(LOI₅₅₀), 具体流程参见文献 [18], 后期计算公式如下: $LOI_{550} = (m_{105} - m_{550}) / (m_{105} - m_0) \times 100$, 式中: m_0 为坩埚净重; m_{105} 为烘干样品与坩埚重量; m_{550} 为样品与坩埚在 550℃ 灼烧后的重量。

¹³⁷Cs 与 ²¹⁰Pb 测年是在中国科学院南京地理与湖泊研究所进行, 使用的设备为美国 EG&GOrtec 的高纯锗井型探测器以及 IBM 构成的 16K 多道分析器。另外, 测定了 6 个样品的有机质¹⁴C 年代, 其中 DPK 岩芯柱 13、28、38 cm 处的¹⁴C 年龄在中国科学院南京地理与湖泊研究所利用液体闪烁计数器(LSC)测定; 其余 72、119、144 cm 处的¹⁴C 年龄在波兰 Poznań Radiocarbon Laboratory of the A. Mickiewicz

University 完成。

炭屑分析在中国地质科学院水文地质环境地质研究所进行。对 DPK 岩芯按上部 69 cm 以 1 cm 间距、69 cm 以下以 2 cm 间距分样, 共获得 114 个炭屑分析样品。实验室样品处理以常规的氢氟酸法同步提取花粉和炭屑, 用外加石松孢子定量测定花粉和炭屑浓度。在光学显微镜下将炭屑按其长轴分为 <50 μm(细粒)、50~100 μm(中粒)和 >100 μm(粗粒)3 个等级, 分别进行统计。本文对炭屑进行分析, 孢粉数据另有论文待发表。

3 结果

3.1 深度-年代序列建立

东平湖 DPK 岩芯¹⁴C 测年结果显示(表 1), 除了底部样品外, 总体上¹⁴C 年龄随着深度增加而增加, 没有出现明显的年龄倒转现象, 说明沉积层序相对比较稳定。DPK 岩芯¹³⁷Cs 的蓄积峰位置在 12 cm 处, 对应于 1963 年人工核试验高峰, 利用 1963 年¹³⁷Cs 核素蓄积峰进行校正, 采用²¹⁰Pb 计年的 CRS 模式建立东平湖现代沉积年代序列, 具体结果见文献 [19]。根据 CRS 模式建立的年代序列, DPK 岩芯 13、28、38 cm 分别对应于 1962、1935、1905 年, 根据沉积速率进一步可推算 51 cm 处为 1855 年 [19](表 1)。通过对比 DPK 岩芯 51 cm 以上¹⁴C 年代与²¹⁰Pb 测年结果, 可以明显看出存在碳库效应, 表明

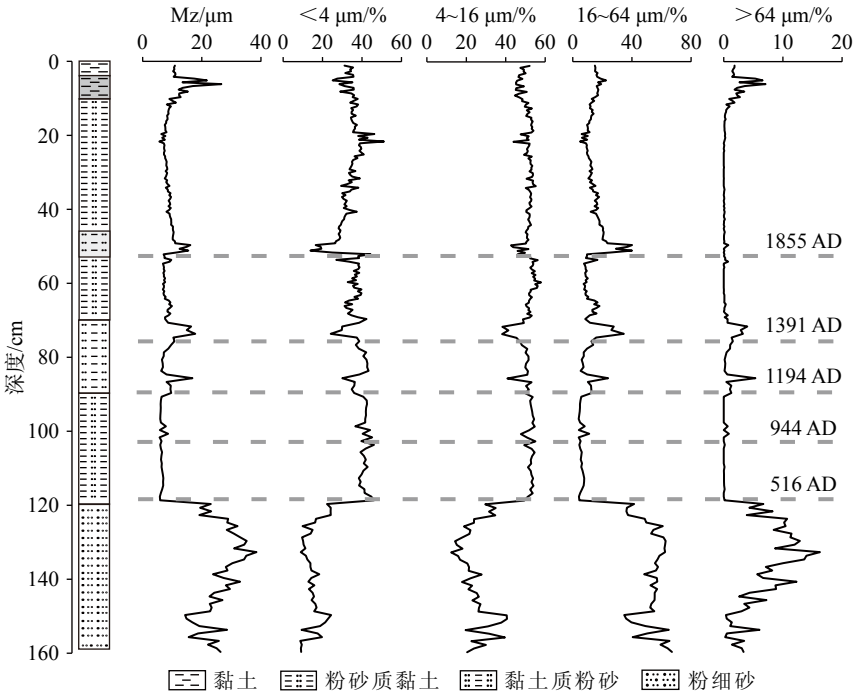


图 2 东平湖 DPK 岩芯粒度特征

Fig.2 Grain-size characteristics of Core DPK in the Dongping Lake

表 1 东平湖¹⁴C 测年与²¹⁰Pb 年代^[19-20]

Table 1 ¹⁴C and ²¹⁰Pb dating results of the Dongping Lake^[19-20]

深度/cm	¹⁴ C测年材料	¹⁴ C/aBP	²¹⁰ Pb年代/AD
13	TOC	980±70	1962
28	TOC	1 300±50	1935
38	TOC	1900±120	1905
52	—	—	1855
72	TOC	2 820±35	
119	TOC	5 220±40	
144	TOC	5 115±35	

东平湖流域内物质在入湖前可能受到了“老碳”的污染。

通过对东平湖表层沉积物、湖水、现生沉水植物马来眼子菜等一系列样品的¹⁴C 年代测定研究,表明东平湖确实存在碳库效应,且碳库效应年龄随沉积层序有显著变化,一般为 1 000~2 000 a,最高可达 3 700 a,这可能与历史时期黄河泛滥、古济水、流域“老碳”以及人类活动等多种因素的影响有关^[20]。由于东平湖沉积物碳库效应年龄随时间并非恒定,因此,碳库效应的复杂性是影响东平湖建立湖泊沉积物高精度年代序列的一大障碍。基于此,我们采用了事件性定年方法,即根据有资料记载的突发事件发生时间,对照相关指标在沉积物中记录的深度

来确定年代或建立年代序列的方法,例如,洪水造成的粒度组成的改变、火灾与炭屑的出现等,其对应层位可依据事件发生的时间记录进行定年^[21]。

已有研究表明,作为黄河下游的滞洪水库,东平湖的形成与演化深受黄河泛滥改道影响,历经大野泽、梁山泊、安山湖等多个时代变迁^[17,22],洪水爆发后这里就成了大洪水沉积记录发育且能良好保存下来的场所。利用湖泊沉积物的粒度特征判别洪水事件,已经被广泛应用于现代和古代洪水事件的识别中。洪水沉积主要表现为粒度指标的突变,一般可通过中值粒径或者平均粒径的骤增、分选性变差等指标判断洪积层位置^[23]。在洪积层内部粒径也有细微的变化,一般沉积物粒径向上缓慢变细^[24]。根据东平湖 DPK 岩芯的粒度特征,可以看出有 5 次明显的粒度突变(图 2),具体如下:

(1) 52 cm 处,本次粒度突变事件可能指示 1855 年黄河决口事件,史料记载显示 1855 年黄河决口于河南兰阳铜瓦厢,向北夺大清河入海,结束了长期夺淮入海的局面。黄河洪水在东平湖区洼地滞留,逐步形成了现代意义上的东平湖。这与根据²¹⁰Pb 推算的测年结果是一致的。

(2) 75 cm 处,本次粒度突变事件可能指示公元 1391 年黄河决溢事件,根据资料记载,公元 1391 年黄河在河南原阳决口,由郛城、旧曹州两个河口漫东平安山(即安山湖),黄河决口淹没安山湖。

(3)89 cm处,本次粒度突变事件可能指示公元1194年发生的黄河决溢泛滥事件,根据资料记载,公元1194年黄河在河南阳武决口,夺淮入海,从此黄河开始了长达700年的夺淮历史。这次黄河洪水在梁山泊分流,梁山泊一带逐渐被淤平。

(4)102 cm处,本次粒度突变事件可能指示公元944年发生的黄河决口事件,史料记载公元944年黄河在济州决口,推测此时东平湖地区由于受黄河洪水影响,湖面北移,形成梁山泊,并且湖水面积增加,合并安山湖于其中。

(5)119 cm处,此时岩性及粒度均发生突变,推测本次粒度突变事件指示公元516年黄河泛滥。据史料记载,北魏孝明帝熙平三年(公元516年),黄河连年泛滥,弥漫冀、定等数州,崔楷特向皇帝提出治河的建议并被采纳,虽最后半途而废,但表明南北朝时期黄河洪水还是很频繁的^[20]。频繁泛滥的洪水导致东平湖地区的水系改变,形成湖泊也是很有可能的。因此,推测此时东平湖深受黄河洪水影响,为东平湖(安山湖)形成时期,后来号称“小洞庭”^[20]。

结合东平湖形成演化历史及几次对东平湖影响较大的黄河决溢泛滥事件,推测119、102、89、75、52 cm可能分别对应于公元516年、944年、1194年、1391年、1855年^[19-20]。东平湖DPK岩芯的年代序列按照线性内插建立(图3)。119 cm以下沉积物在整个剖面粒度最粗,且各粒度组成波动变化较大(图2),表明沉积环境不稳定,水动力较强,另外该层有机质含量整体较低,平均仅为5.1%,综合

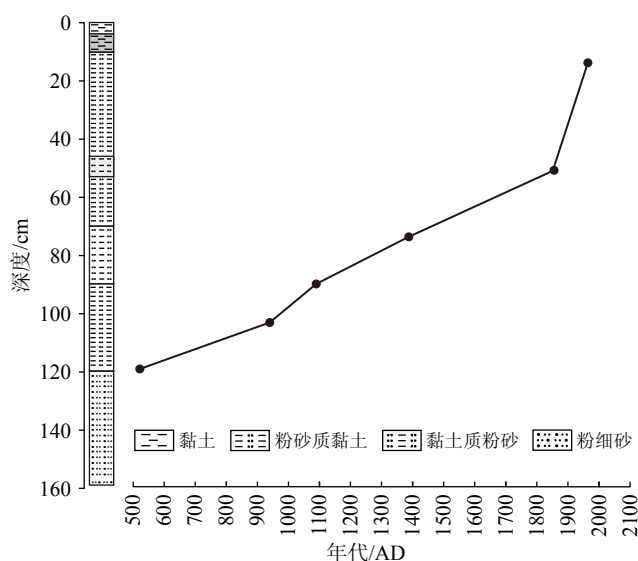


图3 东平湖DPK岩芯岩性及年代序列

Fig.3 Lithology and chronology of Core DPK in the Dongping Lake

判断,推测该层为河流相沉积,可能是古济水流经时的沉积物,由于不知具体年代,在此不再详细讨论。本研究主要探讨东平湖DPK岩芯119 cm以上湖相沉积记录的约1500 a以来的沉积历史。

3.2 炭屑分析

炭屑分析结果表明,在114个样品中共统计鉴定到116431粒炭屑,平均每样约1021.3粒,炭屑平均浓度为39579.4粒/g。炭屑组合以0~50 μm细粒炭屑占绝对优势,平均值为97.1%;中粒(50~100 μm)和粗粒(>100 μm)分别占2.7%及0.3%。DPK岩芯119 cm以下炭屑浓度总体偏低,炭屑组成以0~50 μm的粒级为主,但粗炭屑也占一定比例。根据东平湖DPK岩芯各粒级炭屑浓度在剖面上的变化特征(图4),近1500年(119 cm以上)东平湖炭屑记录的趋势变化可划分成4个带:

带I(119~84 cm, 516—1254 AD):本带炭屑总浓度为17468.3~103664.6粒/g,平均为44495.0粒/g,在105、113、117 cm处有3个明显的峰值。0~50、50~100和>100 μm炭屑浓度平均值分别为43965.4、491.3、38.3粒/g。本带炭屑总浓度整体呈下降趋势,其中119~100 cm变化幅度较大,之后趋于稳定;炭屑组成以0~50 μm的粒级为主,50~100 μm和>100 μm的炭屑浓度整体较低且变化较小。

带II(84~33 cm, 1254—1855 AD):本带炭屑总浓度为21625.7~104990.9粒/g,平均为47861.3粒/g,在44、49、50、71、79 cm处多次出现明显的峰值。其中,0~50 μm炭屑浓度略有升高,平均为47092.9粒/g。50~100 μm和>100 μm粒级炭屑浓度平均为712.2、56.2粒/g。本带炭屑总浓度整体较高且波动变化频繁,炭屑组成仍以0~50 μm的粒级为主,50~100 μm和>100 μm的炭屑浓度明显上升且波动变化较大。

带III(33~13 cm, 1922—1962 AD):本带炭屑总浓度为9509.2~49432.4粒/g,平均为21965.0粒/g,0~50、50~100和>100 μm粒级炭屑浓度平均值分别为21428.8、492.0、44.2粒/g。本带炭屑总浓度总体较低,炭屑组成仍以0~50 μm的粒级为主,但各粒级的炭屑浓度较上带下降明显且波动变化不大。

带IV(13~0 cm, 1962年以来):本带炭屑总浓度为24784.4~60487.8粒/g,平均为38574.8粒/g。0~50、50~100和>100 μm粒级炭屑浓度平均值分别为37180.1、1214.4、180.0粒/g。本带炭屑总浓

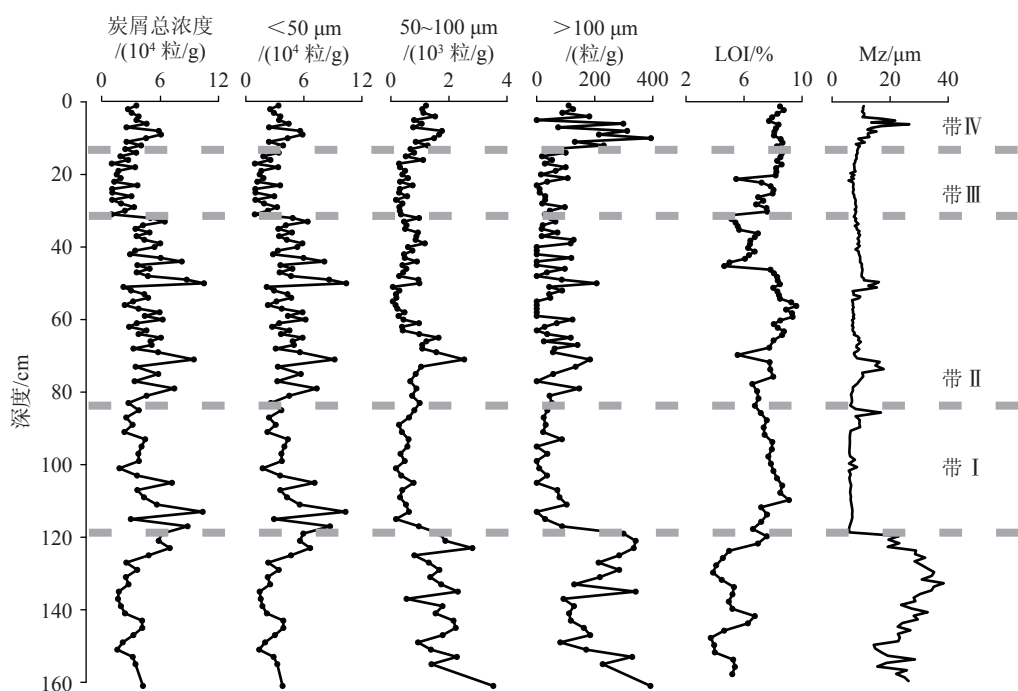


图4 东平湖 DPK 岩芯炭屑浓度、烧失量及平均粒径变化

Fig.4 Results of charcoal concentration, LOI, and average grain-size of Core DPK in the Dongping Lake

度较上带明显上升,炭屑组成仍以 $0\sim 50\ \mu\text{m}$ 粒级为主,但各粒级的炭屑浓度均明显增加,尤其是 $>100\ \mu\text{m}$ 的炭屑浓度迅速上升。

3.3 粒度、烧失量变化

粒度分析结果表明(图2),东平湖 DPK 岩芯沉积物粒度组成主要是以黏土($<4\ \mu\text{m}$)、细粉砂($4\sim 16\ \mu\text{m}$)和粗粉砂($16\sim 64\ \mu\text{m}$)为主,其总含量达 98% 以上,其中黏土含量占 8.7%~51.2%,平均 31.9%;细粉砂占 12.3%~57.9%,平均 46.4%;粗粉砂占 3.9%~67.0%,平均 20.0%;砂含量很少,一般不超过 1%,平均 1.7%。剖面平均粒径变化幅度较大,最小值为 $5.6\ \mu\text{m}$,最大值为 $38.5\ \mu\text{m}$,平均为 $12.0\ \mu\text{m}$ 。整体来看平均粒径和各粒度组成波动变化较大,其中平均粒径、粗粉砂和砂含量变化趋势较一致,黏土和细粉砂含量变化趋势相似。DPK 岩芯烧失量波动变化明显(图4),整体呈上升趋势,最大值为 9.6%,最小值为 3.7%,平均值为 7.2%。

4 讨论

4.1 环境代用指标的指示意义

炭屑作为火发生的直接证据,在沉积物中易于保存下来。炭屑浓度高指示火活动强烈,反之火活动微弱。而气候是火事件发生的重要因子,气候越

干旱,火发生的可能性越大,频率越高^[2];另外,火的发生往往与人类活动也密切相关。因此,炭屑浓度的变化不仅可以指示气候变化,而且可以反映研究区人口数量和人类活动强度的变化^[25-27]。从炭屑传播和沉积规律看,粗、中粒炭屑($>50\ \mu\text{m}$)通常会在原地沉积,或后期被流水等外力携带至沉积区保存下来,传播距离较短,常被用来指示本地野火活动,且在一定程度上能反映人类活动的状况;而细粒炭屑($<50\ \mu\text{m}$)传播距离较长,火源区相对较远,通常指示区域性野火事件^[26]。

沉积物粒度是重建区域干湿变化的物理指标之一,能够提供区域降水、湖泊水位波动等古气候古环境信息。一般来说,区域降水增多,一方面增加了流域的侵蚀强度,另一方面也增大了流域的径流量,这样有利于粗颗粒物被搬运入湖^[21]。因此,湖泊中粗颗粒物质的增多,往往反映区域降水的增多;反之,粗颗粒物质的减少,反映区域降水的减少^[28]。另外,历史时期在黄河下游地区华北平原上发育了一系列湖泊,据《水经注》记载的湖泊就有 130 多个,不过,在全球气候变化背景下,加之黄河频繁决溢改道及人类活动加剧的影响,绝大多数古湖已经消亡^[29]。这些古湖主要沿黄河古河道分布,与黄河关系密切,研究表明,黄河下游湖泊中粗颗粒物质的增多,也可能指示黄河决溢泛滥^[22]。

烧失量经常被用作湖泊沉积物中有机质含量的量度。长期以来,湖泊沉积物中有机质含量的研

究,一直被作为评价湖泊初始生产力的主要依据之一。已有研究表明,在湿润气候条件下,陆生和水生生物的繁盛发育形成较高的生物量,同时较大入湖径流可带来丰富的陆源有机质和营养物质,导致湖泊的有机质增加;反之,寒冷干燥的气候条件下,生物发育贫乏,入湖水量减少,有机质丰度降低^[30]。因此,通常情况下,有机质高值代表降水较多的暖湿环境,低值指示相对冷干的气候环境^[31]。

4.2 东平湖炭屑记录揭示的火事件演化历史及对气候变化与人类活动的响应

黄河下游东平湖 DPK 岩芯的炭屑、粒度、烧失量等记录表明,研究区近 1 500 年来火事件的演化不仅与气温和湿度变化有关,而且与流域人类活动的强度也存在密切联系。

4.2.1 516—1254 AD: 区域性火事件较频繁, 约 1000 AD 之后明显减弱

该阶段有机质含量较高,但明显呈先增加后逐渐减小趋势,指示湖泊生产力整体较高,气候冷干、暖湿波动变化;粒度整体偏细,平均粒径及各粒度组成波动变化很小,反映了入湖水动力较弱,可能指示了流域降水偏少。516—1254 AD 期间,历史上大体对应于南北朝中晚期、隋、唐、五代十国、宋。已有研究表明,该时期我国华北地区大部分时间偏旱,气候频繁波动,冷暖交替(图 5),其中南北朝时期中国东部为寒冷气候,隋至盛唐时期(公元 6 世纪中叶—8 世纪初)气候转向温和,8 世纪中叶气候开始转向寒冷,中唐至五代初期(公元 8 世纪中—叶—9 世纪末)经历了一次比较短暂的气候寒冷时期,自 10 世纪初始,气候开始转暖,五代中至元前期的温暖气候(公元 10 世纪初—13 世纪末)就是所谓的中世纪暖期^[32]。可以看出,本阶段东平湖地区的气候条件与中国东部历史时期该阶段气候记录大体一致,由冷干逐渐转为暖湿。

炭屑记录显示本阶段炭屑总浓度较高,整体呈下降趋势,炭屑组成以 $< 50 \mu\text{m}$ 的粒级为主, $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 和 $> 100 \mu\text{m}$ 的炭屑浓度较低且变化不大(图 4)。本阶段早期炭屑浓度明显偏高且波动频繁,炭屑总浓度、 $< 50 \mu\text{m}$ 炭屑浓度在 105、113、117 cm 处出现 3 个明显的峰值(图 4),表明南北朝中晚期至隋唐时期区域性火事件发生频繁,而且火的强度也大,而湖泊周围的地方性火事件很少发生。据史料记载,中国古代战事频繁,516—1254 AD 期间,攻陷东平县城的战争记录有 9 次(表 2),其中隋唐时期就发生了 6 次^[33],这可能是造成该时期区域古火活动频繁的重要原因之一。其次,区域冷干的气候也可能是导致火活动较强的原因之一。已有研究也表明,当气候变冷时,旱季可能更早,加上较冷的气候不利于枯枝落叶的分解^[34],落叶树种留下的枯枝落叶的堆积,特别是植被类型为落叶阔叶林和多草本植物时,森林火灾更易发生^[35]。至宋朝以后,随着气候逐渐转为暖湿,丰富的降水使空气湿度和可燃物含水量增加,极大地抑制了野火的发生和蔓延,使得各粒级炭屑浓度均呈现低值(图 4),表明火活动明显减弱。此外,这个时期地震、雷电等也可能引起自然灾害,如 1068 年 8 月,东平县发生了地震^[33]。

4.2.2 1254—1922 AD: 区域、地方性火事件频率和强度明显增加

本阶段有机质波动较大,至 1855 年后明显降低,指示气候可能变化频繁;平均粒径及各粒度组成波动变化较大,也反映了入湖水动力强弱不断发生变化,可能指示了流域降水波动变化较频繁。已有研究表明,13 世纪末开始,中国东部气候又向寒冷方向转变,元后期至清末(公元 14 世纪初—19 世纪末)是一个漫长的寒冷时期,即通常所谓的小冰期^[32](图 5)。13 世纪中期后我国华北地区降水呈波动转湿趋势,南宋至元(公元 1128—1368 年)的气候总体偏干,但在 1250 年开始转湿,明前期(约

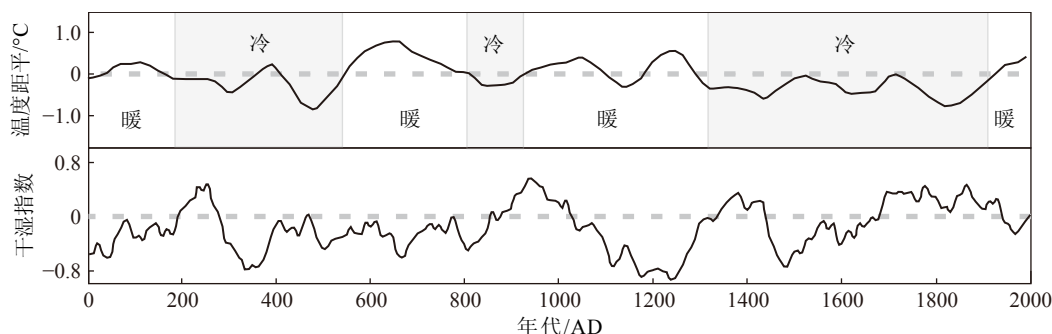


图 5 过去 2000 年中国东中部温度、华北地区降水(干湿)变化序列^[32]

Fig.5 Comparison in temperature in the eastern and central regions of China and the precipitation in the northern China^[32]

表 2 历史时期东平县战争等人类活动与地震记录^[33]

Table 2 War and other human activities and seismic records in the historical period in Dongping County^[33]

时期	战争等人类活动	地震记录
516—1254 AD	● 徐园朗攻陷东平（617 AD）	地震（1068 AD）
	● 李祗兵讨安禄山（756 AD）	
	● 李正己取郓州（777 AD）	
	● 田宏正平郓州（819 AD）	
	● 黄巢起义攻克郓州（877 AD）	
	● 李嗣源攻克郓州，庄宗击退王彦昌（923 AD）	
	● 辛弃疾收复东平（1162 AD）	
1254—1922 AD	● 李龄领导农民起义反金（1215 AD）	地震（1830 AD）
	● 元兵围东平（1216 AD）	
	● 燕军攻陷东平（1402 AD）	
	● 农民李青山率众破东平（1641 AD）	
	● 赵浩然率众攻城（1848 AD）	
	● 张乐行部渡黄河，两次攻打州城（1861 AD、1865 AD）	
1922—1962 AD	● 土匪攻城，军阀哗变，在县城西、南部抢掠（1918 AD）	地震（1937 AD）
	● 县城文庙大火灾（1920 AD）	
	● 张宗昌向县城投放炸弹数枚（1925 AD）	
	● 红枪会攻城，遭“民团”镇压（1926 AD）	
	● 方永昌率部驻扎6个月，骚扰城乡（1926 AD）	
	● 济南惨案后，烧毁日货（1928 AD）	
1962 AD以来	● 抗日战争、解放战争（1937—1949 AD）	地震（1975，1981，1982 AD）
	● 大炼钢铁（1958—1960 AD）	
● 文化大革命，毁坏古墓、文物、古籍（1966—1976 AD）		

1369—1429 年)气候湿润,中期(约 1430—1550 年)持续偏干,明末则出现了秦汉以来最为严重的一次持续性干旱,清代(1645—1911 年)气候总体湿润^[32](图 5)。根据史料记载,自 1264 年有系统旱灾记录以来,1264—1367 年的 104 年中,山东省共发生旱灾 32 次、水灾 68 次,发生概率分别为 30.8%、65.4%;1368—1643 年的 276 年中,山东省共发生旱灾 167 次、水灾 185 次,发生概率分别为 60.5%、67.0%;1644—1911 年的 268 年中,山东省共发生旱灾 243 次、涝灾 268 次,发生概率分别为 90.7%、88.1%^[36]。可见,元、明、清至民国时期,山东旱灾、水灾极为频繁,该时期东平县旱灾、水灾也比较频繁^[33]。综合来看,推测该时期区域温度明显下降,气候整体偏冷,旱涝交替频繁。

炭屑记录显示本阶段炭屑总浓度较高,炭屑组

成仍以 $<50\text{ }\mu\text{m}$ 的粒级为主,各粒级炭屑浓度普遍升高且波动变化频繁,各粒级炭屑浓度在 44、49、50、71、79 cm 等处多次出现明显的峰值,表明区域性火事件和湖泊周围的地方性火事件频率和强度均明显增加。1254—1922 AD 期间区域偏冷的气候条件可能不利于枯枝落叶的分解^[34],进一步促进了火事件的发生。另外,该时期东平县经济渐趋恢复,人口不断上升,1771 年东平县共有人口约 28 万人,至 1825 年增至约 39 万人^[33]。推测随着东平湖周边人口的迅速增加,耕地越来越不足,于是便过度砍伐焚毁湖周边森林,加上周边乡村不断繁荣发展,生活用火随之增多,相应地,火灾发生的次数也可能增多。根据资料记载,在远古时期,泰山有着繁茂的森林,《史记》记载:“茂林满山,合围高木不知有几”,杜甫《望岳》诗中的“岱宗夫如何,齐鲁青

未了”也描绘了泰山植被的繁茂;明清以后数百年,植被遭到严重破坏,森林几乎荡然无存^[37]。此外,元、明、清时期也是战火不断,在元代,仅《中国火灾大典》收录的战争火灾就有 683 次;至明朝,达 1309 次;清朝时期,战争火灾总数上升至 3453 次^[38]。1254—1922 AD 期间东平县也发生了多次战争^[33](表 2)。因此,可能受小冰期气候的持续影响,加上人类活动干扰,导致本阶段东平湖流域的火事件频率及其强度明显上升。

4.2.3 1922—1962 AD: 区域、地方性火事件频率显著减少且趋于稳定

本阶段有机质含量较上一阶段明显迅速升高,且呈不断增加趋势,指示湖泊生产力整体较高,气候暖湿;平均粒径尤其是上部逐渐变粗,可能反映了区域降水的增多,进而增加了流域的侵蚀强度及流域径流量,也可能表明人类活动的影响开始加剧。已有研究也表明,民国以来为温暖气候,20 世纪暖期的起始时间在各区域也有差别,我国东部地区自 20 世纪 20 年代开始气温明显上升^[32](图 5)。此外,华北地区 20 世纪气候在波动中趋干,40 年代中期至 60 年代中期较为湿润,80 年代起则再次转干^[32](图 5)。整体来看,推测该时期东平湖流域为暖湿气候。

炭屑记录显示本阶段炭屑总浓度显著降低,各粒级炭屑浓度普遍下降且波动变化不大,未见明显峰值,尤其是 $< 50 \mu\text{m}$ 粒级炭屑浓度明显下降并处在整个岩芯最低水平,表明该时期区域性火事件和湖泊周围的地方性火事件的强度和频率均大幅度下降,没有出现显著的火灾事件。民国期间(1912—1949 年)战争不断、政局动荡,匪患、兵变等战争火灾达 2646 次^[38]。在此期间东平县地区也发生了多次战争,特别是抗日战争、解放战争(1937—1949)期间战争不断^[33](表 2)。可见,本阶段人类活动影响仍然很大,有多次人为火灾,为何岩芯并未记录显著的火灾事件?究其原因,一方面,尽管 20 世纪气候在波动中趋干,但整体偏湿润,特别是 40 年代中期至 60 年代中期较为湿润^[32],在该气候条件下,火活动可能会被抑制;另一方面,新中国成立以来,我国森林防火工作有了较大的进展,随着区域防火机构和防火设施的完善,致使森林火灾的管理强度上升,森林火灾及其危害呈明显下降趋势^[39],进而抑制了区域火事件的发生频率和强度。更重要的原因可能是,1937 年国民党军在花园口决黄河大堤,水南灌入淮,至 1947 年,花园口堵口,黄河水流入东平湖与汶水复交,因此导致 1938—1947 年黄河

南徙期间,东平湖湖区大部分土地干涸还耕^[17]。由于大部分碳屑主要是由径流搬运至湖盆沉积^[40],因此黄河南徙期间东平湖失去了一个重要的炭屑来源。

4.2.4 1962 年以来: 地方性火事件强度迅速增加

本阶段有机质含量继续呈不断增加趋势,指示湖泊生产力整体仍较高,气候仍然暖湿;平均粒径迅速粗化,特别是粗粉砂含量明显增加,反映了流域侵蚀强度进一步增大,一方面可能区域降水明显增多,另一方面也可能人类干扰更加强烈。气象观测资料显示^[33,41],1957—2020 年,东平县年平均气温呈显著的上升趋势,倾向率为每 10 年上升 0.27°C ,尤其是 1985 年以来上升趋势尤为显著;东平县年平均降水量呈波动减少趋势,倾向率为每 10 年下降 6.7 mm (图 6),表明 20 世纪以来东平湖流域气候逐渐趋于暖干。

炭屑记录显示本阶段炭屑总浓度再次升高,各粒级炭屑浓度普遍上升且波动变化较大,尤其是 $> 100 \mu\text{m}$ 粒级炭屑浓度突然急剧增加至整个剖面的最高峰,且多次出现峰值,指示该时期火事件整体有所上升,特别是湖泊周围的地方性火事件的强度和频率大幅度增加。加之平均粒径迅速粗化,粗粉砂含量明显增加,推测该阶段东平湖周边人类活动干扰强烈。本阶段粒度明显粗化并非受黄河决溢泛滥影响,其原因为:一方面,据东平县志记载^[33],东平湖水库自 1963 年改为防洪运用后,汛期除黄河发生超过下游河段防洪能力的较大洪水需要有控制地分洪进湖外,一般中、小洪水已不再进湖调蓄;另一方面,随着 20 世纪 60 年代以来流域内人口的急剧增长和经济的快速发展(图 7),人地关系矛盾日益突出,毁林开荒和围湖造田等现象时有发生,导致地表植被破坏,加剧了水土流失,大量未经处理的工业废水和生活污水经由大汶河排入东平湖,加上大量水利工程的建设,湖沙开采力度的不断加大,以及近年来东平湖人工养殖活动的蓬勃发展等,共同导致了东平湖粒度明显粗化。

因此,推测此阶段强烈的人类活动可能是导致东平湖地区火事件频率及其强度显著上升的重要原因。另外,随着近年来流域气候变暖、变干,高温、干旱形成的干燥环境,也可能是火事件发生频率及其强度再次上升的原因之一,尤其是 20 世纪 90 年代以来流域气温显著升高(图 6),高温使得空气相对湿度降低,地表可燃物的含水量降低,火险升高;同时,高温直接影响可燃物本身的温度,使可燃物达到燃点时所需热量大大降低,被点燃的风险

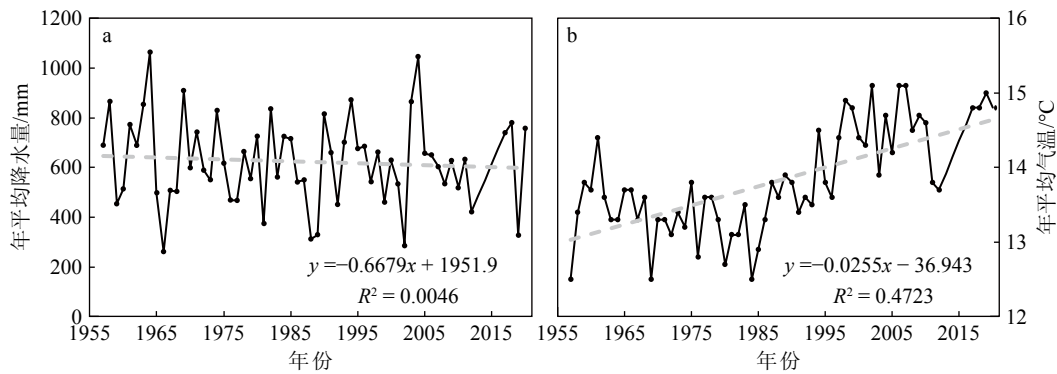


图 6 1957—2020 年东平县年平均降水量 (a)、年平均气温 (b) 变化趋势^[33,41]

Fig.6 Temporal variation trend of average annual precipitation (a) and average annual temperature (b) in Dongping County from 1957 to 2020^[33,41]

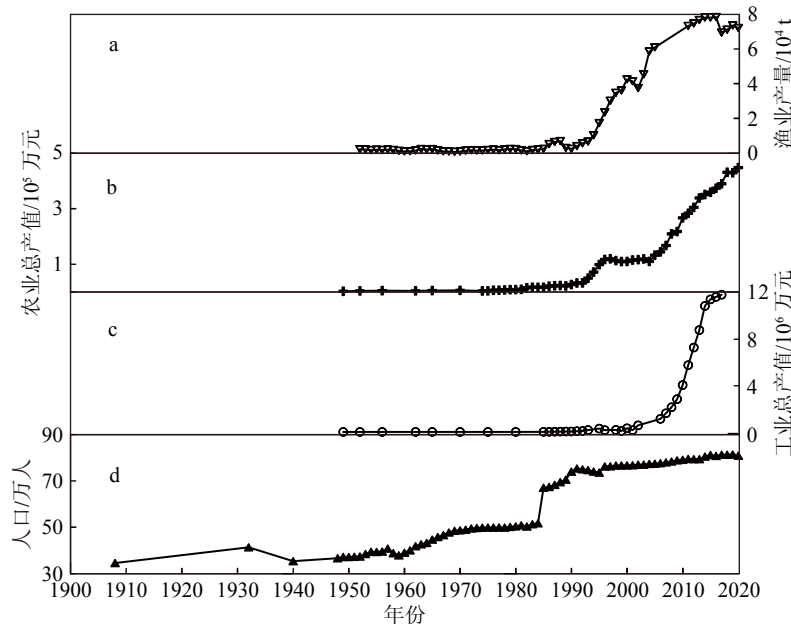


图 7 东平县渔业产量 (a)、农业总产值 (b)、工业总产值 (c) 和人口 (d) 变化情况^[17,33]

Fig.7 Changes in fishery production (a), total agriculture output value (b), total industrial output value (c), and population (d) in Dongping County^[17,33]

增加^[42]。另外, 1975、1981、1982 年东平县发生了地震, 也可能引起自然灾害^[33]。

4.3 东平湖地区近 1 500 年来火演化的启示

综上, 研究区的气候变化与人类活动强度共同驱动了东平湖地区近 1 500 年以来火事件的演化历史, 东平湖流域冷暖波动的气候变化是火事件发生的自然原因, 而流域人口变化、战争、工农业生产等活动是火事件发生的潜在人为原因。火活动可以是自然火, 也可以是人为火。自然火的发生一般需要满足 3 个基本条件: 充足的可燃物、适宜的气候背景(如降雨较少、高温、空气干燥等)和触发条件(闪电、火山爆发、地震等)^[27]。人为火则主要和

人类生产生活有关, 诸如战争、用火不慎、放火等^[38]。

历史规律表明, 自然界真正属于自然因素引起的火灾为数极少, 绝大多数火灾都是人为的^[38]。中国古代战事频繁, 几千年的历史经历了大小无数次的战争。战争引发火灾是中国古代、近代火灾的一个显著特点^[38]。另外, 人类的生活离不开火, 而居住的建筑又为易燃结构, 稍有不慎, 即引发火灾。因此, 用火不慎引起的火灾, 也始终处于各类火灾原因的主导地位^[38]。通过研究火事件的历史, 可以从一个侧面了解不同历史时期的社会经济、政治、军事、科学等发展状况。因此, 东平湖地区火事件的演化历史, 也可以说是一部东平湖流域近 1 500 年来的经济社会发展史。

当前全球气候变暖背景下,高温、干旱极端天气事件出现的频率增加,森林火险加剧,森林防火形势严峻^[42]。根据中国科学院发布的《林火碳排放研究蓝皮书(2023)》报告,2001—2022年,全球年均森林过火面积为4695万公顷,是同期年均人工林增长面积的11倍。研究表明,在过去20年里,气候变化和人类活动导致森林火灾更加频繁和剧烈^[1]。森林火灾数量增加的部分原因是气候变化导致热浪和干旱频发,另外人类也发挥了作用,许多森林火灾实际上是由人类引起的,例如,人类在夜间生火取暖、燃放烟花爆竹或者丢弃烟头等^[1]。据“云南消防”,2023年云南省大部分地区冬春连旱,全省火灾呈多发态势,仅1至4月份,全省共发生火灾9100起,同比增长60%。由此可见,随着全球增温,人类活动加剧,发生野火的风险不断增加,使得火演化规律和机制愈加复杂。因此,未来森林防火形势仍然非常严峻,应尽量避免人为因素引发的火灾。

5 结论

本文基于东平湖DPK沉积岩芯的炭屑记录及粒度、烧失量等指标,重建了研究区过去1500年以来的火演化历史。在此基础上,结合流域气候记录及人类活动的历史资料,探讨了古火活动对气候变化与人类活动的响应。过去1500年以来,东平湖流域火活动明显受气候控制,而人类活动(如刀耕火种、毁林开荒、战争等)的加强可能是导致东平湖流域火灾频发的主因。在全球变暖及人类活动加剧背景下,推测东平湖流域火活动将会进一步趋于频繁。东平湖地处黄河与大汶河下游冲积洪积平原交接的条形洼地上,在较长时期频繁受到黄河决溢、改道、漫流侵扰,而由于黄河流路位置和水源补给大小不同,决定了不同时期这一带洼地积水成湖的中心位置和大小不断发生变化,导致沉积过程更加复杂。由于本文研究材料分辨率所限,难以揭示出东平湖流域火活动变化过程的细节。另外,可靠年代框架的建立也是本研究的难点,由于东平湖碳库效应显著且随沉积层序不断变化,本研究通过对比历史时期黄河决溢改道事件与异常沉积特征(粒度突变事件)建立了年代序列,但这也可能存在一定的不确定性,也许一段时间内的多次暴雨也可能形成类似的沉积特征。有待于今后寻找更合适的研究材料开展研究区高分辨率的火活动演化历史研究工作。

致谢: 中国科学院南京地理与湖泊研究所王苏民研究员、羊向东研究员、吴艳宏研究员、张恩楼研究员、潘红玺副研究员、王荣研究员参加了野外采样工作,测年分析得到了夏威夷副研究员、刘恩峰教授等的帮助,炭屑分析得到了中国地质科学院水文地质环境地质研究所童国榜研究员的帮助,特此感谢。

参考文献 (References)

- [1] You X Y. Surge in extreme forest fires fuels global emissions[Z]. *Nature*, 2023-12-20.
- [2] 庞洋,周斌,徐向春,等. 中国东部季风区全新世火历史及其影响因素[J]. *第四纪研究*, 2022, 42(2): 368-382. [PANG Yang, ZHOU Bin, XU Xiangchun, et al. Holocene fire history and its influencing factors in the monsoon region of East China[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(2): 368-382.]
- [3] Miao Y F, Song Y G, Li Y, et al. Late Pleistocene Fire in the Ili Basin, Central Asia, and its potential links to paleoclimate change and human activities[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2020, 547: 109700.
- [4] Mu Y, Qin X G, Zhang L, et al. Link between black carbon, fires, climate change, and human activity during the Holocene period shown in the loess-paleosol sequence from Henan, China[J]. *Quaternary Research*, 2017, 87(2): 288-297.
- [5] 贾宝岩,肖霞云,迟长婷. 云南洱海炭屑记录揭示的近千年来古火演化历史[J]. *第四纪研究*, 2024, 44(1): 158-173. [JIA Baoyan, XIAO Xiayun, CHI Changting. Fire history over the past millennium revealed by the charcoal record from Lake Erhai, northwestern Yunnan Province[J]. *Quaternary Sciences*, 2024, 44(1): 158-173.]
- [6] 刘剑波,李建勇,韩岳婷,等. 中国西北地区中晚全新世火历史集成重建与气候演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2024, 44(1): 156-169. [LIU Jianbo, LI Jianyong, HAN Yueting, et al. Integrated reconstruction of fire history and climatic changes in Northwest China since mid-late Holocene[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2024, 44(1): 156-169.]
- [7] 裴文强,万世明,谭扬,等. 过去5万年来珠江流域火历史的南海沉积记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(3): 47-57. [PEI Wenqiang, WAN Shiming, TAN Yang, et al. Fire history in Pearl River Basin since 50 kaBP: sediment records from the South China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(3): 47-57.]
- [8] Pei W Q, Wan S M, Clift P D, et al. Human impact overwhelms long-term climate control of fire in the Yangtze River Basin since 3.0 ka BP[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 230: 106165.
- [9] 杜建峰,王宁练,李建勇,等. 洛阳盆地全新世炭屑记录及其古环境意义[J]. *第四纪研究*, 2022, 42(2): 383-396. [DU Jianfeng, WANG Ninglian, LI Jianyong, et al. Charcoal records of Holocene loess-soil sequences and palaeoenvironmental significance in the Luoyang Basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2022, 42(2): 383-396.]
- [10] Xiao X Y, Yao A, Hillman A, et al. Vegetation, climate and human im-

- pact since 20 ka in central Yunnan Province based on high-resolution pollen and charcoal records from Dianchi, southwestern China[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2020, 236: 106297.
- [11] Wang X, Xiao J L, Cui L L, et al. Holocene changes in fire frequency in the Daihai Lake region (north-central China): indications and implications for an important role of human activity[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2013, 59: 18-29.
- [12] 吴立, 张梦翠, 计超, 等. 全新世巢湖沉积物炭屑记录的火环境变化[J]. *地理科学*, 2016, 36(12): 1920-1928. [WU Li, ZHANG Mengcui, JI Chao, et al. Charcoal recorded fire environment change during the Holocene from the sediment of the Chaohu Lake, East China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(12): 1920-1928.]
- [13] Chen Y Y, Li W J, Hou Z F, et al. Clay minerals and provenancial implications of surface sediments in the Dongping Lake, North China[J]. *Quaternary International*, 2023, 673: 53-61.
- [14] 喻宗仁, 窦素珍, 赵培才, 等. 山东东平湖的变迁与黄河改道的关系[J]. *古地理学报*, 2004, 6(4): 469-479. [YU Zongren, DOU Suzhen, ZHAO Peicai, et al. Relationship between changes of Dongping Lake and shifting of the Yellow River in Shandong Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2004, 6(4): 469-479.]
- [15] 栗文佳, 陈影影, 于世永, 等. 近 40 年来东平湖水环境变迁及驱动因素[J]. *环境工程*, 2018, 36(10): 48-52. [LI Wenjia, CHEN Yingying, YU Shiyong, et al. Water environment changes of Dongping Lake in nearly 40 years and its driving factors[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(10): 48-52.]
- [16] Zhang Z F, Yu N, Liu D Y, et al. Assessment and source analysis of heavy metal contamination in water and surface sediment in Dongping Lake, China[J]. *Chemosphere*, 2022, 307: 136016.
- [17] 东平湖管理局. 东平湖志 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2014. [Dongping Lake Administration Bureau. *Annals of Dongping Lake*[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 2014.]
- [18] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 25(1): 101-110.
- [19] 陈诗越, 王苏民, 陈影影, 等. 东平湖沉积物 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 垂直分布及年代学意义[J]. *第四纪研究*, 2009, 29(5): 981-987. [CHEN Shiyue, WANG Sumin, CHEN Yingying, et al. Vertical distribution and chronological implication of ^{210}Pb and ^{137}Cs in sediments of Dongping Lake, Shandong Province[J]. *Quaternary Sciences*, 2009, 29(5): 981-987.]
- [20] 杨丽伟, 陈诗越. 东平湖沉积碳库效应与形成年代探讨[J]. *地球科学前沿*, 2014, 4(5): 311-318. [YANG Liwei, CHEN Shiyue. Discussion about the effects and forming times of carbon reservoir of lacustrine sediments in Lake Dongping, North of China[J]. *Advances in Geosciences*, 2014, 4(5): 311-318.]
- [21] 沈吉, 薛彬, 吴敬禄, 等. 湖泊沉积与环境演化 [M]. 北京: 科学出版社, 2010. [SHEN Ji, XUE Bin, WU Jinglu, et al. *Lake Sedimentation and Environmental Evolution*[M]. Beijing: Science Press, 2010.]
- [22] 魏本杰, 侯战方, 陈诗越, 等. 黄河下游大野泽沉积物粒度特征及其对环境演化的指示[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(3): 151-161. [WEI Benjie, HOU Zhanfang, CHEN Shiyue, et al. Grain-size characteristics of Dayeze lake sediments in the lower reach of Yellow River and their environmental implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(3): 151-161.]
- [23] Schillereff D N, Chiverrell R C, Macdonald N, et al. Flood stratigraphies in lake sediments: a review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 135: 17-37.
- [24] Parris A S, Bierman P R, Noren A J, et al. Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 43(1): 29-49.
- [25] 周锦清, 马春梅, 刘泽雨, 等. 宁绍平原中全新世火历史与影响因素研究[J]. *第四纪研究*, 2024, 44(1): 84-99. [ZHOU Jinqing, MA Chunmei, LIU Zeyu, et al. A study on the Middle Holocene fire history and its influencing factors in Ningshao Plain[J]. *Quaternary Sciences*, 2024, 44(1): 84-99.]
- [26] 谭志海, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河流域全新世以来野火历史与人类土地利用的炭屑记录[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2014, 44(4): 1297-1306. [TAN Zhihai, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. Wildfire history and human land use over Weihe River basin since Holocene: evidence from charcoal records[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(4): 1297-1306.]
- [27] 江鸿, 饶志国. 火的历史重建及其与气候变化和人类活动关系研究进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2018, 38(2): 185-197. [JIANG Hong, RAO Zhiguo. Research progress on fire history reconstruction and its implications for climate change and human activities[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018, 38(2): 185-197.]
- [28] Peng Y J, Xiao J, Nakamura T, et al. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(3-4): 467-479.
- [29] 茹淳淋, 陈影影, 黎心泽, 等. 历史时期黄河下游地区古湖分布与消亡原因[J]. *古地理学报*, 2024, 26(1): 230-240. [RU Tinglin, CHEN Yingying, LI Xinze, et al. Distribution and extinction of paleolakes in the lower reaches of Yellow River during historical period[J]. *Journal of Palaeogeography: Chinese Edition*, 2024, 26(1): 230-240.]
- [30] 刘子亭, 余俊清, 张保华, 等. 烧失量分析在湖泊沉积与环境变化研究中的应用[J]. *盐湖研究*, 2006, 14(2): 67-72. [LIU Ziting, YU Junqing, ZHANG Baohua, et al. Application of loss on ignition to the study of lake sediments and environmental changes[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2006, 14(2): 67-72.]
- [31] 沈吉, 张恩楼, 夏威岚. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(6): 508-513. [SHEN Ji, ZHANG Enlou, XIA Weilan. Records from lake sediments of the Qinghai Lake to mirror climatic and environmental changes of the past about 1000 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 508-513.]
- [32] 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 等. 过去 2000 年中国气候变化的若干重要特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2012, 42(6): 934-942. [GE Quansheng, ZHENG Jingyun, HAO Zhixin, et al. General characteristics of climate changes during the past 2000 years in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(2): 321-329.]
- [33] 山东省东平县地方史志编纂委员会. 东平县志 (1986~2003)[M]. 北京: 中华书局, 2006. [Compiling Team for Annals of Dongping County, Shandong Province. *Annals of Dongping County*[M]. Beijing:

- Zhonghua Book Company, 2006.]
- [34] 刘文耀, 刘伦辉, 荆桂芬, 等. 云南松林与常绿阔叶林中枯落叶分解研究 [J]. 云南植物研究, 2000, 22(3): 298-306, 316. [LIU Wenyao, LIU Lunhui, JING Guifen, et al. Decomposition of leaf litter in *Pinus yunnanensis* forest and evergreen broad-leaved forest in central Yunnan[J]. Acta Botanica Yunnanica, 2000, 22(3): 298-306.]
- [35] 王敏, 蒙红卫, 黄林培, 等. 云南阳宗海流域过去 13000 年植被演替与森林火灾 [J]. 第四纪研究, 2020, 40(1): 175-189. [WANG Min, MENG Hongwei, HUANG Linpei, et al. Vegetation succession and forest fires over the past 13000 years in the catchment of Yangzonghai Lake, Yunnan[J]. Quaternary Sciences, 2020, 40(1): 175-189.]
- [36] 山东省水利厅水旱灾害编委会. 山东水旱灾害 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1996. [The Editorial Committee of Water and Drought Disasters of Shandong Provincial Department of Water Resources. Flood and Drought Disasters in Shandong[M]. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press, 1996.]
- [37] 泰山风景名胜区管理委员会. 中国泰山: 世界文化与自然遗产 [M]. 北京: 文物出版社, 1993. [Mount Taishan Scenic Area Management Committee. Mount Taishan in China[M]. Beijing: Cultural Relics Press, 1993.]
- [38] 李采芹. 中国历朝火灾考略 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010. [LI Caiqin. A Brief Study of Fires in Various Dynasties of China[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2010.]
- [39] 高文学. 中国自然灾害史: 总论 [M]. 北京: 地震出版社, 1997. [GAO Wenxue. History of Natural Disasters in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1997.]
- [40] Kershaw A P. Climatic change and aboriginal burning in north-east Australia during the last two glacial/interglacial cycles[J]. Nature, 1986, 322(6074): 47-49.
- [41] 东平县史志办公室编. 东平年鉴 [M]. 济南: 黄河出版社, 2004-2021. [Compiling Team for Annals of Dongping County. Dongping Yearbook[M]. Ji'nan: Yellow River Press, 2004-2021.]
- [42] 赵凤君, 舒立福. 气候异常对森林火灾发生的影响研究 [J]. 森林防火, 2007(1): 21-23. [ZHAO Fengjun, SHU Lifu. Study on the impact of climate anomaly on forest fires[J]. Forest Fire Prevention, 2007(1): 21-23.]