



增强的人类活动导致青藏高原东北晚全新世气候-生态系统耦合性减弱

王晶¹, 徐海^{1,2,3*}, 史思伟⁴, 蓝江湖⁵, 周慷恩⁶, 宋云平², 张金⁵

1. 贵州大学喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 资源与环境工程学院, 贵阳 550025

2. 天津大学地球系统科学学院, 天津 300072

3. 贵州省古生物与古环境全省重点实验室, 贵阳 550025

4. 中国农业科学院, 北京 100081

5. 中国科学院地球环境研究所, 黄土科学全国重点实验室, 西安 710061

6. 西华师范大学地理科学学院, 南充 637009

* 联系人, E-mail: xuhai@tju.edu.cn

2026-01-14 收稿, 2026-03-29 修回, 2026-05-19 接受, 2026-05-27 网络版发表

国家自然科学基金(42361144842, U20A2078)、贵州省科学技术厅百千万领军人才团队项目(黔科合人才BQW[2025]001)、贵州省科技计划项目(黔科合平台ZSYS[2024]002)和中国博士后科学基金会国家资助博士后研究人员计划(B档)(GZB20250104)资助

摘要 掌握青藏高原湖泊生态系统对气候和人类活动的综合响应对预测其未来生态演化趋势至关重要. 本文基于青藏高原东北可鲁克湖近5000年沉积物古DNA和有机分子组成, 结合其他古气候指标与考古证据, 揭示了人类活动在晚全新世高原生态转变中的关键作用. 结果显示研究区中晚全新世以来西风主控下的夏季降水量逐渐增加, 与经典的亚洲夏季风降水趋势相反; 在此长期趋势上叠加了数次百年-千年尺度冷干事件, 与太阳活动减弱及北大西洋浮冰碎屑事件对应良好. 在此气候背景下, 沉积物古DNA植物多样性显示湖滨植被逐渐繁茂, 与亚洲季风区植被演化呈反向走势. 蓝细菌、硅藻生物量及藻类多样性等指标均在温暖时段为高值, 寒冷时段为低值, 表明百年-千年尺度温暖气候有利于提升高原淡水湖泊生产力. 杂原子化合物含量与有机分子多样性在距今3500~3000年前(cal a BP)升高, 表明人类活动已在沉积物中留下较清晰指纹. 约2500 cal a BP内源脂族化合物增加、外源维管植物多酚降低, 暗示人类活动进一步增强并改变了流域景观格局. 约1000 cal a BP以后流域植被多样性降低, 表明增强的人类活动已导致流域气候-生态系统耦合性减弱. 随着未来全球变化与人为干扰加剧, 该区气候-生态系统耦合关系可能会出现更复杂的时空差异.

关键词 青藏高原, 全新世, 气候变化, 生态演化, 人类活动

掌握中全新世以来气候变化、生态演化和人类活动历史, 对于揭示生态系统对气候波动与人类活动的差异性响应、准确预测其未来演化趋势具有重要科学意义^[1~3]. 研究表明亚洲西风区和季风区的水文气候演变趋势在全新世呈反相位/错相位关系^[4,5]. 尽管亚洲季风区不同区域水文气候存在显著区域差异^[6], 但是中国北方中晚全新世以来总体而言水热同步, 即“暖湿-冷

干”水热配置模式; 而西风区中全新世暖干, 晚全新世凉湿^[5], 表现出“冷湿-暖干”水文气候模式. 相应地, 该异质性水文气候演变趋势可能导致生态系统产生差异性响应. 例如, 孢粉分析表明西北西风区中全新世陆地森林生态系统繁盛^[7], 但该区湖泊却出现干涸, 部分湖泊湖滨区域植被生态系统甚至表现为干旱荒漠景观格局^[1,5], 表现出树木生态系统与禾本科-灌木生态系统的

引用格式: 王晶, 徐海, 史思伟, 等. 增强的人类活动导致青藏高原东北晚全新世气候-生态系统耦合性减弱. 科学通报

Wang J, Xu H, Shi S, et al. Enhanced human activity on the northeastern Tibetan Plateau during the late Holocene reduced climate and ecosystem coupling (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: 10.1360/CSB-2026-0071

“矛盾性”演化趋势。例如, 青藏高原东北共和盆地内的达连海孢粉记录显示9400~3900 cal a BP期间气候湿润, 以针叶林为主的树木花粉比例明显增加(10%~94.3%), 草本花粉减少(17.7%~84.8%)^[7]; 而高原东北部的可鲁克湖/托素湖流域及新疆北部湖区则在中全新世干旱, 表现为以藜科为主的荒漠草原景观^[1,5], 表明西风区内部植被响应存在显著空间差异和复杂性。与之相左的是, 东亚夏季风区中全新世时期不论是山间沟谷还是湖滨开阔区域总体而言均是树木生态系统繁盛且占绝对优势^[8,9]。上述关于中全新世以来西风区湖滨与山间沟谷植被生态系统的差异性演变趋势有待更多精细可靠的地质生物记录去阐释, 其机制亟待厘清。

此外, 不同气候背景下人类活动对生态系统的影响可能不同。季风区生态系统恢复力强, 而干旱/半干旱区生态系统弹性弱。西北干旱区微弱的人类干扰就可能导致生态系统产生强烈的响应^[10~12], 甚至偏离自然气候变化驱动下的演化模式。因此, 需要更多的地质生物证据来进一步厘清人类活动介导下西风区水文气候-生态系统耦合关系的转变过程及机制。

本文瞄准上述科学问题, 建立了西风区可鲁克湖(青藏高原东北部柴达木盆地; 图1)过去约5000年的地球化学-生物学代用指标、沉积物古DNA(sedaDNA)宏条形码数据及有机质(SOM)分子组成特征。研究区地处西风环流主控区边缘, 同时又邻近亚洲夏季风影响范围, 属亚洲西风-季风相互作用的关键过渡带(图1(a)); 区内存在淡水湖(可鲁克湖)与咸水湖(托素湖)相邻共生的特殊地理格局(图1(b)), 对区域水文气候变化及生态响应极为敏感, 是解析西风区内部气候-生态系统耦合关系、揭示生态系统响应复杂性的理想窗口。本研究结合新开发的记录和研究区现有的古气候、古生态资料和考古学证据, 旨在: (1) 重建并探究青藏高原东北部中-晚全新世水文气候变化和生态演化历史, 及其与季风区的差异; (2) 评估气候和人为强迫对湖泊藻类及流域植被群落的潜在影响; (3) 探究人为介导下自然生态系统-气候变化耦合关系转变的历史及机制。

1 研究区概况

可鲁克湖(37°14'~37°20'N, 96°51'~96°57'E, 2817 m a.s.l.)位于青藏高原东北缘、柴达木盆地东北部(图1(a)), 是典型的高原盆地淡水湖^[4,13]。湖泊面积57.7 km², 最大水深9.6 m, 平均水深2.9 m, 水体盐度0.98 g L⁻¹, 矿化度0.64~0.79 g L⁻¹, pH 8.0^[4,14]。湖水主

要通过上游的巴勒根河和巴音河进行补给, 并通过一条小河注入托素湖(咸水湖, 图1(b))^[4,13]。可鲁克湖位置紧邻现代东亚夏季风和西风分界线西侧(图1(a)), 湖区水汽主要来自西北大陆(请参水汽来源后向轨迹分析, 图S1); 区域气候受东亚夏季风、中纬西风和局地地形综合影响(图1(a))^[4,5]。

研究区为典型的高原大陆性荒漠气候, 干旱少雨, 干湿分明。位于湖泊东北部约30 km的德令哈气象站气象资料(2928 m a.s.l.; 1956~2010)显示区域年平均温度约4℃, 年平均降水量约160 mm, 降水集中于5~9月, 占全年降水量的83.7%, 年平均潜在蒸散发可达约2000 mm, 远高于降水量(图1(c))。可鲁克湖水生植物主要包括眼子菜(*Potamogeton*)、狐尾藻(*Myriophyllum*)和金鱼藻(*Ceratophyllum*)等, 流域现代植被类型则以旱生半灌木和草本植物为主^[4,5]。植被从岸边向北部山前阶地呈地带性变化: 湖岸主要簇生芦苇(*Phragmites communis*)等沼泽植被, 稍远处主要分布荒漠草原和灌丛, 包括白刺(*Nitraria*)、赖草(*Leymus secalinus*)和针茅(*Stipa*)等, 更远处则逐渐过渡为低矮的灌丛植被, 包括藜科(*Chenopodiaceae*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、蒿属(*Artemisia*)、驼绒藜(*Ceratoides latens*)和菊科(*Asteraceae*)等^[5,13]。可鲁克湖地区自1954年起兴办了较大规模的国有农场, 西北和东北部有成片的农作物播种区, 以蔬菜、小麦、青稞和豌豆为主。巴音河是流域主要供水来源, 大量河水被引入农场和村镇, 用于工业生产、农业灌溉和人畜用水^[13]。

2 材料与方法

2.1 样品采集和年代学

2013年利用UWITEC重力取芯器(直径60 mm)在可鲁克湖西侧钻取沉积岩芯HL13-2(37°16'55.59"N, 96°52'41.64"E; 水深7 m, 岩芯长87 cm)(图1(b)), 以0.5 cm间隔分样, 共获得174个样品。2021年6月在可鲁克湖中部钻取沉积岩芯KLK21-1-2(37°16'27.47"N, 96°53'47.09"E; 岩芯长127 cm)(图1(b)和图S2(a, b)), 以1 cm间隔分样, 共获得127个样品。岩芯HL13-2和KLK21-1-2的年代模式基于¹³⁷Cs和AMS ¹⁴C测年构建, 覆盖的时间尺度分别为过去约5000年和约1600年(补充材料S1; 图S2(d, e)和表S1)^[15]。此外, 2021年6月在可鲁克湖西南岸边获取了两个深度约100 cm的湖滨剖面KLKP21-1(37°15'N, 96°51'E)和KLKP21-2(37°14'N,

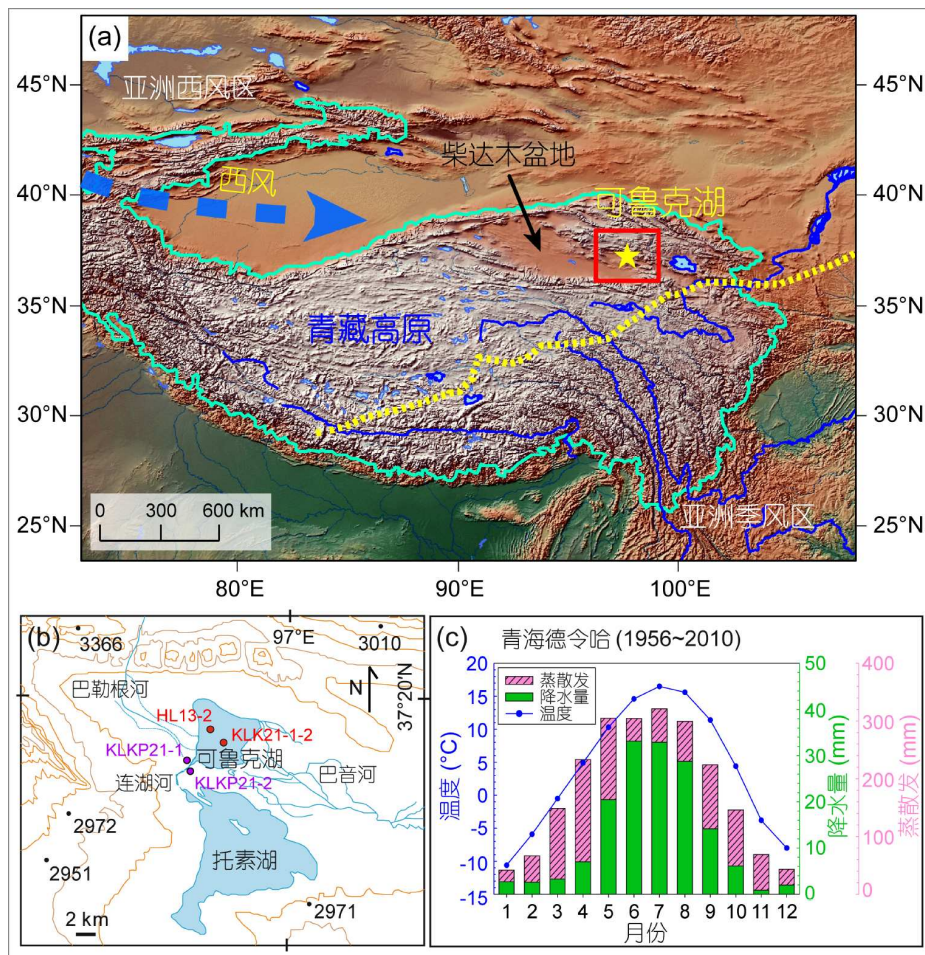


图 1 研究区位置和背景. (a) 地形图展示了可鲁克湖(黄色五角星)研究点以及周围的地理区域和特征, 黄色虚线代表现代东亚夏季季风边界, 底图来源于Natural Earth公共领域地图数据集(<https://www.naturalearthdata.com/>); (b) 可鲁克湖周边地形及水文背景, 红色和紫色圆点分别表示沉积岩芯(HL13-2和KLK21-1-2)和湖岸剖面(KLKP21-1和KLKP21-2)的位置; (c) 可鲁克湖附近的德令哈气象站记录的1956~2010年每月平均温度、降水量和蒸发量(数据来源: 中国气象数据网, <http://data.cma.cn/>)

Figure 1 Location of the study area and settings. (a) Topographic map showing the study site of Lake Hurleg (yellow star) and surrounding geographic regions and features. The yellow dashed line represents the modern East Asian summer monsoon limit. The base map was obtained from the Natural Earth public domain map dataset (<https://www.naturalearthdata.com/>); (b) topographic and hydrologic settings around Lake Hurleg. Red and purple dots denote sites of sediment cores (HL13-2 and KLK21-1-2) and lakeshore sections (KLKP21-1 and KLKP21-2), respectively; (c) monthly mean temperature, precipitation, and evaporation from 1956 to 2010 at Delingha meteorological station near the Lake Hurleg region (data source: China Meteorological Data Network, <http://data.cma.cn/>)

96°51'E)(图1(c)和图S2(c)), 并在KLKP21-1剖面的20、56、94 cm和KLKP21-2剖面的40、60、86 cm深处分别采集3个光释光(OSL)测年样品(图S2(c)). 在中国科学院地球环境研究所进行OSL测年(补充材料S1; 表S2).

2.2 代用指标、沉积物古DNA和有机分子组成分析

本文分别从可鲁克湖HL13-2和KLK21-1-2岩芯挑选沉积物样品开展多指标测定分析, 不同指标所选样品层位相同或接近, 保证年代相近并具有可对比性.

HL13-2岩芯以1 cm为间隔, 共挑选78个样品, KLK21-1-2岩芯以2 cm为间隔, 共挑选61个样品, 测定了沉积物总有机碳(TOC)、总氮(TN)、C/N比、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、总磷(TP)和生物硅(BSi)含量等地球化学-生物学指标. 这些代用指标是重建古气候和古环境历史的有效方法^[16-18]. 样品的详细前处理过程和仪器分析方法、不同代用指标的气候/环境指示意义解释详见补充材料S2~S3.

本研究从可鲁克湖HL13-2岩芯挑选43个样品开展沉积物藻类古DNA分析(表S3), 包括实时荧光定量PCR

(qPCR)和宏条形码测序; 另外选取21个样品进行植物古DNA分析(表S4和S5), 重建了过去约5000年湖泊藻类和植被演化(补充材料S4~S6). 此外, 利用碱液提取法^[17,18]提取沉积物样品有机质(表S6), 进而利用傅里叶变换离子回旋共振质谱(FT-ICR MS)测定上述样品有机分子组成. 样品前处理、仪器测定和数据分析详参补充材料S7.

3 结果与讨论

3.1 青藏高原东北近5000 cal a BP来水文气候演变

本研究利用可鲁克湖HL13-2岩芯地球化学指标(TOC、TN、C/N比和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$)重建了青藏高原东北缘约5000 cal a BP以来的水文气候变化历史(图2; 图S3). 在近5000年的长期趋势上, 这些指标的变化主要受径流强度调控, 因此可作为亚洲西风区夏季降水强度变化的可靠代用指标(补充材料S3; 图S3~S5). 该区降水在过去约5000年总体呈逐渐增加趋势(图2(c)和S3), 与亚洲西风区其他古降水记录基本一致(图2(a~h))^[1,2,5,19~21]. 例如, 可鲁克湖和大黑湖泥炭花粉蒿属(*Artemisia*)与藜科(*Chenopodiaceae*)浓度比值(A/C比)(图2(b, e)), 那仁夏泥炭花粉记录、艾比湖和托勒库勒湖花粉A/C比(图2(d, f~h))表明青藏高原东北部及新疆北部中全新世气候相对干旱, 晚全新世相对湿润^[1,2,5,19,20]. 中亚北部湿度指数也表明该区自约5000 cal a BP以来呈长期变湿润趋势(图2(a))^[21]. 因此, 可鲁克湖多指标指示的5000 cal a BP以来降水持续增加的长期趋势, 与西风区晚全新世湿度增加的区域演化模式基本一致, 进一步证实了多指标变化趋势的气候驱动本质, 并非局地生态或沉积环境变化造成的表观信号(补充材料S3). 与之相反, 北半球太阳辐射、大气 ^{14}C 和温度记录(图3(a~d))^[21~24]在过去5000年呈明显降低趋势, 表明亚洲西风区自中全新世以来存在水热分异, 为“冷湿-暖干”的水文气候模式^[1,25,26], 与典型东亚季风区水热同步演化的“冷干-暖湿”气候模式相反, 在百年-千年尺度上呈反相位/错相位变化^[4,5].

亚洲西风区水文气候变化主要受太阳辐射强度及其调控的西风带强度/位置变化的共同影响^[1,25~27]. 中纬度地区冬季太阳辐射自中全新世以来逐渐增强, 导致冬季辐射梯度逐渐增大^[27]. 北半球夏季太阳辐射减弱, 逐渐变冷(图3(a~c)), 导致中纬度经向温度梯度增大, 西风环流增强并系统性偏南, 西风区接收的水汽增

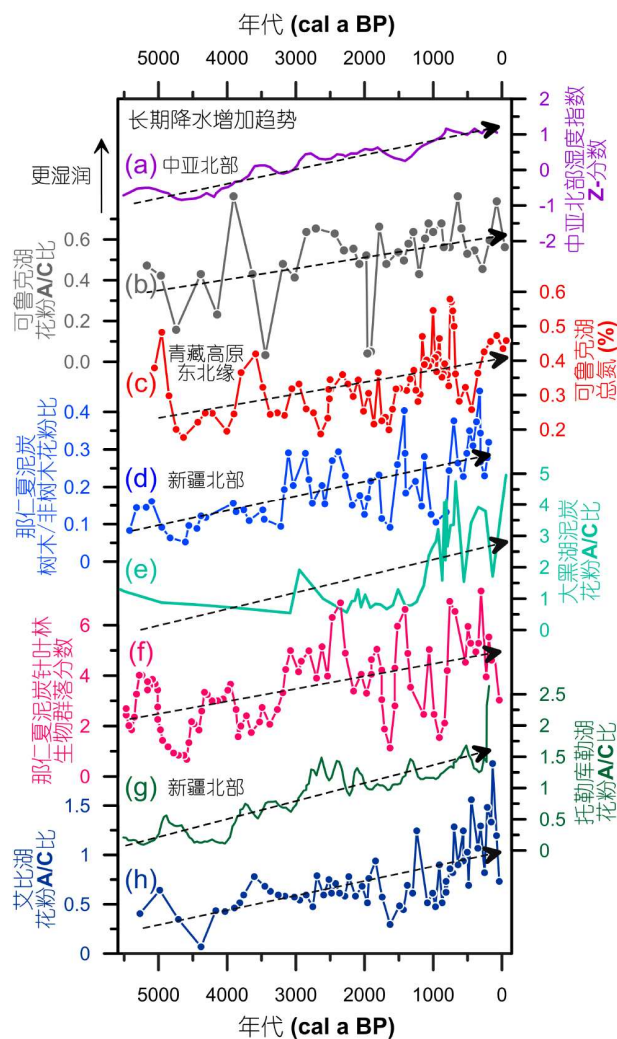


图2 过去约5000年西风区长期降水增加趋势. (a) 中亚北部平均湿度指数^[21]; (b) 可鲁克湖花粉A/C比^[5]; (c) 可鲁克湖HL13-2岩芯总氮(本研究); (d) 那仁夏泥炭树木/非树木花粉比^[2]; (e) 大黑湖泥炭花粉A/C比^[1]; (f) 那仁夏泥炭针叶林生物群落分数^[2]; (g) 托勒库勒湖花粉A/C比^[19]; (h) 艾比湖花粉A/C比^[20]

Figure 2 Long-term increasing precipitation trend in the Westerlies domain over the past ~5000 years. (a) The mean moisture index for northern Central Asia (NCA)^[21]; (b) pollen A/C ratio in Lake Hurleg^[5]; (c) TN in core HL13-2 from Lake Hurleg (this study); (d) Narenxia Peat arboreal/nonarboreal pollen (AP/NAP) ratio^[2]; (e) Big Black Peatland pollen A/C ratio^[1]; (f) Narenxia Peat taiga biome score^[2]; (g) Lake Tuolekule pollen A/C ratio^[19]; (h) Lake Aibi pollen A/C ratio^[20]

加, 使得更多水汽输送至青藏高原东北部, 引起区域降水量增加; 加之亚洲西风区上风方向蒸发加剧, 共同促进了晚全新世水汽输送的增加^[1,27]. 此外, 中亚北部晚全新世的低温(图3(d))^[21]有利于降低地表蒸发量, 进而促进该区湿度增加(图2(a~h))^[21,27]. 亚洲西风区中晚全新世以来在长期降水增加趋势上叠加了多次百年至千

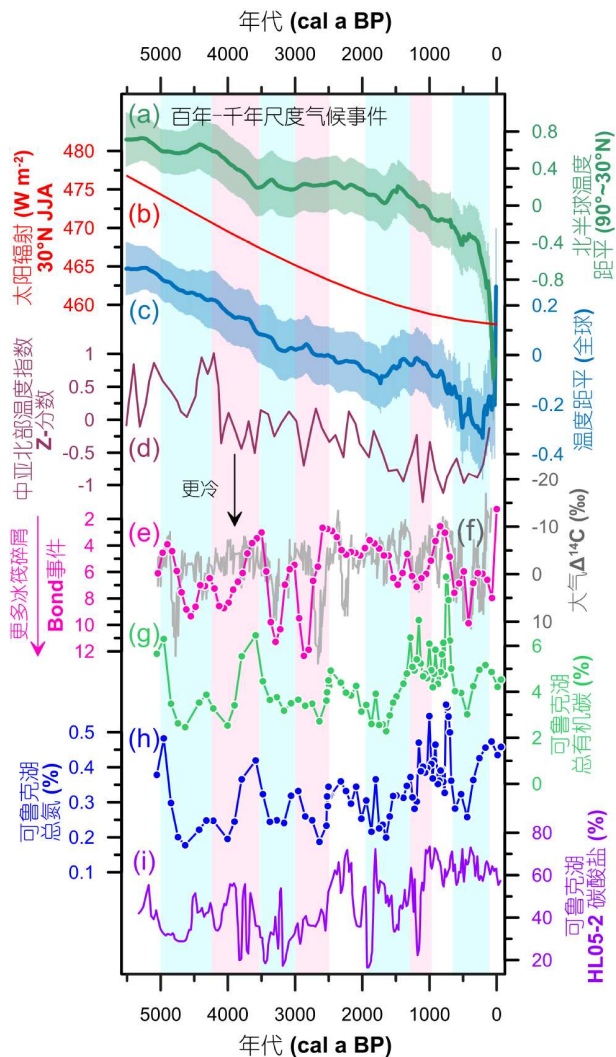


图 3 过去约5000年西风区长期降水增加趋势上叠加的百年-千年尺度气候事件。(a) 北半球90°~30°N温度距平^[22]；(b) 30°N夏季太阳辐射^[24]；(c) 全球温度距平^[22]；(d) 中亚北部平均温度指数^[21]；(e) Bond事件^[28]；(f) 大气 $\Delta^{14}\text{C}$ 记录^[23]；(g) 可鲁克湖HL13-2岩芯总有机碳(本研究)；(h) 可鲁克湖HL13-2岩芯总氮(本研究)；(i) 可鲁克湖HL05-2岩芯碳酸盐含量^[29]。蓝色和粉色条形分别代表两次连续的突然变冷事件。Figure 3 Centennial- to millennial scale climatic events superimposed on the long-term increasing precipitation trend in the Westerlies domain over the past ~5000 years. (a) Northern Hemisphere (NH) temperature anomaly at 90°-30°N^[22]; (b) summer (JJA) insolation at 30°N^[24]; (c) global temperature anomaly^[22]; (d) the mean temperature index for NCA^[21]; (e) Bond events^[28]; (f) $\Delta^{14}\text{C}$ residual variations^[23]; (g) TOC in core HL13-2 from Lake Hurleg (this study); (h) TN in core HL13-2 from Lake Hurleg (this study); (i) carbonate contents (%) in core HL05-2 from Lake Hurleg^[29]. Blue and pink columns represent two continuous abrupt cold events, respectively

年尺度气候波动事件(图3), 与同期太阳活动和北大西洋冰筏碎屑事件(即Bond事件)有良好对应关系(图3(e-i))(补充材料S3)^[28,29]。这些突发性冷干气候事件通

过改变区域水热与生态条件, 成为影响我国史前文化兴衰及古代王朝更替的重要外部驱动因素(补充材料S3)^[16,30]。

3.2 青藏高原东北近5000 cal a BP来生态演化

青藏高原气候变化常伴随湖泊生产力、藻类群落结构(物种组成和多样性)、植被多样性以及景观格局的显著改变^[4,5,31,32]。本文利用HL13-2岩芯多种地球化学-生物学代用指标、古DNA分析重建了约5000 cal a BP以来可鲁克湖藻类群落及流域植被的演变历史(图4和图5; 图S6~S8)。沉积物古DNA分析揭示了包括蓝细菌和真核藻类在内的多种常见的湖泊浮游植物群落(图S6(a, b))。其中蓝细菌以聚球藻(*Synechococcales*)为主(图S6(a)), 真核藻类主要包括硅藻(*Bacillariophyta*)、绿藻(*Chlorophyta*)、金藻(*Chrysophyta*)和红藻(*Rhodophyta*)(图S6(b))。这些浮游植物在青藏高原其他全新世尺度湖泊沉积物古DNA研究中均有过报道^[31,32]。

研究发现约5000 cal a BP以来在区域降水长期增加背景下(图2(a~h)), 可鲁克湖水生生态系统并未表现出明显的改善趋势(图4(c, f~j))。即湖泊内部蓝细菌生物量(蓝细菌16S rRNA-ITS基因拷贝数)和BSi含量表征的初级生产力及藻类生物多样性未随降水增加出现明显升高趋势(图4(c, f~j)), 而主要在百年-千年尺度上响应了北大西洋Bond事件和中亚北部温度的波动(图4(a, b)), 湖泊养分含量(TP)却呈现出明显的增加趋势(图4(d))。这一现象可能与研究区中-晚全新世“冷-湿”气候模态密切相关。虽然长期降水增加促进了流域营养盐输入, 但同期温度整体降低(图3(a~d))^[21,22,24]对高原湖泊藻类生长和初级生产力形成了显著限制, 使得湖泊生态系统在长期尺度上(约5000 cal a BP以来)并未表现出随降水增加而显著改善的趋势。与之相对, 百年-千年尺度的相对温暖阶段则可有效解除低温限制, 更有利于湖泊生态系统发育。这表明研究区降水的长期增加趋势控制了可鲁克湖营养盐的输入, 但是在百年-千年尺度的气候事件上, 温暖的气候更有利于高原淡水湖泊生态系统的繁盛和初级生产力的升高。值得一提的是, 淡水可鲁克湖与咸水托素湖(图1(b))水环境条件迥异^[4,5,14], 导致两湖藻类/微生物群落组成、优势类群及多样性存在显著分异(补充材料S6)^[14], 盐度、电导率、营养盐可能是调控浮游植物群落差异的关键驱动因素(补充材料S6)^[14,33~35]。

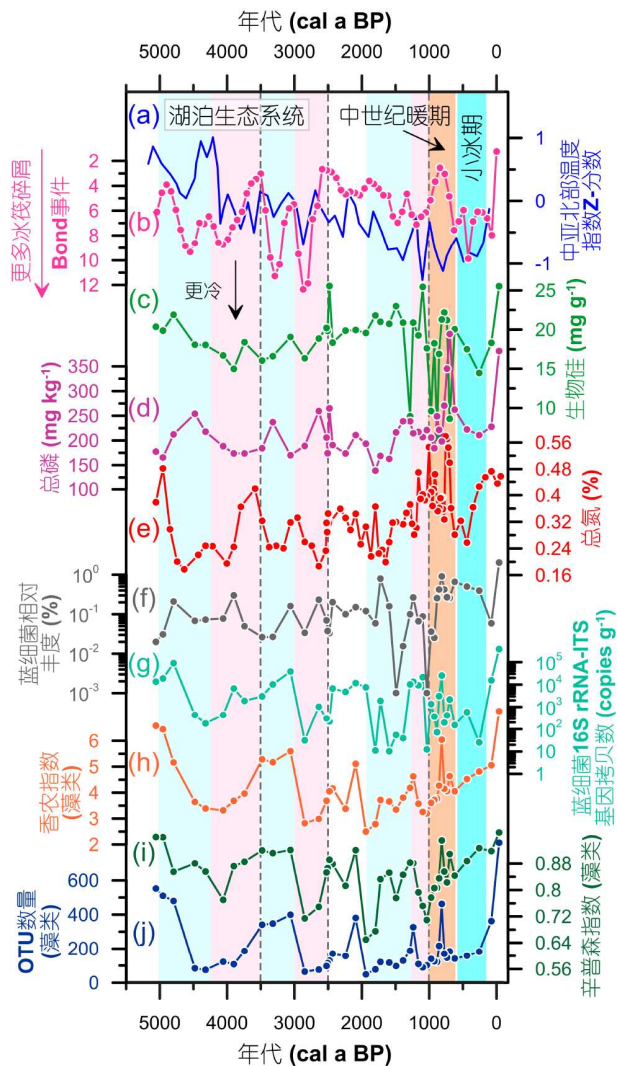


图4 过去约5000年气候事件与可鲁克湖HL13-2岩芯代用指标和藻类古DNA记录对比。(a) 中亚北部平均温度指数^[21]；(b) Bond事件^[28]；(c) 生物硅；(d) 总磷；(e) 总氮；(f) 蓝细菌相对丰度；(g) 蓝细菌16S rRNA-ITS基因拷贝数；(h) 藻类香农指数；(i) 藻类辛普森指数；(j) 藻类OTU数量。蓝色与粉色条形与图3一致。橙色和青色条形分别代表中世纪暖期和小冰期。黑色虚线代表人类活动在~3500、~2500和~1000 cal a BP逐渐增强的三个阶段

Figure 4 Comparison between climate events, proxy indices and algal DNA records in core HL13-2 of Lake Hurler over the past ~5000 years. (a) The mean temperature index for NCA^[21]; (b) Bond events^[28]; (c) BSi content; (d) total phosphorus; (e) TN; (f) relative abundance of cyanobacteria; (g) the copy numbers of cyanobacterial 16S rRNA-ITS gene; (h) algal Shannon index; (i) algal Simpson index; (j) algal observed OTUs. Blue and pink columns are indicated as in Figure 3. Orange and cyan columns indicate the Medieval Warm Period and the Little Ice Age, respectively. Black dashed lines indicate the three stages of gradually intensifying human activities at ~3500, ~2500 and ~1000 cal a BP

研究发现在约5000~3000 cal a BP期间, 蓝细菌在浮游植物群落中所占比例较低(仅为6.9%), 而约

3000 cal a BP以后其丰度逐渐增加, 尤其是近1000年, 蓝细菌(以聚球藻属(*Synechococcus*)为主)占比超过65%, 真核藻类逐渐失去优势地位(图S6(a~e)). 此外, 约3000 cal a BP以后, 蓝细菌相对丰度同样呈现较明显的升高趋势(图4(f)), 表明蓝细菌在整个藻类群落中所占百分比逐渐增加。蓝细菌具有独特的生态生理适应能力, 如浮力调节、快速生长速率和适应弱光的环境条件, 相比于真核浮游植物在竞争光照和养分方面更具优势^[36,37]。因此, 导致这一现象的一个可能的原因是伴随晚全新世降水增加和湖泊营养盐输入增多(图2(a~h)和4(d)), 蓝细菌通过养分的竞争优势得以快速繁殖(图S6(a~e)). 尤其是聚球藻, 是遵循“r-策略”、生长迅速的微型蓝细菌, 对营养波动非常敏感, 在养分富集条件下通常可以快速大量增殖^[36,38]。此外, 气候变化可能会对浮游植物群落的代谢途径产生直接和/或间接影响^[37,38]。在过去约5000年不同种类浮游植物的“此消彼长”过程中, 其群落结构和多样性发生了显著改变。结果显示浮游植物群落平均 α 多样性从中全新世到晚全新世出现轻微降低(图S7(a~c)). 很可能是在区域湿度条件改善背景下(图2(a~h)), 内生营养盐的同步释放与外源营养盐输入增加共同促进了聚球藻的大量繁殖和真核藻类的衰退, 进而导致晚全新世浮游植物群落 α 多样性的整体降低。基于Bray-Curtis相似性系数的排序分析揭示了其群落组成的演替规律: 中全新世和晚全新世样品在群落结构上存在显著差异(图S6(f)和图S7(d~g)). 冗余分析揭示降水和养分含量(TP、TOC和TN)是晚全新世浮游植物群落的主要解释变量(图S6(g)), 进一步表明降水增加和营养盐输入增多共同作用导致可鲁克湖晚全新世浮游植物群落结构发生显著改变。

需要指出的是, 蓝细菌基因拷贝数(图4(g))与相对丰度(图4(f))曲线存在差异, 前者对整体环境生产力约束更敏感, 后者更易响应群落竞争与生态位分化(补充材料S6)。晚全新世(尤其是1000 cal a BP以来)青藏高原东北部人类活动增强(见下文)可能与气候变化协同作用, 驱动湖泊初级生产力升高和浮游植物群落结构转变(补充材料S6)。然而, 本研究尚不能有效量化二者的相对贡献率, 有待在未来的研究中进一步探究。

基于植物古DNA记录, 可鲁克湖流域自约5000 cal a BP以来的植被景观演变大致可分为以下3个阶段(图S8): 阶段 I (约5000~3000 cal a BP): 仅有部分禾本科和木本植物出现, 其他大部分植被均未检测到其有效DNA序列, 指示该时期气候干旱, 流域仅零星

分布着一些耐旱植物(如白茅属(*Imperata*)),为干旱荒漠景观;阶段Ⅱ(约3000~1000 cal a BP):水生植物、禾本科、草本和木本植物明显增多,指示该时期降水增加,流域逐渐变湿润;阶段Ⅲ(约1000 cal a BP以来):禾本科、草本和木本植物进一步大量繁殖,指示流域植被显著恢复。尽管古DNA和孢粉分析重建的植被生态演化细节存在一定差异,本研究的沉积物古DNA植物记录与可鲁克湖已报道的孢粉学结果基本一致(补充材料S6)^[5]。这些孢粉和古DNA数据表明中全新世研究区植被为稀疏的荒漠,而晚全新世则转变为相对湿润的荒漠草原景观(图S8)^[1,5]。这种一致性证实孢粉记录所揭示的大尺度植被格局同样可通过沉积物古DNA进行重建。西风区中全新世湖滨荒漠景观(图S8)^[1,5]与流域树木孢粉结果的对立^[7,39]很可能是该时期强烈的太阳辐射引起温度升高,促使树木向流域边缘高山间移动,最终导致湖滨区域变得干旱。相比之下,中纬度亚洲季风区的植被变化模式与西风区存在较大差异,在千年尺度上呈现“反相位”演变关系。例如,中国华北地区全新世中期有效湿度的增加促进了落叶-针叶混交林的扩张并形成顶级群落^[9],约3000~2800 cal a BP气候逐渐变冷变干,树木比例开始下降^[9]。晚全新世该区植被景观演变为草原-草甸镶嵌格局^[9]。总体而言,这些结果表明中-晚全新世植被群落对亚洲中纬西风区和季风区反相位水文气候格局的响应存在显著差异。

测序数据显示约5000~500 cal a BP期间可鲁克湖植被 α 多样性(包括香农指数、辛普森指数、Chao1指数和植物物种数)呈明显上升趋势(图5(a, b, i, j)),与研究区降水的长期增加趋势相吻合,表明西北干旱半干旱地区的流域植被发育主要受降水/湿度变化的影响^[1,4,5]。尽管植物古DNA的取样/年代分辨率相比于浮游植物较低(图5(a, b, i, j)),但是植被 α 多样性变化总体上仍大致响应了北大西洋Bond事件和中亚北部温度在百年-千年尺度上的波动(图4和5),表明温暖的环境条件同样有利于陆地植被生态系统的发育。值得注意的是,植被多样性变化相比于浮游植物存在数百年滞后(图5(i-k)),一个重要的原因是湖泊藻类/微生物对环境变化非常敏感^[36-38],通常能够在短时间内快速响应气候波动的影响,而陆地生态系统的反应相对较慢。这种植被生态系统对降水/温度变化的滞后响应现象在东亚夏季风区域同样存在^[40],其可能机制包括植被对冬季增温的响应^[27]以及与土壤水分的反馈作用^[40]。尽管植物古DNA样品量较少,时间分辨率较低,但本研究中

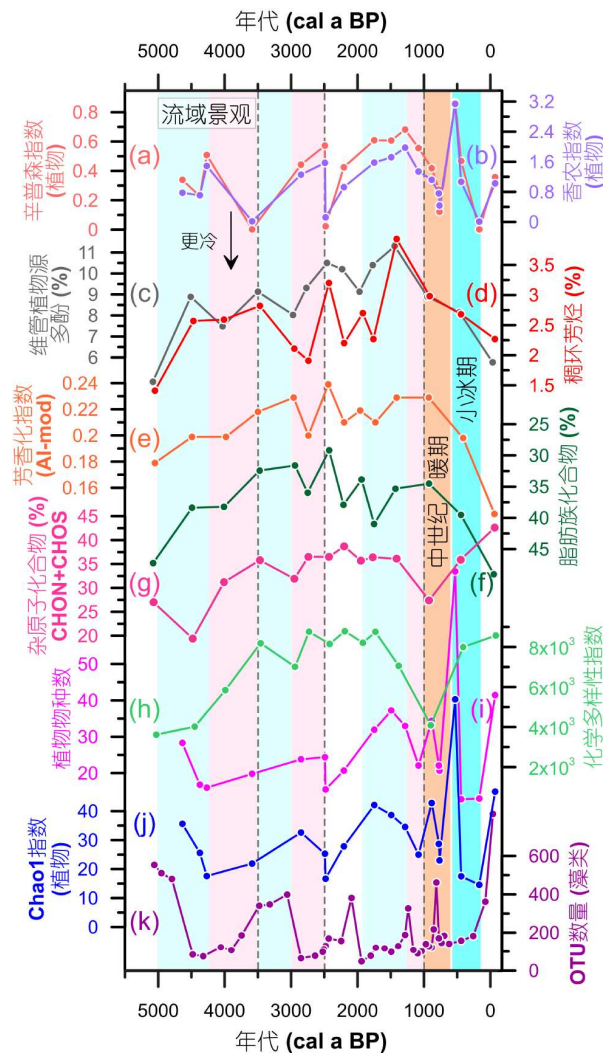


图5 过去约5000年可鲁克湖HL13-2岩芯植物DNA和有机分子组成记录。(a) 植被辛普森指数; (b) 植被香农指数; (c) 维管植物源多酚化合物(VPPC)相对丰度; (d) 稠环芳烃相对丰度; (e) 芳香化指数(AI-mod); (f) 脂肪族化合物相对丰度; (g) 杂原子化合物(CHON和CHOS)相对丰度; (h) 有机分子组成化学多样性指数; (i) 植物物种数; (j) 植被Chao1指数; (k) 藻类OTU数量。条形和虚线与图4一致

Figure 5 Comparison between plant DNA and SOM molecular composition records in core HL13-2 of Lake Hurleg over the past ~5000 years. (a) Plant Simpson index; (b) plant shannon index; (c) relative abundance of vascular plant-derived polyphenols compounds (VPPC); (d) relative abundance of condensed aromatics; (e) modified aromaticity index (AI-mod); (f) relative abundance of aliphatic compounds; (g) relative abundance of heteroatomic compounds (CHON and CHOS); (h) chemodiversity index of SOM molecular compositions; (i) number of plant species; (j) plant Chao1 index; (k) algal observed OTUs. The columns and dashed lines are indicated as in Figure 4

植物DNA样品主要基于地球化学指标界定的关键气候转型节点进行的针对性采样,旨在捕捉气候突变事件中植被生态系统的更迭过程,采样点能够较好刻画植

被多样性的整体变化趋势。伴随区域湿度条件的改善,约500 cal a BP以后可鲁克湖植被多样性指数反而快速减小(图5(a, b, i, j)),如果考虑到植被的滞后响应,其多样性可能在约1000 cal a BP就已开始降低。导致植被生态系统与气候变化的耦合性降低、明显偏离自然演化模式,很可能与区域人类活动干扰的增强有关(见下文)。

综合气候-生态耦合关系与多指标协同变化特征,研究区生态系统在约3000 cal a BP之前总体遵循自然气候驱动的演化模式,植被与湖泊生态对降水、温度变化表现出良好的协同响应。约3000 cal a BP以后,流域内开始出现人类活动信号,生态系统自然演化格局(如藻类群落结构)开始受到微弱但持续的人为扰动影响。约1000 cal a BP以后,区域人类活动进一步增强,可能导致湖泊/流域生态系统明显偏离自然气候驱动的演化路径。

3.3 人类活动增强导致青藏高原东北晚全新世气候-生态系统耦合性减弱

气候并非影响青藏高原东北缘生态系统变化的唯一因素,当地人类活动对景观和植被动态同样具有重要影响^[10,12,41,42]。越来越多的证据表明,现代生态系统的形成是长期人-地相互作用的结果^[43,44],其中人类土地利用是景观转型和生态系统变化的主要驱动因素之一^[43-45]。这些人类土地利用方式的转变反过来也可能受到生态、文化和气候变化的驱动^[43,44],因此有必要从多学科视角对长期生物与非生物记录进行综合分析。流域植被与湖泊生态系统的长期演变,不仅体现在生物群落结构的更替上,也会在沉积物有机质分子组成层面留下清晰记录^[17,18]。为进一步从有机地球化学角度揭示流域景观演变与人类活动强度变化,本文基于沉积物有机质分子组成特征开展了综合分析。

结果显示约5000~1400 cal a BP外源有机质(包括维管植物源多酚、高度不饱和酚及稠环芳烃)的相对丰度呈逐渐增加趋势(图5(c, d); 图S9),可能表明该时期湿润的气候条件促进了陆地植被的扩张^[18],与植物DNA结果基本一致。约1400~1000 cal a BP之后,维管植物源多酚、高度不饱和酚和稠环芳烃的相对丰度逐渐降低,而内源有机质(包括脂类、蛋白质和碳水化合物)的相对丰度则逐渐升高(图5(f); 图S9)。这一变化表明湖泊生产力升高、土壤发育以及流域植被景观转变(林地面积减少),可能与该时期增强的人类土地利用有

关(补充材料S7)^[18]。在区域变湿润的长期趋势上(图2(a~h)),外源有机分子(如维管植物源多酚和稠环芳烃)在约2500~1700 cal a BP显著降低(图5(c, d)),很可能是人为土地利用变化导致的植被景观破碎化,进而导致陆源植物源有机质输入减少(补充材料S7)^[17,18]。约1700~1400 cal a BP外源有机分子的短暂增加(图5(c, d))可能是区域降水增多导致流域植被盖度增加和人类活动阶段性减弱综合作用的结果(图6),也是气候-生态系统-人类活动相互作用的表现。之前的研究同样表明,与林地为主的流域相比,受农业活动影响的流域中外来有机质(包括高度不饱和酚、维管植物源多酚和稠环芳烃)的相对丰度较低^[46],这支持了人类土地利用在重塑景观格局中的重要作用。如前文所述,本文的植物古DNA记录进一步验证了这一结论。过去约1000年,可鲁克湖植被多样性(包括辛普森指数、香农指数、Chao1指数及植物物种数; 图5(a, b, i, j))整体呈显著下降趋势,与藻类多样性(包括辛普森指数、香农指数及藻类OTU数量; 图4(h~j))及区域降水量的增加趋势相悖,偏离了其自然气候驱动下的演化模式(图4和5)。此外,可鲁克湖营养盐含量增加和流域植被覆盖度下降的趋势与中国人口数量的快速增长基本同步(图4和5)^[47]。因此,基于多指标变化综合分析,本研究认为晚全新世以来增强的区域人类活动可能是可鲁克湖营养水平增加和流域景观格局转变的重要驱动因素(图4~6)。

对可鲁克湖沉积物有机质分子组成的主成分分析显示,不同时期样本存在明显分异(图S10(a)),与区域人类活动强度的变化具有良好的时间一致性。约3500 cal a BP以后独特有机分子(H/C<1.5)、化学多样性指数及杂原子CHONS化合物比例均明显升高(图S9(h, i); S10(b, c)),表明这些化合物可能主要来源于流域输入而非湖泊内源初级生产。流域畜牧业发展产生的牲畜粪便可能为湖泊提供了丰富的有机氮补给,进而导致有机分子化学多样性和杂原子比例的增加。这一特征与受农业源、畜禽粪便和生活污水影响的河流及湖泊有机分子组成特征高度相似^[18,46]。最近,有研究发现青藏高原人类农业活动增强间接增加了含氮有机质从深层土壤向河流的淋滤^[51],进一步支持了上述推论。此外,炭屑/黑碳浓度及烟炱通量分析显示,青藏高原东北部自约3600 cal a BP以来(特别是过去约1000年)存在异常高频的用火事件(图S11(b, d)),可能与增强的畜牧和农业活动有关^[12,52]。进一步对比发现3500~1000 cal a BP用火活动为相对较弱阶段,此时植

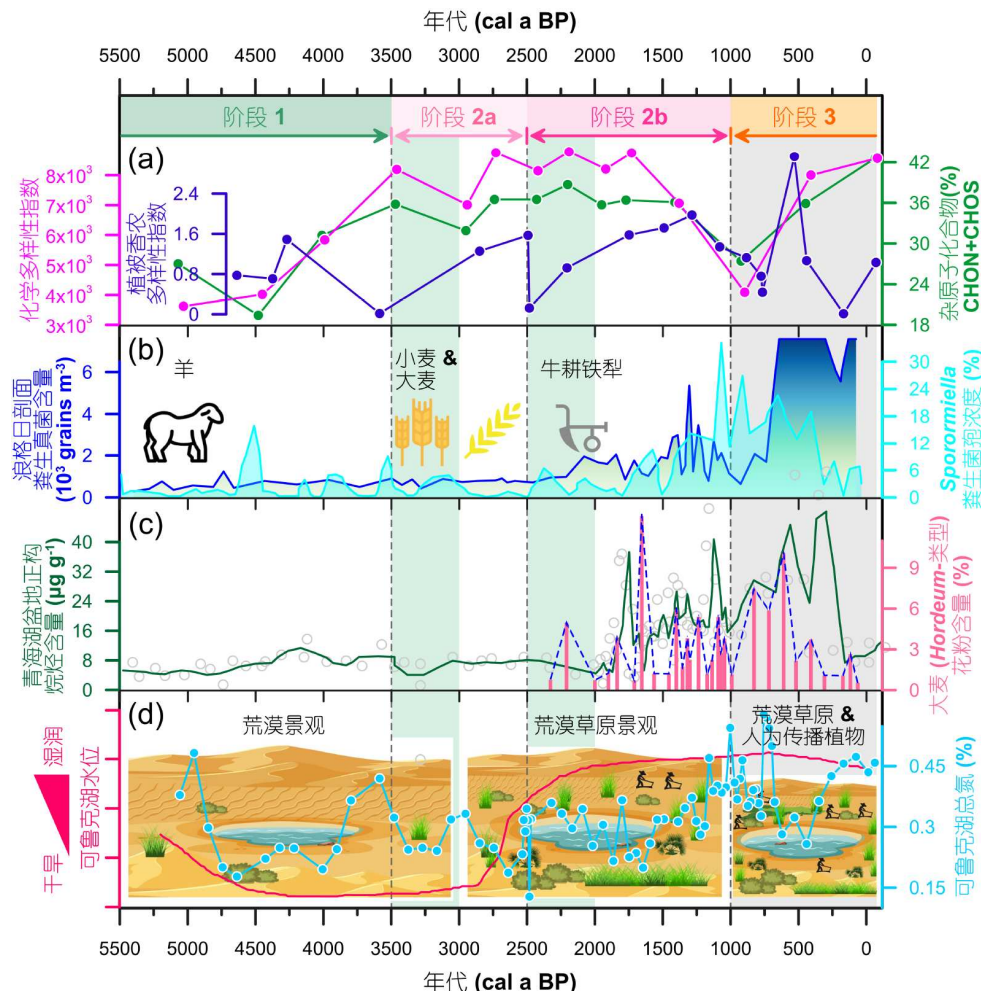


图6 青藏高原东北气候变化、植被景观格局以及人类活动的关系。(a) 可鲁克湖有机分子组成化学多样性指数(粉线)、杂原子化合物(CHON+CHOS)相对丰度(绿线)和植被香农多样性指数(蓝线)(本研究); (b) 青海湖盆地浪格日剖面粪生真菌含量(蓝线)^[10]和更尕海小英孢腔菌(*Sporormiella*)百分含量(青色曲线)^[11]; (c) 青海湖盆地正烷烃含量(绿线)^[48]和大麦属(*Hordeum*-type)花粉百分含量(粉色柱形)^[49]; (d) 可鲁克湖流域不同时期当地植被景观格局示意图。图标从<https://www.iconfont.cn/>和<https://www.vecteezy.com/>获取。红色和天蓝色曲线分别代表可鲁克湖水位^[50]和HL13-2岩芯TN含量(本研究)。绿色条形分别代表人类活动对生态系统显著影响的开始(约3500~3000 cal a BP)和进一步增强时期(约2500~2000 cal a BP), 灰色条形表示近千年人类活动快速加剧时期(约1000 cal a BP以来)

Figure 6 Relationships between climate variability, vegetation landscape pattern, and human activities on the northeastern Tibetan Plateau (NE-TP). (a) Chemodiversity index of SOM molecular composition (pink line), relative abundance of heteroatomic compounds (CHON+CHOS) (green line) and plant Shannon diversity index (blue line) in Lake Hurleg, respectively (this study); (b) the concentration of coprophilous fungi in Langgeri section, Lake Qinghai basin (blue line)^[10] and Lake Genggahai *Sporormiella* fungal spores percentage (cyan line)^[11]; (c) Lake Qinghai basin *n*-alkanes concentration (green line)^[48] and *Hordeum*-type pollen percentage (pink bar)^[49]; (d) diagram of local vegetation landscape patterns in different periods around Lake Hurleg. The icons are obtained from <https://www.iconfont.cn/> and <https://www.vecteezy.com/>. Red and sky-blue lines are water-level of Lake Hurleg^[50] and TN content in core HL13-2 of Lake Hurleg (this study), respectively. The two green columns represent the onset of significant human impact on the ecosystem (~3500–3000 cal a BP) and the period of its further intensification (~2500–2000 cal a BP), respectively. Gray column denotes the period of rapid intensification of human activities over the last millennium (~1000 cal a BP to present)

被多样性呈较明显升高趋势, 约1000 cal a BP火强度显著增强, 植被多样性则快速降低(图6(a); S11(b, d)). 这一对应关系也表明该区高频用火事件可能主要与人为焚烧、农牧活动增强密切相关, 而非干旱化加剧或生物量增加时的自然火主导。该时期农牧活动增强期与多个指标变化高度吻合, 包括更尕海狼毒花粉百分比

(放牧引起草地退化的代用指标)(图S11(c))^[41]、中国人口扩张趋势(图S11(d))^[47]、浪格日剖面粪生真菌浓度^[10]和更尕海*Sporormiella*(一种粪生真菌孢子)百分含量(图6(b))^[11]以及青海湖流域正烷烃浓度和大麦型(*Hordeum*-type)花粉含量(图6(c))^[48,49]。在此之后, 沉积物杂原子化合物相对丰度和化学多样性指数保持相对

稳定(图6(a)). 因此, 这些有机分子证据表明可鲁克湖地区在约3500~3000 cal a BP早期人类活动就已达到较高强度水平, 开始在湖泊沉积物中留下清晰指纹, 改变了湖泊沉积物有机分子的组成模式. 考古学研究也表明约3600 cal a BP以后跨欧亚大陆文化交流促使新型农牧生产方式(利用耐寒作物和牲畜)出现, 导致青藏高原东北部人口逐渐向海拔约2500~3000 m以上的区域迁徙和定居(图6(b))^[10], 该时期可鲁克湖周边地区考古遗址数量明显增多^[42], 人类活动可能在流域生态格局转变中起重要作用. 需要说明的是, 粪生菌孢、放牧引起的草地退化等指标和考古记录是指示人类活动历史和强度的独立、直接证据, 而炭屑、营养盐输入和分子组成复杂度变化可能会受到气候湿度和植被生物量变化的影响^[17,18], 因此可视为区分自然气候驱动和人类活动的间接佐证.

约3500~2500 cal a BP期间维管植物源多酚和高度不饱和酚等外源有机质增加趋势减缓, 并且从约2500 cal a BP开始外源和内源有机分子含量发生方向性反转, 芳香化指数逐渐降低, 而内源脂肪族化合物逐渐增多(图5(e, f)). 约1400~1000 cal a BP以后脂肪族化合物快速增加, 维管植物源多酚等外源有机分子含量快速降低(图5(c~f)), 表明约2500 cal a BP以后人为干扰水平再次升高, 约1000 cal a BP以后人类活动进一步增强(图6). 晚全新世湿度增加导致可鲁克湖扩张, 为人类提供了更充足的水资源和食物来源(图6(d)), 从而创造了更适宜的生存环境. 该时期有机分子组成化学多样性指数再次升高(图6(a))可能表明增强的人类活动对有机分子组成的改造作用(补充材料S7). 本研究发现沉积物有机分子组成特征(化学多样性指数和CHON化合物的相对丰度)与耕地/牧场面积及粪生真菌浓度显著正相关(图S10(d)), 可能暗示流域人类活动增强导致了可鲁克湖有机分子组成变化.

进一步分析发现可鲁克湖单个有机分子化合物同样与耕地/牧场面积显著正相关(图S10(e)). 这些分子中大部分是高度不饱和酚类(>70%), 其次是维管植物源多酚和脂肪族化合物; 从元素组成上看, 大部分是CHO化合物, 其次为CHON和CHOS化合物. 因此, 这些有机分子主要是高O/C比的芳香化合物, 在流域内广泛存在, 表明晚全新世人类活动的增强(特别是约1400~1000 cal a BP以来)显著改变了有机分子的组成模式. 低O/C比(<0.5)的高度不饱和酚类和脂肪族化合物与耕地/牧场面积的正相关表明流域农牧业扩张促进

了脂肪族化合物在沉积物中的富集, 与亚马逊流域的研究结果一致^[46]. 此外, 通过对相关系数进行排序, 本研究进一步筛选出与耕地/牧场相关性较高($r>0.75$)的3类有机化合物, 分别为 $C_{16}H_{22}O_5$ (H/C=1.4, O/C=0.3; 芳香化指数(AI-mod)=0.3)、 $C_{12}H_{22}O_3$ (H/C=1.8, O/C=0.25; AI-mod=0.1)和 $C_9H_{10}O_5N_2$ (H/C=1.1, O/C=0.5; AI-mod=0.6)(图S10(f)). 其中 $C_{16}H_{22}O_5$ 和 $C_{12}H_{22}O_3$ 为脂肪族化合物, $C_9H_{10}O_5N_2$ 具有大量芳香环结构, 为芳香族化合物. 已有研究表明芳香族分子化合物在环境中的稳定性较高, 周转时间可达上万年^[53]. 因此, 湖泊沉积物有机分子中的 $C_9H_{10}O_5N_2$ 可能是表征流域人类农牧活动的潜在分子示踪指标.

综上, 可鲁克湖有机分子组成及区域记录对比分析表明青藏高原东北缘人类活动在约3500~3000 cal a BP开始影响流域景观动态和生态系统状态, 约2500 cal a BP进一步增强, 并在约1400~1000 cal a BP以后快速加剧(图5和6). 本文基于多指标综合分析进一步构建了耦合度偏离系数(D)作为定量指标, 评估研究区气候-生态耦合关系的转变(补充材料S8, 表S7). 结果显示1000 cal a BP以后气候-生态系统耦合性明显减弱, 表明增强的人类活动导致研究区生态演化明显偏离了自然气候驱动的演化模式(补充材料S8). 此外, 青藏高原东北气候背景的复杂性(图1)和人类活动的时空分化格局(图6和S11; 补充材料S8)^[3,10,48,49,54,55]预示在未来全球变化和人类活动持续增强背景下, 该区气候-生态系统耦合关系可能出现更复杂的时空差异.

4 结论

本文利用可鲁克湖多指标序列(包括地球化学代用指标、沉积物古DNA和有机分子组成)及汇编记录综合分析, 揭示了青藏高原东北缘中-晚全新世(约5000 cal a BP)以来水文气候变化、湖泊藻类、流域植被和景观格局演变及其气候响应, 以及晚全新世人类活动介导下高原气候-生态耦合关系转变历史及机制. 研究区降水自约5000 cal a BP以来呈长期增加趋势, 与亚洲夏季风降水趋势反相/错相位. 在此长期湿润趋势上叠加了显著的百年-千年尺度气候变冷事件, 可能与太阳活动和北大西洋冰筏碎屑事件有关. 受气候变湿润影响, 研究区晚全新世植被逐渐恢复, 形成了相对湿润的荒漠草原景观, 与亚洲季风区植被格局演变趋势相反. 在百年-千年尺度气候事件上, 湖泊浮游植物生物量及生物多样性总体上响应了Bond

事件及中亚北部温度波动,表明温暖气候有利于湖泊生态系统繁盛和流域植被生长。可鲁克湖流域人为干扰在约3500~3000 cal a BP就已达到一定强度水平,该时期外源有机分子、杂原子化合物及有机分子组成化学多样性明显升高,在湖泊沉积物中已留下清晰指纹。约3000 cal a BP以后人为营养盐输入可能与降水增加共同导致了水体初级生产力升高和藻类群落结构改变。约2500~2000 cal a BP以来持续增强的人类活动导致流域人为养分输入增加和脂肪族化合物相对丰度升高,而维管植物源多酚等外源有机分子显著减少,可能暗示进一步增强的人类活动改变了流域的自

然景观。约1000 cal a BP以后总体植物多样性和外源有机分子相对丰度快速降低,但藻类多样性增加,与区域其他记录呈同步变化趋势,可能表明进一步增强的人类活动导致流域植被生态系统退化,气候-生态耦合关系明显减弱,但同时也增加了湖泊营养盐输入,提高了湖泊初级生产力及生物多样性。如果上述藻类群落结构/植被景观动态持续发展,该区生态系统演变趋势或将进一步偏离自然气候主导的响应模式。在未来全球变化和人为干扰进一步加剧情景下,青藏高原可能会出现更复杂的、不同时空尺度上的气候-生态耦合关系转变。

致谢 感谢天津大学地球系统科学学院王宝利教授和杨美玲副教授在DNA实验和数据分析方面给予的指导。感谢三位匿名审稿专家提出的建设性意见和建议。

参考文献

- Xu H, Zhou K, Lan J, et al. Arid Central Asia saw mid-Holocene drought. *Geology*, 2019, 47: 255–258
- Feng Z, Sun A, Abdusalih N, et al. Vegetation changes and associated climatic changes in the southern Altai Mountains within China during the Holocene. *Holocene*, 2016, 27: 683–693
- Yang B, Qin C, Bräuning A, et al. Long-term decrease in Asian monsoon rainfall and abrupt climate change events over the past 6,700 years. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118: e2102007118
- Zhao Y, Yu Z, Liu X, et al. Late Holocene vegetation and climate oscillations in the Qaidam Basin of the northeastern Tibetan Plateau. *Quat Res*, 2010, 73: 59–69
- Zhao Y, Yu Z, Chen F, et al. Holocene vegetation and climate history at Hurleg Lake in the Qaidam Basin, northwest China. *Rev Palaeobot Palynology*, 2007, 145: 275–288
- Xu H, Cao J, Wang J, et al. Mid-Holocene rainfall heterogeneity in subtropical East Asia. *Innov Geosci*, 2026, doi:10.59717/j.xinn-geo.2026.100225
- Cheng B, Chen F, Zhang J. Palaeovegetational and palaeoenvironmental changes since the last deglacial in Gonghe Basin, northeast Tibetan Plateau. *J Geogr Sci*, 2013, 23: 136–146
- Xu Q, Xiao J, Li Y, et al. Pollen-based quantitative reconstruction of Holocene climate changes in the Daihai Lake Area, Inner Mongolia, China. *J Clim*, 2010, 23: 2856–2868
- Xu Q, Chen F, Zhang S, et al. Vegetation succession and East Asian Summer Monsoon Changes since the last deglaciation inferred from high-resolution pollen record in Gonghai Lake, Shanxi Province, China. *Holocene*, 2017, 27: 835–846
- Wei H, E C, Duan R, et al. Fungal spore record of pastoralism on the NE Qinghai-Tibetan Plateau since the middle Holocene. *Sci China Earth Sci*, 2021, 64: 1318–1331
- Huang X, Zhang J, Storozum M, et al. Long-term herbivore population dynamics in the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau and its implications for early human impacts. *Rev Palaeobot Palynology*, 2020, 275: 104171
- Miao Y, Zhang D, Cai X, et al. Holocene fire on the northeast Tibetan Plateau in relation to climate change and human activity. *Quat Int*, 2017, 443: 124–131
- Wang S M, Dou H S. Records of Lakes in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998 [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998]
- Long Q F, Feng X Y, Liu J, et al. Microbial diversity of Keluke-Tuosu Lake Wetland Reserve in Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). *Earth Environ*, 2017, 45: 399–407 [龙启福, 封希媛, 刘静, 等. 青藏高原克鲁克-托素湖湿地系统微生物多样性. 地球与环境, 2017, 45: 399–407]
- Zhang J, Xu H, Lan J, et al. Prolonged drought enhances northwest China dust storm activity. *J Geophys Res Atmos*, 2022, 127: e2022JD037088
- Wang J, Xu H, Lan J, et al. Changes in SST regulate hydroclimatic patterns in the monsoon marginal zone, northern China. *Clim Dyn*, 2023, 61: 4551–4562
- Shi S, Xu H, Shui Y, et al. Sedimentary organic molecular compositions reveal the influence of glacier retreat on ecology on the Tibetan Plateau.

- [Sci Total Environ](#), 2023, 882: 163629
- 18 Hu C, Xu H, Shi S, et al. Sedimentary organic matter molecular composition reveals the eutrophication of the past 500 years in Lake Daihai, Inner Mongolia. [Environ Res](#), 2023, 227: 115753
 - 19 Ran M, Zhang C, Feng Z. Climatic and hydrological variations during the past 8000 years in northern Xinjiang of China and the associated mechanisms. [Quat Int](#), 2015, 358: 21–34
 - 20 Wang W, Feng Z. Holocene moisture evolution across the Mongolian Plateau and its surrounding areas: a synthesis of climatic records. [Earth-Sci Rev](#), 2013, 122: 38–57
 - 21 Lan J, Wang T, Dong J, et al. The influence of ice sheet and solar insolation on Holocene moisture evolution in northern Central Asia. [Earth-Sci Rev](#), 2021, 217: 103645
 - 22 Marcott S A, Shakun J D, Clark P U, et al. A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. [Science](#), 2013, 339: 1198–1201
 - 23 Stuiver M, Reimer P J, Bard E, et al. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000–0 cal BP. [Radiocarbon](#), 1998, 40: 1041–1083
 - 24 Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years. [Quat Sci Rev](#), 1991, 10: 297–317
 - 25 Lan J, Zhang J, Cheng P, et al. Late Holocene hydroclimatic variation in central Asia and its response to mid-latitude Westerlies and solar irradiance. [Quat Sci Rev](#), 2020, 238: 106330
 - 26 Lan J, Xu H, Sheng E, et al. Climate changes reconstructed from a glacial lake in high Central Asia over the past two millennia. [Quat Int](#), 2017, 487: 43–53
 - 27 Chen F, Jia J, Chen J, et al. A persistent Holocene wetting trend in arid central Asia, with wettest conditions in the late Holocene, revealed by multi-proxy analyses of loess-paleosol sequences in Xinjiang, China. [Quat Sci Rev](#), 2016, 146: 134–146
 - 28 Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on north Atlantic climate during the Holocene. [Science](#), 2001, 294: 2130–2136
 - 29 Zhao C, Yu Z, Zhao Y, et al. Holocene millennial-scale climate variations documented by multiple lake-level proxies in sediment cores from Hurlig Lake, Northwest China. [J Paleolimnol](#), 2010, 44: 995–1008
 - 30 Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. [Nature](#), 2007, 445: 74–77
 - 31 Huo S, Zhang H, Wang J, et al. Temperature and precipitation dominates millennium changes of eukaryotic algal communities in Lake Yamzhog Yumco, Southern Tibetan Plateau. [Sci Total Environ](#), 2022, 829: 154636
 - 32 Li G, Dong H, Hou W, et al. Temporal succession of ancient phytoplankton community in Qinghai Lake and implication for paleo-environmental change. [Sci Rep](#), 2016, 6: 19769
 - 33 Çelekli A, Lekesiz Ö, Çetin T. Eco-assessment of phytoplankton composition in relation to environmental conditions of saltwater and freshwater lakes in the Konya Closed Basin (Türkiye). [Turkish J Bot](#), 2024, 48: 165–181
 - 34 Çelekli A, Lekesiz Ö. Eco-assessment of West Mediterranean Basin's rivers (Turkey) using diatom metrics and multivariate approaches. [Environ Sci Pollut Res](#), 2020, 27: 27796–27806
 - 35 Coelho S, Pérez-Ruzafa A, Gamito S. Phytoplankton community dynamics in an intermittently open hypereutrophic coastal lagoon in southern Portugal. [Estuar Coast Shelf Sci](#), 2015, 167: 102–112
 - 36 Wang J, Xu H, Lan J, et al. Different responses of cyanobacterial communities to climate change and anthropogenic activities revealed by the 500-year sedimentary record of Lake Daihai. [Anthropocene](#), 2025, 51: 100490
 - 37 Monchamp M E, Spaak P, Domaizon I, et al. Homogenization of lake cyanobacterial communities over a century of climate change and eutrophication. [Nat Ecol Evol](#), 2018, 2: 317–324
 - 38 Zhang J, Shi K, Paerl H W, et al. Ancient DNA reveals potentially toxic cyanobacteria increasing with climate change. [Water Res](#), 2023, 229: 119435
 - 39 Wang Y, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and north Atlantic climate. [Science](#), 2005, 308: 854–857
 - 40 Cheng J, Wu H, Liu Z, et al. Vegetation feedback causes delayed ecosystem response to East Asian Summer Monsoon Rainfall during the Holocene. [Nat Commun](#), 2021, 12: 1843
 - 41 Huang X, Liu S, Dong G, et al. Early human impacts on vegetation on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau during the middle to late Holocene. [Prog Phys Geography-Earth Environ](#), 2017, 41: 286–301
 - 42 Chen F H, Dong G H, Zhang D J, et al. Agriculture facilitated permanent human occupation of the Tibetan Plateau after 3600 BP. [Science](#), 2015, 347: 248–250
 - 43 ter Schure A T M, Bajard M, Loftsgarden K, et al. Anthropogenic and environmental drivers of vegetation change in southeastern Norway during the Holocene. [Quat Sci Rev](#), 2021, 270: 107175
 - 44 Ellis E C, Gauthier N, Klein Goldewijk K, et al. People have shaped most of terrestrial nature for at least 12,000 years. [Proc Natl Acad Sci USA](#), 2021, 118: e2023483118
 - 45 van Vugt L, Garcés-Pastor S, Gobet E, et al. Pollen, macrofossils and *sedaDNA* reveal climate and land use impacts on Holocene mountain vegetation of the Lepontine Alps, Italy. [Quat Sci Rev](#), 2022, 296: 107749

- 46 Spencer R G M, Kellerman A M, Podgorski D C, et al. Identifying the molecular signatures of agricultural expansion in Amazonian headwater streams. *J Geophys Res BioGeosci*, 2019, 124: 1637–1650
- 47 Li X, Dodson J, Zhou J, et al. Increases of population and expansion of rice agriculture in Asia, and anthropogenic methane emissions since 5000BP. *Quat Int*, 2009, 202: 41–50
- 48 Cai Y, Zhang J, Yang N, et al. Human impacts on vegetation exceeded the hydroclimate control 2 ka ago in the Qinghai Lake basin revealed by n-alkanes of loess. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2022, 607: 111269
- 49 Wei H, E C, Zhang J, et al. Climate change and anthropogenic activities in Qinghai Lake basin over the last 8500 years derived from pollen and charcoal records in an aeolian section. *CATENA*, 2020, 193: 104616
- 50 Song G, Wang H L, Shi L F. Climate evolution since 9.32 cal ka BP in Keluke Lake, northeastern Qaidam Basin, China. *J Arid Environ*, 2020, 178: 9
- 51 Nai H, Zhong J, Yi Y, et al. Anthropogenic disturbance stimulates the export of dissolved organic carbon to rivers on the Tibetan Plateau. *Environ Sci Technol*, 2023, 57: 9214–9223
- 52 Zhang S. Temporal-spatial differences and influencing factors of paleo-fire history during middle and late Holocene in northwest China (in Chinese). Doctor Thesis. Lanzhou: University, 2022 [张山佳. 丝绸之路中—东段中晚全新世古火历史时空差异及影响因素研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2022]
- 53 Bahri H, Rasse D P, Rumpel C, et al. Lignin degradation during a laboratory incubation followed by ¹³C isotope analysis. *Soil Biol Biochem*, 2008, 40: 1916–1922
- 54 Qinghai Provincial Local Chronicles Committee. Qinghai Chronicles (in Chinese). Hefei: Huangshan Publishing House, 1998 [青海省地方志编纂委员会. 青海通志. 合肥: 黄山出版社, 1998]
- 55 Dong G, Liu H, Yang Y, et al. Emergence of ancient cities in relation to geopolitical circumstances and climate change during late Holocene in northeastern Tibetan Plateau, China. *Front Earth Sci*, 2016, 10: 669–682

补充材料

补充材料S1 年代学

补充材料S2 地球化学指标分析

补充材料S3 代用指标的气候/环境指示意义及区域水文气候变化

补充材料S4 沉积物DNA提取和实时荧光定量PCR(qPCR)分析

补充材料S5 宏条形码和高通量测序

补充材料S6 序列处理、物种注释、数据统计及对比分析

补充材料S7 湖泊沉积物有机质提取及FT-ICR MS数据分析

补充材料S8 气候-生态耦合关系分析及人类活动时空分化

图S1 可鲁克湖地区水汽来源后向轨迹

图S2 可鲁克湖野外采样照片及HL13-2和KLK21-1-2岩芯年代

图S3 可鲁克湖HL13-2和KLK21-1-2岩芯代用指标

图S4 可鲁克湖HL13-2和KLK21-1-2岩芯代用指标主成分分析(PCA)

图S5 可鲁克湖HL13-2岩芯不同代用指标皮尔逊相关性矩阵

图S6 可鲁克湖过去约5000年藻类群落变化及排序分析

图S7 可鲁克湖HL13-2岩芯43个样品宏条形码文库 α 和 β 多样性

图S8 可鲁克湖过去约5000年表层土壤位置、序列长度分布、不同植物分类群数量及不同植物功能群变化

图S9 可鲁克湖过去约5000年有机分子组成变化特征

图S10 可鲁克湖有机分子组成排序和V-K分析及其与人类农牧活动的关系

图S11 青藏高原东北中晚全新世以来人类活动时空差异

表S1 可鲁克湖HL13-2和KLK21-1-2岩芯¹⁴C测年结果

表S2 可鲁克湖岸边沉积剖面样品OSL年代

表S3 可鲁克湖蓝细菌qPCR和藻类宏条形码古DNA检验结果

表S4 可鲁克湖植物宏条形码古DNA检验结果

表S5 qPCR(蓝细菌)和宏条形码(藻类和植物)引物

表S6 可鲁克湖不同样品有机分子组成

表S7 耦合度偏离系数(D)分析结果

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “增强的人类活动导致青藏高原东北晚全新世气候-生态系统耦合性减弱”

Enhanced human activity on the northeastern Tibetan Plateau during the late Holocene reduced climate and ecosystem coupling

Jing Wang¹, Hai Xu^{1,2,3*}, Siwei Shi⁴, Jianghu Lan⁵, Kang'en Zhou⁶, Yunping Song² & Jin Zhang⁵

¹ Key Laboratory of Karst Georesources and Environment, Ministry of Education, College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

² School of Earth System Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China

³ Guizhou Provincial Key Laboratory for Palaeontology and Palaeoenvironment, Guiyang 550025, China

⁴ Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

⁵ State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China

⁶ School of Geographical Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, China

* Corresponding author, E-mail: xuhai@tju.edu.cn

The Tibetan Plateau is a climate-change-sensitive region and a key ecological security barrier. Clarifying the evolutionary processes and driving mechanisms of its climate and ecosystems will help elucidate regional environmental changes and the ecological effects of human activities. In particular, understanding human-driven environmental change is crucial for elucidating human-environment interactions and future global changes. However, our current understanding of when and how human activities have driven shifts in the climate-ecosystem coupling relationship on the plateau is limited because long-term bio-geological records are scarce. Integrated multi-proxy analyses, including sedimentary ancient DNA (sedaDNA) and organic molecular compositions, allow for more precise identification of the shifts in climate-ecosystem coupling and the early signals driven by human activities. Here, we present algal and plant ancient DNA and organic matter molecular composition records spanning approximately 5000 calibrated radiocarbon years before the present (cal a BP) from Lake Hurlig on the northeastern Tibetan Plateau (NE-TP). By integrating our newly developed records with existing paleoclimatic, paleoecological, and archaeological evidence from the study area, this study aims to: (1) reconstruct the hydroclimatic changes and ecological evolutionary history of the NE-TP during the mid- to late Holocene and distinguish it from the monsoonal domain; (2) evaluate the potential impacts of climatic and anthropogenic forcing on lake algae and watershed vegetation communities; and (3) explore the historical processes and mechanisms underlying the shift in the coupling relationship between natural ecosystems and climate change under human mediation. Combined with other regional paleoclimatic proxies and archaeological evidence, we demonstrate the critical role of human activities in the transformation of late Holocene plateau ecosystems. We show that the region has experienced a persistent wetting trend since approximately 5000 cal a BP, which is out of phase with Asian summer monsoon precipitation. Superimposed on the overall increasing precipitation trend were several centennial- to millennial-scale cold-dry climatic events that were highly synchronous with contemporary weak solar activity and North Atlantic ice-rafted debris events. Driven by climate change, lakeshore vegetation has shown a gradual increase since the late Holocene, which contrasts with vegetation evolution patterns in the Asian monsoon region. On centennial to millennial timescales, cyanobacteria/diatom biomass and biodiversity exhibited higher values during warm periods and lower values during cold periods, indicating that warm climates are conducive to enhancing the productivity of plateau lake ecosystems. The heteroatomic compound contents and chemodiversity index of the organic molecular composition increased during approximately 3500–3000 cal a BP, implying relatively intensified regional human activities and clear sediment fingerprints. Ordination analysis of sedaDNA revealed that algal communities formed distinct clusters before and after approximately 3000 cal a BP, indicating a systematic shift in community structure. At approximately 2500 cal a BP, the increased abundance of autochthonous aliphatic compounds, together with decreased contents of allochthonous organic molecules, such as vascular plant-derived polyphenols, may imply intensified human activities that altered the natural landscape pattern of the catchment. After approximately 1000 cal a BP, lacustrine algae increased again, whereas catchment vegetation diversity declined, indicating that enhanced human activities reduced catchment vegetation diversity and significantly weakened climate-ecosystem coupling, whereas increased nutrient input enhanced lake ecosystem biodiversity. As global change and human disturbances intensify, the climate-ecosystem coupling relationships in this region may exhibit more complex spatiotemporal variations.

Tibetan Plateau, Holocene, climate change, ecological evolution, human activities

doi: [10.1360/CSB-2026-0071](https://doi.org/10.1360/CSB-2026-0071)