

枝角类亚化石揭示的湖北太白湖过去百余年环境演变*

林涌权¹, 董旭辉^{1,2**}, 廖粤军³, 李燕^{1,2}, 羊向东⁴, Jeppesen Erik⁵

(1: 广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510006)

(2: 广州大学气候与环境变化研究中心, 广州 510006)

(3: 广东省韶关市田家炳中学, 韶关 512026)

(4: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(5: 丹麦奥尔胡斯大学生物科学系, 斯尔克堡 8600)

摘要: 近百年来长江中下游地区的浅水湖泊经历了气候变化及日益增强的人类扰动, 造成了普遍的湖泊富营养化、水动力条件和水生生态系统的状态转变, 水体的生态服务功能明显退化。枝角类作为一种重要的水生生物, 敏感地响应于湖泊及其流域的环境变化, 但目前对亚热带湖泊中的枝角类亚化石的环境指示意义, 与其它古生态指标如硅藻、摇蚊等对环境变化的响应差异尚未明确。因此, 本文以浅水湖泊太白湖为研究对象, 结合流域历史资料和监测数据, 基于沉积岩芯中枝角类群落过去百年来的期演化序列, 重建了近百年来太白湖的历史环境演变过程及机制。对比硅藻及摇蚊的群落演化特征, 探讨了多门类古生态指标对环境变化的响应差异。本文重点讨论了枝角类对湖泊鱼类产量指示意义及利用枝角类亚化石来重建历史环境的应用前景及不足。

关键词: 太白湖; 枝角类; 环境变化; 古生态; 状态转变

Environmental evolution of Lake Taibai (Hubei Province) over the past century revealed by cladoceran subfossils*

Lin Yongquan¹, Dong Xuhui^{1,2**}, Liao Yuejun³, Li Yan^{1,2}, Yang Xiangdong⁴ & Jeppesen Erik⁵

(1: School of Geographical Sciences and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P.R.China)

(2: Centre for Climate and Environmental Changes, Guangzhou University, Guangzhou 510006, P.R.China)

(3: Tian Jiabing Middle School, Shaoguan 512026, P.R.China)

(4: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(5: Department of Bioscience, Aarhus University, Silkeborg 8600, Denmark)

Abstract: During the past century, shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River experienced climate change and increasing human disturbance, resulting in widespread lake eutrophication, regime shifts of hydrodynamic condition and aquatic ecosystem, and significant degradation of their ecological functions. Cladoceran, as an important aquatic organism, is sensitive to environmental changes in lakes and surrounding catchments. However, the environmental significance of cladoceran subfossils in subtropical lakes and their unique response patterns to environmental changes from other paleoecological indicators, such as diatoms and chironomids, are not clear yet. Based on the local historical data and monitoring data, this paper reconstructed the past developing process of environment and mechanism of Lake Taibai in the past 100 years from the subfossil cladoceran communities in a sediment core. With significant differences to the response pattern of diatom and chironomid communities, cladoceran exhibited a more complicated manner along with environmental changes. The significance of cladocerans to fish yield and the potential and limitation of using cladoceran subfossils in reconstructing historical environments are discussed.

* 2021-10-21 收稿; 2021-11-20 收修改稿。

国家自然科学基金面上项目 (42171149)、广东省攀登计划项目 (pdjh2022a0405) 和广东省海外名师项目 (2020A1414010320 和 2020A1414010354) 联合资助。

** 通信作者; E-mail: xhdong@gzhu.edu.cn.

Keywords: Lake Taibai; cladoceran; environmental change; paleoecology; regime shift

近百年来,在全球生态环境问题突出、人为干扰强烈和气候变暖的大背景下^[1],湖泊环境亦遭受到了不同程度的破坏^[2],引发系列环境后果,导致水环境质量不断下降、资源枯竭、功能退化^[3],而且环境恶化驱动因素复杂多样,治理难度大^[4].例如在人类活动强烈的东部平原湖区普遍出现的湖泊富营养化问题成因上,一方面与气候变暖^[5]、风速变化^[6]及流域(或湖泊内部)水动力条件^[7]有关,另一方面也受到人类围垦、流域工农业营养盐污染和水产养殖等活动有关,引起部分藻类和水生生物过度繁殖,造成水体的富营养化^[8].这些要素不仅会产生叠加交互效应,而且在不同的时间段内存在强度差异,加剧了湖泊生态系统修复的难度^[9].厘清湖泊复杂系统状态转变过程中不同驱动要素的贡献是生态系统治理的重要前提^[10],而且必须从生态系统的整体、长时间序列的角度上去予以科学的评估^[11].

现代湖泊监测记录通常较短(<50年),无法提供完整、有效的长期生态系统演变信息,而湖泊沉积物的连续记录可以揭示湖泊及其流域长期生态环境变化过程,揭示其演化的规律和原因^[12].自1980s以来,基于湖泊沉积物的湖泊古生态学日益受到重视,诸多湖泊水生生物如摇蚊、硅藻等残体内由于有难以降解的几丁质、硅质等成分,可以长期保存在湖泊沉积物中,因此可以提供丰富的历史水生生态系统不同组分的生物群落信息^[13].随着科学界对生物群落演化规律的认识,特别是生物非线性响应规律、复杂系统论等的兴起,当前古生态学的研究已经由前期的单一指标、线性响应、特定指标的定量重建过渡到多指标比对、临界突变、系统动力学的研究趋势^[11,14-15].无疑,挖掘新的生物指标、加强多生物指标的综合分析应该是今后古生态学研究的一个必然趋势,这不仅可以对不同指标独立的逻辑解释起到相互验证后补充的作用,而且可以提供生态系统层面的信息,包括系统各要素相互作用、食物网结构和功能、生境和物种多样性、以及系统的物质和能量循环等信息^[16].

湖泊水体中的枝角类既是浮游植物的主要牧食者,又是浮游生物如食性鱼和一些无脊椎动物的主要食物,从而在水生态系统的营养传递和能量流动中起着极为重要的作用^[17].因此,湖泊中枝角类的种群结构变化信息及其与环境因子之间的关系不仅是淡水生态学研究中的重要内容,对于湖泊生态修复也具有重要的参考意义^[18].枝角类死亡后,其几丁质残体能很好地保存在湖泊沉积物中,使得枝角类有望成为古湖沼学研究中的重要生物指标^[19].国际上已经开展了众多湖泊枝角类种群的现代环境监测及沉积物中亚化石的环境重建工作,但主要侧重于高山、北方寒冷区的湖泊^[20-22];国内目前开展的枝角类亚化石研究也主要集中在云南地区^[23-25],对东部平原湖区仅有Dong等对60余个湖泊表层沉积物^[26]、刘桂民在太湖^[27]、Cheng等在升金湖^[28]有相关研究报道.我国东部洪泛平原湖泊众多,长期受到多重人类活动与自然要素的共同影响,湖泊生态系统类型独特,进一步明晰枝角类亚化石的环境指示意义、揭示其群落演化的长期趋势与演化机制对湖泊环境治理具有重要的意义.

本文拟通过古湖沼学的研究方法,选择东部典型浅水湖泊太白湖开展枝角类群落的长期生态学研究.近150年来,长江中下游的太白湖经受了严重的水文条件改变和湖泊富营养化问题,导致水质恶化,生态系统发生草-藻型稳态转换.目前一些研究工作对转换机制已有一定认识,特别是,对古生态指标开展了大量的相关研究.例如羊向东、董旭辉等提取该湖沉积物中记录的硅藻信息,重建了历史的营养演化过程^[29-30];全秀芳等利用孢粉组合与碳屑指标分析恢复了近1500年以来流域植被的变化及其驱动因子^[31];张恩楼等通过北部湖区沉积摇蚊亚化石分析,再现了1950年前后摇蚊群落对富营养化水平增加的响应^[32];赵雁捷等^[33]和Xu等^[34]则从不同的角度对太白湖历史环境演化机理进行了深入剖析.但直到目前尚未开展该湖沉积物中枝角类亚化石的研究,特别是枝角类群落与其余古生态指标所揭示的湖泊环境变化特征是否相一致仍然知之甚少^[30,32,35].本文拟补充同一钻孔中的枝角类属种丰度信息,来识别太白湖近150年来枝角类群落变化的主要特征,结合环境监测数据和社会经济数据,探讨枝角类群落的演化机制;对比其他常用的古生态指标硅藻、摇蚊等的响应差异,藉此评估亚热带湖泊中枝角类亚化石指标在重建历史环境变化中的应用前景,丰富湖泊古生态指标体系,并为定量古生态学提供更多的科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太白湖(29°56′~30°01′N, 115°46′~115°50′E)是长江中下游洪泛平原湖泊群中的一个小型浅水湖泊,位于中国湖北省黄冈市黄梅、武穴两县市交界处,现今湖泊总面积约为25 km²,平均深度3.2 m. 太白湖流域地处亚热带季风区,年均温度18.4℃,多年平均降水1273 mm,蒸发量1041 mm,水热条件好,湖水依靠地表径流和湖面降水补给,承雨面积960 km²[36]. 太白湖流域经济类型以农业为主,主要种植水稻、小麦和油菜等;1950s中期至1978年太白湖流域内掀起了大规模的围湖造田潮,直到1970s末期才逐渐放缓. 太白湖水产养殖开始于1950s,1980s后期发展为网箱养殖,渔场调整养殖结构,增加了滤食性鱼种并投放大量草鱼、蟹去除水草,从自然放养发展到集约式养殖模式围网养鱼并投放饵料(包括化肥),进一步导致营养富集,近年来的水体主要水质指标参数如表1所示.

表1 太白湖主要水质参数多年变化

Tab.1 Characteristics of main water quality parameters in Lake Taibai

指标	2002年春季	2007年春季*	2012年(春夏季)	2016年春季
pH	7.51	8.95	8.45	9
电导率/(μS/cm)	223	274.6	212	268
透明度/m	0.6	>0.5	0.32	0.7
总磷/(μg/L)	86	69	388	175
总氮/(mg/L)	1.70	1.37	1.56	2.03
叶绿素a/(μg/L)	4.7	30.2	77.0	71.7

* 数据来源:中国湖泊调查报告(2019)[37];其余数据来源于作者团队实测数据.

1.2 样品采集与实验室分析

本研究基于2007年5月在太白湖北部湖区所采集获得的柱状沉积岩芯(TN1孔,采样点位置为29°59′44.3″N, 115°48′26.5″E,采样水深2.5 m)的上部42 cm样品,沉积柱上部20 cm按0.5 cm间隔,20~40 cm按1 cm间隔,40 cm以下按照2 cm间隔分样. 该沉积柱年代的计算参照刘恩峰等已发表结果[38],上部42 cm涵盖了自1860s以来的湖泊沉积物. 沉积物多指标包括硅藻、摇蚊、元素等的分析方法及结果参考文献[30-33, 38-39].

枝角类前处理参考Frey的方法[40]进行:称取约5 g且经充分混匀的样品,首先将样品置入备有200 mL 10% KOH溶液的烧杯中,然后水浴锅对烧杯加热(60℃, 1 h)以对样品解絮凝,随后样品用80 μm的筛网过滤,残余在筛网上的物质用蒸馏水进行清洗收集,定容至10 mL并加入数滴甲醛防止腐烂.

枝角类的鉴别在光学显微镜下进行. 先将样品充分摇匀,取100 μL悬浮液置于计数框,在100~400倍显微镜下鉴别、计数. 枝角类的鉴别主要依据当前国内外的枝角类鉴定图版[41-42]进行. 由于枝角类微化石多以不同部位的形式存在,因此对某一种/属的计数要根据其不同的残体部位分别计数,最终以此种/属数量最丰富的残体部位的数量作为计数结果,每个样品总的个体计数至少要达到100以上. 枝角类丰度换算成绝对丰度(每克干重沉积物中的枝角类数量)和相对丰度(某一种枝角类占有所有枝角类总数的比例). 枝角类百分比图谱使用Tilia Graph程序绘制,属种组合带的划分基于CONISS聚类分析结果[43].

1.3 数理统计分析

非度量多维尺度分析(Non-metric multidimensional scaling, NMDS)是一种将多维空间的研究对象简化到低维空间进行定位、分析和归类,同时又保留对象间原始关系的数据分析方法,可用于揭示样品间的相对差异大小及生物群落组合变化的总体趋势(用各个轴的得分来衡量,第一轴归纳了最主要的变化趋势)[44-45]. 对枝角类数据,选择在两个以上的样品中出现,含量至少在一个样品中超过2%的常见属种进行数值分析. 最后数据包括了62个层位样品和30个主要枝角类属种类型. 同样,对同一沉积柱中的硅藻和摇蚊群落数据进行NMDS分析,分别计算第一轴的得分,用以表示各个生物群落的总体变化特征. NMDS分析在软件

PAST^[46]中完成。

对于不同生物门类群落状态发生显著变化时间点的检测,本研究采用 Rodionov 等提出的检测平均水平显著变化的突变检测分析方法(sequential t-test algorithm for analyzing, STARS)^[47]。通过 STARS 计算得到枝角类、硅藻及摇蚊 3 个生物门类时间序列上的突变点。在 Excel 中加载 STARS 模块进行分析,本次研究参数设置显著度 0.05,步长为 10,通过计算状态均值变化指数(regime shift index, RSI)来表示状态间变幅大小。

枝角类与鱼类关系密切,Jeppesen 等研究揭示出蚤属(*Daphnia*)占蚤属(*Daphnia*)和象鼻蚤属(*Bosmina*)总量的比例(palaeolimnological predation index, PPI)与单位浮游生物食性鱼类捕获量呈显著负相关关系^[48]。因此,我们利用 PPI 来指示浮游生物食性鱼类丰度变化。建立该指数的长期变化有望与实际的渔业产量数据进行对比,进而评估利用枝角类群落来定量重建历史时期渔业产量方法的有效性。

2 结果

2.1 枝角类组合

太白山湖钻孔中共鉴定出 30 个枝角类属种,尽管所有层位浮游种所占比例较高(接近 80%),其中象鼻蚤属 *Bosmina* 为岩芯柱的绝对优势属(平均百分含量达到 75%),*Bosmina coregoni* 为岩芯柱的绝对优势种,平均百分含量达到 32%。然而沿岸/底栖/附生种的属种种类数目更多,以小型底栖种 *Alona* 的各种类型为主,其余的附生属种如 *Chydorus sphaericus* 和 *Sida crystallina* 亦有较高出现率。整个沉积柱中蚤属(*Daphnia*)的相对丰度均较低(<2%)。根据 CONISS 分析把枝角类群落划分为 4 个组合带,各个组合带变化特征如下:

组合带 1(42~35 cm,对应 1860—1910 年)。此时期以 *B. coregoni*、*Bosmina* sp.、小型 *Alona* sp. 和 *Bosmina longirostris* 为主,在 1905 年 *B. coregoni* 相对丰度最大,可达 42.9%,总体上呈增加趋势。组合带 1 中沿岸种如小型 *Alona* sp.、*Acroperus harpae* 和 *Camprotercus recirostris* 等相对丰度呈现降低趋势。

组合带 2(35~25 cm,对应 1910—1944 年)。此时期沿岸种 *Alona rectangula* type、小型 *Alona* sp.、*C. sphaericus* 和 *S. crystallina* 丰度变化趋势并不明显,浮游种变化不一,*B. longirostris* 和 *Bosmina* sp. 丰度增加,*B. coregoni* 丰度减少。

组合带 3(25~17 cm,对应 1944—1965 年)。此时期沿岸种小型 *Alona* sp.、*C. sphaericus* 和 *S. crystallina* 的丰度总体增加,浮游种 *B. longirostris*、*Bosmina* sp. 和 *B. coregoni* 丰度整体上相比第二阶段,有减少趋势。

组合带 4(17 cm 以上,对应 1965—2006 年)。此时期沿岸种 *A. rectangula* type、小型 *Alona* sp.、*C. sphaericus* 和 *S. crystallina* 的丰度在第三阶段增加后保持稳定高值,*Ilyocryptus* sp. 首次出现。但浮游种仍占绝对优势,浮游种 *B. longirostris* 相比第三阶段丰度减少,而 *Bosmina* sp. 和 *B. coregoni* 丰度保持稳定(图 1)。

2.2 枝角类种群 NDMS 分析

枝角类数据的 NDMS 结果中,前两个轴的特征值分别为 0.99 和 0.14,解释属种数据的方差值分别为 73.68% 和 10.13%。在属种分布图上,富营养种 *B. coregoni*、*B. longirostris* 等出现在图的右边,代表了轴一的主要变化方向;而沿岸种如小型 *Alona* sp.、*A. harpae*、*C. recirostris* 等则出现在图的左边。样点的排列主要受第一轴的控制,同图 1 中的聚类分析结果一致,从左到右 4 个组合带的样品依次排列;第二轴上样品的排列主要反映了带内的差异(图 2)。

2.3 枝角类对湖泊鱼类产量的指示意义

如图 3 所示,过去 50 年内,太白山湖渔业经历了 3 个显著的增长时期:1980 年前和 1985—2000 年间的渔业产量呈缓慢上升趋势;2000 年后出现较大增幅(年产量从 300 t 增长至 3600 t)。古湖沼捕食指数(PPI)在 0.54~0.62 区间内波动变化,推导的鱼总产量波动整体上升趋势明显,特别是 1985 年后的两次增产过程均有反映,在渔业产量增长的初期(1965—1974 年)PPI 亦能较好地指示该过程。尽管 1975—1982 年间两者相关系数较差,但总体上 PPI 能一定程度上较好的刻画历史时期鱼类产量的变化趋势。

2.4 多种古生态指标的对比

枝角类群落演替的 STARS 分析结果表明,在 1910s 前后枝角类发生了一次显著的属种演替(突变显著度 $RSI=3.1$),随后直至 1960s 前后发生第二次显著的群落演替($RSI=-0.8$ 较小),分别对应了浮游种 *Bosmina* 属的增加—减少及底栖属种 *Alona*、*C. sphaericus* 等的减少—增加的过程(图 1,图 4)。

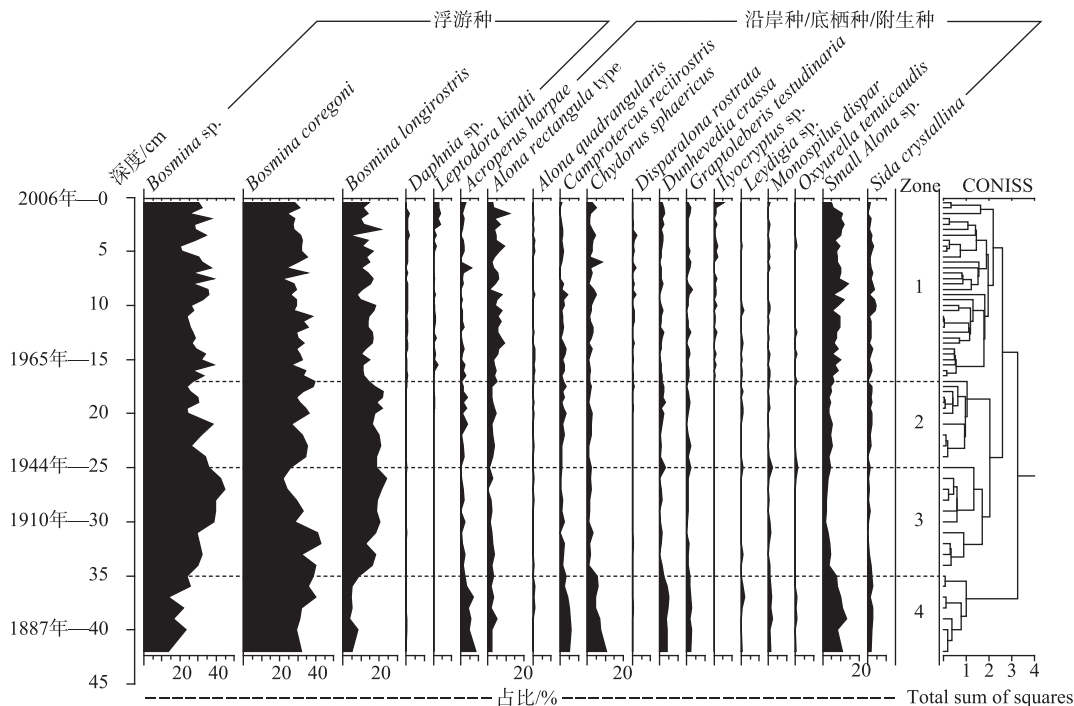


图1 太白湖沉积岩芯枝角类主要属种分布

Fig.1 Cladoceran percentage diagram of the sediment core in Lake Taibai

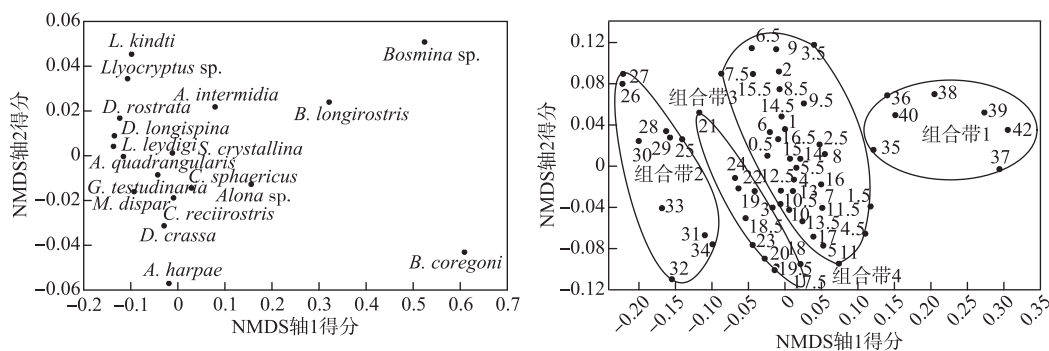


图2 太白湖沉积岩芯中枝角类数据 NMDS 排序分析结果(右图中数字为样品深度, cm)

Fig.2 NMDS ordination of major cladocerans of sediment core in Lake Taibai

(The number on the right figure are the sample depths, cm)

摇蚊和硅藻群落演替阶段则体现出不同的阶段性。摇蚊群落在 1940s 前始终保持相对稳定的结构,此后开始缓慢变化,年间变率相对稳定,直至 1990s 开始逐渐稳定,转变至富营养化群落状态,累计变率 $RSI=2.7$ 。而硅藻群落的第一次显著变化发生于 1900s,稍早于枝角类群落,随后群落变率较大,呈现波动状态,直至 1985 年群落变率回落(稍早于摇蚊群落的 1990 年),维持较为稳定的群落结构(图 4)。

总体上枝角类、摇蚊及硅藻 3 种生物门类的总体变化体现一定的差异性。从群落变率范围来看,3 个生物门类大致相当,如第一阶段(1910s 前)变率范围(NMDS 得分)分别为 0.10~0.25(均值 0.18)、0.10~0.16(均值 0.12)、0.15~0.22(均值 0.19);从变化的时间点来看,3 种生物门类不同的演化阶段尽管存在 5~10 年

的差异但大体重合(图4),例如枝角类和硅藻在1900s前后的第一次显著变化的时间点大体一致,而摇蚊和硅藻则在富营养化的加剧过程中体现出较好的一致性(如1990s前后的第二次群落转换).

3 讨论

3.1 太白湖枝角类基本特征

太白湖枝角类以浮游种 *Bosmina* 为主,同时出现属种类繁多但含量均较低的底栖、附生属种,这些属种均广泛出现于长江中下游其他湖泊中. 作者团队曾于2012年前后对长江中下游60个湖泊的现生枝角类(表层沉积物中的群落)进行系统调查,共发现35个属种,其中28个属种为附生/底栖类型^[26],97%的湖泊中均出现了浮游种 *Bosmina* 及底栖属种 *Alona*、*C. sphaericus*,反映了亚热带浅水湖泊中枝角类群落的相似性^[28,49].

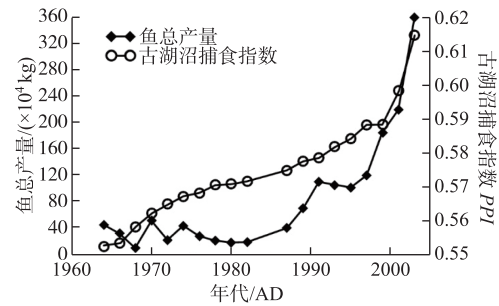


图3 1960s以来太白湖鱼类产量和古湖沼捕食指数PPI

Fig.3 Total fish yield and palaeolimnological predation index (PPI) in Lake Taibai since 1960s

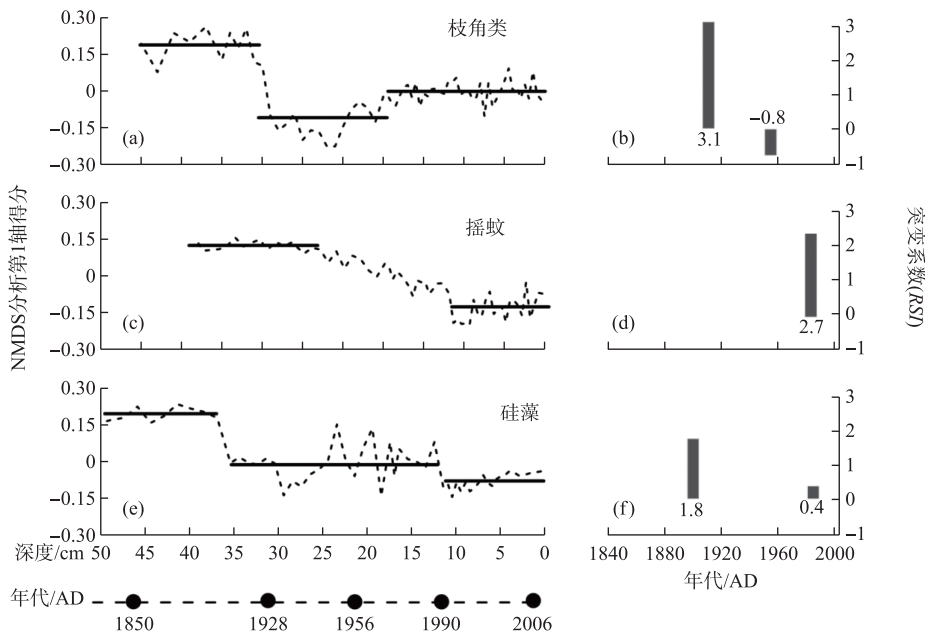


图4 太白湖各生物门类(a~b: 枝角类,c~d: 摇蚊,e~f: 硅藻)

NMDS 分析第一轴得分的状态转换过程检测结果

(其中黑色实线代表种群平均状态,黑色棒状图的高度及下方数值代表状态转变系数RSI大小)

Fig.4 Detection results of the state transition process of the NMDS first-axis scores of different biological communities (a-b: cladocera, c-d: chironomid, e-f: diatom) of Lake Taibai (Horizontal black line represents the average state of each community, and the height of the bar and the value below represents the amount of state change)

沉积序列的NMDS排序分析能有效地揭示样品间的群落差异,进而揭示潜在的影响要素.图2可见第1轴的特征值远高于第2轴,表明太白湖沉积柱中枝角类属种的分布主要受第1轴环境因子的影响,根据以上主要属种生态特征,*B. coregoni*、*B. longirostris* 和 *A. rectangular* type 是偏好富营养水体的枝角类^[49],从左到

右, 枝角类属逐渐从贫营养化指示性组合到富营养化指示性组合转变, 因此第一轴大致反映营养梯度的变化。相应地, 从左到右, 样品点中的排列指示了各层为沉积时期湖泊环境状态的变化。枝角类组合的 NMDS 排序结果与 CONISS 聚类分析结果一致, 响应了近 150 年来太白湖 4 个主要环境演化阶段。

3.2 枝角类群落揭示的湖泊环境变化

结合太白湖环境监测数据、社会经济数据以及多沉积指标数据, 重建太白湖的环境主要演化阶段如下:

1860—1910 年, 此时期江湖自然联通, 水动力条件强, 存在季节性水位波动和周期性冲刷, 太白湖水位较高且变化明显。湖水营养水平低, 但入湖营养物质增加。枝角类组合以浮游类型 *Bosmina* sp. 占优势, 且呈现先轻微减少而后不断增加的趋势, 表明在湖泊与长江自由联通的背景下^[2], 太白湖水动力条件强, 水体更新快, 水质洁净, 与此时期太白湖频率磁化率高、中值粒径大和硅藻类组合以浮游类硅藻占优势等证据吻合(图 5)。枝角类附生种(如小型 *Alona* sp.、*A. harpae* 和 *C. rectirostris*)的减少反映了当时江湖联通引起的季节性水位波动和周期性冲刷及早涝指数先减后增, 暗示该阶段水位先降低后升高, 并一直保持较高水位, 与枝角类响应的水位波动结论一致。指示富营养化的 *B. coregoni* 丰度增加则揭示了当时随着入湖营养物质的增加, 根据记载^[31], 虽然此时期湖水总磷继续维持中营养水平, 但因流域森林植被发育, 湖泊生产力缓慢提高, 因此喜好营养的枝角类丰度一度上升。

1910—1944 年, 此时期江湖仍保持较高的连通性, 捕食压力增强, 人类活动开始加强但尚不剧烈, 太白湖面积缩小, 水位下降。根据记载, 此时期太白湖已经成为当地水产农业的重要产地^[29], 鱼类喜好的枝角类浮游种 *B. coregoni* 丰度减少, 指示了食物网中捕食压力的加大。而指示富营养化的枝角类浮游种 *B. longirostris* 和 *Bosmina* sp. 丰度相比上一时期增加, 则表明此时期人类活动的持续加强, 从而引起入湖营养物质的增多, 太白湖流域沉积通量和人口数量增加也能印证此时期人类活动的加强。后期枝角类沿岸种小型 *Alona* sp. 的增加和中值粒径减小则反映了湖水水位有所上升。该时期内的枝角类沿岸种数量上变化幅度小, 整体上处于低谷平缓期。

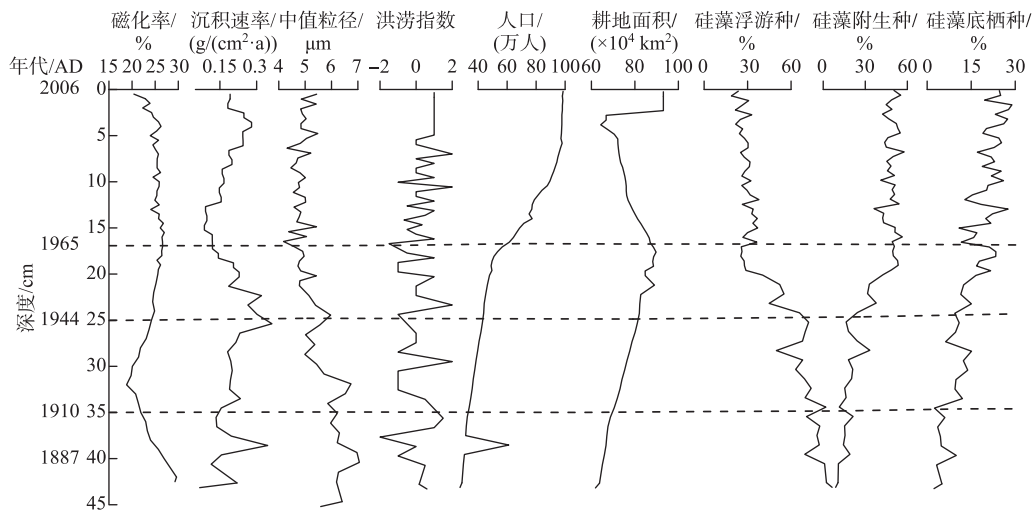


图 5 太白湖钻沉积物指标、流域内旱涝情况、人口、耕地面积情况及不同生态类型的硅藻属种百分比 (组合带对应于枝角类的组合划分)

Fig.5 Sedimentary proxies in Lake Taibai core, drought and flood conditions, population and arable land area data of the catchment. Diatoms were grouped according to habitats and the environmental zones follow the ones for cladocerans

1944—1965 年, 此时期人类活动明显加强, 修闸建坝后江湖连通性开始变差, 水生植被快速扩张。此时期枝角类沿岸种丰度的总体增加响应了太白湖的修闸建坝事件。1955 年太白湖下游建成梅济新闸, 修闸后湖水通过梅济港向东排入龙感湖, 而后进入长江, 水位直接由梅济堤闸人工调控, 减小了江水倒灌对太白湖

的影响,江湖连通性开始变差. 1958—1963年间太白山湖上游陆续建成了仙人坝水库、考田水库、荆竹水库^[50],湖泊水动力减弱,换水周期变长,流速变缓,水生植物能够扎根生长并快速扩张,有利于沿岸/附生种枝角类的生长,这与硅藻类型由浮游类型迅速向附生类型组合演替表明水生植被快速扩张的研究结果高度一致^[33]. 但枝角类增加的幅度并不大,反映了枝角类指标响应的滞后性,由于营养级的传递等原因,可能导致了浮游生产力增加的滞后.

1965—2006年,此时期随着人口数量的急剧增加,人类干扰进一步加剧,快速扩张的水产养殖和农业发展加大了湖泊的环境压力,江湖连通性差,水动力减弱. 枝角类沿岸种的增加更明显地响应太白山湖修闸建坝所引起的水动力下降事件,并与浮游种硅藻的减少、中值粒径和频率磁化率快速下降相互印证,水动力减弱,水位变化减小,入湖的泥沙减少,换水周期拉长,加上太白山湖流域在1960s起开始广施化肥^[18],太白山湖过度的养殖和化肥的大量投入使得水质持续下降,1987年以来在该湖西面的武山湖周围相继建立了数个小型化工厂^[32],入湖磷及污染负荷明显增加^[29],因此指示富营养化的枝角类浮游种数量保持着动态平衡的高值.

3.3 多门类古生态指标对环境变化的响应

不同的生物门类对外界环境胁迫响应的敏感性和弹性存在较大差异. 本研究揭示出在最初的环境变化情况下,硅藻群落最先发生显著变化(37 cm处,约为1900 AD),随后枝角类和摇蚊群落相继发生显著的变化(分别为35 cm处和27 cm处),均滞后于硅藻的响应. 从第一次显著的群落演变幅度来看,枝角类变幅最大($RSI=3.1$),而硅藻和摇蚊变幅则相对较小(RSI 分别为2.7和1.8). 这三者中,硅藻系初级生产者,生命周期较短(1~2周),直接受到湖泊水体状况(如pH值、水体营养、气候条件等)的影响^[8],因此对环境变化响应最为敏感. 而摇蚊大多是底栖类型动物,主要受底泥中的食物供给、溶解氧浓度、温度、水深等要素的影响^[50],而且可以通过迁移、新陈代谢改变等来适应恶劣的环境^[51],因此体现出一定的生态弹性(如图4c中12~27 cm间缓慢的变化),而且在重富营养化环境下,仍然稍稍滞后于硅藻对营养富集响应(1985年硅藻群落变率回落,稍早于摇蚊群落的1990年,图4).

枝角类位处食物网的中间位置,在水生态系统的营养传递和能量流动中起着极为重要的作用^[48]. 相应的,枝角类群落演替不仅会受到外界理化环境变化(如温度、水位、酸碱度等)的影响,还会受到食物网“营养级联效应”(如水生植被的多寡、鱼类数量)的影响^[26,52];此外,枝角类在水深—光照度适应、逃避捕食者及物种进化等方面亦具备较高的灵活性^[42],因此它相对于硅藻及摇蚊一定程度上存在更为复杂的影响机制. 本研究中枝角类于1960s前后的系统状态转变过程,在硅藻及摇蚊群落中均未体现(图4),事实上,1960s以来太白山湖TP和TOC含量整体呈上升趋势^[33],但喜富营养环境的*B. longirostris*(较*B. coregoni*更偏好富营养环境)在1960s以来有较明显下降,因此枝角类的群落变迁应该还受到营养要素之外的作用力,例如湖泊水文条件改变的影响. 历史文献记载^[33],1955年太白山湖下游建闸,修闸后湖泊水位直接受梅济堤闸人工调控,减小了江水倒灌对太白山湖的影响. 1958—1963年期间太白山湖上游陆续建成了水库,使湖泊水动力进一步减弱^[33,38,50]. 因此,枝角类亚化石能捕捉到历史系统演化轨迹中一些独特的生态系统信息. 无疑,如何去解释枝角类这些不同的响应差异,是今后开展基于古生态学指标的环境重建研究的重要内容.

3.4 枝角类的古生态学意义

已有研究表明,枝角类是湖泊食物链上的重要组成部分,具有生命周期很短且响应快速,及分类清晰等优点^[52],能够指示湖泊的环境指标如温度、盐度、营养、pH和食物网中生物的相互作用(如捕食、竞争)等^[10,26],可用于生态响应模式的识别,从而实现湖泊历史变化从定性分析到定量反演的转变,还可用于确立湖泊治理的基准环境^[53-54]. 例如,水生生态系统中历史鱼类的数量可通过鱼类的鳞片残体或DNA技术来予以重建^[8],但由于鱼类残体浓度往往偏低,使得鱼类数量重建始终是一个难点. 本研究展示了基于枝角类种群PPI指数对历史时期浮游性捕食鱼类数量的重建,能有效地反映太白山湖历史时期的渔业养殖状况(图3). 无疑,多古生态指标的不断扩充、方法体系的不断完善,可以为其他指标(如硅藻、摇蚊、介形类、色素、GDGT等)的古环境重建提供佐证,能提供认识过去湖泊环境变化历史更为全面的视角,有利于厘清湖泊演化的规律和原因,模拟和预测湖泊未来的变化趋势,进一步指导管理者更科学地、有针对性地管理湖泊^[15-16].

和其他古生态指标一样,基于枝角类指标的去环境重建也存在一些局限性. 首先是沉积物中的枝角

类与同期水体中现生的群落构成存在一定差异. 尽管大多数枝角类的几丁质外壳能较好的保存^[55], 但是沉积过程会受多种因素如水流和湖底地形的影响, 造成湖心沉积岩芯中的枝角类组合会高于地表浮游种枝角类而降低沿岸种枝角类的真实丰度^[56]; 同时, 由于枝角类容易被其他浮游动物捕食并消化, 这样并非所有枝角类都能在沉积物中得到保存, 这与枝角类几丁质外壳的厚薄程度、湖泊特征相关, 如在上文太白湖沉积岩芯主要枝角类属种分布图中, 象鼻溞属 *Bosmina* 丰度远高于其他属种, 这与其较硬的外壳导致的保存性较好相关, 这种不同属种在沉积物中的代表性将直接影响到定量重建的结果. 其次, 枝角类因处于食物网的中间位置, 受到的影响要素众多, 因此枝角类种群演替的驱动要素会随着外界环境发生变化, 因此对单一环境要素的指示意义相较于硅藻、摇蚊等偏弱. 太白湖长期的枝角类演化序列表明水位、营养、水生植被类型等均是可能的影响要素, 如果就单一要素进行重建, 可能存在较大误差, 必须基于多影响要素的模式(如回归树模型)来进行重建^[55].

基于上述枝角类指标应用的潜在缺陷, 未来需加强下列研究内容: 首先, 需要进行枝角类属种更多的现代生态学研究, 完善不同区域枝角类群落个体生态学信息(如生态位、生理习性等), 这些信息将有助于解释过去环境的变化; 其次, 加强枝角类的埋藏学研究, 建立不同属种的现生—沉积间的定量关系, 对不同保存状况的属种进行校正^[56], 特别的, 近期的枝角类被证明具有较短的进化周期, 沉积物里的枝角类休眠卵的复活生态学研究已成为一个新兴的研究热点^[57]. 最后, 需加强更多不同古生态指标的挖掘工作, 例如环境 DNA 方法的应用^[58]. 本研究表明不同的生物群落对外界环境扰动呈现出不同的响应特征, 多门类的指标体系有利于量化特定群落差异, 提取丢失的环境演化信息.

4 结论

1) 太白湖枝角类具有显著的亚热带浅水湖泊种群特征, 以浮游种 *Bosmina* 为主, 同时出现种类繁多的底栖、附生属种. 沉积枝角类演替特征揭示了过去百余年来太白湖 4 个环境演化阶段: 1910 年前江湖自然联通, 太白湖水位较高且波动明显, 水动力条件强; 1910—1944 年人类活动渐强但尚不剧烈, 入湖营养缓慢增加, 水位下降; 1944—1965 年人类活动明显加强, 营养累积, 水生植被快速扩张; 1965 年后人类干扰进一步加剧, 修闸建坝后江湖连通性开始变差, 水动力减弱, 流域工农业的发展使得湖泊富营养化严重、水质下降, 水生植被退化.

2) 不同的生物门类对外界环境胁迫响应的敏感性和弹性存在较大差异. 本研究揭示出枝角类相对于硅藻及摇蚊具有不同的响应特征(突变时间、幅度均存在差异), 因此能提取额外的生态—环境演化信息.

3) 枝角类亚化石是一种有效的重建历史环境的古生态指标, 在重建鱼类产量方面有独特优势, 但亦存在沉积代表性差异、影响要素众多、部分属种生态信息缺乏等问题, 今后需加强枝角类个体生态学及埋藏学等研究, 加强古今生态学间的融合.

致谢: 感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所张恩楼研究员提供摇蚊数据, 伦敦大学学院 Helen Bennion 教授和南京信息工程大学 Giri Kattel 教授均提供了有益的建议.

5 参考文献

- [1] Winemiller KO, Montaña CG, Roelke DL *et al.* Pulsing hydrology determines top-down control of basal resources in a tropical river-floodplain ecosystem. *Ecological Monographs*, 2014, **84**(4): 621-635. DOI: 10.1890/13-1822.1.
- [2] Steffen W, Richardson K, Rockström J *et al.* Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 2015, **347**(6223): 1259855. DOI: 10.1126/science.1259855.
- [3] Yang GS, Ma RH, Zhang L *et al.* Lake status, major problems and protection strategy in China. *J Lake Sci*, 2010, **22**(6): 799-810. DOI:10.18307/2010.0601. [杨桂山, 马荣华, 张路等. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. 湖泊科学, 2010, **22**(6): 799-810.]
- [4] Zhao L, Liu Y, Li YZ *et al.* Survey on theory and driving factors of regime shifts on lake ecosystems. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(10): 1697-1707. [赵磊, 刘永, 李玉照等. 湖泊生态系统稳态转换理论与驱动因子研究进展. 生态环境学报, 2014, **23**(10): 1697-1707.]
- [5] Deng JM, Qin BQ. A review on studies of effects of climate change on phytoplankton in freshwater systems. *J Lake Sci*,

- 2015, **27**(1): 1-10. DOI:10.18307/2015.0101. [邓建明, 秦伯强. 全球变暖对淡水湖泊浮游植物影响研究进展. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 1-10.]
- [6] Deng JM, Paerl HW, Qin BQ *et al.* Climatically-modulated decline in wind speed may strongly affect eutrophication in shallow lakes. *Science of the Total Environment*, 2018, **645**: 1361-1370. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.208.
- [7] Qin BQ, Yang GJ, Ma JR *et al.* Dynamics of variability and mechanism of harmful cyanobacteria bloom in Lake Taihu, China. *Chinese Science Bulletin*, 2016, **61**(7): 759-770. DOI: 10.1360/N972015-00400. [秦伯强, 杨桂军, 马健荣等. 太湖蓝藻水华“暴发”的动态特征及其机制. 科学通报, 2016, **61**(7): 759-770.]
- [8] Smol JP. Pollution of lakes and rivers: a paleoenvironmental perspective. Wiley-Blackwell, 2008.
- [9] Zhang QH, Dong XH, Yang XD *et al.* Hydrologic and anthropogenic influences on aquatic macrophyte development in a large, shallow lake in China. *Freshwater Biology*, 2019, **64**(4): 799-812. DOI: 10.1111/fwb.13263.
- [10] Zhang K, Yang XD, Kattel G *et al.* Freshwater lake ecosystem shift caused by social-economic transitions in Yangtze River Basin over the past century. *Scientific Reports*, 2018, **8**(1). DOI: 10.1038/s41598-018-35482-5.
- [11] Yang XD, Wang R, Dong XH *et al.* A review of lake palaeoecology research in China. *J Lake Sci*, 2020, **32**(5): 1380-1395. DOI: 10.18307/2020.0512. [羊向东, 王荣, 董旭辉等. 中国湖泊古生态研究进展. 湖泊科学, 2020, **32**(5): 1380-1395.]
- [12] Shen J. Progress and prospect of palaeolimnology research in China. *J Lake Sci*, 2009, **21**(3): 307-313. DOI: 10.18307/2009.0301. [沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望. 湖泊科学, 2009, **21**(3): 307-313.]
- [13] Smol JP. The power of the past: using sediments to track the effects of multiple stressors on lake ecosystems. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(s1): 43-59. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2009.02373.x.
- [14] Wang R, Dearing JA, Langdon PG *et al.* Flickering gives early warning signals of a critical transition to a eutrophic lake state. *Nature*, 2012, **492**(7429): 419-422. DOI: 10.1038/nature11655.
- [15] Bennion H, Davidson TA, Sayer CD *et al.* Harnessing the potential of the multi-indicator palaeoecological approach: an assessment of the nature and causes of ecological change in a eutrophic shallow lake. *Freshwater Biology*, 2015, **60**(7): 1423-1442. DOI: info:doi/10.1111/fwb.12579.
- [16] Yang XD, Dong XH, Chen X *et al.* Past environmental changes and management suggestions for lakes in the Yangtze River economic belt. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2020, **35**(8): 977-987. [羊向东, 董旭辉, 陈旭等. 长江经济带湖泊环境演变与保护、治理建议. 中国科学院院刊, 2020, **35**(8): 977-987.]
- [17] Scheffer M. Ecology of shallow lakes. London: Chapman and Hall, 1998.
- [18] Lotter AF, Birks HJB, Hofmann W *et al.* Modern diatom, cladocera, chironomid, and chrysophyte cyst assemblages as quantitative indicators for the reconstruction of past environmental conditions in the Alps. II. Nutrients. *Journal of Paleolimnology*, 1998, **19**(4). DOI: 10.1023/A:1007982008956.
- [19] Korhola A, Rautio M eds. Cladocera and other branchiopod crustaceans. Dordrecht: Springer Netherlands, 2001: 5-41.
- [20] Griffiths K, Winegardner AK, Beisner BE *et al.* Cladoceran assemblage changes across the Eastern United States as recorded in the sediments from the 2007 National Lakes Assessment, USA. *Ecological Indicators*, 2019, **96**: 368-382. DOI: 10.1016/j.ecolind.2018.08.061.
- [21] Kong LY, Yang XD, Kattel G *et al.* The response of Cladocerans to recent environmental forcing in an Alpine Lake on the SE Tibetan Plateau. *Hydrobiologia*, 2017, **784**(1): 171-185. DOI: 10.1007/s10750-016-2868-6.
- [22] Winegardner AK, Legendre P, Beisner BE *et al.* Diatom diversity patterns over the past c. 150 years across the conterminous United States of America: Identifying mechanisms behind beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, 2017. DOI: 10.1111/geb.12640.
- [23] Zhu QS, Kong LY, Chen L *et al.* Spatial distribution of cladoceran assemblages in surface sediments of shallow lakes in Yunnan. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(9): 3111-3119. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201809.032. [朱庆生, 孔令阳, 陈丽等. 浅水湖泊表层沉积物记录的枝角类群落空间分布特征. 应用生态学报, 2018, **29**(9): 3111-3119.]
- [24] Shi HB, Chen GJ, Liu YY *et al.* Long-term pattern and driving factors of cladoceran community changes in Lake Xingyun, Yunnan. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(9): 2464-2473. DOI: 10.13292/j.1000-4890.2015.0217. [施海彬, 陈光杰, 刘园园等. 星云湖枝角类群落变化的长期特征与驱动因素. 生态学杂志, 2015, **34**(9): 2464-2473.]
- [25] Lu HB, Chen GJ, Chen XL *et al.* The long-term effects of bottom-up and top-down forcing on zooplankton: An example

- from sedimentary *Bosmina* records of Lake Dianchi and Lake Fuxian. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 67-75. DOI: 10.18307/2015.0109. [卢慧斌, 陈光杰, 陈小林等. 上行与下行效应对浮游动物的长期影响评价——以滇池与抚仙湖沉积物象鼻溞(*Bosmina*)为例. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 67-75.]
- [26] Dong XH, Kattel G, Jeppesen E. Subfossil cladocerans as quantitative indicators of past ecological conditions in Yangtze River Basin lakes, China. *Science of the Total Environment*, 2020, **728**: 138794. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138794.
- [27] Liu GM. Paleo-limnological study on the response of Cladocera to the evolution of lake eco-environment [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, 2008. [刘桂民. 枝角类对湖泊生态环境演变响应的古湖沼学研究[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2008.]
- [28] Cheng LJ, Xue B, Yao SC *et al.* Response of Cladocera fauna to environmental change based on sediments from Shengjin Lake, a Yangtze River-connected lake in China. *Quaternary International*, 2020, **536**: 52-59. DOI: 10.1016/j.quaint.2019.11.044.
- [29] Yang XD, Anderson NJ, Dong XH *et al.* Surface sediment diatom assemblages and epilimnetic total phosphorus in large, shallow lakes of the Yangtze floodplain: Their relationships and implications for assessing long-term eutrophication. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(7): 1273-1290. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01921.
- [30] Dong XH, Yang XD, Liu EF. Diatom records and reconstruction of epilimnetic phosphorus concentration in Lake Taibai (Hubei Province) over the past 400 years. *J Lake Sci*, 2006, **18**(6): 597-604. DOI: 10.18307/2006.0607. [董旭辉, 羊向东, 刘恩峰. 湖北太白湖 400 多年来沉积硅藻记录及湖水总磷的定量重建. 湖泊科学, 2006, **18**(6): 597-604.]
- [31] Tong XF, Xiao XY, Yang XD *et al.* Climatic changes and human activities revealed by pollen records in Lake Taibai, Hubei Province, the middle and lower reaches of the Yangtze River region over the past 1500 years. *J Lake Sci*, 2009, **21**(5): 732-740. DOI: 10.18307/2009.0519. [全秀芳, 肖霞云, 羊向东等. 湖北太白湖孢粉记录揭示的近 1500 年以来长江中下游地区的气候变化与人类活动. 湖泊科学, 2009, **21**(5): 732-740.]
- [32] Zhang EL, Cao YM, Liu EF *et al.* Chironomid assemblage and trophic level of Taibai Lake in the middle reaches of the Yangtze River over the past 150 years. *Quaternary Sciences*, 2010, **30**(6): 1156-1161. [张恩楼, 曹艳敏, 刘恩峰等. 近 150 年来湖北太白湖摇蚊记录与湖泊营养演化. 第四纪研究, 2010, **30**(6): 1156-1161.]
- [33] Zhao YJ, Wang R, Yang XD *et al.* Regime shifts revealed by paleoecological records in Lake Taibai's ecosystem in the middle and lower Yangtze River Basin during the last century. *J Lake Sci*, 2016, **28**(6): 1381-1390. DOI: 10.18307/2016.0624. [赵雁捷, 王荣, 羊向东等. 古生态记录揭示的长江中下游太白湖生态系统稳态转换过程. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1381-1390.]
- [34] Xu M, Wang R, Dong XH *et al.* A palaeolimnological perspective to understand regime-shift dynamics in two Yangtze-basin lakes. *Biology Letters*, 2019, **15**(11): 20190447. DOI: 10.1098/rsbl.2019.0447.
- [35] Yang XD, Shen J, Dong XH *et al.* Historical trophic evolutions and their ecological responses from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River: Case studies on Longgan Lake and Taibai Lake. *Science in China; Series D; Earth Sciences*, 2005, **35**(S2): 45-54. [羊向东, 沈吉, 董旭辉等. 长江中下游浅水湖泊历史时期营养态演化及湖泊生态响应——以龙感湖和太白湖为例. 中国科学: D 辑: 地球科学, 2005, **35**(S2): 45-54.]
- [36] Wang S, Dou HS eds. *Lakes of China*. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [37] Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences ed. *Investigation report on lakes in China*. Beijing: Science Press, 2019. [中国科学院南京地理与湖泊研究所. 中国湖泊调查报告. 北京: 科学出版社, 2019.]
- [38] Liu EF, Xue B, Yang XD *et al.* ^{137}Cs and ^{210}Pb chronology for recent lake sediment—a case study of Chaohu Lake and Lake Taibai. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, **29**(6): 89-94. DOI: 10.3724/SP.J.1140.2009.06089. [刘恩峰, 薛滨, 羊向东等. 基于 ^{210}Pb 与 ^{137}Cs 分布的近代沉积物定年方法——以巢湖、太白湖为例. 海洋地质与第四纪地质, 2009, **29**(6): 89-94.]
- [39] Dong XH, Yang XD, Liu EF *et al.* Application of redundancy analysis in predigesting sedimentary proxies for paleolimnological research: A case study of Taibai Lake. *Geographical Research*, 2007, **26**(3): 477-484. [董旭辉, 羊向东, 刘恩峰等. 冗余分析(RDA)在简化湖泊沉积指标体系中的应用——以太白湖为例. 地理研究, 2007, **26**(3): 477-484.]
- [40] Frey DG. Cladocera analysis. In: Berglund BE ed. *Handbook of Holocene palaeoecology and palaeohydrology*. New York:

John Wiley & sons, 1986.

- [41] Szeroczyńska K, Sarmaja-Korjonen K. Atlas of Subfossil Cladocera from Central and Northern Europe. 2007.
- [42] Jiang XZ, Du NS eds. Fauna of China, Phylum arthropoda, crustacea, Cladophora freshwater. Beijing: Science Press, 1979. [蒋燮治, 堵南山. 中国动物志, 节肢动物门, 甲壳纲, 淡水枝角类. 北京: 科学出版社, 1979.]
- [43] Grimm E. Tilia and Tilia. Graph: pc spreadsheet and graphics software for pollen data. *Journal of Molecular Structure*, 1990, **12**(4): 159-165.
- [44] Fasham MJR. A comparison of nonmetric multidimensional scaling, principal components and reciprocal averaging for the ordination of simulated coenoclines, and coenoplanes. *Ecology*, 1977, **58**(3): 551-561. DOI: 10.2307/1939004.
- [45] Legendre P, Legendre L. Multidimensional qualitative data-Chapter 6. *Developments in Environmental Modelling*, 1998, **20**: 207-245. DOI: 10.1016/B978-0-444-53868-0.50006-X.
- [46] Harper, At D. Numerical palaeobiology. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [47] Rodionov S, Overland JE. Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. *ICES Journal of Marine Science*, 2005, **62**(3): 328-332. DOI: 10.1016/j.icesjms.2005.01.013.
- [48] Jeppesen E, Leavitt P, Meester LD *et al.* Functional ecology and palaeolimnology: Using cladoceran remains to reconstruct anthropogenic impact. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, **16**(4): 191-198. DOI: 10.1016/S0169-5347(01)02100-0.
- [49] Liu GM, Chen FZ, Liu ZW. Preliminary study on cladoceran microfossils in the sediments of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2008, **20**(4): 470-476. DOI: 10.18307/2008.0410. [刘桂民, 陈非洲, 刘正文. 太湖枝角类微化石的初步研究. 湖泊科学, 2008, **20**(4): 470-476.]
- [50] Liu EF, Yang XD, Shen J *et al.* Sedimentary flux of Lake Taibai, Hubei Province and correlations with precipitation and human activities in its catchment during the last century. *J Lake Sci*, 2007, **19**(4): 407-412. DOI: 10.18307/2007.0408. [刘恩峰, 羊向东, 沈吉等. 近百年来湖北太白湖沉积通量变化与流域降水量和人类活动的关系. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 407-412.]
- [51] Wiederholm T. Response of aquatic insects to environmental pollution. In: Resh VH, Rosenberg DM eds. *The Ecology of Aquatic Insects*, 1984.
- [52] Eggermont H, Martens K. Preface: Cladocera crustaceans: Sentinels of environmental change. *Hydrobiologia*, 2011, **676**(1): 1-7. DOI: 10.1007/s10750-011-0908-9.
- [53] Dong XH, Yang XD. Establishing reference condition for lake restoration: The opportunity for palaeoecology. *J Lake Sci*, 2012, **24**(6): 974-984. DOI: 10.18307/2012.0622. [董旭辉, 羊向东. 湖泊生态修复基准环境的制定: 古生态学面临的机遇. 湖泊科学, 2012, **24**(6): 974-984.]
- [54] Kattel GR, Battarbee RW, Mackay A *et al.* Are cladoceran fossils in lake sediment samples a biased reflection of the communities from which they are derived? *Journal of Paleolimnology*, 2007, **38**(2): 157-181. DOI: 10.1007/s10933-006-9073-y.
- [55] Davidson TA, Sayer CD, Perrow M *et al.* The simultaneous inference of zooplanktivorous fish and macrophyte density from sub-fossil cladoceran assemblages: A multivariate regression tree approach. *Freshwater Biology*, 2010, **55**(3): 546-564. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2008.02124.x.
- [56] Kattel GR, Battarbee RW, Mackay AW *et al.* Recent ecological change in a remote Scottish Mountain loch: An evaluation of a Cladocera-based temperature transfer-function. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2008, **259**(1): 51-76. DOI: 10.1016/j.palaeo.2007.03.052.
- [57] Burge DRL, Edlund MB, Frisch D. Paleolimnology and resurrection ecology: The future of reconstructing the past. *Evolutionary Applications*, 2018, **11**(1): 42-59. DOI: 10.1111/eva.12556.
- [58] Schleper C, Holben W, Klenk HP. Recovery of crenarchaeotal ribosomal DNA sequences from freshwater-lake sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(1): 321-323. DOI: 10.1128/aem.63.1.321-323.1997.