

亚高山湿地摇蚊亚化石记录的近两百年来环境演化——以重庆葱坪湿地为例^{*}

郑 婷¹, 曹艳敏^{2**}, 彭 佳¹, 陈 旭¹

(1: 中国地质大学(武汉)地球科学学院地理系, 武汉 430074)

(2: 中南民族大学资源与环境学院, 武汉 430074)

摘 要: 偏远的亚高山湿地受人为活动直接干扰较小, 是追踪气候变化和大气沉降双重影响下湿地生态系统演化的理想研究地. 本研究以位于巫山的葱坪湿地为研究对象, 基于一根 50 cm 沉积岩芯的²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 测年、摇蚊亚化石和元素序列, 探讨该湿地近 200 年来环境演化历史. 结果表明, 摇蚊种群由 1910 年之前的 *Chironomus anthracinus*-type、*Limnophyes* sp.、*Cladotanytarsus mancus*-type 1 变为 1910—1925 年的 *C. mancus*-type 1、*C. anthracinus*-type、*Procladius* sp. 和 *Endochironomus impar*-type 的优势组合, 这些优势种均指示浅水环境. 此后, 耐营养种 *E. impar*-type、*Polypedilum nubeculosum*-type 和 *C. anthracinus*-type 逐渐成为优势种. 冗余分析表明, 总磷、总碳和钙是解释摇蚊组合变化的显著环境因子. 20 世纪 30 年代以前摇蚊种群可能与进入湿地的径流量小、水位较低相关, 而 20 世纪中叶以来摇蚊组合变化指示大气沉降增长背景下湿地营养富集过程. 在大气沉降和气候变化的双重影响下, 耐营养属种增加和生物多样性降低表明葱坪湿地生态环境正发生退化.

关键词: 摇蚊亚化石; 元素; 大气沉降; 亚高山湿地; 环境演化; 葱坪湿地

Subfossil chironomid-inferred environmental changes in subalpine wetland over the past 200 years—A case of Congping Wetland in Chongqing

ZHENG Ting¹, CAO Yanmin^{2**}, PENG Jia¹ & CHEN Xu¹

(1: Department of Geography, School of Earth Sciences, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, P.R. China)

(2: College of Resources and Environmental Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, P.R. China)

Abstract: Remote subalpine wetlands are subjected to limited human direct disturbances, and hence they are ideal sites for tracking the combined effects of climate change and atmospheric deposition on wetland ecosystem evolution. This study investigated environmental changes in Congping Wetland located in the Wushan Mountains during the past 200 years, based on the ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs chronology, subfossil chironomids and element contents of a 50 cm long sediment core collected from the wetland. The results revealed that chironomid communities were dominated by *Chironomus anthracinus*-type, *Limnophyes* sp. and *Cladotanytarsus mancus*-type 1 before 1910, and then they were characterized by the co-dominance of *C. mancus*-type 1, *C. anthracinus*-type, *Procladius* sp. and *Endochironomus impar*-type between 1910 and 1925. All the dominant species mentioned above are adapted to shallow water environment. Thereafter, nutrient-tolerant species, including *E. impar*-type, *Polypedilum nubeculosum*-type and *C. anthracinus*-type became the dominant taxa. Redundancy analyses indicated that total phosphorus, total carbon and Ca were significant environmental variables explaining variance in chironomid data. Chironomid communities before the 1930s might be linked to low runoff input and shallow water table in this wetland, while changes in the communities after the mid-20th century mirrored nutrient enrichment due to intensified atmospheric deposition. Under the combined effect of atmospheric deposition and climate change, the increase of nutrient-tolerant species and biodiversity loss indicate that Congping Wetland is facing with ecological environment degradation.

^{*} 国家自然科学基金项目(41877428, 41572343, 41402307)和湖北省自然科学基金项目(2017CFB532)联合资助. 2018-09-13 收稿; 2018-12-24 收修改稿. 郑婷(1994~), 女, 硕士研究生; E-mail: ting19940418@126.com.

^{**} 通信作者; E-mail: ymcao720@gmail.com.

dation.

Keywords: Subfossil chironomid; elements; atmospheric deposition; subalpine wetland; environmental change; Congping Wetland

亚高山湿地是河流重要水源地,同时为珍稀物种提供栖息地,因此是保护流域生态环境健康的重要屏障^[1]. 由于交通不便,亚高山湿地往往较少受到人为直接干扰,生态环境维持在自然状态^[2]. 然而,工业革命以来,工业活动向大气中排放大量污染物. 随着大气干湿沉降过程,这些大气污染物会在亚高山湿地富集,例如在欧洲、北美和青藏高原东缘亚高山湿地中都已检测到活性氮输入增加的信号,以及由此导致的水生生物群落演替过程^[3-5]. 区域工业化导致的大气酸沉降一方面会引起水体酸化^[6-7];另一方面,大气沉降输入的氮磷元素会促进水体富营养化^[8-9].

西南地区是我国大气氮沉降最严重的地区之一^[10],这一地区山地众多,同时在山间盆地发育了一些湖泊和沼泽湿地,这些湿地很好地记录了全新世以来气候变化历史^[1]. 虽然该地区气候重建资料众多,但目前对大气沉降背景下湿地生态环境演化规律了解较少. 作为重要水源涵养地,亚高山湿地环境变化将直接影响下游地区饮水安全. 为此,本文选取位于重庆市东北部巫山县的葱坪湿地为研究对象,基于湿地沉积物多指标记录反演近两百年来区域环境演化历史.

沉积物摇蚊亚化石已被广泛用于古环境重建,如湖泊营养状况、pH 和温度变化等^[11-13]. 目前在我国的一些高山地区也已开展摇蚊古生态学及古环境重建研究,如基于青藏高原东南缘 100 个湖泊表层沉积物中摇蚊亚化石和现代环境因子调查,Zhang 等^[14]建立摇蚊—7 月气温转换函数;在此基础上,Zhang 等^[15]基于云南老君山天才湖摇蚊亚化石记录定量重建了区域全新世以来的夏季温度变化;在人为活动干扰较强的云南滇池,摇蚊优势属由 *Einfeldia* sp. 向厌氧的 *Chironomus* sp. 转变,则主要响应于水体富营养化和水生植被减少^[16]. 在鄂西亚高山泥炭沼泽湿地,摇蚊组合中以耐酸属种为主,且在无人干扰的湿地中物种多样性更高^[17]. 可见,在自然状态下,湖泊湿地摇蚊种群变化主要响应于气候变化过程;而在人为干扰条件下,摇蚊组合中耐污染属种会增加,同时生物多样性下降.

在大气沉降加剧和气候变化背景下,西南地区亚高山湿地生态环境如何演化,目前对此尚不清楚. 本文拟通过重庆巫山葱坪湿地沉积物中摇蚊亚化石分析,结合²¹⁰Pb/¹³⁷Cs 测年和元素等沉积物记录和历史资料数据,揭示其生态环境演化过程并探讨其潜在的原因.

1 材料与方法

1.1 研究地区

葱坪湿地位于长江上游重庆市巫山县当阳乡高坪村边缘,与湖北神农架林区相连,地势上位于我国第二级阶梯的东部边缘,海拔 2045 m(图 1). 葱坪湿地发育于一个岩溶盆地内部,周围围岩以灰岩为主,盆地面积约为 1.6 km²,盆地内发育有若干小型天然浅水湖泊湿地. 该地区受中亚热带季风性湿润气候影响,盆地周围山地植被以针阔混交林为主,盆地内为原生亚高山湿润草甸. 湿地周围无人居住,人为直接干扰很少,处于相对原始状态.

研究点是一个面积约 380 m²的浅水湖泊湿地,水位常年维持在 10 cm 左右. 水源补给主要依靠雨季降水、地表径流及地下水,湖水经出水口流入落水孔. 水体清澈,湿地内水生植被发育,滨岸带有灯心草等湿生植物及低矮灌木等. 2016 年 9 月采样时水体 pH 为 6.17,电导率为 11.72 μS/cm,磷酸盐浓度为 3.7 μg/L,硝态氮浓度为 73 μg/L.

1.2 方法

1.2.1 样品采集 2016 年 9 月,在葱坪湿地中心处(31°24′13.58″N, 110°03′35.83″E)使用重力采样器采集柱状沉积岩芯,岩芯总长度为 50 cm,编号 CP. 现场以 1 cm 间隔分样,共得到 50 个样品,样品置于自封袋内带回实验室 4℃ 冷藏以备分析测试.

1.2.2 实验室处理 每间隔 1 cm 选取沉积样品进行摇蚊亚化石分析,样品依据标准方法^[18]处理. 具体步骤如下:沉积物样品加入 10% KOH 后置于 75℃ 水浴锅中加热 15 min,再依次过 212 和 90 μm 筛,将剩余样品

转移至 25 倍体视显微镜下,用镊子将摇蚊头壳手动挑拣,并用 Hydromatrix[®]将挑拣出的摇蚊头壳封片.封片后的头壳转移到 100~400 倍生物显微镜下进行鉴定,摇蚊亚化石属种鉴定主要依据文献[18]进行.将完整的或多于半个颞的头壳记为 1 个头壳,将半个颞的记为半个头壳,不足一半的不统计.每个沉积样品中摇蚊亚化石统计数至少达 50 个壳体^[19].其中,33 cm 以下的样品因摇蚊头壳总数不足 50 个,故将 33~37 号样品合并记为 35 号,38~40 号样品合并记为 39 号,41~43 合并记为 42 号,44~46 合并记为 45 号,47~50 合并记为 49 号样品.

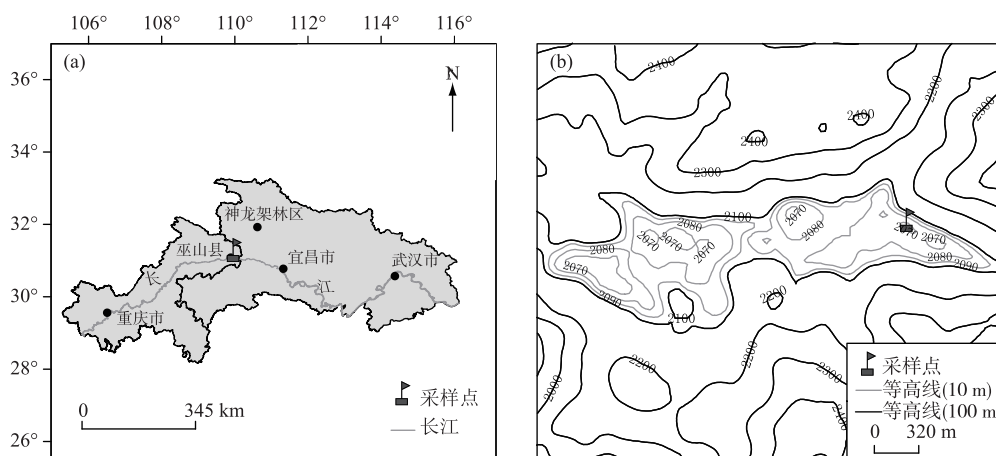


图 1 采样点区域图(a)和葱坪盆地地形图(b)

Fig.1 Regional map of sampling site (a) and topographic map of Congping Basin (b)

^{210}Pb 和 ^{137}Cs 比活度按 4 cm 间隔取样,共测试 14 个样品, ^{210}Pb 比活度采用美国 EG&GOrtec 公司生产的锗井型探测器 (HPGe GWL-120-15) 在中国科学院南京地理与湖泊研究所进行测定.其中 ^{210}Pb 标准样品由英国利物浦大学提供, ^{226}Ra 标准样品由中国原子能科学研究院提供,测试误差小于 10%. 沉积物 Al、Ca 和 TP 等元素利用等离子体原子发射光谱仪 (ICP-AES) 在中国科学院南京地理与湖泊研究所测定,仪器精度控制在重复测量误差小于 5%. 总碳 (TC)、总氮 (TN) 和 S 采用元素分析仪 (varioELcube) 在中国地质大学 (武汉) 测试,测试误差小于 0.1%.

1.2.3 气象资料来源 由于缺乏完善的实测气象数据资料,葱坪湿地 1905 年以来的年均降雨量和年距平温度数据均来自荷兰皇家气象研究所 (KNMI) 网站 (http://climexp.knmi.nl/selectfield_obs.cgi),选择研究点所在区域 ($31^{\circ}\sim 32^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 111^{\circ}\text{E}$) 的数据代表研究区气候.同时,本研究也搜集了重庆市 1950 年以来气候数据^[20],两组数据在降水和温度上均表现出显著正相关 ($P<0.05$,图 2),这表明可用 KNMI 资料数据反映区域气候变化并用于排序分析.

1.2.4 数理统计分析 摇蚊数据剔除无法鉴别的个体,选取在 2 个及以上样品中出现,并且至少在 1 个样品中含量 $\geq 2\%$ 的属种参与后续统计分析.摇蚊属种百分比图谱在 TILIA-GRAPH 1.7.16 软件中绘制,基于 CONISS 聚类分析^[21]并结合断棒模型 (Broken-stick) 检验^[22],划分摇蚊属种组合带.采用降维对应分析 (Detrended correspondence analysis, DCA) 对摇蚊种群组合数据进行分析,以揭示摇蚊种群组合变化的主要特征.摇蚊亚化石属种数据进行平方根转换,从而对稀有属种做降权处理,以减少对结果产生的偏差. DCA 分析结果显示第一轴的梯度长度小于 2,故采用线性模型—冗余分析 (Redundancy analysis, RDA) 进一步揭示摇蚊与解释变量之间的关系^[23],其中以摇蚊数据作为响应变量,沉积物元素 (Al、Ca、TC、TN、TP 和 S)、年距平温度和年均降水量作为解释变量.在进行冗余分析之前,因沉积物元素测试间隔为 4 cm,故对元素数据进行线性插值处理;对年距平温度及年均降水量数据做 3 年滑动平均处理,对解释变量进行对数转换 (除年距平温度外).基于蒙特卡洛置换检验 ($P<0.05$; $n=499$ 非限制性置换) 逐步筛选出解释摇蚊种群组合演替的显著因子,显著解释变量中已剔除共线性的环境因子 ($\text{VIF} \geq 20$).冗余分析基于 1910—2016 年资料数据齐全的

时间段进行. DCA 和 RDA 均在 CANOCO 4.5 软件中运行^[23].

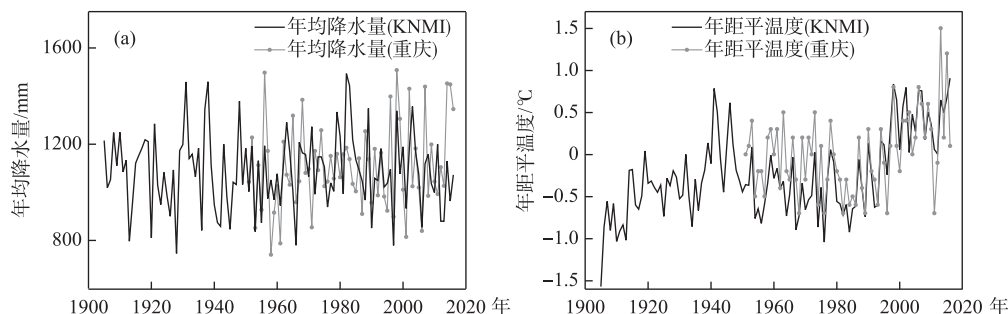


图 2 1905—2016 年研究区降水量(a)和温度距平(b)变化

Fig.2 Changes in annual precipitation (a) and temperature anomalies (b) in the study region between 1905 and 2016

2 研究结果

2.1 钻孔年代序列确定

CP 岩芯中的²¹⁰Pb 比活度呈指数递减趋势,在 12 cm 处¹³⁷Cs 比活度出现明显峰值,对应于 1963 年全球大气核试验峰值. 采用²¹⁰Pb 恒定通量模式^[24]计算沉积物年代,并利用¹³⁷Cs 的 1963 时标对年代进行校正,岩芯底部 50 cm 所对应的年代在 1800 年前后,其²¹⁰Pb 比活度、¹³⁷Cs 比活度及年代—深度对应关系如图 3 所示.

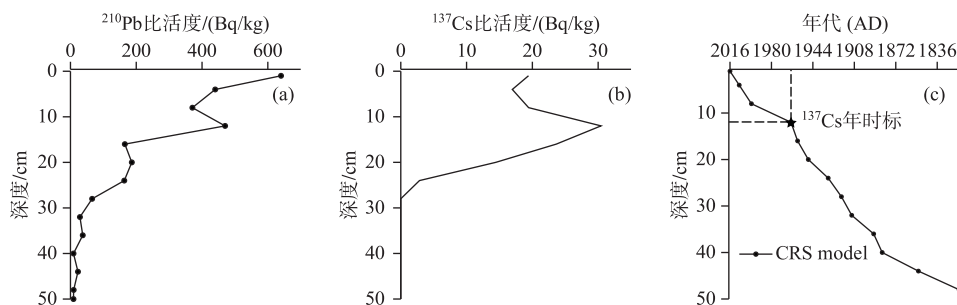


图 3 CP 岩芯沉积物²¹⁰Pb (a)和¹³⁷Cs (b)比活度以及年代—深度对应关系(c)

Fig.3 The activities of ²¹⁰Pb (a) and ¹³⁷Cs (b), and the age-depth relationship in sediment of the CP Core (c)

2.2 摇蚊组合变化

岩芯中共挑拣出 6162 头摇蚊亚化石(每个样品平均 123 头,各样品鉴定头数超过 50 头),鉴定共得 34 个属种,其中以 *Chironomus anthracinus*-type、*Endochironomus impar*-type、*Polypedilum nubeculosum*-type、*Cladotanytarsus mancus*-type 1 和 *Procladius* sp. 为主. 根据 CONISS 聚类分析和 Broken-stick 模型检验结果,可以将摇蚊序列划分为两个组合带,其中组合带 I 又分为两个亚带(图 4).

组合带 I (50~26 cm; 约 1800—1925 年):本阶段以摇蚊亚科(Chironominae)和直突摇蚊亚科(Orthocladiinae)为主,长足摇蚊亚科(Tanypodinae)仅零星出现. 该段主要优势属种 *C. mancus*-type 1、*C. anthracinus*-type、*Procladius* sp.、*E. impar*-type 和 *Limnophyes* sp. 平均含量分别为 30.2%、20.0%、9.1%、7.4% 和 6.3%, *Cricotopus intersectus*-type、*Metriocnemus terrester*-type、*Psectrocladius sordidellus*-type 和 *Pseudosmittia* sp. 少量出现. 组合亚带 Ia(约 1800—1910 年)中,*C. anthracinus*-type、*Limnophyes* sp. 和 *C. mancus*-type 1 的相对丰度较高,平均含量分别为 39%、12.4% 和 9.8%, *Cricotopus intersectus*-type、*Metriocnemus terrester*-type、*Psectrocladius sordidellus*-type 和 *Pseudosmittia* sp. 少量出现. Ia 亚带中摇蚊头壳浓度较低,底部的 5 个样品采用相邻样品合并

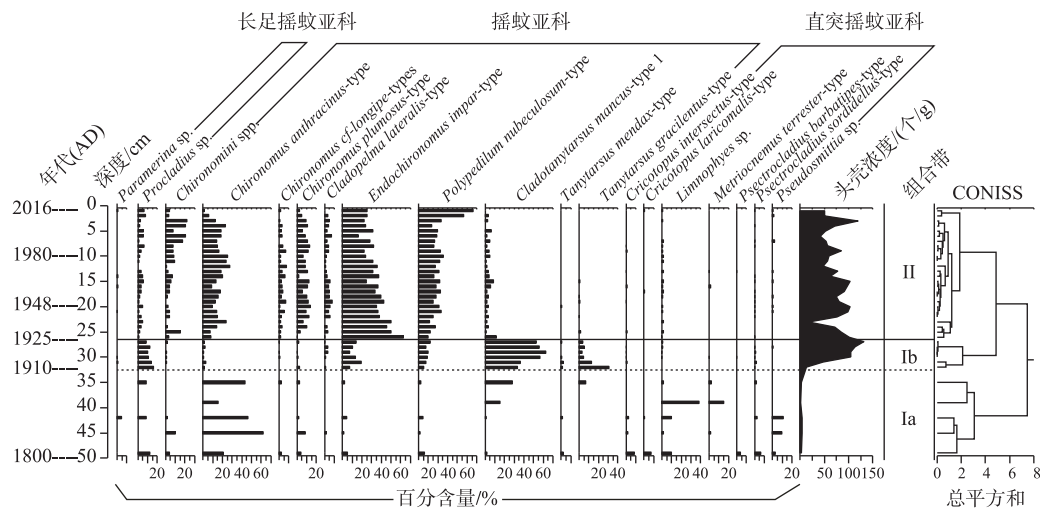


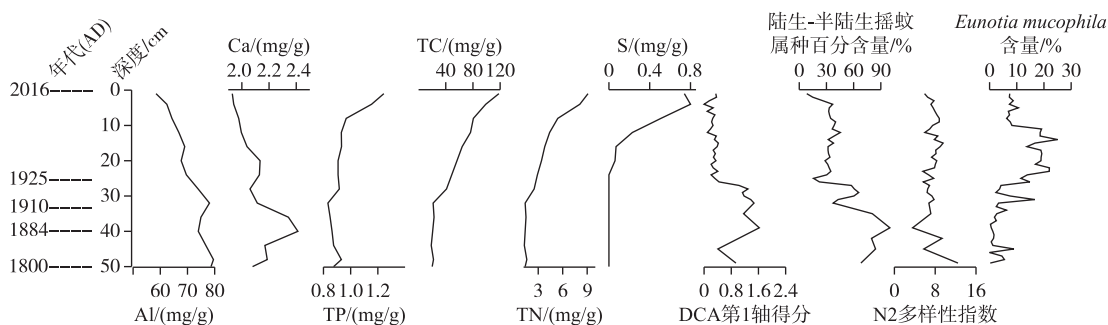
图4 CP岩芯主要摇蚊属种组合图谱

Fig.4 Diagram of main chironomid taxa in the CP Core

的方式得到,所反映的摇蚊组合信息可能存在误差. Ib亚带(约1910—1925年)中, *C. anthracinus*-type 和 *Limnophyes* sp. 含量急剧减少,平均含量分别降至1.7%和0.3%,而 *C. mancus*-type 1、*E. impar*-type 和 *Procladius* sp. 等属种相对丰度则显著上升,平均含量分别为50%、12%和12%. *T. gracilentus*-type 出现短暂升高后逐渐减少. Ia带头壳浓度平均低于14个/g, Ib带升高至平均101个/g.

组合带II(26~0 cm; 约1925—2016年):摇蚊组合在该带发生显著变化, *E. impar*-type、*P. nubeculosum*-type 和 *C. anthracinus*-type 含量明显增加而成为主要优势种,平均含量分别为34%、20.8%和15.5%. *C. mancus*-type 1和 *T. gracilentus*-type 则明显减少,前者含量不超过3.3%,后者则在1960年后完全消失. *Procladius* sp. 的相对丰度有所降低, *Chironomus plumosus*-type 和 *Chironomus cf. longipes*-type 含量虽然不高,但相比前一阶段明显增多. 该段摇蚊头壳浓度虽存在波动,但总体维持在71个/g左右.

此外,本文主要根据 Brooks 等的研究划分了陆生—半陆生摇蚊属种^[18,25-26]. 结果显示,陆生—半陆生摇蚊属种百分含量在约1925年以前虽有波动但总体较高(均值约为63%),之后含量下降至32%以下;N2多样性指数(Hill's diversity number)在1910年以前总体波动下降,此后缓慢升高,在顶部8 cm(约1997年)处开始下降(图5).

图5 CP岩芯中元素含量、摇蚊多指标和硅藻指示种^[29]变化Fig.5 Variation of element contents, multiple proxies of chironomid data and indicative diatom species^[29] in the CP Core

2.3 元素变化序列

岩芯主要元素序列如图5所示。Al与Ca含量在约1910年以前相对较高,约1910年以来呈明显降低趋势。元素TP、TC和TN的变化趋势类似,在约1910年以前含量整体较低,此后呈明显上升趋势;在1930s以前S含量较低,自1950s中期S含量快速升高至约2008年峰值,此后小幅回落。

2.4 统计分析

摇蚊属种组合的DCA前四轴分别解释了摇蚊数据方差的30.3%、13.8%、4%和2.4%,其第一轴和第二轴捕获了摇蚊组合变化的主要信息。DCA第一轴得分在约1800—1884年间总体上升,此后维持高值,在约1925年快速降低后维持低值。

冗余分析结果表明,前两轴共解释了摇蚊组合方差的59.6%,Ca、TC、TP含量与摇蚊种群组合变化显著相关(图6)。第一轴主要与TC含量相关,自右往左反映湖泊生产力提高,组合亚带Ib(1910—1925年)的样品点(由老往新)沿第一轴自右向左排列,与TC和TP增加的方向一致。第二轴自下往上指示湖泊碱度降低(Ca含量下降)和营养富集过程(TP含量升高)。在RDA排序图中,组合带II的样品点排列(由老而新)与TP含量升高的方向一致。

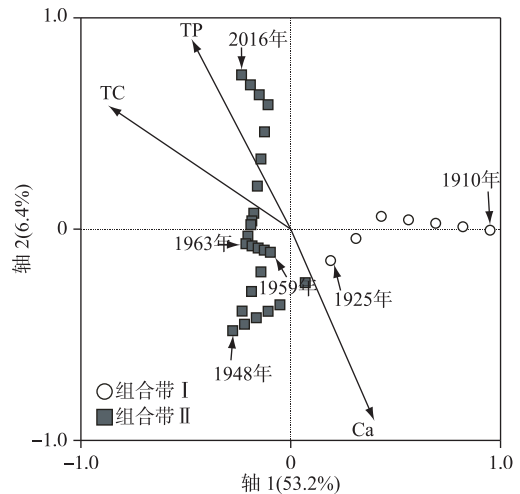


图6 葱坪岩芯1910—2016年
样品点与环境因子排序图
Fig.6 The ordination plot of samples
and environmental factors in the Congping
Core between 1910 and 2016

3 讨论

3.1 摇蚊指示的水位变化

约1800—1925年间,葱坪湿地摇蚊种群以喜浅水环境(沿岸区)属种或陆生一半陆生属种占主导地位

位^[18,25-26]。该阶段的主要优势种 *C. mancus*-type 1 为常见的湖泊沿岸种^[26-27],而 *Limnophyes* sp. 幼虫通常生活于湖泊和溪流等浅水中,部分种则为陆生或半陆生,且有些种与水生植物密切相关^[28],沼泽湿地的低水位可能更有助于该属幼虫的生长^[17]。该时段大量出现的属种还包括浅水种 *C. anthracinus*-type^[25-26],陆生一半陆生的 *Pseudosmittia* sp. 也较常见^[26,28]。在相同的层位,耐旱硅藻种 *Hantzschia amphioxys* 和 *Pinnularia borealis* 大量出现,而浮游种很少,同样指示了葱坪湿地处于低水位的陆生或半陆生环境^[29]。这与该时期(‘明清小冰期’晚期)区域冷干气候^[30](图2)相一致。同时,冷干气候条件下盆地周围山地植被覆盖度降低,植物涵养地下水功能下降,由周围山地输入的地下水将减少,陆生半陆生属种大量出现指示了这一时期的低水位状态。

3.2 摇蚊指示大气沉降变化

RDA 结果表明,约1910—1925年间湿地营养和生产力均有小幅升高(图6)。相关资料表明,1912—1925年全国煤和铁的生产量都增加了1倍以上^[31],近代工业产生的大气污染可能引起湿地沉积物中TP、TN含量小幅增加,*C. mancus*-type 1、*E. impar*-type 以及 *P. nubeculosum*-type 等相对耐营养的属种^[26,32]缓慢增加指示了湿地营养累积过程。

约1925年后,沉积物S元素含量增加,这与当时区域工业发展密切相关,为避免中日战争的影响,1930s约429家钢铁化工产业(如,汉阳钢铁厂、大渡口钢铁厂等)西迁至重庆^[33],导致区域大气污染加剧。统计资料显示,重庆人口从战前的47万人剧增至1945年的124万人,增长近3倍^[33],1949—2016年重庆市煤炭消费量增长约50倍^[20](图7),1952—2016年四川省化肥施用量增长约171倍^[34](图7),1995—2008年间重庆市工业SO₂年排放量维持在60万吨左右^[20]。这些因素可能是导致沉积物中氮硫元素快速升高的主要原因。湿地生态系统中,*Chironomus* sp. 和 *P. nubeculosum*-type 在此阶段呈明显增加趋势,这2个种曾在瑞典南部的2个酸化湖泊中大量出现^[6,26],反映了氮硫等元素沉降增加背景下水体酸性增强的过程。这一时期,耐酸硅藻种 *Eunotia mucophila* 大量出现也证实了水体酸化过程(图5)^[29]。Al和Ca等碱性元素易在酸化水体

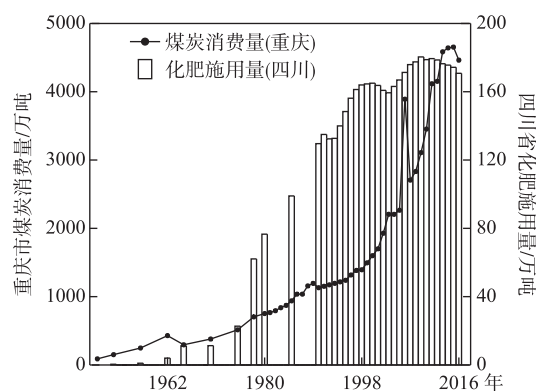


图7 重庆市1949—2016年煤炭消费量^[20]及四川省1952—2016年化肥施用量^[34]

Fig.7 The coal consumption in Chongqing City from 1949 to 2016^[20] and the amount of fertilizer usage between 1952 and 2016 in Sichuan Province^[34]

长江中游浅水湖泊中也观察到类似现象^[38]。此外, *P. nubeculosum*-type 自20世纪初持续增加与区域增温过程相对应(图2和图4), 尽管温度不是解释摇蚊组合变化的显著变量, 但增温可以通过影响沉积物氮磷营养元素释放过程间接地影响摇蚊生长^[39]。

4 结论

葱坪湿地沉积物摇蚊记录表明, 近两百年来湿地生态环境经历了三阶段变化。摇蚊种群优势种由1910年之前的 *C. anthracinus*-type、*Limnophyes* sp.、*C. mancus*-type 1 转变为1910—1925年的 *C. mancus*-type 1、*C. anthracinus*-type、*Procladius* sp. 和 *E. impar*-type, 此后 *E. impar*-type、*P. nubeculosum*-type 和 *C. anthracinus*-type 逐渐占据优势地位。摇蚊组合揭示了葱坪湿地在1930s以前为陆生一半陆生环境, 1930s以来大气沉降成为湿地环境酸化重要诱因。大气沉降和气候变化的双重影响下, 葱坪亚高山湿地水体营养水平明显升高, 耐营养摇蚊属种增多, 摇蚊多样性降低, 反映了湿地生态环境退化。在全球气候变化和大气沉降加剧背景下, 我国南方其他亚高山湿地也可能面临相似的环境退化风险。在此背景下, 亟待开展亚高山湿地古环境变化研究, 进而为保护这些珍稀湿地资源提供重要环境基准信息。

致谢: 乔强龙、张一鸣、夏威岚、朱育新等协助野外和室内实验, 谨致谢忱。

5 参考文献

- [1] Huang XY, Zhang ZQ, Wang HM *et al.* Overview on critical zone observatory at Dajiuhu Peatland, Shennongjia. *Earth Science*, 2017, **42**(6): 1026-1038. DOI: 10.3799/dqkx.2017.081. [黄威雨, 张志麒, 王红梅等. 神农架大九湖泥炭湿地关键带监测进展. 地球科学, 2017, **42**(6): 1026-1038.]
- [2] Catalan J, Pla-Rabés S, Wolfe AP *et al.* Global change revealed by palaeolimnological records from remote lakes: a review. *Journal of Paleolimnology*, 2013, **49**(3): 513-535. DOI: 10.1007/s10933-013-9681-2.
- [3] Kubovčík V, Bituščík P. Subfossil chironomids (Diptera, Chironomidae) in three Tatra Mountain lakes (Slovakia) on an acidification gradient. *Biologia*, 2006, **61**(18): S213-S220. DOI: 10.2478/s11756-006-0133-6.
- [4] Wolfe AP, Baron JS, Cornett RJ. Anthropogenic nitrogen deposition induces rapid ecological changes in alpine lakes of the Colorado Front Range (USA). *Journal of Paleolimnology*, 2001, **25**(1): 1-7.
- [5] Hu Z, Anderson NJ, Yang X *et al.* Catchment-mediated atmospheric nitrogen deposition drives ecological change in two alpine lakes in SE Tibet. *Global Change Biology*, 2014, **20**(5): 1614-1628. DOI: 10.1111/gcb.12435.

溶解而流失^[35], 沉积物中 Al 和 Ca 含量降低主要响应于水体酸化过程。

相比于 Al 和 Ca 含量的下降, 沉积物中 TC、TN 和 TP 含量却呈持续增长的趋势, 表明湿地营养富集, 促进了水生植被和藻类生长^[8-9, 16]。植物残体增加也为摇蚊提供了更多的食物, 摇蚊头壳浓度维持高值指示摇蚊大量生长。随着湿地营养富集, *C. anthracinus*-type、*E. impar*-type、*P. nubeculosum*-type 等逐渐成为优势种。在长江中下游湖泊摇蚊—总磷转换函数中^[36], *E. impar*-type 和 *P. nubeculosum*-type 的 TP 最适值分别为 51 和 70 $\mu\text{g/L}$, *Chironomus* sp. 幼虫营养耐受幅较广^[37], 有些种 TP 最适浓度甚至高达 110 $\mu\text{g/L}$, 这些优势种 TP 最适浓度与欧洲地区数据库的结果基本一致^[26, 37], 因此这些中富营养属种大量出现指示该湿地水体营养富集。N2 多样性指数(Hill's diversity number)通常用来衡量和比较群落的生物多样性, 该岩芯约自1997年开始 N2 指数下降, 反映随湿地营养富集生物多样性减少,

- [6] Brodin Y, Gransberg M. Responses of insects, especially Chironomidae (Diptera), and mites to 130 years of acidification in a Scottish lake. *Hydrobiologia*, 1993, **250**(3): 201-212.
- [7] Ilyashuk B, Ilyashuk E. Response of alpine chironomid communities (Lake Chuna, Kola Peninsula, northwestern Russia) to atmospheric contamination. *Journal of Paleolimnology*, 2001, **25**(4): 467-475.
- [8] Zhai SJ, Yang LY, Hu WP. Observations of atmospheric nitrogen and phosphorus deposition during the period of algal bloom formation in Northern Lake Taihu, China. *Environmental Management*, 2009, **44**(3): 542-551. DOI: 10.1007/s00267-009-9334-4.
- [9] Zhang XF, Li CH. Wet deposition of atmospheric nitrogen and its eutrophication effect on Xihu Lake, Huizhou City. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, **16**(1): 16-19. [张修峰, 李传红. 大气氮湿沉降及其对惠州西湖水体富营养化的影响. 中国生态农业学报, 2008, **16**(1): 16-19.]
- [10] Xiang RJ. Characteristics of acid deposition and environmental effects of typical acid rain areas in southern China [Dissertation]. Changsha: South-Central University, 2012. [向仁军. 中国南方典型酸雨区酸沉降特性及其环境效应研究[学位论文]. 长沙: 中南大学, 2012.]
- [11] Brodersen KP, Anderson NJ. Distribution of chironomids (Diptera) in low arctic West Greenland lakes: trophic conditions, temperature and environmental reconstruction. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(6): 1137-1157.
- [12] Henrikson L, Olofsson JB, Oscarson HG. The impact of acidification on Chironomidae (Diptera) as indicated by subfossil stratification. *Hydrobiologia*, 1982, **86**: 223-229.
- [13] Nazarova L, Self AE, Brooks SJ *et al.* Northern Russian chironomid-based modern summer temperature data set and inference models. *Global & Planetary Change*, 2015, **134**: 10-25.
- [14] Zhang E, Chang J, Cao Y *et al.* A chironomid-based mean July temperature inference model from the south-east margin of the Tibetan Plateau, China. *Climate of the Past*, 2017, **13**(3): 185-199. DOI: 10.5194/cp-13-185-2017.
- [15] Zhang E, Chang J, Cao Y *et al.* Holocene high-resolution quantitative summer temperature reconstruction based on subfossil chironomids from the southeast margin of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, 2017, **165**: 1-12.
- [16] Liu M. The historical and influencing mechanism of the change of the fauna of the benthic invertebrate in the Yunnan province in the past 100 years [Dissertation]. Kunming: Yunnan Normal University, 2014. [刘敏. 近百年来滇池底栖无脊椎动物群落的变化历史与影响机制[学位论文]. 昆明: 云南师范大学, 2014.]
- [17] Cao YM. Subfossil chironomid assemblages and the related environmental factors in subalpine mires, western Hubei Province. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, (5): 1268-1276. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201605.030. [曹艳敏. 鄂西亚高山泥炭地摇蚊种群组成及其影响因子. 生态学杂志, 2016, (5): 1268-1276.]
- [18] Brooks SJ, Langdon PG, Heiri O. The identification and use of Palaeartic Chironomidae larvae in palaeoecology. QRA Technical Guide No.10. London: Quaternary Research Association, 2007.
- [19] Quinlan R, Smol JP. Setting minimum head capsule abundance and taxa deletion criteria in chironomid-based inference models. *Journal of Paleolimnology*, 2001, **26**(3): 327-342.
- [20] Chongqing Bureau of Statistics ed. Chongqing Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2017. [重庆统计局. 重庆统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2017.]
- [21] Grimm EC. CONISS: A FORTRAN 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers and Geosciences*, 1987, **13**(1): 13-35.
- [22] Bennett KD. Determination of the number of zones in biostratigraphical sequence. *New Phytologist*, 1996, **132**(1): 155-170.
- [23] Braak TC, Šmilauer P. CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5) Section on Permutation Methods. Microcomputer Power, Ithaca, New York, 2002.
- [24] Appleby PG. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last W, Smol J eds. Tracking environmental change using lake sediments. Netherlands: Springer, 2001: 171-203.
- [25] Korhola A, Olander H, Blom T. Cladoceran and chironomid assemblages as quantitative indicators of water depth in subarctic Fennoscandian lakes. *Journal of Paleolimnology*, 2000, **24**: 43-54.
- [26] Brodin YW. The postglacial history of Lake Flarken, Southern Sweden, interpreted from subfossil insect remains. *Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie*, 1986, **71**(3): 371-432.
- [27] Tang HQ. Biosystematic study on the chironomid larvae in China (Diptera: Chironomidae) [Dissertation]. Tianjin: Nan-

- kai University, 2006. [唐红渠. 中国摇蚊科幼虫生物系统学研究(双翅目:摇蚊科)[学位论文]. 天津:南开大学, 2006.]
- [28] Massafiero J, Brooks SJ. Response of chironomids to Late Quaternary environmental change in the Taitao Peninsula, southern Chile. *Journal of Quaternary Science*, 2002, **17**: 101-111. DOI: 10.1002/jqs.671.
- [29] Peng J ed. Sedimentary records of ecological environment change of subalpine wetlands in the middle Yangtze reaches since the 1800s—A case study in the Congping Wetland [Dissertation]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018. [彭佳. 近代以来长江中游亚高山湿地生态环境演化的沉积记录——以葱坪湿地为例[学位论文]. 武汉: 中国地质大学, 2018.]
- [30] Wang SW ed. The holocene climate change. Beijing: China Meteorological Press, 2011. [王绍武. 全新世气候变化. 北京: 气象出版社, 2011.]
- [31] Yan ZP, Xu YS, Yao XH *et al* eds. Selected statistics of China economic history. Beijing: China Social Sciences Press, 2012. [严中平, 徐义生, 姚贤镐等. 中国经济史统计资料选辑. 北京: 中国社会科学出版社, 2012.]
- [32] Clegg BF, Clarke GH, Chipman ML *et al*. Six millennia of summer temperature variation based on midge analysis of lake sediments from Alaska. *Quaternary Science Review*, 2010, **29**(23): 3308-3316. DOI: 10.1016/j.quascirev.2010.08.001.
- [33] Zhang B. Theelaboration about industry move to the inland and its function in the war of resistance against Japan [Dissertation]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. [张斌. 论抗战时期工业内迁及其作用[学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2006.]
- [34] Sichuan Bureau of Statistics ed. Sichuan Statistics Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2017. [四川省统计局. 四川统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2017.]
- [35] Psenner R, Schmidt R. Climate-driven pH control of remote alpine lakes and effects of acid deposition. *Nature*, 1992, **356**(6372): 781-783.
- [36] Zhang EL, Cao YM, Langdon P *et al*. Alternate trajectories in historic trophic change from two lakes in the same catchment, Huayang Basin, middle reach of Yangtze River, China. *Journal of Paleolimnology*. 2012, **48**(2): 367-381. DOI: 10.1007/s10933-012-9608-3.
- [37] Saether OA. Chironomid communities as water quality indicators. *Holarctic Ecology*, 1979, **2**(2): 65-74.
- [38] Cao YM, Zhang EL, Tang HQ *et al*. Combined effects of nutrients and trace metals on chironomid composition and morphology in a heavily polluted lake in central China since the early 20th century. *Hydrobiologia*, 2016, **779**(1): 147-159. DOI: 10.1007/s10750-016-2810-y.
- [39] Chen X, Yang XD, Dong XH *et al*. Effects of environmental changes on the succession of diatom assemblage during the last 50 years in Lake Chaohu. *J Lake Sci*, 2011, **23**(5): 665-672. DOI: 10.18307/2011.0501. [陈旭, 羊向东, 董旭辉等. 近 50 年来环境变化对巢湖硅藻组合演替的影响. 湖泊科学, 2011, **23**(5): 665-672.]