

## 太湖流域西沱摇蚊亚化石群落对湖泊生态系统稳态转换的响应\*

张楚明<sup>1</sup>, 倪振宇<sup>2</sup>, 唐红渠<sup>1\*\*</sup>

(1: 暨南大学地下水与地球科学研究院, 广州 510632)

(2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**摘要:** 探究湖泊生态系统稳态转换机制对科学管理湖泊环境具有重大的意义. 本文通过西沱沉积岩芯 XJ2018 中的生物指标(摇蚊亚化石)及地球化学指标(总氮和总磷), 探讨了其环境演变历程以及生态系统的稳态转换. 摇蚊亚化石群落变化和系统突变指数(RSI)结果均表明, 西沱生态系统在近 40 年内经历了明显的稳态转换. 1990s 前, 湖泊营养状态较低, 水生植被覆盖度较高, 摇蚊群落以附植型摇蚊(*Cricotopus trifasciatus*, *Dicortendipes* spp.) 为主, 广食性的长足类摇蚊丰度最低, 此时西沱为草型-清水态湖泊; 以 1990 年为节点一直到 2000 年前后, 由于宜兴市围网养鱼以及农业发展迅速, 湖泊营养状态在较短的时间内, 发生了一次显著的转变, 附植型类群逐步减少, 广食型类群(*Tanytus chinensis*, *Microchironomus tabarui*)暴发且逐步占据统治地位, 湖泊营养化程度逐渐加剧, 由草型逐步向藻型过渡; 2000—2010 年, 湖泊生态系统进一步恶化, 附植型类群几乎消失, 广食型长足亚科(*Tanytus chinensis*, *Procladius choreus*)占绝对优势, 2010 年以后, 附植型摇蚊类群的恢复和广食型摇蚊数量的下降, 表明随着生态保护的重视和生态治理的实施, 西沱环境略有改善, 但藻型富营养湖泊的状态仍未改变.

**关键词:** 摇蚊亚化石; 西沱; 富营养化; 稳态转换

## Tracking ecosystem regime shifts in Lake Xijiu (Taihu Basin) based on chironomid sub-fossil assemblages\*

ZHANG Chuming<sup>1</sup>, NI Zhenyu<sup>2</sup> & TANG Hongqu<sup>1\*\*</sup>

(1: Institute of Groundwater and Earth Sciences, Jinan University, Guangzhou 510632, P.R.China)

(2: Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

**Abstract:** Tracking regime shifts and procession of transforming ecosystem is an essential and efficient approach for lake management. In this study, a sediment core labeled XJ2018 (31°23'48.8"N, 119°43'33.8"E) was extracted and analyzed for reconstructing the past transitional processes of Lake Xijiu based on the biological (chironomid subfossils) and geological parameters (total nitrogen and total phosphorus). The changes of chironomid subfossil assemblage structure and the results of STARS based on PCA scores of chironomid assemblages both indicated Lake Xijiu had undergone a distinct stable-state transition in the past 40 years. The RSI index combined F-test revealed that an ecological shift took place in 1990s. Before 1990, there are high aquatic vegetable coverage and the chironomid was characterized by the macrophyte-related taxa (*Cricotopus trifasciatus* and *Dicortendipes* spp.), thus the ecosystem in this stage can be regarded as plants dominated clear state. In 1990–2000, a remarkable ecology shift was detected due to the enclosed fish-farming and rapid agriculture developments, the macrophyte-related taxa have been gradually reduced while the euryphagic taxa (*Tanytus chinensis* and *Microchironomus tabarui*) has increased and gradually occupied a dominant position. The water status had been changed into the phytoplankton dominated turbid-water. During 2000–2010, the lake ecosystem deteriorated further and the macrophyte-related taxa were almost disappeared. After 2010, The reappearance of some macrophyte-related taxa and the decline of the euryphagic taxa indicate that with the implementation of the ecological restorations and managements, the environment of Lake Xijiu has improved slightly, but the phytoplankton dominated turbid-water was still sustained.

**Keywords:** Chironomid subfossil; Lake Xijiu; eutrophication; regime shift

\* 2019-06-05 收稿; 2019-07-16 收修改稿.

国家自然科学基金项目(41672346, 41572337)资助.

\*\* 通信作者; E-mail: townningt@gmail.com.

富营养化是全球水生生态系统目前面临的最普遍最严峻的环境问题之一<sup>[1]</sup>. 湖泊的富营养化会引起藻类暴发, 导致水质恶化, 生态系统发生稳态转换. 研究表明, 在高营养盐的负载下, 以浮游植物为主的浊水态较稳定, 而在低营养盐的负载下则以大型水生植被为主的清水态较稳定<sup>[2]</sup>. 通常, 在中间范围往往表现为两种稳定状态的共存或转换. 自然状态下, 富营养化过程非常缓慢, 但人类活动强度的增大会迅速打破自然演替过程, 仅数十年或更短时间内就可使之从草型清水状态转化为藻型浊水状态. 长江中下游地区的人口密度较高, 经济活动强度大, 流域受到的环境压力大. 近年来, 对长江中下游湖泊的稳态转换研究已陆续开展<sup>[3-4]</sup>. 探究湖泊的稳态转换对于获得湖泊变化早期预警信号、科学管理湖泊具有重大意义<sup>[5]</sup>.

稳态转换需要建立在湖泊长期变化趋势上, 传统的生态调查往往以季度或月份为单位, 难以满足稳态转换过程所需时间, 湖泊沉积物能够很好地记录并指示湖泊及其流域环境演变过程<sup>[6]</sup>, 是探究湖泊长期演化过程的重要材料. 摇蚊幼虫具有较难分解的几丁质头壳, 能够在湖泊沉积物中保存下来, 易于提取和鉴别, 是研究湖相沉积物重要的生物标识物<sup>[7]</sup>. 由于其广布性以及对环境变化敏感等特性, 一直倍受湖沼学家所关注, 其群落的不同组合能够有效地反映过去环境的变迁, 反映湖水营养状态的变化<sup>[8]</sup>, 根据摇蚊的生态属性划分的类群, 对指示湖泊状况<sup>[9]</sup>, 响应系统稳态变化具有重要作用<sup>[10-11]</sup>.

浅水湖泊水生植被的多寡对生态系统的稳态转变起着至关重要的作用, 同时对摇蚊群落也有重要影响. 附植型摇蚊是指与水生植物相关的所有摇蚊类群的集合, 依据摇蚊栖息场所或食性通常包含两大类, 一类是直接以水生植物的茎秆或枝叶为栖息场所, 在其表面钻蛀或筑巢, 由于此类摇蚊直接生活在水草上, 转移能力相对较差, 故与水生植被紧密关联, 这类属种主要包括 *Cricotopus*、*Polypedilum*、*Phaenopsectra*、*Endochironomus* 以及部分 Tanytarsini 等, 这里统称为直接附植型类群 (Primary macrophyte-related species), 包括食草型 (phytophagous chironomids) 和居住型 (leaf-dwelling chironomids) 两亚类; 另外一类属于间接性, 由于水生植被提供觅食场所, 摇蚊属种为追逐活体食物而长期栖息在水草之中, 主要包括一些肉食性的哈族成员 (如典型的 *Cladopelma*、*Harnischia*) 和长足成员 (如 *Ablabesmyia*、*Zavrelimyia*), 这部分成员机动性较强, 随着水生植被的消退或水草中活体食物 (主要是浮游动物) 的减少, 其幼虫可转向其他区域觅食, 故将此类摇蚊统称为次级或间接附植型 (Secondary macrophyte-related species) 或伞护物种 (Umbrella species), 但并非所有的哈族成员都为捕食型, 部分长足类觅食宽广, 摄食区域更倾向于开阔水域, 如典型的 *Procladius*、*Tanypus*<sup>[12-13]</sup>. 因此, 可以利用沉积物中具有指示性的特定摇蚊组合反演过去的水体健康状态和生态系统转变.

自改革开放之后, 太湖周边的附属水系入湖污染负荷持续增加<sup>[14]</sup>. 西沱作为太湖西岸入湖口, 承接了大量的入湖污染物, 同时西沱的 3 个荡来水—马公荡、临津荡和都山荡等周边的众多企业, 如合成革企业、化工企业、电子企业等都是西沱主要的污染来源, 随着企业发展迅速, 其水体污染较为严重. 目前, 有关西沱的古湖沼研究相对较少, 主要集中在重金属、底泥营养等方面<sup>[15-16]</sup>, 而缺乏对该湖的稳态演替研究. 为探究西沱生态系统的污染进程及其系统稳态转变, 本文利用沉积柱摇蚊亚化石群落和地球化学指标, 重现了西沱环境演替和稳态转变的详细过程, 以期以西沱的科学管理和太湖流域的污染防控研究提供指导.

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

西沱位于江苏宜兴市, 位于“三沱”的最西端 (图 1), 西沱总面积为 10.7 km<sup>2</sup><sup>[17]</sup>, 最大水深 5.8 m, 平均水深 1.85 m, 为太湖西部的附属湖泊之一, 由入湖的古漂河水系演变而来, 是承接宜漂河水进入太湖前的第一站. 宜兴地区流入太湖的水量以及污染负荷最大约占太湖总量的 50% 以上<sup>[18]</sup>. 近几十年来, 随着社会发展, 太湖上游流域入湖污染负荷的增加是导致近年太湖水质下降的主要因素<sup>[19]</sup>, 1970s 以来, 西沱所处的西太湖区大部分水域出现严重的藻型富营养化, 许多水生植被消失, 水质恶化<sup>[20]</sup>. 随着宜兴市城市化进程的加快, 其水体水质持续性恶化, 蓝藻、水华等水体污染现象也频繁暴发<sup>[17]</sup>.

### 1.2 样品采集与分析

2018 年 7 月 22 日, 利用重力采样器在西沱 (31°23'48.8"N, 119°43'33.8"E) 获取沉积岩芯 XJ2018, 将所采集的柱状样在 GEO TEK 平台上以 1 cm 间隔进行切割分样, 样品冷冻干燥 24 h, 使样品完全干燥后转移到黑色封口袋, 置于干燥箱中保存, 用于后续分析. 沉积物中的地球化学指标 (总氮、总磷) 采取过硫酸盐氧化

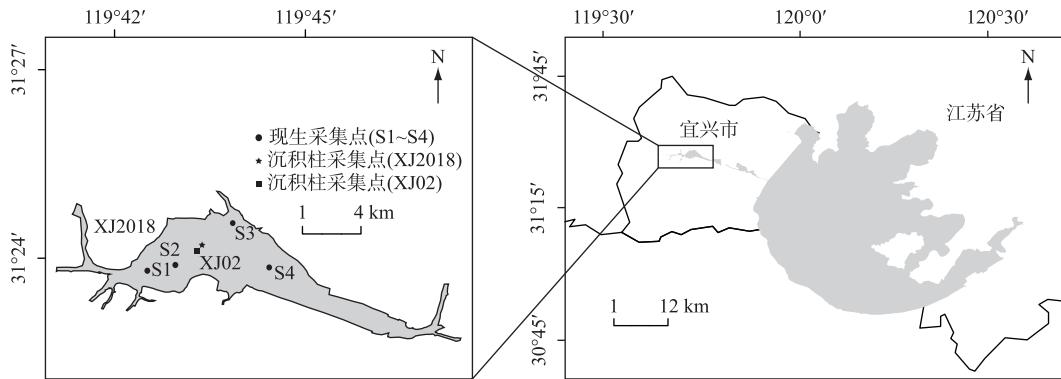


图1 江苏西沭湖及采样点位置

Fig.1 Location of Lake Xijiu in Jiangsu Province and the sampling sites

法<sup>[21]</sup>测定,其中总氮浓度使用紫外法测定,总磷浓度使用钼锑抗比色法测定.称取5 g沉积物样品放入模具中,利用对X射线荧光没有吸收且不参与分析的硼酸作为镶边垫底的材料制作成压片后利用X射线荧光光谱法(X Ray Fluorescence, XRF)测定沉积物中的重金属元素.重复测试求其结果的平均值,若偏差小于5%则表明实验结果可靠.两项指标均在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完成.

摇蚊亚化石样品采取标准方法处理,样品于10%的KOH溶液中水浴加热(75℃)分散处理15~30 min后,过套筛(212 μm/90 μm)后,转移冲洗干净的底质至表面皿中挑拣,将所有挑出的头壳用Euparal胶封片<sup>[22]</sup>.为精准鉴定及校正沉积柱的摇蚊亚化石种类,获取部分摇蚊个体生态信息,在沉积柱周遭的敞水区、水草区以及河流交汇区,利用Ekman Grab(30 cm × 30 cm)共采集了4个位点的底泥样品,从而获得现生幼虫样品.现生样品经过250 μm过筛之后,迅速转移到样品袋,加入85%的酒精保存,带回实验室挑拣;部分成虫样品在水草繁茂区通过扫网获得.所有摇蚊样品(亚化石、幼虫、成虫)均在100~400倍生物显微镜下进行鉴定<sup>[23-24]</sup>.部分属种个体生态习性的划分参考了本次现生材料及相关历史文献<sup>[25-26]</sup>.

### 1.3 数理统计分析

为减少摇蚊稀有种的影响,选择至少在两个样品中出现,并且其中一个样品中百分比超过2%的常见摇蚊属种进行统计分析,摇蚊相对丰度组合图谱在Tilia Graph程序<sup>[27-28]</sup>完成,使用CONISS聚类分析进行摇蚊组合分区<sup>[29]</sup>;通过降维对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA)得知物种分布符合主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)的线性假设,故用PCA分析摇蚊组合变化的环境意义;为进行时间序列上西沭生态系统突变点的检测,使用Rodionov提出的STARS(Sequential T-test Algorithm for Analyzing)进行突变检测,计算出突变指数(RSI, Regime Shift Index)<sup>[30]</sup>.同时,使用Strucchange算法进行连续F检验来验证突变点的发生,当F统计值出现峰值,则表明系统结构重组<sup>[31]</sup>;摇蚊群落的多样性采用香农-威纳指数 $H'(H' = -\sum_{i=1}^S (n_i/N) \log_2(n_i/N))$ 和辛普森多样性指 $D(D = 1 - \sum_{i=1}^S (n_i/N)^2)$ 分析,其中S为物种数, $n_i$ 为第i种的物种个数,N为群落总的物种个数.

## 2 结果分析

### 2.1 年代序列与环境指标

研究表明,可以通过元素变化趋势的对比,获取平行岩芯的基本年代序列<sup>[32]</sup>.孙照斌等对西沭沉积岩芯(XJ02)进行了重金属元素分析,其中Cu元素的含量变化趋势与本研究测定结果具有很好的一致性<sup>[33]</sup>.通过对比发现,XJ02岩芯Cu元素含量从1970年开始显著上升,对应XJ2018岩芯的39 cm深度处,随后其峰值出现在1990年左右,对应XJ2018岩芯的30 cm处(图2a).为验证年代框架的可靠性,我们进一步计算了XJ2018岩芯的平均沉积速率,结果表明1970—1990年的平均沉积速率约为0.45 cm/a,而1990年至今平

均沉积速率明显加快,约为 1.07 cm/a,前后相差 2.4 倍,这与 XJ02 岩芯的研究结果基本一致<sup>[15]</sup>. 综上所述,建立 XJ2018 沉积岩芯的年代序列(图 2b).

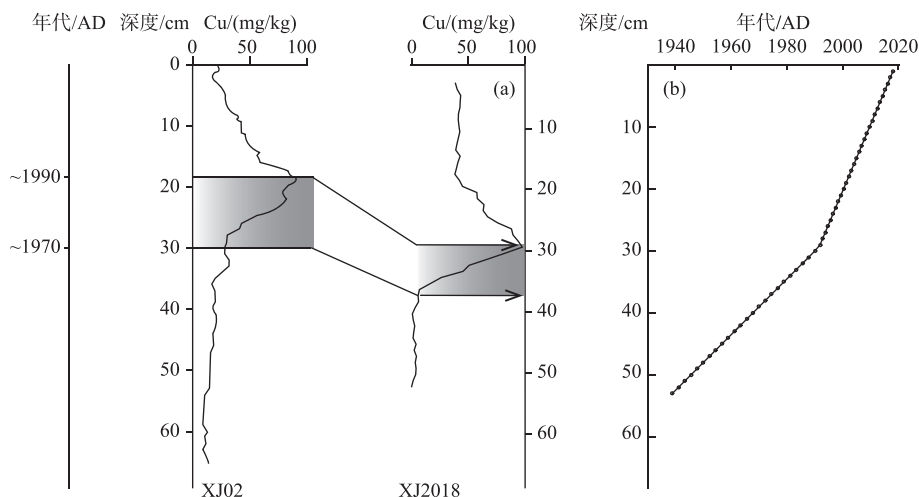


图 2 西沱沉积岩芯 XJ02 和 XJ2018 的 Cu 元素变化趋势对比(a); XJ2018 沉积岩芯年代与深度关系曲线(b)

Fig.2 Copper element variation trends of XJ02 and XJ2018 in Lake Xijiu(a);  
Age-depth relationship curves of XJ2018(b)

## 2.2 摇蚊群落演替

本研究共鉴定西沱沉积岩芯柱摇蚊 1423.5 头,共 3 亚科 31 属种,其中长足摇蚊亚科所占百分含量最大(占 58.8%),以 *Tanytus chinensis* 和 *Procladius choreus* 为主,而摇蚊亚科为西沱摇蚊物种数最多的类群(有近 20 种),百分含量为 39.5%. *Tanytus chinensis* 为岩芯柱的绝对优势种,平均百分含量达到 41.4%. 其他占比较大的属种依次是: *Microchironomus* spp. (14.9%)、*Procladius choreus* (9.8%)、*Dicortendipes* spp. (9.7%) 和 *Cricotopus* spp. (9%) 等. 根据 CONISS 分析将摇蚊群落划分为 3 个组合带(图 3),分别为 Zone1、Zone2 和 Zone3,其中 Zone3 可进一步区分为 Zone3a 和 Zone3b.

Zone1: 36~30 cm(1990 年前),此时期 *Cricotopus trifasciatus*、*Dicortendipes septemmaculatus* 相对丰度分别可达 21.43%、20.34%,*Mirochironomus tener* 丰度最大,可达 41.56%. 其他物种零星分布. 附植型摇蚊属种丰度最多,最大可达 57.12%. 附植型/广食型摇蚊比值较大,此阶段主要为附植型摇蚊占主导地位.

Zone2: 30~20 cm(1990—2000 年),附植型摇蚊 *Cricotopus trifasciatus*、*Polypedilum tigrinum* 以及 *Dicortendipes septemmaculatus* 等属种呈下降趋势;广食型物种 *Mirochironomus tabarui*、*Chironomus plumosus*、*Procladius choreus* 等开始增多,附植型与广食型摇蚊比例明显下降,表明以 *Tanytus chinensis* 为主要代表的广食型摇蚊开始增加,其百分含量达到 60% 左右;整个摇蚊群落结构显著改变.

Zone3a: 20~10 cm(2000—2010 年),此阶段的 *Tanytus chinensis* 百分含量达到最大,最高达 76%; *Procladius choreus* 逐渐增加;形成以 *Tanytus chinensis* 和 *Procladius choreus* 为主的群落结构;附植型属种相对前一时期有所上升,但丰度仍很低;Zone3b: 10~0 cm(2010—2018 年),湖泊优势种 *Tanytus chinensis* 百分含量开始逐渐降低,此时期附植型属种开始逐渐恢复,附植型摇蚊属种与广食型属种的比例也表明广食型物种开始下降,附植型物种恢复.

摇蚊头壳浓度在 Zone2 最大,约 5 头/g,从 Zone2 后,头壳浓度逐渐减少,到 Zone3b 稍有增加. 生物多样性以及辛普森指数在 Zone1 时最大,在 Zone2~Zone3a 持续减小,随后在 Zone3b 逐渐恢复. 总体而言,通过摇蚊组合图谱可知西沱摇蚊种类较丰富,群落格局变化较明显.

## 2.3 理化数据分析

西沱湖沉积柱 XJ2018 的 TN、TP 含量变化特征如图 3 所示,其中 TN、TP 含量在沉积柱的上半部分波动

较大. 1990 年之前,TN、TP 含量相对较低,整体变化幅度几乎很小;1990—2000 年,TN 含量在 25 cm 处达到最大值 2.32  $\mu\text{g}/\text{mg}$ ,TP 含量略微增加但是幅度仍很小;2000—2010 年期间,TN、TP 含量的变化最为剧烈,TP 含量明显增加,最大值达到 1.09  $\mu\text{g}/\text{mg}$ ,TN 含量也达到最大值 3.12  $\mu\text{g}/\text{mg}$ ;在 5 cm 处 TN、TP 含量呈现处先增后降的趋势,接近表层时 TN 含量降低到 1.28  $\mu\text{g}/\text{mg}$ ,TP 含量降低到 0.47  $\mu\text{g}/\text{mg}$ .

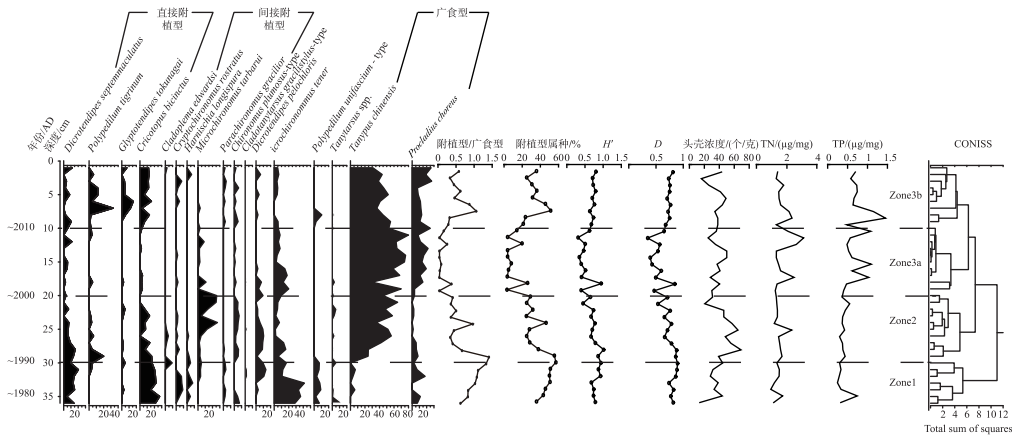


图 3 西沭沉积岩芯中主要摇蚊属种、生物指数及地化指标  
Fig.3 Chironomid stratigraphy with relative abundance,  
biological index and geochemical indicators in Lake Xijiu

2.4 空间多维分析

主成分分析(PCA) (图 4)表明样点分布结果与摇蚊组合带聚类结果一致. PCA 的轴得分对应于摇蚊组合随环境梯度演变的过程. PCA 1 轴解释份额(38.41%)明显比第 2 轴(13.68%)大,PCA 1 轴可以代表西沭生态系统变化的趋势,沉积物中摇蚊亚化石属种组合变化主要体现在 PCA 1 轴上. 顺着箭头方向,Zone1 和 Zone3a 分别位于轴的左右两侧分区明显,Zone2 及 Zone3b 同时横跨左右两轴,以 Zone2 跨度最大,随着 PCA1 轴得分减小,样点呈现由 Zone1 到 Zone3b 的转变.

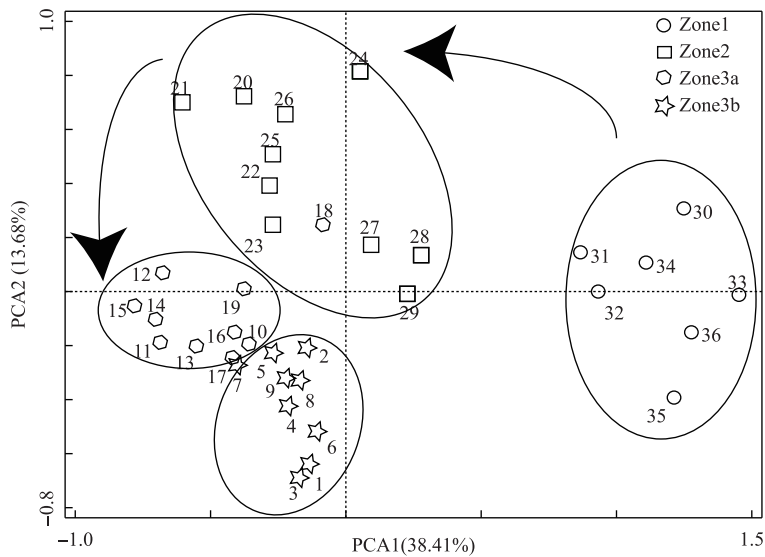


图 4 西沭摇蚊样品 PCA 排序结果  
Fig.4 PCA ordination results of chironomid assemblage in Lake Xijiu

STARS 检测(图 5)结果显示生态系统共出现 3 个突变值,其中,1990s 突变指数  $RSI$  值为-2.45,突变最为显著,1997s 的  $RSI$  值为-0.62,2008 年突变点  $RSI$  值为 0.62. 利用 Strucchange 检测得到的突变点出现在沉积柱 30 cm(1990 年附近)处(图 6),与 STARS 检测的 1990s 处的突变值所在位置一致,故可进一步证明在 1990 年左右西沱生态系统发生重大转变. 而在 1997 年以及 2008 年检测到的突变点与摇蚊群落的变化相似,此时湖泊可能在某程度上发生了变化,仍需要综合更多因素去确认湖泊生态系统是否发生转变.

### 3 讨论

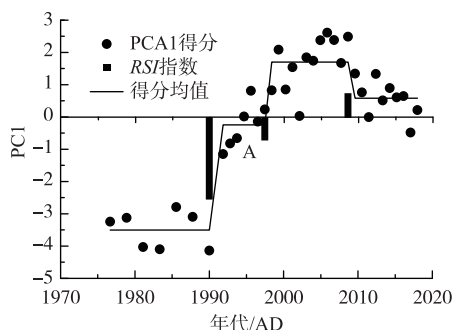


图 5 STARS 检测的生态系统突变过程

Fig.5 Regime shifts detected through STARS

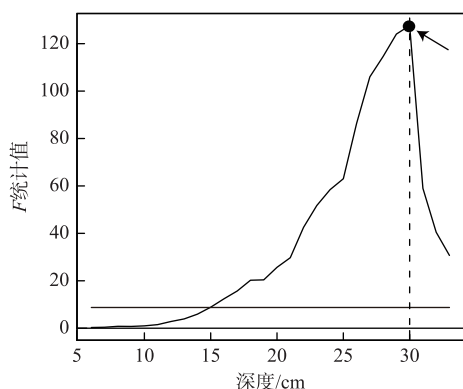


图 6  $F$  检测的生态系统突变点

Fig.6 Regime shifts point detected through  $F$ -test

目前,长江中下游众多湖泊的生态系统不稳定性显著,如太湖在 1990—1995 年期间发生过稳态转换<sup>[34]</sup>. 西沱摇蚊群落以及营养指标的变化表明西沱在 1990s 出现一次较大的突变. STARS 分析结合 Strucchange 算法检验的结果(图 5,图 6)也表明,西沱以 1990s 为节点,全湖由一种稳态向另一种稳态转变. 1990s 前,西沱摇蚊群落主要以附植型类群较多,如 *Cricotopus* 以及 *Dicortendipes* spp. 等,其他属种虽零星分布但整体多样性较高. 研究表明 *Cricotopus* 大量出现在长江中下游的典型草型湖泊中,如洪湖、青菱湖、龙感湖等<sup>[35]</sup>,由此可知该时期西沱沉水植物的覆盖度较高,为草型-清水态湖泊,其营养水平较低,水质良好,这与相关研究结论一致<sup>[36]</sup>. 自 1990s 后,太湖流域工农业现代化、城市化进程加快<sup>[37]</sup>,大量氮、磷营养盐输入太湖,湖泊营养污染严重,其原因主要是农业大量使用化肥、生产生活污水的排放、大规模畜禽养殖以及水域网箱养殖等. 宜兴市养殖业在 1980s 后期得到蓬勃发展,围网养鱼的面积大幅度增加<sup>[38]</sup>,渔业养殖投入的大量有机物、营养物以及鱼类的排泄物等使水体中氮磷浓度增加<sup>[39]</sup>. 进入 1990s,西沱流域的农业施用化肥总量<sup>[40]</sup>以及畜禽养殖污染负荷<sup>[41]</sup>也进一步增加. 通常,与大型水生植被共生的摇蚊属种的减少时常伴随着湖泊富营养化的发生<sup>[42]</sup>,此时期西沱摇蚊群落中附植型物种相对丰度低,且广食型属种 *Tanytus chinensis* 成为绝对优势种,证明西沱正经历富营养化的阶段. *Tanytus chinensis*、*Chironomus plumosus* 等属种均具有较高的污染耐受度,往往指示湖泊营养化程度较高<sup>[10,24]</sup>,此时期太湖流域各湖泊的沉水和浮叶植被退化现象较严重<sup>[20]</sup>,西太湖一带水域的蓝藻水华频繁暴发,*Microchironomus tabarui* 作为蓝藻频发的太湖、巢

湖的绝对优势种<sup>[35]</sup>,它的增加也进一步表明了西沱生态系统由草型清水状态转变成藻型浊水态.

2000 年后,西沱生态系统以广食型摇蚊属种 *Tanytus chinensis*、*Procladius choreus* 等耐污属种为主的摇蚊组合格局逐步建立,2000 年来,太湖流域蓝藻频繁暴发,在 2004 年前后西太湖流域几乎无水生植被的生长<sup>[20]</sup>,广食型耐污种 *Tanytus chinensis* 和 *Procladius choreus* 含量达最大,此时期的营养化程度最高,藻型浊水态越趋稳定. 2010 年后附植型属种开始恢复,物种多样性以及均匀度也增加,说明这 10 年间湖泊环境污染程度有所减缓,原因是该阶段一系列的环保政策的实施使得污染在一定程度上得以控制,使得西沱的入湖污染物有所减少,但尽管众多的环保政策的推行与实施,富营养化的稳定状态仍未改变. 本文仅针对摇蚊群落以及营养指标作为探讨稳态转换的依据,但氮磷等营养盐只是湖泊生态系统转换的先决条件而不是充要条件. 湖泊生态系统状态的变化通常是内外各种驱动力综合影响的结果<sup>[43]</sup>,如西沱流域化工、有色金属的



冶炼、电镀以及压延工业规模扩大导致废水排放量增加<sup>[44]</sup>,沉积物中重金属元素 Cu(图 2)和 Zn、Hg、Pb 等(未发表数据)的含量在 1990s 也有显著增加趋势. 虽从整体上看西泔生态系统稳态转换的驱动因子为营养盐,但对于长时间序列来说,不同时期的触发因素可能各有差异. 对于湖泊演化的进程更应综合考虑各方面的要素,如气候、水文、人类活动等,以便更全面地了解西泔生态系统转换的进程.

#### 4 结论

本文利用摇蚊亚化石作为湖泊环境重建的代用指标,结合 TN、TP 等指标分析,揭示了西泔由草型-藻型转变的历史进程. 西泔在 1990 年左右经历了稳态转换,附植型摇蚊属种逐渐减少,富营养指示种大量出现,在营养物质的持续输入下,西泔由以水生植被为主的湖泊向藻型富营养湖泊状态转变;2000—2010 年,以 *Tanytus chinensis* 以及 *Procladius choreus* 为主要优势种的摇蚊群落结构建立,藻型湖泊状态逐渐稳定,2010 年前后随人为干预、环境保护政策的实行和生态修复的开展,湖泊环境状态稍有好转,但现有格局生态系统未发生明显改变,从湖泊长期演化序列以及稳态转换过程的角度看,仍需制定科学高效的长期管理措施.

致谢:感谢宜兴市徐舍水上中队在采样过程中给与的帮助,感谢段昌兵提出修改建议!

#### 5 参考文献

- [1] Schinder DW. Recent advances in the understanding and management of eutrophication. *Limnology and Oceanography*, 2006, **51**(1, part 2): 356-363.
- [2] Janse JH, Domis LNDS, Scheffer M *et al.* Critical phosphorus loading of different types of shallow lakes and the consequences for management estimated with the ecosystem model pclake. *Limnologia-Ecology and Management of Inland Waters*, 2008, **38**(3/4): 203-219. DOI: 10.1016/j.limno.2008.06.001.
- [3] Zheng WX, Wang R, Zhang EL *et al.* Diversity and stability dynamic of chironomid assemblages in the last two centuries of Lake Yangzong, Yunnan Province. *J Lake Sci*, 2018, **30**(3): 847-856. DOI: 10.18307/2018.0326. [郑文秀, 王荣, 张恩楼等. 近 200 a 来云南阳宗海摇蚊群落多样性及稳定性变化. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 847-856.]
- [4] Zhao YJ, Wang R, Yang XD *et al.* Regime shifts revealed by paleoecological records in Lake Taihai'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湖生态系统稳态转换过程. 湖泊科学, 2016, **28**(6): 1381-1390.]
- [5] Liu SM, Liu L, Wang Q. Review on catastrophic shifts in ecosystems. *Ecological Science*, 2017, **36**(2): 186-192. [刘书敏, 刘亮, 王强. 生态系统灾难性突变研究进展. 生态科学, 2017, **36**(2): 186-192.]
- [6] Battarbee RW. Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. *Quaternary Science Reviews*, 2000, **19**(1): 107-124. DOI: 10.1016/S0277-3791(99)00057-8.
- [7] Walker IR. Late-quaternary paleoecology of chironomidae (Diptera: Insecta) from lake sediments in british columbia [Dissertation]. Burnaby: Simon Fraser University, 1988.
- [8] Langdon PG, Ruiz Z, Brodersen KP *et al.* Assessing lake eutrophication using chironomids: Understanding the nature of community response in different lake types. *Freshwater Biology*, 2010, **51**(3): 562-577. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2005.01500.x.
- [9] Cao YM, Zhang EL, Langdon PG *et al.* Chironomid-inferred environmental change over the past 1400 years in the shallow, eutrophic Taihai Lake (south-east China): Separating impacts of climate and human activity. *The Holocene*, 2014, **24**(5): 581-590. DOI: 10.1177/0959683614522308.
- [10] Brodersen KP, Quinlan R. Midges as palaeoindicators of lake productivity, eutrophication and hypolimnetic oxygen. *Quaternary Science Reviews*, 2006, **25**(15/16): 1995-2012. DOI: 10.1016/j.quascirev.2005.03.020.
- [11] Little J, Smol J. Changes in fossil midge (chironomidae) assemblages in response to cultural activities in a shallow, polymictic lake. *Journal of Paleolimnology*, 2000, **23**(2): 207-212. DOI: 10.1023/A:1008005604602.
- [12] Newman RM. Herbivory and detritivory on freshwater macrophytes by invertebrates: A review. *Journal of the North American Benthological Society*, 1991, **10**(2): 89-114. DOI: 10.2307/1467571.

- [13] Merritt RW, Cummins KW. An introduction to the aquatic insects of North America. Kendall Hunt, 1996.
- [14] Yang LY, Yang XY, Ren LM *et al.* Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 18-27. DOI: 10.18307/2019.0102. [杨柳燕, 杨欣妍, 任丽曼等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 18-27.]
- [15] Wu YH, Jiang XZ, Liu EF *et al.* *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2008, (4): 471-476. [吴艳宏, 蒋雪中, 刘恩峰等. 太湖流域东汊、西汊近百年来的富集特征. 中国科学: 地球科学, 2008, (4): 471-476.]
- [16] Fan M. Analyzing of water pollution characteristic on Yixing and performance optimization of Al/Ca/Fe composite metallic oxides for phosphorus removal [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015. [范森. 宜兴市三汊水污染特征分析及 Al/Ca/Fe 复合型除磷吸附剂性能优化[学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.]
- [17] Zou MH. The distribution and evaluation of sediment nitrogen forms in urban lakes of Yixing city, Western Taihu Lake [Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018. [邹民虎. 太湖西岸宜兴城市内湖沉积物氮形态分布及污染评价[学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.]
- [18] Yan SW, Xu H, Zhang LL *et al.* Water quantity and pollutant fluxes of inflow and outflow rivers of Lake Taihu, 2009. *J Lake Sci*, 2011, **23**(6): 855-862. DOI: 10.18307/2011.0605. [燕姝雯, 余辉, 张璐璐等. 2009 年环太湖入出湖河流水量及污染负荷通量. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 855-862.]
- [19] Wu P, Qin BQ, Yu G *et al.* Effects of economic development on wastewater discharge and influent total phosphorus load in the upstream of Lake Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2016, **27**(6): 1107-1114. DOI: 10.18307/2015.0616. [吴攀, 秦伯强, 于革等. 太湖上游流域经济发展对废水排放及入湖总磷的影响. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1107-1114.]
- [20] Lei ZX, Chen GR, Xie YF *et al.* Management of aquatic macrophytes in Taihu Lake. *Environmental Science and Technology*, 2009, **32**(6): 189-194, 199. [雷泽湘, 陈光荣, 谢贻发等. 太湖大型水生植物的管理探讨. 环境科学与技术, 2009, **32**(6): 189-194, 199.]
- [21] Qian JL, Zhang LD, Le ML. Determination of soil total nitrogen and phosphorus by persulfate digestion. *Soil*, 1990, **22**(5): 258-262. [钱君龙, 张连弟, 乐美磷. 过硫酸盐硝化法测定土壤全氮全磷. 土壤, 1990, **22**(5): 258-262.]
- [22] Brooks SJ. Fossilmidges (Diptera: Chironomidae) as palaeoclimatic indicators for the eurasian region. *Quaternary Science Reviews*, 2006, **25**(15): 1894-1910. DOI: 10.1016/j.quascirev.2005.03.021.
- [23] Andersen T, Cranston P, Epler J. The larvae of the chironomidae (diptera) of the holarctic region, keys and diagnoses. Series: Insect systematics and evolution supplements (formerly entomologica scandinavica supplement). *Entomological Society of Lund, Suecia*, 2013, **66**: 573.
- [24] Brooks SJ, Langdon PG, Heiri O. The identification and use of palaearctic chironomidae larvae in palaeoecology. *Quaternary Research Association*, 2007, **276**. DOI: 10.1111/j.1365-2427.2007.01926.x.
- [25] Tang HQ. Biosystematic study on the chironomid larvae in China (Diptera: Chironomidae) [Dissertation]. Tianjing: Nankai University, 2006. [唐红渠. 中国摇蚊科幼虫生物系统学研究 (Diptera: Chironomidae) [学位论文]. 天津: 南开大学, 2006.]
- [26] Moller-Pillot HK. Chironomidae larvae of the netherlands and adjacent lowlands: Biology and ecology of the chironomini. Utrecht, KNNV publishing, 2009: 268.
- [27] Shu JW, Hang XZ, Xu DK *et al.* The latest Tilia software: Chinese manual and practise skills. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2018, **57**(2): 260-272. [舒军武, 黄小忠, 徐德克等. 新版 Tilia 软件: 中文指南和使用技巧. 古生物学报, 2018, **57**(2): 260-272.]
- [28] Grimm EC. Tilia version 1.11. Tiliagraph version 1.18. A Users Notebook. Illinois State Museum, Springfield, USA, 1991.
- [29] Grimm EC. Coniss: A fortran 77 program for stratigraphically constrained cluster analysis by the method of incremental sum of squares. *Computers & Geosciences*, 1987, **13**(1): 13-35.
- [30] Rodionov SN. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(9): 111-142. DOI: 10.1016/0098-3004(87)90022-7.
- [31] Kleiber C, Hornik K, Leisch F *et al.* Strucchange: An r package for testing for structural change in linear regression models. *Journal of Statistical Software*, 2002, **7**(2): 1-38.
- [32] Zhong CY, Su H, Yan HY. Industrial development of Hong Kong and its environmental impacts as recorded by sediment Pb variation in Shenzhen Bay, South China. *Advances in Oceanography & Marine Biology*, 2019, **1**(3): 1-6.
- [33] Sun ZB, Bing HJ, Wu YH *et al.* Contamination and potential ecological risk of heavy metals in lacustrine sediment core



- from Lake Xijiu, Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2009, **21**(4): 563-569. DOI: 10.18307/2009.0416. [孙照斌, 邴海健, 吴艳宏等. 太湖流域西沭湖沉积岩芯中重金属污染及潜在生态风险. 湖泊科学, 2009, **21**(4): 563-569.]
- [34] Xu D, Cai Y, Wu X *et al.* Regime shifts and resilience of the lake taihu social-ecological system under long-term external disturbance (1960s-2000s). *Clean-Soil, Air, Water*, 2015, **43**(4): 561-568. DOI: 10.1002/clen.201300870.
- [35] Cao YM. The spatio-temporal distribution of chironomid subfossil and its environmental indications in typical lakes from the middle and lower reaches of Yangtze River [Dissertation]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. [曹艳敏. 长江中下游地区典型湖泊摇蚊亚化石时空分布及环境意义 [学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2013.]
- [36] Qin BQ, Wang XD, Tang XM *et al.* Drinking water crisis caused by eutrophication and cyanobacterial bloom in Lake Taihu: cause and measurement. *Advances in Earth Science*, 2007, **22**(9): 896-906. [秦伯强, 王小冬, 汤祥明等. 太湖富营养化与蓝藻水华引起的饮用水危机——原因与对策. 地球科学进展, 2007, **22**(9): 896-906.]
- [37] Deng J, Wang Y, Liu X *et al.* Spatial distribution and risk assessment of heavy metals and as pollution in the sediments of a shallow lake. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, **188**(5): 296. DOI: 10.1007/s10661-016-5301-8.
- [38] Qin PY, Xu YF, Guo MB. Taihu Lake water environment and water resources protection. *Water Resources Protection*, 1990, (2): 36-39. [秦佩英, 徐芸芳, 郭孟朴. 太湖水环境和水资源保护. 水资源保护, 1990, (2): 36-39.]
- [39] Gu XH, Zhang SZ, Bai XL *et al.* Evolution of community structure of aquatic macrophytes in East Lake and its wetlands. *Acta Ecological Sinica*, 2005, **25**(7): 1541-1548. [谷孝鸿, 张圣照, 白秀玲等. 东太湖水生植物群落结构的演变及其沼泽化. 生态学报, 2005, **25**(7): 1541-1548.]
- [40] Liang YH. The actualities, problems and countermeasures of soil and fertilizer in Yixing city, Tai Lake area [Dissertation]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2004. [梁永红. 太湖地区宜兴市土壤肥料现状问题与对策 [学位论文]. 南京: 南京农业大学, 2004.]
- [41] Huang W, Nie E, Li JH *et al.* Study on the spatiotemporal change of pollutant load from livestock and poultry manure in Yixing City. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2013, **34**(7): 64-69. [黄威, 聂耳, 李纪华等. 宜兴畜禽粪便污染负荷时空变化研究. 家畜生态学报, 2013, **34**(7): 64-69.]
- [42] Zhang EL, Cao YM, Liu EF *et al.* Chironomid assemblage and trophic level of Lake Taibai 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 年来湖北太白山摇蚊记录与湖泊营养演化. 第四纪研究, 2010, **30**(6): 1156-1161.]
- [43] 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.]
- [44] Xie HB. Probe on the strategies of water environmental protection in Taihu River Basin. *Environmental Protection*, 2002, (4): 25-26. [谢红彬. 对太湖流域水环境保护对策的思考. 环境保护, 2002, (4): 25-26.]