

城郊湖泊大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系——以武汉市为例

陈璇^{1,2}, 孟建军^{1,2}, 孙聪^{1,2}, 汪剑^{1,2}, 邓平³, 戴煜泰⁴, 韩晓芳⁵, 李丽雪⁵

(1.武汉市市政建设集团有限公司, 武汉 430015; 2.武汉生态环境设计研究院有限公司, 武汉 430050; 3.武汉市农业科学院, 武汉 430070; 4.湖北大学 资源环境学院, 武汉 430062; 5.江汉大学 环境与健康学院, 武汉 430056)

摘要:对武汉市5个城郊湖泊的底栖动物群落组成与水环境因子的关系进行了研究。调查中共检出底栖动物29种, 主要优势种为霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、环棱螺(*Bellamya* sp.)和水丝蚓(*Limnodrilus* sp.), 均为喜有机质的耐污种; 水体理化指标表明5个湖泊呈高度富营养化, 除叶绿素 a 质量浓度之外, 各湖的理化因子间存在显著性差异。典范分析(CCA)与冗余分析(RDA)分析表明, 水体中的总氮(TN)和总磷(TP)与环节动物密度正相关, 与软体动物呈负相关; 透明度(SC)与各湖泊优势种相关性差异较大; 叶绿素 a 则对优势种影响较弱或无明显影响。基于底栖动物指示物种进行水质评价结果显示, Wright指数评级偏优, Goodnight-Whitley生物指数及BPI相对重要性指数近似, 调查的5个城郊湖泊处于轻污染至 β -中污染, 与水质调查的结果相近。研究有助于准确把握武汉市城郊湖泊生态系统的特征和状态, 为城郊湖泊资源的合理利用和生态修复提供科学依据。

关键词:城郊湖泊; 底栖动物; 水环境因子; 指示物种

中图分类号: X524

文献标志码: A

文章编号: 1000-2367(2025)03-0035-07

湖泊生态系统具有调节气候、提供生物栖息地等多种作用^[1]。大型底栖动物作为湖泊生态系统中一个重要生物类群, 因其独特的生态特征而显得尤为重要。它们拥有较长的生命周期、较弱的迁移能力、对环境变化敏感等特点, 使得大型底栖动物成为反映湖泊生态环境健康状态的生物指示器^[2-4]。在实际研究中, 大型底栖动物在水质评价中广泛应用, 例如, 马陶武等^[5]利用大型底栖动物综合生物指数评价了太湖水质, 张翔等^[6]研究了太湖湖滨带大型底栖动物群落结构与水质的紧密关系。近年来, 随着人类活动的不断增加, 湖泊水环境面临着前所未有的挑战, 其中水体富营养化问题尤为突出。这一现象不仅严重破坏了湖泊生态系统的平衡, 也对大型底栖动物的群落结构产生了深远的影响^[7-8]。因此, 深入探讨大型底栖动物群落结构与水环境因素之间的关系, 对于湖泊水生态保护十分必要。

随着城市的快速发展, 人们对于城市湖泊生态系统的影响不断增加, 一些原本位于城郊的湖泊逐步被城市包围, 这些湖泊富营养化问题日益显现^[9-10]。但关于这些城郊湖泊底栖动物群落结构的研究却相对匮乏。对这些湖泊的底栖动物群落结构进行调查, 可以加深对城郊湖泊生态系统结构和功能的理解, 有助于准确掌

收稿日期: 2024-03-15; **修回日期:** 2024-05-29.

基金项目: 国家自然科学基金(32271643); 武汉市市政建设集团有限公司科技计划资助项目(wszky202113); 武汉市教育局产学研项目(CXY201604).

作者简介: 陈璇(1977—), 女, 湖北武汉人, 武汉市市政建设集团有限公司高级工程师, 研究方向为环境保护与治理, E-mail: 438835775@qq.com.

通信作者: 邓平, 博士, 研究方向为水生态, E-mail: 17004319@qq.com.

引用本文: 陈璇, 孟建军, 孙聪, 等. 城郊湖泊大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系——以武汉市为例[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 35-41. (Chen Xuan, Meng Jianjun, Sun Cong, et al. The relationships between macroinvertebrate community structure and water environmental factors in suburban lakes: a case study in Wuhan City[J]. Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition), 2025, 53(3): 35-41. DOI: 10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.03.15.0002.)

握城郊湖泊生态系统的特征和状态.同时,探究城郊湖泊水环境因子与底栖动物群落结构之间的关系,可以进一步揭示城郊湖泊生态系统的运行机制,为城郊湖泊资源的科学合理利用和生态修复提供科学依据.

1 研究区域与方法

1.1 研究区域及样点

研究聚焦武汉市黄陂区和汉南区的 5 个城郊湖泊,它们均处于北亚热带季风性气候带,区域内年降水量高,夏季高温、雨热同季.这些湖泊历史上曾受大面积围垦和水产养殖等人类活动影响,但自 2015 年《武汉市湖泊保护条例》实施以来,湖泊形态和面积变化较小,大规模的水产养殖已经逐步被取缔,湖泊进入生态恢复阶段.黄陂区安汉湖(114°9′23″E,30° 27′38″N)面积 0.65 km²,平均水深 0.85 m,布设样点 8 个;黄陂区姚子海(114° 5′28″E,30° 21′20″N)面积 1.8 km²,平均水深 2.08 m,布设样点 10 个;汉南区项家汊(114° 21′54″E,30° 45′31″N)面积 0.70 km²,平均水深 0.92 m,布设样点 6 个;汉南区桂子湖(114° 27′2″E,30° 47′26″N)面积 0.12 km²,平均水深 3.11 m,布设样点 7 个;汉南区西边湖(114° 11′48″E,30° 46′25″N)面积 0.46 km²,平均水深 0.86 m,布设样点 13 个.结合湖泊蓝线与湖湾分布特点,样点布设采用均匀布点法,并尽可能将样点布设至所有湖湾.

1.2 样品采集与分析

样品采集与分析于 2022 年 5 月进行.使用塞氏盘现场测定样点透明度(SC),其他指标带回实验室测试分析.其中,化学需氧量(COD)使用快速测定法,氨氮(NH₃-N)使用纳氏试剂比色法,总氮(TN)使用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法,总磷(TP)使用钼酸铵分光光度法,叶绿素 *a* (Chl *a*)使用分光光度法进行测定.底栖动物采样点同水样调查样点,利用 1/16 彼得逊采泥器采集湖泊沉积物,用底栖生物网清洗后,带回实验室挑拣和固定.通过显微镜和解剖镜观察,将底栖动物鉴定到种,部分未定物种鉴定至属.计数和称重后,换算成每平方米的个体数量和生物量.

1.3 数据处理

1.3.1 相对重要性指数计算

使用相对重要性指数来确定湖泊中底栖动物中的优势物种^[7].

$$I_{IRI} = (W_i + N_i) \times F_i,$$

式中, I_{IRI} : 相对重要指数; W_i : 相对生物量,即某物种的生物量在总生物量中的比例; N_i : 相对丰度,即某物种丰度在总丰度的比例; F_i : 该物种出现的频率百分比.

划分标准:优势种: $I_{IRI} > 1\,000$,重要种: $500 < I_{IRI} \leq 1\,000$,常见种: $200 < I_{IRI} \leq 500$,一般种: $100 < I_{IRI} \leq 200$,少有种: $I_{IRI} \leq 100$.

1.3.2 指示物种生物学计算

指示物种生物学计算公式和评价标准如下^[11-13].

①Goodnight-Whitley 生物指数:

$$I_{GW} = \frac{n}{N} \times 100\%,$$

式中, I_{GW} : Goodnight-Whitley 生物指数; n : 寡毛类个体数; N : 底栖动物总个体数. $I_{GW} > 80\%$, 表明水体受到重污染; $80\% \geq I_{GW} > 60\%$, 表明水体受到中等污染; $60\% \geq I_{GW} > 30\%$, 表明水质受到轻污染; $30\% \geq I_{GW}$, 表明水质状况良好.

②BPI 生物学污染指数:

$$I_{BPI} = \frac{\lg(N_1 + 2)}{\lg(N_2 + 2) + \lg(N_3 + 2)},$$

式中, I_{BPI} : BPI 生物学污染指数; N_1 : 寡毛类、蛭类以及摇蚊幼虫个体数; N_2 : 其他水生昆虫个体数(除去多毛类、甲壳类、摇蚊幼虫以外); N_3 : 软体动物个体数.

$I_{BPI} > 5.0$, 说明水体受到重污染; $5.0 \geq I_{BPI} > 0.5$, 说明水体受到中污染; $0.5 \geq I_{BPI} > 0.1$, 说明水体受到轻污染; $0.1 \geq I_{BPI}$, 说明水质状况良好.

③Wright 指数: I_w =每平方米寡毛类的数量,单位为 ind./m².
 $I_w > 5\,000$,说明水体受到重污染; $5\,000 \geq I_w > 1\,000$,说明水体受到中污染; $1\,000 \geq I_w > 100$,说明水体受到轻污染; $100 \geq I_w$,说明水质状况良好.

1.3.3 数据统计

使用 Microsoft Excel 2020、Origin 2022 对水化指标进行数据处理、制作图表,运用 SPSS 19.0 统计软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),使用软件 Canoco 5 对底栖动物密度-环境因子进行典范分析(CCA)和冗余分析(RDA)等^[14].

2 结果及分析

2.1 城郊湖泊水体理化性质

根据本次调查结果显示,5 个城郊湖泊平均透明度(SC)处于(0.29±0.12) m 至(0.70±0.49) m 之间,除姚子海 SC 较高,其余湖泊 SC 均小于 0.50 m.TN 质量浓度在(0.87±0.41) mg/L 至(3.19±1.17) mg/L 之间,TP 质量浓度在(0.13±0.01) mg/L 至(0.28±0.05) mg/L 之间,NH₃-N 质量浓度在(0.25±0.32) mg/L 至(0.72±0.21) mg/L 之间,COD 质量浓度在(12.71±0.76) mg/L 至(18.31±1.55) mg/L 之间,叶绿素 *a* 质量浓度在(12.13±3.28) μg/L 至(19.80 ±4.99) μg/L 之间;综合营养状态指数(TLI)在(60±2.17)至(68±1.59)之间,见图 1 所示.表明这些水体均处于中度富营养化状态(60<TLI≤70),TP 均处于地表水 V 类或劣 V 类水质.

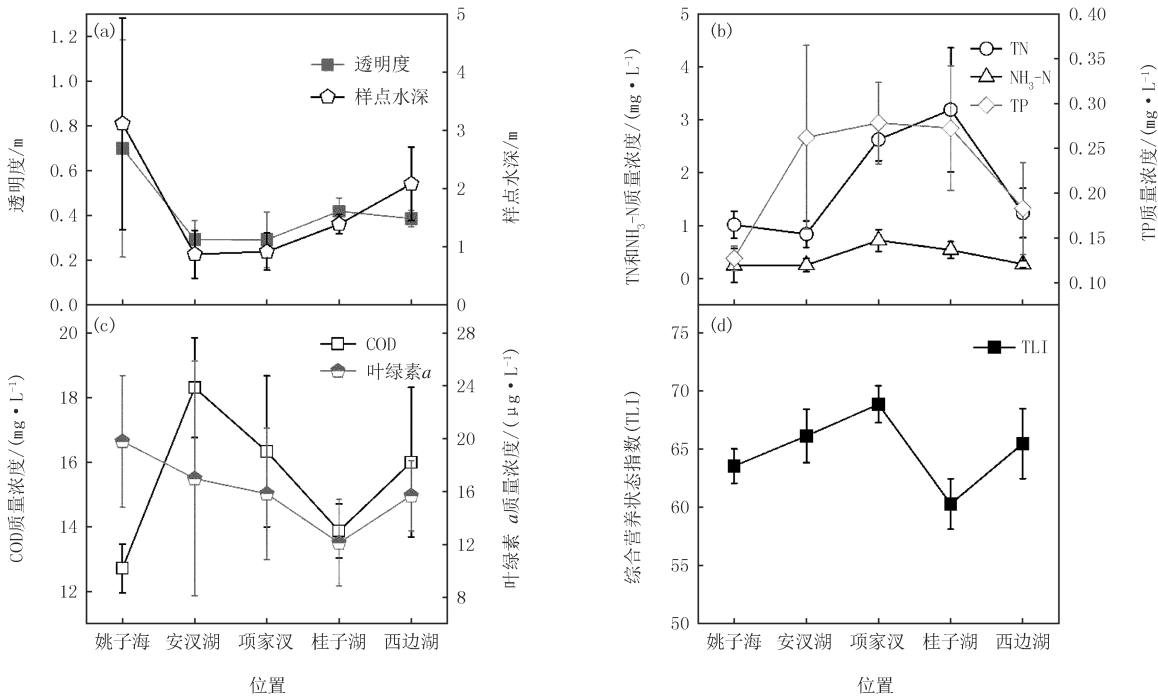


图1 5个城郊湖泊的主要水质和营养状态指标状况
Fig.1 The status of key water quality and trophic state indicators in five suburban lakes

单因素方差分析表明,5 个湖泊在 SC、水深和营养盐等理化因子上存在显著差异($P < 0.05$,见附录表 S1 所示);而叶绿素 *a* 质量浓度差异不显著,可能因为水体营养盐质量浓度高,足够维持藻类生长,导致湖泊之间藻类叶绿素 *a* 差异不显著(附录表 S1).

2.2 城郊湖泊底栖动物群落结构

5 个城郊湖泊共采集并鉴定出底栖动物 3 门 29 种,其中,姚子海共鉴定底栖动物 3 门 14 种,安汉湖共鉴定底栖动物 2 门 5 种,项家汉共鉴定底栖动物 2 门 8 种,桂子湖共鉴定底栖动物 3 门 11 种,西边湖共鉴定底栖动物 2 门 10 种(附录表 S2).5 个湖泊底栖动物平均密度为 363.24 ind./m²,其中,姚子海 925.30 ind./

m²,安汉湖 127.72 ind./m²,项家汉 446.60 ind./m²,桂子湖 176.00 ind./m²,西边湖 140.60 ind./m².

根据底栖动物相对重要性指数计算结果,姚子海中霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)为优势种,水丝蚓(*Limnodrilus* sp.)为重要种,苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)为一般种,其余物种为少有种;安汉湖中环棱螺(*Bellamya* sp.)为优势种,大沼螺(*Parafossarulus eximius*)为重要种,长角涵螺(*Alocinma longicornis*)为常见种,其余物种为少有种;项家汉中水丝蚓为优势种,小摇蚊(*Microchironomus* sp.)为重要种,前突摇蚊(*Procladius* sp.)为常见种,舌蛭(*Glossiphonia* sp.)、黄色羽摇蚊(*Chironomus flaviplumus*)、中国长足摇蚊(*Tanytus chinensis*)为一般种,其余物种为少有种;桂子湖中水丝蚓为优势种,长角涵螺、多足摇蚊(*Polypedilum* sp.)为常见种,其余物种为少见种;西边湖中水丝蚓为优势种,苏氏尾鳃蚓为重要种,舌蛭及前突摇蚊为常见种,其余物种为少见种(见附录表 S3).

5 个湖泊中,环节动物门颤蚓科的水丝蚓出现频次最高,节肢动物门昆虫纲的摇蚊科种类最多,两者均为典型的耐污种.这些数据表明这些城郊湖泊的底栖动物主要为耐污种,水质污染可能比较严重.安汉湖的主要优势种为环棱螺,为一般耐污类群,而非耐污性更强的寡毛纲和昆虫纲,其可能的原因是安汉湖已开展了生态修复,水生植物以人工种植的苦草为主且具有较高的生物量和盖度.

2.3 环境因子对底栖动物密度的影响

典范分析(CCA)和冗余分析(RDA)的结果见附录表 S4.在姚子海轴 1 和轴 2 对物种的解释率分别为 67.56%和 14.69%,叶绿素 *a* 对底栖动物种群密度贡献度最高,为 41.9%;在安汉湖轴 1 和轴 2 对物种的解释率分别为 85.56%和 13.87%,SC 对底栖动物种群密度贡献度最高,为 62.9%;在项家汉由于 CCA 分析结果不理想,改用 RDA 分析,轴 1 和轴 2 对物种的解释率分别为 66.98%和 19.33%,特卡洛置换检验结果表明水质的 4 个指标影响了底栖动物种群密度($P<0.05$);在桂子湖轴 1 和轴 2 对物种的解释率分别为 43.71%和 29.56%,TN 对底栖动物种群密度贡献度最高,为 39.6%($P<0.05$);在西边湖轴 1 和轴 2 对物种的解释率分别为 33.71%和 32.42%,SC 对底栖动物种群密度贡献度最高,为 29.8%.

通过筛选的环境因子(见附录表 S4),得出了 5 个湖泊中各物种与环境因子之间的关系(见附录图 S1).TN 和 TP 与姚子海、桂子湖和西边湖的优势种呈负相关,与安汉湖的优势种呈正相关;TP 与项家汉的优势种呈负相关.TN 和 TP 是导致水体富营养化的重要因素,当它们含量过高时,则导致底栖动物多样性的下降.叶绿素 *a* 与安汉湖、桂子湖的优势种呈负相关性,与项家汉的优势种呈正相关性,对姚子海和西边湖的优势种无明显作用.SC 与姚子海、桂子湖和西边湖的优势种呈负相关性,对其余湖泊的优势种则无明显作用.

2.4 城郊湖泊底栖动物对湖泊水环境质量评价

利用 Goodnight-Whitley 生物指数、BPI 生物学污染指数和 Wright 指数,对上述城郊湖泊水质进行评判,结果见表 1 所示.根据 I_{GW} 指数得分,安汉湖($<30\%$)和项家汉($<30\%$)为清洁状态,桂子湖($30\%\sim 60\%$)和西边湖($30\%\sim 60\%$)为轻污染状态,姚子海($>60\%\sim 80\%$)为中污染状态;根据 I_{BPI} 指数得分,安汉湖($0.1\sim 0.5$)为轻污染状态,项家汉、桂子湖和西边湖[$0.5\sim 1.5$]为 β -中污染状态,姚子海[$1.5\sim 5.0$]为 α -中污染状态;根据 Wright 指数得分,安汉湖、项家汉、桂子湖和西边湖(<100 ind./m²)为清洁状态,姚子海($100\sim 999$ ind./m²)为轻污染状态.因此,根据上述泊底栖动物对湖泊水环境质量评价结果,除安汉湖为清洁或轻污染外,其余 4 个湖泊均为中污染.

表 1 5 个城郊湖泊中湖泊底栖动物对湖泊水环境质量评价结果

Tab. 1 The assessment results of macroinvertebrates on lake water environmental quality in five suburban lakes

湖泊名称	I_{GW}		I_{BPI}		I_W	
	值	评价结果	值	评价结果	值	评价结果
姚子海	78.37%	中污染	1.81	α -中污染	875.08	轻污染
安汉湖	0.00%	清洁	0.18	轻污染	0.00	清洁
项家汉	16.97%	清洁	1.18	β -中污染	90.67	清洁
桂子湖	39.33%	轻污染	0.65	β -中污染	80.00	清洁
西边湖	49.98%	轻污染	0.84	β -中污染	81.60	清洁

3 讨 论

3.1 城郊湖泊底栖动物与水质的关系

目前已有多项研究表明,湖泊中底栖动物群落结构与水质之间存在紧密关系^[4,15-16].底栖动物能够分解和消耗沉积物中的有机质,从而调节水-沉积物界面之间的物质交换过程^[17],这一过程有助于改善水体质量,减少有机污染物的积累.同时水质状况也直接影响着底栖动物的种类、数量和分布^[5].不同种类的底栖动物对水质的要求不同,一些底栖动物对水质较为敏感^[18].本研究中,5个城郊湖泊历史上均遭受严重围垦和大规模水产养殖,汇集了流域内农田种植和水产养殖形成的面源污染,水体营养盐水平高,呈现为地表水劣V类,藻类大量繁殖,导致底栖动物群落的种类组成和数量发生显著变化,对环境敏感的类群消失,而耐污类群的优势地位突出^[15,19].5个城郊湖泊中,底栖动物的优势种(霍甫水丝蚓、环棱螺和水丝蚓)、重要种和常见种均为富营养化水体中常见耐污类群,这种群落结构特征也表明了目前5个湖泊富营养化程度严重(如附图S1所示).

TN、TP和叶绿素 a 等水体理化因子均可影响底栖动物群落结构^[20-22].本研究中,TN、TP等理化因子与各个湖泊中底栖动物优势类群表现出了复杂的对应关系.CCA及RDA分析表明,主要优势种霍甫水丝蚓、水丝蚓与TN和TP关系不显著;环棱螺与TN呈正相关,与TP相关性不大;叶绿素 a 对主要优势种的密度呈现较低的相关性;透明度SC对主要优势种的密度产生负影响或无明显影响.形成这些差异的原因,一方面是水体TP等营养的增加可能会导致底栖动物的食物来源发生变化.一些底栖动物可能依赖于水中的浮游植物或其他有机物质为食,而营养盐浓度的增加可能会促进这些生物的生长,从而增加底栖动物的食物供应,例如水丝蚓等.另一方面,过高的营养盐浓度也可能导致水体中的藻类过度繁殖,降低水体的透明度,影响底栖动物的呼吸和觅食,例如软体动物等.总的来说,武汉市5个城郊湖泊的底栖动物群落结构与水质关系紧密,水质富营养化是导致其以耐污种为主要类群的重要原因.

3.2 城郊湖泊底栖动物对湖泊水环境质量评价

研究表明底栖动物中的主要优势种能够作为指示物种,以寡毛类为代表的具有耐污能力的物种,可以对水质进行较好地监测与衡量^[23-24].其中, I_{GW} 指数评价为清洁、轻污染和中污染; I_{BPI} 指数评价为轻污染、 β -中污染和 α -中污染; I_w 指数评价为清洁和轻污染. I_{GW} 、 I_{BPI} 指数污染等级较高,主要是由于这两个指数均表征了一段历史积累下的综合结果,表明这5个城郊湖泊经历了长时间的污染; I_w 指数污染等级较低,则是由于 I_w 指数为寡毛类物种密度,在调查的湖泊中寡毛类物种占总物种数目的比例较高,但其底栖动物整体密度较低,因此污染指数等级低.

5个城郊湖泊底栖动物对湖泊水环境质量评价结果与这5个湖泊水质状况整体一致.水质评价为V类和劣V类,综合营养状态指数(TLI)评价为中度富营养化.因此,利用底栖动物生物学指数(I_{GW} 指数、 I_{BPI} 指数和 I_w 指数)评价湖泊水环境质量,并不能完全与水质评价和综合营养状态一一对应.这主要是由于底栖动物尤其是耐污种,其对水质的响应具有一定的耐受范围,同时其群落结构变化具有滞后性,即底栖动物群落结构是一段时间积累的结果,而单次调查的水质指标具有瞬时性,受温度、光照、风速和地理位置等因子的影响剧烈,不能够完全代表湖泊水质状况.生物指数-水质结果的差异,需要长时间多频次的调查,才能反映水体水质状况.

4 结 论

1)5个城郊湖泊采集到的大型底栖动物中,主要优势种分别为霍甫水丝蚓、环棱螺和水丝蚓,结构单一、物种丰富度低、耐污类群占据优势;5个城郊湖泊水体理化因子显著差别,但湖泊水质均高度富营养化,藻类浓度差异不显著.

2)CCA及RDA分析得出叶绿素 a 、TN、TP和SC等对各湖底栖动物种群密度有重要影响,与湖泊中底栖动物优势种密度关系显著.SC越大,耐污优势种密度会降低,对环境较敏感的物种密度提高;叶绿素 a 、TN和TP含量越高,水体污染越严重,底栖动物密度越低.

3)基于底栖动物对湖泊水环境质量评价,得出调查的5个城郊湖泊水质处于轻污染至 β -中污染,与水质调查结果相近,表明利用底栖动物指数评价武汉市城郊湖泊水环境质量准确有效。

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2024.03.15.0002)。

参 考 文 献

- [1] 高俊峰,高永年,张志明.湖泊型流域水生态功能分区的理论与应用[J].地理科学进展,2019,38(8):1159-1170.
GAO J F,GAO Y N,ZHANG Z M.Theory and application of aquatic ecoregion delineation in lake-basin[J].Progress in Geography,2019,38(8):1159-1170.
- [2] 胡成龙,姜加虎,陈宇炜,等.湖北省湖泊大型底栖动物群落结构及水质生物学评价[J].生态环境学报,2014,23(1):129-138.
HU C L,JIANG J H,CHEN Y W,et al.Macrozoobenthic community structure and bioassessment of water quality of shallow lakes in Hubei province[J].Ecology and Environmental Sciences,2014,23(1):129-138.
- [3] 罗江之,欧腾,邓恺芊,等.贵阳市翁井水库浮游植物优势种生态位与种间联结性分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2024,42(3):16-25.
LUO J Z,OU T,DENG K Q,et al.Ecological niche and interspecific connectivity of dominant phytoplankton species in Wengjing Reservoir,Guiyang City[J].Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences),2024,42(3):16-25.
- [4] 宋高飞,朱宇轩,米武娟,等.武汉市湖泊浮游动物群落特征及其影响因素[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(3):135-142.
SONG G F,ZHU Y X,MI W J,et al.Characteristics of zooplankton community and their influencing factors in lakes of Wuhan[J].Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition),2022,50(3):135-142.
- [5] 马陶武,黄清辉,王海,等.太湖水质评价中底栖动物综合生物指数的筛选及生物基准的确立[J].生态学报,2008,28(3):1192-1200.
MA T W,HUANG Q H,WANG H,et al.The selection of benthic macroinvertebrate-based multimetrics and preliminary establishment of biocriteria for the bioassessment of the water quality of Taihu Lake[J].Acta Ecologica Sinica,2008,28(3):1192-1200.
- [6] 张翔,徐东炯,陈桥.太湖湖滨带大型底栖动物的群落结构研究[J].环境科学与管理,2014,39(1):159-163.
ZHANG X,XU D J,CHEN Q.Community structure of macrozoobenthos in aquatic-terrestrial ecotones of Taihu Lake[J].Environmental Science and Management,2014,39(1):159-163.
- [7] 李学军,张景晓,于森,等.黄河流域底栖动物调查研究进展[J].河南师范大学学报(自然科学版),2022,50(2):36-47.
LI X J,ZHANG J X,YU M,et al.Progresses of macrozoobenthic investigation in Yellow River Basin[J].Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition),2022,50(2):36-47.
- [8] 王艳杰,李法云,范志平,等.大型底栖动物在水生态系统健康评价中的应用[J].气象与环境学报,2012,28(5):90-96.
WANG Y J,LI F Y,FAN Z P,et al.The application of benthic macroinvertebrates in aquatic ecosystem health assessment[J].Journal of Meteorology and Environment,2012,28(5):90-96.
- [9] 朱广伟,许海,朱梦圆,等.三十年来长江中下游湖泊富营养化状况变迁及其影响因素[J].湖泊科学,2019,31(6):1510-1524.
ZHU G W,XU H,ZHU M Y,et al.Changing characteristics and driving factors of trophic state of lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River in the past 30 years[J].Journal of Lake Sciences,2019,31(6):1510-1524.
- [10] 温周瑞,王丛丹,李文华,等.武汉城市湖泊水质及水体富营养化现状评价[J].水生态学杂志,2013,34(5):96-100.
WEN Z R,WANG C D,LI W H,et al.Evaluation of water quality and eutrophication of urban lakes in Wuhan[J].Journal of Hydroecology,2013,34(5):96-100.
- [11] 陆晓晗,曹宸,李叙勇.付幢河流域中下游大型底栖动物群落结构与水质生物学评价[J].生态学报,2021,41(8):3201-3214.
LU X H,CAO C,LI X Y.Macroinvertebrate community structure and water quality assessment in the middle and lower reaches of Futuan River Basin[J].Acta Ecologica Sinica,2021,41(8):3201-3214.
- [12] 张敏,邵美玲,蔡庆华,等.丹江口水库大型底栖动物群落结构及其水质生物学评价[J].湖泊科学,2010,22(2):281-290.
ZHANG M,SHAO M L,CAI Q H,et al.Macroinvertebrate community structure and the biological assessment to the water quality of the Danjiangkou Reservoir[J].Journal of Lake Sciences,2010,22(2):281-290.
- [13] 刘缠民,冯照军.京杭大运河徐州段水质底栖动物多样性及 BPI 评价[J].河南科学,2008,26(9):1062-1065.
- [14] 翟心语,历从实,胡永歌,等.前坪水库植物物种多样性及其对环境的回应[J].河南农业大学学报,2023,57(1):81-95.
ZHAI X Y,LI C S,HU Y G,et al.Plant species diversity and its response to environment in Qianping Reservoir[J].Journal of Henan Agricultural University,2023,57(1):81-95.
- [15] 高欣,牛翠娟,胡忠军.太湖流域大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J].应用生态学报,2011,22(12):3329-3336.
GAO X,NIU C J,HU Z J.Macroinvertebrate community structure and its relations with environmental factors in Taihu River basin[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2011,22(12):3329-3336.
- [16] 张超文,张堂林,朱挺兵,等.洪泽湖大型底栖动物群落结构及其与环境因子的关系[J].水生态学杂志,2012,33(3):27-33.
ZHANG C W,ZHANG T L,ZHU T B,et al.Community structure of macrozoobenthos and its relationship with environmental factors in Lake Hongze[J].Journal of Hydroecology,2012,33(3):27-33.
- [17] 刘松林,江志坚,邓益琴,等.海草凋落叶分解对沉积物有机碳组成及其关键转化过程的影响[J].中国科学:地球科学,2017,47(12):

1425-1435.

LIU S L,JIANG Z J,DENG Y Q,et al.Effects of seagrass leaf litter decomposition on sediment organic carbon composition and the key transformation processes[J].Scientia Sinica(Terrae),2017,47(12):1425-1435.

[18] 王伟莉,闫振广,何丽,等.五种底栖动物对优控污染物的敏感性评价[J].中国环境科学,2013,33(10):1856-1862.

WANG W L,YAN Z G,HE L,et al.Sensitivity evaluation of five Zoobenthos to priority pollutants[J].China Environmental Science, 2013,33(10):1856-1862.

[19] 温舒珂,彭凯,龚志军,等.近 40 年来太湖梅梁湾底栖动物群落演变特征及驱动因素[J].湖泊科学,2023,35(2):599-611.

WEN S K,PENG K,GONG Z J,et al.Succession of macrozoobenthic communities and its drivers in Meiliang Bay of Lake Taihu during the past 40 years[J].Journal of Lake Sciences,2023,35(2):599-611.

[20] 高杰,黄屿玥,韦冰,等.底栖动物(苏氏尾鳃蚓 *Branchiura sowerbyi* 和椭圆萝卜螺 *Radix swinhoei*)对不同氮负荷程度沉积物脱氮的影响[J].环境科学学报,2022,42(11):202-210.

GAO J,HUANG Y Y,WEI B,et al.Effect of macroinvertebrates(*Branchiura sowerbyi* and *Radix swinhoei*) on nitrogen removal of sedi- ment with varying nitrogen load levels[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2022,42(11):202-210.

[21] 陈晓飞,吴卫菊,胡红娟,等.孝感城市湖泊大型底栖无脊椎动物及其与环境因子的关系[J].环境科学与技术,2023,46(7):40-47.

CHEN X F,WU W J,HU H J,et al.Macrozoobenthos community structure and its relationship with environme-ntal factors in the lakes of Xiaogan City,China[J].Environmental Science & Technology,2023,46(7):40-47.

[22] 靳辉,罗旭光,谷娇,等.河蚬(*Corbicula fluminea*)对霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)生物扰动的抑制效应[J].湖泊科学,2016, 28(6):1348-1353.

JIN H,LUO X G,GU J,et al.Inhibiting effect of *Corbicula fluminea* on the bioturbation of *Limnodrilus hoffmeisteri*[J].Journal of Lake Sciences,2016,28(6):1348-1353.

[23] 王建国,黄恢柏,杨明旭,等.庐山地区底栖大型无脊椎动物耐污值与水质生物学评价[J].应用与环境生物学报,2003,9(3):279-284.

WANG J G,HUANG H B,YANG M X,et al.Tolerance values of benthic macroinvertebrates and bioassessment of water quality in the Lushan nature reserve[J].Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2003,9(3):279-284.

[24] 张跃平.江苏大型底栖无脊椎动物耐污值、BI 指数及水质生物评价研究[D].南京:南京农业大学,2006.

The relationships between macroinvertebrate community structure and water environmental factors in suburban lakes:a case study in Wuhan City

Chen Xuan^{1,2}, Meng Jianjun^{1,2}, Sun Cong^{1,2}, Wang Jian^{1,2}, Deng Ping³,
Dai Yutai⁴, Han Xiaofang⁵, Li Lixue⁵

(1. Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430015, China; 2. Wuhan Ecological Environment Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430050, China; 3. Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430070, China;
4. College of Resources and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China; 5. School of Environment and Health, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

Abstract: This study investigates the composition of macroinvertebrate communities and their relationships with water environmental factors in five suburban lakes located in the outskirts of Wuhan. A total of 29 species of macroinvertebrates were collected, with dominant species being *Limnodrilus hoffmeisteri*, *Bellamya* sp., *Limnodrilus* sp., all of which are organic matter tolerant species. The physicochemical indicators of the water bodies showed that the five lakes were highly eutrophic, and there were significant differences in the physicochemical factors among the lakes, except for the concentration of chlorophyll *a*. Canonical correspondence analysis(CCA) and redundancy analysis(RDA) showed that total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) in the water were positively correlated with densities of annelids, but negatively correlated with mollusks. Transparency(SC) showed significant differences in correlations with dominant species among lakes, while Chlorophyll *a* had weak or no apparent influence on the dominant species. When assessing water quality based on macroinvertebrate indicator species, it was found that the Wright index rating was slightly favorable, and the Goodnight-Whitley index and the BPI(biotic index of pollution) were relatively important, indicating that the water quality of the surveyed five suburban lakes ranged from light pollution to β -moderate pollution, consistent with the results of water quality surveys. This study is helpful to understand accurately the characteristics and status of suburban lake ecosystems of Wuhan City, providing scientific basis for the rational utilization and ecological restoration of suburban lake resources in Wuhan City.

Keywords: suburban lakes; macroinvertebrate; water environmental factors; indicator species

[责任编辑 刘洋 赵晓华]

附 录

表 S1 5 个城郊湖泊之间水环境理化因子差异分析

处理分组		因变量的显著性(<i>P</i> 值)						
		SC	样点水深	TN	TP	NH ₃ -N	COD	叶绿素 <i>a</i>
姚子海	安汊湖	0.001	0	1	0.003	1	0	1
	项家汊	0.009	0	0	0.005	0	0.010	1
	桂子湖	0.112	0.003	0	0.004	0.028	1	0.174
	西边湖	0.043	0.160	1	1	1	0	1
安汊湖	姚子海	0.001	0	1	0.003	1	0	1
	项家汊	1	1	0	1	0	0.345	1
	桂子湖	1	1	0	1	0.009	0	0.770
	西边湖	1	0.013	1	0.016	1	1	1
项家汊	姚子海	0.009	0	0	0.005	0	0.010	1
	安汊湖	1	1	0	1	0	0.345	1
	桂子湖	1	1	0.803	1	0.635	0.170	1
	西边湖	1	0.101	0	0.028	0	1	1
桂子湖	姚子海	0.112	0.003	0	0.004	0.028	1	0.174
	安汊湖	1	1	0	1	0.009	0	0.770
	项家汊	1	1	0.803	1	0.635	0.170	1
	西边湖	1	0.877	0	0.020	0.060	0.004	1
西边湖	姚子海	0.043	0.16	1	1	1	0	1
	安汊湖	1	0.013	1	0.016	1	1	1
	项家汊	1	0.101	0	0.028	0	1	1
	桂子湖	1	0.877	0	0.020	0.060	0.004	1

注:黑色加粗表示 $P<0.05$.

表 S2 5 个城郊湖泊中底栖动物种类与密度

Tab. S2 The species and density of macroinvertebrates in five suburban lakes

ind./m²

种类名称	底栖动物密度				
	姚子海	安汉湖	项家汉	桂子湖	西边湖
黄色羽摇蚊 <i>Chironomus flaviplumus</i>	N.D.	N.D.	21.30±19.47	N.D.	8.90±6.70
摇蚊 <i>Chironomus</i> sp.	3.70±1.87	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
二叉摇蚊 <i>Dicrotendipes</i> sp.	1.20±1.18	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
拟摇蚊 <i>Parachironomus</i> sp.	4.90±3.64	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
多足摇蚊 <i>Polypedilum</i> sp.	1.20±1.18	N.D.	36.00±22.23	36.00±22.23	N.D.
林间环足摇蚊 <i>Cricotopus sylvestris</i>	N.D.	N.D.	N.D.	4.00±3.74	N.D.
环足摇蚊 <i>Cricotopus</i> sp.	11.10±6.60	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
中国长足摇蚊 <i>Tanypus chinensis</i>	N.D.	N.D.	32.00±29.21	12.00±7.87	3.60±3.35
长足摇蚊 <i>Tanypus</i> sp.	25.80±11.62	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
德永雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes tokunagai</i>	N.D.	N.D.	N.D.	12.00±11.22	1.80±1.68
柔嫩雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes cauliginellus</i>	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.80±1.68
雕翅摇蚊 <i>Glyptotendipes</i> sp.	N.D.	2.29±2.12	N.D.	N.D.	N.D.
小摇蚊 <i>Microchironomus</i> sp.	N.D.	N.D.	202.70±185.01	4.00±3.74	1.80±1.68
暗肩哈摇蚊 <i>Harnischia fuscimana</i>	N.D.	N.D.	5.30±4.87	N.D.	N.D.
前突摇蚊 <i>Procladius</i> sp.	N.D.	N.D.	53.30±48.69	12.00±7.87	17.80±11.37
凹铗隐摇蚊 <i>Cryptochironomus defectus</i>	N.D.	N.D.	N.D.	4.00±3.74	N.D.
红裸须摇蚊 <i>Propsilocerus akamusi</i>	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.80±1.68
多毛管水蚓 <i>Aulodrilus pluriseta</i>	49.20±23.64	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	17.20±8.06	N.D.	N.D.	N.D.	10.70±5.62
巨毛水丝蚓 <i>Limnodrilus grandisetosus</i>	1.20±1.18	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	635.10±176.29	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
水丝蚓 <i>Limnodrilus</i> sp.	171.10±43.42	N.D.	90.70±77.07	76.00±35.30	80.00±48.16
癩颤蚓 <i>Spirosperma</i> sp.	1.20±1.18	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
颤蚓 <i>Tubifex</i> sp.	1.20±1.18	N.D.	N.D.	4.00±3.74	N.D.
舌蛭 <i>Glossiphonia</i> sp.	N.D.	N.D.	5.30±4.87	4.00±3.74	12.40±5.50
长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	1.20±1.18	16.00±10.22	N.D.	8.00±7.48	N.D.
大沼螺 <i>Parafossarulus eximius</i>	N.D.	45.71±35.47	N.D.	N.D.	N.D.
中华沼螺 <i>Parafossarulus sinensis</i>	N.D.	6.86±4.41	N.D.	N.D.	N.D.
环棱螺 <i>Bellamya</i> sp.	N.D.	54.86±14.04	N.D.	N.D.	N.D.

注：N.D.表示未检出。

表 S3 5 个城郊湖泊中底栖动物相对重要值

Tab. S3 The index of relative importance(IRI) of macroinvertebrates in five suburban lakes

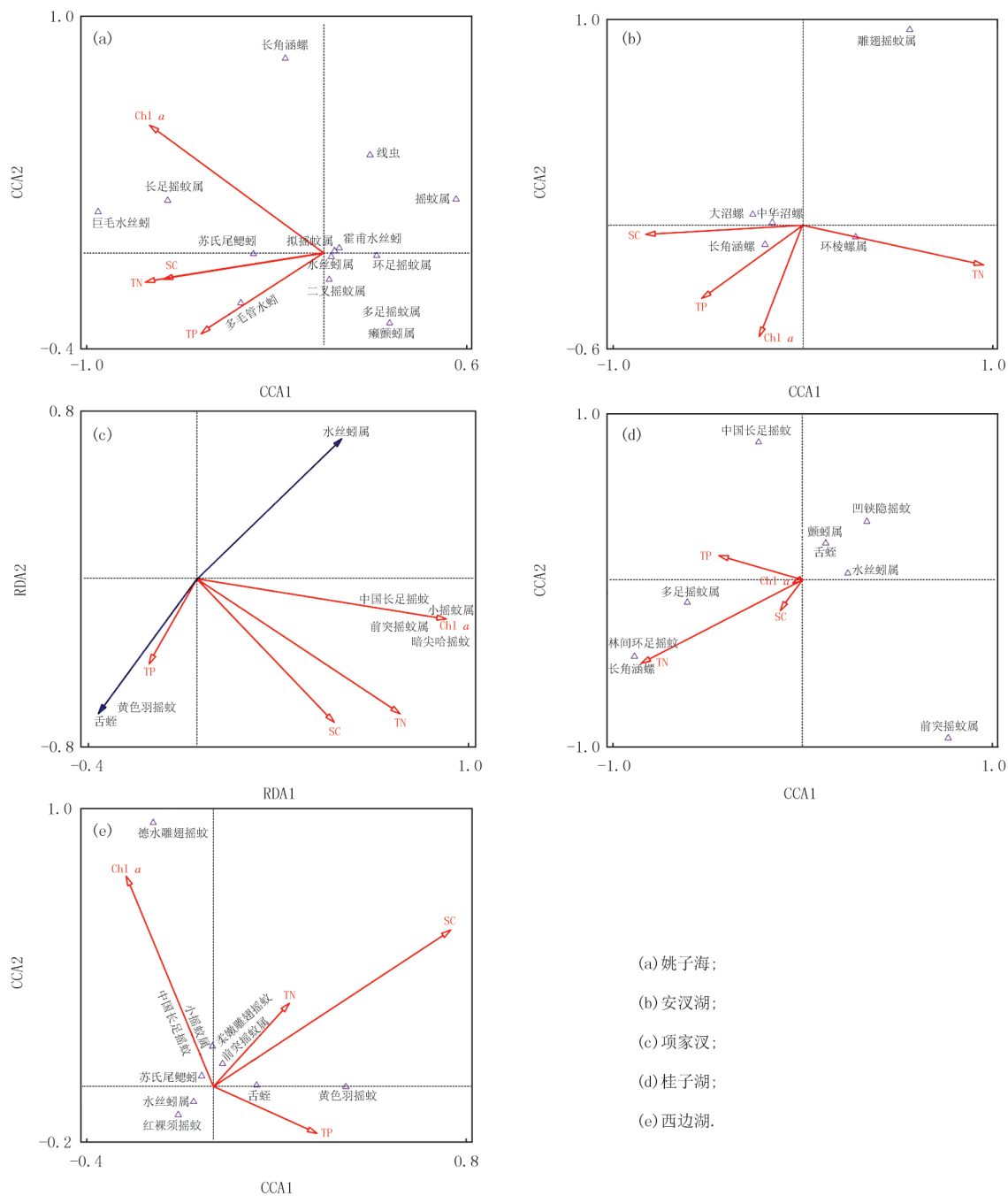
湖泊名称	优势种 $I_{IRI}>1\ 000$	重要种 $500<I_{IRI}\leq1\ 000$	常见种 $200<I_{IRI}\leq500$	一般种 $100<I_{IRI}\leq200$
姚子海	霍甫水丝蚓 $I_{IRI}=2\ 689.78$	水丝蚓 $I_{IRI}=553.86$	/	苏氏尾鳃蚓 $I_{IRI}=187.99$
安汉湖	环棱螺 $I_{IRI}=4\ 646.40$	大沼螺 $I_{IRI}=935.71$	长角涵螺 $I_{IRI}=376.76$	/
项家汉	水丝蚓 $I_{IRI}=1\ 501.74$	小摇蚊 $I_{IRI}=954.40$	前突摇蚊 $I_{IRI}=306.50$	舌蛭 $I_{IRI}=136.65$ 黄色羽摇蚊 $I_{IRI}=149.74$ 中国长足摇蚊 $I_{IRI}=183.90$
桂子湖	水丝蚓 $I_{IRI}=1\ 214.83$	/	长足摇蚊 $I_{IRI}=493.58$ 多足摇蚊 $I_{IRI}=333.35$	/
西边湖	水丝蚓 $I_{IRI}=1\ 398.59$	苏氏尾鳃蚓 $I_{IRI}=872.82$	舌蛭 $I_{IRI}=269.67$ 前突摇蚊 $I_{IRI}=292.19$	/

表 S4 5 个城郊湖泊中底栖动物密度与环境因子的典范分析(CCA)和冗余分析(RDA)结果

Tab. S4 The canonical correspondence analysis(CCA) and redundancy analysis(RDA) results of macroinvertebrate density and environmental factors in five suburban lakes

湖泊名称	统计	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4
姚子海 ^a	解释的拟合变量	67.56	82.25	95.53	100.00
安汉湖 ^a	解释的拟合变量	85.56	99.43	99.96	100.00
项家汉 ^b	解释的拟合变量	66.98	86.31	100.00	
桂子湖 ^a	解释的拟合变量	43.71	73.27	90.21	100.00
西边湖 ^a	解释的拟合变量	33.71	66.13	94.78	100.00
前向选择法结果					
湖泊名称	环境因子	解释率/%	贡献率/%	Pseudo- <i>F</i>	<i>P</i>
姚子海 ^a	叶绿素 <i>a</i>	9.2	41.9	1.1	0.290
	TN	4.9	22.1	0.6	0.782
	SC	5.0	22.6	0.6	0.700
	TP	2.9	13.3	0.3	0.952
安汉湖 ^a	SC	51.6	62.9	5.3	0.134
	TN	13.0	15.8	1.5	0.268
	TP	16.7	20.3	2.7	0.126
	叶绿素 <i>a</i>	0.8	1.0	<0.1	0.872
项家汉 ^b	在所有轴上	Pseudo- <i>F</i> = 6.9, <i>P</i> = 0.022			
桂子湖 ^a	TN	33.2	39.6	2.0	0.034
	TP	16.0	19.1	0.9	0.478
	SC	11.3	13.5	0.6	0.666
	叶绿素 <i>a</i>	23.3	27.8	1.4	0.300
西边湖 ^a	SC	27.7	29.8	1.5	0.090
	叶绿素 <i>a</i>	26.4	28.5	1.7	0.172
	TN	22.5	24.3	1.9	0.196
	TP	16.1	17.4	2.2	0.172

注：^a, CCA 分析结果；^b, RDA 分析结果。



图S1 城郊湖泊中底栖动物与环境因子的排序图
 Fig.S1 The ordination plot of macroinvertebrates and environmental factors in suburban lakes