

太湖流域城市湖泊大型底栖动物群落结构及影响因素研究

陆文泽^{1,2},任 仁^{1,2},饶 骁^{1,2},饶清洋^{1,2},谢 平^{1,3},邓绪伟^{1,2}

(1. 中国科学院水生生物研究所,东湖湖泊生态系统试验站,淡水生态与生物技术国家重点实验室,湖北 武汉 430072;

2. 中国科学院大学,北京 100049;

3. 青海大学,省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室,青海 西宁 810016)

摘要:研究不同营养水平城市湖泊底栖动物群落的差异及成因,为丰富底栖动物生态学研究 and 城市湖泊生态系统恢复提供参考。于2018年12月、2019年3月、6月、9月在太湖流域15个城市湖泊开展了4个季度的调查,结果显示,重度、中度、轻度富营养和中营养水体分别占10.03%、36.89%、42.08%和11.00%。随水体营养下降,透明度显著上升,浊度、总磷和叶绿素a浓度显著下降,大型底栖动物总生物量、蚌类密度和生物量上升,寡毛类密度和生物量下降。在重度富营养水体中,底栖动物总生物量为 $(9.57 \pm 8.29) \text{ g/m}^2$,显著小于其他类型水体($P < 0.01$);在轻度富营养和中营养水体中,蚌类密度和生物量显著大于重度和中度富营养水体($P < 0.01$),寡毛类密度则显著小于重度和中度富营养水体($P < 0.01$)。Shannon-Wiener、Simpson和Pielou指数随水体营养水平下降,先上升再下降,在轻度富营养水体中最高,分别为 1.14 ± 0.04 、 0.55 ± 0.02 、 0.68 ± 0.02 。结构方程模型分析发现,在轻度富营养和中营养湖泊中,水温、总磷和叶绿素a浓度是影响底栖动物群落的关键环境因子。总磷浓度升高会显著促进软体动物增长($P < 0.01$),对螺、蚌的路径系数分别高达0.414和0.440。总磷浓度与水温上升都能显著促进多毛类种群增长($P < 0.01$),抑制水生昆虫种群($P < 0.01$),路径系数分别为0.376和-0.423。城市湖泊水体中总磷和叶绿素a浓度对大型底栖动物群落结构有重要影响,控制磷和藻类,有助于城市湖泊底栖动物群落恢复和水生态系统修复。

关键词:太湖流域;城市湖泊;大型底栖动物;群落变化;富营养化

中图分类号:Q178.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2022)04-0008-08

底栖动物是指生活史的全部或大部分时间生活于水体底层的水生动物群,通常将不能通过0.5 mm孔径筛网的个体称为大型底栖动物(Caner et al, 2017)。在水生态系统食物网中,大型底栖动物是连接初级生产者和分解者与捕食者(主要是鱼类)的纽带,在物质循环和能量流动中具有重要作用(Ntislidou et al, 2018)。大型底栖动物生命周期长、区域性强、迁移能力弱,对环境变化敏感,对其群落变化的研究可以反映水生态系统的状态(Masero et al, 1999; Pan et al, 2015),并为水生态保护与恢复、维持稳定健康的水生态系统提供重要的科学依据。

太湖流域作为我国城市化程度最高的区域之

一,流域内湖泊富营养化问题严重(毛新伟等, 2009)。水体富营养化对大型底栖动物生产力、群落结构及物种多样性等有重要影响。富营养化会明显降低底栖动物群落物种多样性(龚志军等, 2001);在长江中游湖泊的研究表明,草型湖泊大型底栖动物群落的周年生产量,以及寡毛类、螺类和摇蚊的生产量低于藻型湖泊,而草型湖泊底栖动物物种数、物种多样性、密度和生物量均高于藻型湖泊(闫云君等, 2005);蔡永久等(2010)研究发现,随着湖泊营养水平不断升高,底栖动物生物量和生物多样性不断下降,但密度提高。目前对太湖流域湖泊底栖动物已有较多研究,例如,底栖动物群落结构及物种多样性(陈桥等, 2017)、底栖动物群落结构与环境因子的关系(高欣等, 2011)、底栖动物群落特征的水质生物学评价(陈丽平等, 2013)等,但这些研究并未单独以城市湖泊类群开展,对于城市湖泊不同营养水平下大型底栖动物群落结构的差异及影响因素的研究还较为缺乏。由于城市湖泊受到人类活动干扰剧烈,也是目前水生态保护和修复的重要对象,因此,本研究选取了太湖流域15个城市湖泊,从城市湖泊不同营养水平下大型底栖动

收稿日期:2021-03-13 修回日期:2022-07-01

基金项目:中国科学院科技服务网络STS计划区域重点项目(KF-STIS-QYZD-099);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07203-004-001);青海省科技计划(2018-ZJ-709)。

作者简介: 陆文泽,1995年生,男,硕士研究生,主要从事湖泊生态学 research。E-mail:15617188627@163.com

通信作者: 邓绪伟,1985年生,男,副研究员,主要从事湖泊生态学 research。E-mail:dengxuwei@ihb.ac.cn

物群落特征、演变规律及影响因素的角度,分析了城市湖泊底栖动物群落演变特征。本研究将为城市湖泊的底栖动物生态学研究、湖泊生态修复中底栖动物群落结构重建、水生态系统修复等提供重要的参考依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

根据太湖流域的湖泊分布特征,选取流域内15个城市湖泊(见表1),并根据湖泊大小和形态均匀布设采样点位,在2018年12月、2019年3月、6月、9月进行采样(中国生态系统研究网络科学委员会,2007),其中,东氿6月采集5个样本,合计309个样本。

表1 太湖流域城市湖泊及采样点设置信息
Tab.1 Information on the 15 urban lakes and sampling sites in the Taihu Lake basin

湖泊名称	湖泊面积/km ²	经度(E)/°	纬度(N)/°	样点数/个
阳澄湖	120.00	120.6645~120.8532	31.3588~31.5036	9
滆湖	164.00	119.7500~119.8969	31.4935~31.6935	8
淀山湖	62.00	120.8599~121.0300	31.0563~31.1951	8
昆承湖	18.30	120.7304~120.7774	31.5657~31.6207	7
西氿	15.20	119.7150~119.8196	31.3648~31.4108	7
澄湖	40.00	120.7944~120.8839	31.1705~31.2562	6
五里湖	5.00	120.2320~120.3047	31.5014~31.5512	6
独墅湖	7.20	120.6870~120.7285	31.2572~31.3019	5
东氿	8.00	119.8608~119.9200	31.3298~31.3736	4
金鸡湖	7.38	120.6886~120.7233	31.3019~31.3327	4
尚湖	8.00	120.6761~120.7295	31.6330~31.6771	3
九里湖	5.66	120.7307~120.7476	31.1767~31.2020	3
同里湖	2.96	120.7333~120.7587	31.1561~31.1767	3
石湖	2.56	120.5945~120.6161	31.2340~31.2606	3
漕湖	8.30	120.5552~120.6124	31.4762~31.5002	1

现场测定水深(D)、透明度(SD);使用YSI EXO2型多参数水质分析仪测定水温(T)、电导率(Cond)、总溶解固体(TDS)、溶解氧(DO)、pH、氧化还原电位(ORP)和浊度(Turb)。水样用5 L有机玻璃采水器采集,每个点采集距表层0.5 m和距底层0.5 m的水并混合,冷冻带回实验室;在实验室测定水体总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、正磷酸盐(PO₄³⁻-P)和叶绿素a(Chl-a)(国家环境保护总局,2002)。

底栖动物使用1/16 m²改良彼得生采泥器定量采集,采得的底泥现场用60目尼龙筛网洗净,网内残渣装入自封袋并带回挑拣,拣出的底栖动物放入10%甲醛溶液固定。

利用解剖镜和显微镜,将底栖动物样本鉴定至尽可能低的分类单元(唐红渠,2006;刘文亮等,2007;辽宁省环境监测实验中心,2014),用滤纸吸取样本表面固定液后,置于电子天平(精确度0.0001 g)上称重。

1.2 数据分析

参照《湖泊富营养化评价方法及分级标准》计算各点位的综合营养状态指数TLI(Σ)(王明翠等,2002),计算各点位的Shannon-Wiener多样性指数(H')、Simpson指数(D)和Pielou均匀度指数(J)(Shannon & Weaver,1971;Pielou,1975),公式分别为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{i=1}^m W_j \times TLI(j)$$
 ①

$$H' = -\sum_{i=1}^S (\frac{n_i}{N}) \ln(n_i/N)$$
 ②

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S (n_i/N)^2$$
 ③

$$J = H' / \ln S$$
 ④

式中:TLI(j)为第j种环境因子的营养状态指数,W_j为第j种环境因子的营养状态指数的相关权重,m为环境因子的总数(本研究为4个)。S为群落内的种类总数,n_i为第i个种类的个体数,N为所有种类总个体数。TLI(Chl-a)=10×[2.5+1.086×ln(Chl-a)],TLI(TP)=10×[9.436+1.624×ln(TP)],TLI(TN)=10×[5.453+1.694×ln(TN)],TLI(SD)=10×[5.118-1.94×ln(SD)]。各点位的营养水平依据TLI(Σ)确定,TLI(Σ)<30为贫营养,30≤TLI(Σ)≤50为中营养,50<TLI(Σ)≤60为轻度富营养,60<TLI(Σ)≤70为中度富营养,TLI(Σ)>70为重度富营养。

使用SPSS 26.0软件对数据进行Kruskal-Wallis检验;使用PRIMER 5.0软件,采用类平均法(group average)进行聚类分析;基于聚类结果,使用Canoco 5.0软件对不同聚类组底栖动物密度数据进行DCA检验,再根据检验结果确定合适的方法分析底栖动物与环境因子的关系,后使用R4.0.3软件的lavaan包建立结构方程模型,描述环境因子对底栖动物群落的影响路径及作用强度。

2 结果与分析

2.1 不同营养水平水体间的水质比较

综合营养状态指数TLI(Σ)显示,15个城市湖泊水体涵盖4种营养水平:中营养(44.97~49.95)34个样本,占11.00%,轻度富营养(50.15~59.94)130个样本,占42.08%,中度富营养(60.06~69.97)114个样本,占36.89%,重度富营养(70.01~84.49)31个样本,占10.03%。

Kruskal–Wallis 检验结果表明,水体透明度、浊度、总磷和叶绿素 a 在 4 种营养水平水体均存在极显著差异($P<0.01$)(图 1),是区分流域内城市湖泊营养水平最重要的水体指标。随着营养水平下降,水体

透明度从重度富营养水体的(0.14 ± 0.01)m 显著上升到中营养水体的(1.02 ± 0.07)m(图 1a);浊度、叶绿素 a、总磷等指标显著下降变化。但总氮在 4 种类型水体间的差异不显著($P>0.05$)(图 1d)。

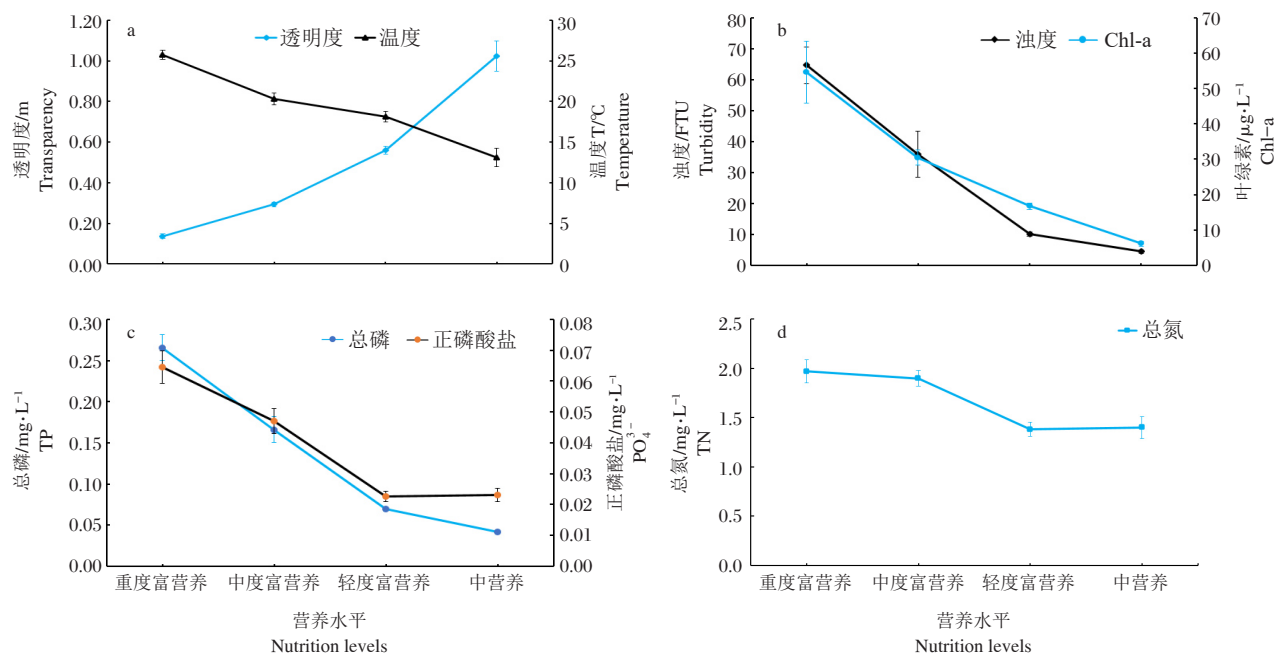


图 1 太湖流域城市湖泊 4 种营养水平水体中环境特征

Fig.1 Water environment characteristics of urban lakes in four trophic conditions in the Taihu Lake basin

2.2 不同营养水平水体间底栖动物群落特征比较

Kruskal–Wallis 检验结果显示,底栖动物总生物量随水体营养水平下降显著上升($P<0.05$),从重度富营养水体的(9.57 ± 8.29)g/m²上升到中营养水体的(510.90 ± 421.85)g/m²(图 2)。底栖动物总密度在不同营养水体间无显著性差异($P>0.05$)(图 2)。底栖动物 Shannon–Wiener 多样性指数(H')、Simpson 指

数(D)和 Pielou 均匀度指数(J)随水体营养下降先上升再下降,在轻度富营养水体达到最大,分别为 1.14 ± 0.04 、 0.55 ± 0.02 和 0.68 ± 0.02 (图 3)。底栖动物物种数在重度、中度、轻度富营养和中营养水体分别有 27、57、56 和 38 种,其中,螺类物种数分别为 2、10、13 和 6 种,蚌类物种数分别为 3、9、8 和 8 种,水生昆虫物种数分别为 11、21、14 和 12 种。

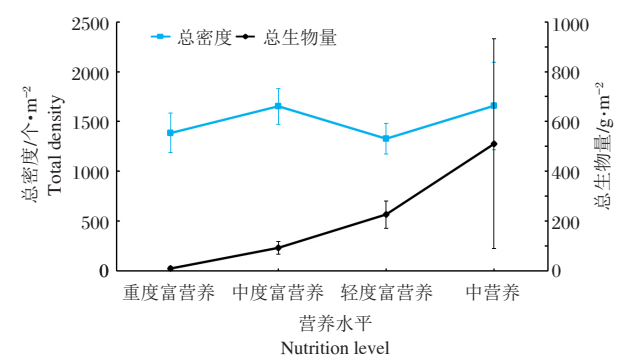


图 2 大型底栖动物总密度和总生物量在 4 种营养水体中的变化

Fig.2 Variation in total density and biomass of macroinvertebrates in waters of four trophic states

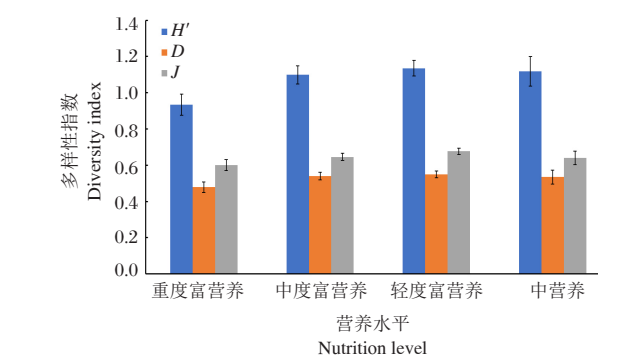


图 3 大型底栖动物群落多样性指数在 4 种营养水体中的变化

Fig.3 Macroinvertebrate biodiversity in waters of four trophic states

4种不同营养水体中底栖动物生物量和密度变化见图4所示。寡毛类密度和生物量从重度富营养水体中的(824.26±147.86)个/m²和(0.81±0.16)g/m²显著下降到中营养水体中的(239.18±51.43)个/m²和(0.30±0.06)g/m²($P<0.05$) (图4a、d);蚌类密度和生物量从重度富营养水体中的(2.06±1.23)个/m²和(0.05±0.04)g/m²显著上升到中营养水体的(119.41±41.11)个/m²和

(503.50±421.27)g/m²($P<0.05$) (图4b、e)。随着水体营养水平下降,螺类、多毛类和其他类群(蛭纲和甲壳纲)的密度和生物量均呈现先上升后下降的规律:在轻度富营养水体最大,分别为:螺类(72.37±15.17)个/m²和(65.14±13.24)g/m²(图4b、e);多毛类(32.22±6.67)个/m²和(0.18±0.03)g/m²(图4c、f);其他类群(蛭纲和甲壳纲)(75.82±49.53)个/m²和(0.24±0.13)g/m²(图4c、f)。

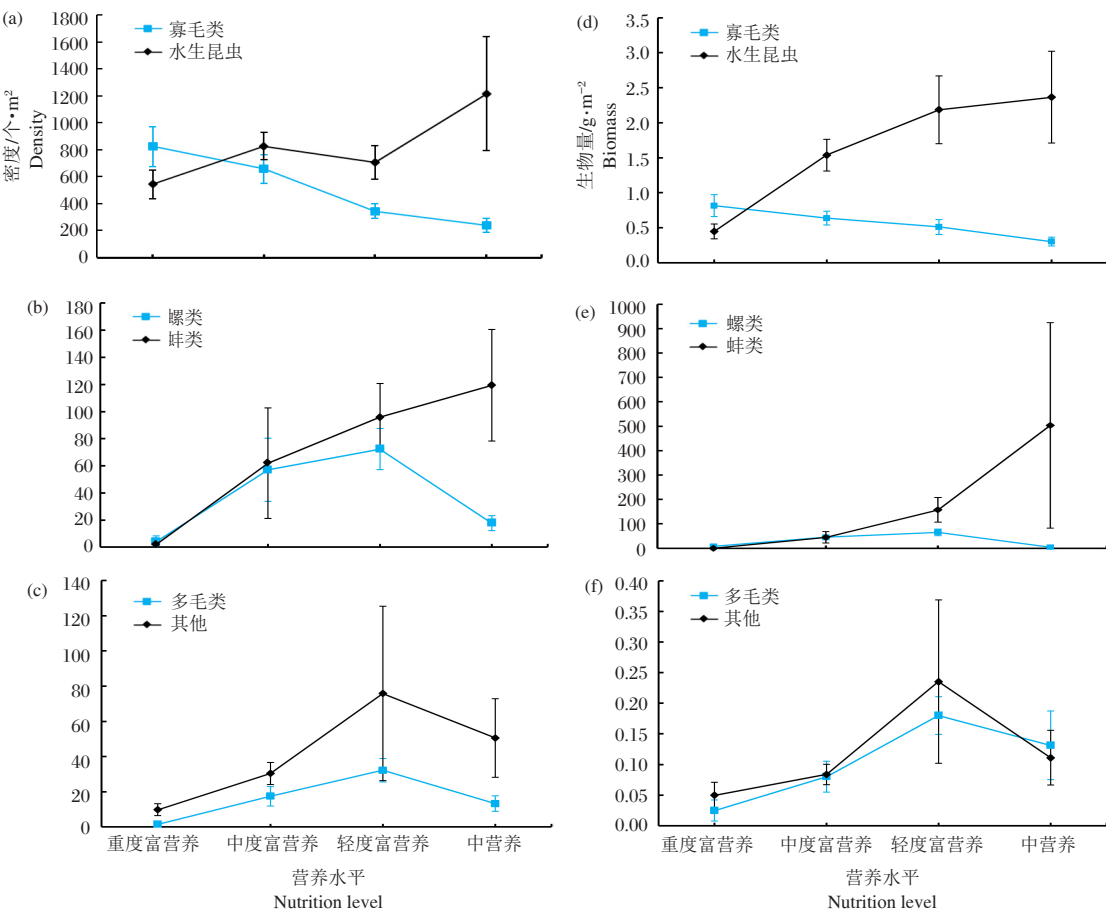


图4 大型底栖动物各类群密度和生物量在4种营养水体中的变化

Fig.4 Characteristics of density and biomass for various macroinvertebrate groups in the waters of trophic levels

2.3 不同营养水平下底栖动物群落与环境因子关系

4种营养水体底栖动物各种(属或科)密度的Bray–Curtis相似性系数的聚类分析表明,4种营养水平下底栖动物可聚为2支,中度和重度富营养水体为1支,轻度富营养和中营养水体为1支。经DCA检验,发现两聚类组都可进行CCA分析。首先,通过蒙特卡洛置换检验筛选符合CCA分析条件的环境因子,结果显示,重度和中度富营养水体中电导率、氧化还原电位和总溶解固体符合CCA分析条件;轻度富营养及中营养水体中正磷酸盐、总磷、总溶解固体等12个环境因子符合CCA分析条件。CCA分析结果显示,在重

度和中度富营养水体,蚌类密度与电导率呈正相关,其余类群与筛选的3个环境因子关系不明显(图5a)。在轻度富营养和中营养水体中,多毛类密度与水温、水体磷含量呈正相关;寡毛类密度与水深、水温呈正相关,而与总溶解固体、氧化还原电位、正磷酸盐和水体氮含量呈负相关;螺蚌密度与水体磷含量呈正相关;水生昆虫密度与氧化还原电位、总氮和总溶解固体呈正相关,并与水温、水深负相关(图5b)。

2.4 环境因子对大型底栖动物群落的影响路径

基于CCA分析筛选的环境因子和底栖动物各类群密度,建立结构方程模型,量化不同环境因子对底

栖动物及底栖动物间的作用强度(图6)。模型建立前,先对各点位环境因子数据进行Z标准化,底栖动物各类群密度数据进行lg(x+1)转换。各模型中的环境因子均定义给潜变量(Env),用潜变量来反应对底栖动物类群的作用。经检验,轻度富营养和中营养水体建立的下列结构方程模型符合条件。

在轻度富营养和中营养水体,磷对软体动物有显著促进作用($P<0.01$)(图6a、b)。在正磷酸盐、总磷和螺蚌

建立的结构方程模型中,正磷酸盐与潜变量的协方差路径系数为0.828,且达到显著性水平($P<0.01$),总磷对潜变量有间接影响,协方差路径系数为0.674,这表明正磷酸盐比总磷对软体动物的作用更强;磷对蚌类的协方差路径系数为0.440,对螺类的协方差路径系数为0.414,这表明磷对蚌类的促进作用大于螺类;此外,螺、蚌种群间的协方差路径系数为0.416,且达到显著性水平($P<0.01$),说明2种群的变化趋势较为一致(图6a)。

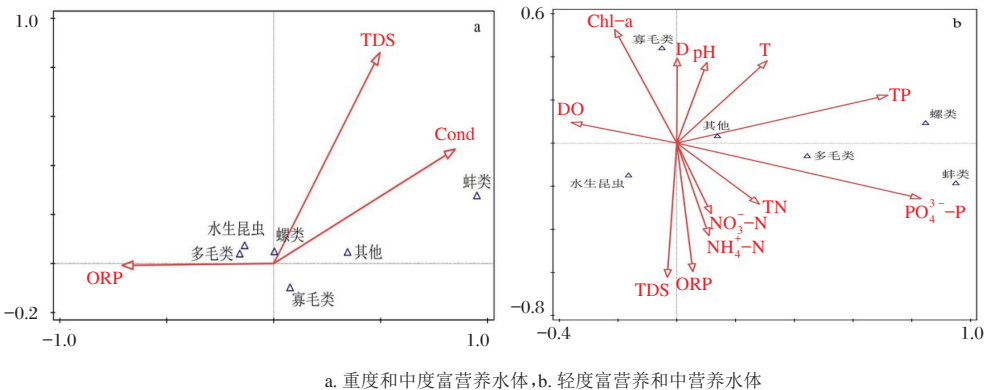


图5 城市湖泊4种营养水平水体中大型底栖动物与环境因子CCA分析
a. water body heavily and moderately eutrophic, b. water body lightly eutrophic and mesotrophic

Fig.5 Canonical correspondence analysis of macroinvertebrate density and environmental factors in urban lakes at four trophic levels

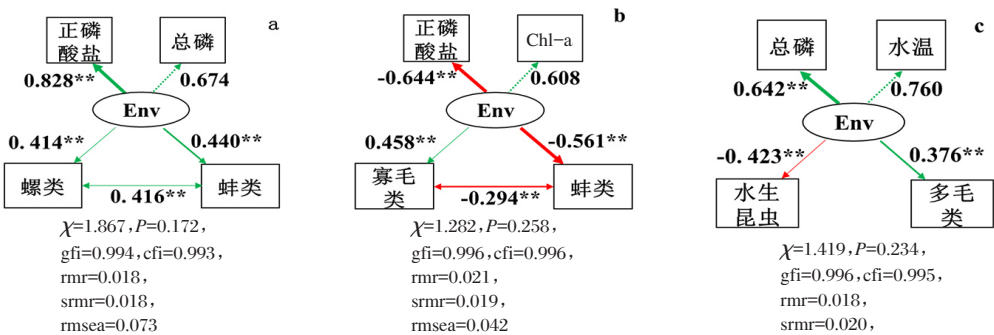


图6 在轻度富营养和中营养水体中的底栖动物各类群密度与环境因子之间结构方程模型

χ: Chi square value, P: P-value of chi-square statistics, gfi: Fitting index, cfi: Relative fitting index, rmr: Nonstandard residual, srmr: Standard residual, resea: Approximate root mean square error; Red arrow indicates that the covariance path coefficient is negative, and green indicates that the covariance path coefficient is positive; Env is latent variable defined for environmental factors; **indicates that the effect has reached a significant level

Fig.6 Structural equation model of macroinvertebrate density and environmental factors in lightly eutrophic and mesotrophic water bodies

在正磷酸盐、叶绿素a和寡毛类、蚌类建立的结构方程模型中,正磷酸盐与潜变量的协方差路径系数为-0.644,且达到显著性水平($P<0.01$),叶绿素a对潜变量有间接影响,协方差路径系数为0.608,可见正磷酸盐对蚌类和寡毛类的作用比叶绿素a更强烈;环境因子的潜变量对蚌类有显著反作用($P<0.01$),协方差路径系数为-0.561,对寡毛类有显著正向作用

($P<0.01$),系数为0.458,说明正磷酸盐对寡毛类有显著抑制作用($P<0.01$),叶绿素a则对寡毛类有促进作用,但对蚌类有抑制作用。此外,寡毛类和蚌类的协方差路径系数为-0.294,且达到显著性水平($P<0.01$),2种群变化趋势相反(图6b)。

在总磷、水温和多毛类、水生昆虫建立的结构方程模型中,总磷与潜变量的协方差路径系数为0.642,

且达到显著性水平($P<0.01$),水温对潜变量有间接影响,协方差路径系数为0.760。总磷和水温对多毛类有显著促进作用($P<0.01$),协方差路径系数为0.376,对水生昆虫则显著抑制($P<0.01$),协方差路径系数为-0.423(图6c)。

3 讨论

3.1 不同营养水平水体间底栖动物群落的差异

有研究认为,在中等营养水平下,群落结构最复杂,物种多样性最高,而贫营养和超富营养水平下,群落结构简单,多样性低(Gong & Xie, 2001)。对长江中下游部分湖泊的研究发现,草型湖泊底栖动物物种数、物种多样性均高于藻型湖泊(闫云君等, 2005);从草型湖泊到城市湖泊,随着湖泊营养水平升高,底栖动物生物多样性不断下降(蔡永久等, 2010);在太湖富营养状态下,底栖动物多样性与水体营养水平呈显著负相关(许浩等, 2015);在武汉东湖和湖北4个不同营养水平湖泊的研究也有类似结论(龚志军等, 2001;熊金林等, 2003)。本研究发现,底栖动物多样性指数随水体营养水平下降,先上升再下降,在轻度富营养水体达到最大值,与这些研究结果相似。湖泊生境的异质性与生物多样性呈正相关(Tews et al, 2004),而水生植物可提高生境异质性,进而提高生物多样性(Phiri et al, 2012)。本研究中,重度富营养的点位,主要集中在西沱、东沱和漏湖,底质基本为淤泥,缺乏水生植物,生境异质性较低,主要适合寡毛类这种穴居型类群繁殖,不适合软体动物生长,软体动物仅5种,生物多样性较低。轻度富营养和中营养水体,涵盖的湖泊较多,生境类型多样,淀山湖、阳澄湖等有水草分布(孙月娟等, 2011;朱利明等, 2019),适合软体动物生长,软体动物达24种,生物多样性较高。

关于水体营养水平与底栖动物群落密度和生物量的关系,不同研究得出的结论不一致。例如,在草型湖泊扁担塘,底栖动物密度和生物量均高于藻型湖泊后湖(闫云君等, 2005),但在长江中下游10个湖泊的研究发现,湖泊营养状态指数与底栖动物密度呈显著正相关,而与生物量呈显著负相关,随着营养状态指数上升,特征种从螺类转变为颤蚓类和摇蚊幼虫(蔡永久等, 2010)。对太湖的研究则发现,底栖动物密度和生物量与营养水平呈正相关,随富营养化加剧,底栖动物优势种从软体动物变成摇蚊幼虫和寡毛类(许浩等, 2015)。对梁塘河的研究也发现,底栖动物密度和生物量与总磷均显著相关(沈宏等,

2016)。本研究中,随水体营养水平上升,寡毛类密度和生物量显著增加,蚌类密度和生物量显著下降,与这些研究结果相似(闫云君等, 2005;蔡永久等, 2010;许浩等, 2015)。随城市湖泊水体营养水平上升,底栖动物总生物量不断下降,重度富营养水体底栖动物总生物量显著小于其他类型水体,也与长江中下游的研究结论一致(蔡永久等, 2010)。太湖流域城市湖泊重度富营养水体中,底栖动物以寡毛类和水生昆虫为主,软体动物占比较低;而在轻度富营养和中营养水体,软体动物密度显著增加;因为底栖动物生物量中软体动物占比最大,所以软体动物的增加是导致底栖动物总生物量增加的主要原因。

3.2 不同营养水平下环境因子对底栖动物群落的影响

环境因子对底栖动物群落的影响一直是底栖动物生态研究的热点,不同湖泊影响底栖动物的环境因子各不相同。对太湖的研究发现,水生植物、水深、沉积物有机质、电导率等对太湖底栖动物物种分布影响较大(许浩等, 2015)。对长江中下游湖泊的研究发现,水深、透明度、水温、总磷、浮游藻类叶绿素a和沉水植物生物量是影响底栖动物现存量的主要因子(王海军等, 2019)。随着富营养化的加剧,颤蚓类和摇蚊幼虫会逐渐成为优势类群,其密度和生物量不断增加,而软体动物密度会不断下降,与软体动物相比,寡毛类和水生昆虫对富营养化有更强的耐受力(闫云君等, 2005;蔡永久等, 2010;许浩等, 2015)。本研究综合CCA和结构方程模型分析发现,在轻度富营养和中营养水体,水体磷含量、水温和叶绿素a浓度是影响底栖动物群落的重要因子,与对长江中下游湖泊的研究基本一致。

在轻度富营养和中营养水体,磷含量的升高会显著增加螺蚌和多毛类的密度($P<0.01$),并显著抑制寡毛类和水生昆虫密度($P<0.01$)。出现这一现象的主要原因是本研究中软体动物以环棱螺属、河蚬、湖球蚬等占绝对优势,这些种类都是常见耐污种(辽宁省环境监测实验中心, 2014);而在轻度富营养水平,磷含量的升高为软体动物提供了更丰富的营养盐,但还没有达到抑制其生长的程度,使软体动物规模得以增长,说明在不超过软体动物耐受范围的情况下,营养盐升高可促进软体动物生长。此外,本研究中轻度富营养和中营养水体(阳澄湖和淀山湖等),有水草分布(孙月娟等, 2011;朱利明等, 2019),利于螺类繁殖。有研究发现,铜锈环棱螺对磷有絮凝作用,降解总磷的幅度能达到50%(魏阳春和濮培民, 1999),铜锈环棱螺与水草组合可显著去

除水体总磷(王彦玲等,2011),蚌草共存也可降低水中各形态磷营养盐含量(李萍,2016),这些发现均可说明,软体动物对水体磷有较强的去除能力。此外,湖泊水温的升高会显著增加多毛类密度,并显著抑制水生昆虫密度,对淀山湖的研究也有类似发现(朱利明等,2019)。

综上所述,在城市湖泊生态保护和生境修复中,首先要降低水体营养水平,当营养水平下降至轻度富营养以下后,还需要提高生境的异质性,如种植水生植物、丰富底质类型等,来增加底栖动物,尤其是软体动物多样性和规模,改善生态系统的功能;同时要减少藻类生物量,以防软体动物群落受到不利影响,导致生态系统受到破坏。

参考文献

- 蔡永久,姜加虎,张路,等,2010.长江中下游湖泊大型底栖动物群落结构及多样性[J].湖泊科学,22(6):811-819.
- 陈丽平,高欣,牛翠娟,等,2013.太湖流域春季底栖动物群落结构特征及水质评价[J].水产学报,37(11):1679-1688.
- 陈桥,张翔,沈丽娟,等,2017.太湖流域江苏片区底栖大型无脊椎动物群落结构及物种多样性[J].湖泊科学,29(6):1398-1411.
- 高欣,牛翠娟,胡忠军,2011.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,22(12):3329-3336.
- 龚志军,谢平,唐汇娟,2001,等.水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响[J].水生生物学报,25(3):210-216.
- 国家环境保护总局,2002.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社.
- 李萍,2016.滤食性贝类、沉水植物及其共存对水体富营养化的影响[D].广州:暨南大学.
- 辽宁省环境监测实验中心,2014.辽河流域底栖动物监测图鉴[M].北京:中国环境出版社.
- 刘文亮,何文珊,2007.长江河口大型底栖无脊椎动物[M].上海:上海科学技术出版社.
- 毛新伟,徐枫,徐彬,等,2009.太湖水质及富营养化变化趋势分析[J].水资源保护,25(1):48-51.
- 沈宏,石彭灵,吴耀,等,2016.梁塘河大型底栖动物群落及其水质生物学评价[J].水生生物学报,40(1):203-210.
- 孙月娟,王武,刘其根,等,2011.江苏阳澄湖螺类群落的空间分布格局[J].长江流域资源与环境,20(6):711-716.
- 唐红渠,2006.中国摇蚊科幼虫生物系统学研究(Diptera:Chironomidae)[D].天津:南开大学.
- 王海军,王洪铸,赵永晶,等,2019.长江中下游浅水湖群底栖动物资源量宏观格局与预测模型[J].水生生物学报,42(1):1-9.
- 王明翠,刘雪芹,张建辉,2002.湖泊富营养化评价方法及分级标准[J].中国环境监测,18(5):47-49.
- 王彦玲,韩士群,宋伟,等,2011.植物与螺组合浮床对富营养化水体的净化效果[J].江苏农业学报,27(2):295-300.
- 魏阳春,濮培民,1999.太湖铜锈环棱螺对氮磷的降解作用[J].长江流域资源与环境,8(1):89-93.
- 熊金林,梅兴国,胡传林,2003.不同污染程度湖泊底栖动物群落结构及多样性比较[J].湖泊科学,15(2):160-168.
- 许浩,蔡永久,汤祥明,等,2015.太湖大型底栖动物群落结构与水环境生物评价[J].湖泊科学,27(5):840-852.
- 闫云君,李晓宇,梁彦龄,2005.草型湖泊和藻型湖泊中大型底栖动物群落结构的比较[J].湖泊科学,17(2):176-182.
- 中国生态系统研究网络科学委员会,2007.水域生态系统观测规范[M].北京:中国环境科学出版社.
- 朱利明,肖文胜,周东,等,2019.淀山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,40(2):55-65.
- Caner J L, Resh V H, Hallnaford M J, 2017. Macroinvertebrates as biotic indicators of environmental quality[M]. New York: Academic Press: 293-318.
- Gong Z J, Xie P, 2001. Impact of eutrophication on biodiversity of the macrozoobenthos community in a Chinese shallow lake[J]. Journal of Freshwater Ecology, 16(2): 171-178.
- Masero J A, Pérez-González M, Basadre M, et al, 1999. Food supply for waders(Aves: Charadrii) in an estuarine area in the Bay of Cadiz(SW Iberian Peninsula) [J]. Acta Oecologica, 20(4): 429-434.
- Ntislidou C, Lazaridou M, Tsiaoussi V, et al, 2018. A new multi-metric macroinvertebrate index for the ecological assessment of Mediterranean lakes[J]. Ecological Indicators, (93): 1020-1033.
- Pan B Z, Wang H Z, Pusch M T, et al, 2015. Macroinvertebrate responses to regime shifts caused by eutrophication in subtropical shallow lakes[J]. Freshwater Science, 34(3): 942-952.
- Phiri C, Chakona A, Day JA, 2012. Macroinvertebrates associated with two submerged macrophytes, Lagarosiphon ilicifolius and Vallisneria aethiopica, in the Sanyati Basin, Lake Kariba, Zimbabwe: effects of plant morphological complexity[J]. African Journal of Aquatic Science, 37(3): 277-288.
- Pielou E C, 1975. Ecological Diversity[M]. New York: Wiley-Inters.
- Shannon C E, Weaver W, 1971. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois Press.
- Tews J, Brose U, Grimm V, et al, 2004. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures[J]. Journal of Biogeography, 31(1): 79-92.

Community Structure of Macroinvertebrates and Influencing Factors in the Urban Lakes of the Taihu Lake Basin

LU Wen-ze^{1,2}, REN Ren^{1,2}, RAO Xiao^{1,2}, RAO Qing-yang^{1,2}, XIE Ping^{1,3}, DENG Xu-wei^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology of China, Donghu Experimental Station of Lake Ecosystems, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P.R. China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R. China;
3. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, P.R. China)

Abstract : Eutrophication is a serious problem in the urban lakes of the Taihu Lake basin. In this study, 15 urban lakes in the basin with varying nutrient levels were studied. The evolution of the macroinvertebrate community in these urban lakes, as well as environmental factors driving change were investigated based on a seasonal survey of macroinvertebrates and the water environment in December 2018, and March, June and September 2019. The aim was to add to our knowledge of macroinvertebrate ecology and provide a reference for ecorestoration of urban lakes. Based on the comprehensive nutrition status index TLI(Σ), the 15 urban lakes included heavily (10.3%), moderately (36.89%) and mildly (42.07%) eutrophic, and mesotrophic (11%) water bodies. Among the lakes, differences in water transparency, turbidity, total phosphorus and Chlorophyll a were highly significant ($P<0.01$), and they were the factors indicating lake trophic status. As nutrient levels decreased, transparency significantly increased, while turbidity, total phosphorus and Chlorophyll a significantly decreased. Total macroinvertebrate biomass, and mussel density and biomass increased as nutrient levels declined, while Oligochaeta density and biomass decreased. In heavily eutrophic water bodies, the total biomass of macroinvertebrates (9.57 ± 8.29) g/m² was significantly lower than in the less eutrophic lakes ($P<0.01$). In the mildly eutrophic and mesotrophic lakes, mussel density and biomass were significantly larger than in the heavily and moderately eutrophic lakes ($P<0.01$), while Oligochaeta density was significantly lower ($P<0.01$). Shannon-Wiener diversity, Simpson richness and Pielou evenness indices increased, but then decreased as nutrient levels decreased with respective maximum values of (1.14 ± 0.04), (0.55 ± 0.02) and (0.68 ± 0.02) in the mildly eutrophic lakes. After developing a structural equation model, we found that water temperature, total phosphorus and Chlorophyll a were the key environmental factors affecting macroinvertebrate community structure in mildly eutrophic and mesotrophic urban lakes. Further analysis showed that increasing levels of total phosphorus significantly increased mollusk populations ($P<0.01$), with path coefficients were as high as 0.414 for snails and 0.440 for mussels. Total phosphorus concentration and water temperature significantly increased polychaete populations ($P<0.01$), and significantly decreased aquatic insect populations ($P<0.01$), with path coefficients as high as 0.376 for polychaetes and -0.423 for aquatic insects. In a word, total phosphorus and chlorophyll a concentrations had important effects on the macroinvertebrate community structure in urban lakes. Reducing phosphorus levels would reduce algal concentrations in urban lakes and play a key role in restoring the macroinvertebrate community and the aquatic ecology of urban lakes.

Key words: Taihu Lake basin; urban lake; macroinvertebrates; community structure; eutrophication