J. Lake Sci.(湖泊科学), 2017, **29**(1): 200-215
DOI 10.18307/2017.0122
© 2017 by *Journal of Lake Sciences*

巢湖流域不同水系大型底栖动物群落结构及影响因素*

张　又[1,2],程　龙[3],尹洪斌[1],高俊峰[1],张志明[1],蔡永久[1**]
(1:中国科学院南京地理与湖泊研究所,中国科学院流域地理学重点实验室,南京 210008)
(2:河海大学水文水资源学院,南京 210098)
(3:南京水利科学研究院,南京 210029)

摘　要: 2013 年 4 月对巢湖流域 8 个水系 147 个样点的大型底栖动物进行调查,分析其群落结构及与环境因子的关系. 共采集到大型底栖动物 213 种,隶属于 3 门 7 纲 22 目 76 科 177 属. 8 个水系大型底栖动物物种数差异较大,在杭埠河发现 172 种,而在十五里河仅发现 10 种. 大型底栖动物密度组成呈现出显著的空间差异. 南淝河和十五里河的寡毛纲相对密度均超过 96%,派河的寡毛纲和摇蚊幼虫的相对密度分别为 47.8% 和 41.1%. 裕溪河、白石天河、柘皋河和杭埠河的腹足纲相对密度最大. 杭埠河的水生昆虫相对密度达 30.6%,是水生昆虫相对密度最大的水系. 相似性分析结果表明,8 个水系特征种差异明显,霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)是十五里河和派河的最主要优势种,而铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)是兆河、裕溪河、杭埠河、白石天河和柘皋河的最主要优势种,铜锈环棱螺和霍甫水丝蚓是南淝河贡献率较大的两种优势种. 生物多样性结果表明,Shannon-Wiener、Simpson 及 Margalef 指数在 8 个水系间具有显著差异,Pielou 指数在 8 个水系间差异不明显. 典范对应分析结果表明,影响大型底栖动物群落结构的主要因素为水体营养状态和底质异质性. 高营养盐浓度导致南淝河、派河和十五里河的耐污种密度高、生物多样性低,而相对较高的底质异质性维持了杭埠河大型底栖动物的高多样性和敏感型物种的生存.
关键词: 巢湖流域;大型底栖动物;生物多样性;典范对应分析

Benthic macroinvertebrate community structure and environmental determinants in river systems of Chaohu Basin

ZHANG You[1,2], CHENG Long[3], YIN Hongbin[1], GAO Junfeng[1], ZHANG Zhiming[1] & CAI Yongjiu[1**]
(1: *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences*, *Nanjing Institute of Geography and Limnology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Nanjing* 210008, *P.R.China*)
(2: *College of Hydrology and Water Resources*, *Hohai University*, *Nanjing* 210098, *P.R.China*)
(3: *Nanjing Hydraulic Research Institute*, *Nanjing* 210029, *P.R.China*)

Abstract: We investigated benthic macroinvertebrate communities at 147 sites in eight river systems of the Chaohu Basin in April 2013. Community structure and environmental determinants were examined by canonical correspondence analysis. A total of 213 macroinvertebrate taxa from 177 genera, 76 families, 22 orders, 7 classes, 3 phyla were recorded. The benthic macroinvertebrate community structure showed significant spatial difference among the eight river systems. Nanfei River and Shiwuli River were dominated by Oligochaeta, accounting for more than 96% of the total abundance. Oligochaeta and Chironomidae dominated the communities in Pai River, accounting for 47.8% and 41.1% of the total abundance, respectively. Yuxi River, Baishitian River, Zhegao River and Hangbu River were mainly dominated by Gastropoda. SIMPER analysis showed that *Limnodrilus hoffmeisteri* was the main dominant species in Shiwuli River and Pai River, and *Bellamya aeruginosa* was the main dominant species in Zhao River, Yuxi River, Hangbu River, Baishitian River and Zhegao River. *L. hoffmeisteri* and *B. aeruginosa* dominated the communities in Nanfei River. The Shannon-Wiener, Simpson and Margalef indices showed significant differences among the eight river systems. Low diversity and abundant pollution tolerant species of benthic communities in Nanfei River, Pai River and Shiwuli River were structured by

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501-002-008)和国家自然科学基金项目(31300396)联合资助. 2015-11-11 收稿; 2016-04-12 收修改稿. 张又(1989~), 女, 博士研究生; E-mail: zhangyou0103@163.com.
** 通信作者; E-mail: caiyj@niglas.ac.cn.

high nutrient loads, while high diversity and sensitive species richness in Hangbu River.
Keywords: Chaohu Basin; benthic macroinvertebrate; biodiversity; canonical correspondence analysis

巢湖位于安徽省中部,是长江中下游典型的大型浅水湖泊. 巢湖流域水系主要支流发源于大别山区,南淝河、杭埠河、派河、兆河、十五里河、白石天河、柘皋河等支流呈辐射状注入巢湖,由裕溪河等支流将巢湖与长江沟通[1-3]. 近年来,随着流域内工业、农业、城市化的快速发展,对流域内水环境的影响愈加强烈[4],水质呈现恶化趋势,水生态系统结构和功能退化严重[5]. 因此开展水质与生态系统结构现状研究,可为生态系统的保护与恢复提供依据. 大型底栖动物是淡水生态系统中的一个重要生物类群,它们可以加速水体碎屑分解、调节水泥界面的物质交换、净化水质,在湖泊和河流的物质循环和能量流动等方面发挥着重要作用[6-7]. 大型底栖动物因为生活在水底,生活史相对较长,移动能力较弱,不同大型底栖动物种类对环境变化的敏感程度不同,其群落结构的变化能很好地反映环境污染状况[8].

巢湖流域各水系自然环境存在显著差异,人类活动对水质和水生态的影响也大有不同. 研究表明,南淝河、十五里河和派河是巢湖最主要的污染负荷来源地,水质现状均为劣Ⅴ类,属于重度污染[9]. 兆河、柘皋河水质现状为Ⅲ~Ⅳ类,水质轻度污染,前者主要污染源为城镇生活污水和工业废水,以及庐南重工业园区带来的环境压力,而后者则以农业面源、富磷山体开采造成的磷污染和城镇污水污染为主. 杭埠河内以山丘区为主,在众多支流中水量最丰,水质现状为Ⅲ类水,水质较好,是巢湖流域最大的入湖支流和最重要的清水来源. 白石天河水质现状为Ⅲ~Ⅳ类水,水质较好,也是巢湖主要的清流来源之一. 裕溪河为长江左岸一级支流,由巢湖闸上承巢湖来水,经裕溪闸下注长江,巢湖闸下段全年水质均值为Ⅳ类;而裕溪闸下段主要为Ⅱ~Ⅲ类.

巢湖流域各水系水环境的差异以及近年来的变化,已然对大型底栖动物的群落结构产生了影响. 目前,针对巢湖流域内大型底栖动物已有一些研究[10-11]. 但主要集中在巢湖湖体,对流域内河流的关注较少. 已有全流域的研究布点较少,采集到的大型底栖动物种类也较少[12-13],不足以反映全流域河流的情况. 因此,本研究于2013年4月对巢湖流域内的河流与溪流大型底栖动物开展了系统调查,其目的是探明不同水系大型底栖动物群落结构的差异,分析巢湖流域生态环境空间差异对大型底栖动物的影响,为流域的生态环境管理和生物多样性保护提供科学数据支撑.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样点布设

巢湖流域位于安徽省中部,属长江水系,流域面积约为 1.3×10^4 km^2. 其中,巢湖闸以上 9130 km^2,地跨合肥、肥西、舒城、庐江、巢湖、肥东6个市(县);闸下面积4365 km^2,地跨无为、和县及含山3个县[2]. 巢湖流域地势的总轮廓是东西向较长. 地形总体呈北高南低,西高东低,中间低洼平坦. 西南为山区,东北为丘陵及浅山区,东南及沿湖为平原. 流域内河网密布、纵横交错,主要包括南淝河、杭埠河、白石天河、派河、十五里河、裕溪河、兆河和柘皋河等8个水系,共33条出入湖河流,呈放射状直接或间接汇入巢湖[14]. 本研究在巢湖流域的8大水系共布设样点147个,其中,南淝河水系21个、杭埠河水系52个、白石天河水系5个、派河水系6个、十五里河水系2个、裕溪河水系37个、兆河水系16个和柘皋河水系8个(图1).

1.2 大型底栖动物样品采集

2013年4月采集了147个样点的大型底栖动物样品. 样品采集采用D形抄网,每个采样点采集10个30 cm×50 cm的样方,并混合成一个样品. 这10个样方涵盖样点100 m河段内的主要生境,从而使样品可以全面反映该样点的情况. 对于无法涉水的大型河流,使用1/16 m^{2}彼得逊采泥器采集大型底栖动物,每个样点采集6次混合成一个样品. 每个样点所采集的泥样经过60目尼龙筛网现场筛洗,剩余物带回实验室,置于白色瓷盘中,将所有大型底栖动物逐一挑出,并用7%福尔马林溶液固定保存. 大型底栖动物的鉴定在解剖镜和显微镜下进行,所有样品都鉴定至尽可能低的分类单元[15-18]. 每个采样点所采到的大型底栖动物按不同种类准确地统计数量并用电子天平称重,称重前用滤纸吸去表面固定液. 根据每个样点的采样面积,最终换算出各样点每种大型底栖动物的密度(ind./m^2)和生物量(g/m^2).

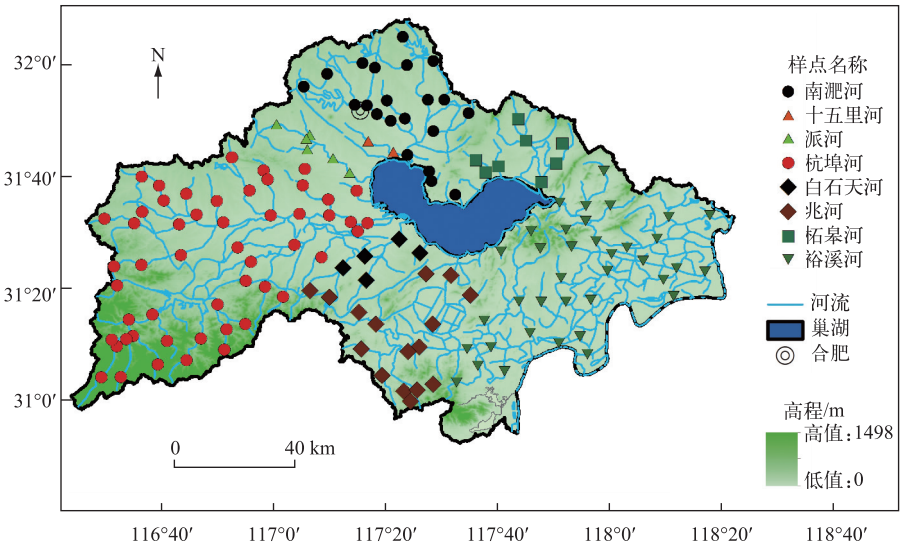


图 1 巢湖流域 8 大水系采样点分布

Fig.1 Sampling sites in the eight river systems in the Chaohu Basin

1.3 环境因子测定

现场测定各样点基本环境指标,并对栖息地质量进行评分,同时采集水样带回实验室分析水化学参数. 现场采用 YSI 6600 V2 型多参数水质监测仪(美国)现场测定表层(30~50 cm)的 pH、溶解氧(DO)、电导率(COND)、浊度(Turbidity)等水质指标. 采集水样冷冻保存带回实验室,用于测量总磷(TP)、正磷酸盐(PO_4^{3-}-P)、总氮(TN)、铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、叶绿素 a(Chl.a)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})以及溶解性总有机碳(DOC),测定方法参考《水和废水监测分析方法》[19]. 栖息地质量选择栖境多样性(Habitat)、河道变化(Channel)、交通干扰程度(Transportation)、土地利用(Land)、底质异质性(Substrate)5 个参数. 通过现场调查,根据质量状况优劣程度,每个指标分为 4 个级别:好(16~20)、较好(11~15)、一般(6~10)和差(0~5)[8, 20-21].

1.4 数据分析处理

1.4.1 多样性指数 采用 Simpson 优势度指数(D)、Margalef 丰富度指数(d_{ma})、Shannon-Wiener 多样性指数(H')及 Pielou 均匀度指数(J')这 4 个多样性指数计算各样点的大型底栖动物多样性,并基于 Shannon-Wiener 指数进行水质生物学评价,其公式分别为:

$$D = 1 - \sum_{i=1}^{S}\left(\frac{n_i}{N}\right)^2 \tag{1}$$

$$d_{ma} = (S-1)\cdot \ln S \tag{2}$$

$$H' = -\sum_{i=1}^{S}\left(\frac{n_i}{N}\right)\cdot \ln\left(\frac{n_i}{N}\right) \tag{3}$$

$$J' = \frac{H'}{H'_{max}} = \frac{H'}{\ln S} \tag{4}$$

式中,S 为群落中的总物种数,N 为观察到的总个体数,n_i 为第 i 个物种的个体数. $H'>3$,水体为无污染;$2\leqslant H'\leqslant 3$ 时,为轻污染;$1\leqslant H'<2$ 时,为中污染;$H'<1$ 时,为重污染.

1.4.2 水体富营养化状态 采用综合营养状态指数方法($TLI(\Sigma)$)[22]来评价河流水体富营养化状态,具体计算方法为:

$$TLI(\Sigma) = \sum_{j=1}^{m} W_j \cdot TLI(j) \tag{5}$$

式中,$TLI(\Sigma)$为综合营养状态指数,W_j为第j种参数营养状态的相关权重,$TLI(j)$为第j种参数的营养状态指数[22]. $TLI(\Sigma)<30$时,水体为贫营养;$30\leqslant TLI(\Sigma)\leqslant 50$时,水体为中营养;$50<TLI(\Sigma)\leqslant 60$时,为轻度富营养;$60<TLI(\Sigma)\leqslant 70$时,为中度富营养;$TLI(\Sigma)>70$时,为重度富营养.

以 Chl.a 作为基准参数,则第j种参数的归一化相关权重计算公式为:

$$W_j = r_{ij}^2 / \sum_m r_{ij}^2 \tag{6}$$

式中,r_{ij}为第j种参数与基准参数 Chl.a 的相关系数[22],m为评价参数的个数.

1.4.3 多元分析　本研究各水系样点数量差异较大,检验发现各水系环境因子方差非齐次,故选用非参数检验(Kruskal-Wallis)来分析 8 个水系环境因子差异,并采用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)来确定主要水质梯度. 采用相似性百分比分析 SIMPER(Similarity Percentages)计算每个水系的特征种及其对水系内相似性的贡献率(累积贡献率至 90%),SIMPER 分析在 PRIMER 5.0 软件中完成[23]. 采用典范对应分析(Canonical Correspondence Analysis, CCA)来分析大型底栖动物群落与环境因子之间的关系. 分析之前,先进行除趋势对应分析(DCA),若结果中最大梯度长度值大于 3,则选择单峰模型(CCA)排序;若最大梯度长度值小于 3,则选择线性模型(冗余分析,RDA)排序. 本研究的 DCA 第一轴的梯度长度为 4.052,故选用 CCA 进行分析. 环境因子的筛选采用向前引入法(forward selection),保留能通过蒙特卡罗置换检验的显著因子(Monte Carlo test, 9999 random permutations, $P<0.05$). 用 CCA 排序图将物种(适合范围 20%~100%的物种)、样点和环境因子绘出,直观地呈现出种类组成及群落分布与环境因子之间的关系. CCA 分析前,将物种数据进行平方根转换,环境因子进行 $\lg(x+1)$转换(pH 除外). PCA 和 CCA 分析在 CANOCO 4.5 软件中完成.

2 结果与分析

2.1 环境特征

8 个水系的环境特征差异较大(表 1). 杭埠河、白石天河和兆河的栖境多样性、河道变化、交通、土地利用和底质异质性的得分均较高,说明这 3 个水系的生境质量较高. 南淝河和十五里河的水体营养盐浓度较高,表明污染较严重. 各水系的环境因子梯度变化呈现显著空间差异(图 2). 前两个主成分的方差解释率分别为 54.1%和 17.0%. 第一主成分主要与生境指标呈负相关,与水体营养指标呈正相关,表明 PC1 主要反映了栖息地质量和水体的营养状态. 杭埠河、白石天河和兆河的点位主要位于左侧,而南淝河和十五里河的点位主要聚集在右侧且沿着营养盐的轴线分布,表明杭埠河、白石天河和兆河的生境质量较高,而南淝河和十五里河的水体营养盐浓度较高.

十五里河、派河和南淝河的富营养化程度较高. 十五里河所有点位均处于重度富营养化状态;派河有 50%的点位处于重度富营养化状态,另有 33%的点位处于轻度富营养化状态;南淝河有 38%的点位处于重度富营养化状态,而处于中度和轻度富营养化状态的点位比例分别为 19%和 29%,有 14%的点位处于中营养状态,主要为南淝河上游水质较好的样点. 杭埠河、白石天河和兆河主要处于中营养状态,柘皋河和裕溪河的大部分点位处于中营养和轻度富营养状态(图 3).

2.2 种类组成

巢湖流域 147 个采样点,共采集并鉴定出大型底栖动物 213 种,分属 3 门 7 纲 22 目 76 科 177 属. 其中寡毛纲 4 种,双壳纲 12 种,腹足纲 18 种,摇蚊幼虫(因摇蚊幼虫多为耐污种,且在巢湖流域占据优势,故单独列出)56 种,水生昆虫(除摇蚊幼虫以外的水生昆虫,下同)111 种,其他大型底栖动物 12 种. 出现率大于 20%的有 17 种,其中铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)的出现率最高,达到 72.1%. 其次为椭圆萝卜螺(*Radix swinhoei*)、纹沼螺(*Parafossarulus striatulus*)和霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*),其出现率分别为 53.7%、44.9%和 37.4%.

巢湖流域不同水系间物种数量和组成差异较大(表 2). 杭埠河物种数最多(172 种),其次为裕溪河(107 种)、兆河(64 种)、南淝河(50 种)和柘皋河(44 种). 十五里河的物种数最少,仅有 10 种. 杭埠河的水生昆虫、双壳纲和腹足纲的数量均最多,分别为 136、10 和 15 种. 杭埠河各样点的物种数均值也最大(达 15 种),其次是裕溪河(12 种)、白石天河(12 种)和柘皋河(12 种). 十五里河水系的物种数均值最小(6 种).

表 1 巢湖流域各水系的理化特征

Tab.1 Physicochemical characteristic in the eight river systems of the Chaohu Basin

理化指标	南淝河 (n=21)	十五里河 (n=2)	派河 (n=6)	杭埠河 (n=52)	白石天河 (n=5)	兆河 (n=16)	柘皋河 (n=8)	裕溪河 (n=37)	P 值
河宽/m	30(3~105)	21(7~35)	37(6~90)	33(3~320)	52(8~144)	41(1~310)	33(3~85)	71(4~230)	<0.05
流速/(m/s)	0.01(0~0.07)	0.20(0~0.39)	0.04(0~0.17)	0.21(0~0.90)	0.04(0~0.080)	0.16(0~0.72)	0.04(0~0.20)	0.10(0~0.60)	<0.01
pH	8.03(7.11~9.28)	7.75(7.40~8.09)	7.65(7.10~8.35)	8.71(7.31~18.56)	7.91(7.67~8.24)	7.92(7.23~9.71)	7.71(6.93~9.10)	8.11(7.04~9.94)	<0.05
DO/(mg/L)	7.5(0.9~13.8)	6.5(1.8~11.1)	7.4(5.3~11.2)	11.5(1.5~18.2)	9.8(8.8~10.7)	8.8(2.4~13.3)	6.7(2.0~14.4)	10.1(1.8~21.4)	<0.01
电导率/(mS/cm)	0.36(0.11~1.24)	0.49(0.48~0.50)	0.22(0.16~0.28)	0.14(0.03~0.36)	0.20(0.15~0.24)	0.37(0.04~3.16)	0.27(0.08~0.58)	0.20(0.08~0.50)	<0.01
浊度/NTU	26.7(3.0~54.5)	19.1(16.7~21.5)	10.3(2.6~18.6)	8.8(0.1~38.8)	6.4(3.8~12.1)	11.4(0.4~101.2)	23.2(0.9~116.1)	22.1(0.3~108.6)	<0.01
COD_{Mn}/(mg/L)	9.53(1.76~68.29)	6.54(3.32~9.76)	7.32(4.68~9.76)	4.57(1.76~10.73)	5.54(4.68~6.83)	4.56(2.54~7.80)	6.68(4.88~9.17)	5.33(1.76~19.32)	<0.01
TP/(mg/L)	1.16(0.04~8.81)	5.12(3.40~6.84)	0.44(0.07~1.10)	0.13(0.02~1.44)	0.04(0.02~0.07)	0.27(0.02~3.00)	0.15(0.03~0.47)	0.08(0.01~6.84)	<0.01
PO_4^{3-}-P/(mg/L)	0.66(0.01~5.73)	4.43(2.77~6.09)	0.27(0.01~0.70)	0.07(0.01~0.83)	0.02(0.01~0.04)	0.18(0~2.19)	0.10(0.02~0.30)	0.03(0.01~6.09)	<0.01
TN/(mg/L)	10.99(0.70~53.49)	25.86(25.10~26.63)	5.51(1.02~14.75)	1.73(0.45~4.64)	1.53(0.68~3.02)	3.26(0.61~20.67)	1.43(0.48~4.47)	1.44(0.60~26.63)	<0.01
NH_4^+-N/(mg/L)	7.38(0.28~31.60)	19.79(15.93~23.64)	4.44(0.41~16.14)	0.55(0.06~3.83)	0.49(0.17~1.08)	2.09(0.32~19.06)	0.95(0.26~3.66)	0.59(0.16~23.64)	<0.01
NO_3^--N/(mg/L)	0.14(0.05~1.49)	0.07(0.05~0.09)	0.08(0.04~0.16)	0.44(0.04~2.74)	0.26(0.07~0.73)	0.31(0.05~1.35)	0.07(0.05~0.09)	0.18(0.05~0.66)	<0.01
Chl.a/(μg/L)	40.5(0.5~288.9)	23.7(14.0~33.3)	39.5(3.0~82.6)	4.0(0.1~21.9)	3.6(1.1~6.9)	3.9(0.1~17.2)	27.9(0.4~105.2)	11.0(0.2~128.0)	<0.01
DOC/(mg/L)	9.8(5.48~18.33)	11.91(10.70~13.11)	5.79(3.93~6.49)	4.92(1.99~18.59)	5.32(3.58~7.35)	5.43(2.35~8.54)	6.99(3.13~10.81)	4.76(1.45~13.11)	<0.01
栖境多样性(20′)	8.67(1~15)	6(1~11)	9.83(3~13)	13.88(9~18)	13(12~16)	11.94(4~18)	12(8~15)	11.49(1~18)	<0.01
河道变化(20′)	8.43(2~16)	6(2~10)	9(5~12)	13.71(6~20)	11(7~17)	13.31(5~20)	9.38(6~13)	11.35(2~19)	<0.01
交通干扰程度(20′)	6.81(1~16)	2(2~2)	6.17(2~13)	12.13(5~18)	11(6~16)	11.38(1~19)	8.25(4~12)	10.08(0~18)	<0.01
土地利用(20′)	7.52(2~16)	5(3~7)	6.5(2~11)	11.75(5~18)	10.8(6~16)	10.25(4~18)	8.75(6~10)	10.11(3~18)	<0.01
底质异质性(20′)	1.81(0~4)	1(1~1)	2.33(1~3)	8.69(1~19)	3.2(1~7)	4.75(1~14)	2.5(2~3)	3.89(0~18)	<0.01

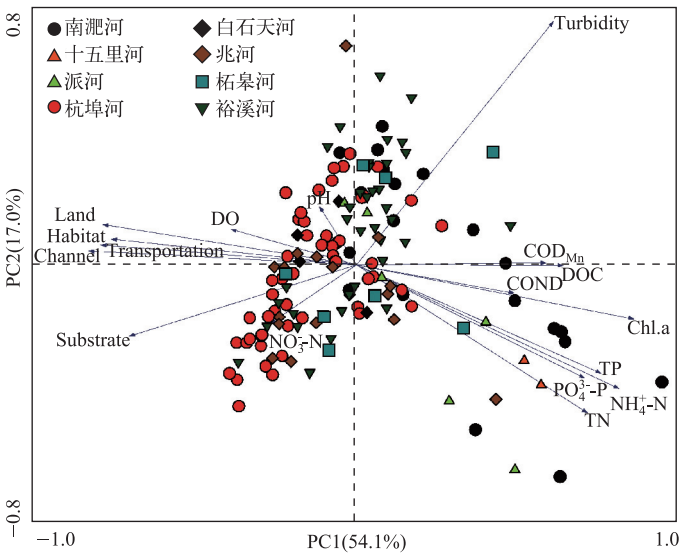


图 2 巢湖流域各水系样点的理化因子主成分分析

Fig.2 Principal component analysis of physicochemical parameters in the eight river systems of the Chaohu Basin

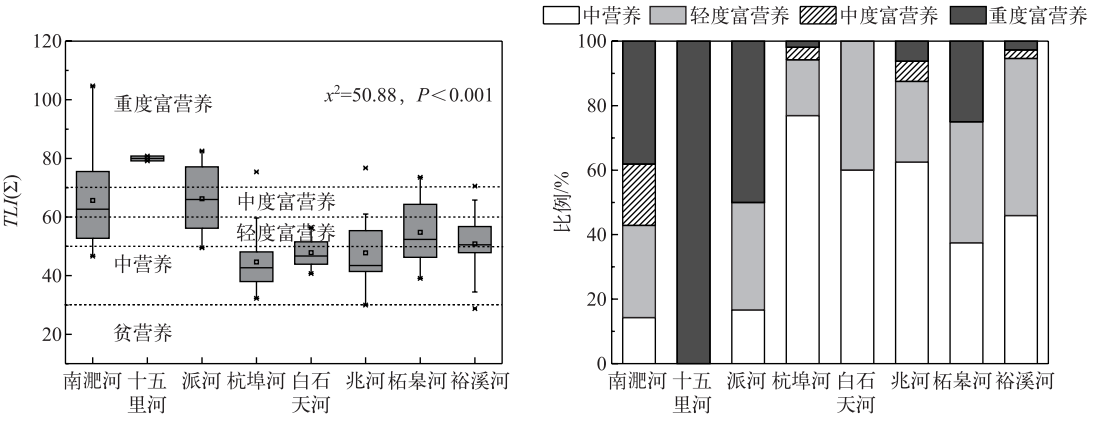


图 3 巢湖流域各水系营养状态

Fig.3 Trophic state of the eight river systems of the Chaohu Basin

杭埠河的点位物种数最大值和最小值分别为 28 和 6 种,其标准差也是各水系中最大的,表明杭埠河水系内底栖动物物种数差异较大.

2.3 大型底栖动物密度分布特征

巢湖流域大型底栖动物密度类群的组成呈现出显著的空间差异(图 4). 整体而言,腹足纲密度在巢湖流域平原区河流大部分样点占据优势,大部分点位所占比重高于 75%,但在西南部的源头溪流和污染严重的南淝河水系未出现(图 5). 铜锈环棱螺是腹足纲的第一优势种,其分布特征基本与腹足纲的分布特征一致. 寡毛纲主要在城市河道(十五里河、南淝河和派河)占据优势. 南淝河水系各样点的寡毛纲密度均高于 5000 ind./m^2,最高值可达 203400 ind./m^2,所占比重接近 100%,在南淝河入湖口区域所占比例也超过 80%. 寡毛纲在派河监测点密度也较高,超过 1000 ind./m^2. 双壳纲主要分布于平原区河流,在山区溪流、城市河道密度基本无分布. 摇蚊幼虫在巢湖流域分布广泛,主要在南淝河、派河和十五里河的部分点位占据优势. 水

表 2 巢湖流域不同水系大型底栖动物种类组成

Tab.2 The number of taxa in the eight river systems of the Chaohu Basin

门	纲	目	南淝河	十五里河	派河	杭埠河	白石天河	兆河	柘皋河	裕溪河
环节动物门	寡毛纲		2	2	2	3	2	3	2	3
	多毛纲		0	0	0	0	0	0	0	1
	蛭纲		3	0	2	5	2	5	2	6
节肢动物门	甲壳纲		3	0	2	3	1	2	1	4
	昆虫纲	鞘翅目	2	1	0	6	0	0	2	1
		双翅目	15	3	3	50	8	24	15	38
		蜉蝣目	0	0	0	16	0	3	1	4
		半翅目	2	1	1	3	1	0	1	2
		等足目	0	0	0	0	0	0	0	1
		鳞翅目	1	0	0	3	1	0	0	1
		广翅目	0	0	0	2	0	0	0	0
		蜻蜓目	7	2	4	30	2	7	8	20
		襀翅目	0	0	0	5	0	0	0	0
		毛翅目	1	0	0	21	0	5	0	6
		合计	28	7	8	136	12	39	27	73
软体动物门	双壳纲		5	0	1	10	2	6	3	9
	腹足纲		9	1	6	15	9	9	9	11
总计			50	10	21	172	28	64	44	107

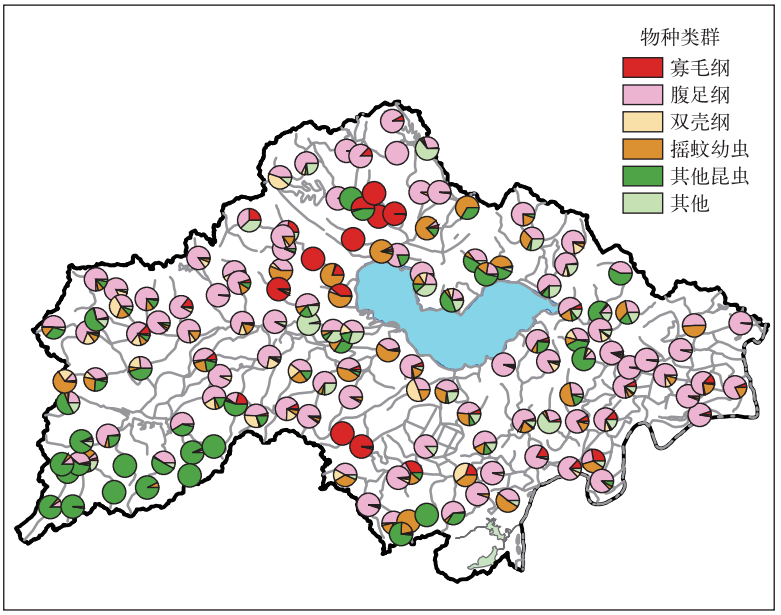


图 4 巢湖流域大型底栖动物密度类群组成空间格局

Fig.4 Spatial patterns of relative abundance of the common taxonomic groups in the Chaohu Basin

生昆虫大多为敏感型物种,主要分布在西南(杭埠河)和南部(兆河)的山区溪流. 多毛纲的寡鳃齿吻沙蚕(*Nephtys oligobranchia*)仅在裕溪河水系采集到.

巢湖流域各水系的大型底栖动物类群组成差异也较大(图 6). 寡毛纲在南淝河(占总密度 96.8%)和十

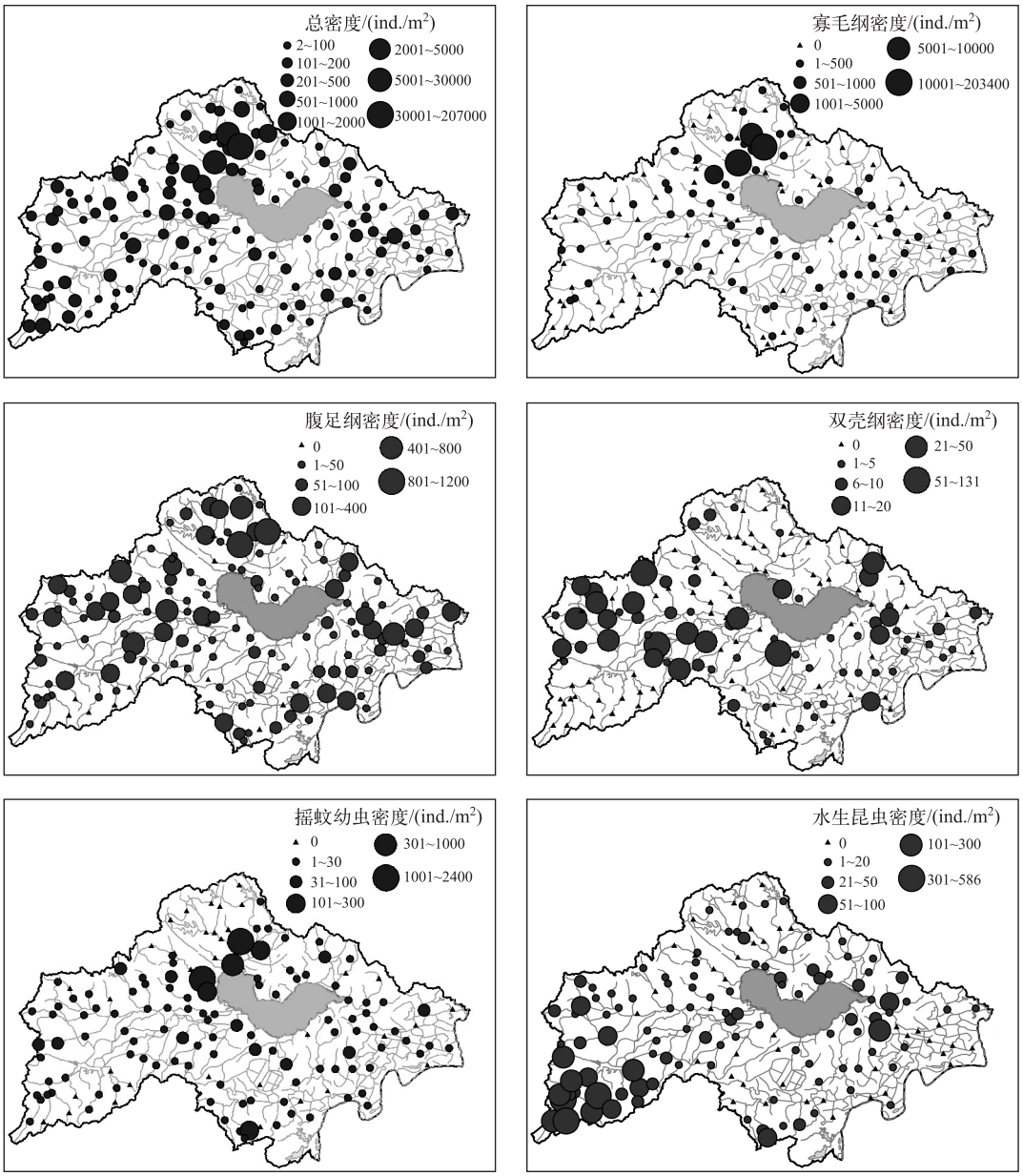


图 5 巢湖流域大型底栖动物总密度和主要类群密度的空间分布特征

Fig.5 Spatial patterns of abundance for total benthic macroinvertebrate and common taxonomic groups in the Chaohu Basin

五里河(98.3%)占据绝对优势. 派河的寡毛纲和摇蚊幼虫所占比例最大,分别为 47.8% 和 41.1%. 腹足纲在裕溪河(68.6%)、白石天河(56.2%)和柘皋河(55.9%)的相对密度较大. 水生昆虫相对密度最高的是杭埠河(30.6%),柘皋河(13.8%)和裕溪河(10.6%)次之,其他水系的水生昆虫相对密度都很小.

SIMPER 分析结果显示 8 个水系的特征种差异显著(表 3). 十五里河的特征种仅 1 种,即寡毛纲的霍甫水丝蚓,其密度达 10874.4 ind./m^2. 杭埠河的主要特征种数量最多,有 11 种,且各个物种类群皆有. 派河、兆河和裕溪河的主要特征种均为寡毛纲、腹足纲和摇蚊幼虫,但派河的特征种数量要少于兆河和裕溪河,且派

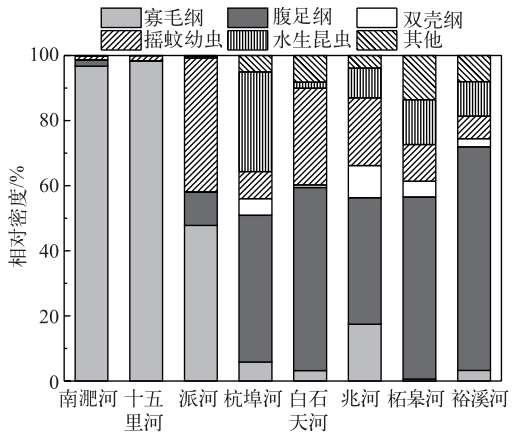


图 6 巢湖流域各生态区常见大型底栖动物类群的相对密度

Fig.6 Relative abundance of the common taxonomic groups in the eight river systems of the Chaohu Basin

河的摇蚊幼虫密度要远大于兆河和裕溪河;而兆河和派河的寡毛纲密度远大于裕溪河,但裕溪河的腹足纲密度高于兆河. 南淝河的主要特征种有 8 种,主要为寡毛纲和腹足纲. 白石天河的主要特征种为腹足纲和摇蚊幼虫,共 5 种;而柘皋河的主要特征种有 7 种,除了腹足纲和摇蚊幼虫外,还有其他昆虫和甲壳纲. 总之,铜锈环棱螺和霍甫水丝蚓是大部分水系的特征种,但其在不同水系的平均密度和贡献率不同. 如霍甫水丝蚓是十五里河和派河的最主要优势种,而铜锈环棱螺是兆河、裕溪河、杭埠河、白石天河和柘皋河的最主要优势种,铜锈环棱螺和霍甫水丝蚓是南淝河贡献率较大的两种优势种,其中霍甫水丝蚓是南淝河的第一优势种,而铜锈环棱螺则是南淝河水系中店埠河的第一优势种.

2.4 生物多样性

巢湖流域大型底栖动物物种多样性呈现空间差异. Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数的高值主要出现在杭埠河、兆河和裕溪河的部分点位,4 个生物多样性指数的低值主要出现在南淝河、十五里河、派河和兆河的部分点位(图 7). Shannon-Wiener 指数均值最大的为杭埠河(1.79),其次是白石天河(1.76)、柘皋河(1.76)和裕溪河(1.61). 柘皋河(0.74)、白石天河(0.74)和杭埠河(0.73)的 Simpson 指数均值较大. 杭埠河(2.88)和白石天河(2.77)的 Margalef 指数均值最大. Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数的均值最小值均为十五里河. 统计分析结果表明,Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Margalef 指数在 8 个水系间具有显著差异,Pielou 指数在 8 个水系间差异不明显($P=0.133$). Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数及 Margalef 指数在杭埠河、柘皋河和白石天较高,在南淝河和十五里河较低.

基于 Shannon-Wiener 指数进行水质生物学评价(图 8),结果显示十五里河污染最严重,所有样点均处于重污染状态. 派河、南淝河和兆河的污染状况也较为严重,分别有 50%、38% 和 31% 的点位处于重污染状态;处于中污染状态的点位则分别有 50%、52% 和 44%. 杭埠河和裕溪河处于重污染状态的点位比例较少,分别占 8% 和 14%;其大部分点位(58% 和 62%)处于中污染状态. 白石天河和柘皋河污染相对较轻,分别有 80% 和 63% 的点位处于中污染状态,其余点位则处于轻污染状态.

2.5 典范对应分析

CCA 分析筛选出 COND、TN、NH_4^+-N、NO_3^--N、Chl.a、Substrate 与巢湖流域河流大型底栖动物群落关系最显著. 第 1 轴和第 2 轴的特征值较大,分别为 0.610 和 0.297,分别解释了 4.7% 和 2.3% 的物种数据方差变异和 37.4% 和 18.3% 的物种-环境关系变异. 第 3 轴和第 4 轴分别解释了 1.6% 和 1.6% 的物种数据方差变异以及 12.6% 和 12.6% 的物种-环境关系变异(表 4). 第 1 轴与 Substrate、NO_3^--N 和 Chl.a 的相关性较高,第 2 轴与 NH_4^+-N、TN 的相关性较高. 从各因子进入 CCA 分析的顺序及其解释率可以看出,Substrate、NH_4^+-N 和 TN 的解释率相对较高,而 COND、NO_3^--N 和 Chl.a 的解释率相对较低. 从排序图上可以看出,杭埠河的样点主要沿 Substrate 分布,而南淝河、派河和十五里河的点位主要沿 NH_4^+-N 和 TN 分布,其他点位主要分布在 NH_4^+-N、TN 及 Substrate 的反方向(图 9). 这说明营养盐浓度和底质异质性是影响巢湖流域大型底栖动物群落结构的主要因素. 高营养盐浓度是决定南淝河、派河和十五里河这 3 个水系大型底栖动物结构的主要因素,底质异质性高是决定杭埠河水系大型底栖动物结构的主要因素.

典范对应分析揭示了 16 种大型底栖动物(响应范围为 20%~100% 的物种)与环境因子的关系. 寡毛纲的霍甫水丝蚓和苏氏尾鳃蚓的分布与 NH_4^+-N 和 TN 浓度呈正相关. 12 种水生昆虫与 Substrate 呈正相关,而腹足纲的铜锈环棱螺和纹沼螺与 Substrate 及营养盐浓度呈负相关(图 9).

表 3 巢湖流域 8 个水系的大型底栖动物相似性百分比分析*

Tab.3 SIMPER analysis of the eight river systems of the Chaohu Basin

物种	南淝河	十五里河	派河	杭埠河	白石天河	兆河	柘皋河	裕溪河
寡毛纲								
霍甫水丝蚓 *Limnodrilus hoffmeisteri*	9604.0/23.5	10874.4/100	204.3/52.8	10.5/1.3		97.0/10.3		
苏氏尾鳃蚓 *Branchiura sowerbyi*			6.9/8.0					1.5/2.0
腹足纲								
铜锈环棱螺 *Bellamya aeruginosa*	45.2/35.2			47.3/43.8	15/42.7	16.8/59.1	36.1/38.3	42.2/51.3
椭圆萝卜螺 *Radix swinhoei*	11.3/9.7			12.0/7.6	4.2/16.8	0.9/2.1		1.7/2.4
纹沼螺 *Parafossarulus striatulus*	5.6/2.2					1.5/2.5	7.2/7.0	8.3/12.6
膀胱螺属 *Physa* sp.	3.6/3.4			8.0/5.1	4.2/13			
大沼螺 *Parafossarulus eximius*								5.1/3.6
长角涵螺 *Alocinma longicornis*	50.6/8.1					3.6/6.3		18.1/17.4
方格短沟蜷 *Semisulcospira cancelata*				14.0/4.6				
尖口圆扁螺 *Hippeutis cantori*	77.6/5.6		35.5/14.2				7.3/5.6	
双壳纲								
河蚬 *Corbicula fluminea*				6.4/4.3				
摇蚊幼虫								
黄色羽摇蚊 *Chironomus flaviplumus*			49.2/8.9		4.6/9.9	6.1/7.2	6.4/10.4	2.6/2.4
林间环足摇蚊 *Cricotopus sylvestris*				6.3/1.7	9.4/10.1		3.2/4.9	
其他昆虫								
合脉石蛾属 *Cheumatopsyche* sp.				5.3/2.9		4.2/3.4		
扁蜉属 *Heptagenia* sp.				22.0/15.4				
负子蝽科 Belostomatidae sp.	1.0/2.6						8.3/8.1	
纹石蛾属 *Hydropsyche* sp.				4.5/1.6				
其他								
锯齿新米虾 *Neocaridina denticulata*				7.4/2.5			14.8/16.6	
日本沼虾 *Macrobrachium nipponense*			0.8/6.6					
总计	9798.9/90.4	10874.4/100	296.6/90.4	143.7/90.7	37.4/92.6	2339.4/90.9	83.3/90.9	79.5/91.6

* 表格数据为平均密度/贡献率,其中平均密度的单位为 ind./m^2,贡献率的单位为%.

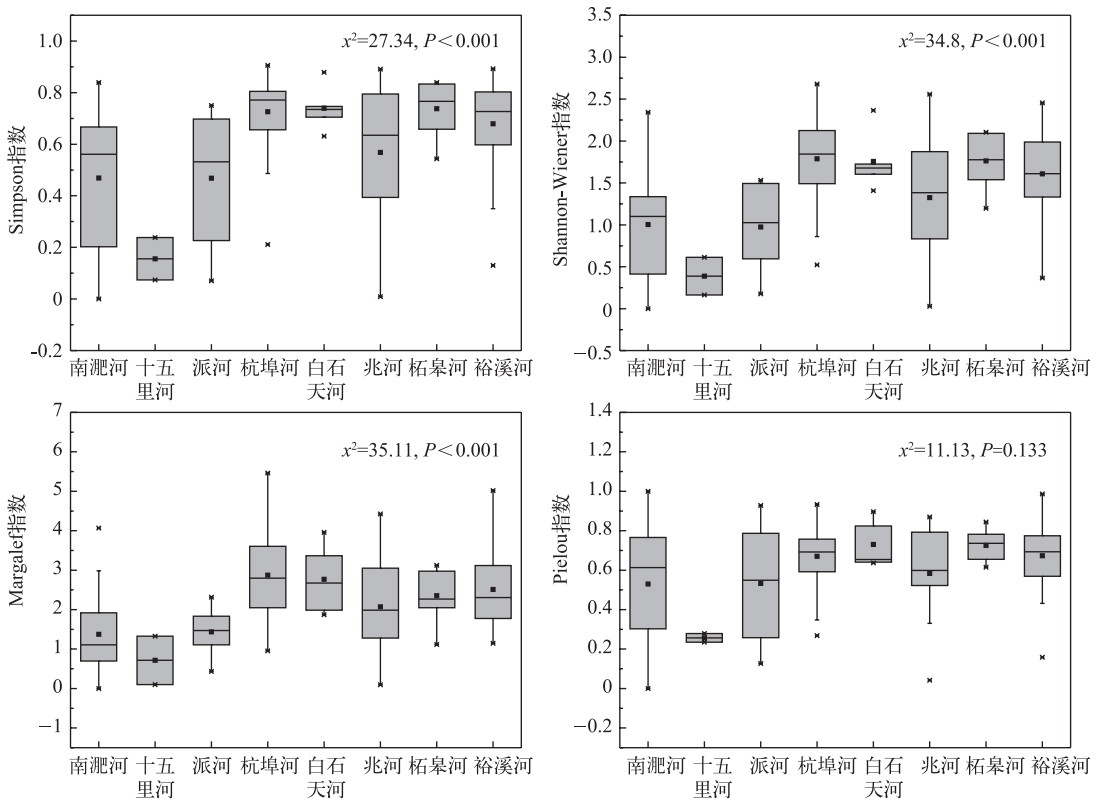


图 7 巢湖流域各水系的大型底栖动物多样性箱线图

Fig.7 Box plots of diversity indices in the eight river systems of the Chaohu Basin

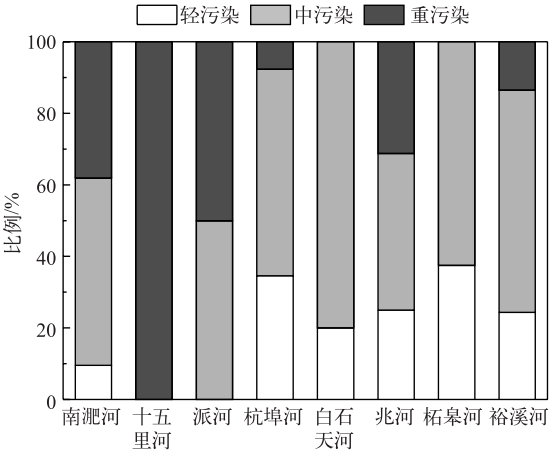


图 8 基于 Shannon-Wiener 指数的巢湖流域各水系水质生物学评价

Fig.8 Bioassessment of water quality based on Shannon-Wiener index for the eight river systems of the Chaohu Basin

3 讨论

3.1 大型底栖动物群落结构及空间分布格局

本次调查共采集到大型底栖动物 213 种,相对于前期高峰等[12]和宁怡等[13]在巢湖流域调查到的 23 种大型底栖动物,本次调查采样点更多,分布范围更广,涵盖了巢湖流域的主要河流和溪流,采集到的物种数也更多,更能反映巢湖流域的大型底栖动物分布特征.

霍甫水丝蚓在污染严重的南淝河、十五里河和派河大量孳生. 一般而言,霍甫水丝蚓的大量出现常被认为是环境污染严重的标志[24]. 寡毛纲密度在十五里河和南淝河大部分点位都超过 5000 ind./m^2. 南淝河已处于严重富营养化状态,且有机污染物是造成南淝河水质污染的主要原因[25],这是因为未经处理的城市生活污水和工业废水直接排放,南淝河已成为合肥市的纳污河[26]. 此外,寡毛纲在派河监测点密度也较高,超过 1000 ind./m^2. 寡毛纲在以上点位的高密度表明这些河流污染严

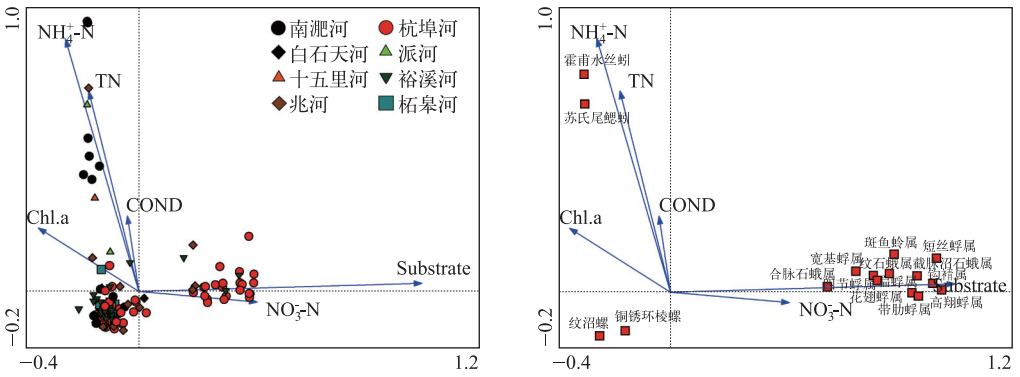


图 9 大型底栖动物群落结构与环境因子的典范对应分析排序图

Fig.9 CCA plots of benthic macroinvertebrate assemblages and environmental factors

表 4 大型底栖动物群落结构与环境因子的典范对应分析结果

Tab.4 Summarized results for the first four axes of the CCA of species-environment

项目	轴 1	轴 2	轴 3	轴 4	总惯量
特征值	0.610	0.297	0.206	0.205	12.862
物种-环境关系	0.924	0.838	0.899	0.918	
物种数据方差变异累计百分比/%	4.7	7.0	8.6	10.2	
物种-环境关系变异累计百分比/%	37.4	55.7	68.3	80.9	
电导率	−0.04	0.22	0.37	0.76	
TN	−0.16	0.59	0.50	0.04	
NH_4^+-N	−0.24	0.74	0.22	0.004	
NO_3^--N	0.38	−0.03	0.18	0.20	
Chl.a	−0.33	0.19	0.60	−0.21	
Substrate	0.92	0.02	0.002	−0.07	

重,这与水化学监测结果一致. 腹足纲在大部分河流中的密度比重都高于 75%,特别是铜锈环棱螺,为大部分水系的第一优势种. 这是因为铜锈环棱螺主要以着生藻类、细菌及淤泥中的有机碎屑为食,适应性较强,生态位宽[27]. 但污染较为严重的南淝河和十五里河中,腹足纲和双壳纲都鲜有出现或密度很小. 邓道贵等[28]在对巢湖富营养化对河蚬和环棱螺分布和种群特征的影响研究中指出:河蚬和环棱螺的种群密度和生物量均会随着水体富营养化程度的加剧而下降,而南淝河和十五里河均处于严重富营养化状态,不利于环棱螺的栖息与繁殖. 多毛纲的寡鳃齿吻沙蚕仅在裕溪河水系采集到,寡鳃齿吻沙蚕(*Nephtys oligobranchia*)为海洋河口性种类,主要分布在长江下游两侧的湖泊和河流中,其在裕溪河的出现主要受到物种扩散过程影响,这也表明湖泊与长江连通对维持生物多样性具有重要作用.

巢湖流域大型底栖动物群落结构与国内其他流域相比,具有一定的差异. 与相对发达的太湖流域相比[29],巢湖流域大型底栖动物的物种丰富度更高,各样点的密度、物种数及多样性指数也更高. 巢湖流域是一个农业型主导的湖泊型流域,其河道以自然土质护坡为主. 而太湖流域的很多河流均为硬质护坡,流域内河流渠道化程度较高、生境退化严重,这也更加证明了城市化和河道渠道化会严重影响大型底栖动物的结构特征. 与同样是以农业为主的辽河流域相比[30],巢湖流域大型底栖动物的物种丰富度水平和生物多样性水平相似,但辽河流域发现的水生昆虫比例相对高一些. 在杭埠河上游的源头溪流点位中,水生昆虫的物种丰富度较高,且相对密度较大,而巢湖流域下游污染较为严重的河流中,摇蚊幼虫和寡毛纲等耐污型物种占据优势. 这与辽河流域的研究结果一致[30]:在源头溪流中的清洁种,特别是水生昆虫 *Baetis* sp.的数量较多,而在第四级河流的点位中摇蚊幼虫、甲壳纲等耐污性物种更占优势. 李法云等[31]的研究也发现辽河流域以

水生昆虫为主的清洁种主要分布在以林地为主的区域中,在以耕地和居民住宅为主的区域摇蚊幼虫占据优势,而以城市发展为主的土地利用区域寡毛纲的优势地位明显. 对浑太河流域的研究发现河段尺度人类活动压力对底栖动物群落结构空间分异影响最显著[32],且不同尺度环境因子对大型底栖动物群落结构的影响有联合效应. 在今后研究中应综合考虑土地利用、水文、栖息地质量及地质状况等对大型底栖动物的影响. 敖江流域研究也发现大型底栖动物种类呈现支流多于干流的规律[33],且在上游、中游和下游的断面均有寡毛纲物种,表明其受到了不同程度的有机污染;鳌江流域中游端面出现蜉蝣目、毛翅目、襀翅目等敏感型水生昆虫,表明其自然生境保存较为完整,受到人为干扰较小. 因为底栖动物的分布有一定的地域性,每一个地理区域都有各自的底栖动物区系特点. 因此,对于大型底栖动物的研究除了要分析底栖动物区域性的特征,还应深入分析底栖动物的不同功能类群,如功能摄食类群、耐污能力等生物特征.

3.2 水体营养盐与大型底栖动物空间格局的关系

水体营养盐与大型底栖动物群落组成具有较高相关性. 在高营养盐浓度的水体中,水体底层的溶解氧浓度较低,直接限制了敏感物种的生存;厌氧条件还会增加沉积物中硫化物的含量,从而增大了对大型底栖动物的潜在毒性[34]. 伴随着富营养化的进程,浮游植物在水体初级生产力中的比重逐渐增大,而水生植被则逐渐减少,甚至消失,这会直接降低生境多样性,限制了与水生植物密切相关种类的生存[35]. 同时,富营养化对大型底栖动物的生长、繁殖和存活率也有一定影响[36-37],富营养化往往会导致大型底栖动物多样性的降低,并且小个体的种类(如寡毛纲和摇蚊幼虫)逐渐代替大个体的种类(如腹足纲和双壳纲)成为优势种,因为小个体的种类一般生活年限较短,对环境的适应能力较强[38]. 霍甫水丝蚓和苏氏尾鳃蚓可以在极度缺氧的环境中生存,有研究表明,富营养化水体中可发现大量霍甫水丝蚓,其在东湖富营养化最严重区域的密度可达 10524 ind./m^2[39]. 本研究结果表明霍甫水丝蚓和苏氏尾鳃蚓这两种寡毛纲物种与水体营养盐浓度呈正相关. 寡毛纲是十五里河和派河最主要的优势种,其在南淝河的贡献率仅次于铜锈环棱螺. 在这 3 条水系中的多个点位,寡毛纲大量孳生,其密度百分比接近 100%,占据绝对优势地位. 综合营养状态指数表明,十五里河、派河和南淝河的富营养化程度较高,相当一部分点位处于重度富营养状态. 杭埠河、兆河上游点位的寡毛纲相对密度百分比很小,在某些点位甚至没有发现寡毛纲,这与综合营养状态的结果是一致的.

3.3 底质对大型底栖动物空间格局的影响

底质在很大程度上决定了大型底栖动物的群落组成和多样性,对巢湖水向湖滨带的研究发现底质是影响大型底栖动物分布及现存量的主要因素[11]. 一般而言,大型底栖动物多样性随底质稳定性和异质性的增加而增加[40]. 这是因为底质是大型底栖动物赖以生存的环境,可提供栖息、摄食、繁殖和躲避捕食的场所. 此外,底质的粒径大小对大型底栖动物影响较大,卵石河床决定了鳌江流域下游大型底栖动物物种更丰富、密度也较高[33]. 一般而言,底质粒径可以通过影响沉积物孔隙度及溶解氧浓度和深度来影响大型底栖动物的摄食和生长率[41]. 不同大型底栖动物类群对底质的喜好差异很大. 本研究中,杭埠河水系源头溪流的底质异质性较高,但下游的河流中底质异质性逐渐降低. 典范对应分析结果指出,12 种水生昆虫与底质异质性呈正相关,这 12 种水生昆虫均为清洁型物种 EPT 昆虫(蜉蝣目、襀翅目、毛翅目合称)和广翅目昆虫,而水生昆虫主要分布在底质异质性较高的源头溪流中. 这是因为 EPT 昆虫等水生昆虫喜好粗砂砾底质,因为它们喜欢粘在小石头上生存[42],并且在底质为粗砂砾和卵石的生境中,蜉蝣目的密度可达到最大[43]. 软体动物喜好砂质淤泥,有研究发现细颗粒的沉积物可以通过影响螺 *Reymondia horei* 的摄食行为而明显降低螺的存活率[44]. 双壳纲在源头溪流和城市河道中基本没有分布,可能是因为双壳纲对水体溶解氧比较敏感,而十五里河富营养化严重,可能水体底层溶解氧浓度较低直接限制了双壳纲的生存. 同时,双壳纲喜栖息于淤泥、砂底质,摄食方式主要为滤食,而山区溪流底质多为卵石、巨石等,水质透明度高,可供滤食的食物少,不利于双壳纲的生存繁殖.

巢湖流域 8 个水系的大型底栖动物群落结构特征差异明显. 总体而言,杭埠河的大型底栖动物物种丰富度最高,底质异质性高是决定其大型底栖动物群落结构特征的主要环境因子;而十五里河、南淝河和派河的大型底栖动物生物多样性较低,物种丰富度低且寡毛纲密度很大,这主要是因为其水体营养盐浓度过高,污染较为严重;这些区域已受到严重的人为干扰,需引起关注.

4 参考文献

[1] Editorial Committee of Encyclopedia of Rivers and Lakes in China. Encyclopedia of rivers and lakes in China · The Yangtze River. Beijing: China Water & Power Press, 2010.[中国河湖大典编委会. 中国河湖大典·长江卷. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.]

[2] Editorial Committee of Water Conservancy Annals of Anhui Province ed. Rivers and lakes of Anhui. Wuhan: Yangtze River Press, 2010.[安徽省水利志编辑室. 安徽河湖概览. 武汉: 长江出版社, 2010.]

[3] Zhang Zhiming, Gao Junfeng, Yan Renhua. Assessment of ecosystem services based on aquatic ecoregion of the area surrounding the Chaohu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(7): 1110-1118. DOI:10.11870/cjlyzyyhj201507005.[张志明, 高俊峰, 闫人华, 基于水生态功能区的巢湖环湖带生态服务功能评价. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(7): 1110-1118.]

[4] Wang Zhenxiang, Zhu Xiaodong, Meng Ping. Annual scale variation analysis of eutrophication in Chaohu Lake and its countermeasures. *Environmental Protection*, 2009, **416**(6): 33-36. [王振祥, 朱晓东, 孟平. 巢湖富营养化年度尺度变化分析及对策. 环境保护, 2009, **416**(6): 33-36.]

[5] Zhang Min, Kong Fanxiang. The process, spatial and temporal distributions and mitigation strategies of the eutrophication of Lake Chaohu(1984-2013). *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 791-798. DOI: 10.18307/2015.0505.[张民, 孔繁祥. 巢湖富营养化的历程、空间分布与治理策略(1984－2013 年). 湖泊科学, 2015, **27**(5): 791-798.]

[6] Vanni MJ. Nutrient cycling by animals in freshwater ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2002, **33**: 341-370. DOI:10.1146/annurev.ecolsys.33.010802.150519.

[7] Covich AP, Palmer MA, Crowl TA. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems-zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling. *Bioscience*, 1999, **49**(2): 119-127. DOI:10.2307/1313537.

[8] Zhang You, Liu Ling, Cai Yongjiu *et al*. Benthic macroinvertebrate community structure in rivers and streams of Lake Taihu Basin and environmental determinants. *China Environmental Science*, 2015, **35**(5): 1535-1546.[张又, 刘凌, 蔡永久等. 太湖流域河流及溪流大型底栖动物群落结构及影响因素. 中国环境科学, 2015, **35**(5): 1535-1546.]

[9] Wang Shuhang, Jiang Xia, Jin Xiangcan. Classification and pollution characteristic analysis for inflow rivers of Chaohu Lake. *Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2834-2839. DOI:10.13227/j.hjkx.2011.10.024.[王书航, 姜霞, 金相灿. 巢湖入湖河流分类及污染特征分析. 环境科学, 2011, **32**(10): 2834-2839.]

[10] Cai YJ, Gong ZJ, Xie P. Community structure and spatiotemporal patterns of macrozoobenthos in Lake Chaohu (China). *Aquatic Biology*, 2012, **17**(1): 35-46. DOI:10.3354/ab00455.

[11] Zhao Yongjing, Liu Xueqin. Community structure of macrozoobenthos in the littoral zone of the Chaohu Lake. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, **21**(S2): 39-44.[赵永晶, 刘学勤. 巢湖水向湖滨带底栖动物群落结构研究. 长江流域资源与环境, 2012, **21**(S2): 39-44.]

[12] Gao Feng, Yin Hongbin, Hu Weiping *et al*. Ecological characteristics of macrobenthos communities in Chaohu basin in spring and their relationships with environmental factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, **21**(8): 2132-2139. DOI:10.13287/j.1001-9332.2010.0279.[高峰, 尹洪斌, 胡维平等. 巢湖流域春季大型底栖动物群落生态特征及与环境因子关系. 应用生态学报, 2010, **21**(8): 2132-2139.]

[13] Ning Yi, Gao Feng, Deng Jiancai *et al*. Biological assessment of water quality in Chaohu Lake watershed: A case study of benthic macroinvertebrate. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, **31**(4): 916-922. DOI:10.13292/j.1000-4890.2012.0107.[宁怡, 高峰, 邓建才等. 巢湖流域水质生物学评价——以大型底栖动物为例. 生态学杂志, 2012, **31**(4): 916-922.]

[14] Zhang Z, Gao J, Gao Y. The influences of land use changes on the value of ecosystem services in Chaohu Lake Basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 2015, **74**(1): 385-395. DOI:10.1007/s12665-015-4045-z.

[15] Liu Yueying, Zhang Wenzhen, Wang Yuexian *et al* eds. Economic Fauna of China: Freshwater Mollusca. Beijing: Science Press, 1979.[刘月英, 张文珍,王跃先等. 中国经济动物志——淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979.]

[16] Morse JC, Yang L, Tian L eds. Aquatic insects of China useful for monitoring water quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994.

[17] Wang Hongzhu ed. Studies on taxonomy, distribution and ecology of microdrile oligochaetes of China, with descriptions of

two new species from the vicinity of the Great Wall Station of China, Antarctica. Beijing: Higher Education Press, 2002. [王洪铸. 中国小蚓类研究(附中国南极长城站附近地区两新种).北京: 高等教育出版社, 2002.]

[18] Tang Hongqu. Biosystematic study on the chironomid larvae in China (Diptera: Chironomidae) [Dissertation]. Tianjin: Nankai University, 2006.[唐红渠. 中国摇蚊科幼虫生物系统学研究[学位论文]. 天津: 南开大学, 2006.]

[19] "Monitoring and analysis method of water and wastewater" editorial board of State Environmental Protection Administration of China ed. Monitoring and analysis methods of water and wastewater: Fourth Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]

[20] Barbour MT, Gerritsen J, Snyder BD *et al.* Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable river: Peiiphyton, Benthic macroinvertebrates and fish, Second Edition. Washington, DC, 1999.

[21] Zheng Binghui, Zhang Yuan, Li Yingbo. Study of indicators and methods for river habitat assessment of Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(6): 928-936. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2007.06.006.[郑丙辉, 张远, 李英博. 辽河流域河流栖息地评价指标与评价方法研究. 环境科学学报, 2007, **27**(6): 928-936.]

[22] Wang Mingcui, Liu Xueqin, Zhang Jianhui. Evaluate method and classification standard on lake eutrophication. *Environmental Monitoring in China*, 2002, **18**(5): 47-49.[王明翠, 刘雪芹, 张建辉. 湖泊富营养化评价方法及分级标准. 中国环境监测, 2002, **18**(5): 47-49.]

[23] Zhou Hong, Zhang Zhinan. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, **33**(1): 58-64. [周红, 张志南. 大型多元统计软件PRIMER的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用. 青岛海洋大学学报, 2003, **33**(1): 58-64.]

[24] Wang Zhi, Zhang Zhiyong, Zhang Junqian *et al.* The fauna structure of benthic macro-invertebrates for environmental restoration in a eutrophic lake using water hyacinths. *China Environmental Science*, 2012, **32**(1): 142-149.[王智, 张志勇, 张君倩等. 水葫芦修复富营养化湖泊水体区域内外底栖动物群落特征. 中国环境科学, 2012, **32**(1): 142-149.]

[25] Sheng Zhoujun, Sun Shiqun, Wang Jingcheng *et al*. Comprehensive evaluation of river water environmental quality based on the principal component analysis. *Environmental Science and Management*, 2007, **32**(12): 172-175.[盛周君, 孙世群, 王京城等. 基于主成分分析的河流水环境质量评价研究. 环境科学与管理, 2007, **32**(12): 172-175.]

[26] Ji Lan, Yang Liwu, Li Jing. Study on pollution situation of Nanfeihe River and strategies of substainable development. *Journal of Anhui University* (*Natural Science Edition*), 2006, **30**(4): 91-94.[纪岚, 杨立武, 李菁. 南淝河水污染现状与可持续发展对策研究. 安徽大学学报: 自然科学版, 2006, **30**(4): 91-94.]

[27] Cai Yongjiu, Gong Zhijun, Qin Boqiang. Standing crop and spatial distributional pattern of Mollusca in Lake Taihu, 2006-2007. *J Lake Sci*, 2009, **21**(5): 713-719. DOI: 10.18307/2009.0516.[蔡永久, 龚志军, 秦伯强. 太湖软体动物现存量及空间分布格局(2006－2007年). 湖泊科学, 2009, **21**(5): 713-719.]

[28] Deng Daogui, Li Hongyuan, Hu Wanming *et al.* Effects of eutrophication on distribution and population density of *Corbicula fluminea* and *Bellamya* sp. in Chaohu Lake. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, **16**(8): 1502-1506. DOI: 10.13287/j.1001-9332.2005.0184.[邓道贵, 李洪远, 胡万明等. 巢湖富营养化对河蚬和环棱螺分布及种群密度影响. 应用生态学报, 2005, **16**(8): 1502-1506.]

[29] Zhang Y, Liu L, Cheng L *et al.* Macroinvertebrate assemblages in streams and rivers of a highly developed region (Lake Taihu Basin, China). *Aquatic Biology*, 2014, **23**: 15-28. DOI: 10.3354/ab00600.

[30] Gao X, Niu C, Chen Y *et al*. Spatial heterogeneity of stream environmental conditions and macroinvertebrates community in an agriculture dominated watershed and management implications for a large river (the Liao River, China) basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, **186**(4): 2375-2391. DOI:10.1007/s10661-013-3545-0.

[31] Li Fayun, Lang Hongwei, Wang Yanjie *et al.* Impacts of land use on the spatial and temporal distribution characteristics of the macroinvertebrates in the Liao River basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, **36**(3): 767-777. DOI:10.13671/j.hjkxxb.2015.0624.[李法云, 郎红伟, 王艳杰等. 辽河流域典型支流土地利用方式对大型底栖动物群落时空分布特征的影响. 环境科学学报, 2016, **36**(3): 767-777.]

[32] Li Yanli, Li Yanfen, Xu Zongxue. Effect of environmental factors on macroinvertebrate community structure in the Huntai River Basin. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 94-106. DOI:10.13227/j.hjkx.2015.01.013.[李艳利, 李艳粉, 徐宗学. 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析. 环境科学, 2015, **36**(1): 94-106.]

[33] Zhang Yuzhen, Huang Wendan, Wang Zhiyuan *et al*. Evaluation of aquatic ecosystem health in Aojiang Basin, Fujian

Province. *J Lake Sci*, 2015, **27**(6): 1079-1086. DOI: 10.18307/2015.0612.[张玉珍, 黄文丹, 王智苑等. 福建敖江流域水域生态系统健康评估. 湖泊科学, 2015, **27**(6): 1079-1086.]

[34] Jonge MD, Dreesen F, Paepe JD *et al*. Do acid volatile sulfides (AVS) influence the accumulation of sediment-bound metals to benthic invertebrates under natural field conditions? *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(12): 4510-4516. DOI:10.1021/es8034945.

[35] Céréghino R, Ruggiero A, Marty P *et al*. Influence of vegetation cover on the biological traits of pond invertebrate communities. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 2008, **44**(4): 267-274. DOI: 10.1051/limn:2008010.

[36] Wacker A, Becher P, von Elert E. Food quality effects of unsaturated fatty acids on larvae of the zebra mussel *Dreissena polymorpha*. *Limnology and Oceanography*, 2002, **47**(4): 1242-1248. DOI: 10.4319/lo.2002.47.4.1242.

[37] Wacker A, von Elert E. Food quality controls reproduction of the zebra mussel (*Dreissena polymorpha*). *Oecologia*, 2003, **135**(3): 332-338. DOI: 10.1007/s00442-003-1208-5.

[38] Warwick RM, Collins NR, Gee JM *et al*. Species size distributions of benthic and pelagic Metazoa: Evidence for interaction? *Marine Ecology Progress Series*, 1986, **34**: 63-68. DOI:10.3354/meps034063.

[39] Gong Zhijun, Xie Ping, Tang Huijuan *et al*. The influence of eutrophication upon community structure and biodiversity of macrozoobenthos. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2001, **25**(3): 210-216.[龚志军, 谢平, 唐汇涓等. 水体富营养化对大型底栖动物群落结构及多样性的影响. 水生生物学报, 2001, **25**(3): 210-216.]

[40] Miyake Y, Nakano S. Effects of substratum stability on diversity of stream invertebrates during baseflow at two spatial scales. *Freshwater Biology*, 2002, **47**(2): 219-230. DOI:10.1046/j.1365-2427.2002.00798.x.

[41] Donohue I, Molinos JG. Impacts of increased sediment loads on the ecology of lakes. *Biological Reviews*, 2009, **84**(4): 517-531. DOI:10.1111/j.1469-185x.2009.00081.x.

[42] Quinn JM, Hickey CW. Magnitude of effects of substrate particle size, recent flooding, and catchment development on benthic invertebrates in 88 New Zealand rivers. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1990, **24**(3): 411-427. DOI:10.1080/00288330.1990.9516433.

[43] Jowett IG, Richardson J, Biggs BJF *et al*. Microhabitat preferences of benthic invertebrates and the development of generalised *Deleatidium* spp. habitat suitability curves, applied to four New Zealand rivers. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1991, **25**(2):187-199. DOI:10.1080/00288330.1991.9516470.

[44] Donohue IIK. Effects of sediment particle size composition on survivorship of benthic invertebrates from Lake Tanganyika, Africa. *Archiv für Hydrobiologie*, 2003, **157**(1): 131-144. DOI:10.1127/0003-9136/2003/0157-0131.