

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第33卷 第16期 Vol.33 No.16 **2013**

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 16 期 2013 年 8 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 物种分布模型理论研究进展..... 李国庆,刘长成,刘玉国,等 (4827)
- 稀土元素对农田生态系统的影响研究进展..... 金姝兰,黄益宗 (4836)
- 藤壶金星幼虫附着变态机制..... 饶小珍,林 岗,许友勤 (4846)
- 群居动物中的共同决策..... 王程亮,王晓卫,齐晓光,等 (4857)

### 个体与基础生态

- 季风进退和转换对中国褐飞虱迁飞的影响..... 包云轩,黄金颖,谢晓金,等 (4864)
- 两种海星对三种双壳贝类的捕食选择性和摄食率..... 齐占会,王 珺,毛玉泽,等 (4878)
- 新疆巴音布鲁克繁殖期大天鹅的生境选择..... 董 超,张国钢,陆 军,等 (4885)
- 我国特有植物青檀遗传结构的 ISSR 分析..... 李晓红,张 慧,王德元,等 (4892)
- 栽培菊花与菊属-近缘属属间杂种杂交后代耐盐性的遗传分析..... 许莉莉,陈发棣,陈素梅,等 (4902)
- 荒漠区植物光合器官解剖结构对水分利用效率的指示作用..... 张海娜,苏培玺,李善家,等 (4909)
- 水分对番茄不同叶龄叶片光合作用的影响..... 陈凯利,李建明,贺会强,等 (4919)
- 广西猫儿山不同海拔常绿树种和落叶树种光合速率与氮的关系..... 白坤栋,蒋得斌,万贤崇 (4930)
- 施肥对板栗林地土壤 N<sub>2</sub>O 通量动态变化的影响..... 张蛟蛟,李永夫,姜培坤,等 (4939)
- 施肥对红壤水稻土团聚体分布及其碳氮含量的影响..... 刘希玉,王忠强,张心昱,等 (4949)

### 种群、群落和生态系统

- 大兴安岭天然沼泽湿地生态系统碳储量..... 牟长城,王 彪,卢慧翠,等 (4956)
- 基于多时相 Landsat TM 影像的汶川地震灾区河岸带植被覆盖动态监测——以岷江河谷映秀-汶川段  
为例..... 许积层,唐 斌,卢 涛 (4966)
- 不同强度火干扰下盘古林场天然落叶松林的空间结构..... 倪宝龙,刘兆刚 (4975)
- 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素..... 蔡永久,姜加虎,张 路,等 (4985)
- 千岛湖岛屿社鼠的种群年龄结构和性比..... 张 旭,鲍毅新,刘 军,等 (5000)
- 性信息素诱捕下害虫 Logistic 增长及经济阈值数学模型..... 赵志国,荣二花,赵志红,等 (5008)
- 秋末苏南茶园昆虫的群落组成及其趋色性..... 郑颖姘,钮羽群,崔桂玲,等 (5017)
- 北方常见农业土地利用方式对土壤螨群落结构的影响..... 韩雪梅,李丹丹,梁子安,等 (5026)

### 景观、区域和全球生态

- 基于鸟类边缘种行为的景观连接度研究——空间句法的反规划应用..... 杨天翔,张韦倩,樊正球,等 (5035)
- 西南高山地区土壤异养呼吸时空动态..... 张远东,庞 瑞,顾峰雪,等 (5047)

江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素..... 赵明松,张甘霖,李德成,等 (5058)

基于林业清查资料的桂西北植被碳空间分布及其变化特征..... 张明阳,罗为检,刘会玉,等 (5067)

### 资源与产业生态

基于能值分析方法的都市代谢过程——案例研究 ..... 刘耕源,杨志峰,陈 彬 (5078)

基于 PSR 模型的耕地生态安全物元分析评价 ..... 张 锐,郑华伟,刘友兆 (5090)

保水剂对煤矸石基质上高羊茅生长及营养吸收的影响 ..... 赵陟峰,王冬梅,赵廷宁 (5101)

### 城乡与社会生态

生态保护价值的距离衰减性——以三江平原湿地为例..... 敖长林,陈瑾婷,焦 扬,等 (5109)

### 研究简报

广东山区土壤有机碳空间变异的尺度效应..... 姜 春,吴志峰,钱乐祥,等 (5118)

室内养殖雌性松鼠秋季换毛期被毛长度和保温性能变化..... 荆 璞,张 伟,华 彦,等 (5126)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 306 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 32 \* 2013-08



**封面图说:** 高寒草甸牦牛群——三江源区位于青藏高原腹地,平均海拔 4200m,是长江、黄河、澜沧江三条大河的发源地,也是全球气候变化最敏感的地区。三江源区高寒草甸植被状况对该区的生态环境、草地资源合理利用和应对全球气候变化具有十分重要的意义。2005 年以来,国家投资 70 多亿元启动三江源生态保护工程。监测显示,近年来,三江源湖泊湿地面积逐步扩大,植被覆盖度得到提高,三江源区高寒草甸的生态恶化趋势得到遏制。图为冒着风雪在三江源高寒草甸上吃草的牦牛群。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201205150721

蔡永久, 姜加虎, 张路, 陈宇炜, 龚志军. 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素. 生态学报, 2013, 33(16): 4985-4999.

Cai Y J, Jiang J H, Zhang L, Chen Y W, Gong Z J. Structure of macrozoobenthos in lakes along the Yangtze River and relationships with environmental characteristics. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 4985-4999.

# 长江中下游湖群大型底栖动物群落结构及影响因素

蔡永久, 姜加虎, 张路, 陈宇炜, 龚志军\*

(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, 南京 210008)

**摘要:** 长江中下游地区是我国淡水湖泊分布最为密集的区域, 其中面积大于 10 km<sup>2</sup> 的湖泊总面积占相同级别中国淡水湖泊总面积的 51.3%。目前对本地区湖泊大型底栖动物研究主要是关于单个湖泊或几个湖泊之间的比较, 将区域内湖泊作为一个整体来分析的研究较少。为揭示现阶段长江中下游浅水湖泊底栖动物群落现状及其主要影响因素, 于 2008 年和 2009 年夏季对本地区 5 个湖群 69 个湖泊大型底栖动物和水化学进行了调查, 并分析区域过程和局域环境条件在决定该地区底栖群落结构中的相对重要性。结果表明水体矿化度、电导率及氮磷指标在不同湖群间具有显著差异, 而高锰酸盐指数、叶绿素 a 及营养状态指数无显著差异。密度方面, 以寡毛类和摇蚊幼虫为优势类群的湖泊共 46 个, 占总数量的 66.7%, 以螺类为优势类群之一的湖泊 16 个, 占总数量的 23.2%; 生物量方面, 以螺类为优势的湖泊数量最多(33 个), 占总数量的 46.4%, 但以寡毛类和摇蚊幼虫占优势的湖泊亦有 27 个, 占总数量的 39.1%, 双壳类仅在 9 个湖泊占据优势。典范对应分析结果表明该地区底栖动物群落结构是局域环境条件和区域过程共同作用的结果, 两类因子共解释了 33.9% 的底栖动物群落变异, 其中局域环境因子占被解释量的 48.1%, 空间变量占 35.4%。空间变量较高的解释量表明对整个长江中下游地区湖泊而言, 区域过程对底栖动物的分布也起着非常重要的作用。

**关键词:** 长江中下游; 湖群; 浅水湖泊; 局域和区域过程; 大型底栖动物

## Structure of macrozoobenthos in lakes along the Yangtze River and relationships with environmental characteristics

CAI Yongjiu, JIANG Jiahu, ZHANG Lu, CHEN Yuwei, GONG Zhijun\*

State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

**Abstract:** In the middle and lower reaches of the Yangtze River, there are 108 freshwater lakes with surface area larger than 10 km<sup>2</sup>, accounting for 51.3% of the total freshwater lake area in China. However, few studies of macrozoobenthos were conducted at the regional scale, contrasting with many studies focused on individual or several lakes. To elucidate macrozoobenthic community structure and their relationships with spatial and environmental factors in shallow lakes along the Yangtze River, physicochemical parameters and macrozoobenthos were measured in 69 lakes of this region during summer in 2008 and 2009. We also evaluated the relative influences of local environmental conditions versus regional processes on macrozoobenthic community structure. The results showed that total dissolved solids (TDS), conductivity, nitrogen and phosphorus differed significantly among the five lake districts, but not for chemical oxygen demand (COD<sub>Mn</sub>), chlorophyll a and Trophic State Index (TSI) index. In terms of density, 46 lakes (66.7% of the total 69 lakes) were dominated by Oligochaeta and Chironomidae, and Gastropoda was one of the dominant taxa in 16 lakes. With respect to biomass, 27 lakes were also dominated by Oligochaeta and Chironomidae, and 33 and 9 lakes were dominated by Gastropod

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB417000); 中国科学院南京地理与湖泊研究所一三五重点项目(NIGLAS2012135002); 国家自然科学基金资助项目(41230744, 31070418); 科技部基础性工作专项资助项目(2006FY110600)

收稿日期: 2012-05-15; 修订日期: 2012-10-26

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zjgong@niglas.ac.cn

and Bivlavia due to their relatively large body size, respectively. Canonical correspondence analyses (CCA) showed that macrozoobenthic community structure reflected the influence of local conditions (*TSI*, *Macrophytes*, *Chl a*, *TDS*) as well as regional processes. Only 33.9% of variation in a density matrix was explained by local environmental conditions and regional processes. Of the total explained variation, 48.1% and 35.4% were purely related to local environmental parameters and spatial variables, respectively. The high proportion of variation related to spatial variables indicated the importance of regional processes on spatial patterns of macrozoobenthic assemblages in this region.

**Key Words:** the middle and lower reaches of the Yangtze River; lake district; shallow lakes; local and regional processes; macrozoobenthos

湖沼学研究开展以来,对于单个湖泊长期深入的研究,加深了对湖泊生态系统结构和重要过程的认识,这也是湖沼学研究开展以来湖沼学家研究的重点。近年来,湖沼学研究不再局限于单个湖泊,而将视野扩大到湖泊所在的地理区域和流域范围,甚至全球尺度<sup>[1-2]</sup>。湖泊比较是区域湖沼学的重要研究内容,多个湖泊的比较研究对湖沼学理论的发展具有重要意义<sup>[1]</sup>,同时对湖泊生态系统的管理和保护也具有指导作用<sup>[3]</sup>。湖群的存在为比较湖沼学提供了得天独厚的条件。Riera 等将湖群定义为一块湖泊富集的景观,这些湖泊具有相同的起源、气候和流域特征<sup>[4]</sup>。尽管如此,湖群内湖泊的物理、化学和生物特征也可能存在着显著差异。了解这些差异背后的驱动因素是区域湖沼学的主要内容之一。在区域层次上,通过对多个湖泊的比较研究,更有助于找出湖泊间和湖群间各种差异的内在机制。然而,对于湖群的研究不能只考虑湖泊自身的环境特征,同时需要将湖泊所在的地理位置考虑在内<sup>[5]</sup>。

种库假说认为:生物群落的结构不仅与所在地的环境条件和生态过程(如竞争和捕食)有关,也受其潜在的物种库即区域种库所左右。在区域和局域尺度上起主导作用的过程是不同的。捕食、寄生、竞争以及环境波动(即干扰)等生态过程的作用主要发生在局域水平上,而物种的长距离扩散、物种形成、大范围的绝灭以及物种分布区的变化等生物地理学过程主要发生在区域尺度<sup>[6]</sup>。局域和区域过程共同作用于群落的结构和物种组成,并且两者的相对作用大小随群落类型、环境条件及尺度而变化<sup>[7]</sup>。自然界中,生物群落受到多尺度过程的影响,群落结构多尺度调控的概念来源于环境筛选。要想成功建立一个局域群落,每个物种必须通过多尺度下一系列的环境筛选<sup>[7]</sup>。在大尺度上,历史事件和气候限制形成了各区域独特的物种库,且只有物种库的一部分物种最终能在局域群落中共存。对于湖泊生态系统来说,局域群落的物种必须通过区域、流域、湖群、生境等多个尺度环境因子的筛选。这些因子对物种的特性具有筛选作用,只有那些具有特定特性且能通过各级因子筛选的物种才能最终形成局域群落。

长江中下游平原是我国淡水湖泊分布最密集的核心区,且主要分布在长江两侧。根据其地理位置和流域特征,可分为洞庭湖群、江汉湖群、鄱阳湖群、华阳湖群、苏皖湖群和太湖湖群<sup>[8]</sup>,为开展区域湖沼学研究提供了天然条件。关于长江中下游地区湖泊底栖动物群落结构及其影响因素已有一些研究,但主要是关于单个湖泊或几个湖泊之间的比较,将区域或流域内湖泊作为一个整体来分析的更少<sup>[9]</sup>。本文尝试将长江中下游湖泊作为一个整体,假设底栖动物受到局域和区域过程的共同作用,通过比较分析不同湖群水体理化参数和底栖动物群落结构,并利用 partial CCA 解析区域过程和局域环境条件在决定本地区湖泊底栖动物群落结构中的相对重要性。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域及底栖动物样品采集

共调查大于 10 km<sup>2</sup> 的湖泊 69 个,分属洞庭湖群、江汉湖群、鄱阳湖群、华阳湖群和太湖湖群(图 1)。采样时根据湖泊面积大小,在敞水区布设若干采样点(附录 1)。底栖动物定量采集用 1/16 m<sup>2</sup> 改良 Peterson 采泥器,每个样点采集 1—2 次,泥样经 60 目尼龙筛洗净后,剩余物至于白磁盘中将底栖动物活体逐一挑出,样

本用 10% 福尔马林溶液保存。样品带回实验室鉴定至尽可能低的分类单元<sup>[10-12]</sup>,统计各个分类单元的数量,然后用滤纸吸去表面固定液,置于电子天平上称重,最终结果折算成单位面积的密度和生物量。样品采集时间为 2008 年 6 月至 8 月及 2009 年 7 月至 8 月。

## 1.2 环境因子的测定

采集底栖动物样品时,同时现场测定环境指标并采集水样分析水化学参数。透明度(SD)用赛氏盘测定,pH、电导率(Cond)和矿化度(TDS)于现场用 YSI 6600 V2 多参数水质监测仪测定。采集水样冷冻保存带回实验室,氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)、正磷酸盐磷(PO<sub>4</sub>-P)用微量流动注射分析仪(Skalar-SA1000)测定,总悬浮颗粒物(TSS)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chl a)及高锰酸盐指数(COD<sub>Mn</sub>)的测定参考标准方法<sup>[13]</sup>。水生植被盖度指数(Macrophytes):现场采样时估计采样点附近区域水生植物覆盖情况,分为 5 个等级 0,1—25%,26—50%,51—75%,76—100%,分别赋值为 0—4。为评价各湖泊营养状态,参照蔡庆华等改进的湖泊富营养化评价综合模型计算各点的营养状态指数(TSI)<sup>[14]</sup>,计算公式为:

$$TSI = 0.540 TSI(Chl a) + 0.297 TSI(SD) + 0.163 TSI(TP)$$

式中,TSI(Chl a)、TSI(SD)、TSI(TP)按照 Carlson 提出的营养状态指数计算方法获得,计算公式分别为:

$$TSI(Chl a) = 10 \times (6 - (2.04 - 0.68 (\ln(Chl a)))) / \ln 2$$

$$TSI(SD) = 10 \times (6 - \ln(SD)) / \ln 2$$

$$TSI(TP) = 10 \times (6 - \ln(48/TP)) / \ln 2$$

式中,Chl a、SD、TP 单位分别为  $\mu\text{g/L}$ 、m、 $\mu\text{g/L}$ 。

## 1.3 数据分析

数据分析前,各湖泊多个采样点的环境因子数据和底栖动物数据进行平均,理化数据进行 Z 标准化(平均值 0,标准差 1),物种数据进行对数转换。

### 1.3.1 湖群比较分析:

由于不同湖群湖泊数量相差较大,且数据转换后仍不能满足方差分析的要求,故采用 Kruskal-Wallis 非参数检验比较各湖群水体理化参数的差异性,多重比较采用 Games-Howell 方法。由于部分环境因子之间存在高度相关性,利用主成分分析对环境因子进行降维分析。

运用 Bray-Cutis 相似性指数分析不同湖群湖泊底栖动物群落相似性,并利用相似性分析(ANOSIM)检验各湖群湖泊底栖动物群落差异显著性,多元分析采用对数转换后的密度数据,分析软件用 PRIMER 5.0<sup>[15]</sup>和 PAST 2.01<sup>[16]</sup>。

### 1.3.2 影响因素解析

用 partial CCA 解析局域环境条件和区域过程对本地区底栖动物群落的影响,分析时需构建两个解释变量矩阵,分别是局域环境因子和空间变量<sup>[17]</sup>。局域环境因子矩阵[E],包括水体理化因子、TSI 指数、水生植被盖度指数以及主成分分析中各湖泊在前二个主成分的得分,将主成分作为环境因子的原因是许多环境因子之间存在共线性,而主成分作为多个因子的线性组合,在实际分析中可能会更好地反映出环境梯度的影响。空间变量利用湖泊的经纬度为基础构建,鉴于空间过程的影响并不是简单的线性格局,也包括其它复杂的过程(如隔离、斑块),在这里采用 9 个空间变量组合,分别为 X、Y、XY、X<sup>2</sup>、Y<sup>2</sup>、X<sup>2</sup>Y、XY<sup>2</sup>、X<sup>3</sup>、Y<sup>3</sup>,X 和 Y 分别为各湖泊采样点经度和纬度的平均值(附录 1)。同时考虑到不同湖群底栖动物可能具有显著差异,将 5 个湖群作为哑变量进入分析,经纬度变量和哑变量共同构成空间变量矩阵[S]。CCA 分析时,分别用局域环境因子和空间变量作为解释变量,物种数据为对数转换后的密度数据,并剔除出现率小于 10% 的物种,因子筛选采用向前引入法( $\alpha=0.05$ ),基于 Monte Carlo permutation 检验( $n=9999$ )。

根据 Borcard 的方法<sup>[17]</sup>,将物种数据矩阵的总变异分解成不同组分:1)将筛选后环境因子和空间变量一起进入 CCA 分析,计算出总解释量[E+S];2)环境因子独立解释量[E|S],分析时环境因子为解释变量,空间变量为协变量;3)空间变量独立解释量[S|E],分析时空间变量为解释变量,环境变量为协变量,排序结果的

显著性用 Monte Carlo permutation 检验 ( $n=9999$ )。空间变量和环境变量共同解释部分  $[E \cap S]$  计算公式为  $[E + S] - [E|S] - [S|E]$ , 未解释部分为  $1 - [E + S]$ , 分析软件采用 CANOCO 4.5<sup>[18]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 水体理化特征

表 1 为不同湖群水体理化参数和营养状态指数, 非参数分析结果表明电导率、矿化度、TSS 及水体中氮磷浓度在各湖群间具有显著差异。电导率和矿化度呈现出一致的变化趋势, 其中鄱阳湖群最低 (平均值分别为 150.4  $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、99.04 mg/L), 洞庭湖群、江汉湖群和华阳湖群处于中间水平, 太湖湖群最高, 其电导率和矿化度的平均值分别为 532.03  $\mu\text{s}/\text{cm}$  和 345.86 mg/L。水体中 TN 和 TP 的共同变化特征是太湖湖群显著高于其他湖群 (除和鄱阳湖群 TP 无显著差异), 洞庭湖群和华阳湖群水体 TN 和 TP 含量均较低 (表 1), 水体中  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、Chl a 及 TSI 指数在各湖群间无显著差异。

表 1 各湖群水体理化特征及非参数 Kruskal-Wallis 检验结果

Table 1 Physicochemical characteristics of the five lake districts, showing the results of Kruskal-Wallis tests

参数 Parameters	鄱阳湖群 Poyang Lake District	洞庭湖群 Dongting Lake District	江汉湖群 Jiangnan Lake District	华阳湖群 Huayang Lake District	太湖湖群 Taihu Lake District	<i>P</i>
SD/m	0.79 (0.27—2.69)	0.48 (0.26—0.65)	0.71 (0.17—1.92)	0.64 (0.23—1.23)	0.41 (0.24—0.77)	0.269
pH	8.18 (7.47—9.42)	8.7 (7.64—9.52)	8.53 (7.99—9.27)	8.3 (7.63—8.96)	8.65 (8.43—8.9)	0.102
Cond/( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	150.4 (61.68—261.13) <sub>a</sub>	275.21 (111—461.39) <sub>b</sub>	304.49 (143—515.42) <sub>b</sub>	228.05 (141.38—318.5) <sub>b</sub>	532.03 (360.17—672) <sub>c</sub>	<0.001
TDS/(mg/L)	99.04 (39.89—169.75) <sub>a</sub>	165.48 (72.17—267.33) <sub>b</sub>	197.26 (92.94—334.75) <sub>b</sub>	148.21 (91.81—206.67) <sub>b</sub>	345.86 (234.33—437) <sub>c</sub>	<0.001
TSS/(mg/L)	21.69 (0.87—57.42) <sub>ab</sub>	23.39 (12.93—44.31) <sub>ab</sub>	20.23 (4.4—70) <sub>b</sub>	14.01 (6.5—23.07) <sub>a</sub>	35.99 (16.57—67.17) <sub>b</sub>	0.045
$\text{NO}_3\text{-N}/(\text{mg}/\text{L})$	0.31 (0—0.94) <sub>ab</sub>	0.47 (0—2.23) <sub>b</sub>	0.06 (0—0.47) <sub>a</sub>	0.03 (0—0.08) <sub>a</sub>	0.94 (0.67—1.46) <sub>c</sub>	<0.001
$\text{NH}_4\text{-N}/(\text{mg}/\text{L})$	0.14 (0.05—0.19) <sub>a</sub>	0.41 (0.1—0.94) <sub>ab</sub>	0.36 (0.07—0.94) <sub>b</sub>	0.28 (0.12—0.57) <sub>ab</sub>	0.61 (0.29—1.16) <sub>b</sub>	0.001
TN/(mg/L)	1.21 (0.48—2.03) <sub>b</sub>	0.58 (0.36—1.15) <sub>a</sub>	0.91 (0.3—2.44) <sub>ab</sub>	0.85 (0.49—1.91) <sub>ab</sub>	2.52 (1.83—3.16) <sub>c</sub>	<0.001
$\text{PO}_4\text{-P}/(\mu\text{g}/\text{L})$	10.06 (1.66—56.68) <sub>a</sub>	8.25 (1.36—29.41) <sub>a</sub>	20.12 (1.27—96.23) <sub>ab</sub>	6.18 (0.86—37.33) <sub>a</sub>	87.82 (11.27—186.38) <sub>b</sub>	<0.001
TP/( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	99.96 (35—210.67) <sub>ab</sub>	62.77 (21.67—173.33) <sub>a</sub>	83.79 (24—255.01) <sub>a</sub>	63.55 (28—228.11) <sub>a</sub>	173.25 (109.7—256.86) <sub>b</sub>	<0.001
$\text{COD}_{\text{Mn}}/(\text{mg}/\text{L})$	5.25 (2.82—7.76)	5.88 (3.44—6.74)	5.73 (3.79—7.23)	5.16 (3.86—6.53)	5.99 (3.67—11.06)	0.608
Chl a/( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	26.35 (1.94—67.39)	34.3 (3.38—78.77)	29.45 (2.54—100.72)	26.09 (6.05—99.41)	20.39 (3.68—61.78)	0.318
TSI 指数	61.04 (42.64—74.47)	64.81 (52.39—75.98)	63.32 (46.81—80.18)	61.32 (53.69—75.24)	64.81 (56.09—74.53)	0.656

不同字母间表示差异显著

主成分排序图反映了 69 个湖泊的环境特征 (图 2)。第一主成分与 SD、TSS、TN、TP、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、Chl a 及 TSI 指数相关性较高, 表明 PC1 主要反映了水体的营养状态; 第二主成分与电导率及矿化度相关性最高, 其主要反映了水体的离子浓度; 第三主成分与各环境因子的相关性都较低 (表 2)。前 3 个主成分的方差解释率分别为 39.08%、17.99% 及 10.63%。

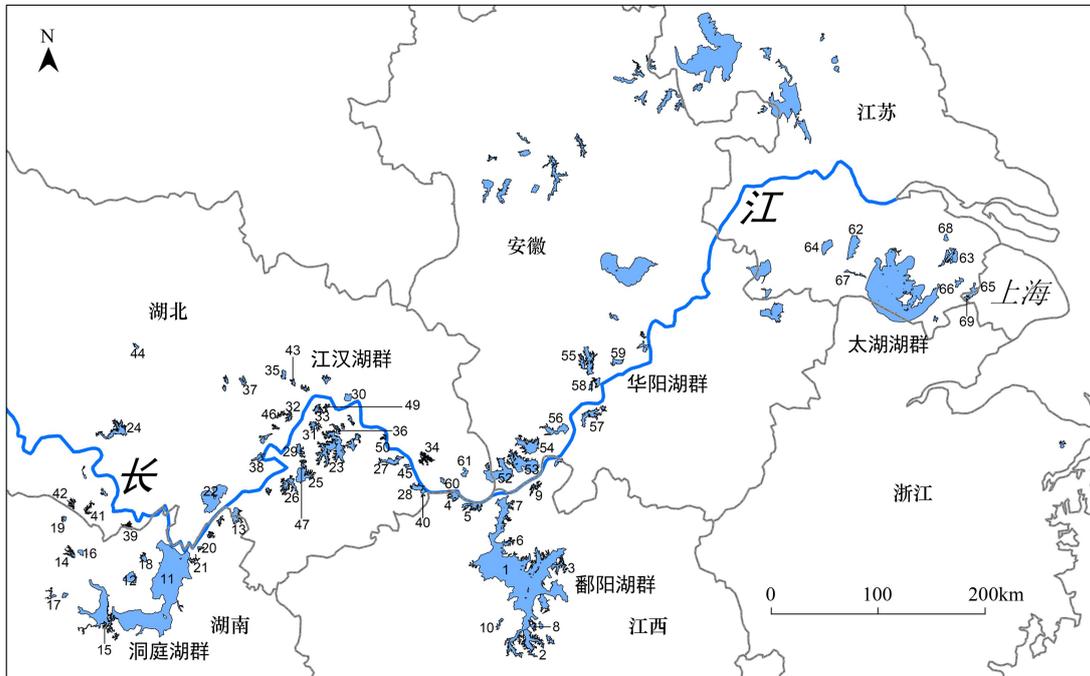


图 1 长江中下游湖泊空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of the studies lakes in the middle of lower reaches of the Yangtze River

表 2 69 个湖泊环境参数主成分分析结果,包括各主成分的特征值、方差解释率及与环境参数相关系数

Table 2 Statistical characteristics of PCA, including the eigenvalues, percentage of variance explained, and correlations for each environmental variable with the first 3 principle components

参数 Parameters	PC1	PC2	PC3
SD/m	0.725	0.213	0.059
pH	-0.651	-0.222	-0.364
Cond/( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	-0.470	0.745	-0.332
TDS/(mg/L)	-0.479	0.763	-0.297
TSS/(mg/L)	-0.718	-0.108	0.387
NO <sub>3</sub> -N/(mg/L)	-0.220	0.596	0.424
NH <sub>4</sub> -N/(mg/L)	-0.408	0.126	0.464
TN/(mg/L)	-0.720	0.270	0.465
PO <sub>4</sub> -P/( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	-0.390	0.264	-0.504
TP/(mg/L)	-0.780	0.137	0.057
COD <sub>Mn</sub> /(mg/L)	-0.659	-0.245	0.030
Chl a/( $\mu\text{g}/\text{L}$ )	-0.697	-0.568	-0.126
TSI	-0.866	-0.425	-0.112
特征值 Eigenvalue	5.081	2.339	1.38
方差解释率 Percentage of variance explained/%	39.08	17.99	10.63

## 2.2 不同湖群底栖动物类群组成

图 3 为不同类群底栖动物在各湖泊总密度和总生物量中所占比重。密度方面,鄱阳湖群中,赤湖以摇蚊幼虫和螺类为优势类群,双壳类(主要是河蚬)和寡鳃齿吻沙蚕在珠湖和军山湖比重较高,鄱阳湖的优势种为河蚬,其他中小型湖泊为寡毛类和摇蚊幼虫共同主导。洞庭湖群中,摇蚊幼虫在芭蕉湖和珊瑚湖占据绝对优势,城市湖泊岳阳南湖完全被寡毛类主导(97.39%),平均密度为 2192 个/m<sup>2</sup>,黄盖湖为寡毛类和摇蚊幼虫共同主导,螺类在湖南东湖等 6 个湖泊中占据一定比重。根据优势类群,江汉湖群的 30 个湖泊可分为两组,其

中以寡毛类和摇蚊幼虫占据优势的湖泊有 22 个,而以螺类和寡毛类及摇蚊幼虫占主导的湖泊有 8 个,其中大冶湖、斧头湖和洪湖螺类所占比重较高,分别为 95.71%、71.88% 和 63.34%。华阳湖群类群组成较为多样,6 个中小型湖泊(武山湖、太白湖、武昌湖、升金湖和破岗湖)以寡毛类和摇蚊幼虫为优势类群,菜子湖和白荡湖的优势类群为螺类,大型湖泊龙感湖和泊湖的优势种为寡鳃齿吻沙蚕。太湖湖群中除澄湖和淀山湖的优势种分别为钩虾和寡鳃齿吻沙蚕外,其它湖泊优势类群均为寡毛类和摇蚊幼虫。对所有湖泊进行分析发现,以寡毛类和摇蚊幼虫为优势类群的湖泊共 46 个,占所调查湖泊的 66.7%,以螺类为优势类群之一的湖泊 16 个,占总数量的 23.2%,双壳类和其它种类占优势的湖泊共 7 个(表 3)。

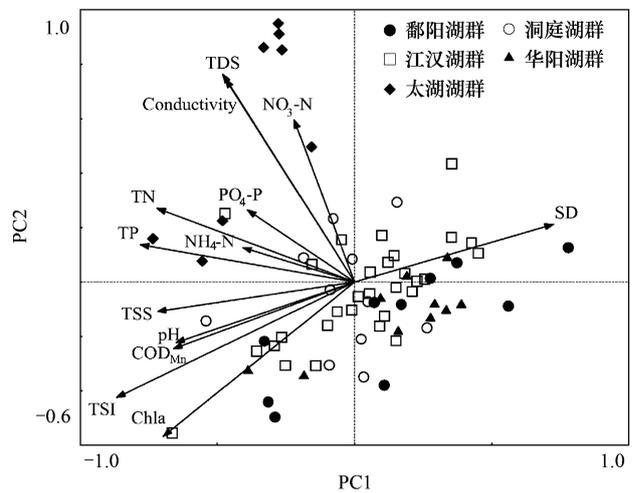


图 2 69 个湖泊水体理化参数主成分分析  
Fig. 2 Principal components analysis (PCA) of physicochemical parameters in the 69 studied lakes

表 3 不同类群底栖动物占优势湖泊数量在各湖群的分

Table 3 Number of lakes dominated by different taxonomic groups in the five lake districts

湖群 Lakes	密度 Density				生物量 Biomass			
	寡毛类和 摇蚊幼虫 Oligochaeta Chironomidae	螺类 Gastropoda	双壳类 Bivalvia	其它 Others	寡毛类和 摇蚊幼虫 Oligochaeta Chironomidae	螺类 Gastropoda	双壳类 Bivalvia	其它 Oothers
鄱阳湖群	6	1	2	1	4	2	4	0
洞庭湖群	6	5	0	0	3	6	2	0
江汉湖群	22	8	0	0	13	17	0	0
华阳湖群	6	2	0	2	5	5	0	0
太湖湖群	6	0	0	2	2	2	3	1
合计 Total	46	16	2	5	27	32	9	1

生物量方面,虽然螺类和双壳类个体较大,在多数湖泊对总生物量贡献较大,但寡毛类和摇蚊幼虫的贡献率在部分湖泊亦较高。鄱阳湖群中,以寡毛类和摇蚊幼虫占优势的湖泊有 4 个,螺类和双壳类占优势的湖泊分别为 2 个和 4 个。洞庭湖群大部分湖泊为螺类(6 个)和双壳类(2)所主导,其余 3 个湖泊为摇蚊幼虫所主导。江汉湖群螺类为优势的湖泊有 17 个,寡毛类和摇蚊幼虫为主的湖泊 13 个,数量大致相当。华阳湖群中 5 个湖泊为螺类所主导,2 个为寡毛类和摇蚊幼虫共同主导,其余 3 个湖泊以这 3 个类群共同主导。太湖湖群中各类群占优的湖泊数量相当,其中钩虾对澄湖生物量贡献较大。整体分析发现,虽然以螺类为优势的湖泊数量最多(32 个),占总数量的 46.4%,但以寡毛类和摇蚊幼虫占优势的湖泊亦较多(27 个),占总数量的 39.1%,双壳类仅在 9 个湖泊占据优势(表 3)。

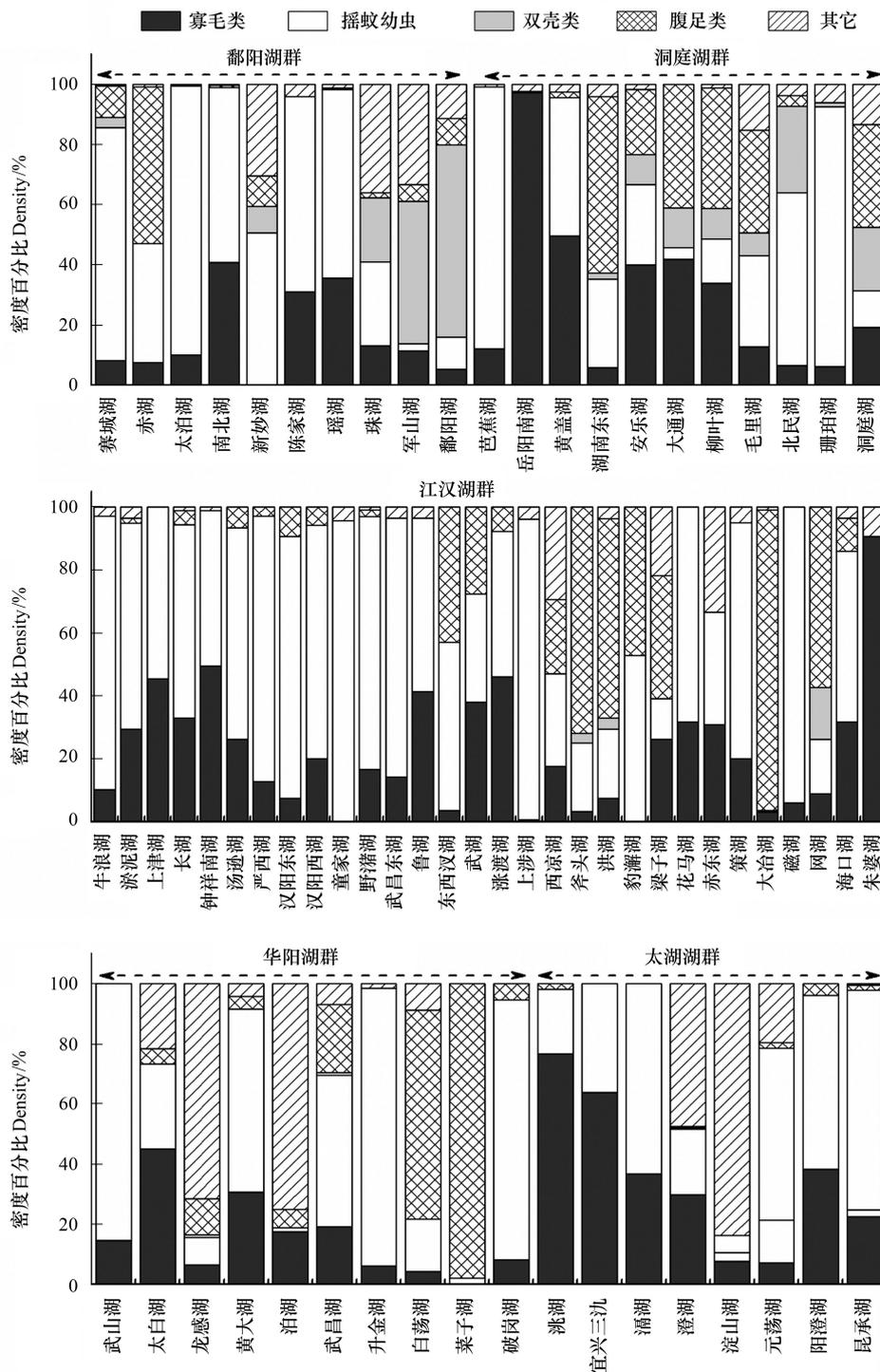
表 4 不同湖群湖泊大型底栖动物群落 Bray-Curtis 相似性分析

Table 4 Bray-Curtis similarity analyses of macrozoobenthic communities in the five lake districts

	鄱阳湖群	洞庭湖群	江汉湖群	华阳湖群	太湖湖群
鄱阳湖群		0.070	0.005	0.031	0.012
洞庭湖群	67.70%		0.065	0.003	0.041
江汉湖群	73.48%	70.08%		0.432	0.074
华阳湖群	69.85%	70.17%	67.01%		0.042
太湖湖群	70.70%	66.62%	70.42%	67.52%	

\* 下方为不相似性百分比,上方为显著性水平

Bray-Curtis 相似性系数结果表明不同湖群底栖动物群落不相似性百分比较高,介于 67.52% 至 73.48% (表 4)。ANOSIM 分析结果表明鄱阳湖群和洞庭湖群与华阳湖群和太湖湖群底栖动物群落组成具有显著差异,鄱阳湖群和洞庭湖群之间无显著差异;江汉湖群除与鄱阳湖群具有显著差异外,与其它湖群均无显著差异,这可能是因为江汉湖群湖泊数量较多,按底栖优势类群可分为两组,将江汉湖群湖泊分为两组进入分析时发现,所有湖群间均具有显著差异(鄱阳湖群和洞庭湖群间除外)。NMDS 排序分析显示除江汉湖群部分湖泊分布较为集中外,其它湖群湖泊空间聚集现象并不明显,这表明湖群内部底栖动物群落变化也较大,湖群因子不能很好地反映本区域湖泊底栖动物群落的变化。



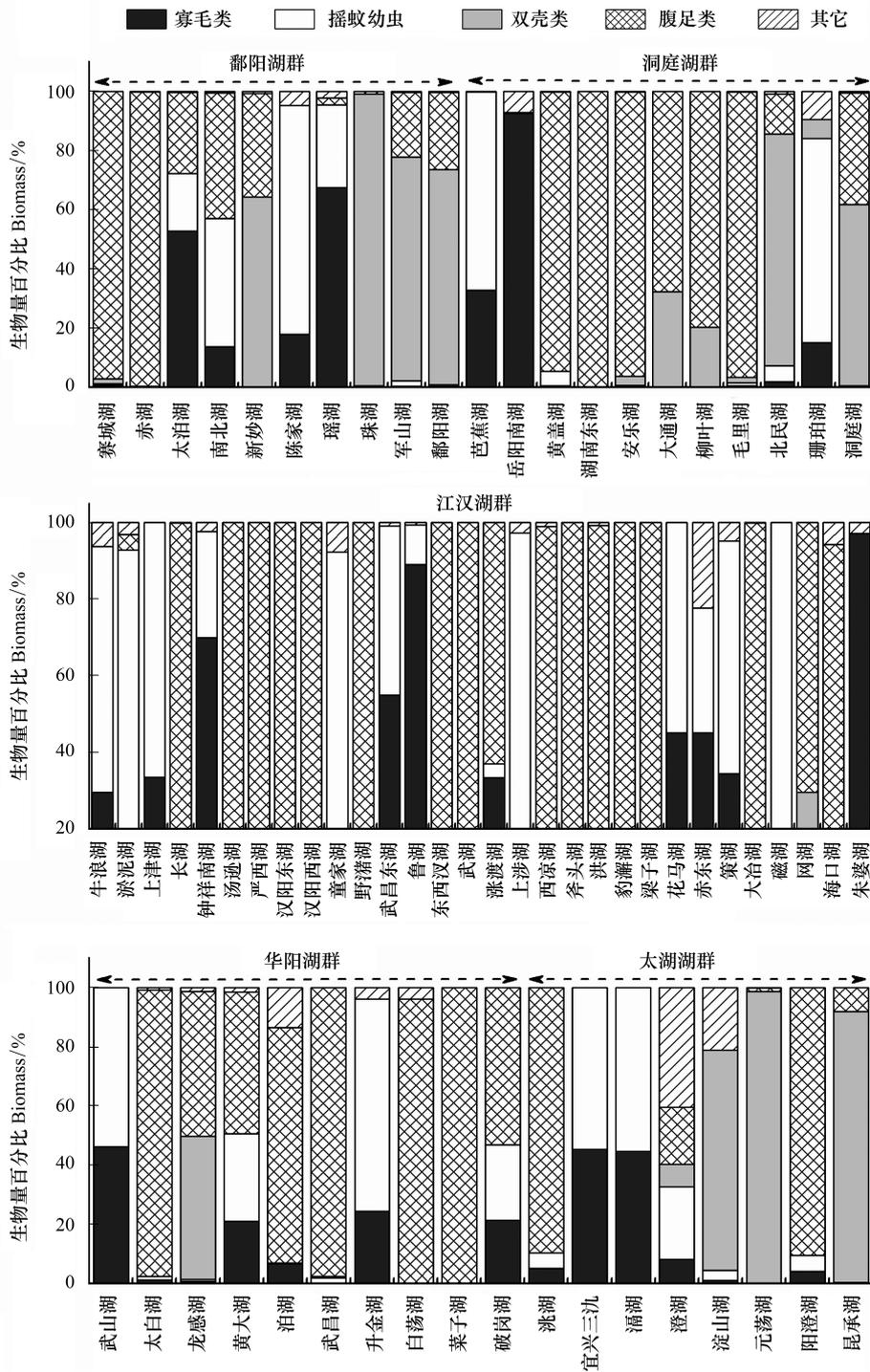


图3 各湖群4种常见类群大型底栖动物在总密度和生物量中所占比重

Fig. 3 Relative abundance and biomass of the four common taxonomic groups in the five lake districts

### 2.3 影响因素解析

#### 2.3.1 局域环境条件

典范对应分析表明局域环境因子中 TSI 指数、Macrophytes、Chl a、TDS 及 PC2 与 69 个湖泊底栖动物群落关系最显著。第一轴和第二轴的特征值较大,分别为 0.198 和 0.146,分别解释了 10.2% 和 7.4% 的物种数据变异及 43.9% 和 32.3% 的物种-环境关系变异,第三轴解释了 3.0% 的物种数据变异和 12.9% 的物种-环境关系变异,第四轴特征值和解释率都相对较低,前 3 轴基本反映了底栖群落与局域环境因子的关系。蒙特卡罗

检验结果表明 CCA 前 3 个排序轴均显著 ( $P_{1,2} < 0.001$ ,  $P_3 = 0.008$ ), 第四轴不具有显著性 ( $P_4 = 0.53$ )。第一轴与 TSI、Macrophytes、Chl a 相关性较高, 其主要反映了水体营养状态及生境的异质性; 第二轴与 Chl a 相关性最高, 第三轴与 TDS 和 PC2 呈显著正相关(表 5 和图 5)。从各因子进入 CCA 分析的顺序及其解释量可以看出, TSI 指数、Macrophytes 和 Chl a 解释量相对较高, 而 TDS 和 PC2 相对较低。物种与环境因子的排序图显示水生盖度指数与螺类相关性较高, TSI 和 Chl a 与摇蚊科幼虫及颤蚓科的种类相关性较高, PC2 则与钩虾、双壳类及寡鳃齿吻沙蚕呈正相关关系(图 5)。

2.3.2 空间过程

利用空间变量和湖群哑变量作为解释因子, CCA 分析最终筛选出 5 个空间变量组合最大程度地解释了底栖动物群落变异, 而 5 个哑变量并没有在组合之内。蒙特卡罗检验结果表明 CCA 分析前两个排序轴均显著 ( $P_{1,2} < 0.01$ ), 第三轴和第四轴不具有显著性 ( $P_3 = 0.08$ ,  $P_4 = 0.11$ )。相比于局域环境因子的 CCA 分析, 空间变量的 CCA 分析前两轴特征值较小, 分别为 0.159 和 0.081, 共解释了 12.3% 的物种数据变异和 66.7% 的物种-环境关系变异(表 6)。空间变量与第一轴相关性较低, 第二轴与变量  $Y$ 、 $X^3$  及  $X$  相关性较强。从排序图中可以看出, 各湖群湖泊在排序图中能较好的区分开来, 其中洞庭湖群湖泊位于排序图的下方, 江汉湖群湖泊主要位于排序图左方, 鄱阳湖群湖泊位于排序图右侧, 太湖湖群湖泊较为分散地分布区排序图上方, 华阳湖群湖泊位于排序图中心区域(图 6)。

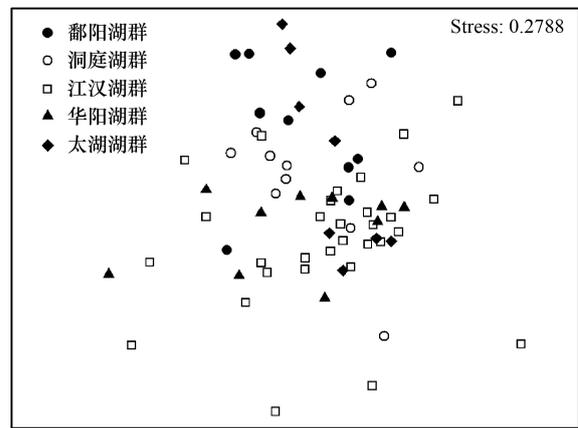


图 4 基于 69 个湖泊大型底栖动物密度的 Bray-Curtis 相似性系数的非度量多维标度排序图

Fig.4 Ordination plot of macrozoobenthic communities based on Bray-Curtis similarity coefficients in the 69 lakes

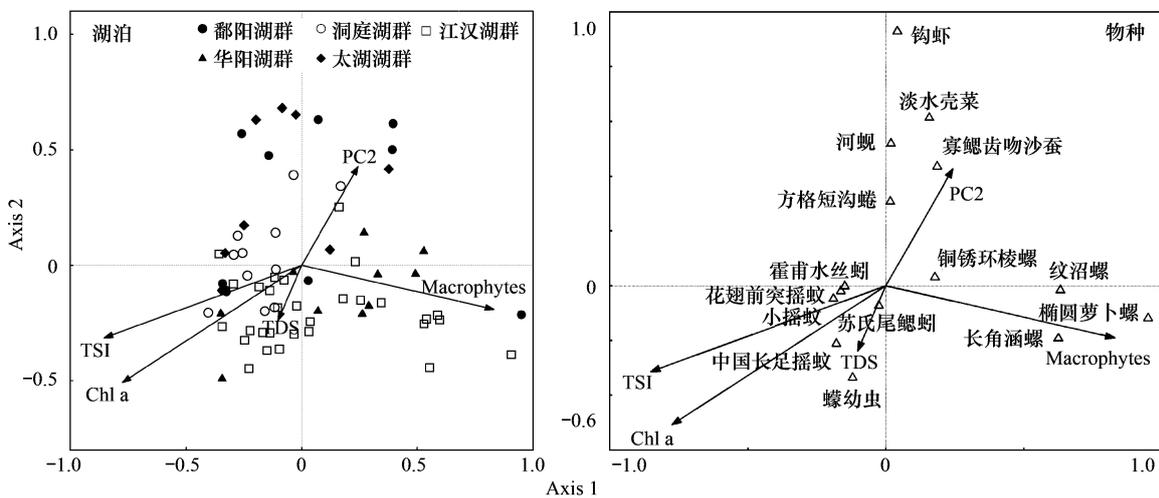


图 5 69 个湖泊大型底栖动物群落与局域环境因子的典范对应分析排序: 湖泊, 物种, 仅显示与环境因子相关性较高的种类

Fig.5 CCA biplots of macrozoobenthic communities in 69 lakes, showing the first three axes and the most strongly correlated local environmental variables: lakes, species, only show species with high correlations with environmental variables

2.3.3 方差分解

局域环境因子和空间变量对底栖动物群落变异的总解释量为 33.9%, 其中局域环境因子独立解释的部分为 16.3%, 稍大于空间变量的解释率 12.0%, 由空间过程控制的局域环境因子解释量最小, 仅为 5.6%。partial CCA 分析发现当以空间变量为协变量时, PC2 和 TDS 并不具有显著性, 表明电导率和矿化度主要受湖泊所处地理区域控制。方差分解结果表明长江中下游地区湖泊底栖动物并不简单受到局域环境因子的影响,

区域过程在调节底栖群落结构中同样起着重要的作用。

表5 底栖动物群落与局域环境因子的典范对应分析结果,各因子括号中的数值分别代表因子筛选时进入 CCA 分析的顺序和对底栖群落变异的解释量

Table 5 Summary statistics for the first four axes of the canonical correspondence analysis (CCA) of species-environment, Values after the environmental variables refer to the entry ranks of variables in forward selection and the percentage of variance explained in species data

轴 Axes	1	2	3	4
特征值 Eigenvalues	0.198	0.146	0.058	0.029
种类-环境相关性 Species-environment correlations	0.832	0.76	0.746	0.519
物种数据累积变化百分比 Cumulative percentage variance of species data	10.2	17.6	20.6	22.1
物种-环境关系累积变化百分比 Cumulative percentage variance of species-environment relationship	43.9	76.2	89.1	95.5
TSI (1, 8.37%)	-0.853	-0.314	0.042	0.380
Macrophytes (2, 7.70%)	0.830	-0.191	0.122	0.505
Chl a (3, 8.26%)	-0.775	-0.508	-0.129	0.349
TDS (4, 3.34%)	-0.102	-0.238	0.965	-0.028
PC2 (5, 4.67%)	0.244	0.428	0.851	-0.102

表6 底栖动物群落与空间变量的典范对应分析结果,各因子括号中的数值分别代表因子筛选时进入 CCA 分析的顺序和对底栖群落变异的解释量

Table 6 Summary statistics for the first four axes of the canonical correspondence analysis (CCA) of species-environment, Values after the environmental variables refer to the entry ranks of variables in forward selection and the percentage of variance explained in species data

轴 Axes	1	2	3	4
特征值 Eigenvalues	0.159	0.081	0.056	0.046
种类-环境相关性 Species-environment correlations	0.798	0.735	0.731	0.563
物种数据累积变化百分比 Cumulative percentage variance of species data	8.2	12.3	15.2	17.6
物种-环境关系累积变化百分比 Cumulative percentage variance of species-environment relationship	44.2	66.7	82.2	95
Y(1, 4.47%)	-0.426	0.722	0.510	0.166
X <sup>2</sup> (2, 4.21%)	0.477	0.372	0.783	-0.002
X <sup>3</sup> (3, 3.95%)	0.286	0.792	0.417	-0.220
XY(4, 2.98%)	0.322	0.156	0.783	-0.157
X(5, 3.59%)	0.227	0.839	0.015	-0.046

### 3 讨论

#### 3.1 水体理化特征

电导率和矿化度在不同湖群间差异显著。电导率和矿化度是湖泊水化学的重要基础参数,它们直接反映了水体的离子总量,又可间接反映湖泊盐类物质积累的环境条件。矿化度受不同湖群所处流域的自然限制,因而呈现出明显的区域差异。在五个湖群中,鄱阳湖群矿化度最低,所有湖泊的最低值也出现在该湖群的军山湖(39.9 mg/L),相比之下,太湖湖群湖泊的电导率都较高,如淀山湖、元荡湖和澄湖都超过了 400 mg/L。湖群之间矿化度的显著差异可能与地质背景、流域降水及湖泊换水周期有一定的关系。

长江中下游地区的年降水量一般都在 1000 mm 以上,但其在各大湖群也呈现出地区性的分异,如鄱阳湖地区的鄱阳县年降水量比洞庭湖地区的岳阳、常德、沅江多 250—300mm,而后者又比太湖地区的吴县东山及上海多 200—300mm,表明鄱阳湖区年降水量最丰、洞庭湖区次之,太湖地区降水量相对最少<sup>[8]</sup>。另一方面,鄱阳湖群降水丰沛,水系发达,它上承赣、抚、信、饶、修 5 条河流,来水量丰富,水体交换快,可溶性盐类不易因水蒸发而积累。此外,鄱阳湖流域土壤类型多为红壤,而红壤呈酸性,含盐量较低<sup>[19]</sup>,故入湖河流的矿化度也较低,这些因素共同造就了鄱阳湖群成为本区矿化度最低的湖群。

湖泊换水周期也直接决定了离子在湖泊水体中的积累。鄱阳湖、洞庭湖和石臼湖是目前长江中下游仅有的天然通江湖泊,虽分属不同的湖群,地质背景差异较大,但矿化度均较低,分别为 73、155 及 122 mg/L。这主要是因为它们与长江的水体交换频繁,换水周期较短,稀释作用较为明显,因而矿化度也较低。华阳湖群湖泊多为大中型湖泊,部分湖泊季节性与长江相通,其矿化度也较低。

研究发现反映水体营养盐含量的指标在湖群间存在显著差异,水体中营养盐含量除与地质背景有关,其受人类活动影响更多。华阳湖群总氮和总磷水平最低,这是因为该地区湖泊多为大中型湖泊,且季节性与长江相通,不适宜进行施肥养殖,养殖方式多为人放天养,因此其氮磷含量较低。鄱阳湖群、洞庭湖群和江汉湖群除有几个大型(鄱阳湖、洞庭湖)和大中型湖泊(洪湖、军山湖、梁子湖)外,其他湖泊均面积较小,湖泊多被集体、个人或公司承包经营,养殖过程中为追求产量,多采用投饵投肥的养殖方式,因此营养盐含量较高,且 3 个湖群之间无显著差异。太湖湖群不仅担任着养殖的功能,其周边工农业发达、人口众多,污水不可避免地进入湖泊水体,过去几十年中一直接纳生产生活污水,因此营养盐含量最高。研究发现 Chl a 在湖群间不具有显著差异,表明其并不简单受水体营养盐含量影响,Chl a 主要反映了浮游植物的生物量,其它因素(如鱼类和浮游动物捕食、气候条件等)对其控制作用也不可忽视,可惜未能获得这方面数据。

### 3.2 影响因素解析

#### 3.2.1 局域环境因子

CCA 分析中筛选出 5 个局域环境因子与底栖动物群落关系最密切。其中 TSI 指数和 Chl a 反映了水体的营养水平,Macrophytes 主要反映了生境的异质性程度,PC2 主要代表了电导率和矿化度,先前分析表明电导率和矿化度不仅仅受地质背景影响,更反映了湖泊的换水周期和稀释条件。从排序图中可以看出,PC2 和 Macrophytes 均位于 TSI 指数和 Chl a 的反方向,CCA 分析中相关系数介于-0.370 至-0.542 间,换水周期直接影响了水体的营养状态和 Chl a 浓度,而水草覆盖度较高的湖泊水体营养状态一般较低,说明 5 个环境因子之间是相互关联的。因此,筛选出的环境因子主要反映了水体的营养状态和生境的异质性。关于水体营养状态和水生植被对底栖动物群落结构影响的研究较多,长江中下游地区湖泊水体营养状态较高,一方面与其较高的本底值有关,另一方面是人类活动的结果,本文研究的湖泊营养水平均已到达或超过中营养水平。富营养化对底栖动物的影响往往是间接的,主要是改变了生境条件和食物质量,如氧含量、底质粒径和异质性、有机质含量、食物中元素比例和必需脂肪酸含量<sup>[20]</sup>。水生植被的存在为底栖动物提供了栖息和躲避捕食的场所,同时其复杂的构件结构也增加了可供多个物种共存的空间<sup>[21]</sup>。

#### 3.2.2 区域过程

研究淡水底栖动物分布的一个重要方面就是分析地理因素和环境因素对其分布的限制作用。某物种在特定生境的缺失可能是该物种并没有扩散到该生境,也可能是它已经扩散到了该地区,但是由于环境条件不利于其存活或竞争,从而导致它没有繁衍下去。相反,一个物种在特定地点的出现可能是它竞争优势更强,也有可能是它到了这里,而它潜在的竞争对手并没有扩散到这里。扩散受多种因素的影响,如高山、距离、扩散方式、种群大小<sup>[7]</sup>。一个种群在新生境的竞争和繁衍能力取决于它对新环境的适应能力。许多底栖动物是世界性分布种类,而另一些种类则仅出现在特定的气候区或地理区域。

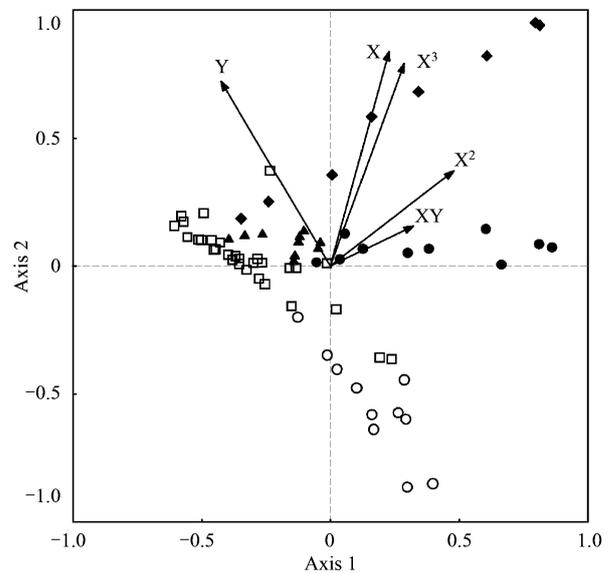


图 6 69 个底栖动物群落与空间变量的典范对应分析排序图  
Fig. 6 CCA biplots of macrozoobenthos communities in 69 lakes, showing the first two axes and the most strongly correlated spatial variables

生态学研究中,关于底栖动物群落大尺度空间格局的研究较少。推测起来,区域过程的影响在小范围地理区域可以忽略。然而,对整个长江中下游地区的研究不能忽视区域过程的影响。本文研究结果表明超过40%的被解释的底栖动物群落变化可归结于空间因素,尽管部分空间因素解释量可能是未测量环境因子共同的解释量,但是如此高的比重表明至少部分物种受空间过程影响更明显。事实上,在调查中也发现部分物种值出现在某些特定湖泊,如耳河螺(*Rivularia auriculata*)和双龙骨河螺(*R. bicarinata*)只在洞庭湖群和鄱阳湖群湖泊中采集到,寡鳃齿吻沙蚕在调查湖泊中的分布上限为鄱阳湖群,其主要分布在长江下游两侧的湖泊中,而在中游的洞庭湖群和江汉湖群均未采集到,寡鳃齿吻沙蚕为海洋河口性种类,可见其在本区湖泊中的分布受到空间扩散的限制。在CCA分析中,筛选的空间变量包括 $X$ 、 $Y$ 、 $XY$ 、 $X^2$ 及 $X^3$ ,表明底栖动物群落并不简单受空间经度和纬度梯度的影响,而更复杂的景观格局(表现为高次方的空间变量),如斑块、隔离等在决定底栖群落结构中也起着重要作用。CCA分析中,5个湖群哑变量并没有进入最终的CCA模型,可能是因为哑变量与某些空间变量存在相关,单独分析每个哑变量对底栖群落的解释能力发现,4个湖群哑变量(除华阳湖群)均与底栖群落显著相关,解释率介于3.08%—4.36%,与空间变量的解释率相当,这种结果说明湖群并不是解释本区底栖群落变化的最佳空间变量,这可能是由于部分湖泊在历史上同属于一个湖群,如洞庭湖群和江汉湖群由云梦泽演化形成,而鄱阳湖群和华阳湖群在历史上均是彭蠡泽的一部分,因此它们的物种库可能存在重叠。

### 3.2.3 区域过程和局域环境条件的相对重要性

底栖动物受到从局域到区域多重因素的影响,本研究中,大尺度的空间变量和局域环境因子对解释底栖动物群落变化都非常重要。淡水生物群落的地理格局常对应于大尺度的历史、气候和地理因素。一些学者认为大型无脊椎动物群落结构变化与大尺度的区域过程关系更密切,其次才是局域环境条件<sup>[22]</sup>。在极地溪流和湖泊中,底栖群落变化经常与纬度梯度联系密切<sup>[23-24]</sup>。区域过程和局域环境条件对生物群落的影响与尺度相关,一般而言,随着研究范围的减小,局域环境因子的解释量逐渐增加,而空间变量和受空间限制的环境因子的解释量却逐渐降低。本地区湖泊虽覆盖了很大的地理范围,但是在决定底栖群落结构时局域环境条件比大尺度的空间趋势更重要。这可能与本地区湖泊的特征有关,所调查的湖泊虽属于不同湖群或流域,但均为整个长江流域的一部分,多数湖泊的形成都与长江有密切的关系,且许多物种在该区域是广泛分布的,可能并没有受到扩散的限制,更多的是受到局域环境条件的限制。Johnson和Goedkoop对瑞典湖泊<sup>[25]</sup>及Sandin和Johnson对瑞典溪流<sup>[26]</sup>底栖动物的研究也发现局域环境因子较空间变量更重要,这可能与其较小的研究区域范围有关。本文中与纬度相关的区域过程对本区湖泊底栖动物群落的影响较小,这可从CCA分析筛选出的空间变量组合看出,其原因是本区湖泊纬度跨度小,湖泊主要是沿经度上分布,而纬度对生物种群的影响一般较经度更明显。另外,Donohue等研究发现富营养化导致底栖动物群落在局域和区域尺度上均趋于同质化<sup>[27]</sup>,而本区湖泊营养状态普遍较高,可能导致该区湖泊底栖群落趋于同质化,从而降低了空间变量的解释率。

本研究中,CCA解释的底栖动物群落变异量较低,共为33.9%,Økland指出低的解释率所提供的信息也是非常有价值的<sup>[28]</sup>。低解释率在生态学数据中是很常见的,主要是因为生态学数据繁杂且庞大,另外野外调查取得数据也不可避免地与实际情况存在差异,特别是物种数据,由于野外工作条件及人力财力的限制,不可能获得所有物种的数据。本文中局域环境因子的解释也较低,独立解释率为16.3%,这主要是因为测定的因子数量较少,本文使用的因子主要是水体的理化参数,而有关沉积物和生境的数据未能获得,如沉积物有机质含量、粒径组成、底质类型、鱼类潜在捕食压力、与河流和其它湖泊的连通性。这些因子都对底栖动物的组成、密度和生物量有显著影响,因此导致局域环境因子的解释率较低。

致谢:周方正、邓建明、吴召仕帮助采集野外样品,特此致谢。

附录 1 研究湖泊经纬度、面积及采样点个数

Appendix 1 Longitude, Latitude, surface areas and number of sampling sites of the 69 studied lakes

湖群 Lake district	湖泊 Lake	代码 Code	经度(E) longitude	纬度(N) latitude	面积/km <sup>2</sup> Surface area	样点数/个 Number of sites
鄱阳湖群 Poyang lake district	鄱阳湖	1	116.2691	29.2827	2933.0	35
	军山湖	2	116.3291	28.5446	192.5	7
	珠湖	3	116.6443	29.1425	80.8	4
	赤湖	4	115.7046	29.7847	80.4	4
	赛城湖	5	115.8818	29.6875	61.3	4
	新妙湖	6	116.1620	29.3650	47.8	3
	南北湖	7	116.2254	29.6806	24.7	3
	陈家湖	8	116.3736	28.6549	22.0	3
	太泊湖	9	116.7216	30.0087	20.7	3
	瑶湖	10	116.0602	28.6946	*16.1	3
洞庭湖群 Dongting lake district	洞庭湖	11	112.6466	29.0243	2432.5	30
	大通湖	12	112.6454	29.3638	114.2	6
	黄盖湖	13	113.1107	29.3363	86.0	5
	毛里湖	14	111.9452	29.4190	36.8	3
	安乐湖	15	112.5135	29.2069	30.0	3
	珊珀湖	16	111.8749	29.7151	26.0	3
	柳叶湖	17	111.7460	29.0764	24.0	3
	湖南东湖	18	112.1856	28.8212	23.2	3
	北民湖	19	112.0296	29.4285	14.5	2
	芭蕉湖	20	113.1850	29.4421	12.3	2
	岳阳南湖	21	113.5438	29.7043	12.0	2
江汉湖群 Jianghan lake district	洪湖	22	113.3583	29.8697	344.4	8
	梁子湖	23	114.5358	30.2450	304.3	7
	长湖	24	112.3977	30.4171	129.1	6
	斧头湖	25	114.2405	30.0011	114.7	5
	西凉湖	26	114.0797	29.9580	72.1	4
	大冶湖	27	115.1004	30.0982	68.7	4
	网湖	28	115.3359	29.8686	42.3	3
	鲁湖	29	114.1981	30.2129	40.2	3
	涨渡湖	30	114.7014	30.6434	35.2	3
	汤逊湖	31	114.3799	30.4210	36.6	3
	汉阳东湖	32	114.0523	30.5443	34.4	3
	武昌东湖	33	114.3787	30.5592	33.7	3
	赤东湖	34	115.3887	30.1217	26.8	3
	野漕湖	35	114.0761	30.8608	26.6	3
	豹澥湖	36	114.5492	30.4161	25.8	1
	东西汉湖	37	113.6606	30.8352	24.3	3
	武湖	38	114.4915	30.7972	21.2	3
	上津湖	39	112.4716	30.0488	18.6	2
朱婆湖	40	115.3947	29.8332	17.7	2	
淤泥湖	41	112.1003	29.7924	16.5	2	
牛浪湖	42	111.9659	29.8278	15.9	2	
童家湖	43	114.1656	30.8010	14.4	2	
钟祥南湖	44	112.6215	31.1410	13.7	2	
海口湖	45	115.2453	30.0577	12.9	2	

续表

湖群 Lake district	湖泊 Lake	代码 Code	经度(E) longitude	纬度(N) latitude	面积/km <sup>2</sup> Surface area	样点数/个 Number of sites
	汉阳西湖	46	113.9004	30.5068	12.7	2
	上涉湖	47	114.2109	30.1335	11.9	2
	策湖	48	115.1599	30.2528	11.8	2
	严西湖	49	114.4719	30.5726	11.8	2
	花马湖	50	115.0429	30.2999	10.3	2
	磁湖	51	115.0525	30.2089	* 9.6	2
华阳湖群 Huayang lake district	龙感湖	52	116.1557	29.9410	316.2	8
	黄大湖	53	116.3911	30.0183	299.2	8
	泊湖	54	116.4224	30.1659	180.4	7
	菜子湖	55	117.1047	30.8105	172.1	7
	武昌湖	56	116.7112	30.2695	100.5	5
	升金湖	57	117.0234	30.3683	78.5	4
	破岗湖	58	117.1689	30.6501	60.0	4
	白荡湖	59	117.3690	30.8161	39.7	3
	武山湖	60	115.5881	29.9095	25.1	3
	太白湖	61	115.8078	29.9722	16.1	3
太湖湖群 Taihu lake district	溇湖	62	119.8157	31.6105	146.5	6
	阳澄湖	63	120.7836	31.4357	119.0	5
	洮湖	64	119.5652	31.6268	89.0	5
	淀山湖	65	120.9522	31.1082	63.7	4
	澄湖	66	120.8207	31.2175	45.0	3
	宜兴三洿	67	119.8097	31.3668	23.2	3
	昆承湖	68	120.7473	31.5831	18.0	2
	元荡湖	69	120.8895	31.0677	12.9	2

湖泊面积数据源自《中国湖泊志》<sup>[29]</sup>, \* 瑶湖和磁湖在书中无记录, 面积数据源于 Google earth 面积测量工具, 经纬度数据为用于 CCA 分析中构建空间变量的基础数据

## References:

- [ 1 ] Kratz T K, Frost T M. The ecological organisation of lake districts: general introduction. *Freshwater Biology*, 2000, 43: 297-299.
- [ 2 ] Downing J A, Prairie Y T, Cole J J, Duarte C M, Tranvik L J, Striegl R G, McDowell W H, Kortelainen P, Caraco N F, Melack J M. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51: 2388-2397.
- [ 3 ] Heiskary S A, Wilson C B, Larsen D P. Analysis of regional patterns in lake water quality: Using ecoregions for lake management in Minnesota. *Lake and Reservoir Management*, 1987, 3: 337-344.
- [ 4 ] Riera J N. A geomorphic template for the analysis of lake districts applied to the Northern Highland Lake District, Wisconsin, USA. *Freshwater Biology*, 2000, 43: 301-318.
- [ 5 ] Kratz T K, Webster K E, Bowser C J, Maguson J J, Benson B J. The influence of landscape position on lakes in northern Wisconsin. *Freshwater Biology*, 1997, 37: 209-217.
- [ 6 ] Fang J Y, Wang X P, Tang Z Y. Local and regional processes control species richness of plant communities: the species pool hypothesis. *Biodiversity Science*, 2009, 17: 605-612.
- [ 7 ] Huston M A. Local processes and regional patterns: appropriate scales for understanding variation in the diversity of plants and animals. *Oikos*, 1999, 86: 393-401.
- [ 8 ] Jiang J H, Dou H S, Su S D. Freshwater lake groups in the middle and lower reaches of the Yangtze and Huaihe Rivers. Wuhan: Changjiang Press, 2009: 428.
- [ 9 ] Xie Z C. Studies on ecological characteristics of macrozoobenthos and lake ecosystem health in lake districts along the mid-lower reaches of Changjiang River [D]. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2003.

- [10] Liu Y Y, Zhang W Z, Wang Y X, Wang E Y. Economic fauna of China: Freshwater Mollusca. Beijing: Science Press, 1979: 134.
- [11] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality, Nanjing: Hohai University Press, 1994: 570.
- [12] Wang H Z. 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: 228.
- [13] Jin X C, Tu Q Y. The standard methods for observation and analysis of lake eutrophication, 2nd ed. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 137.
- [14] Cai Q H, Liu J K, King L. A comprehensive model for assessing lake eutrophication. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13: 1674-1678.
- [15] Clarke K R and Warwick R M. Changes in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation, 2nd edition. PRIMER-E, Plymouth, 2001.
- [16] Hammer Ø, Harper D A T, Ryan P D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia electronica, 2001, 4: 1-9.
- [17] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation. Ecology, 1992, 73: 1045-1055.
- [18] ter Braak C J F, Šmilauer P. CANOCO reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: software for canonical community ordination (version 4.5): Microcomputer Power Ithaca, NewYork, 2002.
- [19] Kumar S. Effect of Different Vegetation Systems on Soil Erosion and Soil Nutrients in Red Soil Region of Southeastern China. Pedosphere, 2003, 13: 121-128.
- [20] Anderson D M, Glibert P M, Burkholder J M. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. Estuaries and Coasts, 2002, 25: 704-726.
- [21] Brönmark C. Interactions between epiphytes, macrophytes and freshwater snails: a review. Journal of Molluscan Studies, 1989, 55: 299-311.
- [22] Richards C, Johnson L B, Host G E. Landscape-scale influences on stream habitats and biota. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1996, 53: 295-311.
- [23] Heino J, Muotka T, Paavola R, Paasivirta L. Among-taxon congruence in biodiversity patterns: can stream insect diversity be predicted using single taxonomic groups? Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2003, 60: 1039-1049.
- [24] Johnson R K, Goedkoop W, Sandin L. Spatial scale and ecological relationships between the macroinvertebrate communities of stony habitats of streams and lakes. Freshwater Biology, 2004, 49: 1179-1194.
- [25] Johnson R K and Goedkoop W. Littoral macroinvertebrate communities: spatial scale and ecological relationships. Freshwater Biology, 2002, 47: 1840-1854.
- [26] Sandin L and Johnson R K. Local, landscape and regional factors structuring benthic macroinvertebrate assemblages in Swedish streams. Landscape Ecology, 2004, 19: 501-514.
- [27] Donohue I, Jackson A L, Pusch M T, Irvine K. Nutrient enrichment homogenizes lake benthic assemblages at local and regional scales. Ecology, 2009, 90: 3470-3477.
- [28] Økland R H. On the variation explained by ordination and constrained ordination axes. Journal of Vegetation Science, 1999, 10: 131-136.
- [29] Wang S M and Dou H S. Chinese Lakes. Beijing, Science Press, 1998: 480.

#### 参考文献:

- [6] 方精云, 王襄平, 唐志尧. 局域和区域过程共同控制着群落的物种多样性: 种库假说. 生物多样性, 2009, 17: 605-612.
- [8] 姜加虎, 窦鸿身, 苏守德主编. 江淮中下游淡水湖群. 武汉: 长江出版社, 2009, 428.
- [9] 谢志才, 湖群大型底栖动物的生态学特征及生态系统健康评价. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2003.
- [10] 刘月英, 张文珍, 王跃先, 王恩义. 中国经济动物志·淡水软体动物. 北京: 科学出版社, 1979: 134.
- [12] 王洪铸. 中国小蛭类研究——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: 228.
- [13] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 317.
- [29] 王苏民和窦鸿身主编. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 480.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33 ,No. 16 Aug. ,2013( Semimonthly)**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

- Advances in theoretical issues of species distribution models ..... LI Guoqing, LIU Changcheng, LIU Yuguo, et al (4827)
- A review on rare earth elements in farmland ecosystem ..... JIN Shulan, HUANG Yizong (4836)
- A review on the mechanism of attachment and metamorphosis in barnacle cyprids ... RAO Xiaozhen, LIN Gang, XU Youqin (4846)
- Decision making in group living animals ..... WANG Chengliang, WANG Xiaowei, QI Xiaoguang, et al (4857)

**Autecology & Fundamentals**

- Influence of monsoon's advancing, retreating and conversion on migrations of *Nilaparvata lugens* (Stål) in China .....  
..... BAO Yunxuan, HUANG Jinying, XIE Xiaojin, et al (4864)
- Prey selection and feeding rate of sea stars *Asterias amurensis* and *Asterina pectinifera* on three bivalves .....  
..... QI Zhanhui, WANG Jun, MAO Yuze, et al (4878)
- Habitat selection of Whooper Swan at Bayanbulak in Xinjiang of China ..... DONG Chao, ZHANG Guogang, LU Jun, et al (4885)
- The genetic structure of endemic plant *Pteroceltis tatarinowii* by ISSR markers .....  
..... LI Xiaohong, ZHANG Hui, WANG Deyuan, et al (4892)
- Genetic analysis of salt tolerance of F<sub>1</sub> progenies between chrysanthemum and the intergeneric hybrid of chrysanthemum and  
crossostephium ..... XU Lili, CHEN Fadi, CHEN Sumei, et al (4902)
- Indicative effect of the anatomical structure of plant photosynthetic organ on WUE in desert region .....  
..... ZHANG Haina, SU Peixi, LI Shanxia, et al (4909)
- Effects of water on photosynthesis in different age of tomato leaves ..... CHEN Kaili, LI Jianming, HE Huiqiang, et al (4919)
- Photosynthesis-nitrogen relationship in evergreen and deciduous tree species at different altitudes on Mao'er Mountain, Guangxi .....  
..... BAI Kundong, JIANG Debing, WAN Xianchong (4930)
- Effect of fertilization on the dynamic of soil N<sub>2</sub>O fluxes in Chinese chestnut stands .....  
..... ZHANG Jiaojiao, LI Yongfu, JIANG Peikun, et al (4939)
- Effects of long-term fertilization on aggregate dynamics and organic carbon and total nitrogen contents in a reddish paddy soil .....  
..... LIU Xiyu, WANG Zhongqiang, ZHANG Xinyu, et al (4949)

**Population, Community and Ecosystem**

- Carbon storage of natural wetland ecosystem in Daxing'anling of China ..... MU Changcheng, WANG Biao, LU Huicui, et al (4956)
- Monitoring the riparian vegetation cover after the Wenchuan earthquake along the Minjiang River valley based on multi-temporal  
Landsat TM images; a case study of the Yingxiu-Wenchuan section ..... XU Jiceng, TANG Bin, LU Tao (4966)
- A dynamic analysis of spatial distribution pattern of *Larix gmelinii* natural forest in Pangu farm under varying intensity of fire  
disturbance ..... NI Baolong, LIU Zhaogang (4975)
- Structure of macrozoobenthos in lakes along the Yangtze River and relationships with environmental characteristics .....  
..... CAI Yongjiu, JIANG Jiahu, ZHANG Lu, et al (4985)
- The research on the age structure and sex ratio of *Niviventer confucianus* in Thousand Island Lake .....  
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (5000)
- Mathematical model of insect Logistic increasing and economic threshold based on sex pheromone trap .....  
..... ZHAO Zhiguo, RONG Erhua, ZHAO Zhihong, et al (5008)
- Community composition and phototaxis of insects in tea plantations in Southern Jiangshu Province during late fall .....  
..... ZHENG Yingcha, NIU Yuqun, CUI Guiling, et al (5017)
- Effect of agricultural land use types on soil mite communities in north China .....  
..... HAN Xuemei, LI Dandan, LIANG Zian, et al (5026)

**Landscape, Regional and Global Ecology**

- Exploring the space syntax under negative planning; a case study of landscape connectivity based on the behaviors of avian edge  
species ..... YANG Tianxiang, ZHANG Weiqian, FAN Zhengqiu, et al (5035)
- Temporal-spatial variation of heterotrophic respiration in alpine area of southwestern China .....  
..... ZHANG Yuandong, PANG Rui, GU Fengxue, et al (5047)

- Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province ..... ZHAO Mingsong, ZHANG Ganlin, LI Decheng, et al (5058)
- Spatial distribution and change of vegetation carbon in Northwest Guangxi, China on the basis of vegetation inventory data ..... ZHANG Mingyang, LUO Weijian, LIU Huiyu, et al (5067)
- Resource and Industrial Ecology**
- Urban metabolism process based on emergy synthesis; a case study of Beijing ..... LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin (5078)
- Evaluation on cultivated land ecological security based on the PSR model and matter element analysis ..... ZHANG Rui, ZHENG Huawei, LIU Youzhao (5090)
- The effect of super absorbent polymer on the growth and nutrition absorption of *Festuca arundinacea* L. on an improved gangue matrix ..... ZHAO Zhifeng, WANG Dongmei, ZHAO Tingning (5101)
- Urban, Rural and Social Ecology**
- The effect of distance on the ecological conservation value; a case study of Sanjiang Plain Wetland ..... AO Changlin, CHEN Jinting, JIAO Yang, et al (5109)
- Research Notes**
- Scaling effect on spatial variation of soil organic carbon in mountainous areas of Guangdong Province ..... JIANG Chun, WU Zhifeng, QIAN Lexiang, et al (5118)
- The changes of hair length and pelage thermal insulation in captive female squirrel, *Sciurus vulgarize manchuricus*, during autumn molting period ..... JING Pu, ZHANG Wei, HUA Yan, et al (5126)

# 《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大16开本,300页,国内定价90元/册,全年定价2160元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路18号 电话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 王克林 编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段靖

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第16期 (2013年8月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 16 (August, 2013)

编辑 《生态学报》编辑部  
地址:北京海淀区双清路18号  
邮政编码:100085  
电话:(010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

主编 王如松  
主管 中国科学技术协会  
主办 中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
地址:北京海淀区双清路18号  
邮政编码:100085

出版 科学出版社  
地址:北京东黄城根北街16号  
邮政编码:100717

印刷 北京北林印刷厂  
发行 科学出版社  
地址:东黄城根北街16号  
邮政编码:100717  
电话:(010)64034563  
E-mail: journal@espg.net

订购 全国各地邮局  
国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址:北京399信箱  
邮政编码:100044

广告经营 京海工商广字第8013号  
许可证

Edited by Editorial board of  
ACTA ECOLOGICA SINICA  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China  
Tel: (010)62941099  
www.ecologica.cn  
shengtaixuebao@rcees.ac.cn

Editor-in-chief WANG Rusong  
Supervised by China Association for Science and Technology  
Sponsored by Ecological Society of China  
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS  
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,  
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North  
Street, Beijing 100717, China  
Tel: (010)64034563  
E-mail: journal@espg.net

Domestic All Local Post Offices in China  
Foreign China International Book Trading  
Corporation  
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元