

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

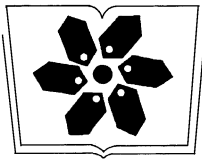
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第9期 Vol.33 No.9 **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 9 期 2013 年 5 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 可持续发展研究的学科动向 茶 娜, 邬建国, 于润冰 (2637)
- 代谢异速生长理论及其在微生物生态学领域的应用 贺纪正, 曹 鹏, 郑袁明 (2645)
- 植物内生菌促进宿主氮吸收与代谢研究进展 杨 波, 陈 晏, 李 霞, 等 (2656)
- 中国园林生态学发展综述 于艺婧, 马锦义, 袁韵珏 (2665)

个体与基础生态

- 基于最小限制水分范围评价不同耕作方式对土壤有机碳的影响 陈学文, 王 农, 时秀焕, 等 (2676)
- 草原土壤有机碳含量的控制因素 陶 贞, 次旦朗杰, 张胜华, 等 (2684)
- 外源钙离子与南方菟丝子寄生对喜旱莲子草茎形态结构的影响 车秀霞, 陈惠萍, 严巧娣, 等 (2695)
- 毛竹出笋后快速生长期茎秆色素含量与反射光谱的相关性 刘 琳, 王玉魁, 王星星, 等 (2703)
- 巴郎山异型柳叶片功能性状及性状间关系对海拔的响应 冯秋红, 程瑞梅, 史作民, 等 (2712)
- 外源磷或有机质对板蓝根吸收转运砷的影响 高宁大, 耿丽平, 赵全利, 等 (2719)
- 不同猎物饲喂对南方小花蝽捕食量和喜好性的影响 张昌容, 郅军锐, 莫利锋 (2728)
- 捕食风险对东方田鼠功能反应格局的作用 陶双伦, 杨锡福, 姚小燕, 等 (2734)
- 基于线粒体细胞色素 c 氧化酶亚基 I 基因序列的帘蛤科贝类分子系统发育研究
..... 程汉良, 彭永兴, 董志国, 等 (2744)
- 不同实验生态环境对海刺猬遮蔽行为的影响 常亚青, 李云霞, 罗世滨, 等 (2754)

种群、群落和生态系统

- 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化 陈美球, 赵宝华, 罗志军, 等 (2761)
- 长江口及邻近海域富营养化指标响应变量参照状态的确定 郑丙辉, 朱延忠, 刘录三, 等 (2768)
- 长江口及邻近海域富营养化指标原因变量参照状态的确定 郑丙辉, 周 娟, 刘录三, 等 (2780)
- 鸭绿江口及邻近海域生物群落的胁迫响应 宋 伦, 王年斌, 杨国军, 等 (2790)
- 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系 陆 强, 陈慧丽, 邵晓阳, 等 (2803)
- 生物土壤结皮对荒漠土壤线虫群落的影响 刘艳梅, 李新荣, 赵 昕, 等 (2816)
- 大棚模拟条件下角倍蚜春季迁飞数量动态及其与气象因子的关系 李 杨, 杨子祥, 陈晓鸣, 等 (2825)
- 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳定及有机碳粒径分布的影响 程 曼, 朱秋莲, 刘 雷, 等 (2835)
- 1958—2008 年太白山太白红杉林碳循环模拟 李 亮, 何晓军, 胡理乐, 等 (2845)
- 不同干扰对黄土区典型草原物种多样性和生物量的影响 陈芙蓉, 程积民, 刘 伟, 等 (2856)
- 乌拉山自然保护区白桦种群的年龄结构和点格局分析 胡尔查, 王晓江, 张文军, 等 (2867)
- 西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响 杞金华, 章永江, 张一平, 等 (2877)
- 阿尔泰山小东沟林区乔木物种丰富度空间分布规律 井学辉, 曹 磊, 臧润国 (2886)

景观、区域和全球生态

太湖流域生态风险评价 许妍,高俊峰,郭建科 (2896)

基于 GIS 的关中-天水经济区土地生态系统固碳释氧价值评价 周自翔,李晶,冯雪铭 (2907)

资源与产业生态

淹水条件下控释氮肥对污染红壤中重金属有效性的影响..... 梁佩筠,许超,吴启堂,等 (2919)

研究简报

高温强光对小麦叶绿体 Deg1 蛋白酶和 D1 蛋白的影响及水杨酸的调节作用 郑静静,赵会杰,胡巍巍,等 (2930)

不同 CO₂ 浓度变化下干旱对冬小麦叶面积指数的影响差异 李小涵,武建军,吕爱锋,等 (2936)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-05



封面图说: 肥美的当雄草原——高寒草甸是在寒冷环境条件下,发育在高原和高山的一种草地类型。其植被组成主要是多年生草本植物,冬季往往有冰雪覆盖,土壤主要为高山草甸土。当雄草原位于藏北高原,藏南与藏北的交界地带,海拔高度为 5200—4300m,受海洋性气候影响,呈现高原亚干旱气候,年平均降水量 293—430mm。主要有小嵩草草甸、藏北嵩草草甸和沼泽草甸等,覆盖度为 60%—90%,其中小嵩草草甸分布面积最大,连片分布于广阔的高原面上。高寒草甸草层低,草质良好,是畜牧业优良的夏季牧场。

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/stxb201203080316

陆强, 陈慧丽, 邵晓阳, 王莹莹, 陶敏, 何京, 唐龙. 杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征及与环境因子的关系. 生态学报, 2013, 33(9): 2803-2815.
Lu Q, Chen H L, Shao X Y, Wang Y Y, Tao M, He J, Tang L. Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(9): 2803-2815.

杭州西溪湿地大型底栖动物群落特征 及与环境因子的关系

陆 强¹, 陈慧丽^{1,*}, 邵晓阳¹, 王莹莹², 陶 敏¹, 何 京¹, 唐 龙¹

(1. 杭州师范大学动物适应与进化杭州市重点实验室, 杭州 310036; 2. 中国湿地博物馆, 杭州 310036)

摘要:为揭示现阶段西溪湿地大型底栖动物群落现状及其对湿地生态保护工程的响应,于2009年8月至2010年5月对西溪湿地在3个不同时期建设的区域(I区、II区和III区)中的大型底栖动物进行季度调查。共记录大型底栖动物3门8纲15科45种。霍甫水丝蚓(*Limnodrilus hoffmeisteri*)、多毛管水蚓(*Aulodrilus pluriset*)和梨形环棱螺(*Bellamyia purificata*)是现阶段西溪湿地大型底栖动物的优势种。最早建设的I区的环节动物密度在各季节均低于建设较晚的II区和III区,而软体动物的密度和生物量的变化趋势则相反;I区大型底栖动物的总密度虽然与II区和III区没有明显差异,但总生物量、物种数、Margalef物种丰富度指数和Shannon-Wiener多样性指数均显著上升。上述结果表明,西溪湿地生态保护工程早期建设区域的底栖动物多样性趋于增加,水生生态系统环境质量得以改善。ANOSIM分析显示,西溪湿地不同区域或季节间大型底栖动物群落结构均存在显著差异,且这些差异的主要贡献物种为多毛管水蚓(*Aulodrilus pluriset*)和梨形环棱螺(*Bellamyia purificata*),表明这两个优势物种对西溪湿地底栖环境变化反应敏感,可作为湿地环境评价的指示物种。BIO-ENV分析表明,水温是影响春季和夏季大型底栖动物群落结构的主要环境因子,水深是影响秋季和冬季大型底栖动物群落的主要因子,同时底泥总磷含量对解释大型底栖动物生物量和群落结构具有一定作用。

关键词: 西溪湿地; 大型底栖动物; 多样性; 生物与环境联合分析

Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland

LU Qiang¹, CHEN Huili^{1,*}, SHAO Xiaoyang¹, WANG Yingying², TAO Min¹, HE Jing¹, TANG Long¹

1 Hangzhou Key Laboratory for Animal Adaptation and Evolution, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China

2 National Wetland Museum of China, Hangzhou 310036, China

Abstract: To explore the status of macrobenthic communities and their response to the ecological restoration in Xixi Wetland, we surveyed the diversity of macrobenthos at three areas between in August of 2009 and May of 2010. We recorded 45 species from 15 families, 8 classes and 3 phyla. *Limnodrilus hoffmeisteri*, *Aulodrilus pluriset* and *Bellamyia purificata* were the dominant species in Xixi Wetland. The density of Annelida of area I, which was carried out early, was lower than area II and area III. However, the changes of density and biomass of Mollusca were different. Total density of macrobenthos in area I had no significant differences between area II and area III. But there were significant differences in the total biomass, number of species, Margalef abundance index and Shannon-Weaver index. These results suggested that the diversity of macrobenthos had been increased and the quality of environment had been improved by the restoration project in Xixi Wetland. ANOSIM showed that the structure of macrozoobenthic communities differed significantly between

基金项目:浙江省重点科技创新团队基金(2010R50039);中国湿地博物馆项目(CWM2011-W02);国家自然科学基金(31100301)

收稿日期:2012-03-08; **修订日期:**2012-10-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: huilichen@hznu.edu.cn

different areas and seasons, and the main contributing species were *A. pluriseta* and *B. purificata*. It indicated that the two dominant species were sensitive to the changing of environment in Xixi Wetland which could be indicator species in environmental assessment of Wetland. Using BIO-ENV (biota and environment analysis), we found that water temperature was the key factors affecting the macrozoobenthic communities in spring and summer, whereas water depth was the key factors affecting the macrozoobenthos in autumn and winter. The total phosphorus of sediment was related to the macrozoobenthic biomass and community structure.

Key Words: Xixi Wetland; macrobenthos; species diversity; biota and environment analysis

湿地生态系统具有独特的生态服务功能,是自然界最重要的生态系统之一,同时也是全球破坏最为严重的生态系统之一^[1]。城市湿地是指城市区域之内的海岸与河口、河岸、浅水湖沼、水源保护区、自然和人工池塘以及污水处理厂等具有水陆过度性质的生态系统^[2]。在我国,随着经济的快速发展以及城市化进程的推进,城市湿地和城市边缘湿地受破坏日益严重,以致威胁城市生态安全^[3]。由此,城市湿地和城市边缘湿地的恢复和保护工作已成为目前湿地研究的热点与焦点^[4]。杭州西溪湿地是世界罕见的城市次生湿地,具有很高的生态服务价值,是杭州市生态安全和经济社会可持续发展的重要基础。自 20 世纪 80 年代以来,随着城市化的推进,该片湿地被大量侵占,面积锐减^[5]。为了保护杭州的“城市之肾”,自 2003 年起杭州市分期启动了西溪湿地生态保护工程建设,主要针对其污染严重、河道堵塞、景观破坏及生态功能退化等问题,在湿地保护工程建设中采取修复和培育池塘和港汊、疏浚清淤、植被复绿等生态恢复措施,并在此基础上进行持续保护。然而,迄今为止对生态保护工程是否改善了湿地生态系统中生物的种间关系、改变了碎屑分解及物质循环速率,改善水生生态环境等的问题的研究非常有限,对西溪湿地保护工程实施后底栖动物群落的现状及其对工程的响应则未见报道。

大型底栖动物是湿地生态系统的重要组成部分之一。其具有区域性强,迁移力弱,不同种类对环境条件的适应性及对污染等不利因素的耐受力 and 敏感程度不同等特点^[6-7]。更为重要的是,底栖动物在湿地生态系统物质循环和能量流动中起着重要作用,它可以加速水底碎屑的分解,促进泥水界面的物质交换和水体的自净^[8-11]。因此,研究底栖动物的种类组成、群落结构、时空变化以及物种多样性等特征,是评价湿地生态系统组织、功能、状态、健康的重要指标,在湿地生态系统的监测和评价中独具优势。目前我国对湿地大型底栖动物的研究大多集中于湖泊、河流等湿地^[12-13],对于城市湿地中底栖动物群落结构及其与环境因子间关系的研究工作较为薄弱。

为评估现阶段西溪湿地大型底栖动物群落现状及其对湿地生态保护工程的响应,本研究对西溪湿地不同时期建设的工程区域中的大型底栖动物多样性和群落结构进行调查,并分析其与环境因子的关系,揭示湿地综合保护工程中底栖动物群落结构的演变规律及原因,为我国城市湿地的生态学管理、环境保护以及资源的可持续利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究地点概况

西溪湿地,位于浙江省杭州市区西部,总面积 11.5 km²,是国内第一个国家湿地公园。西溪生态恢复与保护工程于 2003 年全面开展,分 3 期进行建设,主要采取修复和培育池塘和港汊、疏浚清淤、植被复绿等生态恢复措施。西溪湿地一期保护工程区域(Ⅰ区)位于西溪湿地中部,于 2003—2005 年开展建设,距离本次研究采样约 6a 时间;二期保护工程区域(Ⅱ区)位于西溪湿地的东部,建设时间为 2006—2007 年,距离采样近 3 年时间;三期保护工程区域(Ⅲ区),位于西面,于 2008—2009 年进行建设,采样时刚完成建设(图 1)。

1.2 采样点布设与样品采集

本研究共设 24 个样点(图 1),1—8 号样点位于西溪湿地Ⅰ区;9—18 号样点位于Ⅱ区;19—24 号样点位

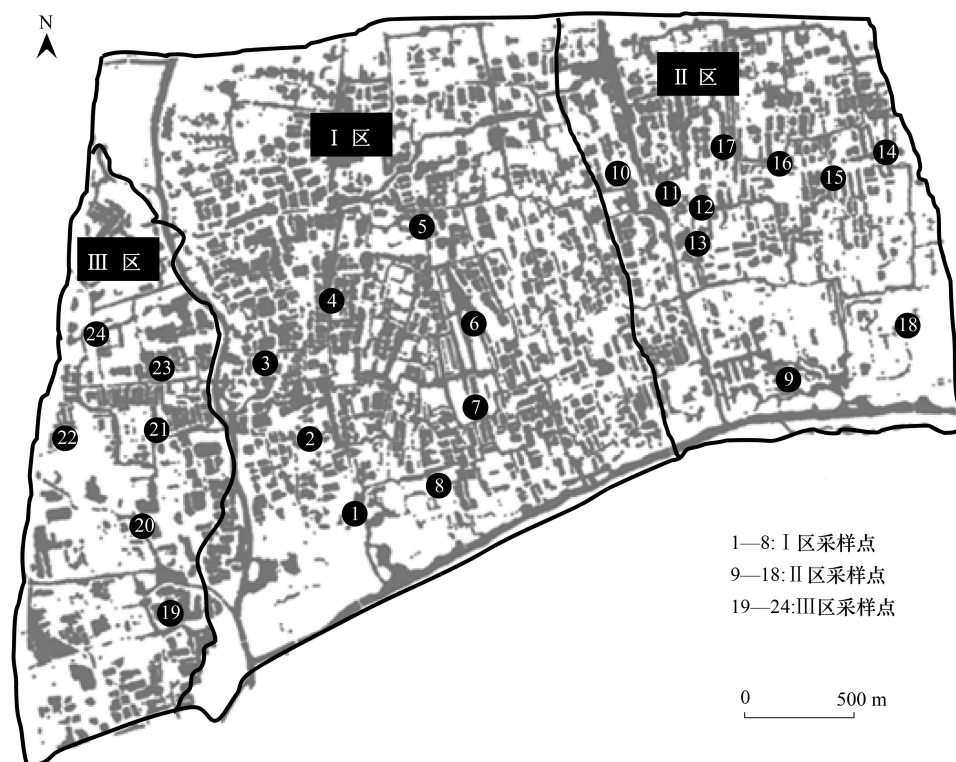


图1 西溪湿地大型底栖动物调查的采样点

Fig. 1 Sampling sites for the surveys of macrobenthos in Xixi Wetland

于Ⅲ区。于2009年8月至2010年5月每季度采样1次,分别为8月(夏季)、11月(秋季)、2月(冬季)和5月(春季)。底泥样品的定量采集用 $1/40\text{m}^2$ 改良彼得森采泥器,每个样点重复采样3次,合并为1个样品。在现场用0.5mm的分样筛分筛底泥,洗净后在解剖盘中逐一将底栖动物拣出,放入装有10%的甲醛溶液的广口瓶中,贴上标签,在实验室中将标本鉴定至尽可能低的分类单元。样品在计数时,若标本损坏则只统计头部。称重时,先用滤纸将样品表明水分吸干,在用万分之一电子天平(AL204)称重。最后将每个样点的个体数和重量换算成 1m^2 面积的密度(个/ m^2)和生物量(g/m^2)。

1.3 环境因子的测定

在采样现场测定水温、水深、pH和溶解氧。pH用笔式酸度计(HI98127)测定,溶解氧用溶氧分析仪(DO5510HA)测定。在各样点用彼得生采泥器采集底泥1次,带回实验室,用于底泥总氮和总磷含量的测定。总氮用碱解扩散法测定,总磷用酸溶-钼锑抗比色法测定。

1.4 优势种和多样性分析

采用物种优势度指数(Y)确定底栖动物的优势种类;采用Margalef物种丰富度指数(d_M)和Shannon-Wiener指数(H')分析西溪湿地大型底栖动物的多样性。具体计算公式如下:

$$Y = P_i \times f_i$$

$$d_M = (S-1) / \ln N$$

$$H' = -\sum P_i \ln P_i$$

式中, $P_i = n_i/N$, P_i 为种 i 的个体数占总个体数的比例, n_i 为种 i 的个体数, N 为所有种的个体总数; f_i 为该种出现的样点数与总样点数之比的百分数; S 为总种数。当 $Y > 0.02$ 时,该种即为优势种^[14]。

1.5 统计分析

本研究采用Statistica 6.0统计软件包对环境参数及大型底栖动物群落特征进行双因子方差分析(two-way ANOVA),以检验季节和区域对大型底栖动物的种类数、密度、生物量、多样性指数的影响,显著性水平设置为

0.05, 后续比较采用 Tukey HSD 检验, 以检验各季节和各区域大型底栖动物群落间的两两差异。

大型底栖动物群落结构分析采用多种非参数变量分析方法, 包括双因子交叉 ANOSIM 分析、单因子 ANOSIM 分析和 SIMPER 分析^[15]。通过丰富度-生物量法 ABC 曲线对群落稳定性和受干扰状况进行分析^[16]。研究大型底栖动物与环境因子间的关系采用生物与环境参数的联合分析 (BIO-ENV)^[15], 该分析中生物群落结构相似性矩阵的构建基础为 Bray-Curtis 相似性系数, 以上分析均由 Primer V5.2.8 软件完成。

2 结果与分析

2.1 环境参数

西溪湿地三个区域大型底栖动物的环境因子如表 1 所示。双因子方差分析表明 (表 1), 各区域间水温、水深、pH 值、溶解氧和底泥总氮含量均存在显著差异 ($P < 0.01$), 而底泥总磷含量的差异不显著 ($P = 0.065$)。季节方面, 除水深外其他环境因子的季节差异均显著 ($P < 0.001$)。

表 1 西溪湿地大型底栖动物环境参数及其双因子方差分析

Table 1 Environmental parameters of microbenthos in Xixi Wetland and summary of two-way ANOVA for testing the effects of sampling site and season

样区 Area	季节 Season	水温 Temperature /°C	水深 Depth /m	pH	溶解氧 Dissolved oxygen / (mg/L)	总氮 Total nitrogen / (mg/kg)	总磷 Total phosphorus / (mg/kg)
I 区 Area I	春季 Spring	23.4	0.96	7.77	0.96	180.54	0.04
	夏季 Summer	32.16	0.78	7.88	4.55	771.2	0.06
	秋季 Autumn	14.2	1.21	7.88	1.95	344.13	0.06
	冬季 Winter	10.08	0.98	8.12	3.84	132.31	0.05
II 区 Area II	春季	24.64	0.7	7.75	1.4	185.61	0.04
	夏季	34.95	0.97	7.72	6.67	394.22	0.06
	秋季	14.63	0.82	7.81	4.52	158.55	0.04
	冬季	11.64	0.74	8.1	3.74	158.48	0.04
III 区 Area III	春季	23.37	1.23	7.88	1.83	143	0.05
	夏季	33.3	1.61	8.25	4.1	291.71	0.06
	秋季	13.98	1.54	8.06	3.43	122	0.04
	冬季	10.98	1.23	8.22	4.23	172.17	0.04
双因子方差分析 (P 值) Two-way ANOVA (P-value)							
样区 (df=2) Area		< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.002	0.006	0.065
季节 (df=3) Season		< 0.001	0.288	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
样区×季节 (df=6) Area × season		0.216	0.505	0.04	0.116	0.026	0.293

黑体字表示存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.2 大型底栖动物种类组成和优势种

本研究共采集大型底栖动物 45 种, 隶属 3 门 8 纲 15 科。其中, 环节动物和软体动物种类最多, 各占总物种数的 31.1%; 其次为摇蚊幼虫 11 属 11 种, 占总物种数的 24.4%; 其它节肢动物种类 6 种, 占总物种数的 13.4% (表 2)。

以优势度指数 $Y > 0.02$ 为判别标准, 西溪湿地大型底栖动物优势种为霍甫水丝蚓 (*Limnodrilus hoffmeisteri*) ($Y = 0.446$)、多毛管水蚓 (*Aulodrilus pluriset*) ($Y = 0.190$) 和梨形环棱螺 (*Bellamya purificata*) ($Y = 0.020$) (表 2), 其中霍甫水丝蚓的丰度在地点间差异不显著, 而多毛管水蚓和梨形环棱螺地点间差异显著。多毛管水蚓的丰度随着保护工程建设历史的延长呈减少趋势, I 区多毛管水蚓丰度显著低于 III 区; 梨形环棱螺丰度的变化趋势则相反, I 区梨形环棱螺的丰度显著高于 II 区和 III 区 (图 2)。此外, 苏氏尾鳃蚓

表 2 西溪湿地大型底栖动物优势度与分布

Table 2 Dominance and distribution of macrobenthos in Xixi Wetland

物种 Species	优势度指数 Dominance index	I 区 Area I	II 区 Area II	III 区 Area III	方差分析 P
环节动物 Annelida					
苏氏尾鳃蚓 <i>Branchiura sowerbyi</i>	0.019	+	+	+	ns
霍甫水丝蚓 <i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	0.446	+++	+++	+++	ns
皮氏管水蚓 <i>Aulodrilus pigueti</i>	0.003	+	+	+	ns
多毛管水蚓 <i>Aulodrilus plurisetia</i>	0.190	+++	+++	+++	0.004
正颤蚓 <i>Tubifex tubifex</i>	0.001	+	+	+	0.025
颤蚓科一种 <i>Tubificidae</i> sp.	< 0.001	+	+	+	ns
费氏拟仙女虫 <i>Paranais frici</i>	< 0.001	+	-	+	ns
普通仙女虫 <i>Nais communis</i>	0.002	+	+	+	ns
参差仙女虫 <i>Nais variabilis</i>	0.005	+	+	+	ns
特城泥盲虫 <i>Stephensoniana strivandrana</i>	< 0.001	+	+	-	ns
瓦式红仙女虫 <i>Haemonais waldvogeli</i>	< 0.001	+	+	-	ns
寡鳃齿吻沙蚕 <i>Nephtys oligobranchia</i>	< 0.001	+	-	+	ns
石蛭 <i>Herpobdella</i> sp.	< 0.001	+	-	-	ns
扁蛭 <i>Glossiphonia</i> sp.	< 0.001	+	+	-	ns
软体动物 Mollusca					
河蚬 <i>Corbicula fluminea</i>	< 0.001	+	+	+	ns
河蚌一种 <i>Unionidae</i> sp.	< 0.001	+	-	-	ns
无齿蚌 <i>Anodonta</i> sp.	< 0.001	+	-	-	ns
圆顶珠蚌 <i>Unio dongtasiae</i>	< 0.001	-	+	-	ns
淡水壳菜 <i>Limnoperna fortunei</i>	< 0.001	+	-	+	ns
折叠萝卜螺 <i>Radix plicatula</i>	< 0.001	-	+	-	ns
小土蜗 <i>Galba pervia</i>	< 0.001	-	+	+	ns
大沼螺 <i>Parafossarulus eximius</i>	0.002	+	+	-	< 0.001
纹沼螺 <i>Parafossarulus striatulus</i>	< 0.001	+	+	-	< 0.001
长角涵螺 <i>Alocinma longicornis</i>	< 0.001	+	-	+	0.020
懈豆螺 <i>Bithynia misella</i>	< 0.001	+	-	-	ns
铜锈环棱螺 <i>Bellamya aeruginosa</i>	0.012	+	+	+	ns
梨形环棱螺 <i>Bellamya purificata</i>	0.020	++	+	+	< 0.001
方形环棱螺 <i>Bellamya quadrata</i>	0.001	+	+	+	ns
摇蚊幼虫 Chironomidae					
长足摇蚊 <i>Tanytus</i> sp.	0.001	+	+	+	ns
多足摇蚊 <i>Polypedilum</i> sp.	0.001	+	-	+	0.020
裸须摇蚊 <i>Prosilocerus</i> sp.	0.004	+	++	+	0.030
直突摇蚊 <i>Orthocladius</i> sp.	< 0.001	-	+	-	ns
羽摇蚊 <i>Chironomus</i> sp.	0.010	+	+	+	ns
隐摇蚊 <i>Cryptochironomus</i> sp.	< 0.001	-	-	+	0.046
恩非摇蚊 <i>Einfeldia</i> sp.	0.007	+	+	+	ns
前突摇蚊 <i>Procladius</i> sp.	< 0.001	+	-	+	ns
小摇蚊 <i>Microchironomus</i> sp.	< 0.001	-	-	+	ns
枝角摇蚊 <i>Cladopelma</i> sp.	< 0.001	+	-	+	ns
二叉摇蚊 <i>Dicortendipes</i> sp.	< 0.001	+	+	+	ns
其他 Other					
螺科一种 <i>Ceratopogonidae</i> sp.	< 0.001	+	+	+	ns
蛹 pupa	< 0.001	+	+	+	ns
蜉蝣目一种 <i>Ephemera</i> sp.	< 0.001	+	-	-	ns
蜻蜓幼体 larval dragonfly	< 0.001	+	+	+	ns
米虾属 <i>Caridina</i> sp.	< 0.001	+	+	+	ns
栉水虱 <i>Asellusa quaticus</i>	< 0.001	+	-	-	ns

+++表示平均密度 $\geq$ 均 100 个/ m^2 ; ++ 表示 50 个/ $\text{m}^2 \leq$ 平均密度 < 100 个/ m^2 ; +表示平均密度 < 50 个/ m^2 ; -表示未出现; ns 表示该物

种数量在 3 个区域间不存在显著差异

(*Branchiura sowerbyi*)、铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*)和羽摇蚊(*Chironomus* sp.)为西溪湿地大型底栖动物的常见种类($Y \geq 0.01$),它们的丰度在地点间差异均不显著。

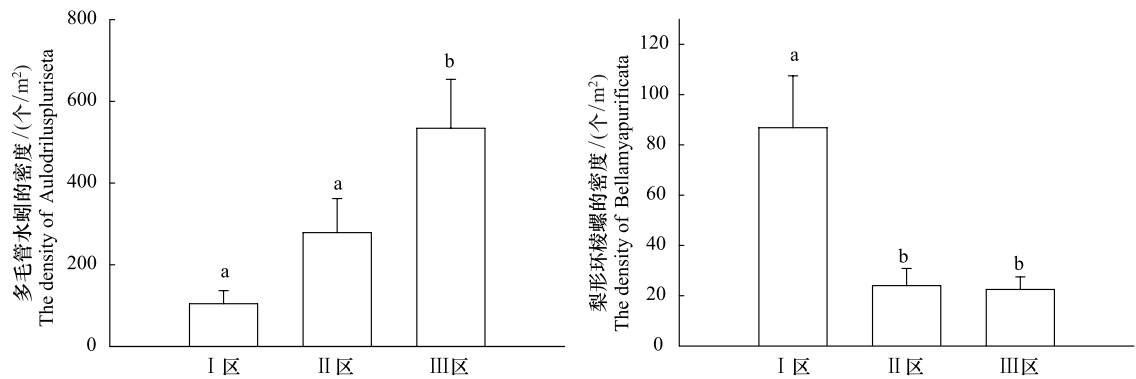


图2 各区域多毛管水蚓和梨形环棱螺密度

Fig.2 Density of *Aulodrilus plurisetus* and *Bellamyapurificata* in different areas

2.3 大型底栖动物密度和生物量

西溪湿地大型底栖动物的年平均密度为 1145.90 个/m²,以环节动物具绝对优势,占总密度的 81.08%,其次为摇蚊幼虫和软体动物,分别占 9.04%和 8.91%,其他类群所占比例较小。双因子方差分析结果显示,西溪湿地大型底栖动物总密度在 3 个区域及 4 个采样季节间均不存在显著差异,但环节动物密度和软体动物密度在各区域的差异显著,环节动物和摇蚊幼虫的季节变异明显(表 3)。I 区环节动物密度在各季节均低于 II 区和 III 区,尤其和 III 区差异显著;I 区的软体动物生物量在各季节均显著高于 II 区和 III 区(Tukey HSD, $P<0.05$)。

表3 西溪湿地各类群大型底栖动物密度(个/m²)及其双因子方差分析

Table 3 Density (ind./m²) of macrobenthos in Xixi Wetland and summary of two-way ANOVA for testing the effects of sampling site and season

样区 Area	季节 Season	环节动物 Annelida	软体动物 Mollusca	摇蚊幼虫 Chironomidae	其他 Others	总计 Total
I 区 Area I	春季 Spring	1042.5±359.4	182.5±49.6	147.5±46.0		1372.5±345.4
	夏季 Summer	667.5±139.8	115.0±35.8	92.5±41.2	2.50±2.50	877.5±138.5
	秋季 Autumn	582.5±182.7	177.5±62.2	37.5±22.5	17.5±9.6	815.0±195.6
	冬季 Winter	430.0±116.3	290.0±95.7	112.5±55.2	30.0±12.5	862.5±174.1
II 区 Area II	春季	1346.0±257.2	72.0±22.4	58.0±22.6	8.0±6.1	1484.0±247.7
	夏季	762.2±159.8	77.8±31.2	35.6±13.2	11.1±5.9	886.7±175.9
	秋季	1212.0±302.2	58.0±23.6	78.0±30.3	20.0±9.4	1368.0±309.5
	冬季	466.0±89.8	38.0±11.3	380.0±106.9	14.0±6.0	898.0±134.6
III 区 Area III	春季	1283.3±341.7	93.3±37.5	206.7±131.1		1583.3±355.1
	夏季	1896.7±357.4	73.3±30.4	66.7±31.7	6.7±4.2	2043.3±339.6
	秋季	1043.3±474.5	23.3±15.9	6.7±4.2	10.0±6.8	1083.3±478.4
	冬季	573.3±193.4	36.7±12.0	33.3±13.3	16.7±9.6	660.0±192.8
双因子方差分析(P 值) Two-way ANOVA (P-value)						
样区 (df=2) Area		0.032	< 0.001	0.323	0.660	0.192
季节 (df=3) Season		0.006	0.646	0.018	0.018	0.019
样区×季节 (df=6) Area × season		0.128	0.174	0.001	0.631	0.094

黑体字表示存在差异显著($P<0.05$)

西溪湿地大型底栖动物年平均生物量为 237.67g/m²,年均生物量以软体动物占据绝对优势,占总生物量的 98.36%,其次为环节动物和摇蚊幼虫,为 1.29%和 0.18%,其他类群所占比例较小。双因子方差分析结果显示(表 4),西溪湿地大型底栖动物总生物量在 3 个区域间存在显著差异,I 区的生物量显著高于 II 区和 III 区。环节动物、软体动物和摇蚊幼虫三大类群的生物量在 3 个区域间差异也均显著,其中环节动物和摇蚊幼

虫生物量的季节变异大,且季节与地点间存在交互作用(表 4)。软体动物生物量仅受采样区域的影响,Ⅰ区的软体动物生物量显著大于Ⅱ区和Ⅲ区。

表 4 西溪湿地大型大型底栖动物各类群生物量(g/m^2)以及双因子方差分析

Table 4 Biomass (g/m^2) of macrobenthos in Xixi Wetland and summary of two-way ANOVA for testing the effects of sampling site and season

样区 Area	季节 Season	环节动物 Annelida	软体动物 Mollusca	摇蚊幼虫 Chironomidae	其他 Others	合计 Total
Ⅰ区 Area I	春季	0.96±0.24	189.4±51.4	0.14±0.05		190.5±51.3
	夏季	0.66±0.22	148.8±51.5	0.06±0.04	0.16±0.16	149.7±51.5
	秋季	17.81±4.59	1395.7±839.1	0.88±0.37	1.44±1.00	1415.8±841.3
	冬季	1.10±0.27	289.8±91.0	0.30±0.24	0.68±0.58	291.9±91.1
Ⅱ区 Area II	春季	1.01±0.19	101.8±34.7	0.24±0.13	0.01±0.01	103.1±34.6
	夏季	0.25±0.03	92.0±32.1	0.08±0.04	0.89±0.59	93.2±32.1
	秋季	1.35±0.36	142.2±45.2	0.12±0.05	0.25±0.13	143.9±45.2
	冬季	0.89±0.23	89.6±27.7	2.67±0.85	0.50±0.33	93.7±27.8
Ⅲ区 Area III	春季	1.01±0.29	158.1±64.4	0.45±0.31		159.6±64.1
	夏季	1.08±0.26	93.1±53.4	0.03±0.02	0.10±0.06	94.3±53.5
	秋季	0.84±0.36	35.0±30.7	0.01±0.00	0.17±0.17	36.0±30.9
	冬季	9.65±8.72	48.9±30.2	0.12±0.11	0.52±0.52	59.2±28.3
双因子方差分析(p 值) Two-way ANOVA (p-value)						
样区 ($df=2$) Area		0.024	0.030	0.038	0.525	0.029
季节 ($df=3$) Season		0.007	0.152	0.008	0.304	0.145
样区 × 季节 ($df=6$) Area × Season		0.000	0.081	0.000	0.430	0.073

黑体字表示存在差异显著($P < 0.05$)

2.4 大型底栖动物物种多样性

西溪湿地大型底栖动物种类数(S)、Margalef 物种丰富度指数(d_M)和 Shannon-Wiener 多样性指数(H')在不同区域间差异均显著($S: F_{2,93} = 9.8, P = 0.014$; $d_M: F_{2,93} = 12.9, P = 0.005$; $H': F_{2,93} = 13.290, P < 0.01$),而季节间差异不显著($F_{3,93} < 1.28, P > 0.05$)。西溪湿地 3 个工程建设区中,Ⅰ区种类数显著大于Ⅱ区和Ⅲ区。Margalef 物种丰富度指数(d_M)和 Shannon-Wiener 多样性指数(H')的大小顺序均为Ⅰ区 > Ⅱ区 > Ⅲ区,其中Ⅰ区显著大于Ⅱ区和Ⅲ区(图 3)。

2.5 大型底栖动物群落结构和稳定性

大型底栖动物群落的双因子交叉相似性分析(two-way crossed ANOSIM)(表 5)显示区域($R = 0.205, P = 0.001$)和季节($R = 0.185, P = 0.001$)均对大型底栖动物群落结构存在极显著影响。通过 SIMPER 分析得到造成各区域各季节大型底栖动物群落结构差异的主要贡献物种。结果显示,多毛管水蚓、梨形环棱螺、苏氏尾鳃蚓和羽摇蚊是导致区域间大型底栖动物群落结构差异的主要贡献物种,而导致季节间差异的物种也主要为多毛管水蚓、梨形环棱螺。

西溪湿地各区域各季节的 ABC 曲线如图 4 所示。就季节来看,春、夏、秋、冬四个季节 ABC 曲线均出现明显的翻转和交叉,表明西溪湿地大型底栖动物群落均受到一定程度的干扰,其中冬季群落稳定性相对最好($W = 0.019$),夏季群落稳定性最差($W = 0.054$)。在西溪湿地 3 个区域中,Ⅰ区群落稳定性最好,所受的干扰最小,其次是Ⅱ区,Ⅲ区群落稳定性最差。

2.6 大型底栖动物群落与环境因子的关系

大型底栖动物与环境因子的相关分析结果见表 6。结果显示,大型底栖动物生物量与底泥总磷含量呈显著正相关关系,物种数、物种丰富度、Shannon-Wiener 多样性指数与水深呈显著负相关,而大型底栖动物的密度与 6 种环境因子的相关关系均不显著。

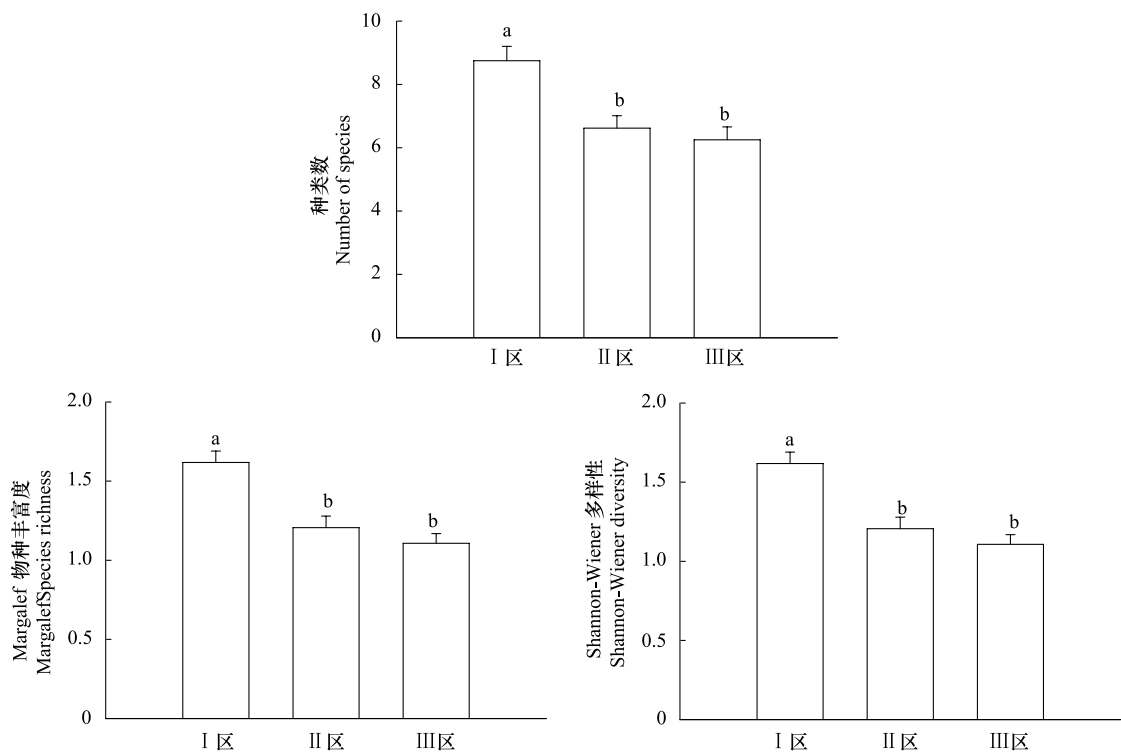


图3 各区域大型底栖动物多样性指数
Fig.3 Diversity indices in different areas

表5 西溪湿地大型底栖动物群落结构的双因子(地点×季节)交叉相似性分析及地点之间和季节之间大型底栖动物群落结构相似性的两两比较

Table 5 Two-way crossed ANOSIM for testing the site and season on macrobenthic communities in Xixi Wetland, and the differences in macrobenthic communities between sites and between seasons

	总差异 Global test <i>R</i>	组间差异 Pairwise test <i>R</i>	显著性水平 <i>P</i> value	主要贡献物种 Main contribute species
样区 Area	0.205		0.001	
I 区和 II 区 Area I and II		0.27	0.001	多毛管水蚓; 梨形环棱螺; 苏氏尾鳃蚓 <i>A. pluriseta</i> ; <i>B. purificata</i> ; <i>B. sowerbyi</i>
I 区和 III 区 Area II and III		0.133	0.016	多毛管水蚓; 梨形环棱螺; 羽摇蚊 <i>A. pluriseta</i> ; <i>B. purificata</i> ; <i>Chironomus</i> sp.
II 区和 III 区 Area II and III		0.172	0.007	多毛管水蚓; 苏氏尾鳃蚓; 羽摇蚊 <i>A. pluriseta</i> ; <i>B. sowerbyi</i> ; <i>Chironomus</i> sp.
季节 Season	0.185		0.001	
春季+夏季		0.105	0.033	多毛管水蚓; 梨形环棱螺; 铜锈环棱螺 <i>A. pluriseta</i> ; <i>B. purificata</i> ; <i>B. aeruginosa</i>
春季+秋季		0.132	0.010	多毛管水蚓; 梨形环棱螺; 苏氏尾鳃蚓 <i>A. pluriseta</i> ; <i>B. purificata</i> ; <i>B. sowerbyi</i>
春季+冬季		0.118	0.022	多毛管水蚓; 梨形环棱螺; 裸须摇蚊 <i>A. pluriseta</i> ; <i>B. purificata</i> ; <i>Procladius</i> sp.
夏季+秋季		0.238	0.001	多毛管水蚓; 参差仙女虫; 苏氏尾鳃蚓 <i>A. pluriseta</i> ; <i>N. variabilis</i> ; <i>B. sowerbyi</i>
夏季+冬季		0.276	0.001	多毛管水蚓; 梨形环棱螺; 裸须摇蚊 <i>A. pluriseta</i> ; <i>B. purificata</i> ; <i>Procladius</i> sp.
秋季+冬季		0.25	0.001	多毛管水蚓; 梨形环棱螺; 苏氏尾鳃蚓 <i>A. pluriseta</i> ; <i>B. purificata</i> ; <i>B. sowerbyi</i>

黑体字表示存在显著差异($P < 0.05$)

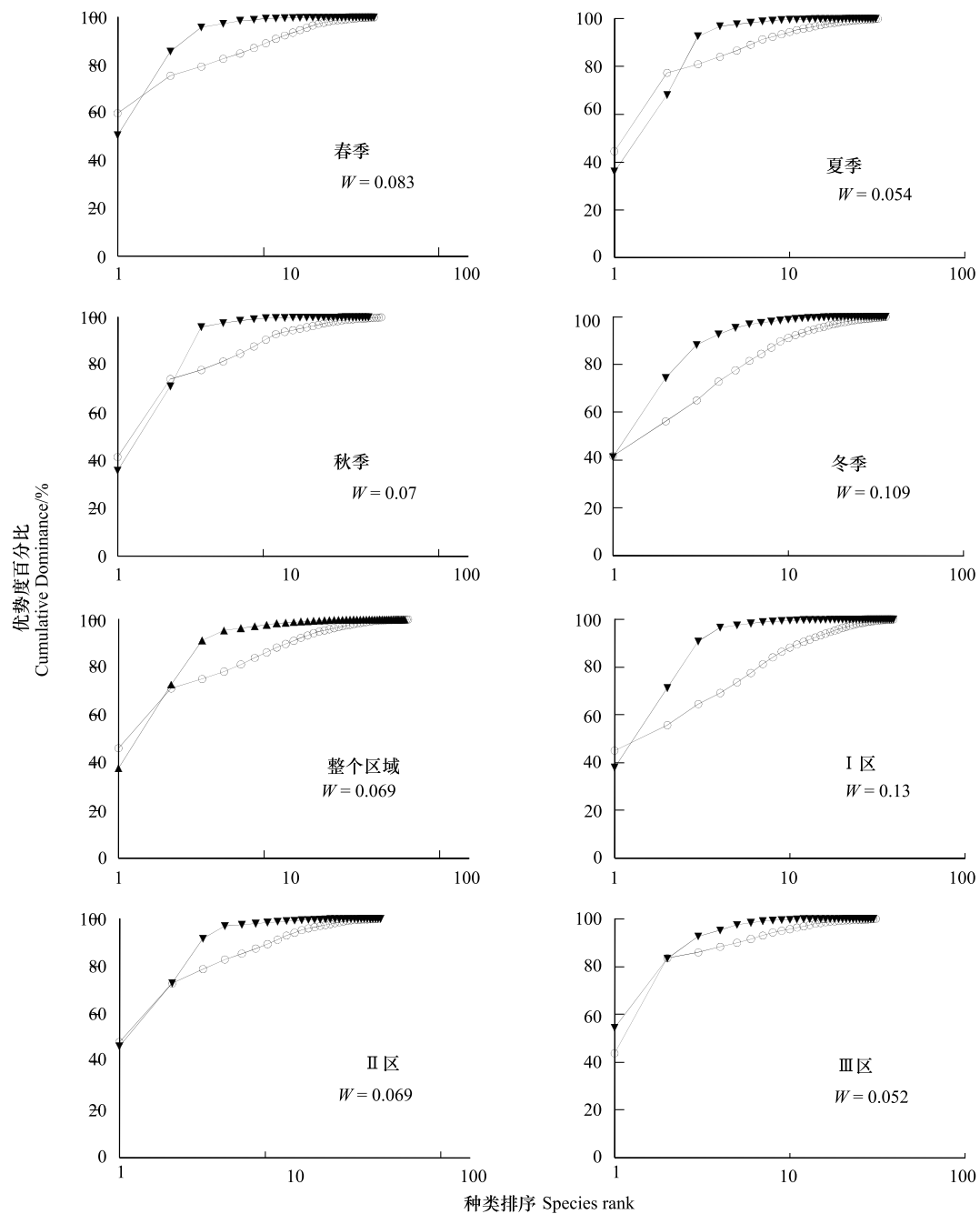


图4 西溪湿地大型底栖动物群落 ABC 曲线

Fig.4 ABC curves of macrobenthic communities of Xixi Wetland

表6 大型底栖动物群落多样性与环境因子的相关系数

Table 6 Pearson correlation between diversity indices of macrobenthos and environmental factors

	密度 Density	生物量 Biomass	物种数 No. of species	Margalef 物种丰富度 Species richness	Shannon-Wiener 多样性 Shannon-Wiener diversity
水温 Temperature	0.188	-0.110	0.034	-0.021	-0.170
水深 Depth	0.091	0.131	-0.209 *	-0.220 *	-0.202 *
pH	-0.106	-0.082	-0.071	-0.033	0.064
溶解氧 Dissolved oxygen	-0.137	-0.105	-0.010	-0.004	0.003
总氮 Total nitrogen	0.024	0.025	0.165	0.160	0.088
总磷 Total phosphorus	-0.004	0.211 *	0.148	0.161	0.161

* 表示 $P < 0.05$

BIO-ENV 分析显示(表 7),在本研究中无论是单个环境因子,还是环境因子组合,其与大型底栖动物群落的相关系数都比较低($\text{coefficients} < 0.258$)。从单个因子与大型底栖动物群落的相关系数可以发现,春季和夏季影响大型底栖动物群落结构的主要因子是水温;秋季和冬季影响大型底栖动物群落结构的主要因子为水深。多个环境因子的组合与大型底栖动物群落结构的相关性通常高于单个环境因子,底泥总磷对解释春季、秋季、夏季或全年大型底栖动物群落结构均具有一定的作用。

表 7 大型底栖动物群落结构与环境因子组群及单个环境因子的相关系数

Table 7 Results from BIO-ENV analysis of macrobenthic communities and environmental variables

	单个环境因子 Single environmental factors		环境因子组合 Combination environmental factors	
	相关系数 Coefficients	环境因子 Environmental factors	相关系数 Coefficients	环境因子 Environmental factors
春季	0.257	水温	0.258	水温,总磷
夏季	0.166	水温	0.200	水温,水深
秋季	0.137	水深	0.160	水深、总氮和总磷
冬季	0.120	水深	0.142	溶解氧、水深和总磷
全年 Total year	0.115	水温	0.117	水温和总磷

3 讨论

3.1 西溪湿地在 3 个不同时期保护工程建设的区域大型底栖动物群落结构特征

本次调查共获大型底栖动物 45 种,其中环节动物、软体动物和摇蚊幼虫的种类数所占比例差别不大。西溪湿地大型底栖动物的优势种为霍甫水丝蚓、多毛管水蚓和梨形环棱螺,其中霍甫水丝蚓的密度在各个区域中差异不显著,而多毛管水蚓和梨形环棱螺的密度地点间差异显著。具体而言,多毛管水蚓密度表现为 I 区显著低于 II 区和 III 区,而梨形环棱螺的密度变化趋势则相反,为 I 区显著高于 II 区和 III 区,即多毛管水蚓的密度随着湿地保护时间的延长呈减少趋势,而梨形环棱螺密度的变化趋势则相反。这与吴杰等的研究结果相类似,他们的研究表明钱塘江引水工程运行 10a 后,西湖大型底栖动物群落发生改变,主要表现为梨形环棱螺的密度和生物量都有显著上升^[17]。在本研究中,SIMPER 分析表明西溪湿地不同的区域或季节间大型底栖动物群落结构均存在显著差异,且这些差异的主要贡献物种都为多毛管水蚓和梨形环棱螺,可见这两个优势物种对西溪湿地底栖环境变化反应敏感,可作为西溪湿地环境评价的指示物种。

生态恢复工程措施主要改变了所在水域的养分状况和底质等环境要素^[18],这是对湿地生态系统剧烈的干扰,同时随着保护措施的不断推进,水质和底泥环境不断改善,环节动物和摇蚊的密度会逐渐减少,而喜好栖息于石质和沙质环境的软体动物则逐渐增加^[17,19]。本研究显示,西溪湿地不同时期的工程区域间大型底栖动物主要类群的密度发生了很大的改变,表现为软体动物在 I 区的密度和生物量要显著高于 II 区的 III 区的密度;而 I 区环节动物密度在各季节均少于 II 区和 III 区。由此对比各个区域工程建设时间上的差异可以看出,随着西溪湿地生态恢复与保护工程的推进,使得其大型底栖动物的环节动物的密度比以往有所下降,而软体动物的密度则有上升的趋势。这与 Sparks 等^[19]的研究结果一致,他们的研究结果显示经过对美国密西西比河进行生态恢复后,其大型底栖动物的主要类群发生了变化,表现为软体动物的密度比以往有所提高,而环节动物的密度则有所下降。一般认为,环节动物中的颤蚓类和摇蚊幼虫等耐污种通常在营养水平高的水体成为优势种,而软体动物的数量会随着水体营养水平的升高有下降的趋势^[20]。本研究发现,工程建设较早的 I 区软体动物的密度显著大于工程建设较晚的 II 区和 III 区,而颤蚓科类群中优势种多毛管水蚓的密度在 I 区和 II 区显著小于 III 区。因此从大型底栖动物的主要类群的变化趋势可以看出,西溪湿地通过保护工程建设后使得其水质环境得到了一定的改善。

分析大型底栖动物群落多样性常用指数为 Margalef 指数(d_M)和 Shannon-Wiener 指数(H')^[21-22]。本研究中 3 个工程区 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数在各个工程区间存在差异显著,两种指数均表现为 I 区 >

Ⅱ区 > Ⅲ区,表明两种多样性指数随着保护工程建设历史的延长呈增大的趋势。杜飞雁等^[23]在对大亚湾西北部海域的大型底栖动物群落进行调查,研究表明通过对大亚湾西北部进行疏浚工程后,短期内大型底栖动物多样性水平有显著的下降。戴雅奇等^[24]对疏浚后苏州河底栖动物恢复进行了研究,发现疏浚后,黄渡断面大型底栖动物多样性大幅度下降,但随后几个月后,多样性指数显著上升。本研究采样时西溪湿地Ⅲ区刚刚完成清淤疏浚,经剧烈干扰后大型底栖动物恢复的时间较短,而保护工程实施时间较长的Ⅰ区,底质生态修复时间较长,底栖动物多样性水平可能增加,因此,不排除恢复工程的扰动也可能是造成西溪湿地不同区域的多样性差异的重要因素之一。对西溪湿地大型底栖动物群落的 ABC 曲线进行分析,也表明各个区域均受到明显的扰动,通过对比各群落丰度和生物量曲线之间的距离,发现Ⅰ区群落稳定性最高,受干扰程度最小,其次是Ⅱ区和Ⅲ区。因此可以看出,西溪湿地通过保护工程建设后,其大型底栖动物群落稳定性有上升的趋势。各季节的 ABC 曲线显示西溪湿地大型底栖动物群落均存在一定的干扰,具体而言,冬季底栖动物群落稳定性要好于春夏秋,可能是由于在春季和夏季,随着水温的逐渐升高,大型底栖动物处于繁殖和快速增长阶段,群落结构的波动较大,从而导致群落稳定性较差。湿地生态环境保护工程是对湿地生态进行了修复和改善,但同时也会带来一定的人为干扰。杭州和睦湿地位于西溪湿地西面,且两者仅以一条高速公路相隔,至今未进行生态保护工程措施。对比和睦湿地大型底栖动物的数据(待另文发表),发现西溪湿地3个工程区与和睦湿地的 Margalef 指数和 Shannon-Wiener 指数在各个区域中均存在差异显著,3种指数均表现为Ⅰ区较大,Ⅱ区次之,Ⅲ区与和睦湿地较小,表明西溪湿地经过保护工程和随着时间的推移,底栖动物3种多样性指数均呈增大的趋势。对比西溪湿地与和睦湿地大型底栖动物群落的 ABC 曲线进行分析,结果显示Ⅰ区群落稳定性最高,受干扰程度最小,其次是和睦湿地,Ⅱ区和Ⅲ区稳定性较差。因此可以看出,西溪湿地通过保护工程建设后,其大型底栖动物群落稳定性是先表现一定的下降,随后出现上升的趋势。因此,西溪湿地生态保护工程短期内降低了底栖动物群落稳定性,对底栖动物群落产生了一定的人为干扰,但随着时间的推移,底栖动物的恢复表现出越来越好的趋势。综上可知,保护工程建设较早的Ⅰ区的底栖动物多样性和稳定性均显著高于未进行保护工程建设的和睦湿地,这是在生态保护工程扰动的基础上通过人工演替而实现的结果,是杭州西溪湿地生态保护工程的长期成效的体现。

3.2 西溪湿地大型底栖动物与环境因子的关系

许多研究表明,不同季节影响大型底栖动物分布的环境因子存在显著差异^[25-26],本研究也印证了这一点,通过 BIO-ENV 分析结果发现,环境因子对大型底栖动物群落结构是随季节变化而变化的,其中春季和夏季影响大型底栖动物群落结构的主要因子是水温;秋季和冬季影响大型底栖动物群落结构的主要因子为水深。春季和夏季,随着水温的逐渐升高,大型底栖动物开始繁殖,其个体数和生物量也随之增加,因此水温是影响春季和夏季大型底栖动物分布的主要环境因子;秋季和冬季,影响大型底栖动物群落结构的主要影响因素是水深,而水深对于大型底栖动物的种类组成和分布格局有很大的影响,随着水体深度的增加,大型底栖动物的密度和种类数会通常减少^[27],因此,水深是影响秋季和冬季大型底栖动物分布的主要因子。但环境因子对底栖动物的影响是一个十分复杂的问题,表现为不仅环境因子众多,而且各个环境因子对底栖动物的影响也不完全一致。廖一波等^[28]在对三门湾大型底栖动物时空分布与环境因子的关系进行研究,提出将大型底栖动物的环境因子分成物理因素、富营养化因素和底质类型等因素。在本研究中主要检测了水体理化因素和底泥营养状况与大型底栖动物的关系,因此要深刻理解大型底栖动物的关键因素,则需要对大型底栖动物的环境因子进行全面的分析,有待进一步研究。

致谢:感谢安徽师范大学邵美玲博士、南京农业大学王备新教授在物种分类鉴定方面给予的帮助。

References:

- [1] Mitsch W J, Gosselink J G. Wetlands. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986.
- [2] Wang J H, Lu X G. Urban wetland: Its concept, ecological services and protection. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(4): 555-560.
- [3] Cao X X, Zhai Q M, Guo Z Y. Ecosystem Services of Urban Wetland and Its Conservation. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12

- (1): 145-148.
- [4] Wheeler B D. Introduction: Restoration and wetland. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1995, 1-18.
- [5] Wu M, Shao X X, Jiang K Y. Characteristics and assessment on nutrient distribution in water and sediments of Xixi National Wetland Park in Hangzhou. *Forest Research*, 2008, 21(4): 587-591.
- [6] Brown S C, Smith K, Batzer D. Macroinvertebrate responses to wetland restoration in northern New York. *Environmental Entomology*, 1997, 26(5): 1016-1024.
- [7] Pedersen M L, Friberg N, Skriver J, Baattrup-Pedersen A, Larsen S E. Restoration of Skjern River and its valley-Short-term effects on river habitats, macrophytes and macroinvertebrates. *Ecological Engineering*, 2007, 30(2): 145-156.
- [8] Rosenberg D M, Resh V H. Introduction to freshwater biomonitoring and benthic macroinvertebrates. Chapman And Hall, New York (USA)., 1993: 1-9.
- [9] Borcherdig J, Sturm W. The Seasonal Succession of Macroinvertebrates, in Particular the Zebra Mussel (*Dreissena polymorpha*), in the River Rhine and Two Neighbouring Gravel-Pit Lakes Monitored Using Artificial Substrates. *International Review of Hydrobiology*, 2002, 87(2/3): 165-181.
- [10] Giovanni M V, Goretti E, Tamanti V. Macrobenthos in Montedoglio Reservoir, central Italy. *Hydrobiologia*, 1996, 321(1): 17-28.
- [11] Crawford O, Degraer S, Mallefet J, Zintzen V. Macrobenthos of shipwrecks within and around the Belgian waters as a potential food resource for fish populations. *Biodiversity of shipwrecks from the Southern Bight of the North Sea*. pp, 2007, 269-281.
- [12] Liu M Q, Yu H X. The Community Structure of Zoobenthos in Anbang River Wetland Reserves. *Chinese Journal of Fisheries*, 2009, 22(2): 34-39.
- [13] Zhou X, Ge Z M, Shi W Y, Wang T H, Cao D, Zhou L C. Seasonal fluctuation of macrobenthos community in Jiuduansha intertidal wetland of Yangtze River Estuary. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(11): 2079-2083.
- [14] Chen Y Q, Xu Z L, Wang Y L, Hu F X, Hu H, Gu G C. An ecological study on zooplankton in plume front zone of Changjiang (Yangtze) River estuarine area I. biomass and distribution of dominant species. *Journal of fishery sciences of China*, 1995, 2(1): 49-58.
- [15] Clarke K R, Warwick R M. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. Natural Environment Research Council. United Kingdom, 1994.
- [16] Warwick R M. A new method for detecting pollution effects on marine macrobenthic communities. *Marine Biology*, 1986, 92(4): 557-562.
- [17] Wu J, Wang R Y, Jian Y, Yu Z M, Shen X D. Macrozoobenthos communities of West Lake after drawing fresh water from Qiantang River. *Environmental Pollution and Control*, 1999, 21(5): 25-29.
- [18] Galdean N, Callisto M, Barbosa F A R, Rocha L A. Lotic ecosystems of Serra do Cipo, Southeast Brazil: water quality and a tentative classification based on the benthic macroinvertebrate community. *Journal of Aquatic Ecosystem Health & Restoration*, 2000, 3: 545-552.
- [19] Sparks R. The upper Mississippi river: Restoration of aquatic ecosystems. Nat. Acad. Press, Washington, D, C, 1992: 406-411.
- [20] James R T, David D H, Donald F C, Timothy L N, Diane M W. Effects of removal of a small dam on downstream macroinvertebrate and algal assemblages in a Pennsylvania stream. *Journal of the North American Benthological Society*, 2005, 24: 192-207.
- [21] Chainho P, Costa J L, Chaves M L, Dauer D M, Costa M J. Influence of seasonal variability in benthic invertebrate community structure on the use of biotic indices to assess the ecological status of a Portuguese estuary. *Marine Pollution Bulletin*, 2007, 54: 1586-1597.
- [22] Specchiulli A, Renzi M, Scirocco T, Cilenti L, Florio M, Breber P, Focardi S, Bastianoni S. Comparative study based on sediment characteristics and macrobenthic communities in two Italian lagoons. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 160: 237-256.
- [23] Du F Y, Lin Q, Jia X P, Yang S Y, Ma S W, Chen H G, Li C H. Analysis on the characteristics of macrobenthic community in the North-west Daya Bay of South China Bay in spring. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7075-7085.
- [24] Dai Y Q, Xiong Y Q, You W H. The impacts of dredging on the community structure of the micro-invertebrate in Suzhou Creek. *Journal of East China Normal University (Natural Science)* 2003, 9(3): 83-87.
- [25] Jiang W X, Jia X H, Zhou S C, Li F Q, Tang T, Cai Q H. Seasonal dynamics of macrozoobenthos community structure in Xiangxi River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(4): 923-928.
- [26] Shou L, Zeng J N, Liao Y B, Zhao Y Q, Jiang Z B, Chen Q Z, Gao A G, Yang J X. Seasonal distribution of macrozoobenthos and its relations to environmental factors in Oujiang River estuary sea area, *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1958-1964.
- [27] Horne A J, Goldman C R. *Limnology*. Second Edition. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [28] Liao Y B, Shou L, Zeng J N, Gao A G. Spatiotemporal distribution of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in

Sanmen Bay. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(9): 2424-2430.

参考文献:

- [2] 王建华, 吕宪国. 城市湿地概念和功能及中国城市湿地保护. 生态学杂志, 2007, 26(4): 555-560.
- [3] 曹新向, 翟秋敏, 郭志永. 城市湿地生态系统服务功能及其保护. 水土保持研究, 2005, 12(1): 145-148.
- [5] 吴明, 邵学新, 蒋科毅. 西溪湿地公园水体和底泥 N、P 营养盐分布特征及评价. 林业科学研究, 2008, 21(4): 587-591.
- [12] 刘茂奇, 于洪贤. 安邦河湿地自然保护区秋季底栖动物群落结构研究及生物学评价. 水产学杂志, 2009, 22(2): 34-39.
- [13] 周晓, 葛振鸣, 施文彧, 王天厚, 曹丹, 周立晨. 长江口九段沙湿地大型底栖动物群落结构的季节变化规律. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2079-2083.
- [14] 陈亚瞿, 徐兆礼, 王云龙, 湖方西, 湖辉, 谷国传. 长江口河口峰区浮游动物生态研究 I. 生物量及优势种的平面分布. 中国水产科学, 1995, 2(1): 49-58.
- [17] 吴洁, 王锐俞, 剑莹, 虞左明, 沈小东. 西湖引水治理后的底栖动物群落. 环境污染与治理, 1999, 21(5): 25-29.
- [23] 杜飞雁, 林钦, 贾晓平, 杨圣云, 马胜伟, 陈海刚, 李纯厚. 大亚湾西北部春季大型底栖动物群落特征. 生态学报, 2011, 31(23): 7075-7085.
- [24] 戴雅奇, 熊昀青, 由文辉. 疏浚对苏州河底栖动物群落结构的影响. 华东师范大学学报(自然科学版), 2003, 9(3): 83-87.
- [25] 蒋万祥, 贾兴焕, 周淑婵, 李凤清, 唐涛, 蔡庆华. 香溪河大型底栖动物群落结构季节动态. 应用生态学报, 2009, 20(4): 923-928.
- [26] 寿鹿, 曾江宁, 廖一波, 赵永强, 江志兵, 陈全震, 高爱根, 杨家新. 瓯江口海域大型底栖动物分布及其与环境的关系. 应用生态学报, 2009, 20(8): 1958-1964.
- [28] 廖一波, 寿鹿, 曾江宁, 高爱根. 三门湾大型底栖动物时空分布及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2424-2430.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 9 May, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Analysis of subject trends in research on sustainable development CHA Na, WU Jianguo, YU Runbing (2637)
- Metabolic scaling theory and its application in microbial ecology HE Jizheng, CAO Peng, ZHENG Yuanming (2645)
- Research progress on endophyte-promoted plant nitrogen assimilation and metabolism
..... YANG Bo, CHEN Yan, LI Xia, et al (2656)
- Review on the development of landscape architecture ecology in China YU Yijing, MA Jinyi, YUAN Yunjue (2665)

Autecology & Fundamentals

- Evaluating tillage practices impacts on soil organic carbon based on least limiting water range
..... CHEN Xuewen, WANG Nong, SHI Xiuhuan, et al (2676)
- Controls over soil organic carbon content in grasslands TAO Zhen, CI Dan Langjie, ZHANG Shenghua, et al (2684)
- Antagonistic interactive effects of exogenous calcium ions and parasitic *Cuscuta australis* on the morphology and structure of
Alternanthera philoxeroides stems CHE Xiuxia, CHEN Huiping, YAN Qiaodi, et al (2695)
- Correlation between pigment content and reflectance spectrum of *Phyllostachys pubescens* stems during its rapid growth stage
..... LIU Lin, WANG Yukui, WANG Xingxing, et al (2703)
- Response of leaf functional traits and the relationships among them to altitude of *Salix dissa* in Balang Mountain
..... FENG QiuHong, CHENG Ruimei, SHI Zuomin, et al (2712)
- Effects of phosphate and organic matter applications on arsenic uptake by and translocation in *Isatis indigotica*
..... GAO Ningda, GENG Liping, ZHAO Quanli, et al (2719)
- Effect of different preys on the predation and prey preference of *Orius similis* ... ZHANG Changrong, ZHI Junrui, MO Lifeng (2728)
- Effects of predation risk on the patterns of functional responses in reed vole foraging
..... TAO Shuanglun, YANG Xifu, YAO Xiaoyan, et al (2734)
- Phylogenetic analysis of Veneridae (Mollusca: Bivalvia) based on the mitochondrial cytochrome c oxidase subunit I gene fragment ...
..... CHENG Hanliang, PENG Yongxing, DONG Zhiguo, et al (2744)
- Effects of different ecological environments in the laboratory on the covering behavior of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis*
..... CHANG Yaqing, LI Yunxia, LUO Shibin, et al (2754)

Population, Community and Ecosystem

- The ecosystem services value change in the upper reaches of Ganjiang River Based on RS and GIS
..... CHEN Meiqiu, ZHAO Baoping, LUO Zhijun, et al (2761)
- The reference condition for Eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — response variables
..... ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, LIU Lusan, et al (2768)
- The reference condition for eutrophication Indicator in the Yangtze River Estuary and adjacent waters — Causal Variables
..... ZHENG Binghui, ZHOU Juan, LIU Lusan, et al (2780)
- The stress response of biological communities in China's Yalu River Estuary and neighboring waters
..... SONG Lun, WANG Nianbin, YANG Guojun, et al (2790)
- Ecological characteristics of macrobenthic communities and its relationships with environmental factors in Hangzhou Xixi Wetland
..... LU Qiang, CHEN Huili, SHAO Xiaoyang, et al (2803)
- Effects of biological soil crusts on desert soil nematode communities LIU Yanmei, LI Xinrong, ZHAO Xin, et al (2816)
- Associations between weather factors and the spring migration of the horned gall aphid, *Schlechtendalia chinensis*
..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (2825)
- Effects of vegetation on soil aggregate stability and organic carbon sequestration in the Ningxia Loess Hilly Region of northwest
China CHENG Man, ZHU Qiulian, LIU Lei, et al (2835)

- Simulation of the carbon cycle of *Larix chinensis* forest during 1958 and 2008 at Taibai Mountain, China LI Liang, HE Xiaojun, HU Lile, et al (2845)
- Effects of different disturbances on diversity and biomass of communities in the typical steppe of loess region CHEN Furong, CHENG Jimin, LIU Wei, et al (2856)
- Age structure and point pattern of *Butula platyphylla* in Wulashan Natural Reserve of Inner Mongolia HU Ercha, WANG Xiaojiang, ZHANG Wenjun, et al (2867)
- The impacts of the Southwest China drought on the litterfall and leaf area index of an evergreen broadleaf forest on Ailao Mountain ... QI Jinhua, ZHANG Yongjiang, ZHANG Yiping, et al (2877)
- Spatial distribution of tree species richness in Xiaodonggou forest region of the Altai Mountains, Northwest China JING Xuehui, CAO Lei, ZANG Runguo (2886)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- The ecological risk assessment of Taihu Lake watershed XU Yan, GAO Junfeng, GUO Jianke (2896)
- The value of fixing carbon and releasing oxygen in the Guanzhong-Tianshui economic region using GIS ZHOU Zixiang, LI Jing, FENG Xueming (2907)
- Resource and Industrial Ecology**
- Effect of different controlled-release nitrogen fertilizers on availability of heavy metals in contaminated red soils under waterlogged conditions LIANG Peijun, XU Chao, WU Qitang, et al (2919)
- Research Notes**
- Effect of heat and high irradiation stress on Deg1 protease and D1 protein in wheat chloroplasts and the regulating role of salicylic acid ZHENG Jingjing, ZHAO Huijie, HU Weiwei, et al (2930)
- The difference of drought impacts on winter wheat leaf area index under different CO₂ concentration LI Xiaohan, WU Jianjun, LÜ Aifeng, et al (2936)

《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,探索自然奥秘,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 欧阳志云

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 9 期 (2013 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 9 (May, 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	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
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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