

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第34卷 第10期 Vol.34 No.10 **2014**

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 34 卷 第 10 期      2014 年 5 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 景观可持续性与景观可持续性科学..... 赵文武,房学宁 (2453)
- 生态系统服务付费的诊断框架及案例剖析 ..... 朱文博,王 阳,李双成 (2460)
- 湿地植物根表铁膜研究进展..... 刘春英,陈春丽,弓晓峰,等 (2470)
- 水生生态环境中捕食信息素的生态学效应..... 覃光球,卢豪良,唐振柱,等 (2481)
- 脊椎动物传播植物肉质果中的次生物质及其生态作用 ..... 潘 扬,罗 芳,鲁长虎 (2490)

### 个体与基础生态

- 中亚热带天然林土壤 CH<sub>4</sub>吸收速率对模拟 N 沉降的响应 ..... 陈朝琪,杨智杰,刘小飞,等 (2498)
- 塔里木盆地南缘早生芦苇生态特征与水盐因子关系..... 贡 璐,朱美玲,塔西甫拉提·特依拜,等 (2509)
- 黄刺玫叶片光合生理参数的土壤水分阈值响应及其生产力分级..... 张淑勇,夏江宝,张光灿,等 (2519)
- 亚热带杉木和米老排人工林土壤呼吸对凋落物去除和交换的响应..... 余再鹏,万晓华,胡振宏,等 (2529)
- 施钾提高蚜害诱导的小麦茉莉酸含量和叶片相关防御酶活性..... 王 祎,张月玲,苏建伟,等 (2539)
- 高浓度 O<sub>3</sub>及太阳辐射减弱对冬小麦 PS II 光合活性及光能耗散的影响 .....  
..... 孙 健,郑有飞,吴荣军,等 (2548)
- 蜡样芽孢杆菌 B3-7 在大田小麦根部的定殖动态及其对小麦纹枯病的防治效果 .....  
..... 黄秋斌,张 颖,刘凤英,等 (2559)
- 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究..... 张兴娟,薛绪掌,郭文忠,等 (2567)
- 抗真菌转基因水稻生态适合度评价..... 李 伟,郭建夫,袁红旭,等 (2581)
- 花生叶片蛋白组对 UV-B 辐射增强的响应 ..... 杜照奎,李钧敏,钟章成,等 (2589)
- 南海南部悬浮颗粒物脂肪酸组成..... 刘华雪,柯常亮,李纯厚,等 (2599)
- 年龄、集群、生境及天气对鄱阳湖白鹤越冬期日间行为模式的影响..... 袁芳凯,李言阔,李凤山,等 (2608)
- [树]麻雀羽再生的能量预算和水代谢散热调节 ..... 杨志宏,吴庆明,杨 渺,等 (2617)
- 低剂量杀虫剂对星豹蛛捕食效应的影响及其机理 ..... 李 锐,李 娜,刘 佳,等 (2629)
- 空心莲子草叶甲对越冬保护的响应与控害效能..... 刘雨芳,王秀秀,李 菲,等 (2638)
- ### 种群、群落和生态系统
- 气候变化对鄱阳湖白鹤越冬种群数量变化的影响..... 李言阔,钱法文,单继红,等 (2645)
- 不同退耕年限下菜子湖湿地土壤磷素组分特征变化..... 刘文静,张平究,董国政,等 (2654)

查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析 .....	李然然,章光新,张 蕾 (2663)
闽江河口区淡水和半咸水潮汐沼泽湿地土壤产甲烷菌多样性.....	曾志华,杨民和,余晨兴,等 (2674)
环境及遗传背景对延河流域植物叶片和细根功能性状变异的影响.....	郑 颖,温仲明,宋 光,等 (2682)
衡阳紫色土丘陵坡地植被恢复阶段土壤特性的演变.....	杨 宁,邹冬生,杨满元,等 (2693)
海平面上升影响下广西钦州湾红树林脆弱性评价.....	李莎莎,孟宪伟,葛振鸣,等 (2702)
中国南方3种主要人工林生物量和生产力的动态变化.....	杜 虎,曾馥平,王克林,等 (2712)
杉木人工林土壤真菌遗传多样性.....	何苑曦,周国英,王圣洁,等 (2725)
科尔沁固定沙地植被特征对降雨变化的响应.....	张腊梅,刘新平,赵学勇,等 (2737)
黄土丘陵区退耕还林地刺槐人工林碳储量及分配规律.....	申家朋,张文辉 (2746)

### 景观、区域和全球生态

南亚热带森林演替过程中小气候的改变及对气候变化的响应.....	刘效东,周国逸,陈修治,等 (2755)
黄淮海平原典型站点冬小麦生育阶段的干旱特征及气候趋势的影响.....	徐建文,居 辉,刘 勤,等 (2765)

### 资源与产业生态

基于GIS的山西省矿产资源规划环境影响评价 .....	刘 伟,杜培军,李永峰 (2775)
基于效益分摊的水电水足迹计算方法——以密云水库为例 .....	赵丹丹,刘俊国,赵 旭 (2787)

### 学术信息与动态

全球土地计划第二次开放科学大会 (GLP 2 <sup>nd</sup> Open Science Meeting) 会议述评 .....	段宝玲,卜玉山 (2796)
---	----------------

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 348 \* zh \* P \* ¥ 90.00 \* 1510 \* 36 \* 2014-05



**封面图说:** 鄱阳湖越冬的白鹤群——白鹤为国家一级保护动物,世界上白鹤东部种群的迁徙路线是从俄罗斯西伯利亚的雅库特,向南迁飞 5100km 到中国长江下游的鄱阳湖越冬,其中途经俄罗斯的雅纳河、印迪吉尔卡河和科雷马河流域,进入中国后主要停歇地有扎龙、林甸、莫莫格以及双台河口、滦河口、黄河三角洲和升金湖等地。多年的监测表明,世界 90% 以上的白鹤种群都在鄱阳湖越冬。越冬初期和末期是白鹤补充能量的关键阶段,因此,研究鄱阳湖国家级自然保护区越冬白鹤种群数量和当地气候变化的相关性具有重要意义。

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/stxb201306091545

李然然, 章光新, 张蕾. 查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析. 生态学报, 2014, 34(10): 2663-2673.

Li R R, Zhang G X, Zhang L. Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(10): 2663-2673.

## 查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析

李然然<sup>1,2</sup>, 章光新<sup>1,\*</sup>, 张蕾<sup>1</sup>

(1. 中国科学院湿地生态与环境重点实验室, 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 采用野外采样调查的方法, 结合聚类(Cluster)、多维排序尺度(MDS)、冗余度分析(RDA)以及 Shannon 多样性指数、Pielou 均匀度指数、Margalef 丰度指数等手段, 研究了查干湖湿地 2012 年平水期(5 月)和丰水期(9 月)浮游植物的种群结构特征、多样性及其与环境因子的相关性。调查期间共发现浮游植物 127 种, 隶属于 5 门 53 属, 其中硅藻门 52 种, 占 40.94%, 绿藻门 46 种, 占 36.22%; 蓝藻门 25 种, 占 19.69%。从浮游植物丰度看, 平水期蓝藻最为丰富(占丰度的 39.85%), 其次为硅藻(占 36.19%)和绿藻(占 21.33%), 而丰水期绿藻(占 70.84%)占绝对优势。查干湖湿地研究区可划分为主湖区和新庙泡两个区域, 浮游植物丰度时空差异显著; 其平均值为平水期( $658.0 \times 10^4$  个/L) > 丰水期( $459.3 \times 10^4$  个/L), 主湖区丰度是新庙泡的 8—10 倍。相关分析表明: 平水期和丰水期浮游植物丰度均与盐度呈显著正相关; 平水期浮游植物丰度与 pH 值、磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ )显著负相关, 说明平水期浮游植物丰度空间差异主要受盐度和营养盐的影响, 主湖区盐度(52.0 mg/L)是新庙泡(16.0 mg/L)的 3.3 倍, 同时主湖区的磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ )(0.045 mg/L)是新庙泡(0.012 mg/L)的 3.8 倍; 而丰水期由于营养盐没有显著差异, 浮游植物丰度空间差异主要受盐度影响。除野外调查结果外, 基于 Bray-Curtis 相似性计算的聚类和多维排序尺度分析也表明据研究区可划分为主湖区和新庙泡两个区域。RDA 显示: 影响查干湖湿地浮游植物分布的关键环境因子, 平水期是 pH 值、TN 和  $\text{BOD}_5$ , 丰水期是盐度、 $\text{PO}_4^{3-}$  和  $\text{BOD}_5$ 。平水期优势属喜低碱、低磷素、高氮素的生境, 而丰水期优势属则喜欢微碱性、高盐度、高磷素、高  $\text{BOD}_5$  的生境。调查期浮游植物优势种群为温带小型藻类, 能迅速吸收营养盐并进行繁殖生长, 在较高营养盐条件下可以形成较高的相对丰度。根据浮游植物生态指标对查干湖湿地水质污染程度进行现状评价表明查干湖湿地处于  $\beta$ -中度污染水平。

**关键词:** 环境因子; 浮游植物; 冗余分析; 查干湖湿地

## Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland

LI Ranran<sup>1,2</sup>, ZHANG Guangxin<sup>1,\*</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Wetland Ecology and Environment, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** This study investigated the biodiversity and community structures of phytoplankton and their relations with environmental factors in Chagan Lake during the intermediate (May) and rainy season (September) in 2012. Combining field investigations with cluster analysis, multi-dimensional scaling (MDS) analysis and redundancy analysis (RDA), and applying Shannon, Pielou and Margalef indices, the study identified a total of 127 phytoplankton species (belonging to 53 genera and 5 phyla). Among these species, 52 were members of *Bacillariophyta*, 46 *Chlorophyta*, and 25 *Cyanophyta*, accounting for 40.94%, 36.22%, and 19.69% of the total phytoplankton species, respectively. In terms of algal population

**基金项目:** 水利部公益性行业科研专项经费项目(201401014); 吉林省重点科技攻关项目(20130206012SF); 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-Q06-2)

收稿日期: 2013-06-09; 修订日期: 2014-04-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhgx@neigae.ac.cn

distribution, in the intermediate season *Cyanophyta* was the most abundant phylum of planktonic algae (accounting for 39.85% of algal population), followed by *Bacillariophyta* (36.193%) and *Chlorophyta* (21.33%), whereas in the rainy season *Chlorophyta* (70.84%) was the dominant phylum. Consisting of two connected parts (the main lake body and Xinmiao wetland), Chagan lake was found to sustain significant temporal-spatial variations of phytoplankton populations. The abundance of phytoplankton in the intermediate season (averaging  $658.0 \times 10^4$  cells/L) was considerably higher than that in the rainy season (averaging  $459.3 \times 10^4$  cells/L). In both seasons, phytoplankton abundance was found to be positively correlated with water salinity (i.e. greater salinity coinciding with higher phytoplankton populations), and negatively affected by pH and phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) concentration in the intermediate season. In either season, the abundance of phytoplankton in the main lake was 8–10 times of that in Xinmiao wetland. In the intermediate season, such discrepancy was caused by different salinity and nutrients in these two water bodies; salinity in the main lake (52.0 mg/L) was 3.3 times of that in Xinmiao wetland (16.0 mg/L), whilst  $\text{PO}_4^{3-}$  in the main lake (0.045 mg/L) was 3.8 times of its concentration in Xinmiao wetland. In the rainy season, there was no significant difference in nutrient levels in the whole lake, so water salinity was the main factors affecting the distribution of phytoplankton. In addition to field investigation results, cluster and MDS analyses based on Bray-Curtis measures of similarity also illustrated significant discrepancy between the main lake and Xinmiao wetland in terms of phytoplankton abundance. RDA results indicated that in the intermediate season the key environmental factors influencing the phytoplankton assemblages were pH, total nitrogen (TN) and phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), whereas salinity, phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) and 5-day biological oxygen demand ( $\text{BOD}_5$ ) were the key factors in the rainy season. In the intermediate season, dominant phytoplankton genera were those favoring low alkalinity, low phosphorus and high nitrogen levels. Rainy season benefitted genera that were more tolerant alkalinity, salinity, phosphorus and  $\text{BOD}_5$ . Most dominant genera indentified in this study were micro-phytoplankton, common in temperate climate and capable of rapid multiplying and fast growing through nutrient assimilation, could form a higher abundance in rich nutrients. When phytoplankton was used as a bio-indicator in water quality evaluation, the results revealed that water quality in Chagan Lake was in  $\beta$ -moderately-polluted category.

**Key Words:** environmental factors; phytoplankton; redundancy analysis; Chagan Lake wetland

查干湖国家级自然保护区是由湖泊、沼泽、沼泽化草甸等不同生态系统复合而成的、以浅水型湖泊为核心的典型草原湖泊湿地生态系统,是吉林省西部重要的生态屏障,也是吉林省重要的渔业基地和旅游区,发挥着调节气候、保护区域生物多样性、发展生态产业、维护区域生态平衡的重要功能。在全球气候变化和人类活动影响下查干湖湿地水环境发生了深刻变化,已面临农业面源污染、盐碱化、有机污染等严峻的生态环境问题<sup>[1-2]</sup>。目前,吉林省承担着增产百亿斤粮食的重任,主要途径之一开发盐碱荒地发展灌区,农田退水中的盐碱、N、P 污染物势必会对查干湖湿地水环境安全带来潜在风险。

浮游植物是水域生态系统的初级生产者,其种类组成和分布对环境变化具有指示作用,其生物量及群落结构的动态变化能很好地反映水环境现状及变化,浮游植物因为其多样性的时间和空间分布特征而被视为水环境的重要指示生物之一,反过来环境条件也能直接影响浮游植物的群落结构<sup>[3-5]</sup>。浮

游植物作为水环境特征的重要指示剂,已引起了世界范围内的研究和关注<sup>[6-7]</sup>,但查干湖湿地浮游植物与环境因子之间关系的研究还鲜有报道。本文首次较系统地调查分析了查干湖湿地浮游植物群落组成、丰度及其空间分布特征,应用冗余分析(RDA)探讨查干湖湿地浮游植物群落与环境因子间的关系,利用浮游植物生态指标评价其水质营养状态,为查干湖湿地水资源开发与水环境保护提供生物学依据。

## 1 实验设计及研究方法

### 1.1 研究区概况

查干湖湿地位于吉林省西部松原市内( $124^\circ 03' - 124^\circ 34' \text{E}$ ,  $45^\circ 05' - 45^\circ 30' \text{N}$ ),属半干旱温带大陆性季风气候,多年年均温  $4.5^\circ \text{C}$ ,多年年均降雨量为 415.4 mm,其中 6—9 月降雨量占全年的 80% 左右,多年年均蒸发量为 1400—2100 mm,平均水位 1.5 m。自然状态下,7—9 月为丰水期,10 月—次年

4 月为枯水期,5—6 月为平水期,生长季为 5—10 月。

## 1.2 样品采集

于 2012 年平水期 5 月和丰水期 9 月对查干湖湿地设置了 13 个采样点(图 1),由于新庙泡为芦苇沼泽,船无法驶入,故在引松灌渠进入新庙泡处-高家桥即点 3 和新庙泡与查干湖相连处-川头闸即点 1 设置取样点,另在庙东核心区即点 2 布设样点。在查干湖主湖区,沿新庙泡—查干湖—辛甸泡方向设定 3 条平行样带,间隔 5 km,在每条样带每隔 5 km 设置一个样点。浮游植物定性样品以 25 号浮游生物网(孔径 64  $\mu\text{m}$ )在水面下 0.3—0.5 m 处缓慢地做“ $\infty$ ”状拖取 3min 后将生物网中的水浓缩至 100 ml 保存,用 1—2 mL 鲁哥试液固定;定量样品使用采水器在表层采取 1 L 加 10—15 mL 鲁哥试剂固定,于实验室中经 48 h 沉淀后浓缩至 30 mL,加 4% 甲醛溶液保存以备镜检。

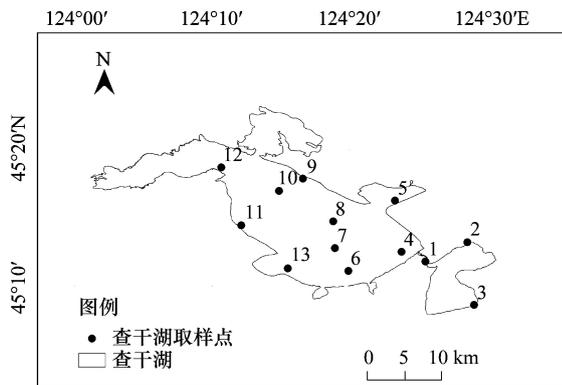


图 1 查干湖湿地采样点分布图

Fig.1 Sampling sites in Chagan Lake wetland

浮游植物种类鉴定依据联合国教科文组织推荐的《浮游植物手册》<sup>[8]</sup>和《中国淡水藻类——系统、分类及生态》<sup>[9]</sup>,硅藻种类的鉴定主要是以硅藻壳的形态及壳表面上的花纹为依据,需加酸煮沸去除其内含物后用蒸馏水洗净烤干,用安息香酸钠封片制成永久玻片观察;藻类计数采用 0.1 mL 计数框,在显微镜(Olympus CX21, 400x)下进行,每个样本重复计数 2 次,每次观察 100 个视野,取其平均值;藻类生物量采用细胞体积法推算,单细胞藻类的生物量主要根据藻类个体形状测量而得<sup>[10]</sup>。

在各采样点使用多参数水质分析测定仪(HI9828)现场测定溶解氧(DO)、pH 值、水温( $T$ )、总溶解性固体(TDS),并用采水器采集表层水样 1

L,带回实验室后依据《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)<sup>[11]</sup>,总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}$ )采用磷钼蓝法、高锰酸钾指数( $\text{COD}_{\text{Mn}}$ )采用高锰酸钾法、五日生化需氧量( $\text{BOD}_5$ )采用稀释与接种法测定。

## 1.3 数据处理和统计分析

浮游植物群落多样性指数采用 Shannon 多样性指数( $H'$ )、Margalef 丰富度指数( $D$ )、Pielou 均匀度指数( $J$ )和多样性阈值( $D_v$ )(公式 1—4)<sup>[12-13]</sup>描述,通过优势度(公式 5)确定样本的优势种群( $Y$ )。

$$H' = - \sum_{i=1}^S \frac{N_i}{N} \log_2 \frac{N_i}{N} \quad (1)$$

$$D = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (2)$$

$$J = \frac{H'}{\ln S} \quad (3)$$

$$D_v = H' \times J \quad (4)$$

$$Y = (N_i/N) \times f_i \quad (5)$$

式中, $N_i$ 为第  $i$  个种群的个数, $N$ 为同一样品中所有种群的总个数, $f_i$ 为第  $i$  种群的出现频率, $S$ 为样品中浮游植物种群类别总数。 $Y \geq 0.02$  为优势种群<sup>[14]</sup>。

利用 SPSS16.0 软件进行 Bray-Curtis 相似性聚类分析,并采用多维排序尺度(MDS)分析相结合分析浮游植物群落的空间分布。用 CANOCO4.5 软件分析浮游植物分布与环境因子的关系;对平水期和丰水期种群信息进行去趋势对应分析(DCA),排序轴梯度长度(LGA)分别为 0.867 和 1.651,均小于 3,适合用基于线性的冗余分析(RDA),相关显著性用 Monte Carlo 法进行检验。为使浮游植物的个体数和环境因子的数据获得正态分布,除 pH 值外均进行  $\lg(x+1)$  转换。由于环境因子之间可能存在较高的相关性,偏相关系数大于 0.8 和膨胀因子(VIF)大于 20 的环境因子都不进入 RDA 分析<sup>[15]</sup>。

按照优势度,本文用于排序的种群满足以下要求: $Y \geq 0.02$ ,且该种群不同时期出现的频率  $> 2.5\%$ ,该种群至少在一个样点的相对丰度  $> 1\%$ <sup>[16-17]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 查干湖湿地水环境

2012 年查干湖湿地平水期和丰水期环境因子见表 1,平水期水温极显著低于丰水期,分别在 15.8—18.6  $^{\circ}\text{C}$ 、19.8—22.4  $^{\circ}\text{C}$  之间变化;pH 值平水期显著

高于丰水期,分别在 7.8—8.8,7.1—8.0 之间波动;平水期 DO、BOD<sub>5</sub>含量极显著高于丰水期,而 COD<sub>Mn</sub>含量显著低于丰水期。营养盐中 SiO<sub>3</sub>-Si 含量丰水期

显著高于平水期,TN、NO<sub>3</sub>-N、TP、PO<sub>4</sub>-P 没有显著性差异。

表 1 查干湖湿地平水期和丰水期的环境因子

Table 1 Environmental parameters in the intermediate and rainy season in Chagan Lake wetland

参数 Parameters	平水期 Intermediate season			丰水期 Rainy season			t 检验 t-test P 值 P value
	平均 Mean	最小 Min	最大 Max	平均 Mean	最小 Min	最大 Max	
水温 Temperature/ °C	17.34	15.77	18.63	21.07	19.8	22.42	-12.060 **
盐度 Salinity / (mg/L)	442	140	600	396	190	490	0.807
pH	8.2	7.8	8.8	7.6	7.1	8.0	6.336 **
溶解氧 Dissolved oxygen/ (mg/L)	10.5	6.4	12.5	6.6	4.6	7.9	7.836 **
高锰酸钾指数/ (mg/L) Chemical oxygen demand	9.7	3.3	14.6	12.5	6.9	16.1	-2.204 *
生化需氧量/ (mg/L) 5-day biochemical oxygen demand	3.64	1.80	4.65	1.95	0.69	2.65	5.362 **
总氮 Total nitrogen/ (mg/L)	1.74	1.02	3.61	1.94	1.36	3.21	-0.849
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/ (mg/L)	0.05	0.02	0.15	0.05	0.01	0.18	-0.148
总磷 Total phosphorus/ (mg/L)	0.11	0.07	0.15	0.11	0.05	0.19	0.287
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P / (mg/L)	0.02	0.01	0.05	0.01	0.01	0.02	0.878
SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> -Si / (mg/L)	7.01	4.79	16.92	9.61	8.36	12.07	-2.617 *

\*\* 表示环境因子在 0.01 水平上存在极显著差异, \* 表示环境因子在 0.05 水平上存在显著差异

2.2 查干湖湿地浮游植物种类组成及优势种群

本次调查共鉴定出浮游藻类 5 门 53 属 127 种,其中硅藻门 18 属 52 种,占 40.94%;绿藻门 20 属 46 种,占 36.22%;蓝藻门 13 属 25 种,占 19.69%;裸藻门 1 属 3 种,甲藻门 1 属 1 种。平水期物种较多,4

门 48 属 95 种,丰水期略少,5 门 43 属 85 种,藻类组成均以硅藻门和绿藻门为主(图 2)。根据优势度计算共发现浮游植物优势种群 15 个,其中平水期 12 个,丰水期 11 个,共有属 8 个(表 2)。

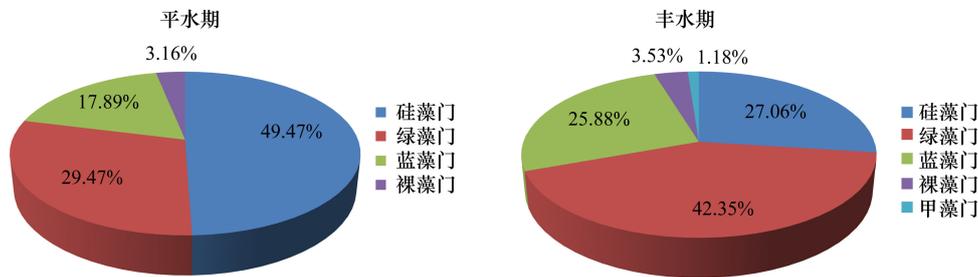


图 2 查干湖湿地浮游植物种类组成

Fig.2 Phytoplankton composition in Chagan Lake wetland

2.3 浮游植物的丰度特征和生物量特征

调查区平水期和丰水期浮游植物丰度分别介于 34.27—1143.1×10<sup>4</sup>个/L、5.016—972×10<sup>4</sup>个/L,平均值分别为 658.0×10<sup>4</sup>个/L、459.3×10<sup>4</sup>个/L。平水期蓝藻在丰度上占绝对优势,占浮游植物丰度的 39.85%,丰度为 0.92—494.1×10<sup>4</sup>个/L,平均为 262.2×10<sup>4</sup>个/L,其次为硅藻,占 36.19%,丰度为 23.46—475.2×10<sup>4</sup>个/L,平均为 238.2×10<sup>4</sup>个/L,再次为绿

藻,占 21.33%,丰度为 6.5—287.7×10<sup>4</sup>个/L,平均为 140.4×10<sup>4</sup>个/L;丰水期绿藻在丰度上占绝对优势,占浮游植物丰度的 70.84%,丰度为 0.132—811.3×10<sup>4</sup>个/L,平均为 325.4×10<sup>4</sup>个/L,其次为蓝藻,占 17.51%,丰度为 0.083—215.0×10<sup>4</sup>个/L,平均为 80.5×10<sup>4</sup>个/L,再次为硅藻,占 6.547%,丰度为 2.55—85.5×10<sup>4</sup>个/L,平均为 27.3×10<sup>4</sup>个/L(图 3)。平水期和丰水期浮游植物生物量分别介于 0.43—

22.61 mg/L、0.20—20.69 mg/L, 平均值分别为: 11.86、8.24 mg/L。

由查干湖湿地各站点浮游植物丰度和生物量分

布图可以看出(图4):新庙泡三点的浮游植物丰度和生物量明显低于主湖区,主湖区各点差异不显著,丰水期低于平水期。

表 2 查干湖湿地浮游植物优势属名录

Table 2 Appendix list of dominant genus of phytoplankton in Chagan Lake wetland

编号 Code	门 Phylum	属 Genus	拉丁学名 Latin names	优势度 Dominance	
				平水期 Intermediate season	丰水期 Rainy season
n1	硅藻门	针杆藻	<i>Synedra</i>	0.140	-
n2	硅藻门	舟形藻	<i>Navicula</i>	0.109	-
n3	硅藻门	脆杆藻	<i>Fragilaria</i>	0.048	-
n4	硅藻门	直链藻	<i>Melosira</i>	0.022	0.025
n5	蓝藻门	束丝藻	<i>Aphanizomenon</i>	0.216	0.074
n6	蓝藻门	席藻	<i>Phormidium</i>	0.132	-
n7	蓝藻门	颤藻	<i>Oscillatoria</i>	0.023	0.045
n8	蓝藻门	拟鱼腥藻	<i>Anabaenopsis</i>	-	0.020
n9	绿藻门	栅列藻	<i>Scenedesmus</i>	0.140	0.354
n10	绿藻门	十字藻	<i>Crucigenia</i>	0.020	0.050
n11	绿藻门	纤维藻	<i>Ankistrodesmus</i>	0.021	0.020
n12	绿藻门	盘星藻	<i>Pediastrum</i>	0.020	0.071
n13	绿藻门	实球藻	<i>Pandorina</i>	-	0.050
n14	绿藻门	空球藻	<i>Coelastum</i>	-	0.036
n15	裸藻门	裸藻	<i>Euglena</i>	0.022	0.051

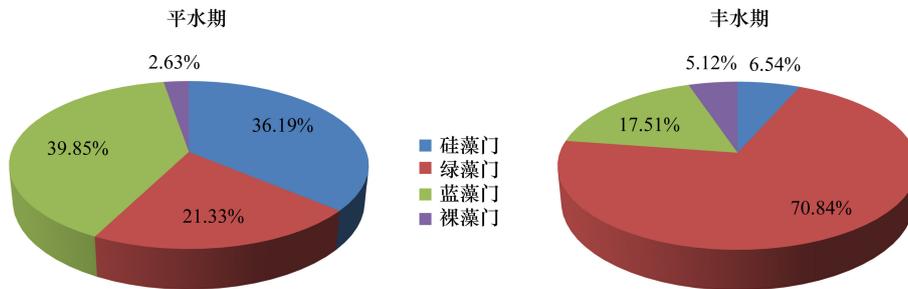


图 3 查干湖湿地平水期和丰水期浮游植物相对丰度

Fig.3 Relative abundance of phytoplankton in the intermediate and rainy season

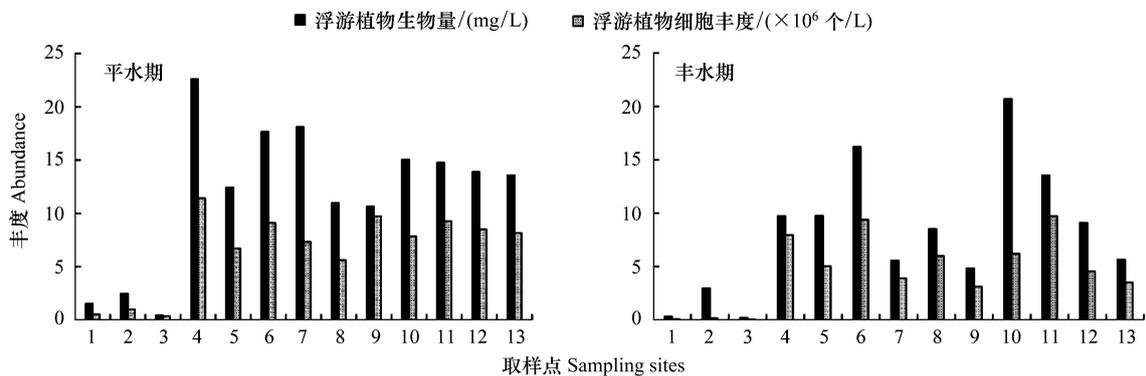


图 4 查干湖湿地各站点浮游植物丰度和生物量分布图

Fig.4 Density and biomass of phytoplankton in each site, Chagan Lake wetland

2.4 浮游植物的群落多样性分析

查干湖湿地平水期和丰水期的表层水域浮游植

物群落 Shannon 多样性指数 ( $H'$ )、Margalef 指数 ( $D$ )、Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 以及物种多样性阈值

( $D_v$ )的平面分布如图5所示。

平水期和丰水期浮游植物群落  $H'$  分别介于 0.14—3.48、1.93—3.49, 均值分别为 2.91、2.83,  $D$  分别介于 0.88—1.23、0.58—1.06, 均值分别为 1.02、0.80,  $J$  分别介于 0.05—1.20、0.60—1.32, 均值分别为 1.04、1.1,  $D_v$  分别介于 0.01—4.10、0.74—4.39, 均

值分别为 3.27、3.21。  $H'$  和  $J$  表现出一致的时空变化趋势。对比浮游植物丰度的平面分布(图4), 多样性指数的平面分布与浮游植物丰度呈镶嵌分布, 表明: 在丰度的高值区, 浮游植物基本上是由高丰度的单一优势种群组成。

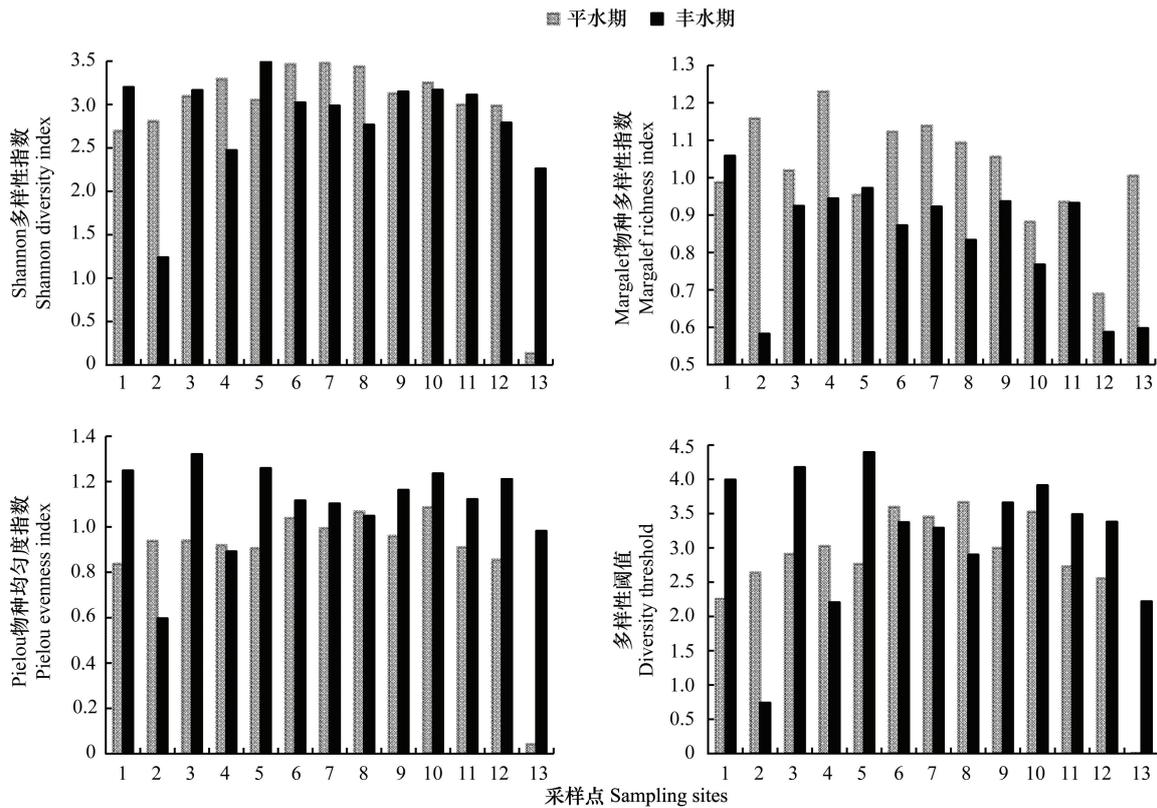


图5 查干湖湿地浮游植物多样性指数分布

Fig.5 Distribution of diversity index of phytoplankton in Chagan Lake wetland

2.5 浮游植物优势种群空间分布特征

在 Bray-Curtis 相似性测量基础上, 采用组间平均聚类分析方法画出聚类树枝图(图6)。可知, 查干湖湿地平水期和丰水期浮游植物组成在 10% 处均

可划分为两个聚类类型。各群聚类型包含站点和所处位置不同, 类型 I (含调查点位 1、2、3) 分布于新庙泡, 类型 II (含调查点位 4—13) 位于查干湖主湖区, 与浮游植物群落多维排序尺度分析(图7)一致。

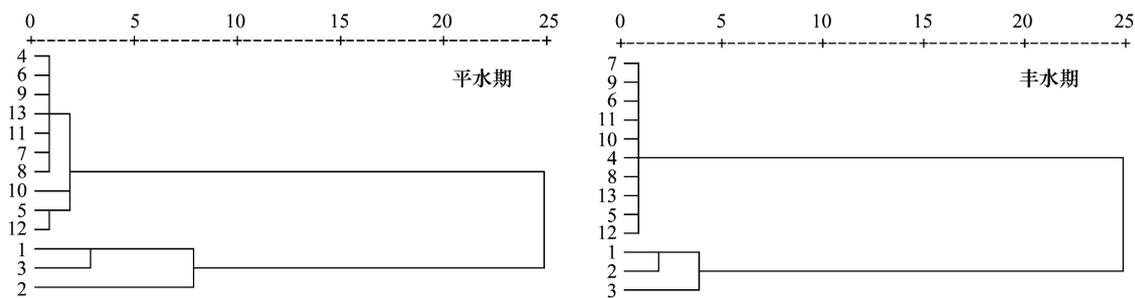


图6 查干湖湿地浮游植物群落聚类分析

Fig.6 Cluster analysis of phytoplankton community in Chagan Lake wetland

### 2.6 浮游植物群落与环境因子的相关分析

相关分析表明(图 8):平水期,查干湖湿地浮游植物丰度与盐度呈显著正相关,与 pH 值、 $PO_4^{3-}$  呈显

著负相关;丰水期,浮游植物丰度与盐度呈显著正相关,与 pH 值、 $PO_4^{3-}$ 、TN 不存在统计学意义上的相关性。

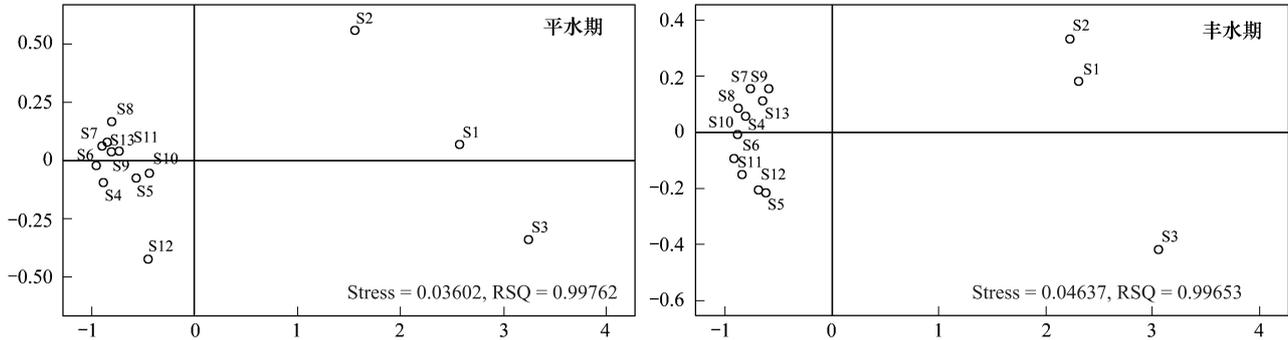


图 7 查干湖湿地浮游植物群落多维排序尺度分析

Fig.7 MDS of phytoplankton community in Chagan Lake wetland

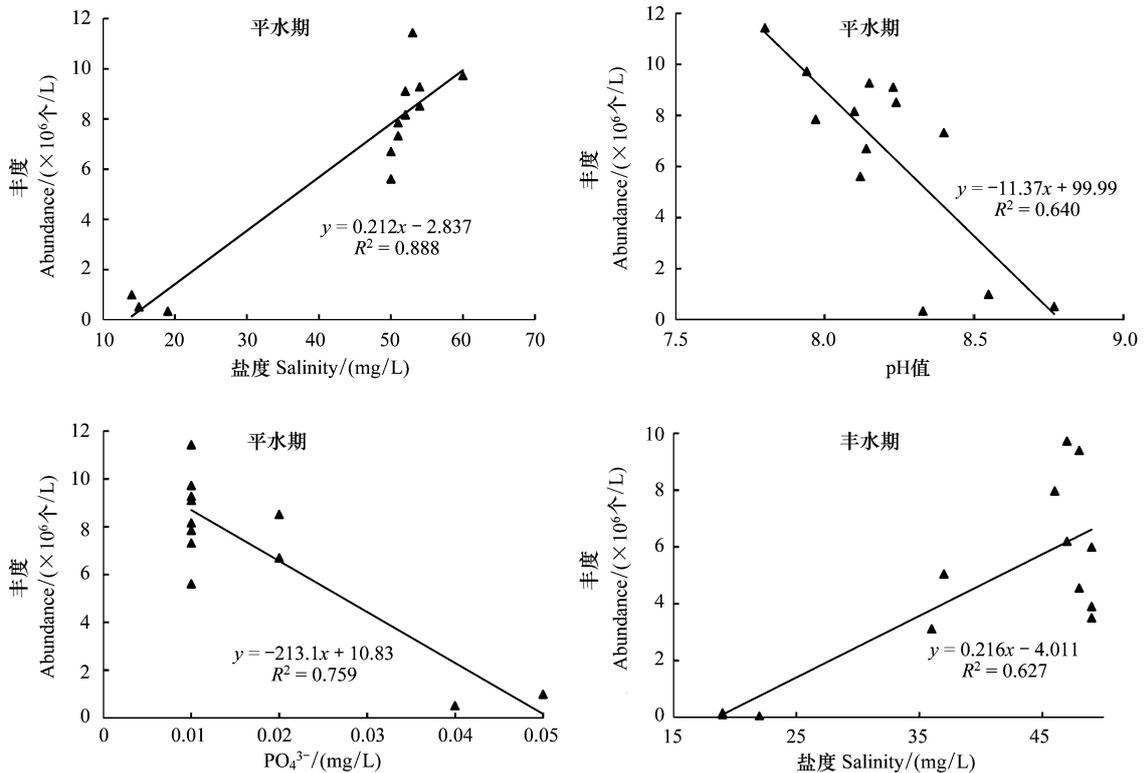


图 8 查干湖湿地浮游植物丰度与环境因子的关系

Fig.8 Correlation between phytoplankton abundance and environmental variables in Chagan Lake wetland

### 2.7 浮游植物群落与环境因子关系的 RDA 分析

查干湖湿地平水期和丰水期浮游植物群落与环境因子的 RDA 分析结果见表 3 和图 9。由表 3 知:在排序图中,平水期轴 I 和轴 II 的特征值分别为 0.7、0.038,丰水期的分别为 0.613 和 0.059;所选的环境因子共解释了平水期 77.1%、丰水期 71.1% 的物种变化信息,前两轴累计解释了平水期 73.8%、丰水期 67.1%

的物种变化信息和平水期 95.7%、丰水期 94.4% 的物种-环境关系信息;两水文期的两个物种排序轴近似垂直,相关系数分别为 -0.0524、0.0251,环境因子轴与物种排序轴之间的相关系数平水期为 0.9714、0.8146,丰水期为 0.9559、0.8442,两水文期两个环境排序轴的相关系数均为 0(两水文期 Monte Carlo 置换检验所有排序轴均达到显著水平 ( $P < 0.05$ )) 说明排序结果可

表 3 浮游植物群落 RDA 统计结果

Table 3 Summary of redundancy analysis (RDA) of phytoplankton community for the first two axes

时间 Time	轴 Axis	I	II	III	IV
平水期	特征值	0.7	0.038	0.017	0.011
Intermediate season	浮游植物种属与环境因子相关关系	0.971	0.815	0.659	0.652
	浮游植物种属的累积百分数/%	70	73.8	75.5	76.6
	浮游植物与环境因子相关性的累积百分数/%	90.8	95.7	97.9	99.3
	典型特征值总和	0.771			
丰水期	特征值	0.613	0.059	0.021	0.015
Rainy season	浮游植物种属与环境因子相关关系	0.956	0.844	0.626	0.676
	浮游植物种属的累积百分数/%	61.3	67.1	69.3	70.8
	浮游植物与环境因子相关性的累积百分数/%	86.2	94.4	97.4	99.5
	典型特征值总和	0.711			

靠<sup>[15]</sup>,排序轴与环境因子间线性结合的程度较好地反映了物种与环境之间的关系。

利用向前引入法对环境因子进行逐步筛选, Monte Carlo 置换检验结果见图 9:平水期 TN、BOD<sub>5</sub>、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、pH 值主要在第 I 轴影响浮游植物的分布,水温(T)主要在第 II 轴影响浮游植物分布。平水期优势属与 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、pH 值呈反向相关,这与 2.6 分析结果一致;位于左下方的直链藻 *Melosira* (n4)、纤维藻 *Ankistrodesmus* (n11) 与水温有正向相关;位于左上方的针杆藻 *Synedra* (n1)、舟形藻 *Navicula* (n2)、脆杆藻 *Fragilaria* (n3)、颤藻 *Oscillatoria* (n7)、裸藻 *Euglena* (n15) 与水温有反向关联;位于 I 轴两侧的针杆藻 *Synedra* (n1)、脆杆藻 *Fragilaria* (n3)、束丝

藻 *Aphanizomenon* (n5)、席藻 *Phormidium* (n6)、栅列藻 *Scenedesmus* (n9)、十字藻 *Crucigenia* (n10)、盘星藻 *Pediastrum* (n12)、裸藻 *Euglena* (n15) 与 TN、BOD<sub>5</sub> 有正向关联,与 pH、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 负相关。而丰水期,盐度(sal.)、pH 值、和 BOD<sub>5</sub> 主要在第一轴影响浮游植物分布,水温(T)和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 主要在第 II 轴影响浮游植物分布;丰水期优势属与盐度、pH 值、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、BOD<sub>5</sub> 有正向关联,位于左下方的拟鱼腥藻 *Anabaenopsis* (n8)、纤维藻 *Ankistrodesmus* (n11) 与水温呈正向相关。由 RDA 分析知:影响平水期浮游植物优势属分布的最主要环境因子是 pH 值、TN 和 BOD<sub>5</sub>,而盐度、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> 和 BOD<sub>5</sub> 则是影响丰水期浮游植物分布的最主要因子。

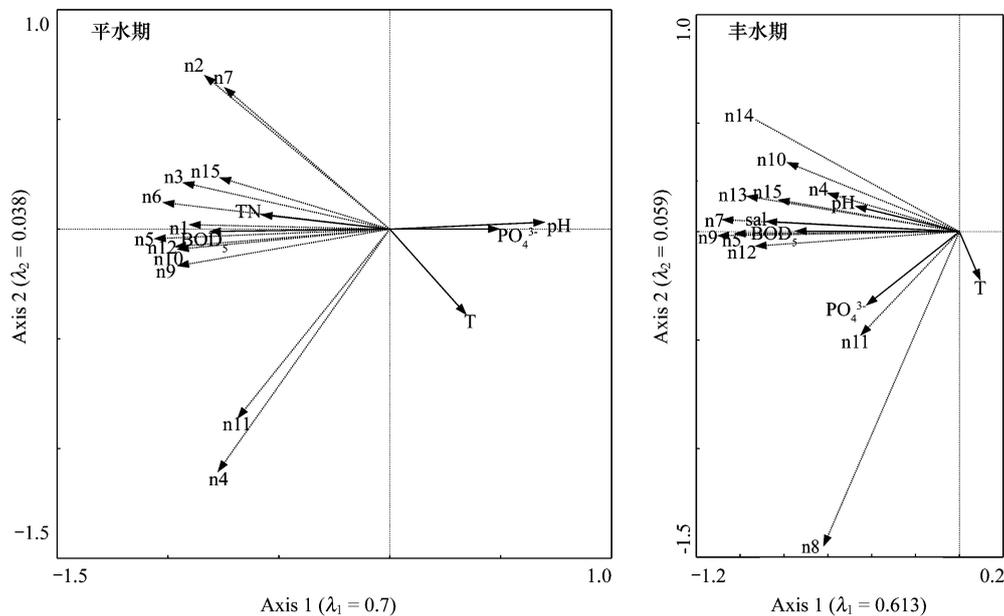


图 9 浮游植物与环境因子 RDA 排序图

Fig.9 Correlation plots of the redundancy analysis (RDA) on the relationship between the environment variables and phytoplankton taxa n \* 为浮游植物代码,见表 2

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物群落结构特征

调查期间,查干湖湿地浮游植物群落由平水期的硅藻型发展为丰水期的绿藻型,这与温度变化及水质状况密切相关。平水期,水温较低,适合硅藻生长,丰水期,随着温度升高,绿藻开始大量繁殖。这与杨富亿 1994 年 9 月对查干湖浮游植物的调查结果一致<sup>[18]</sup>。同南方浅水性湖泊相比,查干湖共检出浮游植物 5 门 53 属 127 种,在种类和数量上少于鄱阳湖(鄱阳湖 1987—1993 年浮游植物种类数为 8 门 153 属 319 种<sup>[19]</sup>),多于太湖(太湖 1991—2002 年检出浮游植物 4 门 74 种<sup>[20]</sup>)。与中国东北镜泊湖(镜泊湖 2007 年浮游植物种数为 8 门 103 种<sup>[21]</sup>)和小兴凯湖相近(小兴凯湖 2011 年浮游植物种数为 7 门 121 种<sup>[22]</sup>)。

#### 3.2 浮游植物群落结构与环境因子的关系

水温是浮游植物水平分布的主要影响因素之一,浮游植物丰度、生物量均随水温的升高而增加<sup>[23]</sup>。但在查干湖湿地,虽然丰水期水温高于平水期,但其浮游植物物种数、丰度及生物量均低于平水期。原因在于:一方面,丰水期时降水量增加,来自前郭灌区的农田退水也汇入查干湖,致使水位升高了 40 cm,对浮游植物丰度和生物量具稀释作用,且导致水力滞留时间减少,水流速度增加,而浮游植物的水平分布受水流的影响很大<sup>[24]</sup>,较快的水流不利于浮游植物生物量的积累;另一方面,查干湖湿地浮游植物丰度与盐度呈显著正相关关系,而丰水期盐度低于平水期;第三,查干湖湿地作为吉林省重要的渔业基地,每年春秋两季都会投放鱼苗几十万斤,随着鱼类生长,其摄食量的增加也加剧了两水文期浮游植物丰度和生物量的时间差异。

浮游植物丰度和生物量的空间分布显示:新庙泡浮游植物的丰度、生物量均显著低于查干湖主湖区。同一水文期内,主湖区的丰度、生物量是新庙泡的 8—10 倍。这是由于:平水期浮游植物丰度与盐度呈正相关,与 pH 值及  $\text{PO}_4^{3-}$  呈显著负相关,而平水期查干湖主湖区的盐度(52.7 mg/L)是新庙泡(16.0 mg/L)的 3.3 倍,且新庙泡 pH 值(平均为 8.6)、 $\text{PO}_4^{3-}$  含量(平均为 0.045 mg/L)高于查干湖主湖区(pH 值、 $\text{PO}_4^{3-}$  平均值分别为 8.1、0.012 mg/L);而丰水期

主湖区的盐度(45.6 mg/L)是新庙泡(20 mg/L)的 2.3 倍,浮游植物丰度空间分布主要受盐度影响。此外,新庙泡内 3 号点高家桥和 1 号川头闸位于农田退水进出新庙泡处,较大的流速不利于浮游植物的富集,致使两处浮游植物丰度较低。

浮游植物群落的时间差异显示:平水期优势属纤维藻 *Ankistrodesmus* (n11) 喜欢水温高的生境,在丰水期仍为优势属;而硅藻门的针杆藻 *Synedra* (n1)、舟形藻 *Navicula* (n2)、脆杆藻 *Fragilaria* (n3),蓝藻门的颤藻 *Oscillatoria* (n7),裸藻门的裸藻 *Euglena* (n15) 等喜低温生境的优势属则为喜高温的绿藻取代,这也使得浮游植物群落结构由平水期的硅藻型演变为丰水期的绿藻型。平水期优势属喜低碱、低磷素、高氮素的生境,而丰水期优势属则喜微碱性、高盐度、高磷素、高  $\text{BOD}_5$  的生境。本次调查发现的物种均为温带常见小型藻类,新陈代谢速度较快,属于能迅速吸收营养盐并进行繁殖生长的种类<sup>[25]</sup>,因此,它们在较高营养盐条件下可以形成较高的相对丰度。

不同湖泊由于其自然条件和人类干扰不同,影响其浮游植物群落和分布的环境因子各不相同。Naselli-Flores 等<sup>[26]</sup>研究 Arancio 湖表明:水体温度、电导率、库容对浮游植物的影响最大,而 Arhonditis 等<sup>[27]</sup>研究了华盛顿湖发现透明度、总磷和捕食压力对浮游植物的影响最大;张怡等<sup>[28]</sup>应用冗余度分析研究南屏水库发现水力滞留时间、降雨量和正磷是影响南屏水库浮游植物功能类群演替的重要因子;吴卫菊等<sup>[29]</sup>通过冗余度分析渔洞水库浮游植物群落结构发现水温是影响渔洞水库浮游植物结构季节性变化的主要因素,而水文动力学对水库浮游植物多样性及优势种的形成有较大影响。查干湖湿地作为前郭灌区农田退水的承泄区,营养盐对浮游植物的分布有重要作用。

#### 3.3 基于生物多样性的查干湖湿地水质生态学评价

环境条件可以直接影响浮游植物的群落结构,浮游植物的优势种群及群落结构特征指数的变化也可以在一定程度上反映水环境现状及变化。物种多样性就是衡量群落中物种组成的稳定程度及其数量分布的均匀程度和群落结构特征的重要营养指标。在生物水质监测中  $H' > 3$  为轻或无污染,3—2 为  $\beta$ -中度污染(轻中污染),2—1 为  $\alpha$ -中度污染(重中污

染),0—1 为重度污染。本次研究  $H'$  结果表明查干湖湿地水体处于  $\beta$ -中度污染(轻中污染),平水期略严重。

#### 4 结论

(1)调查期间共鉴定出浮游植物 5 门 53 属 127 种,主要由硅藻和绿藻组成,浮游植物丰度变化明显,为平水期>丰水期,浮游植物群落结构的时间差异较大,平水期优势种群以硅藻为主,丰水期以绿藻为主。据浮游植物多样性结果判断查干湖湿地处于  $\beta$ -中度污染水平。

(2)根据 Bray-Curtis 相似性系数聚类和多维排序尺度分析查干湖湿地浮游植物群落结构,可以把查干湖湿地划为新庙泡和主湖区两个区域,受盐度、营养盐、流速影响,新庙泡丰度、生物量低于主湖区。影响浮游植物群落优势属分布的环境因子,平水期为 pH 值、TN 和  $BOD_5$ , 丰水期为盐度、 $PO_4^{3-}$  和  $BOD_5$ 。平水期优势属喜低碱、低磷素、高氮素的生境,而丰水期优势属则喜欢微碱性、高盐度、高磷素、高  $BOD_5$  的生境。两个水文期浮游植物优势种群多为温带小型藻类能迅速吸收营养盐并进行繁殖生长,在较高营养盐条件下可以形成较高的相对丰度。

(3)由于查干湖湿地在吉林西部特殊的生态地位及经济价值,应研究其浮游植物群落特征在不同季节、不同年份之间的长期变化特征,因此需要更多资料的积累,同时对于浮游植物各物种与环境之间关系的认识,还有待进一步的现场实验去验证和完善。

**致谢:** 本研究在浮游植物样品的采集、鉴定过程中得到东北师范大学环境学院宋传涛老师及其团队的大力协助,英文摘要得到了澳大利亚詹姆斯库克大学工程学院孙广智老师的修改润色,特此致谢。

#### References:

- [ 1 ] Dai X J, Tian W. Analysis and countermeasures on water pollution of lake Chagan. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(8): 179-184.
- [ 2 ] Xiao H F, Xue B, Yao S C, Lv X G. Water quality of lakes evolution in Songnen Plain. *Wetland Science*, 2011, 9(2): 120-124.
- [ 3 ] Whitton B A. Use of Algae for monitoring rivers. *Journal of Applied Phycology*, 1991, 3(3): 287-287.
- [ 4 ] Whitton B A. Changing approaches to monitoring during the period of the 'Use of Algae for Monitoring Rivers' symposia. *Hydrobiologia*, 2012, 695(1): 7-16.
- [ 5 ] Lepisto L, Holopainen A L, Vuoristo H. Type-specific and indicator taxa of phytoplankton as a quality criterion for assessing the ecological status of Finnish boreal lakes. *Limnologia*, 2004, 34(3): 236-248.
- [ 6 ] Beisner B E, Longhi M L. Spatial overlap in lake phytoplankton: Relations with environmental factors and consequences for diversity. *Limnology and Oceanography*, 2013, 58(4): 1419-1430.
- [ 7 ] Longhi M L, Beisner B E. Environmental factors controlling the vertical distribution of phytoplankton in lakes. *Journal of Plankton Research*, 2009, 31(10): 1195-1207.
- [ 8 ] Hasle G, Sournia A. *Phytoplankton Manual, Monographs on Oceanographic Methodology*. Paris: UNESCO, 1978.
- [ 9 ] Hu H J, Wei Y X. *The freshwater algae of China: systematic, taxonomy and ecology*, Beijing: Sciences Press, 2006.
- [ 10 ] Sun J, Liu D Y. Study on phytoplankton biomass: I. Phytoplankton measurement biomass from cell volume or plasma volume. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(2): 75-85.
- [ 11 ] Standardization Administration of China. GB3838—2002, National Standard of the People's Republic of China: Environmental Quality Standards for Surface Water. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [ 12 ] Jin X C, Tu Q Y. *The Standard Methods in Lake Eutrophication Investigation*. Beijing: China Environment Science Press, 1990.
- [ 13 ] Liu W Y, Gao R H, Zhang Q L, Chen Y H, Xing X J, Bai Z Y, Jia L Q, Yu X Z. The diversity of phytoplankton in salina-alkaline wetland on the Erdos Plateau. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 27(5): 143-148.
- [ 14 ] Xu Z L, Chen Y Q. Aggregated intensity of dominant species of zooplankton in autumn in the East China Sea and Yellow Sea. *Journal of Ecology*, 1989, 8(4): 13-15, 19.
- [ 15 ] Ter Braak C J, Prentice I C. A theory of gradient analysis. *Advances in Ecological Research*, 1988, 18: 277-315.
- [ 16 ] Lopes M R M, Bicudo C E M., Ferragut M C. Short term spatial and temporal variation of phytoplankton in a shallow tropical oligotrophic reservoir, southeast Brazil, *Hydrobiologia*, 2005, 542: 235-247.
- [ 17 ] Muylaert, K, Sabbe K, Vyverman W. Spatial and temporal dynamics of phytoplankton communities in a freshwater tidal estuary (Schelde, Belgium). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2000, 50(5): 673-687.
- [ 18 ] Yang F Y. Comprehensive exploitation and utilization of Chagan Lake. *Resource Development & Marker*, 1998, 14(6): 247-249, 254.
- [ 19 ] Xie Q M, Li C C, Peng C L. Primary studies on community ecology of floating algae in Poyang Lake. *Jiangxi Science*, 2000, 18(3): 162-166.

- [20] Qian K M, Chen Y W, Song X L. Long-term development of phytoplankton dominant species related to eutrophication in Lake Taihu. *Ecological Science*, 2008, 27(2): 65-70.
- [21] Song C, Yu H X. Phytoplankton diversity in Jingpo Lake and water quality evaluation. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(4): 39-42.
- [22] Yuan Y X, Yu H X, Jiang M. Phytoplankton community structure and diversity in Xiaoxingkai Lake. *Wetland Science*, 2013, 11(2): 151-157.
- [23] Lehman W. The influence of climate on phytoplankton community biomass in San Francisco Bay Estuary. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(3): 580-590.
- [24] Wu N C, Tang T, Zhou S C, Fu X C, Jiang W X, Li F Q, Cai Q H. Influence of cascaded exploitation of small hydropower on phytoplankton in Xiangxi River. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(5): 1093-1098.
- [25] Sandgren C D. Growth and reproductive strategies of freshwater phytoplankton. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [26] Naselli-Flores L, Barone R. Phytoplankton dynamics in two reservoir with different trophic state (Lake Rosamarina and Lake Arancio, Sicily, Italy). *Hydrobiologia*, 1998, 369: 163-178.
- [27] Arhonditsis G B, Winder M, Brett M T, Schindler, D E. Patterns and mechanisms of phytoplankton variability in Lake Washington (USA). *Water Research*, 2004, 38: 4013-4027.
- [28] Zhang Y, Hu R, Xiao L J, Han B P. Comparative analysis of succession of the phytoplankton functional groups in two reservoirs with different hydrodynamics in Southern China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(1): 107-117
- [29] Wu W J, Yang K, Wang Z C, Li G B, Liu B D. Community structure and seasonal succession of phytoplankton in Yundong Reservoir of Yungui-plateau. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(2): 69-75.
- [2] 肖海丰, 薛滨, 姚书春, 吕宪国. 松嫩平原湖泊水质演化研究. *湿地科学*, 2011, 9(2): 120-124.
- [9] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类——系统、分类及生态. 北京: 科学出版社, 2006.
- [10] 孙军, 刘东艳. 浮游植物生物量研究: I. 浮游植物生物量细胞体积转化法. *海洋学报*, 1999, 21(2): 75-85.
- [11] 中国国家标准化管理委员会. GB3838—2002, 中华人民共和国国家标准: 地表水环境质量标准. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [12] 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.
- [13] 刘文盈, 高润宏, 张秋良, 陈玉海, 邢小军, 白兆勇, 贾丽琼, 于向芝. 鄂尔多斯高原盐沼湿地浮游植物的多样性与评价. *干旱区资源与环境*, 2009, 27(5): 143-148.
- [14] 徐兆礼, 陈亚瞿. 东黄海秋季浮游动物优势种聚集强度与鲈鳕渔场的关系. *生态学杂志*, 1989, 8(4): 13-15, 19.
- [18] 杨富亿. 查干湖的综合开发与利用. *资源开发与市*, 1998, 14(6): 247-249, 254.
- [19] 谢钦铭, 李长春, 彭赐莲. 鄱阳湖浮游藻类群落生态的初步研究. *江西科学*, 2000, 18(3): 162-166.
- [20] 钱奎梅, 陈宇炜, 宋晓兰. 太湖浮游植物优势种长期演化与富营养化进程的关系. *生态科学*, 2008, 27(2): 65-70.
- [21] 宋辞, 于洪贤. 镜泊湖浮游植物多样性分析及水质评价. *东北林业大学学报*, 2009, 37(4): 39-42.
- [22] 袁宇翔, 于洪贤, 姜明. 小兴凯湖浮游植物群落结构及多样性. *湿地科学*, 2013, 11(2): 151-157.
- [24] 吴乃成, 唐涛, 周淑婵, 傅小城, 蒋万祥, 李凤清, 蔡庆华. 香溪河小水电的梯级开发对浮游藻类的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(5): 1093-1098.
- [28] 张怡, 胡韧, 肖利娟, 韩博平. 南亚热带两座不同水文动态的水库浮游植物的功能类群演替比较. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 107-117.
- [29] 吴卫菊, 杨凯, 汪志聪, 李根保, 刘永定. 云贵高原渔洞水库浮游植物群落结构及季节演替. *水生态学杂志* 2012, 33(2): 69-75.

#### 参考文献:

- [1] 代雪静, 田卫. 查干湖水质污染分析及控制途径. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(8): 179-184.

**ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.10 May, 2014 (Semimonthly)**  
**CONTENTS**

**Frontiers and Comprehensive Review**

- Landscape sustainability and landscape sustainability science ..... ZHAO Wenwu, FANG Xuening (2453)
- A diagnostic framework of payments for ecosystem services and associated case studies .....  
..... ZHU Wenbo, WANG Yang, LI Shuangcheng (2460)
- Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants .....  
..... LIU Chunying, CHEN Chunli, GONG Xiaofeng, et al (2470)
- Ecological effects of predator chemical cues in aquatic ecosystem ..... QIN Guangqiu, LU Haoliang, TANG Zhenzhu, et al (2481)
- Secondary substances and their ecological effects on seed dispersal in vertebrate-dispersed fleshy fruit plants .....  
..... PAN Yang, LUO Fang, LU Changhu (2490)

**Autecology & Fundamentals**

- Responses of CH<sub>4</sub> uptake rates to simulated N deposition in a nature forest in mid-subtropical China .....  
..... CHEN Chaoqi, YANG Zhijie, LIU Xiaofei, et al (2498)
- Ecological characteristics of *Phragmites australis* and their relationship to water-salt indicators in dry habitats of the southern  
marginal zones of the Tarim Basin, China ..... GONG Lu, ZHU Meiling, TASHPOLAT · Tiyip, et al (2509)
- Threshold effect of soil moisture on photosynthetic and physiological parameters in *Rosa xanthina* L. and its photosynthetic  
productivity classification ..... ZHANG Shuyong, XIANG Jiangbao, ZHANG Guangcan, et al (2519)
- Contrasting responses of soil respiration to litter manipulation in subtropical *Mytilaria laosensis* and *Cunninghamia lanceolata*  
plantations ..... YU Zaipeng, WAN Xiaohua, HU Zhenhong, et al (2529)
- Potassium application for increased jasmonic acid content and defense enzyme activities of wheat leaves infested by aphids .....  
..... WANG Yi, ZHANG Yueling, SU Janwei, et al (2539)
- Combined effects of elevated O<sub>3</sub> concentration and reduced solar irradiance on photosynthetic activity and energy dissipation  
of winter wheat ..... SUN Jian, ZHENG Youfei, et al (2548)
- Colonization dynamics of *Bacillus cereus* B3-7 on wheat roots and control efficiency against sharp eyespot of wheat .....  
..... HUANG Qiubin, ZHANG Ying, LIU Fengying, et al (2559)
- Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation .....  
..... ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al (2567)
- Assessment on the ecological fitness of anti-fungal transgenic rice ..... LI Wei, GUO Jianfu, YUAN Hongxu, et al (2581)
- A proteomic analysis of *Arachis hypogaea* leaf in responses to enhanced ultraviolet-B radiation .....  
..... DU Zhaokui, LI Junmin, ZHONG Zhangcheng, et al (2589)
- Composition of fatty acids from suspended particulate matter in southern South China Sea .....  
..... LIU Huaxue, KE Changliang, LI Chunhou, et al (2599)
- The influence of age, flock size, habitat, and weather on the time budget and the daily rhythm of wintering Siberian Cranes  
in Poyang Lake ..... YUAN Fangkai, LI Yankuo, LI Fengshan, et al (2608)
- The energy budget and water metabolism heat regulation of tree sparrows *Passer montanus* of toba compensatory regeneration .....  
..... YANG Zhihong, WU Qingming, YANG Miao, et al (2617)
- The effect of low-dose of pesticide on predation of spider and its preliminary mechanisms ..... LI Rui, LI Na, LIU Jia, et al (2629)
- Response of the alligator weed flea beetle, *Agasicles hygrophila* (Coleoptera: Chrysomelidae) to overwintering protection and  
its controlling effect on alligator weed *Alternanthera philoxeroides* (Amaranthaceae: Alternanthera) .....  
..... LIU Yufang, WANG Xiuxiu, LI Fei, et al (2638)

**Population, Community and Ecosystem**

- The effect of climate change on the population fluctuation of the Siberian crane in Poyang Lake ..... LI Yankuo, QIAN Fawen, SHAN Jihong, et al (2645)
- Characteristics of soil phosphorus fractions in wetlands with various restoration age in caizi lake, Anhui Province ..... LIU Wenjing, ZHANG Pingjiu, DONG Guozheng, et al (2654)
- Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland ..... LI Ranran, ZHANG Guangxin, ZHANG Lei (2663)
- Diversity of methanogen communities in tidal freshwater and brackish marsh soil in the Min River estuary ..... ZENG Zhihua, YANG Minhe, SHE Chenxing, et al (2674)
- The influence of environment and phylogenetic background on variation in leaf and fine root traits in the Yanhe River catchment, Shaanxi, China ..... ZHENG Ying, WEN Zhongming, SONG Guang, et al (2682)
- Changes of soil properties in re-vegetation stages on sloping-land with purple soils in hengyang of Hunan Province, South-central China ..... YANG Ning, ZOU Dongsheng, YANG Manyuan, et al (2693)
- Vulnerability assessment on the mangrove ecosystems in qinzhou bay under sea level rise ..... LI Shasha, MENG Xianwei, GE Zhenming, et al (2702)
- Dynamics of biomass and productivity of three major plantation types in southern China ..... DU Hu, ZENG Fuping, WANG Kelin, et al (2712)
- Fungal diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation soil ..... HE Yuanhao, ZHOU Guoying, WANG Shenjie, et al (2725)
- Response of sandy vegetation characteristics to precipitation change in Horqin Sandy Land ..... ZHANG Lamei, LIU Xinping, ZHAO Xueyong, et al (2737)
- Characteristics of carbon storage and sequestration of *Robinia pseudoacacia* forest land converted by farmland in the Hilly Loess Plateau Region ..... SHEN Jiapeng, ZHANG Wenhui (2746)

**Landscape, Regional and Global Ecology**

- Forest microclimate change along with the succession and response to climate change in south subtropical region ..... LIU Xiaodong, ZHOU Guoyi, CHEN Xiuzhi, et al (2755)
- Drought variations of winter wheat in different growth stages and effects of climate trend in Huang-Huai-Hai Plain, China ..... XU Jianwen, JU Hui, LIU Qin, et al (2765)

**Resource and Industrial Ecology**

- A method of environment assessment of mineral resources planning for shanxi provinces base on GIS ..... LIU Wei, DU Peijun, LI Yongfeng (2775)
- A new approach to assess the water footprint of hydropower: a case study of the Miyun reservoir in China ..... ZHAO Dandan, LIU Junguo, ZHAO Xu (2787)

# 《生态学报》2014 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,280 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 祖元刚 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 34 卷 第 10 期 (2014 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA  
(Semimonthly, Started in 1981)  
Vol. 34 No. 10 (May, 2014)

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@cspg.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@cspg.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