

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

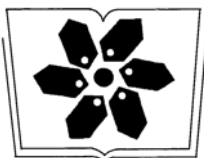
## Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 21 期 Vol.33 No.21 **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 21 期 2013 年 11 月 (半月刊)

## 目 次

### 前沿理论与学科综述

- 生态系统生产总值核算:概念、核算方法与案例研究..... 欧阳志云,朱春全,杨广斌,等 (6747)
- 气候变化对传染病爆发流行的影响研究进展..... 李国栋,张俊华,焦耿军,等 (6762)
- 好氧甲烷氧化菌生态学研究进展 ..... 负娟莉,王艳芬,张洪勋 (6774)
- 氮沉降强度和频率对羊草叶绿素含量的影响..... 张云海,何念鹏,张光明,等 (6786)
- 世界蜘蛛的分布格局及其多元相似性聚类分析..... 申效诚,张保石,张 锋,等 (6795)
- 风向因素对转基因抗虫棉花基因漂移效率的影响..... 朱家林,贺 娟,牛建群,等 (6803)

### 个体与基础生态

- 长江口及东海春季底栖硅藻、原生动物和小型底栖生物的生态特点 ..... 孟昭翠,徐奎栋 (6813)
- 长江口横沙东滩围垦潮滩内外大型底栖动物功能群研究..... 吕巍巍,马长安,余 骥,等 (6825)
- 沔阳沿岸土壤和优势植物重金属富集特征和潜在生态风险..... 杨 阳,周正朝,王欢欢,等 (6834)
- 盐分和底物对黄河三角洲区土壤有机碳分解与转化的影响..... 李 玲,仇少君,檀菲菲,等 (6844)
- 短期夜间低温胁迫对秋茄幼苗碳氮代谢及其相关酶活性的影响..... 郑春芳,刘伟成,陈少波,等 (6853)
- 32 个切花菊品种的耐低磷特性 ..... 刘 鹏,陈素梅,房伟民,等 (6863)
- 年龄和环境条件对泥蚶富集重金属镉和铜的影响..... 王召根,吴洪喜,陈肖肖,等 (6869)
- 角倍蚜虫瘿对盐肤木光合特性和总氮含量的影响..... 李 杨,杨子祥,陈晓鸣,等 (6876)
- 多噬伯克霍尔德氏菌 WS-FJ9 对草甘膦的降解特性 ..... 李冠喜,吴小芹,叶建仁 (6885)
- 金龟甲对蓖麻叶挥发物的触角电位和行为反应..... 李为争,杨 雷,申小卫,等 (6895)

### 种群、群落和生态系统

- 白洋淀生态系统健康评价..... 徐 菲,赵彦伟,杨志峰,等 (6904)
- 珠海鹤洲水道沿岸红树林湿地大型底栖动物群落特征 ..... 王 卉,钟 山,方展强 (6913)
- 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系..... 朱先进,于贵瑞,王秋凤,等 (6925)
- 抚育间伐对油松人工林下大型真菌的影响..... 陈 晓,白淑兰,刘 勇,等 (6935)
- 百山祖自然保护区植物群落 beta 多样性 ..... 谭珊珊,叶珍林,袁留斌,等 (6944)
- 土霉素对堆肥过程中酶活性和微生物群落代谢的影响..... 陈智学,谷 洁,高 华,等 (6957)

### 景观、区域和全球生态

- 兴安落叶松针叶解剖结构变化及其光合能力对气候变化的适应性 ..... 季子敬,全先奎,王传宽 (6967)
- 盐城海滨湿地景观演变关键土壤生态因子与阈值研究..... 张华兵,刘红玉,李玉凤,等 (6975)

半干旱区沙地芦苇对浅水位变化的生理生态响应 ..... 马赞花,张铜会,刘新平 (6984)

SWAT 模型融雪模块的改进 ..... 余文君,南卓铜,赵彦博,等 (6992)

科尔沁沙地湖泊消涨对气候变化的响应..... 常学礼,赵学勇,王 玮,等 (7002)

贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征..... 夏江宝,张淑勇,王荣荣,等 (7013)

三峡库区古夫河着生藻类叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素..... 吴述园,葛继稳,苗文杰,等 (7023)

资源与产业生态

煤炭开发对矿区植被扰动时空效应的图谱分析——以大同矿区为例..... 黄 翌,汪云甲,李效顺,等 (7035)

学术信息与动态

《中国当代生态学研究》新书推介 ..... 刘某承 (7044)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q \* 1981 \* m \* 16 \* 300 \* zh \* P \* ¥90.00 \* 1510 \* 30 \* 2013-11



**封面图说:** 百山祖保护区森林植物群落——百山祖国家级自然保护区位于浙西南闽浙交界处,由福建武夷山向东北伸展而成,主峰海拔 1856.7m,为浙江省第二高峰。其独特的地形和水文地理环境形成了中亚热带气候区中一个特殊的区域,保存着十分丰富的植物种质资源以及国家重点保护野生动植物种,尤其是 1987 年由国际物种保护委员会列为世界最濒危的 12 种植物之一的百山祖冷杉,是第四纪冰川的孑遗植物,素有“活化石”之称。随着海拔的升高,其植被为常绿阔叶林、常绿-落叶阔叶混交林、针阔混交林、针叶林、山地矮林和山地灌草丛。

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/stxb201207050937

徐菲, 赵彦伟, 杨志峰, 陈彬. 白洋淀生态系统健康评价. 生态学报, 2013, 33(21): 6904-6912.

Xu F, Zhao Y W, Yang Z F, Chen B. Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(21): 6904-6912.

## 白洋淀生态系统健康评价

徐 菲, 赵彦伟, 杨志峰\*, 陈 彬

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

**摘要:** 涵盖热力学指标的指标体系可全面表征湖泊生态系统在受扰条件下的健康状态。在实地监测的基础上, 应用浮游植物生物量( $BA$ )、浮游动物生物量/浮游植物生物量( $BZ/BA$ )、浮游植物群落初级生产量( $P$ )、能质( $Ex$ )、结构能质( $Ex_{st}$ )和浮游植物对 TP 的缓冲能力( $\beta_p$ )表征白洋淀的健康状态, 并通过集成健康综合指数, 确定了白洋淀 14 个水域的健康等级。结果表明, 白洋淀大部分水域健康受损较为严重。枣林庄和采蒲台水域处于亚健康状态, 烧车淀、光淀张庄和东田庄水域处于不健康状态, 其余 9 个水域均处于病态。结合各水域人类干扰活动的分布可知, 白洋淀健康退化的程度与人类干扰强度密切相关。府河和淀内居民生活及水产养殖污水排放是造成白洋淀健康受损的主要原因。该结果可为白洋淀生态系统的管理和修复提供一定的科学依据。

**关键词:** 生态系统健康; 健康评价; 白洋淀; 能质

## Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake

XU Fei, ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng\*, CHEN Bin

State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract:** Index system covering thermodynamic indicators specialized by eco-exergy and structural eco-exergy could comprehensively characterize the ecological health condition of lake ecosystems under human disturbances. This system has been widely used for assessing lake ecosystem health in recent decades. For comparing ecological health of one lake across time scale or that of different lakes, integration of comprehensive health index is needed to identify the degree of lake health and to better reflect the discrepancies of the ecological health conditions. In this paper, an integrated index system including indicators of phytoplankton biomass ( $BA$ ), ratio of zooplankton to phytoplankton biomass ( $BZ/BA$ ), phytoplankton primary production ( $P$ ), eco-exergy ( $Ex$ ), structural eco-exergy ( $Ex_{st}$ ) and ecological buffer capacity to total phosphorus for phytoplankton ( $\beta_p$ ) collected from field survey was structured to assess the ecological health condition of Baiyangdian Lake which is located in North China. Health classes of fourteen water areas in Baiyangdian Lake were identified using comprehensive health index, which was computed through the sum of normalized indices multiplied by the weights. The results indicate that the ecological health of most water areas in Baiyangdian Lake is deteriorated severely. The water areas of Zaolinzhuang and Caiputai are sub-healthy, those of Shaochedian, GuangdianZhangzhuang and Dongtianzhuang are less healthy, and those of the remaining nine are unhealthy. The spatial variations of ecological health condition of the all water areas across Baiyangdian Lake are notable. The water areas in the northeast and southeast are under relatively better ecological health conditions. The ecological health conditions in the northern, central and southern water areas are deteriorated to some extent while those in the western water area, which is close to Fu River, the ecological health

**基金项目:** 国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51121003); 国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2008ZX07209-009); 国家自然科学基金资助项目(51279009)

**收稿日期:** 2012-07-05; **修订日期:** 2013-01-31

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zfyang@bnu.edu.cn

conditions are seriously degraded. The ecological health conditions from good to bad in spatial scale are in the following order: water areas in the northeast and southeast > water areas in the north, center and south > water areas in the west. There is close relationship between intensity of human disturbances and extent of lake health degradation. The water areas in the northeast and southeast with little human disturbances can maintain relatively natural state of the lake ecosystem with good health conditions. The dense non-point source pollution associated with aquaculture and villages is the key factor which leads to the ecological health deterioration in the northern, central and southern water areas. The western water areas have been greatly affected greatly by large amounts of pollutants from Fu River, leading to relatively worse ecological health condition. It can be seen that sewages discharged from the villages and aquaculture into the reservoir are the dominant factors resulting in ecological health degradation in Baiyangdian Lake. In comparison with the pollutants from the aquaculture and villages, there are more impacts of pollutants discharged from Fu River on the ecological health condition of Baiyangdian Lake. The results in the paper could offer foundation for further study of early warning and control of lake ecosystem health. In addition, they can provide scientific evidence for ecosystem restoration and management of Baiyangdian Lake.

**Key Words:** ecosystem health; health assessment; Baiyangdian Lake; eco-exergy

随着 20 世纪 80 年代生态系统健康概念的提出,生态系统健康评价被广泛应用于湖泊保护与管理实践过程中。与人类健康评价相似,完整的湖泊评价可以通过生态系统健康评价完成,从而为管理者分析湖泊健康退化原因和制定相应的管理规划提供便利。

各国专家学者相继开展了有关湖泊生态系统健康评价方面的研究,在热力学指标用于湖泊生态系统健康评价上取得了一定进展<sup>[1]</sup>。Jørgensen 于 1995 年提出应用能质、结构能质和生态缓冲能力从生态系统水平上衡量生态系统健康状态,并认为健康的湖泊生态系统应拥有较高的能质、结构能质和生态缓冲能力<sup>[2-3]</sup>。Xu 应用富营养化指数、多样性指数、能质、结构能质和浮游植物生态缓冲能力评价了巢湖的健康状态<sup>[4]</sup>。在此基础上,Xu 等进一步通过分析湖泊在酸化、有机杀虫剂污染、重金属铜污染和油污染胁迫下结构、功能和系统方面的响应特征,建立了一套包括湖泊生态系统结构、功能和系统三方面指标的具有普适性的湖泊生态系统健康综合评价指标体系和评价标准,并应用于巢湖。同时提出健康的湖泊生态系统不仅应具有相对较高的能质、结构能质、生态缓冲能力,还应有较高的浮游动物生物量/浮游植物生物量及较低的浮游植物生物量和浮游植物群落初级生产量<sup>[5]</sup>。胡会峰等对上述指标体系进行了简化,选择表征生态系统结构和系统方面的 8 个指标评价了青海湖 1988—1989 年的生态系统健康状态<sup>[6]</sup>。刘永等应用包含热力学指标的指标体系通过计算综合健康指数评价了滇池不同时期的生态系统健康状况<sup>[7]</sup>。胡志新等应用 Xu<sup>[4]</sup>的方法评价了太湖 15 个湖区的生态系统健康状况,并在计算能质和结构能质时,除浮游植物和浮游动物之外,还考虑了底栖动物和大型水生植物<sup>[8]</sup>。卢媛媛等和卢志娟等运用了同样的方法分别评价了武汉市多个浅水湖泊和西湖不同时期的健康状况<sup>[9-10]</sup>。

Jørgensen 指出能质、结构能质与生态缓冲能力相结合,可以反映 von Bertalanffy 和 E.P. Odum 提出的生态系统发展的性质以及 Costanza 提出的生态系统健康的 6 项描述<sup>[11]</sup>。涵盖热力学指标的指标体系能较好地反映湖泊生态系统对外界干扰的抵抗能力,使健康的表征更全面。同时,上述研究实例表明涵盖热力学指标的指标体系适用于我国湖泊生态系统健康评价。

白洋淀作为北方地区典型的草型浅水湖泊其健康状态面临严重退化的威胁,影响了当地社会经济环境的可持续发展。白洋淀健康状况受到了政府、专家学者以及公众的广泛关注,如何改善白洋淀健康受损的状态成为亟待解决的问题。目前针对白洋淀的研究大多集中在水质评价方面,仅 Xu 等应用包含能质和结构能质的指标体系评价了白洋淀的健康状态<sup>[12]</sup>。然而对于同一湖泊不同时期或不同湖区状态的比较,多指标集成健康综合指数更能直观反映健康状态的差异<sup>[13]</sup>,便于确定健康等级。本文选取 Xu 等<sup>[5]</sup>中提出的包含结构、

功能和系统三方面指标的指标体系,并应用于白洋淀生态系统进行健康评价,通过计算健康综合指数,确定 14 个水域的健康等级,为白洋淀的管理和修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白洋淀(38°43′—39°02′ N,115°38′—116°07′ E)是中国华北地区典型的草型浅水湖泊,主要位于河北省保定市安新县境内,水面面积约为 150 km<sup>2</sup>(平均水位为 7.5 m,平均水深为 2.3 m),淀区由大小不等且相互联系的 143 个淀泊组成。20 世纪 50 年代,白洋淀拥有 8 条入淀河流,水量充足,水质状况较好,且生物多样性较高。近几十年来,由于流域内社会经济发展速度较快,作为上游几百万人民生活生活排污的必经之地,白洋淀生态系统受到当地人类活动的严重影响,入淀水量逐年减少,目前仅有府河携带大量排污物入淀,加之淀内居民人口的增加及水产养殖规模的扩大,大量污水排放造成大部分水域处于草型富营养化状态,仅少数水产养殖规模较大的水域处于藻型富营养化状态。大型水生植物(包括挺水植物、沉水植物、漂浮植物和浮叶植物)过量生长加速了沼泽化进程,对湖泊生态系统健康、当地的可持续发展与管理产生了严重的负面影响。

1.2 数据来源

本文用于健康评价指标计算的数据来源于实地监测。遵循与国控水质监测点相一致的原则,并参考以往生态调查过程中选取的采样点,在白洋淀共布设 14 个采样点。采样点基本情况介绍见表 1,分布示意图见图 1。2009 年 8 月至 2010 年 7 月,对上述测点进行了 6 次采样。监测项目包括物理化学指标(TN、TP、Chla)、生物指标(浮游植物、浮游动物、底栖动物及大型水生植物的生物量)及有机碎屑含量。上述指标的分析方法见《湖泊生态调查观测与分析》<sup>[14]</sup>。各水域实地监测的主要生物及化学数据见表 2。

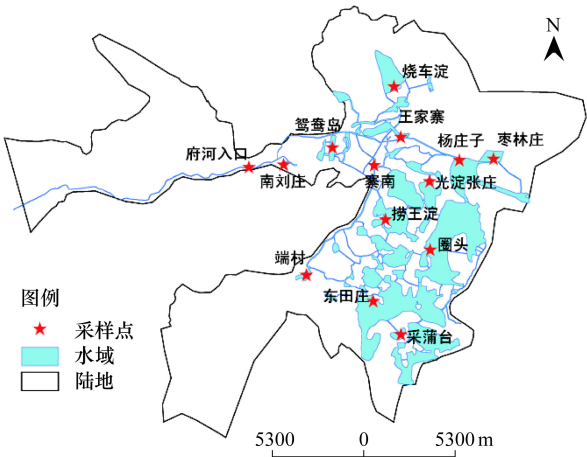


图 1 白洋淀采样点分布示意图  
Fig.1 The sampling sites in Baiyangdian Lake

表 1 白洋淀采样点基本情况介绍  
Table 1 Introduction of sampling sites in Baiyangdian Lake

| 序号<br>No. | 采样点<br>Sampling sites | 经纬度<br>Coordinate        | 描述<br>Description        |
|-----------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1         | 烧车淀                   | N 38.94065° E 115.99974° | 少量水产养殖活动,沉水植物较多          |
| 2         | 王家寨                   | N 38.9177° E 116.01142°  | 周边有村庄农田分布,少量水产养殖活动       |
| 3         | 杨庄子                   | N 38.908° E 116.04733°   |                          |
| 4         | 枣林庄                   | N 38.90205° E 116.08038° | 人为干扰较少,水体透明度较高,有大量沉水植物分布 |
| 5         | 鸳鸯岛                   | N 38.91114° E 115.95599° | 位于白洋淀旅游区,人为干扰强度较大        |
| 6         | 南刘庄                   | N 38.90449° E 115.93478° | 周边有村庄分布,受府河携带污染物影响较大     |
| 7         | 府河入口                  | N 38.90437° E 115.9238°  |                          |
| 8         | 寨南                    | N 38.90376° E 115.98805° | 有水产养殖活动分布                |
| 9         | 光淀张庄                  | N 38.89491° E 116.02956° | 周边有村庄分布                  |
| 10        | 捞王淀                   | N 38.87511° E 115.99689° | 围栏养鱼区                    |
| 11        | 圈头                    | N 38.86037° E 116.02824° | 水产养殖密集区                  |
| 12        | 端村                    | N 38.84698° E 115.95057° |                          |
| 13        | 东田庄                   | N 38.83492° E 115.99138° | 周边有村庄农田分布                |
| 14        | 采蒲台                   | N 38.82489° E 116.01023° | 人为干扰较少,少量水产养殖活动,大量水生植物分布 |

表 2 白洋淀各水域主要生物及化学监测数据

Table 2 Biological and chemical data of water areas in Baiyangdian Lake

| 采样点<br>Sampling sites | 总氮<br>Total nitrogen<br>/(mg/L) | 总磷<br>Total phosphorus<br>/(mg/L) | 浮游植物生物量<br>phytoplankton biomass<br>/(mg/L) | 浮游动物生物量<br>Zooplankton biomass<br>/(mg/L) | 大型水生植物生物量<br>Macrophyte biomass<br>/(g/m <sup>2</sup> ) |
|-----------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 烧车淀                   | 4.724                           | 0.135                             | 46.29                                       | 0.384                                     | 479                                                     |
| 王家寨                   | 2.858                           | 0.355                             | 41.20                                       | 0.915                                     | 270                                                     |
| 杨庄子                   | 1.865                           | 0.109                             | 53.92                                       | 0.645                                     | 346                                                     |
| 枣林庄                   | 1.304                           | 0.035                             | 8.48                                        | 0.132                                     | 625                                                     |
| 鸳鸯岛                   | 13.615                          | 1.113                             | 62.96                                       | 1.512                                     | 510                                                     |
| 南刘庄                   | 17.818                          | 1.544                             | 12.45                                       | 0.141                                     | 442                                                     |
| 府河入口                  | 18.113                          | 1.612                             | 10.50                                       | 0.096                                     | 140                                                     |
| 寨南                    | 3.218                           | 0.290                             | 20.77                                       | 0.654                                     | 443                                                     |
| 光淀张庄                  | 1.543                           | 0.046                             | 17.10                                       | 0.321                                     | 450                                                     |
| 捞王淀                   | 4.792                           | 0.065                             | 22.25                                       | 0.174                                     | 405                                                     |
| 圈头                    | 4.545                           | 0.061                             | 17.27                                       | 0.783                                     | 374                                                     |
| 端村                    | 4.769                           | 0.182                             | 114.97                                      | 0.252                                     | 519                                                     |
| 东田庄                   | 2.237                           | 0.045                             | 19.07                                       | 0.315                                     | 424                                                     |
| 采蒲台                   | 1.896                           | 0.046                             | 11.32                                       | 0.732                                     | 485                                                     |

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 评价指标

本文针对白洋淀富营养化的特点,根据 Xu 等<sup>[5]</sup>提出的表征湖泊健康的指标体系,选择结构指标:浮游植物生物量( $BA$ )和浮游动物生物量/浮游植物生物量( $BZ/BA$ );功能指标:浮游植物群落初级生产量( $P$ );系统指标:能质( $Ex$ )、结构能质( $Ex_{st}$ )和浮游植物对 TP 的缓冲能力( $\beta_p$ )共 6 项指标进行白洋淀健康评价。

能质( $Ex$ )作为系统水平的生态指标,表示生态系统的发展程度,即生态系统是如何发展的,以及整个生态系统免于退化的能力<sup>[11, 15]</sup>,被认为是表征湖泊生态系统健康状态和发展水平的最佳指标<sup>[16, 17]</sup>。Jørgensen 等认为能质主要是储存在生物量中的化学能和基因中的信息<sup>[18]</sup>,计算公式为:

$$Ex = \sum_{i=1}^n \beta_i C_i \quad (1)$$

式中, $\beta_i$ 为第  $i$  种生物的权重因子; $C_i$ 为第  $i$  种生物的生物量(mg/L);一般 1 g 有机碎屑燃烧释放 18.7 kJ 能量,通过生物权重因子将不同生物转换成有机碎屑的等价物(kJ/L)。

结构能质定义为能质除以总生物量,反映生态系统利用资源的能力,计算公式为<sup>[2-3]</sup>:

$$Ex_{st} = \sum_{i=1}^n \beta_i C_i / C_t \quad (2)$$

式中, $Ex_{st}$ 单位是 kJ/mg; $C_t$ 为各种生物的生物量之和(mg/L)。

在计算能质和结构能质的过程中,考虑的生物组分包括浮游植物、浮游动物、底栖动物和大型水生植物,各类生物组分的权重因子(表 3)是根据不同种类生物基因计算得出的,不会受营养状态和健康状态变化的影响。

生态缓冲能力用于表征生态系统对外部变化(如营养盐浓度变化、光照、温度等)的响应<sup>[20]</sup>,反映生态系统抵抗外界压力的能力。可根据需要,组合任一状态变量和外部变量进行计算。文中浮游植物对 TP 缓冲能力的计算公式为:

$$\beta_{TP-A} = \frac{\partial(TP)}{\partial(A)} \quad (3)$$

式中, $\partial(TP)$ 和 $\partial(A)$ 分别表示 TP 浓度和浮游植物生物量变化的绝对值。



表 3 各类生物组分的权重因子<sup>[19]</sup>  
Table 3 Weighting factors of organisms<sup>[19]</sup>

| 生物组分 Organisms             |                                         | 权重因子 Weighting factors $\beta_i$ |
|----------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------|
| 有机碎屑 Detritus              |                                         | 1                                |
| 浮游植物 Phytoplankton (algae) |                                         | 20                               |
| 浮游动物 Zooplankton           | 原生动物的 Protozoa                          | 39                               |
|                            | 轮虫 Rotifera                             | 163                              |
|                            | 甲壳类 Crustaceans (Cladocera and copepod) | 232                              |
|                            | 环节动物 Annelida                           | 133                              |
| 底栖动物 Benthonic animals     | 软体动物 Mollusca                           | 310                              |
|                            | 昆虫类 Insecta                             | 167                              |
|                            | 无种子维管束植物 Seedless vascular plants       | 158                              |
| 大型水生植物 Macrophytes         | 开花植物 Flowering plants                   | 393                              |

1.3.2 健康综合指数

参考刘永等<sup>[7]</sup>用于计算综合健康指数的方法, 首先将评价指标归一化, 再分别乘以相应的权重后求和, 即得到健康综合指数, 计算公式如下:

$$I_{CH} = \sum_{i=1}^n I_i \times W_i \tag{4}$$

式中,  $I_{CH}$  表示健康综合指数;  $I_i$  为第  $i$  种指标的归一化值;  $W_i$  表示指标  $i$  的权重, 通过熵权法<sup>[21]</sup> 计算得到。各健康评价指标的权重见表 4。

表 4 健康评价指标的权重  
Table 4 Weights of health assessment indicators

| 浮游植物生物量<br>Phytoplankton biomass | 浮游动物生物量/<br>浮游植物生物量<br>Ratio of zooplankton to<br>phytoplankton biomass | 浮游植物群落<br>初级生产量<br>Phytoplankton primary<br>production | 能质<br>Eco-exergy | 结构能质<br>Structural eco-exergy | 浮游植物对 TP 的<br>缓冲能力<br>Ecological buffer capacity<br>to total phosphorus for<br>phytoplankton |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0.17                             | 0.18                                                                    | 0.15                                                   | 0.15             | 0.18                          | 0.17                                                                                         |

根据 Jørgensen<sup>[2]</sup> 和 Xu 等<sup>[5]</sup>, 健康的湖泊生态系统应具有相对较高的浮游动物生物量/浮游植物生物量、能质、结构能质、生态缓冲能力及较低的浮游植物生物量和浮游植物群落初级生产量。然而, 根据白洋淀实地监测数据, 南刘庄和府河入口水域营养盐浓度较高, 但浮游植物生物量和群落初级生产量较低, 处于非响应状态, 表明较低的浮游植物生物量和浮游植物群落初级生产量并不能指示健康状态。此外, 作为富营养化的草型湖泊, 白洋淀的大型水生植物生物量较高, 处于过度生长状态。根据能质计算公式, 大型水生植物较高的生物量和权重因子造成能质数值较高, 表明较高的能质亦不能指示健康状态。因此, 在应用上述指标集成健康综合指数时, 以生态状况相对较好的枣林庄水域的指标数值为基准, 越接近基准健康状态越好的原则进行归一化处理。浮游植物生物量 ( $BA$ )、浮游植物群落初级生产量 ( $P$ ) 和能质 ( $Ex$ ) 属于固定型指标, 即越接近某一数值, 健康状态越好。固定型指标的归一化计算公式为:

$$I_i = \frac{\text{Min} |x_i - x_{\text{opt}}|}{|x_i - x_{\text{opt}}|} \tag{5}$$

式中,  $x_i$  为指标值;  $x_{\text{opt}}$  为枣林庄水域的指标数值。

浮游动物生物量/浮游植物生物量 ( $BZ/BA$ )、结构能质 ( $Ex_{\text{st}}$ ) 和浮游植物对 TP 的缓冲能力 ( $\beta_p$ ) 属于正向型指标, 即指标数值越大, 健康状态越好。正向型指标的归一化计算公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - x_{\text{min}})}{(x_{\text{max}} - x_{\text{min}})} \tag{6}$$



式中,  $x_i$  为指标值;  $x_{\max}$  和  $x_{\min}$  分别为第  $i$  种指标在各采样点中的最大值和最小值。

1.3.3 评价标准

本文参考了张远等<sup>[22]</sup>应用 B-IBI 进行健康评价的标准的设定方法,选择受评水域中位于前三位的  $I_{CH}$  平均值作为亚健康等级划分的临界点,即若某水域的  $I_{CH}$  值大于这一数值时,表示该水域处于亚健康状态;对于小于这一数值的分布范围进行二等分,确定出不健康和病态 2 个等级划分的临界值。白洋淀健康评价标准见表 5。

表 5 白洋淀健康评价标准  
Table 5 Health assessment standards for Baiyangdian Lake

| 健康<br>Healthy | 亚健康<br>Sub-healthy | 不健康<br>Unhealthy | 病态<br>Sick |
|---------------|--------------------|------------------|------------|
| >1.921        | 1.344—1.921        | 0.766—1.344      | <0.766     |

2 结果分析

应用上述方法计算白洋淀 14 个水域的健康评价指标及健康综合指数(图 2),并根据健康评价标准确定各水域健康等级(表 6 与图 3)。受评的 14 个水域中,仅枣林庄和采蒲台 2 个水域处于亚健康状态,烧车淀、光淀张庄和东田庄 3 个水域处于不健康状态,其余 9 个水域均处于病态,表明白洋淀大部分水域健康受损较为严重。从健康状态的空间分布来看,位于东北和东南部的水域健康状态相对较好;北部、中部和南部水域健康状态次之;西部水域健康状态相对较差。

表 6 白洋淀健康评价结果  
Table 6 Health assessment results for Baiyangdian Lake

| 水域<br>Water areas | 浮游植物<br>生物量<br>Phytoplankton biomass<br>/(mg/L) | 浮游动物生物量/浮游植物生物量<br>Ratio of zooplankton to phytoplankton biomass | 浮游植物群落初级生产量<br>Phytoplankton primary production<br>/(g·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> ) | 能质<br>Eco-exergy<br>/(kJ/L) | 结构能质<br>Structural eco-exergy<br>/(kJ/mg) | 浮游植物对 TP 的缓冲能力<br>Ecological buffer capacity to total phosphorus for phytoplankton | 健康综合指数<br>Comprehensive health index | 健康等级<br>Health classes |
|-------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| 烧车淀               | 46.29                                           | 0.008                                                            | 1.694                                                                                     | 4062                        | 6.22                                      | 0.007                                                                              | 0.790                                | 不健康                    |
| 王家寨               | 41.20                                           | 0.022                                                            | 1.403                                                                                     | 2345                        | 6.35                                      | 0.060                                                                              | 0.318                                | 病态                     |
| 杨庄子               | 53.92                                           | 0.012                                                            | 1.829                                                                                     | 2868                        | 6.33                                      | 0.012                                                                              | 0.551                                | 病态                     |
| 枣林庄               | 8.48                                            | 0.016                                                            | 0.312                                                                                     | 4848                        | 7.15                                      | 0.895                                                                              | 1.596                                | 亚健康                    |
| 鸳鸯岛               | 62.96                                           | 0.024                                                            | 2.401                                                                                     | 3712                        | 6.05                                      | 0.042                                                                              | 0.346                                | 病态                     |
| 南刘庄               | 12.45                                           | 0.011                                                            | 0.426                                                                                     | 2984                        | 6.18                                      | 0.018                                                                              | 0.293                                | 病态                     |
| 府河入口              | 10.50                                           | 0.009                                                            | 0.670                                                                                     | 2131                        | 6.23                                      | 0.645                                                                              | 0.189                                | 病态                     |
| 寨南                | 20.77                                           | 0.031                                                            | 0.977                                                                                     | 3878                        | 6.7                                       | 0.062                                                                              | 0.445                                | 病态                     |
| 光淀张庄              | 17.10                                           | 0.019                                                            | 0.568                                                                                     | 4004                        | 6.72                                      | 0.025                                                                              | 0.938                                | 不健康                    |
| 捞王淀               | 22.25                                           | 0.008                                                            | 1.148                                                                                     | 3012                        | 6.62                                      | 0.012                                                                              | 0.395                                | 病态                     |
| 圈头                | 17.27                                           | 0.045                                                            | 0.699                                                                                     | 2857                        | 6.35                                      | 0.039                                                                              | 0.326                                | 病态                     |
| 端村                | 114.97                                          | 0.002                                                            | 2.958                                                                                     | 3904                        | 6.27                                      | 0.004                                                                              | 0.476                                | 病态                     |
| 东田庄               | 19.07                                           | 0.017                                                            | 0.643                                                                                     | 3129                        | 6.8                                       | 0.009                                                                              | 0.798                                | 不健康                    |
| 采蒲台               | 11.32                                           | 0.065                                                            | 0.498                                                                                     | 4261                        | 6.99                                      | 0.686                                                                              | 1.497                                | 亚健康                    |

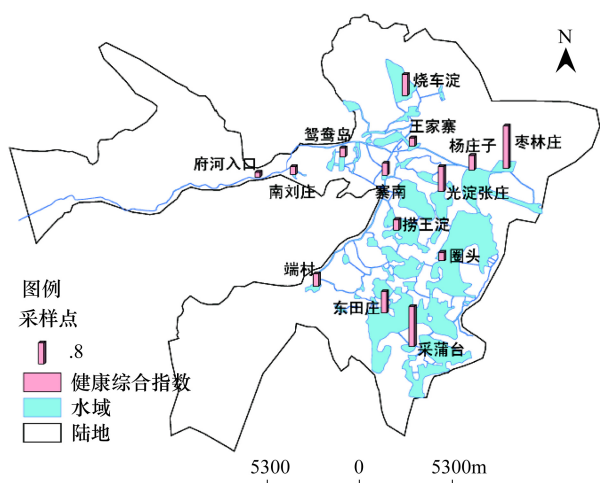


图2 白洋淀 14 个水域的健康综合指数

Fig.2 Health comprehensive index of fourteen water areas in Baiyangdian Lake

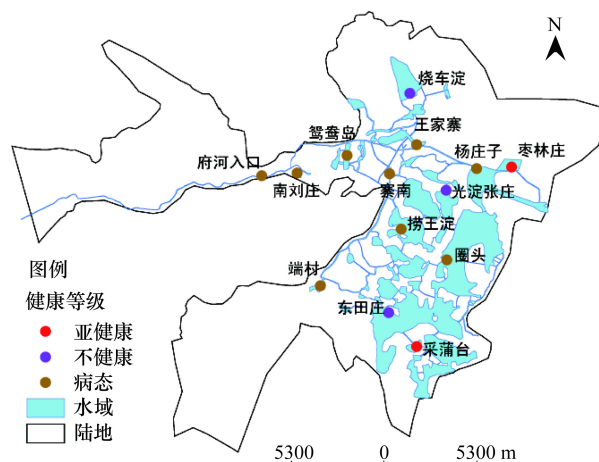


图3 白洋淀 14 个水域的健康等级

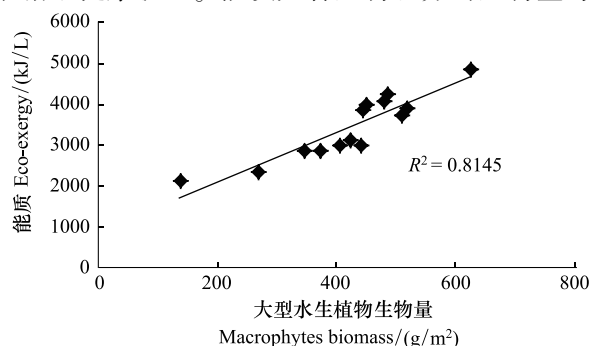
Fig.3 Health classes of fourteen water areas in Baiyangdian Lake

结合各水域人类干扰活动的分布可知,白洋淀健康退化的程度与人类干扰强度密切相关。枣林庄和采蒲台水域受人类活动干扰相对较少,健康状态相对较好,处于亚健康状态;受淀内及周边村庄居民生活污水直接排放的影响,烧车淀、光淀张庄和东田庄水域处于不健康状态;端村、圈头和捞王淀位于水产养殖密集分布区,网箱养殖投饵造成水体富营养化,水域健康受损严重,处于病态;鸳鸯岛水域靠近府河入口,同时位于淀内的旅游区,在旅游和府河入淀污水的综合影响下,水域处于病态;杨庄子、王家寨和寨南水域村庄分布密集,同时有部分水产养殖活动,因此水域健康亦受严重损害,处于病态。南刘庄和府河入口长年受府河入淀污水的影响,水体严重富营养化,营养盐浓度超出了适宜浮游生物生长的范围,造成浮游生物生物量下降,健康退化最为严重。

### 3 讨论

在白洋淀健康评价过程中,较高的能质和较低的浮游植物生物量、浮游植物群落初级生产量不能指示白洋淀的健康状态。由于府河常年携带高营养盐浓度的污水进入白洋淀的西部水域,使水域的 TN 和 TP 浓度远大于水生生物生长的适宜浓度,生物生长受到抑制,造成浮游植物生物量和浮游植物群落初级的生产量较低。这种类型水域处于非响应状态,即水域营养盐浓度较高但浮游植物生物量和群落初级生产量较低,所以,较低的浮游植物生物量和浮游植物群落初级生产量并不能指示健康状态。能质是各生物组分的生物量与权重因子乘积之和。文中参与能质计算的生物组分中大型水生植物的生物量和权重因子都相对较高, Xu 等相关分析结果表明能质与大型水生植物生物量成正相关(图4)<sup>[12]</sup>。白洋淀处于大型水生植物过量生长的状态,大部分水域大型水生植物生物量过高,即拥有较高的能质,但生态状况并不佳,因此,较高的能质亦不能指示健康状态。

应用 14 个水域的生态监测数据和健康评价结果初步建立了水质指标 TN、TP 浓度与健康综合指数的定量关系(图5)。应用定量关系,管理者可通过监测淀区 TN、TP 浓度的变化获知健康状态的变化趋势或得到维持相对健康状态对应的 TN、TP 浓度,为制定白洋淀生

图4 白洋淀能质与大型水生植物生物量的相关关系<sup>[12]</sup>Fig.4 The correlation between eco-exergy and macrophytes biomass in Baiyangdian Lake<sup>[12]</sup>

态系统修复措施提供一定依据。然而,上述定量关系仅通过分析 14 个水域的数据得到,日后可增加监测点位以提高数据质量或建立生态模型,使水环境状况与健康状态的定量关系更为准确。

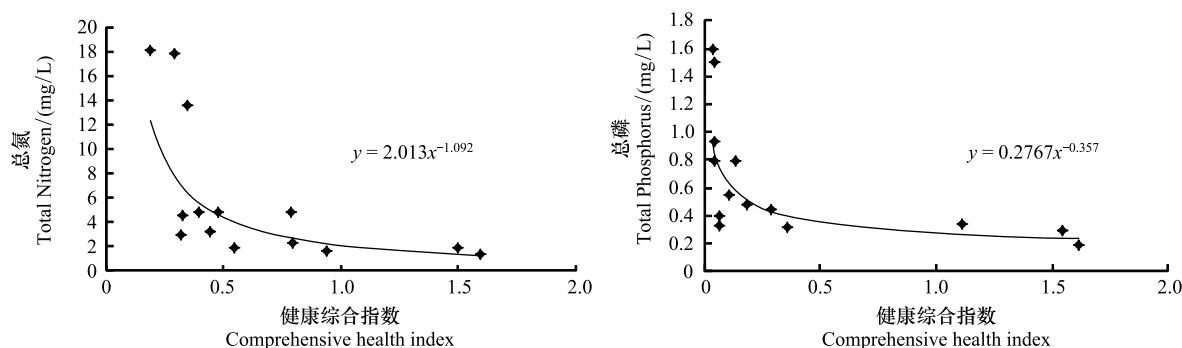


图 5 白洋淀 TN、TP 浓度与健康综合指数的关系

Fig. 5 The relationship between the concentrations of TN, TP and health comprehensive index in Baiyangdian Lake

本文与 Xu 等<sup>[12]</sup>均应用包含能质和结构能质的指标体系评价了白洋淀 14 个水域的健康状态。与 Xu 等<sup>[12]</sup>相比,本文将各评价指标集成健康综合指数并确定健康等级,更能直观反映健康状态的差异,适用于同一湖泊不同时期或不同湖区健康状态的比较,同时便于建立水环境状况与健康状态的定量关系,为湖泊管理者制定修复措施提供依据。

#### 4 结论

本文基于实地监测,计算了浮游植物生物量(BA)、浮游动物生物量/浮游植物生物量(BZ/BA)、浮游植物群落初级生产量(P)、能质( $Ex$ )、结构能质( $Ex_{st}$ )和浮游植物对 TP 的缓冲能力( $\beta_p$ ),并集成健康综合指数确定了白洋淀 14 个水域的健康等级。评价结果表明白洋淀大部分水域健康受损较为严重。除东北和东南部的水域健康状态相对较好外,其它水域健康均受到不同程度的损害,超过 60%的水域处于病态。府河和淀内居民生活及水产养殖污水排放是造成白洋淀健康受损的主要原因,且府河对白洋淀健康状态影响相对较大。通过将各评价指标集成健康综合指数并确定健康等级,更能直观反映各水域健康状态的差异,评价结果可为进一步研究湖泊生态系统健康预警和调控提供基础,为白洋淀生态系统的管理和修复提供一定的科学依据。

#### References:

- [ 1 ] Zhang J J, Gurkan Z, Jørgensen S E. Application of eco-exergy for assessment of ecosystem health and development of structurally dynamic models. *Ecological Modelling*, 2010, 221(4): 693-702.
- [ 2 ] Jørgensen S E. Exergy and ecological buffer capacities as measures of ecosystem health. *Ecosystem Health*, 1995, 1(3): 150-160.
- [ 3 ] Jørgensen S E. The application of ecological indicators to assess the ecological condition of a lake. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 1995, 1(3): 177-182.
- [ 4 ] Xu F L. Ecosystem health assessment of Lake Chao, a shallow eutrophic Chinese lake. *Lakes and Reservoirs: Research and Management*, 1996, 2(1/2): 101-109.
- [ 5 ] Xu F L, Tao S, Dawson R W, Li P G, Cao J. Lake ecosystem health assessment: indicators and methods. *Water Research*, 2001, 35(13): 3157-3167.
- [ 6 ] Hu H F, Xu F L, Zhao Z Y, Zhan W. An assessment of ecosystem health for Qinghai Lake. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2003, 16(3): 71-75.
- [ 7 ] Liu Y, Guo H C, Dai Y L, Lu Y F. An assessing approach for lake ecosystem health. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(4): 723-729.
- [ 8 ] Hu Z X, Hu W P, Gu X H, Chen Y W, Ji J. Assessment of ecosystem health in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(3): 256-262.
- [ 9 ] Lu Y Y, Wu H J, Lü J, Zhang S H. Evaluating ecosystem health of shallow lakes in Wuhan. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(9): 66-68.
- [ 10 ] Lu Z J, Pei H P, Wang Y. Preliminary exploration of ecosystem health assessment for Lake west. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(6): 802-805.

- [11] Jørgensen S E. Application of holistic thermodynamic indicators. *Ecological Indicators*, 2006, 6(1): 24-29.
- [12] Xu F, Yang Z F, Chen B, Zhao Y F. Ecosystem health assessment of the plant-dominated Baiyangdian Lake based on eco-exergy. *Ecological Modelling*, 2011, 222(1): 201-209.
- [13] Zhao Z Y, Xu F L, Zhan W, Hao J Y, Zhang Y, Zhao S S, Hu W P, Tao S. A quantitative method for assessing lake ecosystem health. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1466-1474.
- [14] Huang X F. Survey, Observation and Analysis of Lake Ecology. Beijing: Standards Press of China, 1999: 27-105.
- [15] Jørgensen S E, Nielsen S N. Application of exergy as thermodynamic indicator in ecology. *Energy*, 2007, 32(5): 673-685.
- [16] Ludovisi A, Poletti A. Use of thermodynamic indices as ecological indicators of the development state of lake ecosystems 2. Exergy and specific exergy indices. *Ecological Modelling*, 2003, 159(2/3): 223-238.
- [17] Silow E A, In-Hye O. Aquatic ecosystem assessment using exergy. *Ecological Indicators*, 2004, 4(3): 189-198.
- [18] Jørgensen S E, Nielsen S N, Mejer H. Emergy, environ, exergy and ecological modelling. *Ecological Modelling*, 1995, 77(2/3): 99-109.
- [19] Jørgensen S E, Ladegaard N, Debeljak M, Marques J C. Calculations of exergy for organisms. *Ecological Modelling*, 2005, 185(2/4): 165-175.
- [20] Jørgensen S E, Mejer H. Ecological buffer capacity. *Ecological Modelling*, 1977, 3(1): 39-61.
- [21] Zhou W H, Wang L S. An entropy weight approach on the fuzzy synthetic assessment of Beijing urban ecosystem health, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(12): 3244-3251.
- [22] Zhang Y, Xu C B, Ma X P, Zhang Z, Wang J C. Biotic integrity index and criteria of benthic organisms in Liao River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(6): 919-927.

#### 参考文献:

- [6] 胡会峰, 徐福留, 赵臻彦, 詹巍. 青海湖生态系统健康评价. *城市环境与城市生态*, 2003, 16(3): 71-75.
- [7] 刘永, 郭怀成, 戴永立, 陆轶峰. 湖泊生态系统健康评价方法研究. *环境科学学报*, 2004, 24(4): 723-729.
- [8] 胡志新, 胡维平, 谷孝鸿, 陈宇炜, 季江. 太湖湖泊生态系统健康评价. *湖泊科学*, 2005, 17(3): 256-262.
- [9] 卢媛媛, 邬红娟, 吕晋, 张绍浩. 武汉市浅水湖泊生态系统健康评价. *环境科学与技术*, 2006, 29(9): 66-68.
- [10] 卢志娟, 裴洪平, 汪勇. 西湖生态系统健康评价初探. *湖泊科学*, 2008, 20(6): 802-805.
- [13] 赵臻彦, 徐福留, 詹巍, 郝君宜, 张颖, 赵珊珊, 胡维平, 陶澍. 湖泊生态系统健康定量评价方法. *生态学报*, 2005, 25(6): 1466-1474.
- [14] 黄祥飞. 湖泊生态调查观测与分析. 北京: 中国标准出版社, 1999: 27-105.
- [21] 周文华, 王如松. 基于熵权的北京城市生态系统健康模糊综合评价. *生态学报*, 2005, 25(12): 3244-3251.
- [22] 张远, 徐成斌, 马溪平, 张铮, 王俊臣. 辽河流域河流底栖动物完整性评价指标与标准. *环境科学学报*, 2007, 27(6): 919-927.



# ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33, No.21 Nov., 2013 (Semimonthly)

## CONTENTS

### Frontiers and Comprehensive Review

- Gross ecosystem product: theory framework and case study ..... OUYANG Zhiyun, ZHU Chunquan, YANG Guangbin, et al (6747)
- Advances in impacts of climate change on infectious diseases outbreak ..... LI Guodong, ZHANG Junhua, JIAO Gengjun, et al (6762)
- Ecology of aerobic methane oxidizing bacteria (methanotrophs) ..... YUN Juanli, WANG Yanfen, ZHANG Hongxun (6774)
- Nitrogen deposition and *Leymus chinensis* leaf chlorophyll content in Inner Mongolian grassland .....  
..... ZHANG Yunhai, HE Nianpeng, ZHANG Guangming, et al (6786)
- Worldwide distribution and multivariate similarity clustering analysis of spiders .....  
..... SHEN Xiaocheng, ZHANG Baoshi, ZHANG Feng, et al (6795)
- The influence of wind direction on pollen-mediated gene flow in transgenic insect-resistant cotton .....  
..... ZHU Jialin, HE Juan, NIU Jianqun, et al (6803)

### Autecology & Fundamentals

- Ecological characteristics of benthic diatoms, protozoa and meiobenthos in the sediments of the Changjiang Estuary and East China  
Sea in spring ..... MENG Zhaoxui, XU Kuidong (6813)
- Macrobenthic functional groups at the reclamation and natural tidal flats of Hengsha East Shoal, the Estuary of Changjiang River .....  
..... LV Weiwei, MA Chang'an, YU Ji, et al (6825)
- Enrichment and ecological risk of heavy metal in soils and dominant plants in the riparian of the Fenghe River .....  
..... YANG Yang, ZHOU Zhengchao, WANG Huanhuan, et al (6834)
- Effects of salinity and exogenous substrates on the decomposition and transformation of soil organic carbon in the Yellow River  
Delta ..... LI Ling, QIU Shaojun, TAN Feifei, et al (6844)
- Effects of short-term dark chilling on leaves carbon and nitrogen metabolism and involved activities of enzymes in mangrove *Kandelia  
obovata* seedling ..... ZHENG Chunfang, LIU Weicheng, CHEN Shaobo, et al (6853)
- Preliminary evaluation on tolerance to phosphorous deficiency of 32 cultivars of cut chrysanthemum .....  
..... LIU Peng, CHEN Sumei, FANG Weimin, et al (6863)
- Effects of age and environmental conditions on accumulation of heavy-metals Cd and Cu in *Tegillarca granosa* .....  
..... WANG Zhaogen, WU Hongxi, CHEN Xiaoxiao, et al (6869)
- Effects of Chinese gallnut on photosynthetic characteristics and total nitrogen content of *Rhus chinensis* .....  
..... LI Yang, YANG Zixiang, CHEN Xiaoming, et al (6876)
- The characterization of glyphosate degradation by *Burkholderia multivorans* WS-FJ9 ..... LI Guanxi, WU Xiaoqin, YE Jianren (6885)
- Electroantennographic and behavioural responses of scarab beetles to *Ricinus communis* leaf volatiles .....  
..... LI Weizheng, YANG Lei, SHEN Xiaowei, et al (6895)

### Population, Community and Ecosystem

- Ecosystem health assessment in Baiyangdian Lake ..... XU Fei, ZHAO Yanwei, YANG Zhifeng, et al (6904)
- Characteristics of macrobenthic communities in mangrove wetlands along the waterways of North Hezhou, Zhuhai, South China .....  
..... WANG Hui, ZHONG Shan, FANG Zhanqiang (6913)
- The interaction between components of ecosystem respiration in typical forest and grassland ecosystems .....  
..... ZHU Xianjin, YU Guirui, WANG Qiufeng, et al (6925)
- Effects of thinning on macro fungi and their relationship with litter decomposition in *Pinus tabulaeformis* plantations .....  
..... CHEN Xiao, BAI Shulan, LIU Yong, et al (6935)

- Beta diversity of plant communities in Baishanzu Nature Reserve ..... TAN Shanshan, YE Zhenlin, YUAN Liubin, et al (6944)
- Effect of Oxytetracycline (OTC) on the activities of enzyme and microbial community metabolic profiles in composting .....  
 ..... CHEN Zhixue, GU Jie, GAO Hua, et al (6957)

### Landscape, Regional and Global Ecology

- Variations in leaf anatomy of *Larix gmelinii* reflect adaptation of its photosynthetic capacity to climate changes .....  
 ..... JI Zijing, QUAN Xiankui, WANG Chuankuan (6967)
- The studying of key ecological factors and threshold of landscape evolution in Yancheng Coastal wetland .....  
 ..... ZHANG Huabing, LIU Hongyu, LI Yufeng, et al (6975)
- Eco-physiological response of *Phragmites communis* to water table changes in the Horqin Sand Land .....  
 ..... MA Yunhua, ZHANG Tonghui, LIU Xinping (6984)
- Improvement of snowmelt implementation in the SWAT hydrologic model ... YU Wenjun, NAN Zhuotong, ZHAO Yanbo, et al (6992)
- Responses of lake fluctuation to climate change in Horqin Sandy Land .....  
 ..... CHANG Xueli, ZHAO Xueyong, WANG Wei, et al (7002)
- Water ecology and fractal characteristics of soil particle size distribution of three typical vegetations in Shell Island .....  
 ..... XIA Jiangbao, ZHANG Shuyong, WANG Rongrong, et al (7013)
- Spatio-temporal distribution of epilithic algal chlorophyll a in relation to the physico-chemical factors of Gufu River in Three Gorges Reservoir ..... WU Shuyuan, GE Jiwen, MIAO Wenjie, et al (7023)

### Resource and Industrial Ecology

- Graphic analysis of spatio-temporal effect for vegetation disturbance caused by coal mining: a case of Datong Coal Mine Area .....  
 ..... HUANG Yi, WANG Yunjia, LI Xiaoshun, et al (7035)

# 《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 余新晓

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 21 期 (2013 年 11 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 21 (November, 2013)

|               |                                                                                                                    |                 |                                                                                                                                                                                   |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 编 辑           | 《生态学报》编辑部<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085<br>电话:(010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>shengtaixuebao@rcees.ac.cn | Edited by       | Editorial board of<br>ACTA ECOLOGICA SINICA<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China<br>Tel: (010)62941099<br>www.ecologica.cn<br>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<br>中国科学院生态环境研究中心<br>地址:北京海淀区双清路 18 号<br>邮政编码:100085                                                        | Sponsored by    | Ecological Society of China<br>Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS<br>Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China                                  |
| 出 版           | 科 学 出 版 社<br>地址:北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717                                                                       | Published by    | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                 |
| 印 刷           | 北京北林印刷厂                                                                                                            | Printed by      | Beijing Bei Lin Printing House,<br>Beijing 100083, China                                                                                                                          |
| 发 行           | 科 学 出 版 社<br>地址:东黄城根北街 16 号<br>邮政编码:100717<br>电话:(010)64034563<br>E-mail: journal@cspg.net                         | Distributed by  | Science Press<br>Add: 16 Donghuangchenggen North<br>Street, Beijing 100717, China<br>Tel: (010)64034563<br>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<br>地址:北京 399 信箱<br>邮政编码:100044                                                                         | Foreign         | China International Book Trading<br>Corporation<br>Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China                                                                                         |
| 广告经营<br>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