

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第3期 Vol.33 No.3 **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 3 期 2013 年 2 月 (半月刊)

目 次

生态系统服务功能模拟与管理

- 保障自然资本与人类福祉:中国的创新与影响 Gretchen C. Daily, 欧阳志云, 郑 华, 等 (669)
- 建立我国生态补偿机制的思路与措施 欧阳志云, 郑 华, 岳 平 (686)
- 区域生态合作机制下的可持续农户生计研究——以“稻改旱”项目为例 梁义成, 刘 纲, 马东春, 等 (693)
- 生态系统服务功能管理研究进展 郑 华, 李屹峰, 欧阳志云, 等 (702)
- 白洋淀流域生态系统服务评估及其调控 白 杨, 郑 华, 庄长伟, 等 (711)
- 汶川地震灾区生物多样性热点地区分析 徐 佩, 王玉宽, 杨金凤, 等 (718)
- 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例 李屹峰, 罗跃初, 刘 纲, 等 (726)
- 森林生态效益税对陕西省产业价格水平的影响 黎 洁, 刘峥男, 韩秀华 (737)
- 海南岛生态系统土壤保持功能空间特征及影响因素 饶恩明, 肖 燧, 欧阳志云, 等 (746)
- 居民对文化林生态系统服务功能的认知与态度 高 虹, 欧阳志云, 郑 华, 等 (756)
- 青海省三江源自然保护区生态移民补偿标准 李屹峰, 罗玉珠, 郑 华, 等 (764)
- 张家界武陵源风景区自然景观价值评估 成 程, 肖 燧, 欧阳志云, 等 (771)
- 国家生态保护重要区域植被长势遥感监测评估 侯 鹏, 王 桥, 房 志, 等 (780)
- 都江堰市水源涵养功能空间格局 傅 斌, 徐 佩, 王玉宽, 等 (789)
- 汶川地震重灾区生态系统碳储存功能空间格局与地震破坏评估 彭 怡, 王玉宽, 傅 斌, 等 (798)

前沿理论与学科综述

- “波特假说”——生态创新与环境管制的关系研究述评 董 颖, 石 磊 (809)
- 生态环境保护与福祉 李惠梅, 张安录 (825)
- 丛枝菌根真菌最新分类系统与物种多样性研究概况 王宇涛, 辛国荣, 李韶山 (834)

个体与基础生态

- “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨 蒋 冲, 王 飞, 刘思洁, 等 (844)
- 内蒙古荒漠草原主要草食动物食性及其营养生态位 刘贵河, 王国杰, 汪诗平, 等 (856)
- 基于面向对象及光谱特征的植被信息提取与分析 崔一娇, 朱 琳, 赵力娟 (867)
- 桉树叶片光合色素含量高光谱估算模型 张永贺, 陈文惠, 郭乔影, 等 (876)
- 枫杨幼苗对土壤水分“湿-干”交替变化光合及叶绿素荧光的响应 王振夏, 魏 虹, 吕 茜, 等 (888)
- 模拟淹水对杞柳生长和光合特性的影响 赵竑绯, 赵 阳, 张 驰, 等 (898)
- 梨枣花果期耗水规律及其与茎直径变化的相关分析 张琳琳, 汪有科, 韩立新, 等 (907)
- 基于上部叶片 SPAD 值估算小麦氮营养指数 赵 犇, 姚 霞, 田永超, 等 (916)

种群、群落和生态系统

- 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量 王卫霞, 史作民, 罗 达, 等 (925)

低效柏木纯林不同改造措施对水土保持功能的影响..... 黎燕琼,龚固堂,郑绍伟,等 (934)

浙江紧水滩水库浮游植物群落结构季节变化特征..... 张 华,胡鸿钧,晁爱敏,等 (944)

黑龙江凤凰山国家级自然保护区野猪冬季容纳量及最适种群密度 孟根同,张明海,周绍春 (957)

云南苍山火烧迹地不同恢复期地表蜘蛛群落多样性..... 马艳滢,李 巧,冯 萍,等 (964)

景观、区域和全球生态

基于综合气象干旱指数的石羊河流域近 50 年气象干旱特征分析 张调风,张 勃,王有恒,等 (975)

基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟 冯仕超,高小红,顾 娟,等 (985)

研究简报

三大沿海城市群滨海湿地的陆源人类活动影响模式..... 王毅杰,俞 慎 (998)

洋河水库富营养化发展趋势及其关键影响因素..... 王丽平,郑丙辉 (1011)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 350 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 36 * 2013-02



封面图说:卧龙自然保护区核桃坪震后——汶川大地震是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最大的一次地震,地震的强度、烈度都超过了 1976 年的唐山大地震。在这次地震中,震区的野外大熊猫受到不同程度的影响,卧龙自然保护区繁育中心的赠台大熊猫团团、圆圆居住的屋舍上方巨石垮塌,房舍全部毁坏,只因两只熊猫在屋外玩耍逃过一劫。不过,圆圆一度因惊恐逃走,失踪 5 天后才被找回来。由于繁育基地两面山体滑坡,竹子短缺等原因,繁育基地只能将大熊猫全部转移下山。

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

DOI: 10.5846/stxb201204100500

王丽平, 郑丙辉. 洋河水库富营养化发展趋势及其关键影响因素. 生态学报, 2013, 33(3): 1011-1017.

Wang L P, Zheng B H. Eutrophication development and its key affected factors in the Yanghe Reservoir. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(3): 1011-1017.

洋河水库富营养化发展趋势及其关键影响因素

王丽平*, 郑丙辉

(中国环境科学研究院, 国家环境保护部河口与海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

摘要: 洋河水库作为秦皇岛和北戴河暑期办公的重要水源地, 近年来富营养化逐年加重, 水质恶化。通过收集历史资料和现场连续监测, 综合分析了洋河水库富营养化发展趋势及其关键影响因素, 结果表明 1990—2011 年期间, 总氮、总磷常年超过国际公认的发生富营养化的浓度水平, 每年 8 月是水华集中暴发期。以 8 月为例, 自 1990 年以来, 水体总氮、总磷和叶绿素 a 浓度逐年上升, 透明度则呈明显下降趋势, 富营养化状态从 1990 年的中营养状态变成 2011 年的超富营养状态。对 2011 年 5—10 月监测数据进行相关关系分析发现水温、透明度、溶解氧、pH 值、总磷、正磷酸盐、高锰酸盐指数和总有机碳都与叶绿素 a 浓度明显相关, 其中透明度、溶解氧、pH 值是水华暴发的结果而非原因, 表明透明度、溶解氧和 pH 值是水华暴发影响水质的主要表现因素; 既然洋河水库地处北温带, 四季分明, 冬季存在 2—3 个月的冰封期, 因此水温是水库水华暴发的驱动因子之一。2011 年 7 月中旬至 8 月底洋河水库暴发了全库水域的蓝藻水华, 优势种为铜绿微囊藻 (*Microcystis aeruginosa*) 和鱼害微囊藻 (*M. ichthyoblabe*), 密度分别达到 3.5×10^6 和 1.4×10^6 个/mL。

关键词: 洋河水库; 富营养化; 水华

Eutrophication development and its key affected factors in the Yanghe Reservoir

WANG Liping*, ZHENG Binghui

State Environmental Protection Key Laboratory of Estuary and Coastal Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: The Yanghe Reservoir has been the important drinking resource of Qinhuangdao and Beidaihe summer central office. However, in recent decades the water body has been undergoing intense eutrophication, resulting in loss of water quality and increases in the frequency of cyanobacterial bloom outbreak. It almost lost the function as drinking resource during the occurrence of algal bloom. We have analyzed the eutrophication development and its key regulating factors of the reservoir by collecting history materials and monitoring dataset of water quality in 2011. The results showed that the concentrations of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) have been higher continuously than the critical ones of eutrophication during 1990—2011. Algal blooms have almost broken out in August of each year. Based on the monitoring data in August of each year, TN, TP, chlorophyll a (Chl-a) increased significantly since 1990, their concentration increased from 0.72 mg/L, 0.029 mg/L, 3.35 μ g/L in 1990 to 4.25 mg/L, 0.103 mg/L, 88.5 μ g/L in 2011, respectively. Secchi disk depth (SD) decreased significantly, and it was 1.65 m in 1990, while it decreased into 0.3 m in 2011. Trophic state index based on TN (TSI_{TN}), TP (TSI_{TP}), SD (TSI_{SD}) and Chl-a (TSI_{CHL}) were also increased rapidly, and from 49.71, 52.71, 52.78, 42.46 in 1990 to 75.33, 70.98, 77.36 and 74.58 in 2011, respectively. Based on the Carlson-type TSI, the trophic state of the system were mesoeutrophic in 1990 and became hypereutrophic in 2011. There was a good relationship between SD and Chl-a during 1990—2011 ($R^2 = 0.9186$), indicating that algae dominate light attenuation. From May to October in 2011, water temperature (T) varied from 15.7 to 29.2 $^{\circ}$ C, with mean ($22.75 \pm$

基金项目: 国家科技重大专项 (2009ZX07528-003)

收稿日期: 2012-04-10; 修订日期: 2012-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanglp@craes.org.cn

4.77) °C; SD was 0.30—4.00 m with mean (1.66 ± 0.98) m; dissolved oxygen (DO) was 5.38—13.58 mg/L with mean (8.91 ± 2.09) mg/L; pH was 8.17—10.92 with mean (8.87 ± 0.78); chemical oxygen demand (COD_{Mn}) was 2.06—4.90 mg/L with mean (3.52 ± 0.94) mg/L; total organic carbon (TOC) was 8.26—23.16 mg/L with mean (13.57 ± 3.66) mg/L; TP was 0.0336—0.095 mg/L with mean (0.060 ± 0.014) mg/L; TN was 3.078—6.752 mg/L with (4.713 ± 1.014) mg/L; nitrate nitrogen ($\text{NO}_3\text{-N}$) was 0.393—2.856 mg/L with mean (1.252 ± 0.788) mg/L; ammoniacal nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$) was 0.0077—0.2191 mg/L with mean (0.109 ± 0.070) mg/L; orthophosphate ($\text{PO}_3\text{-P}$) was 0.0022—0.0096 mg/L with mean (0.0066 ± 0.0022) mg/L; Chl-a was 1.46—136.97 $\mu\text{g/L}$ with mean (27.31 ± 34.99) $\mu\text{g/L}$. It revealed that the concentration of each factor varied substantially among months. The correlation relationship analysis showed that T , SD, DO, pH, TP, $\text{PO}_3\text{-P}$, COD_{Mn} and TOC have obvious correlation with Chl-a. SD, DO and pH were the results induced by water eutrophication, but not the driving factors, therefore, SD, DO and pH were the major symptom of water quality deterioration induced by algal bloom outbreak. Since the reservoir is situated in northern temperature zone with 2—3 months ice cover, T should be a driving factor of summer blooms. The regression equation of log-transformed values for Chl-a on the other factors was performed and it is presented as below: $\log(\text{Chl-a}) = -1.768 + 0.058T + 0.006\text{SD} - 0.067\text{DO} + 0.068\text{pH} + 0.118\text{TN} - 0.091\text{NO}_3\text{-N} + 1.25\text{NH}_4\text{-N} + 2.272\text{TP} + 11.669\text{PO}_3\text{-P} + 0.037\text{COD}_{\text{Mn}} + 0.046\text{TOC}$, $R^2 = 0.979$. During the outbreak of algal bloom from the middle July to the end of August in 2011, T was 23.5—29.2 °C, and the dominant species were *Microcystis aeruginosa* and *M. ichthyoblabe* that belong to Cyanophyta with cell density of 3.5×10^6 and 1.4×10^6 cells/ml, respectively. The Yanghe Reservoir was a typical lake-reservoir with slow water flow and long residence time. In order to prevent the outbreak of algal bloom and improve the function as drinking resource, the nutrient concentrations must be decreased by reducing exogenous and control endogenesis pollution, and simultaneously change hydrodynamic conditions by increasing flow velocity or water exchange speed.

Key Words: the Yanghe Reservoir; eutrophication; algal blooms

洋河水库位于河北省秦皇岛市抚宁县城北 10 km 处,地理坐标为 $\text{N}39^\circ58'45''$ — $40^\circ00'59''$; $\text{E}119^\circ00'09''$ — $119^\circ59'59''$,始建于 1959 年 10 月,1961 年建成蓄水,总库容为 3.53 亿 m^3 ,流域面积 755 km^2 ,以城市供水功能为主,兼有防洪、灌溉、养殖和发电功能^[1]。流域内属温带季风性气候,气候温和,四季分明,水库正常蓄水位 57.0 m(库容为 1.45 亿 m^3),平均水深 5.7 m。目前水库富营养化程度日益加重,数据显示,1985 年水库水华现象并不十分明显,主要集中在暑期末的部分水域;而在 1990 年水华现象已经覆盖 7 月底—9 月初的大部分水域;到 1999 年水体则呈现出‘中-富营养化’,水华现象已经主要出现在 7 月中旬至 9 月中旬的所有水域^[2-8]。目前,几乎每年暑期都会有全库水域的水华暴发,水质恶化,景观环境受到破坏,更重要的是对秦皇岛居民以及北戴河中央暑期办公人员的供水安全产生严重影响。

2011 年对洋河水库进行水质和浮游藻类的监测调查,以期全面了解水库的富营养化特征及其关键影响因素,为采取有效措施预防水华暴发、恢复暑期作为饮用水源的使用功能提供技术支持。

1 材料和方法

1.1 采样站位和监测参数

洋河水库流域属于季风型大陆气候,四季分明,每年冬季约 2—3 个月的冰封期(12 月至翌年 2 月)。因此,温度是水华暴发的重要限制因子,每年 5—10 月水温(10—29 °C)适合藻类生长。因此在 2011 年 5—10 月采集洋河水库表层水体和浮游藻类生物样品,每月 2 次,现场采用 YSI 多参数水质监测仪测定水温(T)、溶解氧(DO)、pH 值(pH),透明度(SD)采用塞式盘法测定。其它监测指标总磷(TP)、正磷酸盐($\text{PO}_3\text{-P}$)、总氮(TN)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、氨态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、总有机碳(TOC)、叶绿素 a(Chl-a)按照《水和废水监测分析方法》第四版的样品采集和分析方法进行^[9]。在 2010 年对水库进行预调查基础上,优化了采样站位,最终共设置 4 个站位(图 1):坝前 1 个(Y1)、库中心 1 个(Y2)、西洋河口(Y3)和东洋河口(Y4)各

1 个。

在监测过程中发现,自 7 月中旬至 8 月底,洋河水库暴发全库水体的水华,水体呈葱绿色,并伴有六六六粉味。在此期间采集浮游藻类生物样品 500 mL,鲁哥氏液固定,静止 24 h 后,经虹吸最终体积浓缩为 20 mL,生物显微镜进行藻密度计数和优势藻种类鉴定。

1.2 统计分析

水库的富营养化状态采用卡尔森指数法(Trophic State Index, TSI)^[10-11],计算方法如下:

$$TSI_{TN} = 54.45 + 14.43 \ln(TN, \text{mg/L})$$

$$TSI_{TP} = 14.42 \ln(TP, \mu\text{g/L}) + 4.15$$

$$TSI_{SD} = 60 - 14.42 \ln(SD, \text{m})$$

$$TSI_{CHL} = 9.81 \ln(CHL, \mu\text{g/L}) + 30.6$$

监测指标间的相关关系分析采用软件 SPSS13.0 进行。

2 结果

2.1 洋河水库富营养化的年际变化趋势

由于洋河水库水华主要在每年的 7—9 月暴发,在这个时间段内关于 TN、TP、SD 和 Chl-a 的调查分析数据较多,本研究收集了 1990 年以来每年 8 月的监测数据^[2-8],并结合 2011 年本研究小组的监测结果,综合分析洋河水库富营养化的变化趋势。图 2 为洋河水库水体 TN、TP、SD 和 Chl-a 浓度及其相应富营养化状态指数 TSI 的变化趋势。由图可见,TN、TP 和 Chl-a 浓度呈明显上升趋势,分别从 1990 年的 0.72 mg/L、0.029 mg/L 和 3.35 $\mu\text{g/L}$ 增加至 2011 年的 4.25 mg/L、0.103 mg/L 和 88.5 $\mu\text{g/L}$;SD 则呈现明显下降趋势,从 1990 年的 1.65 m 降低至 2011 年的 0.3 m。 TSI_{TN} 、 TSI_{TP} 、 TSI_{SD} 和 TSI_{CHL} 分别从 1990 年的 49.71、52.71、52.78、42.46 升高至 2011 年的 75.33、70.98、77.36、74.58。

2.2 洋河水库 5—10 月的富营养化特征

图 3 为洋河水库 2011 年 5—10 月水环境条件的变化趋势,由图可见,5—10 月期间各水质因子都存在不同程度的波动,在水华暴发期间(7 月中旬至 8 月底), T 在 23.5—29.2 $^{\circ}\text{C}$ 之间,SD 和 DO 明显下降($P < 0.05$),pH 值略有上升,COD_{Mn} 和 TOC 有所上升。2011 年 5—10 月营养盐和 Chl-a 浓度变化趋势见图 4,其中氮磷都呈现不同程度的上升趋势,Chl-a 浓度发生明显变化,在水华暴发期间明显升高($P < 0.05$),水华暴发后期突然下降($P < 0.05$)。各参数的变化范围见表 1。

洋河水库 2011 年 5—10 月 Chl-a 与营养盐、水环境条件的相关分析见表 2,其中 T 、SD、DO、pH 值、TP、PO₃-P、COD_{Mn} 和 TOC 都与 Chl-a 浓度明显相关;其它各因子之间也存在一定的相关性,如 T 与 SD、DO、pH 值和 TOC 明显相关;SD 与 DO、pH 值、TP 和 PO₃-P 明显相关等。

7 月中旬至 8 月底水华暴发期间浮游藻类优势种为铜绿微囊藻(*Microcystis aeruginosa*),密度高达 3.5×10^6 个/mL,其次为鱼害微囊藻(*M. ichthyoblabe*),密度为 1.4×10^6 个/mL。

经非参数 Kolmogorov-Smirnov 检验发现,Chl-a 不服从正态分布而是服从 log 值正态分布,因此采用 log(Chl-a) 为因变量进行回归分析。log(Chl-a) 与各指标间的逐步回归方程为:

$$\begin{aligned} \log(\text{Chl-a}) = & -1.768 + 0.058T + 0.006SD - 0.067DO + 0.068\text{pH} + 0.118\text{TN} - 0.091\text{NO}_3\text{-N} + 1.25\text{NH}_4\text{-N} + \\ & 2.272\text{TP} + 11.669\text{PO}_3\text{-P} + 0.037\text{COD}_{\text{Mn}} + 0.046\text{TOC} \\ R^2 = & 0.979 \end{aligned}$$

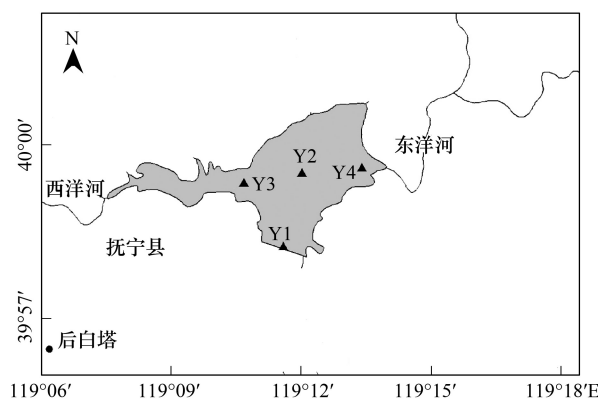


图 1 洋河水库采样站

Fig. 1 The Yanghe Reservoir and its sampling stations

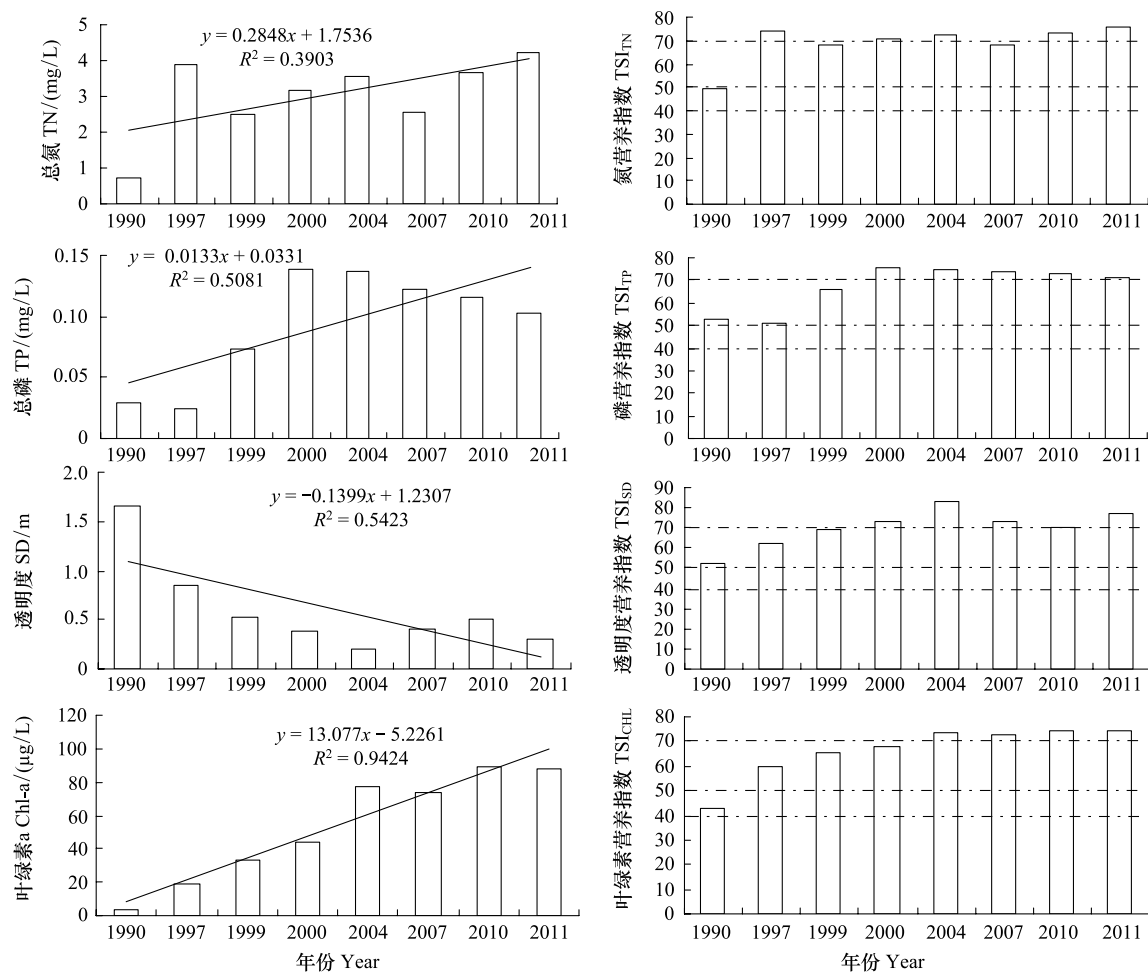


图2 1990—2011年每年8月TP、TN、SD和Chl-a平均浓度及其相应TSI指数的年变化

Fig. 2 Total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), secchi disk depth (SD), chlorophyll a (Chl-a) concentration and TSI_{TN}, TSI_{TP}, TSI_{SD}, TSI_{CHL} in August of each year during 1990—2011

TSI<40 为贫营养;40<TSI<50 为中营养;50<TSI<70 为富营养;TSI>70 为超富营养

表1 洋河水库2011年5—10月水环境参数、Chl-a浓度的平均值及其波动范围 (n=24)

Table 1 Mean values and their range of water quality indices and Chl-a from May to October in 2011 (n=24)

	平均值 Mean±S. D.	波动范围 Range of variation
水温 Temperature T/℃	22.75 ± 4.77	15.7—29.2
透明度 Secchi disk depth SD/m	1.66 ± 0.98	0.30—4.00
溶解氧 Dissolved oxygen DO/(mg/L)	8.91 ± 2.09	5.38—13.58
pH值 pH value	8.87 ± 0.78	8.17—10.92
高锰酸盐指数 Chemical oxygen demand COD _{Mn} /(mg/L)	3.52 ± 0.94	2.06—4.90
总有机碳 Total organic carbon TOC/(mg/L)	13.57 ± 3.66	8.26—23.16
总磷 Total phosphorus TP/(mg/L)	0.060 ± 0.014	0.0336—0.095
总氮 Total nitrogen TN/(mg/L)	4.713 ± 1.014	3.078—6.752
硝态氮 Nitrate nitrogen NO ₃ -N/(mg/L)	1.252 ± 0.788	0.393—2.856
氨态氮 Ammoniacal nitrogen NH ₄ -N/(mg/L)	0.109 ± 0.070	0.0077—0.2191
正磷酸盐 Orthophosphate PO ₃ -P/(mg/L)	0.0066 ± 0.0022	0.0022—0.0096
叶绿素 a Chlorophyll a Chl-a/(μg/L)	27.31 ± 34.99	1.46—136.97

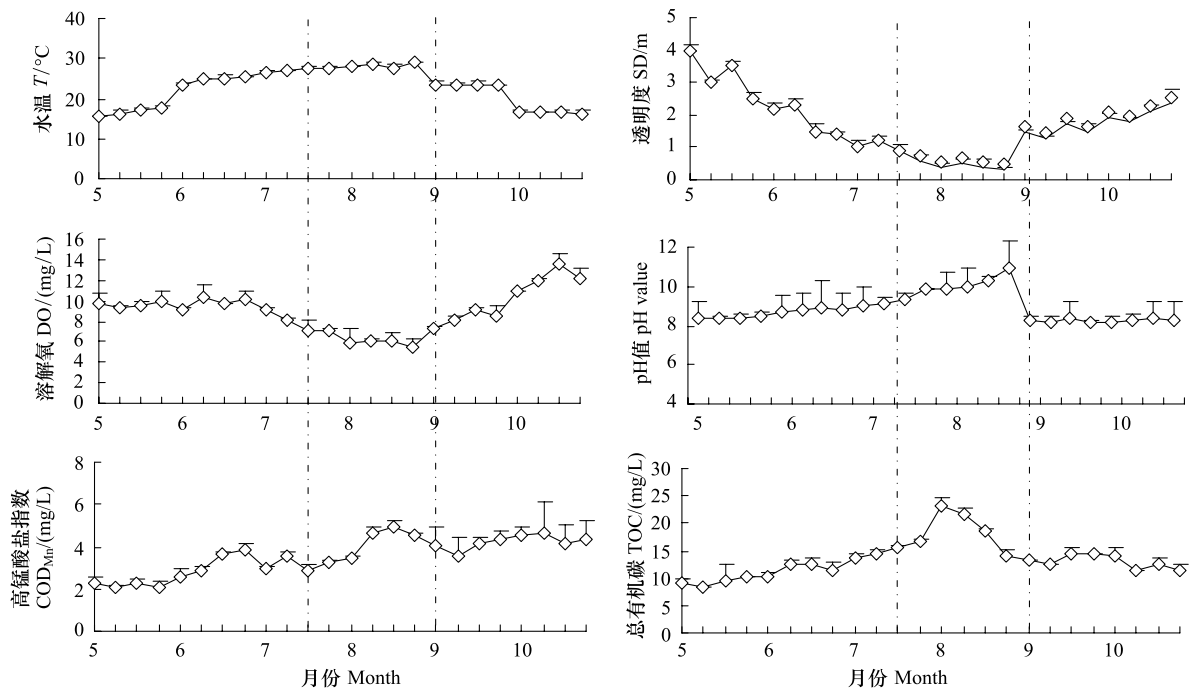


图3 洋河水库 2011 年 5—10 月水体 T 、 SD 、 DO 、 pH 值、 COD_{Mn} 、 TOC 的变化趋势(每个站位的月平均值)

Fig.3 The developing trend of water temperature (T), secchi disk depth (SD), dissolved oxygen (DO), pH , chemical oxygen demand (COD_{Mn}) and total organic carbon (TOC) from May to October in 2011(monthly average value of each site), the period between two dashed line showed the time of algal bloom outbreak

图中两条虚线之间为水华暴发时期

表 2 洋河水库 2011 年 5—10 月叶绿素 a 与各水环境因子的相关关系

Table 2 The spearman rank correlation in water quality factors and Chl-a

	Chl-a	T	SD	DO	pH	TN	$NO_3\text{-}N$	$NH_4\text{-}N$	TP	$PO_3\text{-}P$	COD_{Mn}	TOC
Chl-a	1.000											
T	0.682 **	1.000										
SD	-0.724 **	-0.846 **	1.000									
DO	-0.761 **	-0.790 **	0.645 **	1.000								
pH	0.795 **	0.766 **	-0.724 **	-0.744 **	1.000							
TN	-0.197	-0.643 **	0.266	0.415 *	-0.500 **	1.000						
$NO_3\text{-}N$	0.019	-0.229	-0.203	0.193	-0.179	0.783 **	1.000					
$NH_4\text{-}N$	0.059	-0.038	-0.393 *	0.220	-0.114	0.601 **	0.838 **	1.000				
TP	0.426 *	0.402 *	-0.616 **	-0.339	0.445 *	0.114	0.524 **	0.549 **	1.000			
$PO_3\text{-}P$	0.452 *	0.469 *	-0.713 **	-0.299	0.280	0.223	0.584 **	0.719 **	0.632 **	1.000		
COD_{Mn}	0.407 *	0.251	-0.582 **	-0.091 *	0.259	0.321	0.763 **	0.792 **	0.753 **	0.772 **	1.000	
TOC	0.884 **	0.695 **	-0.799 **	-0.640 **	0.669 **	-0.124	0.165	0.281	0.381 *	0.614 **	-0.041	1.000

* $P<0.01$; * $P<0.05$

3 讨论

对 1990—2011 年 Chl-a 与 TN 、 TP 、 SD 的相关关系进行分析,发现 SD 与 Chl-a 具明显相关性,两者间的拟合关系如图 5 所示, $R^2=0.9612$;2011 年 5—10 月 SD 也与 Chl-a 明显相关(表 2),表明洋河水库水体透明度主要受浮游藻类细胞密度的影响。在与 Chl-a 浓度具明显相关性的各水环境指标中(表 2),其中 SD 、 DO 、 pH 值是水华暴发的结果而非原因^[12],因此 SD 、 DO 、 pH 都是洋河水库水华暴发影响水质的主要表现指标,而 SD 受水华影响最明显。 COD_{Mn} 和 TOC 是作为衡量水中有机物质含量多少的指标,其中 TOC 示水中有机物的总含

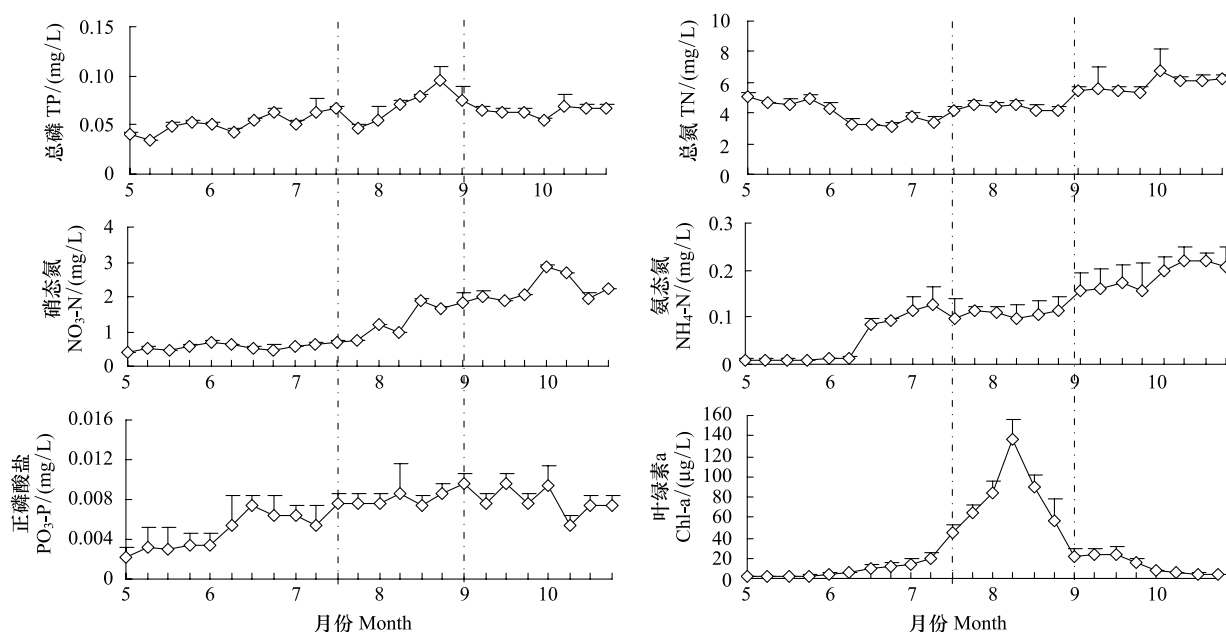


图4 洋河水库 2011 年 5—10 月水体营养盐和 Chl-a 浓度的变化趋势(每个站位的月平均值)

Fig. 4 The developing trend of nutrient and chlorophyll a (Chl-a) concentration from May to October in 2011 (monthly average value of each site)

图中两条虚线之间阶段为水华暴发时期

碳量,而 COD_{Mn} 只表示水体中具还原性的有机物含量,一般 $TOC > COD$,水华暴发期间 COD_{Mn} 和 TOC 略有上升,且都与 Chl-a 浓度具明显相关性(表 2),因此 COD_{Mn} 、 TOC 是水库水华暴发的主要影响因素之一。营养盐监测结果发现,1990—2011 期间 TN 常年超过国际公认湖库发生富营养化的浓度水平(0.20 mg/L),TP 也常年超过国际公认的发生富营养化的浓度水平(0.02 mg/L)^[13],因此洋河水库属于高营养水体,具备发生富营养化的营养盐条件。2011 年 5—10 月期间 TP、 $PO_4\text{-P}$ 、TN、 $NO_3\text{-N}$ 、 $NH_4\text{-N}$ 浓度都呈逐渐上升趋势(图 4),9 月水华消退后仍明显上升,表明这几种形式营养盐浓度的升高与水华生消没有直接关系,主要受内源、外源污染的影响。洋河水库支流上游是种植和加工白薯比较集中的区域,每年 9 月至 11 月上旬,农民利用简陋的粉碎装置,在田间地头、户院把白薯粉碎、过滤加工成淀粉,此时产生大量含高浓度营养盐的废水,汇集河道后流入洋河水库^[6,14]。因此,氮磷营养盐浓度的升高(尤其是 9 月以后)主要是洋河上游农业活动造成的。水华暴发期间 Chl-a 浓度在 $22.16\text{--}162.26 \text{ }\mu\text{g/L}$ 之间,明显高于水华暴发前和水华消退后的浓度水平(图 4)。

氮、磷是水体富营养化发生的主导因子,气象环境(主指温度和光照)是诱发富营养化的外因,缓流水体是富营养化产生的载体(尤其是水流缓慢、水深较浅且相对封闭的水体)。人为地改变气候条件的可能性较小,因此富营养化防治一般重点考虑营养盐以及水动力条件的改变。对于洋河水库,上游农业活动是造成水库氮磷污染的主要原因^[6,14]。另外,洋河水库中沉积物高达水库总容积的 $1/10$,平均沉积物厚度达 0.96 m ,从某种意义上讲沉积物已经成为水库内部储存营养盐等污染物的巨大仓库^[15]。刘娜对洋河水库底泥氮磷释放规律进行了系统研究,指出内源污染对水体的富营养化程度起着控制作用^[14]。因此,降低水库营养盐浓度,在控制上游农业生产所带来外源营养盐污染的同时,还要

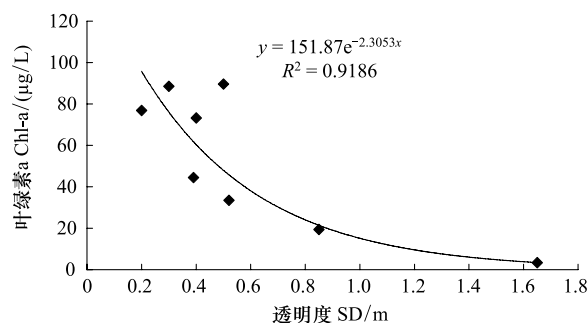


图5 1990—2011 年期间 SD 与 Chl-a 之间的拟合关系图

Fig. 5 Power regression between secchi disk depth (SD) and chlorophyll a (Chl-a) during 1990—2011

充分考虑内源污染对水体富营养化的影响并采取相应措施。根据水库的流速特征,可以将水库划分为河流型水体($>0.2\text{ m/s}$)、过渡型水体($0.05\text{—}0.2\text{ m/s}$)和湖泊型水体($\leq 0.05\text{ m/s}$)^[16]。洋水库水体几乎处于静止状态,水体滞留时间约 284 d ^[14],水华原因种主要是蓝藻门的微囊藻,因此洋水库属于典型的富营养化的湖泊型水体。当水温和光照适合时,水华暴发。因此,预防洋水库水华暴发,在有效降低水体营养盐浓度,控制内源、外源污染的同时提高水体流速或水体交换速率,才能控制水体水华暴发,最终达到改善洋水库水质状况,提高洋水库服务功能质量的目的。

综上,洋水库水华暴发是多种因素造成的,但水体中较高浓度的氮磷是最主要的因素,当夏季水温升高达到藻类迅速增殖的温度时,蓝藻迅速增殖形成水华。洋水库流域降雨主要集中在夏季,也是水华集中暴发的季节,监测过程中发现,在水华暴发期间,有几次主要降雨,但并没有达到有效稀释水体中藻细胞密度的效果,水华仍持续发生。当进入初秋季节,日温差较大,表层水体温度昼夜差异明显,可能是水华消失的重要原因。

References:

- [1] Wang Q P, Zhang J D. Hydrologic Manual of Qinhuangdao City. Mapping Academy of Hebei Geological Survey Bureau, Ministry of Geology and Mineral Resources of P. R. China. 1999: 3-4.
- [2] Li F B. Eutrophication and fishery benefit of Yanghe river reservoir. Water and Wastewater Engineering, 2001, 27(10): 30-33.
- [3] Li F B, Tang J Y. Eutrophication countermeasures of Yanghe Reservoir. Liaoning Urban and Rural Environmental Science and Technology, 2001, 21(3): 12-14.
- [4] Cui L, Li Z W. Study on phosphorus as a critical limiting factor in algae bloom occurrence in Yanghe Reservoir. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(S1): 141-143.
- [5] Cai J B, Li W Q, Pang Y, Sun Y. Limiting factors of eutrophication in Yanghe Reservoir. Water Resources Protection, 2007, 23(3): 52-55.
- [6] Li W Q, Cai J B, Pang Y, Xiao X F. Eutrophication assessment of Yanghe Reservoir and its control measures. Water Resources Protection, 2007, 23(2): 16-19.
- [7] Yang X C, Wang S F, E X L, Yang K X. Correlation between microcystin and water pollution indexes of Yanghe Reservoir, Qinhuangdao. Journal of Environment and Health, 2009, 26(2): 137-138.
- [8] Zhang Y, Wang X L, Luo Y. Discussion on reason analysis and prevention methods of Yanghe Reservoir Eutrophication. Haihe Water Resources, 2009, (5): 26-28.
- [9] <Monitoring and Analysis Methods of Water and Wastewater> Editing Committee, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Monitoring and Analysis Methods of Water and Wastewater. 4th ed. Beijing: Chinese Environment Science Press, 2002.
- [10] Carlson RE. A trophic state index for lakes. Limnology and Oceanography, 1977, 22(2): 361-369.
- [11] Kasai H, Saito H, Yoshimori A, Taguchi S. Variability in timing and magnitude of spring bloom in the Oyashio region, the western subarctic Pacific off Hokkaido, Japan. Fisheries Oceanography, 1997, 6(2): 118-129.
- [12] Wang X L, Lu Y L, He G Z, He G Z, Han J Y, Wang T Y. Exploration of relationships between phytoplankton biomass and related environmental variables using multivariate statistic analysis in a eutrophic shallow lake: a 5-year study. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(8): 920-927.
- [13] Jin X C, Liu S K, Zhang Z S. Chinese Lake Environment. Beijing: Ocean Press, 1995.
- [14] Liu N. Study on Rule of Nitrogen and Phosphor Release from Sediments in Yanghe Reservoir [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2005.
- [15] Li F B, Dai L, Xiao Y, Kang J Y, Wu C L, Zhang X F. Effect of Yanghe reservoir sediment on eutrophication. Water Resources Protection, 2003, (3): 31-34.
- [16] Strskaba M, Tundisi J G. Guidelines of Lake Management (Volume 9): Reservoir Water Quality Management. Kusatsu: International Lake Environment Committee, 1999: 229-229.

参考文献:

- [1] 王庆平, 张俊栋. 秦皇岛市水文手册. 地质矿产部河北地质勘测局测绘院, 1999: 3-4.
- [2] 李凤彬. 洋水库富营养化及其渔业利用. 给水排水, 2001, 27(10): 30-33.
- [3] 李凤彬, 康瑾瑜. 洋水库富营养化防治对策. 辽宁城乡环境科技, 2001, 21(3): 12-14.
- [4] 崔力拓, 李志伟. 洋水库“水华”形成的关键因子. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 141-143.
- [5] 蔡金榜, 李文奇, 逢勇, 孙宇. 洋水库富营养化限制性因子分析. 水资源保护, 2007, 23(3): 52-55.
- [6] 李文奇, 蔡金榜, 逢勇, 肖兴富. 洋水库富营养化评价及防治对策. 水资源保护, 2007, 23(2): 16-19.
- [7] 杨希存, 王素凤, 鄂学礼, 杨可心. 洋水库微囊藻毒素含量与水污染指标的相关性研究. 环境与健康杂志, 2009, 26(2): 137-138.
- [8] 张芸, 王秀兰, 罗阳. 洋水库富营养化原因分析及防治方法探讨. 海河水利, 2009, (5): 26-28.
- [9] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [13] 金相灿, 刘淑坤, 张宗涉. 中国湖泊环境. 北京: 海洋出版社, 1995.
- [14] 刘娜. 洋水库底泥氮磷释放规律试验研究 [D]. 山西太原: 太原理工大学, 2005.
- [15] 李凤彬, 代礼, 肖勇, 康瑾瑜, 武春良, 张秀芬. 洋水库底泥对富营养化影响的研究. 水资源保护, 2003, (3): 31-34.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 3 February, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Ecosystem Service Simulation and Management

Securing Natural Capital and Human Well-Being: Innovation and Impact in China	Gretchen C. Daily, Ouyang Zhiyun, Zheng Hua, et al (677)
Establishment of ecological compensation mechanisms in China: perspectives and strategies	OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, YUE Ping (686)
Regional cooperation mechanism and sustainable livelihoods: a case study on paddy land conversion program (PLCP)	LIANG Yicheng, LIU Gang, MA Dongchun, et al (693)
Progress and perspectives of ecosystem services management	ZHENG Hua, LI Yifeng, OUYANG Zhiyun, et al (702)
Ecosystem services valuation and its regulation in Baiyangdian basin: Based on InVEST model	BAI Yang, ZHENG Hua, ZHUANG Changwei, et al (711)
Identification of hotspots for biodiversity conservation in the Wenchuan earthquake-hit area	XU Pei, WANG Yukuan, YANG Jinfeng, et al (718)
Effects of land use change on ecosystem services: a case study in Miyun reservoir watershed	LI Yifeng, LUO Yuechu, LIU Gang, et al (726)
Impacts of forest eco-benefit tax on industry price levels in Shaanxi Province, China	LI Jie, LIU Zhengnan, HAN Xiuhua (737)
Spatial characteristics of soil conservation service and its impact factors in Hainan Island	RAO Enming, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al (746)
Perception and attitudes of local people concerning ecosystem services of culturally protected forests	GAO Hong, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua, et al (756)
Standard of payments for ecosystem services in Sanjiangyuan Natural Reserve	LI Yifeng, LUO Yuzhu, ZHENG Hua, et al (764)
Natural landscape valuation of Wulingyuan Scenic Area in Zhangjiajie City	CHENG Cheng, XIAO Yi, OUYANG Zhiyun, et al (771)
Satellite-based monitoring and appraising vegetation growth in national key regions of ecological protection	HOU Peng, WANG Qiao, FANG Zhi, et al (780)
Spatial Pattern of Water Retention in Dujiangyan County	FU Bin, XU Pei, WANG Yukuan, et al (789)
Spatial distribution of carbon storage function and seismic damage in wenchuan earthquake stricken areas	PENG Yi, WANG Yukuan, FU Bin, et al (798)

Frontiers and Comprehensive Review

The Porter Hypothesis: a literature review on the relationship between eco-innovation and environmental regulation	DONG Ying, SHI Lei (809)
Ecological protection and well-being	LI Huimei, ZHANG Anlu (825)
An overview of the updated classification system and species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi	WANG Yutao, XIN Guorong, LI Shaoshan (834)

Autecology & Fundamentals

Evaporation paradox in the northern and southern regions of the Qinling Mountains	JIANG Chong, WANG Fei, LIU Sijie, et al (844)
The diet composition and trophic niche of main herbivores in the Inner Mongolia Desert steppe	LIU Guihe, WANG Guojie, WANG Shiping, et al (856)
Abstraction and analysis of vegetation information based on object-oriented and spectra features	CUI Yijiao, ZHU Lin, ZHAO Lijuan (867)
Hyperspectral estimation models for photosynthetic pigment contents in leaves of <i>Eucalyptus</i>	ZHANG Yonghe, CHEN Wenhui, GUO Qiaoying, et al (876)
Response of photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics of <i>Pterocarya stenoptera</i> seedlings to submergence and drought alternation	WANG Zhenxia, WEI Hong, LÜ Qian, et al (888)

Effect of flooding stress on growth and photosynthesis characteristics of <i>Salix integra</i>	
.....	ZHAO Hongfei, ZHAO Yang, ZHANG Chi, et al (898)
Water consumption of pear jujube trees (<i>Ziziphus jujuba</i> Mill.) and its correlation with trunk diameter during flowering and fruit development periods	ZHANG Linlin, WANG Youke, HAN Lixin, et al (907)
Estimation of nitrogen nutrient index on SPAD value of top leaves in wheat	
.....	ZHAO Ben, YAO Xia, TIAN Yongchao, et al (916)
Population, Community and Ecosystem	
Carbon and nitrogen storage under different plantations in subtropical south China	
.....	WANG Weixia, SHI Zuomin, LUO Da, et al (925)
Impact on water and soil conservation of different bandwidths in low-efficiency cypress forest transformation	
.....	LI Yanqiong, GONG Gutang, ZHENG Shaowei, et al (934)
Seasonal changes of phytoplankton community structure in Jinshuitan Reservoir, Zhejiang, China	
.....	ZHANG Hua, HU Hongjun, CHAO Aimin, et al (944)
Winter carrying capacity and the optimum population density of wild boar in fenghuang Mountains National Nature Reserve of Heilongjiang Province	MENG Gentong, ZHANG Minghai, ZHOU Shaochun (957)
Diversity of ground-dwelling spider community in different restoring times of post-fire forest, Cangshan Mountain, Yunnan Province	
.....	MA Yanyan, LI Qiao, FENG Ping, et al (964)
Landscape, Regional and Global Ecology	
Drought characteristics in the shiyang river basin during the recent 50 years based on a composite index	
.....	ZHANG Tiaofeng, ZHANG Bo, WANG Youheng, et al (975)
Land use spatial distribution modeling based on CLUE-S model in the Huangshui River Basin	
.....	FENG Shichao, GAO Xiaohong, GU Juan, et al (985)
Research Notes	
Patterns of terrestrial anthropogenic impacts on coastal wetlands in three city clusters in China	WANG Yijie, YU Shen (998)
Eutrophication development and its key affected factors in the Yanghe Reservoir	WANG Liping, ZHENG Binghui (1011)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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

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 3 期 (2013 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 3 (February, 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