

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

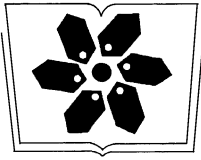
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第5期 Vol.32 No.5 **2012**

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 32 卷 第 5 期 2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

淀山湖富营养化过程的统计学特征	程 曦, 李小平, 陈小华 (1355)
拟水狼蛛对食物中镉的吸收和排泄及生物学响应	张征田, 张光铎, 张虎成, 等 (1363)
接种后共培养时间对丛枝菌根喜树幼苗喜树碱含量的影响	于 洋, 于 涛, 王 洋, 等 (1370)
沙尘暴发生日数与空气湿度和植物物候的关系——以民勤荒漠区为例	常兆丰, 王耀琳, 韩福贵, 等 (1378)
西藏牦牛 mtDNA D-loop 区的遗传多样性及其遗传分化	张成福, 徐利娟, 姬秋梅, 等 (1387)
红松阔叶混交林林隙土壤水分分布格局的地统计学分析	李 猛, 段文标, 陈立新, 等 (1396)
黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征	邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 等 (1403)
毛竹高速生长期土壤碳氮动态及其微生物特性	王雪芹, 张奇春, 姚槐应 (1412)
长期 N 添加对典型草原几个物种叶片性状的影响	黄菊莹, 余海龙, 袁志友, 等 (1419)
接种 AMF 对菌根植物和非菌根植物竞争的影响	张宇亭, 王文华, 申 鸿, 等 (1428)
福州大叶榕隐头果内的小蜂群落结构与多样性	吴文珊, 陈友铃, 蔡美满, 等 (1436)
不同生境朝鲜淫羊藿生长与光合特征	张永刚, 韩 梅, 韩忠明, 等 (1442)
基于日均温度的华山松径向生长敏感温度研究	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (1450)
长江三峡库区蝶类群落的等级多样性指数	马 琦, 李爱民, 邓合黎 (1458)
甜瓜幼苗叶片光合变化特性	韩瑞锋, 李建明, 胡晓辉, 等 (1471)
双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响	唐海明, 肖小平, 帅细强, 等 (1481)
古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响	曾晓玲, 刘 彤, 张卫宾, 等 (1490)
流溪河水库颗粒有机物及浮游动物碳、氮稳定同位素特征	宁加佳, 刘 辉, 古滨河, 等 (1502)
采用本土蔬菜种子替代水藓评价污泥有机腐熟度	刘颂颂, 许田芬, 吴启堂, 等 (1510)
人为营养物质输入对汉丰湖不同营养级生物的影响——稳定 C、N 同位素分析	李 斌, 王志坚, 金 丽, 等 (1519)
流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素	张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等 (1527)
福寿螺的过冷却研究	赵本良, 章家恩, 罗明珠, 等 (1538)
水稻生育期对褐飞虱和白背飞虱卵巢发育及起飞行为的影响	陈 宇, 傅 强, 赖凤香, 等 (1546)
绿盲蝽越冬卵的耐寒能力	卓德干, 李照会, 门兴元, 等 (1553)
陆桥岛屿环境下社鼠种群数量的估算方法	张 旭, 鲍毅新, 刘 军, 等 (1562)
北京市居民食物消费碳足迹	吴 燕, 王效科, 逯 非 (1570)
社会经济系统磷物质流分析——以安徽省含山县为例	傅银银, 袁增伟, 武慧君, 等 (1578)
内陆河流域试验拍卖水权定价影响因素——以黑河流域甘州区为例	邓晓红, 徐中民 (1587)
专论与综述	
台风对森林的影响	刘 斌, 潘 澜, 薛 立 (1596)
海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展	张成龙, 黄 晖, 黄良民, 等 (1606)
三种外来入侵斑潜蝇种间竞争研究进展	相君成, 雷仲仁, 王海鸿, 等 (1616)
沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义	于 宇, 宋金明, 李学刚, 等 (1623)
异化 Fe(III) 还原微生物研究进展	黎慧娟, 彭静静 (1633)
问题讨论	
锡林郭勒盟生态脆弱性	徐广才, 康慕谊, Marc Metzger, 等 (1643)
研究简报	
哥斯达黎加外海夏季表层浮游动物种类组成及分布	刘必林, 陈新军, 贾 涛, 等 (1654)



封面图说: 气候变暖下的北极冰盖——自从 1978 年人类对北极冰盖进行遥感监测以来, 北极冰正以平均每年 8.5% 的速度持续缩小, 每年 1500 亿吨的速度在融化。这使科学家相信, 冰盖缩小的根本原因是全球变暖。北极的冰盖消失, 让更大面积的深色海水暴露出来, 使海水吸收更多太阳热辐射反过来又加剧冰盖融化。由于北极冰的加速融化, 北冰洋的通航已经成为 21 世纪初全球最重要的自然地理事件和生态事件。从这张航片可以看到北极冰缘正在消融、开裂崩塌的现状。

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

DOI: 10.5846/stxb201101170091

程曦, 李小平, 陈小华. 淀山湖富营养化过程的统计学特征. 生态学报, 2012, 32(5): 1355-1362.

Cheng X, Li X P, Chen X H. Statistical characteristics of eutrophication process in Dianshan Lake. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1355-1362.

淀山湖富营养化过程的统计学特征

程 曦^{1,2}, 李小平^{1,*}, 陈小华^{1,2}

(1. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 2. 上海市环境科学研究院, 上海 200233)

摘要:湖泊营养物输入及响应指标的统计学规律正在受到越来越广泛的关注。对淀山湖在不同富营养化阶段和近期总磷 TP、总氮 TN 和叶绿素 Chl a 的频率分布以及 TP-Chl a 关系的经验方程进行了分析, 结果表明: (1) 淀山湖 TP、TN 和 Chl a 的平均浓度和离散程度随着湖泊富营养化程度的加剧而增加, 其中以 Chl a 的增幅最大; (2) 在富营养化条件下, 即使营养物 TP 得到一定程度的控制, Chl a 大于 15 $\mu\text{g/L}$ 的概率继续增加了 20% 以上。仅仅削减营养物的峰值, 对降低湖泊初级生产力水平的贡献有限; (3) TP-Chl a 对数回归方程的斜率随湖泊富营养化程度的升高而增加, 由 20 世纪 80 年代的 0.54 增加到目前的 2.46。淀山湖营养物输入及响应指标的统计学特征, 可以用来表征水体富营养化程度, 评价湖泊生态恢复的进程和效果, 为湖泊营养物基准和标准的制定提供最为实际的统计学支持。

关键词:富营养化阶段; 营养物输入响应指标; 统计学特征; 斜率; 淀山湖

Statistical characteristics of eutrophication process in Dianshan Lake

CHENG Xi^{1,2}, LI Xiaoping^{1,*}, CHEN Xiaohua^{1,2}

1 State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

2 Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China

Abstract: The statistical characteristics of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) nutrient input and their responses during the lake eutrophication process are of increasing concern. An increase in the mean (μ) and/or variance (σ) of TN and TP input may increase the probability of exceeding the critical threshold at which algal blooms proliferate.

Dianshan Lake, a shallow temperate lake in the Taihu Plain, is an important source of drinking water for Shanghai and is subject to a subtropical monsoon climate. Its trophic state transitioned from eutrophic to hypereutrophic in 1999, causing the lake to suffer from bluegreen algal blooms ever since. Beginning in 2004, some restoration measures have been taken to reduce nutrient inputs into the lake. However, the immediate reduction of nutrient inputs did not instantly reduce the frequency of algal bloom events.

In order to understand nutrient input and their responses in a lake ecosystem from a statistical point of view, the frequency distributions of TP, TN and chlorophyll a (Chl a), and the TP-Chl a relationships during two different trophic stages (eutrophic stage: 1986—1999; hypereutrophic stage: 1999—2009) of the lake were analyzed based on long-term data from 1985 to 2009. The means and variances of these parameters were compared with those after restoration measures were undertaken on the lake in 2004.

The means and variances of TN and TP increased with the eutrophication process. The probabilities of TN and TP values exceeding the Surface Water Standard for Class V Waters (TN = 2.0mg/L; TP = 0.2mg/L) increased from 62.8% and 12.1% during the eutrophic stage to 91.4% and 51.9% during the hypereutrophic stage, respectively. The

基金项目:国家“十一五”科技重大专项“水体污染控制与治理”项目(2008ZX07106-001);上海市环保局项目(沪环科08-17)

收稿日期:2011-01-17; **修订日期:**2011-06-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixp_2008@hotmail.com

increase in Chl a concentration was even greater, with the probability of exceeding the limit of 15 $\mu\text{g/L}$ increasing from 0.5% during the eutrophic stage to 67.5% during the hypertrophic stage.

The log-log relationship between TP and Chl a was calculated as per Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) methods using three data sets: 1985—1986, 2000—2004 and 2004—2008. All of the observed patterns fit the TP control paradigm well, which indicated that TP had been the primary limiting factor. Over the 24-year eutrophication period examined, the slope of the TP-Chl a log-log relationship increased from 0.54 during the 1980s to 0.83 in the early 2000s and then further to 2.46 by 2008, which might indicate an increasing of proportion of bluegreen algae and the frequency of their blooms.

After restoration measures were undertaken in 2004, mean TP stayed constant and the discrete degree (variance σ) decreased to 50%, whereas the probability of Chl a exceeding 15 $\mu\text{g/L}$ continued to increase by an additional 20%. Under the hypereutrophic condition, a reduction in peak nutrient values or variance only had a limited contribution to primary algal production. Further study on the effects of TN and TP reductions in eutrophication control is necessary.

Here, we showed that statistical parameters such as mean, variance, slope and frequency distribution of nutrients and their responses were able to describe the eutrophication process of Dianshan Lake. These characteristics also offer statistical support for lake restoration assessments, risk assessments for Harmful Algal Bloom and nutrient criteria and standard development.

Key Words: eutrophication process; nutrient input and response; statistical characteristics; slope; Dianshan Lake

20世纪七八十年代,联合国经济合作与发展组织(OECD)利用统计学方法来量化湖泊不同营养状态中营养物投入与响应变量的变化^[1];美国国家环保局(USEPA)也于90年代制定了区域性营养物基准的国家战略,利用长期积累的大量湖泊数据,用统计学的方法制定了不同生态分区的湖泊营养物基准和标准^[2-3]。与通常采用的回归分析、箱线图等统计学方法来分析河流水质和底栖动物群落的偶合关系和长期变化一样^[4],湖泊营养物输入与响应变量数据的频率分布等统计学特征,也成为描述湖泊富营养化过程的重要方法,成为制定湖泊营养物基准的最重要依据之一。采用湖泊营养物输入和响应变量的统计学规律,来制定湖泊本身的营养物基准和标准,这是湖泊富营养化控制和营养物管理的一个重要进步:(1)湖泊营养物的基准/标准的建立以湖泊多年实测数据的统计学特征为基础,充分考虑了不同生态分区湖泊营养物输入响应关系的差异性;(2)所制定的基准/标准更能适应不同类别湖泊的独特性;(3)因此也就更容易实现湖泊富营养化控制的期望目标。

本文利用淀山湖20多年的监测数据,对不同富营养化阶段水体营养物总磷(TN)、总氮(TP)和响应指标叶绿素(Chl a)的频率分布及相互关系,以及TP-Chl a关系式的斜率进行分析和比较,力图反映淀山湖富营养化过程中营养物输入和响应指标的统计学特征,从统计学的角度去认识淀山湖的富营养化过程和恢复效果,为制定淀山湖营养物的基准和标准提供最为实际的统计学支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

淀山湖又称薛淀湖,地处江苏、浙江、上海两省一市交界处,地理位置为 $31^{\circ}04'—31^{\circ}12'N$, $120^{\circ}54'—120^{\circ}01'E$,分属江苏昆山市和上海青浦区管辖。淀山湖是太湖平原地区的一个吞吐性浅水湖泊,水域面积 62 km^2 ,平均水深约2.1 m,最大水深3.6 m,主要承泄太湖来水。太湖水由西北向东南经急水港、大朱厓等河港进入湖体,然后经拦路港、淀浦河等河流泄入黄浦江,停留时间约29 d,占黄浦江水量的17%左右,是上海市的主要水源地之一。淀山湖多年营养物变化和藻类增长响应分析表明,从1985年淀山湖第1次大规模藻类水华算起,经过15 a的营养物积累,淀山湖生态系统发生了重大转折,于1999—2000年前后由中度富营养化转变成重度富营养化。藻类群落迅速向以绿藻-蓝藻为主的群落结构演替,夏秋季则以蓝藻为主,已经具备了暴发

大规模、大面积蓝藻水华的条件^[5]。

1.2 统计学特征分析

本文采用的淀山湖营养物输入指标为总磷(TN)和总氮(TP),响应指标为反映水体初级生产力水平的叶绿素 a(Chl a)。主要分析的湖泊营养物输入响应的统计学特征为正态分布参数(μ, σ)和频率分布的变化与湖泊富营养化程度的关系。采用的统计分析方法为概率分布和箱线图等描述统计方法及回归分析,回归分析的显著性检验采用方差分析。

1.2.1 正态分布 μ 和 σ 的变化对藻类水华发生概率的影响

正态分布是概率论中最重要的一种分布,也是自然界最常见的一种分布,可用下式表达:

$$N(\mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right\} \quad (1)$$

式中, μ 是平均值, σ 是标准差。

在多数情况下,湖泊水体 TP 和 TN 浓度的概率分布可用对数正态分布或正态分布来描述^[6-7],响应指标 Chl a 也呈近似的对数正态分布或正态分布。正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$ 由两个参数平均值 μ 和标准差 σ 决定。在湖泊水质指标的监测中,平均值 μ 代表某一水质指标的平均浓度,而标准差 σ 则代表该项指标监测的离散程度。假设出现藻类水华的某一营养物质的临界浓度为 C (图 1),如果该营养物质在水体中的浓度增加,即监测数据组的平均值 μ 增加,那么水体暴发藻类水华的概率随之增加。同样,如果水体中营养物质浓度的离散程度增加,即监测数据组的标准差 σ 增加,水体暴发藻类水华的概率也会增加。如果监测到的湖泊水体某一营养物质的浓度及其离散程度同时增加,湖泊水体暴发藻类水华的概率,就会大大增加(图 1)。所以,在实际的湖泊水体中,无论是营养物质浓度的平均值 μ 增加还是离散程度 σ 增加,超过某一阈值(例如藻类水华的临界浓度)的概率都会增加。

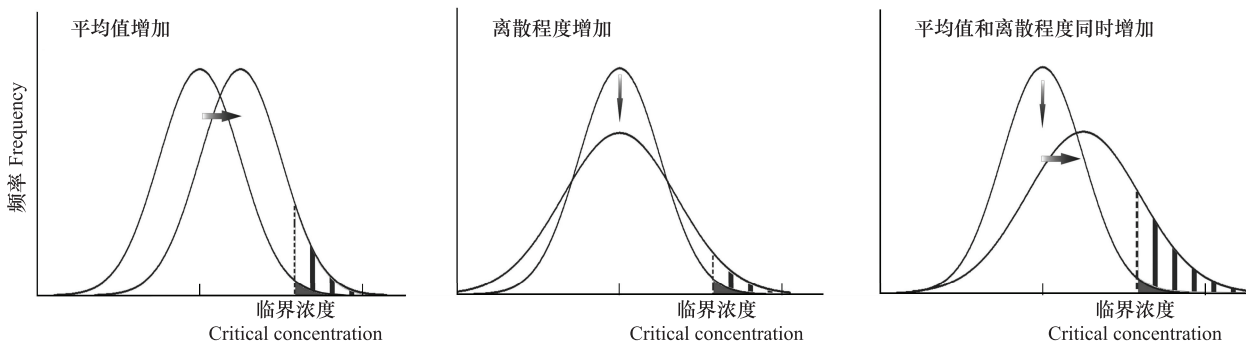


图 1 正态分布的平均值和离散程度的变化对某一事件概率的影响

Fig. 1 Effects of changing mean and discrete degree of normal distribution on the probability of an event

1.2.2 湖泊不同富营养化状态的变量频率分布

OECD 认为^[1],在湖泊的富营养化过程中,指标变量的频率分布有两种不同的变化形式。第 1 种形式是,某指标变量(如 TP、TN 和 Chl a)在水体中的平均浓度随富营养化程度的增加而增加,但其离散程度不变,即悬钟形曲线向高浓度方向移动,但形状不变(图 2);第 2 种形式是,某指标变量(如 TP、TN 和 Chl a)在水体中的浓度峰值随富营养化程度的增加而增加,其离散程度亦随之增加,即悬钟形曲线向高浓度方向移动,形状变得扁平(图 2)。

1.3 数据来源

统计分析采用淀山湖 20 多年(1985—2009 年)积累的长期数据,其中:(1)1985—1986 年 TN、TP 和 Chl a 数据引自宋永昌的研究^[8],监测频率每月 1 次;(2)1987—2004 年的数据由上海市环境监测中心提供,2000 年以前监测频率每年 6 次,2000 年以后监测频率每月 1 次,Chl a 自 1991 年以后才开始测量;(3)2004—2007

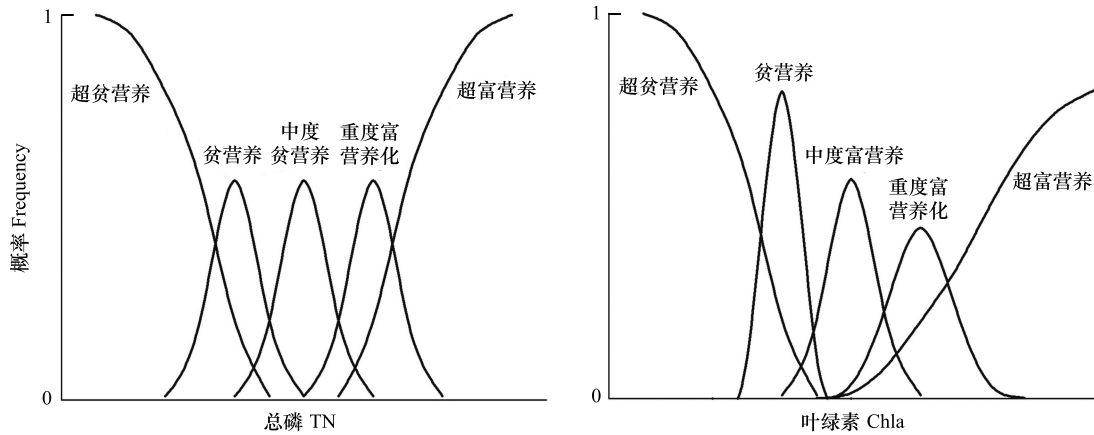


图2 湖泊富营养化过程中总磷和叶绿素频率分布的变化 (OECD)^[1]

Fig. 2 Frequency distributions of TP and Chl a during the different trophic stages of lakes (OECD)^[1]

年 TN、TP 和 Chl a 数据引自王丽卿等人^[9]和郑晓红等人^[10]的研究,监测频率每月 1 次;(4)2008—2009 年的 TN、TP 和 Chl a 数据为本文作者在淀山湖的实测资料,每月监测 1 次,夏季每月 2 次。本文还参考了 1991—2007 年间上海市环保局发布的各年度的《上海市环境质量报告书》^[11],和其他一些研究成果^[12-15]。与 TN 和 TP 的数据相比较,Chl a 数据比较零散,本文假设 1991 年以前的 Chl a 数据也符合正态分布。

2 结果与分析

2.1 淀山湖不同富营养化阶段的营养物输入响应变量的频率分布

淀山湖于 1999—2000 年前后由中度富营养化转变成重度富营养化^[5]。图 3 给出了淀山湖中度富营养化 (1986—1999) 和重度富营养化 (1999—2009) 2 个不同营养阶段营养物输入响应变量 TP、TN 和 Chl a 的频率分布。

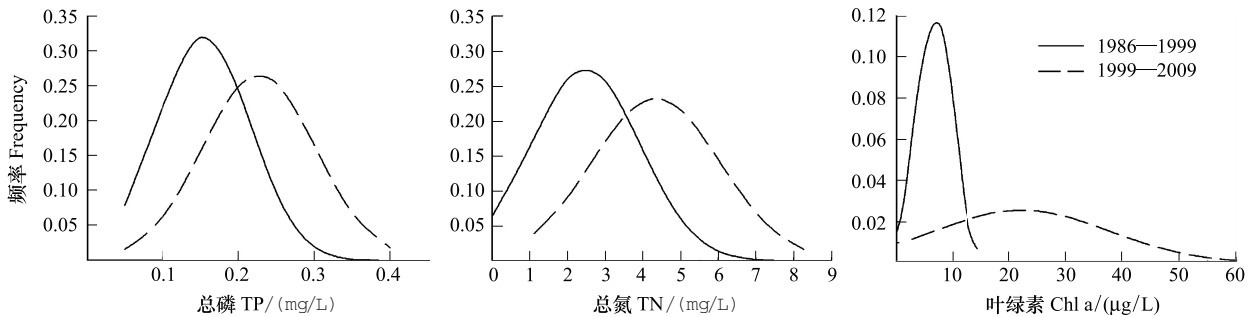


图3 淀山湖中度富营养化(1986—1999年)和富营养化(1999—2009年)两个不同营养阶段 TP、TN 和 Chl a 的频率分布

Fig. 3 Frequency distributions of TP, TN and Chl a of Dianshan Lake on different trophic stages

如图 3 所示,淀山湖从中度富营养化 (1986—1999 年) 向重度富营养化 (1999—2009 年) 的演变过程中,水体营养物输入响应指标 TP、TN 和 Chl a 的平均浓度 (平均值 μ) 随着富营养化程度的增加而增加,而且指标的离散程度 (标准差 σ) 也随之增加 (表 1)。如果以湖库 V 类水环境质量的 TN (2.0 mg/L) 和 TP (0.2 mg/L),以及 Chl a (15 $\mu\text{g/L}$) 为参照阈值,重度富营养化的淀山湖超过上述阈值的概率为 91.4%, 51.9% 和 67.9%, 远大于中度富营养化时淀山湖的上述阈值的概率 62.8%, 12.1% 和 0.5%。尤其是营养物的响应指标 Chl a, 在重度富营养化下较高的平均值和离散程度,使其悬钟形曲线的形状变得更加扁平。

2.2 淀山湖生态修复前后的营养物输入响应变量的频率分布

2004 年以来,上海加强了对淀山湖流域上海境内的营养物控制和水质管理,例如在第 2 轮环保 3a 行动计划 (2003—2005 年) 中取消淀山湖内网箱养鱼,在一定程度上遏制了水体营养物浓度继续上升的趋势。图

4 给出了淀山湖修复前(1999—2004 年)和修复后(2004—2009 年)两个时期营养物输入响应变量 TP、TN 和 Chl a 的频率分布。

表 1 淀山湖在不同富营养化程度下 TN、TP 和 Chl a 的统计学特征

Table 1 Statistical characteristics of TP, TN and Chl a of Dianshan Lake on different trophic stages

指标 Index	统计学特征 Statistical characteristics	中度富营养化 Mesotrophic (1986—1999)	重度富营养化 Eutrophic (1999—2009)
总氮 TN	平均值 Mean(μ)	2.47	4.34
	离散程度 Variance(σ)	1.45	1.71
	频率 Frequency (> 2.0 mg/L)/%	62.8	91.4
总磷 TP	平均值 Mean(μ)	0.13	0.20
	离散程度 Variance(σ)	0.06	0.08
	频率 Frequency (> 0.2 mg/L)/%	12.1	51.9
叶绿素 Chl a	平均值 Mean(μ)	6.70	22.20
	离散程度 Variance(σ)	3.25	15.46
	频率 Frequency (> 15 μ g/L)/%	0.5	67.9

如图 4 所示,淀山湖修复后水体营养物 TN 和 TP 平均浓度(平均值 μ)不再上升,离散程度(标准差 σ)也有所减小;但响应指标 Chl a 的平均浓度和离散程度均继续显著增加。如果也以湖库 V 类水环境质量的 TN (2.0 mg/L)和 TP(0.2 mg/L),以及 Chl a(15 μ g/L)为参照阈值,淀山湖修复后 TN 和 TP 超过上述阈值的概率为 94.5% 和 55.5%,与修复前的 89.2% 和 50.3% 大体相当;而修复后 Chl a 超过 15 μ g/L 的概率则继续增加至 72.6%,超过修复前 1.33 倍(表 2)。

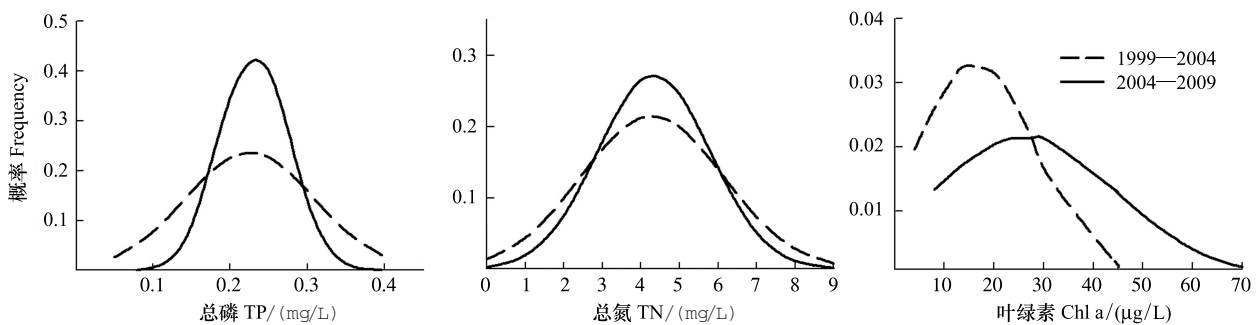


图 4 淀山湖修复前(1999—2004 年)后(2004—2009 年)两个不同时期 TP、TN 和 Chl a 的频率分布

Fig. 4 Frequency distributions of TP, TN and Chl a of Dianshan Lake on different periods before (1999—2004) and after (2004—2009) restoration

表 2 淀山湖在修复前(1999—2004 年)后(2004—2009 年)TP、TN 和 Chl a 的统计学特征

Table 2 Statistical characteristics of TP, TN and Chl a of Dianshan Lake before (1999—2004) and after (2004—2009) restoration

指标 Index	统计学特征 Statistical characteristics	生态修复前 Before restoration (1999—2004)	生态修复后 After restoration (2004—2009)
总氮 TN	平均值 Mean(μ)	4.29	4.34
	离散程度 Variance(σ)	1.85	1.46
	频率 Frequency (> 2.0 mg/L)/%	89.2	94.5
总磷 TP	平均值 Mean(μ)	0.20	0.21
	离散程度 Variance(σ)	0.08	0.04
	频率 Frequency (> 0.2 mg/L)/%	50.3	55.5
叶绿素 Chl a	平均值 Mean(μ)	16.36	26.16
	离散程度 Variance(σ)	12.09	18.55
	频率 Frequency (> 15 μ g/L)/%	54.5	72.6

2.3 淀山湖不同富营养化阶段 TP 和 Chl a 的关系

采用 OECD 的方法^[1]对淀山湖不同富营养化阶段的 TP 和 Chl a 的关系进行回归分析(图 5)。结果表明,无论是中度富营养化阶段、重度富营养化阶段,还是最近几年,淀山湖水体的总磷浓度与叶绿素浓度之间都具有显著的对数线性回归关系。营养物 TP 和响应指标 Chl a 之间的这种显著回归关系还表明,淀山湖浮游藻类增长的营养物限制符合磷限制范式,即营养物磷是淀山湖藻类增长(年平均水平)的主要限制营养物。值得注意的是,随着淀山湖富营养化程度的加剧,回归方程的斜率逐渐增大。尤其是最近几年(2004—2008 年),TP-Chl a 关系式斜率增加的特别快,是淀山湖中度富营养化和重度富营养化初期的 3—5 倍。

3 讨论

3.1 富营养化程度与营养物输入响应变量的频率分布

从统计学角度讲,淀山湖中度富营养化(1986—1999 年)和重度富营养化(1999—2009 年)阶段营养物输入响应变量频率分布的变化(图 3 和图 4),颇为典型地反映了 OECD 提出的变化规律,即随着湖泊富营养化程度的加重,水体中 TN 和 TP 的平均浓度上升(淀山湖 TN 和 TP 的离散程度亦有小幅变化);Chl a 的平均浓度和离散程度都有较大的增加(图 2)。这个湖泊富营养化过程的统计学特征表明,在湖泊富营养化的初期 TN 和 TP 浓度的增加并不会马上引起湖泊初级生产力(例如 Chl a)的变化。湖泊一旦进入重度富营养化,Chl a 的变化速率,无论是平均值还是离散程度,都会有很大程度的上升,大大增加了水华暴发的概率。从表 1 可以看到,淀山湖进入重度富营养化之后,水体中叶绿素浓度超过 15 $\mu\text{g}/\text{L}$ 的概率呈百倍的上升。淀山湖的营养物输入指标 TN 和 TP 随湖泊富营养化程度的变化呈线性,而响应指标 Chl a 随湖泊富营养化程度的变化则可能呈非线性。

3.2 湖泊营养物控制和营养物输入响应变量的关系

淀山湖在重度富营养化的条件下,TN 和 TP 平均浓度及其离散程度即使变化不大,也会引起 Chl a 平均浓度及其离散程度的较大变化(图 3)。这就是说,在重度富营养化的湖泊中,即便营养物质得到了控制(水体中营养物质的浓度不再增加),水体藻类的增长也不会马上停止,藻类水华事件还会在一个时期内继续发生。

图 6 给出了淀山湖生态修复前(1999—2004 年)后(2004—2009 年)两个时期营养物输入响应变量 TP、TN 和 Chl a 的箱线图。从统计学的角度讲,对淀山湖营养物控制和削减的成效仅仅反映在水体营养物峰值的减少(离散程度减小);而仅仅削减水体营养物的峰值,不能有效降低湖泊藻类叶绿素的浓度。这种统计学

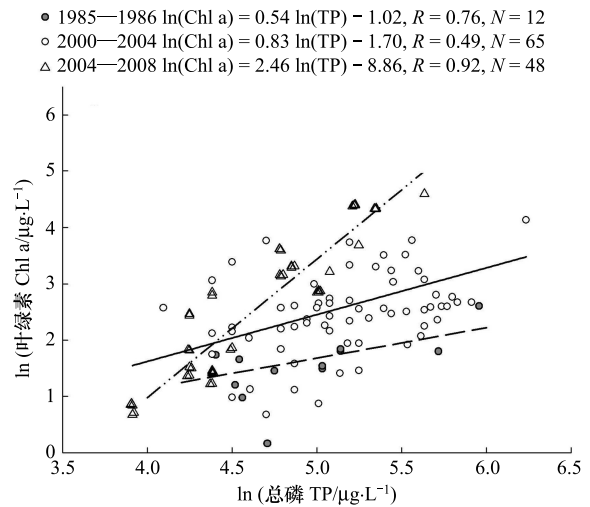


图 5 淀山湖在不同富营养化阶段时的 TP 和 Chl a 的关系

Fig. 5 The TP-Chl a relationships during the different trophic stages of Dianshan Lake

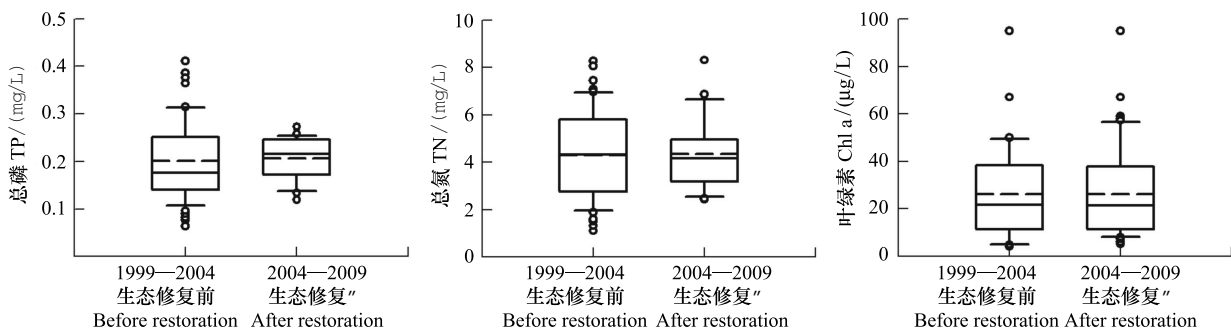


图 6 淀山湖修复前(1999—2004 年)后(2004—2009 年)两个不同时期 TP、TN 和 Chl a 的箱线图

Fig. 6 Box plots of TP, TN and Chl a of Dianshan Lake in different periods before (1999—2004) and after (2004—2009) restoration

特征不仅反映在淀山湖上,其他湖泊在修复和营养物削减的过程中,也表现出类似的现象。例如 1995 年荷兰对 231 个湖泊进行了调查,调查涵盖了 1980—1996 年整整 17a 的历史数据。1985—1992 年期间,TP 的峰值水平下降了近一半,但湖泊藻类 Chl a 的平均浓度和离散程度并没有因为磷的削减而发生显著的变化^[16]。

3.3 富营养化程度与 TP-Chl a 关系式的斜率

随着淀山湖富营养化程度的加剧,TP-Chl a 回归方程的斜率逐渐增大。从某种意义上讲,湖泊 TP-Chl a 关系式的斜率反映了藻类增长的产率,即单位 TP 所产生的藻类生物量。在不同条件下,单位总磷的叶绿素产率不是一个常数^[17];但一般认为,清洁湖泊的叶绿素具有比浑浊湖泊更高的产率^[18]。Havens 等人研究了北美、欧洲、亚洲和新西兰的 369 个湖泊夏季的数据,他们不认为湖泊的颜色和混合状态是影响 TP-Chl a 关系中斜率的主要因素,尤其是在 TP 含量高的富营养化湖泊^[19]。

淀山湖是一个富营养化的浅水湖泊,在一般的情况下混合程度较高。在 2008—2009 年度的全湖测量中,只在夏季监测到了短暂的分层现象^[20]。淀山湖 1999 年进入重度富营养化阶段之后,水体透明度以平均每年递减 5cm 的速度下降,蓝藻在藻类群落中比例逐年升高^[5]。这些具有气囊的蓝藻会迁移聚集在湖泊表面^[21],消除了光强限制作用,单位营养物的产率也就得到了提高。

河流中悬浮藻类的产率也有类似的现象。图 7 是美国明尼苏达州若干条河流的 TP-Chl a 和 TN-Chl a 关系图^[22],两组回归方程中 2006 年的斜率都比 1999 年的要高得多。但明尼苏达州河流中总磷的平均浓度 1999 年相比 2006 年变化不大,而总氮的浓度却有大幅度的下降。如何解释这些截然相反的现象,是一个值得继续研究的问题。

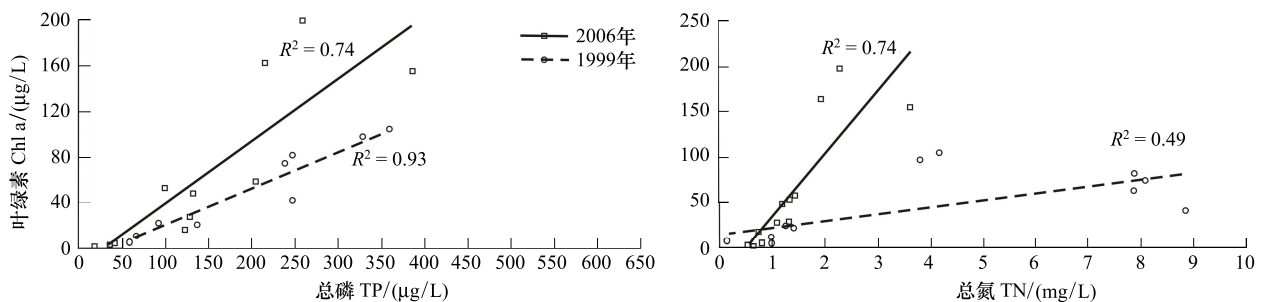


图 7 美国明尼苏达州若干条河流的 TP-Chl a 和 TN-Chl a 关系图^[22]

Fig. 7 TP-Chl a and TN-Chl a relationships of streams in Minnesota, USA^[22]

4 结论

淀山湖富营养化过程中,水体营养物输入(TP 和 TN)和及其响应指标(Chl a)的统计学特征表明:

(1) 水体 TP、TN 和 Chl a 的平均浓度和离散程度随湖泊富营养化程度的升高而增加,其中以 Chl a 的增幅为最大;

(2) 湖泊营养物质(例如 TP)即使得到一定程度的控制,藻类生物量的平均水平和离散程度还会在一定时期内继续增加. 淀山湖在营养物总体浓度不变的情况下,Chl a 大于 15 µg/L 的概率继续增加了 20% 以上;

(3) 仅仅是削减营养物 TP 的峰值,从统计学上讲只减少了 TP 离散程度,不能有效降低湖泊叶绿素的平均水平。湖泊生态修复/恢复不是一个简单的可逆过程,营养物削减的效果不会在短期内体现出来;

(4) TP-Chl a 对数回归方程的斜率随湖泊富营养化程度的升高而增加,由 20 世纪 80 年代的 0.54 增加到目前的 2.46,可能是湖泊蓝藻群落比例上升和水华次数增加的结果。

淀山湖水体营养物投入响应指标的统计学特征,在许多混合较好的浅水湖泊和河流中都有体现。尽管如此,如何很好地解释这些湖泊统计学现象还需要更多的研究,湖泊营养物输入与响应变量的统计学规律可以从统计学角度认识湖泊的富营养化过程和恢复效果,为湖泊营养物基准和标准的制定提供最为实际的统计学支持。

References:

- [1] Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). *Eutrophication of Waters: Monitoring Assessment and Control*. Paris: OECD, 1982.
- [2] United States Environmental Protection Agency (USEPA). *National Strategy for the Development of Regional Nutrient Criteria*. Washington DC: USEPA, 1998.
- [3] Meng W, Wang L, Zheng B, Lei K. Methods for developing nutrient criteria in estuarine waters. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28 (10): 5133-5140.
- [4] Cheng X, Li X, Chen X. An assessment of long-term changes in water quality and benthos community of Suzhou Creek (1996—2006). *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29 (6): 3278-3287.
- [5] Cheng X, Li X P. 20-year variations of nutrients (N and P) and their impacts on algal growth in Lake Dianshan, China. *Journal of Lake Sciences*, 2008, 20(4): 409-419.
- [6] Hu E B. *Environment Risk Assessment Practical Technique and Method*. Beijing: China Environmental Science Press, 2000: 254-302.
- [7] Jerald L S. *Environmental Modeling: Fate and Transport of Pollutants in Water, Air, and Soil*. New York: John Wiley and Sons, 1996: 259-269.
- [8] Song Y C. *Research on Eutrophication and Pollution Prevention in Dianshan Lake*. Shanghai: East China Normal University, 1992.
- [9] Wang L Q, Zhang J Y, Wang X C, Peng Z R, Wang Y. Multianalysis between chlorophyll-a and environmental factors in Dianshan Lake water. *Journal of Shanghai Fisheries University*, 2008, 17(1): 58-64.
- [10] Zheng X, Wang Q. Evaluation of water quality and eutrophication in Dianshan Lake. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2009, 21(2): 68-70.
- [11] Shanghai Environmental Protection Bureau. *Shanghai Environment Quality Reports (1991—2007)*. Shanghai: Shanghai Environmental Protection Bureau, 1992-2008.
- [12] Wang Y B, You W H, Hu X Q, Xu C Y, Tong D. Seasonal dynamics of Cyanophyta and related affecting factors in Dianshan Lake. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(12): 2477-2485.
- [13] Wu A N, Zhu M J, Tang L, Zhu G, Wang Q, Zhang J P. Dynamics of chlorophyll a and analysis of environmental factors in Lake Dianshan during summer and autumn. *Journal of Lake Sciences*, 2011, 23(1): 67-72.
- [14] Zhang Z H, Zhao J M, Jiang S H, Qu W D, Zhu H G. Distribution of microcystin-LR and anatoxin — A and their influence factors in Dianshan Lake during summer and autumn. *Journal of Hygiene Research*, 2003, 32(4): 316-319.
- [15] Zhang Z H, Zheng L X, Qu W D, Zhu H G. The distribution state of microcystin-LR and anatoxin — A in Dianshan lake. *China Environmental Science*, 2003, 23(4): 403-406.
- [16] National Institute for Public Health and Environment. *Environmental Balance*. The Netherlands: National Institute for Public Health and Environment, 1995.
- [17] Tetta P, Gilpin L, Svendsen H, Erlandsson C P, Larsson U, Kratzer S, Foulland E, Janzen C, Lee J Y, Grenz C, Newton A, Ferreira J G, Fernandes T, Scory S. Eutrophication and some European waters of restricted exchange. *Continental Shelf Research*, 2003, 23 (17/19): 1635-1671.
- [18] Edmundson J A, Carlson S R. Lake typology influences on the phosphorus-chlorophyll relationship in subarctic, Alaskan lakes. *Lake and Reservoir Management*, 1998, 14(4): 440-450.
- [19] Havens K E, Nürnberg G K. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes: potential influences of color and mixing regime. *Lake and Reservoir Management*, 2004, 20(3): 188-196.
- [20] Li X P. *Study on the Growth of Phytoplankton Community in Dianshan Lake*. Shanghai: Shanghai Academy of Environmental Sciences, 2009.
- [21] Li X. Cyanobacteria movements and its bloom control. *Chinese Journal of Nature*, 2008, 30(5): 280-286.
- [22] Minnesota Pollution Control Agency. *Relation of Nutrient Concentrations and Biological Responses in Minnesota Streams; Applications for River Nutrient Criteria Development*. Saint Paul: Minnesota Pollution Control Agency, 2008.

参考文献:

- [3] 孟伟, 王丽婧, 郑丙辉, 雷坤. 河口区营养物基准制定方法. *生态学报*, 2008, 28(10): 5133-5140.
- [4] 程曦, 李小平, 陈小华. 苏州河水质和底栖动物群落 1996—2006 年的时空变化. *生态学报*, 2009, 29(6): 3278-3287.
- [5] 程曦, 李小平. 淀山湖氮磷营养物 20 年变化及其藻类增长响应. *湖泊科学*, 2008, 20(4): 409-419.
- [6] 胡二邦. *环境风险评价实用技术和方法*. 北京: 中国环境科学出版社, 2000: 254-302.
- [8] 宋永昌. *淀山湖富营养化及其防止研究*. 上海: 华东师范大学出版社, 1992.
- [9] 王丽卿, 张军毅, 王旭晨, 彭自然, 王岩. 淀山湖水体叶绿素 a 与水质因子的多元分析. *上海水产大学学报*, 2008, 17(1): 58-64.
- [10] 郑晓红, 汪琴. 淀山湖水质状况及富营养化评价. *环境监测管理与技术*, 2009, 21(2): 68-70.
- [11] 上海市环境保护局. *上海市环境质量报告书 (1991—2007)*. 上海: 上海市环境保护局. 1992-2008.
- [12] 汪益斌, 由文辉, 胡雪芹, 徐春燕, 童琰. 淀山湖蓝藻季节动态及其影响因子. *生态学杂志*, 2010, 29(12): 2477-2485.
- [13] 吴阿娜, 朱梦杰, 汤琳, 朱刚, 汪琴, 张锦平. 淀山湖蓝藻水华高发期叶绿素 a 动态及相关环境因子分析. *湖泊科学*, 2011, 23(1): 67-72.
- [14] 张志红, 赵金明, 蒋颂辉, 屈卫东, 朱惠刚. 淀山湖夏秋季微囊藻毒素-LR 和类毒素——A 分布状况及其影响因素. *卫生研究*, 2003, 32(4): 316-319.
- [15] 张志红, 郑力行, 屈卫东, 朱惠刚. 淀山湖微囊藻毒素-LR 和类毒素——A 的分布状况. *中国环境科学*, 2003, 23(4): 403-406.
- [20] 李小平. 淀山湖藻类群落增长规律的研究. 上海: 上海市环境科学研究院, 2009.
- [21] 李小平. 蓝藻运动与水华早期预防和控制. *自然杂志*, 2008, 30(5): 280-286.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 5 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

- Statistical characteristics of eutrophication process in Dianshan Lake CHENG Xi, LI Xiaoping, CHEN Xiaohua (1355)
- Cadmium assimilation and elimination and biological response in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) fed on Cadmium diets ZHANG Zhengtian, ZHANG Guangduo, ZHANG Hucheng, et al (1363)
- Effect of co-cultivation time on camptothecin content in *Camptotheca acuminata* seedlings after inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi YU Yang, YU Tao, WANG Yang, et al (1370)
- Relationship between frequency of sandstorms and air humidity as well as plant phenology: a case study from the Minqin desert area CHANG Zhaofeng, WANG Yaolin, HAN Fugui, et al (1378)
- Genetic diversity and evolution relationship on mtDNA D-loop in Tibetan yaks ZHANG Chengfu, XU Lijuan, JI Qiumei, et al (1387)
- Geostatistical analysis on spatiotemporal distribution pattern of soil water content of forest gap in *Pinus koraiensis* dominated broadleaved mixed forest LI Meng, DUAN Wenbiao, CHEN Lixin, et al (1396)
- Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau, China XING Xiaoyi, HUANG Yimei, HUANG Haibo, et al (1403)
- Soil carbon, nitrogen and microbiological characteristics during bamboo high-speed growth WANG Xueqin, ZHANG Qichun, YAO Huaiying (1412)
- Effects of long-term increased soil N on leaf traits of several species in typical Inner Mongolian grassland HUANG Juying, YU Hailong, YUAN Zhiyou, et al (1419)
- Influence of arbuscular mycorrhizal associations on the interspecific competition between mycorrhizal and non-mycorrhizal plants ZHANG Yuting, WANG Wenhua, SHEN Hong, et al (1428)
- Structure and biodiversity of fig wasp community inside syconia of *Ficus virens* Ait. var. *sublanceolata* (Miq.) Corner in Fuzhou WU Wenshan, CHEN Youling, CAI Meiman, et al (1436)
- Growth and photosynthetic characteristics of *Epimedium koreanum* Nakai in different habitats ZHANG Yonggang, HAN Mei, HAN Zhongming, et al (1442)
- The critical temperature to Huashan Pine (*Pinus armandi*) radial growth based on the daily mean temperature FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (1450)
- The analysis of grade diversity indices of butterfly community in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River MA Qi, LI Aimin, DENG Heli (1458)
- Research on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves HAN Ruifeng, LI Jianming, HU Xiaohui, et al (1471)
- Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emission fluxes from double-cropping paddy field TANG Haiming, XIAO Xiaoping, SHUAI Xiqiang, et al (1481)
- Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Grubantonggut Desert ZENG Xiaoling, LIU Tong, ZHANG Weibin, et al (1490)
- Carbon and nitrogen stable isotope characteristics of particulate organic matter and zooplankton in Liuxihe Reservoir NING Jiajia, LIU Hui, GU Binhe, et al (1502)
- Selection of vegetable seeds native in China instead of the cress seed for evaluating the maturity of biosolids LIU Songsong, XU Tianfen, WU Qitang, et al (1510)
- Effects of anthropogenic nutrient input on organisms from different trophic levels in Hanfeng Lake: evidence from stable carbon and nitrogen isotope analysis LI Bin, WANG Zhijian, JIN Li, et al (1519)
- Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Liusha Bay ZHANG Caixue, CHEN Huiyan, SUN Xingli, et al (1527)
- Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*) ZHAO Benliang, ZHANG Jia'en, LUO Mingzhu, et al (1538)
- The effects of rice growth stages on the ovarian development and take-off of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera* CHEN Yu, FU Qiang, LAI Fengxiang, et al (1546)
- Cold tolerance of the overwintering egg of *Apolygus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae) ZHUO Degan, LI Zhaohui, MEN Xingyuan, et al (1553)
- A suggestion on the estimation method of population sizes of *Niviventer confucianus* in Land-bridge island ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (1562)
- The carbon footprint of food consumption in Beijing WU Yan, WANG Xiaoke, LU Fei (1570)
- Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hanshan County in Anhui Province FU Yinyin, YUAN Zengwei, WU Huijun, et al (1578)
- A laboratory study of auctions for water rights transactions in inland river basin: a case study of irrigation areas of Heihe river basin DENG Xiaohong, XU Zhongmin (1587)
- Review and Monograph**
- A review of the effect of typhoon on forests LIU Bin, PAN Lan, XUE Li (1596)
- Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems ZHANG Chenglong, HUANG Hui, HUANG Liangmin, et al (1606)
- Interspecific competition among three invasive *Liriomyza* species XIANG Juncheng, LEI Zhongren, WANG Haihong, et al (1616)
- Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters YU Yu, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (1623)
- Recent advances in studies on dissimilatory Fe(III)-reducing microorganisms LI Huijuan, PENG Jingjing (1633)
- Discussion**
- Ecological vulnerability research for Xilingol League, Northern China XU Guangcai, KANG Muye, Marc Metzger, et al (1643)
- Scientific Note**
- Spatial distribution and species composition of zooplanktons in the eastern tropical Pacific Ocean off Costa Rica LIU Bilin, CHEN Xinjun, JIA Tao, et al (1654)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,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,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 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 32 卷 第 5 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 5 2012

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, 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:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.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 70.00 元