

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第1期 Vol.32 No.1 **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 1 期

2012 年 1 月 (半月刊)

目 次

局域种群的 Allee 效应和集合种群的同步性	刘志广, 赵 雪, 张丰盘, 等 (1)
叶片毛尖对齿肋赤藓结皮凝结水形成及蒸发的影响	陶 冶, 张元明 (7)
长江口锋面附近咸淡水混合对浮游植物生长影响的现场培养	王 奎, 陈建芳, 李宏亮, 等 (17)
河流流量对流域下垫面特性的响应	田 迪, 李叙勇, Donald E. Weller (27)
中国中东部平原亚热带湿润区湖泊营养物生态分区	柯新利, 刘 曼, 邓祥征 (38)
基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略	聂泽宇, 梁新强, 邢 波, 等 (48)
滇池外海蓝藻水华爆发反演及规律探讨	盛 虎, 郭怀成, 刘 慧, 等 (56)
采伐干扰对华北落叶松细根生物量空间异质性的影响	杨秀云, 韩有志, 张芸香, 等 (64)
松嫩草原榆树疏林对不同干扰的响应	刘 利, 王 赫, 林长存, 等 (74)
天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应	周德成, 罗格平, 韩其飞, 等 (81)
草原化荒漠草本植物对人工施加磷素的响应	苏洁琼, 李新荣, 冯 丽, 等 (93)
自然和人工管理驱动下盐城海滨湿地景观格局演变特征与空间差异	张华兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等 (101)
晋、陕、宁、蒙柠条锦鸡儿群落物种多样性对放牧干扰和气象因子的响应	周 伶, 上官铁梁, 郭东罡, 等 (111)
华南地区 6 种阔叶幼苗叶片形态特征的季节变化	薛 立, 张 柔, 奚如春, 等 (123)
河西走廊不同红砂天然群体种子活性相关性	苏世平, 李 毅, 种培芳 (135)
江西中南部红壤丘陵区主要造林树种碳固定估算	吴 丹, 邵全琴, 李 佳, 等 (142)
酸雨和采食模拟胁迫下克隆整合对空心莲子草生长的影响	郭 伟, 李钧敏, 胡正华 (151)
棉铃虫在 4 个辣椒品种上的寄主适合度	贾月丽, 程晓东, 蔡永萍, 等 (159)
烟草叶面积指数的高光谱估算模型	张正杨, 马新明, 贾方方, 等 (168)
不同作物田烟粉虱发生的时空动态	崔洪莹, 戈 峰 (176)
长期施肥对稻田土壤固碳功能菌群落结构和数量的影响	袁红朝, 秦红灵, 刘守龙, 等 (183)
新银合欢篱对紫色土坡地土壤有机碳固持的作用	郭 甜, 何丙辉, 蒋先军, 等 (190)
一株产漆酶土壤真菌 F-5 的分离及土壤修复潜力	茆 婷, 潘 澄, 徐婷婷, 等 (198)
木论喀斯特自然保护区土壤微生物生物量的空间格局	刘 璐, 宋同清, 彭晚霞, 等 (207)
岷江干旱河谷 25 种植物一年生植株根系功能性状及相互关系	徐 琨, 李芳兰, 苟水燕, 等 (215)
黄土高原草地植被碳密度的空间分布特征	程积民, 程 杰, 杨晓梅, 等 (226)
棉铃发育期棉花源库活性对棉铃对位叶氮浓度的响应	高相彬, 王友华, 陈兵林, 等 (238)
耕作方式对紫色水稻土有机碳和微生物生物量碳的影响	李 辉, 张军科, 江长胜, 等 (247)
外源钙对黑藻抗镉胁迫能力的影响	闵海丽, 蔡三娟, 徐勤松, 等 (256)
强筋与弱筋小麦籽粒蛋白质组分与加工品质对灌浆期弱光的响应	李文阳, 闫素辉, 王振林 (265)
专论与综述	
蛋白质组学研究揭示的植物根盐胁迫响应机制	赵 琪, 戴绍军 (274)
流域生态风险评估研究进展	许 妍, 高俊峰, 赵家虎, 等 (284)
土壤和沉积物中黑碳的环境行为及效应研究进展	汪 青 (293)
研究简报	
青藏高原紫穗槐主要形态特征变异分析	梁坤伦, 姜文清, 周志宇, 等 (311)
菊属与蒿属植物苗期抗蚜虫性鉴定	孙 娅, 管志勇, 陈素梅, 等 (319)
滨海泥质盐碱地衬膜造林技术	景 峰, 朱金兆, 张学培, 等 (326)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 332 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-01



封面图说: 白鹭展翅为梳妆, 玉树临风巧打扮——这是大白鹭繁殖期时的美丽体态。大白鹭体羽全白, 身长 94—104cm, 寿命 20 多年。是白鹭中体型最大的。繁殖期的大白鹭常常在湿地附近的大树上筑巢, 翩翩飞舞吸引异性, 其繁殖期背部披有蓑羽, 脸颊皮肤从黄色变成兰绿色, 嘴由黄色变成绿黑色。大白鹭是一个全世界都有它踪迹的广布种, 一般单独或成小群, 在湿地觅食, 以小鱼、虾、软体动物、甲壳动物、水生昆虫为主, 也食蛙、蝌蚪等。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201011171637

聂泽宇, 梁新强, 邢波, 叶玉适, 钱轶超, 余昱葳, 边金云, 顾佳涛, 刘瑾, 陈英旭. 基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略. 生态学报, 2012, 32(1): 0048-0055.

Nie Z Y, Liang X Q, Xing B, Ye Y S, Qian Y C, Yu Y W, Bian J Y, Gu J T, Liu J, Chen Y X. The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(1): 0048-0055.

基于氮磷比解析太湖苕溪水体营养现状及应对策略

聂泽宇¹, 梁新强^{2,*}, 邢波³, 叶玉适², 钱轶超², 余昱葳², 边金云²,
顾佳涛², 刘瑾¹, 陈英旭¹

(1. 浙江大学水环境研究院, 杭州 310029; 2. 浙江省水体污染控制与环境安全技术重点实验室, 杭州 310029;
3. 绍兴市环境监测中心站, 绍兴 312000)

摘要:生态化学计量学是评价水体营养状态的重要手段, 利用其氮磷比指标探讨了我国太湖主要入湖河流苕溪的营养状态。野外监测结果显示, 苕溪水氮素超标严重, 磷素污染轻度, 硝酸盐、颗粒态磷为氮磷的主要赋存形态, 且氮磷浓度呈现相似的季节变化规律, 表明苕溪主要受农业面源污染影响。氮磷比分析表明, 苕溪水体春、秋季处于磷素限制状态, 夏季适合藻类生长, 冬季低温条件下不利于藻类的大量繁殖; 苕溪生物量增长受磷素限制, 线性拟合亦显示其氮磷比主要受磷素波动的调控; 苕溪干流大面积暴发蓝藻水华的风险较部分支流及死水区低, 苕溪水入湖后, 特别是夏季其暴发风险将显著提高。针对苕溪水体的富营养化现状, 提出若干条水质改善应对策略。

关键词:苕溪; 氮磷比; 水质现状; 富营养化; 水质改善

The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis

NIE Zeyu¹, LIANG Xinqiang^{2,*}, XING Bo³, YE Yushi², QIAN Yichao², YU Yuwei², BIAN Jinyun², GU Jiatao², LIU Jin¹, CHEN Yingxu¹

1 The Academy of Water Science and Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

2 Key Laboratory for Water Pollution Control and Environmental Safety, Zhejiang Province, Hangzhou 310029, China

3 Environmental Monitoring Station of Shaoxing City, Shaoxing 312000, China

Abstract: Ecological stoichiometry is an important measurement to evaluate water trophic status. In this study, the ratio of nitrogen to phosphorus (N/P, an index of stoichiometry) was used to assess the nutrient conditions of Tiaoxi River which is the main inflow river of Taihu Lake. The results from field monitoring data showed that nitrogen contents in Tiaoxi River were much higher than surface water quality standards in China but phosphorus pollution was relatively light. The average concentration of total nitrogen (TN) was up to 3.5 mg/L, which was worse than Grade V (2mg/L) of national surface water quality standards in China, while the average concentration of total phosphorus (TP) was 0.18 mg/L, which met the water quality requirement of Level III (0.2 mg/L). In addition, nitrate and particulate phosphate were the main pollutants in Tiaoxi River. The average content of nitrate was up to 2.1 mg/L, indicating that Tiaoxi River was in a high oxidation environment and its self-purification ability was strong, whereas the mean value of dissolved phosphate (DP) was low (0.07 mg/L). Nutrients concentrations presented the similarly seasonal variations. The maximum concentration of TN was in winter, and the minimum level was in spring and autumn. The dynamic changes of TP concentration were roughly similar

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-006, 2009ZX07528-005-003); 国家自然科学基金资助项目(40901142)

收稿日期:2010-11-17; **修订日期:**2011-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liang410@zju.edu.cn

to TN, but TP presented a sharp decline in spring and fell to the lowest level throughout the year. Furthermore, correlation analysis also showed certain correlations among different nutrients index. TN and TP, DP were significantly positively correlated, indicating that the ways for nutrients inputs to Tiaoxi River were substantially the same, which suggested that Tiaoxi River was mainly influenced by agricultural non-point source pollution. TN/TP ratio represents the nutrients structure in Tiaoxi River for phytoplankton growth. According to the previous studies, $TN/TP < 7$ and $TN/TP > 30$ were used to categorize the different trophic status of nitrogen and phosphorus limitation in aquatic ecosystem, respectively. The N/P ratios showed that Tiaoxi River in spring and autumn ($TN/TP > 30$) were under the condition of phosphorus limitation. It was demonstrated that the water was suitable for algae growth in summer ($7 < TN/TP < 30$) but not in winter ($7 < TN/TP < 30$) because of the low temperature. Biomass growth was inhibited by phosphorus for the whole river during the monitoring period ($TN/TP > 30$), and linear regression showed that N/P ratio was mainly affected by phosphorus fluctuations. In the inlets of Taihu Lake and some other dead water zones, the TN and TP concentrations were higher than 0.80 mg/L and 0.20mg/L, respectively, and the water flow velocity was slow, thus dominant bloom-forming cyanobacteria was not limited by nutrients content. Consequently, the TN/TP ratio, absolute nutrients concentration and water flow status were appropriate to meet the requirements of algal bloom. By researching and analyzing the whole river, it was concluded that the algal bloom risk in main stream of Tiaoxi River was lower than in part tributaries and dead water zones, which would significantly increase the algal bloom risk in the inlets zones of Taihu Lake, especially in summer. Furthermore, some strategies for water quality improvements were proposed based on the eutrophication status of Tiaoxi River.

Key Words: Tiaoxi River; N/P ratio; present situation of water quality; eutrophication; water quality improvement.

目前我国河流湖泊水体富营养化现象日趋严重,氮磷浓度成倍增长^[1-2],治理前对其污染现状进行深入评估将直接影响后续污染源削减方案的制定和实施。近年来,生态化学计量学理论逐渐被应用于水生生态学研究,该理论自经典 Redfield 比率(海洋浮游植物 N:P 值为固定值,即 16:1)的首次提出,后经 Hassett 及 Elser 等学者的推进而不断完善^[3],其中 N:P 不断成为评估水体营养结构的重要工具,氮磷的大量输入在一定程度上改变了水体营养及生物群落结构,而氮磷之间的耦合作用亦制约着生态系统的主要过程并受环境及水生生物调节^[3]。苕溪是太湖重要入湖河流,其水环境问题日趋突出且相关研究较少,本文利用野外水质监测结果,初步探明其氮磷污染现状,分析水体氮磷营养盐结构在不同季节的变化规律,利用氮磷比解析苕溪及其入湖后的富营养化风险,为其水质改善策略的制定提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域及采样方案

苕溪主要由东、南、西、北、中苕溪五大部分构成。苕溪上游流经浙西低山丘陵区,具有山溪性河流特征,土地利用类型主要以山林为主,竹林、茶园等较多。苕溪中下游途经杭嘉湖平原后注入太湖,具有平原性河道特征,主要土地利用类型为水稻田,另外包括菜地、苗木等。气象资料显示(图 1),监测期间日均温度范围为 $-0.8\sim 33.6^{\circ}\text{C}$,年均温度为 16.5°C ,年降雨量为 1411.6 mm,其中 2010 年 3 月降雨量高达 324.6 mm,占年降雨量的 23%,最大日降雨量为 94.6 mm,亦出现在此月份,而 2009 年 10 月降雨量最低仅为 9.4 mm,占年降雨量的 0.7%。可知苕溪流域降雨时间分配不均,每年入春及夏季降雨量较多,从 3 月开始进入雨季,苕溪处于

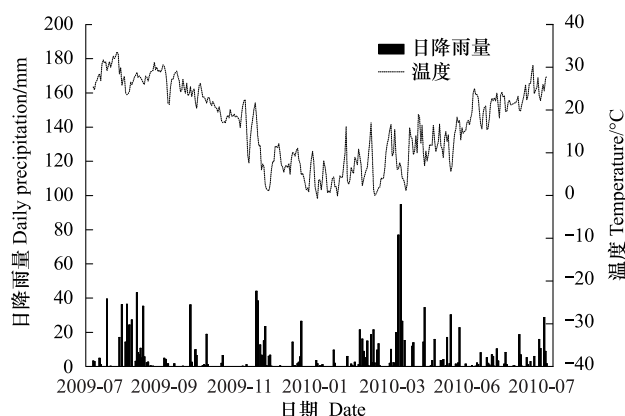


图 1 苕溪流域径山站气象数据月度监测结果

Fig. 1 Monthly monitoring results of meteorological data at Jingshan station in Tiaoxi River

丰水期,而入秋后与冬季降雨量较少,苕溪处于枯水期,其余时期降雨量介于两者之间,苕溪处于平水期。期间降雨天数共 150 d, 比例为 43.9%。日降雨量>25—30 mm 以上降雨天数共计 16 d,该类降雨能形成明显地表径流^[4],易形成严重的农业面源污染。

本研究在苕溪五大干流、太湖入湖口以及苕溪流域境内的主要支流布设 24 个断面,其余较小支流未考虑在内,监测期间(2009 年 6 月到 2010 年 6 月)共进行月度采样 12 次,所采集水样经酸化后于 48 h 内完成其分析测试工作。

1.2 测试分析与数据处理

水样测试指标包括氨氮、硝氮、总氮、溶解性磷酸盐和总磷,均按国家标准方法测定^[5]。同时根据国家《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)评估苕溪氮磷污染情况。所需气象数据由北苕溪附近的微型气象站(HOBO-U30, America)提供(图 2)。根据研究区内温度变化情况并参考浙江省季节变化规律将全年定性划分如下,春季为 2010-03—2010-05,夏季为 2009-06—2009-08,秋季为 2009-09—2009-11,冬季为 2009-12—2010-02。测试数据采用 SPSS 17.0 进行统计分析,将变量进行对数化处理以使其相关性分析和回归分析稳定,同时使用 SigmaPlot 9.0 中的局部加权回归方法(LOESS 拟合,核函数为 Tricube)对各月水质数据进行回归平滑并制图,以说明图 3 中数据序列的总体变化特点^[6]。

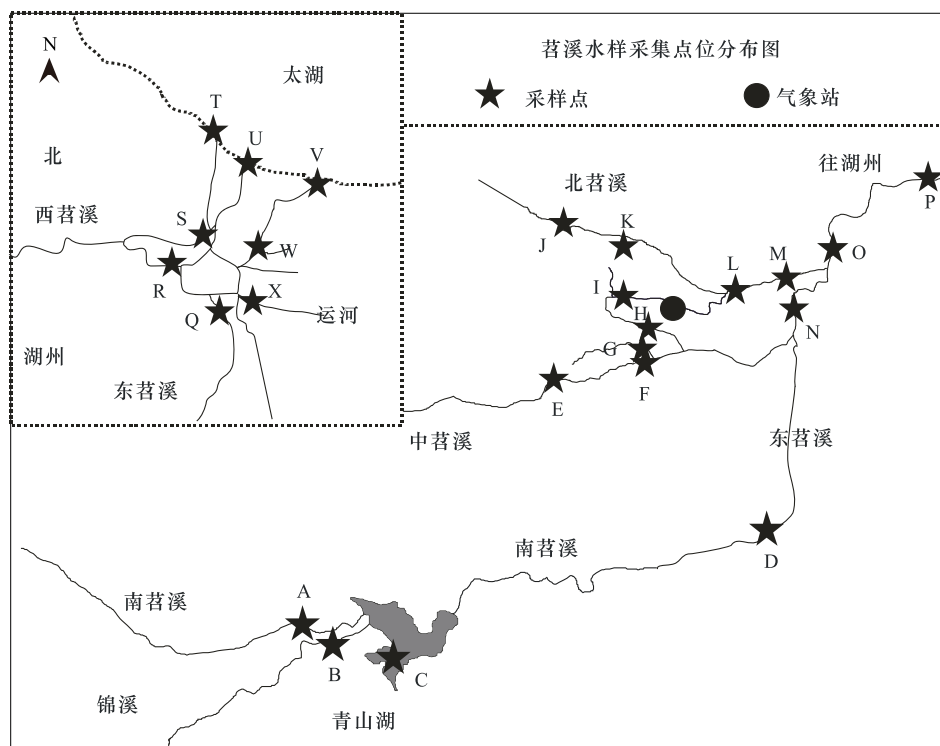


图 2 苕溪流域水样采集点位分布

Fig. 2 Distribution of water sampling sites in Tiaoxi River basin

水样采集点地理位置如下: A(N30°14', E119°43'); B(N30°13', E119°43'); C(N30°13', E119°46'); D(N30°16', E119°55'); E(N30°20', E119°51'); F(N30°20', E119°52'); G(N30°20', E119°52'); H(N30°21', E119°52'); I(N30°22', E119°52'); J(N30°23', E119°51'); K(N30°23', E119°52'); L(N30°22', E119°55'); M(N30°22', E119°56'); N(N30°21', E119°56'); O(N30°22', E119°57'); P(N30°23', E119°58'); Q(N30°50', E120°6'); R(N30°52', E120°4'); S(N30°53', E120°5'); T(N30°57', E120°6'); U(N30°56', E120°7'); V(N30°55', E120°11'); W(N30°52', E120°8'); X(N30°50', E120°7')

2 结果与讨论

2.1 苕溪氮磷水质基本现状

2.1.1 苕溪氮磷污染总体特征

监测期间苕溪总氮浓度介于 1.1—11.3 mg/L,均值为 3.5 mg/L,是 V 类水质浓度限值(2 mg/L)的 1.75

倍;氨氮浓度小于 9.9 mg/L,均值为 0.9 mg/L;硝氮浓度小于 6.1 mg/L,均值为 2.1 mg/L,硝态氮占总氮的 59.3%,为总氮的主要赋存形式,而水体氮素常以还原态及氧化态两种形式存在,还原态氨氮含量降低而氧化态硝氮含量上升在一定程度上意味着水体环境氧化能力有提升的趋势^[7],说明苕溪总体处于较高的氧化环境,其水体自净能力较强^[6,8]。总磷浓度介于 0.02—1.45 mg/L,均值为 0.18 mg/L,低于Ⅲ类水质浓度限值(0.2 mg/L);溶解态磷酸盐浓度低于 1.27 mg/L,均值为 0.07 mg/L,其中颗粒态磷占总磷的 59.7%,为总磷的主要构成形式。

相关性分析表明,各指标之间存在一定关联,并且具备农业面源污染特征(表 1):(1)TN 与 TP、溶解性磷酸盐呈显著正相关关系,表明苕溪氮磷的输入形式及途径大致相同,农业面源将携带大量氮磷进入水体;(2)溶解性磷酸盐、总磷与硝氮呈负相关,而与氨氮呈显著正相关关系,说明溶解性磷酸盐、总磷以及氨氮的输入途径一致,面源污染中氮磷常以氨氮、溶解性磷酸盐形式同时流失,氨氮入河后在河水自净作用下不断向硝态氮转化;(3)硝氮与氨氮呈显著负相关关系,这可能是由于苕溪水体氧化还原电位较高,还原态的铵根离子将被氧化成硝酸根离子而存在;(4)其余各指标之间的相关性关系亦符合常规解释。

表 1 苕溪各监测指标相关性分析结果

Table 1 The correlation analysis results of monitoring indicators in Tiaoxi River

	氨氮 Ammonia nitrogen	硝氮 Nitrate	总氮 Total nitrogen	溶解性磷酸盐 Dissolved phosphorus	总磷 Total phosphorus	TN/TP N/P ratio
氨氮 Ammonia nitrogen ammonia	1					
硝氮 Nitrate	-0.347 **	1				
总氮 Total nitrogen	0.406 **	0.504 **	1			
溶解性磷酸盐 Dissolved phosphorus	0.714 **	-0.204 **	0.338 **	1		
总磷 Total phosphorus	0.603 **	-0.156 *	0.321 **	0.575 **	1	
TN/TPN/P ratio	-0.317 **	0.512 **	0.222 **	-0.255 **	-0.500 **	1

** 显著性水平为 0.01, * 显著性水平为 0.05。

综上可知苕溪氮磷污染特征为:(1)氮素污染严重,TN 指标超标严重,硝态氮为总氮主要赋存形态,水体自净能力较强;(2)磷素指标整体维持在Ⅲ类水质水平;(3)各指标具备农业面源污染特征。

2.1.2 苕溪氮磷季节性变化特征

TN、TP 浓度的季节性变化过程非常类似,各指标均存在季节性波动(图 3)。总氮浓度在冬季最大,入冬初期即 12 月初达到最大值,夏季其次,春秋两季含量大体相当均较低,于 10 月初达到最小值。总磷浓度变化大体类似前者,但其浓度在春季急剧下降至全年最低水平,各季节氮磷浓度变化特征如下:

(1)冬季水体中 TN 和 TP 浓度均值最高,分别达 (3.7 ± 0.2) mg/L, (0.24 ± 0.03) mg/L。冬季氮磷浓度过高,一方面是受苕溪枯水期影响,另一方面可能是由于冬季持续低温(平均气温为 6.0 ℃)抑制了水体微生物,浮游动植物以及大中型沉水植物、挺水植物的生物活性,从而降低了生物作用对氮磷的去除效果,河流自净能力较差^[9]。

(2)夏季平均温度为 27.0 ℃,TN,TP 浓度均值较高,分别达 (3.6 ± 0.2) mg/L, (0.22 ± 0.33) mg/L。该时期苕溪正处于丰水期,且台风导致降雨量较大,若苕溪水体主要受点源污染,氮磷浓度受雨水稀释本应极大降低,然水体中氮磷浓度仍然较高,由此推测苕溪呈明显的农业面源污染特征^[10],且面源污染严重,其氮磷流失“面广量大”。究其原因可知,苕河流域种植业的作物施肥时间主要集中于夏季,如此时期流域内的主要作物类型水稻(面积达 14.4 万 hm²,占苕河流域土地资源的 39.9%),其平均单季施氮量高达 300 kgN/hm²,而肥料利用率仅为当季施肥量的 30%—35%,故大部分的肥料随田间排水大量流失,氮磷流失严重;农村地区生活污水收集处理率较低,分布广泛,缺乏污水处理设施,面源贡献率高;沿岸养殖业规模较大,氮磷排放量居高不下;同时,频繁降雨导致土壤侵蚀作用加强,土壤中氮磷大量流失^[2]。TN 和 TP 浓度在夏季波动范围最大,并表现出明显的浓度峰值,分别为 1.3—11.3 mg/L 与 0.05—1.45 mg/L,进一步说明夏季氮磷流失受降雨影

响流失严重^[10]。

(3) 春秋两季平均温度为 16.6℃, 氮磷浓度较低, 春季 TN、TP 浓度均值为 (3.3±0.1) mg/L, (0.13±0.12) mg/L, 秋季 TN、TP 浓度均值为 (3.3±0.2) mg/L, (0.16±0.24) mg/L。TN、TP 浓度入春后呈现明显的下降趋势, 这可能受春季降雨影响, 苕溪水位上升, 或入春后水体生物复苏有关, 同时该时期施肥及降雨量较夏季低, 氮磷流失因此较低, 氮磷浓度由于稀释、生物阻截等作用而降低^[10]。

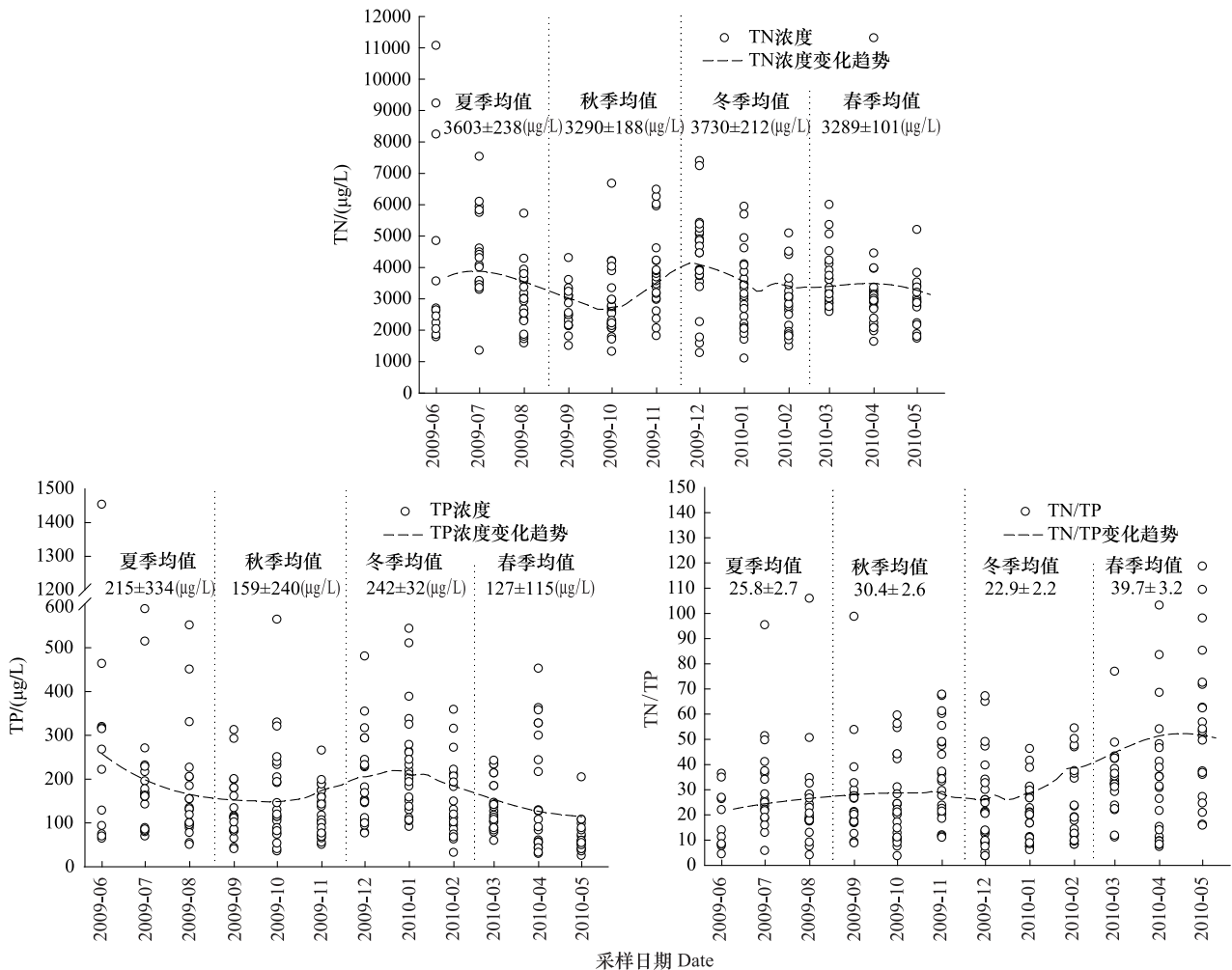


图3 苕溪水体总氮、总磷浓度与氮磷比的季节变化过程

Fig. 3 The seasonal variation process of total nitrogen, total phosphorus concentration and N/P ratio in the waterbody of Tiaoxi River

2.2 苕溪及入湖水体富营养化现状评估

2.2.1 苕溪水体氮磷营养盐结构分析

TN/TP(质量比)对藻类的爆发性生长具有重要意义,是水中浮游植物营养结构特点的重要反映^[6]。据此学者提出富营养化评估的营养物限制性划分标准:(1)当水体中氮磷比<7—10时,藻类生长表现为氮限制状态,生物固氮作用有可能发生以调节 TN/TP,消纳水体中相对较多的 TP;(2)氮磷比>22.6—30时,磷将成为藻类生长的限制性因子^[6,8,11],较低的 TP 含量水平可能使得氮素的有机合成过程受到抑制,无机氮向有机氮形态转化速率降低;(3)氮磷比介于两者之间时为藻类生长的合适范围,通过对硝氮的利用和摄取以实现氮素有机合成的生态过程较为明显。研究表明浮游植物在代谢过程中的氮磷摩尔比理论值为 16:1^[12]。而 TN/TP 为 12:1 左右的水体中藻类产生周期最短,产生量最多,降至 4:1 时则未产生藻类^[13]。

从图 3 得知氮磷比均值在 2009 年夏季达到全年较低值 25.8±2.7,入秋后其均值增大至 30.4±2.6,在冬

季下降至全年最低值 22.9 ± 2.2 , 2010 年春季达到最大值 39.7 ± 3.2 。本研究采用氮磷比 <7 与 >30 作为水体氮限制与磷限制的参考值^[8]。统计结果显示:(1)春、秋季氮磷比均值分别 >30 , 苕溪水体整体处于磷限制状态,特别是春季,苕溪总磷浓度下降趋势显著高于总氮浓度,氮磷比出现了显著的提高并达到最大值(图 3),这可能是由于春季水体生物复苏作用消纳大量氮磷,氮素易通过降雨及地表径流得到补充,而自然界磷素迁移速率远远低于氮素并主要以颗粒态形式流失^[14],且其在迁移过程中易被截留,故苕溪氮素补充强度远远高于磷素,监测结果亦显示水体磷素浓度较氮素下降显著(图 3),李哲等对小江回水区的研究亦发现春季氮磷比达全年最大值^[6];(2)夏冬季氮磷比均值分别介于 7—30 之间,苕溪水体整体上适合藻类生长,但由于冬季气温较低,在一定程度上抑制了藻类的繁殖生长,使冬季藻类产生周期延长,生产量相对较低^[13],可以推测冬季藻类大量繁殖的风险较低。(3)苕溪氮磷比年均值为 30.2 ± 1.5 , 水体浮游植物总体处于磷限制状态。当水体氮磷含量分别大于 0.80 mg/L 与 0.20 mg/L 时,以微囊藻为主导的蓝藻暴发不受氮磷营养盐含量限制^[15],而苕溪水体总氮和总磷平均浓度分别为 $3.5, 0.18 \text{ mg/L}$, 因此可知苕溪氮素供应充足,磷素成为生物量增长的限制性因子,生物量可以维持在原有水平上,磷输入负荷的增强将有利于藻类的生长繁殖^[15]。(4)苕溪水体氮磷比介于 3.6—118.6 之间,说明苕溪部分水体在时空上处于氮限制与磷限制交替出现的状态,在同时刻不同地区,以及不同季节的条件下,其水体中浮游生物的群落结构及其生长均在发生演替^[6]。

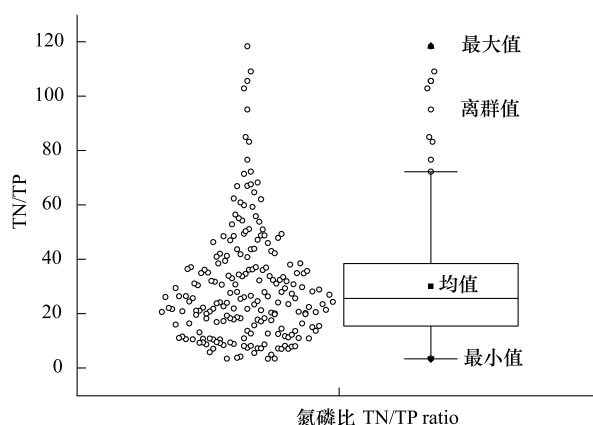


图 4 采样期间监测水样氮磷浓度比分布

Fig. 4 The distribution of TN/TP ratio of monitored water samples during sampling period

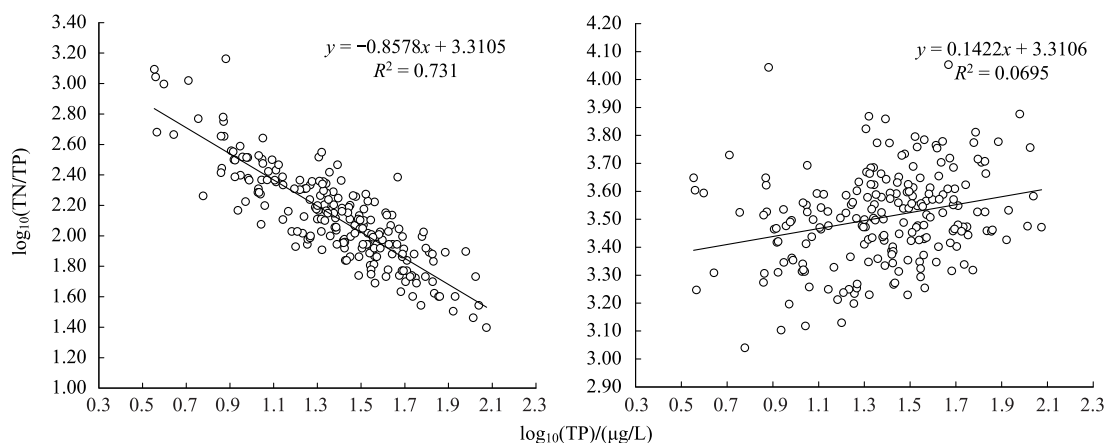


图 5 苕溪 TN/TP 与 TN、TP 的 log-log 相关关系

Fig. 5 The log-log correlation between TN / TP and TN, TP in Tiaoxi River

将 TN/TP 与 TP 进行对数化处理后进行线性拟合可得如下方程(图 5): $\log_{10}(\text{TN/TP}) = -0.8578\log_{10}(\text{TP}) + 3.3105$ ($R^2 = 0.731$, TP 单位为 $\mu\text{g/L}$), 拟合效果较好。而 $\log_{10}(\text{TN/TP})$ 与 $\log_{10}(\text{TN})$ 线性拟合效果较差 ($R^2 = 0.0695$)。说明苕溪水体氮磷比主要受磷素波动调控,进一步支持了苕溪水体营养结构主要处于磷素限制的结论。

2.2.2 苕溪及入湖水体蓝藻水华暴发风险分析

相对充足的氮磷含量,缓慢的水流流态(流速、水深等),适宜的气候条件(水温、光照等)是蓝藻水华暴发的 3 个必要条件^[16]。国内外文献中氮磷比的划分标准,绝大多数仅针对湖泊、水库及河道型水库,而将氮磷

比应用于河流富营养化水平及藻类暴发风险评估的尝试较少。河流水体因其滞留时间短,交换能力较强及流速较高等特点,使其不利于浮游植物的生长及群落结构的保持,同时河道底部由于水力冲刷作用,沉积物较少,内源提供的氮磷较湖泊水体少,因而发生大规模蓝藻水华的风险较低,如长江干流平均 TP 浓度高达 0.15—0.25 mg/L, TN 浓度在 1.5—2.8 mg/L 之间却未发生富营养化现象^[9]。而湖泊水库以及河流的部分支流、死水区的营养盐容易滞留并垂直分层,水体交换能力较差,底泥二次污染严重,这些因素均有利于浮游植物的聚集生长,因而其水体富营养化敏感性较高^[17-18],水生态安全系数较低。苕溪入湖后水流流态发生急剧的变化,可见苕溪水入湖后其蓝藻水华暴发风险将发生显著的变化。

仅通过氮磷比评估其蓝藻水华暴发风险并不可靠,苕溪水体氮磷比年均值说明其总体处于磷素限制状态,而夏季水体整体上适合藻类生长,但由于河流富营养化敏感性较低,同时夏季苕溪干流总氮浓度均值为 (3.4 ± 0.1) mg/L,总磷浓度为 (0.17 ± 0.02) mg/L,藻类繁殖生长亦受磷素限制^[15],可以推测总体上苕溪特别是干流发生大面积蓝藻水华现象的风险较低。而夏季苕溪支流总氮浓度均值为 (3.8 ± 0.2) mg/L,总磷浓度均值为 (0.22 ± 0.02) mg/L,故部分支流及死水区在充足的氮磷补给、合适的气象条件下,由于水流流动缓慢而成为富营养化发生的高危敏感区,此类河段蓝藻水华暴发事件频繁,如中苕溪支流长乐溪,北苕溪支流南港等河段水流流动缓慢,在 2009 年夏季均出现明显藻类暴发事件。

苕溪入湖后,特别是在夏季,氮磷比显示苕溪水体整体上适合藻类生长,而苕溪下游总氮浓度均值达 (3.1 ± 0.1) mg/L,总磷浓度则高达 (0.31 ± 0.03) mg/L,藻类生长不受氮磷营养盐限制^[15],同时河水水动力学条件发生急剧的变化,水流速度逐渐下降,水体交换能力减弱,因此可以推测苕溪入湖区域水体在适宜的气候条件下暴发蓝藻水华的风险非常高。近年来太湖尤其是入湖口附近水体在夏季蓝藻水华频现,藻类密度指数急剧上升等现象均印证上述推测。

本文对苕溪蓝藻水华暴发风险的评估,由于温度,光照,悬浮颗粒,水动力学条件等影响因素欠缺深入的考察,因此本结论存在一定缺陷并有待进一步完善。

2.3 苕溪氮磷污染防治策略

(1) 根据苕溪氮磷污染现状和排放通量制定削减方案,实现国控断面水质总氮指标从劣 V 类向 III 类突破,全流域总磷指标维持在 III 类水质水平。

(2) 氮磷削减同步进行,重点加强氮素排放削减力度,另需集中控磷以防止苕溪水体磷素限制状态发生逆转,以此抑制藻类快速繁殖^[18]。据此重点突破种植业、养殖业和农村生活污水等面污染源控制关键技术,以及营养盐生态拦截等过程阻控关键技术,形成农业面源污染控制技术体系。

(3) 苕溪水体与陆地的物质交换能力,河网的生态连通性在一定程度上受到各类工程如防洪大堤、水闸等人造隔断而支离破碎,水体交换与自净能力下降^[19],应充分考虑人类活动对苕溪生态承载力的影响。同时应充分重视苕溪发源地天目山区森林资源在水土保持与氮磷阻截方面的作用。

(4) 加强宣传教育,强化社会与个人对农业面源污染控制的意识。设置管理机构及组织协调机构,建设面源污染控制管理体系与相应政策法规。

3 结论

(1) 苕溪水体总氮指标超标严重,磷素污染轻度,硝态氮、颗粒态磷为氮磷主要赋存形式,氮磷污染指标具备农业面源污染特征。

(2) 氮磷浓度在不同季节存在差异,且其季节变化过程类似,总氮、总磷浓度冬季最高,夏季较高,春秋两季大体相当均低于冬夏两季。

(3) 苕溪水体氮磷比分析显示:春、秋季整体上处于磷素限制状态;夏季整体上适合藻类生长;冬季由于气温较低,藻类大量繁殖风险较低。苕溪水体总体上氮素供应充足,磷素是生物量增长的限制性因子,水体氮磷比主要受磷素波动调控。

(4) 总体而言苕溪特别是干流发生大面积蓝藻水华现象的风险较低,而部分支流及死水区为高危敏感

区,夏季苕溪入湖区域水体蓝藻水华暴发风险较高。

(5) 基于苕溪氮磷污染调查情况及其蓝藻水华暴发风险评估结果,提出一系列氮磷污染防治策略,为苕溪面源污染防治及水生态健康发展提供指导。

References:

- [1] Meybeck M, Chapman D, Helmer R. Global Fresh Water Quality, A First Assessment. London: Blackwell, 1989: 95-217.
- [2] Chen J S. River Water Quality in China and Principle of River Water. Beijing: Science Press, 2006: 68-69, 210-212.
- [3] He J S, Han X G. Ecological stoichiometry: searching for unifying principles from individuals to ecosystems. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 2-6.
- [4] Sheng Z Y, Liu R M, Ye M, Ding X W, Xu Q G, Jia H Y. The Characteristics of Non-Point Source Pollution and Its Change Rules in the Upper Yangtze River. Beijing: Science Press, 2008.
- [5] The Compilation Committee of *Analysis Methods of Water and Exhausted Water Monitoring* Belonging to State Environmental Protection Administration. Analysis Methods of Water and Exhausted Water Monitoring. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 243-285.
- [6] Li Z, Guo J S, Fang F, Zhang C, Sheng J P, Zhou H. Potential impact of TN/TP ratio on the cycling of nitrogen in Xiaojiang backwater area, Three Gorges Reservoir. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(4): 509-517.
- [7] Quirós R. The relationship between nitrate and ammonia concentrations in the pelagic zone of lakes. Limnetica, 2003, 22(1/2): 37-50.
- [8] Peng J X, Chen H J. Eutrophication and Water Quality Protection. Beijing: China Environmental Science Press, 1988: 15-47.
- [9] Liu T T. The Seasonally Change and Output of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in the Waterbody of Jialing River. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [10] Zhang G M, Gao Y, Li Z J, Wang J A, Shi J W. Study on non-point resource dynamic transport of Lanhe Watershed located in Fenhe River's upstream. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 102-106.
- [11] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? Limnology and Oceanography, 2000, 45(6): 1213-1223.
- [12] Bomchul K, Kwangsoon C, Chulgoo K, Lee U H, Kim Y H. Effects of the summer monsoon on the distribution and loading of organic carbon in a deep reservoir, Lake Soyang, Korea. Water Research, 2000, 34(14): 3495-3504.
- [13] Luo G Y, Kang K, Zhu L. Relationship between the period and quantity of algae production and TN/TP in water. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2007, 30(1): 142-145.
- [14] Wang X Y, Wang J Y, Ou Y, Yu Y, Duan S H, Lu B J. Phosphorus loss from Soil-Runoff-Sediment at slope plots. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 1-5.
- [15] Xu H, Paerl H W, Qin B Q, Zhu G W, Gao G. Nitrogen and phosphorus inputs control phytoplankton growth in eutrophic Lake Taihu, China. Limnology and Oceanography, 2010, 55(1): 420-432.
- [16] Zhang S, Li C M, Zheng B H, Zhai C Z, Zheng J, Zhang Q. Trophic status and nutrient output of tributaries in Three Gorges Reservoir area. Chinese Environmental Science, 2007, 28(3): 500-505.
- [17] Zhang Y, Zheng B H, Fu G, Liu H L. On the assessment methodology and standards for nutrition status in channel type reservoirs based on zoning of eutrophication sensitivity. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(6): 1016-1021.
- [18] Zhang Z B, Shi X L, Liu G J, Yang X Y, Wang Y N, Liu X J. The relationship between planktonic algae changes and the water quality of the West Lake, Hangzhou, China. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2980-2988.
- [19] Zheng B H, Tian Z Q, Zhang L, Zheng F D. The characteristics of the Hydrobios' distribution and the analysis of water quality along the West Shore of Taihu Lake. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(10): 4214-4223.

参考文献:

- [2] 陈静生. 河流水质原理及中国河流水质. 北京: 科学出版社, 2006: 68-69, 210-212.
- [3] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.
- [4] 沈珍瑶, 刘瑞民, 叶闯, 丁晓雯, 许其功, 贾海燕. 长江上游非点源污染特征及其变化规律. 北京: 科学出版社, 2008.
- [5] 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: 243-285.
- [6] 李哲, 郭劲松, 方芳, 张超, 盛金萍, 周红. 三峡水库小江回水区不同 TN/TP 水平下氮素形态分布和循环特点. 湖泊科学, 2009, 21(4): 509-517.
- [8] 彭近新, 陈慧君. 水质富营养化与防治. 北京: 中国环境科学出版社, 1988: 15-47.
- [9] 刘婷婷. 嘉陵江水体中碳、氮、磷季节变化及其输出. 重庆: 西南大学, 2009.
- [10] 张国明, 高扬, 李兆君, 王静爱, 史建伟. 汾河上游岚河流域非点源输出动态研究. 水土保持学报, 2008, 22(2): 102-106.
- [13] 罗固源, 康康, 朱亮. 水体中 TN/TP 与藻类产生周期及产生量的关系. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(1): 142-146.
- [14] 王晓燕, 王静怡, 欧洋, 于洋, 段淑怀, 路柄军. 坡面小区土壤-径流-泥沙中磷素流失特征分析. 水土保持学报, 2008, 22(2): 1-5.
- [16] 张晟, 李崇明, 郑丙辉, 崇志, 郑坚, 张芹. 三峡库区次级河流营养状态及营养盐输出影响. 环境科学, 2007, 28(3): 500-505.
- [17] 张远, 郑丙辉, 富国, 刘鸿亮. 河道型水库基于敏感性分区的营养状态标准与评价方法研究. 环境科学学报, 2006, 26(6): 1016-1021.
- [18] 张志兵, 施心路, 刘桂杰, 杨仙玉, 王娅宁, 刘晓江. 杭州西湖浮游藻类变化规律与水质的关系. 生态学报, 2009, 29(6): 2980-2988.
- [19] 郑丙辉, 田自强, 张雷, 郑凡东. 太湖西岸湖滨带水生生物分布特征及水质营养状况. 生态学报, 2007, 27(10): 4214-4223.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.32 ,No.1 January ,2012(Semimonthly)

CONTENTS

Allee effects of local populations and the synchrony of metapopulation	LIU Zhiguang, ZHAO Xue, ZHANG Fengpan, et al (1)
Effects of leaf hair points on dew deposition and rainfall evaporation rates in moss crusts dominated by <i>Syntrichia caninervis</i> , Gurbantunggut Desert, northwestern China	TAO Ye, ZHANG Yuanming (7)
The influence of freshwater-saline water mixing on phytoplankton growth in Changjiang Estuary	WANG Kui, CHEN Jianfang, LI Hongliang, et al (17)
The responses of hydrological indicators to watershed characteristics	TIAN Di, LI Xuyong, Donald E. Weller (27)
Lake nutrient ecosystems in the east-central moist subtropical plain of China	KE Xinli, LIU Man, DENG Xiangzheng (38)
The current water trophic status in Tiaoxi River of Taihu Lake watershed and corresponding coping strategy based on N/P ratio analysis	NIE Zeyu, LIANG Xinqiang, XING Bo, et al (48)
Reversion and analysis on cyanobacteria bloom in Waihai of Lake Dianchi	SHENG Hu, GUO Huaicheng, LIU Hui, et al (56)
Effects of cutting disturbance on spatial heterogeneity of fine root biomass of <i>Larix principis-rupprechtii</i>	YANG Xiuyun, HAN Youzhi, ZHANG Yunxiang, et al (64)
Responses of elm (<i>Ulmus pumila</i>) woodland to different disturbances in northeastern China	LIU Li, WANG He, LIN Changcun, et al (74)
Impacts of grazing and climate change on the aboveground net primary productivity of mountainous grassland ecosystems along altitudinal gradients over the Northern Tianshan Mountains, China	ZHOU Decheng, LUO Geping, HAN Qifei, et al (81)
Response of herbaceous vegetation to phosphorus fertilizer in steppe desert	SU Jieqiong, LI Xinrong, FENG Li, et al (93)
Spatiotemporal characteristics of landscape change in the coastal wetlands of Yancheng caused by natural processes and human activities	ZHANG Huabing, LIU Hongyu, HAO Jingfeng, et al (101)
Response of species diversity in <i>Caragana Korshinskii</i> communities to climate factors and grazing disturbance in Shanxi, Shaanxi, Ningxia and Inner Mongolia	ZHOU Ling, SHANGGUAN Tieliang, GUO Donggang, et al (111)
Seasonal change of leaf morphological traits of six broadleaf seedlings in South China	XUE Li, ZHANG Rou, XI Ruchun, GUO Shuhong, et al (123)
Correlation analysis on <i>Reaumuria soongorica</i> seed traits of different natural populations in Gansu Corridor	SU Shiping, LI Yi, CHONG Peifang (135)
Carbon fixation estimation for the main plantation forest species in the red soil hilly region of southern-central Jiangxi Province, China	WU Dan, SHAO Quanqin, LI Jia, et al (142)
Effects of clonal integration on growth of <i>Alternanthera philoxeroides</i> under simulated acid rain and herbivory	GUO Wei, LI Junmin, HU Zhenghua (151)
Difference of the fitness of <i>Helicoverpa armigera</i> (Hübner) fed with different pepper varieties	JIA Yueli, CHENG Xiaodong, CAI Yongping, et al (159)
Hyperspectral estimating models of tobacco leaf area index	ZHANG Zhengyang, MA Xinming, JIA Fangfang, et al (168)
Temporal and spatial distribution of <i>Bemisia tabaci</i> on different host plants	CUI Hongying, GE Feng (176)
Abundance and composition of CO ₂ fixating bacteria in relation to long-term fertilization of paddy soils	YUAN Hongzhao, QIN Hongling, LIU Shoulong, et al (183)
Effect of <i>Leucaena leucocephala</i> on soil organic carbon conservation on slope in the purple soil area	GUO Tian, HE Binghui, JIANG Xianjun, et al (190)
Isolation and the remediation potential of a Laccase-producing Soil Fungus F-5	MAO Ting, PAN Cheng, XU Tingting, et al (198)
Spatial heterogeneity of soil microbial biomass in Mulun National Nature Reserve in Karst area	LIU Lu, SONG Tongqing, PENG Wanxia, et al (207)
Root functional traits and trade-offs in one-year-old plants of 25 species from the arid valley of Minjiang River	XU Kun, LI Fanglan, GOU Shuiyan, et al (215)
Spatial distribution of carbon density in grassland vegetation of the Loess Plateau of China	CHENG Jimin, CHENG Jie, YANG Xiaomei, et al (226)
Effect of nitrogen concentration in the subtending leaves of cotton bolls on the strength of source and sink during boll development	GAO Xiangbin, WANG Youhua, CHEN Binglin, et al (238)
Long-term tillage effects on soil organic carbon and microbial biomass carbon in a purple paddy soil	LI Hui, ZHANG Junke, JIANG Changsheng, et al (247)
Effects of exogenous calcium on resistance of <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle to cadmium stress	MIN Haili, CAI Sanjuan, XU Qinsong, et al (256)
Comparison of grain protein components and processing quality in responses to dim light during grain filling between strong and weak gluten wheat cultivars	LI Wenyang, YAN Suhui, WANG Zhenlin (265)
Review and Monograph	
Salt-responsive mechanisms in the plant root revealed by proteomic analyses	ZHAO Qi, DAI Shaojun (274)
The research progress and prospect of watershed ecological risk assessment	XU Yan, GAO Junfeng, ZHAO Jiahu, et al (284)
A review of the environmental behavior and effects of black carbon in soils and sediments	WANG Qing (293)
Scientific Note	
Variation in main morphological characteristics of <i>Amorpha fruticosa</i> plants in the Qinghai-Tibet Plateau	LIANG Kunlun, JIANG Wenqing, ZHOU Zhiyu, et al (311)
Identification of aphid resistance in eleven species from <i>Dendranthema</i> and <i>Artemisia</i> at seedling stage	SUN Ya, GUAN Zhiyong, CHEN Sumei, et al (319)
Research of padded film for afforestation in coastal argillaceous saline-alkali land	JING Feng, ZHU Jinzhao, ZHANG Xuepei, et al (326)

《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 1 期 (2012 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 1 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: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 70.00 元