

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

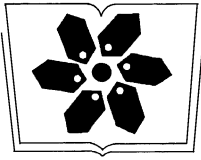
Acta Ecologica Sinica



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/stxb201101110048

傅银银,袁增伟,武慧君,张玲. 社会经济系统磷物质流分析——以安徽省含山县为例. 生态学报, 2012, 32(5): 1578-1586.

Fu Y Y, Yuan Z W, Wu H J, Zhang L. Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hanshan County in Anhui Province. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1578-1586.

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,张玲

(污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210046)

摘要:氮、磷等营养物质过量输入是造成我国湖泊富营养化问题日益严重的根源,磷作为水体富营养化过程关键限制元素,主要来自流域社会经济系统中的人类活动排放,因此,定量刻画社会经济系统内的磷流动路径是追踪水体外源磷来源和进行有效控制磷排放量的前提。以巢湖流域的安徽省含山县为例,构建社会经济系统磷流分析框架,建立磷流核算模型,并在实地调查和数据统计分析的基础上定量刻画了含山县 2008 年度社会经济系统磷流路径。结果表明,2008 年含山县社会经济系统向水体排放的磷总量为 1592t,其中农业种植子系统的排放所占比例最大(77%),该子系统的磷利用效率也较低(45%)。因此,含山县富营养化治理的重点是优化农业种植系统的磷流路径,主要措施包括合理施肥、科学排灌等。

关键词:物质流分析;磷;巢湖;产业生态学;富营养化

Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hanshan County in Anhui Province

FU Yinyin, YUAN Zengwei*, WU Huijun, ZHANG Ling

State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210046, China

Abstract: Excessive input of nutrients such as nitrogen and phosphorus into natural water bodies is an escalating factor that leads to eutrophication. As a critical limiting nutrient for the growth of aquatic biomass, phosphorus is mainly from human activities of the socio-economic system. Hence, quantifying the pathway of phosphorus throughout the socio-economic system is essential for the selection of appropriate measures to mitigate phosphorus discharge. The study develops a framework for analyzing phosphorus flows in socio-economic at county which divides the life-cycle of phosphorus flow into four stages: extraction, fabrication and manufacturing, use, and waste management. Meantime, we subdivide the stage of use into five major subsystems: agriculture, large-scale livestock breeding, domestic breeding, rural consumption, and urban consumption. Furthermore, based on principle of mass conservation, we develop formulas for calculating phosphorus flows which is mainly expressed in three kinds: constant equations, dependent equations and balance equations. In addition, we apply our framework and calculation formulas to quantify the anthropogenic phosphorus flows of Hanshan County in 2008. Hanshan county located east of Chaohu Lake. Our data mainly come from questionnaire, face-to-face interviews, official statistics, published literature, and expert consultation. The data of phosphorus content of the products are collected from published literature and expert consultation. The data of phosphorus product consumption per capita are acquired through questionnaire and face-to-face interviews. The other data, such as planting area and rural and urban population, come from official statistics.

The results show that, in 2008, the total input of phosphorus in Hanshan county is 5324 tons, of which, 59% is

基金项目:国家重大水专项资助项目(2008ZX07103-007);国家自然科学基金资助项目(40971302);中央高校基本科研业务费专项资金资助

收稿日期:2011-01-11; **修订日期:**2011-09-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuanzw@nju.edu.cn

imported from outside with purchased fertilizers. The total output of phosphorus in Hanshan County is 3023 tons, and 22% is exported outside. In terms of phosphorus loss, there was 1592 tons of phosphorus discharged into local surface water in Hanshan county, which primarily comes from agriculture (77%) and rural consumption (18%), and the other subsystems contribute only 5% of the total phosphorus loss into watercourses. Moreover, agricultural subsystem accounts for the largest proportion of the phosphorus input with the lowest phosphorus use efficiency (45%) due to excessive phosphorus loss. At the same time, intensive input of fertilizers in agricultural practices was identified as the most important source of phosphorus load on local surface water. Based on our above analysis, we propose that the eutrophication of local water bodies could be addressed by optimizing agricultural structure, promoting rational fertilization and scientific farming, encouraging the appropriate disposal of livestock manure, enhancing residents' environmental consciousness and improving the waste management system. Limitations of the methodology and data are also discussed. We will simulate and analyze the policies and control programs with the substance flow model and scenario analysis in future study.

Key Words: substance flow analysis; phosphorus; Chaohu Lake; industrial ecology; eutrophication

近年来,我国湖泊富营养化问题日趋严重,太湖、巢湖和滇池等三大湖,曾多次发生蓝藻爆发事件。研究表明,湖泊富营养化主要是由于水体中氮、磷等营养元素过量引起的,湖泊底泥的磷释放(内源)和人类社会经济活动引起的磷输入(外源)是湖体磷的两个主要来源,其中外源是造成湖泊流域水体磷过量的最根本原因^[1]。Schindler 和 Hecky 等人的研究表明,要减轻富营养化程度必须把管理和调控的重点放在减少磷的输入上^[2]。而要有效控制外源磷输入,就必须厘清其在流域社会经济系统中的流动过程,也即定量追溯水体磷来源。因此,如何构建湖泊经济社会系统的磷物质分析框架及其磷流核算方法成为该领域的核心问题。

形成于 20 世纪 80 年代的物质流分析方法(Substance Flow Analysis, SFA),是一种定量刻画特定物质(通常为元素、化合物或一类物质等)在某一特定系统内的流动状况的分析工具^[3-4]。作为产业生态学领域的一种重要分析工具,SFA 的核心是质量守恒定律,它通过量化某一物质或某一类物质在特定系统的流动和贮存状况,建立该系统经济与环境之间的定量关系^[5]。近年来,随着湖泊富营养化形势的日益严峻,一些学者尝试运用 SFA 方法对经济社会系统中的磷流进行分析,研究主要从全球、国家、流域及城市三个层面展开。在流域及城市层面,国外研究的重点逐渐从居民区与生态环境之间的磷流关系转移到刻画具体的磷代谢过程^[6-8]。我国的研究重点主要集中在刻画某一特定过程的磷代谢机理^[9-12]。

本研究以中国巢湖流域的安徽省含山县为例,运用 SFA 方法来刻画县域社会经济系统的磷代谢过程(不考虑由于风蚀、水蚀、地表挥发、底泥释放等自然过程引起的磷物质流),识别该系统对流域水体磷负荷贡献较大的关键过程和节点,分析造成这些过程磷负荷产生的根源,在此基础上提出提高含山县社会经济系统磷利用效率和减少磷排放入水体量的对策建议。

1 研究方法

1.1 含山县概况

含山县位于巢湖流域东部,面积 1047 km²,人口 45 万,现辖 8 个镇。该县人口与经济发展在所属巢湖市均处于较低水平,其主导产业为建材、食品加工、铸造、陶瓷、石灰石、石膏资源开发利用等,由于磷矿资源不稳定、储量少、工业品味低,不具开采价值,因此,没有规模以上的磷矿开采或磷产品加工企业,磷产品主要从外地进口;农业种植以水稻、油菜和棉花为主。该县环境基础设施建设相对落后,含山县污水处理厂一期工程 2008 年建成,管网覆盖率较低,2008 年含山县城镇污水的处理率为 26%^[13]。

1.2 系统磷流分析框架

与磷相关的人类社会经济活动主要包括磷矿开采、磷产品加工、消费、磷废物处置、磷积累贮存和循环等关键过程和环节^[14]。其中,消费过程又包括家庭养殖、规模养殖、农业种植、农村和城镇居民生活消费等几个子系统^[15]。考虑到经济和环境统计数据的缺失,本研究建立了如图 1 所示的社会经济系统磷流静态分析

模型。

该分析框架包含了社会经济系统中磷流的生命周期过程,由于含山县没有规模以上的磷矿开采和磷产品加工企业,本研究仅对磷产品消费和处置过程进行分析,研究年份是 2008 年。

1.3 磷流核算模型

磷流核算模型构建的基本依据是物质守恒定律,即,对于各子系统,有“输入=输出+累积-释放”。磷流核算公式主要包括三类:一类是定值方程(1),用于计算独立于其它变量且具有固定值的物质流,如农业种植系统化肥*i*的输入,用化肥*i*的含磷系数 $\gamma(i)$ 、单位面积化肥*i*使用量 $\theta(i)$ 和播种总面积 $Q(i)$ 相乘的加和得到;一类是从属方程(2),用于计算依赖于其它磷流的磷流,如农业种植系统的土壤累积磷量,依其磷肥料输入量而定;另一类是平衡方程(3),基于物质守恒计算的物质流,比如农业种植系统的农田排水:

$$Y = \sum_i \gamma(i) \times \theta(i) \times Q(i) \quad (1)$$

式中, Y 表示独立固定值的物质流, γ 表示物质的含磷系数, θ 表示单位个体消耗或排放含磷产品量,这里的单位个体指的是每位居民、每头牲畜、每亩耕地等, Q 表示个体数量。

$$Y' = f(Y) \quad (2)$$

式中, Y' 表示从属物质流, Y 表示独立固定值的物质流。

$$Y_{in} = Y_{out} \pm Y_{balance} \quad (3)$$

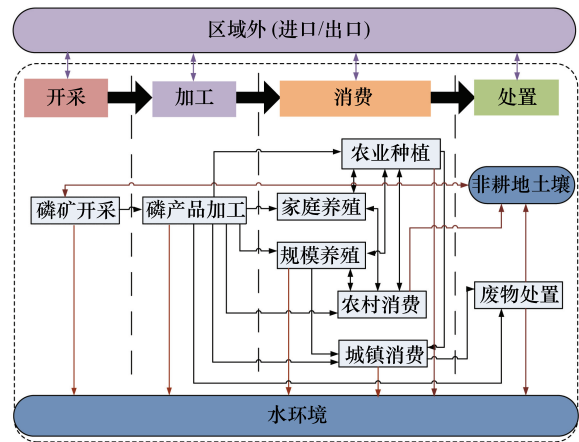
式中, Y_{in} 表示输入流, Y_{out} 表示输出流, $Y_{balance}$ 表示基于物质守恒计算的平衡流。

1.4 数据来源

本研究所需数据有 3 个来源:单位个体含磷产品消耗/排放系数来自对含山县农村和城镇居民的问卷调查;物质的含磷系数以及其它参数主要来自参考文献,并结合访谈进行校正;个体数量数据来自巢湖市统计年鉴资料。

由于农村居民和城镇居民的磷代谢过程和结构都有很大差别,针对两者分别设计调查问卷。针对农村居民的问卷主要包括 4 个部分:农业种植情况(如农作物种类、亩数、施肥用药量、产量等)、家庭养殖情况(如畜禽种类、数量、食料食量等)、生活消费情况(如肉类、蔬果、生活用品消费、垃圾产生量等)和家庭基本情况(如人口、收入等);针对城镇居民的调查问卷主要包括家庭基本情况和生活消费情况。在对象选择上,选择经济发展处于含山县平均水平的清溪镇进行调研,并根据经济发展水平分别选取较高、中、较低水平的兴隆村、中兴村和半湖村作为调研区域。按照含山县农村和城镇人口的比例(4:1)分别向农村和城镇居民发放问卷。由于农村居民的文化水平普遍较低,主要采用了代填的方法,由调研人员向其口述问题,并代他们填写答案,这种方法耗费时间和人力较多,但问卷的质量和回收率得到了保证。对于城镇居民,其文化水平相对较高,一般是由他们自行填写问卷,调研人员对填答过程进行观察和控制,这既节省时间,也在一定程度上保证了问卷的质量和回收率。最后将问卷获得的数据进行计算、处理,得到单位个体含磷产品消耗/排放系数。由于这类数据是通过实地调查获取的,较符合当地的实际情况,可靠性较高。

对于含磷系数,主要是参考文献资料并根据实际情况进行调整。这里以农药为例说明产品含磷系数的确定方法。农民使用的含磷农药主要为杀虫剂和除草剂,分别调查两者的使用量。查阅《<有机磷类农药工业水污染物排放标准>编制说明》^[16]得知,2007 年我国杀虫剂产量为 60.6 万 t,其中有机磷农药约 40 万 t;除



注: ←表示社会经济系统与自然环境的物质交换; ←表示系统内外的磷贸易流; ←表示各子系统之间的磷物质流

图 1 社会经济系统磷流静态分析框架

Fig. 1 Static analytical framework for phosphorus metabolism in socio-economic system

草剂 26 万 t, 含磷品种主要是草甘膦, 折 100% 有效成分约 20 万 t。据此, 可以粗略算出有机磷农药占杀虫剂的比例为 66% (40/60.6), 草甘膦占除草剂的比例为 76.92% (20/26)。另外, 根据安徽省最大农药制造企业华星化工任部长的建议得出有机磷杀虫剂含磷约 5%, 根据镇农技站的调研和舒城县舒农集团的调研得知草甘膦含磷量约为 10%。因此, 杀虫剂含磷为 3.3%, 除草剂含磷为 7.7%。根据此方法计算得出的含磷系数比直接引用文献中的系数更具可靠性, 更符合当地的实际情况。本研究用到的其他主要系数及其来源见下表 1。

表 1 主要系数取值及其来源

Table 1 Main coefficients and their sources

系数 Coefficient	系数描述 Description of coefficient	系数取值 Value of coefficient	系数来源 Source of coefficient
$\gamma^{z(i)}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 10$)	农作物 i (稻谷、小麦、油菜、花生、芝麻、棉花、蔬菜瓜果、玉米、豆类、甘薯) 种子的含磷率/%	0.4, 0.5, 0.34, 0.5, 0.5, 4.23, 0.13, 0.4, 0.6, 0.1	[12, 17]
$\gamma^{p(i)}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 10$)	农产品 i (稻谷、小麦、油菜、花生、芝麻、棉花、蔬菜瓜果、玉米、豆类、甘薯) 的含磷率/%	0.4, 0.5, 0.9, 0.5, 0.5, 0.78, 0.1, 0.4, 0.6, 0.1	[1, 12, 18]
$\gamma^{q(i)}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 7$)	畜禽 i (鸡、鸭、鹅、猪、牛、羊、水产) 活体的含磷系数 (kg/只)	0.013, 0.013, 0.013, 0.46, 2.7, 0.28, 0.0034	[19]
γ^{d}	蛋类含磷率/%	0.093	[20]
γ^{f}	人均每年排放的粪便含磷量 ($\text{kg} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$)	0.73	[21-22]
β^j	肥料磷在农业种植系统的累积率/%	30	[1, 23-26]
$\beta^{is(i)}$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 9$)	农作物 i (稻谷、小麦、油菜、花生、芝麻、棉花、玉米、豆类、甘薯) 秸秆的还田率/%	94, 97.3, 98.7, 99.4, 100, 98.6, 75.6, 97.1, 100	通过对农村居民问卷调查获得
β^{h}	粪便还田率/%	95.28	通过对农村居民问卷调查获得

2 结果及讨论

由于在城市层面上没有进出口贸易相关的统计数据, 对各子系统之间、子系统与自然环境之间以及系统与区域外的物质关联进行简化, 根据实地调研, 磷元素流向遵循就近原则, 即, 系统内生产出的物质优先满足系统内的需求, 不足或剩余的产品由系统外进口或出口。比如, 农业种植系统产出的农产品依次优先提供给农村居民生活消费、家庭养殖、城镇居民生活消费, 若不足则从系统外购入, 有剩余则向系统外售出。据此, 得到 2008 年含山县社会经济系统的磷物质流情况, 如图 2 所示。

2.1 排入水体情况

整个含山县社会经济系统 2008 年向周围水环境排放的磷总量约为 1592t, 其中农业种植系统排放所占比例最大, 占 77%, 农村居民生活消费系统次之, 占 18%, 相比之下, 其它子系统累积仅占 5%。因此, 农业种植和农村居民生活消费系统磷流调控是减少含山县社会经济系统向水体排磷的关键。

分析农业种植系统的磷代谢结构特征 (图 3) 发现, 该系统的磷输出方式主要是农产品产出和农田排水, 而通过农田排水进入水体的磷质量是 1225t, 占了整个农业种植系统磷输出的 43.26%, 接近磷在农产品中的含量, 可见该子系统内磷元素的浪费和损失相当严重。究其原因, 主要是农田中的磷养分未被作物充分吸收而流失, 而这些养分的来源, 主要是化肥、畜禽和人类粪便, 化肥占了将近 70%, 畜禽粪便居次, 占 23%。因此, 含山县农业种植系统对环境水体造成磷负荷的主要原因是肥料尤其是化肥使用过量或不当, 导致其中的磷元素不能被作物充分吸收, 残留在土壤表面或缝隙, 经农田排水、地表径流和淋溶等方式排入附近水体。

农村居民生活消费系统的磷排放主要来自农村生活污水的排放。从该子系统的磷输入构成 (图 4) 来看, 农村居民生活消费系统的磷元素输入主要来自农作物的消费, 占整个农村居民消费系统磷输入总量的 90% 以上。而这些磷元素通过三种途径输出该系统: 生活垃圾、生活污水和粪便, 以生活污水和粪便为主。由于粪

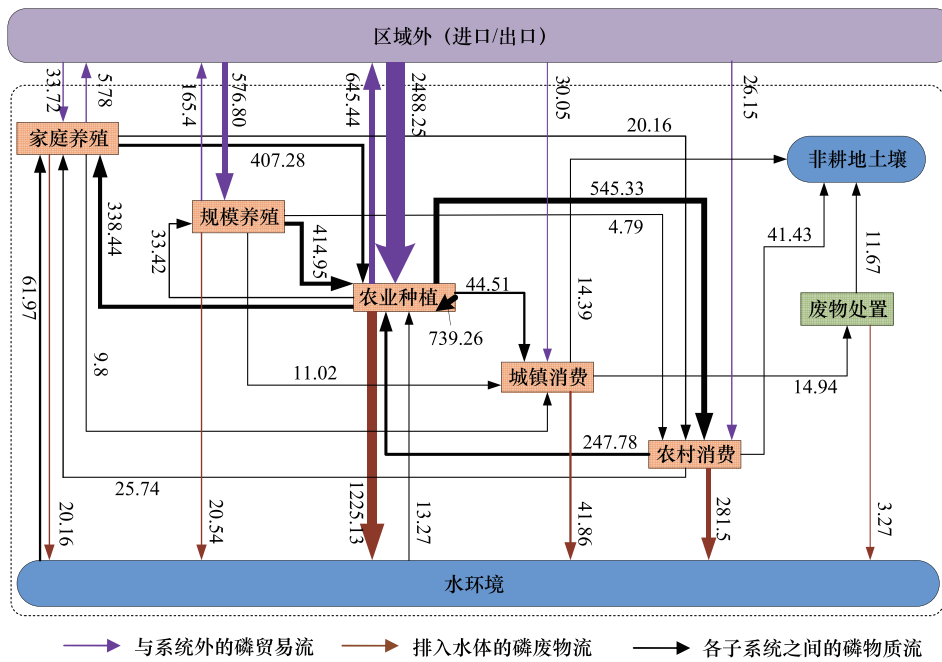


图2 2008年含山县社会经济系统的磷物质流/t

Fig. 2 Phosphorus flows of the socio-economic system of Hanshan in 2008/t

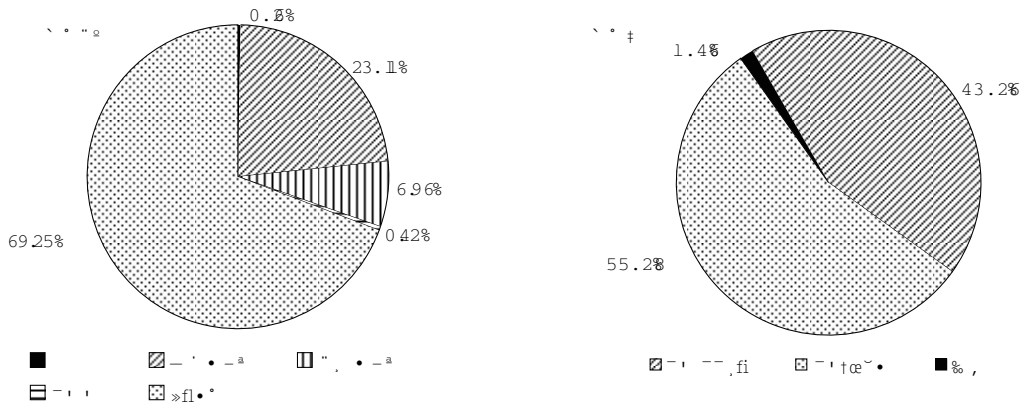


图3 2008年含山县农业种植系统磷输入、输出结构

Fig. 3 Phosphorus inputs and outputs of cropping farming subsystem in 2008

便的还田率是95%，绝大部分粪便进入农业种植系统，而未直接排入环境。相比之下，由于农村没有集中的污水收集和处理设施，只能将生活污水随意排放，对环境造成的压力较大，是控制农村居民生活消费系统向巢湖流域排放磷的一个重要方面。追寻其来源，主要是洗涤用品的使用，农作物、肉类等食物中的磷元素在清洗、烹饪、食用等过程中的损失和耗散，最后在洗涤过程中随生活污水进入环境水体。

2.2 利用效率

用系统的有效磷产出除以磷输入总量可以得到系统的磷利用效率，这里的“有效磷产出”指的是在系统内或系统外具有使用价值的磷输出项，如农业种植系统的农作物。含山县社会经济系统的整体磷利用效率为56.78%，比较几个具有生产性质的子系统的磷利用效率，如农业种植子系统、家庭养殖子系统和规模养殖子系统(图5)发现，农业种植系统的磷输入量最大，而磷利用效率最低，仅45%，主要是由于输入该子系统的磷没有被作物充分吸收利用，有近一半的磷通过农田排水从系统中流失。家庭和规模养殖系统的磷利用效率较高，这是由于这两个子系统排放的主要废弃物粪便的回田率较高，由废物转变为具有使用价值的产品——

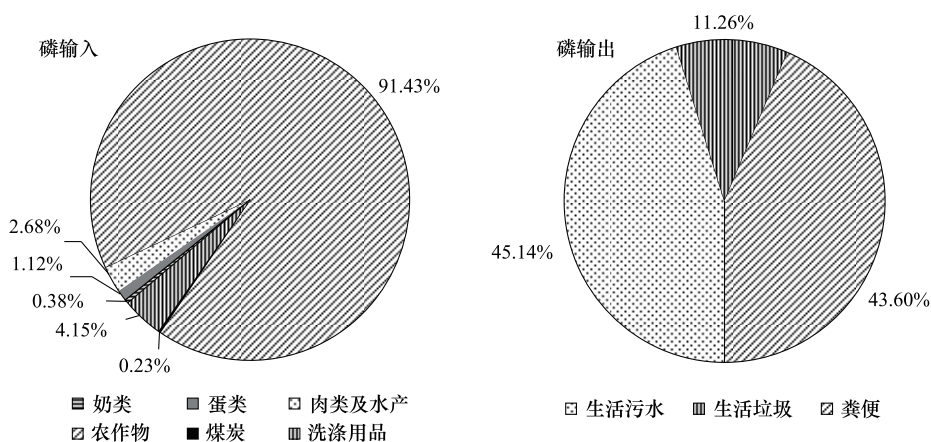


图4 2008年含山县农村居民生活消费系统磷输入、输出结构

Fig. 4 Phosphorus inputs and outputs of Hanshan's rural residents living system in 2008

肥料,输入农业种植子系统,由此间接造成的磷流失不可忽略。居民生活消费子系统的主要功能是消费使用,不具有生产性质,这里不分析其利用效率。因此,提高农业种植子系统的磷利用效率,同时优化粪便回田环节是提高整个含山县磷利用效率的关键。

2.3 进出口情况

从图2可以看出,含山县系统的磷输入总量为5324t,其中,从区域外进口的部分达到3155t,占输入总量的59%,可见含山县的磷代谢对外依存度相当高,尤其是农业种植子系统,其进口磷流是整个含山县系统内最大的磷物质流。主要原因是含山县磷矿资源匮乏,没有磷矿开采和磷产品加工制造企业,农业种植系统大量使用的农药、化肥等含磷化学产品必须依赖于进口。

从产出方面看,含山县有效磷产出的总量是3023t,其中出口量占22%,主要是由于农业种植子系统的农产品在系统内使用有盈余而出口引起的,出口比例达40%。农业种植系统的化肥、农药输入是引起含山县进口磷流的主要因素,而该系统的农产品输出是引起出口磷流的主要因素。

一方面,该子系统的输入需要依赖进口,另一方面产出有盈余而出口到系统外,相当于是为系统外提供产品的一个加工厂。而前面的分析发现农业种植系统是向环境水体排放磷最多、磷利用效率较低的系统,它的进出口磷流越大,系统外通过它转嫁给系统内的磷排放和低效率就越大。因此对于该系统,如果单纯从能源与环境的角度来看,可以通过缩减其规模至刚好满足系统内需求,以减少磷排放、低效率,以及进出口交通运输过程中的能耗用环境污染。但是考虑到社会经济等现实因素,应在农业种植产品结构和种植方法上加以改进。

3 结论与建议

整个含山县社会经济系统向流域水体排放的磷量为1592t,磷利用效率为57%。农业种植系统的磷利用效率低下,向水体的磷排放占了整个含山县社会经济系统向水体排磷总量的77%,是含山县控制磷排放和提高磷利用效率的关键子系统,建议优化农业种植结构,调控磷养分输入,提高作物吸收利用效率。具体措施为:根据不同的土地性质和养分含量,合理规划耕种的农作物种类和数量,筛选和培育对磷的需求小、利用效率高、活化土壤中非有效态磷能力强的作物新品种,同时发掘植物自身潜力、利用遗传及育种手段提高土壤中磷的生物有效性^[27,28];旱作农田应保持表土植被、覆盖地膜和精确滴灌,以减少径流和泥沙产生量,降低总磷

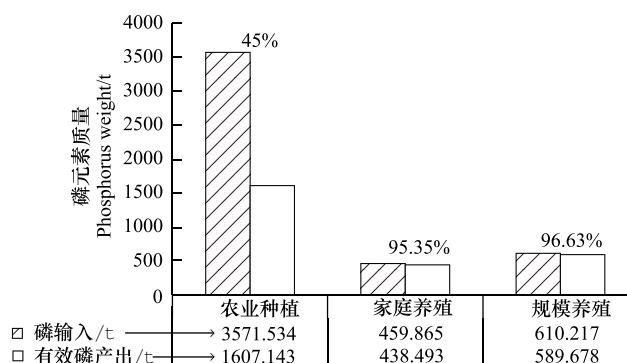


图5 2008年含山县各子系统的磷利用效率

Fig. 5 Phosphorus use efficiency of each subsystem in 2008

流失量^[29];加大力度推进和鼓励秸秆还田,改善土壤物理性质,改良土壤耕性^[30];广泛开展测土配方施肥,根据各地的土壤特性、养分含量、栽培习惯、作物的需肥规律、生产水平和气候等条件,提出最适的氮、磷、钾肥比例和用量,进行专用肥、复合肥、有机肥等肥料品种的科学搭配,并根据土壤类型、作物的生长特性和需肥规律,制定相应的施肥模式;在此基础上,农技站人员要及时对农户科学施肥进行指导和培训,使其掌握基本的养分吸收常识,避免盲目、过量施肥,使磷养分被作物充分吸收而不致流失。

同时,畜禽养殖产生的粪便虽然没有直接进入水体造成磷负荷,但它以 95% 的回田率进入农业种植系统,有研究表明,当有机肥使用量超过一定数值时,养分不能被当季作物吸收,过量的磷素由于有机肥的存在也不易被土壤固定,随渗液进入地下水成为水体富营养化的诱因^[31]。因此,不能忽略养殖系统间接造成的磷负荷,尤其是规模养殖系统产生的粪便,应当采用工厂化好氧发酵或集中堆贮发酵处理,达到脱臭、杀虫、灭菌的无害化、商品化目的,再进行一定的加工,用于农田施肥。或者将畜禽粪便入沼气池发酵产生沼气,用于取暖做饭。

农村居民生活消费系统生活污水排放的磷占磷排放总量的 18%,由于农村居民生活的分散性以及该县经济水平的限制,采用集中收集污水处理的方法并不现实,因此,可通过成本较低的环境教育的方式来提高农村居民的环保意识,如宣传环境保护、倡导居民使用无磷洗涤剂等方法来影响其生活和消费习惯,最终减少磷排放。另外,要加强农村地区的环境基础设施建设,如设立固定的垃圾堆放场所,安排人员及时收集并监督,杜绝村民随处丢弃垃圾的行为。

虽然城镇居民生活消费系统向水体的磷排放量不是很大,但是其污水处理率只有 26%,仍有很大的调控空间,因此要健全含山县城镇污水处理设施,提高管网的覆盖率和接管率,同时要增加固废处理设施,如垃圾填埋场。

4 研究展望

本研究运用物质流分析方法对安徽省含山县社会经济系统 2008 年的磷流进行了定量刻画,并且据此提出了提高磷利用效率和减少磷排放的对策和建议,该结论对于含山县控制磷排放和提高磷利用效率实践工作具有积极的指导作用,但需要指出的是,本方法仍然存在一些不足。

首先,在系统界定时,对于磷在局部过程中的迁移转化过程进行了简化处理,譬如,调研时发现含山县农村生活垃圾是堆存,核算过程中即认为这部分磷流向土壤,而实际上并非所有的生活垃圾都是堆存处理,堆存处理部分也会有一定量的磷经雨水侵蚀等流入水体,而本研究中未对其实际的转化迁移过程和路径进行更深入的刻画,同样,生活污水、农田排水、污水处理厂的出水所含磷流也简化地认为是直接流向水体。另外,本研究核算的是主要磷流,一些微量磷流被忽略,并且“过程平衡”原理也会造成一些磷流被混合在一起,从而给研究结果带来一定的不确定性。在今后的研究中,需要结合环境化学和生物等相关方向对磷在水体和土壤中的迁移代谢过程进行深入研究,以更清晰准确地刻画磷物质流。

其次,在模型核算时,一些参数是根据相关文献结合实际情况综合所得,受专业背景和时间所限,未进行实验检测,给核算结果带来了一定的不确定性,在今后的研究中,将对这些参数进行实地抽样检测,提高研究成果的可靠性和实用性。

此外,为了进一步加强本研究方法和参数的可靠性,后续的研究将会考虑运用计算机辅助手段对其进行不确定性分析和敏感性分析,基于分析结果,运用情景分析方法,对一些建议、对策和控制方案进行模拟分析,并进行策略优选。

References:

- [1] Smil V. Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, 25(1): 53-88.
- [2] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, Stainton M P, Parker B R, Paterson M J, Beaty K G, Lyng M, Kasian S E M. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input; results of a 37-year whole-ecosystem experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*

- of the United States of America, 2008, 105(32): 11254-11258.
- [3] Udo de Haes H, van der Voet E, Kleijn R. From quality to quantity: substance flow analysis (SFA), an analytical tool for integrated chain management//Bringezu S, Moll S, Fischer-Kowalski M, Kleijn R, Palm V, eds. Regional and National Material Flow Accounting, "From Paradigm to Practice of Sustainability". Proceedings of the 1st ConAccount Workshop. Leiden: Wuppertal Institute, 1997.
- [4] Zhang L, Yuan Z W, Bi J. Substance flow analysis (SFA): a critical review. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11): 6189-6198.
- [5] Voet E van der. Substance flow analysis methodology // Ayres R U, Ayres L W, eds. *A Handbook of Industrial Ecology*. Cheltenham, Northampton: Edward Elgar, 2002: 91-101.
- [6] Nilsson J. A phosphorus budget for a Swedish municipality. *Journal of Environmental Management*, 1995, 45(3): 243-253.
- [7] Reed-Andersen T, Carpenter S R, Lathrop R C. Phosphorus flow in a watershed-lake ecosystem. *Ecosystems*, 2000, 3(6): 561-573.
- [8] Schmid Neset T S, Bader H P, Scheidegger R, Lohm U. The flow of phosphorus in food production and consumption-Linköping, Sweden, 1870-2000. *Science of the Total Environment*, 2008, 396(2/3): 111-120.
- [9] Liu Y, Chen J N, Mol A P J. Evaluation of phosphorus flows in the Dianchi watershed, Southwest of China. *Population and Environment*, 2004, 25(6): 637-656.
- [10] Liu Y, Chen J N. Substance flow analysis on phosphorus cycle in Dianchi basin, China. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, 27(8): 1549-1553.
- [11] Yue P P. Substance Flow Analysis on Phosphorus Cycle in Bai Yangdian Basin [D]. Beijing: Capital Normal University, 2008.
- [12] Wang X Y, Yan E S, Ou Y. Material flow analysis of the phosphorus cycle in the upper watershed of the Miyun Reservoir in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(7): 1549-1560.
- [13] Bureau of Statistics of Chaohu City. *Chaohu Statistical Yearbook ——2009*. 2009.
- [14] Liu Y, Mol A P J, Chen J. Material flow and ecological restructuring in China: the case of phosphorus. *Journal of Industrial Ecology*, 2004, 8(3): 103-120.
- [15] Liu Y, Chen J N. Substance flow analysis of phosphorus cycle system in China. *China Environmental Science*, 2006, 26(2): 238-242.
- [16] Compiling group of industrial water pollutant discharge standards for organophosphate pesticides. Specifications For Industrial Water Pollutant Discharge Standards for Organophosphate Pesticides. [2011-12-26]. <http://www.chinapesticide.gov.cn/doc08/20081127101328439.pdf>
- [17] Xu J X. Phosphorus Cycling and Balance in "Agriculture-Animal Husbandry-Nutrition-Environment" System of China [D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2005.
- [18] Lu R K, Liu H X, Wen D Z, Qin S W, Zheng J Y, Wang Z Q. Nutrient cycles of agricultural ecosystems in typical areas of China. *Chinese Journal of Soil Science*, 1996, 27(4): 145-151.
- [19] Huo Q G. Phosphorus Nutrition and Source in Animals. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002.
- [20] Yang Y X. *China Food Composition Table 2004 (Book 2)*. Beijing: Peking University Medical Press, 2005.
- [21] Wang J N, Xu Z C, Peng X C, Chen Z L, Feng L P, Li M Y. Experimental investigation of pollutants in human excreta. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(9): 1098-1102.
- [22] Feng L P, Guo Z Y, Xu Z C, Sun J W, Luo M, Tan Z Y. P. Total nitrogen and phosphorus emissions of human excrement. *China Science and Technology Information*, 2009, (1): 16-17.
- [23] Busman L, Lamb J, Randall G, Rehm G, Schmitt M. The nature of phosphorus in soils. University of Minnesota Extension, 2002.
- [24] Daniels M, Daniel T, van Devender K. Soil phosphorus levels: concerns and recommendations. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [25] Zhao M Q, Wen L Q, Shi Y, Niu M F, Lu C Y, Chen X. Effects of fertilization on the changes of dissolved phosphorus contents in paddy soil solution in lower reach of Liaohe River Plain. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(2): 331-334.
- [26] Lian Y F, Liu S Q. Phosphorus losses from agricultural lands and water eutrophication. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2008, 12(7): 91-93, 99-99.
- [27] Liu J Z, Li Z S, Li J Y. Utilization of plant potentialities to enhance the bio-efficiency of phosphorus in soil. *Eco-Agriculture Research*, 1994, 2(1): 16-23.
- [28] Wang Q R, Li J Y, Li Z S. Studies on plant nutrition of efficient utility for soil phosphorus. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(3): 417-421.
- [29] Qian X Y, Shen G X, Huang L H, Gu H R, Pugliese M. Loss of soil phosphorus from rain-fed cropland and its affecting factors in Dongtan of Chongming. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(4): 334-338.
- [30] Jiang J, Chen H, Zhao X L. The application actuality and methods of meliorated soil with crop stalks. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(8): 420-423.
- [31] Sun R J, Wang D J, Lin J H, Yang L Z. Variation of N & P contents in paddy soil water and its potential environmental effect under pig manure

application. *Soils*, 2009, 41(6): 907-911.

参考文献:

- [4] 张玲, 袁增伟, 毕军. 物质流分析方法及其研究进展. *生态学报*, 2009, 29(11): 6189-6198.
- [10] 刘毅, 陈吉宁. 滇池流域磷循环系统的物质流分析. *环境科学*, 2006, 27(8): 1549-1553.
- [11] 乐萍萍. 白洋淀流域磷物质流分析 [D]. 北京: 首都师范大学, 2008.
- [12] 王晓燕, 阎恩松, 欧洋. 基于物质流分析的密云水库上游流域磷循环特征. *环境科学学报*, 2009, 29(7): 1549-1560.
- [13] 巢湖市统计局. 巢湖统计年鉴——2009. 2009.
- [15] 刘毅, 陈吉宁. 中国磷循环系统的物质流分析. *中国环境科学*, 2006, 26(2): 238-242.
- [16] 《有机磷类农药工业水污染物排放标准》编制组. 《有机磷类农药工业水污染物排放标准》编制说明. (2008-11) [2011-12-26]. <http://www.chinapesticide.gov.cn/doc08/20081127101328439.pdf>
- [17] 许俊香. 中国“农田-畜牧-营养-环境”体系磷素循环与平衡 [D]. 保定: 河北农业大学, 2005.
- [18] 鲁如坤, 刘鸿翔, 闻大中, 钦绳武, 郑剑英, 王周琼. 我国典型地区农业生态系统养分循环和平衡研究 I. 农田养分支出参数. *土壤通报*, 1996, 27(4): 145-151.
- [19] 霍启光. 动物磷营养与磷源. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
- [20] 杨月欣. 中国食物成分表 2004 (第二册). 北京: 北京大学医学出版社, 2005.
- [21] 王俊能, 许振成, 彭晓春, 陈志良, 冯丽萍, 李梅莹. 基于产污观点的人体排泄试验. *环境科学研究*, 2009, 22(9): 1098-1102.
- [22] 冯丽萍, 郭正元, 许振成, 孙佳为, 罗敏, 谭智勇. 人体排泄物总氮和总磷排污影响初探. *中国科技信息*, 2009, (1): 16-17.
- [25] 赵牧秋, 温林钦, 史奕, 牛明芬, 鲁彩艳, 陈欣. 施磷对下辽河平原稻田土壤溶液可溶性磷动态变化的影响. *土壤通报*, 2009, 40(2): 331-334.
- [26] 连彦峰, 刘树庆. 农田土壤中磷素流失与水体富营养化. *河北农业科学*, 2008, 12(7): 91-93, 99.
- [27] 刘建中, 李振声, 李继云. 利用植物自身潜力提高土壤中磷的生物有效性. *生态农业研究*, 1994, 2(1): 16-23.
- [28] 王庆仁, 李继云, 李振声. 高效利用土壤磷素的植物营养学研究. *生态学报*, 1995, 19(3): 417-421.
- [29] 钱晓雍, 沈根祥, 黄丽华, 顾海蓉, Pugliese M. 崇明东滩旱作农田土壤磷素流失及其影响因素. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4): 334-338.
- [30] 姜洁, 陈宏, 赵秀兰. 农作物秸秆改良土壤的方式与应用现状. *中国农学通报*, 2008, 24(8): 420-423.
- [31] 孙瑞娟, 王德建, 林静慧, 杨林章. 有机肥施用对水田土壤溶液氮磷动态变化及环境的潜在影响. *土壤*, 2009, 41(6): 907-911.

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