

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第3期

Vol.34 No.3

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

BP网络框架下MODIS气溶胶光学厚度产品估算中国东部PM _{2.5}	郭建平, 吴业荣, 张小曳, 李小微 (817)
北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究	林海峰, 辛金元, 张文煜, 王跃思, 刘子锐, 陈传雷 (826)
气象因素对长三角背景地区甲烷浓度的影响分析	浦静姣, 徐宏辉, 顾骏强, 马千里, 方双喜, 周凌晔 (835)
密闭化填埋作业条件下的场内恶臭污染分布情况与分析	路鹏, 吴世新, 戴志锋, 张晓辉, 苏昭辉, 周小飞, 代占国, 卢旭飞, 郑斌, 沈凯, 卫潘明 (842)
冬季中国东海海水中挥发性卤代烃的分布特征和海-气通量	何真, 陆小兰, 杨桂朋 (849)
2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化	李绪录, 周毅频, 夏华永 (857)
渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析	周然, 彭士涛, 覃雪波, 石洪华, 丁德文 (864)
青藏高原淡水湖泊水化学组成特征及其演化	王鹏, 尚英男, 沈立成, 伍坤宇, 肖琼 (874)
漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选	徐华山, 徐宗学, 刘品 (882)
面向对象的湖泊污染控制智能工程设计方法	邹锐, 周璟, 刘永, 朱翔, 赵磊, 阳平坚, 郭怀成 (892)
九龙江口湿地植物凋落物对沉积物有机质赋存的贡献	罗专溪, 邱昭政, 王振红, 颜昌宙 (900)
修复达标土壤回填对地下水环境影响的层次化评估方法应用研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 樊艳玲, 夏天翔, 李婷婷, 田美影 (907)
去除地下水中硝酸盐的渗透性反应墙研究	李秀利, 杨君君, 卢晓霞, 张姝, 侯珍 (914)
北京城区雨水管道沉积物污染负荷研究	李海燕, 徐波平, 徐尚玲, 崔爽 (919)
城市污水处理厂及其受纳水体中5种典型PPCPs的赋存特征和生态风险	温智皓, 段艳平, 孟祥周, 陈玲 (927)
城市景观娱乐水体微生物风险评价	孙傅, 沙婧, 张一帆, 刘彦华 (933)
模拟曝气生物滤池去除邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯试验研究	李伟, 赵晶, 余健, 任文辉 (943)
膜生物反应器处理工业废水中膜污染及膜过滤特性研究	范举红, 余素林, 张培帅, 兰亚琼, 刘锐, 陈吕军 (950)
γ -Al ₂ O ₃ 负载磷钨酸催化强化电化学法处理水中酸性大红3R的研究	岳琳, 王开红, 郭建博, 杨景亮, 刘宝友, 廉静, 王涛 (955)
活性炭催化过硫酸钠降解金橙G动力学	杨梅梅, 周少奇, 刘琳, 郑可 (962)
ABR反应器处理碱减量印染废水的启动研究	杨波, 钟启俊, 李方, 田晴 (968)
O ₃ -BAF深度处理制革废水中沿程污染物降解规律	余彬, 刘锐, 程家迪, 范举红, 李昌湖, 冉坤, 曹国华, 陈吕军 (974)
规模化猪场养殖废水UASB-SFSBR-MAP处理工艺中试研究	王亮, 陈重军, 陈英旭, 吴伟祥 (979)
连续流态下以城市污水培养好氧颗粒污泥及颗粒特性研究	牛姝, 段百川, 张祚薰, 刘士峰, 张家铭, 王聪, 周丹丹 (986)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅰ)——模型的建立	张超, 陈银广 (993)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅱ)——动力学模拟	张超, 陈银广 (998)
乙酸/丙酸作为EBPR碳源的动力学模型研究(Ⅲ)——模型的应用	张超, 陈银广 (1004)
三峡水库两条支流水-气界面CO ₂ 、CH ₄ 通量比较初探	李哲, 白镭, 郭劲松, 方芳, 蒋滔 (1008)
不同土地利用方式下土壤呼吸空间变异的影响因素	陈书涛, 刘巧辉, 胡正华, 刘艳, 任景全, 谢薇 (1017)
黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素	周小刚, 张彦军, 南雅芳, 刘庆芳, 郭胜利 (1026)
层次化健康风险评估方法在苯污染场地的应用及效益评估	姜林, 钟茂生, 梁竞, 姚珏君, 夏天翔, 樊艳玲, 李敬东, 唐振强 (1034)
海州湾滩涂重金属污染的历史记录	张瑞, 张帆, 刘付程, 尹福军, 丁迎军, 高金荣, 陈晶, 邵威 (1044)
草海典型高原湿地表层沉积物重金属的积累、分布与污染评价	张清海, 林昌虎, 谭红, 林绍霞, 杨鸿波 (1055)
大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析	程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅 (1062)
典型有色金属矿山城市小河流沉积物重金属形态分布及风险评估	李如忠, 姜艳敏, 潘成荣, 陈婧, 徐晶晶 (1067)
典型有色金属矿业城市零星菜地蔬菜重金属污染及健康风险评估	李如忠, 潘成荣, 徐晶晶, 陈婧, 姜艳敏 (1076)
城市表层土壤磁化率与重金属含量分布的相关性研究	陈秀端, 卢新卫, 杨光 (1086)
典型热带林地土壤团聚体颗粒中重金属的分布特征及其环境意义	龚仓, 徐殿斗, 成杭新, 任雅阁, 刘志明, 刘应汉, 刘飞, 聂海峰, 郑祥, 马玲玲 (1094)
生态沟渠底泥属性与磷吸附特性研究	张树楠, 贾兆月, 肖润林, 杨凤飞, 余红兵, 刘锋, 吴金水 (1101)
三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究	孙文彬, 杜斌, 赵秀兰, 何丙辉 (1107)
Triton X-100在黄土上的吸附行为及影响因素	钟金魁, 赵保卫, 朱琨, 钱小龙, 张杰西 (1114)
新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险	马子龙, 毛蒲萱, 丁中原, 高宏, 黄韬, 田慧, 郭强 (1120)
青海省西宁市与天峻县大气中得克隆与十溴联苯醚的水平与来源	何畅, 金军, 马召辉, 王英, 扎西卓玛, 马丽花 (1129)
太湖沉积物中多溴联苯醚和类二噁英多氯联苯的水平垂直分布	马召辉, 金军, 元学奎, 王英, 姜霞, 何松洁, 李明圆 (1136)
典型电器工业区河涌沉积物中有机污染物特征分析	刘近, 邓代永, 许玫英, 孙国萍 (1142)
柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性	谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明 (1150)
机械炼焦过程生成飞灰中多环芳烃分布特征研究	牟玲, 彭林, 刘效峰, 白慧玲, 张建强 (1156)
污泥干化床与芦苇床稳定化污泥中多环芳烃的含量比较	崔玉波, 孙红杰, 冉春秋, 李金凤, 谢瑶 (1161)
固体添加剂对污泥焚烧过程中重金属迁移行为的影响	刘敬勇, 孙水裕, 陈涛 (1166)
铸造废砂的环境毒性研究	张海凤, 王玉珏, 王劲磷, 黄天佑, 熊鹰 (1174)
Cr ⁶⁺ 生物可利用度检测的微生物全细胞传感器CB10的构建及其响应特征	侯启会, 马安周, 庄绪亮, 庄国强 (1181)
反硝化脱硫工艺中微生物群落结构及动态分析	于皓, 王爱杰, 陈川 (1190)
农业废物好氧堆肥中环境因子对nirK、nirS和nosZ数量的影响	胡春晓, 陈耀宁, 张嘉超, 唐聪, 曾光明 (1196)
蚯蚓体内过氧化物还原蛋白PRDX基因对土壤PAHs污染胁迫的转录响应	林康丽, 郑森林, 宋玉芳, 邱晓燕, 薛文玲 (1204)
有序介孔碳载金/L-赖氨酸/纳米金修饰电极的制备及其对邻苯二酚、对苯二酚的检测响应研究	周耀渝, 汤琳, 李贞, 刘媛媛, 杨贵德, 伍梦诗, 雷晓霞, 曾光明 (1211)
新建核电站风险信息沟通实证研究	贺桂珍, 吕永龙 (1218)
《环境科学》征订启事(942) 《环境科学》征稿简则(992) 信息(932, 949, 1061, 1210) 专辑征稿通知(1173)	

漳卫南运河流域非点源污染负荷估算及最佳管理措施优选

徐华山^{1,2}, 徐宗学^{1*}, 刘品¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 河南理工大学资源环境学院, 焦作 454003)

摘要: 制定实施流域 TMDL (total maximum daily load) 计划的一项关键技术就是借助水文模型量化流域非点源污染负荷, 设置 BMPs (best management practices), 实施非点源负荷削减。采用构建的 SWAT 模型估算了漳卫南运河流域不同水平年(丰、平、枯)非点源负荷大小, 分析了非点源负荷的空间分布特征。丰水年总氮非点源负荷占总负荷的 0.07%, 总磷非点源负荷占总负荷的 27.24%。空间上, 流域非点源输出负荷较大的区域主要为具有一定坡度的农业用地和城镇居民用地。对照基准情景非点源输出负荷, 通过对 47 种不同 BMPs 控制措施的模拟, 核算出不同 BMPs 对 8 个优先控制子流域的有机氮、有机磷、硝酸盐氮、溶解态磷和矿物磷共 5 种污染物的削减效率。通过对比分析不同 BMPs 的费用效益, 优选出漳卫南运河流域最佳的总氮和总磷污染物削减措施为修建植被型沟渠, 其 TN、TP 单位削减费用分别介于 16.11 ~ 151.28 元·kg⁻¹ 和 100 ~ 862.77 元·kg⁻¹ 之间, 该项措施是 47 种 BMPs 中最经济有效的。相关研究结果可以为流域非点源污染负荷削减提供科学依据, 为流域水环境改善和水生态修复提供技术支撑。

关键词: 非点源污染; BMPs; 费用-效益分析; SWAT 模型; 漳卫南运河

中图分类号: X592 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)03-0882-10

Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin

XU Hua-shan^{1,2}, XU Zong-xue¹, LIU Pin¹

(1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: One of the key techniques in establishing and implementing TMDL (total maximum daily load) is to utilize hydrological model to quantify non-point source pollutant loads, establish BMPs scenarios, reduce non-point source pollutant loads. Non-point source pollutant loads under different years (wet, normal and dry year) were estimated by using SWAT model in the Zhangweinan River basin, spatial distribution characteristics of non-point source pollutant loads were analyzed on the basis of the simulation result. During wet years, total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) accounted for 0.07% and 27.24% of the total non-point source pollutant loads, respectively. Spatially, agricultural and residential land with steep slope are the regions that contribute more non-point source pollutant loads in the basin. Compared to non-point source pollutant loads with those during the baseline period, 47 BMPs scenarios were set to simulate the reduction efficiency of different BMPs scenarios for 5 kinds of pollutants (organic nitrogen, organic phosphorus, nitrate nitrogen, dissolved phosphorus and mineral phosphorus) in 8 prior controlled subbasins. Constructing vegetation type ditch was optimized as the best measure to reduce TN and TP by comparing cost-effective relationship among different BMPs scenarios, and the costs of unit pollutant reduction are 16.11-151.28 yuan·kg⁻¹ for TN, and 100-862.77 yuan·kg⁻¹ for TP, which is the most cost-effective measure among the 47 BMPs scenarios. The results could provide a scientific basis and technical support for environmental protection and sustainable utilization of water resources in the Zhangweinan River basin.

Key words: non-point source pollutant; BMPs; cost-effective analysis; SWAT model; Zhangweinan River

农业生产过程中, 伴随降水或灌溉过程, 氮、磷、农药及其它污染物通过农田地表径流、地下渗漏和农田排水等方式进入水体形成的水环境污染称为农业非点源污染, 主要包括化肥污染、土壤流失、畜禽养殖污染、农药污染及其它农业生产活动中造成的污染^[1]。非点源污染负荷是美国 TMDL 计划制定实施的重要组成部分, 但非点源污染随机性强、分布广、潜伏期长、难以估算, 致使其污染控制难度大、成本高^[2]。针对泥沙、营养元素 N、P 及农药和杀虫剂, 各国在实践中提出过多种调控方法, 涉及多个领域, 但所有的管理措施归结起来无非是两个

方面: 一是控制污染源, 二是控制污染物迁移转化的途径, 如不同来源的氮、磷迁移转化的详细过程^[3]。最佳管理措施 (best management practices, BMPs)^[4]在非点源污染控制中得到了广泛应用^[5]。

BMPs 受流域特定的水文气候因素、地形要素影响^[6, 7], 前期研究工作多集中于 BMPs 措施的环

收稿日期: 2012-05-11; 修订日期: 2012-08-08

基金项目: 漳卫南运河管理局全球环境基金海河项目 (ZWN0ZJ017); 河南省高校矿山环境保护与生态修复省级重点实验室培育基地开放基金项目 (KF2010-06)

作者简介: 徐华山 (1977 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为流域污染物总量控制, E-mail: xuhuashan@mail.bnu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

境效益评价^[8~12],也常常结合经济学理论做 BMPs 的费用效益分析^[13~16].如 Cuttle 等^[17]比较分析了用于农场的 44 种 BMPs,形成控制农业非点源污染的费用-效益清单. Qiu 等^[18]结合 SWAT 模型对农业流域的河岸缓冲带进行了经济评价,建议农民发展和保留临近水体的河岸缓冲带. Panagopoulos 等^[19]在 2007 年给出了 BMPs 费用-效益分析计算方法,并在 2011 年采用 SWAT 模型分析了不同的 BMPs 对流域非点源负荷削减的效果^[6],并进行了效益对比分析,得出单位污染物削减费用. Rabotyagov 等^[20]给出了不同种类 BMPs 费用,为研究者选择经济合适的 BMPs 提供参考.

由于 BMPs 设计并没有固定的公式可循, Heatwole 等^[21]建立了 BMPs 的优化设计目标准则,提出标准化的 BMPs 优化设计方法,但 BMPs 种类繁多,应用地区地形条件复杂,标准化的优化设计方法适用性有限. 20 世纪 90 年代,非线性规划以及混合整数规划被应用到 BMPs 的优化设计中,解决了标准化设计在适应性上的不足. 随后有学者采用了多种算法来解决理论研究及工程技术上的数值计算难题. 如 Cerucci 等^[22]针对资金受限会影响河岸缓冲带设计和选择的问题,研究了采用 SWAT 和 REMM 这 2 种水文模型和二进制优化相结合的方法解决约束条件下的河岸缓冲带最优选择的问题. Veith 等^[23]在比较了 5 种优化算法优缺点的基础上,首次将遗传算法应用于 BMPs 的优化设计. 此后的研究主要专注于两个方面,即尝试在 BMPs 优化设计中引入新的优化算法以及基于不同的假设和情景分析来设计和优化 BMPs. 如 Rabotyagov 等^[20]通过构建 SWAT 模型,采用改进的算法,对 BMPs 进行优化,并成功应用于美国爱荷华州的典型农业流域. Maringanti 等^[24]发展了一种多目标优化工具来选择和实施 BMPs,在流域尺度的 BMPs 优选上考虑到经济和生态效应.

BMPs 发展至今经历了两个阶段,第 1 个阶段仅考虑非点源污染负荷的削减效果,这一阶段,研究者注重不同的 BMPs 措施对流域非点源污染负荷的削减能力,基本上不考虑经济成本. 第 2 阶段又可分为 2 个研究方向,一是非点源污染控制措施 BMPs 的费用效益分析,研究者不但考虑非点源污染控制措施所带来的环境效益(削减效果),同时考虑非点源污染控制措施所需的花费,即费用效益,总结分析不同的 BMPs 费用效益,并给出相应的评价. 另外一个研究方向是采用优化算法对不同的 BMPs 措施

进行优化,如非点源污染负荷削减效率及费用双目标优化,进而优选出适合某一流域的特定的 BMPs 措施.

BMPs 措施的制定实施需要借助水文模型量化流域非点源污染负荷, SWAT 模型是美国环保署实施 TMDL 计划的首选模型,被广泛用于流域非点源污染关键区识别、流域非点源输出负荷定量化和模拟评估 BMPs 实施效果, BMPs 优选也常常借助于 SWAT 模型. 本研究通过已经构建和率定好的 SWAT 模型^[25],定量估算漳卫南运河流域非点源污染负荷,通过设置不同的 BMPs 控制措施,对比其削减效果,分析其环境效益和所需费用,优选流域经济适用的 BMPs,以期作为流域管理部门的决策提供科学依据和技术支撑.

1 漳卫南运河流域非点源负荷估算

1.1 模型初始化时管理情景

采用 SWAT 模型估算流域非点源负荷,首先要对模型管理情景进行初始化,包括播种、施肥、灌溉和收获等作物管理措施. SWAT 模型中农业耕作模拟分为耕作管理、作物管理和收割管理,每种农作物都有固定的播种、生长、灌溉、施肥、收割时间和过程. SWAT 模型自身构建了常见农作物的生长参数数据库,研究人员可以根据自身需求添加相关的作物类型及其参数. 植被和作物分为 7 种不同类型,设定不同的生长参数. 生长所需要的参数包括作物能量利用效率参数、最大可能叶面积指数、理想状况下收获指数、作物冠层结构等近 40 个参数^[26]. 作物生长根据简单的温度相关法,即温度指标,用植物生长潜在可利用热量指标(potential heat unit, PHU)表示.

$$PHU = \sum_{d=1}^m (T_{av} - T_{base}) \quad (T_{av} > T_{base}) \quad (1)$$

式中, T_{av} 为日平均温度; T_{base} 为作物生长基温,各种作物有所不同. PHU 也用来划分作物生长的各个阶段.

1.1.1 作物栽培模式

面积较大的流域,因其土壤特性、地势地形、土地利用形式等多方面因素的影响,其非点源污染模拟考虑所有 HRU 内的管理措施是不现实的,应在能反映流域真实情况的前提下适当取舍^[27]. 漳卫南运河流域范围广,主要种植玉米、小麦、大豆等农作物,在某种农作物主产区,也不是所有的耕地都种植同种农作物,因此,对耕地中的每一种农作物划

定单独的范围、设置独立的管理情景是不现实的^[27]。考虑到研究区域农业种植结构,选用冬小麦和夏玉米为流域主要的土地利用方式,其中冬小麦的生长和施肥时间在非汛期,相对夏玉米来说,产生的污染负荷较小。漳卫南运河流域小麦和玉米的栽培过程包括以下3个步骤。

(1)播种前整地 采用旋耕机机械作业,耕深在20 cm以上,做到田面平整。

(2)施肥 小麦和玉米的种植过程中一般需要施肥3次,第1次是播种前施用,称为基肥,以农家肥为主;第2次是种肥,种肥指的是播种时随种子或者在种子旁边施下的肥料,一般以速效氮肥为主,适当配合磷肥以提高肥效,施于地下5~7 cm处。

(3)追肥 小麦在返青期和拔节前,玉米在生育期,追肥的时期、次数和数量,视具体情况而定。

1.1.2 施肥种类

本研究中将漳卫南运河畜禽养殖和生活污染源所产生的污染物折合成农家肥,作为复合肥料以基肥形式追加到管理情景的施肥措施中去;根据基肥中N、P的比例,在SWAT模型肥料数据库中添加新的化肥类型(ZWN composite fertilizer),播种施肥主要以二氮为主(ZWN N fertilizer和ZWN P fertilizer),追肥以尿素为主(ZWN N fertilizer)。根据非点源调查,得到漳卫南运河流域氮肥、磷肥和钾肥多年平均施肥量分别为320、260和95 kg·hm⁻²。

1.1.3 施肥时间

SWAT模型中各子流域内农作物成熟所需要的总热量可以根据农作物类型和天气发生器自动生成。漳卫南运河流域地理纬度跨越较大,农作物生长发育时间不同,同时每年的节气也存在一定的差异。SWAT模型中提供了2种定义施肥时间的方法,一种是根据日期定义,另一种则是根据农作物累积的热量占总热量单位的比例来定义施肥时间。后一种方法根据逐日气温确定执行管理措施(施肥)的时间,所以模拟结果更加符合农作物的实际情况,故本研究采用第二种方法。由于基肥和种肥施用时间间隔较短,在SWAT模型中将施加基肥和播种施肥合并成一次添加到施肥管理措施中,追肥的时间根据经验及模型要求分别确定为农作物总热量的0.16和0.6。

1.2 流域非点源污染负荷空间分布

子流域尺度上模型模拟的非点源污染物主要包括有机氮、有机磷、硝态氮、溶解态磷和矿物磷。根据漳卫南运河现状施肥情况,对冬小麦和夏玉米

设置现状施肥情景,以2002、2003和2004年分别代表枯水年、丰水年和平水年(其年降水量分别为389、749、583 mm,流域多年平均降水量为608 mm),采用SWAT模型分别模拟丰、平、枯3种水平年流域5种典型污染物非点源负荷在子流域尺度输出情况。其输出结果如图1~图5所示。

由流域2002~2004年非点源输出负荷空间分

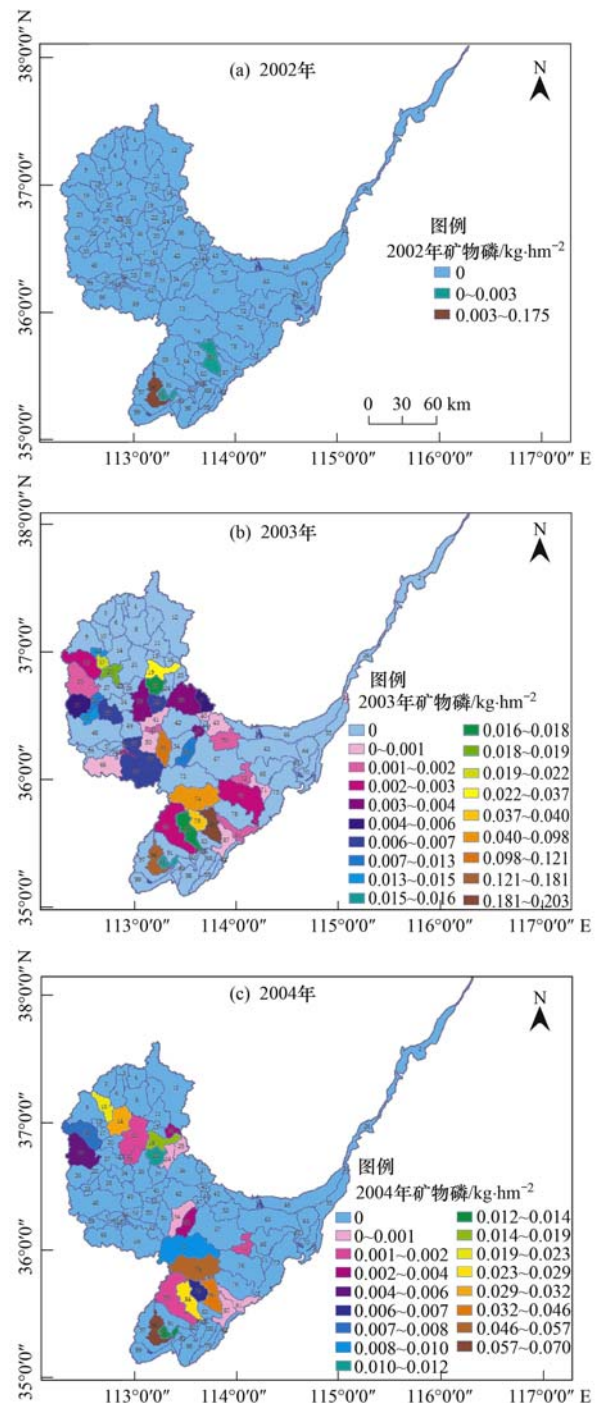


图1 不同水平年矿物磷负荷空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of mineral phosphorus load in different level years in the Zhangweinan River basin

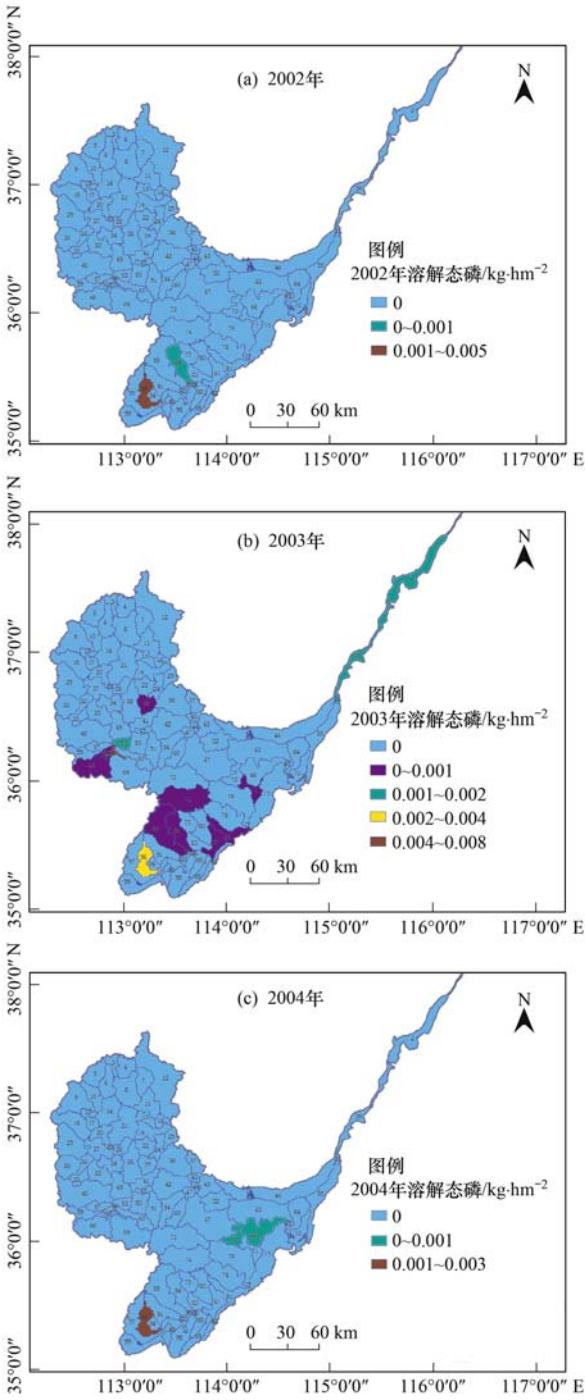


图 2 不同水平年溶解态磷负荷空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of dissolved phosphorus load in different level years in the Zhangweinan River basin

布(图 1 ~ 图 5),结合流域 2002 ~ 2004 年降水分布(图 6)可以看出,非点源负荷输出较大的区域,降水相对较为丰沛。同时土地利用多为具有一定坡度的农业用地(图 7)和城镇居民用地(图 8)。

丰水年(2003)全流域非点源污染输出负荷为有机氮726 142.7 kg、有机磷90 821.34 kg、硝酸盐氮22 270.15 kg、溶解态磷 731.59 kg、矿物磷

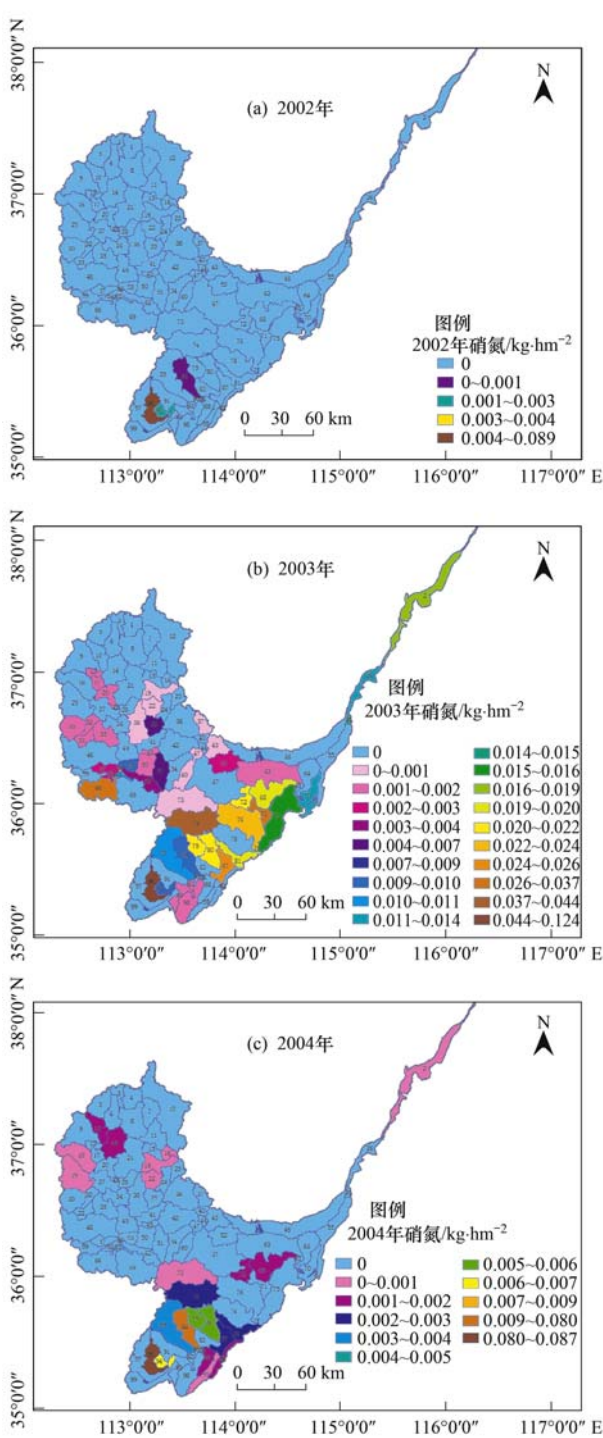


图 3 不同水平年硝氮负荷空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of nitrate nitrogen load in different level years in the Zhangweinan River basin

31 691.24 kg. 为了便于与整个流域点源负荷对比,将这 5 项指标按总氮和总磷分别汇总,即总氮为有机氮和硝酸盐氮之和,总磷为有机磷、溶解态磷和矿物磷 3 项指标之和,这样漳卫南运河流域 2003 年总氮非点源负荷为748 412.9 kg,总磷非点源负荷为123 244.2 kg;总氮非点源负荷占总负荷的0.07%,

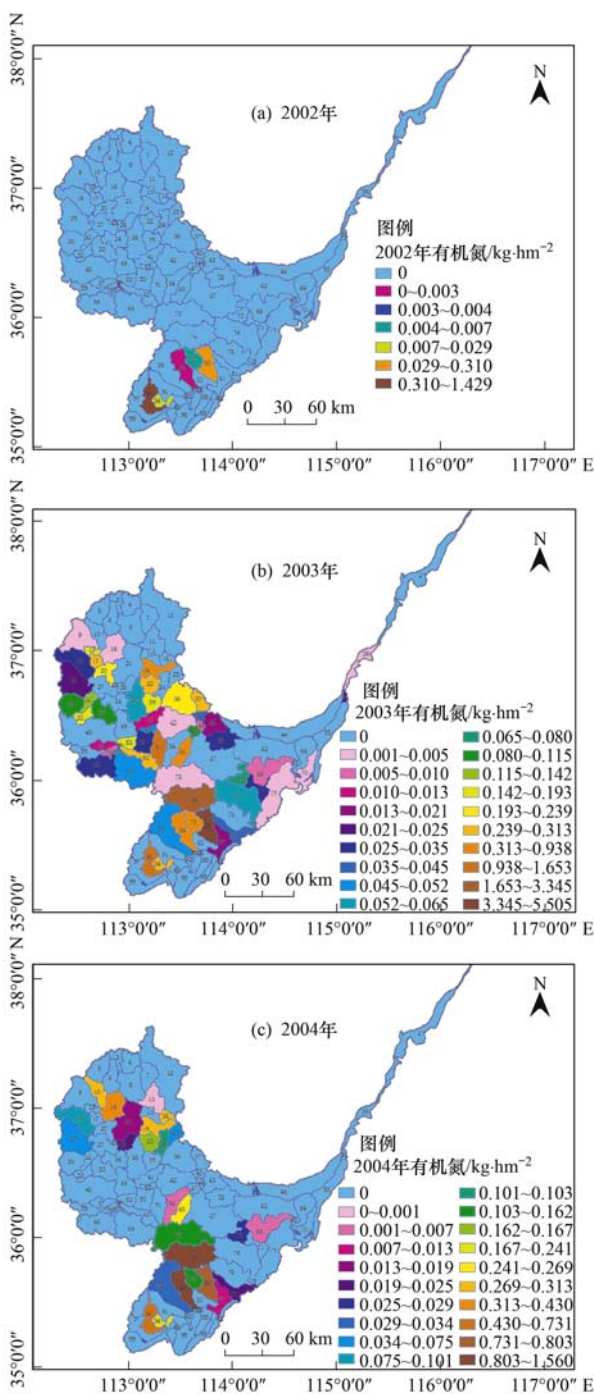


图 4 不同水平年有机氮负荷空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of organic nitrogen load in different level years in the Zhangweinan River basin

总磷非点源负荷占总负荷的 27.24%。总氮在流域污染负荷中所占比例非常小,但是总磷所占的比例较大。

从漳卫南运河流域汛期非点源输出负荷看,负荷较大的子流域大部分是以农业土地利用为主(图 8),如冬小麦(WWHT)-夏玉米轮作,旱玉米(CORN)和草地(PAST),还有部分子流域为城镇居

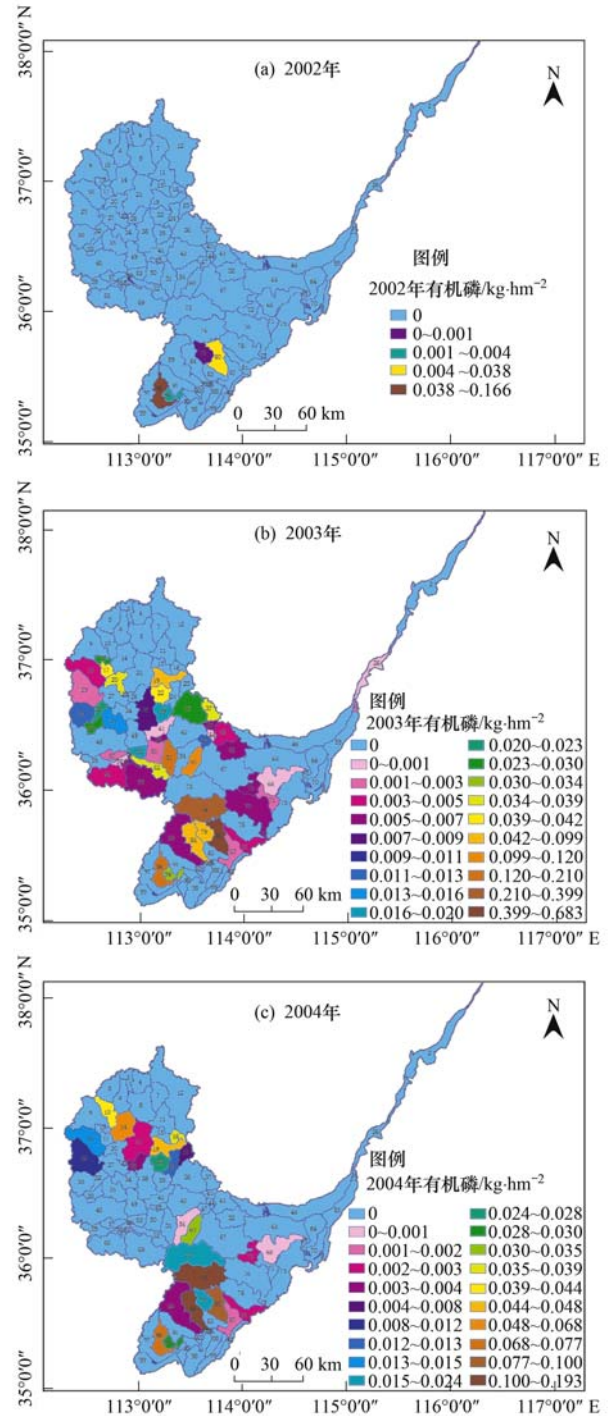


图 5 不同水平年有机磷负荷空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of organic phosphorus load in different level years in the Zhangweinan River basin

民用地(URLD 和 URHD),如第 68、71、72、80、87、94、96 子流域。这就说明漳卫南运河流域非点源污染主要由农业活动引起,同时乡镇居民区非点源输出也占相当比例。对子流域总体地势和坡度进行进一步对比发现,这些流域地势存在一定坡度(图 7),如果子流域地势平坦,即使绝大部分或者全

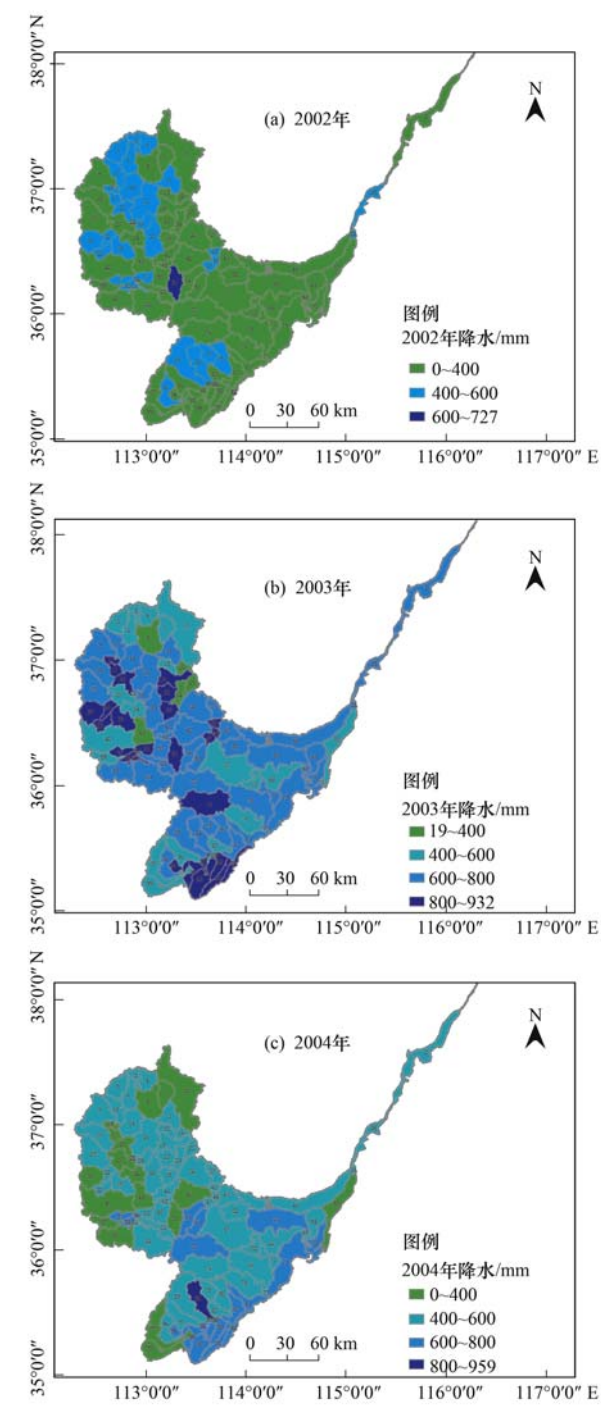


图6 2002~2004年流域降水分布
Fig. 6 Precipitation distribution during 2002-2004
in the Zhangweinan River basin

部的土地均为农业土地利用,其非点源输出负荷也比较低,如子流域 90(92.74% 冬小麦,100% 坡度分类为 0~2),92(88.78% 冬小麦,100% 坡度分类为 0~2),93(89.12% 冬小麦,100% 坡度分类为 0~2),98(71.65% 冬小麦,100% 坡度分类为 0~2),99(78.29% 冬小麦,97% 坡度分类为 0~2)。所以,漳卫南运河流域非点源污染区主要是具有一定坡度的

农业活动剧烈地区以及乡村和城镇居民区。在进行非点源污染控制措施的设置时,需重点考虑这些区域的非点源污染控制措施实施效果模拟,并进行费用-效益分析。

2 漳卫南运河流域 BMPs 优选

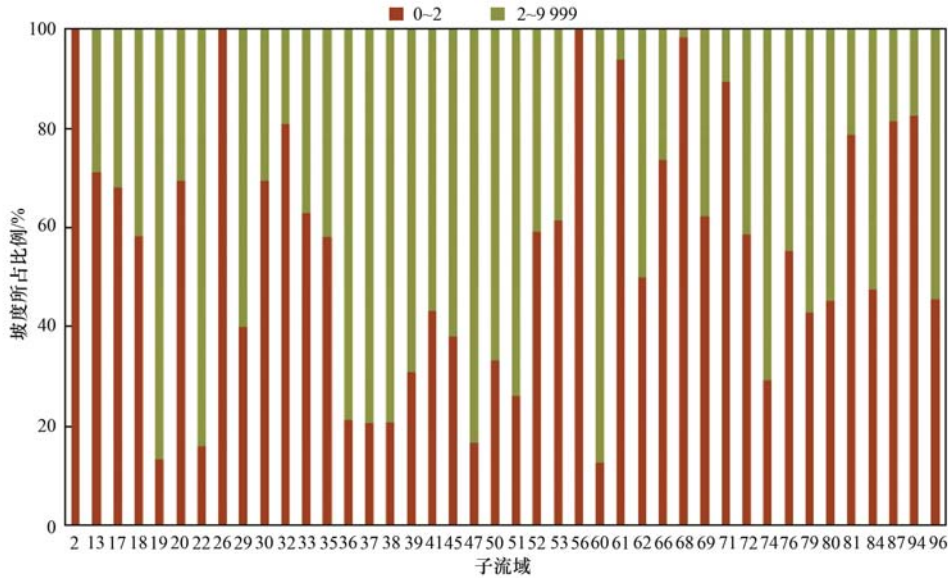
2.1 漳卫南运河流域 BMPs 设置

根据漳卫南运河流域地势地形特点及非点源负荷输出的空间分布特征,选取河岸缓冲带、等高种植、植被型沟渠、梯田种植和减少化肥施用量 5 种措施,配合基准情景(现状施肥和传统耕作)组合成 48 种 BMPs 措施(表 1),依据 2003 年漳卫南运河流域非点源负荷空间分布,选择第 19、51、60、74、79、80、84、96 这 8 个子流域(这 8 个子流域 2003 年非点源负荷的各项指标占整个漳卫南运河流域的百分比分别为:有机氮 86.90%、有机磷 86.45%、硝酸盐氮 40.50%、溶解态磷 32.26%、矿物磷 84.82%),分别将这 48 种 BMPs 措施输入 SWAT 模型,模拟估算其非点源负荷削减效果。以现状施肥和传统耕作模式为基准情景,参考 Rabotyagov 等^[20]的费用标准,结合漳卫南运河流域实际情况调查,以漳卫南运河流域化肥实际施用情况及减少施肥带来的损失,计算出漳卫南运河流域不同的 BMPs 费用(表 1),按照 Panagopoulos 等^[19]给出的 BMPs 费用-效益分析计算方法进行费用-效益分析,选取最优的控制措施。其 BMPs 设置如下:肥料削减 10%、30% 和 50% 均指在现状基础上削减,且只针对小麦和玉米实施。等高种植针对坡度分类在 2~9 999 的小麦和玉米进行设置,从 2001 年开始实施,缓冲带针对小麦、玉米、草地、森林及居民用地进行设置,植草型沟渠针对小麦、玉米、草地、森林及居民用地进行设置,梯田种植针对坡度分类在 2~9 999 的小麦和玉米进行设置。

2.2 漳卫南运河流域 BMPs 优选

根据不同 BMPs 措施下的 SWAT 模型模拟结果,并与基准情景流域非点源输出负荷对比,47 种 BMPs 措施在 8 个子流域对 5 种污染物削减效率如表 2 所示。表 3 为单项指标最佳环境效益的 BMPs 措施。

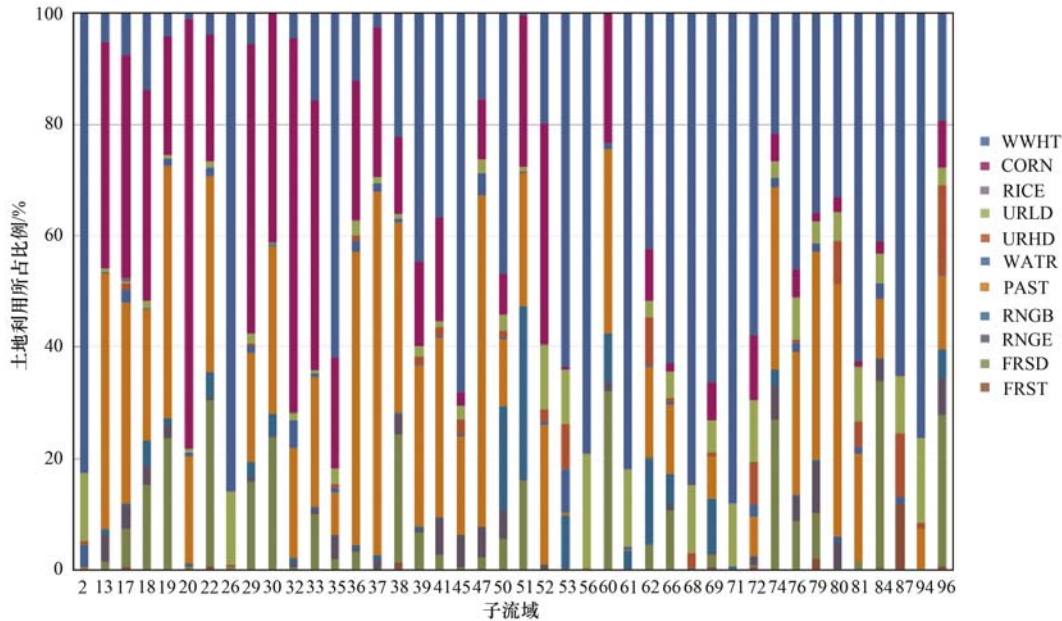
漳卫南运河流域非点源污染负荷较低,分别计算子流域尺度上的有机氮、有机磷、硝酸盐氮、溶解态磷、矿物磷的费用效益势必会造成其值过大,同一种 BMPs 措施可以同时多种形态的氮和磷起到削减作用,所以在费用效益分析中将有机氮和硝



0~2 表示地势平坦,2~9999 地势有一定坡度

图 7 典型子流域坡度分布

Fig. 7 Slopes of typical subbasins in the Zhangweinan River basin



WWHT 冬小麦,CORN 玉米,RICE 水稻,URLD 农村居民区,URHD 城镇用地,WATR 水体,PAST 草地,RNGB 灌木林地,RNGE 高覆盖草地,FRSD 落叶林,FRST 混交林

图 8 典型子流域土地利用类型

Fig. 8 Land use of typical subbasin in the Zhangweinan River basin

酸盐氮相加作为总氮(TN),有机磷、溶解态磷和矿物磷相加作为总磷(TP),然后进行费用效益分析,选取费用效益比最小的 BMPs. 子流域尺度上最佳的 TN 和 TP 费用-效益如表 3 所示. 从中可知,漳卫南运河流域非点源负荷单位处理费用相对较大,其主要原因是漳卫南运河流域非点源负荷较低,造成单位污染物削减费用较高,8 个子流域非点源 N、P

最经济适用的 BMPs 措施是植被型沟渠.

对这 8 个子流域实施植被型沟渠措施后,能削减漳卫南运河流域非点源负荷中的 74.82% 的有机氮、75.02% 的有机磷和 78.57% 的矿物磷. 考虑到漳卫南运河流域非点源氮和磷的输出主要是以有机氮磷为主,故可认为本研究中对漳卫南运河流域非点源污染控制措施的优选是有效和经济的. 如果需

表 1 BMPs 及其单位费用

Table 1 BMPs and its unit costs

序号	BMPs	费用/元·(a·hm ²) ⁻¹
1	现状施肥和耕作及种植方式 (基准情景)	—
2	等高种植	102.70
3	等高种植 + 减少单位化肥施用量 (10%)	281.65
4	等高种植 + 减少单位化肥施用量 (30%)	460.61
5	等高种植 + 减少单位化肥施用量 (50%)	997.46
6	等高种植 + 植被型沟渠	189.84
7	等高种植 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (10%)	368.79
8	等高种植 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (30%)	547.74
9	等高种植 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (50%)	1 084.6
10	缓冲带	415.00
11	缓冲带 + 减少单位化肥施用量 (10%)	593.95
12	缓冲带 + 减少单位化肥施用量 (30%)	772.90
13	缓冲带 + 减少单位化肥施用量 (50%)	1 309.76
14	缓冲带 + 等高种植	517.70
15	缓冲带 + 等高种植 + 减少单位化肥施用量 (10%)	696.65
16	缓冲带 + 等高种植 + 减少单位化肥施用量 (30%)	875.61
17	缓冲带 + 等高种植 + 减少单位化肥施用量 (50%)	1 412.46
18	缓冲带 + 等高种植 + 植被型沟渠	604.84
19	缓冲带 + 等高种植 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (10%)	783.80
20	缓冲带 + 等高种植 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (30%)	962.75
21	缓冲带 + 等高种植 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (50%)	1 499.60
22	缓冲带 + 梯田种植	1 166.60
23	缓冲带 + 梯田种植 + 减少单位化肥施用量 (10%)	1 345.55
24	缓冲带 + 梯田种植 + 减少单位化肥施用量 (30%)	1 524.50
25	缓冲带 + 梯田种植 + 减少单位化肥施用量 (50%)	2 061.35
26	缓冲带 + 梯田种植 + 植被型沟渠	1 253.4
27	缓冲带 + 梯田种植 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (10%)	1 432.69
28	缓冲带 + 梯田种植 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (30%)	1 611.64
29	缓冲带 + 梯田种植 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (50%)	2 148.50
30	缓冲带 + 植被型沟渠	502.14
31	缓冲带 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (10%)	681.09
32	缓冲带 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (30%)	860.04
33	缓冲带 + 植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (50%)	1 396.90
34	减少单位化肥施用量 (10%)	178.95
35	减少单位化肥施用量 (30%)	357.90
36	减少单位化肥施用量 (50%)	894.76
37	梯田种植	751.60
38	梯田种植 + 减少单位化肥施用量 (10%)	930.55
39	梯田种植 + 减少单位化肥施用量 (30%)	1 109.50
40	梯田种植 + 减少单位化肥施用量 (50%)	1 646.35
41	植被型沟渠	87.14
42	植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (10%)	266.09
43	植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (30%)	445.04
44	植被型沟渠 + 减少单位化肥施用量 (50%)	981.90
45	植被型沟渠 + 梯田种植	838.74
46	植被型沟渠 + 梯田种植 + 减少单位化肥施用量 (10%)	1 017.69
47	植被型沟渠 + 梯田种植 + 减少单位化肥施用量 (30%)	1 198.64
48	植被型沟渠 + 梯田种植 + 减少单位化肥施用量 (50%)	1 733.5

表 2 不同子流域 47 种 BMPs 措施削减率

Table 2 Reduction efficiency of 47 kinds of BMPs measures in different subbasins

子流域代码	削减率/%				
	有机氮	有机磷	硝酸盐氮	溶解态磷	矿物磷
19	0.68 ~ 97.80	2.2 ~ 98.9	0 ~ 100	0	2.7 ~ 100
51	0.67 ~ 90.63	1.90 ~ 94.29	0 ~ 85.71	0	4.13 ~ 95.87
60	0 ~ 98.19	0 ~ 98.33	0 ~ 100	0	0 ~ 100
74	1.17 ~ 77.43	0 ~ 76.69	0 ~ 86.36	0 ~ 100	0 ~ 91.84
79	0.87 ~ 95.79	0 ~ 94.95	0 ~ 94.95	0	0 ~ 95
80	0.09 ~ 98.44	0 ~ 98.39	0 ~ 90.48	0	0 ~ 98.52
84	0 ~ 85.98	0 ~ 85.86	0 ~ 90	0 ~ 100	0 ~ 88.89
96	0 ~ 78.22	0 ~ 81.48	0 ~ 67.74	0 ~ 75	0 ~ 84.53

要削减不同子流域的硝态氮和溶解态氮,流域管理机构或当地政府可以根据自身的经济条件和实际需要在表 4 中选择合适的削减措施.

表 3 8 个优先控制子流域 BMPs 费用效益

Table 3 Cost-effectiveness of BMPs in 8 prior controlled subbasins

子流域代码	费用效益/元·kg ⁻¹			
	TN	BMPs	TP	BMPs
19	151.28	植被型沟渠	697.12	植被型沟渠
51	76.51	植被型沟渠	290.47	植被型沟渠
60	94.92	植被型沟渠	670.31	植被型沟渠
74	34.20	植被型沟渠	222.30	植被型沟渠
79	114.36	植被型沟渠	660.15	植被型沟渠
80	16.11	植被型沟渠	100.05	植被型沟渠
84	127.21	植被型沟渠	862.77	植被型沟渠
96	67.55	植被型沟渠	283.84	植被型沟渠

表 4 单项指标最佳环境效益的 BMPs 措施¹⁾

Table 4 Single parameter best environmental benefit of BMPs in 8 prior controlled subbasins

子流域代码	有机氮	有机磷	硝酸盐氮	溶解态磷	矿物磷
19	6	18	10	—	6
51	21	20	18	—	21
60	6	6、45	2、10	—	41
61	17	14	17	16	15
74	48	9	21	14	42
79	9、48	41	17	—	41
80	9	6	17	—	41
84	8、46	41	17	2、10、34	41
96	9、48	41	16、18	14	41

1)表中数字即表 1 中对应的 BMPs,如 2 即代表“等高种植”,“—”表示该项指标输出负荷为 0,不考虑 BMPs

3 结论

(1)通过构建的 SWAT 模型,估算出流域不同水平年非点源输出负荷,识别出流域非点源污染负荷较大的子流域.丰水年总氮非点源负荷占总负荷的 0.07%,总磷非点源负荷占总负荷的 27.24%.总氮在流域污染负荷中所占比例非常小,但是总磷所占比例较大.

(2)对照基准情景非点源输出负荷,通过对 47 种不同 BMPs 控制措施的模拟,核算出不同 BMPs 措施对 8 个优先控制子流域中有机氮、有机磷、硝酸盐氮、溶解态磷和矿物磷 5 种污染物的削减效率,挑选出了对这 5 种污染物削减效率最好的 BMPs 措施.

(3)通过计算不同 BMPs 的费用效益,优选出漳卫南运河流域最佳的总氮和总磷污染物削减措施为修建植被型沟渠,其单位污染物削减费用为 TN 16.11 ~ 151.28 元·kg⁻¹ 和 TP 100 ~ 862.77 元·kg⁻¹,该项措施是 47 种 BMPs 中最经济有效的,可以为流域管理部门和当地政府科技决策提供技术支持.

致谢:本研究得到水利部海河水利委员会漳卫南运河管理局于伟东、程燕平、田术存及韩朝光等的直接帮助,在此表示衷心感谢.

参考文献:

[1] 李家科. 流域非点源污染负荷量化研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009. 1-2.

[2] 周慧平, 高超, 朱晓东. 关键源区识别: 农业非点源污染控制方法[J]. 生态学报, 2005, **25**(12): 3368-3374.

[3] Schoumans O F, Chardon W J, Bechmann M, *et al.* Mitigation options for reducing nutrient emissions from agriculture: a study amongst European member states of Cost action 869 [R]. Wageningen: Alterra Wageningen UR, 2011. 16-19.

[4] McKissock G, Jefferies C, D'Arcy B J. An assessment of drainage best management practices in Scotland[J]. Water and Environment Journal, 1999, **13**(1): 47-51.

[5] 王晓燕. 非点源污染及其管理[M]. 北京: 海洋出版社, 2003. 130-148.

[6] Panagopoulos Y, Makropoulos C, Mimikou M. Reducing surface water pollution through the assessment of the cost-effectiveness of BMPs at different spatial scales[J]. Journal of Environmental Management, 2011, **92**(10): 2823-2835.

[7] Rao N S, Easton Z M, Schneiderman E M, *et al.* Modeling watershed-scale effectiveness of agricultural best management practices to reduce phosphorus loading [J]. Journal of

- Environmental Management, 2009, **90**(3): 1385-1395.
- [8] Arabi M, Govindaraju R S, Hantush M M, *et al.* Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with swat [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2006, **42**(2): 513-528.
- [9] Barlund I, Kirkkala T, Malve O, *et al.* Assessing SWAT model performance in the evaluation of management actions for the implementation of the Water Framework Directive in a Finnish catchment [J]. Environmental Modelling & Software, 2007, **22**(5): 719-724.
- [10] Sahu M, Gu R R. Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality [J]. Ecological Engineering, 2009, **35**(8): 1167-1177.
- [11] Santhi C, Srinivasan R, Arnold J, *et al.* A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a watershed in Texas [J]. Environmental Modelling & Software, 2006, **21**(8): 1141-1157.
- [12] White M J, Arnold J G. Development of a simplistic vegetative filter strip model for sediment and nutrient retention at the field scale [J]. Hydrological Processes, 2009, **23**(11): 1602-1616.
- [13] Cools J, Broekx S, Vandenbergh V, *et al.* Coupling a hydrological water quality model and an economic optimization model to set up a cost-effective emission reduction scenario for nitrogen [J]. Environmental Modelling & Software, 2011, **26**(1): 44-51.
- [14] Gassman P W, Osei E, Saleh A, *et al.* Application of an environmental and economic modeling system for watershed assessments [J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 2002, **38**(2): 423-438.
- [15] Gassman P W, Osei E, Saleh A, *et al.* Alternative practices for sediment and nutrient loss control on livestock farms in northeast Iowa [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, **117**(2-3): 135-144.
- [16] Osei E, Gassman P W, Hauck L M, *et al.* Environmental benefits and economic costs of manure incorporation on dairy waste application fields [J]. Journal of Environmental Management, 2003, **68**(1): 1-11.
- [17] Cuttle S P, Macleod C J A, Chadwick D R, *et al.* An inventory of methods to control diffuse water pollution from agriculture (DWPA) [R]. London: Institute of Grassland and Environment Research (IGER), UK Clearing House Mechanism for Biodiversity, 2007. 1-113.
- [18] Qiu Z Y, Prato T. Economic evaluation of riparian buffers in an agricultural watershed [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, **34**(4): 877-890.
- [19] Panagopoulos I, Mimikou M, Kapetanaki M. Estimation of nitrogen and phosphorus losses to surface water and groundwater through the implementation of the SWAT model for Norwegian soils [J]. Journal of Soils and Sediments, 2007, **7**(4): 223-231.
- [20] Rabotyagov S S, Jha M, Campbell T D. Nonpoint-source pollution reduction for an Iowa Watershed: an application of evolutionary algorithms [J]. Canadian Journal of Agricultural Economics/Revue Canadienne D'Agroeconomie, 2010, **58**(4): 411-431.
- [21] Heatwole C D, Bottcher A B, Baldwin L B. Modeling cost-effectiveness of agricultural nonpoint pollution abatement programs on two Florida basins [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1987, **23**(1): 127-131.
- [22] Cerucci M, Conrad J M. The use of binary optimization and hydrologic models to form Riparian buffers [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, **39**(5): 1167-1180.
- [23] Veith T L, Wolfe M L, Heatwole C D. Optimization procedure for cost effective BMP placement at a watershed scale [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2003, **39**(6): 1331-1343.
- [24] Maringanti C, Chaubey I, Popp J. Development of a multiobjective optimization tool for the selection and placement of best management practices for nonpoint source pollution control [J]. Water Resources Research, 2009, **45**(6): W06406.
- [25] 徐华山, 徐宗学, 唐芳芳, 等. 强烈人类活动影响流域的水量水质模拟 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, **48**(5): 542-549.
- [26] 程磊. 变化环境下的流域年际水量平衡研究 [D]. 北京: 北京师范大学, 2011. 100-107.
- [27] 庞靖鹏. 非点源污染分布式模拟——以密云水库水源地保护为例 [D]. 北京: 北京师范大学, 2007. 47-49.

CONTENTS

Estimation of PM _{2.5} over Eastern China from MODIS Aerosol Optical Depth Using the Back Propagation Neural Network	GUO Jian-ping, WU Ye-rong, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (817)
Comparison of Atmospheric Particulate Matter and Aerosol Optical Depth in Beijing City	LIN Hai-feng, XIN Jin-yuan, ZHANG Wen-yu, <i>et al.</i> (826)
Impacts of Meteorological Factors on Atmospheric Methane Mole Fractions in the Background Area of Yangtze River Delta	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, GU Jun-qiang, <i>et al.</i> (835)
Dispersion and Analysis of Odor Pollution in Landfill Area Under the Enclosed Operation Condition	LU Peng, WU Shi-xing, DAI Zhi-feng, <i>et al.</i> (842)
Distribution Characteristics and Sea-Air Fluxes of Volatile Halocarbons in the East China Sea in Winter	HE Zhen, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng (849)
Intra- and Inter-annual Variabilities of Particulate Organic Matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010	LI Xu-lu, ZHOU Yi-pin, XIA Hua-yong (857)
Phytoplankton Assemblages and Their Relation to Environmental Factors by Multivariate Statistic Analysis in Bohai Bay	ZHOU Ran, PENG Shi-tao, QIN Xue-bo, <i>et al.</i> (864)
Characteristics and Evolution of Hydrochemical Compositions of Freshwater Lake in Tibetan Plateau	WANG Peng, SHANG Ying-nan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (874)
Estimation of Nonpoint Source Pollutant Loads and Optimization of the Best Management Practices (BMPs) in the Zhangweinan River Basin	XU Hua-shan, XU Zong-xue, LIU Pin (882)
An Object-Oriented Intelligent Engineering Design Approach for Lake Pollution Control	ZOU Rui, ZHOU Jing, LIU Yong, <i>et al.</i> (892)
Contribution of Plant Litters to Sediments Organic Matter in Jiulong River Estuary Wetland	LUO Zhuang-xi, QIU Zhao-zheng, WANG Zhen-hong, <i>et al.</i> (900)
Application of Tiered Approach to Assess the Impact of Backfilling Remediated Soil on Groundwater	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (907)
Removal of Nitrate from Groundwater Using Permeable Reactive Barrier	LI Xiu-li, YANG Jun-jun, LU Xiao-xia, <i>et al.</i> (914)
Research on Pollution Load of Sediments in Storm Sewer in Beijing District	LI Hai-yan, XU Bo-ping, XU Shang-ling, <i>et al.</i> (919)
Occurrence and Risk Assessment of Five Selected PPCPs in Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	WEN Zhi-hao, DUAN Yan-ping, MENG Xiang-zhou, <i>et al.</i> (927)
Microbial Risk Assessment of Urban Water Bodies for Aesthetical and Recreational Uses	SUN Fu, SHA Jing, ZHANG Yi-fan, <i>et al.</i> (933)
Study on Removal of Di-(2-Ethylhexyl) Phthalate by Using of Small-Scale Biological Aerated Filter	LI Wei, ZHAO Jing, YU Jian, <i>et al.</i> (943)
Mechanism of Membrane Fouling and Filtration Characteristics in a Membrane Bioreactor for Industrial Wastewater Treatment	FAN Ju-hong, YU Su-lin, ZHANG Pei-shuai, <i>et al.</i> (950)
Enhanced Electro-Chemical Oxidation of Acid Red 3R Solution with Phosphotungstic Acid Supported on γ -Al ₂ O ₃	YUE Lin, WANG Kai-hong, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (955)
Degradation Kinetics of Activated Carbon Catalyzed Persulfate Oxidation Orange G	YANG Mei-mei, ZHOU Shao-qi, LIU Dan, <i>et al.</i> (962)
Study on the Start-up of the Anaerobic Baffled Reactor for Treating Alkali-dewighting and Dyeing-printing Wastewater	YANG Bo, ZHONG Qi-jun, LI Fang, <i>et al.</i> (968)
Study on the Pollutants Removal Performance Along the Advanced Treatment in Tannery Wastewater by O ₃ -BAF	YU Bin, LIU Rui, CHENG Jia-di, <i>et al.</i> (974)
Effect of Pilot UASB-SFSBR-MAP Process for the Large Scale Swine Wastewater Treatment	WANG Liang, CHEN Chong-jun, CHEN Ying-xu, <i>et al.</i> (979)
Cultivation of Aerobic Granular Sludge with Municipal Wastewater and Studies on Its Characteristics Under the Continuous Flow	NIU Shu, DUAN Bai-chuan, ZHANG Zuo-li, <i>et al.</i> (986)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (I) : Model Constitution	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (993)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (II) : Process Simulation	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (998)
Kinetic Model of Enhanced Biological Phosphorus Removal with Mixed Acetic and Propionic Acids as Carbon Sources (III) : Model Application	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang (1004)
Comparative Study on Water-air CO ₂ , CH ₄ Flux in Two Tributaries in the Three Gorges Reservoir, China	LI Zhe, BAI Lei, GUO Jin-song, <i>et al.</i> (1008)
Factors Influencing the Spatial Variability in Soil Respiration Under Different Land Use Regimes	CHEN Shu-tao, LIU Qiao-hui, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1017)
Differences in Soil Respiration Between Cropland and Grassland Ecosystems and Factors Influencing Soil Respiration on the Loess Plateau	ZHOU Xiao-gang, ZHANG Yan-jun, NAN Ya-fang, <i>et al.</i> (1026)
Application and Benefit Evaluation of Tiered Health Risk Assessment Approach on Site Contaminated by Benzene	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, LIANG Jin, <i>et al.</i> (1034)
History of Heavy Metal Pollution from Tidal Flat in Haizhou Bay	ZHANG Rui, ZHANG Fan, LIU Fu-cheng, <i>et al.</i> (1044)
Accumulation, Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediment of Caohai Plateau Wetland, Guizhou Province	ZHANG Qing-hai, LIN Chang-hu, TAN Hong, <i>et al.</i> (1055)
Assessment and Correlation Analysis of Heavy Metals Pollution in Soil of Dajinshan Island	CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, <i>et al.</i> (1062)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Stream Sediments from a Typical Nonferrous Metals Mining City	LI Ru-zhong, JIANG Yan-min, PAN Cheng-rong, <i>et al.</i> (1067)
Contamination and Health Risk for Heavy Metals via Consumption of Vegetables Grown in Fragmentary Vegetable Plots from a Typical Nonferrous Metals Mine City	LI Ru-zhong, PAN Cheng-rong, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1076)
Correlativity Study of the Distribution of Soil Magnetic Susceptibility and the Heavy Metal Contents in Xi'an City	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei, YANG Guang (1086)
Distribution Characteristics and Environmental Significance of Heavy Metals in Soil Particle Size Fractions from Tropical Forests in China	GONG Cang, XU Dian-dou, CHENG Hang-xin, <i>et al.</i> (1094)
Study on Phosphorus Adsorption Characteristic of Sediments in an Ecological Ditch	ZHANG Shu-nan, JIA Zhao-yue, XIAO Run-lin, <i>et al.</i> (1101)
Fractions and Adsorption Characteristics of Phosphorus on Sediments and Soils in Water Level Fluctuating Zone of the Pengxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir	SUN Wen-bin, DU Bin, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> (1107)
Sorption Behavior of Triton X-100 on Loess and Affecting Factors	ZHONG Jin-kui, ZHAO Bao-wei, ZHU Kun, <i>et al.</i> (1114)
Residual Levels in Air, Soil and Soil-Air Exchange of Organochlorine Pesticides in Hami Region of Xinjiang and Its Potential Ecological Risk	MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, <i>et al.</i> (1120)
Levels and Sources of Decabromodiphenyl Ether and Dechlorane Plus in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	HE Chang, JIN Jun, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of PBDEs and DL-PCBs in Sediments of Taihu Lake	MA Zhao-hui, JIN Jun, QI Xue-kui, <i>et al.</i> (1136)
Characteristics of Organic Pollutants in the Sediments from a Typical Electronics Industrial Zone	LIU Jin, DENG Dai-yong, XU Mei-ying, <i>et al.</i> (1142)
Emission Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Exhaust Particles from a Diesel Car	TAN Pi-qiang, ZHOU Zhou, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (1150)
Characterization of PAHs in Fly Ashes from Coke Production	MU Ling, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (1156)
Comparison of PAHs Distribution in Stabilized Sludge by Sludge Drying Bed and Reed Bed	CUI Yu-bo, SUN Hong-jie, RAN Chun-qiu, <i>et al.</i> (1161)
Effects of Adsorbents on Partitioning and Fixation of Heavy Metals in the Incineration Process of Sewage Sludge	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu, CHEN Tao (1166)
Environmental Toxicity of Waste Foundry Sand	ZHANG Hai-feng, WANG Yu-jue, WANG Jin-lin, <i>et al.</i> (1174)
Construction and Properties of a Microbial Whole-cell Sensor CB10 for the Bioavailability Detection of Cr ⁶⁺	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xu-liang, <i>et al.</i> (1181)
Structure and Dynamics of Microbial Community in the Denitrifying Sulfide Removal Process	YU Hao, WANG Ai-jie, CHEN Chuan (1190)
Effects of Physico-chemical Parameters on the Abundance of the Denitrification-associated Genes <i>nirK</i> , <i>nirS</i> and <i>nosZ</i> During Agricultural Waste Composting	HU Chun-xiao, CHEN Yao-ning, ZHANG Jia-chao, <i>et al.</i> (1196)
Impact of PAHs on the Expression of PRDX in Earthworm (<i>Eisenia fetida</i>)	LIN Kang-li, ZHENG Sen-lin, SONG Yu-fang, <i>et al.</i> (1204)
Preparation of OMC-Au/L-Lysine/Au Modified Glassy Carbon Electrode and the Study on Its Detection Response to Hydroquinone and Catechol	ZHOU Yao-yu, TANG Lin, LI Zhen, <i>et al.</i> (1211)
Risk Communication in Construction of New Nuclear Power Plant	HE Gui-zhen, LÜ Yong-long (1218)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年3月15日 34卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 3 Mar. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人