

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源	李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)
河北张家口市大气污染观测研究	邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)
大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟	黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)
膜生物反应器处理甲苯性能及机制	叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)
厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析	张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)
北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究	徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)
枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价	李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)
三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险	吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)
东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征	陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)
三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征	安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)
长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价	王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)
江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性	李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁璐, 沈新强 (2607)
扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响	李大鹏, 黄勇 (2614)
干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用	张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)
常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响	李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)
温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应	周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)
沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征	于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)
城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响	杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)
基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究	边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)
基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析	白凤姣, 李天宏 (2667)
黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应	卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)
强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究	周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)
九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测	王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)
布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究	孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)
曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究	彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)
城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析	郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)
IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析	朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)
原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化	郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)
UV/H ₂ O ₂ 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果	李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)
蛋白核小球藻 <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 的异养培养条件优化及污水养殖	王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)
“Fe ⁰ /优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究	戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)
树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色	戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)
TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能	王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)
微波加热下苯的催化氧化性能研究	张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)
纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究	高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)
好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述	苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺江, 沈俊 (2773)
超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究	叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)
微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响	宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)
实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化	饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)
西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态	吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)
典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究	尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)
土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响	胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)
土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应	张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)
可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复	张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)
广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究	蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)
北京市近郊区土壤砷累积特征	戚洁, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)
抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究	陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)
臭气污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响	寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)
尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响	陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)
铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究	胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)
pH 和 Ni ²⁺ 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响	罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)
铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究	刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)
环丙沙星在潮土中的吸附特性	崔皓, 王淑平 (2895)
中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究	洪彦, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)
H ₂ S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状	郝郑平, 冀广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)
《环境科学》征稿简则 (2550) 《环境科学》征订启事 (2568) 信息 (2684, 2714, 2848, 2916)	

基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究

边金云¹, 王飞儿^{1*}, 杨佳¹, 俞洁², 楼莉萍¹, 俞丹萍¹

(1. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 2. 浙江省环境监测中心, 杭州 310015)

摘要: 采用流域尺度的农业非点源污染模型——AnnAGNPS 模拟预测苕溪流域四岭水库小流域氮磷流失情况, 分析氮磷流失空间分布特征. 结果表明, 单位面积总氮、总磷流失量在空间分布上有一定的相似性, 均呈现出南部大于北部, 西部高于东部的特点. 以竹林地为主的林地是氮磷输出的最主要来源, 其对氮、磷流失总量的贡献率在 90% 以上. 设定不施肥处理 (CK)、适地养分管理 (SSNM)、当地高产竹农普遍采用的施肥方法 (FFP) 这 3 种施肥方式对林地主要植被类型竹林进行情景分析, 模拟结果表明, 与 FFP 相比, SSNM 在一定程度上减少了氮磷输出, 其中溶解性氮和颗粒态氮流失量分别削减 8.17%、4.33%, 溶性磷和颗粒态磷流失量依次减少 9.08%、1.02%.

关键词: AnnAGNPS 模型; 小流域; 农业非点源; 氮磷污染; 情景分析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2659-08

Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS

BIAN Jin-yun¹, WANG Fei-er¹, YANG Jia¹, YU Jie², LOU Li-ping¹, YU Dan-ping¹

(1. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Zhejiang Environmental Monitoring Center, Hangzhou 310015, China)

Abstract: By using annual agricultural non-point source model (AnnAGNPS), this study simulated the export loading of nitrogen and phosphorus in Siling Reservoir watershed in Xiaoxi Basin, and integrated with the simulation results, the spatial distribution characteristics of non-point source pollution in the watershed was analyzed. The result showed that the export loading of nitrogen and phosphorus had similar characteristics: in the study area, the export loading of nutrients were higher in southern and western regions and lower in northern and eastern regions. Forest land mainly made up of bamboo was the main export source of nitrogen and phosphorus loading with the contribution above 90% of nutrient load of whole watershed. Three fertilization practices such as no fertilizer (CK), site-specific nutrient management (SSNM) and farmers' fertilization practice (FFP) were used in the scenario analysis. The scenario analysis showed that to a certain degree, SSNM could reduce the nitrogen and phosphorus loss. Comparing with FFP, the reduction of SSNM in dissolved nitrogen (DN), particle nitrogen (PN), dissolved phosphorus (DP) and particle phosphorus (PP) was 8.17%, 4.33%, 9.08% and 1.02%, respectively.

Key words: AnnAGNPS model; watershed; agricultural non-point source; nutrient pollution; scenario analysis

近年来随着对点源污染治理的日益加强, 非点源污染对水体污染的贡献越来越显著. 许多发达国家已经证实非点源污染, 尤其是农业非点源污染是地表和地下水污染问题的主要原因之一^[1]. 由于农业非点源污染具有发生随机性、污染物来源不确定及排放分散、污染滞后、隐蔽且不易监测、难以量化、处理复杂等特征^[2], 造成非点源污染的研究与控制具有较大的难度.

随着非点源污染研究的深入, 非点源污染模型如 ANSWERS (areal nonpoint source watershed environment response simulation)^[3]、HSPF (hydrological simulation program fortran)^[4]、WEPP (water erosion prediction project)^[5]、AnnAGNPS (annualized agricultural non-point source pollution

model)^[6]、SWAT (soil and water assessment tool)^[7]等大型连续-分布式参数机制模型应运而生, GIS 与大型机制模型的结合成为当今农业非点源污染研究的重要手段, 已被广泛地应用于模拟非点源污染机制过程、标识关键源区、探讨污染负荷时空分布、制定非点源管理方案等^[8,9]. 其中 AnnAGNPS 模型因其能够很好地模拟土壤固体颗粒、氮磷营养物的形成以及迁移转化过程, 可以计算点源、饲养场产生的污染物以及土壤、水库和集水坑对径流量、泥

收稿日期: 2011-10-19; 修订日期: 2012-01-05

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2008ZX07101-006)

作者简介: 边金云 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境管理与规划, E-mail: bianjinyun@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangfeier@zju.edu.cn

沙的影响并评价非点源污染的长期作用效果^[10],且适用于复杂地质地貌的模拟,而成为流域农业非点源污染研究的热点. 本研究采用 AnnAGNPS 模型模拟苕溪流域四岭水库小流域农业非点源污染状况,对比分析了不同施肥方案下区域氮磷营养盐输出的特征,以期为研究区农业非点源污染管理方案的制定和水环境的有效治理提供科学的决策依据.

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

四岭水库地处杭州市余杭区径山镇西北部,属太湖流域的苕溪水系,水域面积达 70.2 hm²,总库容达 $2\,838 \times 10^4$ m³ (图 1),是杭州市唯一的一座中

型水库,兼具饮用、灌溉、防洪、发电、养殖、旅游等功能. 四岭水库小流域西部和南部地势高,地势起伏较大,海拔高程在 61 ~ 1 095 m 之间,流域面积为 44.1 km²,为北亚热带南缘季风气候区,年平均气温 15.3 ~ 16.2℃,年平均雨量 1 391.8 mm. 流域土壤类型以黄红壤为主,包括黄红壤、潴育型水稻土、渗育型水稻土、酸性粗骨土、红壤、酸性紫色土、黄壤,植被类型主要是竹子、茶树、梨树、水稻等. 该流域没有工业污染源,整个流域为典型的山村农业生态环境小流域,然而近几年来水库水质逐渐下降,水体富营养化趋势逐年明显,尤其是 2000 年以后常常发生蓝藻水华,农林复合型面源污染是其水质恶化的主要原因之一.

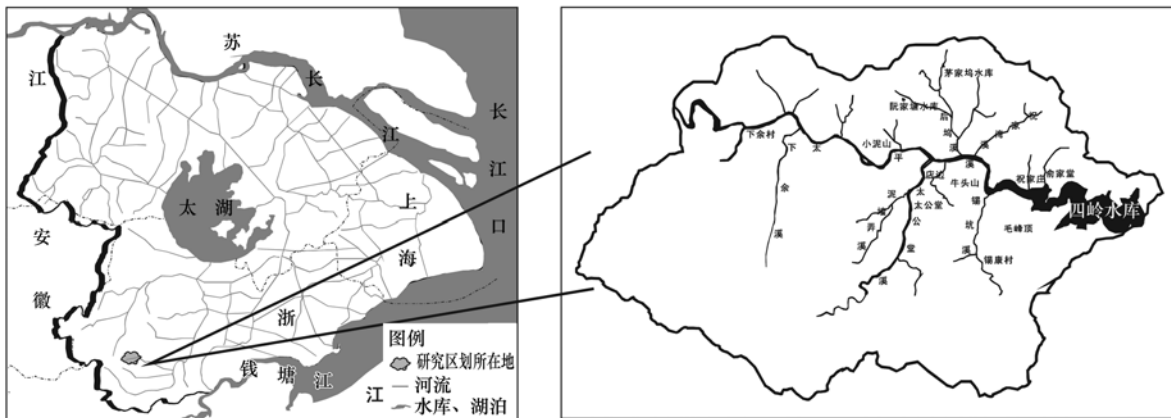


图 1 四岭水库小流域地理位置示意

Fig. 1 Geographic location of Siling Reservoir watershed

1.2 研究方法

1.2.1 AnnAGNPS 模型简介

AnnAGNPS 模型是针对区域农业管理措施响应而设计的连续分布式模型^[11]. 该模型主要由水文子模型、土壤侵蚀子模型和化学物质输移子模型构成^[12],能够模拟产流、蒸散发、土壤侵蚀和养分输移等过程^[13].

该模型按照流域的地形、土壤类型和土地利用等特征将研究区划分为任意形状均质分室单元 (cell),并认为各单元对流域出口污染负荷的贡献是独立的,在每个单元分别计算其径流量、土壤侵蚀和污染物流失量,由河网将这些分室单元连接起来,并根据单元的平均坡度和坡向等对径流和泥沙进行迁移演算,累计得到流域出口处水土流失总量和非点源污染物质输出^[14]. 它采用 ANSIFortran95 语言,以日为运算时间步长,能够进行连续模拟,输出结果包括各个分室单元和流域出水口的径流量、不同粒径分级的泥沙流失量、溶解性和颗粒态有机

碳和养分流失负荷等.

1.2.2 数据来源

AnnAGNPS 的模拟运算需要依托强大的数据库,参数系统包含了 8 大类,31 小类,约 500 余个参数,本研究中模型主要输入数据及来源如表 1 所示.

1.2.3 模型校准和验证

首先进行水文模块校准,参照流域实际特征、模型使用手册 CN 推荐值以及相关文献^[19~21],采用试错法,反复调试 CN 值,并微调土壤供水能力参数,校准径流量使其与实测值最大程度地接近^[22,23]. 针对 AnnAGNPS 模型不能很好地模拟地下径流^[24,25],本研究采用已被国内外多个流域实测检验、可信度较高的 Arnold 博士等开发的数字滤波程序对流域径流量进行基流分割,输出 3 个通道的基流值,以 1、2 通道的平均值作为滤波结果计算地表径流值^[26].

在对径流值进行校正的基础上,对氮磷营养物流失模块进行校正. 影响氮磷输出的主要参数包括

表 1 AnnAGNPS 模型输入数据
Table 1 Input data of AnnAGNPS model

类型	项目	数据描述	数据来源
图数据	数字高程模型	比例尺 1:1 万, 10 m 分辨率	浙江大学遥感所
	土地利用图	比例尺 1:1 万 (2008 年)	浙江大学遥感所
	土壤类型图	比例尺 1:5 万 (2008 年)	浙江大学遥感所
主要参数	气象数据	降雨量、日最高和最低气温、露点等	临安气象站
	分室数据	分室面积、坡度、平均高程、坡向、汇流时间等	数字高程模型
	沟道数据	沟道长度、沟谷宽度、沟道入渗率等	数字高程模型
	作物数据	生长时间, 不同生长阶段氮、磷摄取, 作物残茬等	土地利用图, 调查资料等
	土壤数据	土壤容重、田间持水量、萎蔫系数、饱和导水率等	文献[15~17]
	肥料数据	肥料施用率、施用深度、肥料中氮磷含量等	土地利用图, 调查资料以及文献[18]
	管理数据	相对轮作年、犁耕操作深度、管理事件日期等	土地利用图, 调查资料等
	模拟期数据	流域暴雨雨类型号、降雨因子、10 a EI 等	视实际情况而定
	水质	监测数据	浙江省环境监测中心

CN 值、化肥施用量、曼宁系数、土壤侵蚀因子 K、耕作与管理因子 C、水土保持措施因子 P 等^[27], 调整上述敏感因子, 使得总氮、总磷模拟值最大限度地接近其实测值. 鉴于监测数据有限, 本研究采用研究区出水口断面 2007 年总氮、总磷监测数据校准模型, 采用 2008 年实测数据来验证模型在四岭水库小流域氮磷模拟的适用性.

2 结果与讨论

2.1 模型的校准和验证

2.1.1 地表径流的校准和验证

表 2 为校正期(1999~2003 年)和验证期(2004

~2008 年)年地表径流实测值与模拟值的对比, 年地表径流校正期的相对误差在 -18.28% ~ -0.05% 范围内, 相关系数 R^2 和 Nash-suttcliffe 模拟效率系数 E_{ns} 依次为 0.927、0.871; 验证期的相对误差在 -9.34% ~ 6.35% 范围内, R^2 和 E_{ns} 分别为 0.970 和 0.951. 模型校正期和验证期相对误差均保持在 20% 以内^[28].

月时间尺度地表径流实测值和模拟值对比图如图 2 所示, 其相关系数 R^2 为 0.829, E_{ns} 为 0.778. 月时间尺度地表径流模拟值与实测值相比较, 呈现出枯水期被低估, 丰水期和平水期模拟效果较好.

表 2 1999~2008 年地表径流实测值与模拟值对比

Table 2 Observed and simulated value of annual surface runoff between 1999-2008

项目	年份	降雨量 /mm	径流实测值 /m ³	径流模拟值 /m ³	相对误差 /%	R^2	E_{ns}
校正期	1999	1 829.7	35 882 368.5	29 321 588.1	-18.28	0.927	0.871
	2000	1 269.5	16 608 625.5	15 374 338.4	-7.43		
	2001	1 530.1	29 541 617.7	29 457 624.9	-0.28		
	2002	1 703.3	23 203 426.5	23 191 784.8	-0.05		
	2003	1 130	11 764 047.4	9 771 777.5	-16.94		
验证期	2004	956.6	7 999 629.7	8 290 480.4	3.64	0.970	0.951
	2005	1 132.5	16 012 124.8	15 131 411.6	-5.5		
	2006	1 172	14 972 392.9	15 881 576.3	6.07		
	2007	1 234.8	16 716 462.4	17 778 183.9	6.35		
	2008	1 503.2	27 315 998.1	24 573 071	-9.34		

参照中国侵蚀性降雨标准^[29], 选取降雨量大于或等于 12 mm 的日流量数据, 将日尺度地表径流实测值和模拟值进行对比(见图 3), 日尺度地表径流的确定性系数 R^2 为 0.803. 由此可知, 经过校正的模型能较好地模拟流域径流输出.

2.1.2 氮磷营养盐的校准和验证

由表 3 和图 4 可知: 2007~2008 年研究区总氮

模拟值与实测值相对误差均小于 10%, 校正期和验证期总氮 R^2 分别为 0.753、0.875, E_{ns} 为 0.687、0.786; 2007 年总磷模拟值高于实测值, 相对误差高达 37.47%, 而 2008 年模拟值略低于实测值, 校正期和验证期总磷 R^2 依次为 0.765、0.798, E_{ns} 为 0.467、0.726. 上述结果表明: 与径流量模拟相比, AnnAGNPS 模型对流域氮磷模拟表现出一定的不确

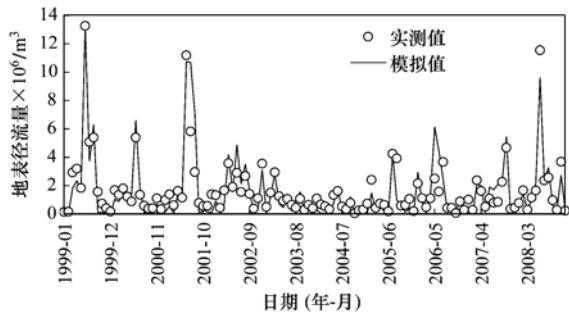


图2 月地表径流实测值和模拟值对比 (1999 ~ 2008 年)
Fig. 2 Observed and simulated value of monthly surface runoff (1999-2008)

定性,不过年相对误差仍能维持在-40% ~ 40% 的范围内,校正期和验证期 $R^2 \geq 0.6$, E_{ns} 大于或接近 0.5,说明模型在研究区的氮磷流失模拟精度一般,基本上可以接受^[28,30].

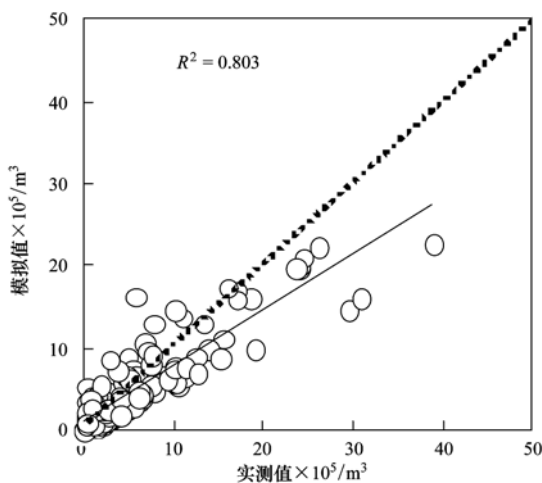


图3 日地表径流实测值和模拟值拟合
Fig. 3 Comparison for observed and simulated values of daily surface runoff

表3 模型校正和验证结果

Table 3 Results of model calibration and validation

项目	总氮					总磷				
	实测值/t	模拟值/t	相对误差/%	R^2	E_{ns}	实测值/t	模拟值/t	相对误差/%	R^2	E_{ns}
校正期	61.998	65.665	5.91	0.753	0.687	1.171	1.61	37.47	0.765	0.467
验证期	125.312	118.433	-5.49	0.875	0.786	1.226	1.167	-4.84	0.798	0.726

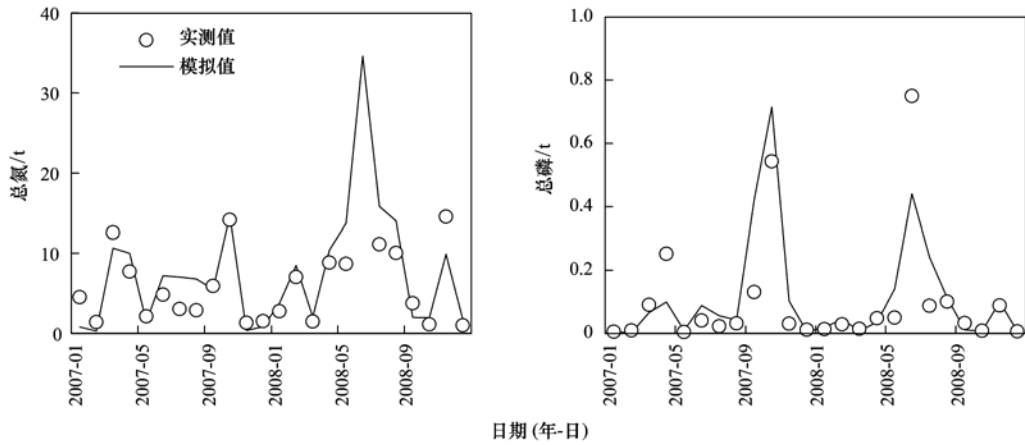


图4 2007 ~ 2008 年总氮、总磷实测值和模拟值对比
Fig. 4 Comparison of observed and simulated value of total nitrogen and total phosphorus between 2007-2008

本研究中径流量模拟精度最高,拟合性最好,其次是氮营养盐的模拟效果,而磷营养盐稳定性最低,精度受限.这是因为 AnnAGNPS 模型需要输入大量参数,而参数主要是通过实地调查、参阅模型自带的用户手册及其他相关文献报道获得的,对于一些难以确定的参数,采用了模型的默认值.本研究将四岭水库小流域概化为 4 种作物,以各类作物最典型的施肥、施药、耕作方式等数据导入模型,而居民区生活污染采用排污系数法估算,这本身与实际情况就有一定的差异性.另外水文模块或者泥沙侵蚀

模块产生的误差会转移并且扩大到污染物质输出模块,从而导致模型对径流、泥沙、氮磷流失量的模拟误差依次增大^[31]. 磷的模拟结果比氮差可能是由于暴雨事件磷的输出状态以泥沙结合态为主,较易发生降解、吸附、迁移等复杂的环境行为过程,引起模型偏差的累积,导致磷负荷输出难估算,模型模拟精度较差^[32].

2.2 流域非点源污染输出状况

2.2.1 非点源污染输出的空间分布特征

四岭水库小流域土地利用类型主要为林地、耕

地、园地、水域和居民用地(图 5),其中林地面积最大,占整个流域面积的 88.94%,各种土地利用类型的面积及其所占比例如表 4 所示.

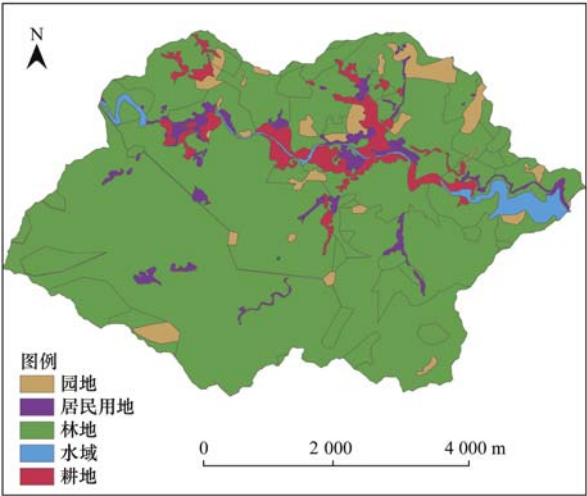


图 5 四岭水库小流域土地利用类型图
Fig. 5 Land use map of Siling Reservoir watershed

表 4 四岭水库小流域各种土地利用类型面积及其所占比例

Table 4 Area and proportion of land use type in Siling Reservoir watershed			
土地利用类型	主要作物	面积/hm ²	面积百分比/%
耕地	水稻	143.12	3.24
水域	—	66.66	1.51
居民用地	—	106.09	2.41
园地	茶树	34.31	0.78
	梨树	70.39	1.60
	其他作物	66.93	1.52
林地	竹林	2 637.27	59.79
	硬阔类	817.89	18.54
	针叶类	468.03	10.61

将模型生成的氮磷负荷数据库文件和 subwta.shp 结合,可按照集水单元显示流域非点源污染物的空间分布.本研究区单位面积氮磷污染负荷的空间分布情况如图 6 所示,总体显示研究区单位面积氮磷污染负荷的空间分布呈现出南部大于北部,西部高于东部的特点. 1999~2008 年研究区年均总氮输出量为 81.43 t·a⁻¹,居民用地和梨园单位面积总氮产生量相对较高,一般在 23~32 kg·(hm²·a)⁻¹ 范围内;西、南部地势较高的竹林地区单位面积总氮产生量在 19~23 kg·(hm²·a)⁻¹ 范围,由于竹林所占面积比例较大,因此对流域总氮的贡献较高. 1999~2008 年流域年均总磷流失量为 2.86 t·a⁻¹,居民用地单位面积总磷产生量最大,其次是梨园.与氮素输出相比,研究区磷素流失量较少.

总氮、总磷的输出在空间分布上有一定的相似性,磷流失多的区域氮流失量往往也大,在磷流失少的区域氮流失量通常也比较小.这是因为吸附态是该研究区营养物流失的主要赋存形式,而吸附态营养物质往往附着在泥沙上,随着泥沙的迁移而迁移,因此总氮、总磷负荷的空间分布必然呈现一定的相似性,氮磷流失的相似性也是农业非点源污染的典型特征,同时印证了该流域为农林复合型面源污染.

2.2.2 不同土地利用类型氮磷流失的差异性

经模型模拟,流域内不同土地利用类型总氮、总磷流失量和贡献率如表 5 所示.在氮流失量中,以竹林为主的经济林地贡献最大,高达 94.18%,其次是园地,占 2.23%;在磷流失量中,林地的贡献率最大,占 91.99%,居民用地第二,占 3.30%.

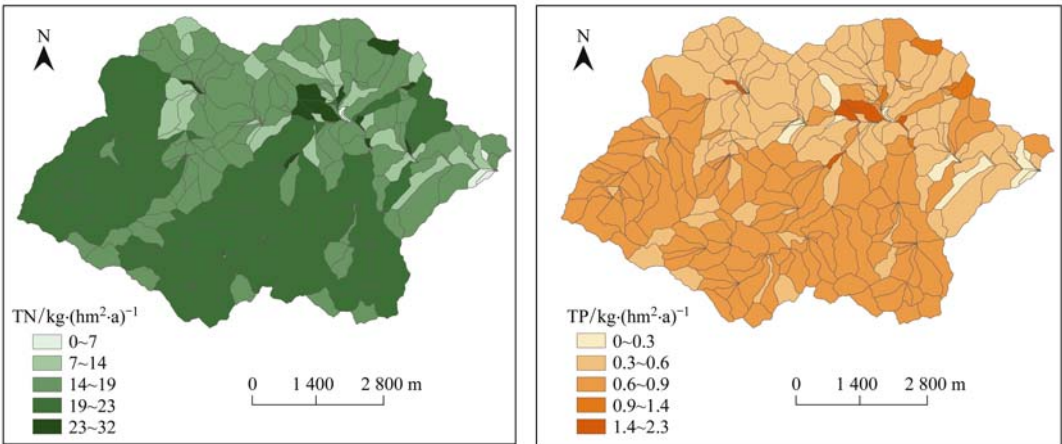


图 6 1999~2008 年研究区氮磷污染负荷的空间分布情况
Fig. 6 Spatial distribution of export loading of total nitrogen and total phosphorus in study area during 1999-2008

表 5 各土地利用类型的氮、磷负荷及贡献率

Table 5 Total export loading and contribution rate of total nitrogen and total phosphorus in different land use types

土地利用类型	面积/hm ²	总氮		总磷	
		流失量/kg	贡献率/%	流失量/kg	贡献率/%
耕地	80.85	1 468.91	1.80	49.43	1.73
园地	75.7	1 815.94	2.23	73.38	2.57
林地	4 166.19	76 697.66	94.18	2 630.51	91.99
水域	43.9	317.37	0.39	11.97	0.42
居民用地	43.85	1 134.95	1.39	94.40	3.30
合计	4 410.49	81 434.82	100	2 859.68	100

表 6 是不同土地利用类型的单位面积总氮、总磷流失量,流域各土地利用类型的单位面积总氮、总磷负荷分别在 7.23 ~ 25.88 kg·(hm²·a)⁻¹ 和 0.27 ~ 2.15 kg·(hm²·a)⁻¹ 之间,其中居民用地的总氮和总磷均为流域最高,分别为 25.88 kg·(hm²·a)⁻¹、2.15 kg·(hm²·a)⁻¹,其次是园地,其单位面积总氮、总磷负荷分别是 23.99 kg·(hm²·a)⁻¹ 和 0.97 kg·(hm²·a)⁻¹,氮磷营养盐输出总量贡献率最大的林地位列第三,氮磷负荷依次为 18.41 kg·(hm²·a)⁻¹ 和 0.63 kg·(hm²·a)⁻¹. 林地植被覆盖率较高,依靠植物根系固有的净化作用,氮磷流失一般较低,但是当地的林地主要以竹林

为主,竹农为了获得高产和最大经济效益,往往采取一些不恰当的经营和管理模式,再加上竹林地一般坡度较大,在缺乏植被覆盖时,如遇到暴雨冲刷,营养物极易随着地表径流流失.

2.3 AnnAGNPS 模型的模拟应用

根据四岭水库小流域的实际情况,拟定对主要林地植被类型竹林进行不同经营管理模式情景分析,共设定 3 种施肥方式,分别是不施肥处理(CK)、适地养分管理(site-specific nutrient management, SSNM)、当地高产竹农普遍采用的施肥方法(farmers' fertilizer practice, FFP). 研究区竹林施用的肥料有氮肥(尿素,含 46.4% N)、磷肥(过磷酸钙,含 16% P₂O₅)、钾肥(含 95% KCl,折合约 60% K₂O)及复合肥(N 15%-P₂O₅ 15%-K₂O 15%). SSNM 每隔 2.5 m 左右开宽 20 cm、深 20 ~ 30 cm 水平沟施,化肥施用强度 N 210 kg·hm⁻²、P₂O₅ 105 kg·hm⁻²、K₂O 95 kg·hm⁻²; FFP 处理施肥采取全区均匀撒施,施后复土,施用强度 N 465 kg·hm⁻²、P₂O₅ 112.5 kg·hm⁻²、K₂O 112.5 kg·hm⁻²^[18],具体施肥方案见表 7.

表 6 各土地利用类型的单位面积氮磷负荷

Table 6 Export loading of total nitrogen and total phosphorus per unit area of each land use type

土地利用类型	总氮/kg·(hm ² ·a) ⁻¹	总磷/kg·(hm ² ·a) ⁻¹
耕地	18.17	0.61
园地	23.99	0.97
林地	18.41	0.63
水域	7.23	0.27
居民用地	25.88	2.15

表 7 四岭水库小流域竹林的施肥方案

Table 7 Fertilizer used practices for bamboo forest in Siling Reservoir watershed

施肥方案	施肥时间		
	2 月	5 月	9 月
CK	—	—	—
SSNM	—	尿素 226.3 kg·hm ⁻²	尿素 226.3 kg·hm ⁻²
		磷肥 400 kg·hm ⁻²	磷肥 256.3 kg·hm ⁻²
		钾肥 125.3 kg·hm ⁻²	钾肥 125.3 kg·hm ⁻²
FFP	尿素 380 kg·hm ⁻²	尿素 380 kg·hm ⁻²	复合肥 750 kg·hm ⁻²

2.3.1 氮素流失情况

降雨造成的地表径流会带走土壤中的氮素养分,从而降低肥料的利用效率,同时使氮素养分迁出农林生态系统. AnnAGNPS 模型模拟结果显示 2008 年研究区氮素流失具有较明显的季节特征,氮素流失与降雨呈现显著正相关(R² = 0.847). 氮素流失主要集中在降雨较多的夏秋季,其流失总量约占全

年的 76.46%.

张奇春等^[18]研究结果表明,颗粒态氮(PN)与溶解性氮(DN)是毛竹林土壤氮素流失的主要形态,不同降雨条件下 DN 与 PN 流失总量相近,占总氮流失量的质量分数分别为 51% 和 49%. 模型研究结果表明,3 种施肥模式下 DN 流失量占总氮的质量分数依次为 50.9%、50.7% 和 51.7%,PN 流失量占

总氮的质量分数分别为 49.1%、49.3% 和 48.3%，基本与张奇春等^[18]的现场调查结果一致。

在 CK、FFP 和 SSNM 这 3 种施肥方式下,研究区域总氮年流失量分别为 102.76、118.43 和 111.07 t。

模拟结果显示(图 7),不施肥下氮素流失量少于施肥,说明竹林施肥对流域氮素的流失具有一定的贡献.与 FFP 相比,SSNM 在一定程度上减少氮素的输出,DN 和 PN 流失量分别削减 8.17%、4.33%。

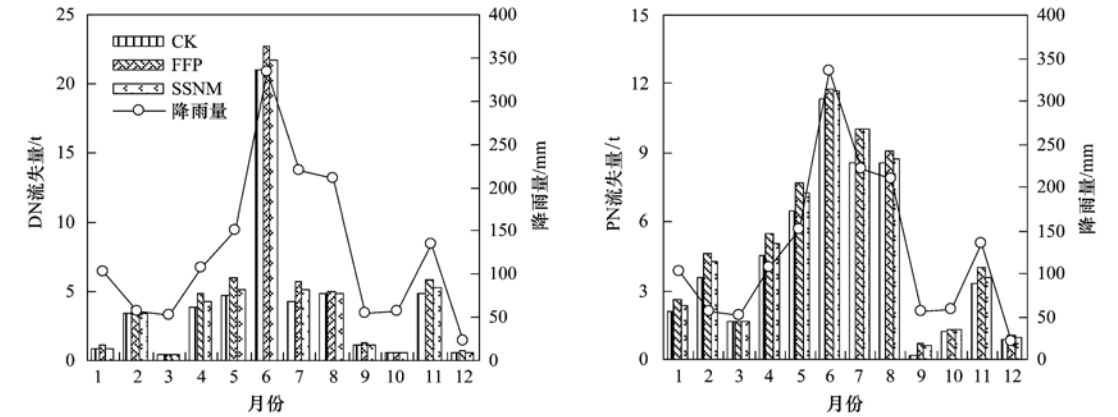


图 7 不同施肥方式下溶解性氮和颗粒态氮的流失情况
Fig. 7 Export loading of DN and PN under different fertilization practices

2.3.2 磷素流失情况

流域磷素流失一般以溶解性磷(DP)和颗粒态磷(PP)2 种形式输出,模拟结果显示:降雨量影响 DP、PP 流失量,在降雨量大的月份,磷素流失多,磷素输出与降雨量呈现很好的一致性($R^2 = 0.810$).竹林 3 种经营模式下 CK、FFP 和 SSNM 的总磷流失量分别为 1.13、

1.17 和 1.15 t,其中 PP 流失量占总磷的质量分数依次为 97.1%、96.4% 和 96.7%,因此 PP 是磷素流失的最主要赋存形态.溶解性磷和颗粒态磷流失量均表现出 CK<SSNM<FFP 的规律,与 FFP 相比,SSNM 主要是减少了 DP 的输出,对 PP 流失的削减不显著,DP 和 PP 流失量分别减少了 9.08%、1.02%。

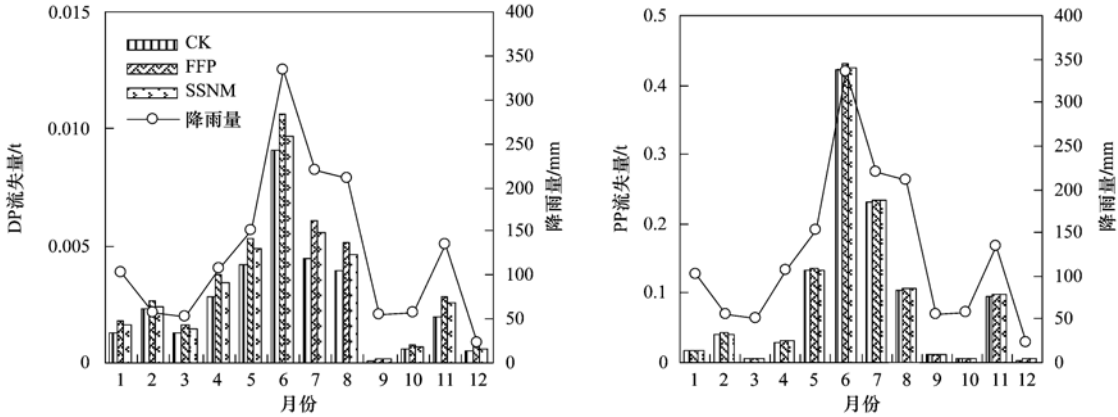


图 8 不同施肥方式下溶解性磷和颗粒态磷的流失情况
Fig. 8 Export loading of DP and PP under different fertilization practices

2.3.3 最佳施肥方案的确定

FFP 虽然能够提高竹林的产量,短期来看给竹农带来了一定的经济效益,但是从长远考虑过量施肥不仅会降低竹笋品质和竹材质量,而且可能诱发流域下游四岭水库的富营养化,给环境带来了巨大的压力.与 FFP 相比,SSNM 在维持竹林高产、甚至增产的前提下,减少研究区氮肥的年施用量,降低了生产成本,还控制了氮、磷的输出,达到社会、经济

和环境的共赢.因此在研究区推广 SSNM 技术是切实可行的,这对于改善小流域环境质量、遏制四岭水库富营养化都具有重大的现实意义。

3 结论

(1)利用 AnnAGNPS 模型对四岭水库小流域地表径流及氮磷流失量进行模拟,结果显示地表径流的模拟精度较高,而氮磷营养物输出的模拟结果一

般,基本上可以接受。

(2)总氮、总磷的输出在空间分布上有一定的相似性。研究区单位面积氮磷输出的空间分布呈现出南部大于北部,西部高于东部的特点。竹林为主的大面积林地是氮磷输出的最主要来源,其对氮、磷流失总量的贡献率高达 94.18% 和 91.99%。

(3)对不同施肥方式(CK、SSNM、FFP)下研究区氮磷输出情况的模拟表明:氮磷流失量与降雨量之间呈现显著正相关,氮素流失的主要形态是溶解性氮和颗粒态氮,磷素流失的主要形态为颗粒态磷。FFP 这种高投入的施肥方式只能带来短期的高产出,实际上不利于流域的可持续发展。SSNM 在稳产甚至高产的前提下减轻了氮磷污染,该技术的推广和应用对流域环境质量的改善和提高意义深远。

参考文献:

- [1] 侯越. 农业非点源污染的危害与防治措施[J]. 水资源与水工程学报, 2008, **19**(4): 103-106.
- [2] Shen Z Y, Liao Q, Hong Q, *et al.* An overview of research on agricultural non-point source pollution modelling in China[J]. Separation and Purification Technology, 2012, **84**: 104-111.
- [3] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning[J]. Transactions of the ASABE, 1980, **23**(4): 938-944.
- [4] Johanson R C, Imhoff J C, Davis H H. Users Manual for Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF) [M]. USA: Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U. S. Environmental Protection Agency, 1980.
- [5] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, *et al.* A process-based soil-erosion model for USDA-water erosion prediction project technology[J]. Transactions of the ASABE, 1989, **32**(5): 1587-1593.
- [6] Bosch D D, Theurer F D, Bingner R L, *et al.* Evaluation of the AnnAGNPS Water Quality Model[R]. Orlando: ASAE, 1998. 1-12.
- [7] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment Part I: Model development [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998, **34**(1): 73-89.
- [8] Sivertun Å, Prange L. Non-point source critical area analysis in the Gisselö watershed using GIS[J]. Environmental Modeling & Software, 2003, **18**(10): 887-898.
- [9] Baginska B, Milne-Home W, Cornish P S. Modeling nutrient transport in Currency Creek, NSW with AnnAGNPS and PEST [J]. Environmental Modelling & Software, 2003, **18**(8-9): 801-808.
- [10] 高龙华. 遥感和 GIS 支持下流域非点源污染模型研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. 50-52.
- [11] 花利忠, 贺秀斌, 颜昌宙, 等. 三峡库区大宁河流域 AnnAGNPS 模型参数评价[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(4): 65-74.
- [12] 黄志霖, 田耀武, 肖文发. AGNPS 模型机理与预测偏差影响因素[J]. 生态学杂志, 2008, **27**(10): 1806-1813.
- [13] 黄志霖, 田耀武, 肖文发, 等. AnnAGNPS 模型在三峡库区农林复合小流域模拟效果评定[J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2872-2878.
- [14] 花利忠, 贺秀斌, 颜昌宙, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的大宁河流域泥沙输移比评价[J]. 水土保持通报, 2009, **29**(3): 154-158.
- [15] 朱克贵, 杜国华, 章士炎, 等. 中国土种志[M]. 北京: 农业出版社, 1993.
- [16] 浙江省土壤普查办公室. 浙江土壤[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1994.
- [17] 魏孝孚, 吕仁焕, 严学芝, 等. 浙江土种志[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1990.
- [18] 张奇春, 王雪芹, 楼莉萍, 等. 毛竹林生态系统地表径流及其氮素流失形态研究[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(5): 23-26.
- [19] Cronshey R. Urban hydrology for small watersheds [R]. Washington DC: United States Department of Agriculture, 1986.
- [20] Sarangi A, Cox C A, Madramootoo C A. Evaluation of the AnnAGNPS model for prediction of runoff and sediment yields in St Lucia watersheds [J]. Biosystems Engineering, 2007, **97**(2): 241-256.
- [21] Shamshad A, Leow C S, Ramlah A, *et al.* Applications of AnnAGNPS model for soil loss estimation and nutrient loading for Malaysian conditions[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2008, **10**(3): 239-252.
- [22] Borah D K, Bera M. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source Pollution models: Review of applications [J]. Transactions of the ASABE, 2004, **47**(3): 789-803.
- [23] Polyakov V, Fares A, Kubo D, *et al.* Evaluation of a non-point source pollution model, AnnAGNPS, in a tropical watershed[J]. Environmental Modeling & Software, 2007, **22**(11): 1617-1627.
- [24] 李硕, 刘磊. AnnAGNPS 模型在澧水河流域产水、产沙的模拟评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 49-57.
- [25] Klimont Z, Kadlec J, Langhammer J. Evaluation of suspended load changes using AnnAGNPS and SWAT semi-empirical erosion models[J]. Catena, 2008, **73**(3): 286-299.
- [26] Arnold J G, Allen P M, Muttiah R, *et al.* Automated base flow separation and recession analysis techniques[J]. Ground Water, 1995, **33**(6): 1010-1018.
- [27] Liu J C, Zhang L P, Zhang Y Z, *et al.* Validation of an agricultural non-point source (AGNPS) pollution model for a catchment in the Jiulong River watershed, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2008, **20**(5): 599-606.
- [28] Binger R L, Mutchler C K, Murphree C E. Predictive capabilities of erosion models for different storm sizes [J]. Transactions of the ASABE, 1992, **35**(2): 505-513.
- [29] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J]. 地理科学, 2002, **22**(6): 705-711.
- [30] 李家科, 李怀恩, 李亚娇, 等. 基于 AnnAGNPS 模型的陕西黑河流域非点源污染模拟[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(6): 81-88.
- [31] 高菲, 张文胜, 刘庄, 等. AnnAGNPS 模型在太湖流域丘陵区适用性研究[J]. 人民长江, 2009, **40**(21): 79-82.
- [32] 邵研. AnnAGNPS 模型在土门西沟小流域退耕还林模拟中的应用[D]. 北京: 北京林业大学, 2006. 39-43.

CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area	WEI Wei, JIA Fu-yan, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H ₂ O ₂ Process	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe ⁰ /Enriched-Bacteria" System	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO ₂ /PS/Fe ₃ O ₄ and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions	RAO Ben-qiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i>	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb ²⁺ and Cu ²⁺ on Nano-HAP Surfaces	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni ²⁺ on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO _x Removal at Moderate to High Temperatures	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H ₂ S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

《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)

2012年8月15日 33卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行