

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 F _{rex} 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究

陆宇超¹, 毕孟飞², 李泽利¹, 沙健¹, 王玉秋¹, 钱丽萍^{3*}

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 黄山市环境监测站, 黄山 245000; 3. 黄山学院生命与环境科学学院, 黄山 245041)

摘要: 利用区域营养盐管理模型 (ReNuMa) 对率水流域 2000~2010 年的溶解态氮 (DN) 负荷进行了定量估算和来源解析。在率定期和验证期, 径流和 DN 负荷模拟的 E_{ns} 和 R^2 都大于 0.9, 模型具备可靠的模拟能力。结果表明, 率水流域的年均非点源 DN 负荷为 $1.11 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, 负荷强度为 $(0.75 \pm 0.22) \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。在所有土地利用类型中, 水田的 DN 负荷强度最大 [$28.60 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], 林地的 DN 负荷强度最小 [$2.71 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]。农业生产用地 (水田、谷物、经济作物、果园和茶园) 对 DN 负荷的贡献最大, 表明人类影响下的农业生产活动是流域非点源污染的最主要来源。基于污染负荷适量削减和农业经济产值最大化原则, 开展了流域 2015 年土地利用结构优化分析, 规划结果表明在土地利用结构最优情况下, 经济收益的增长依然伴随着负荷的增加, 但经济产值的增幅大于 DN 负荷的增幅。

关键词: ReNuMa; 非点源; 溶解态氮; 污染负荷; 土地利用; 优化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2139-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.014

Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuaishui Watershed

LU Yu-chao¹, BI Meng-fei², LI Ze-li¹, SHA Jian¹, WANG Yu-qiu¹, QIAN Li-ping³

(1. College of Environmental Science and Technology, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Environment Monitoring Station of Huangshan City, Huangshan 245000, China; 3. College of Life and Environment Sciences, Huangshan University, Huangshan 245041, China)

Abstract: Regional Nutrient Management (ReNuMa) was applied to estimate dissolved nitrogen (DN) load and perform source apportionment in Shuaishui watershed during 2000-2010. Satisfactory performance of ReNuMa was revealed by the E_{ns} and R^2 of greater than 0.9 in calibrating and validating streamflow and DN. The average nonpoint DN load in this watershed was $1.11 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$, with the load intensity of $(0.75 \pm 0.22) \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$. Among all the land uses, paddy field had the largest DN load intensity [$28.60 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], while forest had the least [$2.71 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]. Agricultural land (including paddy, grain, cash crop, tea plant and orchard) contributed most to DN load in Shuaishui watershed, indicating that the human dominated agricultural activities was the major contributor of nonpoint source pollution. Land use structure optimization for Shuaishui watershed in 2015 was conducted under the rule of reducing pollutants loads and maximizing the agricultural output value. The results demonstrated that agricultural monetary growth was accompanied with the increasing DN load at the optimal level, although output increment was higher than that of DN load.

Key words: ReNuMa; nonpoint source; dissolved N; pollutant load; land use; optimization

随着工业点源污染控制水平的提高, 非点源污染已成为水环境污染的主要因素, 引起水体富营养化、水体生态功能降低和饮用水源污染等问题, 尤其是土地利用/覆盖变化导致的为甚^[1~3]。不同土地利用类型的土壤侵蚀和营养物迁移特征存在显著差异^[4, 5], 因此其对流域非点源污染的贡献也各有不同。在定量化制定流域管理措施时, 为了寻求环境效益、经济效益最大化, 可以通过优化各种土地利用类型大小及其空间分布, 从而实现同步控制非点源污染和增加经济产值^[6~8]。

在定量估算流域非点源污染负荷方面, 许多研究采用依靠水文驱动的机制模型 (deterministic

modeling) 或者基于经验的输出系数法 (export coefficient modeling)^[9, 10]。前者应用非点源污染发生的物理机制定量污染物负荷的产出及其对水体的影响, 考虑水文过程、土壤侵蚀过程和污染物迁移过程等^[11, 12]; 后者不考虑非点源污染发生的具体过程, 而是根据不同单位源 (如不同土地利用类型) 负荷排放量与输出系数的乘积之和来计算^[13~15]。

收稿日期: 2013-10-11; 修订日期: 2013-12-23

基金项目: 环境保护部环境规划院水污染综合防治项目 (2013A009)

作者简介: 陆宇超 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制与防治, E-mail: luyuchao.nk@hotmail.com

* 通讯联系人, E-mail: lpq@hsu.edu.cn

但前者要求较多依赖建模区域的输入数据,人力财力成本高,在建模区域外的推广和应用受到限制^[16, 17];后者则没有考虑单位源和受纳水体间的水力联系程度,不能提供连续或者逐月逐年负荷估算值,无法反映随降水径流变化而变化的负荷输出^[16, 18, 19],而且由于不合理“借用”输出系数、缺乏有效的率定和验证方式,导致估算结果较大的不确定性和风险^[9, 17, 20],因此两种模型在应用中均存在一定限制。

区域营养盐管理模型 (regional nutrient management, ReNuMa)^[21, 22] 是一种水文驱动的半经验模型,相比机制模型,其所需参数少、成本低,易于向建模区域外推广;相对于输出系数法,其含有连续降水径流传输模块,能够反映降水径流影响下的负荷输出,提供逐月逐年的负荷估算值,此外还能够分别给出溶解态、颗粒态营养盐负荷及其来源,能够更为全面真实地反映流域负荷情况。目前, ReNuMa 已被用于美国东北部 16 个流域^[21],中国长春的石头口门水库流域^[23, 24] 和天津于桥水库的沙河流域^[25] 等的非点源污染定量估算。本研究采用 ReNuMa 模型对新安江上游率水流域 2000 ~ 2010 年溶解态氮 (dissolved nitrogen, DN) 负荷进行定量估算和来源解析,不仅提供了流域内非点源 DN 负荷的来源和占比,确定了不同土地利用类型的 DN 负荷强度,还按照污染物负荷适量削减和农业经济产值最大化的原则,进行流域土地利用结构优化,以期对解决流域非点源污染问题和规划土地资源提供参考。

1 研究区域概况

率水河是新安江、富春江和钱塘江的正水源头,与横江交汇于安徽省黄山市中心城区屯溪区,全长 148.2 km,流域面积约为 1 520 km²,流域内林地和耕地为主要土地利用类型。该流域属于亚热带季风气候,年平均降水量为 1 752 mm,大多集中在 4 ~ 8 月之间。流域范围中没有被记录到工业点源污染,污染物主要通过非点源排放的形式进入水体。率水流域的地理位置关系如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 ReNuMa 模型的运行

ReNuMa 模型的输入输出示意图如图 2 所示。其中,输入数据来源及处理步骤列于表 1。

模型的输入参数包括①定义产汇产流产沙过程



图 1 率水流域地理位置

Fig. 1 Location of Shuaishui watershed

的传输参数 (transport parameter) 和②定义营养盐 (本研究为 DN) 循环过程的营养盐参数 (nutrient parameter), 参数初值根据文献资料或者实地监测获得,经过率定后用于正式模拟;模型的输出结果包括:不同来源的径流深 (streamflow, cm) 和 DN 负荷量 (DN, t)。采用 Microsoft Excel 中的规划求解加载项 (Excel Solver Add-in) 使模型参数获得率定值,此时径流和 DN 负荷的逐月观测值和模型模拟值差值的平方和最小。径流观测值来自率水流域唯一的水文站月潭站点 (黄山水利局提供), 根据流域出口的黄山林校断面 (黄山市环境监测站提供) 和负荷-流量相关关系^[26, 27] 得到的 DN 负荷用于模型率定和验证。

采用扰动分析法,即分别考察单一输入参数在相对其基线值高 ($\Delta x/x = +10\%$) 和低 ($\Delta x/x = -10\%$) 两种取值情形下的输出结果变化 ($\Delta y/y$) 与输入参数变化 ($\Delta x/x$) 的比值 S ,对 ReNuMa 模型输入参数进行敏感性分析^[21]。根据敏感值的大小可以说明参数对模型结果影响的大小,敏感值越大则影响越大。在率定过程中,优先率定敏感值高的参数,能够有效规避“同效异参”效应,提高率定效率和结果可靠性。

采用 Nash-Sutcliffe 效率系数 E_{ns} ^[28] 和决定系数 R^2 评价模型模拟结果。一般认为, $E_{ns} > 0.5$, $R^2 > 0.6$ 时模型的模拟结果是可接受的^[24, 29], 特别当 $E_{ns} > 0.75$, $R^2 > 0.7$ 时,表明模型模拟结果非常好^[30]。

2.2 土地利用结构优化模型

作为安徽省重要生态功能区,率水流域内的区县工业产值比重很小,主要以农林经济为支柱产业。

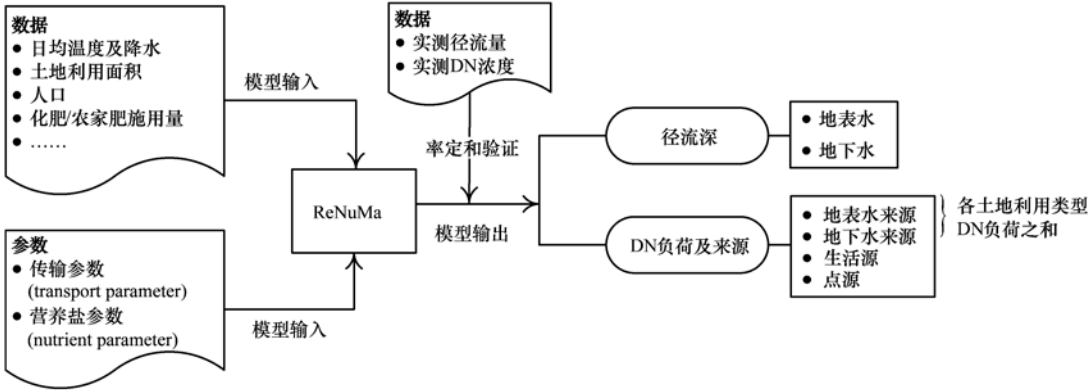


图2 ReNuMa 模型输入输出示意

Fig. 2 Input and output flow chart of ReNuMa

表1 ReNuMa 模型输入数据来源及处理

Table 1 Source and processing methods of ReNuMa model input data

数据名称	来源	处理
降水量	黄山市水文局提供的流域内 13 个降水站点 2000 ~ 2010 年逐日降水量	利用 ESRI® ArcGis 9.3 进行泰森多边形插值获得流域平均降水量
气温	中国气象科学数据共享服务网 (http://cdc.cma.gov.cn) 提供的景德镇、衢州和杭州 3 个地面国际交换站 2000 ~ 2010 年日均气温	3 个站点日均气温平均值为流域日均气温
土地利用	黄山市环保局提供的 2010 年《黄山市统计年鉴》	将统计年鉴提供的流域内各区县不同土地利用面积加和,得到流域内 9 种土地利用类型,包括水田、谷物、经济作物、茶园、果园、林地和草地,根据《黄山市统计年鉴》2000 ~ 2010 年期间流域内各土地利用类型面积改变不大,本研究不考虑此期间土地利用面积的改变导致的 DN 负荷改变
人口	地球系统科学数据平台 (http://www.geodata.cn) 2003 年 1km 格网全国人口空间化数据	利用 ESRI® ArcGis 9.3 以河道周边 500m 为界划分缓冲区,分别计算缓冲区内外的人口数 ^[25] ,用于计算生活源 DN 负荷. 在 ReNuMa 中,假定缓冲区内外居民生活排放的 N 负荷分别由短循环系统 (short circuit system) 和普通系统 (normal septic system) 处理,具体算法参见文献[21, 22]
施肥量	黄山市环保局提供的污染源普查数据和 2010 年《黄山市统计年鉴》	—

根据《GB/T 21010-2007 土地利用现状分类》和流域特点,本研究考虑农林用地〔水田、非水稻谷物(谷物)、经济作物、茶园、果园、林地和草地〕的土地利用结构规划,建筑用地和其他类型土地不予考虑.

以农林经济产值最大化为目标,以耕地面积、粮食产量、农业用水量、水土流失量、DN 负荷和农业可利用土地资源总量为约束条件,以不同土地利用类型的面积作为决策变量,建立土地利用结构优化模型,规划目标的求解过程在 LINDO 6.1 (Lindo System Inc, USA) 软件中进行. 各约束条件中的系数列于表 2.

目标函数: $\text{Max}A = \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (n = 7)$

式中, a_i 为各土地利用类型的产值系数 [万元·(hm²·a)⁻¹], 由《2011 年安徽省统计年鉴》和《安徽省林业发展第十二个五年规划》得出, x_i 为

各土地利用类型的面积(hm²), $x_1 \sim x_7$ 分别指水田、谷物、经济作物、果园、茶园、林地和草地.

约束条件如下.

(1)耕地面积是水田、谷物和经济作物面积之和,根据《黄山市土地利用总体规划(2006-2020 年)》得出耕地面积(hm²)约束:

$$\sum_{i=1}^3 x_i \leq 17\,756.01$$

(2)根据《黄山市“十二五”农业和农村经济发展规划》,得出粮食产量(万 t)约束:

$$b_1 x_1 + b_2 x_2 \geq 5\,090$$

式中, b_1 和 b_2 分别是水田和谷物的粮食产量系数 [万元·(hm²·a)⁻¹], 根据《2011 年安徽省统计年鉴》得出(表 2).

(3)根据《黄山市“十二五”农业和农村经济发展规划》、《黄山市土地利用总体规划(2006-2020

年)》、《黄山市农业产业化“635”转型增效行动规划纲要》以及当前实际面积,分别得出水田、林地、草地、以蔬菜为代表的经济作物、果园和茶园的面积约束空间,并且 $x_i \geq 0$.

(4) 根据(3)中的面积约束上限与相应的灌溉用水定额,得出农业用水量(亿 m^3)约束:

$$c_1x_1 + c_3x_3 + c_4x_4 \leq 0.2045$$

式中, c_1 、 c_2 和 c_3 是根据《DB34/T 679-2007 安徽省行业用水定额》确定的水田、经济作物和果园的灌溉用水定额($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$),见表2.

(5) 根据当前土地利用结构下的水土流失量,得出水土流失量(k t)约束:

$$\sum_{i=1}^n d_i x_i \leq 3191.57$$

式中, d_i 是各土地利用类型的土壤侵蚀模数 [$\text{t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$],其值取自文献[31~33](表2).

(6) 根据(3)中的面积约束上限与相应的 DN 负荷强度,得出 DN 负荷(t)约束:

$$\sum_{i=1}^n e_i x_i \leq 850.60 \quad (i \neq 2)$$

式中, e_i 是各土地利用类型的 DN 负荷强度 [$\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$],取自 ReNuMa 模型运算结果.

(7) 根据《黄山市土地利用总体规划(2006-2020年)》与当前实际面积,得出农林可利用土地资源总量(hm^2)约束:

$$146982.82 \leq \sum_{i=1}^n x_i \leq 148298.59$$

表2 土地利用结构优化模型约束条件中的系数

Table 2 Coefficients in constraints of land use structure optimization

土地利用类型	产值系数 /万元·(hm ² ·a) ⁻¹	粮食产量系数 /万 t·(hm ² ·a) ⁻¹	灌溉用水定额 /m ³ ·hm ⁻²	土壤侵蚀模数 /t·(hm ² ·a) ⁻¹
水田	1.42	0.62	2100	13.72
谷物	0.94	0.39	450	39.87
经济作物	2.60	—	750	45.73
果园	13.31	—	900	10.88
茶园	2.00	—	—	15.76
林地	0.36	—	—	19.96
草地	—	—	—	26.94

3 结果与分析

3.1 ReNuMa 模型的应用

在率水流域,敏感性参数包括退水系数、渗透

系数、不同土地利用类型的径流 CN 值(表3),说明土壤的含水状况与不同土地利用类型的特征对径流深和 DN 负荷影响较大.

对于传输参数,采用2000~2006年的逐月径流

表3 ReNuMa 模型敏感性参数取值

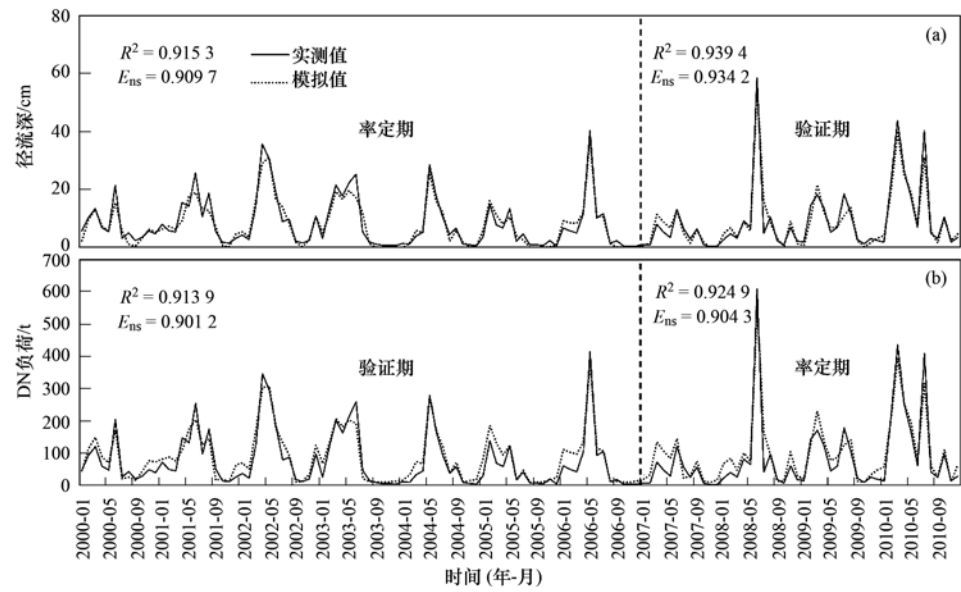
Table 3 Calibrated parameters with higher sensitivity for model simulation

参数名称	参数敏感值 S		参数取值
	高(+10%)	低(-10%)	
退水系数	0.1027	0.1226	0.0618
渗透系数	-0.1092	-0.1116	0.0077
不同土地利用 类型 CN 值	水田	1.7605	90
	谷物	0.3439	75
	经济作物	1.1434	80
	果园	0.0238	75
	茶园	0.1860	50
	林地	0.0175	52
	草地	0.0014	60
	水体	0.0245	100
	建筑用地	0.0467	95

监测数据进行率定,2007~2010年的逐月径流监测数据进行验证.对于营养盐参数,以 DN 负荷监测数据相对完备的2007~2010年为率定期,2000~2006年为验证期.从图3中可以看出,无论是率定

期还是验证期,径流深和 DN 负荷的 E_{ns} 和 R^2 都大于0.9,表明模拟的效果非常好,模型运算的结果能够反映流域真实情况.

3.2 DN 负荷来源



(a) 率定期和验证期的径流深; (b) 率定期和验证期的 DN 负荷

图 3 径流深和 DN 负荷的实测值和模拟值

Fig. 3 Observed and simulated streamflow and DN load

在 ReNuMa 模型中,陆域产生的 DN 负荷被设定为通过 4 种途径进入受纳水体:①地表水来源(runoff flux),指含氮污染物通过降水冲刷地表土壤,随地表径流进入河流;②地下水来源(groundwater flux),指含氮污染物下渗进入土壤后经由土壤浅层饱和区进入河流;③生活源(septic system flux),指居民的排泄物经过化粪池系统处理后向河流排放;④点源(point source flux),指由于工业活动形成的含氮污染物向河流排放(图 2)。

模型计算结果表明,率水流域 2000~2010 年均 DN 负荷为 $1.1 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,年际变化较大,最大年份是最小年份的 2.57 倍(图 4)。根据 2000~2010 年均 DN 负荷计算结果,径流来源是流域中最主要的 DN 负荷来源,其中地下水来源的贡献(60.6%)明显高于地表水(20.1%);生活源贡献仅占 19.3%;由于研究流域中没有工业活动,因而点源贡献为 0 [图 5(a)]。这说明,从陆域向水体迁移过程中与土地利用密切相关的这类 DN 负荷是率水流域最主要的非点源污染来源。因此在量化制定流域管理措施时,有必要细分各种土地利用类型对流域 DN 负荷的具体贡献,识别对 DN 负荷贡献最大的土地利用类型。

ReNuMa 模型结果中,仅直接给出了不同土地利用类型对地表水来源的 DN 负荷的贡献值,但由于模型认为地下水 DN 浓度是由不同土地利用类型的地表水 DN 浓度根据下渗(infiltration)权重加权

平均得到的,因此本研究根据各土地利用类型的下渗权重计算出相应地下水来源的 DN 负荷,并将地表水与地下水来源的 DN 负荷之和定义为各土地利用类型对受纳水体贡献的 DN 负荷。由各土地利用类型 2000~2010 的年均 DN 负荷可见,林地的 DN 负荷贡献最大(35.2%),其后为经济作物(21.6%)、水田(19.4%) [图 5(b)]。

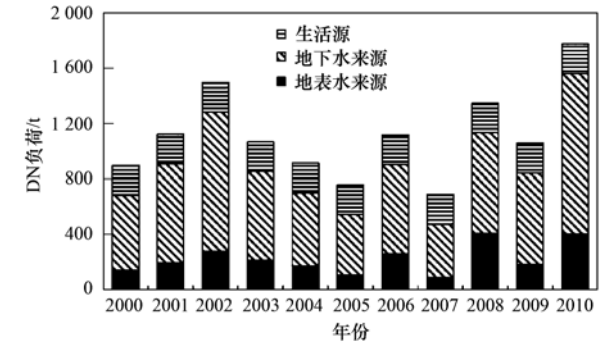
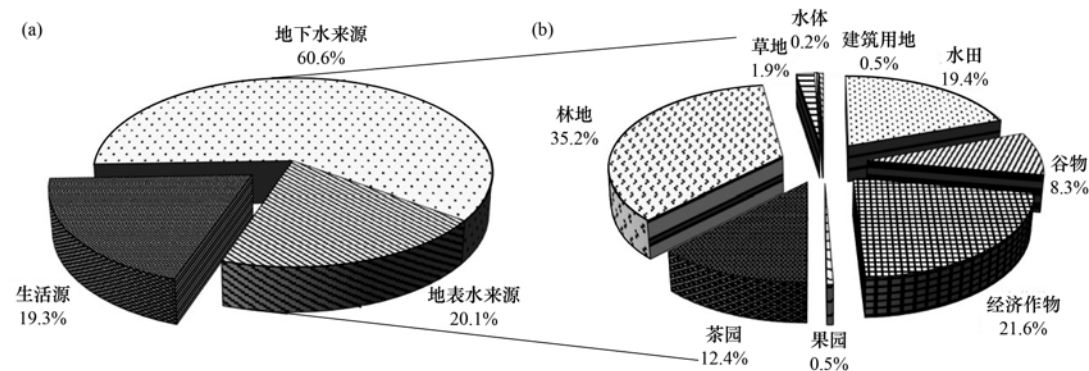


图 4 2000~2010 年 ReNuMa 估算的不同来源 DN 负荷量

Fig. 4 Estimated DN load of all sources by ReNuMa model during 2000-2010

3.3 DN 负荷强度

负荷强度是指单位面积上的污染负荷量,可以消除面积大小对负荷量分析的影响,是污染分析的重要指标之一^[15, 34]。率水流域 DN 负荷强度为 $(0.75 \pm 0.22) \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$,与 Wang 等^[35]在本流域所处地区的研究结果 $(0.16 \sim 3.37 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2})$ 较为一致。从不同土地利用类型的 DN 负荷强度来看(表 4),



(a) 年均 DN 负荷不同传输形式贡献率; (b) 年均 DN 负荷不同土地利用贡献率

图 5 率水流域年均 DN 负荷不同传输形式和不同土地利用贡献率

Fig. 5 Contributions of annual average DN load sources in transport way and land uses

水田的负荷强度最大[$28.60\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$],其后依次为经济作物[$23.50\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]、果园[$22.99\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]和谷物[$21.80\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$],而草地[$2.80\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]和林地[$2.71\text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]的负荷强度最小,分别仅

为水田的 9.8% 和 9.5%.

3.4 土地利用结构

根据建立的土地利用结构优化模型,以 2015 年为规划年对流域内的农林用地土地利用结构进行优化(表 5).从土地结构变化来看,规划年的耕地面

表 4 各土地利用类型的年均 DN 负荷和 DN 负荷强度

Table 4 Annual average DN load and load intensity of all land uses in ReNuMa model

项目	土地面积		DN 负荷		DN 负荷强度	
	面积/ hm^2	次序	DN 负荷/ $\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$	次序	DN 负荷强度/ $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$	次序
水田	6 097.27	5	174.36	3	28.60	1
谷物	3 420.89	6	74.60	5	21.80	4
经济作物	8 252.06	2	193.93	2	23.50	2
果园	197.68	8	4.55	7	22.99	3
茶园	6 186.73	3	110.92	4	17.93	5
林地	116 688.22	1	316.10	1	2.71	9
草地	6 139.95	4	17.22	6	2.80	8
水体	157.63	9	1.60	9	10.14	6
建筑用地	973.14	7	4.00	8	4.11	7

表 5 土地利用结构优化前后状况对比

Table 5 Land use situation before and after structure optimization

项目		当前实际状况(2010 年)				优化规划状况(2015 年)			
		面积/hm ²	面积比例 /%	DN 负荷比例 /%	经济收益 比例/%	面积 /hm ²	面积比例 /%	DN 负荷比例 /%	经济收益比例 /%
土地利用类型	水田	6 097.27	4.1	19.6	9.6	6 468.20	4.4	20.3	9.9
	谷物	3 420.89	2.3	8.4	3.6	2 768.50	1.9	6.6	2.8
	经济作物	8 252.06	5.6	21.8	23.7	8 252.06	5.6	21.3	23.0
	果园	197.68	0.1	0.5	2.9	224.63	0.2	0.6	3.2
	茶园	6 186.73	4.2	12.4	13.7	7 501.42	5.1	14.7	16.1
	林地	116 688.22	79.4	35.4	46.5	116 688.22	78.8	34.6	45.1
	草地	6 139.95	4.2	1.9	—	6 136.57	4.1	1.9	—
约束条件限制量	耕地面积/hm ²	17 770.22				17 488.76			
	粮食产量/万 t	5 114.45				5 090.00			
	农业用水量/亿 m ³	0.207 1				0.212 2			
	水土流失量/kt	3 191.57				3 148.96			
	DN 负荷量/t	890.42				910.95			
	农林土地总面积/hm ²	146 982.80				148 039.60			
	农业总产值/万元	90 341.46				93 243.02			

积比现状减少 1.6%, 其中, 水田面积增加 6.1% 而谷物面积减少 19.1%; 果园面积增加 13.6%, 茶园面积增加 21.3%; 林地和草地变化不明显。总体而言, 农林土地总面积增加 0.7%。

从污染和经济变化来看, 规划年的 DN 负荷比现状增加 2.3%, 经济产值增加 3.2%; 经济产值与 DN 负荷之比由 2010 年的 $101.46 \text{ 万元} \cdot \text{t}^{-1}$ 上升到 $102.38 \text{ 万元} \cdot \text{t}^{-1}$, 增加 0.9%。

4 讨论

4.1 不同土地利用类型 DN 负荷强度比较

ReNuMa 模拟过程中仅需要较少的参数, 模型率定和验证后模拟效果非常好 (图 3), 能够反映流域真实情况。由于 ReNuMa 模型含有连续降水径流传输模块, 其计算结果不仅给出了逐年的地下水和地表水径流深的模拟值, 还给出了与径流紧密相关的不同来源的 DN 负荷, 反映了降水径流影响下的负荷输出。因此应用 ReNuMa 模型计算流域非点源污染负荷既合理又简便。

本研究结果表明地下水来源的 DN 负荷大于地表水, 这可能是因为该流域的地下水径流深 ($52.40 \sim 141.03 \text{ cm}$) 大于地表水径流深 ($4.24 \sim 33.04 \text{ cm}$)。在孙晓庆等^[36]和黄秀梅等^[37]的研究中, 也报道了进入地下水中的氮量大于进入地表水中的现象。这可能是由于降水产流过程中地下水出水量大于地表水, 而且氮肥经过土壤微生物转化成不被土壤胶体吸附的硝酸盐, 很容易淋溶进入地下水, 造成地下水 DN 负荷较大^[38]。Lerner 等^[39]以及 Güler 等^[40]认为地下水硝酸盐污染严重与过多施用化肥、采用传统的灌溉、耕作方式以及缺乏土地利用的系统规划有关。

本研究中, 农业生产用地 (水田、谷物、经济作物、果园和茶园) 以 16.3% 的面积占比贡献了 62.2% 的 DN 负荷, 而林地以 78.8% 的面积占比仅贡献了 35.2% 的 DN 负荷, 说明农业生产用地在很大程度上影响流域 DN 负荷的总量, 是决定 DN 负荷的关键土地利用类型。

在本研究中, 农业生产用地的负荷强度大于林地和草地, 这一现象在国内各流域中普遍存在。对汉江中下游流域^[41]、太湖地区的西苕溪流域^[42]、广州流溪河水库流域^[43]和福建晋江流域^[10]的研究都报道了类似结果。这是因为林地和草地不施用化肥而且较少地受人为活动干扰, 而农业生产用地施肥水平高而且受到人为活动频繁干扰。结合土地利

用类型的面积 (表 4) 来看, 由于林地面积是所有土地利用类型中最大的, 所以在林地的负荷强度是最小的情况下, 林地贡献的 DN 负荷仍是最大的; 而果园的负荷强度为 $22.99 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 仅次于水田和经济作物, 但由于面积占比仅为 0.1%, 所以果园贡献的 DN 负荷较小, 是所有农业生产用地类型中最小的。这说明非点源污染负荷量不仅与不同土地利用类型的负荷强度有关, 还与各自的面积紧密相关。所以, 可以通过合理规划不同土地利用类型, 实现非点源污染的有效控制^[44]。

4.2 土地利用结构优化分析

在土地利用结构优化的结果中, 水田的面积增加而谷物面积减小, 这是因为谷物相比于水田而言, 产值与 DN 负荷强度之比和粮食产量系数都较小 (表 2 和表 4), 所以在粮食、环境和经济约束条件综合考量下减少谷物种植面积。果园和茶园的面积都有较大增加, 说明作为流域内主要发展的两大特色农业产业的果园和茶园由于其产值系数高、DN 负荷强度小的优势而能够在土地面积有较大增加 (表 2 和表 4)。农林土地总面积略有增加而各土地利用类型有不同程度的变化, 说明土地利用结构优化一方面较好地利用未利用土地进行农业开发, 另一方面对现有土地利用类型结构进行适当调整, 从而支持特色农业产业的发展。

根据土地利用结构优化结果, 发现规划年的 DN 负荷和经济产值都有所增加, 经济产值与 DN 负荷之比也有小幅上升。这说明在土地利用结构最优情况下, 经济产值的增长依然伴随着负荷的增加, 但经济产值的增幅大于 DN 负荷的增幅。因此削减 DN 负荷可以通过降低 DN 负荷强度的方式实现。特别是 DN 负荷强度高、产值系数低的水田应当给予重点关注。例如采用少耕免耕^[45, 46]和秸秆留茬覆盖^[47]等保护性耕作方式^[48]来减少地表径流和土壤流失, 以及测土施肥、平衡施肥等合理施用化肥技术来提高化肥利用率^[49]。

5 结论

(1) 农业生产用地对率水流域中 DN 负荷的贡献最大, 表明人类影响下的农业生产活动是流域非点源污染的最主要来源。不同土地利用类型的 DN 负荷贡献率排序为林地 > 经济作物 > 水田 > 茶园 > 谷物 > 草地 > 果园 > 建筑用地 > 水体; DN 负荷强度的排序为水田 > 经济作物 > 果园 > 谷物 > 茶园 > 水体 > 建筑用地 > 草地 > 林地。非点源污染负荷量

不仅与不同土地利用类型的负荷强度有关,还与各自的面积紧密相关。

(2)对率水流域 2015 年的土地利用结构优化结果表明,在土地利用结构最优情况下,经济产值的增长依然伴随着负荷的增加,但经济产值的增幅大于 DN 负荷的增幅。

参考文献:

- [1] US EPA. Liquid assets: a summertime perspective on the importance of clean water to the nation's economy, 800-R-96-002 [R]. Washington, DC: US EPA, 1996. 18.
- [2] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, **19**(5): 87-91.
- [3] 刘瑞民,何孟常,王秀娟. 大辽河流域上游非点源污染输出风险分析[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 663-667.
- [4] Novotny V. Integrating diffuse/nonpoint pollution control and water body restoration into watershed management[J]. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 1999, **35**(4): 717-727.
- [5] 胥彦玲,王苏舰,李怀恩. 土地覆被变化对流域非点源污染的影响研究——以黑河流域为例[J]. 水土保持研究, 2010, **17**(3): 250-253.
- [6] 郭怀成,张振兴,于湧. 流域土地可持续利用规划方法及应用研究[J]. 地理研究, 2003, **22**(6): 671-679.
- [7] 盛虎,向男,郭怀成,等. 流域水质管理优化决策模型研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(1): 1-8.
- [8] Liu Y, Yu Y J, Guo H C, *et al.* Optimal land-use management for surface source water protection under uncertainty: a case study of Songhuaba Watershed (Southwestern China) [J]. Water Resources Management, 2009, **23**(10): 2069-2083.
- [9] Ongley E D, Zhang X L, Yu T. Current status of agricultural and rural non-point source pollution assessment in China [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(5): 1159-1168.
- [10] Chen H, Teng Y, Wang J. Load estimation and source apportionment of nonpoint source nitrogen and phosphorus based on integrated application of SLURP model, ECM, and RUSLE: a case study in the Jinjiang River, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2013, **185**(2): 2009-2021.
- [11] 胡雪涛,陈吉宁,张天柱. 非点源污染模型研究[J]. 环境科学, 2002, **23**(3): 124-128.
- [12] 曾思育,杜鹏飞,陈吉宁. 流域污染负荷模型的比较研究[J]. 水科学进展, 2006, **17**(1): 108-112.
- [13] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach [J]. Journal of Hydrology, 1996, **183**(3-4): 323-349.
- [14] Mattikalli N M, Richards K S. Estimation of surface water quality changes in response to land use change: Application of the export coefficient model using remote sensing and geographical information system [J]. Journal of Environmental Management, 1996, **48**(3): 263-282.
- [15] 刘瑞民,杨志峰,丁晓雯,等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究[J]. 环境科学, 2006, **27**(12): 2407-2414.
- [16] Worrall F, Burt T P. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models [J]. Journal of Hydrology, 1999, **221**(1-2): 75-90.
- [17] 沈晔娜,吕军,陈军华,等. 水源区河流非点源污染物入河量计算的水质方程反演方法[J]. 环境科学, 2010, **31**(8): 1768-1774.
- [18] 于涛,孟伟,郑丙辉,等. 我国非点源负荷研究中的问题探讨[J]. 环境科学学报, 2008, **28**(3): 401-407.
- [19] Chen D J, Lu J, Huang H, *et al.* Stream nitrogen sources apportionment and pollution control scheme development in an agricultural watershed in eastern China [J]. Environmental Management, 2013, **52**(2): 450-466.
- [20] 李兆富,杨桂山,李恒鹏. 基于改进输出系数模型的流域营养盐输出估算[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 668-672.
- [21] Hong B, Swaney D. Regional Nutrient Management (ReNuMa) Model, Version 1.0. User's Manual [EB/OL]. <http://www.eeb.cornell.edu/biogen/nanc/usda/renuma.htm>, 2007-3-8.
- [22] Hong B, Swaney D. Regional Nutrient Management (ReNuMa) Model, Version 2.1.1. User's Manual [EB/OL]. <http://www.eeb.cornell.edu/biogen/nanc/usda/renuma.htm>, 2012-11-14.
- [23] 刘敏,谢阳村,王东,等. 基于 ReNuMa 模型的长春石头口门水库流域非点源污染负荷模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2012, **23**(6): 70-72.
- [24] 谢阳村. 基于 BMPs 的农业非点源污染主导流域总氮总量控制目标研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
- [25] Sha J, Liu M, Wang D, *et al.* Application of the ReNuMa model in the Sha He river watershed: Tools for watershed environmental management [J]. Journal of Environmental Management, 2013, **124**: 40-50.
- [26] Cohn T A, Caulder D L, Gilroy E J, *et al.* The validity of a simple statistical model for estimating fluvial constituent loads: An empirical study involving nutrient loads entering Chesapeake Bay [J]. Water Resources Research, 1992, **28**(9): 2353-2363.
- [27] Sheeder S A, Evans B M. Estimating nutrient and sediment threshold criteria for biological impairment in pennsylvania watersheds [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004, **40**(4): 881-888.
- [28] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles [J]. Journal of Hydrology, 1970, **10**(3): 282-290.
- [29] Moriasi D N, Arnold J G, Van Liew M W, *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2007, **50**(3): 885-900.
- [30] Zhai X Y, Zhang Y Y, Wang X L, *et al.* Non-point source pollution modelling using Soil and Water Assessment Tool and its parameter sensitivity analysis in Xin'anjiang catchment, China [J]. Hydrological Processes, 2014, **28**(4): 1627-1640.

- [31] 喻锋, 李晓兵, 陈云浩, 等. 皇甫川流域土地利用变化与土壤侵蚀评价[J]. 生态学报, 2006, **26**(6): 1947-1956.
- [32] 王小雷, 杨浩, 赵其国, 等. ^{137}Cs 法估算宁镇山脉地区黄棕壤侵蚀作用的初步研究[J]. 水土保持学报, 2009, **23**(2): 32-36.
- [33] 泮雪芹, 刘占仁, 孟晓云, 等. 云蒙湖流域不同土地利用类型的土壤侵蚀特征分析[J]. 水土保持研究, 2012, **19**(4): 6-9.
- [34] 丁晓雯, 沈珍瑶. 涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别[J]. 环境科学, 2012, **33**(11): 4025-4032.
- [35] Wang X L, Wang Q, Wu C Q, *et al.* A method coupled with remote sensing data to evaluate non-point source pollution in the Xin'anjiang catchment of China [J]. Science of the Total Environment, 2012, **430**: 132-143.
- [36] 孙晓庆, 卞建民, 查恩爽, 等. 伊通河流域农业非点源污染对水环境的影响模拟研究[J]. 水土保持通报, 2013, **33**(3): 139-143.
- [37] 黄秀梅, 申广荣, 周培. 基于模型的上海郊区地下水氮素非点源污染特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, **30**(7): 1378-1384.
- [38] 唐莲, 白丹, 蒋任飞, 等. 农业活动非点源污染与地下水的污染与防治[J]. 水土保持研究, 2003, **10**(4): 212-214.
- [39] Lerner D N, Harris B. The relationship between land use and groundwater resources and quality[J]. Land Use Policy, 2009, **26**(S1): S265-S273.
- [40] Güler C, Kurt M A, Korkut R N. Assessment of groundwater vulnerability to nonpoint source pollution in a Mediterranean coastal zone (Mersin, Turkey) under conflicting land use practices[J]. Ocean & Coastal Management, 2012, **71**: 141-152.
- [41] 史志华, 蔡崇法, 丁树文, 等. 基于 GIS 的汉江中下游农业面源氮磷负荷研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(4): 473-477.
- [42] 李兆富, 杨桂山, 李恒鹏. 西苕溪典型小流域土地利用对氮素输出的影响[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(6): 678-681.
- [43] 温海广, 周劲风, 李明, 等. 流溪河水库流域非点源溶解态氮磷污染负荷估算[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(4): 387-394.
- [44] 孟晓云, 于兴修, 泮雪芹. 云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1789-1794.
- [45] Tapia-Vargas M, Tiscareño-López M, Stone J J, *et al.* Tillage system effects on runoff and sediment yield in hillslope agriculture [J]. Field Crops Research, 2001, **69**(2): 173-182.
- [46] 刘世平, 张洪程, 戴其根, 等. 免耕套种与秸秆还田对农田生态环境及小麦生长的影响[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(2): 393-396.
- [47] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 巢湖流域不同耕作和施肥方式下农田养分径流流失特征[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(1): 6-11.
- [48] 王晓燕, 高焕文, 李洪文, 等. 保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, **16**(3): 66-69.
- [49] 王晓燕, 张雅帆, 欧洋, 等. 最佳管理措施对非点源污染控制效果的预测——以北京密云县太师屯镇为例[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(11): 2440-2450.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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