

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

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

京津冀与长三角区域大气 NO ₂ 污染特征	王英, 李令军, 刘阳 (3685)
2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析	杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)
沧州市大气污染特征观测研究	王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)
华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源	李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)
广州市交通主干道空气中苯系物的测量	叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)
基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究	黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)
柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性	胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)
九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征	余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)
南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价	舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)
天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究	李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)
北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究	李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)
云阳宗海库的分布与来源	张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)
南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究	孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)
三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)
江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究	单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)
人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果	汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)
潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响	魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)
人工湿地处理含盐生活污水的特性研究	高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)
催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚	刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)
ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究	孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)
微波改性 MWNTs/TiO ₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究	施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)
腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究	丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)
臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究	邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)
复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究	徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)
进水比例对水解反应器出水水质的影响研究	梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)
厌氧-好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)
我国城市污水处理回用调查研究	郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)
快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征	姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)
黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探	马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)
半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应	卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)
广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素	孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)
酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究	王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)
淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究	付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)
空气注射修复苯污染地下水模拟研究	樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)
不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性	张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)
上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应	陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)
耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究	吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)
高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究	陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)
四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究	钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)
长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响	尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)
三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究	何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)
多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究	肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)
硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响	刘敬勇, 孙永裕 (3990)
关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究	纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)
第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文	
稻田气溶胶 NH ₃ 和气体 NO _x 排放在线测定研究	龚巍巍, 栾胜基 (4006)
一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制	文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)
基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究	孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)
涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别	丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)
人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析	曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)
基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌	林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)
消毒副产物生成的温度影响和动力学模型	张小璐, 杨宏伟, 王小仵, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)
梧桐树叶作为反硝化碳源的研究	熊剑锋, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)
降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究	崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)
《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)	

涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别

丁晓雯^{1,2}, 沈珍瑶²

(1. 华北电力大学资源与环境研究院, 区域能源环境系统优化教育部重点实验室, 北京 102206; 2. 北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 采用输出系数模型, 借助地理信息系统技术, 对涪江流域的农业非点源污染进行了模拟, 分析了流域非点源污染的空间分布特征, 并对主要污染源进行了辨识, 以期为流域非点源污染控制与管理提供决策支持。研究表明, 2010年研究区农业非点源总氮污染负荷为 9.11×10^4 t, 全区平均负荷强度为 $3.10 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$; 农业非点源总氮负荷总量最主要分布在旱地、绵阳市和缓坡区, 农业非点源总氮负荷强度的高负荷区为旱地、德阳市和缓坡区; 农业用地的化肥流失是污染的首要污染源, 贡献率为 62.12%, 其中旱地的化肥流失是最主要来源, 贡献率为 50.49%。可见, 改进粗放的农业耕作方式、积极推进“退耕还林”、合理处理养殖废水、集中收集农村生活污水等是研究区非点源污染有效的控制措施。

关键词: 涪江流域; 农业非点源; 总氮; 输出系数模型; 空间分布; 污染源识别

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)11-4025-08

Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujiang Watershed

DING Xiao-wen¹, SHEN Zhen-yao²

(1. Key Laboratory of Regional Energy and Environmental Systems Optimization, Ministry of Education, Resources and Environmental Research Academy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to provide regulatory support for management and control of non-point source (NPS) pollution in Fujiang watershed, agricultural NPS pollution is simulated, spatial distribution characteristics of NPS pollution are analyzed, and the primary pollution sources are also identified, by export coefficient model (ECM) and geographic information system (GIS). Agricultural NPS total nitrogen (TN) loading of research area was 9.11×10^4 t in 2010, and the average loading intensity was $3.10 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$. Agricultural NPS TN loading mainly distributed over dry lands, Mianyang city and gentle slope areas; high loading intensity areas were dry lands, Deyang city and gentle slope areas. Agricultural land use, of which contribution rate was 62.12%, was the most important pollution source; fertilizer loss in dry lands, of which contribution rate was 50.49%, was the prominent. Improving methods of agricultural cultivation, implementing “farm land returning to woodland” policy, and enhancing treatment efficiency of domestic sewage and livestock wastewater are effective measures.

Key words: Fujiang watershed; agricultural non-point source; total nitrogen (TN); export coefficient model (ECM); spatial distribution; pollution source identification

随着工业点源污染的控制, 非点源 (non-point source, NPS) 成为水环境污染的主要来源, 其中又以农业非点源贡献最大^[1,2]。农业非点源污染是指农业生产活动引起的各种污染物以低浓度、大范围的形式缓慢地在土壤圈内运动并向水圈扩散的过程^[3,4]。氮(N)、磷(P)是农业 NPS 污染中最主要的污染物, 也是我国水污染监测的重要指标, 其超标可引起藻类及其他浮游生物迅速繁殖, 导致水富营养化^[5,6]。

目前广泛应用于区域范围 N、P 非点源污染模拟的模型主要有 ANSWERS、SWRRB、SWAT、HSPF、AGNPS、BASINS 和 ECM 等^[7~11]。美国曾利用 SWAT 对全美的非点源污染负荷进行了估算, 但研究的局限性在于其对时间和数据的要求非常

高^[11]。日本和我国学者合作运用 HSPF 模型对整个长江上游进行较好的水文模拟, 但该过程对输入参数的要求很高^[12]。美国农业部农业研究所开发的 AGNPS 和美国环境保护署开发的 BASINS 等也都具有较为严格的数据输入条件^[13]。可见, 一些模型对参数的要求较高, 且率定过程复杂。英国学者 Johnes^[14]提出的输出系数模型 (export coefficient model, ECM), 对非点源污染发生过程进行了黑箱式模拟, 所需参数少, 并能保证一定的精度, 符合我国基础资料缺乏的现状, 可满足资料相对缺乏区域非

收稿日期: 2012-02-16; 修订日期: 2012-03-26

基金项目: 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室开放基金项目; 长江学者和创新团队发展计划项目 (IRT1127)

作者简介: 丁晓雯 (1981~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为非点源污染模拟与控制, E-mail: binger2000dxw@163.com

点源污染模拟的要求.

涪江是嘉陵江右岸的最大支流,流域具有降雨丰沛、以丘陵山区为主要地貌、水土流失较为严重等 NPS 污染发生的自然条件,加上农业人口密集、农事活动发达、生产模式粗放等造成了较为严重的农业 NPS 污染^[15,16]. Shen 等^[16] 利用 APPI 和 PLOAD 模型对涪江流域的重污染区进行了识别,杨立中等^[15]、李云祯等^[17] 利用水质统计资料、一维水环境容量计算模型对涪江流域的非点源污染负荷进行了估算. 本研究采用 ECM 模型,通过水文水质资料对模型参数进行率定,对涪江流域的 NPS 污染负荷进行了模拟,分析了流域 NPS 污染的空间分布特征,对主要污染源进行了辨识,以期为流域的非点源污染控制与管理提供决策支持.

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

涪江是嘉陵江右岸最大支流,发源于四川省松潘县黄龙乡岷水雪宝顶,集水面积约 35 640 km²,河

长约 670 km. 涪江干流由西北向东南斜穿四川盆地,于合川市城南汇入嘉陵江. 涪江流域属亚热带湿润气候,气温南高北低. 江油市(县级市,隶属绵阳市)武都镇(龙口)以上河段为涪江上游,河流深切于四川盆地盆周山地崇山峻岭之中,滩多水急,河床平均比降为 15.1%;武都镇以下为涪江中、下游,河流流经四川盆地盆中丘陵地区,河床比降大大减小,武都镇至遂宁市区之间为 1‰,遂宁市区以下为 0.6‰. 涪江支流较为发育,流域面积在 1 000 km² 的一级支流,左岸有夺补河与梓江,右岸支流众多,有平通河、通口河、安昌河、凯江、妻江、琼江(安居河)、小安溪等. 涪江流域形状狭长,多年平均年降水量一般在 800 ~ 1 400 mm,以位于龙门山西南段东南麓的安县、北川县及干流平武县、江油市一带为多雨区^[18]. 出口控制站为小河坝水文站(东经 106°03′、北纬 30°06′),小河坝以上集水面积为 29 420 km². 本研究选取小河坝以上控制流域作为研究区,占整个涪江流域面积的 82.5%,如图 1 所示.

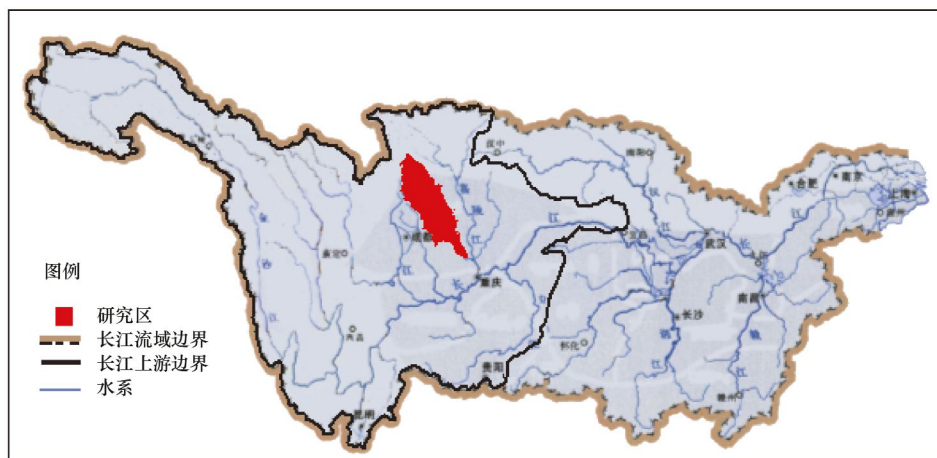


图 1 研究区在长江流域地理位置示意

Fig. 1 Location map of research area

1.2 NPS 污染特征

研究区地势变化明显,地表物质易蚀,降雨丰富,具有坡面侵蚀产生的强大动力条件,是我国水土流失最为强烈的地区之一^[19]. 区内农业人口众多、农事活动发达. 耕地占全区土地面积的 56.00%,而耕地中的坡耕地高达 40.83%,畜禽养殖也具有一定的规模. 农业、畜牧业的粗放型发展和农村生活污水的随意排放等人为因素,更加剧了流域的水土流失及 NPS 污染^[20]. 相关水质监测结果表明,涪江流域部分水域的水质时有超标,主要污染物为氮、磷, NPS 污染已经成为影响流域水质的环境问题.

2 研究方法

2.1 模型结构

1996 年英国学者 Johnes 等^[14] 提出的 ECM 模型在考虑土地利用分类的基础上,结合居民非点源污染物的排放和处理状况、牲畜的数量和分布来确定不同污染源的输出系数^[21,22]. 模型在氮素方面考虑了植物固氮、氮的空气沉降等因素,能较为准确地对大尺度流域的非点源污染进行评价和预测^[23,24]. 该方法虽不能预测单场降雨产生的非点源污染,却为区域范围的流域长期 NPS 污染研究提供

了有效途径,模型自提出后在全球得到了广泛应用^[25~29]。模型的一般表达式为^[14]:

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij}A_i + p \quad (1)$$

式中, j 为污染物类型; i 为流域中的污染源类型,共 m 种; L_j 为污染物 j 在流域的总负荷量; E_{ij} 为第 i 种污染源排放污染物 j 的输出系数; A_i 为第 i 种污染源的数量; p 为由降雨输入的营养物数量。

本研究针对涪江流域的农业非点源污染进行模拟和分析,考虑到研究需要和资料情况,非点源污染物选择总氮(total nitrogen, TN),污染源主要包括农村生活、畜禽养殖和农业用地3大类。其中畜禽养

殖又分为大牲畜、猪、羊和家禽这4类,农业用地分为旱地、水田和果林3类。

2.2 输出系数值的确定

输出系数模型的关键是确定合理的输出系数,常用方法有现场监测法和查阅文献法^[25]。两者各有利弊,前者精度高,但耗时长、且费用高;后者简便快捷、费用低,但误差较大。在本研究中,对于不同土地利用类型的输出系数,由于其受化肥施用、地形、降雨等因素密切相关,地域性明显,采用基于水文水质资料的输出系数确定方法^[25,26],其它污染源的输出系数主要采用查阅文献法,如表1所示。

表1 研究区非点源 TN 输出系数的分类与取值

Table 1 Export coefficients of NPS TN in research area

类型	畜禽	1990 年	2000 年	2003 年	文献
农村生活/kg·(人·a) ⁻¹		1.87	1.87	1.87	[14,22,28,29]
畜禽养殖/kg·(头或只·a) ⁻¹	大牲畜	7.32	7.32	7.32	[14,22,28,29]
	猪	1.39	1.39	1.39	
	羊	1.40	1.40	1.40	
	家禽	0.06	0.06	0.06	
土地利用/t·(km ² ·a) ⁻¹	旱地	3.44 ¹⁾	4.23 ¹⁾	3.67 ¹⁾	[26]
	水田	2.89 ¹⁾	3.50 ¹⁾	3.03 ¹⁾	
	果林	1.66 ¹⁾	2.02 ¹⁾	1.75 ¹⁾	

1) 该值为研究区的平均值,实际地理信息系统(geographic information system, GIS)网格计算时与化肥施用量相关,存在空间差异性

2.3 模型验证

根据可获取的水文水质资料,利用模型及确定的输出系数,对流域在1990、2000和2003年3个年份的非点源 TN(含农业非点源 TN 和其它非点源 TN)进行模拟值与监测值对比,从而对模型的模拟精度进行验证,如表2所示。验证结果表明,模拟值与监测值的相对误差在可接受范围内,3个年份分别为5.68%、-9.57%和4.02%。模拟值与监测值

存在误差是非点源污染随机性、复杂性的体现,从3个年份的误差值来看,研究所确定的模型、参数较为合理、可靠。

3 数据获取及处理

根据 ECM 模型和确定的输出系数,对涪江流域2010年的农业 NPS 污染负荷及空间分布进行模拟。研究用到的数据主要包括1:10万土地利用图、1:25万数字高程(digital elevation model, DEM)图、1:100万行政区划图和相关市/州的社会经济资料,如表3所示。通过卫星遥感图片解译获得研究区土地利用图;利用 ArcGIS 软件,通过 DEM 图生成研究区轮廓图、坡度图、河流图以及水系图;将全国行政区划图数字化,结合研究区轮廓图,生成研究区的市、州域图。

表2 非点源 TN 负荷模拟结果验证

Table 2 Result verification of NPS TN loadings in research area

年份	模拟值 ×10 ⁴ /t	监测值 ×10 ⁴ /t	相对误差 /%
1990	9.3	8.8	5.68
2000	17.95	19.85	-9.57
2003	16.8	16.15	4.02

表3 基础数据来源及说明

Table 3 Source and description of basic data

数据类型	空间尺度	分辨率	描述	来源
土地利用	1:100 000	30 m×30 m	研究区土地利用状况	数字化、遥感图像解译、中科院地理所
地形	1:250 000	90 m×90 m	用于生成流域边界、获取高程、坡度等信息	国家基础地理信息中心
行政区划	1:1 000 000	200 m×200 m	研究区内各市、州的空间分布和边界	国家基础地理信息中心
社会经济	研究区涉及的所有地级市、州	各市、州	人口数量、畜禽养殖和化肥施用等情况	省、市统计局

根据表 1 中确定的输出系数,由于农村生活、畜禽养殖主要与人、畜禽的新陈代谢有关,随时空变化很小,因此,采用表 1 中的相关输出系数值对研究区 2010 年的农业非点源 TN 污染进行模拟. 而农业用地的输出系数与化肥施用量密切相关^[30],在结合各市、州化肥施用情况的基础上,确定的输出系数值如表 4 所示.

表 4 研究区农业用地非点源 TN 输出系数列表(2010 年)/ $t \cdot km^{-2}$

市、州	旱地	水田	果林
绵阳	3.38	1.07	0.75
遂宁	3.63	2.84	2.46
德阳	6.45	4.19	8.45
阿坝	0.66	— ¹⁾	0.15
重庆	3.73	1.37	0.85
内江	2.18	2.02	0.22

1) 研究区涉及阿坝州的农业用地中,土地利用类型无水田

在 GIS 技术支持下,根据表 3 中涉及的数据和表 1、表 4 中所列的输出系数,运用 ECM 模型,对研究区农业非点源 TN 污染负荷进行定量计算和空间分布模拟;并结合研究区土地利用图、市/州域图和 DEM 图等,对研究区的农业非点源 TN 污染负荷及强度的空间分布特征开展分析;并在此基础上,进行污染源识别.

4 结果与分析

4.1 农业非点源 TN 污染负荷

2010 年,研究区农业非点源 TN 污染负荷为 $9.11 \times 10^4 t$,按研究区面积 $29\,420 km^2$ 计,区内平均负荷强度为 $3.10 t \cdot km^{-2}$.

4.2 农业非点源 TN 空间分布

根据对流域农户的实地调研,农村生活、畜禽养殖产生的农业非点源 TN 可视为农家肥施入农业用地. 借助 ArcGIS 软件,研究区 2010 年农业非点源 TN 的模拟结果如图 2 所示.

4.2.1 负荷总量空间分布分析

从农业用地、行政区划、地形这 3 个空间角度,探讨研究区农业非点源 TN 负荷总量的空间分布特征.

研究区的土地利用如图 3 所示. 就各土地利用类型而言,农业非点源 TN 最主要分布在旱地,负荷量为 $7.02 \times 10^4 t$,占总负荷的 77.06%;其次分布于水田,负荷量为 $1.62 \times 10^4 t$,占总负荷的 17.78%;最后是果林,负荷量为 $0.47 \times 10^4 t$,占总负荷的

5.16%;如表 5 所示.

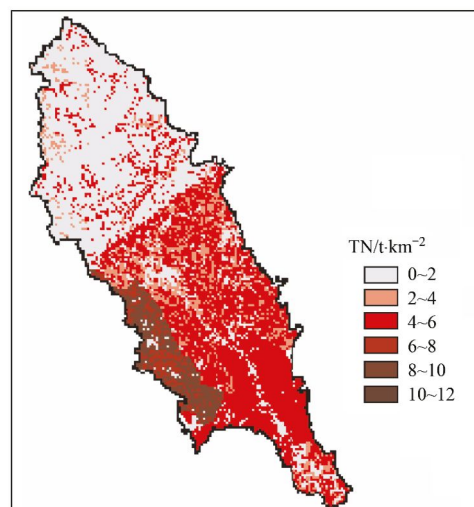


图 2 研究区农业非点源 TN 空间分布图(2010 年)

Fig. 2 Spatial distribution of agricultural NPS TN loading in research area (2010)

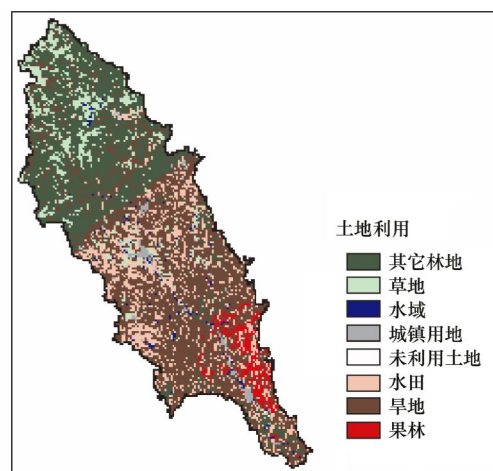


图 3 研究区土地利用

Fig. 3 Landuse map of research area

研究区主要涉及绵阳、遂宁、德阳、阿坝、重庆、内江几个市、州,区内的行政区划如图 4 所示. 就各市、州而言,农业非点源 TN 最主要分布在绵阳市,负荷量为 $4.71 \times 10^4 t$,占总负荷的 51.70%;最少分布于重庆市、内江市和阿坝州,负荷量分别为 $0.39 \times 10^4 t$ 、 $0.10 \times 10^4 t$ 和 $0.10 \times 10^4 t$,占总负荷的 4.28%、1.10% 和 1.10%;其它市介于其间;如表 5 所示.

研究区地形起伏,高程介于 242 ~ 5 556 m 之间,坡度介于 $0 \sim 66^\circ$ 之间,如图 5 所示. 若将研究区根据坡度分为缓坡区(坡度 $< 5^\circ$)、陡坡区(坡度为 $5 \sim 25^\circ$)和极陡坡区(坡度 $> 25^\circ$),则农业非点源 TN 最主要分布在缓坡区,负荷量为 $5.38 \times 10^4 t$,占

表 5 研究区农业非点源 TN 负荷及强度空间分布情况(2010 年)

Table 5 Spatial distribution of loadings and loading intensities of agricultural NPS TN in research area(2010a)

空间单元	面积/km ²	负荷总量		负荷强度	
		数值 × 10 ⁴ /t	占总量比例/%	数值/t·km ⁻²	与全区平均值的比值
农业用地 ¹⁾	旱地	12 375	77.06	5.67	1.83
	水田	4 101	17.78	3.95	1.27
	果林	1 061	5.16	4.43	1.43
行政区	绵阳市	19 399	51.70	2.43	0.78
	德阳市	2 622	21.62	7.51	2.42
	遂宁市	3 828	20.20	4.81	1.55
	重庆市	1 088	4.28	3.58	1.15
	阿坝州	2 212	1.10	0.45	0.15
	内江市	271	1.10	3.69	1.19
地形	缓坡区(<5°)	12 061	59.05	4.46	1.44
	陡坡区(5~25°)	10 656	34.80	2.97	0.96
	极陡坡区(>25°)	6 703	6.15	0.84	0.27

1) 对于每一个行政区,由农村生活和畜禽养殖产生的 TN 视为全部以农家肥的形式均匀地施入农业用地,故表中的农业用地负荷来源为化肥施用、农村生活和畜禽养殖这 3 种

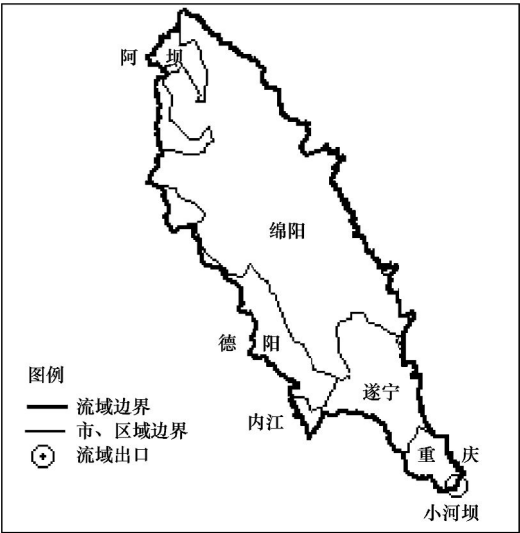


图 4 研究区行政区划示意

Fig. 4 Administrative division map of research area

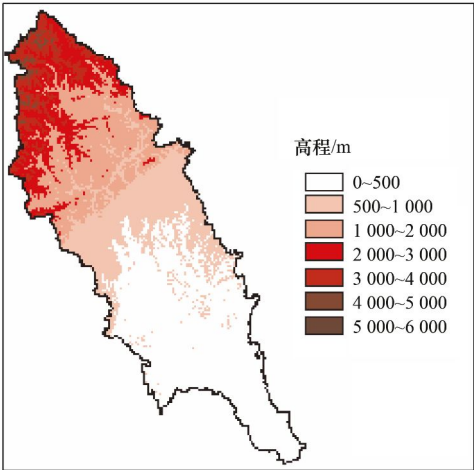


图 5 研究区数字高程示意

Fig. 5 DEM map of research area

总负荷的 59.05%; 其次分布在陡坡区, 负荷量为 3.17×10^4 t, 占总负荷的 34.80%; 最少分布在极陡坡区, 负荷量为 0.56×10^4 t, 占总负荷的 6.15%; 如表 5 所示。

结合土地利用图和地形图对研究区农业非点源 TN 负荷的分析结果表明, 极陡坡区的农业非点源 TN 主要分布于旱地、其次是水田, 最后才是果林; 农业非点源 TN 负荷在 25° 以上的坡耕地(旱地、水田)上仍有分布, 进一步实施退耕还林, 将 25° 以上的坡耕地有计划地转为林地是削减研究区农业非点源污染的有效措施之一。

可见, 就农业非点源 TN 负荷总量而言, 对于各农业用地、各市/州、地形区, 农业非点源 TN 主要分布在旱地、绵阳市和缓坡区。这一方面有其面积较大的原因(如表 5), 另一方面与旱地、缓坡地是农事活动聚集区, 农业非点源 TN 输出强度大密切相关。

4.2.2 负荷强度空间分布分析

污染负荷强度是单位面积上的负荷量, 其能消除面积对负荷量的影响, 是污染分析的重要指标。由于负荷强度具有很强的空间异质性, 下文利用空间单元的平均 TN 负荷强度值, 从农业用地、行政区划、地形这 3 个角度, 探讨研究区农业非点源 TN 负荷强度的空间分布特征。

就土地利用类型而言, 在 3 种农业用地中, 最高负荷强度区为旱地, 负荷强度为 $5.67 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 是全区平均负荷强度的 1.83 倍; 低负荷强度区为水田, 负荷强度为 $3.95 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 是全区平均负荷强度的 1.27 倍; 果林介于两者之间, 负荷强度为 4.43

$\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$, 是全区平均负荷强度的 1.43 倍; 如表 5 和图 6 所示.

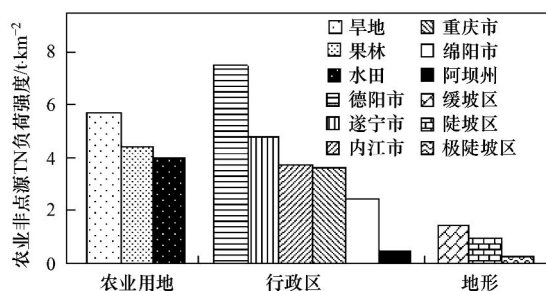


图 6 研究区农业非点源 TN 负荷强度统计图(2010 年)

Fig. 6 Statistical map of agricultural NPS TN loading intensities in research area (2010)

就各市、州而言,高负荷强度区是德阳市,负荷强度为 $7.51 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 是全区平均负荷强度的 2.42 倍; 绵阳市和阿坝州为低负荷强度区, 负荷强度为 $2.43 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 和 $0.45 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 是全区平均负荷强度值的 0.78 和 0.15; 其它市介于其间; 如表 5 和图 6 所示.

就地形而言,高负荷强度区为缓坡区, 负荷强度为 $4.46 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 是全区平均负荷强度的 1.44 倍; 低负荷强度区为极陡坡区, 负荷强度为 0.84

$\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$, 是全区平均负荷强度值的 0.27; 陡坡区介于两者之间, 负荷强度为 $2.97 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$, 是全区平均负荷强度值的 0.96; 如表 5 和图 6 所示.

可见,就农业非点源 TN 负荷强度而言,对于各农业用地、各市/州、地形区,农业非点源 TN 的高负荷强度区为旱地、德阳市和缓坡区. 这与其农事活动发达、耕作方式粗放、农村生活和养殖废水处理率低、农业非点源 TN 输出强度大密切相关.

4.3 污染源分析

2010 年,研究区产生的农业非点源 TN 负荷为 $9.11 \times 10^4 \text{ t}$, 其中由农业用地的化肥施用产生的负荷为 $5.66 \times 10^4 \text{ t}$, 贡献率为 62.12%, 为首要污染源; 由畜禽养殖产生的负荷为 $2.01 \times 10^4 \text{ t}$, 为第二污染源, 贡献率为 22.07%; 由农村生活产生的负荷为 $1.44 \times 10^4 \text{ t}$, 贡献率为 15.81%. 在各农业用地中,旱地的化肥流失是最主要污染源, 占总负荷的 50.49%; 其次为水田的化肥流失, 占总负荷的 8.89%; 最后是果林的化肥流失, 如表 6 和图 7 所示. 在畜禽养殖的各污染源中,猪的养殖废水、废物排放是最主要的污染源, 占总负荷的 8.78%, 其次是大牲畜、家禽和羊的养殖.

表 6 研究区农业非点源 TN 负荷污染源分析(2010 年)

Table 6 Agricultural non-point sources of TN in research area(2010)

污染源	数量	输出量 $\times 10^4/\text{t}$	占 TN 负荷比例/%
农村生活(农村人口)	770.05×10^4 人	1.44	15.81
畜禽养殖	大牲畜	85.31×10^4 头	0.63
	猪	578.40×10^4 头	0.80
	羊	134.79×10^4 头	0.19
	家禽	6539.86×10^4 只	0.39
	小计	—	2.01
农业用地	旱地	12375 km^2	4.60
	水田	4101 km^2	0.81
	果林	1061 km^2	0.25
	小计	—	5.66
合计	—	9.11	100

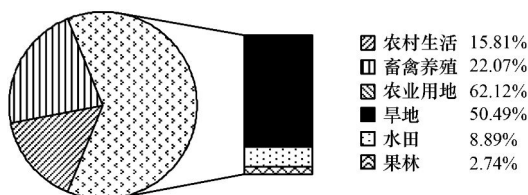


图 7 研究区农业非点源 TN 污染源构成(2010 年)

Fig. 7 Constitution of agricultural non-point sources of TN in research area(2010)

可见过量的化肥施用是研究区 TN 浓度增加的最主要原因. 旱地是最主要污染源, 一方面是由于其面积较大, 另一方面由于该区旱地多为小麦/玉米轮作, 土地利用率高, 陡坡垦殖严重, 化肥施用量大、

流失程度严重的缘故.

农业耕作的化肥施用(尤其是旱地的化肥施用)是研究区农业非点源 TN 的首要污染源, 畜禽养殖和农村生活的 N 素排放也是重要来源. 粗放的农事生产方式、陡坡耕作、养殖废水/废物的肆意排放、农村生活废水的低处理率等是造成研究区农业非点源 TN 污染的主要原因, 其中粗放的农业耕作方式, 尤其是旱地无节制地使用化肥是最主要原因.

5 结论

(1) 2010 年,研究区农业非点源 TN 污染负荷为 $9.11 \times 10^4 \text{ t}$, 全区平均负荷强度为 $3.10 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$.

(2) 就各农业用地类型而言, 农业非点源 TN 负荷最主要分布在旱地, 负荷量为 7.02×10^4 t, 最高负荷强度区也为旱地, 负荷强度为 $5.67 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$; 就各市、州而言, 农业非点源 TN 负荷最主要分布在绵阳市, 负荷量为 4.71×10^4 t, 负荷强度最高区为德阳市, 负荷强度为 $7.51 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$; 就各地形区而言, 农业非点源 TN 负荷最主要分布在缓坡区, 负荷量为 5.38×10^4 t, 最高负荷强度区也为缓坡区, 负荷强度为 $4.46 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 。

(3) 农业用地的化肥施用是研究区农业非点源 TN 的首要污染源, 贡献率为 62.12%, 其次是畜禽养殖和农村生活。在各农业用地中, 旱地的化肥流失是最主要污染源, 贡献率为 50.49%; 在各畜禽养殖中, 猪的养殖废水、养殖废物排放是最主要的污染源, 贡献率为 8.78%。

(4) 粗放的农事生产方式(尤其是旱地无节制地施用化肥)、养殖废水/废物的肆意排放、农村生活污水的低处理率是造成研究区农业非点源 TN 污染的主要原因。因此, 改进粗放的农业耕作方式、合理施用化肥、调整农业种植结构、积极推进“退耕还林”、合理处理养殖废水、集中收集农村生活污水、加强农村固体废弃物管理等是有效的非点源污染控制管理措施。

致谢: 国家卫星气象中心在遥感影像获取方面提供帮助, 中国科学院地理科学与资源研究所在土地利用图获取和解译方面提供帮助, 刘瑞民、洪倩、宫永伟等在基础数据采集和 GIS 模拟分析方面提供帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Csathó P, Sisák I, adimsky L, *et al.* Agriculture as a source of phosphorus causing eutrophication in Central and Eastern Europe [J]. *Soil Use and Management*, 2007, **23**(S1): 36-56.
- [2] 赵倩, 马建, 问青春, 等. 应用 AnnAGNPS 模型模拟柴河上游农业非点源污染[J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(2): 344-351.
- [3] Boers P C M. Nutrient emissions from agriculture in the Netherlands, causes and remedies [J]. *Water Science and Technology*, 1996, **33**(4-5): 183-190.
- [4] Jaepil C, Saied M. Dynamic agricultural non-point source assessment tool (DANSAT): model development [J]. *Biosystems Engineering*, 2009, **102**(4): 486-499.
- [5] Zhao T Q, Xu H S, He Y X, *et al.* Agricultural non-point nitrogen pollution control function of different vegetation types in riparian wetlands: a case study in the Yellow River wetland in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(7): 933-939.
- [6] 曹杰君, 高扬, 黄海波, 等. 长三角典型村域次降雨条件下氮素非点源输出特征[J]. *环境科学*, 2010, **31**(11): 2587-2593.
- [7] Cho J, Park S, Im S. Evaluation of agricultural nonpoint source (AGNPS) model for small watersheds in Korea applying irregular cell delineation[J]. *Agricultural Water Management*, 2008, **95**(4): 400-408.
- [8] Jabbar M T. Application of GIS to estimate soil erosion using RUSLE[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2003, **6**(1): 34-38.
- [9] Ribarova I, Ninov P, Cooper D. Modeling nutrient pollution during a first flood event using HSPF software: Iskar River case study, Bulgaria[J]. *Ecological Modelling*, 2008, **211**(1-2): 241-246.
- [10] Singh R, Tiwari K N, Mal B C. Hydrological studies for small watershed in India using the ANSWERS model[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **318**(1-4): 184-199.
- [11] Santhi C, Arnold J G, Willams J R, *et al.* Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001, **37**(5): 1169-1188.
- [12] 林诚二, 村上正吾, 渡边正孝, 等. 基于全球降水数据估计值的地表径流模拟——以长江上游地区为例[J]. *地理学报*, 2004, **59**(1): 125-135.
- [13] Whitte M R C. The BASINS model[J]. *Water Environment and Technology*, 1998, **10**(12): 57-61.
- [14] 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 modeling approach[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, **183**(3-4): 323-349.
- [15] 杨立中, 熊风, 罗洁. 涪江绵阳段河流水环境容量测算[J]. *西南交通大学学报*, 2007, **42**(2): 153-157.
- [16] Shen Z Y, Hong Q, Chu Z, *et al.* A framework for priority non-point source area identification and load estimation integrated with APPI and PLOAD model in Fujiang Watershed, China [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, **98**(6): 977-989.
- [17] 李云祯, 黄涛, 戴本林. 涪江支流湔江水环境容量及总量控制研究[J]. *测绘科学*, 2010, **35**(6): 158-160.
- [18] 虞孝感. 长江流域可持续发展研究[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 260-284.
- [19] 刘瑞民, 杨志峰, 沈珍瑶, 等. 土地利用/覆盖变化对长江流域非点源污染的影响及其信息系统建设[J]. *长江流域资源与环境*, 2006, **15**(3): 372-377.
- [20] 王渺林, 夏军, 朱辉. 涪江流域分布式日径流模型研究[J]. *水资源研究*, 2007, **28**(2): 1-3.
- [21] 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.
- [22] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛, 等. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. *水利学报*, 2004, (7): 40-45.

- [23] Ierodiaconou D, Laurenson L, Leblanc M, *et al.* The consequences of land use change on nutrient exports: a regional scale assessment in south-west Victoria, Australia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2005, **74**(4): 305-316.
- [24] 李怀恩, 庄咏涛. 预测非点源营养负荷的输出系数法研究进展与应用[J]. *西安理工大学学报*, 2003, **19**(4): 307-312.
- [25] 丁晓雯, 刘瑞民, 沈珍瑶. 基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2006, **42**(5): 534-538.
- [26] Ding X W, Shen Z Y, Hong Q, *et al.* Development and test of the export coefficient model in the upper reach of the Yangtze River[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, **383**(3-4): 233-244.
- [27] Nandish M M, Keith S R. 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.
- [28] Jennifer G W. Export coefficient modeling and bioassessment in two tributaries of the Grand River, southern Ontario, Canada [D]. Waterloo: University of Waterloo, 1998. 41-47.
- [29] 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.
- [30] Johnes P J, Heathwaite A L. Modelling the impact of land use change on water quality in agricultural catchments [J]. *Hydrological Processes*, 1997, **11**(3): 269-286.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphorus in Wastewater	····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil	····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbendazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujian Watershed	····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 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

国内外公开发刊