

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第11期

Vol.34 No.11

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京不同污染事件期间气溶胶光学特性 施禅臻,于兴娜,周斌,项磊,聂皓浩 (4139)

秋季渤海、北黄海大气气溶胶中水溶性离子组成特性与来源分析 张岩,张洪海,杨桂朋 (4146)

中国北部湾地区夏季大气碳气溶胶的空间分布特征 杨毅红,陶俊,高健,李雄,施展,韩保新,谢文彰,曹军骥 (4152)

改进的大气 CO₂、CH₄、N₂O、CO 在线观测 FTIR 系统 夏玲君,刘立新,周凌晔,方双喜,王红阳,张振波 (4159)

长沙市郊大气 CH₄ 浓度变化特征 刘鲁宁,王迎红,徐小娟,王卫东,王跃思 (4165)

麦草及其烟尘中正构烷烃的组成 刘刚,李久海,徐慧,吴丹 (4171)

过二硫酸盐降解碱液吸收的甲硫醇恶臭 杨世迎,王雷雷,冯琳玉,赵腊娟,石超 (4178)

污泥堆肥及其土地利用全过程的温室气体与氨气排放特征 钟佳,魏源送,赵振凤,应梅娟,周国胜,熊建军,刘培财,葛振,丁刚强 (4186)

长江口滨岸及近海水体中胶体的分布和理化性质研究 顾丽军,杨毅,刘敏,聂明华,李涛,侯立军 (4195)

海河流域主要河口区域沉积物中重金属空间分异及生态风险评价 吕书丛,张洪,单保庆,李立青 (4204)

汾河流域太原段河水及沉积物中 PFOS 和 PFOA 的浓度分布特征 东口朋宽,史江红,张晖,刘晓薇 (4211)

基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析 李凯,曾凡棠,房怀阳,林澍 (4218)

合流制排水系统雨天溢流污染 CMB 法源解析 戴梅红,李田,张伟 (4226)

微藻脂肪酸在中国近海缺氧海水-沉积物界面中的降解模拟研究 随伟伟,丁海兵,杨桂朋,陆小兰,李文娟,孙立群 (4231)

太湖两种水生植物群落对沉积物中氮素的影响 马久远,王国祥,李振国,许宽,周锋,张佳 (4240)

表面流人工湿地中硫丹的去除规律研究 秦晶,高甫威,谢慧君 (4251)

带菌盐藻对不同形态砷的富集和转化研究 王亚,张春华,王淑,申连玉,葛滢 (4257)

镧改性沸石活性覆盖控制重污染河道底泥溶解性磷酸盐和铵释放研究 李佳,林建伟,詹艳慧 (4266)

底栖动物扰动对河床渗透性的影响研究 任朝亮,宋进喜,杨小刚,薛健 (4275)

铜绿微囊藻胞内物消毒副产物生成:氯化化和溴化比较 田川,郭婷婷,刘锐平,William Jefferson,刘会娟,曲久辉 (4282)

天然有机物对混凝效果影响机制及絮体特性分析 徐磊,俞文正,梁亮,王彤 (4290)

DOM 纳滤膜污染及对膜截留卡马西平性能的影响 丰桂珍,董秉直 (4295)

零价铁去除废水中的汞 周欣,张进忠,邱昕凯,王定勇 (4304)

Fe₃O₄ 稳定化纳米 Pd/Fe 对水中 2,4-D 的催化还原脱氯研究 周红艺,梁思,雷思思,雷双健 (4311)

不同粒径粉末活性炭对水中天然有机物吸附性能的比较研究 李政剑,石宝友,王东升 (4319)

氯化十六烷基吡啶改性活性炭对水中硝酸盐的吸附作用 郑雯婧,林建伟,詹艳慧,方巧,杨孟娟,王虹 (4325)

改性石墨烯对水中亚甲基蓝的吸附性能研究 吴艳,罗汉金,王侯,张子龙,王灿,王雨微 (4333)

经典等温吸附模型在重金属离子/硅藻土体系中的应用及存在问题 朱健,吴庆定,王平,李科林,雷明婧,张伟丽 (4341)

硝酸盐对矿化垃圾中兼/厌氧甲烷氧化的影响 刘妍妍,龙焰,尹华,叶锦韶,何宝燕,张娜 (4349)

硫酸盐/氨的厌氧生物转化试验研究 张丽,黄勇,袁怡,李祥,刘福鑫 (4356)

硫酸盐还原-氨氧化反应的特性研究 袁怡,黄勇,李祥,张春蕾,张丽,潘杨,刘福鑫 (4362)

UASB 系统低 pH 运行时对产氢性能的分析 赵健慧,张百惠,李宁,王兵,李永峰 (4370)

响应面法优化赤泥负载 Co 催化剂制备及活性评价 李华楠,徐冰冰,齐飞,孙德智 (4376)

高浓度氨氮胁迫对纤细裸藻的毒性效应 刘炎,石小荣,崔益斌,李梅 (4386)

NAPLs 污染物垂向指流迁移分形表征中图像处理的影响研究 李慧颖,杜晓明,杨宾,伍斌,徐竹,史怡,房吉敦,李发生 (4392)

近 50 年浙江省耕作土壤有机质和酸碱度的变化特征 章明奎,常跃畅 (4399)

浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨 黄春雷,宋明义,魏迎春 (4405)

黄河口新生湿地土壤 Fe 和 Mn 元素的空间分布特征 孙文广,甘卓亭,孙志高,李丽丽,孙景宽,孙万龙,牟晓杰,王玲玲 (4411)

崇明岛土壤中 MCCPs 的污染水平、组成与来源研究 孙阳昭,王学彤,张媛,孙延枫,李梅,马中 (4420)

福建戴云山山脉土壤有机氯农药残留及空间分布特征 瞿程凯,祁士华,张莉,黄焕芳,张家泉,张原,杨丹,刘红霞,陈伟 (4427)

电子垃圾拆解地周边土壤中二噁英和二噁英类多氯联苯的浓度水平 邵科,尹文华,朱国华,巩宏平,周欣,王玲,刘劲松 (4434)

外源水溶性氟在茶园土壤中赋存形态的转化及其生物有效性 蔡荟梅,彭传燧,陈静,侯如燕,宛晓春 (4440)

丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用 赵仁鑫,郭伟,付瑞英,赵文静,郭江源,毕娜,张君 (4447)

丛枝菌根真菌在矿区生态环境修复中应用及其作用效果 李少朋,毕银丽,孔维平,王瑾,余海洋 (4455)

超积累植物垂序商陆 (*Phytolacca americana* L.) 吸收锰机制的初步探讨 徐向华,李仁英,刘翠英,施积炎,林佳 (4460)

Shewanella oneidensis MR-1 对硫化汞的生物利用性研究 陈艳,王卉,司友斌 (4466)

基于我国西南地区儿童行为模式的 IEUBK 模型本地化研究 蒋宝,崔晓勇 (4473)

不同结构有机磷在(氢)氧化铝表面的吸附与解吸特征 柳飞,张延一,严玉鹏,刘凡,谭文峰,刘名茗,冯雄汉 (4482)

煤中铁元素赋存状态的超声逐级化学提取研究 熊金钰,李寒旭,董众兵,张颂,钱宁波,武成利 (4490)

植物对纳米颗粒的吸收、转运及毒性效应 杨新萍,赵方杰 (4495)

《环境科学》征订启事 (4239) 《环境科学》征稿简则 (4369) 信息 (4225, 4265, 4303, 4375)

基于 L-THIA 模型的市桥河流域非点源氮磷负荷分析

李凯^{1,2}, 曾凡棠^{1*}, 房怀阳¹, 林澍¹

(1. 环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要:以番禺市桥河流域为研究对象, 利用现场建立的不同土地利用类型的径流实测降雨径流数据, 对长期水文影响评价模型(L-THIA)的主要参数进行校正, 模拟计算该流域非点源氮磷负荷量, 并分析土地利用和降雨变化对氮磷负荷输出的影响. 结果表明, 市桥河流域内非点源氮磷污染高负荷区主要集中在农业用地和城镇用地, 单位面积污染负荷输出最高的为农业用地. 从 1995~2010 年, 流域非点源氮磷负荷呈增加趋势, TN 增加了 17.91%, 而 TP 的增加幅度达到了 25.30%. 随着流域城镇化的迅速发展, 城镇用地明显增加, 所占比例达到了 43.94%, 2010 年对负荷总量的贡献率已超过 40%, 几乎与农业用地持平, 这也是近 15 年来流域内农业用地面积虽然有所降低, 但污染负荷总量仍然增加的主要因素. 流域内降雨主要集中在汛期, 因而汛期非点源氮磷负荷亦远高于非汛期, 占全年比例超过了 85%. 不同降雨类型发生次数与污染负荷的 Pearson 相关分析表明, 日降雨量大于 20 mm 的降雨是造成流域内非点源氮磷污染的主要降雨类型.

关键词:非点源; 氮磷; L-THIA 模型; 土地利用; 降雨

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)11-4218-08

Analysis on Nitrogen and Phosphorus Loading of Non-point Sources in Shiqiao River Watershed Based on L-THIA Model

LI Kai^{1,2}, ZENG Fan-tang¹, FANG Huai-yang¹, LIN Shu¹

(1. South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the Long-term Hydrological Impact Assessment (L-THIA) model, the effect of land use and rainfall change on nitrogen and phosphorus loading of non-point sources in Shiqiao river watershed was analyzed. The parameters in L-THIA model were revised according to the data recorded in the scene of runoff plots, which were set up in the watershed. The results showed that the distribution of areas with high pollution load was mainly concentrated in agricultural land and urban land. Agricultural land was the biggest contributor to nitrogen and phosphorus load. From 1995 to 2010, the load of major pollutants, namely TN and TP, showed an obviously increasing trend with increase rates of 17.91% and 25.30%, respectively. With the urbanization in the watershed, urban land increased rapidly and its area proportion reached 43.94%. The contribution of urban land to nitrogen and phosphorus load was over 40% in 2010. This was the main reason why pollution load still increased obviously while the agricultural land decreased greatly in the past 15 years. The rainfall occurred in the watershed was mainly concentrated in the flood season, so the nitrogen and phosphorus load of the flood season was far higher than that of the non-flood season and the proportion accounting for the whole year was over 85%. Pearson regression analysis between pollution load and the frequency of different patterns of rainfall demonstrated that rainfall exceeding 20 mm in a day was the main rainfall type causing non-point source pollution.

Key words: non-point source pollution; nitrogen and phosphorus load; L-THIA model; land use; rainfall

近年来,随着社会经济水平的不断发展、人口数量的激增、人类活动的频繁、土地利用/覆盖的剧烈变化以及气候水文的改变,由此引发的非点源污染问题越来越引起人们的重视^[1~3]. 大量的泥沙、氮磷等污染物负荷进入江河、湖库等水体,不仅使水质恶化,破坏水生生态系统平衡,还会威胁到人类的健康^[4].

目前,对于非点源的研究大体上可分为两类:一是选取代表性地块建立径流实验场,通过人工或天然降雨的方式,研究非点源污染产生的机理和排放特征^[5~7];二是利用数值模拟技术对非点源负荷进行模拟计算以及模拟环境因子(包括地形、土地利

用类型、土壤类型及降雨量等)对非点源污染输出的影响^[8~11]. 通过监测实验的方法可以较为准确地确定研究区域不同土地利用类型非点源污染负荷的产生特征,但由于非点源污染的随机性、广泛性、不确定性等特点^[12],仅凭小面积和短时期的监测实验难以全面地反映流域大尺度的非点源污染状况. 因而采用国际上先进、成熟的模型,对研究区域进

收稿日期: 2013-03-20; 修订日期: 2013-05-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07011-0010)

作者简介: 李凯(1988~),男,硕士研究生,主要研究方向为水环境模拟, E-mail: lk0413@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zengfantang@scies.org

行模拟计算,才能较准确地掌握大尺度流域的非点源负荷的时空分布规律. 基于物理生化过程所构建的流域分布式产汇污模型如 SWAT、SWMM、HSPF、AnnAGNPS 等能够对产汇污过程进行长时间序列的模拟,但是这些模型对输入数据的要求很高,不仅需要高分辨率的土地利用、土壤和地形数据,同时还需要大量详尽的污染源数据、气象数据和农业作业方式等数据,这些数据获取的难度高,因而在一定程度上限制了其应用范围. 如果数据不完整,加上模型对产汇污机制过程的假定与实际情况不一定完全相符,就有可能导致模拟结果产生较大偏差^[11]. Harbor^[13]设计开发的长期水文影响评价模型 L-THIA(long-term hydrological impact assessment)对输入数据的要求相对较低,且能够有效地评价土地利用变化对地表径流的长期水文影响,这对资料匮乏的地区来说更具实际应用价值. 国内外已有不少研究者采用该模型计算区域非点源污染负荷^[14~19],但在模拟计算过程中缺乏对研究区域参数的校正或仅对 CN 值进行了校正,而对于事件平均浓度(event mean concentration, EMC),大多直接采用模型内设的参数,但该数据源自美国 Texas 州的监测资料,与我国实际情况相差较大,以致于会影响模拟结果的准确性,白凤娇等^[19]对深圳观澜河流域的非点源负荷估算中虽然对 EMC 值进行了校正,但其 EMC 数据仍然是采用相近其他流域的资料,而并未在该流域进行降雨径流的实测. 因此本研究将监测实验和数值模拟的方法结合在一起,利用在研究区域进行的典型地类径流场降雨过程的水质水量监测数据对 L-THIA 模型进行校正,以期能够合理估算研究区域的非点源污染负荷,并利用率定好的模型分析该流域非点源污染的时空变化特征及主要影响因素,从而为非点源污染控制提供参考.

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

番禺市桥河流域位于珠江三角洲中部河网地带,总面积约 229.8 km²(图 1). 流域内地势低平,由西北向东南倾斜,市桥城区北部和沙湾镇西部有岛状孤立山丘和台地,土壤类型以赤红壤为主. 流域地处回归线以南,属南亚热带海洋性季风气候,多年平均年降水量为 1 684.5 mm,降水量年内分配极不均匀,汛期(4~9 月)降水量占年降水量的百分比基本上都在 80%以上. 目前市桥河流域内农业用地约占 29.18%,城镇用地和农村用地分别约占

43.94%和 7.92%,林地约占 8.20%. 自 20 世纪 80 年代以来,流域内社会经济发展迅速,人口剧增,土地利用类型变化显著^[20].

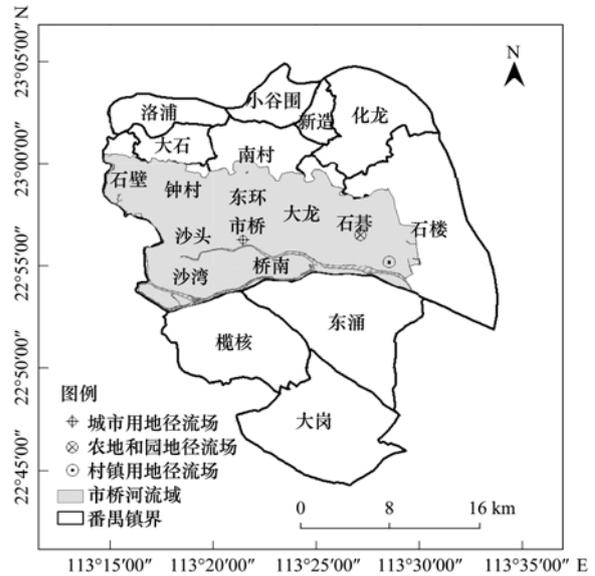


图 1 市桥河流域及径流场地理位置示意

Fig. 1 Geographical location of Shiqiao River watershed and runoff plots

1.2 研究方法

1.2.1 L-THIA 模型

L-THIA 模型是基于 SCS CN(Curve Number)^[21]法发展而来,以土地利用和土壤类型为基础,通过输入长时间序列的降雨数据和 EMC 数据,计算区域的非点源污染负荷. L-THIA 运算的核心是美国农业部水土保持局的经验数据建立起来的 CN 法,CN 为无量纲参数,是一个综合反映土地利用类型、土壤类型和土壤前期湿润程度等因素的参数.

模型计算流程(图 2)如下:将处理好的土地利用图和土壤图输入模型中计算每个栅格的 CN 值,利用逐日降雨量进行驱动,运行 L-THIA,计算流域内不同地类的径流深和径流量,并与实际监测的流量数据进行对比,调整 CN 值使得模拟径流量与实

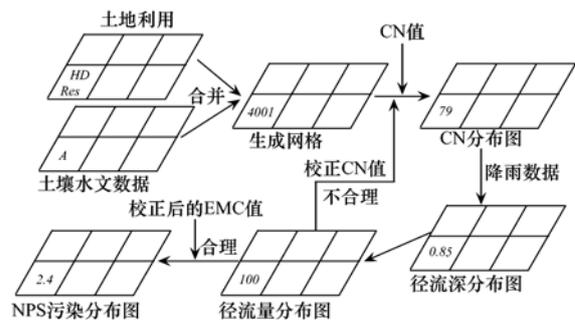


图 2 L-THIA 模型计算流程

Fig. 2 Simulation process of L-THIA model

测数据相符,然后利用校正好的不同地类 EMC 值计算非点源污染负荷。

1.2.2 数据准备

(1) 土地利用数据

采用市桥河流域 1995、2000 和 2010 年这 3 期土地利用数据(图 3),其中 1995 年和 2000 年两个时段购自中国科学院地理科学与资源研究所地球数据共享平台,由 TM 遥感影像解译而得,比例尺为 1:25 万。2010 年的土地利用现状图由番禺国土局提供,该数据为广东省向国土资源部上报的第二次全国土地调查形成的土地利用现状图,比例尺为 1:1 万。采用中国科学院“中国资源环境数据库”分类体系,并参考全国土地利用现状分类方法,结合研究区域实际情况将土地利用类型划分为 7 类:城镇(主要指商业区、交通区和高密度居住区等)、农村(主要指农村低密度居住区)、农业用地(主要指水田和菜地)、园地(指果园,主要是香蕉和甘蔗等)、林地(主要指以乔木为

主,植被覆盖良好的用地)、草地(主要指天然草地和人工草地等)和水域(主要指河流、湖库和湿地)。因数据来源有所不同,除采用同一分类系统进行统一划分外,在模型模拟过程中,需将土地利用数据转换为栅格格式,并进行重采样到统一大小的分辨率,根据流域面积,栅格尺寸定为 100 m。

(2) 土壤水文数据

美国农业部水土保持局(USDA)根据土壤的渗透性特征将 8 500 多种土壤类型分别归为 A、B、C 和 D 这 4 类(表 1)。利用番禺农业局提供的由广东省农业科学院编制的 2004 年广州市番禺区土壤图(比例尺 1:20 万),并根据文献[22,23],将市桥河流域土壤水文条件归类,并在 ARCVIEW 软件中生成相应的土壤水文图,流域内的土壤条件以 B 和 C 类为主。考虑到在研究时段(1995~2010 年)内土壤性质不会发生明显变化,故涉及的年份采用同一土壤类型图。

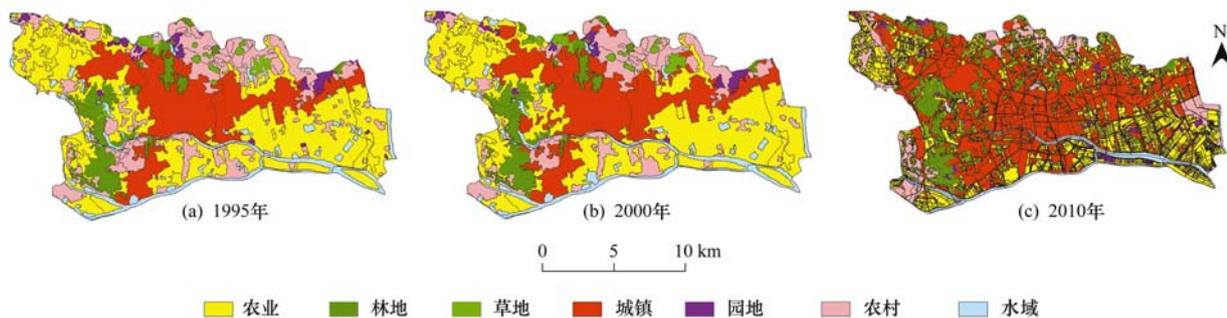


图 3 市桥河流域 1995~2010 年土地利用

Fig. 3 Land use distribution in the Shiqiao River watershed during 1995-2010

表 1 土壤水文类型

Table 1 Hydrologic soil types

土壤水文类型	含义	最小下渗率/mm·h ⁻¹
A	易产生高渗透无径流的土壤(沙、砾石)	7.26~11.43
B	易产生中等渗透少径流的土壤(粉砾土壤)	3.81~7.26
C	易产生少渗透中等径流的土壤(砾石)	1.27~3.81
D	易产生低渗透高径流的土壤(黏土)	0~1.27

(3) 降雨数据

本研究利用从中国气象局气象数据共享平台申请的广州气象站 1980~2000 年的逐日降雨量数据以及市桥河流域三沙口站和三善窖站 2001~2010 年的逐日降雨量观测数据来构建研究区域长时间序列的气象数据,并对数据进行整理和格式转换。

(4) EMC 数据

L-THIA 模型内置的 EMC 值数据来源于北美地区,但不同地区因社会经济发展情况和地理气象条件的不同而导致 EMC 值差异性较大^[19],L-THIA 模

型亦允许用户利用自己实测的 EMC 数据对其进行修改。因此,在市桥河流域选取代表性地块建立径流场以确定流域内不同土地利用类型的 EMC 值。

根据流域内土地利用类型比例,确定建立城镇用地、农业用地、农村用地和园地这 4 个径流场(图 1),林地和草地因地域差异性并不大,故并不单独建立径流场,参考同类研究确定。课题组于 2012 年 4~6 月共采集到 12 场有效降雨,降雨强度覆盖中雨、大雨、暴雨,非汛期因降雨量小和降雨历时短,产流不明显,故没有监测到有效降雨。年内非点

源氮磷负荷输出主要受降雨的影响较大,市桥河流域内降雨主要集中在汛期,因此,虽仅监测到汛期的降雨,但对于估算非点源氮磷负荷影响不大,模型模拟过程中亦考虑了不同时期降雨量和前期土壤湿润程度的影响。另外,考虑到施肥会影响农业用地氮磷负荷输出浓度,因而对不同施肥期的降雨径流进行了监测。径流场的相关情况、采样结果分析及非点源污染特征等可参见课题组的相关研究成果^[24]。通过这些实测资料识别流域内非点源污染特征,并确定各地类的平均输出浓度 EMC 值。

2 结果与讨论

2.1 模型参数的校正和有效性验证

2.1.1 CN 值校正

CN 值把流域下垫面条件定量化,用量的指标来反映下垫面条件对产汇流的影响。USDA 建立了 CN 值表,可根据土地利用类型和土壤水文类型查找相应的数值^[21]。为了更切实地反映研究区域的下垫面条件,利用径流场的降雨监测径流量对 CN 值进行校正(每个径流场各有 3 套降雨监测数据,其中 2 套用来校正参数,另外 1 套用来验证模拟结果),确定市桥河流域中等湿润(antecedent moisture condition, AMCII)条件下的 CN 值(表 2),其他土壤前期水分条件(AMCI,干燥;AMCIII,湿润)下的 CN 值则根据中等湿润条件的 CN 值进行计算校正^[25]。

表 2 校正后市桥河流域不同土地利用类型的 CN 值和 EMC 值

Table 2 Revised CN and EMC value of different land use types in Shiqiao river watershed

土地利用类型	CN 值				EMC 值/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	
	A	B	C	D	TN	TP
农业用地	76	84	89	92	16.79	1.19
城镇用地	90	92	95	97	6.07	0.58
农村用地	82	88	91	95	2.36	0.13
园地	57	72	81	85	2.8	0.88
草地	60	74	82	86	3.08	0.12
林地	50	68	78	83	3.12	0.14

2.1.2 EMC 值校正

L-THIA 模型中 EMC 数据的脚本是以 Avenue 编程语言编写的,通过修改内置的 EMC 数据以及与不同土地利用类型之间的调用关系,将径流场监测实验获得的 EMC 数据(N、P 营养盐是衡量非点源污染最为关键的两个指标,因而选用 TN 和 TP)输入到模型中,从而计算非点源污染负荷。其中草地和林地的 EMC 数据地域差异性较小,参考流域背景相似的深圳西丽水库实测的 EMC 数据确定^[19]。

2.1.3 模型有效性的验证

L-THIA 模型提供单次降雨的模拟计算,可用于进行径流量的验证。根据径流场降雨监测资料,选用同一场降雨对 4 种土地类型分别进行模拟计算,将得到的模拟径流量与实际监测得到的流量进行对比。为了消除径流场面积对结果的影响,将数据统一换算成单位面积 $1\ 000\ \text{m}^2$ 下的径流深进行比较,单位为 mm(表 3)。模拟误差在可接受的范围(15%以内)^[18],其中农村用地的误差稍大,可能是因为农村建设步伐加快,屋面、道路和庭院等不透水地表面积的比例发生较大的改变,从而对径流量模拟结果有一定影响。总体来说 L-THIA 模型模拟计算得到的径流量基本合理,符合市桥河流域的实际情况。

表 3 径流深的模拟值与实际值对比

Table 3 Contrast between simulated value and observation value of runoff depth

地类	模拟径流深/mm	实际径流深/mm	误差/%
农业用地	4.57	4.64	-1.54
城镇用地	13.83	15.39	-10.11
农村用地	10.60	12.38	-14.38
园地	2.04	1.94	5.50

2.2 土地利用变化对氮磷负荷输出的影响

利用率定好的 L-THIA 模型,对市桥河流域进行氮磷负荷的模拟计算,得到不同年份(1995、2000 和 2010 年)的 TN 和 TP 空间分布图(图 4)。结合土地利用图(图 3)可以看出 TN 和 TP 的空间分布特征相似,并与土地利用类型的空间分布相对应。

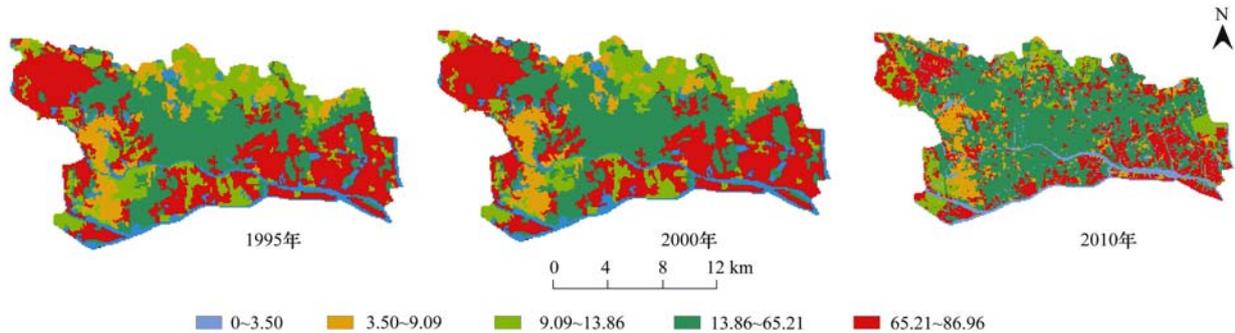
市桥河流域内非点源氮磷污染高负荷区主要集中在农业用地和城镇用地,低负荷区则以林地和绿地为主。随着近年来城镇用地的迅速扩张和城镇绿地系统的建造,既有氮磷污染低负荷区转变为高负荷区,亦有高负荷区向低负荷区转变。单位面积污染负荷输出最高的是农业用地,主要是因为化肥的施用使得农业用地的 EMC 值远高于其他地类;而城镇用地则是由于下垫面硬化程度高,加速了径流的形成,径流量明显要高于其他土地利用类型,故输出负荷亦较高。Zhang 等^[14]和 Wang 等^[26]的研究也认为农业用地的 EMC 远高于其他地类,因而农业用地输出的污染负荷也要高于其他地类,而白凤娇等^[19]利用 L-THIA 模型在深圳市观澜河流域模拟计算非点源污染负荷得到的结果则有所不同,其研究结果显示 TN 和 TP 单位面积污染负荷输出最高的为交通用地,其次为农业用地,这主要是因为深圳市城市化发展迅速,其模型输入的交通用地 EMC 值较

高的缘故。

近年来城镇用地的迅速扩张,虽然占用了一部分农业用地,但氮磷污染高负荷区总体来说呈扩大的趋势. 从1995~2010年这15a的年际变化看(表4),污染负荷总量亦呈增加趋势,TN从1995年的

950.91 t 增加到2010年的1 121.21 t,增加了17.91%; TP从1995年的74.75 t增加到了2010年的93.66 t,增加幅度达到了25.30%. 可以看出,农业用地面积虽然有所下降,但污染负荷总量仍然呈增加趋势.

(a) TN分布 单位: $\text{kg}\cdot\text{cell}^{-1}$, 孔径 = 100 m



(b) TP分布 单位: $\text{kg}\cdot\text{cell}^{-1}$, 孔径 = 100 m

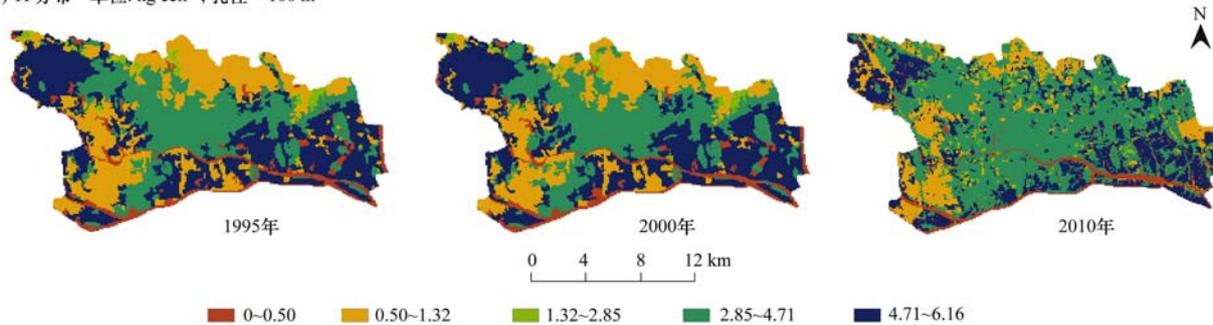


图4 市桥河流域 TN 和 TP 空间分布变化

Fig. 4 Change in spatial distribution of TN and TP in Shiqiao river watershed

表4 市桥河流域非点源负荷年际变化

Table 4 Interannual variation of pollution load in Shiqiao river watershed

项目	非点源负荷/t			变化率/%		
	1995年	2000年	2010年	1995~2000年	2000~2010年	1995~2010年
TN	950.91	990.87	1 121.21	4.20	13.15	17.91
TP	74.75	78.25	93.66	4.68	19.70	25.30

对市桥河流域内不同土地利用类型的面积和对非点源负荷总量的“贡献率”进行统计分析(表5),市桥河流域氮磷负荷的来源以农业用地、城镇用地和农村用地为主,园地、草地和林地因所占面积较小,对污染负荷的贡献相对也较低. 从1995~2010年,流域内农业用地面积呈下降趋势,对非点源负荷的贡献率也随之下降,但仍然是贡献最大的土地利用类型. 近15年随着城镇化的迅速发展,城镇用地迅速增加,在2010年已经是流域内面积比例最大的土地类型,达到了43.94%,超过了农业用地的29.18%,城镇用地对污染负荷的贡献率也因此增加,2010年的贡献率已经超过了40%,几乎与农业

用地持平,相对于1995年增加了20%左右,这也是流域内氮磷负荷总量增长的主要因素.

2.3 降雨对氮磷负荷输出的影响

根据流域内气象站历年实测资料统计,多年平均年降水量为1 684.5 mm. 降水量年内分配极不均匀(图5),降雨主要集中在汛期(4~9月),汛期雨量占年降雨量的百分比基本上都在80%以上. 因此,有必要统计出月污染通量,以便找出污染负荷量的年内分布规律. 以2010年土地利用图为基础,利用1980~2010年共31a每个月的日降雨资料对流域非点源氮磷负荷进行逐月模拟,得到市桥河流域各个月份的污染负荷量(图6). 结果显示,降雨量

表 5 不同土地利用类型的面积比例和污染负荷贡献率变化¹⁾/%

Table 5 Change of area composition and contribution to pollution load for different land use types/%

年份	项目	土地利用类型						
		农业用地	城镇用地	农村用地	园地	草地	林地	水域
1995	面积	39.86	22.61	18.53	2.04	1.66	7.52	7.78
	TN	70.2	23.16	5.19	0.24	0.85	0.36	/
	TP	64.09	28.5	3.69	0.5	1.79	1.44	/
2000	面积	40.54	25.25	15.81	1.65	1.69	7.59	7.47
	TN	69.35	24.98	4.31	0.24	0.84	0.29	/
	TP	62.98	30.59	3.04	0.49	1.75	1.15	/
	TN 变化率	-0.85	1.82	-0.88	0.00	-0.01	-0.07	/
	TP 变化率	-1.11	2.09	-0.65	-0.01	-0.04	-0.29	/
2010	面积	29.18	43.94	7.92	2.14	2.2	8.2	6.42
	TN	51.48	44.63	2.24	0.36	0.94	0.36	/
	TP	47.86	46.29	1.62	0.74	2.01	1.47	/
	TN 变化率	-18.72	21.47	-2.95	0.12	0.09	0.00	/
	TP 变化率	-16.23	17.79	-2.07	0.24	0.22	0.03	/

1) 贡献率的变化率均是相对于 1995 年而言,指不同时期贡献率大小的变化

高的月份,污染负荷量也明显更高,汛期污染负荷产生量远高于非汛期,占全年比例甚至超过了 85%.

降雨是非点源污染发生的动力,流域非汛期内

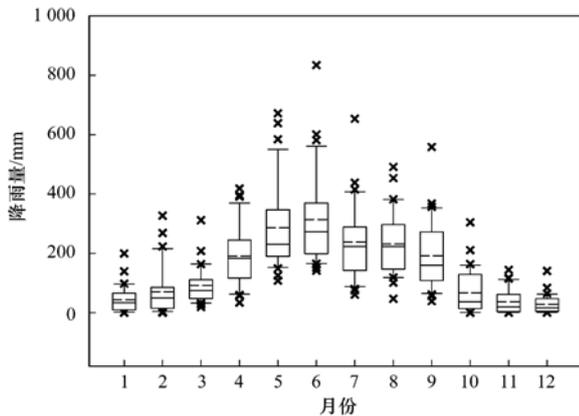


图 5 流域降雨量年内分布

Fig. 5 Annual distribution of rainfall in the watershed

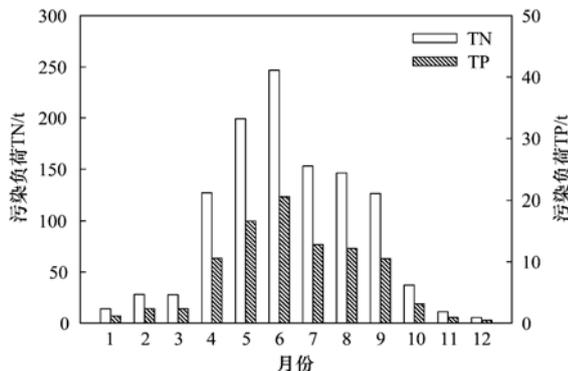


图 6 流域污染负荷年内分布

Fig. 6 Annual distribution of pollution load in the watershed

不仅总降雨量小,且大多是降雨强度较小的降雨类型,产生的径流量较小,甚至有些土地类型不产流,故污染负荷输出明显要低. Whischmeier 等^[27]根据 35 个水土保持站的实测资料认为侵蚀性降雨的条件为降雨量大于 12.7 mm, Elwell 等^[28]则认为日降雨大于 25 mm 的降雨是引起 Rhodesia 地区土壤侵蚀的主要降雨类型. 沈珍瑶等^[29]对三峡库区张家冲流域的降雨类型和发生频度的统计结果认为大于 30 mm 的降雨是引起非点源污染的主要降雨类型. 为了尝试从模型模拟方面进一步研究降雨类型对非点源负荷输出的影响,假设在土地利用类型不变的前提下(采用同一年土地利用图),利用 L-THIA 模型分别输入不同年份的日降雨量数据进行模拟计算,得到 2000 ~ 2010 年这 11 a 来每一年的污染负荷量,同时对每一年不同降雨类型发生的次数进行统计,并利用 SPSS 软件将统计结果与污染负荷量进行 Pearson 相关分析(表 6). 从降雨径流引起流域氮磷污染的角度看,日降雨量大于 20 mm 的降雨是造成市桥河流域非点源污染的主要降雨类型. 这也与现场观测结果相符,由于降雨初期大部分降水消耗于植物截留、下渗、填洼与蒸散发等,故降雨量小时不易形成明显的地表径流. 这与其他学者的研究结果有所不同,主要与地区的土壤、地形、植被等因素有关,市桥河流域地处珠江三角洲,属亚热带海洋性季风气候,降雨充沛,地表产流机制以蓄满产流为主,年降雨量远高于中国内陆地区,且降雨强度大,特别是汛期台风活动常携带大暴雨,容易

表 6 污染负荷与不同降雨类型次数的 Pearson 相关关系¹⁾

Table 6 Pearson correlation coefficients between pollution load and rainfall types

	降雨量	降雨类型					
		<10 mm	10~20 mm	<20 mm	>20 mm	20~50 mm	>50 mm
污染负荷	0.982 **	-0.145	0.137	-0.092	0.946 **	0.815 **	0.902 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

产流.

3 结论

(1) 市桥河流域内非点源污染高负荷区主要集中在农业用地和城镇用地, 单位面积污染负荷输出最高的为农业用地. 从 1995~2010 年, 流域非点源负荷呈增加趋势, TN 增加了 17.91%, 而 TP 的增加幅度达到了 25.30%.

(2) 从 1995~2010 年, 农业用地面积有所降低, 但仍然是对市桥河流域非点源污染负荷总量贡献最大的土地利用类型. 随着城镇化的迅速发展, 城镇用地明显增加, 在 2010 年对污染负荷总量的贡献率已超过 40%, 这也是近 15 年来污染负荷总量增加的主要因素.

(3) 市桥河流域内降雨主要集中在汛期, 因而汛期非点源负荷亦远高于非汛期, 占全年比例超过了 85%, 而不同降雨类型发生次数与污染负荷的 Pearson 相关分析表明, 日降雨量大于 20 mm 的降雨是造成流域内非点源污染的主要降雨类型.

参考文献:

- [1] Goolsby D A, Battaglin W A, Aulenbach B T, *et al.* Nitrogen flux and sources in the Mississippi River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **248**(2-3): 75-86.
- [2] Lin J, Xu H Z, Cudaback C, *et al.* Inter-annual variability of hypoxic conditions in a shallow estuary [J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, **73**(1-2): 169-184.
- [3] Oneley 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.
- [4] Potter K M, Cabbage F W, Blank G B, *et al.* A watershed-scale model for predicting nonpoint pollution risk in north carolina [J]. *Environmental Management*, 2004, **34**(1): 62-74.
- [5] 汪涛, 朱波, 况福红, 等. 有机-无机肥配施对紫色土坡耕地氮素淋失的影响 [J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(4): 781-788.
- [6] 胡远安, 程声通, 贾海峰. 芦溪流域非点源污染物流失的一般规律 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 108-112.
- [7] 黄金良, 涂振顺, 杜鹏飞, 等. 城市绿地降雨径流污染特征对比研究: 以澳门与厦门为例 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(12): 3514-3521.
- [8] Ullrich A, Volk M. Application of the soil and water assessment tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, **96**(8): 1207-1217.
- [9] Walton R S, Hunter H M. Isolating the water quality responses of multiple land uses from stream monitoring data through model calibration [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **378**(1-2): 29-45.
- [10] 陈媛, 郭秀锐, 程水源, 等. 基于 SWAT 模型的三峡库区大流域不同土地利用情景对非点源污染的影响研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(4): 798-806.
- [11] 张恒, 曾凡棠, 房怀阳, 等. 基于 HSPF 及回归模型的淡水河流域非点源负荷计算 [J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(4): 856-864.
- [12] Weng Q H. Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS [J]. *Environmental Management*, 2001, **28**(6): 737-748.
- [13] Harbor J M. A practical method for estimating the impact of land-use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology [J]. *Journal of the American Planning Association*, 1994, **60**(1): 95-108.
- [14] Zhang J H, Shen T, Liu M H, *et al.* Research on non-point source pollution spatial distribution of Qingdao based on L-THIA model [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011, **54**(3-4): 1151-1159.
- [15] 金洋, 李恒鹏, 李金莲. 太湖流域土地利用变化对非点源污染负荷量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(4): 1214-1218.
- [16] Lim K J, Engel B A, Tang Z, *et al.* Effects of calibration on L-THIA GIS runoff and pollutant estimation [J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, **78**(1): 35-43.
- [17] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 汉阳非点源污染控制区划 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(1): 31-36.
- [18] 郎海鸥, 王文杰, 王维, 等. 基于土地利用变化的小江流域非点源污染特征 [J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(9): 1158-1166.
- [19] 白凤姣, 李天宏. 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 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2667-2673.
- [20] 陈颖彪, 李雁, 千庆兰, 等. 基于 TM 数据的广州市番禺区土地覆被格局分析 [J]. *地理科学*, 2012, **32**(4): 458-463.
- [21] USDA (United States Department of Agriculture Soil Conservation Service). Urban hydrology for small watersheds [A]. In: Technical Release No. 55 [C]. Colorado: Water Resources Publications, 1986. 15-17.

- [22] 广东省土壤普查办公室. 广东土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [23] 广东省土壤普查办公室. 广东土种志[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [24] 李凯, 曾凡荣, 胡应成, 等. 广州番禺区不同地类的非点源污染排放特征[J]. 环境科学与技术, 2013, (6): 26-31.
- [25] USDA-SCS (Department of Agriculture, Soil Conservation Service). National engineering handbook. Section 4: hydrology [M]. Washington, DC: Soil Conservation Service, USDA, 1985. 13-24.
- [26] Wang Y, Choi W, Deal B M. Long-term impacts of land-use change on non-point source pollutant loads for the St. Louis metropolitan area, USA[J]. Environmental Management, 2005, 35(2): 194-205.
- [27] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Washington, D C: Agriculture Handbook, USDA, 1978. 537.
- [28] Elwell H A, Stocking M A. Parameters for estimating annual runoff and soil loss from agricultural lands in Rhodesia [J]. Water Resources Research, 1975, 11(4): 601-605.
- [29] 沈珍瑶, 刘瑞民, 叶闽, 等. 长江上游非点源污染特征及其变化规律[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 224-225.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Aerosol Optical Properties During Different Air-Pollution Episodes over Beijing	SHI Chan-zhen, YU Xing-na, ZHOU Bin, <i>et al.</i> (4139)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Aerosol Ions over the Bohai Sea and the North Yellow Sea in Autumn	ZHANG Yan, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (4146)
Spatial Distribution Characteristics of Carbonaceous Aerosol During Summer in Beibu Gulf Zone, China	YANG Yi-hong, TAO Jun, GAO Jian, <i>et al.</i> (4152)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Greenhouse Gas by an Improved FTIR	XIA Ling-jun, LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (4159)
Distribution of CH ₄ in the Suburb of Changsha City, China	LIU Lu-ning, WANG Ying-hong, XU Xiao-juan, <i>et al.</i> (4165)
Chemical Composition of <i>n</i> -Alkanes in Wheat Straw and Smoke	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (4171)
Degradation of the Absorbed Methyl Mercaptan by Persulfate in Alkaline Solution	YANG Shi-ying, WANG Lei-lei, FENG Lin-yu, <i>et al.</i> (4178)
Emissions of Greenhouse Gas and Ammonia from the Full Process of Sewage Sludge Composting and Land Application of Compost	ZHONG Jia, WEI Yuan-song, ZHAO Zhen-feng, <i>et al.</i> (4186)
Distribution and Physicochemical Properties of Aquatic Colloids in the Yangtze Estuarine and Coastal Ecosystem	GU Li-jun, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4195)
Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Estuaries Surface Sediments from the Haihe River Basin	LÜ Shu-cong, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (4204)
Distribution of Perfluorooctanesulfonate and Perfluorooctanoate in Water and the Sediment in Fenhe River, Shanxi Province	Higashiguchi Tomohiro, SHI Jiang-hong, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4211)
Analysis on Nitrogen and Phosphorus Loading of Non-point Sources in Shiqiao River Watershed Based on L-THIA Model	LI Kai, ZENG Fan-tang, FANG Huai-yang, <i>et al.</i> (4218)
Pollutant Source Apportionment of Combined Sewer Overflows Using Chemical Mass Balance Method	DAI Mei-hong, LI Tian, ZHANG Wei (4226)
Simulated Study of Algal Fatty Acid Degradation in Hypoxia Seawater-Sediment Interface Along China Coastal Area	SUI Wei-wei, DING Hai-bing, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4231)
Influence of Two Different Species of Aquatic Plant Communities on the Concentration of Various Nitrogen Forms in Sediment of Lake Taihu	MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (4240)
Study on Removal Rule of Endosulfan in Surface Flow Constructed Wetland	QIN Jing, GAO Fu-wei, XIE Hui-jun (4251)
Accumulation and Transformation of Different Arsenic Species in Nonaxenic <i>Dunaliella salina</i>	WANG Ya, ZHANG Chun-hua, WANG Shu, <i>et al.</i> (4257)
Evaluation of <i>in situ</i> Capping with Lanthanum-Modified Zeolite to Control Phosphate and Ammonium Release from Sediments in Heavily Polluted River	LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (4266)
Effects of Invertebrate Bioturbation on Vertical Hydraulic Conductivity of Streambed for a River	REN Chao-liang, SONG Jin-xi, YANG Xiao-gang, <i>et al.</i> (4275)
Formation of Disinfection By-products by <i>Microcystis aeruginosa</i> Intracellular Organic Matter; Comparison Between Chlorination and Bromination	TIAN Chuan, GUO Ting-ting, LIU Rui-ping, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Natural Organic Matter on Coagulation Efficiency and Characterization of the Floes Formed	XU Lei, YU Wen-zheng, LIANG Liang, <i>et al.</i> (4290)
DOM Membrane Fouling and Effects on Rejection Behaviors of NF Membranes	FENG Gui-zhen, DONG Bing-zhi (4295)
Removal of Hg in Wastewater by Zero-Valent Iron	ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, QIU Xin-kai, <i>et al.</i> (4304)
Catalytic Dechlorination of 2,4-D in Aqueous Solution by Fe ₃ O ₄ -Stabilized Nanoscale Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, LIANG Si, ZENG Si-si, <i>et al.</i> (4311)
Comparative Study on Adsorption Behaviors of Natural Organic Matter by Powered Activated Carbons with Different Particle Sizes	LI Zheng-jian, SHI Bao-you, WANG Dong-sheng (4319)
Removal of Nitrate from Aqueous Solution Using Cetylpyridinium Chloride (CPC)-Modified Activated Carbon as the Adsorbent	ZHENG Wen-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4325)
Adsorption Properties of Modified Graphene for Methylene Blue Removal from Wastewater	WU Yan, LUO Han-jin, WANG Hou, <i>et al.</i> (4333)
Application of Classical Isothermal Adsorption Models in Heavy Metal Ions/Diatomite System and Related Problems	ZHU Jian, WU Qing-ding, WANG Ping, <i>et al.</i> (4341)
Effects of Nitrate on Anoxic/Anaerobic Oxidation of Methane in the Aged Refuse	LIU Yan-yan, LONG Yan, YIN Hua, <i>et al.</i> (4349)
Study on the Biotransformation of Sulfate and Ammonia in Anaerobic Conditions	ZHANG Li, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4356)
Characteristics of Sulfate Reduction-Ammonia Oxidation Reaction	YUAN Yi, HUANG Yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (4362)
Analysis of Hydrogen-production Performance in a UASB System at Low pH	ZHAO Jian-hui, ZHANG Bai-hui, LI Ning, <i>et al.</i> (4370)
Preparation of Red Mud Loaded Co Catalysts; Optimization Using Response Surface Methodology (RSM) and Activity Evaluation	LI Hua-nan, XU Bing-bing, QI Fei, <i>et al.</i> (4376)
Toxic Effects of High Concentrations of Ammonia on <i>Euglena gracilis</i>	LIU Yan, SHI Xiao-rong, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (4386)
Influence of Image Process on Fractal Morphology Characterization of NAPLs Vertical Fingering Flow	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4392)
Changing Characteristics of Organic Matter and pH of Cultivated Soils in Zhejiang Province over the Last 50 Years	ZHANG Ming-kui, CHANG Yue-chang (4399)
Study on Selenium Contents of Typical Selenium-rich Soil in the Middle Area of Zhejiang and Its Influencing Factors	HUANG Chun-lei, SONG Ming-yi, WEI Ying-chun (4405)
Spatial Distribution Characteristics of Fe and Mn Contents in the New-born Coastal Marshes in the Yellow River Estuary	SUN Wen-guang, GAN Zhuo-ting, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (4411)
Level, Composition and Sources of Medium-Chain Chlorinated Paraffins in Soils from Chongming Island	SUN Yang-zhao, WANG Xue-tong, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4420)
Distribution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Soil from Daiyun Mountain Range in Fujian, China	QU Cheng-kai, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (4427)
Levels of PCDD/Fs and Dioxin-Like PCBs in Soils Near E-Waste Dismantling Sites	SHAO Ke, YIN Wen-hua, ZHU Guo-hua, <i>et al.</i> (4434)
Chemical Form Changes of Exogenous Water Solution Fluoride and Bioavailability in Tea Garden Soil	CAI Hui-mei, PENG Chuan-yi, CHEN Jing, <i>et al.</i> (4440)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Vegetation Restoration of Different Types of Coal Mine Spoil Banks	ZHAO Ren-xin, GUO Wei, FU Rui-ying, <i>et al.</i> (4447)
Effects of the Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Environmental Phytoremediation in Coal Mine Areas	LI Shao-peng, BI Yin-li, KONG Wei-ping, <i>et al.</i> (4455)
Preliminary Analysis of Manganese Uptake Mechanism in the Hyperaccumulator <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LI Ren-ying, LIU Cui-ying, <i>et al.</i> (4460)
Research on the Bioaccessibility of HgS by <i>Shewanella oneidensis</i> MR-1	CHEN Yan, WANG Hui, SI You-bin (4466)
Study on IEUBK Model Localization Based on Behavior Parameters of Children from Southwestern China	JIANG Bao, CUI Xiao-yong (4473)
Sorption and Desorption Characteristics of Different Structures of Organic Phosphorus onto Aluminum (Oxyhydr) Oxides	LIU Fei, ZHANG Yan-yi, YAN Yu-peng, <i>et al.</i> (4482)
Study on the Occurrence of Ferrum in Coal by Ultrasound-assisted Sequential Chemical Extraction	XIONG Jin-yu, LI Han-xu, DONG Zhong-bing, <i>et al.</i> (4490)
A Review of Uptake, Translocation and Phytotoxicity of Engineered Nanoparticles in Plants	YANG Xin-ping, ZHAO Fang-Jie (4495)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年11月15日 34卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 11 Nov. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行