

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第2期

Vol.34 No.2

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

16 届亚运会期间广州城区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对霾天气的影响	陶俊, 柴发合, 高健, 曹军骥, 刘随心, 张仁健 (409)
北京地区秋季雾霾天 PM _{2.5} 污染与气溶胶光学特征分析	赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 马志强, 董璠, 何迪 (416)
上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究	王倩, 陈长虹, 王红丽, 周敏, 楼晟荣, 乔利平, 黄成, 李莉, 苏雷燕, 牟莹莹, 陈宜然, 陈明华 (424)
杭州市大气超细颗粒物浓度谱季节性特征	谢小芳, 孙在, 付志民, 杨文俊, 林建忠 (434)
保定市大气气溶胶中正构烷烃的污染水平及来源识别	李杏茹, 杜熙强, 王英锋, 王跃思 (441)
春节期间西安城区碳气溶胶污染特征研究	周变红, 张承中, 王格慧 (448)
华东区域高山背景点 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 背景值及污染特征	苏彬彬, 刘心东, 陶俊 (455)
基于电子鼻土壤与地下水污染修复现场 TVOC 和恶臭的评估	田秀英, 蔡强, 刘锐, 张永明 (462)
积融雪控制下土壤大气间汞交换通量特征	张刚, 王宁, 艾建超, 张蕾, 杨净, 刘子琪 (468)
靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究	徐林波, 高勤峰, 董双林, 刘佳, 傅秀娟 (476)
正构烷烃及单体碳同位素记录的石臼湖生态环境演变研究	欧杰, 王延华, 杨浩, 胡建芳, 陈霞, 邹军, 谢云 (484)
干旱区城市昌吉降雪及积雪中 PGEs 含量分布及其影响因素	刘玉燕, 刘浩峰, 张兰 (494)
降尘收集方法对降尘效率的影响	张正偲, 董治宝 (499)
海河流域水生生态功能一级二级分区	孙然好, 汲玉河, 尚林源, 张海萍, 陈利顶 (509)
长江中下游浅水湖泊水下辐照度漫射衰减特征研究	时志强, 张运林, 王明珠, 刘笑茵 (517)
内陆水体叶绿素反演模型普适性及其影响因素研究	黄昌春, 李云梅, 徐良将, 杨浩, 吕恒, 陈霞, 王延华 (525)
溶氧对富集培养的河口湿地表层沉积物氨氧化菌多样性及氨氧化速率的影响	邱昭政, 罗专溪, 赵艳玲, 颜昌宙 (532)
自然条件下盐城海滨湿地土壤水分/盐度空间分异及其与植被关系研究	张华兵, 刘红玉, 李玉凤, 安静, 薛星宇, 侯明行 (540)
淮河流域农业非点源污染空间特征解析及分类控制	周亮, 徐建刚, 孙东琪, 倪天华 (547)
高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征	崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 陈玲, 肖尚斌, 向坤, 张涛 (555)
城市雨水径流水质演变过程监测与分析	董雯, 李怀恩, 李家科 (561)
复合人工湿地系统强化处理单元的运行特性与效果	任峰, 陆忆夏, 刘琴, 汤杨杨, 王世和, 高海鹰, 乔红杰, 王为进 (570)
给水管网中耐氯分枝杆菌的灭活特性及机制研究	郑琦, 陈超, 张晓健, 陆品品, 刘源源, 陈雨乔 (576)
1 株溶藻菌的部分生物学特性及溶鱼腥藻作用	李三华, 张奇亚 (583)
水生植物热解生物油对中肋骨藻抗氧化酶活性的影响	姚远, 李锋民, 李媛媛, 单时, 李杰, 王震宇 (589)
TiO ₂ 光催化联合技术降解苯酚机制及动力学	张轶, 黄若男, 王晓敏, 王齐, 丛燕青 (596)
皮革废水有机污染物生物降解特性研究	王勇, 李伟光, 杨力, 宿程远 (604)
链霉菌 FX645 对偶氮染料红 AR30 的降解机制研究	谢练武, 方继前, 郭亚平 (611)
一种负载型生物载体的制备及性能研究	杨基先, 曾红云, 周义, 邱珊, 马放, 王蕾, 肖大伟 (616)
基于污泥资源化利用的蛋白核小球藻 (<i>Chlorella pyrenoidosa</i>) 培养研究	嵇雯雯, 夏会龙, 方治国, 刘惠君 (622)
温和热处理对低有机质污泥厌氧消化性能的影响	陈汉龙, 严媛媛, 何群彪, 戴晓虎, 周琪 (629)
天然和水热合成针铁矿对有机物厌氧分解释放 CH ₄ 的影响	姚敦璠, 陈天虎, 王进, 周飞跃, 岳正波 (635)
蚀刻废液及其回收后生产的铜盐产品中 PCDD/Fs 含量水平及分布特征	青宪, 韩静磊, 温炎桑 (642)
基于特定场地污染概念模型的健康风险评估案例研究	钟茂生, 姜林, 姚珏君, 夏天翔, 朱笑盈, 韩丹, 张丽娜 (647)
区域地下水污染风险评价方法研究	杨彦, 于云江, 王宗庆, 李定龙, 孙宏伟 (653)
地下水有机污染源识别技术体系研究与示范	王晓红, 魏加华, 成志能, 刘培斌, 纪轶群, 张干 (662)
祁连山不同海拔土壤有机碳库及分解特征研究	朱凌宇, 潘剑君, 张威 (668)
黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应	骆坤, 胡荣桂, 张文菊, 周宝库, 徐明岗, 张敬业, 夏平 (676)
根茬连续还田对镉污染农田土壤中镉赋存形态和生物有效性的影响	张晶, 于玲玲, 辛木贞, 苏德纯 (685)
长期施肥措施下稻田土壤有机质稳定性研究	罗璐, 周萍, 童成立, 石辉, 吴金水, 黄铁平 (692)
外源 Cr(Ⅲ) 在我国 22 种典型土壤中的老化特征及关键影响因子研究	郑顺安, 郑向群, 李晓辰, 刘书田, 姚秀荣 (698)
某林丹生产企业搬迁遗留场地土壤中六六六的残留特征	潘峰, 王利利, 赵浩, 尤奇中, 刘林 (705)
大型炼锌厂周边土壤及蔬菜的汞污染评价及来源分析	刘芳, 王书肖, 吴清茹, 林海 (712)
天津成人头发指甲中有机氟污染物的残留特征	姚丹, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波, 王艳萍, 刘国卿 (718)
沉积物中雌激素及壬基酚、辛基酚、双酚 A 的测定	吴唯, 史江红, 陈庆彩, 张晖, 刘晓薇 (724)
动物饲料中砷、铜和锌调查及分析	姚丽贤, 黄连喜, 蒋宗勇, 何兆桓, 周昌敏, 李国良 (732)
氟虫双酰胺在水稻和稻田中的残留动态研究	王点点, 宋宁慧, 吴文铸, 由宗政, 何健, 石利利 (740)
2 株降解菲的植物内生细菌筛选及其降解特性	倪雪, 刘娟, 高彦征, 朱雪竹, 孙凯 (746)
嗜盐拟香味菌 Y6 降解硝基苯的特性研究	厉阗, 钱坤, 肖伟, 王进军, 邓新平 (753)
固定化条件对苯系物细胞传感器检测效果的影响	唐阔, 马安周, 于清, 邓雪梅, 吕迪, 庄国强 (760)
16S rDNA 克隆文库分析高含盐生物脱硫系统细菌多样性	刘卫国, 梁存珍, 杨金生, 王桂萍, 刘苗苗 (767)
氨氮浓度对 CANON 工艺功能微生物丰度和群落结构的影响	刘涛, 李冬, 曾辉平, 畅晓燕, 张杰 (773)
筒青霉 (<i>Penicillium simplicissimum</i>) 对木质纤维素的降解及相关酶活性特征	沈莹, 胡天觉, 曾光明, 黄丹莲, 尹璐, 刘杨, 吴娟娟, 刘晖 (781)
石油污染土壤微生物群落结构与分布特性研究	杨萌青, 李立明, 李川, 李广贺 (789)
土霉素在鸡粪好氧堆肥过程中的降解及其对相关参数的影响	王桂珍, 李兆君, 张树清, 马晓彤, 梁永超 (795)
生活垃圾填埋过程含水率变化研究	李睿, 刘建国, 薛玉伟, 张媛媛, 岳东北, 聂永丰 (804)
动物消化机制用于木质纤维素的厌氧消化	吴昊, 张盼月, 郭建斌, 吴永杰 (810)

高岚河不同降雨径流类型磷素输出特征

崔玉洁¹, 刘德富^{1,2*}, 宋林旭¹, 陈玲¹, 肖尚斌¹, 向坤³, 张涛³

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 湖北工业大学资源与环境学院, 武汉 430068; 3. 湖北省宜昌市水文水资源勘测局, 宜昌 443000)

摘要: 通过对三峡水库次级支流高岚河流域不同强降水过程中水量、水质变化过程的同步监测, 系统分析了产流过程中不同形态磷素浓度及通量变化的规律, 解析场次降雨事件点源和非点源磷素入库负荷。结果表明, “矮胖型”降雨径流变化过程表现出迟滞性, 而“尖瘦型”降雨径流为快涨快退; 强降雨冲刷产生的泥沙携带大量颗粒态磷进入水体, 使得总磷含量迅速增加, 溶解性总磷和正磷酸磷浓度略微升高; 相对于“矮胖型”降雨, “尖瘦型”强降雨产生的总磷浓度及通量极大值均高于“矮胖型”降雨, 泥沙侵蚀效果更为明显; 不同雨型下, 磷通量与浓度随时间的变化过程和流量的变化过程具有大体一致性; 各磷素在强降雨过程中流失非点源污染占90%左右, 由于“矮胖型”降雨径流历时较长, 非点源总磷负荷贡献率大于“尖瘦型”。

关键词: 高岚河; 降雨; 径流; 磷素; 非点源; 输出特征

中图分类号: X131.2; X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)02-0555-06

Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River

CUI Yu-jie¹, LIU De-fu^{1,2}, SONG Lin-xu¹, CHEN Ling¹, XIAO Shang-bin¹, XIANG Kun³, ZHANG Tao³

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Resources and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 3. Yichang Water Hydrology and Water Resource Survey, Yichang 443000, China)

Abstract: Through capturing the dynamics of water quantity and quality during varied intensities of rainfall, the variation characteristics of different forms of phosphorus and flux during the producing of runoff were studied systematically in Gaolan River watershed (a secondary tributary of Three Gorges Reservoir). Meanwhile, the phosphoric loadings from point and non-point sources were identified, respectively. The results show that: the variation of rainfall-runoff under “squat” rain was relatively slow, while under “pointed thin” rain it presented quickly both during rising and recession. Total phosphorus concentration increased quickly because soil carried particulate phosphorus into water under the heavy rainfall, while the relative variations of dissolved total phosphorus and orthophosphate concentration were slightly elevated. Compared with “squat” rain, the maximum value of total phosphorus concentration and flux were both higher in “pointed thin” rain, which led to the more heavily soil erosion. The dynamics of flux and concentration of phosphorus were generally consistent with that of the flow rate between the two different types of rain. Phosphorus from non-point source accounts for 90% during the whole heavy rain. Because of the long lasted time during “squat” rain, the contribution of the “squat” rain outweighs the “pointed thin” rain.

Key words: Gaolan River; rainfall; runoff; phosphorus; non-point source; output characteristics

三峡水库蓄水后, 部分支流受回水顶托影响, 长期处于回水淹没状态, 形成相对静止的库湾, 水体自净能力下降, 库区水体富营养化加重, 水华频发, 受到国内外广泛关注^[1~5]。大量研究表明, 磷是水体富营养化的限制因子, 藻类的生长产量受磷的限制更为明显^[6,7]。水体磷素的来源分为点源和非点源, 随着国家对点源磷污染的大力控制, 非点源磷污染贡献率不断提高。非点源磷素流失主要以降雨为驱动力^[8], 依附侵蚀的泥沙和产生的地表径流为载体, 水体侵蚀过程复杂, 机制上分为源-汇-输出过程。为探究降雨过程中非点源磷素迁移特征, 国内外结合模型, 开展了大量室内模拟降雨和坡面径流小区原位监测试验, 取得大量研究成果^[9~11]。三峡库区支

流多为山区型河流, 高程落差大, 下垫面空间异质性突出, 非点源污染随机性, 不确定性更加显著, 常规以小区为研究尺度过小, 对总量控制和控源缺少实践意义。本研究选择三峡水库次级支流高岚河为对象, 完整捕捉 20110613 和 20110802 两场雨量相当、雨型差异性较大的强降雨下, 河道断面的水量水质连续变化过程, 分析磷素在降雨径流过程中输出变化特征, 解析点源和非点源的入库贡献, 以期减少

收稿日期: 2012-04-15; 修订日期: 2012-07-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51179095); 国家自然科学基金青年科学基金项目(51009080, 51209123); 三峡大学硕士学位论文培育基金项目(2012py008)

作者简介: 崔玉洁(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水工学, E-mail: cuida2008@163.com

* 通讯联系人, E-mail: dfliu@189.cn

磷素入库、抑制水华提供科学理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域

高岚河为长江的三级支流,香溪河次级支流,于兴山县峡口镇注入香溪河,河道长度 60 km,流域面积 926.99 km²,为典型的山区型河流(图 1)。根据三峡大学野外监测站结果显示:自 2003 年蓄水以来,受回水顶托影响,高岚河下游形成相对静止的库湾,香溪河的大量氮磷营养物质倒灌进入高岚河,水华频发,优势藻种由河流型的甲藻、硅藻向湖泊型绿藻、蓝藻演替^[12~14]。2008 年 6~7 月,香溪河库湾暴发蓝藻水华时,高岚河最为严重^[15]。高岚河流域自然地质条件复杂多变,矿产资源十分丰富,其中香溪河全流域磷矿储量 3.57 亿 t,是中国三大富磷矿区之一^[3],香溪河总磷年平均值 0.17 mg·L⁻¹,远高于富营养化阈值 0.02 mg·L⁻¹^[16],水体倒灌也使得高岚河存在富磷现象。高岚河流域气候为亚热带大陆季风气候,年降雨量为 800~1400 mm,降水分布不均匀,夏季以暴雨为主,河水暴涨暴落,河流溪润性特征明显,洪峰历时一般为 2~3 d。土壤包括以黄棕壤和石灰土为主的六大土壤类型,土层浅薄,土壤保肥能力差,在降雨冲刷下,极易导致水土流失,引起大量的营养盐流失,进一步恶化水质。

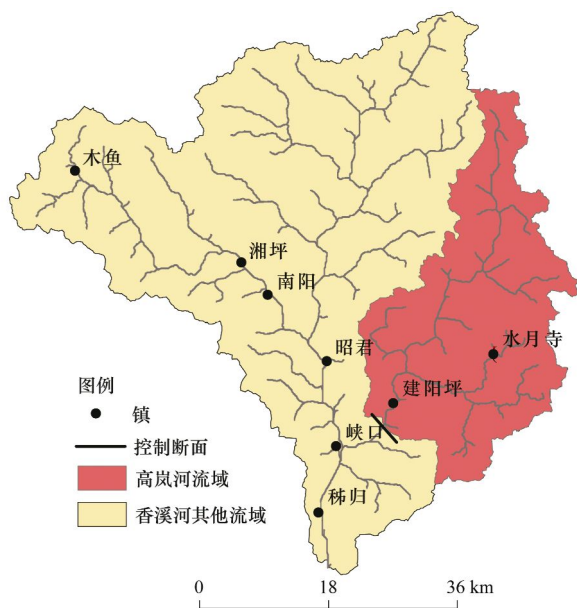


图 1 高岚河流域示意

Fig. 1 Map of Gaolan Basin

1.2 分析方法

香溪河水系发达,河网众多,有三大主要支流,上游的古夫河、南阳河,中游高岚河,由于古夫河,

南阳河上游修建了古洞口一级、二级电站,水量拦截作用明显,人为影响因素较大。为研究自然降雨径流过程中磷素输出变化特征,选定其支流高岚河作为研究对象。依托三峡大学香溪河水生态与环境野外观测站,在高岚河 175 m 回水区以外设置监测控制断面,位置如图 1 所示,控制流域面积 873.56 km²。常规采样每周进行一次。在 20110613 和 20110802 次强降雨期,采样频次为每 2 h 一次,连续昼夜监测直至水位回落至降雨前状态。每次采样 2 瓶,储存于 2 个洁净的 350 mL 聚乙烯瓶中,对采集的水样一瓶现场加酸至 pH < 2,一瓶经电动抽滤机用醋酸纤维滤膜(孔径 0.45 μm)抽滤,水化学分析测试指标为:总磷(TP)、溶解性总磷(DTP)、正磷酸磷(PO₄-P),具体方法参考文献[17,18]。

2 结果与讨论

2.1 不同雨型的降雨流量过程

本研究完整捕捉 20110613 和 20110802 两场不同类型强降水引起的河槽汇流起涨消退过程,流量数据频率为每 6 h 1 次,其缺省值采用线性内插。图 2(a)为 20110613 次降雨径流过程线,该场次降雨为 6 月 13 日 12:00~6 月 14 日 21:00,历时 33 h,总降雨量 103.1 mm。降雨过程存在 2 次小波峰,最大雨强为 7.7 mm·h⁻¹,降雨历时长,雨强分散,可定义为“矮胖型”降雨。降雨初期,在重力、吸引力和表面压力综合作用下,前期非饱和带中水分逐渐下渗。下渗能力大于雨强时,雨水全部进入土壤,一部分增加土壤含水量,致使下渗能力减弱,一部分继续下渗到地下水面,形成地下径流。下渗能力小于雨强时,形成地表径流。“矮胖型”降雨下,多以“蓄满产流”为主,坡面产流经过拦截、吸附、解析等复杂水土转化过程逐级汇入高岚河,河道流量在降雨 15 h 后显著上升,26 h 达到流量峰值 70.6 m³·s⁻¹,并稳定在峰值。降雨停止后,地下径流的持续补充,流量逐步回落,退水过程具有迟滞性。

图 2(b)为 20110802 次降雨径流变化过程线,该场次降雨为 8 月 1 日 20:00~8 月 2 日 09:00,历时 13 h,降雨总量 99 mm,雨量与“矮胖型”降雨相当。降雨雨强集中,最大雨强达 37 mm·h⁻¹,远超过中国气象上关于暴雨的临界值 16 mm·h⁻¹,降雨 3 h 降雨量占到本次降雨的 84%,可定义为“尖瘦型”降雨。在“尖瘦型”降雨的冲击下,雨强大于入渗量,形成的坡面径流一部分下渗,一部分形成地表径流,汇流进入河道,产流模式以超渗产流为主,随着雨强趋

缓,产流发展为蓄满产流和超渗产流共存的混合产流模式.高岚河流量在降雨 18 h 后达到最大流量 $78.4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,峰值以尖点形式存在,流量峰值略大

于“矮胖型”降雨,由于地下水补充量小于“矮胖型”降雨,流量在降雨停止 24 h 内回归到雨前水平,退水迅速.

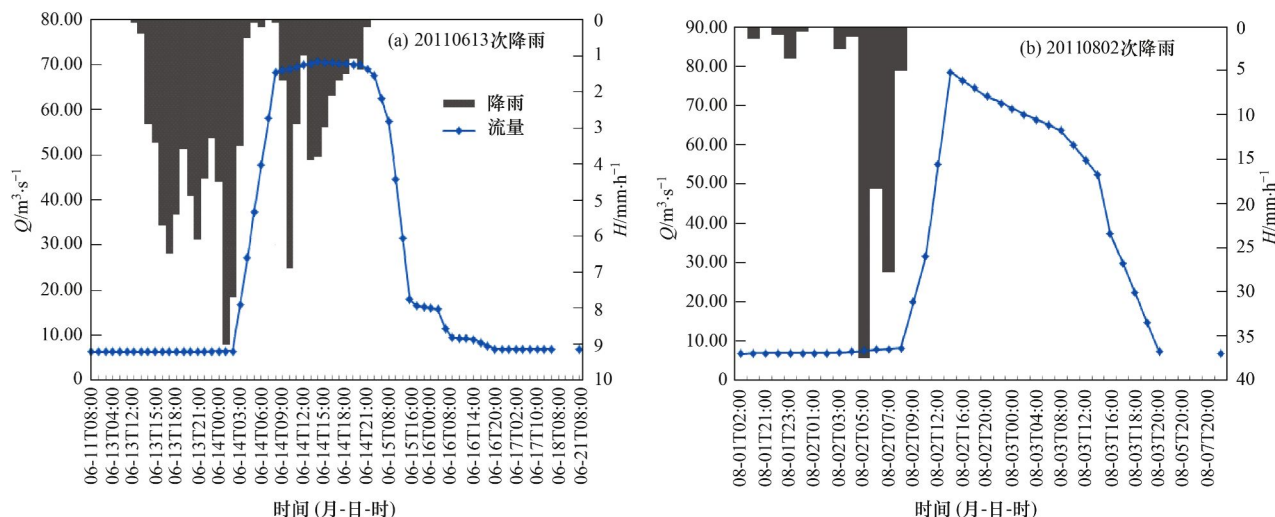


图2 不同雨型降雨-径流变化过程

Fig. 2 Dynamics of rainfall and runoff under different rainfall types

2.2 不同雨型的磷素浓度变化

图3为2场强降雨径流磷素浓度变化过程,其中两端离散点为20110611和20110621两场降水,20110801和20110808雨前雨后常规监测结果,降雨前不同形态磷素均处于较低水平,降雨坡面产流初期,水土大量流失,依托泥沙载体,吸附态磷大量进入水体,导致总磷浓度迅速增大,峰值均以尖点形式存在,径流携带的溶解性总磷与正磷酸磷略微增大,正磷酸磷是溶解性总磷的主要赋存形态.降雨渐停期雨强减小,产流水平输移过程弱化,入渗量增大,吸附态磷在垂向迁移过程中经土壤层层吸附、过滤、沉降,最终迁移进入水体总量减少,河道流速

趋缓,泥沙输移率减小,吸附态磷沉积,使得以吸附态磷占主导地位的总磷减少,以径流为运移载体的溶解性总磷和正磷酸磷略微增大.降雨停止后,因壤中流、地下径流的汇流补给作用,流量回落相对于不同形态磷素的回落都具有一定的迟滞性.

“矮胖型”和“尖瘦型”降雨因降雨强度、历时的差异性,对地面的打击力度不同,侵蚀所带来的效果也存在差异.雨水击溅产生大量分散的土壤细颗粒,被坡面薄层水流运走.在“尖瘦型”强降雨条件下,坡面径流冲刷能力强,总磷、溶解性总磷、正磷酸磷三者具有很好的相关性,而“矮胖型”降雨,雨强的分散增加了水体水平、垂向输移的不确定性,在总磷达到

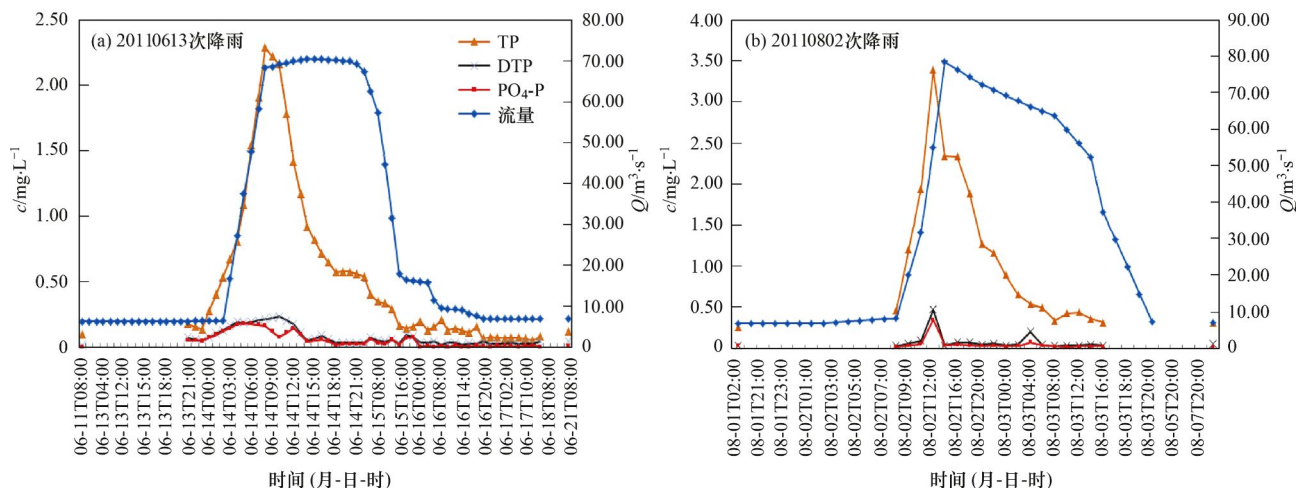


图3 不同雨型磷素浓度变化过程

Fig. 3 Dynamics of phosphorus concentration under different rainfall types

峰值时,正磷酸磷表现为下降-上升-下降。“尖瘦型”降雨的总磷浓度最大值为 $3.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而“矮胖型”降雨由于雨强小,持续的时间长,蓄满产流模型下水平、垂向上土层的阻挡、过滤等,最高浓度 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,明显小于“尖瘦型”降雨.由溶解性总磷小幅度波动可知:“尖瘦型”降雨带来的泥沙侵蚀效果更为明显,泥沙所携带的吸附态磷高于“矮胖型”降雨是导致总磷差异的主要因素.不同磷素浓度回落历时也因雨型不同存在差异性,“矮胖型”降雨不同形态磷素回落明显慢于“尖瘦型”强降雨.

2.3 不同雨型的通量变化过程

通量是单位时间通过监测断面的不同形态磷素负荷的总量,是磷素浓度与对应流量效果的叠加,研究降雨过程中各磷素通量变化过程可为污染物总量控制提供支撑.

通量的计算如式(1):

$$F_i = c_i \times Q_i \times 3.6 \quad (1)$$

式中, c_i 表示不同形态的磷素浓度,包括总磷、溶解性总磷、正磷酸磷浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; Q_i 表示不同形态磷素所对应流量, $\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$; F_i 为不同形态磷素通量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$. 图4为20110613和20110802次降雨磷素通量变化过程,从中可知,通量的变化与浓度和流量的变化大体一致,降雨下磷素浓度和流量的增加使得不同形态磷素入库通量迅速增大,其中以总磷变化最为显著.“矮胖型”降雨总磷通量最大为 $563.98 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,溶解性总磷为 $58.37 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,正磷酸磷为 $39.97 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,不同形态磷素通量达到最大值的时间存在略微的差异;“尖瘦型”降雨总磷通量最大为 $671.30 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,溶解性总磷为 $92.81 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,正磷酸磷通量为 $68.26 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$,均高于同等条件下“矮胖型”降雨各磷素通量,且三者通量同时达到最大值.

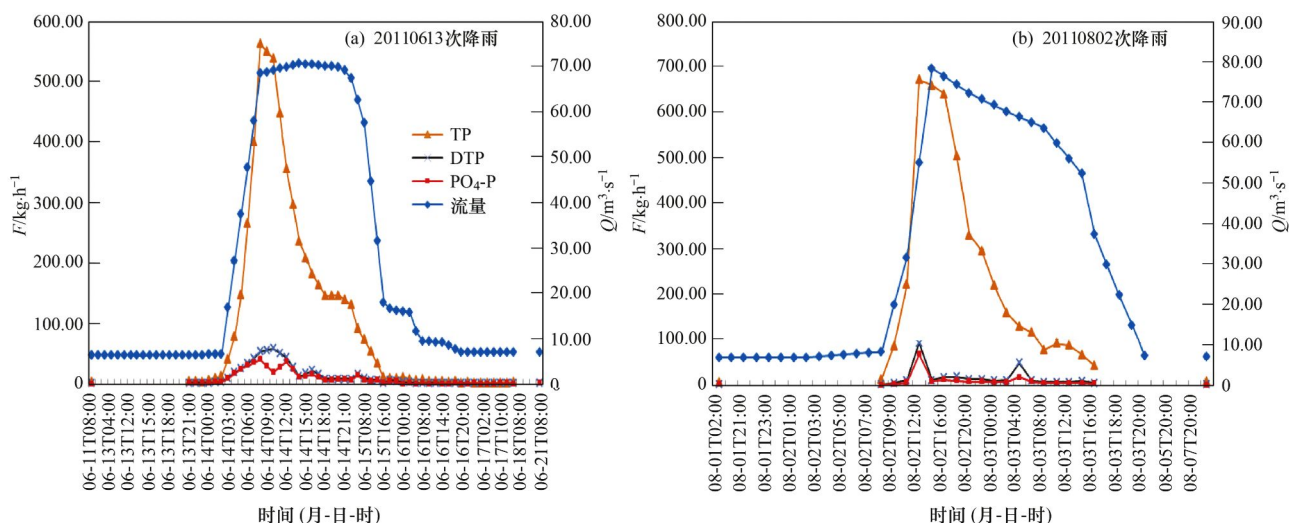


图4 不同雨型下磷素通量变化过程

Fig. 4 Dynamics of phosphorus flux under different rainfall types

2.4 点源与非点源负荷估算

非点源污染是指在降雨径流的冲刷和淋溶作用下,大气、地面和土壤中的溶解性或固体污染物质,进入江河、湖泊、水库和海洋等水体而造成的水环境污染^[19].农业非点源污染、生活污水排放、畜禽养殖为非点源污染的主要三大来源.香溪水库湾水体呈现高度富磷性且水华频发,定量化研究非点源磷素负荷输出是非点源污染治理与控制的关键,为水华预测及防治提供科学支撑.

目前非点源负荷定量研究主要集中在模型计算和经验估算两方面^[20,21],香溪河流域下垫面复杂,加上上游小水电站的人为调控、工程施工、三峡大

坝蓄水回水倒灌等人为影响,模型具有很大的局限性.李怀恩^[22]提出的平均浓度法估算年尺度非点源负荷,洪小康等^[23]将水质水量相关关系应用于地表径流,提出了在有限资料条件下,估算降雨径流年负荷量.在场次降雨过程水质水量完整的情况下,结合过程进行基流分割,非点源负荷估算更逼近真实情况,区域应用性更强.

场次径流磷素总负荷由点源负荷和非点源负荷等部分组成,其中点源负荷排放稳定,根据河川径流的水文特点,可由河川基流推求,非点源污染负荷可由降雨径流推求.磷素场次径流污染负荷总量 W_T 可表示为:

$$W_T = \int_{t_0}^{t_c} [c_s(t)Q_s(t) + c_b(t)Q_b(t)] \quad (2)$$

式中, $c_s(t)$ 为非点源负荷浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $Q_s(t)$ 为非点源负荷流量 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $c_b(t)$ 为点源浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $Q_b(t)$ 点源流量, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 根据基流分割对式(2)进行离散化处理, 对于年尺度的基流分割通常采用数字滤波法、最小平滑值法等^[24,25], 对于场次降雨基流分割, 水文学通常采用斜线、直线分割法^[26], 根据

斜线、直线分割原理, 降雨前常规采样流量较小, 一般为壤中流和地下径流, 可将此点作为分割起涨点, 此时流量作为基流量 Q_b , 此时的浓度作为基流时的浓度 c_b . 可得式(3):

$$W_T = \sum [c_b(t)Q_b(t)\Delta t + c_s(t)Q_s(t)\Delta t] \quad (3)$$

式中, Δt 是对应的时间段, 一般为小时的倍数.
由式(3)可以求得不同降雨条件下非点源与点源负荷以及贡献率大小, 详见表 1.

表 1 点源非点源负荷与贡献率对比
Table 1 Comparison of loading and contribution between point source and non-point source

项目	20110613			20110802		
	点源负荷/kg	非点源负荷/kg	非点源贡献率/%	点源负荷/kg	非点源负荷/kg	非点源贡献率/%
TP	225.52	6 674.67	96.73	325.39	8 592.45	96.35
DTP	39.77	731.93	94.85	47.41	558.48	92.18
PO ₄ -P	11.06	548.56	98.02	38.59	340.74	89.83
降雨产流历时/h	110			54		

由表 1 可知, 磷素在降雨过程中以非点源污染为主, “矮胖型”降雨非点源总磷负荷入库为 6.67 t, “尖瘦型”降雨非点源总磷负荷入库为 8.59 t, 非点源贡献率均在 90% 左右. “矮胖型”降雨产流历时, 即从水位上涨到回落的时间要远大于“尖瘦型”降雨. 香溪河流域坡度陡峭, 土层较薄, 高雨强冲刷更易导致水土流失, 增加磷素非点源入库负荷. 从贡献率上看, 正磷酸磷、溶解性总磷的贡献率“矮胖型”要高于“尖瘦型”, 这与香溪河特殊下垫面有关, 在持续雨强下, 可溶性磷素随着地表径流溶出, 使得贡献率高于降雨冲刷.

3 结论

(1) 不同雨型河道汇流流量峰值、起涨消退时间存在差异. 相对于“矮胖型”降雨, 流量对“尖瘦型”降雨响应表现为快涨快退.

(2) 在降水的冲击下, 依托泥沙的颗粒态磷素大量进入水体, 总磷浓度、通量迅速升高, 而单以径流为载体溶解性总磷、正磷酸磷略微增高, 变化不明显.

(3) 降雨过程中, 磷素主要以非点源形式流失, 不同形态磷素在不同降雨下非点源贡献率在 90% 左右, 均远超过点源, 降雨下应尤其加强非点源污染控制.

参考文献:

[1] 龙天渝, 蒙国湖, 吴磊, 等. 水动力条件对嘉陵江重庆主城区藻类生长影响的数值模拟[J]. 环境科学, 2012, 31(7): 1498-1503.
[2] Fu B J, Wu B F, Lü Y H, et al. Three gorges project: efforts

and challenges for the environment [J]. Progress in Physical Geography, 2010, 34(6): 741-754.
[3] 李凤清, 叶麟, 刘瑞秋, 等. 三峡水库香溪河库湾主要营养盐的入库动态[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2073-2079.
[4] 熊俊, 袁喜, 梅朋森, 等. 三峡库区消落带环境治理和生态恢复的研究现状与进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2011, 33(2): 23-28.
[5] Yang Z J, Liu D F, Ji D B, et al. Influence of the impounding process of the Three Gorges Reservoir up to water level 172.5m on water eutrophication in the Xiangxi Bay[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(4): 1114-1125.
[6] Legović T, Cruzado A. A model of phytoplankton growth on multiple nutrients based on the Michaelis-Menten-Monod uptake, Droop's growth and Liebig's law [J]. Ecological Modelling, 1997, 99(1): 19-31.
[7] 王晓燕, 王静怡, 欧洋, 等. 坡面小区土壤-径流-泥沙中磷素流失特征分析[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 1-5.
[8] Schlesinger W H, Abrahams A D, Parsons A J, et al. Nutrient losses in runoff from grassland and shrubland habitats in Southern New Mexico: I. rainfall simulation experiments [J]. Biogeochemistry, 1999, 45(1): 21-34.
[9] 晏维金, 章申, 唐以剑. 模拟降雨条件下沉积物对磷的富集机理[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 332-337.
[10] Vadas P A, Owens L B, Sharpley A N. An empirical model for dissolved phosphorus in runoff from surface-applied fertilizers [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2008, 127(1-2): 59-65.
[11] 刘京. 三峡紫色土坡耕地小流域氮磷收支及流失风险研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
[12] 汤宏波, 刘国祥, 胡征宇. 三峡库区高岚河甲藻水华的初步研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 47-51.
[13] 诸葛亦斯, 欧阳丽, 纪道斌, 等. 三峡水库香溪河库湾水华生消的数值模拟分析[J]. 中国农村水利水电, 2009, (5): 18-22.

- [14] 黄钰玲. 三峡水库香溪河库湾水华生消机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [15] 杨霞, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾春季水华暴发藻类种源研究[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(6): 2051-2056.
- [16] 宋林旭, 刘德富, 肖尚斌. 三峡库区香溪河流域非点源营养盐输出变化的试验研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, **20**(8): 990-996.
- [17] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 200-284.
- [18] 黄祥飞, 陈伟民, 蔡启铭. 湖泊生态调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [19] 周利. 农业非点源污染迁移转化机理及规律研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [20] 沈晔娜. 流域非点源污染过程动态模拟及其定量控制[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [21] Abbaspour K C, Yang J, Maximov I, *et al.* Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2007, **333**(2-4): 413-430.
- [22] 李怀恩. 估算非点源污染负荷的平均浓度法及其应用[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(4): 397-400.
- [23] 洪小康, 李怀恩. 水质水量相关法在非点源污染负荷估算中的应用[J]. 西安理工大学学报, 2000, **16**(4): 384-386.
- [24] 崔玉洁, 刘德富, 宋林旭, 等. 数字滤波法在三峡库区香溪河流域基流分割中的应用[J]. 水文, 2012, **31**(6): 18-23.
- [25] Aksoy H, Kurt I, Eris E. Filtered smoothed minima baseflow separation method[J]. Journal of Hydrology, 2009, **372**(1-4): 94-101.
- [26] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2000. 75-76.

CONTENTS

Characterization of Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Hazy Weather During 16 th Asian Games in Guangzhou	TAO Jun, CHAI Fa-he, GAO Jian, <i>et al.</i> (409)
PM _{2.5} Pollution and Aerosol Optical Properties in Fog and Haze Days During Autumn and Winter in Beijing Area	ZHAO Xiu-juan, PU Wei-wei, MENG Wei, <i>et al.</i> (416)
Forming Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources Apportionment of VOCs in Autumn of Shanghai, China	WANG Qian, CHEN Chang-hong, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (424)
Study on Number Concentration Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles in Hangzhou	XIE Xiao-fang, SUN Zai, FU Zhi-min, <i>et al.</i> (434)
Pollution Characteristics and Source Identification of Atmospheric Particulate Matters <i>n</i> -Alkanes in Baoding City	LI Xing-ru, DU Xi-qiang, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (441)
Study on Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in Xi'an City During the Spring Festival	ZHOU Bian-hong, ZHANG Cheng-zhong, WANG Ge-hui (448)
Characteristics of PM ₁₀ and PM _{2.5} Concentrations in Mountain Background Region of East China	SU Bin-bin, LIU Xin-dong, TAO Jun (455)
Assessment of TVOC and Odor in the Remediation Site of Contaminated Soil and Groundwater Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (462)
Characteristics of Mercury Exchange Flux Between Soil and Atmosphere Under the Snow Retention and Snow Melting Control	ZHANG Gang, WANG Ning, AI Jian-chao, <i>et al.</i> (468)
Study on Heavy Metal Contaminations and the Sources of Pb Pollution in Jinghai Bay Using the Stable Isotope Technique	XU Lin-bo, GAO Qin-feng, DONG Shuang-lin, <i>et al.</i> (476)
Eco-environmental Evolution Inferred from <i>n</i> -Alkanes and $\delta^{13}\text{C}$ Records in the Sediments of Shijiu Lake	OU Jie, WANG Yan-hua, YANG Hao, <i>et al.</i> (484)
Distribution of PGEs Contents and Its Factors in Snowfall and Snow Cover over the Arid Region in Changji City	LIU Yu-yan, LIU Hao-feng, ZHANG Lan (494)
Effect of Dust Deposition Collection Methods on Collection Efficiency	ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao (499)
Regionalization of the Freshwater Eco-regions in the Haihe River Basin of China	SUN Ran-hao, JI Yu-he, SHANG Lin-yuan, <i>et al.</i> (509)
Characteristics of Diffuse Attenuation Coefficient of Underwater Irradiance in the Lakes in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River	SHI Zhi-qiang, ZHANG Yun-lin, WANG Ming-zhu, <i>et al.</i> (517)
Study on Influencing Factors and Universality of Chlorophyll- <i>a</i> Retrieval Model in Inland Water Body	HUANG Chang-chun, LI Yun-mei, XU Liang-jiang, <i>et al.</i> (525)
Effect of Dissolved Oxygen on Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Enrichment Culture from Estuarine Wetland Surface Sediments and Ammonia-oxidizing Rate	QIU Zhao-zheng, LUO Zhuan-xi, ZHAO Yan-ling, <i>et al.</i> (532)
Spatial Variation of Soil Moisture/Salinity and the Relationship with Vegetation Under Natural Conditions in Yancheng Coastal Wetland	ZHANG Hua-bing, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (540)
Spatial Heterogeneity and Classified Control of Agricultural Non-Point Source Pollution in Huaihe River Basin	ZHOU Liang, XU Jian-gang, SUN Dong-qi, <i>et al.</i> (547)
Phosphorus Output Characteristics Under Different Rainfall-Runoffs in Gaolan River	CUI Yu-jie, LIU De-fu, SONG Lin-xu, <i>et al.</i> (555)
Monitoring and Analysis on Evolution Process of Rainfall Runoff Water Quality in Urban Area	DONG Wen, LI Huai-en, LI Jia-ke (561)
Characteristics and Contribution of the Strengthening Units of Composite Constructed Wetland for Treating Urban Sewage	REN Feng, LU Yi-xia, LIU Qin, <i>et al.</i> (570)
Inactivation of <i>Mycobacteria mucogenicum</i> in Drinking Water: Chlorine Resistance and Mechanism Analysis	ZHENG Qi, CHEN Chao, ZHANG Xiao-jian, <i>et al.</i> (576)
Partial Biological Characteristics and Algicidal Activity of an Algicidal Bacterium	LI San-hua, ZHANG Qi-ya (583)
Effects of Macrophytes Pyrolysis Bio-oil on <i>Skeletonema costatum</i> Antioxidant Enzyme Activities	YAO Yuan, LI Feng-min, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (589)
Mechanism and Kinetics of Phenol Degradation by TiO ₂ Photocatalytic Combined Technologies	ZHANG Yi, HUANG Ruo-nan, WANG Xiao-min, <i>et al.</i> (596)
Biodegradation Characteristics of Organic Pollutants Contained in Tannery Wastewater	WANG Yong, LI Wei-guang, YANG Li, <i>et al.</i> (604)
Microbial Degradation Mechanism of Disperse Azo Dye Red 30 by <i>Streptomyces</i> sp. FX645	XIE Lian-wu, FANG Ji-qian, GUO Ya-ping (611)
Study on Preparation and Performance of a Biological Carrier with Tourmaline	YANG Ji-xian, ZENG Hong-yun, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (616)
Study on the <i>Chlorella pyrenoidosa</i> Cultivation Technology Based on the Excess Sludge Utilization	JI Wen-wen, XIA Hui-long, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (622)
Effects of Mild Thermal Pretreatment on Anaerobic Digestibility of Sludge with Low Organic Content	CHEN Han-long, YAN Yuan-yuan, HE Qun-biao, <i>et al.</i> (629)
Effect of Natural and Hydrothermal Synthetic Goethite on the Release of Methane in the Anaerobic Decomposition Process of Organic Matter	YAO Dun-fan, CHEN Tian-hu, WANG Jin, <i>et al.</i> (635)
Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Spent Etching Solution and Its Copper Salt Recycling Products	QING Xian, HAN Jing-lei, WEN Yan-shen (642)
Case Study on Health Risk Assessment Based on Site-Specific Conceptual Model	ZHONG Mao-sheng, JIANG Lin, YAO Jue-jun, <i>et al.</i> (647)
Study on the Risk Assessment Method of Regional Groundwater Pollution	YANG Yan, YU Yun-jiang, WANG Zong-qing, <i>et al.</i> (653)
Groundwater Organic Pollution Source Identification Technology System Research and Application	WANG Xiao-hong, WEI Jia-hua, CHENG Zhi-neng, <i>et al.</i> (662)
Study on Soil Organic Carbon Pools and Turnover Characteristics Along an Elevation Gradient in Qilian Mountain	ZHU Ling-yu, PAN Jian-jun, ZHANG Wei (668)
Response of Black Soil Organic Carbon, Nitrogen and Its Availability to Long-term Fertilization	LUO Kun, HU Rong-gui, ZHANG Wen-ju, <i>et al.</i> (676)
Phytoavailability and Chemical Speciation of Cadmium in Different Cd-Contaminated Soils with Crop Root Return	ZHANG Jing, YU Ling-ling, XIN Shu-zhen, <i>et al.</i> (685)
Study on Mechanism of SOM Stabilization of Paddy Soils Under Long-term Fertilizations	LUO Lu, ZHOU Ping, TONG Cheng-li, <i>et al.</i> (692)
Aging Process of Cr(III) in 22 Typical Soils of China and Influence Factors Analysis	ZHENG Shun-an, ZHENG Xiang-qun, LI Xiao-zheng, <i>et al.</i> (698)
Residual Characteristics of HCHs in Soils of a Former Lindane Production Enterprise	PAN Feng, WANG Li-li, ZHAO Hao, <i>et al.</i> (705)
Evaluation and Source Analysis of the Mercury Pollution in Soils and Vegetables Around a Large-scale Zinc Smelting Plant	LIU Fang, WANG Shu-xiao, WU Qing-ru, <i>et al.</i> (712)
Residue of Organic Fluorine Pollutants in Hair and Nails Collected from Tianjin	YAO Dan, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (718)
Analysis of Estrogens, Nonylphenol, 4-tert-Octylphenol and Bisphenol A in the Sediments	WU Wei, SHI Jiang-hong, CHEN Qing-cai, <i>et al.</i> (724)
Investigation of As, Cu and Zn Species and Concentrations in Animal Feeds	YAO Li-xian, HUANG Lian-xi, JIANG Zong-yong, <i>et al.</i> (732)
Residue Dynamics of Flubendiamide in Paddy Field	WANG Dian-dian, SONG Ning-hui, WU Wen-zhu, <i>et al.</i> (740)
Isolation of Two Endophytic Phenanthrene-Degrading Strains and Their Degradation Capacity	NI Xue, LIU Juan, GAO Yan-zheng, <i>et al.</i> (746)
Biodegradation of Nitrobenzene by a Halophilic <i>Myroides odoratimimus</i> Strain Y6	LI Tian, QIAN Kun, XIAO Wei, <i>et al.</i> (753)
Effect of Immobilization on Biosensor for Benzene Derivates Detection	TANG Kuo, MA An-zhou, YU Qing, <i>et al.</i> (760)
Investigation of Bacterial Diversity in the Biological Desulfurization Reactor for Treating High Salinity Wastewater by the 16S rDNA Cloning Method	LIU Wei-guo, LIANG Cun-zhen, YANG Jin-sheng, <i>et al.</i> (767)
Assessment of the Effect of Influent NH ₄ ⁺ -N Concentration on the Abundance and Community Structure of Functional Bacteria in CANON Process	LIU Tao, LI Dong, ZENG Hui-ping, <i>et al.</i> (773)
Biodegradation of Lignocellulose by <i>Penicillium simplicissimum</i> and Characters of Lignocellulolytic Enzymes	SHEN Ying, HU Tian-jue, ZENG Guang-ming, <i>et al.</i> (781)
Microbial Community Structure and Distribution Characteristics in Oil Contaminated Soil	YANG Meng-qing, LI Li-ming, LI Chuan, <i>et al.</i> (789)
Degradation of Oxytetracycline in Chicken Feces Aerobic-Composting and Its Effects on Their Related Parameters	WANG Gui-zhen, LI Zhao-jun, ZHANG Shu-qing, <i>et al.</i> (795)
Research of Moisture Content Variation in MSW Landfill	LI Rui, LIU Jian-guo, XUE Yu-wei, <i>et al.</i> (804)
Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Biomass with Animal Digestion Mechanisms	WU Hao, ZHANG Pan-yue, GUO Jian-ben, <i>et al.</i> (810)

《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2月15日 34卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 2 Feb. 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