

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁锋, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

西湖龙泓涧流域暴雨径流氮磷流失特征

杨帆¹, 蒋轶锋^{1*}, 王翠翠¹, 黄晓楠¹, 吴芝瑛², 陈琳²

(1. 浙江工业大学生物与环境工程学院, 杭州 310014; 2. 杭州西湖水域管理处, 杭州 310002)

摘要: 为掌握西湖入湖溪流龙泓涧流域非点源污染现状, 研究了一年内 3 场暴雨径流过程中营养盐的流失特征。结果表明, 长历时暴雨事件一般会形成多个径流峰值, 而其滞后于雨强峰值的时间取决于当次强降雨的分布。降雨的初期冲刷效应与前期降雨量有关, 前期降雨量越少, 总磷和氨氮的初期冲刷效应越明显, 在退水阶段滞缓的壤中流会使总氮和硝态氮再产生一个浓度峰值。径流中各形态氮素的平均浓度 (EMC) 与降雨量、降雨历时、最大雨强和平均雨强均表现为负相关, 与前 5 d 的降雨量表现为正相关, 而总磷的 EMC 值与氮素有相反的变化规律。径流营养盐迁移通量随降雨量的增大而上升, Pearson 分析表明总氮、硝态氮与径流水深 (流量) 具有较好的相关性。总磷、总氮、硝态氮和氨氮的平均迁移通量分别为 34.10、1 195.55、1 006.62 和 52.38 g·hm⁻², 硝态氮为主要的氮素迁移类型 (占总氮的 84%)。

关键词: 龙泓涧流域; 非点源污染; 暴雨; 径流; 营养盐流失

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0141-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.01.019

Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff

YANG Fan¹, JIANG Yi-feng^{1*}, WANG Cui-cui¹, HUANG Xiao-nan¹, WU Zhi-ying², CHEN Lin²

(1. College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China; 2. Hangzhou West Lake Administration, Hangzhou 310002, China)

Abstract: In order to understand the non-point source pollution status in Longhong ravine basin of Westlake, the characteristics of nutrient losses in runoff was investigated during three rainstorms in one year. The results showed that long duration rainstorm event generally formed several runoff peaks, and the time of its lag behind the peaks of rain intensity was dependent on the distribution of heavy rainfall. The first flush was related to the antecedent rainfall, and the less rainfall in the earlier period, the more total phosphorus (TP) and ammonia (NH₄⁺-N) in runoff was washed off. During the recession of runoff, more subsurface runoff would result in a concentration peak of total nitrogen (TN) and nitrogen (NO₃⁻-N). The event mean concentration (EMC) of runoff nitrogen had a negative correlation with rainfall, rainfall duration, maximum rain intensity and average rain intensity except for antecedent rainfall, whereas the change in TP EMC showed the opposite trend. The transport fluxes of nutrients increased with an elevation in runoffs, and Pearson analysis showed that the transport fluxes of TN and NO₃⁻-N had good correlations with runoff depth. The average transport fluxes of TP, TN, NH₄⁺-N and NO₃⁻-N were 34.10, 1 195.55, 1 006.62 and 52.38 g·hm⁻², respectively, and NO₃⁻-N was the main nitrogen form and accounted for 84% of TN.

Key words: Longhong ravine basin; non-point source pollution; rainstorm; runoff; nutrient loss

随着点源污染控制的不断完善, 面源污染已逐渐成为城市水体水质恶化的重要因素^[1]。研究表明, 暴雨产生的径流对地表有强烈的冲刷作用, 是非点源污染的主要动力^[2]。降雨强度的增大会导致流域氮素和泥沙的平均流失速率上升^[3], 引起的总磷流失占其雨季输出的 81%^[4]。杭州西湖作为我国著名的世界文化景观遗产, 其水体仍处于轻度富营养化状态, 流域内林地、茶园等主要的红壤土层薄且疏松, 极易受雨水冲刷淋溶而释出污染物, 其地表径流已成为钱塘江引水外西湖入湖污染物的最大来源^[5]。

目前, 西湖富营养化问题的研究大多集中于湖泊内源污染及引水水体本身的水质等, 而对于入湖溪流及其流域对西湖水质影响的研究较少^[6~9]。人

工模拟暴雨虽然可较好地研究土壤特征、管理措施、降雨时长等因素对降雨径流中污染物流失的影响规律^[10,11], 但人为模拟条件与自然降雨状态在降雨属性方面存在很大差异, 难以准确反映流域尺度下暴雨径流中营养盐的输出情况^[12]。本研究通过对西湖入湖溪流之一的龙泓涧流域外鸡笼山集水区在自然暴雨条件下的实时监测, 探讨不同暴雨降雨条件下氮磷的流失特征, 以期对西湖流域非点源污染控制提供科学依据。

收稿日期: 2015-07-27; 修订日期: 2015-09-08

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51308501); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101-007-005); 浙江省环境保护科研计划项目 (2011B16)

作者简介: 杨帆 (1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为非点源污染, E-mail: yf20131030@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jyf@zjut.edu.cn

1 研究区域现状

西湖景区现有金沙涧、龙泓涧、赤山泉、长桥溪等入湖溪流,流域面积约 27.2 km². 龙泓涧流域位于景区西部(30°13'N,120°06'E),地势西高东低,为丘陵小流域,海拔高度 6~276 m(如图 1). 流域属于亚热带季风性湿润气候,年均气温 16.5℃,降雨主要集中在 4~9 月,多年平均降雨量 1 454.4 mm. 基于龙泓涧数字高程模型(digital elevation model, DEM)和实地调查,将龙泓涧流域分为里鸡笼山集水区和外鸡笼山集水区. 如图 2 所示,运用西湖流域 1:10 000 地形图并结合 Google Earth 影像分析^[13]和实地调查获得外鸡笼山集水区面积为 2.82 km²,其中林地 2.22 km²,茶园 0.41 km²,居住地 0.18 km²,其他 0.01 km². 流域内茶园每年定期施肥两次,第 1 次施肥在 3 月下旬至 5 月下旬,主要为复合肥 1 100 kg·hm⁻²;第 2 次为秋季深耕施肥,于 10 月至 11 月施入有机肥 8 000 kg·hm⁻².

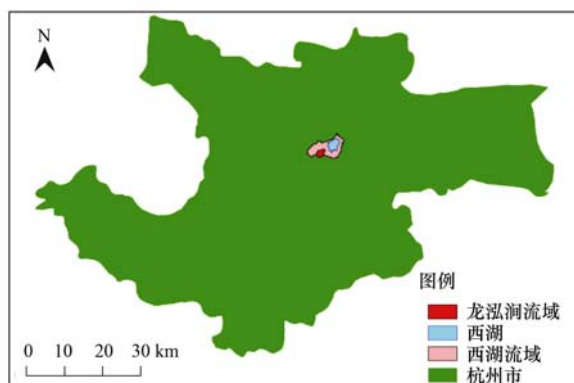


图 1 龙泓涧流域位置示意

Fig. 1 Location of Longhong ravine watershed area

2 研究方法

2.1 降雨径流量测定

降雨数据采用浙江省水雨情信息展示系统中离研究区域最近的梅家坞监测站(站号 70156450)为实时降雨量数据的来源(<http://www.zjsq.net.cn:8010/webwarn/>). 外鸡笼山集水区没有任何工业污染源,地表径流汇集后从同一出水口流出,因此出水口处的水质状况可以代表该流域的非点源污染状况. 在外鸡笼山出水口设置表面经光滑处理的薄壁矩形堰(长 1.5 m、深 0.5 m)以保证对自然水流无较大影响,同时在监测断面放置水位自动监测仪实时记录水位变化,通过计算获得实时径流量.

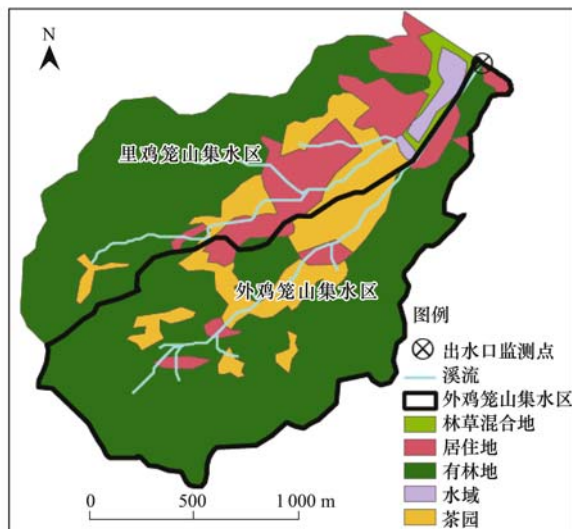


图 2 龙泓涧流域土地利用类型分布示意

Fig. 2 Land use types of the Longhong ravine watershed area

2.2 水样采集与分析

在降雨开始时的前 2 h 每隔 0.5 h 采集瞬时水样一次,其后每隔 1 h 采样直至降雨结束,并根据降雨强度和时长适当调整采样频次. 所有径流样品经酸化后置于便携式储柜中,按照文献[14]分析其 TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TP 等含量.

2.3 数据计算和处理方法

次降雨径流中污染物的平均浓度(EMC)可以用来表示次降雨径流的污染状况^[15,16]. 其值用污染物总通量同径流总量的比值来确定:

$$EMC = \frac{M}{V}$$

其中:

$$V = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{V_i + V_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i$$

$$M = \sum_{i=1}^{i=n-1} \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \cdot \frac{V_i + V_{i+1}}{2} \cdot \Delta t_i$$

式中, M 为污染物总通量(g), V 为径流总量(m³), c_i 为污染物在样本 i 监测时的浓度(mg·L⁻¹), V_i 为样本 i 在监测时的流量(m³·s⁻¹), Δt_i 是样本 i 和 $i+1$ 的时间间隔(s). 暴雨径流初期往往携带有大量的污染物质,形成初期冲刷效应^[17]. 国内外学者对初期冲刷效应有不同的判定方法^[18],本研究采用 Geiger^[19]提出的 $M(V)$ 曲线即基于累积径流量及污染物累积负荷量绘制的无量纲曲线来对比不同降雨事件的初期冲刷效应. 污染物累积负荷比例 $F(\%)$ 和暴雨径流累积比例 $Q(\%)$ 为:

$$F = \frac{m(t)}{M} = \frac{\int_0^t c_i V_i dt}{M}$$

$$Q = \frac{v(t)}{V} = \frac{\int_0^t V_t dt}{V}$$

式中, $m(t)$ 为 0 ~ t 时刻污染物累积负荷(g), M 次降雨污染负荷(g), $v(t)$ 为至 t 时刻累积径流量(m^3), V 为径流总量(m^3). 以 Q 值作为横坐标值, 以 F 值作为纵坐标值作图即可得 $M(V)$ 曲线. 当曲线位于 45° 对角线上方时则表示发生了初始冲刷, 曲线与对角线垂向最远距离越大则初始冲刷效应越强.

采用 K-S 方法检验数据的正态分布性, 以满足 Pearson 相关分析的数据统计假设, 数据统计分析采用 SPSS 19.0 进行

3 结果与讨论

3.1 降雨-径流变化

于 2014 年 7 月 ~ 2015 年 7 月全年实地观测的 15 次自然降雨事件中, 选取 2014 年最后一次暴雨 (编号为 2014/9/22)、2015 年首场暴雨 (编号为 2015/4/6) 及研究期内最强降雨 (编号为 2015/6/7) 等 3 场暴雨为考察对象. 其中 2014/9/22 受 2014 年第 16 号台风 "凤凰" 的影响降雨雨量大、历时长;

2015/4/6 降雨为杭州入降雨期以来的首场暴雨, 其降雨比较集中且降雨强度大; 2015/6/7 次降雨为春茶结束施肥后的首场特大暴雨. 表 1 和图 3 分别显示了这 3 场不同降雨条件下, 龙泓涧雨量、雨强、径流等主要降雨特征值的实时变化.

龙泓涧径流的变化主要受降雨特征的影响, 由图 3 可知: ① 3 场降雨事件都有多个雨强峰值, 径流曲线相应显示多个峰值, 并且在降雨峰值后径流量都有明显增大, 显示了雨强对径流的决定作用, 符合径流的峰值一般出现在最大雨强之后的一般规律^[20]; ② 2014/9/22 降雨事件径流的最大峰值出现在雨强峰值后 3h, 峰值流量为 $1.29\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 而后两次降雨事件径流最大峰值出现在雨强峰值后 1h, 峰值流量分别为 $1.15\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $1.97\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 其中 2015/4/6 和 2014/9/22 两次降雨事件前 5 d 的降雨量相差不大, 这表明径流峰值延滞于雨强峰值的时间与当次雨情密切相关. 2014/9/22 次降雨雨强呈多峰型缓慢增强, 而另两次降雨的强降雨集中在降雨前期, 土壤水分迅速饱和, 入渗率迅速降低^[21], 形成超渗产流^[22,23], 所以在降雨后期一旦雨强再次变大, 径流量则呈现出直线上涨的趋势, 因此径流峰值也在降雨峰值后迅速产生, 这与其他流域有相似的特征^[24,25].

表 1 三场降雨的特征值
Table 1 Characteristics of three rainfalls

降雨编号	降雨量/mm	降雨历时/h	最大雨强 /mm·h ⁻¹	平均雨强 /mm·h ⁻¹	监测次数/次	前 5 日降雨量 /mm
2014/9/22	87.5	32	7	2.73	44	53
2015/4/6	72.2	19	15	3.8	22	39
2015/6/7	141.5	43	16.5	3.72	55	22

3.2 营养盐流失随径流的变化

影响非点源污染物排放的因素很多, 包括前期降雨量、降雨特征、土地利用方式、下垫面等, 而径流中污染物浓度取决于降雨径流量、施肥量、降雨间隔时间等因素^[26]. 图 4 为不同降雨条件下龙泓涧营养盐浓度随径流量的持续变化情况, 表明各水质指标在降雨初期随着暴雨径流对流域内不透水路面^[27]、林地、茶园等透水路面^[28,29]的冲刷、浸提等效应影响呈现较明显增大.

2015/6/7 次降雨总氮和硝态氮的浓度在降雨开始后呈波浪形缓慢增长, 而另两次降雨总氮和硝态氮在降雨开始后迅速达到浓度峰值, 这主要是由于这两次降雨事件前期降雨量多, 土壤含水量多, 降低了水分的入渗率, 因此通过径流流失的硝态氮就多^[30]. 进入涨水阶段, 总氮和硝态氮浓度呈现出波

浪型增长的趋势, 主要是由于 3 场降雨事件雨量较大, 使得降雨的浸提作用和稀释作用交替变化. 随着径流量的不断增大, 总氮和硝态氮浓度在径流峰值后都有一个明显下降, 随后又产生一个明显的浓度峰值, 这是因为在径流峰值时径流的稀释作用占主导地位^[31], 而后由于径流减少, 滞后的壤中流占比增加, 而壤中流硝态氮含量相对较高^[32], 使得总氮和硝态氮浓度有不同程度的上升.

图 4 中 2015/6/7 次降雨中总磷和氨氮的峰值浓度要明显大于其他两次降雨事件, 并且在降雨初期出现了氨氮浓度比硝态氮浓度高的现象. 经调查发现这主要是由于龙泓涧流域的茶园每年会在春茶结束后的 5 月施有机肥, 而 2015 年 5 月降雨量又偏少, 只有 107.5 mm, 因此 2015/6/7 的大暴雨事件在降雨初期对氮磷的浸提作用非常明显, 使得总磷和

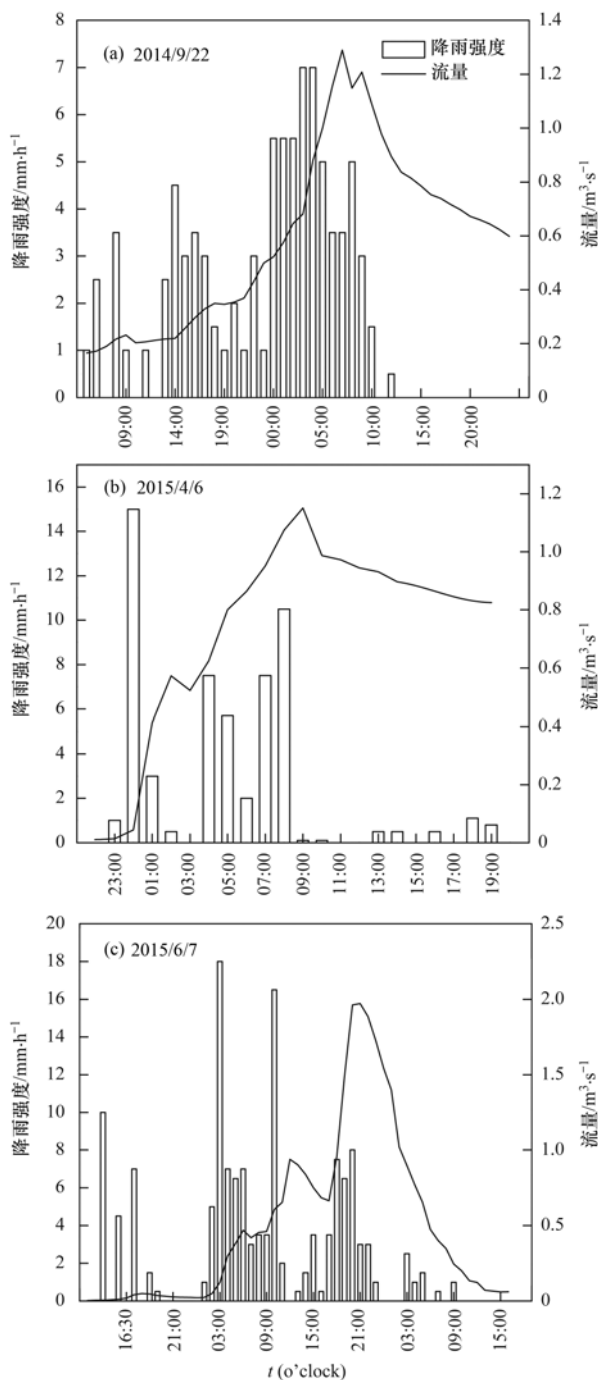


图3 三场降雨强度及径流量变化

Fig. 3 Real-time changes of rainfall intensity and runoff during three rainfalls

氨氮的含量迅速增大,而随后在径流的稀释作用下迅速下降。

图5 进而显示了3场降雨事件的氮磷累计负荷曲线和雨水初期冲刷效应的关系,如图所示 $M(V)$ 曲线与对角线垂向距离越远说明初期冲刷效应越明显,结果表明各降雨条件下总磷和氨氮的初期冲刷作用最明显,而总氮和硝态氮的初期冲刷作用不明

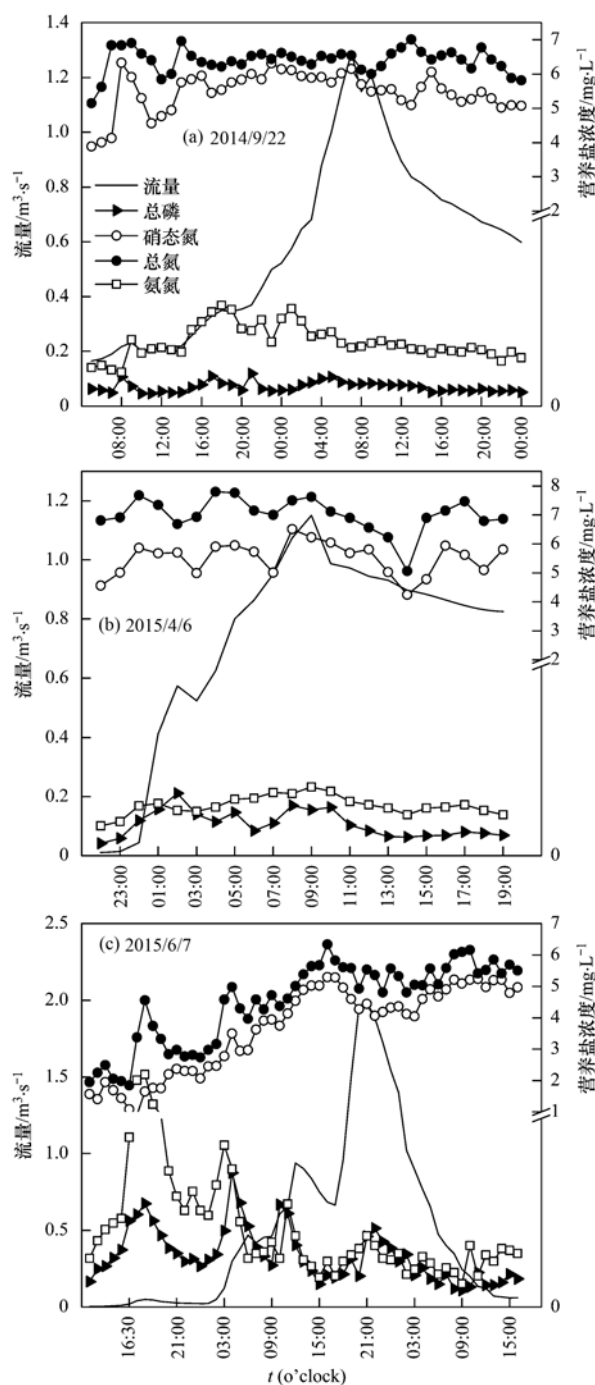


图4 营养盐浓度随径流量的变化

Fig. 4 Variation of nutrient concentrations during tree runoffs

显。这主要是因为降雨初期暴雨对地面的冲刷作用,使得泥沙等悬浮物在降雨初期大量进入地表径流,而磷素的流失以泥沙吸附的颗粒态磷为主^[33],氨氮主要吸附于土壤颗粒表面进行输移^[34]。

3.3 氮磷迁移通量分析

3场暴雨径流的次降雨径流平均浓度(EMC)如图6所示,各污染物浓度指标中总氮和硝态氮的最高值在2015/4/6事件中产生,并且2014/9/22和

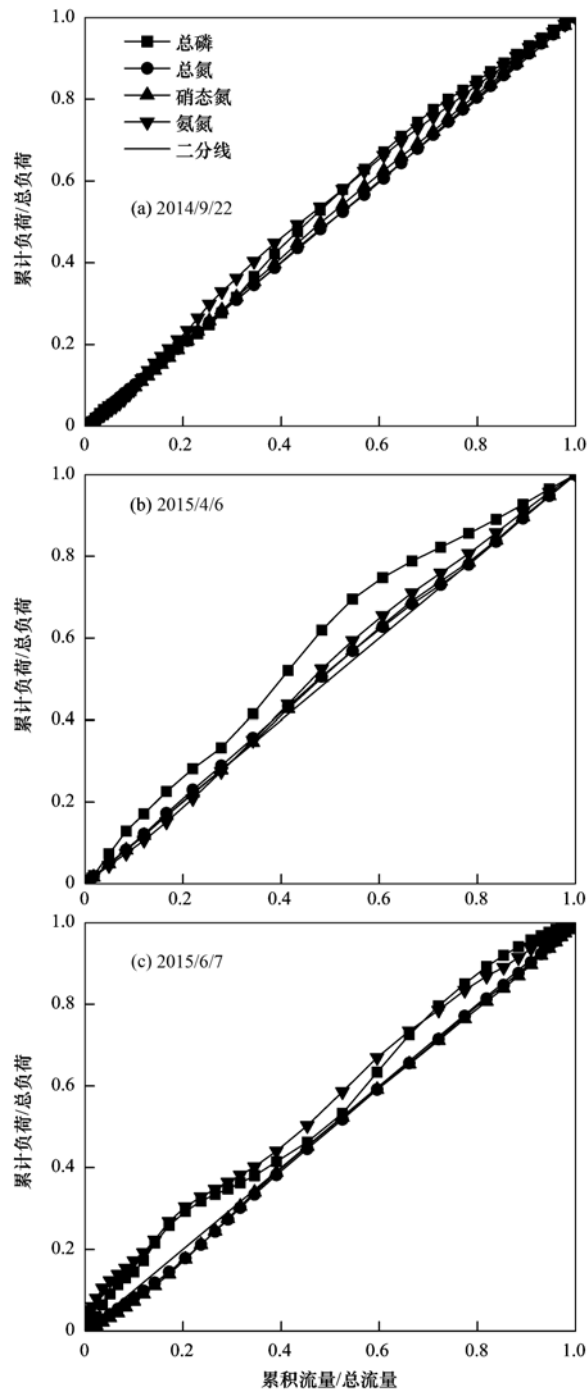


图5 氮磷累积负荷累积曲线

Fig. 5 Cumulative load curves of nitrogen and phosphorus

2015/4/6 降雨事件总氮和硝态氮的 EMC 要明显大于 2015/6/7 次降雨事件,主要是由于这两次降雨事件的前期降雨量都比较大,土壤湿润,降雨对土壤中氮的浸提作用比较明显^[35],且前两次降雨特征(最大雨强、降雨量、径流量、径流时间、降雨时间)都没有 2015/6/7 次降雨事件大.如表 2 所示,通过 SPSS19 软件对 3 次暴雨事件中各污染物 EMC 与降雨特征进行 Pearson 相关性分析,表明 3 次暴雨事件中各形态氮素的 EMC 值与降雨量、降雨历时、最大雨强和平均雨强负相关,与前 5 d 降雨量表现为正相关,而总磷则与之相反,这与其他研究有相似的结果^[36,37];总磷 EMC 的最大值出现在 2015/6/7 次降雨事件,主要是因为前期施肥以及龙泓涧流域土壤的持磷效果差^[38],磷素随雨水迅速进入径流中.

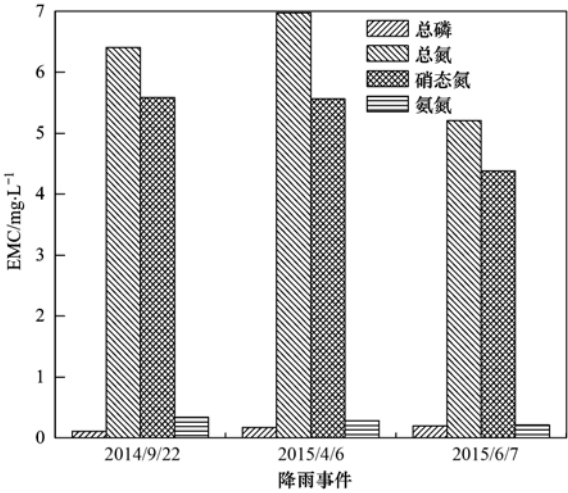


图6 氮磷 EMC 值

Fig. 6 EMC values of nitrogen and phosphorus

由表 3 各污染物迁移通量发现,总氮和硝态氮的迁移通量都与径流深有很好的相关性, Pearson 分析显示,总氮和硝态氮与径流深的相关性分别达到了 0.998 和 0.992,而总磷和氨氮与径流深的相关性相对较差,分别为 0.968 和 0.913,说明不同强度降雨事件中总氮和硝态氮受径流深的影响很大,而总磷和氨氮除受降雨条件的影响外还受前期

表 2 各形态营养盐 EMC 与降雨特征的相关系数

Table 2 Correlative coefficients between EMC of different nutrient concentrations and characteristics of three rainfalls

	降雨量	降雨历时	最大雨强	平均雨强	前 5 d 的降雨量
总磷	0.526	0.193	0.995	0.952	-0.944
总氮	-0.994	-0.968	-0.347	-0.139	0.708
硝态氮	-0.975	-0.833	-0.633	-0.454	0.899
氨氮	-0.771	-0.491	-0.913	-0.805	1.000

表 3 氮磷迁移通量对比
Table 3 Comparison of transport fluxes of nitrogen and phosphorus

事件	径流深/mm	迁移通量/ $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$			
		总磷	总氮	硝态氮	氨氮
2014/9/22	16.63	17.51	1 066.18	929.50	56.42
2015/4/6	9.63	17.16	694.94	554.76	28.10
2015/6/7	30.04	67.62	1 825.53	1 535.60	72.62
均值	20.54	34.10	1 195.55	1 006.62	52.38

施肥量和土壤特性的影响. 在各种氮素中,可溶性的硝态氮占总氮的比例最大,为 84%.

4 结论

(1)暴雨雨强的特性对龙泓涧径流曲线峰值和形状具有决定作用,对于强降雨主要集中在降雨前期的事件,在降雨中后期产生的径流峰值滞后于雨强峰值的时间就较短.

(2)次降雨径流事件的初期冲刷效应受前期降雨量的影响较大,前期降雨量越少,总磷和氨氮的初期冲刷效应越明显;对于暴雨事件,在径流退水阶段,高浓度硝态氮的壤中流会使径流中总氮和硝态氮再产生一个浓度峰值.

(3)3 次暴雨事件中各形态氮素的 EMC 值均与降雨量、降雨历时、最大雨强和平均雨强负相关,与前 5 日降雨量表现为正相关,而总磷的 EMC 值与氮素有相反的特征.

(4)各氮素和总磷的迁移通量都随降雨量的增大而增大,总磷、总氮、硝态氮和氨氮的平均迁移通量分别为 34.10、1 195.55、1 006.62 和 52.38 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,总氮和硝态氮的迁移通量与径流深有很好的相关性,相关系数分别达到 0.998 和 0.992,硝态氮占到总氮的 84%.

参考文献:

[1] 姜庆虎,刘艳芳,黄浦江,等. 城市湖泊流域面源污染的源-汇效应研究——以武汉市东湖为例[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(3): 469-474.

[2] 黄俊,张旭,彭炯,等. 暴雨径流污染负荷的时空分布与输移特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(2): 255-258.

[3] 陈玲,刘德富,宋林旭,等. 不同雨强下黄棕壤坡耕地径流养分输出机制研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2151-2158.

[4] 李振炜,于兴修,刘前进,等. 沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1152-1158.

[5] Jin Z F, Chen L X, Li F L, *et al.* Effects of water transfer on water quality and estimation of the pollutant fluxes from different sources into West Lake, Hangzhou City, China [J]. Environmental Earth Sciences, 2015, **73**(3): 1091-1101.

[6] 吴芝瑛,虞左明,盛海燕,等. 杭州西湖底泥疏浚工程的生态效应[J]. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 277-284.

[7] 鲁佳妮,董春颖,刘静静,等. 西湖北里湖沉积物磷形态分布及其与间隙水磷的关系[J]. 环境污染与防治, 2012, **34**(12): 35-40.

[8] 毛成贵,余雪芳,邵晓阳. 杭州西湖总氮、总磷周年变化与水体富营养化研究[J]. 水生态学杂志, 2010, **3**(4): 1-7.

[9] 朱军政,韩曾萃. 西湖引水淡化总磷浓度效果研究[J]. 水力发电学报, 2010, **29**(3): 137-142.

[10] 胡建,郭太龙,卓慕宁,等. 华南红壤坡面产流产沙过程模拟降雨试验研究[J]. 生态环境学报, 2013, **22**(5): 787-791.

[11] Liu R, Wang J, Shi J, *et al.* Runoff characteristics and nutrient loss mechanism from plain farmland under simulated rainfall conditions[J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 1069-1077.

[12] Kleinman P J A, Sharpley A N, Veith T L, *et al.* Evaluation of phosphorus transport in surface runoff from packed soil boxes [J]. Journal of Environmental Quality, 2004, **33**(4): 1413-1423.

[13] 吕雄杰,陆文龙,宋治文,等. QuickBird 影像在城市土地利用现状调查中的应用研究[J]. 天津农业科学, 2008, **14**(2): 12-15.

[14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997.

[15] 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.

[16] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water [J]. Journal of Environmental Engineering, 1997, **123**(2):134-143.

[17] Ma Z B, Ni H G, Zeng H, *et al.* Function formula for first flush analysis in mixed watersheds: A comparison of power and polynomial methods[J]. Journal of Hydrology, 2011, **402**(3-4): 333-339.

[18] 李春林,刘淼,胡远满,等. 沈阳市降雨径流初期冲刷效应[J]. 生态学报, 2013, **33**(18): 5952-5961.

[19] Geiger W. Flushing effects in combined sewer systems[A]. In: Gujer W, Krejci V (eds.). Proceedings of the 4th International Conference Urban Drainage[C]. Lausanne, Switzerland, 1987. 40-46.

[20] 李瑞玲,张永春,刘庄,等. 太湖缓坡丘陵地区雨强对农业非点源污染物随地表径流迁移的影响[J]. 环境科学, 2010, **31**(5): 1220-1226.

- [21] 沈紫燕, 王辉, 平李娜, 等. 前期土壤含水量对粘性红壤产流产沙及溶质运移的影响[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(1): 58-62.
- [22] McDowell R W, Sharpley A N. The effect of antecedent moisture conditions on sediment and phosphorus loss during overland flow: Mahantango Creek catchment, Pennsylvania, USA [J]. Hydrological Processes, 2002, **16**(15): 3037-3050.
- [23] 邵明安, 张兴昌. 坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. 世界科技研究与发展, 2001, **23**(2): 7-12.
- [24] 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 等. 三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(8): 3035-3042.
- [25] 于兴修, 李振伟, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征[J]. 环境科学, 2012, **33**(8): 2644-2651.
- [26] Semhi K, Suchet P A, Clauer N, *et al.* Impact of nitrogen fertilizers on the natural weathering-erosion processes and fluvial transport in the Garonne basin [J]. Applied Geochemistry, 2000, **15**(6): 865-878.
- [27] Maniquiz M C, Lee S, Kim L H. Multiple linear regression models of urban runoff pollutant load and event mean concentration considering rainfall variables [J]. Journal of Environmental Sciences, 2010, **22**(6): 946-952.
- [28] 张恒, 曾凡棠, 房怀阳, 等. 连续降雨对淡水河流域非点源污染的影响[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(5): 927-934.
- [29] 赵越, 李泽利, 刘茂辉, 等. 模拟降雨条件下坡度对茶园红壤氮素流失影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(5): 992-998.
- [30] 张长保, 王全九, 樊军, 等. 模拟降雨下初始含水量对砂黄土硝态氮迁移特征的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, **14**(5): 894-899.
- [31] 李定强, 王继增, 万洪富, 等. 广东省东江流域典型小流域非点源污染物流失规律研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, **4**(3): 12-18.
- [32] 郑海金, 胡建民, 黄鹏飞, 等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(6): 41-45, 70.
- [33] Foster I D L, Chapman A S, Hodgkinson R M, *et al.* Changing suspended sediment and particulate phosphorus loads and pathways in underdrained lowland agricultural catchments; Herefordshire and Worcestershire, U. K. [A]. In: Kronvang B (ed.). The Interactions between Sediments and Water [M]. Netherlands: Springer, 2003. 119-126.
- [34] 周崧, 和树庄, 胡斌, 等. 滇池柴河小流域暴雨径流氮磷的输移过程研究[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(1): 162-168.
- [35] 杜立宇, 刘艳茹, 董淑萍, 等. 太子河小流域氮素输出特征研究[J]. 水土保持通报, 2014, **34**(1): 268-272.
- [36] 罗专溪, 朱波, 王振华, 等. 川中丘陵区村镇降雨特征与径流污染物的相关关系[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(11): 1032-1036.
- [37] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff [J]. Water Research, 2000, **34**(6): 1773-1780.
- [38] 唐孟成, 俞秋红, 王寿祥. 雨后入湖溪流磷污染对西湖的影响及其对策[J]. 环境污染与防治, 2003, **25**(1): 12-15.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行