

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM<sub>2.5</sub>的源贡献分析..... 李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)

华北地区乡村站点(曲周)夏季PM<sub>2.5</sub>中二次无机组分的生成机制与来源解析 ..... 陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)

成都市大气PM<sub>2.5</sub>中有机磷阻燃剂的污染水平及来源 ..... 印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)

不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究 ..... 黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)

北京地区大气消光特征及参数化研究 ..... 陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)

光助芬顿反应催化降解气体中甲苯 ..... 郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)

遗体火化二噁英类排放水平及影响因素 ..... 尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)

我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析 ..... 张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商细彬, 曹阳, 张君 (3603)

太湖湖表反照率时空特征及影响因子 ..... 曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)

基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演 ..... 王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)

河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤孔隙水溶解性甲烷时空特征 ..... 杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)

石家庄市区土壤水分运移的稳定同位素特征分析 ..... 陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)

长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素 ..... 白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)

三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态 ..... 王晓锋, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)

湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系 ..... 王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)

水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移 ..... 李邵龙, 陈道毅 (3683)

城市道路径流的排污特征 ..... 武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)

杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征 ..... 段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)

海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律 ..... 杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)

天然有机物和电解质对水中C<sub>60</sub>凝聚行为的影响 ..... 方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)

钆改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果 ..... 王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)

污水管网中无机氮类营养盐迁变规律 ..... 金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)

微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究 ..... 朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)

倒置A<sup>2</sup>/O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性 ..... 王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)

高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响 ..... 李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)

苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性 ..... 李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)

驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径 ..... 宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)

苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响 ..... 杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)

连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化 ..... 鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)

FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化 ..... 马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)

污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究 ..... 刘吉宝, 李亚明, 吕镗, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)

残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响 ..... 贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)

大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征 ..... 丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)

缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响 ..... 祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)

三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制 ..... 吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)

坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响 ..... 冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)

不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响 ..... 沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)

有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险 ..... 纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)

改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响 ..... 陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)

菹草乙酸酯组分抑藻活性物质的分离纯化和鉴定 ..... 孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)

血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险 ..... 李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)

生物传感细胞ADP1<sub>p</sub>WHlux在水环境急性毒性检测中的应用 ..... 唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)

虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况 ..... 高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)

纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应 ..... 刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)

黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用 ..... 陈亚楠, 袁玲 (3892)

发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性 ..... 谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)

搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯 ..... 高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)

COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析 ..... 李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)

养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用 ..... 丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)

土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展 ..... 邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)

《环境科学》征订启事 (3553) 《环境科学》征稿简则 (3589) 信息 (3705, 3755, 3763, 3800)

# 杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征

段圣辉<sup>1,2</sup>, 赵钰<sup>2</sup>, 单保庆<sup>2\*</sup>, 唐文忠<sup>2</sup>, 张文强<sup>2</sup>, 张淑珍<sup>3</sup>, 郎超<sup>4</sup>

(1. 中国科学技术大学生命科学学院, 合肥 230026; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 辽宁大学环境学院, 沈阳 110036; 4. 河北工程大学城市建设学院, 邯郸 056038)

**摘要:** 为探讨南方经济发达地区农村暴雨径流污染特征, 选择杭州市余杭区的漕桥与蒲家头两个典型建制村, 采集了屋顶、场院、农田和污水汇集口这4种下垫面的3次降雨过程中的径流水样, 重点分析了氮、磷和重金属元素(Mn、Cu、Zn、Ni、Cr、Cd、As、Pb)浓度, 对比了不同下垫面3次暴雨径流中污染物的浓度差异和年污染负荷。结果表明, 在漕桥暴雨径流中, TSS、COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP和TN的平均浓度分别为16.19、21.01、0.74、1.39和2.39 mg·L<sup>-1</sup>; 在蒲家头暴雨径流中, TSS、COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP和TN的平均浓度分别为3.10、15.69、0.90、0.78和3.58 mg·L<sup>-1</sup>; 暴雨径流中各重金属浓度均低于国家地表水Ⅱ类标准。与地表水标准比较, 漕桥和蒲家头TP的EMC分别超出地表水Ⅴ类标准1.9倍、3.5倍, TN分别超标1.8倍、1.2倍。另外, 农田下垫面中的TSS和COD年污染负荷最高。

**关键词:** 农村; 暴雨径流; 下垫面; 降雨特征; 污染特征

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3697-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.018

## Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou

DUAN Sheng-hui<sup>1,2</sup>, ZHAO Yu<sup>2</sup>, SHAN Bao-qing<sup>2\*</sup>, TANG Wen-zhong<sup>2</sup>, ZHANG Wen-qiang<sup>2</sup>, ZHANG Shu-zhen<sup>3</sup>, LANG Chao<sup>4</sup>

(1. School of Life Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. School of Environmental Science, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 4. College of Urban Construction, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

**Abstract:** In order to investigate the pollution characteristics of stormwater runoff in the southern developed rural region, the runoff samples were collected from four different underlying surfaces during three storm events in Caoqiao and Pujia Tou, which are two typical villages and are located in Yuhang District of Hangzhou. The content of nutrition (nitrogen and phosphorus) and heavy metals (Mn, Cu, Zn, Ni, Cr, Cd, As, Pb) in the samples were analyzed, and the difference of EMC (event mean concentration) and pollution load of the contaminants in the runoff on different underlying surfaces were compared. The results showed that the EMC of TSS, COD, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, TP and TN were 16.19, 21.01, 0.74, 1.39 and 2.39 mg·L<sup>-1</sup> in the Caoqiao, respectively; as to Pujia Tou, they were 3.10, 15.69, 0.90, 0.78 and 3.58 mg·L<sup>-1</sup>, respectively. The content of heavy metals was all lower than the national surface water quality of two type water in the runoff. Compared with the quality standards for surface water, the EMC of TP was 1.9 times and 3.5 times higher and TN was 1.8 times and 1.2 times higher in two areas. Besides, the pollution loads of TSS and COD were the highest in farmland.

**Key words:** rural; storm runoff; underlying surface; rainfall characteristics; pollution characteristics

农村暴雨径流污染是一种典型的非点源污染<sup>[1]</sup>, 主要是指大气、地面和土壤中的污染物, 在雨水的淋溶和冲刷作用下, 通过地表径流进入受纳水体而引起的水体污染<sup>[2-4]</sup>, 具有随机性、偶然性、广泛性、难处理性等特点<sup>[5]</sup>。农村暴雨径流中污染物来源主要有村镇生活污水、农村固体废弃物、农田农药化肥、水土流失等<sup>[6]</sup>。这些污染物通过不透水区地表径流、透水区的下渗等途径进入河道、湖泊及地下水<sup>[7, 8]</sup>, 造成水体富营养化、重金属、有机污染物污染, 严重影响了地表水和地下水水质。目前国外对暴雨径流污染特征的研究主要集中在城

市工业区、商业区、生活区<sup>[9, 10]</sup>, 我国很多地区, 如北京、上海、广州、厦门、重庆、武汉等也相继开展了地表径流污染研究<sup>[11-15]</sup>, 但多侧重城市暴雨径流水质特性、初始冲刷效应、地表材料和交通流量对径流水质影响的研究<sup>[16]</sup>; 同时对农村暴雨径流的研究也集中在对农田径流污染特征的研究<sup>[17]</sup>。针对南方发达地区农村不同下垫面暴雨径流污染特

收稿日期: 2015-01-28; 修订日期: 2015-05-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAJ24B01)

作者简介: 段圣辉(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为流域水污染过程, E-mail: duanshh2013@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: bqshan@cees.ac.cn

征、污染负荷及其污染源解析的相关研究还比较缺乏。

随着我国经济社会的发展及农村工业化水平的提高<sup>[18]</sup>,南方发达地区农村表现出一些与城市相似的特点:不透水面积增大、工业企业增加。同时,农村高效农业产业化的提升及集约化养殖场的发展,使农药、化肥用量加大,废弃物增多,使发达农村地区暴雨径流污染除了氮磷带来的富营养化外,还增加了重金属和新型污染物等有害物质。但是,农村和城市在气候条件、下垫面性质、径流特点等方面的不同,又使其非点源污染表现出与城市不同的特征。因此,本研究监测了浙江省杭州市余杭区径山镇漕桥与蒲家头两个典型建制村的4种下垫面类型屋顶、场院、农田、污水汇集口暴雨径流的水质、水量及降雨特征等参数,对发达农村暴雨径流不同下垫面污染输出特征及重金属的来源进行分析,以为南方发达农村暴雨径流污染评价及治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

径山镇位于浙江省杭州市余杭区西部,地处北亚热带南缘季风气候区,年平均气温 15.3 ~ 16.2℃,受梅雨和台风的影响,降雨主要集中在4~10月,其占全年降雨量的70%,年平均雨量为1391.8 mm。从土地利用方式来看,研究区域以林地和耕地为主,其次是草地、居民地、工矿和水体等。水体以北苕溪和中苕溪贯穿径山镇,是径山镇暴雨径流的主要受纳水体。另外,径山镇位于余杭区西部丘陵地带,受地形地貌影响,散点式和多户聚集型村落是其主要的村落形态。因此,本研究选取径山镇两个典型村落漕桥和蒲家头作为研究区域,漕桥是多户聚集型村落,总面积约452 hm<sup>2</sup>,硬化程度低,卫生状况较差,垃圾路面堆积,不具备完善的排水管道,雨水通过地表径流进入河道;蒲家头是散点式村落,占地面积约266 hm<sup>2</sup>,人口密度小,森林及绿地覆盖面积较大。在研究区域内平面屋顶和斜面屋顶材料分别以混凝土和琉璃瓦为主;场院水泥硬化;污水汇集口为漕桥农村径流的主要汇集单元,周边为道路和机械加工厂;蒲家头排水口为单户径流汇集区;农田为土壤下垫面。

根据研究区域特点,本研究在漕桥共设置采样点7个,包括平面屋顶S1、斜面屋顶S2、场院S3、农田S4、污水汇集口S5、总汇集口S6;蒲家头单户

设置采样点为平面屋顶S7、场院S8、排水口S9。采样点分布示意图如图1所示。

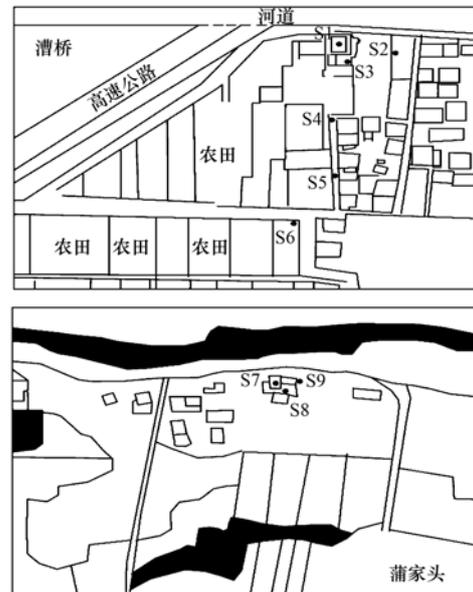


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Schematic graph of sampling sites

### 1.2 样品采集

选取屋顶、场院、污水汇集口、农田这4种不同性质的农村下垫面收集径流水样。前3种为人工下垫面,农田为自然下垫面。暴雨产生时,屋顶、场院容易产生径流,在屋顶雨水管道底部和场院出水口处放置收集桶,全过程收集屋顶和场院流出的雨水;农田相对来说产流速度较慢,污水汇集口则为一定区域内径流汇集后的排水通路,分别在农田汇水口和污水汇集口断面处以同样的方法收集雨水。

于7~8月,对研究区域内3场暴雨降雨事件进行监测,基本特征见表1。暴雨径流产生后,在各下垫面汇水口处采取径流水样于聚乙烯样品瓶中,前30 min每5 min采样一次,30 min后为每10 min采样一次,直至径流结束,样品采集后立即送回实验室进行分析。取样的同时采用容积法监测每个径流水样所对应的流量,并在取样的同时采用自动雨量计(TPJ-32)在监测点附近同步记录降雨特征。

### 1.3 样品分析

监测指标包括pH、总悬浮固体(TSS)、化学需氧量(COD)、总磷(TP)、活性磷(SRP)、总氮(TN)、氨氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)和溶解态重金属(Mn、Cu、Zn、Ni、Cr、Cd、As和Pb)等。按照国家水质分析标准<sup>[19]</sup>,pH用便携式水质分析仪(美国YSI professional plus)测定;TSS采用重量法测定;COD采用哈希比色法测定;TP采用过硫酸钾加氢氧化

表 1 降雨特征参值

Table 1 Characteristics of rainfalls

降雨日期	前期晴天数/d	降雨量/mm	降雨历时/h	平均降雨强度/mm·h <sup>-1</sup>
7月18日	7	13.5	2.2	6.14
8月2日	6	12.4	1.8	8.89
8月14日	10	24.2	3.3	7.56
平均值	7.67	16.7	2.4	6.86

钠消煮后钼酸盐比色法测定(700 nm),SRP 采用钼酸盐比色法(700 nm),其中,测定 DTP 和 SRP 的水样用 0.45 μm 孔径滤膜过滤;TN 采用进口过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂分光光度法;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用紫外分光光度法. 溶解态重金属采用 ICP-MS (7500a, Agilent Technologies, USA) 进行测定.

研究区域采样点分布图采用 AutoCAD 绘制. 实验数据运用 Excel 2013、Origin 8.5 与 PASW 19.0 进行统计与分析.

#### 1.4 数据处理方式

由于降雨特征、集水区特征和污染物本身性质影响,一次径流污染过程中污染物浓度变化范围大,随机性强. 为了表征一次径流污染事件的污染程度以及对受纳水体的影响,美国 EPA 提出了一次暴雨径流污染的平均浓度(event mean concentration, EMC)作为评价径流水质的标准,即总污染量与总径流量比<sup>[20]</sup>,EMC 可表达为:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{t_r} c_t Q_t dt}{\int_0^{t_r} Q_t dt} \approx \frac{\sum c_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \quad (1)$$

式中,EMC 为暴雨径流污染物平均浓度,mg·L<sup>-1</sup>; M 为一次暴雨径流过程中污染物总量,g; V 为径流总量,m<sup>3</sup>; t<sub>r</sub> 为径流持续时间,min; c<sub>t</sub> 为 t 时刻污染物浓度,mg·L<sup>-1</sup>; Q<sub>t</sub> 为 t 时刻径流流量,m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>; Δt

为采样时间间隔,min.

用年污染负荷来衡量研究区域内暴雨径流污染物的输出<sup>[21]</sup>:

$$L = R \times P \times A \times EMC_s \quad (2)$$

式中,L 为年污染负荷,kg; R 为研究区域的年径流系数; P 为研究区域的年平均降雨量,mm; A 为研究区域的面积,km<sup>2</sup>; EMC<sub>s</sub> 为 3 次降雨的平均值. 其中,2 个研究区域的年径流系数是根据研究区域中不透水地表面积的比例计算的.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同下垫面暴雨径流中 pH 值及 TSS 污染特征

漕桥与蒲家头 3 次暴雨径流平均 pH 分别为 6.47 ± 0.06 (n = 92)、6.43 ± 0.04 (n = 49),为中性偏酸. 漕桥斜面屋顶(S2)平均 pH 最低,为 5.47. 如图 2 所示,不同下垫面类型以及相同下垫面不同区域 TSS 含量具有明显的差异. 各类下垫面中,漕桥场院(S3)的 TSS 最高,达到 45.67 mg·L<sup>-1</sup>,斜面屋顶(S2)与污水汇集口(S5)相当;蒲家头各类下垫面 TSS 含量较低,均小于 10 mg·L<sup>-1</sup>.

黄剑锋等<sup>[22]</sup>研究发现苕溪流域地表水平均 pH 为 8.93,说明地表径流注入受纳水体可能导致河流 pH 降低,低 pH 将对河流生态系统中的不同生物类群产生影响;使底泥中的重金属溶解,对生物甚至人类造成危害;甚至引起水生生态系统的改变.

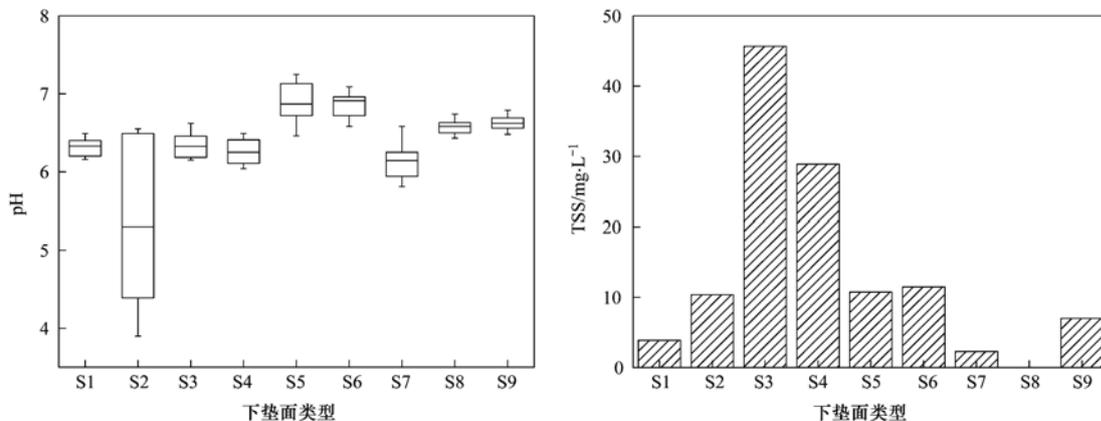


图 2 不同下垫面 pH 与 TSS 含量

Fig. 2 The pH and TSS content for different underlying surfaces

漕桥场院(S3)TSS 高的主要原因是其为硬化下垫面,通过交通、大气沉降及生活活动等因素带入大量颗粒性物质;而屋顶相对受人为干扰因素低,颗粒物主要来源于大气降尘;农田与汇集口主要受降雨强度与径流流量的影响,农田土质松软,经雨水淋洗,易冲刷出大量的固体颗粒物<sup>[23]</sup>. 蒲家头 TSS 含量较低,一方面是由于农户聚集度较低,受到人类活动的影响较小;另一方面是森林及绿地覆盖面积较大,大气降尘较少. 蒲家头场院(S8)TSS 含量最低,可能是该区域场院进行了良好的日常清扫.

## 2.2 不同下垫面暴雨径流中常规污染物污染特征

### 2.2.1 耗氧物质

漕桥与蒲家头暴雨径流污染物平均浓度在空间上具有差异性. 漕桥 COD 浓度范围 2.00 ~ 48.00  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为 21.01  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ;蒲家头 COD 浓度范围为 2.00 ~ 39.00  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,平均值为 15.69  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 2). 蒲家头 COD 较漕桥浓度变化范围

小,这主要是因为蒲家头村庄农户比例低,下垫面类型相对简单. 如图 3 所示,各下垫面暴雨径流中 COD 变化范围较大,其最大值均接近地表水 V 类标准(40.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),仅场院(S3)、农田(S4)、污水汇集口(S5)、总汇集口(S6)的 COD 最大值超过地表水 V 类标准,这可能与研究区域内晴天居民饮食过程中丢弃的垃圾和餐饮垃圾、餐饮用水的随意倾倒相关<sup>[24]</sup>.

漕桥和蒲家头  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的 EMC 分别为 0.74  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和 0.77  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,远低于地表水 V 类标准(2.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 与 COD 相比,由于污水汇集口不仅是漕桥暴雨径流的汇水通道,而且还接受大气的干湿沉降<sup>[25]</sup>,侯培强等<sup>[12]</sup>和张千千等<sup>[13]</sup>研究发现, $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 等污染物质主要来源于大气的干湿沉降,从而使污水汇集口(S5)和总汇集口(S6)  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量较高. 另外,降雨冲刷屋顶,携带长期以来积累的大量氮元素到径流中<sup>[26]</sup>,使蒲家头屋顶(S7)  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  含量高.

表 2 不同集水区暴雨径流污染物 EMC 与污染负荷/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$   
Table 2 EMC of runoff pollutants in different catchment areas/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

研究区域	类型	最小值	最大值	中值	平均值	标准差	V 类水 <sup>1)</sup>
漕桥	COD	2.00	48.00	18.00	21.01	11.91	40.0
	TP	0.050	5.500	1.275	1.390	0.121	0.4
	SRP	0.001	2.545	0.122	0.196	0.036	—
	TN	0.73	5.12	2.41	2.39	0.08	2.0
	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	0.15	4.54	0.56	0.74	0.07	2.0
蒲家头	COD	2.00	39.00	12.00	15.69	11.62	40.0
	TP	0.020	3.720	0.460	0.780	0.115	0.4
	SRP	0.001	0.651	0.056	0.092	0.017	—
	TN	0.73	12.00	2.62	3.58	0.33	2.0
	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	0.16	6.16	0.58	0.90	0.15	2.0

1) “—”表示无值

### 2.2.2 富营养物质

漕桥 TP 平均浓度约为蒲家头 2 倍, TN 平均浓度小于蒲家头(表 2). 另外,蒲家头和漕桥 TP 的 EMC 分别超出地表水 V 类标准 3.5 倍和 1.9 倍, TN 分别超标 1.2 倍和 1.8 倍,为研究区暴雨径流的主要污染物. 其中,氮污染物以溶解态占优,其中以氨氮、硝氮为主;磷污染物以颗粒态磷为主, SRP 含量较低,约占 TP 的 14%.

通过对比两个村落不同下垫面氮磷污染物污染浓度发现,研究区域磷污染较严重,各下垫面磷的浓度均高于地表水 V 类标准(0.4  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). 如图 3 所示,暴雨径流中 TP 平均浓度,漕桥平面屋顶 < 斜面屋顶 < 污水汇集口 < 总汇集口 < 农田;蒲家头场院 < 屋顶 < 排水口. TN 平均浓度,漕桥平面屋顶 < 斜

面屋顶 < 农田 < 污水汇集口 < 总汇集口;蒲家头排水口 < 场院 < 屋顶.

研究区域各污染物浓度的差异,一方面与村落不同下垫面类型及下垫面材料有关;另一方面与村落的聚集方式、村落周围环境(如工业)及环境特性(大气污染状况、时空变化等)有关. 对于屋面而言,屋面材料的种类、性质和老化程度以及大气干湿沉降和降雨性质是影响径流水质的主要原因<sup>[27]</sup>. 从图 3 可以看出,漕桥混凝土平面屋顶径流中 TN 和 TP 的 EMC 均低于琉璃瓦斜面屋顶,屋面材料及屋面坡度对径流水质具有影响作用,斜面屋顶由于受坡度的影响,冲刷作用较平面屋顶强,降雨径流中的污染物也相对较多<sup>[28]</sup>. 对比两个村落平面屋顶 TN 和 TP 可以发现,蒲家头平面屋顶(S7)及污水汇

集口(S9)均高于漕桥平面屋顶(S1)和污水汇集口(S5或S6),其原因可能是蒲家头硬化程度低以及地表的动物粪便溶解在径流雨水中所致<sup>[6]</sup>。在漕桥场院径流中TN浓度低,TP浓度高,而蒲家头场院径流则相反,表明暴雨径流中污染物的浓度不仅与污染物类型相关,而且还与不同研究区域人类的生活习惯、消费方式特别是饮食方式密切相关<sup>[27]</sup>。

另外,暴雨径流中氮磷含量高,农田(S4)径流

中TP浓度尤为突出,可能是该区域土地利用类型主要为山林和耕地,竹林、茶园较多<sup>[29]</sup>,而且氮磷是农业生长的营养因子,是化肥的主要成分,当径流产生时,氮磷随地表径流汇入受纳水体,是水体富营养化的限制因子<sup>[30]</sup>。大量氮磷随暴雨径流进入河流,导致水体富营养化,影响水生生物生存环境,破坏局部水生生态系统平衡<sup>[31]</sup>。因此,林地和耕地是研究区域控制暴雨径流非点源污染治理的重点。

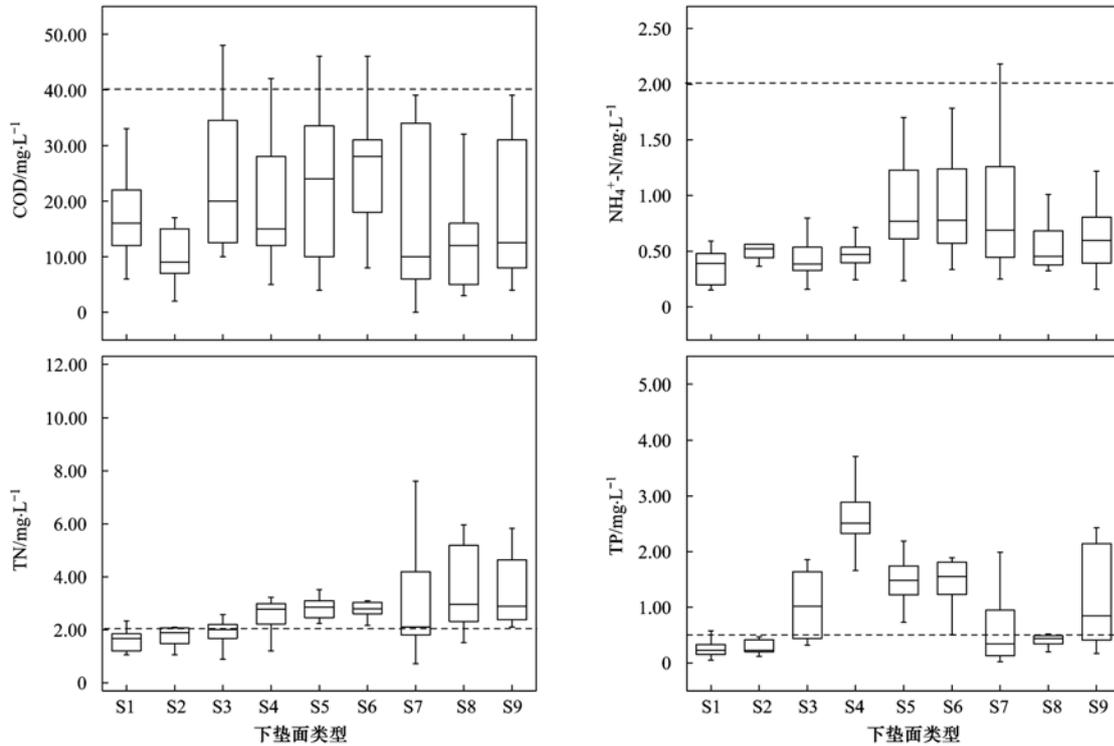


图3 不同下垫面常规污染物浓度特征

Fig. 3 Concentration of normal pollutants in different underlying surfaces

### 2.2.3 污染负荷

研究区域内不同下垫面类型污染物的平均浓度、汇水面积和年径流系数的不同,使不同污染物产生的年污染负荷不同,其估算结果如表3。从下垫面类型来看,年污染负荷最高的是农田(S4),其中

TSS、COD、TP分别为80.38、64.41、8.17 kg·a<sup>-1</sup>;从污染物类型看,TSS和COD的年污染负荷最大。暴雨径流中颗粒物的主要来源有屋面、路面、场院等硬化下垫面以及农田、污水汇集口等土壤;另外,由于废弃物管理模式的不规范化、农业产业化

表3 不同下垫面各污染物的污染负荷

Table 3 Pollution load of different pollutants in different underlying surfaces

污染负荷/kg·a <sup>-1</sup>	TSS	COD	TP	TN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N
S1	0.539 3	2.520 7	0.036 0	0.216 8	0.050 1
S2	1.732 8	1.595 9	0.055 1	0.297 4	0.091 8
S3	3.177 9	1.721 2	0.089 4	0.131 6	0.031 4
S4	80.376 5	64.409 4	8.166 8	6.918 2	1.554 5
S5	0.003 7	0.008 0	0.000 6	0.001 0	0.000 3
S6	0.008 0	0.017 9	0.001 3	0.002 1	0.000 9
S7	0.256 1	1.955 0	0.095 1	0.452 9	0.170 2
S8	0.000 6	0.732 2	0.024 5	0.215 6	0.028 8
S9	0.000 9	0.002 3	0.000 2	0.000 5	0.000 1

及城市化的发展,导致该地区暴雨径流中氮磷负荷量的增加<sup>[18]</sup>. 因此,该研究区域地表径流控制应该以 TSS 为水质目标,这样对解决 COD 和 TP 是有效的;改善污染物处理模式、合理高效的利用化肥是控制暴雨径流污染的另一重要措施.

### 2.3 不同下垫面暴雨径流重金属污染特征

根据研究区暴雨径流的监测结果,对屋顶、场院、农田、污水汇集口各下垫面暴雨径流重金属浓度进行描述性统计分析,结果表明,暴雨径流中 Mn、Cu、Zn、Ni、Cr、Cd、As 和 Pb 这 8 种重金属浓度均低于地表水 II 类标准;但是,不同下垫面中各重金属浓度有所不同.

从图 4 可以看出,漕桥暴雨径流中各重金属含量普遍高于蒲家头,但 Cd 除外,其在蒲家头屋顶 (S7) 达到最高浓度  $0.087 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 研究发现我国煤矿中 Cd 含量较高<sup>[32]</sup>,这可能与蒲家头农户以煤炭作为主要能源物质有关. 对比两个村落场院、屋顶两种下垫面发现,漕桥重金属 Cu、Zn、Ni、As 和 Pb 最大值均高于蒲家头,人口密度较大,植被覆盖率低是影响漕桥径流水质的主要原因. 由于漕桥植被较少,使悬浮于空气中的重金属被植物吸收的少,大部分以沉降的方式进入到水体和土壤<sup>[33]</sup>. 另外,平面屋顶的重金属浓度普遍高于斜面屋顶,可能是由于平面屋顶上枯枝落叶在屋面上积累,形成腐殖质;

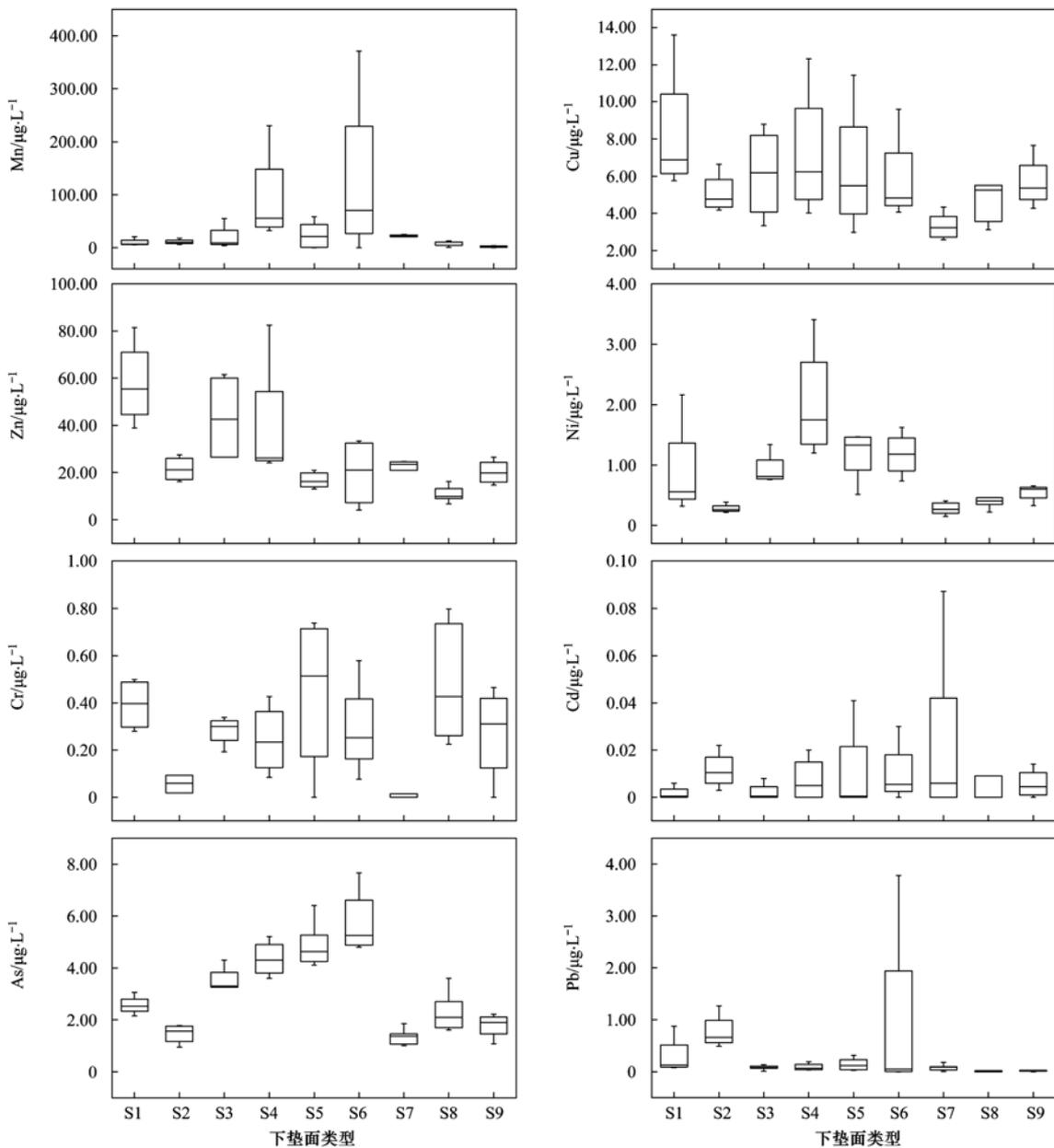


图 4 不同下垫面重金属浓度特征

Fig. 4 Concentration of heavy metals in different underlying surfaces

同时平面屋顶也会增加空气降尘的积累<sup>[34]</sup>。在农田径流中, Cu、Zn、Ni 的最高浓度分别为 12.32、82.40、3.40  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 比污水汇集口的浓度还高, 说明农田受重金属污染严重, 其主要原因是化肥和农药的使用。另外, 研究区域内生活和工业垃圾露天堆放, 导致其渗滤液在雨水的淋滤下随暴雨径流到污水汇集口<sup>[35]</sup>, 并且受汇集口周围道路交通的影响, 使 Pb、Cr 在该下垫面浓度明显偏高。

研究区域内不同下垫面暴雨径流中各重金属浓度较低, 说明农村暴雨径流中重金属污染不是其主要的污染物, 但是通过沉积和吸附等作用汇集于河流沉积物, 具有潜在的生态风险<sup>[36]</sup>。另外, 农田暴雨径流是农村重金属污染的重要组成成分, 该结果与文献[17, 37, 38]的研究结果相似。同时, 研究区域地表卫生管理是另一个影响径流重金属污染的因素, Long 等<sup>[39]</sup>对浙江省城市生活垃圾的研究表明, 生活垃圾中 76.3% 的 Zn 和 82.3% 的 Cu 主要来源于餐厨垃圾、灰尘、塑料和纸这 4 种成分。因此, 在加强农田暴雨径流管理的基础上, 农村卫生设施和管理水平也应提高。

#### 2.4 影响因素分析

农村暴雨径流污染是一个涉及多介质、多时空尺度和多污染物的非点源污染的复杂过程。Petrucci 等<sup>[33]</sup>研究了人类日常活动、下垫面类型以及大气沉降对非点源污染的贡献, 指出屋面材料、大气沉降和生活垃圾的处理对暴雨径流污染过程有重要的影响。不同的屋面材料其径流污染特征也不同<sup>[28]</sup>。生活垃圾的处理方式是地表污染物累积的一种反映。地表污染物积累的过程与程度实际上与人口密度、地表卫生管理密切相关。另外, 降雨特征(前期晴天数、累积降雨量、降雨强度、降雨历时等)对径流水质也有一定的影响, 尤其是大气沉降随径流污染物的贡献与前期晴天数有很大的相关性。

径山镇由于气候湿润、降雨较频繁、屋面污染物累积周期短, 因此屋面径流水质优于其他下垫面。但是, 由于屋面材料和屋面坡度不同, 混凝土平面屋顶径流水质优于琉璃瓦斜面屋顶。漕桥径流水质中 TSS、COD 的 EMC 以及重金属 Cu、Zn、Ni、As 和 Pb 的最大值均高于蒲家头, 人口密度较大, 植被覆盖率低是影响漕桥径流水质的主要原因。另外, 从不同污染物的污染负荷估算的结果来看, 地表卫生管理以及农药化肥的使用情况是另一个影响径流污染的因素, 因此, 建议研究区域可以对生活垃圾采取集中收集、分类处理的措施, 减少其产生的污染负

荷<sup>[40]</sup>。

目前, 关于降雨特征对径流水质的影响有了一定的研究。降雨量决定着稀释污染物的水量, 多数学者研究发现污染物的浓度与降雨量呈负相关关系<sup>[41, 42]</sup>。而降雨强度决定着淋洗、冲刷地表污染物的能量大小, 不同形态的污染物与降雨强度之间的相关关系不同, Kayhanian 等<sup>[43]</sup>研究发现最大降雨强度与颗粒态污染物有正相关关系, 而与溶解态污染物呈负相关。李贺等<sup>[44]</sup>运用相关性分析降雨特征与径流污染物的关系, 发现 TSS、TP、COD 受前期晴天数影响较大, 而 TN 和  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  则受降雨量影响较大, 主要因为 TSS、TP、COD 以颗粒态物质存在, 而  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 则以溶解态存在。而降雨历时既决定着污染物被冲刷的时间, 也决定着降雨期间的污染物向地表输送的时间<sup>[42]</sup>。因此, 为降低暴雨径流对受纳水体的污染负荷, 可以通过生态技术(生物滞留系统及河岸缓冲带)以及非生态化技术对径流中的颗粒性污染物进行去除<sup>[45]</sup>。

### 3 结论

(1) 研究区屋顶、场院、农田、污水汇集口各下垫面暴雨径流的 pH 为中性偏酸; 漕桥场院 TSS 含量最高, 达到 45.67  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 蒲家头各下垫面的 TSS 均小于 10  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

(2) 漕桥暴雨径流中, COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和 TP 的 EMC 的值分别为 21.01、0.74、2.39 和 1.39  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 蒲家头暴雨径流中, COD、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、TN 和 TP 的 EMC 的值分别为 15.69、0.77、3.58 和 0.779  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 暴雨径流中各重金属含量均低于地表水 II 类标准。与地表水 V 类标准比较, 漕桥和蒲家头 TN 分别超标 1.2 倍和 1.8 倍, TP 分别超标 3.5 倍和 1.9 倍。说明氮磷是研究区暴雨径流的主要污染物, 其中氮污染物以溶解态为主, 磷污染物以颗粒态为主。

(3) 研究区域 TSS 和 COD 污染负荷较高, 可通过生态技术(生物滞留系统及河岸缓冲带)以及非生态化技术对径流中的颗粒性污染物进行去除, 以降低暴雨径流对受纳水体的污染负荷。

#### 参考文献:

- [1] 单保庆, 陈庆峰, 尹澄清, 等. 常见基质对暴雨径流中磷素去除效果的比较研究[J]. 环境科学, 2007, 28(10): 2280-2286.
- [2] Short A G. Governing change: land-use change and the prevention of nonpoint source pollution in the north coastal basin of California[J]. Environmental Management, 2013, 51(1):

- 108-125.
- [ 3 ] Rowny J G, Stewart J R. Characterization of nonpoint source microbial contamination in an urbanizing watershed serving as a municipal water supply[J]. *Water Research*, 2012, **46** ( 18 ): 6143-6153.
- [ 4 ] 朱松, 方沛南, 蓝雪春. 降雨径流污染研究综述[J]. *中国农学通报*, 2009, **25**(12): 240-245.
- [ 5 ] Hu H Y, Huang G R. Monitoring of non-point source pollutions from an agriculture watershed in south China[J]. *Water*, 2014, **6**(12): 3828-3840.
- [ 6 ] 李青云, 田秀君, 魏孜. 北京典型村镇降雨径流污染及排放特征[J]. *给水排水*, 2011, **37**(7): 130-140.
- [ 7 ] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 我国农业面源污染的现状与控制技术研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, **38** ( 5 ): 2548-2552.
- [ 8 ] 李春林, 胡远满, 刘森, 等. 城市非点源污染研究进展[J]. *生态学杂志*, 2013, **32**(3): 492-500.
- [ 9 ] Brezonik P L, Stadelmann T H. Analysis and predictive models of stormwater runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA[J]. *Water Research*, 2002, **36**(7): 1743-1757.
- [ 10 ] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff[J]. *Water Research*, 2000, **34**(6): 1773-1780.
- [ 11 ] 易雯, 李彤, 付清, 等. 极端暴雨条件下广东北江重金属污染特征[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(12): 1458-1464.
- [ 12 ] 侯培强, 任玉芬, 王效科, 等. 北京市城市降雨径流水质评价研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 71-75.
- [ 13 ] 张千千, 王效科, 郝丽玲, 等. 重庆市路面降雨径流特征及污染源解析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(1): 76-82.
- [ 14 ] 欧阳威, 王玮, 郝芳华, 等. 北京城区不同下垫面降雨径流产污特征分析[J]. *中国环境科学*, 2010, **30** ( 9 ): 1249-1256.
- [ 15 ] 李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 等. 北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究[J]. *环境科学*, 2012, **33** ( 11 ): 3760-3767.
- [ 16 ] 盛建国, 曾平, 张灿灿, 等. 镇江老城区降雨径流污染特征分析[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2011, **25**(5): 496-499.
- [ 17 ] 师荣光, 蔡彦明, 郑向群, 等. 天津郊区农田降雨径流重金属的污染特征及来源分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, **25**(5): 213-217.
- [ 18 ] Stokal M, Yang H, Zhang Y C, *et al.* Increasing eutrophication in the coastal seas of China from 1970 to 2050[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **85**(1): 123-140.
- [ 19 ] HJ/T 91-2002, 地表水和污水监测技术规范(HJ/T91-2002)[S].
- [ 20 ] 马英, 马岱文, 万金泉, 等. 东莞不同下垫面降雨径流污染转移规律研究[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(12): 1983-1990.
- [ 21 ] 李立青, 尹澄清, 何念慈, 等. 武汉市城区降雨径流污染负荷对受纳水体的贡献[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(3): 312-316.
- [ 22 ] 黄剑锋, 张依章, 张远, 等. 太湖西苕溪流域地表水、地下水硝酸盐污染特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2012, **25** ( 11 ): 1229-1235.
- [ 23 ] 任玉芬, 王效科, 韩冰, 等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. *生态学报*, 2005, **25**(12): 3225-3230.
- [ 24 ] 毕见霖, 王立硕, 唐文忠, 等. 非常规水源补给城市河流富营养化时空变化规律及风险研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1703-1709.
- [ 25 ] 张千千, 王效科, 高勇, 等. 绿色屋面降雨径流水质及消减污染负荷研究[J]. *生态学报*, 2015, **35**(10): 3454-3463.
- [ 26 ] 廖剑宇, 彭秋志, 郑楚涛, 等. 东江干支流水体氮素的时空变化特征[J]. *资源科学*, 2013, **35**(3): 505-513.
- [ 27 ] 李立青, 朱仁肖, 郭树刚, 等. 基于源区监测的城市地表径流污染空间分异性研究[J]. *环境科学*, 2010, **31** ( 12 ): 2896-2904.
- [ 28 ] 张科峰, 李贺, 傅大放, 等. 三种不同屋面雨水径流重金属污染特性及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2011, **31** ( 4 ): 724-730.
- [ 29 ] 金婧靓, 王飞儿, 戴露莹, 等. 苕溪流域非点源污染特征及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(8): 2119-2125.
- [ 30 ] 张旭, 郝庆菊, 高扬, 等. 都市农业区域暴雨径流磷素输出特征研究——以上海市新场镇果园村为例[J]. *水土保持研究*, 2010, **17**(4): 38-42.
- [ 31 ] Dupas R, Delmas M, Dorioz J M, *et al.* Assessing the impact of agricultural pressures on N and P loads and eutrophication risk[J]. *Ecological Indicators*, 2015, **48**: 396-407.
- [ 32 ] Ren D Y, Zhao F H, Wang Y Q, *et al.* Distributions of minor and trace elements in Chinese coals[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1999, **40**(2-3): 109-118.
- [ 33 ] Petrucci G, Gromaire M C, Shorshani M F, *et al.* Nonpoint source pollution of urban stormwater runoff: a methodology for source analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(17): 10225-10242.
- [ 34 ] 赵建伟, 单保庆, 尹澄清. 城市旅游区暴雨径流污染过程中的不透水面效应[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, **7** ( 12 ): 50-53.
- [ 35 ] 包丹丹, 李恋卿, 潘根兴, 等. 垃圾堆放场周边土壤重金属含量的分析及污染评价[J]. *土壤通报*, 2011, **42**(1): 185-189.
- [ 36 ] 王立硕, 毕见霖, 王馨慧, 等. 非常规水源补给城市河流表层沉积物重金属污染及风险评价[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(3): 903-910.
- [ 37 ] 王宁, 朱颜明. 松花湖水源地重金属非点源污染调查[J]. *中国环境科学*, 2000, **20**(5): 419-421.
- [ 38 ] 王文华, 刘俊华, 彭安. 降水引起的地表径流中汞来源的研究[J]. *农业环境保护*, 2001, **20**(5): 297-301.
- [ 39 ] Long Y Y, Shen D S, Wang H T, *et al.* Heavy metal source analysis in municipal solid waste (MSW): Case study on Cu and Zn[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **186** ( 2-3 ): 1082-1087.
- [ 40 ] 银燕春, 王莉淋, 肖鸿, 等. 成都市区、城郊和农村生活垃圾重金属污染特性及来源[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(1):

- 392-400.
- [41] Gan H Y, Zhou M N, Li D Q, *et al.* Quality characterization and impact assessment of highway runoff in urban and rural area of Guangzhou, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **140**(1-3): 147-159.
- [42] 张千千, 李向全, 王效科, 等. 城市路面降雨径流污染特征及源解析的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(2): 352-358.
- [43] Kayhanian M, Singh A, Suverkropp C, *et al.* Impact of annual average daily traffic on highway runoff pollutant concentrations [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2003, **129**(11): 975-990.
- [44] 李贺, 张雪, 高海鹰, 等. 高速公路路面雨水径流污染特征分析[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(11): 1037-1041.
- [45] 于慧, 刘政, 王书敏, 等. 城市道路暴雨径流水质特性及控制对策[J]. *环境污染与防治*, 2014, **36**(10): 88-92.
- 

## 《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjkx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能,欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题,请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址:北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编:100085

电 话:010-62941102,010-62849343

传 真:010-62849343

E-mail:[hjkx@rcees.ac.cn](mailto:hjkx@rcees.ac.cn)

网 址:[www.hjkx.ac.cn](http://www.hjkx.ac.cn)

## CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology .....	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM <sub>2.5</sub> at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer .....	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM <sub>2.5</sub> in Chengdu City .....	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning .....	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing .....	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction .....	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors .....	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China .....	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors .....	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images .....	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary .....	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City .....	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir .....	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR .....	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes .....	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance .....	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater .....	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou .....	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination .....	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C <sub>60</sub> Nanoparticles in Aquatic Systems .....	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers .....	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network .....	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater .....	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A <sup>2</sup> /O- <i>MBR</i> Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling .....	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System .....	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures .....	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway .....	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge .....	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage .....	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge .....	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes .....	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> -Alkaline Process .....	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain .....	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain .....	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area .....	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China .....	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils .....	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment .....	Ji Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants .....	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i> .....	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence .....	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADP1_pWHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment .....	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring .....	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish .....	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i> .....	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions .....	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater .....	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components .....	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment .....	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications .....	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

# 《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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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

国内外公开发行人