

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第7期

Vol.38 No.7

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于船载走航气溶胶质谱技术的海洋气溶胶研究 ..... 颜金培, 陈立奇, 林奇, 赵淑惠, 李磊, 朱大勇 (2629)

利用 MODIS C6 数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征 ..... 赵仕伟, 高晓清 (2637)

秋冬季节华北背景地区 PM<sub>1</sub> 污染特征及来源 ..... 张周祥, 张养梅, 张小曳, 王亚强, 沈小静, 孙俊英, 周怀刚 (2647)

杭州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 ..... 吴丹, 蔺少龙, 杨焕强, 杜荣光, 夏俊荣, 齐冰, 刘刚, 李凤英, 杨孟, 盖鑫磊 (2656)

青岛不同强度霾天气溶胶中二次无机离子的生成及粒径分布 ..... 谢丹丹, 祁建华, 张瑞峰 (2667)

西安市重污染与清洁天 PM<sub>2.5</sub> 组分及其活性氧物质对比 ..... 王莹, 韩永明, 何世恒, 张婷, 刘随心, 曹军骥 (2679)

黄山 PM<sub>10</sub> 中二元羧酸类化合物的季节变化特征及其来源 ..... 孟静静, 侯战方, 张二勋, 董杰, 刘晓迪, 邢继钊, 刘加珍 (2688)

泉州市大气 PM<sub>2.5</sub> 镧系元素组成特征及来源解析 ..... 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 孙境蔚, 许文质, 张棕巍 (2698)

西北石化区周围毒害类空气污染物污染特征及健康风险评价 ..... 许亚宣, 李小敏, 于华通, 董林艳, 赵玉婷, 姚懿函, 邹广迅, 张新民 (2707)

G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析 ..... 张磷, 张祥志, 秦玮, 茅晶晶, 秦艳红, 谢卫平, 史文科, 陈文泰 (2718)

四川省 2005 ~ 2014 年农业源氨排放清单及分布特征 ..... 冯小琼, 陈军辉, 姜涛, 钱骏, 叶宏 (2728)

长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单 ..... 鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晟荣, 陶士康, 李莉 (2738)

我国城市饮用水中 N-亚硝基二甲胺的健康风险评估及水质标准制定 ..... 张秋秋, 潘申龄, 张昱, 杨敏, 安伟 (2747)

地下水污染风险评估中污染源荷载量化方法的对比分析 ..... 赵鹏, 何江涛, 王曼丽, 崔亚丰 (2754)

胶州湾表层海水中的正构烷烃及其来源解析 ..... 张倩, 宋金明, 彭全材, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 段雨琴, 曲宝晓, 王启栋 (2763)

桂江流域夏季水-气界面 CO<sub>2</sub> 脱气的空间变化及其影响因素 ..... 张陶, 李建鸿, 蒲俊兵, 吴飞红, 李丽, 袁道先 (2773)

都柳江水系沉积物锑等重金属空间分布特征及生态风险 ..... 宁增平, 肖青相, 蓝小龙, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙, 吴世良 (2784)

太湖表层水体及沉积物中双酚 A 类似物的分布特征及潜在风险 ..... 陈政宏, 郭敏, 徐怀洲, 刘丹, 程杰, 李江, 张圣虎, 石利利 (2793)

洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异 ..... 李文章, 张莉, 王圣瑞, 肖尚斌, 钱伟斌, 席银, 许可宸, 史玲珑 (2801)

阿哈水库沉积物-水界面磷、铁、硫高分辨率空间分布特征 ..... 孙清清, 陈敬安, 王敬富, 杨海全, 计永雷, 兰晨, 王箫 (2810)

北京市水环境中精神活性物质污染特征 ..... 张艳, 张婷婷, 陈卫平, 郭昌胜, 花镇东, 张远, 徐建 (2819)

降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响 ..... 陈莹, 王昭, 吴亚刚, 赵剑强, 杨文娟 (2828)

CaO<sub>2</sub> 不同投加方式对黑臭河道底泥内源磷释放抑制作用 ..... 徐焱, 李大鹏, 韩菲尔, 宋小君, 李鑫, 周婧, 黄勇 (2836)

坡耕地薄层紫色土-岩石系统中氮磷的迁移特征 ..... 鲜青松, 唐翔宇, 朱波 (2843)

微生物强化组合浮床净化微盐碱水体的效果 ..... 陈友媛, 吴亚东, 孙萍, 吴丹 (2850)

氧化镁基生物质炭高效去除水体中磷的特性 ..... 王彬斌, 林景东, 万顺利, 何锋 (2859)

Pd/Fe<sup>0</sup> 双金属复合催化纤维降解水中痕量亚硝基二甲胺 ..... 张环, 傅敏, 魏俊富, 王一冰, 安慧颖, 沈书怡 (2868)

针铁矿、磁铁矿和石膏对 2,4-二氯苯酚厌氧降解的影响 ..... 孔殿超, 周跃飞, 陈天虎, 王进, 李碧 (2875)

污水再生过程中消毒副产物前体物转化规律 ..... 韩慧慧, 缪恒峰, 张雅晶, 陆敏峰, 黄振兴, 阮文权 (2883)

微生物燃料电池改性阳极处理 PTA 废水 ..... 孙靖云, 范梦婕, 陈英文, 祝社民, 沈树宝 (2893)

水稻秸秆浸泡液对蓝藻和绿藻生长选择性抑制作用 ..... 苏文, 陈洁, 张胜鹏, 孔繁翔 (2901)

沼液 SBR 处理出水养殖螺旋藻 ..... 蔡小波, 郁强强, 刘锐, 赵远, 陈吕军 (2910)

K<sup>+</sup> 强化高盐环境下厌氧氨氧化脱氮效能 ..... 吴国栋, 于德爽, 李津, 周同, 王晓静 (2917)

包埋氨氧化细菌短程硝化的高效稳定运行 ..... 于濛雨, 刘毅, 田玉斌, 石欢, 徐富, 杨宏 (2925)

ANAMMOX 的快速启动及 EPS 在 ANAMMOX 颗粒污泥中的空间分布 ..... 李惠娟, 彭党聪, 陈国燕, 姚倩, 卓杨, 王彬斌 (2931)

厌氧氨氧化污泥中氨氧化的潜在电子受体 ..... 李祥, 林兴, 王凡, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 毕贞, 刘忻, 杨朋兵 (2941)

基于厌氧氨氧化的含氮废气原位处理 ..... 林兴, 王凡, 袁砚, 李祥, 黄勇, 袁澄伟 (2947)

基于污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶生长基质的组成 ..... 沈庆然, 李田, 曹熠, 潘舆 (2953)

罗红霉素短期冲击对活性污泥中氨氧化微生物丰度和多样性的影响 ..... 高景峰, 孙丽欣, 樊晓燕, 潘凯玲, 李定昌 (2961)

不同盐度下活性污泥中微生物群落变化规律及其处理模拟染料废水 ..... 周贵忠, 许硕, 姚倩, 银钗 (2972)

CO<sub>2</sub>-咸水-砂岩相互作用过程中微生物群落结构动态变化特征 ..... 王博强, 李晨阳, 卢伟, 樊昊, 张冬至, 汪治, 吕聪, 沈福东 (2978)

油菜/玉米轮作农田土壤呼吸和异养呼吸对秸秆与生物炭还田的响应 ..... 田冬, 高明, 黄容, 吕盛, 徐畅 (2988)

模拟气候升温对湿地土壤微生物群落及磷素形态的影响 ..... 腾昌运, 沈建国, 王忠, 王行, 李鸿毅, 张志剑 (3000)

秦岭红桦林土壤细菌群落剖面分布特征及其影响因素 ..... 杜璨, 许晨阳, 王强, 张帆, 马武功, 和文祥, 侯琳, 耿增超 (3010)

微生物对汞矿区农田土壤甲基化的影响 ..... 贾钦, 朱雪梅, 王琪, 傅海辉, 郝亚琼, 何洁, 杨子良 (3020)

施用海泡石对铅、镉在土壤-水稻系统中迁移与再分配的影响 ..... 方至萍, 廖敏, 张楠, 吕婷, 黄小辉 (3028)

BS + CTMAB 复配修饰在黄棕壤吸附苯酚上的应用 ..... 刘伟, 孟昭福, 任爽, 李文斌 (3036)

1999 年与 2014 年贡嘎山峨眉冷杉枝和叶中常见重金属的生物富集特征对比 ..... 李芬, 王训, 罗辑, 袁巍, 喻子恒, 商立海 (3045)

铅锌尾矿污染区 3 种菊科植物体内重金属的亚细胞分布和化学形态特征 ..... 朱光旭, 肖化云, 郭庆军, 张忠义, 杨曦, 孔静 (3054)

膨润土调质对污泥堆肥的脱毒及重金属钝化和雌酮消除作用 ..... 周莉娜, 蔡函臻, 李荣华, 王美净, 赵军超, 王权, 张增强 (3061)

餐厨垃圾与秸秆混合中温和高温厌氧消化对比 ..... 郭香麟, 左剑恶, 史绪川, 王凯军, 李静 (3070)

我国村镇生活垃圾可燃组分基本特征及其时空差异 ..... 晏卓逸, 岳波, 高红, 李志龙, 黄启飞, 聂小琴, 汪群慧 (3078)

甲烷催化还原 NO<sub>x</sub> 中 Co 基/分子筛催化剂的助剂和载体优化 ..... 潘华, 建艳飞, 陈宁娜, 刘红霞, 何焯, 贺亚飞 (3085)

《环境科学》征稿简则 (2737) 《环境科学》征订启事 (2809) 信息 (2867, 2971, 3027)

# 降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染排放的影响

陈莹<sup>1</sup>, 王昭<sup>2</sup>, 吴亚刚<sup>1</sup>, 赵剑强<sup>1</sup>, 杨文娟<sup>1</sup>

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054; 2. 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075)

**摘要:** 在西安市城市主干道南二环路太白立交高架段设置路面径流采样点, 采用人工时间间隔采样法对 2014 年 7 月 ~ 2015 年 9 月的 13 场径流事件全程采样, 共获得样品 207 个, 测试径流过程 SS、COD、溶解态 COD、Cu、溶解态 Cu、Pb、溶解态 Pb、Cr、溶解态 Cr、Cd、溶解态 Cd 的质量浓度变化, 研究降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染质量浓度变化和负荷排放的影响。结果表明, 西安市城市道路径流 SS、COD 污染严重, 是径流的主要污染物, 重金属 Pb、Cr 污染水平亦较高; 径流过程中污染物质量浓度变化与降雨特征及污染物赋存状态密切相关, 溶解态污染物排放不受降雨特征影响, 均在径流初期达到质量浓度峰值随即持续降低, 颗粒态污染物的质量浓度峰值出现在足够大的降雨强度峰值之后, 径流过程随雨强变化波动显著, 且受降雨历时和降雨量等因素的共同影响; 降雨特征对溶解态污染物负荷排放的影响较小, 但对颗粒态污染物具有显著影响。I、II 型降雨事件较之 III 型降雨, SS、COD、Cu、Pb、Cr、Cd 的负荷初期冲刷效应更明显; 路面径流的负荷初期冲刷效应并非普遍存在, 所监测径流场次所有污染指标均未出现强烈的负荷初期冲刷, 各污染物的负荷初期冲刷程度排序为 COD > SS > 溶 COD > Cu > Pb > Cr > 溶 Cu > Cd > 溶 Pb > 溶 Cr > 溶 Cd。

**关键词:** 路面径流; 降雨特征; 污染物赋存类型; 排放特征;  $M(v)$  曲线

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)07-2828-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201612153

## Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution

CHEN Ying<sup>1</sup>, WANG Zhao<sup>2</sup>, WU Ya-gang<sup>1</sup>, ZHAO Jian-qiang<sup>1</sup>, YANG Wen-juan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Limited Liability Company, Xi'an 710075, China)

**Abstract:** Urban road runoff contains pollutants such as particulate matters, organic chemicals, heavy metals, nutrients, oil and grease that can cause significant degradation of receiving water quality. Eliminating the pollutant mass loading of road runoff and protecting the receiving water bodies have been the focuses in environmental field in recent years. To accomplish pollutant reduction and develop a cost-effective treatment method, knowledge of water quality characteristics, as well as the pollutant effluent characteristics of road runoff is required. In order to investigate the impacts of rainfall characteristics and occurrence of pollutant on the variation of pollutant concentrations during the duration of runoff events and pollutant load effluent characteristics of road runoff, 207 road runoff samples in the durations of 13 storm events occurred at Taibai Interchange of the south second-ring road in Xi'an, Shaanxi province from July 2014 to September 2015 were collected by the manual time-interval sampling method, and concentrations of SS, COD, dissolved COD, Cu, dissolved Cu, Pb, dissolved Pb, Cr, dissolved Cr, Cd and dissolved Cd of the samples were determined. The results indicated that, the road runoff of Xi'an city was seriously polluted by SS and COD, which were the main contaminants in road runoff. Meanwhile, concentrations of Pb and Cr in road runoff were also at a high level. The variation of pollutant concentrations during the duration of runoff was closely related to rainfall characteristics and occurrence states of the pollutants. Emission of the dissolved pollutants was not affected by the type of rainfall. The concentration of the dissolved pollutants in the runoff reached a peak in the initial duration of runoff, and then, decreased continuously. However, the peak concentration of particulate pollutants in the runoff only occurred after the peak of sufficiently large rainfall intensity. The concentration of particulate pollutants in the runoff fluctuated sharply with the variation of rainfall intensity, and impacted by the rainfall duration and rainfall depth as well. Rainfall characteristics didn't have a great impact on the load emission of the dissolved pollutants, therefore, had a significant influence on the load emission of the particulate pollutants. Compared with the rainfall type III, first flush effects of pollutant loads of SS, COD, Cu, Pb, Cr, Cd in rainfall type I and type II were more obvious. Besides, first flush effect of pollutant loads was not ubiquitous. All the pollutants in the monitoring 13 runoff events didn't exhibit an obvious first flush effect. The descending order of the first flush effect of those pollutants was COD, SS, dissolved COD, Cu, Pb, Cr, dissolved Cu, Cd, dissolved Pb, dissolved Cr, dissolved Cd.

**Key words:** road runoff; rainfall characteristics; occurrence of pollutant; effluent characteristics;  $M(v)$  curve

收稿日期: 2016-12-16; 修订日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308050)

作者简介: 陈莹(1977~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为交通环境保护与城市面源污染, E-mail: cy0818cy@126.com

随着点源污染治理率的持续提高,城市地表径流对水体污染的显著贡献不断被众多研究证实,地表径流污染成为最重要的城市环境问题之一<sup>[1~4]</sup>. 路面径流作为城市地表径流中污染效应最强的部分,被国内外研究者广泛关注<sup>[5]</sup>. 众多研究表明,路面径流污染受区域气候、环境空气质量、降雨特征、交通量、周围土地利用方式、城市管理水平等诸多因素影响,具有来源广泛、机制复杂、变异显著、治理困难等特征<sup>[6~8]</sup>. 美国等发达国家基于几十年的系统监测研究,成功治理径流污染,经历从终端最佳管理措施(best management practices, BMPs)到源头低影响开发(low impact development, LID)控制污染的实践,以满足日益严格的最大日负荷(total maximum daily load, TMDL)污染减排要求<sup>[9]</sup>. 实践证明,探明径流污染影响因素及排放特征是正确估算污染负荷的前提<sup>[10,11]</sup>,研究者试图建立各种数学模型描述径流污染排放过程<sup>[12~15]</sup>,并关注负荷初期冲刷效应(first flush effect, FFE)以合理确定治理设施规模<sup>[9,16]</sup>. 自二十世纪末起,国内研究者在西安<sup>[17,18]</sup>、北京<sup>[19~21]</sup>、重庆<sup>[22]</sup>、澳门<sup>[23]</sup>、上海<sup>[24]</sup>、南京<sup>[25]</sup>、沈阳<sup>[26]</sup>等地相继展开路面径流污染测试,探求各地的径流污染特征、污染负荷及初期冲刷效应,并就径流污染影响因素、污染机制展开探索,但截至目前,鲜见有关降雨特征及污染物赋存类型对路面径流污染质量浓度和负荷排放影响的研究报道.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地点

以西安市南二环路太白立交高架段作为采样区域采集路面径流. 该径流收集段为专供机动车行驶

的单向 3 车道桥面,日均车流量大于 5 万辆,路拱横坡 0.2%、纵坡 0.5%、桥宽 11 m,采样点汇流面积 410 m<sup>2</sup>. 该段路面维护方式为每日定期洒水,真空吸尘车不定时清扫至少 3 次.

### 1.2 采样方法

降雨期间采用人工时间间隔采样法在桥梁排水立管采样. 采样原则为:径流开始 30 min 内,用聚乙烯瓶每 5 min 采样一次,30 min ~ 1 h 每 10 min 采样一次,1 ~ 2 h 每 20 min 采样一次,2 ~ 3 h 每 30 min 采样一次,此后每 1 h 采样一次直至径流终止,采样时若雨强变化较大则随机加密采样次数,每次采样 500 mL,共获得样品 207 个. 采样期间采用 JFZ-01 型数字雨量计同步观测降雨特征.

### 1.3 水质测试方法

场次径流结束后将水样送至实验室分析水质. 分析项目包括 SS、COD、溶解性 COD、4 种重金属 Cu、Pb、Cr、Cd 总量及溶解态含量. SS 采用重量法测定,COD 采用快速密闭催化消解法测定,重金属采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,溶解态污染物需将水样经 0.45 μm 滤膜过滤后再行测定.

### 1.4 降雨特征

#### 1.4.1 场次降雨特征

本研究对 2014 年 7 月 ~ 2015 年 9 月的 13 场径流事件实现了全程有效采样、测试,降雨事件的降雨特征见表 1. 从中可见,根据美国地质勘探局(USGS)对降雨级别的划分标准,采样场次降雨类型以小到中雨为主,大雨、暴雨较少,且多数场次平均雨强不大,这与西安市作为我国西部降雨量相对较小的典型城市的地域降雨特征相吻合,表明采样降雨场次可有效代表西安市降雨特征.

表 1 13 场降雨事件的降雨特征

Table 1 Rainfall characteristics of 13 rainfall events

序号	降雨日期	降雨量/mm	降雨历时/min	平均雨强/mm·min <sup>-1</sup>	最大雨强/mm·min <sup>-1</sup>	前期晴天时间/d	降雨类型
1	2014-07-10	6.0	218	0.028	0.208	10.0	小雨
2	2014-08-06	5.3	88	0.060	0.391	27.8	中雨
3	2014-08-07	10.0	240	0.036	0.185	0.5	中雨
4	2014-08-08	6.3	415	0.015	0.041	0.3	小雨
5	2014-08-12	41.0	440	0.093	0.817	3.2	大雨
6	2014-09-16	3.9	382	0.010	0.024	16.0	小雨
7	2014-10-20	7.4	380	0.020	0.052	18.8	小雨
8	2015-06-16	2.3	95	0.024	0.067	13.8	小雨
9	2015-06-23	8.1	385	0.025	0.057	9.6	小雨
10	2015-06-26	9.9	268	0.037	0.050	3.0	小雨
11	2015-08-08	24.7	87	0.283	0.850	17.7	暴雨
12	2015-08-13	7.9	78	0.101	0.331	5.5	中雨
13	2015-08-23	12.5	119	0.105	0.376	10.3	大雨

### 1.4.2 降雨类型划分

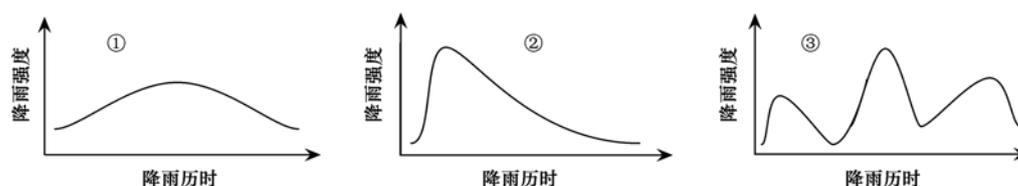
作者所在研究团队自上世纪九十年代开始对西安市上百场降雨径流事件进行了长时间序列的观测,基于对所监测径流事件降雨过程雨强变化情况的整理和统计,探明西安市降雨具有较明显的特征,

基本可概化为 3 种类型,即降雨量小、降雨强度较平均的 I 型降雨,初期雨强大的前峰型 II 型降雨和多峰型 III 型降雨,详见表 2. 本研究所观测的 13 场降雨事件 I、II、III 型降雨分别为 6 场、5 场和 2 场,可见西安市多见 I、II 型降雨.

表 2 降雨类型分类

Table 2 Classification of rainfall types

类型	降雨特征	降雨场次	示意
I 型	雨量小、降雨强度较平均的降雨事件	2014-08-08、2014-09-16、2014-10-20、2015-06-16、2015-06-23、2015-06-26	①
II 型	初期雨强大的前峰型降雨事件	2014-08-06、2014-08-07、2015-08-08、2015-08-13、2015-08-23	②
III 型	多峰降雨事件	2014-07-10、2014-08-12	③



### 1.5 径流量估计

因条件限制,本研究未能实测径流量. 因集水对象为内渗量与蒸发量很小的沥青路面,且采样时记录了降雨开始与径流形成时间,进而可计算消除径流的滞后性,各采样时段径流体积可用扣除产流时间的各时段的降雨量与集雨面积的乘积估算<sup>[17]</sup>.

### 1.6 分析方法

#### 1.6.1 EMC 估算

根据事件平均浓度(event mean concentration, EMC)的定义,采用式(1)近似估算场次径流 EMC 值.

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T c(t)Q(t)dt}{\int_0^T Q(t)dt} \approx \frac{\sum_{i=1}^n C_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (1)$$

式中, $M$ 为径流排放某污染物的总质量, $g$ ;  $V$ 为径流体积, $m^3$ ;  $c(t)$ 为径流过程某污染物质量浓度随时间  $t$  的分布, $mg \cdot L^{-1}$ ;  $Q(t)$ 为  $t$  时刻的径流量, $m^3 \cdot s^{-1}$ ;  $T$ 为径流总历时, $s$ ;  $n$ 为时间分段数;  $C_i$ 为第  $i$  时间段样品某污染物的质量浓度, $mg \cdot L^{-1}$ ;  $V_i$ 为第  $i$  时间段的径流体积, $m^3$ .

#### 1.6.2 初期冲刷效应判别

##### (1) 判别方法

初期冲刷效应即初期径流不成比例的携带大部分污染负荷的现象,是相关学者研究污染负荷排放特征的常用指标. 本研究采用 Deletic<sup>[27]</sup>对初期冲刷的严格定义,即初期 30% 的径流携带超过 80% 的污染物即认为初期冲刷效应强烈作为冲刷程度的判

据,基于 Bertrand<sup>[28]</sup>提出的对实测所得无量纲  $M(v)$  曲线进行数据拟合,通过拟合指数  $b$  定量表征初期冲刷程度大小. 不同  $b$  值将  $M(v)$  曲线分为 6 个区域,具体见图 1,拟合公式见式(2).

$$Y = X^b \quad (2)$$

式中, $Y$ 为累积污染物排放率; $X$ 为累积径流率; $b$ 为拟合指数.

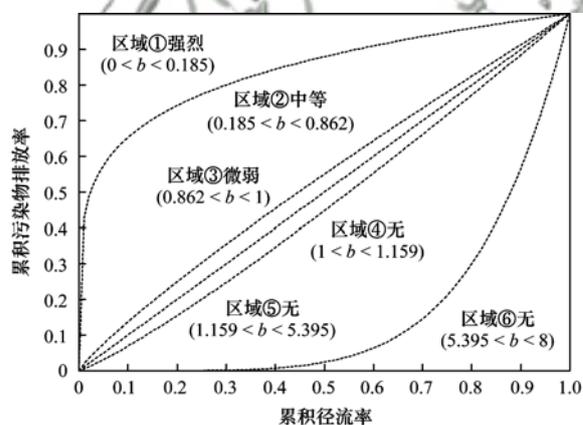


图 1  $M(v)$  曲线分区及其含义

Fig. 1 Partitions of  $M(v)$  curve and the meanings

##### (2) $FF_{30}$ 计算

$FF_{30}$ 指占径流体积 30% 的初期径流携带的污染负荷率,是表征初期冲刷程度的定量指标,计算见式(3).

$$FF_{30} = 0.3^b \quad (3)$$

式中, $b$ 同式(2).

##### (3) 数据处理方法

本研究实验数据采用 SPSS 17.0 进行分析和处

理,拟合指数  $b$  采用曲线回归方法确定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 西安市路面径流污染水平

受篇幅限制,且因部分场次降雨特征及径流污染状况类似,本文选择 7 场径流事件污染测试结果进行径流污染水平分析,见表 3。从中可见,西安市城市道路径流 SS、COD 污染严重,变化显著,不仅表现为单场径流过程污染物质量浓度峰值、底值差异巨大,不同场次径流污染物质量浓度也呈宽幅变化,各场次径流 SS、COD 质量浓度峰值范围为 1 608

~ 5 260  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、500.9 ~ 1 791.0  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,均大于《污水综合排放标准》三级标准,最高超标 13.15、3.58 倍,多数场次径流 SS 的 EMC 大于《污水综合排放标准》三级标准,全部场次径流 COD 的 EMC 值大于《污水综合排放标准》二级标准。可见 SS、COD 是西安市路面径流的主要污染物,需重点关注;重金属污染也不容忽视,Pb、Cr 污染水平较高,多数场次径流 Pb 的 EMC 值、全部场次 Cr 的质量浓度峰值均超过《地表水环境质量标准》Ⅲ类标准,不经处理直接排放对接纳水体环境质量造成较为严重的影响。

表 3 西安市路面径流污染测试结果

Table 3 Determination results of pollutant concentrations in road runoff of Xi'an City

采样场次	SS / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	COD / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	溶 COD / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Cu / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	溶 Cu / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Pb / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	溶 Pb / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Cr / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	溶 Cr / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	Cd / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	溶 Cd / $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	
2014-08-06	底值	158	181.1	32.8	35.9	5.2	20.7	0.2	13.2	1.6	0.3	0.03
	峰值	2080	778.3	269.6	148.1	20.3	122.0	0.8	199.0	5.2	1.4	0.14
	EMC	1194	498.0	79.7	87.4	12.3	74.1	0.3	57.8	2.4	0.9	0.05
2014-08-07	底值	90	149.1	19.9	36.0	3.4	23.1	0.1	16.2	1.3	0.3	0.03
	峰值	2542	1791.0	149.1	210.0	39.4	245.0	0.7	95.2	3.9	2.7	0.13
	EMC	848	482.3	45.7	70.8	9.9	74.8	0.2	37.2	1.8	0.9	0.05
2014-08-12	底值	210	109.0	18.0	14.1	4.6	45.4	0.2	8.8	1.2	2.4	0.04
	峰值	1608	1058.4	185.1	46.1	33.2	172.2	0.7	72.2	4.9	8.9	0.20
	EMC	365	228.5	31.6	20.9	9.8	73.7	0.3	17.4	1.6	3.5	0.07
2014-09-16	底值	148	104.7	13.2	22.4	3.1	22.7	0.1	18.0	1.0	0.8	0.04
	峰值	1976	800.3	55.2	92.9	11.3	98.0	0.5	66.6	4.9	1.7	0.11
	EMC	477	211.5	27.4	36.8	5.9	38.5	0.2	27.2	1.8	1.1	0.06
2014-10-20	底值	154	90.3	14.2	31.4	14.3	22.6	0.4	11.2	2.4	1.5	0.11
	峰值	1812	500.9	54.1	169.7	63.2	168.8	1.3	52.8	5.3	9.4	0.45
	EMC	886	288.1	25.4	103.6	26.3	86.2	0.6	35.5	3.4	4.1	0.21
2015-06-16	底值	200	289.6	36.3	65.6	20.5	36.0	0.2	20.6	1.9	1.2	0.02
	峰值	1688	1014.2	109.2	209.5	90.1	107.7	0.7	55.9	6.0	2.3	0.08
	EMC	1007	649.4	107.5	148.7	37.1	78.7	0.6	40.6	3.2	2.0	0.05
2015-08-08	底值	368	42.4	44.0	19.8	14.0	5.8	0.2	7.5	5.7	0.2	0.05
	峰值	5260	1339.0	218.0	125.2	46.8	48.2	0.8	55.5	1.3	0.9	0.25
	EMC	3181	815.6	59.7	80.8	17.5	23.4	0.3	32.0	1.9	0.6	0.10
污水综合 排放标准	一级	70	100	—	500	—	1 000	—	—	—	—	—
	二级	150	150	—	1 000	—	1 500	—	100	—	—	—
	三级	400	500	—	2 000	—	—	—	—	—	—	—
地表水环境质量 标准(Ⅲ类)	—	20	—	1 000	—	50	—	50	—	5	—	

### 2.2 降雨特征及污染物赋存类型对径流过程污染质量浓度的影响

尽管路面径流污染排放受前期路面污染物累积(与前期晴天时间、道路清扫水平、其他随机排污因素有关)和降雨径流冲刷(与降雨量、降雨强度变化、雨期交通等因素有关)影响,机制复杂,但本研究结果证明,降雨特征对不同类型污染物排放的影

响非常明显,也即同类型的降雨事件具有相似的径流污染排放特征,包括污染物浓度变化趋势、浓度峰值出现的时间以及径流后期浓度的相对稳定等。限于篇幅,结合降雨特征分类,本文选择 2014-09-16 日降雨代表 I 型小雨、2014-08-07 日降雨代表 II 型中雨、2014-08-12 日降雨代表 III 型大雨,就不同类型降雨径流事件各污染指标的质量浓度变化特征进

行分析。3 场径流事件全程各污染指标质量浓度变化测试结果见图 2 ~ 4。

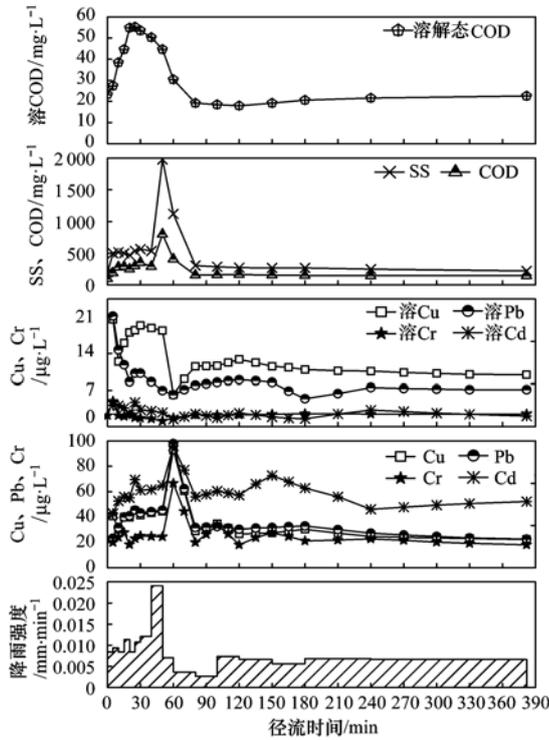


图 2 I 型降雨径流事件降雨特征及污染物质量浓度变化 (2014-09-16)

Fig. 2 Rainfall characteristics and pollution variation during runoff of rainfall type I (2014-09-16)

由图 2 可见, 2014-09-16 日 I 型小雨事件中, SS、COD、Cu、Pb、Cr、Cd 的质量浓度随降雨强度波动明显, 径流开始 60 min 左右达到峰值, 滞后于雨强峰值约 10 min 后出现, 此后质量浓度逐渐下降并在后段趋于平稳。I 型降雨事件因雨量少、降雨强度小, 无法实现对路面沉积物的有效冲刷, 出现雨强峰值时冲刷作用加强, 较多污染物进入径流, 整场径流各污染指标质量浓度相对较高, 总体污染较为严重。溶解态污染物, 包括溶解态 COD 及重金属, 尽管雨强较小但质量浓度峰值均在径流初期 10 min 左右出现, 此后逐渐降低直至径流结束, 末期质量浓度约为峰值质量浓度的 1/2 ~ 1/3, 整场径流质量浓度均保持较高水平。

图 3 所示 2014-08-07 日 II 型降雨事件中, 因初期雨强较大即对地面形成了有效冲刷, SS、COD、Cu、Pb、Cr、Cd 的质量浓度均在径流开始 15 min 左右达到峰值, 受初期高雨强径流强劲冲刷的影响, 峰值后污染物质量浓度迅速下降达到底值, 由于降雨强度大、径流量大使路面得到彻底冲刷, 污染物质量浓度在末期处于较低水平, 因该场降雨历时较

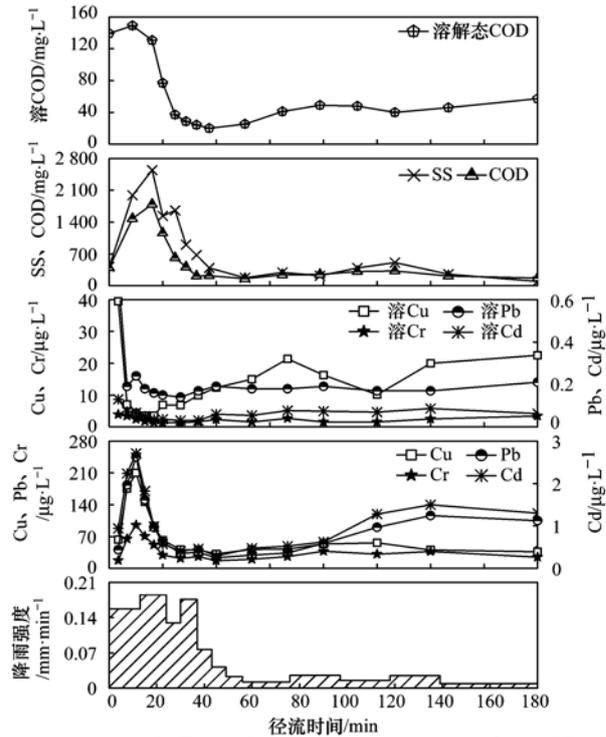


图 3 II 型降雨径流事件降雨特征及污染物质量浓度变化 (2014-08-07)

Fig. 3 Rainfall characteristics and pollution variation during runoff of rainfall type II (2014-08-07)

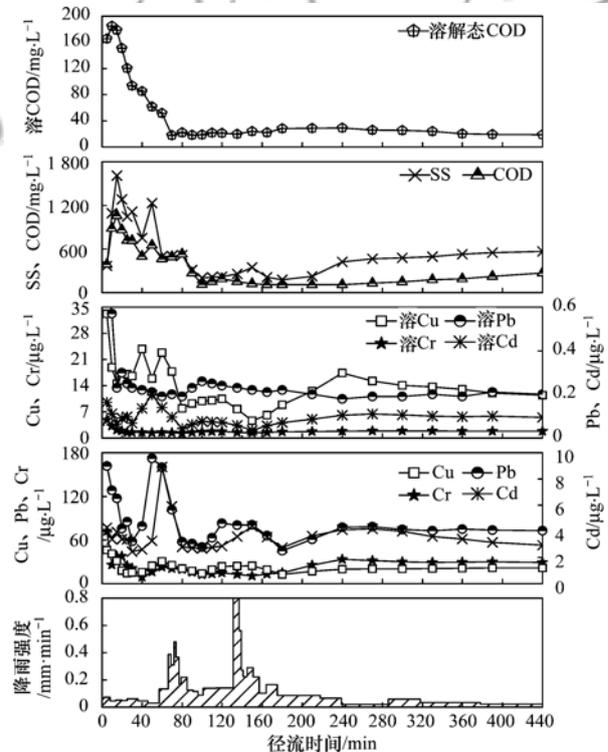


图 4 III 型降雨径流事件降雨特征及污染物质量浓度变化 (2014-08-12)

Fig. 4 Rainfall characteristics and pollution variation during runoff of rainfall type III (2014-08-12)

长,雨期交通即时排放的污染物在后期被逐渐带入径流使得后期径流质量浓度有所升高;溶解态污染物质量浓度峰值均在径流初期 10 min 以内出现,此后迅速降低达到底值,中后期受雨期交通即时排污影响略有升高。

图 4 所示 2014-08-12 日 III 型降雨事件,该场降雨整体强度较大,平均雨强达  $0.093 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。初期雨强即较大且在径流中期出现 2 次典型雨峰。SS、COD 质量浓度随降雨强度呈现波动变化,重金属 Cu、Pb、Cr、Cd 呈现与降雨强度更好的相关性。因初期雨强较大,对地面形成有效冲刷,径流开始后较短时间各污染物质量浓度均达到峰值,此后在下降过程中受雨强变化导致的径流冲刷能力变化影响而呈锯齿形波动,两次典型雨峰过后质量浓度趋于平稳,因降雨历时长,中后期可能受雨期交通即时排污影响略有升高;溶解态污染物则呈现相似排放规律,即在初期质量浓度达到最大,其后随雨强变化呈轻微锯齿形波动,后期受雨期交通即时排污影响,污染物质量浓度略有升高。

综上所述,以降雨强度、降雨量、降雨历时等指标表征的降雨特征及污染物赋存类型均对径流过程污染物质量浓度变化产生影响。降雨强度表征着径流冲刷地表的能量,只有当雨强和径流流速超过地表物质的启动流速时,颗粒态污染物才会从地表

剥离、被径流裹挟,所以足够大的雨强出现的时段影响着径流中颗粒态污染物的输出,显著表现为颗粒态污染物质量浓度峰值出现时间均略滞后于足够大的雨强峰值,但溶解态污染物均在径流初期达到峰值,不受雨强大小表征的径流冲刷能力大小的影响,表明溶解态污染物容易从路面剥离进入径流,其受降雨强度影响较小;降雨历时也对径流污染质量浓度具有一定影响,若降雨历时短,路面累积的污染物尚未被完全冲刷干净,则末期径流仍保持较高浓度,若降雨历时长且期间有较大雨峰出现,强劲的径流冲刷可将前期累积于地表的大部分污染物携带进入径流,浓度峰值过后迅速下降,中后期维持较低水平,表明前期累积的路面污染物被冲刷殆尽,此后若降雨过程继续,则雨期交通污染源即时排污产生的影响逐步显现,表现为径流后期污染物质量浓度略有增加;降雨量与降雨强度、降雨历时相关,其对径流污染的影响较为复杂,当降雨强度增大、降雨量增大时,一方面径流冲刷地表的能力增加,径流能够裹挟、夹带更多的污染物,但降雨量越大稀释作用愈明显,污染物质量浓度也可能降低。

### 2.3 降雨特征对路面径流污染负荷排放的影响

基于 3 场典型径流事件全程污染物质量浓度和降雨量测试结果,绘制不同类型降雨事件同类污染物的  $M(v)$  曲线见图 5,以分析比较降雨特征对路面

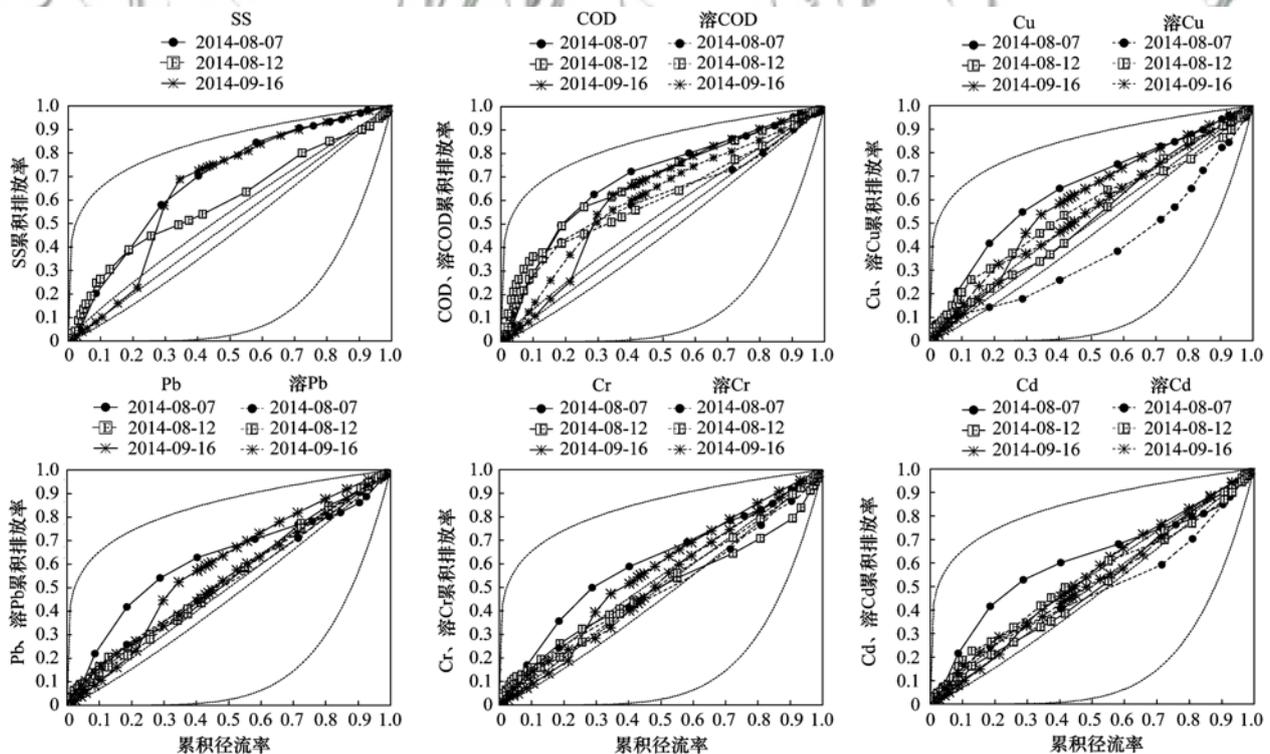


图 5 不同雨型径流事件各污染指标的  $M(v)$  曲线

Fig. 5 The  $M(v)$  curves of different pollutants in the road runoff caused by different rainfall types

径流污染负荷排放的影响。

从图 5 可见, I、II 型降雨事件较之 III 型降雨, SS、COD、Cu、Pb、Cr、Cd 的负荷初期冲刷效应更明显, 表明降雨特征对上述污染物负荷排放具有显著影响, 也即上述污染物的污染负荷是否不成比例地由初期径流携带与降雨特征密切相关, 初期雨强大的 II 型降雨事件较雨量小、降雨强度小且平均的 I 型径流事件初期冲刷效应更加明显。而溶解态污染物的出流受降雨特征的影响较小, 均在径流初期达到浓度峰值而与雨强大小及降雨量大小无关, 故图 5 中溶解态污染物呈现出初期冲刷效应受雨型影响不大的规律。

#### 2.4 污染物类型对路面径流污染负荷排放的影响

基于 13 场径流事件各污染指标及降雨量测试结果, 采用式(3)计算各场次径流各污染物的  $FF_{30}$ , 并对计算结果进行统计分析, 分析结果见图 6。

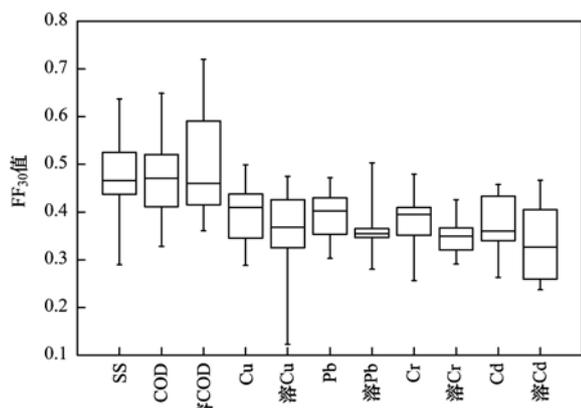


图 6 13 场路面径流事件各污染指标  $FF_{30}$  分布

Fig. 6 Box-plots of pollutants'  $FF_{30}$  of 13 road runoff events

由图 6 可见, 路面径流污染初期冲刷效应并非普遍存在, 同类污染物在不同径流事件中呈现截然不同的初期冲刷程度, 表现为图中各箱体高度的宽幅变化。但测试的 13 场径流事件所有污染指标均未出现  $FF_{30} > 0.8$  的强烈初期冲刷, 部分污染物出现中等和微弱程度初期冲刷, 多数溶解态污染物部分径流场次无初期冲刷现象出现。该研究结果与 Lee“初期 30% 径流至少携带 80% 污染物发生的概率仅为 1%”<sup>[29]</sup> 的研究结论吻合, 表明尽管多数场次径流初期污染物质量浓度较高, 但其并未不成比例的携带更多的污染负荷, 故仅处理初期径流无法实现对路面径流污染的有效控制。此外, 由图可见, SS、COD、溶解态 COD 的  $FF_{30}$  中值均大于 0.45 且明显高于其它污染物, 表明上述污染物较易出现初期冲刷, 也即在径流初期负荷比例较其他污染物高,

各重金属总量的初期负荷率也高于其相应溶解态含量, 总体而言, 路面径流各污染物的初期冲刷程度排序依次为  $COD > SS > 溶 COD > Cu > Pb > Cr > 溶 Cu > Cd > 溶 Pb > 溶 Cr > 溶 Cd$ 。

### 3 结论

(1) 西安市城市道路径流污染严重, 变化显著, SS、COD 是主要污染物, 其 EMC 远超《污水综合排放标准》二级标准, 需重点关注; 重金属污染也不容忽视, Pb、Cr 污染水平较高, 不经处理直接排放对受纳水体环境质量造成严重影响。

(2) 径流过程中污染物质量浓度变化与降雨特征及污染物的赋存状态密切相关。溶解态污染物排放不受雨强大小表征的径流冲刷能力大小影响, 均在径流初期达到质量浓度峰值随即持续降低, 而颗粒态污染物的质量浓度峰值出现在足够大的降雨强度峰值之后, 径流过程中随降雨强度变化波动显著; 降雨历时和降雨量也对径流过程污染物浓度变化产生影响。

(3) 降雨特征对溶解态污染物污染负荷排放的影响较小, 但对颗粒态污染物污染负荷排放具有显著影响。较之 III 型降雨, I、II 型降雨事件 SS、COD、Cu、Pb、Cr、Cd 的负荷初期冲刷效应更明显。

(4) 路面径流负荷初期冲刷效应并非普遍存在, 监测的 13 场径流所有监测指标均未出现强烈初期冲刷, 各污染物的初期冲刷程度排序为  $COD > SS > 溶 COD > Cu > Pb > Cr > 溶 Cu > Cd > 溶 Pb > 溶 Cr > 溶 Cd$ 。

#### 参考文献:

- [1] Nabizadeh R, Mahvi A, Mardani G, *et al.* Study of heavy metals in urban runoff [J]. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 2005, **1**(4): 325-333.
- [2] Eriksson E, Baun A, Scholes L, *et al.* Selected stormwater priority pollutants-a European perspective [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **383**(1-3): 41-51.
- [3] Imteaz M A, Hossain I, Hossain M I. Estimation of build-up and wash-off models parameters for an east-Australian catchment [J]. *International Journal of Water*, 2014, **8**(1): 48-62.
- [4] Zhao J Q, Chen Y, Hu B, *et al.* Mathematical model for sediment wash-off from urban impervious surfaces [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2016, **142**(4): 04015091.
- [5] Opher T, Ostfeld A, Friedler E. Modeling highway runoff pollutant levels using a data driven model [J]. *Water Science and Technology*, 2009, **60**(1): 19-28.
- [6] Lau S L, Han Y, Kang J H, *et al.* Characteristics of highway stormwater runoff in Los Angeles; metals and polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Water Environment Research*, 2009, **81**(3):

- 308-318.
- [ 7 ] Helmreich B, Hilliges R, Schriewer A, *et al.* Runoff pollutants of a highly trafficked urban road-correlation analysis and seasonal influences[J]. *Chemosphere*, 2010, **80**(9): 991-997.
- [ 8 ] Li M H, Barrett M E. Relationship between antecedent dry period and highway pollutant: conceptual models of buildup and removal processes[J]. *Water Environment Research*, 2008, **80**(8): 740-747.
- [ 9 ] Kayhanian M, Fruchtmann B D, Gulliver J S, *et al.* Review of highway runoff characteristics: comparative analysis and universal implications[J]. *Water Research*, 2012, **46**(20): 6609-6624.
- [ 10 ] Flint K R, Davis A P. Pollutant mass flushing characterization of highway storm water runoff from an ultra-urban area[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, **133**(6): 616-626.
- [ 11 ] Kayhanian M, Stenstrom M K. First flush highway runoff characterization: for stormwater runoff treatment [ J ]. *Stormwater*, 2008, **9**(2): 32-45. (未找到本文献信息,请核对)
- [ 12 ] Lindblom E, Ahlman S, Mikkelsen P S. Uncertainty-based calibration and prediction with a stormwater surface accumulation-washoff model based on coverage of sampled Zn, Cu, Pb and Cd field data[J]. *Water Research*, 2011, **45**(13): 3823-3835.
- [ 13 ] Avellaneda P, Ballesteros T P, Roseon R M, *et al.* On parameter estimation of urban storm-water runoff model [ J ]. *Journal of Environmental Engineering*, 2009, **135**(8): 595-608.
- [ 14 ] 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.
- [ 15 ] Hallberg M, Renman G, Lundbom T. Seasonal variations of ten metals in highway runoff and their partition between dissolved and particulate matter[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, **181**(1-4): 183-191.
- [ 16 ] Abrishamchi A, Massoudieh A, Kayhanian M. Probabilistic modeling of detention basins for highway stormwater runoff pollutant removal efficiency[J]. *Urban Water Journal*, 2010, **7**(6): 357-366.
- [ 17 ] 陈莹, 赵剑强, 胡博, 等. 西安市城市主干道路面径流初期冲刷效应[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(3): 929-935.  
Chen Y, Zhao J Q, Hu B, *et al.* First flush effect of urban trunk road runoff in Xi'an [ J ]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, **6**(3): 929-935.
- [ 18 ] 袁宏林, 李星宇, 王晓昌. 西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4143-4147.  
Yuan H L, Li X Y, Wang X C. Heavy metals pollution and analysis of seasonal variation runoff in Xi'an[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4143-4147.
- [ 19 ] 任玉芬, 王效科, 欧阳志云, 等. 北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 373-378.  
Ren Y F, Wang X K, Ouyang Z Y, *et al.* Analysis of first flush effect of typical underlying surface runoff in Beijing urban city [ J ]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 373-378.
- [ 20 ] 武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 等. 城市道路径流的排污特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 2691-2696.  
Wu J L, Ren Y F, Wang X M, *et al.* Characterization of pollutant wash-off in the urban stormwater [ J ]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 2691-2696.
- [ 21 ] 冯伟, 王建龙, 车伍. 不同地表雨水径流冲刷特性分析[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(3): 817-822.  
Feng W, Wang J L, Che W. Analysis on characteristics of stormwater runoff flush on different land surfaces [ J ]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, **6**(3): 817-822.
- [ 22 ] 王龙涛, 段丙政, 赵建伟, 等. 重庆市典型城镇区地表径流污染特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2809-2816.  
Wang L T, Duan B Z, Zhao J W, *et al.* Pollution characteristics of surface runoff of typical town in Chongqing city [ J ]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2809-2816.
- [ 23 ] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市路面地表径流特征分析[J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(4): 469-473.  
Huang J L, Du P F, Ou Z D, *et al.* Characterization of urban roadway runoff in Macau [ J ]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(4): 469-473.
- [ 24 ] 武子澜, 杨毅, 刘敏, 等. 城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4148-4156.  
Wu Z L, Yang Y, Liu M, *et al.* Distribution and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in urban rainfall runoff [ J ]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4148-4156.
- [ 25 ] 傅大放, 石峻青, 李贺. 高速公路雨水径流重金属污染初期效应[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(8): 1672-1677.  
Fu D F, Shi J Q, Li H. First flush analysis of heavy metals in expressway stormwater runoff [ J ]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(8): 1672-1677.
- [ 26 ] 李春林, 刘森, 胡远满, 等. 沈阳市降雨径流污染物排放特征[J]. *生态学杂志*, 2014, **33**(5): 1327-1336.  
Li C L, Liu M, Hu Y M, *et al.* Characteristics of pollutants in urban rainfall runoff in Shenyang city [ J ]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(5): 1327-1336.
- [ 27 ] Deletic A B, Maksimovic C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas [ J ]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, **124**(9): 869-879.
- [ 28 ] Bertrand K J, Chebbo G, Saget A. Distribution of pollutant mass vs volume in stormwater discharges and the first flush phenomenon [ J ]. *Water Research*, 1998, **32**(8): 2341-2356.
- [ 29 ] Lee J H, Bang K W, Ketchum L H Jr, *et al.* First flush analysis of urban storm runoff [ J ]. *Science of the Total Environment*, 2002, **293**(1-3): 163-175.

## CONTENTS

Marine Aerosol Using On-board Aerosol Mass Spectrometry .....	YAN Jin-pei, CHEN Li-qi, LIN Qi, <i>et al.</i> (2629)
Analysis of Spatio-temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Depth over the Northwest of China by MODIS C6 Product .....	ZHAO Shi-wei, GAO Xiao-qing (2637)
Sources and Characteristics of Regional Background PM <sub>1</sub> in North China During the Autumn and Winter Polluted Period .....	ZHANG Zhou-xiang, ZHANG Yang-mei, ZHANG Xiao-ye, <i>et al.</i> (2647)
Pollution Characteristics and Light Extinction Contribution of Water-soluble Ions of PM <sub>2.5</sub> in Hangzhou .....	WU Dan, LIN Shao-long, YANG Huan-qiang, <i>et al.</i> (2656)
Formation and Size Distribution of the Secondary Aerosol Inorganic Ions in Different Intensity of Haze in Qingdao, China .....	XIE Dan-dan, QI Jian-hua, ZHANG Rui-feng (2667)
Comparison of Characteristics and Reactive Oxidative Species of PM <sub>2.5</sub> in Xi'an, China During Haze and Clean Days .....	WANG Kun, HAN Yong-ming, Ho Steven Sai Hang, <i>et al.</i> (2679)
Seasonal Variation and Sources of Dicarboxylic Acids and Related Compounds in PM <sub>10</sub> from Mt. Huangshan .....	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, ZHANG Er-xun, <i>et al.</i> (2688)
Composition Characteristics and Sources Apportionment of Lanthanoid in PM <sub>2.5</sub> of Quanzhou .....	ZHANG Yun-feng, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (2698)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Hazardous Air Pollutants in the Surroundings of Three Petrochemical Industries in Northwest China .....	XU Ya-xuan, LI Xiao-min, YU Hua-tong, <i>et al.</i> (2707)
VOCs Characteristics and Sources Apportionment in Yixing City During the G20 Summit .....	ZHANG Lin, ZHANG Xiang-zhi, QIN Wei, <i>et al.</i> (2718)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Sichuan Province from 2005 to 2014 .....	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (2728)
Air Pollutant Emission Inventory of Non-road Machineries in Typical Cities in Eastern China .....	LU Jun, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2738)
Estimation of Health Risk and Enaction of Safety Standards of <i>N</i> -nitrosodimethylamine (NDMA) in Drinking Waters in China .....	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (2747)
Comparison and Analysis of the Quantitative Methods for Pollutant Sources Load in Groundwater Contamination Risk Assessment .....	ZHAO Peng, HE Jiang-tao, WANG Man-li, <i>et al.</i> (2754)
Distribution and Sources of <i>n</i> -alkanes in Surface Seawater of Jiaozhou Bay .....	ZHANG Qian, SONG Jin-ming, PENG Quan-cai, <i>et al.</i> (2763)
Spatial Variations of CO <sub>2</sub> Degassing Across Water-air Interface and Its Impact Factors in Summer in Guijiang River, China .....	ZHANG Tao, LI Jian-hong, PU Jun-bing, <i>et al.</i> (2773)
Spatial Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk of Antimony and Selected Heavy Metals in Sediments of Duliujiang River .....	NING Zeng-ping, XIAO Qing-xiang, LAN Xiao-long, <i>et al.</i> (2784)
Distribution Characteristics and Potential Risk of Bisphenol Analogues in Surface Water and Sediments of Lake Taihu .....	CHEN Mei-hong, GUO Min, XU Huai-zhou, <i>et al.</i> (2793)
Characteristics of Water Extractable Organic Nitrogen from Erhai Lake Sediment and Its Differences with Other Sources .....	LI Wen-zhang, ZHANG Li, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (2801)
High-resolution Distribution Characteristics of Phosphorous, Iron and Sulfur Across the Sediment-Water Interface of Aha Reservoir .....	SUN Qing-qing, CHEN Jing-an, WANG Jing-fu, <i>et al.</i> (2810)
Distribution Characteristics of Drugs of Abuse and Their Metabolites in Aqueous Environment of Beijing, China .....	ZHANG Yan, ZHANG Ting-ting, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (2819)
Impacts of Rainfall Characteristics and Occurrence of Pollutant on Effluent Characteristics of Road Runoff Pollution .....	CHEN Ying, WANG Zhao, WU Ya-gang, <i>et al.</i> (2828)
Inhibition of Internal Phosphorus Release in the Black-Odor Channel Under Different Adding Methods of CaO <sub>2</sub> .....	XU Yao, LI Da-peng, HAN Fei-er, <i>et al.</i> (2836)
Transport of Nitrogen and Phosphorus from Sloping Farmland with Thin Purple Soil Overlying Rocks .....	XIAN Qing-song, TANG Xiang-yu, ZHU Bo (2843)
Purification of Slightly Salt-alkaline Water Bodies by Microorganism Enhanced Combined Floating Bed .....	CHEN You-yuan, WU Ya-dong, SUN Ping, <i>et al.</i> (2850)
MgO-Biochar for the Adsorption of Phosphate in Water .....	WANG Bin-bin, LIN Jing-dong, WAN Shun-li, <i>et al.</i> (2859)
Degradation of <i>N</i> -nitrosodimethylamine by Palladium/ Iron Bimetallic Composite Catalytic Fiber .....	ZHANG Huan, FU Min, WEI Jun-fu, <i>et al.</i> (2868)
Effects of Goethite, Magnetite and Gypsum on the Anaerobic Degradation of 2,4-Dichlorophenol .....	KONG Dian-chao, ZHOU Yue-fei, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (2875)
Transformation of Disinfection Byproduct Precursors During the Wastewater Regeneration Processes .....	HAN Hui-hui, MIAO Heng-feng, ZHANG Ya-jing, <i>et al.</i> (2883)
Treatment of PTA Wastewater by Modified Anode Microbial Fuel Cell .....	SUN Jing-yun, FAN Meng-jie, CHEN Ying-wen, <i>et al.</i> (2893)
Selective Inhibition of Rice Straw Extract on Growth of Cyanobacteria and Chlorophyta .....	SU Wen, CHEN Jie, ZHANG Sheng-peng, <i>et al.</i> (2901)
Cultivation of <i>Spirulina platensis</i> in Digested Piggery Wastewater Pretreated by SBR with Operating Conditions Optimization .....	CAI Xiao-bo, YU Qiang-qiang, LIU Rui, <i>et al.</i> (2910)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Process with K <sup>+</sup> Addition in Saline Surroundings .....	WU Guo-dong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2917)
Efficient and Stable Operation of Shortcut Nitrification by Entrapping Ammonia Oxidizing Bacteria .....	YU Meng-yu, LIU Yi, TIAN Yu-bin, <i>et al.</i> (2925)
Fast Start-up of ANAMMOX and the Spatial Distribution of EPS in ANAMMOX Granules .....	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (2931)
Ammonia Oxidation with Potential Electron Acceptor in ANAMMOX Sludge .....	LI Xiang, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (2941)
Ammoniac Waste Gas in-situ Treatment Based on ANAMMOX Process .....	LIN Xing, WANG Fan, YUAN Yan, <i>et al.</i> (2947)
Extensive Green Roof Substrate Composition Based on Sludge Recycling .....	SHEN Qing-ran, LI Tian, CAO Yi, <i>et al.</i> (2953)
Short-term Effect of Roxithromycin on Abundance and Diversity of Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Activated Sludge .....	GAO Jing-feng, SUN Li-xin, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (2961)
Influence of Salinity on Microbial Community in Activated Sludge and Its Application in Simulated Dye Wastewater Treatment .....	ZHOU Gui-zhong, XU Shuo, YAO Qian, <i>et al.</i> (2972)
Shift of Microbial Communities During the CO <sub>2</sub> -Brine-Sandstone Interaction Process .....	WANG Bo-qiang, LI Chen-yang, LU Wei, <i>et al.</i> (2978)
Response of Soil Respiration and Heterotrophic Respiration to Returning of Straw and Biochar in Rape-Maize Rotation Systems .....	TIAN Dong, GAO Ming, HUANG Rong, <i>et al.</i> (2988)
Effect of Simulated Climate Warming on Microbial Community and Phosphorus Forms in Wetland Soils .....	TENG Chang-yun, SHEN Jian-guo, WANG Zhong, <i>et al.</i> (3000)
Patterns of Bacterial Community Through Soil Depth Profiles and Its Influencing Factors Under <i>Betula albosinensis</i> Burkill in the Xinjiashan Forest Region of Qinling Mountains .....	DU Can, XU Chen-yang, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3010)
Effects of Microbial Activities on Mercury Methylation in Farmland near Mercury Mining Area .....	JIA Qin, ZHU Xue-mei, WANG Qi, <i>et al.</i> (3020)
Effect of Sepiolite Application on the Migration and Redistribution of Pb and Cd in Soil Rice System in Soil with Pb and Cd Combined Contamination .....	FANG Zhi-ping, LIAO Min, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3028)
Application of Amphoteric-Cationic Combined Modification on Phenol Adsorption of Yellow Brown Soil .....	LIU Wei, MENG Zhao-fu, REN Shuang, <i>et al.</i> (3036)
Bioaccumulation of Heavy Metals in Twigs and Leaves of <i>Abies fabri</i> at Mount Gongga in China: A Comparison Study Between 1999 and 2014 .....	LI Fen, WANG Xun, LUO Ji, <i>et al.</i> (3045)
Subcellular Distribution and Chemical Forms of Heavy Metals in Three Types of Compositae Plants from Lead-Zinc Tailings Area .....	ZHU Guang-xu, XIAO Hua-yun, GUO Qing-jun, <i>et al.</i> (3054)
Effects of Bentonite Amendment on Detoxification, Heavy Metal Passivation and Estrone Elimination of Sewage Sludge Compost .....	ZHOU Li-na, CAI Han-zhen, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3061)
Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Food Waste and Straw .....	GUO Xiang-lin, ZUO Jian-e, SHI Xu-chuan, <i>et al.</i> (3070)
Basic Features of Combustible Rural Garbage Component and Its Spatial-temporal Difference in China .....	YAN Zhuo-yi, YUE Bo, GAO Hong, <i>et al.</i> (3078)
Optimization of Promoter and Support for Co-based/zeolites Catalysts in Catalytic Reduction of NO <sub>x</sub> by CH <sub>4</sub> .....	PAN Hua, JIAN Yan-fei, CHEN Ning-na, <i>et al.</i> (3085)