

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第1期

Vol.33 No.1

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

30年来中国民航运输行业的大气污染物排放	何吉成(1)
北京上甸子站气相色谱法大气CH ₄ 和CO在线观测方法研究	汪巍,周凌晔,方双喜,张芳,姚波,刘立新(8)
2010年1月北京城区大气消光系数重建及其贡献因子	朱李华,陶俊,陈忠明,赵岳,张仁健,曹军骥(13)
广东东江流域多氯萘的大气沉降研究	王琰,李军,刘向,成志能,张瑞杰,张干(20)
塔克拉玛干沙尘暴源区空气微生物群落的代谢特征	段魏魏,娄恺,曾军,胡蓉,史应武,何清,刘新春,孙建,晁群芳(26)
紫外光降解对生物过滤塔去除氯苯性能的影响机制研究	王灿,席劲瑛,胡洪营,姚远(32)
春季黄渤海溶解有机碳的平面分布特征	丁雁雁,张传松,石晓勇,商荣宁(37)
春季胶州湾海水汞的形态研究	许廖奇,刘汝海,王金玉,汤爱坤,王舒(42)
丽江盆地地表-地下水的水化学特征及其控制因素	蒲焘,何元庆,朱国锋,张蔚,曹伟宏,常丽,王春风(48)
塔里木河下游输水间歇地下水埋深及化学组分的变化	陈永金,李卫红,董杰,刘加珍(55)
某危险废物填埋场地下水污染预测及控制模拟	马志飞,安达,姜永海,席北斗,李定龙,张进保,杨昱(64)
北京市城市降雨径流水质评价研究	侯培强,任玉芬,王效科,欧阳志云,周小平(71)
重庆市路面降雨径流特征及污染源解析	张千千,王效科,郝丽岭,侯培强,欧阳志云(76)
沉水植物床-固定化微生物技术在水源地修复中的应用研究	陈祈春,李正魁,王易超,吴凯,范念文(83)
Pd/TiO ₂ 对水体中2,4-二氯酚的催化加氢脱氯研究	张寅,邵芸,陈欢,万海勤,万玉秋,郑寿荣(88)
pH值对纳米零价铁吸附降解2,4-二氯苯酚的影响	冯丽,葛小鹏,王东升,汤鸿霄(94)
给水管网中耐氯性细菌的灭活特性研究	陈雨乔,段晓笛,陆品品,王茜,张晓健,陈超(104)
安徽省畜禽粪便污染耕地、水体现状及其风险评价	宋大平,庄大方,陈巍(110)
染整废水深度处理纳滤工艺膜污染成因分析	曹晓兵,李涛,周律,杨海军,王晓(117)
间歇式气水联合反冲洗生物炭池的试验研究	谢志刚,邱雪敏,赵燕玲(124)
pH及表面活性剂对诺氟沙星在海洋沉积物上吸附行为的影响	庞会玲,杨桂朋,高先池,曹晓燕(129)
硅在湖泊沉积物上的吸附特征及形态分布研究	吕昌伟,崔萌,高际玫,张细燕,万丽丽,何江,孟婷婷,白帆,杨旭(135)
农作物残体制备的生物质炭对水中亚甲基蓝的吸附作用	徐仁扣,赵安珍,肖双成,袁金华(142)
高分子固体废物基活性炭对有机染料的吸附解吸行为研究	廉菲,刘畅,李国光,刘一夫,李勇,祝凌燕(147)
活性污泥对四环素的吸附性能研究	陈瑞萍,张丽,于洁,陶芸,张忠品,李克勋,刘东方(156)
加油站油类污染物自然衰减现场试验研究	贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(163)
生物质炭对土壤中氯苯类物质生物有效性的影响及评价方法	宋洋,王芳,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,谢祖彬,蒋新(169)
利用第二缺氧段硝酸盐氮浓度作为MUCT工艺运行控制参数	王晓玲,尹军,高尚(175)
数学模拟好氧颗粒污泥的形成及水力剪切强度对颗粒粒径的影响	董峰,张捍民,杨凤林(181)
不同污泥停留时间对城市污泥生物沥浸推流式运行系统的影响	刘奋武,周立祥,周俊,姜峰,王电站(191)
间歇曝气生物滤池生物除磷性能研究	曾龙云,杨春平,郭俊元,罗胜联(197)
鸡粪与互花米草沼渣混合发酵产甲烷的研究	陈广银,常志州,叶小梅,杜静,徐跃定,张建英(203)
北京市生活垃圾填埋场产甲烷不确定性定量评估	陈操操,刘春兰,李铮,王海华,张妍,王璐(208)
外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电特性的研究	杨慧,刘志华,李小明,杨麒,方丽,黄华军,曾光明,李硕(216)
赤潮藻电致化学发光分子探针检测系统的构建	朱霞,甄毓,米铁柱,池振明,徐晓春(222)
邻苯二甲酸二丁酯对短裸甲藻的抑制机制研究	别聪聪,李锋民,王一斐,王昊云,赵雅茜,赵薇,王震宇(228)
纳米TiO ₂ 对短裸甲藻的毒性效应	李锋民,赵薇,李媛媛,田志佳,王震宇(233)
苏州河底泥3种内分泌干扰物的空间分布及环境风险	李洋,胡雪峰,王效举,茂木守,大塚宜寿,细野繁雄,杜艳,姜琪,李珊,冯建伟(239)
电子废物拆解区农业土壤中PCNs的污染水平、分布特征与来源解析	王学彤,贾金盼,李元成,孙阳昭,吴明红,盛国英,傅家谟(247)
洛阳市不同功能区道路灰尘重金属污染及潜在生态风险	刘德鸿,王发园,周文利,杨玉建(253)
湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价	刘春早,黄益宗,雷鸣,郝晓伟,李希,铁柏清,谢建治(260)
广西铅锡矿冶炼区土壤剖面及孔隙水中重金属污染分布规律	项萌,张国平,李玲,魏晓飞,蔡永兵(266)
缺氧条件下土壤砷的形态转化与环境行为研究	吴锡,许丽英,张雪霞,宋雨,王新,贾永锋(273)
可渗透反应复合电极法对铬(VI)污染土壤的电动修复	付融冰,刘芳,马晋,张长波,何国富(280)
胡敏酸对汞还原能力的测定和表征	江韬,魏世强,李雪梅,卢松,李梦婕,罗畅(286)
Zn(II)对生物质碳源处理酸性矿山排水中厌氧微生物活性影响	黎少杰,陈天虎,周跃飞,岳正波,金杰,刘畅(293)
油气田土壤样品中可培养丁烷氧化菌多样性研究	张莹,李宝珍,杨金水,汪双清,袁红莉(299)
利用PCR-DGGE分析未开发油气田地表微生物群落结构	满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(305)
黄土高原六道沟流域8种植物根际细菌与AMF群落多样性研究	封晔,唐明,陈辉,丛伟(314)
鸡粪与猪粪所含土霉素在土壤中降解的动态变化及原因分析	张健,关连珠,颜丽(323)
杂质对废塑料裂解产物及污染物排放的影响	赵磊,王中慧,陈德珍,马晓波,栾健(329)
《环境科学》征稿简则(7)	
《环境科学》征订启事(19)	
信息(47,70,202,304)	

重庆市路面降雨径流特征及污染源解析

张千千¹, 王效科^{1*}, 郝丽岭², 侯培强¹, 欧阳志云¹

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 西南大学资源与环境学院, 重庆 400715)

摘要: 2010年雨季对重庆市3场降雨时段的地表径流进行采样监测, 分析了重庆市路面降雨径流过程特征与降雨强度和降雨间隔时间对不同水质参数初始冲刷的影响, 运用多元统计技术区分出路面径流的潜在污染源。结果表明, 3场降雨径流的COD、TP和TN的次降雨平均浓度(EMC)分别为60.83~208.03、0.47~1.01和2.07~5.00 mg·L⁻¹, 超出了国家地表水环境质量Ⅴ类标准, 是主要污染物; 3次降雨事件中, 污染物浓度的峰值均提前或同步于径流量的峰值, 并且污染物浓度的峰值多数出现在产流10 min内; 重金属Zn、Cu、Pb和Cd浓度随降雨径流过程呈锯齿状变化; 运用主成分分析区分出路面径流水质的2种潜在污染源: ①机动车交通损耗和大气干湿沉降; ②城市垃圾。

关键词: 降雨径流; 污染源; 初始冲刷; 次降雨平均浓度(EMC); 主成分分析

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)01-0076-07

Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing

ZHANG Qian-qian¹, WANG Xiao-ke¹, HAO Li-ling², HOU Pei-qiang¹, OUYANG Zhi-yun¹

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environments, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: By investigating surface runoff from urban roadway in Chongqing, we assessed the characteristics of surface runoff pollution and the effect of rainfall intensity and antecedent dry weather period on water quality. Using multivariate statistical analysis of data of runoff quality, potential pollutants discharged from urban roadway runoff were identified. The results show that the roadway runoff has high levels of COD, TP and TN, the EMC were 60.83-208.03 mg·L⁻¹, 0.47-1.01 mg·L⁻¹ and 2.07-5.00 mg·L⁻¹ respectively, being the main pollutants; The peaks of pollutant concentration are ahead of or synchronous with the peak of runoff volume; the peaks of pollutant concentrations are mostly occurred within 10 minutes of rainfall. The heavy metal concentrations fluctuate dentately during runoff proceeding. Two potential pollution sources to urban roadway runoff apportioned by using principal component analysis are: vehicle's traffic loss and atmospheric dry and wet deposition, and municipal wastes.

Key words: storm runoff; pollution sources; initial flushing; event mean concentration(EMC); principal component analysis

随着点源污染逐步得到控制, 城市面源污染已经成为制约城市水环境质量的重要影响因素。面源污染是指溶解的或固体污染物从非特定的地点, 通过径流过程而汇入受纳水体, 引起的水体污染^[1,2]。

研究城市暴雨径流和面源污染规律, 对城市水环境问题的研究有着重要的意义。由于城市路面径流往往直接排入城区湖泊水体或是海湾, 易引起水质恶化和水生生态系统破坏。因此, 20世纪70年代以来, 许多国家相继开展了城市路面暴雨径流监测, Butcher研究了场次降雨路面径流的污染物平均浓度(EMC)^[3]。Taeb和Lee等^[4,5]研究了路面径流污染物的初始冲刷现象, 分析了初始冲刷与降雨强度和2次降雨间隔之间关系。Shinya等^[6]探讨了路面径流水质与交通强度、暴雨强度、干期长度等的关系。我国在面源污染监测方面起步相对较晚, 近年来, 在北京、西安、武汉等城市相继开展了路面径流

水质的监测分析^[7~18], 但对山地城市面源污染监测一直未开展。

基于此, 本研究选取重庆(山地城市)市公路汇水区, 进行路面径流水质的现场监测, 并且运用了主成分分析方法识别了路面径流的潜在污染源, 通过累积山地城市路面径流的监测数据, 获取山地城市路面径流污染特征, 以期对山地城市降雨径流污染的控制提供依据。

收稿日期: 2011-03-25; 修订日期: 2011-05-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07315); 国家自然科学基金重点项目(41030744); 城市与区域生态国家重点实验室自主项目(SKLU2008-1-01)

作者简介: 张千千(1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为城市面源污染, E-mail: z_qqian@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangxk@cees.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

重庆地区地形地貌结构较为复杂. 地貌类型可分为中山、低山、丘陵、台地、平原(坝)5 大类. 区域属四川盆地热带季风湿润气候, 气候温和, 雨量充沛, 四季分明. 年均降雨量为1 085.3 mm, 夏季占年降水量 40% ~ 50%, 历年平均相对湿度为 79%, 日照时数1 243.8 h. 年平均气温 17.5 ~ 18.7℃, 无霜期 296 d.

所选路面为沥青公路, 单车道, 位于重庆市北部新区大竹林镇慈竹路, 路面汇水区用地类型为 2 个居民住宅区之间的交通主干道. 采样地点选取公路上部的一雨水井, 以雨水井为降雨路面

径流出口的路面汇水面积约为 540 m², 坡度 10°, 周围以居住用地为主, 结合部分交通道路. 据现场调查统计, 车流量约为 300 ~ 600 辆/h, 日交通流量约8 000辆. 路面清扫时间在早晨 5 点左右, 人工清扫.

1.2 样品采集

2010 年共监测了 3 场降雨. 降雨的基本特征(见表 1). 当降雨产流时即开始采样, 在初期径流 30 min 内采样间隔 5 min; 30 ~ 60 min 时段内, 每隔 10 min 采 1 个样; 60 ~ 90 min 时段内, 每隔 15 min 采 1 个样. 90 min 以后为每隔 30 min 采 1 个样. 样品均采 1L. 在采样点附近安装了 JDZ-1 型数字雨量计, 收集降雨的资料, 在采集径流样的同时, 测定流速和记录水位, 计算流量.

表 1 2010 年监测降雨特征¹⁾

Table 1 Characteristics of rainfall events sampled in 2010

降雨事件	采样日期	降雨时间	降雨历时 /min	降雨量 /mm	雨强 /mm·min ⁻¹	最大雨强 /mm·min ⁻¹	2 次降雨间隔 /d	样品数 /个
(A)	2010-06-19	01:28 ~ 04:12	165	13.7	0.08	0.16	8	13
(B)	2010-07-04	14:45 ~ 17:15	150	21.2	0.14	0.62	11	13
(C)	2010-07-09	09:50 ~ 11:20	90	59.4	0.66	1.78	3	11

1) 2 次降雨间隔是指与上次降雨量超过 10 mm 降雨事件的间隔时间

1.3 样品分析

径流监测指标包括 pH、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TSS、COD、TN、TP 和溶解态重金属(Cu、Zn、Cd 和 Pb)等. pH 分析使用美国 Hach 公司生产的 SenSion156 便携式多参数测量仪; 溶解态重金属的测量采用 ICP-MS; 其余水质指标均按照标准方法进行测定^[19].

1.4 数据分析

1.4.1 场次降雨平均浓度(EMC)

在任意一场降雨引起的地表径流过程中, 由于降雨强度的随机性变化, 使得径流中污染物的浓度随时间变化很大, 所以目前通常采用“次降雨径流的平均浓度”来表示在一场降雨的地表径流全过程排放的某污染物的平均浓度(event mean concentration, EMC). EMC 定义为: 任意一场降雨所引起地表径流中排放的某污染物的质量除以总的径流体积. 可用下式表示:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T c_t Q_t dt}{\int_0^T Q_t dt}$$

式中, M 是指某场降雨径流所排放的某污染物的总量, g; V 是指某场降雨所引起的总的地表径流体

积, m³; c_t 是指某污染物在 t 时的浓度, mg·L⁻¹; Q_t 是指地表径流在 t 时的径流排水量, m³·s⁻¹; T 是指某场降雨的总历时, s.

3 次降雨污染物的平均浓度分别与地表水环境质量标准(GB 3838-2002)对比得出其污染水平(见表 2).

1.4.2 初期冲刷

在降雨径流产生的初期污染物浓度要高于后期的现象. 有关城市地表径流污染的初期冲刷特征许多研究者对城市地表径流的初期冲刷效应做了大量研究, 而且各自对初期冲刷的定义与所得的结论也不尽相同. 目前, 多采用 Geiger 的定义^[20], 即以污染物的累积污染负荷与累积径流量的相关性为基础, 以两者所形成无量纲累积曲线的发散度来确定是否发生了初始冲刷. 若曲线位于对角平分线左上部分, 则说明存在初期冲刷效应; 并且发散度越大, 说明初始冲刷现象越明显.

1.4.3 主成分分析

主成分分析是一种数学变换方法, 它把给定的一组相关变量通过线性变换转换成另一组不相关的变量, 这些新的变量按照方差依次递减的顺序排列. 在数学变换中保持变量的总方差不变, 使第一个变

量具有最大方差,称为第一主成分,第二个变量的方差次大,并和第一个变量不相关,称为第二主成分,依次类推,最后一个主成分方差最小,且与此前的主成分都不相关。

主成分分析法(PCA)是一种将多维因子纳入同一系统中进行定量化研究,理论比较完善的多元统计分析方法,在大气和水环境污染源解析中得到了广泛的应用,但在城市降雨径流中应用很少^[13]。基于此,本研究运用主成分分析来区分路面径流的污染源。

城市地表径流中的污染物主要来自于降雨对城市地表的冲刷,所以,城市地表沉积物是城市地表径流中污染物的主要来源。城市地表沉积物的组成决定着城市地表径流污染的性质。城市地表沉积物包含许多污染物质,有固体废物碎屑(城市垃圾、动物粪便和城市建筑施工场地堆积物)、化学药品(草坪施用的化肥农药)、空气沉降物和车辆排放物等。

应用 SPSS 17.0 对 3 场降雨 37 组数据的 11 个监测指标进行了主成分分析。由于 11 个监测指标的浓度差别较大,分析前数据需经过标准化处理。

2 结果与讨论

2.1 降雨特征描述

表 1 列出了所监测降雨事件的特征。由表 1 可

知,所监测的 3 场降雨事件差异较大,其中 6 月 19 日降雨时间在晚上 01:28,此时路上的车流量较少,路面还未清扫。2 次降雨间隔时间是 8 d,降雨量虽达到中雨级别,但由于降雨历时较长,降雨强度相对较小,对路面的冲刷较小。7 月 4 日降雨时间在 14:45,此时路上的车流量较大,2 次降雨间隔时间是 11 d,降雨量达到大雨级别,降雨历时较长,降雨强度较大。7 月 9 日降雨时间在 09:50,此时路面已清扫,路上的车流量较大,2 次降雨间隔时间是 3 d,降雨量达到暴雨级别,降雨历时较短,降雨强度很大,对路面的冲刷作用很大。本研究所监测 3 场降雨事件具有较好的代表性,为研究结果的可靠性提供了保证。

2.2 城市降雨径流场次降雨平均浓度(EMC)

由表 2 可见,3 场降雨径流水质参数:COD、TP 和 TN 的 EMC 值超出国家地表水环境质量 V 类标准,为公路径流主要污染物。与其他人的研究相比^[21,22],Cu、Zn、Cd 和 Pb 的浓度相对较低,因为本研究测定的是溶解态重金属的缘故。在 3 场降雨中,TSS 相差悬殊,可能与晴天累计天数不同和降雨强度有关。7 月 9 日的降雨,虽然降雨强度很大,但是由于 2 次降雨间隔较少,且路面刚清扫不久,所以污染物的浓度相对较低。

表 2 路面径流污染物平均浓度¹⁾/mg·L⁻¹

Table 2 Average concentration of pollutants in road runoff/mg·L⁻¹

采样日期	pH	COD	TP	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	TSS	Pb	Cu	Zn	Cd
2010-06-19	7.90	99.52 *	0.47 *	2.97 *	1.07	0.58	253.77	0.003 5	0.003 0	0.004 2	0.000 5
2010-07-04	8.01	208.03 *	1.01 *	5.00 *	1.40	1.04	874.00	0.002 2	0.004 7	0.006 5	0.000 5
2010-07-09	8.60	60.83 *	0.68 *	2.07 *	1.31	1.59	564.76	0.002 2	0.000 9	0.010 1	0.000 5
国标 V 类 ^[23]	6~9	≤40	≤0.4	≤2.0	≤2.0	—	—	≤0.1	≤1.0	≤2.0	≤0.01

1) “*”表示超出国家地表水环境质量 V 类标准;“—”表示无值

2.3 径流过程与污染物浓度的变化

图 1~3 分别是 3 次不同降雨特征条件下的路面径流-水质变化过程曲线图,图 1 是 2010 年 6 月 19 日的降雨过程图,是 1 次多峰型降雨,径流量的最高峰值出现在中后期,除 TSS 外,各污染物的浓度的峰值都提前于流量的峰值。TSS 和 TP 的浓度变化趋势与径流量的趋势基本一致,COD、TN、Cu 和 Cd 的浓度在径流过程的变化趋势基本一致,Zn 和 Pb 的浓度变化趋势一致。

由图 2 可见,径流量呈现逐渐减少的趋势,最大值出现在初期。COD、TSS、TN 和 TP 的浓度变化趋势与流量的变化趋势基本一致,重金属 Zn、Cu、Pb 和 Cd 浓度随降雨径流过程呈锯齿状变化。这主要是因

为 Zn、Cu、Pb 和 Cd 主要来自于轮胎摩擦、制动器和燃料等,采样时正值车辆的高峰期,所以重金属浓度呈锯齿状波动,这与黄金良等^[10]的研究一致。Cu 和 Cd 浓度变化趋势基本一致,Zn 和 Pb 的浓度变化趋势一致。

由图 3 可见,7 月 9 日的降雨过程比较复杂,径流量出现了 3 次峰值,最高峰出现在前期(第 4 个水样)。COD、TSS、TP 和 TN 的浓度都呈逐渐降低的趋势,TSS 和 TP 浓度的最大值与径流量的最大值一致,且变化趋势基本相同,COD 和 TN 的变化趋势基本相同,重金属 Zn、Cu、Pb 和 Cd 浓度呈锯齿状变化,并且都呈现出不同程度的翘尾现象。这主要是由于在降雨的后期,交通量逐渐的增大的缘故。Cu 和

Cd 浓度变化趋势基本一致, Zn 和 Pb 的浓度变化趋势一致。

由 3 次降雨事件所知, 污染物的峰值均提前或同步于径流量的峰值, 并且污染物浓度的峰值多数出现在产流 10 min 内, 这是山地城市与平原城市的

最大区别。TSS 和 TP 的浓度变化趋势与径流量的趋势基本一致。由于降雨过程中车辆仍在行驶, 导致重金属 Zn、Cu、Pb 和 Cd 浓度随降雨径流过程呈锯齿状变化。Cu 和 Cd 浓度变化趋势基本一致, Zn 和 Pb 的浓度变化趋势一致。

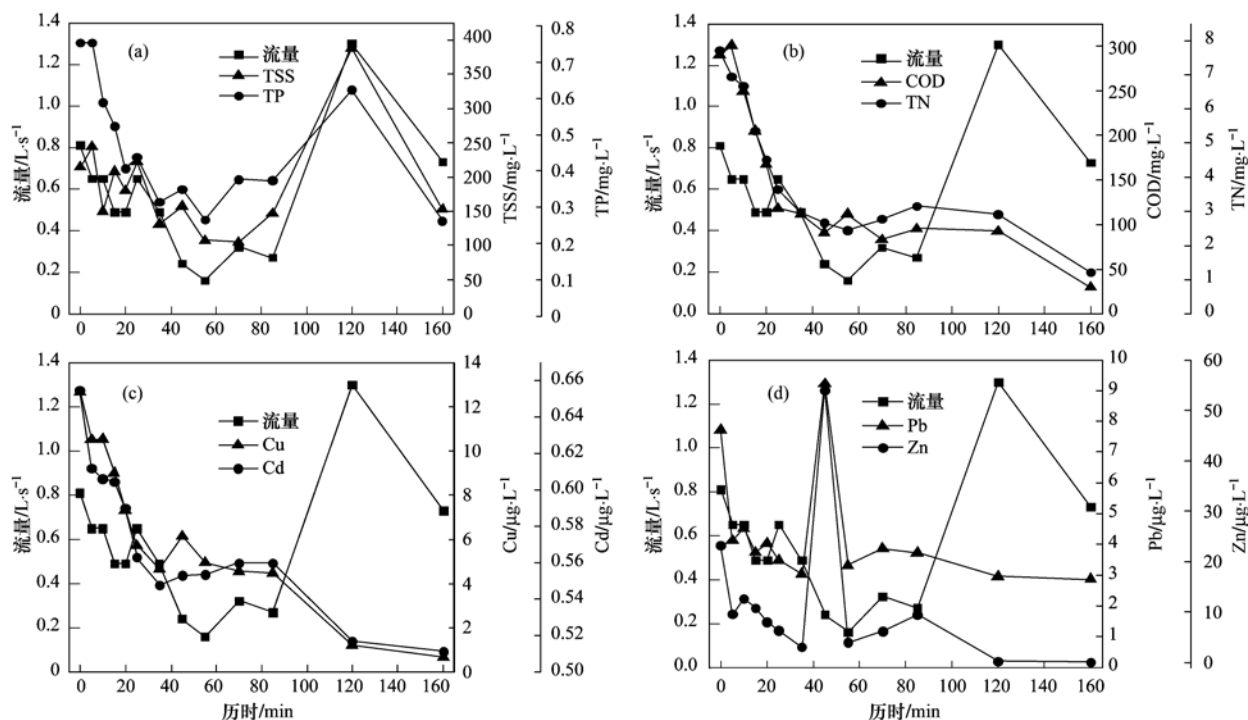


图 1 水质随降雨历时变化曲线图(2010-06-19)

Fig. 1 Pollutographs for June 19, 2010 rainfall event

2.4 初始冲刷分析

由图 4 可以看出: 在 3 次降雨事件中, COD、TN 和 Cu 都存在不同程度的初始冲刷现象; 由表 1 可知, 3 次降雨事件中降雨强度大小依次是: (A) 6 月 19 日 < (B) 7 月 4 日 < (C) 7 月 9 日, 2 次降雨间隔时间长短依次是 (B) 7 月 4 日 > (A) 6 月 19 日 > (C) 7 月 9 日。随着降雨强度的增大, COD、TN 和 Cu 曲线的发散度也相应增大, 初始冲刷现象更加明显。因此, COD、TN 和 Cu 受降雨强度的影响比较大。COD 随着 2 次降雨间隔时间延长, 初始冲刷现象更加明显。TN 和 Cu 受 2 次降雨间隔时间影响不是很大。在图 4(a) 中, TSS 无初始冲刷现象, TP 的初始冲刷现象也不是很明显; 在图 4(b) 和图 4(c) 中, TSS 和 TP 都存在明显的初始冲刷现象。说明 TSS 和 TP 的初始冲刷现象受降雨强度的影响比较大。Pb 和 Cd 在图 4(a) 和图 4(b) 中, 累积曲线发散度都很小, 存在微弱的初始冲刷现象, 在图 4(c) 中, 基本上不存在初始冲刷现象。这说明 Pb 和 Cd 初始冲刷

现象受降雨强度影响不大, 与 2 次降雨间隔时间长短有关。Zn 在图 4(a) 和图 4(b) 中, 累积曲线发散度很大, 存在很强的初始冲刷现象, 在图 4(c) 中, 累积曲线位于平衡线以下, 不存在初始冲刷现象。这说明 Zn 初始冲刷现象受降雨强度影响不大, 受 2 次降雨间隔时间长短影响很大。

2.5 路面径流污染源解析

在主成分分析之前, 对全部数据进行了 KMO 检验和 Barlett 球形检验, 结果显示, KMO 值为 0.714, Barlett 球形检验值为 467.547, 并且 $P < 0.05$, 表明原有数据适合进行主成分分析。

通过主成分分析及方差极大法旋转, 根据特征值 > 1 并且累计方差贡献率 > 75% 的原则, 提取出影响路面径流水质的 2 个主因子, 这 2 个因子能够解释全部变量的 76.893% (表 3 和图 5), 说明它们基本包含了以上 11 个指标的所有信息。第一主成分的贡献率为 51.480%, 与 PC1 密切相关的是 TN、COD、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、Cu、Cd 和 pH, Zn 和 Pb 与

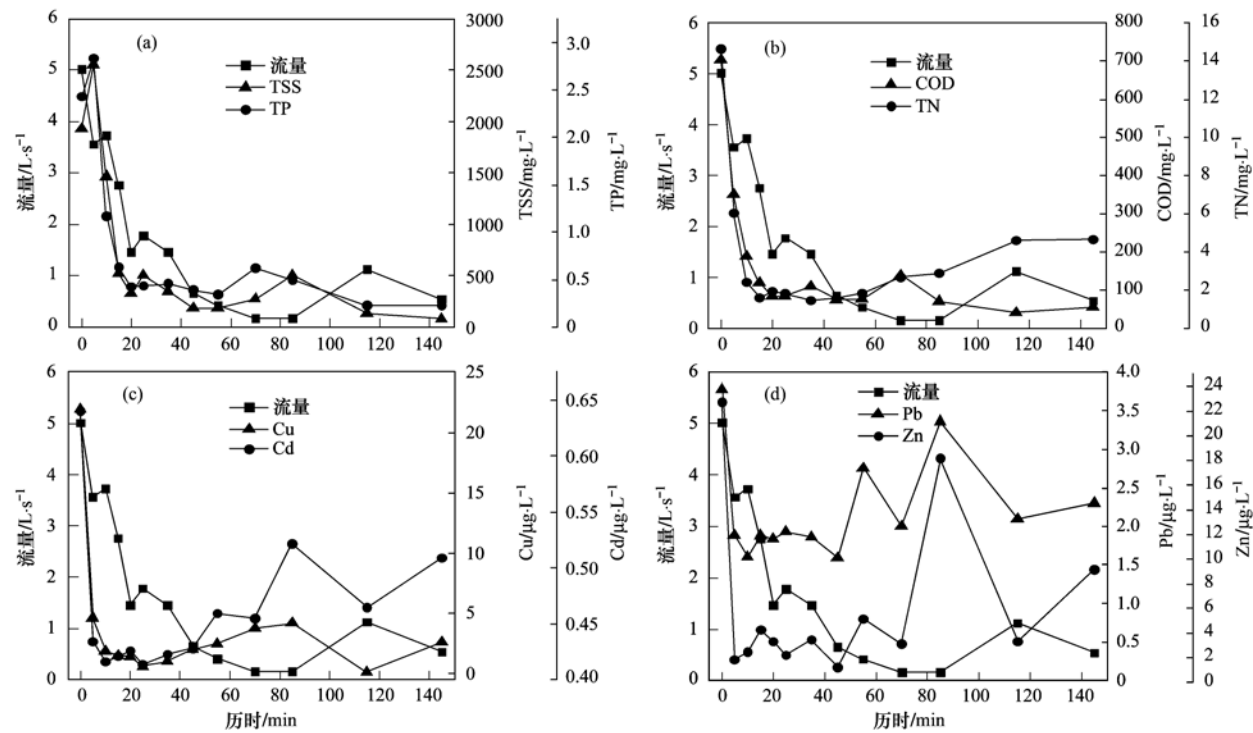


图 2 水质随降雨历时变化曲线图(2010-07-04)

Fig. 2 Pollutographs for July 4, 2010 rainfall event

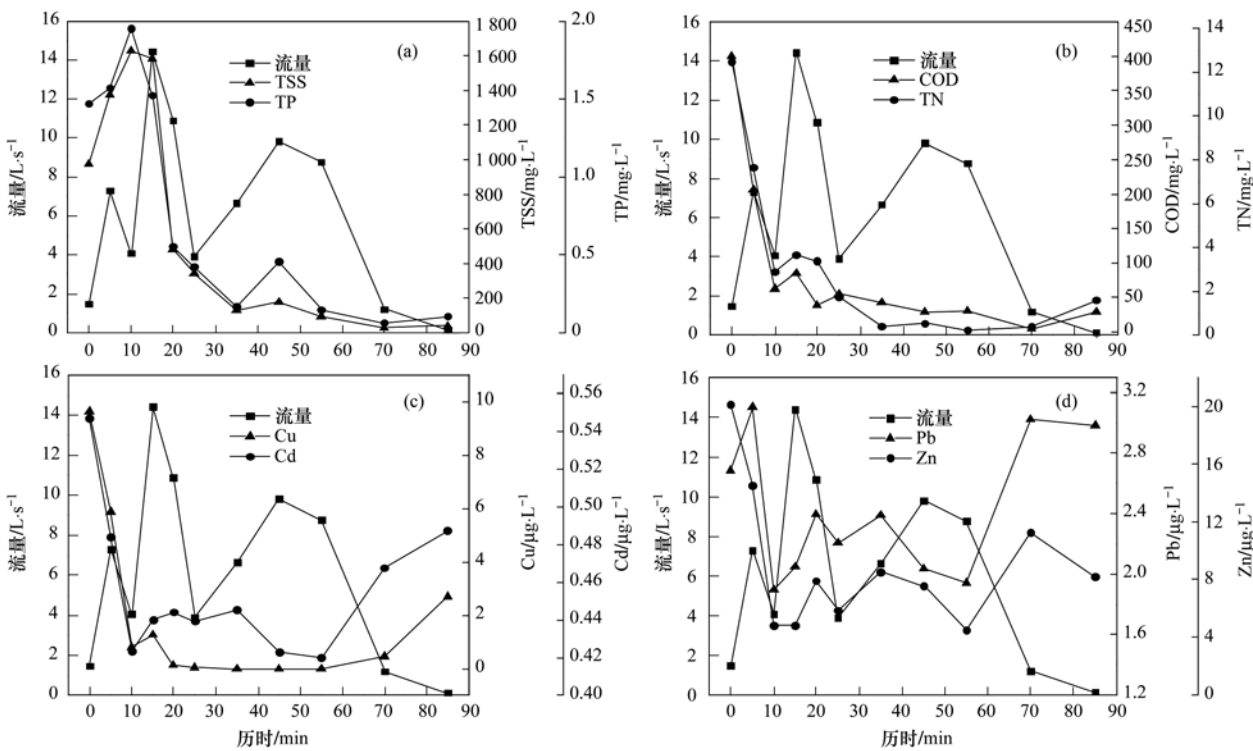


图 3 水质随降雨历时变化曲线图(2010-07-09)

Fig. 3 Pollutographs for July 9, 2010 rainfall event

PC1 的相关性一般, TN、COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 和 Cu 之间密切相关, Cd、Zn 和 Pb 之间密切相关; PC1 主

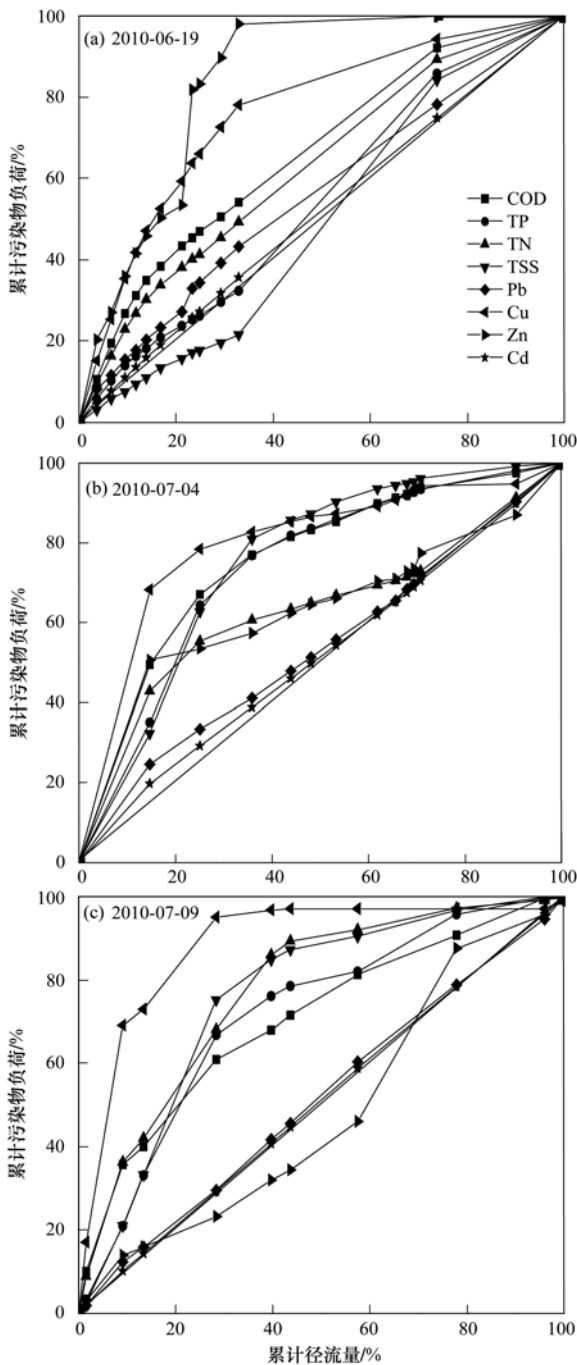


图4 3场降雨路面径流污染物初始冲刷分析
Fig.4 First flush of roadway runoff for 3 rainfall events

要反映的是路面径流水质主要受到重金属、氮和有机污染物的污染,其污染源为机动车交通损耗和大气干湿沉降.据黄金良等人研究降雨径流中的 TOC 和 COD 等有机物质主要来源于车辆轮胎损耗^[24],据 Sansalone 等^[25]研究,Zn、Cu 和 Pb 主要来自于制动器、车体结构和燃料等,Wu 等^[26]认为城市道路径流中氮主要来源于大气干湿沉降,道路径流中 70%~90% 的氮负荷来源于大气干湿沉降.与 PC2 密切

相关的是 TSS 和 TP,PC2 主要反映了路面径流水质受到 TSS 和磷的污染,其污染源为城市垃圾.

表3 路面径流的主成分分析结果

指标	成份	
	PC1	PC2
TN	0.934	0.220
Cu	0.928	-0.115
COD	0.861	0.296
NO ₃ ⁻ -N	0.718	0.363
NH ₄ ⁺ -N	0.674	0.027
Cd	0.665	-0.660
Zn	0.574	-0.419
Pb	0.570	-0.685
TP	0.563	0.762
TSS	0.392	0.835
pH	-0.806	0.396
方差贡献率/%	51.480	25.413
累计贡献率/%	51.480	76.893

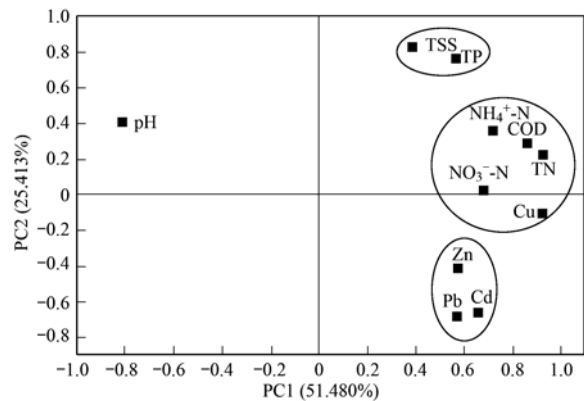


图5 路面径流主成分载荷值分析
Fig.5 Principal component analysis biplot for the road runoff

3 结论

(1)重庆市路面降雨径流水质参数:COD、TP 和 TN 的 EMC 值超出国家地表水环境质量 V 类标准,是公路径流的主要污染物.

(2)3 次降雨事件中,污染物的峰值均提前或同步于径流量的峰值,并且污染物浓度的峰值多数出现在产流 10 min 内,TSS 和 TP 的浓度变化趋势与径流量的趋势基本一致.重金属 Zn、Cu、Pb 和 Cd 浓度随降雨径流过程呈锯齿状变化.

(3)在 3 次降雨事件中,COD、TN 和 Cu 都存在不同程度的初始冲刷现象;Pb 和 Cd 初始冲刷现象不太明显,Pb 和 Cd 初始冲刷现象受降雨强度影响不大,与 2 次降雨间隔时间长短有关.

(4)TSS 和 TP 的初始冲刷现象受降雨强度的

影响比较大; Zn 初始冲刷现象受降雨强度影响不大,受 2 次降雨间隔时间长短影响很大。

(5)重庆市路面径流水质有 2 种潜在的污染源,第 1 种污染源(PC1)是机动车辆的交通损耗和大气干湿沉降;第 2 种污染源(PC2)是城市垃圾。

参考文献:

- [1] He C S, Fu B J, Chen L D. Non-point source pollution control and management [J]. *Environmental Science*, 1998, **19**(5): 87-96.
- [2] Chen L D, Fu B J. Farm ecosystem management and control of nonpoint source pollution [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2000, **21**(2): 98-100.
- [3] Butcher J B. Buildup, washoff, and event mean concentration [J]. *Journal of the American Water Association*, 2003, **39**(6): 1521-1528.
- [4] Taebi A, Droste R L. First flush pollution load of urban stormwater runoff [J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2004, **3**(4): 301-309.
- [5] 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.
- [6] Shinya M, Tsuruho K, Konishi T, *et al.* Evaluation of factors influencing diffusion of pollutant loads in urban highway runoff [J]. *Water Science and Technology*, 2003, **47**(7-8): 227-232.
- [7] 赵剑强, 孙奇溥. 城市道路路面径流水质特性及排污规律 [J]. *长安大学学报 (自然科学版)*, 2002, **22**(2): 21-23.
- [8] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 北京市城市非点源污染特征的研究 [J]. *中国环境监测*, 2005, **21**(6): 63-65.
- [9] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门城市小流域地表径流污染特征分析 [J]. *环境科学*, 2006, **27**(9): 1753-1759.
- [10] 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.
- [11] 任玉芬. 北京城市生态系统暴雨径流过程及污染负荷研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
- [12] 李立青, 尹澄清. 雨、污合流制城区降雨径流污染的迁移转化过程与来源研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 368-375.
- [13] 李立青, 尹澄清, 孔玲莉, 等. 2 次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(10): 2287-2293.
- [14] 林莉峰, 李田, 李贺. 上海市城区非渗透性地面径流的污染特性研究 [J]. *环境科学*, 2007, **28**(7): 1430-1434.
- [15] Chen J H, Wang W, Zhang J Y, *et al.* Characteristics of gaseous pollutants near a main traffic line in Beijing and its influencing factors [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(3): 470-480.
- [16] Wang T, Xie S D. Assessment of traffic-related air pollution in the urban streets before and during the 2008 Beijing Olympic Games traffic control period [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(35): 5682-5690.
- [17] Ren Y F, Wang X K, Ouyang Z Y, *et al.* Stormwater runoff quality from different surfaces in an urban catchment in Beijing, China [J]. *Water Environment Research*, 2008, **80**(8): 719-724.
- [18] Wei Q S, Zhu G F, Wu P, *et al.* Distributions of typical contaminant species in urban short-term storm runoff and their fates during rain events: a case of Xiamen City [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(4): 533-539.
- [19] 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, 2002.
- [20] Geiger W. Flushing effects in combined sewer systems [A]. In: *Urban storm drainage* [C]. Lausanne, Switzerland, 1987. 40-46.
- [21] 李耀初, 吴淮, 罗伟华. 惠阳城区降雨径流重金属污染特征研究: II. 重金属污染负荷估算 [J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(3): 51-56.
- [22] 甘华阳, 卓慕宁, 李定强, 等. 公路路面径流重金属污染特征 [J]. *城市环境与城市生态*, 2007, **20**(3): 34-37.
- [23] GB 3838-2002. 地表水环境质量标准 [S].
- [24] Huang J, Du P, Ao C, *et al.* Multivariate analysis for stormwater quality characteristics identification from different urban surface types in Macau [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2007, **79**(6): 650-654.
- [25] 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.
- [26] Wu J S, Allan C J, Saunders W L, *et al.* Characterization and pollutant loading estimation for highway runoff [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1998, **124**(7): 584-592.

CONTENTS

Air Pollutant Emissions of Aircraft in China in Recent 30 Years	HE Ji-cheng (1)
Study on the <i>in-situ</i> Measurement of Atmospheric CH ₄ and CO by GC-FID Method at the Shangdianzi GAW Regional Station	WANG Wei, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (8)
Reconstructed Ambient Light Extinction Coefficient and Its Contribution Factors in Beijing in January, 2010	ZHU Li-hua, TAO Jun, CHEN Zhong-ming, <i>et al.</i> (13)
Atmospheric Deposition of Polychlorinated Naphthalenes in Dongjiang River Basin of Guangdong Province	WANG Yan, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (20)
Metabolic Characteristics of Air Microbial Communities from Sandstorm Source Areas of the Taklamakan Desert ...	DUAN Wei-wei, LOU Kai, ZENG Jun, <i>et al.</i> (26)
Mechanisms of UV Photodegradation on Performance of a Subsequent Biofilter Treating Gaseous Chlorobenzene ...	WANG Can, XI Jin-ying, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (32)
Distribution of Dissolved Organic Carbon in the Bohai Sea and Yellow Sea in Spring	DING Yan-yan, ZHANG Chuan-song, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (37)
Research on the Mercury Species in Jiaozhou Bay in Spring	XU Liao-qi, LIU Ru-hai, WANG Jin-yu, <i>et al.</i> (42)
Geochemistry of Surface and Ground Water in the Lijiang Basin, Northwest Yunnan	PU Tao, HE Yuan-qing, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> (48)
Variations in Depth and Chemistry of Groundwater in Interval of Water Delivery at the Lower Tarim River	CHEN Yong-jin, LI Wei-hong, DONG Jie, <i>et al.</i> (55)
Simulation on Contamination Forecast and Control of Groundwater in a Certain Hazardous Waste Landfill	MA Zhi-fei, AN Da, JIANG Yong-hai, <i>et al.</i> (64)
Research on Evaluation of Water Quality of Beijing Urban Stormwater Runoff	HOU Pei-qiang, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (71)
Characterization and Source Apportionment of Pollutants in Urban Roadway Runoff in Chongqing	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (76)
Applied Study of the Submerged Macrophytes Bed-Immobilized Bacteria in Drinking Water Restoration	CHEN Qi-chun, LI Zheng-kui, WANG Yi-chao, <i>et al.</i> (83)
Catalytic Hydrodechlorination of 2,4-Dichlorophenol over Pd/TiO ₂	ZHANG Yin, SHAO Yun, CHEN Huan, <i>et al.</i> (88)
Effects of pH Value on the Adsorption and Degradation of 2,4-DCP by Nanoscale Zero-Valent Iron	FENG Li, GE Xiao-peng, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (94)
Inactivation of the Chlorine-resistant Bacteria Isolated from the Drinking Water Distribution System	CHEN Yu-qiao, DUAN Xiao-di, LU Pin-pin, <i>et al.</i> (104)
Risk Assessment of the Farmland and Water Contamination with the Livestock Manure in Anhui Province	SONG Da-ping, ZHUANG Da-fang, CHEN Wei (110)
Analysis of Membrane Fouling Genesis in Nanofiltration Process for Advanced Treatment of Dyeing and Finishing Wastewater	CAO Xiao-bing, LI Tao, ZHOU Lü, <i>et al.</i> (117)
Experimental Research on Combined Water and Air Backwashing Reactor Technology for Biological Activated Carbon	XIE Zhi-gang, QIU Xue-min, ZHAO Yan-ling (124)
Impacts of pH and Surfactants on Adsorption Behaviors of Norfloxacin on Marine Sediments	PANG Hui-ling, YANG Gui-peng, GAO Xian-chi, <i>et al.</i> (129)
Adsorption Characteristic and Form Distribution of Silicate in Lakes Sediments	LÜ Chang-wei, CUI Meng, GAO Ji-mei, <i>et al.</i> (135)
Adsorption of Methylene Blue from Water by the Biochars Generated from Crop Residues	XU Ren-kou, ZHAO An-zhen, XIAO Shuang-cheng, <i>et al.</i> (142)
Adsorption and Desorption of Dyes by Waste-Polymer-Derived Activated Carbons	LIAN Fei, LIU Chang, LI Guo-guang, <i>et al.</i> (147)
Study on the Sorption Behavior of Tetracycline onto Activated Sludge	CHEN Rui-ping, ZHANG Li, YU Jie, <i>et al.</i> (156)
<i>In situ</i> Experimental Research on Natural Attenuation of Oil Pollutants in a Gas Station	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (163)
Influence and Assessment of Biochar on the Bioavailability of Chlorobenzenes in Soil	SONG Yang, WANG Fang, YANG Xing-lun, <i>et al.</i> (169)
Control for MUCT Process Operation Using Nitrate Concentration in the Secondary Anoxic Zone	WANG Xiao-ling, JIN Yun, GAO Shang (175)
Modeling Formation of Aerobic Granule and Influence of Hydrodynamic Shear Forces on Granule Diameter	DONG Feng, ZHANG Han-min, YANG Feng-lin (181)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) on Municipal Sewage Sludge Bioleaching Continuous Plug Flow Reaction System	LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (191)
Biological Phosphorus Removal in Intermittent Aerated Biological Filter	ZENG Long-yun, YANG Chun-ping, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (197)
Methane Production by Anaerobic Co-digestion of Chicken Manure and <i>Spartina alterniflora</i> Residue After Producing Methane	CHEN Guang-yin, CHANG Zhi-zhou, YE Xiao-mei, <i>et al.</i> (203)
Uncertainty Analysis for Evaluating Methane Emissions from Municipal Solid Waste Landfill in Beijing	CHEN Cao-cao, LIU Chun-lan, LI Zheng, <i>et al.</i> (208)
Electricity Generation of Surplus Sludge Microbial Fuel Cells Enhanced by Additional Enzyme	YANG Hui, LIU Zhi-hua, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (216)
Construction of Electrochemiluminescence System for Harmful Algae Detection	ZHU Xia, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (222)
Mechanism of the Inhibitory Action of Allelochemical Dibutyl Phthalate on Algae <i>Gymnodinium breve</i>	BIE Cong-cong, LI Feng-min, WANG Yi-fei, <i>et al.</i> (228)
Toxic Effects of Nano-TiO ₂ on <i>Gymnodinium breve</i>	LI Feng-min, ZHAO Wei, LI Yuan-yuan, <i>et al.</i> (233)
Spatial Distribution of Three Endocrine Disrupting Chemicals in Sediments of the Suzhou Creek and Their Environmental Risks	LI Yang, HU Xue-feng, OH Kokyo, <i>et al.</i> (239)
Level, Distribution, and Source Identification of Polychlorinated Naphthalenes in Surface Agricultural Soils from an Electronic Waste Recycling Area	WANG Xue-tong, JIA Jin-pan, LI Yuan-cheng, <i>et al.</i> (247)
Heavy Metal Pollution in Street Dusts from Different Functional Zones of Luoyang City and Its Potential Ecological Risk	LIU De-hong, WANG Fa-yuan, ZHOU Wen-li, <i>et al.</i> (253)
Soil Contamination and Assessment of Heavy Metals of Xiangjiang River Basin	LIU Chun-zao, HUANG Yi-zong, LEI Ming, <i>et al.</i> (260)
Characteristics of Heavy Metals in Soil Profile and Pore Water Around Hechi Antimony-Lead Smelter, Guangxi, China	XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (266)
Speciation Transformation and Behavior of Arsenic in Soils Under Anoxic Conditions	WU Xi, XU Li-ying, ZHANG Xue-xia, <i>et al.</i> (273)
Remediation of Chromium(VI) Contaminated Soils Using Permeable Reactive Composite Electrodes Technology	FU Rong-bing, LIU Fang, MA Jin, <i>et al.</i> (280)
Determination and Characterization on the Capacity of Humic Acid for the Reduction of Divalent Mercury	JIANG Tao, WEI Shi-qiang, LI Xue-mei, <i>et al.</i> (286)
Effect of Zn (II) on Microbial Activity in Anaerobic Acid Mine Drainage Treatment System with Biomass as Carbon Source	LI Shao-jie, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (293)
Diversity of Culturable Butane-oxidizing Bacteria in Oil and Gas Field Soil	ZHANG Ying, LI Bao-zhen, YANG Jin-shui, <i>et al.</i> (299)
Microbial Community Structure Analysis of Unexploited Oil and Gas Fields by PCR-DGGE	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (305)
Community Diversity of Bacteria and Arbuscular Mycorrhizal Fungi in the Rhizosphere of Eight Plants in Liudaogou Watershed on the Loess Plateau China	FENG Ye, TANG Ming, CHEN Hui, <i>et al.</i> (314)
Dynamics of Degradation of Oxytetracycline of Pig and Chicken Manures in Soil and Mechanism Investigation	ZHANG Jian, GUAN Lian-zhu, YAN Li (323)
Influence of Impurities on Waste Plastics Pyrolysis: Products and Emissions	ZHAO Lei, WANG Zhong-hui, CHEN De-zhen, <i>et al.</i> (329)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年1月15日 33卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 1 Jan. 15, 2012

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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行