

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 朱芳 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳玉荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

温州城市降雨径流中 BOD_5 和 COD 污染特征及其初始冲刷效应

王骏, 毕春娟*, 陈振楼, 周栋

(华东师范大学资源与环境科学学院, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 为研究温州降雨径流污染情况, 监测了温州 2 个采样区 4 场较为典型的降雨过程, 测定了不同下垫面径流中 BOD_5 和 COD 的浓度, 并且计算出污染物的 EMC 值、 $M(V)$ 曲线和 BOD_5/COD 值等。结果表明, 温州城市降雨径流中 BOD_5 和 COD 的含量分别介于 $ND \sim 69.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $ND \sim 636 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, 不同城市下垫面径流中 BOD_5 和 COD 的含量均随着降雨历时的延长而呈下降趋势, 处理初期径流水样对减少耗氧性有机污染具有重要意义。从 COD 和 BOD_5 的 EMC 值来判断, 部分城市下垫面降雨径流中污染物浓度超出地表五类水标准, 甚至高于污水排放二级标准, 此类降雨径流若直接入河将对下级受纳水体造成耗氧性有机污染的压力。根据 $M(V)$ 累积曲线判断, COD 初期冲刷效应在城市降雨径流中是较为普遍的, 城市降雨径流中的 BOD_5 表现出与 COD 类似的初始冲刷情况, 该结果亦表明径流初期耗氧性有机污染严重。城市降雨径流中 COD 和 BOD_5 的浓度受下垫面类型和降雨条件的影响, 而 BOD_5/COD 指标的变化特征则指出生物降解是削减有机污染负荷的有效途径之一, 但不同下垫面径流有机污染的治理工作应采用不同的最佳管理方案 (BMPs)。

关键词: 降雨径流; COD; BOD_5 ; EMC; 初始冲刷

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1735-10

Pollution Load and the First Flush Effect of BOD_5 and COD in Urban Runoff of Wenzhou City

WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, ZHOU Dong

(Key Laboratory of Geographic Information Science of the Ministry of Education, School of Resources and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

Abstract: Four typical rainfalls were monitored in two different research areas of Wenzhou Municipality. Concentrations of BOD_5 and COD in six different urban runoffs were measured. In addition the event mean concentration (EMC), $M(V)$ curve and BOD_5/COD of pollutant were calculated. The results showed that concentrations of BOD_5 and COD in different urban runoffs of Wenzhou ranged from ND to $69.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and ND to $636 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. Concentrations of BOD_5 and COD in different urban runoffs were decreasing over time, so it is greatly significant to manage the initial runoff for reducing organic pollution. Judged by EMC of BOD_5 and COD in these five rainfalls, concentrations of pollutant in some urban runoffs were out of the integrated wastewater discharge standard. If these runoffs flowed into river, it would cause environmental pressure to the next level receiving water bodies. According to the $M(V)$ curve, the first flush effect of COD in most urban runoffs was common; while the first flush effect of BOD_5 was same as that of COD. The result also showed that organic pollution was serious at the beginning of runoff. The underlying surface type could affect the concentration of BOD_5 and COD in urban runoff. While the results of BOD_5/COD also suggested that biodegradation was considered as one of the effective ways to decrease the pollution load of organics in urban runoff, and the best management plans (BMPs) should be selected for various urban runoff types for the treatment of organic pollution.

Key words: runoff; COD; BOD_5 ; EMC; the first flush

随着城市化的发展, 城市点污染源的治理方式日渐成熟, 城市非点源污染比重越发突出^[1], EPA (美国环保署) 把城市降雨径流列为导致全美河流湖泊污染的第三大污染源^[2]。城市降雨径流不仅导致河流各污染物浓度超标, 随着治理的不及时性, 将造成水体黑臭和富营养化, 最后严重影响到人们的生活^[3,4]。在我国, 城市降雨径流引起的污染问题较多, 其中水体富营养化和耗氧性有机污染最为严重^[5-7]。耗氧性有机污染物指的是存在于水体中,

在发生生物降解时消耗水体中的溶解氧, 导致水质下降的一类有机物。COD 与 BOD_5 作为两种常见的耗氧性有机污染物, 经常被作为衡量水中有机物质

收稿日期: 2012-07-12; 修订日期: 2012-10-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07317-006); 国家自然科学基金项目 (40971259); 上海市自然科学基金项目 (12ZR1409000); 上海市科委基础研究重点项目 (10JC1404300)

作者简介: 王骏 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市水环境与水资源, E-mail: junwang1988@sina.cn

* 通讯联系人, E-mail: cjbj@geo.ecnu.edu.cn

含量多少的指标^[8,9],含量越大,耗氧性有机物污染越严重.目前,国外对城市降雨径流耗氧性有机污染的研究集中在三方面:研究单一的下垫面径流中多种污染物质的污染情况,研究氮磷营养盐在不同下垫面径流中的污染情况,研究降雨特征对污染物含量的影响.而国内对城市降雨径流耗氧性有机污染的研究与国外相当,近年来在上海、珠海、厦门等多个城市对降雨径流中的富营养化元素氮、磷以及耗氧性有机污染物进行过监测^[10~15],发现 COD 成为降雨径流中主要污染物质,并且径流中 COD 浓度与 TSS 浓度呈正比,TSS 成为耗氧性有机污染物的主要载体^[16~19];亦有研究表明:降雨径流中 COD 存在着较为显著的初期冲刷效应,并且耗氧性有机污染物含量受降雨特征影响较为明显^[20,21].综合国内外研究发现,单独以降雨径流中耗氧性有机污染为对象的研究较少,更缺少从多种下垫面和多种降雨类型对耗氧性有机污染进行的研究,另外根据 BOD_5/COD 值选择合适 BMPs 的研究也很少出现,而针对日趋严重的耗氧性有机污染,全面系统地对城市降雨径流中耗氧性有机污染进行研究意义重大.本研究依托国家重大水专项,从不同下垫面类型和不同降雨类型对温州降雨径流中 COD 与 BOD_5 的含量特征以及变化特点进行分析,以期有效控制降雨径流对河流的有机污染提供技术指标,并且为治理城市黑臭河道提供建设性的意见.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

温州位于中亚热带季风气候区,常年平均雨日 175 d,年降水量 1 225 ~ 2 061 mm,多年平均年降水量 1 706 mm,降雨主要集中在 6 ~ 9 月,占全年降雨量的 2/3 以上,而 8、9 两个月由于受台风的影响,温州降雨频繁且强度大、雨量足,导致雨水对地表污染物的冲刷、携带能力增强^[22].这对城市排污及污水处理能力都是一个重大的考验,因此选取 8 ~ 9 月作为温州降雨径流中耗氧性有机污染物的主要监测期,具有一定代表性的同时也具有一定的实际意义.在遥感解译与实地考察相结合的基础上,以典型性与代表性为原则,在温州市鹿城区内选定了 2 个平行采样区,分别位于山下河两岸(SX,下同)和九山外河两岸(JS,下同).其中,山下河汇流区位于 120°41'10"E ~ 120°42'00"E、27°59'50"N ~ 28°0'30"N 之间,总面积约为 0.40 km²;九山外河汇流区位于 120°38'00"E ~ 120°39'00"E、28°0'30"N ~ 28°1'20"N

之间,总面积约为 0.33 km².监测的下垫面涵盖了交通干道(J)、停车场(T)、小区路面(L)、小区屋面(W)、径流汇流口(O)以及绿地(C)等 6 种城市中最为常见的土地利用类型(图 1).

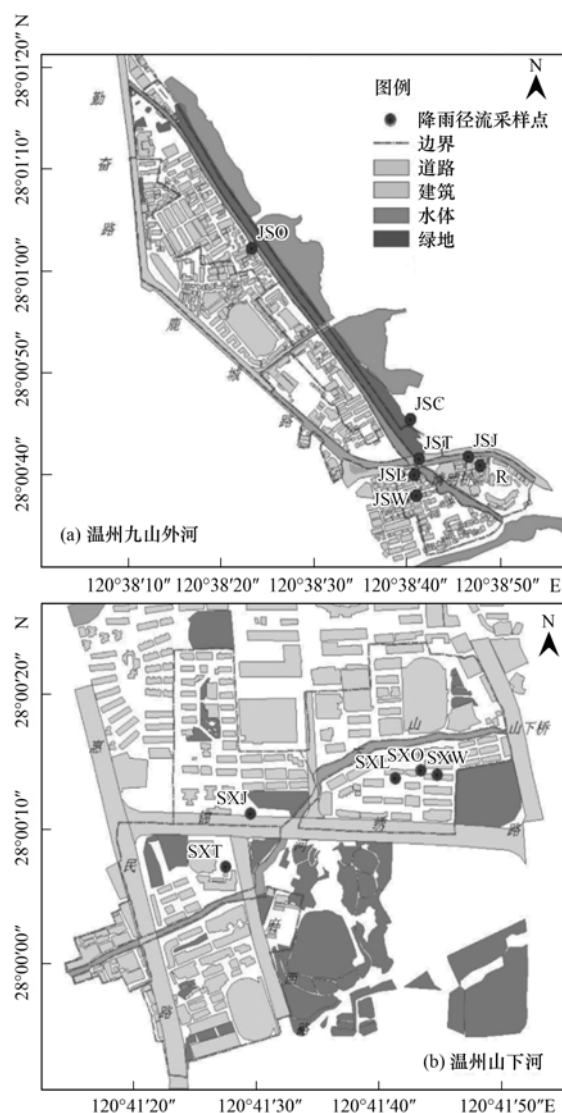


图 1 研究区及采样点示意

Fig. 1 Map of the study area and sampling sites

1.2 样品采集和室内分析

2010 年 8 ~ 9 月在上述 2 个采样区共监测了 4 场较为典型的降雨事件,各场次降雨特征见表 1.由于城市降雨径流的污染物存在一定的初期冲刷情况^[23],即前期径流中污染物含量较高且变化较大,后期污染物含量较低且稳定,因此特采用“前密后疏”的非均匀间隔采样方式,具体采样序列为:产流后的前 30 min 内按照 5 min 的时间间隔进行样品采集;然后 30 ~ 60 min 内,按照 10 min 的时间间隔采集样品;60 ~ 120 min 内,按照 20 min 的时间间隔采

集样品 3 个；而后的样品统一按照 30 min 的时间间隔进行收集直至径流过程结束。采样过程中，测量各采样时间内径流总量，样品采集后立即转入室内进行分析测定。

径流样品分析指标包括 BOD₅ 和 COD，水体

BOD₅ 的含量用五日接种稀释法(HJ 505-2009)进行测定；化学需氧量 COD 的含量用 HJ/T 399-2007 快速消解分光光度法进行测定。样品分析过程中同时进行回收率与重复率的测定，二者皆能满足实验分析要求。

表 1 温州夏季降雨特征

项目	九山外河				山下河			
	20100818	20100830	20100901	20100926	20100818	20100830	20100901	20100926
降雨量/mm	4.8	1.6	48	5.2	6.8	7.5	27.2	17.4
雨前干期/d	7	1	0.5	4	7	1	0.5	4
最大雨强/mm·min ⁻¹	0.24	0.35	1.59	0.14	2.72	0.36	0.55	0.59
降雨类别	小雨	小雨	暴雨	小雨短时有阴	中雨	小雨	大雨	中雨转小雨

2 结果与分析

2.1 径流中 COD 和 BOD₅ 随时间的污染特征

综合考虑雨强与最大雨强出现的时间，2 个研究区域 4 场降雨包含 6 种降雨类型，图 2 和图 3 分

别为 6 种降雨类型，温州城市降雨径流中 BOD₅ 和 COD 的浓度分别介于 ND ~ 69.21 mg·L⁻¹ 和 ND ~ 636 mg·L⁻¹ 之间。由图 2 可知，各下垫面降雨径流中 COD 浓度随降雨历时大致呈“山峰”型，径流初期，污染物浓度较高，一段时间内，污染物浓度略有

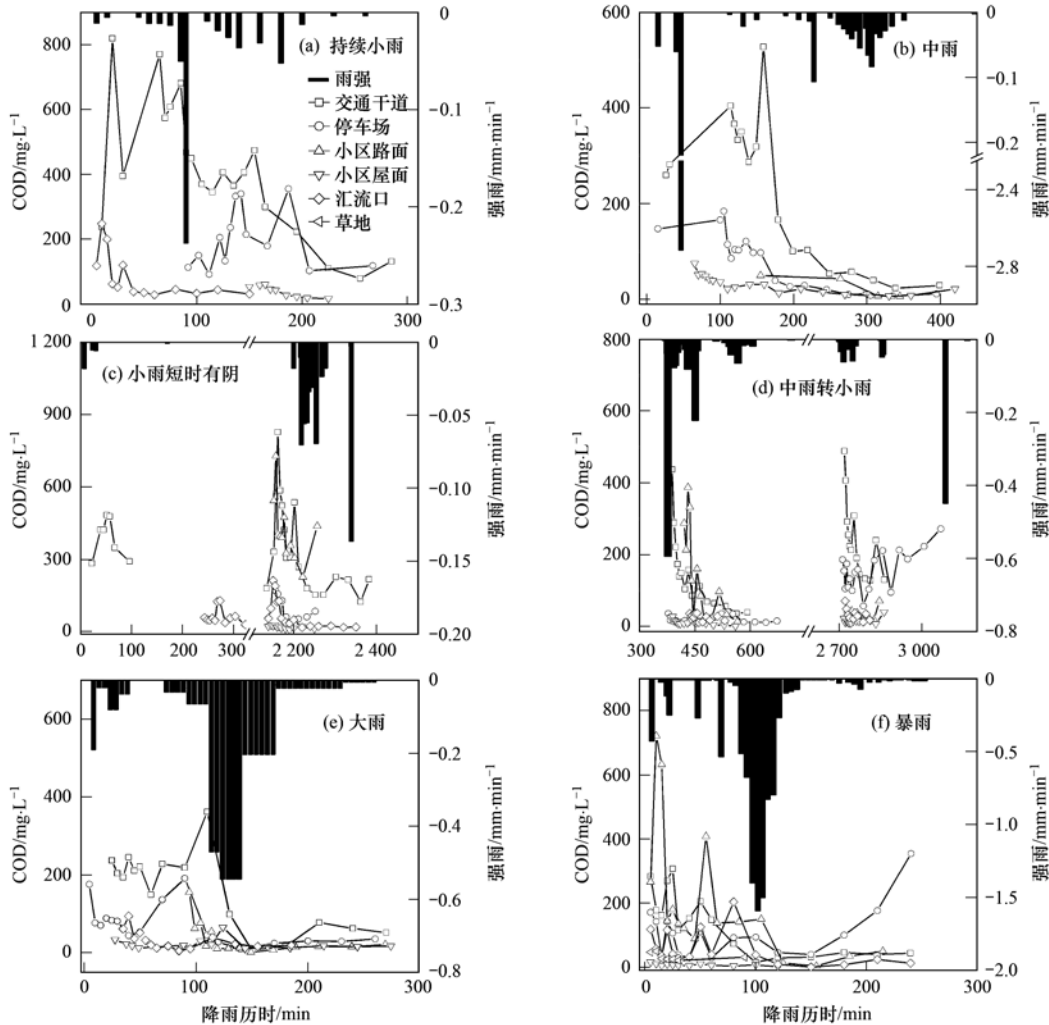


图 2 不同降雨场次各下垫面径流中 COD 浓度变化
Fig. 2 Concentrations of COD in different urban runoffs

增加,最大雨强出现后,污染物浓度迅速降低;总体而言,随着降雨历时的延长,污染物浓度呈下降趋势,所以处理初期径流水样对减少耗氧性有机污染具有重要意义. 不同下垫面降雨径流中污染物的浓度存在差异,而且浓度变化幅度也存在差异,其中,交通干道地表径流中污染物 COD 初始浓度最高,停车场与小区路面次之;地表径流中污染物 COD 浓

度变化幅度在交通干道上最大,小区路面与停车场次之. 降雨事件本身对污染物浓度也存在一定的影响,与其他研究结果^[24]存在相似性,如图 2、3 所示,在雨强较小的降雨场次中,污染物 COD 浓度相对较高;雨强越大,污染物 COD 和 BOD₅ 浓度相对越低,这表明丰富的降雨量对地表污染存在一定稀释效果.

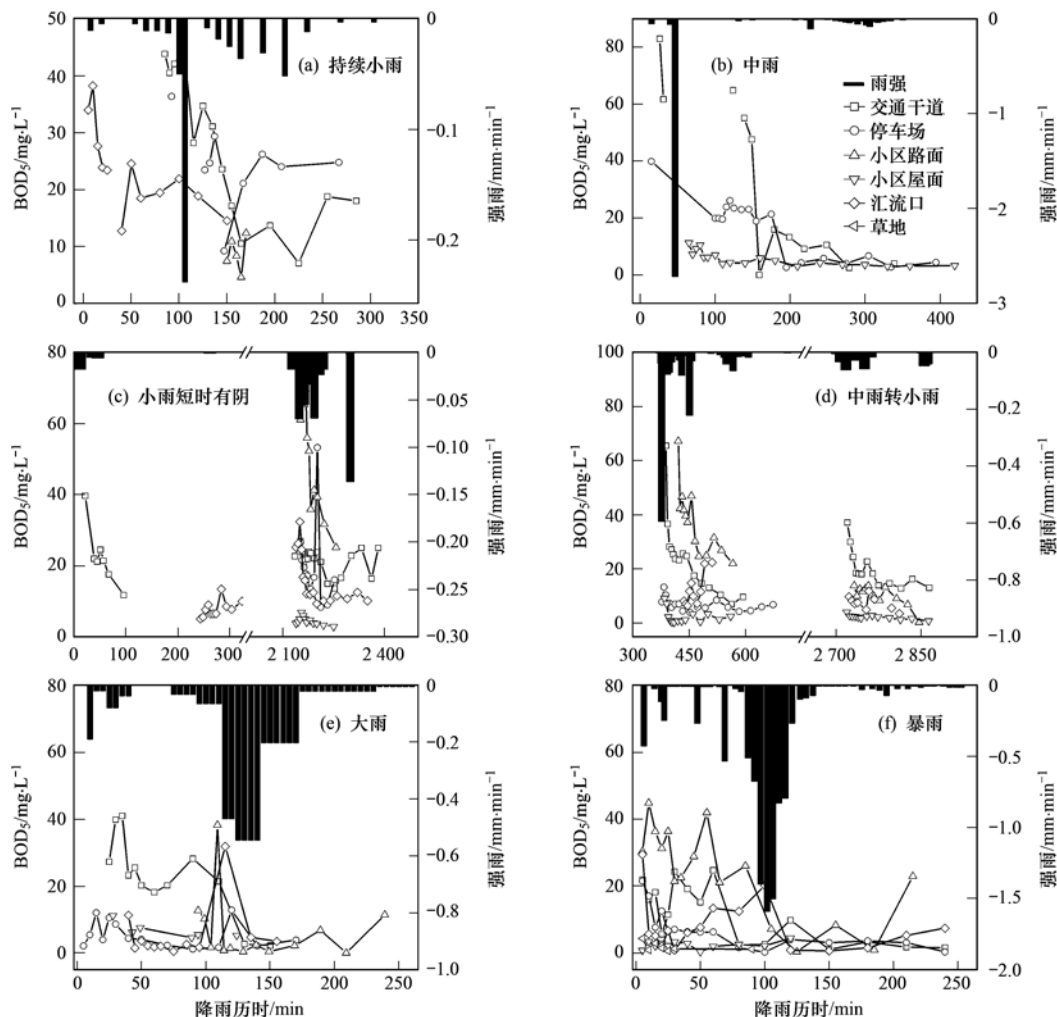


图 3 不同降雨场次各下垫面径流中 BOD₅ 浓度变化

Fig. 3 Concentrations of BOD₅ in different urban runoffs

2.2 径流中 COD 和 BOD₅ 的 EMC 分布情况

气候特点及区域下垫面性质等因素导致径流污染物质浓度变化差异显著,因此需要对一场降雨径流的污染负荷做出总体评价^[25]. 美国环保局在国家城市径流项目 (NURP) 中最先提出“降雨径流事件平均浓度”(Event Mean Concentration),用以表示某污染物在一场降雨径流全过程中的平均浓度^[26]. 随后美国地质调查局 USGS 进一步更新规范了 EMC 资料,被广泛地用于评估城市降雨径流的污

染负荷、管理措施的有效性和暴雨径流对接纳水体的影响^[27]. EMC 实质上是一场降雨径流全过程瞬时污染浓度的流量加权平均值^[28],如式(1)所示:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t c_i Q_i dt}{\int_0^t Q_i dt} \cong \frac{\sum c_i Q_i \Delta t}{\sum Q_i \Delta t} \quad (1)$$

式中,EMC 为场次降雨事件污染物平均浓度 (mg·L⁻¹); M 为场次降雨过程中污染物总含量 (mg); V 为相对应的总径流量 (L); t 指总径流时

间 (min); c_t 指随时间变化的污染物含量 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); Q_t 指随时间变化的径流速率 ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$); Δt 指不连续的采样时间间隔。

将各下垫面类型多场降雨径流中污染物 COD 和 BOD₅ 浓度 EMC 值制成表 2, 如表所示; 多场降雨中各下垫面径流 COD 的 EMC 值在 2.47 ~ 330.98 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间变化, 各下垫面径流 COD 的 EMC 值差异较大。总体而言, 交通干道与停车场径流中 COD 的 EMC 值高于其他下垫面, 其中在交通干道下垫面上, 九山外河地区 20100818 与 20100830 场次降雨径流污染物 COD 浓度均为污水排放 II 级标准 ($\leq 100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 2 倍以上, 而山下河地区 20100830 与 20100926 场次降雨径流污染物 COD 浓度均超污水排放 II 级标准; 小区路面与汇流口径流中 COD 污染相当, 除部分场次降雨 EMC 值较高外, 其他场

次降雨过程中污染物浓度在污水排放 II 级标准阈值内; 所有下垫面中, 小区屋面径流中 COD 的 EMC 值最低, 基本都低于国家地表水环境 V 标准 ($\leq 40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 低于王和意等^[29] 监测的上海屋面降雨径流中 COD 含量 (40 ~ 364.17 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。此外, 本研究与常静等^[30] 对上海市区降雨径流的研究结果相一致, 即车流量较大的交通干道和停车场径流中 COD 的 EMC 含量明显偏高, 而居民区的屋顶径流情况较为良好, 但上海市区降雨径流中 COD 的 EMC 值高于温州市, 为 100.40 ~ 831.64 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。与澳门^[31] 城市小流域地表径流 COD 含量 (7.3 ~ 1 274 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比, 温州城市降雨径流污染相对较低。温州市山下河区域地表径流中 COD 的含量与滇池流域^[32] 城郊地表径流中 COD 含量相当 (29.04 ~ 190.94 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

表 2 温州历次降雨各下垫面径流中 COD、BOD₅ 的 EMC 值¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 EMC of COD and BOD₅ in different urban runoffs of Wenzhou / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

样点编号	20100818		20100830		20100901		20100926	
	COD	BOD ₅	COD	BOD ₅	COD	BOD ₅	COD	BOD ₅
SXJ	60.48	6.35	227.21	13.89	70.43	5.68	166.4	19.73
SXT	18.63	5.77	243.62	ND	84.07	3.98	81.26	5.71
SXL	ND	ND	ND	ND	27.64	7.45	94.81	29.19
SXW	12.23	3.85	24.62	10.77	23.82	5.33	11.54	2.47
SXO	ND	ND	98.21	ND	32.42	2.96	28.99	12.82
JSJ	325.59	18.83	236.13	31.09	53.2	4.19	19.73	21.94
JST	28.22	23.83	61.96	4.51	107.26	5.91	5.71	19.72
JSL	ND	ND	296.6	52.33	77.87	5	29.19	44.85
JSW	53.34	10.83	16.25	0.58	4.37	3.08	2.47	4.32
JSO	77.97	22.48	330.98	18.61	32.69	5.69	12.82	12.77
JSC	ND	ND	ND	ND	34.94	2.11	ND	ND
地表水 V 类标准	40	10	40	10	40	10	40	10
污水排放 II 级标准	100	30	100	30	100	30	100	30

1) ND 表示该降雨场次中未收集到该下垫面径流样品

与 COD 污染相比, 降雨径流 BOD₅ 污染较轻, 最高值出现在 20100830 场次九山外河小区路面径流中, 超出污水排放 II 级标准 ($\leq 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 一倍左右; 其他大部分径流样中 BOD₅ 浓度均不超过污水排放 II 级标准; 并且在 20100901 场次降雨中, 九山外河与山下河地区各下垫面径流中 BOD₅ 污染物浓度均低于国家地表水 V 类标准 ($\leq 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

2.3 径流中 COD 和 BOD₅ 的初期冲刷效应评价

如果场次降雨事件中初期 30% 径流量中携带了整个径流过程中 80% 污染负荷, 则称该降雨事件存在初期冲刷效应 (first flush effect, FFE), 其最直观的表现就是某一污染物的累积速率超过了径流量的累积速率^[32~36]。准确判断出某降雨事件中某污染物是否发生了初期冲刷效应对径流最佳管理方案

的制定与选取至关重要, 目前关于 FFE 的评价方法也很多, 本研究采用经典的 Geiger^[37] 定义的 M(V) 累积曲线法对温州下垫面径流中 COD 和 BOD₅ 是否发生初期冲刷效应做出评判 (图 3、图 4)。

纵观 COD 的 M(V) 曲线 (图 4), 在降雨初期, 各下垫面大部分场次降雨径流表现出明显的冲刷效应, 尤其是交通干道径流与小区路面径流, 这表明降雨初期更容易发生冲刷效应^[38,39]; 而在降雨后期, 部分冲刷曲线落于平衡线之下, 径流冲刷效果不明显, 发生污染源的衰减及耗竭效应^[28]。未出现初期冲刷效应的降雨事件均属于降雨量低、降雨强度小的降雨类型, 这表明在较小降雨量条件下, 地表径流难以在整个汇流区域内形成冲刷效应。与其他下垫面相比, 草地较难产流, 只有当降雨强度较大时, 才

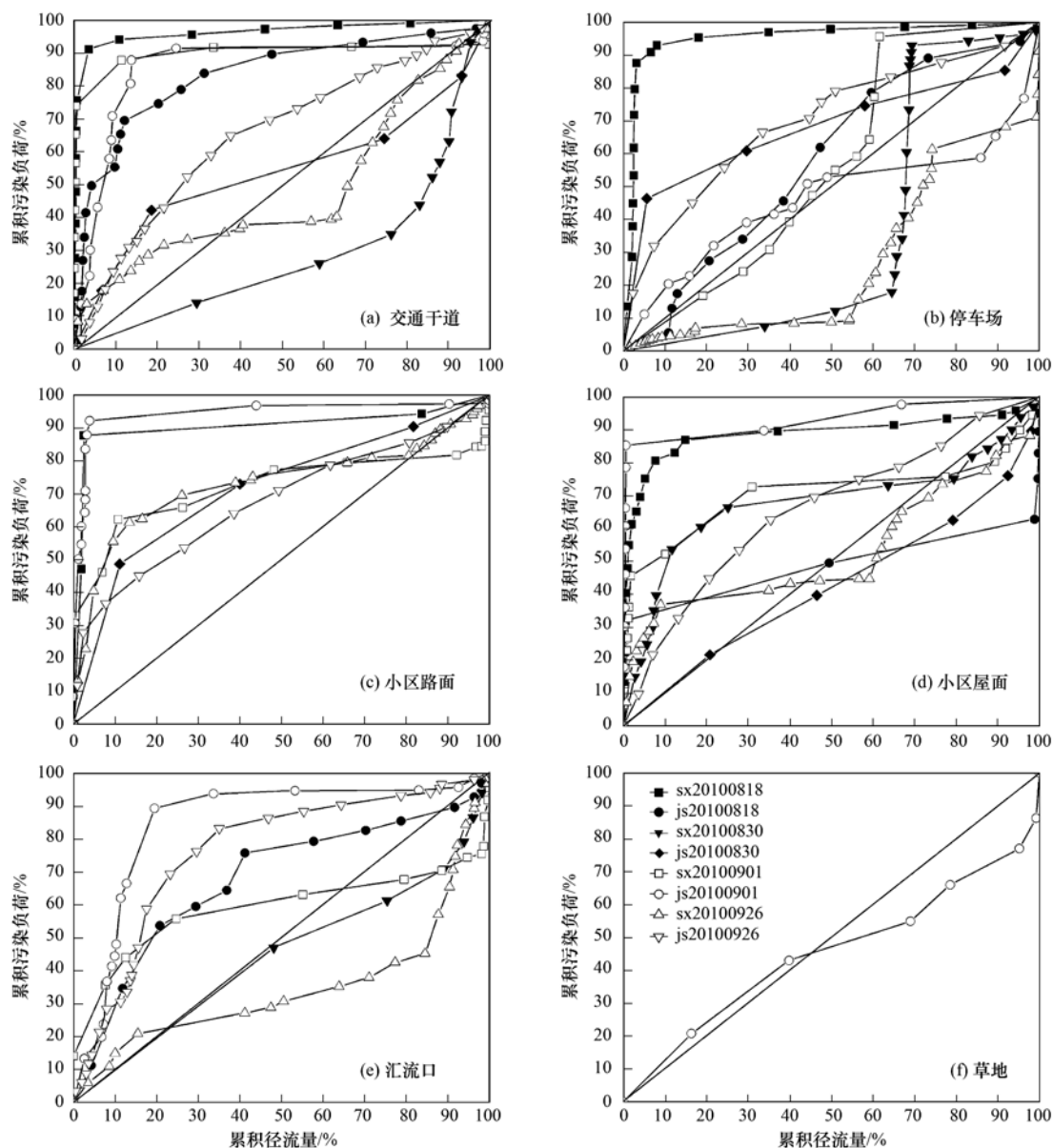


图4 温州历次降雨不同下垫面径流中 COD 含量 $M(V)$ 曲线

Fig. 4 $M(V)$ curve of COD content in different urban runoffs of Wenzhou

会出现地表径流. 这使得草地在降雨初期虽然出现初始冲刷效应,但强度很低,作用时间不长,而随着降雨量及降雨强度的增大,污染物被迅速稀释,从而使初始冲刷效应消失.

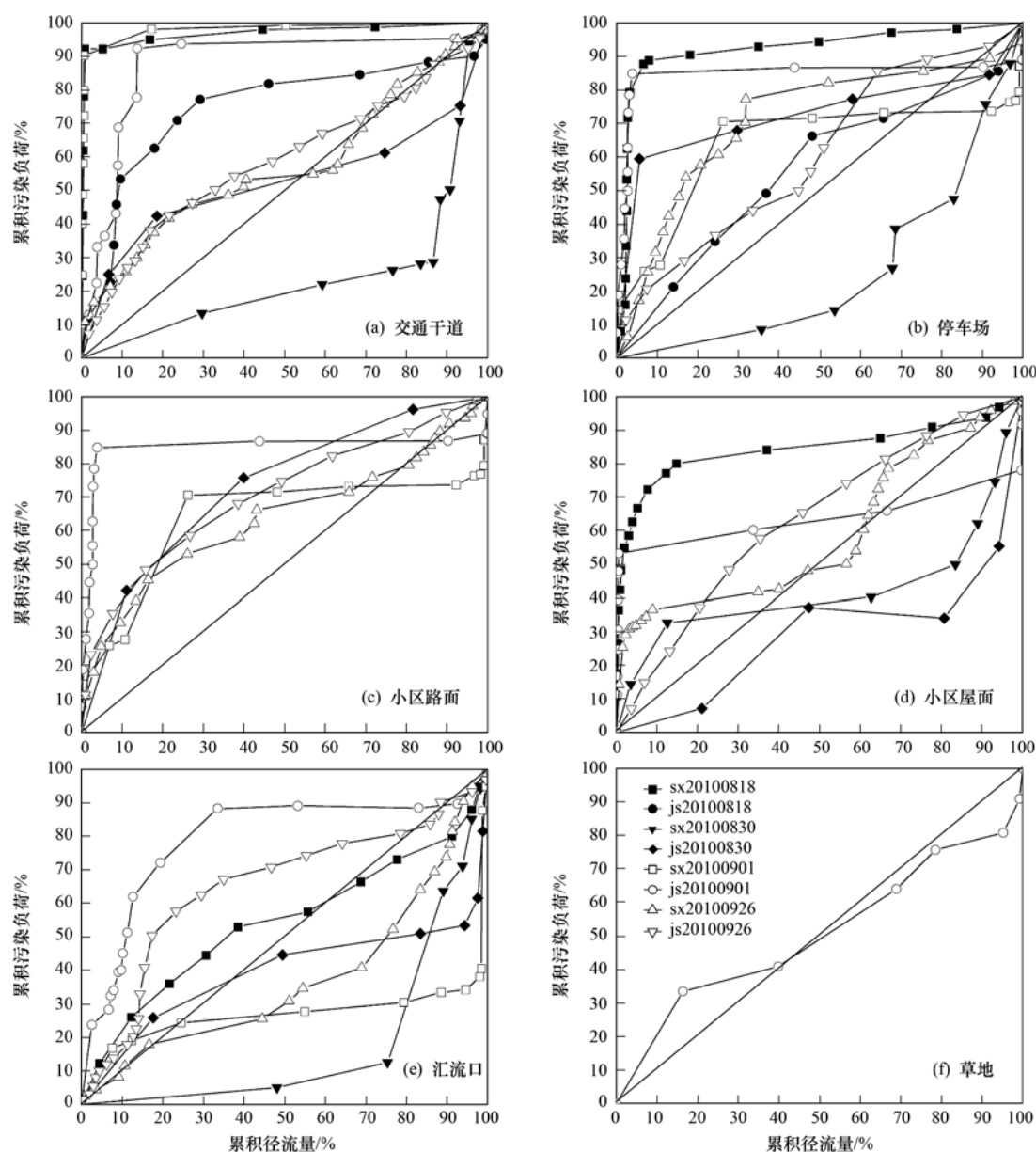
除停车场径流和汇流口径流外,其他下垫面径流中 BOD_5 的初始冲刷曲线与 COD 的初始冲刷曲线基本一致(图5). 而停车场径流除8月30日降雨事件中山下河地区未表现出明显的初期冲刷效应外,其他降雨场次及区域都表现出初期冲刷效应. 但各场次、区域冲刷效应的冲刷强度有所区别,分析认为这与降雨强度是有关. 而汇流口径流仅有3组表现出了较为明显的初期冲刷效应,其他未出现

初期冲刷效应的均属于降雨量低,降雨强度较小的场次. 8月30日降雨中山下河地区在降雨初期就未表现出初始冲刷效应.

3 讨论

3.1 不同下垫面类型对径流中 COD 和 BOD_5 浓度的影响

图6为不同下垫面径流中 COD 与 BOD_5 浓度箱式图,从中可知,不同下垫面径流中 COD 与 BOD_5 含量存在差异性,其中,屋面径流有机污染基本处于最低水平,交通干道径流、小区路面径流相对污染严重,这与郭婧等^[40]对城市降雨径流的研究结果较

图5 温州历次降雨不同下垫面径流中 BOD_5 含量 $M(V)$ 曲线图Fig. 5 $M(V)$ curve of BOD_5 content in different urban runoffs of Wenzhou

为接近. 有机物主要来源车辆轮胎损耗^[41], 交通干道和小区路面车流量大, 所以导致径流中有机污染严重. 对数据进行单因子方差分析可知, 无论身处哪个采样区, 或者降雨条件如何, 不同下垫面径流中 COD 和 BOD_5 浓度的均值之间普遍存在着显著的差异性 ($P < 0.01$), 说明下垫面自身的性质对降雨径流中 COD 浓度影响较大, 甚至超出了局地大环境和降雨条件对其的影响.

3.2 不同降雨特征对径流中 COD 和 BOD_5 浓度的影响

Lee 等^[36]研究表明, 污染物的冲刷过程是一个复杂的动态过程, 受降雨特征、污染物特征、路面

状况等多种因素的影响. 而 Deletic^[42]的研究表明: 土地利用和降雨前期干旱时间长短决定了污染物的初始浓度, 而降雨强度则对冲刷过程影响较大. 分析不同降雨特征对径流中 COD 和 BOD_5 浓度的影响, 如图 7, 从中可知, 污染物浓度随着降雨量存在“倒 S”型变化特征, 在能形成降雨径流的情况下, 降雨量越小, 污染物浓度越高, 随着降雨量升高, 污染物浓度下降, 降低至一定程度后又存在上升的趋势. 2 次有效降雨之间的时间间隔越长, 即雨前干期越长, 降雨径流中污染物 COD 和 BOD_5 浓度也越高, 在上海、武汉、北京的研究中也出现相同结果^[30,43,44]. 而最大雨强对污染物浓度的影响与降雨

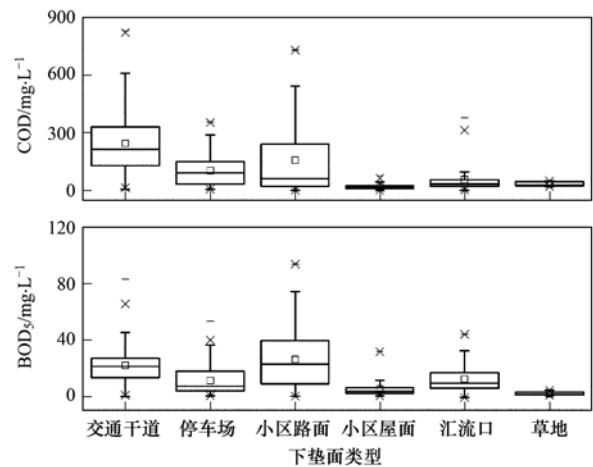


图 6 温州不同下垫面径流中 COD 和 BOD₅ 含量箱式图

Fig. 6 Box chart of COD and BOD₅ content in different runoffs of Wenzhou

量类似,雨强较小时,污染物 COD 和 BOD₅ 浓度较高,原因在于雨强大时,降雨量也过大,导致污染物浓度被稀释.

3.3 径流中 BOD₅ 和 COD 比值情况

BOD₅/COD 指标是 5 日生化需氧量与化学需氧量的比值,是指示污水可生化降解性的指标^[45]. 通常以 BOD₅/COD = 0.3 为污水可生化降解的下限^[46].

交通干道径流中 4 次降雨过程 BOD₅/COD 值随时间并无明显变化规律(图 8),但均低于 0.3,虽然交通干道径流污水中污染非常严重,但并不适宜使用生物工艺进行净化污水. 在停车场径流 BOD₅/COD 值随径流时间缓慢增加,径流初期低于 0.3,后期则高于 0.3,针对径流后期的污水,可以使用生物工艺进行净化,而径流初期的污水则需使用其他的净化工艺. 小区路面径流中 BOD₅/COD 值随径流时间变化幅度较大,多数时间 BOD₅/COD 值都超过 0.3 这一标准,适宜用生物工艺进行净化污水,这也符合人类生活密集的小区主要排放生活污水的现状,耗氧性有机污染严重. 小区屋面与汇流口径流

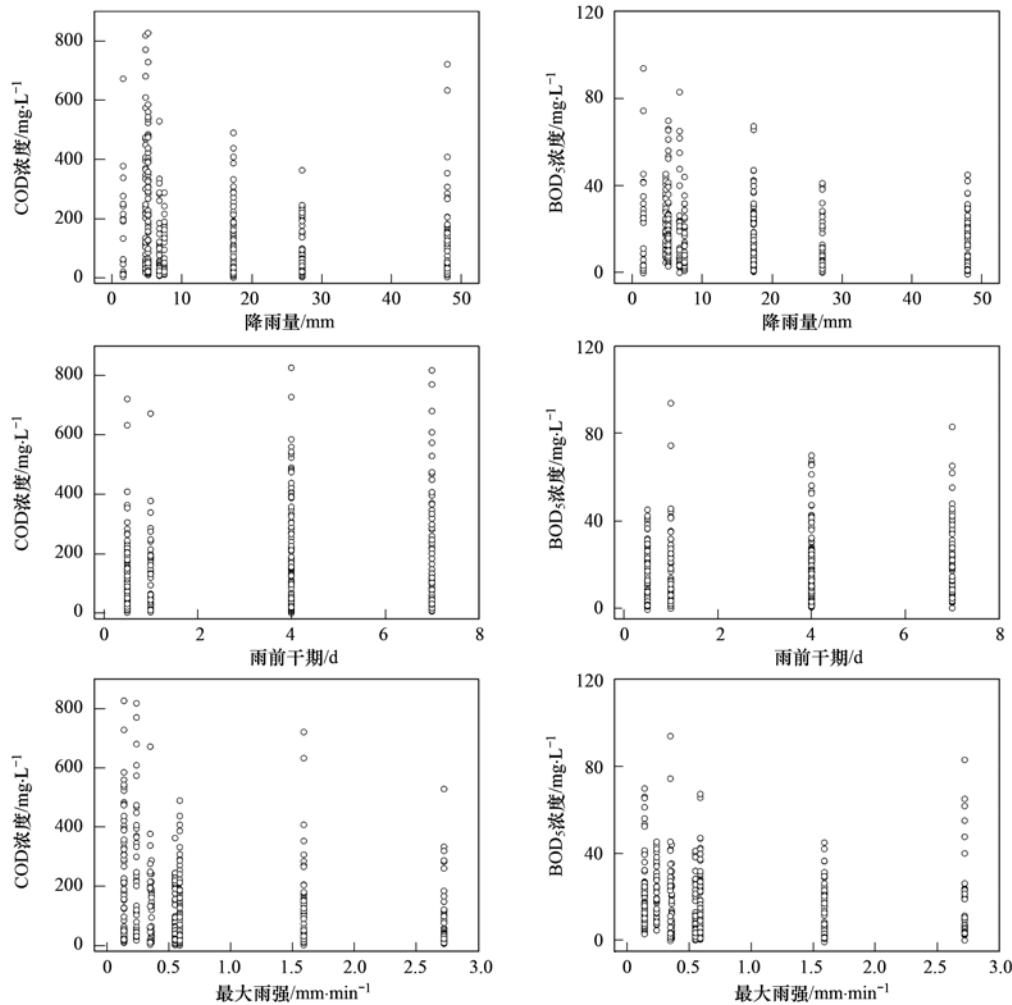
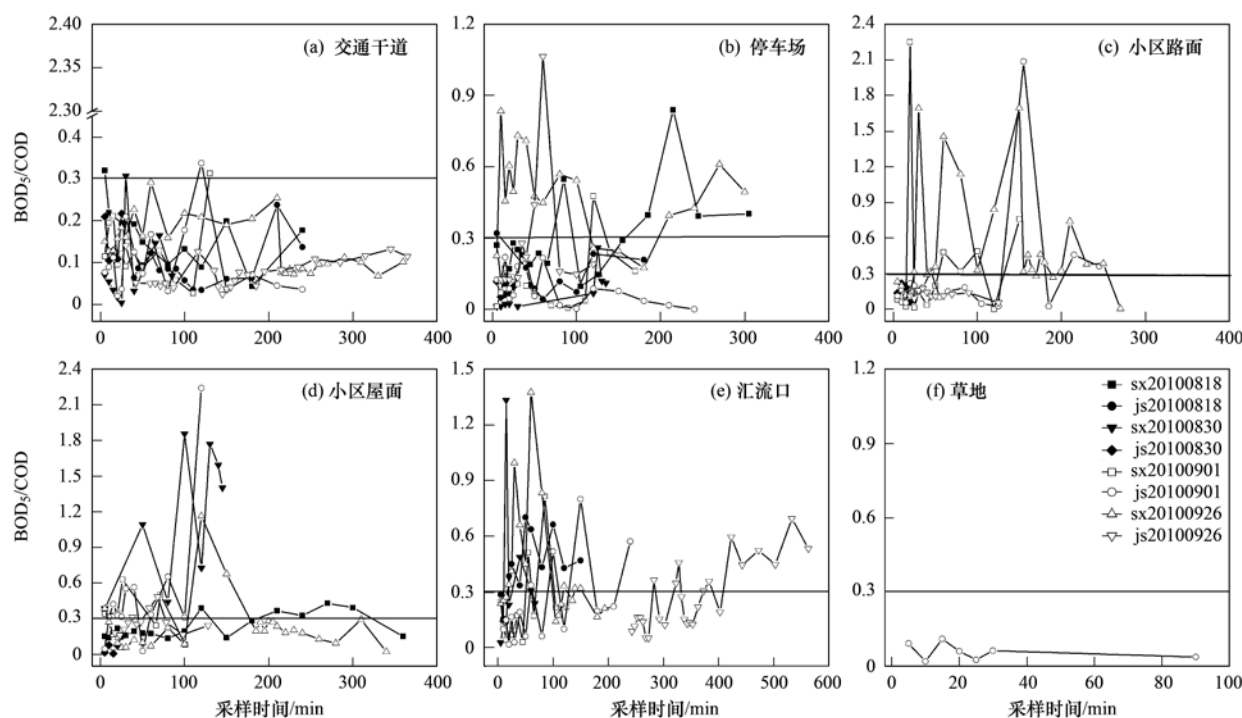


图 7 不同降雨条件下污染物 COD 和 BOD₅ 浓度

Fig. 7 Concentration of COD and BOD₅ under different rainfall conditions

图8 不同下垫面径流 BOD_5/COD 变化Fig. 8 Change of BOD_5/COD in different urban runoffs

中 BOD_5/COD 值随径流时间缓慢降低,这表明,径流初期的污水可以通过生物降解的方式净化,可是径流后期的污水则要通过其他方式净化。

4 结论

(1)温州城市降雨径流中 BOD_5 和 COD 的浓度分别介于 $ND \sim 69.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $ND \sim 636 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,各下垫面降雨径流中 COD 浓度随降雨历时大致呈“山峰”型,径流初期,污染物浓度较高,一段时间内,污染物浓度略有增加,最大雨强出现后,污染物浓度迅速降低。

(2)多场降雨中各下垫面径流 COD 的 EMC 值在 $2.47 \sim 330.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间变化,部分交通干道、停车场和小区路面径流中 COD 的 EMC 值超污水排放 II 级标准,此类径流样直接排放入河可能造成河流有机污染。

(3)所监测的各种下垫面径流中 COD 和 BOD_5 初期冲刷效应较为普遍,由于降雨量、雨前干期等条件的差异,不同降雨场次观测的初期冲刷强度存在差异,并且随着降雨历时的延长,初始冲刷发生衰减和耗竭效应。

(4)影响降雨径流中 COD 和 BOD_5 浓度的因素有下垫面类型和降雨特征,其中降雨特征包括降雨量、雨前干期和最大雨强;对初期降雨径流进行生

物降解净化处理,可以有效控制污染物总量,降低径流中有机污染物浓度,降低降雨径流对河流的非点源污染。

参考文献:

- [1] Hsieh C H, Davis A P. Evaluation and optimization of bioretention media for treatment of urban storm water runoff[J]. ASCE Journal of Environmental Engineering, 2005, **131** (11): 1521-1531.
- [2] US EPA. National water quality inventory, Report to Congress Executive Summary[R]. Washington: US EPA. 1995. 497.
- [3] 左良平. 城市地表径流非点源污染的研究现状与进展[J]. 江西化工, 2008, (4): 51-53.
- [4] 韩磊等. 污水土地处理系统填料的研究进展[J]. 四川有色金属, 2008, (2): 33-36.
- [5] 伍发元, 周金泉. 我国城市降雨径流污染控制模式探讨[J]. 云南环境科学, 2005, **24** (2): 45-47.
- [6] 黄金良, 杜鹏飞, 赵冬泉, 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.
- [7] 李莉峰, 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.
- [8] 胡湘君. 嘉定区水系中 BOD_5 与 COD_{Cr} 比值变化关系的研究[J]. 上海环境科学, 2005, **24** (6): 257-260.
- [9] 张德刚, 陈永川, 汤利. 滇池流域典型城郊降雨径流 COD_{Cr} 及 TSS 污染负荷及贡献[J]. 水土保持通报, 2010, **30** (3): 172-175.
- [10] 顾琦, 刘敏, 蒋海燕. 上海市区降水径流磷的负荷空间分布[J]. 上海环境科学, 2002, **21** (4): 213-215.
- [11] 蒋海燕, 刘敏, 顾琦, 等. 上海城市降水径流营养盐氮负荷

- 及空间分布[J]. 城市环境与城市生态, 2002, **15**(1): 15-17.
- [12] 卓慕宁, 吴志峰, 王继增, 等. 珠海城区降雨径流污染特征初步研究[J]. 土壤学报, 2003, **40**(5): 775-778.
- [13] 杨德敏, 曹文志, 陈能汪, 等. 厦门城市降雨径流氮、磷污染特征[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(6): 625-628.
- [14] 李敬峰. 铁岭市中心城区降雨径流氨氮污染特征初步研究[J]. 气象与环境学报, 2007, **23**(3): 47-49.
- [15] 边博, 朱伟, 黄峰, 等. 镇江城市降雨径流营养盐污染特征研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 19-25.
- [16] 车武, 汪慧贞, 任超, 等. 北京城区屋面雨水污染及利用研究[J]. 中国给水排水, 2001, **17**(6): 57-61.
- [17] 黄金良, 杜鹏飞, 欧志丹, 等. 澳门屋面径流特征初步研究[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(7): 1076-1081.
- [18] 李立青, 朱仁肖, 郭叔刚, 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.
- [19] 李青云, 田秀君, 魏孜, 等. 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): 136-140.
- [20] Lee H J, Lau S L, Kayhanian M, *et al.* Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges [J]. Water Research, 2004, **38**(19): 4153-4163.
- [21] Kim L H, Kayhanian M, Zoh K D, *et al.* Modeling of highway stormwater runoff[J]. Science of the Total Environment, 2005, **348**(1-3): 1-18.
- [22] 温州统计局. 温州统计年鉴-2007[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [23] 董欣, 杜鹏飞, 李志一, 等. 城市降雨屋面、路面径流水文水质特征研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(3): 607-612.
- [24] 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.
- [25] 常静, 刘敏, 李先华, 等. 城市地表灰尘-降雨径流系统重金属生物有效性研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(8): 2241-2247.
- [26] 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.
- [27] Taebe A, Droste R L. Pollution loads in urban runoff and sanitary wastewater[J]. Science of the Total Environment, 2004, **327**(1-3): 175-184.
- [28] Lee J H, Bang K W. Characterization of urban stormwater runoff[J]. Water Research, 2000, **34**(6): 1773-1780.
- [29] 王和意, 刘敏, 刘巧梅, 等. 城市降雨径流非点源污染分析与研究进展[J]. 城市环境与城市生态, 2003, **16**(6): 283-285.
- [30] 常静, 刘敏, 许世远, 等. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J]. 地理研究, 2006, **25**(6): 994-1002.
- [31] 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.
- [32] 王和意, 刘敏, 刘巧梅, 等. 城市暴雨径流初始冲刷效应和径流污染管理[J]. 水科学进展, 2006, **17**(2): 181-185.
- [33] 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.
- [34] Barrett M E, Irish L B Jr, Malina J F, *et al.* Characterization of highway runoff in Austin, Texas, Area [J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, **124**(2): 131-137.
- [35] Drapper D, Tomlinson R, Williams P. Pollutant concentrations in road runoff: Southeast Queensland case study[J]. Journal of Environmental Engineering, 2000, **126**(4): 313-320.
- [36] 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.
- [37] Geiger W F. Flushing effects in combined sewer systems [A]. In: Yen B C, ed. Proceedings of the 4th international conference on urban storm drainage[C]. Lausanne, Switzerland, 1987. 40-46.
- [38] Gupta K, Saul A J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows[J]. Water Research, 1996, **30**(5): 1244-1252.
- [39] Deletic A B, Maksumovic C T. Evaluation of water quality factors in storm runoff from paved areas[J]. Journal of Environmental Engineering, 1998, **124**(9): 869-879.
- [40] 郭婧, 马琳, 史鑫源, 等. 北京城市道路降雨径流监测与分析[J]. 环境化学, 2011, **30**(10): 1814-1815.
- [41] Whipple W, Grigg S, Gizzard T, *et al.* Stormwater Management in Urbanizing Areas[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1983.
- [42] Deletic A. The first flush load of urban surface runoff[J]. Water Research, 1998, **32**(8): 2462-2470.
- [43] 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.
- [44] 欧阳威, 王伟, 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.
- [45] 上海环境保护局. 废水生化处理[M]. 上海: 同济大学出版社, 1999. 34-36.
- [46] 郭文成, 吴群河. BOD_5/COD_{Cr} 值评价污水可生化性的可行性分析[J]. 环境科学技术, 1998, **8**(3): 39-41.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 90.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行