

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区VOCs特征及O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的A ² O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N ₂ O产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)	

苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态

李淮, 吴玮*, 田永静, 黄天寅

(苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009)

摘要: 基于苏州市古城区内商业区、现代住宅区、老旧住宅区、交通区、园林旅游区等 5 种具有代表性的功能区降雨径流中颗粒物粒径分析、水质监测以及降雨径流参数, 考察了古城区不同功能区降雨径流中颗粒物分布及其过程变化特征, 重点分析了前期晴天数、降雨强度和径流量对径流中颗粒物分布的影响, 并探讨了不同功能区主要污染物的赋存形态以及相关关系。结果表明, 城市不同功能区降雨径流中颗粒物的粒径分布、迁移过程和输出特征存在较大差异, 在针对径流污染控制措施的设计阶段需要区别对待; 前期晴天数、降雨强度、径流量与粒径分布有显著的相关关系, 是影响颗粒物分布的重要因素; 颗粒物输出在降雨初期受径流冲刷影响较大, 径流量与颗粒物迁移能力的相关性在降雨事件初期 30% 和后期 70% 径流体积中出现了明显差异; 颗粒态是径流中污染物重要的输出形态, 并且通过与不同粒径段颗粒物的相关性分析探明了小于 150 μm 的颗粒物是吸附、富集污染物的主要载体。

关键词: 城市降雨 径流; 粒径分布; 影响因素; 前期晴天数; 污染物形态; 迁移转化

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0565-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.02.022

Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou

LI Huai, WU Wei*, TIAN Yong-jing, HUANG Tian-yin

(School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The particle size distribution (PSD) and its transformation processes in the stormwater runoffs in the ancient town of Suzhou were studied based on the particles size analyses, the water-quality monitoring data and the parameters of the rainfall-runoff models. The commercial districts, the modern residential area, the old residential area, the traffic area and the landscape tourist area were selected as the five functional example areas in the ancient town of Suzhou. The effects of antecedent dry period, the rainfall intensity and the amount of runoffs on the particle size distributions were studied, and the existing forms of the main pollutants in different functional areas and their possible relations were analyzed as well. The results showed that the particle size distribution, the migration processes and the output characteristics in the stormwater runoffs were greatly different in these five functional areas, which indicated different control measures for the pollution of the runoffs should be taken in the design process. The antecedent dry period, the rainfall intensity and the amount of runoffs showed significant correlations with the particle size distribution, showing these were the important factors. The output of the particles was greatly influenced by the flow scouring in the early period of the rainfall, and the correlations between the amount of runoffs and the particle migration ability presented significant difference in 30% (early period) and 70% (later period) of the runoff volume. The major existence form of the output pollutants was particle, and the correlation analyses of different diameter particles showed that the particles smaller than 150 μm were the dominant carrier of the pollutants via adsorption and accumulation processes.

Key words: urban stormwater runoff; particle-size distribution; influencing factor; antecedent dry period; pollutant forms; migration and transformation

随着城市化进程的加快, 不透水地表面积不断扩大, 降雨径流逐渐成为城市水环境恶化的主要原因^[1~3]。颗粒物具有孔隙结构和良好的吸附性能, 是污染物在径流中迁移的重要载体^[4~6], 而粒径是表征颗粒物的首要参数, 影响着颗粒物的迁移能力^[7], 对于径流中污染物的性质和组成具有决定作用, 也是控制径流污染“最佳管理措施”(best management practices, BMPs)中一项重要的设计参数^[8]。

从近年国内外的相关研究成果来看, 地表沉积物中颗粒物的研究较为全面, 围绕沉积物中颗粒物的粒径、重金属分布及迁移转换等方面均有较多的报道^[7,9~12]。与地表沉积物相比, 径流中颗粒物特

收稿日期: 2015-08-05; 修订日期: 2015-09-10

基金项目: 住房和城乡建设部 2014 年科学技术项目(2014-K5-043); 国家自然科学基金项目(51278267)

作者简介: 李淮(1991~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与回用技术, E-mail: lihuaigame@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wwuzn@126.com

征则更加符合实际的设计要求,但两者之间有较大差异^[13],需要进一步对径流中颗粒物的粒径分布、过程变化以及污染物在颗粒物中赋存形态进行更加细致的研究,目前虽已取得不少有价值的成果^[14~16],然而对于径流中颗粒物粒径分布影响因素的关注相对较少,在污染物进入受纳水体前,要经历前期积累、降雨的冲刷、径流的迁移传输这3个主要过程^[17],因此前期晴天数、降雨强度、径流量对于颗粒物粒径分布具有重要影响,研究这些影响因素对于城市非点源污染控制管理具有深远意义.此外,与传统城市相比,老城区城市用地类型以及污染来源更为复杂,水环境也格外脆弱,加之土地利用紧张,因而对于城市非点源污染的控制和管理方面具有相当的特殊性和迫切性,不能完全照搬其类型城市的经验,在设计时缺乏理论依据.鉴于此,选择苏州市老城区为研究对象,考察了老城区中不同功能区降雨径流中颗粒物分布及其过程变化特征,重点分析了前期晴天数、降雨强度和径流量对径流中颗粒物分布的影响,并探讨了不同功能区主要污染物的赋存形态以及相关关系,以期为城市雨水管理及非点源污染控制管理提供数据支撑和理论指导.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

苏州市位于长江三角洲中部,地处温带,属于亚热带季风海洋气候,四季分明,雨量充沛,年平均降雨量约1 100 mm,年平均降雨日约125 d,降雨多分布于5~9月.

研究选取的城市降雨径流监测区域为苏州市老城区(护城河以内),是一座具有悠久历史的古城,也是苏州最繁华、人口最为集中的区域之一,对于老城区降雨径流污染研究具有一定的代表性,区域面积约为14.2 km²,人口密度1.14万人·km⁻²,根据老城区不同用地功能和特点,选取5个监测点,分别代表5种城市功能区,详见表1.

表1 径流采样点概况

Table 1 Overview of sampling sites in this study		
功能区	采样点布置	特征
商业区	观前街	苏州市最繁华的商业区,日客流量超过20万人次,节假日可达30~40万人次,路面为大理石,每日人工清扫3~4次
现代住宅区	狮林苑	高档园林式别墅住宅区,居住条件和环境卫生状况较好,路面材料为透水性混凝土,每日人工清扫2~3次
老旧住宅区	桃花坞大街	房屋建设年代久远,布局凌乱、密集,路面为方格砖石和细小碎石砌筑,每日人工清扫1次
交通区	临顿路	古城中部的一条南北向重要道路,车流量较高,路面材料为沥青,采用人工和机械相结合的方式清扫
园林旅游区	朴园	古典私家园林,路面为方格砖石,每日人工清扫1~2次

1.2 监测降雨特征

于2015年4月~2015年7月对监测点降雨径流进行收集,共获得5次完整的场次降雨样品,收集场次较少是由于降雨发生的随机性以及部分场次降雨径流不连续所导致.表2是5次有效的降雨事件所对应的降雨特征.相关降雨事件的参数通过设在监测点附近的JDZ01-1型翻斗式雨量计获得.

表2 所监测的场次降雨特征

Table 2 Characteristics of the rainfall events monitored						
降雨日期 /年-月-日	降雨量 /mm	降雨历时 /h	平均雨强 /mm·h ⁻¹	最大雨强 /mm·h ⁻¹	前期晴天数 ¹⁾ /d	样品数 /个
2015-04-07	12.2	1.8	6.8	14.2	7	56
2015-05-08	16.7	2.6	6.4	15.6	9	69
2015-05-28	12.6	2.4	5.3	13.4	6	71
2015-06-15	29.2	3.1	9.4	22.7	12	72
2015-07-11	18.2	4.4	4.1	10.1	1	72

1)前期晴天数是指与上次降雨雨量超过5 mm降雨事件的间隔时间

1.3 样品采集与分析方法

取样时采用自制取样器放入检查井中,用1 L聚乙烯瓶进行取样.当地表雨水产流后开始计时,前30 min按照每5 min取1次样;30~60 min每隔10 min取1次样;60~120 min每隔20 min取1次样;120 min后每隔30 min取1次样,直至降雨结束.取样器中设有容积标尺,在采集样品的同时用

秒表进行计时,根据秒表记录的时间以及取样器内标尺读出的体积计算出该时刻的瞬时径流量.

样品收集后立即转入室内进行分析,未进行分析的样品进行预处理后放入冰箱中1~5℃暗处冷藏.水质监测的指标包括:总化学需氧量(TCOD)、总氮(TN)、总磷(TP)、溶解态化学需氧量(SCOD)、溶解态氮(DN)、溶解态磷(DP)以及固

体悬浮物粒径分布. TCOD 测定采用快速密闭消解法 (DRB200, Hach, America); 粒径分析采用激光粒度分析仪 (Mastersizer 3000, Malvern, Britain); SCOD、DN、DP 采用 $0.45\ \mu\text{m}$ 微滤膜抽滤后测定, 方法同 TCOD、TN、TP; 颗粒态化学需氧量 (PCOD)、颗粒态氮 (PN)、颗粒态磷 (PP) 分别为 TCOD 与 SCOD、TN 与 DN、TP 与 DP 的差值; 所有常规指标均按照文献 [18] 中的标准方法进行测定.

2 结果与讨论

2.1 城市不同功能区降雨径流颗粒物粒径分布及其过程变化特征

2.1.1 颗粒物粒径分布特征

粒径是表征颗粒物行为的重要参数^[14], 其分布特征不仅影响颗粒物的可迁移性, 而且与其他污染物密切相关^[10]. 城市是人类活动最频繁、最集中的区域, 人类活动方式的不同使得城市不同功能区降雨径流中悬浮颗粒物粒径分布存在差异^[19]. 对采集的 5 次降雨事件中不同功能区降雨径流的粒径进行分析, 结果如图 1 所示. 商业区路面为大理石, 质地较为光滑, 地表颗粒物不易附着, 径流中颗粒物主要为 $5\sim100\ \mu\text{m}$ 小颗粒物; 老旧住宅区虽然地表类型与商业区相差较大, 但在小于 $250\ \mu\text{m}$ 粒径段的分布特征与商业区较为相近, 不同的是老旧住宅区大于 $250\ \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数在 5 种功能区中最高, 这可能是由于其道路两旁裸露土壤缺乏植被保护, 易发生侵蚀; 现代住宅区路面透水材料有较多的孔隙, 对细小颗粒物有一定的截留作用, 加之街道清扫频率较高、人类和车辆活动频率相对较低, 因此小于 $100\ \mu\text{m}$ 的小颗粒物体积分数较小, 其中 $5\sim40\ \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数在 5 种功能区中最低; 交通区颗粒物粒径分布特征较为突出, 粒径小于 $40\ \mu\text{m}$, 特别是小于 $5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数显著高于其他 4 种功能区, 交通区车辆通行量大, 汽车尾气、轮胎磨损、轮轴摩擦以及沥青路面材料老化极易产生细小颗粒物, 此外车辆的机械碾压作用会使得一些较大颗粒物被碾碎, 这可能也是导致其粒径大于 $250\ \mu\text{m}$ 颗粒物体积分数在 5 种功能区中最低的原因之一; 园林旅游区内植物、树木生长茂盛, 道路多从绿地中穿过, 径流中极易夹带土壤、植物残渣等粒径较大的颗粒物, 其大于 $40\ \mu\text{m}$ 粒径段的颗粒体积分数普遍较高.

总体来看, 在 5 种城市功能区中, $5\sim40\ \mu\text{m}$ 的细颗粒物的体积分数最大, $150\sim250\ \mu\text{m}$ 这个粒

段颗粒物体积分数最小, 这与朱伟等^[14]对镇江的研究结果相一致. 已有研究表明^[20], 大于 $250\ \mu\text{m}$ 颗粒物可以通过街面清扫有效的去除, 但从图 1 可知, 粒径大于 $250\ \mu\text{m}$ 颗粒物的体积分数仍较大, 并且其变异系数 (标准差与均值的比值) 较高, 表明其在实际降雨过程中仍不容忽视, 受城市管理水平以及地面清扫方式和频率的影响较大.

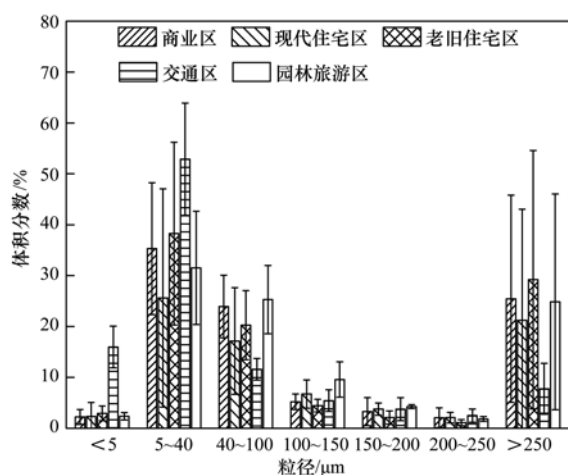


图 1 城市不同功能区降雨径流颗粒物粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of stormwater runoffs in different urban functional areas

2.1.2 颗粒物粒径过程变化特征

不同粒径颗粒物上污染物的分布不同^[21,22], 对降雨径流中颗粒物粒径分布过程变化进行研究有助于了解污染物的变化过程^[23], 从而有针对性的采取弃流、调蓄、渗滤等控制措施来削减降雨径流中的污染物. 图 2 为不同粒径颗粒物的平均体积分数随径流形成时间变化特征, 从中可以看出, 城市不同功能区颗粒物过程变化受到各自地表类型的影响较大. 商业区、交通区不透水地表面积较大, 综合径流系数较高, 径流容易汇集, 从而导致其在降雨初期 $5\sim150\ \mu\text{m}$ 的小颗粒物体积分数较高, 且上下波动明显, 受降雨特征影响较大, 随着降雨历时的增加, 体积分数呈现明显下降趋势, 这与左晓俊等^[15]对公路径流中观察到的现象基本一致; 现代住宅区路面为透水性材料, 径流不易积聚, 颗粒物的输出变化特征则较为稳定; 老旧住宅区颗粒物输出呈现“多峰”的特点, 这是由于其路面多为方格砖与细石, 极易坑洼积水, 颗粒物在低洼处聚集后又受到降雨冲刷影响重新进入径流中; 园林旅游区的变化特征较为特殊, 在降雨初始阶段道路两旁绿地的截留作用使得粒径较小颗粒物体积分数出现了短暂下降, 随着降雨的进行, 地表径流量不断增大, 绿地截留作用开始

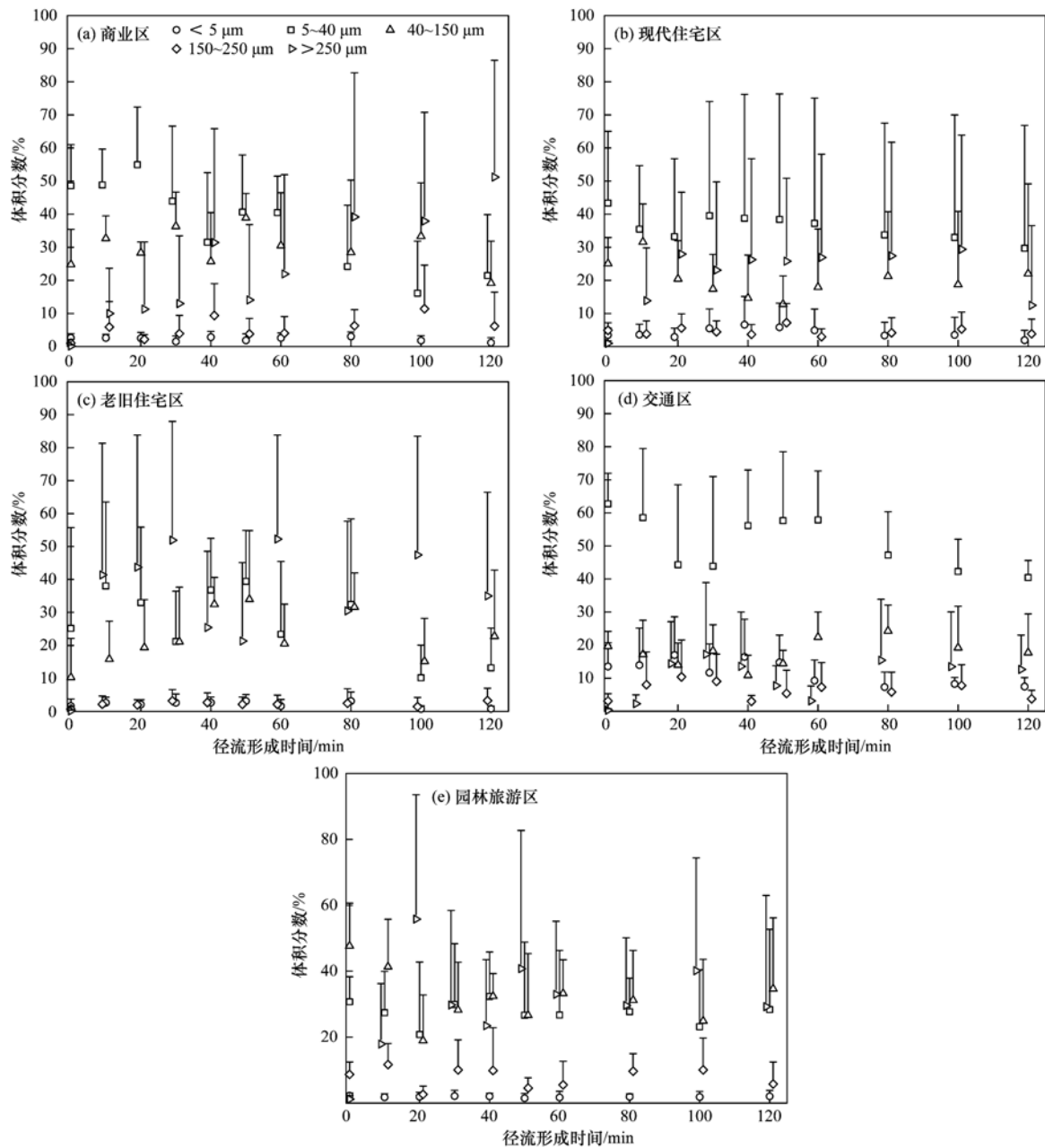


图2 城市不同功能区降雨径流颗粒物粒径分布随径流形成时间变化特征

Fig. 2 Variation characteristics of the particle size distribution with the formation time of the runoffs in different urban functional areas

减弱,到了降雨后期颗粒物才开始进行平稳的输出。

从整体来看,在径流形成初期的5 min内,小于150 μm 粒径段的颗粒物最先开始迁移,大于150 μm 粒径段的颗粒物略有滞后,在10~20 min才开始随地表径流进行迁移,体积分数逐渐开始升高。在整个径流过程中,粒径小于5 μm 的颗粒体积分数基本保持稳定;5~150 μm 粒径段的颗粒体积分数则上下波动明显;大于150 μm 粒径段的颗粒物体积分数变化趋势规律性不强,一方面是由于粒径较大的颗粒物在地表累积存在随机性,另一方面可能是其容易在路面低洼处沉淀积聚,从而影响其迁

移进程。

2.2 水文参数对颗粒物分布的影响分析

2.2.1 前期晴天数对颗粒物粒径分布的影响分析

前期晴天数反映了污染物在地表的累积程度^[24],因此晴天数与降雨径流中颗粒物分布情况存在一定的关联性。图3为降雨径流中各粒径段颗粒物体积分数随前期晴天数增加的变化情况。从中可知,除了粒径大于250 μm 的颗粒物以外,其余粒径段颗粒物体积分数与前期晴天数的相关性较好,均达到显著水平($P < 0.05$)。随着晴天数的增加,粒径在5~150 μm 的颗粒物体积分数增加明显,在晴

天时能够得到快速积累; 小于 $5\ \mu\text{m}$ 以及 $150\sim 250\ \mu\text{m}$ 的颗粒物变化平缓, 这表明该粒径段颗粒物在地表沉积过程中来源较少; 大于 $250\ \mu\text{m}$ 的颗粒物变化趋势则与上述情况相反, 这是由于粒径较小的颗粒物在晴天时的积累速率要远远大于粒径较大的颗粒, 且其更容易受到降雨径流冲刷而被夹带, 因而随着晴天数的增加, 径流中粒径小于 $250\ \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数增大, 大于 $250\ \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数呈减小趋势。

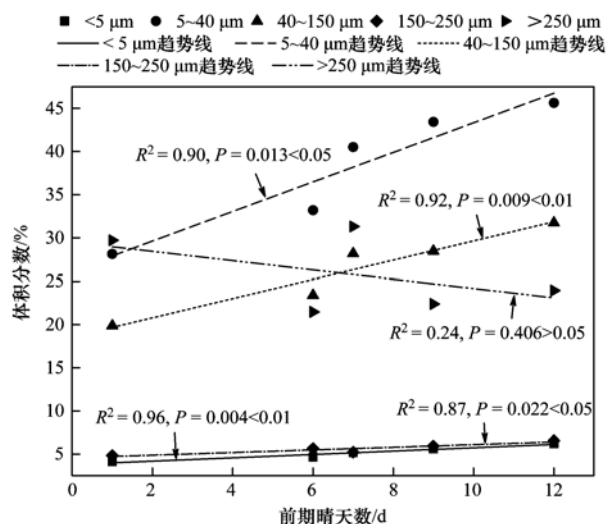


图3 降雨径流颗粒物粒径分布与前期晴天数之间的相关关系 ($n=5$)

Fig. 3 Correlation between the particle size distribution in stormwater runoffs and the antecedent dry period

2.2.2 降雨强度对颗粒物粒径分布的影响分析

降雨强度代表降雨对地表的冲刷能力, 对于降雨径流中颗粒物分布有重要影响。降雨径流中 5 个粒径段颗粒物体积分数与平均降雨强度、最大降雨

强度的单因子相关分析结果见图 4。从中可知, 随着降雨强度(平均降雨强度和最大降雨强度)的增大, 粒径小于 $250\ \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数普遍增加, 尤其是小于 $150\ \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数与降雨强度呈显著正相关($P<0.05$); $150\sim 250\ \mu\text{m}$ 粒径段的颗粒物与降雨强度存在较弱的正相关, 但未达到显著水平($P>0.05$); 粒径大于 $250\ \mu\text{m}$ 的颗粒物体积分数与降雨强度相关性较差。同时比较不同粒径段颗粒物体积分数与降雨强度的相关性可以看出, 粒径小于 $150\ \mu\text{m}$ 的颗粒物的 R^2 略大于粒径较大的颗粒物, 表明粒径小于 $150\ \mu\text{m}$ 的颗粒物与降雨强度的相关性较好, 受降雨冲刷作用影响较大。

2.2.3 降雨径流量对颗粒物粒径分布的影响分析

降雨在形成径流前首先要有一部分降雨满足初损、下渗等损失^[25], 因此径流量更能代表地表径流对颗粒的迁移传输能力。为了进一步考察径流量对颗粒物迁移的影响, 以 D_{10} (粒径小于某一数值的颗粒物体积占总颗粒物的 10%) 表征径流中携带颗粒物的底值, D_{50} 表征中值粒径, 分别对 5 次降雨事件初期 30% 和后期 70% 累积径流体积中每一采样时刻对应的径流量与 D_{10} 、 D_{50} 进行 Pearson 相关分析 (以交通区为例), 图 5 给出了相关分析 $P<0.05$ 的统计结果。总体看来, 在降雨事件初期 30% 径流体积中, 5 次降雨事件的径流量均与 D_{10} 呈显著正相关 ($P<0.05$), 而与 D_{50} 呈显著正相关有两次 (2015-05-08 和 2015-06-15), 随着径流量的增加, 颗粒物迁移能力显著增加, 并且小颗粒物迁移能力与径流量相关性要高于大颗粒物。对于降雨事件后期 70% 径流体积来说, 只有 1 次降雨事件 (2015-06-15) 的径流量与 D_{10} 呈显著正相关 ($P<0.05$), 其余均未达

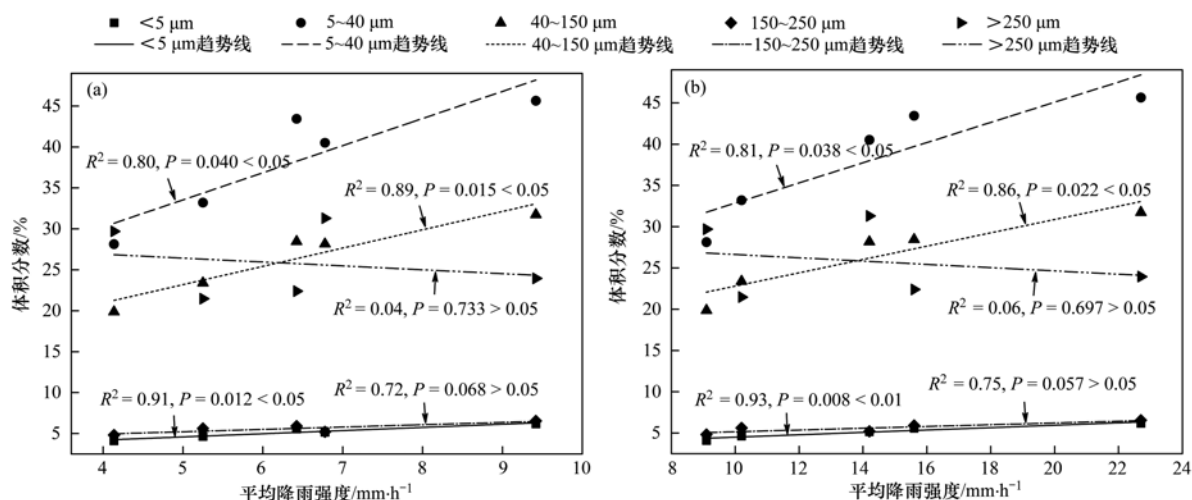


图4 降雨径流颗粒物粒径分布与降雨强度之间的相关关系 ($n=5$)

Fig. 4 Correlation between the particle size distribution in stormwater runoffs and the rainfall intensity

到显著水平($p > 0.05$). 从 2.2.1 节中对颗粒物粒径分布过程变化分析可知,小于 $150\ \mu\text{m}$ 的颗粒物在降雨事件初期变化明显且体积分数较高,因此颗粒物在降雨前期很快被降雨径流冲刷殆尽,从而导致在降雨事件初期 30% 和后期 70% 径流体积中径

流量与粒径分布的相关性存在差异,同时不难发现 2015-05-08 和 2015-06-15 这两次降雨事件对应的前期晴天数、降雨强度均较高,由此说明当地表累积的颗粒物数量足够多、降雨强度足够大时,这种差异性将会缩小.

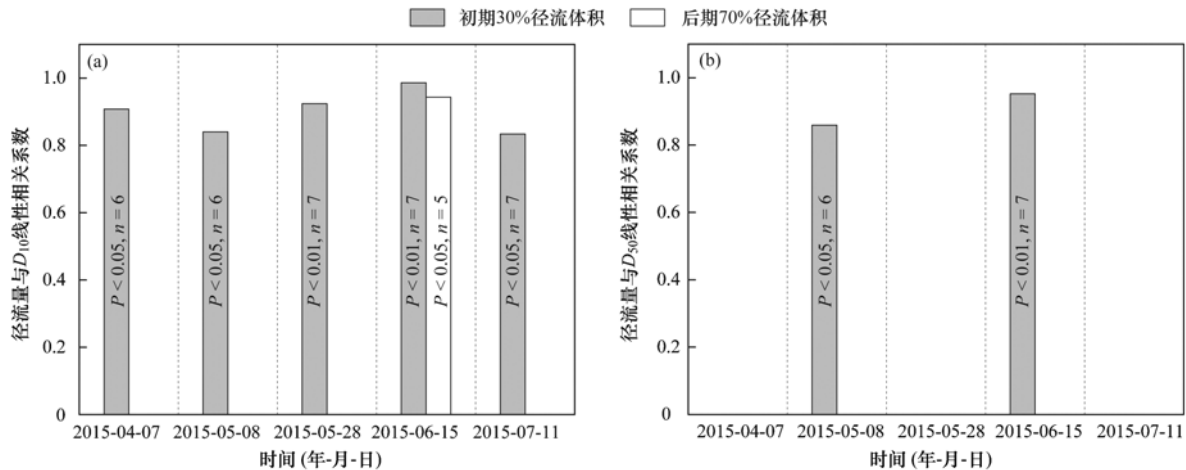


图5 降雨径流颗粒物粒径分布与场次降雨径流量之间的相关关系

Fig. 5 Correlation between the particle size distribution in stormwater runoffs and the amount of runoffs

2.3 主要污染物赋存形态以及与颗粒物相关性分析

降雨径流是污染物进入水体的重要途径,大量研究表明^[26,27],径流中的各项污染物与颗粒物具有较好的相关关系,因此有必要对城市不同功能区降雨径流中主要污染物的赋存形态进行分析,对于科学地制定雨水调控和污染物削减措施,具有重要意义. 本研究以 COD、TN、TP 分别代表有机物和营养物质,利用 5 次降雨事件污染物平均浓度(event mean concentration, EMC)来研究城市不同功能区降雨径流主要污染物赋存形态,详细结果见图 6. 结果表明,交通区有机污染状况最为严重且颗粒态有机物占到了 74%,这与陈莹等^[28]对西安市主干道的研究结果相近,老旧住宅区、商业区的颗粒态有机物占比次之,分别达到了 59% 和 48%,现代住宅区、园林旅游区有机物则以溶解态为主,颗粒态含量较少. 从氮磷等营养物质来看,商业区和交通区中氮的赋存形态主要是颗粒态,分别占到总氮的 73% 和 55%,现代住宅区、老旧住宅区、园林旅游区中氮则主要以溶解态为主,颗粒态氮平均只占到总氮的 24%. 磷的赋存形态特征较为一致,在 5 种城市功能区中均以颗粒态为主,平均占比达到了 73%,这与磷易被颗粒物所吸附的性质密切相关^[29].

从上述分析中可以看出,城市不同功能区降雨径流中有机物和营养物质的赋存形态特点不尽相同,但仍可以通过对径流中颗粒物的控制来去除径

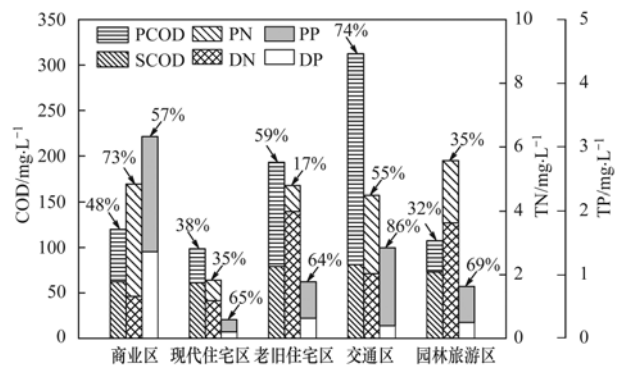


图6 城市不同功能区降雨径流主要污染物赋存形态

Fig. 6 Dominant existing forms of pollutants in different urban functional areas

流中一定比例的污染负荷. 然而,不同粒径段颗粒物对污染物的吸附能力不同,对其与污染物的相关性进行研究有助于了解不同粒径段颗粒物的污染潜力,从而有针对性的控制某一粒径范围内的颗粒物. 从表 3 可知,小于 $150\ \mu\text{m}$ 粒径段的颗粒物与 COD、TN、TP 的相关性较好,均达到显著水平($P < 0.05$),而大于 $150\ \mu\text{m}$ 粒径段的颗粒物与之相关性较差,说明小于 $150\ \mu\text{m}$ 的颗粒物是富集降雨径流中污染物的重要载体;在小于 $150\ \mu\text{m}$ 粒径范围内,随着粒径的减少,其与污染物的 Pearson 相关系数在逐渐增大,显著性在增强,由此表明颗粒物的粒径越小,对污染物的吸附性能越强,与污染物的相关性也

表 3 降雨径流中主要污染物与不同颗粒段颗粒体积分数的 Pearson 相关系数¹⁾($n=20$)

Table 3 Pearson correlation coefficients between the dominant pollutants and the volume of various particles with different sizes in the stormwater runoffs

颗粒物粒径	<5 μm	5 ~ 40 μm	40 ~ 150 μm	150 ~ 250 μm	>250 μm
COD	0.629 ** (0.003)	0.544 * (0.013)	0.483 * (0.272)	0.149 (0.531)	-0.371 (0.108)
TN	0.565 ** (0.009)	0.467 * (0.038)	0.500 * (0.025)	0.137 (0.565)	-0.339 (0.144)
TP	0.703 ** (0.001)	0.692 ** (0.001)	0.560 * (0.010)	0.267 (0.238)	-0.294 (0.209)

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; ** 表示在 0.01 水平(双侧)显著相关; 括号内为 P 值

越好,因此对于细小颗粒的污染潜力要格外重视; TP 与各粒径段的颗粒物相关性均高于 COD 和 TN,说明其相对于其他两种污染物更容易被颗粒物所吸附,也进一步佐证了之前得出颗粒态磷是降雨径流中主要赋存形态的结论。

3 结论

(1)苏州古城区不同功能区降雨径流颗粒物的分布、迁移过程和输出特征存在明显差异,因此需要根据不同功能区颗粒物粒径的特点来选取合理的控制措施和设计参数。

(2)城市降雨径流中粒径分布与前期晴天数、降雨强度、径流量存在显著的相关关系,是影响降雨径流中颗粒物分布的重要水文参数。粒径小于 150 μm 的颗粒物受前期晴天数和降雨强度的影响最为明显,并且粒径较小的颗粒物与径流量的相关性也要高于大颗粒物,这些都反映了粒径越小的颗粒物越容易随径流迁移。

(3)降雨初期 30% 的径流体积中颗粒物粒径与径流量的相关性要高于后期,由此表明降雨初期和后期径流中颗粒物的迁移过程存在差异,需要区别对待。

(4)颗粒态是污染物在径流污染的重要输出形态,也是其进入受纳水体的主要载体,对降雨径流中颗粒物进行去除是降低其污染负荷的有效途径。粒径小于 150 μm 的颗粒物对于污染物的吸附、富集作用最为明显,且粒径越小与污染物的相关性越显著,在径流污染控制措施设计中需要格外关注。

致谢:对周佳磊、殷方亮、赵硕、郭富成、李治源、张黎明、崔蒙蒙、胡金梅、朱其龙、贡丹燕等在现场雨水收集和分析测试中提供的帮助,以及苏州市气象局对本研究的支持,在此一并谨致谢忱!

参考文献:

[1] Gnecco I, Berretta C, Lanza L G, *et al.* Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy [J]. Atmospheric Research, 2005, **77**(1-4): 60-73.

[2] 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.

[3] 侯培强,任玉芬,王效科,等.北京市城市降雨径流水质评价研究[J].环境科学,2012, **33**(1): 71-75.

[4] Cristina C, Tramonte J, Sansalone J J. A granulometry-based selection methodology for separation of traffic-generated particles in urban highway snowmelt runoff[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2002, **136**(1): 33-53.

[5] Uusitalo R, Turtola E, Puustinen M, *et al.* Contribution of particulate phosphorus to runoff phosphorus bioavailability[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, **32**(6): 2007-2016.

[6] Bibby R L, Webster-Brown J G. Characterisation of urban catchment suspended particulate matter (Auckland region, New Zealand); a comparison with non-urban SPM[J]. Science of the Total Environment, 2005, **343**(1-3): 177-197.

[7] 何小艳,赵洪涛,李叙勇,等.不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化[J].环境科学,2012, **33**(3): 810-816.

[8] Li Y X, Lau S L, Kayhanian M, *et al.* Particle size distribution in highway runoff[J]. Journal of Environmental Engineering, 2005, **131**(9): 1267-1276.

[9] Tuccillo M E. Size fractionation of metals in runoff from residential and highway storm sewers[J]. Science of the Total Environment, 2006, **355**(1-3): 288-300.

[10] 王小梅,赵洪涛,李叙勇.北京市地面街尘与径流中重金属的污染特征[J].生态毒理学报,2010, **5**(3): 426-432.

[11] 于海霞,于江华,徐礼强,等.韩国西海岸地区停车场径流携带沉积物的粒径分布及污染特征研究[J].环境科学学报,2013, **33**(4): 1066-1072.

[12] Murakami M, Nakajima F, Furumai H. Size- and density-distributions and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban road dust[J]. Chemosphere, 2005, **61**(6): 783-791.

[13] Andral M C, Roger S, Montréjaud-Vignoles M, *et al.* Particle size distribution and hydrodynamic characteristics of solid matter carried by runoff from motorways [J]. Water Environment Research, 1999, **71**(4): 398-407.

[14] 朱伟,边博,李磊.镇江城市径流颗粒粒径分布及其与污染物的关系[J].环境科学学报,2008, **28**(4): 764-771.

[15] 左晓俊,傅大放,李贺.不同类型降雨公路径流中颗粒粒径及污染物的分布特性[J].东南大学学报(自然科学版),2011, **41**(2): 411-415.

[16] Li Y, Lau S, Kayhanian M, *et al.* Dynamic characteristics of

- particle size distribution in highway runoff: Implications for settling tank design[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(8): 852-861.
- [17] 尹澄清. 城市面源污染的控制原理和技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. 1-71.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [19] Bannerman R T, Owens D W, Dodds R B, *et al.* Sources of pollutants in Wisconsin stormwater [J]. *Water Science & Technology*, 1993, **28**(3-5): 241-259.
- [20] Bender G M, Terstriep M L. Effectiveness of street sweeping in urban runoff pollution control [J]. *Science of the Total Environment*, 1984, **33**(1-4): 185-192.
- [21] Miguntanna N P, Liu A, Egodawatta P, *et al.* Characterising nutrients wash-off for effective urban stormwater treatment design [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, **120**: 61-67.
- [22] Vaze J, Chiew F H S. Nutrient loads associated with different sediment sizes in urban stormwater and surface pollutants [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004, **130**(4): 391-396.
- [23] 王彪, 李田, 孟莹莹, 等. 屋面径流中营养物质的分布形态研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(11): 3035-3042.
- [24] Kim L H, Zoh K D, Jeong S M, *et al.* Estimating pollutant mass accumulation on highways during dry periods [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(9): 985-993.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 周栋, 陈振楼, 毕春娟. 温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应[J]. *环境科学*, 2012, **33**(8): 2634-2643.
- [28] 陈莹, 赵剑强, 胡博. 西安市城市主干道路面径流污染特征研究[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(5): 781-788.
- [29] McDowell R W, Sharpley A N. Soil phosphorus fractions in solution: Influence of fertiliser and manure, filtration and method of determination[J]. *Chemosphere*, 2001, **45**(6-7): 737-748.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行