

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素

李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年7月

第42卷 第7期
Vol.42 No.7

目次

冠状病毒气溶胶传播及环境影响因素	李雪, 蒋靖坤, 王东滨, 邓建国, 贺克斌, 郝吉明 (3091)
新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对 PM _{2.5} 的影响	逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 雷宇, 严刚 (3099)
基于网格的长三角 PM _{2.5} 分布影响因素及交互效应	黄小刚, 赵景波, 辛未冬 (3107)
ARIMA 时间序列分析模型在臭氧浓度中长期预报中的应用	李颖若, 韩婷婷, 汪君霞, 权维俊, 何迪, 焦热光, 吴进, 郭恒, 马志强 (3118)
中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析	赵宇, 吴灿, 王益倩, 陈玉宝, 吕少君, 汪芳琳, 杜伟, 刘仕杰, 李志健, 王格慧 (3127)
四川盆地 PM _{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析	李梦真, 张廷斌, 易桂花, 秦岩宾, 李景吉, 刘贤, 蒋杰 (3136)
河网连续动态模型构建及其在典型杀虫剂时空迁移模拟中的应用	邢成, 张芊芊, 蔡雅雅, 烟晓婷, 应光国 (3147)
九龙江流域河流氮输出对土地利用模式和水文状况的响应	黄亚玲, 黄金良 (3156)
滇池近岸水体微塑料污染与富营养化的相关性	袁海英, 侯磊, 梁启斌, 李佳琛, 任甲 (3166)
白洋淀夏季入淀区沉积物间隙水-上覆水水质特征及交换通量分析	张甜娜, 周石磊, 陈召莹, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3176)
镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价	原璐彬, 邢书语, 刘鑫, 周晓红, Adelaide Angela Dadzie (3186)
洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险	刘永九, 黄素珍, 张璐, 彭雪, 张心怡, 葛芳杰, 刘碧云, 吴振斌 (3198)
苏州古城区域河道底泥的重金属污染分布及生态风险评价	白冬锐, 张涛, 包峻松, 陈坦, 王洪涛, 金曦, 金军, 杨婷 (3206)
武汉集中式饮用水源地土壤重金属的时空分布特征及生态风险评价	朱静, 侯耀宗, 邹书成, 曹梦华, 涂书新 (3215)
升金湖湖交汇区地表-地下水水化学特征及成因分析	崔玉环, 王杰, 刘友存, 郝洸, 高祥 (3223)
青岛市农区地下水硝态氮污染来源解析	寇馨月, 丁军军, 李玉中, 毛丽丽, 李巧珍, 徐春英, 郑欠, 庄姗 (3232)
三峡库区支流浮游植物群落稳定性及其驱动因子分析	何书晗, 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨安琪, 施军琼, 吴忠兴 (3242)
哈尔滨城市河网丰水期浮游植物群落分布特征及驱动因子	路枫, 李磊, 齐青松, 陆欣鑫, 刘妍, 范亚文 (3253)
湖泊沉积物中微生物群落对天然有机质输入的响应	居琪, 章奇, 曹驰程, 白雷雷, 张晖 (3263)
补给水质与社会活动对白洋淀湿地微生物的影响特征	赵志瑞, 吴会清, 毕玉方, 展庆周, 吴海森, 袁凯悦, 孟祥源, 李方红 (3272)
蓝藻衰亡过程中上覆水溶解性有机物变化特征	李翔, 李致春, 汪旋, 张思远, 王慧敏, 厉荣强, 王国祥, 李启蒙 (3281)
长江下游快速城市化地区水污染特征及源解析:以秦淮河流域为例	马小雪, 龚畅, 郭加汛, 王腊春, 徐蕴韵, 赵春发 (3291)
长江下游居民区降水地表径流的污染特征	郭文景, 张志勇, 闻学政, 张瀚文, 王岩 (3304)
潮河流域降雨径流事件污染物输出特征	包鑫, 江燕, 胡羽聪 (3316)
不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响	单溪环, 谢文霞, 廖云杰, 房志达, 杨晓晶, 苏静君, 赵洪涛, 李叙勇 (3328)
基于概率方法的中国居民饮水途径暴露健康风险评估	秦宁, 刘运炜, 侯荣, 王彩云, 王贝贝, 段小丽 (3338)
蛋白类有机质在水厂各处理单元中的去除特性	李梦雅, 宋钰莹, 张晓岚, 黄海鸣 (3348)
污水处理厂不同单元工艺水中重金属及其纳米颗粒的分布	王杜珈, 何帅, 周小霞 (3358)
基于宏基因组技术分析 MBR 膜清洗后污泥中抗性基因	杜彩丽, 李中涵, 李晓光, 张列宇, 陈素华, 黎佳茜, 李曹乐 (3366)
石化废水处理厂中耐药菌和耐药基因的分布特征与去除效能解析	唐振平, 肖莎莎, 段毅, 刘迎九, 高媛媛, 吴月月, 陈怡雯, 周帅 (3375)
一段式亚硝化厌氧氨氧化 SMBBR 处理中低浓度氨氮废水	吕恺, 邵贤明, 王康舟, 姚雪薇, 彭党聪, 韩芸 (3385)
外加固体缓释碳源的两段反硝化工艺脱氮性能	唐义, 马懿文, 王金泉, 王艳, 叶刚 (3392)
臭氧投量对 SBR 系统污泥沉降性能及脱氮除磷的影响	吕永涛, 朱传首, 张旭阳, 徐超, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (3400)
间歇梯度曝气下首段延时厌氧强化好氧颗粒污泥脱氮除磷	张玉君, 李冬, 王歆鑫, 张富国, 张杰 (3405)
提盐速率对序批式生物反应器性能和微生物群落结构的影响	古柏铭, 金春姬, 温淳, 侯金源, 赵阳国, 高孟春 (3413)
低温驯化对自养脱氮颗粒污泥功能活性与菌群结构的影响分析	钱飞跃, 刘雨馨, 王建芳, 刘文如 (3422)
矿渣基改性剂对城市污泥重金属稳定化	张发文, 董明坤, 陈辰慧, 赵长民 (3430)
2000~2018 年长三角土地利用变化对农田生态系统氮排放的影响	王文锦, 王卿, 朱安生, 黄凌, 顾莹, 王杨君, 王敏, 李莉 (3442)
麦秸水热炭及其改良产物对水稻产量和稻田氮挥发排放的影响	韩晨, 侯朋福, 薛利红, 冯彦房, 余姗, 杨林章 (3451)
水肥管理对热带地区双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	李金秋, 邵晓辉, 缙广林, 邓艺欣, 谭诗敏, 徐文娟, 杨秋, 刘文杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3458)
耐盐碱水稻土壤产甲烷菌群落特征及产甲烷途径	杨雨虹, 贺惠, 米铁柱, 刘玥腾, 刘佳音, 张国栋, 李明月, 甄毓 (3472)
铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响	赵仲婧, 郝庆菊, 涂婷婷, 胡曼利, 张尧钰, 江长胜 (3482)
农地土壤重金属 Pb 和 Cd 有效性测定方法的筛选与评价	陈莹, 刘汉燚, 刘娜, 蒋珍茂, 魏世强 (3494)
亚热带高山森林土壤典型重金属的空间分布格局及其影响因素:以云南哀牢山为例	刘旭, 王训, 王定勇 (3507)
深圳市不同土类的重金属环境背景值与理化性质特征	林挺, 赵述华, 郝秀平, 杨坤, 吴静雅, 朱艳, 罗飞 (3518)
同步钝化土壤 Cd 和 As 材料的筛选	周嗣江, 刘针延, 熊双莲, 马烁, 黄倚豪, 雷寅, 曹梦华, 涂书新 (3527)
两种铁基材料对污染农田土壤砷、铅、镉的钝化修复	袁峰, 唐先进, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱 (3535)
青藏高原东缘冻土中有机磷酸酯的污染特征	刘丽娅, 印红玲, 蹇林洁, 徐子文, 熊远明, 罗怡, 刘小雯, 徐维新 (3549)
成都平原氮磷化肥施用强度空间分布及影响因素分析	刘奇鑫, 王昌全, 李冰, 赵海岚, 方红艳, 邓茜, 李启权 (3555)
土壤中溶解性有机质对不同类型堆肥的响应差异	席北斗, 王燕, 檀文炳, 余红, 崔东宇, 程东会, 党秋玲 (3565)
《环境科学》征订启事 (3315)	
《环境科学》征稿简则 (3357)	
信息 (3391, 3441, 3564)	

不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷影响

单溪环^{1,2}, 谢文霞^{1*}, 廖云杰², 房志达², 杨晓晶^{2,3}, 苏静君², 赵洪涛², 李叙勇²

(1. 青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071; 2. 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; 3. 兰州交通大学环境与市政工程学院, 兰州 730070)

摘要: 目前国内外关于不透水地表微观结构特征如何影响街尘对径流输出过程的研究鲜见报道. 本研究基于 12 场降雨事件的野外观测, 以粗糙度(构造深)量化不透水地表微观结构特征, 分析粗糙度与晴天街尘的累积特征及雨天冲刷特征之间的相关关系. 结果表明, 不透水地表粗糙度显著影响街尘的晴天累积-雨天冲刷过程, 晴天累积天数对粗糙度与街尘累积量的相关性($r=0.664, P<0.01$)具有增强效应, 降雨量对粗糙度与街尘冲刷量的相关性($r=0.527, P<0.01$)具有增强效应; 各粒径段街尘累积量与粗糙度的相关性($0.529 \leq r < 0.757$)随颗粒物粒径变大而提高, 各粒径段街尘冲刷量与粗糙度的相关性($0.603 > r > 0.209$)随颗粒物粒径变大而降低. 通过建立粗糙度和降雨量的线性回归模型可以较好地预测场降雨径流中 TSS 累积污染负荷. 粗糙度和降雨量对 $<20 \mu\text{m}$ 以及 $>250 \mu\text{m}$ 粒径段的累积负荷作用效果显著. 上述结果揭示了粗糙度和降雨量对街尘输出为地表径流污染物的作用, 为准确模拟城市面源颗粒污染物的径流冲刷过程提供了科学依据.

关键词: 城市面源; 不透水地表; 粗糙度; 街尘; 降雨径流; 粒径分布

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)07-3328-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202012063

Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles

SHAN Xi-huan^{1,2}, XIE Wen-xia^{1*}, LIAO Yun-jie², FANG Zhi-da², YANG Xiao-jing^{2,3}, SU Jing-jun², ZHAO Hong-tao², LI Xu-yong²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. College of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: At present, there are few reports about how impervious surface microstructure characteristics affect the runoff output process of street dust. Based on field observations of 12 rainfall events, this study quantified the microstructure characteristics of impervious surfaces by structural depth (roughness) and analyzed the correlation between roughness and accumulation characteristics of street dust on sunny days as well as scouring characteristics in rainy days. The results show that the roughness of the underlying surface notably affects dust accumulation on sunny days and scouring in rainy days. The correlation between roughness and street dust accumulation ($r=0.664, P<0.01$) was enhanced on sunny days, and the correlation between roughness and street dust erosion ($r=0.527, P<0.01$) was enhanced by rainfall. The correlation of street dust accumulation and roughness of each particle size segment increased as particle size increased ($0.529 \leq r < 0.757$), and the correlation between street dust scouring amount and roughness decreased as particle size increased ($0.603 > R > 0.209$). By establishing the linear regression model of roughness and rainfall, the cumulative pollution load of TSS in rainfall runoff can be well predicted. The effects of roughness and rainfall on the cumulative load of grain sizes $<20 \mu\text{m}$ and $>250 \mu\text{m}$ are significant. These results elucidate the role of roughness and rainfall analysis in predicting surface runoff pollution load characteristics, which can provide new information for predicting and evaluating urban non-point source pollution.

Key words: urban non-point source; impervious surface; roughness; street dust; rainfall runoff; particle size distribution

随着对城市区域污水收集、截污系统完善和水质净化标准提高, 由降雨径流冲刷地表污染物引起的城市面源污染得到了广泛关注^[1,2]. 城市地表街尘是面源污染物的重要载体^[3], 而径流冲刷是污染物汇入受纳水体的主要环节^[4~6]. 以道路和屋顶为主的不透水地表面积的增加, 将使更多污染物迁移至受纳水体^[7~10]. 因此, 了解城市面源颗粒物的累积和冲刷影响因素对于城市面源污染估算和控制有着重要意义.

目前, 城市面源颗粒物迁移传输过程的研究主要集中在 3 个方面: ①街尘晴天累积和粒径分布特

征的影响因素分析. 街尘的累积量和粒径分布特征受晴天累积天数、土地利用、交通、降雨强度和气候条件等多种因素的共同作用^[11,12]. ②街尘雨天冲刷形成的地表径流水质的影响因素分析^[13~15]. 当前研究主要集中在城市道路及所在功能区、屋顶类型和材质等对地表径流水质特征的影响^[16~18]; ③地表

收稿日期: 2020-12-08; 修订日期: 2021-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41771529); 中国科学院生态环境研究中心(义乌)长三角中心委托项目(20200060); 山东省自然科学基金项目(ZR2020MD073)

作者简介: 单溪环(1995~), 女, 硕士, 主要研究方向为城市面源污染. E-mail: 15689989376@163.com

* 通信作者, E-mail: xwx080312@163.com

径流输移过程的模型模拟与径流污染负荷的评估^[19]. 主要通过暴雨模型(STORM)和雨水管理模型(SWMM)等对城市降雨径流负荷的模拟和计算^[20,21]. 不透水地表对街尘累积量和径流水质的影响的宏观定性描述已有较多成果,但径流冲刷如何影响迁移输出过程认识不足. 同时,当前的水质模型对不透水地表微界面特征在控制颗粒物质量损失以及抑制和截留径流水质的作用缺乏足够重视^[22]. 城市地表是径流污染物输移过程的主要场所,其微界面特征必然会影响街尘的累积及降雨冲刷过程. 因此,有必要开展不透水地表微界面特征与街尘和降雨径流量传输关系的研究. 然而,对于不透水地表微界面特征的测定还没有公认的标准方法,本文借鉴当前学者以粗糙度表征不透水地表微界面的方法^[23],以期量化不透水地表粗糙度对城市面源颗粒物的累积和冲刷过程的影响.

鉴于此,本研究以浙江省金华义乌市不透水地表为例,基于多场降雨事件的野外对比观测,探究不透水地表粗糙度对街尘的累积冲刷质量、粒径组成、降雨径流累积负荷和径流粒径累积负荷等特征的影响,通过对多种影响因素的分析实现对场降雨径流总悬浮物(TSS)累积负荷预测估算,以期为源头削

减和过程控制径流污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

义乌市位于浙江省中部,市境东、南、北三面群山环抱,属中亚热带季风气候,有明显的盆地气候特点,季风交替,四季分明,光照较多,雨量充沛. 多年平均气温 17.1℃,多年平均降水量为 1 406.2 mm,受梅雨和台风同时影响,降水量及地表径流量年内分配分布不均,3~6 月的多年平均降水量占年降水量的 52.3%,在空间分布上呈现山区明显大于平原的特点. 市域面积约 1 105 km²,建城区面积 52 km². 城镇化达到 75.5%. 为了研究不透水地表粗糙度的变化特征对街尘累积以及径流冲刷的影响,本研究选取粗糙度变化明显的北苑街道和上溪镇的典型不透水地表采集街尘和径流样品(图 1). 6 个采样点位于北苑街道工业区和上溪镇居民区附近的主要交通道路,其车流量、人流量较大,街道清扫方式以人工清扫方式(扫帚)为主,清扫频次较低,利于地表污染物累积和传输. 同时,各采样点附近的交通流量、人类活动、街道清扫方式差别较小,地表污染物来源基本相同,可避免除不透水地表粗糙度外其他环境因素的干扰.



图 1 采样点空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of sampling points

1.2 样品采集

街尘样品的采集:2020 年 5~7 月间在义乌市 6 个典型不透水地表采集雨前雨后的街尘样品. 采样范围为采样点附近的汇水区单元内,使用戴森吸尘器(Dyson V8)吸取地表街尘样品不少于 200 g,记录采样面积,并将样品密封保存.

径流样品采集:在采样点附近安装 RG3-M 型翻斗式雨量计(Onset Computer Corporation, 美国 HOBO)记录降雨量. 场降雨事件特征见表 1,采集降雨冲刷不透水地表形成的地表径流. 起初径流采样每 5 min 采集一次,而后采样间隔根据降雨强度变

化增加为 10、20 和 30 min. 将采集到的径流样品置于聚乙烯瓶中,放在低于 4℃ 保温箱中暂存,样品采集完成后应在 24 h 内尽快完成对 TSS 水质指标浓度的测定.

1.3 测定方法

1.3.1 街尘粒径分布

将街尘样品过 2 mm 孔径筛除去石子和碎叶等杂物,使用德国空气动力筛分仪(Retsch AS200 jet)将处理后样品筛分为 <20、20~45、45~63、63~106、106~150、150~250、250~450、450~1 000 和 >1 000 μm 共计 9 个粒径段,并将分粒径段的街

表 1 降雨事件特征

Table 1 Basic characteristics of rainfall events

采样日期 (月-日)	累计降雨量 /mm	降雨历时 /h	平均降雨强度 /mm·h ⁻¹	晴天累积天数 /d
05-09	44.8	2.8	16	1.3
05-15	23.4	5.7	4.1	4.8
05-25	11.2	5.3	2.1	3.4
06-10	24	4.9	4.9	3.8
06-19	67.4	8.9	7.6	6.8
06-23	9.8	2.2	4.5	1.2
06-30	31.2	5.3	5.9	1.9
07-02	16.6	4.5	3.7	0.5
07-04	8.4	5.2	1.6	0.8
07-10	0.4	0.3	1.3	1.7
07-15	0.4	1.7	0.2	4.8
07-20	4	2.3	1.7	4.6

尘称重记录.

1.3.2 径流 TSS 浓度及粒径分布

径流样品中 TSS 浓度:测定方法参照文献[24],将蒸发皿在 103 ~ 105℃ 烘箱中烘干至恒重(两次称量相差不超过 0.000 5 g),取 100 mL 混合均匀的径流样品置于上述蒸发皿内,移入烘箱烘干至恒重,称量两次的质量差,求出径流样品中 TSS 的浓度.

径流样品的粒径分布:取 100 mL 混合均匀的径流样品,加入 0.05 mol·L⁻¹ 六偏磷酸钠 10 mL,使其较好地抗凝分散^[25],超声处理 10 min 后使用马尔文激光粒度仪(Mastersizer 2000)完成径流样品粒径分布的测定.

1.3.3 不透水地表粗糙度

表观粗糙度:路面的构造深度可反映路面表面的宏观粗糙度^[23].本研究通过手工铺沙法测定:将路面的松散颗粒及浮土刷净,取体积为(25 ± 0.15) mL,粒径为 0.16 ~ 0.2 mm 的细砂倒在路面上,用推平板由里向外重复作摊铺运动,尽可能将砂摊成圆形,用构造深度尺测量所构成圆的两个垂直方向的直径,取其平均值,准确至 1 mm.按以上方法,同一处平行测试不少于 3 次,3 个测点均位于轮迹带上,测点间距 3 ~ 5 m.对同一处测试应该由同一个试验员进行测试.

构造深度测试结果按式(1)计算:

$$TD = 1000V/(\pi D^2/4) = 31831/D^2 \quad (1)$$

式中,TD 为路面的构造深(mm);V 为砂的体积(25 cm³);D 为摊平砂的平均直径(mm).

1.4 数据处理

1.4.1 街尘冲刷率

场降雨径流中街尘各粒径段冲刷率按式(2)计算^[26]:

$$F_w = \frac{M_w}{M_{\text{initial}}} \times 100\% = \frac{\int_0^1 C(t) \times Q(t) dt}{M_{\text{initial}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, F_w 为场降雨中街尘冲刷率; M_w 为整个降雨过程中所冲掉的街尘质量(mg); M_{initial} 为道路表面对应街尘的初始质量(mg); $C(t)$ 是每个采样时间地表径流水中相应颗粒尺寸的街尘质量浓度(mg·L⁻¹); $Q(t)$ 是每个采样时间的表面径流量(m³·min⁻¹).

1.4.2 径流污染物累积负荷

场降雨径流的某种污染物的累积负荷按式(3)计算^[27]:

$$L = \int_0^t c_i q_i dt \quad (3)$$

式中, L 为场降雨径流污染物的累积负荷(g); c_i 为 t 时刻污染物的浓度(mg·L⁻¹); q_i 为 t 时刻的径流量(m³·min⁻¹).

1.4.3 统计分析

本研究所使用的统计学方法参考文献[28],借助 IBM SPSS 22 统计分析软件对数据进行处理分析.主要采用的统计分析方法有:皮尔森(Pearson)相关分析、偏相关分析、方差分析和回归分析等.

2 结果与分析

2.1 粗糙度对街尘累积特征的影响

明确不同粗糙度下街尘的静态累积及粒径分布特征,可以对进一步识别粗糙度与街尘累积冲刷之间的关系提供重要参考依据.根据图 2(a)发现,沥青路面粗糙度为 1.38、0.90 和 0.80 mm 时,对应的单位面积街尘含量为(29.27 ± 10.58)、(26.91 ± 1.03) 和 (3.1 ± 0.73) g·m⁻²;水泥路面粗糙度为 0.61、0.55 和 0.26 mm 时,对应的单位面积街尘含量为(21.83 ± 5.63)、(8.51 ± 0.41) 和 (3.49 ± 1.50) g·m⁻².这表明沥青路面和水泥路面的单位面积街尘的质量都随着粗糙度的降低而减少,不透水地表粗糙度的变化会影响街尘单位面积质量的累积.总体上,街尘静态累积量随粗糙度降低呈现非线性减少的趋势,这说明影响街尘累积的成因复杂,粗糙度并不是影响街尘累积量的唯一因素,街尘累积量还会受晴天累积天数、交通流量、清扫方式和风力等多种因素的共同影响^[29,30].由图 2(b)可知,不透水地表粗糙度的变化也会影响街尘的粒径分布.因粗糙度改变,沥青路面 3 个采样点街尘的 9 个粒径段占比波动范围在 0.21% ~ 22.44% 之间,水泥路面

3 个采样点街尘的 9 个粒径段街尘占比波动范围在 2.16%~9.84% 之间,这说明粗糙度较大的沥青路面街尘的粒径分布占比影响较大.从街尘粒径占比可以看出[图 2(b)],不同粗糙度的不透水地表街尘的静态累积粒径分布以大于 150 μm 粗粒径为

主.其中,沥青路面街尘大于 150 μm 粗粒径占比为 $(76.28 \pm 8.36)\%$,水泥路面街尘粒径大于 150 μm 粗粒径占比为 $(51.74 \pm 8.95)\%$,沥青路面粒径大于 150 μm 粗粒径占比高于水泥路面.这表明粗糙度明显影响不透水地表街尘持留量和粒径分布特征.

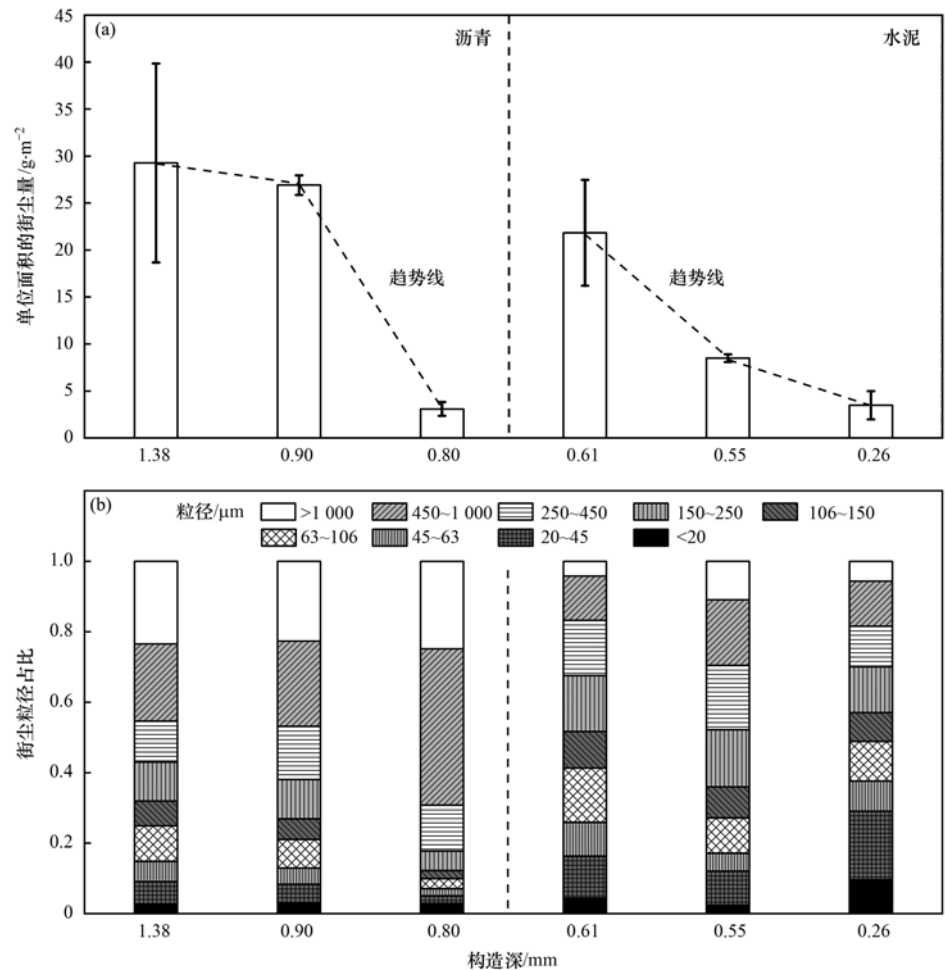


图2 不同构造深下单位面积街尘的累积量和街尘粒径分布

Fig. 2 Accumulation and size distribution of street dust per unit area under different tectonic depths

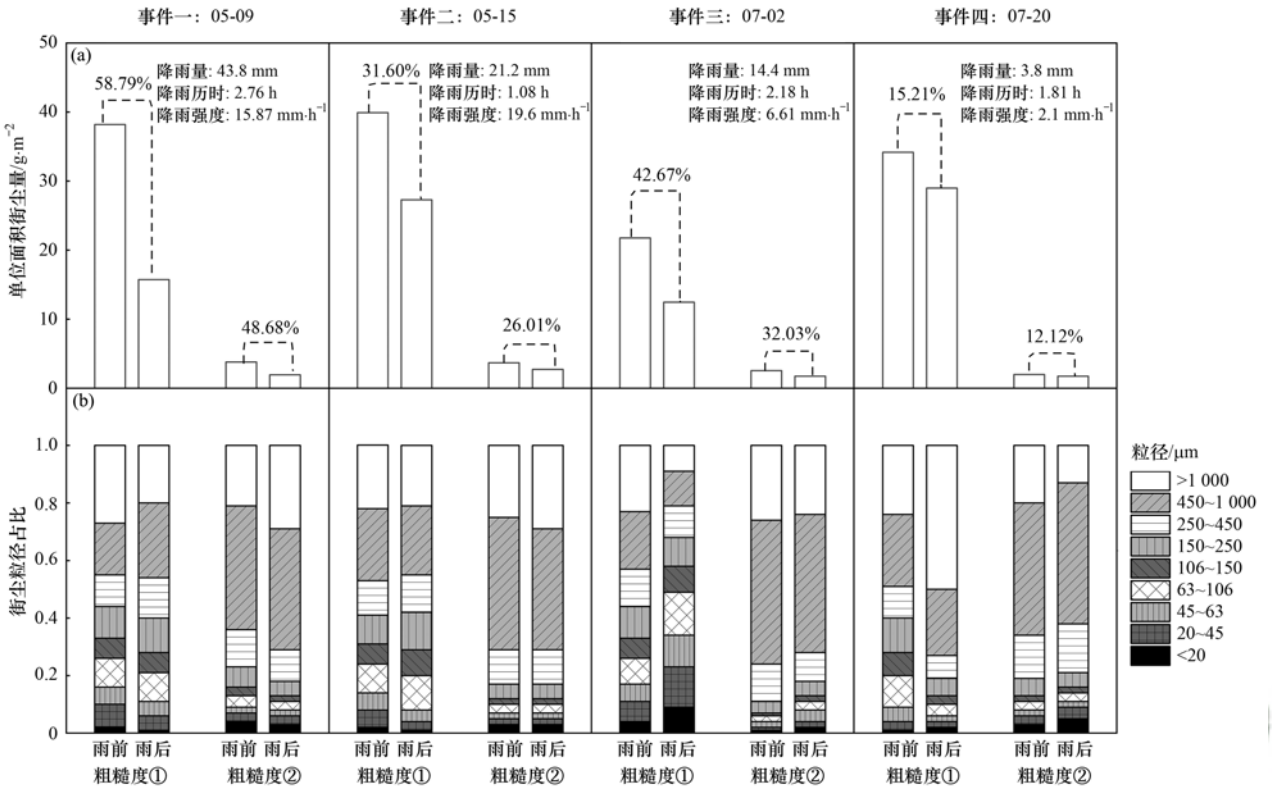
2.2 降雨量和粗糙度对街尘冲刷特征的影响

降雨量和粗糙度变化是影响街尘冲刷程度的重要因素^[31,32],从图 3(a)可以看出,降雨量会影响街尘的冲刷率.总体上,两种粗糙度下不透水地表单位面积街尘的冲刷率随降雨量的降低(事件一至事件四)而减小,事件三显示了一定的变异性.由表 1 可知,降雨事件三晴天累积天数为 0.5 d,说明受上一场降雨事件冲刷影响,街尘初始累积的质量较少,与街尘冲刷质量的比值较高,导致事件三冲刷率高于事件二.粗糙度也会影响街尘单位面积的冲刷率.由图 3(a)可得,粗糙度为 1.38 mm 的不透水地表街尘冲刷率(15.21%~58.79%)均高于粗糙度为 0.8 mm 的不透水地表冲刷率(12.12%~48.68%),二者冲刷率差值达 3.09%~10.64%.由图 3(b)可得,降雨量和粗糙度对降雨前后的粒径分布特征也有影

响.粗糙度为 1.38 mm 的不透水地表在降雨前后各粒径段的变化范围是 -25.99%~14.61%,粗糙度为 0.8 mm 的不透水地表在降雨前后各粒径段的变化范围是 -7.42%~6.26%.降雨量和粗糙度的变化重塑了街尘各粒径段的分布.这些未被冲刷的颗粒在下次降雨来临时会继续重复累积冲刷这一过程,释放污染物进入受纳水体.因此有必要采取譬如加强街道清扫等有效的管理措施来减少街尘量的累积.

2.3 粗糙度和街尘累积量及冲刷量的相关性分析

为了识别粗糙度和街尘累积以及粗糙度和街尘冲刷的相关密切程度,对其进行相关性分析(表 2).本研究中街尘累积量为降雨前所采集的街尘质量,街尘冲刷量为降雨前后街尘的质量差值.在不考虑其他因素的影响下,结果表明,粗糙度与街尘的累积



粗糙度①为 1.38 mm,粗糙度②为 0.8 mm;百分数为场降雨街尘的冲刷率 F_w 。

图 3 降雨量和粗糙度对街尘冲刷率和街尘粒径组成的影响

Fig. 3 Effects of rainfall and roughness on the scour rate and particle size composition of street dust

量呈显著正相关($r=0.636, P<0.01$),高于粗糙度与街尘冲刷量间的相关性($r=0.516, P<0.05$).在考虑晴天累积天数的影响下,粗糙度与街尘累积量的相关性($r=0.664, P<0.01$)进一步提高;在考虑

降雨量的影响下,粗糙度与街尘冲刷量相关性($r=0.527, P<0.01$)进一步提高.这表明晴天累积天数对街尘累积量具有增强效应,降雨量对街尘冲刷量具有增强效应.

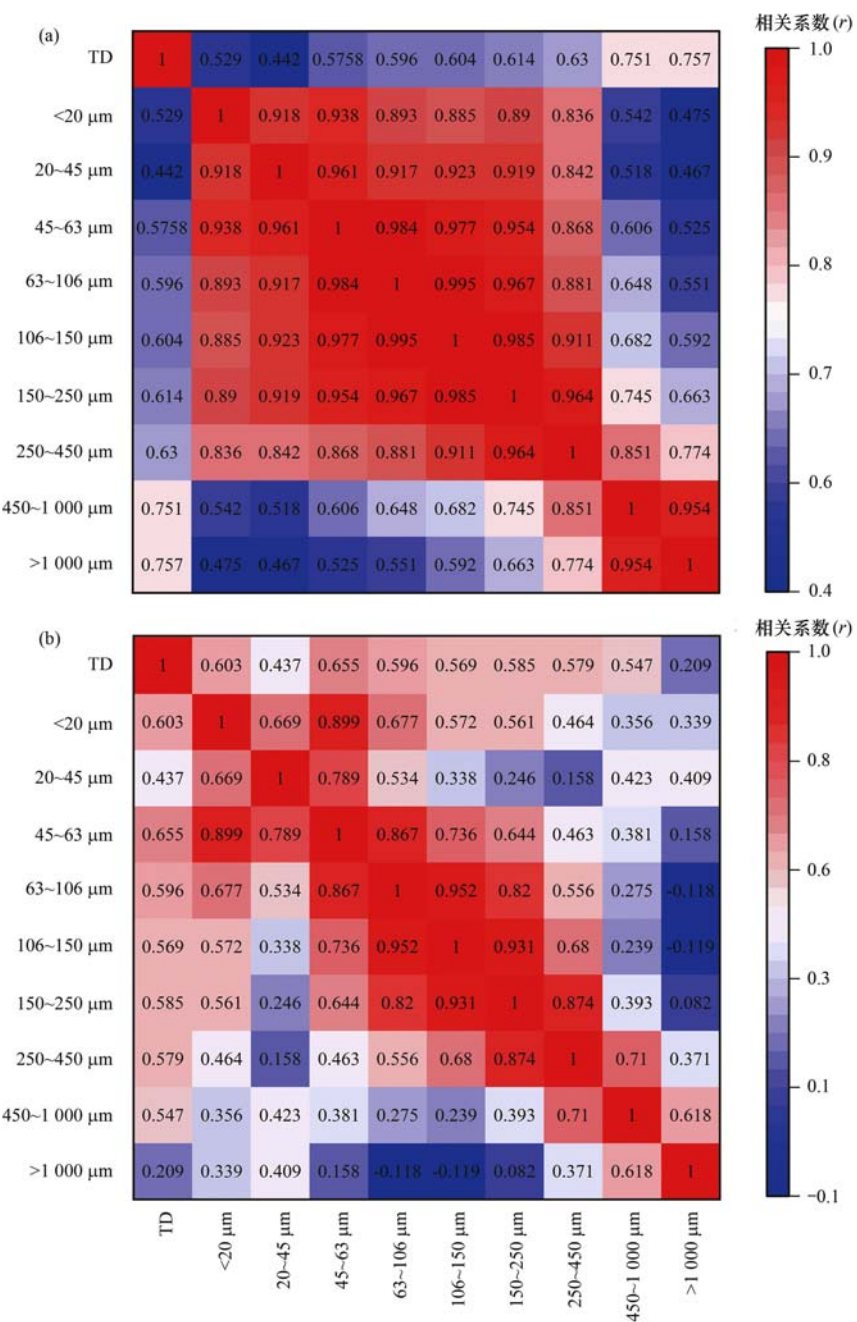
表 2 粗糙度和街尘累积量和冲刷量的相关性分析¹⁾

Table 2 Correlation analysis of roughness, dust accumulation, and erosion				
相关关系	考虑的影响因素	变量	相关系数 r	显著性水平 P (双尾)
Pearson 相关 偏相关	无	粗糙度与街尘累积量	0.636 **	0.001
	晴天累积天数	粗糙度与街尘累积量	0.664 **	0.001
Pearson 相关 偏相关	无	粗糙度与街尘冲刷量	0.516 *	0.012
	降雨量	粗糙度与街尘冲刷量	0.527 *	0.025

1) **表示在 $P=0.01$ 水平上显著,*表示在 $P=0.05$ 水平上显著;样本量 $N=24$ 个

街尘颗粒物是一种粗糙的非均匀的分散沉积物^[33],在考虑晴天累积天数和降雨量的影响下,继续对粗糙度和街尘各粒径段累积量及各粒径段冲刷量进行偏相关分析,如图 4 所示.街尘被划分为<20、20~45、45~63、63~106、106~150、150~250、250~450、450~1 000和>1 000 μm 这 9 个粒径段,粗糙度和街尘各粒径段质量的相关程度以热力图表示.结果表明,各粒径段街尘累积量与粗糙度的相关性($0.529\leq r<0.757$)随颗粒物粒径变大而提高[图 4(a)].其中,粗糙度与>450 μm 粒径段累积量的相关性较高($0.751\leq r<0.757$),

与<450 μm 粒径段累积量相关性较低($0.529\leq r<0.630$).各粒径段街尘冲刷量与粗糙度的相关性($0.603>r>0.209$)随颗粒物粒径变大而降低[图 4(b)].粗糙度与45~63 μm 冲刷细粒径段的相关性最高($r=0.655$),与>1 000 μm 冲刷粗粒径段相关性最低($r=0.209$).对雨天冲刷过程的不同结果考虑有两方面原因,一方面是不同的粗糙地表自持累积的细粒径街尘极易随降雨径流冲刷,另一方面由于街尘粗粒径段在降雨情况下的不稳定表现,经过冲刷分散过程,也会成为细粒径重要来源^[34].



(a)粗糙度与街尘累积量,(b)粗糙度与街尘冲刷量

图 4 粗糙度与街尘分粒径段累积量及分粒径段的冲刷量相关性热力图

Fig. 4 Correlation thermodynamic diagram between roughness and accumulation as well as scour amount with street dust particle size

2.4 粗糙度和降雨量对径流 TSS 累积负荷的相关性分析

TSS 不仅是城市降雨径流过程中的主要污染物,而且是其他污染物的载体^[35],对影响径流 TSS 累积负荷的相关因素分析,能够为径流污染物的防治提供相关依据.目前可获得易表征、随环境变异性较小的影响因素有限,本研究只考虑粗糙度和降雨量这两个影响因素,TSS 累积负荷计算方法参照 1.4.2 节.由表 3 的 Pearson 分析可知,TSS 累积负荷和降雨量呈显著正相关($r = 0.549, P < 0.05$),TSS 累积负荷和粗糙度呈显

著正相关($r = 0.574, P < 0.05$).若对 TSS 累积负荷和降雨量进行偏相关分析(考虑粗糙度的影响),二者的相关性以及显著性进一步提高($r = 0.711, P < 0.01$).同理,若对 TSS 累积负荷和粗糙度进行偏相关分析(考虑降雨量的影响),二者的相关性以及显著性也得到提升($r = 0.725, P < 0.01$).说明粗糙度和降雨量都是 TSS 负荷累积的影响因素.对粗糙度和降雨量的多因素方差分析(表 3)结果进一步表明,粗糙度和降雨量共同影响 TSS 累积负荷的输出过程,二者存在交互作用,且交互作用显著.

表 3 粗糙度和降雨量对 TSS 输出负荷的相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of roughness and rainfall on output load of TSS

分析方法	考虑的影响因素	变量	分析结果	显著性水平
简单相关	无	TSS 累积负荷与降雨量	$r = 0.549^*$	0.034
	无	TSS 累积负荷与粗糙度	$r = 0.574^*$	0.025
偏相关	粗糙度	TSS 累积负荷与降雨量	$r = 0.711^{**}$	0.004
	降雨量	TSS 累积负荷与粗糙度	$r = 0.725^{**}$	0.003
多因素方差分析	粗糙度	TSS 累积负荷	$F > F_{0.01}$, 显著	0.002
	降雨量	TSS 累积负荷	$F > F_{0.01}$, 显著	0.001
	粗糙度 * 降雨量	TSS 累积负荷	$F > F_{0.01}$, 交互作用显著	0.019

1) 相关分析中 ** 表示在 $P = 0.01$ 水平上显著, * 表示在 $P = 0.05$ 水平上显著; 方差分析中以统计量 F 判断显著性; 样本量 $N = 12$ 个

3 讨论

3.1 受粗糙度和降雨量影响的径流 TSS 累积负荷的量化表征

对城市暴雨污染物的负荷进行估算,能够为源头削减和过程控制径流污染提供科学依据,减少对受纳水体的影响^[36]. 目前, STORM 和 SWMM 等水质模型在径流水质的模拟与估算方面应用广泛,但因下垫面、水文、气象以及地形等基础资料的搜集难度大且多模块参数设定繁杂等约束条件,导致此类模型的模拟在基础资料缺乏的地区应用受限,且模拟精度较低^[20,37]. 同时,当前的水质模型对不透水地表微界面特征影响径流污染物迁移过程缺乏足够重视,造成对汇水区内不同不透水地表的污染负荷不能准确模拟. 在综合考虑上述因素的基础上,本研究以粗糙度量化的不透水地表微观结构特征,采用 12 个降雨事件的实测数据对 TSS 累积负荷与粗糙度和降雨量进行多元线性回归拟合,得到 TSS 累积负荷与粗糙度和降雨量的线性回归模型,如式(4)所示:

$$L_{TSS} = 5.813 \times S + 258.317 \times TD - 189.584$$
$$R_a^2 = 0.613 \tag{4}$$

式中, L_{TSS} 为场降雨径流 TSS 累积负荷 (g); S 为次降雨径流累积降雨量 (mm); TD 为路面的构造深 (mm); R_a^2 为调整后的拟合优度. 对回归方程的显著性进行 F 检验结果表明,此线性回归模型达到了极显著水平 ($P = 0.001$). 对 TSS 累积负荷的实测值与预测值相关关系也可得知 (图 5), 实测值的散点图与预测值相差较小且基本满足线性关系,说明该模型拟合效果较好.

因此,利用粗糙度和降雨量可以对场降雨径流中 TSS 累积负荷的输出量做简单的预测估计. 此回归模型采用的预测变量为该地区监测的实测值,模型模拟的结果体现了较好的地域性,与之前复杂的水质模型相比,该方法更为简易,模型参数相对较少,对于资料缺乏的地区也满足估算条件,具有较强

的普适性. 但考虑在对粗糙度的表征和 TSS 累积负荷的核算时,可能存在人为误差的影响,因此在今后的研究中应增大样本数量,尽量减少人为误差的干扰,继续提高该线性回归模型的精度.

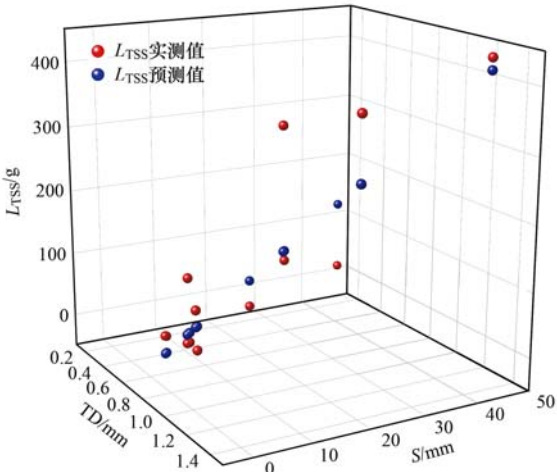


图 5 TSS 累积负荷最优回归模型的实测值与预测值的相关关系
Fig. 5 Correlation between measured value and predicted value of TSS cumulative load optimal regression model

3.2 粗糙度和降雨量对径流 TSS 粒径累积负荷的影响分析

在径流冲刷过程中,由于径流粒径的不均一性,在污染物的传输阶段会有不同的迁移状态,不同径流粒径携带的污染负荷也会产生不同程度的污染风险,径流污染的潜在影响部分取决于颗粒物的粒径分布和颗粒物的污染负荷^[38]. 然而,之前鲜见对径流中粒径累积负荷变化的研究,这导致对径流污染的迁移规律认识不足. 因此,研究径流粒径累积负荷的分布特征,能够为人们提供针对性、高效地降雨径流管理策略^[39].

已知粗糙度和降雨量共同影响 TSS 累积负荷的输出总量,且二者存在强交互作用,为找出粗糙度和降雨量作用的关键粒径段,本研究分析了 TSS 粒径累积负荷与粗糙度、TSS 粒径累积负荷与降雨量的偏相关变化. 从图 6 中可以看出,粗糙度和降雨量对

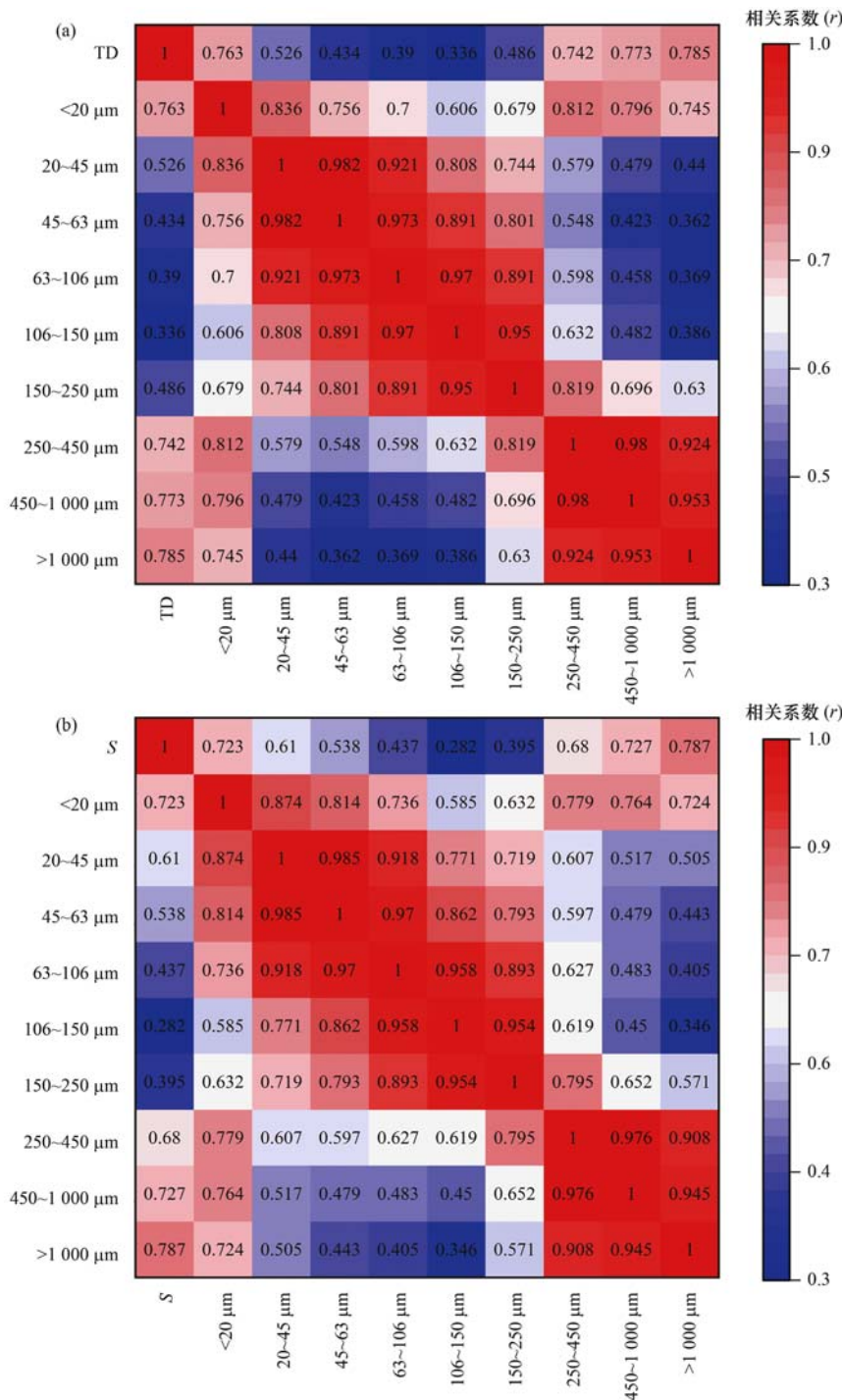


图6 粗糙度与TSS粒径累积负荷及降雨量与TSS粒径累积负荷偏相关热图

Fig. 6 Partial correlation heat map of roughness and TSS particle size cumulative load and precipitation with TSS particle size cumulative load

TSS 各粒径段负荷的累积有相似的规律,二者与 <20 μm (相关系数 r 值:0.723, 0.763) 以及 >250 μm (相关系数 r 值:0.742 < r < 0.785, 0.68 < r < 0.787) 的粒径段累积负荷相关性最高. 与位于 20 ~ 250 μm 中间粒径段的粒径累积负荷与粗糙度和降雨量的相关性较低 (相关系数 r 值:0.336 < r < 0.526, 0.282 < r < 0.61). 上述结果表明,粗糙度和降雨量对 <20 μm 以及 >250 μm 粒径段的累积负荷作用效果显著. 考虑是因为不透水地表自身 (粗糙度) 的有利条件成为积累大量颗粒污染物的

“汇”,降雨冲刷也为径流携带污染物迁移传输提供了水动力条件,二者共同作用于径流污染物的传输过程. 在径流冲刷过程中, <20 μm 以及 >250 μm 粒径段的累积负荷主要受粗糙度和降雨量因素的影响. 对于位于 20 ~ 250 μm 中间粒径段的颗粒物来说,粒径累积负荷污染物由于不确定性大,影响因素复杂,粗糙度和降雨量对其作用并不显著. 因此,未来研究需要进一步识别影响 20 ~ 250 μm 中间粒径段的粒径累积污染负荷的其他过程影响因素,以便在汇入受纳水体之前采用合理的雨水设施,降低中

间粒径段污染物负荷,从而提高雨水设施的处置净化效率。

4 结论

(1)不透水地表粗糙度明显影响街尘的晴天累积-雨天冲刷过程。晴天累积天数对粗糙度与街尘累积量的相关性($r=0.664, P<0.01$)具有增强效应,降雨量对粗糙度与街尘冲刷量相关性($r=0.527, P<0.01$)具有增强效应。各粒径段街尘累积量与粗糙度的相关性($0.529 \leq r < 0.757$)随颗粒物粒径变大而提高。各粒径段街尘冲刷量与粗糙度的相关性($0.603 > r > 0.209$)随颗粒物粒径变大而降低。

(2)不透水地表粗糙度和降雨量共同影响径流TSS累积负荷的输出过程,通过建立粗糙度和降雨量的线性回归模型可以较好地预测场降雨径流中TSS累积污染负荷。同时,粗糙度和降雨量对20~250 μm 中间粒径段的粒径累积负荷污染物的相关性较差,对<20 μm 以及>250 μm 粒径段的累积负荷作用效果显著。

参考文献:

- [1] 陈铁, 孙飞云, 杨淑芳, 等. 基于SWAT模型的观澜河流域城市面源污染负荷量化及影响效应评估[J]. 环境工程学报, 2020, **14**(10): 2866-2875.
- Chen T, Sun F Y, Yang S F, *et al.* Load quantification and effect evaluation of urban non-point source pollution in the Guanlan river basin based on SWAT model[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, **14**(10): 2866-2875.
- [2] 李定强, 刘嘉华, 袁再健, 等. 城市低影响开发面源污染治理措施研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2019, **28**(10): 2110-2118.
- Li D Q, Liu J H, Yuan Z J, *et al.* Research advance and prospects on low impact development control measures for urban non-point source pollution[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, **28**(10): 2110-2118.
- [3] 赵洪涛, 李叙勇, 王为东, 等. 城镇街尘污染与平原河网水体的源-汇效应研究[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(6): 1295-1301.
- Zhao H T, Li X Y, Wang W D, *et al.* The source-sink effects of street dust pollution in a stream network[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, **30**(6): 1295-1301.
- [4] Barbosa A E, Fernandes J N, David L M. Key issues for sustainable urban stormwater management[J]. Water Research, 2012, **46**(20): 6787-6798.
- [5] 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.
- [6] 袁宏林, 熊壮, 张路明, 等. 降雨特征与地表径流和雨水管内径流污染物变化特征[J]. 安全与环境学报, 2018, **18**(4): 1593-1597.
- Yuan H L, Xiong Z, Zhang L M, *et al.* Analysis of the rainfall specific features, the surface rain-off and the network flow pollutants[J]. Journal of Safety and Environment, 2018, **18**(4): 1593-1597.
- [7] Rio M, Salles C, Cernesson F, *et al.* An original urban land cover representation and its effects on rain event-based runoff and TSS modelling[J]. Journal of Hydrology, 2020, **586**, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124865.
- [8] Sansalone J J, Kim J Y. Transport of particulate matter fractions in urban source area pavement surface runoff[J]. Journal of Environmental Quality, 2008, **37**(5): 1883-1893.
- [9] 何舸, 牛宇琛, 王成坤, 等. 高度城镇化地区跨区水污染协同综合治理——东莞案例[J]. 中国给水排水, 2020, **36**(12): 25-30.
- He G, Niu Y C, Wang C K, *et al.* Cross-regional cooperative comprehensive control of water pollution in highly urbanized areas: a case study of Dongguan[J]. China Water & Wastewater, 2020, **36**(12): 25-30.
- [10] 杨默远, 潘兴瑶, 刘洪禄, 等. 基于文献数据再分析的中国城市面源污染规律研究[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(8): 1634-1644.
- Yang M Y, Pan X Y, Liu H L, *et al.* Urban non-point pollution characteristics in China: a meta-analysis[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(8): 1634-1644.
- [11] Egodawatta P, Thomas E, Goonetilleke A. Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(6): 1834-1841.
- [12] Shaw S B, Stedinger J R, Walter M T. Evaluating urban pollutant buildup/wash-off models using a madison, wisconsin catchment[J]. Journal of Environmental Engineering, 2010, **136**(2): 194-203.
- [13] Zhang K F, Deletic A, Bach P M, *et al.* Testing of new stormwater pollution build-up algorithms informed by a genetic programming approach[J]. Journal of Environmental Management, 2019, **241**: 12-21.
- [14] 蔡成豪, 许立宏, 朱方伦, 等. 临安区不同功能区道路降雨径流重金属污染特征及源解析[J]. 环境污染与防治, 2020, **42**(2): 218-222.
- Cai C H, Xu L H, Zhu F L, *et al.* Characteristics and source analysis of heavy metal pollution of road rainfall runoff in different functional areas of Lin'an District[J]. Environmental Pollution & Control, 2020, **42**(2): 218-222.
- [15] 张琼华, 王倩, 王晓昌, 等. 典型城市道路雨水径流污染解析和利用标准探讨[J]. 环境工程学报, 2016, **10**(7): 3451-3456.
- Zhang Q H, Wang Q, Wang X C, *et al.* Discussion on road runoff pollution and its utilization standard in typical cities[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, **10**(7): 3451-3456.
- [16] Liu A, Mummullage, S, Ma Y K, *et al.* Linking source characterisation and human health risk assessment of metals to rainfall characteristics[J]. Environmental Pollution, 2018, **238**: 866-873.
- [17] 李迎霞, 向丽, 田鹏, 等. 城市不透水表面颗粒物上总磷和重金属的解析特征[J]. 科学通报, 2013, **58**(12): 1117-1120.
- Li Y X, Xiang L, Tian P, *et al.* Desorption characteristics of total phosphorus and heavy metals from impervious urban surface sediments[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, **58**(27): 3357-3360.
- [18] 王闪, 李敏, 张立秋. 不同屋面材料径流过程中重金属的污染特征[J]. 城市环境与城市生态, 2015, **28**(3): 35-38.
- Wang S, Li M, Zhang L Q. Characteristics analysis of heavy metal pollution in runoff from different types of roof[J]. Urban Environment & Urban Ecology, 2015, **28**(3): 35-38.

- [19] Zhang W, Li T, Dai M H. Uncertainty assessment of water quality modeling for a small-scale urban catchment using the GLUE methodology: a case study in Shanghai, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(12): 9241-9249.
- [20] 秦语涵, 王红武, 张一龙. 城市雨洪径流模型研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2016, **39**(1): 13-19.
Qin Y H, Wang H W, Zhang Y L. Review of urban stormwater runoff models[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **39**(1): 13-19.
- [21] 赵磊, 杨逢乐, 袁国林, 等. 昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟[J]. *生态学报*, 2015, **35**(6): 1961-1972.
Zhao L, Yang F L, Yuan G L, *et al.* Simulation of the quantity and quality of the urban runoff [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(6): 1961-1972.
- [22] Shaw S B, Parlange J Y, Lebowitz M, *et al.* Accounting for surface roughness in a physically-based urban wash-off model [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **367**(1-2): 79-85.
- [23] Zhao H T, Jiang Q, Xie W x, *et al.* Role of urban surface roughness in road-deposited sediment build-up and wash-off[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, **560**: 75-85.
- [24] 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.
- [25] 张智群, 沈俊杰. 沉积物粒度测量前处理方法研究[J]. *城市地理*, 2017, (4): 116.
- [26] Zhao H T, Li X Y, Wang X M. Heavy metal contents of road-deposited sediment along the urban-rural gradient around Beijing and its potential contribution to runoff pollution [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(17): 7120-7127.
- [27] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 武汉汉阳地区城市集水区尺度降雨径流污染过程与排放特征[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(7): 1057-1061.
Li L Q, Yin C Q, He Q C, *et al.* Catchment-scale pollution process and first flush of urban storm runoff in Hanyang, Wuhan City[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, **26**(7): 1057-1061.
- [28] 程子峰, 徐富春. 环境数据统计分析基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [29] Egodawatta P, Thomas E, Goonetilleke A. Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall[J]. *Water Research*, 2007, **41**(13): 3025-3031.
- [30] Vaze J, Chiew F H S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface[J]. *Urban Water*, 2002, **4**(4): 379-389.
- [31] Brodie I, Rosewell C. Theoretical relationships between rainfall intensity and kinetic energy variants associated with stormwater particle washoff[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, **340**(1-2): 40-47.
- [32] Shaw S B, Walter M T, Steenhuis T S. A physical model of particulate wash-off from rough impervious surfaces[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **327**(3-4): 618-626.
- [33] Sansalone J, Ying G. Partitioning and granulometric distribution of metal leachate from urban traffic dry deposition particulate matter subject to acidic rainfall and runoff retention[J]. *Water Research*, 2008, **42**(15): 4146-4162.
- [34] Zhao H T, Chen X F, Hao S N, *et al.* Is the wash-off process of road-deposited sediment source limited or transport limited? [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **563-564**: 62-70.
- [35] 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.
Li L Q, Yin C Q, Kong L L, *et al.* Effect of antecedent dry weather period on urban storm runoff pollution load [J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(10): 2287-2293.
- [36] Vaze J, Chiew F H S. Comparative evaluation of urban storm water quality models[J]. *Water Resources Research*, 2003, **39**(10), doi: 10.1029/2002WR001788.
- [37] Tuomela C, Sillanpaa N, Koivusalo H. Assessment of stormwater pollutant loads and source area contributions with storm water management model (SWMM) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **233**: 719-727.
- [38] Kim J Y, Sansalone J J. Event-based size distributions of particulate matter transported during urban rainfall-runoff events [J]. *Water Research*, 2008, **42**(10-11): 2756-2768.
- [39] Ma Y K, Hao S N, Zhao H T, *et al.* Pollutant transport analysis and source apportionment of the entire non-point source pollution process in separate sewer systems [J]. *Chemosphere*, 2018, **211**: 557-565.

CONTENTS

Transmission of Coronavirus via Aerosols and Influence of Environmental Conditions on Its Transmission	LI Xue, JIANG Jing-kun, WANG Dong-bin, <i>et al.</i> (3091)
Impacts of Meteorology and Emission Variations on PM _{2.5} Concentration Throughout the Country During the 2020 Epidemic Period	LU Shi-ze, SHI Xu-rong, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (3099)
Factors and Their Interaction Effects on the Distribution of PM _{2.5} in the Yangtze River Delta Based on Grids	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, XIN Wei-dong (3107)
Application of ARIMA Model for Mid- and Long-term Forecasting of Ozone Concentration	LI Ying-ruo, HAN Ting-ting, WANG Jun-xia, <i>et al.</i> (3118)
Pollution Characteristics and Sources of Wintertime Atmospheric Brown Carbon at a Background Site of the Yangtze River Delta Region in China	ZHAO Yu, WU Can, WANG Yi-qian, <i>et al.</i> (3127)
Spatio-temporal Variation Characteristics Monitored by Remotely Sensed Technique of PM _{2.5} Concentration and Its Influencing Factor Analysis in Sichuan Basin, China	LI Meng-zhen, ZHANG Ting-bin, YI Gui-hua, <i>et al.</i> (3136)
Construction of Continuous Dynamic Model for River Networks and Its Application in Simulation of Spatiotemporal Migration of Typical Biocides	XING Cheng, ZHANG Qian-qian, CAI Ya-ya, <i>et al.</i> (3147)
Response of Riverine Nitrogen Exports to Land Use Pattern and Hydrological Regime in the Jiulong River Watershed	HUANG Ya-ling, HUANG Jin-liang (3156)
Correlation Between Microplastics Pollution and Eutrophication in the Near Shore Waters of Dianchi Lake	YUAN Hai-ying, HOU Lei, LIANG Qi-bin, <i>et al.</i> (3166)
Analysis of Water Quality and Exchange Flux of Interstitial Water-Overlying Water in Sediments of Baiyangdian Entrance Area in Summer	ZHANG Tian-na, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i> (3176)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Nitrogen and Organic Matter in Overlying Water and Sediment of Guyun River and Jinshan Lake in Zhenjiang City	YUAN Lu-bin, XING Shu-yu, LIU Xin, <i>et al.</i> (3186)
Spatial Distribution Characteristics of Phosphorus Fractions and Release Risk in Sediments of Honghu International Importance Wetland	LIU Yong-jiu, HUANG Su-zhen, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (3198)
Pollution Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in River Sediments from the Ancient Town of Suzhou	BAI Dong-rui, ZHANG Tao, BAO Jun-song, <i>et al.</i> (3206)
Spatio-temporal Distribution Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Around Centralized Drinking Water Sources in Wuhan	ZHU Jing, HOU Yao-zong, ZOU Shu-cheng, <i>et al.</i> (3215)
Hydro-chemical Characteristics and Ion Origin Analysis of Surface Groundwater at the Shengjin Lake and Yangtze River Interface	CUI Yu-huan, WANG Jie, LIU You-cun, <i>et al.</i> (3223)
Identifying the Sources of Groundwater NO ₃ ⁻ -N in Agricultural Region of Qingdao	KOU Xin-yue, DING Jun-jun, LI Yu-zhong, <i>et al.</i> (3232)
Analysis of Phytoplankton Community Stability and Influencing Factors in a Tributary of the Three Gorges Reservoir	HE Shu-han, OUYANG Tian, ZHAO Lu, <i>et al.</i> (3242)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community in Harbin Urban River Network During Wet Season	LU Feng, LI Lei, QI Qing-song, <i>et al.</i> (3253)
Response of Microbial Community to Natural Organic Matter Input in Lake Sediments	JU Qi, ZHANG Qi, CAO Chi-cheng, <i>et al.</i> (3263)
Effects of Water Supply Quality and Social Activity on the Microbial Community in Baiyangdian Wetland	ZHAO Zhi-rui, WU Hui-qing, BI Yu-fang, <i>et al.</i> (3272)
Characteristics of Dissolved Organic Matter in Overlying Water During Algal Bloom Decay	LI Xiang, LI Zhi-chun, WANG Xuan, <i>et al.</i> (3281)
Water Pollution Characteristics and Source Apportionment in Rapid Urbanization Region of the Lower Yangtze River: Considering the Qinhuai River Catchment	MA Xiao-xue, GONG Chang, GUO Jia-xun, <i>et al.</i> (3291)
Contamination Characteristics of Surface Runoff in Densely Populated Areas in Downstream Yangtze River, China	GUO Wen-jing, ZHANG Zhi-yong, WEN Xue-zheng, <i>et al.</i> (3304)
Characteristics of Pollutant Dynamics Under Rainfall-Runoff Events in the Chaohe River Watershed	BAO Xin, JIANG Yan, HU Yu-cong (3316)
Influence of Impervious Surface Roughness on Accumulation and Erosion of Urban Non-Point Source Particles	SHAN Xi-huan, XIE Wen-xia, LIAO Yun-jie, <i>et al.</i> (3328)
Probabilistic Risk Assessment of Arsenic Exposure Through Drinking Water Intake in Chinese Residents	QIN Ning, LIU Yun-wei, HOU Rong, <i>et al.</i> (3338)
Removal Behavior of Protein-like Dissolved Organic Matter During Different Water Treatment Processes in Full-Scale Drinking Water Treatment Plants	LI Meng-ya, SONG Yu-ying, ZHANG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3348)
Distribution of Heavy Metals and Their Corresponding Nanoparticles in Different Treatment Unit Processes in the Sewage Treatment Plant	WANG Du-jia, HE Shuai, ZHOU Xiao-xia (3358)
Metagenomic Analysis of Resistance Genes in Membrane Cleaning Sludge	DU Cai-li, LI Zhong-hong, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (3366)
Distribution and Removal of Antibiotic-Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes in Petrochemical Wastewater Treatment Plants	TANG Zhen-ping, XIAO Sha-sha, DUAN Yi, <i>et al.</i> (3375)
Treatment of Medium Ammonium Wastewater by Single-stage Partial Nitrification-ANAMMOX SMBBR	LÜ Kai, SHAO Xian-ming, WANG Kang-zhou, <i>et al.</i> (3385)
Two-Stage Denitrification Process Performance with Solid Slow-Release Carbon Source	TANG Yi, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (3392)
Effect of Ozone Dosage on Sludge Settleability and Biological Nutrient Removal in SBR System	LÜ Yong-tao, ZHU Chuan-shou, ZHANG Xu-yang, <i>et al.</i> (3400)
First Extended Anaerobic Phase Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal by Aerobic Granular Sludge Under Intermittent Gradient Aeration	ZHANG Yu-jun, LI Dong, WANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3405)
Effect of Rate of Salinity Increase on the Performance and Microbial Community Structure of Sequencing Batch Reactors	GU Bai-ming, JIN Chun-ji, WEN Chun, <i>et al.</i> (3413)
Effects of Cold Acclimation on the Activity of Autotrophic Nitrogen Removal in Granular Sludge and Its Bacterial Population Structure	QIAN Fei-yue, LIU Yu-xin, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3422)
Stabilization of Heavy Metals in Municipal Sludge Using a Slag-Based Modifying Agent	ZHANG Fa-wen, DONG Ming-kun, CHEN Chen-hui, <i>et al.</i> (3430)
Role of Land Use Changes on Ammonia Emissions from Agricultural Ecosystems in the Yangtze River Delta Region from 2000 to 2018	WANG Wen-jin, WANG Qing, ZHU An-sheng, <i>et al.</i> (3442)
Effects of Wheat Straw Hydrochar and Its Modified Product on Rice Yield and Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HAN Chen, HOU Peng-fu, XUE Li-hong, <i>et al.</i> (3451)
Effects of Water and Fertilization Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Double-rice Paddy Fields in Tropical Regions	LI Jin-qiu, SHAO Xiao-hui, GOU Guang-lin, <i>et al.</i> (3458)
Community Characteristics of Methanogens and Methanogenic Pathways in Salt-tolerant Rice Soil	YANG Yu-hong, HE Hui, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (3472)
Effect of Ferric-carbon Micro-electrolysis on Greenhouse Gas Emissions from Constructed Wetlands	ZHAO Zhong-jing, HAO Qing-ju, TU Ting-ting, <i>et al.</i> (3482)
Screening and Evaluation of Methods for Determining Available Lead (Pb) and Cadmium (Cd) in Farmland Soil	CHEN Ying, LIU Han-yi, LIU Na, <i>et al.</i> (3494)
Spatial Distribution Trends and Influencing Factors of Typical Heavy Metals in Subtropical Alpine Forest Soils: A Case Study from Ailao Mountain in Yunnan Province	LIU Xu, WANG Xun, WANG Ding-yong (3507)
Environmental Background Values of Heavy Metals and Physicochemical Properties in Different Soils in Shenzhen	LIN Ting, ZHAO Shu-hua, XI Xiu-ping, <i>et al.</i> (3518)
Screening of Amendments for Simultaneous Cd and As Immobilization in Soil	ZHOU Si-jiang, LIU Zhen-yan, XIONG Shuang-lian, <i>et al.</i> (3527)
Simultaneous Immobilization of Arsenic, Lead, and Cadmium in Paddy Soils Using Two Iron-based Materials	YUAN Feng, TANG Xian-jin, WU Ji-zi, <i>et al.</i> (3535)
Pollution Characteristics of Organophosphate Esters in Frozen Soil on the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau	LIU Li-ya, YIN Hong-ling, JIAN Lin-jie, <i>et al.</i> (3549)
Analysis of Spatial Distribution and Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Fertilizer Application Intensity in Chengdu Plain	LIU Qi-xin, WANG Chang-quan, LI Bing, <i>et al.</i> (3555)
Different Responses of Soil Dissolved Organic Matter to Different Types of Compost	XI Bei-dou, WANG Yan, TAN Wen-bing, <i>et al.</i> (3565)