

雨水花园施工过程的场地污染特征研究

宫曼莉^{1,2}, 马玉坤¹, 赵江³, 佘年⁴, 赵洪涛^{1,2}, 李叙勇^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学 资源与环境学院, 北京 100049; 3. 中国生态城市研究院, 北京 100048; 4. 深圳大学 建设工程生态技术研究所, 广东 深圳 518060)

摘要: 当前我国海绵城市建设中低影响开发(LID)施工场地污染普遍存在,但却没有引起足够的重视与正确的认识。为此,以镇江市雨水花园施工场地为例,分析了不同施工阶段地表沉积物的静态空间分布特征与动态径流污染特征,并与未施工场地进行对比。结果表明,开挖、铺砂、填土及种植阶段的地表沉积物单位面积质量分别为 (478.7 ± 14.57) 、 (261.74 ± 37.79) 、 (76.18 ± 17.22) 、 (31.83 ± 9.44) g/m^2 ,均高于未施工场地 $[(17.71 \pm 2.81) \text{g}/\text{m}^2]$,且各施工阶段的地表沉积物均以粗粒径(149~1 000 μm)为主;各施工阶段地表沉积物中的重金属含量均低于未施工场地,但重金属污染负荷均高于未施工场地,由高到低依次为开挖阶段、铺砂阶段、填土阶段、种植阶段;地表沉积物的扩散迁移距离约为120 m。施工道路径流中总悬浮固体与重金属浓度均高于未施工道路,施工道路径流中总悬浮固体的场次降雨径流平均浓度(EMC)约为未施工道路的2.8倍。基于上述结果,提出了适合我国海绵城市建设的LID场地径流污染控制措施。

关键词: 雨水花园; 施工场地污染; 地表沉积物; 重金属; 降雨径流; 防治措施

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0128-06

Site Pollution Characteristics during Construction of Rain Garden

GONG Man-li^{1,2}, MA Yu-kun¹, ZHAO Jiang³, SHE Nian⁴, ZHAO Hong-tao^{1,2},
LI Xu-yong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Eco-city Academy, Beijing 100048, China; 4. Ecological Technology Institute of Construction Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Currently, the low impact development (LID) construction site pollution during sponge cities construction in China is widespread, but it does not arouse enough attention and correct understanding. So, taking rain garden construction in Zhenjiang as an example, static spatial distribution characteristics and dynamic runoff pollution characteristics of road-deposited sediment (RDS) during different construction stages were analyzed and compared with the sites without construction. The results showed that the RDS mass per unit area during excavation, gravel filling, soil filling and planting stage were $(478.7$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41471417、41701586); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07206-006-02)

通信作者: 赵洪涛 E-mail:htzhao@rcees.ac.cn

± 14.57) g/m^2 , (261.74 ± 37.79) g/m^2 , (76.18 ± 17.22) g/m^2 , and (31.83 ± 9.44) g/m^2 , respectively, which were all higher than the sites without LID construction [(17.71 ± 2.81) g/m^2], and RDS at each construction stage was dominated by coarse particle size ($149 - 1\ 000\ \mu\text{m}$). The heavy metals contents of RDS in construction sites were significantly lower than that of the sites without construction, but the heavy metal pollution load was higher than that of the sites without construction, and the order from high to low was excavation stage > gravel filling stage > soil filling stage > planting stage. With the increase distances from the construction site, the mass of RDS per unit area gradually reduced. The diffusion and migration distance of RDS around the construction site was approximately 120 m. The total suspended solid and heavy metal concentration of the construction road runoff were higher than that of the road without construction, and the event mean concentration (EMC) of total suspended solids of the construction road was about 2.8 times of that of the road without construction. According to the analysis results, the pollution control measures of LID site runoff in sponge city construction in China were put forward.

Key words: rain garden; construction site pollution; road-deposited sediment (RDS); heavy metal; rainfall runoff; control measure

低影响开发(LID)技术通过大量分散式的微观景观尺度措施维持和再现城市开发前的水文过程,通过截留、渗透、过滤等措施对雨水进行源头控制,目前国内外应用的LID措施主要包括:雨水花园、透水路面、下凹式绿地、绿色屋顶等^[1]。然而,由于缺少合理的污染防治管控措施,我国LID建设施工过程中场地污染现象普遍存在,“粗放式”的开挖、运输、堆积物料等施工行为导致土壤暴露面积及地表沉积物累积量的增加,地表沉积物中富集的有毒污染物如重金属的含量随之增加。地表沉积物易随降雨冲刷迁移,是重金属进入地表水体的重要途径,从而加大城市面源污染风险^[2]。目前国内外对城市径流污染的研究多为径流水质的监测与模拟、控制工程的性能评价等方面^[3,4],而对施工阶段引起的面源污染问题关注较少,尤其是针对LID施工过程的场地污染研究更为罕见。因此,量化表征LID施工过程的场地污染特征,对于正确认识海绵城市建设过程中的场地污染问题及科学合理地制定场地污染防控措施具有重要意义。

针对目前我国海绵城市建设施工过程中场地污染普遍存在而未被重视这一重要现象,笔者聚焦LID施工场地,以镇江市雨水花园施工场地为例,通过采集不同施工阶段的地表沉积物,对地表沉积物单位面积累积量和粒径占比、重金属含量和污染负荷、施工场地附近地表沉积物扩散迁移距离等进行分析,并与未施工场地进行对比,以揭示LID施工过

程对场地污染的影响,并提出了适合我国海绵城市建设的场地径流污染控制措施。

1 材料与方法

1.1 采样点布置

镇江市在老城区改造过程中因地制宜地融入海绵城市建设元素,建造了雨水花园、下凹式绿地、透水铺装等LID措施,有效解决了老城区的改造难题。笔者选取镇江市京口区与润州区8个居民住宅小区的12个雨水花园施工场地、3个毗邻未受到施工干扰的场地及2条施工场地出口附近的道路,设置32个代表性采样点,采集雨水花园不同施工阶段施工场地附近的地表沉积物;并选取雨水花园施工道路与毗邻未施工道路的2个雨水排水口采集道路径流水样。

1.2 样品采集与处理

根据雨水花园的结构,将施工过程分为开挖阶段、铺砂阶段、填土阶段与种植阶段。使用真空吸尘器于每个施工阶段采集3个雨水花园施工场地附近的地表沉积物,并采集3个未受到施工干扰的小区场地地表沉积物作为背景值。2个施工场地出口附近道路地表沉积物采样点的布设如下:运粮河路与古城路以施工小区出口为起点,沿车辆流动方向每隔30 m设置1个采样点,共设置6个采样点;样品采集选择前期累积晴天数在一周以上,且在道路清扫之前。采样点面积控制在 $1 \sim 6\ \text{m}^2$,保证样品质量 $> 700\ \text{g}$,密封保存并记录。将采集的地表沉积物

样品通过粒径形态分析仪筛分为: <44、44~62、62~105、105~149、149~250、250~450、450~1 000、1 000~2 000 μm 等 8 个粒径段,将每个粒径段的样品分别称质量,并装到密封袋中备用。采集一场短时降雨条件下(降雨历时为 50 min,平均降雨强度为 0.13 mm/min)雨水花园施工道路与毗邻的未施工道路 2 个雨水排水口的地表径流,用聚乙烯塑料瓶收集样品。根据降雨强度与降雨历时,自产流起 15 min 内,每隔 5 min 采集 1 个样;15~55 min 内,每隔 10 min 采集 1 个样。监测指标包括:总悬浮固体(TSS)与重金属 Cu、Cr、Ni、Pb 和 Zn,分析方法采用国家标准方法。

1.3 样品分析与质量控制

采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 法对土壤样品进行消解^[5],每 3 组(每组有 8 个粒径段样品,共 24 个)样品加 2 个空白和 2 个土壤标准样品(GSS-1)进行质量控制,消解后用 0.5% 的硝酸定容至 50 mL 离心管中。用 ICP-MS 测定 Cu、Cr、Ni、Pb、Zn 等 5 种重金属的含量,每 30 个样品加测一次与被测样品含量接近的标准物质的含量,以确保监测数据的真实可靠。最终土壤样品中重金属的回收率控制在 85%~100%。为保证样品不受污染,试验用具使用前均在稀硝酸溶液中浸泡 12 h,然后用自来水、蒸馏水、超纯水各冲洗 3 次。

1.4 数据分析方法

地表沉积物重金属污染负荷是指单位面积地表沉积物全部粒径段的重金属含量之和,即^[6]:

$$Q = \sum_{i=1}^m C_i \times GS_i \times M \quad (1)$$

式中: Q 为重金属污染负荷,mg/m²; C_i 为单个粒径段地表沉积物中的重金属含量,mg/kg; GS_i 是单个粒径段占全部粒径段地表沉积物的质量比; m 为粒径段数; M 为地表沉积物的单位面积质量,kg/m²。

采用场次降雨径流的平均浓度(EMC)来表示一场降雨地表径流全过程排放的某污染物的平均浓度,可用下式表示^[7]:

$$\text{EMC} = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^T C(t) Q(t) dt}{\int_0^T Q(t) dt} \approx \frac{\sum C(t) Q(t) \Delta t}{\sum Q(t) \Delta t} \quad (2)$$

式中: M 为整个径流过程中污染物的量,mg; V 为径流总量,m³; $C(t)$ 为 t 时刻的污染物浓度,mg/

L; $Q(t)$ 为 t 时刻的径流流量,m³/min; Δt 为采样间隔时间,min。

2 结果与分析

2.1 施工对地表沉积物单位面积质量的影响

雨水花园不同施工阶段对地表沉积物的单位面积质量有重要影响。在本研究中,开挖、铺砂、填土及种植阶段的地表沉积物单位面积质量分别为(478.7 ± 14.57)、(261.74 ± 37.79)、(76.18 ± 17.22)、(31.83 ± 9.44) g/m²,均高于未施工场地[(17.71 ± 2.81) g/m²]。根据现场调查发现,施工场地附近地表沉积物主要是由机械或物料运输车辆轮携带或车身遗撒所致。开挖阶段地表沉积物单位面积质量最大,是由于挖掘过程中土壤表层受到剥蚀,大面积土壤暴露,使得遗撒在施工场地外的地表沉积物量大大增加^[8]。一旦在施工过程中发生暴雨事件,大量地表沉积物携带污染物质侵蚀冲刷进入雨水管道、汇入水体,将会带来严重的径流污染。因此加强对施工过程尤其是开挖阶段的污染防治显得尤为重要。

2.2 施工对地表沉积物粒径分布的影响

粒径分布决定了地表沉积物的迁移率与潜在的污染效应^[9],地表沉积物对地表径流的贡献取决于被径流冲刷进入水体的那部分粒径的地表沉积物所负载的污染物。图 1 给出了雨水花园不同施工阶段地表沉积物的粒径分布特征。

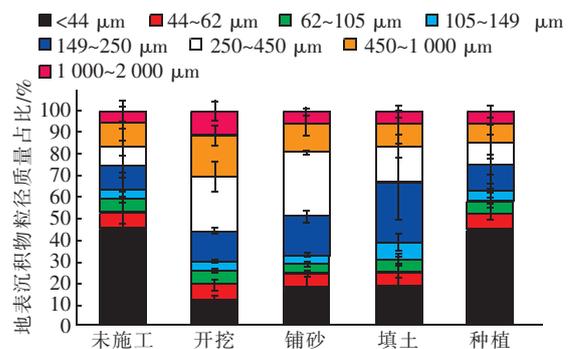


图 1 雨水花园不同施工阶段地表沉积物的粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of RDS at different construction stages

由图 1 可知,不同施工阶段的地表沉积物在 44~149 μm 粒径范围内占比相似,均小于 20%。未施工阶段与种植阶段地表沉积物主要以细粒径(粒径 <105 μm)为主。开挖与铺砂阶段地表沉积物在 250~450 μm 粒径范围内质量占比最大;填土阶段

地表沉积物在 149 ~ 250 μm 粒径范围内质量占比最大。施工阶段地表沉积物以粗粒径(149 ~ 1 000 μm)为主,这主要与施工材料本身遗撒及物料运输车辆或小区进出车辆携带的地表沉积物有关。

2.3 施工对地表沉积物中重金属污染的影响

地表沉积物是重金属污染物的载体,不同施工阶段的重金属含量和污染负荷见图 2。可知,未施工场地地表沉积物的重金属含量明显高于施工各阶段。这是由于施工前地表沉积物的来源主要是大气沉降、交通等,受到的重金属污染较严重;而施工阶段的地表沉积物一方面来自深层土壤,另一方面来自物料的遗撒,携带的重金属污染物较少。相比于未施工场地,施工过程中的重金属含量虽然低,但由于单位面积沉积物质量较大,从而也会形成较高的污染负荷。不同施工阶段重金属污染负荷(除 Pb 外)大体呈现开挖阶段 > 铺砂阶段 > 填土阶段 > 种植阶段。污染程度不同的原因可能是粒径组成不同,其重金属来源及对重金属的吸附能力不同。Pb 在铺砂阶段明显高于其他施工阶段,可能与铺砂时机械材料的磨损有关^[10]。Zn 在开挖阶段明显高于其他阶段,可能与开挖土壤中的 Zn 含量较高有关。

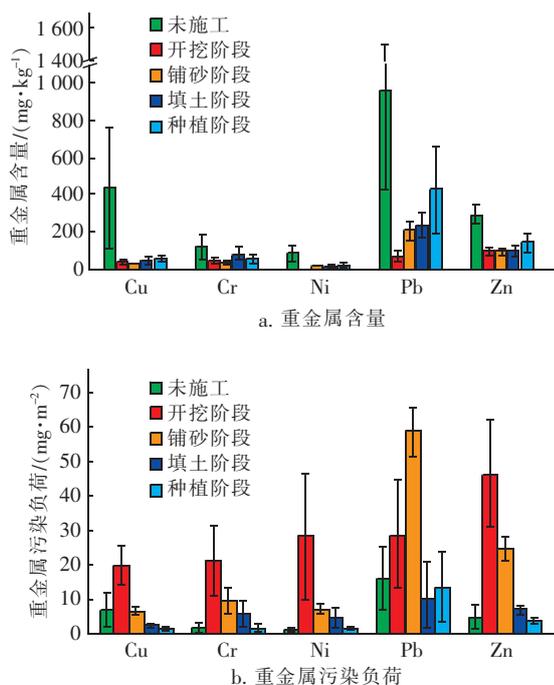


图2 雨水花园不同施工阶段对地表沉积物重金属含量及污染负荷的影响

Fig. 2 Effect of different construction stages of rain garden on heavy metals content and load in RDS

2.4 施工路段地表沉积物的变化规律

为了考察雨水花园施工活动对道路地表沉积物的影响范围,选择 2 个雨水花园施工小区出口附近道路:古城路与运粮河路,沿施工车辆运输方向布设 6 个监测点对地表沉积物进行了监测分析。结果表明,地表沉积物单位面积质量最大值都出现在距离施工场地最近的监测点,其随着与施工场地距离的增加而呈递减的趋势。古城路距离雨水花园施工场地由近及远的 6 个监测点的地表沉积物单位面积质量分别为 19.73、19.53、18.50、12.10、3.26 和 2.86 g/m^2 ,后一监测点相对于前一监测点的降低幅度分别为 1.01%、5.29%、34.59%、73.00%、12.24%;运粮河路 6 个监测点的地表沉积物单位面积质量分别为 35.48、21.72、18.03、16.50、3.7 和 3.5 g/m^2 ,后一监测点相对于前一监测点的降低幅度分别为 38.78%、24.02%、9.29%、79.48%、5.40%。可见,在距离施工场地 90 ~ 120 m 范围附近,地表沉积物单位面积质量降低幅度最大,大于 120 m 的范围后地表沉积物单位面积质量逐渐趋于稳定。施工场地附近道路的地表沉积物主要是由于运料车辆遗撒物料及社会道路交通车辆携带造成的,防控施工场地污染时,也应加强对施工场地附近一定范围的污染控制,从而有效减小地表径流污染风险。

3 讨论

3.1 雨水花园施工对降雨径流污染物的影响

雨水花园建设施工增加了邻近道路的地表沉积物累积量,地表沉积物携带重金属等污染物在雨水冲刷下极易随地表径流一起进入水体,从而对城市水环境造成严重的威胁。选取受雨水花园施工影响的道路及未受影响的毗邻道路,采集降雨径流水样并测试其中的总悬浮固体与重金属污染物,结果见图 3。可以看出,施工道路降雨径流中总悬浮固体含量始终高于未施工道路,施工道路径流中总悬浮固体的 EMC 值约为未施工道路的 2.8 倍。总悬浮固体含量随降雨历时发生明显变化,初期径流污染严重。随着降雨历时的延长,总悬浮固体含量呈波浪型锯齿状下降趋势,并最终趋于稳定。污染物的冲刷过程是一个复杂的动力学过程,受到众多因素的影响。施工与未施工道路径流中总悬浮固体含量存在明显差别的原因可能是地表沉积物累积量及悬浮颗粒物粒径分布不同。总悬浮固体含量增大时,重金属污染负荷也随之增大。由图 3(b)可见,施工

道路降雨径流的重金属含量(除Cr外)明显高于未施工道路。有研究表明,重金属主要来自于汽车燃料的燃烧、轮胎的老化磨损及冶金工业等。施工活动时机械及物料运输车辆的流动造成施工道路重金属浓度较高。另外,Pb和Zn的含量明显高于其他金属,这与小强度降雨中Pb和Zn的迁移率较高有关^[11]。镇江市年均降雨量为1 070 mm,径流大部分进入管网或直接排入河流,试点区高强度大范围的海绵城市建设施工过程势必带来接纳水体的污染,应引起足够的重视与正确的认识。

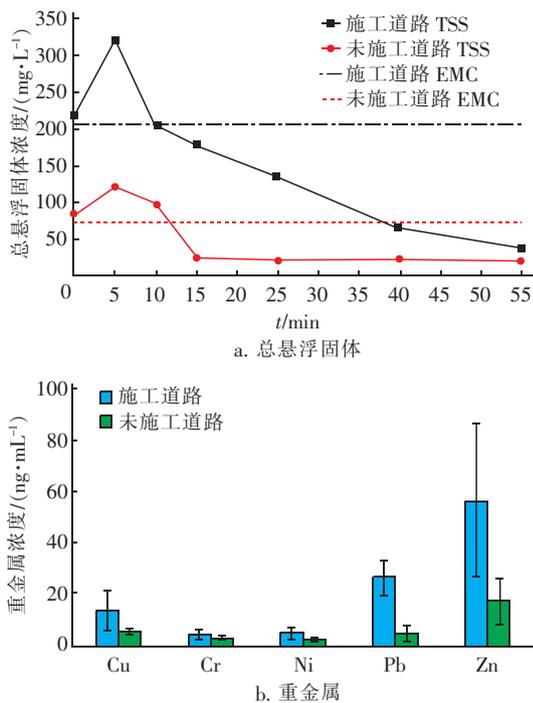


图3 施工道路与未施工道路径流中总悬浮固体和重金属的含量比较

Fig. 3 Total suspended solids and heavy metal concentrations in different roads

3.2 雨水花园施工场地径流污染防治措施

加强海绵城市施工阶段的污染防控是实现海绵城市优质建设的基础与保障。对于雨水花园施工过程的径流污染防治措施建议如下:

① 开挖阶段。此阶段地表沉积物累积量最多、径流冲刷风险最大,建议防治措施如下:开挖时只暴露施工设备占用的植被,不应移除场地所有植被,暴露大面积土壤;使用小型轻便挖掘装置,避免土壤压实;施工场地内部采取清扫、洒水、喷洒抑尘剂和运料货车密封等措施减少地表沉积物累积;选择在非雨季、气候相对干燥的时节施工;缩短开挖阶

段施工时间,减少径流污染风险。

② 铺砂阶段。此阶段地表沉积物累积量较多、径流冲刷风险较大,建议防治措施如下:运料车辆进入社会道路之前要进行彻底清洗;物料堆放区靠近施工场地以避免不必要的机械压实土壤。

③ 填土阶段。此阶段地表沉积物累积量较少、径流冲刷风险较小,建议防治措施如下:设置围栏、土工布等防治土壤沉积物的侵蚀冲刷;施工用土的冲刷区域应远离LID设施。

④ 种植阶段。此阶段地表沉积物累积量较少、径流冲刷风险较小,建议防治措施如下:尽量选择耐涝、耐旱、四季性的植物进行种植;如遇暴雨,暴雨后要检查雨水花园表层覆盖层的侵蚀情况以及植被的损坏情况,必要时替换被侵蚀的表面覆盖层及被损伤的植被。

综上,加强对施工过程尤其是开挖阶段的场地防护尤为重要;其次,建议加强施工场地周围一定范围的管理;还有,加强对施工场地出口道路地表沉积物污染的监测与评估分析,定期公布结果,督促相关部门对地表沉积物污染的控制,切实改善城市空气质量,降低径流污染风险。此外,合理安排施工周期是海绵城市建设施工成功的关键。因地制宜地选择合适的季节与气候条件,比如在雨水较少的冬季进行开挖等活动以减少土壤侵蚀的风险,春季气候变暖时种植植被以提高植被的成活率,这样一方面可以有效降低地表径流污染风险,另一方面可以实现海绵城市的优质建设。

4 结论

① 雨水花园在不同施工阶段施工场地周围地表沉积物的单位面积质量差异明显,从大到小依次为:开挖阶段、铺砂阶段、填土阶段、种植阶段,分别为 (478.7 ± 14.57) 、 (261.74 ± 37.79) 、 (76.18 ± 17.22) 、 (31.83 ± 9.44) g/m²,均高于未施工场地 $[(17.71 \pm 2.81)$ g/m²]。开挖阶段施工机械剥蚀地表土壤,造成地表沉积物累积量最大,因此需加强开挖阶段的污染防治。

② 雨水花园不同施工阶段的地表沉积物以粗粒径(149~1 000 μm)为主,开挖与铺砂阶段250~450 μm粒径范围内的地表沉积物质量占比最大,而填土阶段149~250 μm粒径范围内的地表沉积物质量占比最大,这主要与施工材料本身遗撒及物料运输车辆或小区进出车辆携带的地表沉积物有关。

③ 雨水花园各施工阶段的重金属含量明显低于未施工场地,但重金属污染负荷均高于未施工场地,由大到小依次为:开挖阶段、铺砂阶段、填土阶段、种植阶段。

④ 地表沉积物单位面积质量最大值都出现在距离施工场地最近的监测点,其随着与施工场地距离的增加而呈递减的趋势。地表沉积物在施工场地周围的扩散迁移距离约为120 m。

⑤ 雨水花园施工道路降雨径流中的污染物浓度明显高于未施工路段,施工道路径流中总悬浮固体的EMC值约是未施工道路的2.8倍。

参考文献:

- [1] Gulbaz S, Kazezyilmaz-Alhan C M. Hydrological model of LID with rainfall-watershed-bioretenion system[J]. *Water Resour Manage*, 2017, 31(6): 1931 - 1946.
- [2] 赵洪涛,李叙勇,尹澄清. 街尘与城市降雨径流污染的关系综述[J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 8001 - 8007.
Zhao Hongtao, Li Xuyong, Yin Chengqing. Research progress on the relationship of pollutants between road-deposited sediments and its washoff[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 8001 - 8007 (in Chinese).
- [3] 潘国庆,车伍,李俊奇,等. 中国城市径流污染控制量及其设计降雨量[J]. *中国给水排水*, 2008, 24(22): 25 - 29.
Pan Guoqing, Che Wu, Li Junqi, et al. Urban runoff pollution control quantity and its design rainfall in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(22): 25 - 29 (in Chinese).
- [4] Al A S, Bonhomme C, Dubois P, et al. Investigation of the wash-off process using an innovative portable rainfall simulator allowing continuous monitoring of flow and turbidity at the urban surface outlet[J]. *Sci Total Environ*, 2017, 609: 17 - 26.
- [5] Sutherland R A. Lead in grain size fractions of road-deposited sediment[J]. *Environ Pollut*, 2003, 121(2): 229 - 237.
- [6] 邹常亮,赵全升,谢文霞,等. 下垫面高度梯度对城市灰尘分布特性及其重金属污染的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(2): 729 - 736.
Zou Changliang, Zhao Quansheng, Xie Wenxia, et al. Effects of depositional height on the distribution and heavy metal content of urban dust[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(2): 729 - 736 (in Chinese).
- [7] 李春林,刘森,胡远满,等. 沈阳市降雨径流污染物排放特征[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(5): 1327 - 1336.
Li Chunlin, Liu Miao, Hu Yuanman, et al. Characteristics of pollutants in urban rainfall runoff in Shenyang City [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(5): 1327 - 1336 (in Chinese).
- [8] Ma Y K, Gong M L, Zhao H T, et al. Influence of low impact development construction on pollutant process of road-deposited sediments and associated heavy metals [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 613/614: 1130 - 1139.
- [9] 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.
He Xiaoyan, Zhao Hongtao, Li Xuyong, et al. Migration and transformation of heavy metals in street dusts with different particle sizes during urban runoff [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(3): 810 - 816 (in Chinese).
- [10] 朱伟,边博,阮爱东. 镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析[J]. *环境科学*, 2007, 28(7): 1584 - 1589.
Zhu Wei, Bian Bo, Ruan Aidong. Analysis of sources of heavy metal contamination in road-deposited sediment from Zhenjiang [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(7): 1584 - 1589 (in Chinese).
- [11] 李海燕,石安邦. 城市地表颗粒物重金属分布特征及其影响因素分析[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(11): 1852 - 1860.
Li Haiyan, Shi Anbang. Distribution characteristics and their influencing factors of heavy metals in urban road sediments [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(11): 1852 - 1860 (in Chinese).



作者简介:宫曼莉(1993 -),女,蒙古族,内蒙古锡林浩特人,硕士研究生,研究方向为城市面源污染控制。

E-mail: gongmanli_imu@163.com

收稿日期:2017 - 10 - 15