

## 不同粒径地表街尘中重金属在径流冲刷中的迁移转化

何小艳<sup>1,2</sup>, 赵洪涛<sup>2\*</sup>, 李叙勇<sup>2</sup>, 连宾<sup>3</sup>, 王小梅<sup>2</sup>

(1. 贵州大学喀斯特环境与地质灾害防治教育部重点实验室, 贵阳 550003; 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. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002)

**摘要:** 在我国快速城市化进程中, 街尘及其径流冲刷引起的重金属污染日益突出. 通过对北京市城乡道路街尘及其人工降雨模拟径流冲刷过程中不同粒径街尘中重金属的分析, 探讨街尘与径流冲刷过程中的粒径效应及不同重金属赋存形态的动态变化规律. 结果表明, 同一粒径颗粒物从“静态”街尘到“动态”径流中的颗粒物, 重金属浓度呈下降趋势. 街尘中重金属在径流冲刷过程中, 存在溶解与析出现象, 颗粒物粒径越小, 减少比率越大, 5种重金属(Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)的减少比率分别为24.3%、56.8%、34.3%、22.8%、27.3%. 街尘中的弱酸可提取态比例要略大于径流颗粒物中弱酸可提取态比例, 部分以水溶态进入水体中. 在径流冲刷过程中, 水相溶解态重金属变化不大, 水相颗粒态重金属含量随降雨时间径流过程迅速降低. 固相颗粒物的重金属浓度随降雨时间总体上呈下降趋势. 粒径越小, 冲刷率越大, 最大为62.1%, 最小为4.6%. 地表街尘在径流冲刷过程中, 小粒径颗粒物具有较强的迁移能力, 较容易进入水体造成污染.

**关键词:** 街尘; 径流冲刷过程; 人工模拟降雨; 粒径; 重金属形态; 迁移转化

中图分类号: X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)03-0810-07

## Migration and Transformation of Heavy Metals in Street Dusts with Different Particle Sizes During Urban Runoff

HE Xiao-yan<sup>1,2</sup>, ZHAO Hong-tao<sup>2</sup>, LI Xu-yong<sup>2</sup>, LIAN Bin<sup>3</sup>, WANG Xiao-mei<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Karst Environment and Geological Hazard Prevention of Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550003, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** The heavy metal pollution in runoff caused by street dust washoff has been an increasingly prominent problem in the context of rapid urbanization in China. Based on measurement of heavy metal contents in street dusts with different particle sizes and an experiment of street dust washoff using simulated rainfall, we analyzed the role of particle size of street dust in heavy metal pollution, and the variation in geometrical forms of heavy metals during street dust washoff. Our results showed that the heavy metal concentration decreased from "static" street dust to "dynamic" runoff particulate in the same diameter particles. Heavy metals in street dust were dissolved and extracted during washoff. The average loss proportion of the five metals (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) were 24.3%, 56.8%, 34.3%, 22.8%, 27.3%, respectively. The loss proportion increased with the decrease of the particle size of street dust. Proportion of extracted form dust was higher in street than that in washoff samples, which suggested some dissolved loss in water. In washoff samples, dissolved metals of waterphase did not have significant changes; however, heavy metals with particle state in waterphase reduced rapidly during runoff. Meanwhile, heavy metals of solid-phase particle reduced during runoff. Street dust with small particle size had higher loss rate during runoff. The variation rate of street dust loss among different particle sizes varied from 4.6% to 62.1%. Street dust with smaller particle size had higher migration ability in runoff, which was more risky to urban water pollution.

**Key words:** street dust; runoff; simulated rainfall; particle size; heavy metal; migration and transformation

街尘是各种污染物的载体, 是地表径流污染的主要来源<sup>[1]</sup>. 街尘受汽车尾气、轮胎磨损、道路老化、大气沉降等污染<sup>[2-4]</sup>, 容易富集有毒污染物尤其是重金属, 极易随降雨冲刷迁移, 形成地表径流污染. 在街尘受径流冲刷进入受纳水体前有3个主要过程, 即累积、冲刷和传输<sup>[5-6]</sup>. 国内外对地表径流污染的研究主要是基于自然降雨条件下开展的<sup>[7-9]</sup>, 这些研究存在较多的不可控因素; 而对街尘的研究则主要集中在街尘的累积过程和径流污染

传输过程<sup>[10-13]</sup>, 缺乏对街尘降雨径流的人工控制实验的深入研究, 因而难以解释不同降雨强度、不同粒径组成等多种情景下街尘冲刷过程机制. 而街尘降雨冲刷过程中是一个非常复杂的过程, 受到了多种

收稿日期: 2011-05-05; 修订日期: 2011-09-07  
基金项目: 中国科学院百人计划项目; 国家自然科学基金项目(40971271, 41071323, 41171395); 城市与区域国家重点实验室自主项目(SKLURE2008-1-05)  
作者简介: 何小艳(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市面源污染. E-mail: hxy1014@163.com  
\* 通讯联系人, E-mail: htzhao@rcees.ac.cn

因素的交互影响,目前有许多机制尚待研究,如:不同粒径对街尘冲刷及污染物分配的影响;污染物在冲刷过程中的固液分配与粒径的交互影响等。

鉴于此,本研究将收集的街尘按粒径大小进行分级,采用人工模拟降雨收集降雨径流,分析不同粒径的街尘在径流冲刷前后及过程中的重金属形态的变化,深入探讨面源污染污染物中迁移转化过程,以期有效控制城市地表径流污染提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

街尘样品采集:根据北京市的城乡环境梯度,选择中心城区(海淀、丰台)、城中村;卫星城区(延庆、房山、通州)、乡镇、农村采集道路街尘样品,采样时间为2009年9月,前期晴天累计天数约为2周。采样时,为避免人为因素对样品产生污染,街尘样品选用真空吸尘器(型号为Philips fc8264)在不透水路面收集。采样面积的范围为5~20 m<sup>2</sup>,质量约为700 g。将收集的街尘样品风干后,先通过1 000 μm的筛子去除树叶、烟头、大石子等杂物,之后依次通过44、62、105、149、250、450 μm的筛子,将其分成七部分后用封口袋装好用于模拟降雨实验和化学分析。

径流样品采集:采用人工控制模拟降雨实验对7种不同粒径的街尘进行径流分析,模拟降雨实验于2010年7月在北京师范大学房山实验基地进行,降雨装置采用槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨机<sup>[14-17]</sup>,实验区选择在实验基地附近的沥青道路地面,径流小区面积1.5 m×2 m,地面粗糙度0.625,

坡度2.36°,降雨高度为2.5 m。预实验测试人工模拟降雨装置降雨雨滴分布范围和均匀度,并校正雨强,其强度为暴雨级雨强(46.7 mm·h<sup>-1</sup>)。降雨供水采用去离子水调到与天然雨水的pH值和电导率等相近。分别称取150 g 7种不同粒径(<44、44~62、62~105、105~149、149~250、250~450、450~1 000 μm)的街尘样品,用塑料尺推平使其均匀分布于径流小区中,利用真空负压收集径流水样,采用校正的20 mL和5 mL塑料桶测定径流体积。开始产流的10 min中每隔2 min收集一次,之后每隔5 min收集一次,30 min后每隔10 min收集一次,降雨历时1 h。取1 L径流水样于采样瓶中4℃保存。收集的径流经沉淀、离心后,获取的沉积物样品置于低于40℃的条件下烘干待测。

### 1.2 样品分析

#### 1.2.1 径流水样的处理方法

将径流水样过0.45 μm的滤膜(已烘干称重),用HNO<sub>3</sub>调整pH≤2后测定溶解态重金属,将滤膜烘干后称重计算总悬浮物浓度(TSS)。未过滤的径流样品经浓硝酸消煮后测定重金属总量<sup>[18]</sup>。

#### 1.2.2 街尘和径流颗粒物的处理方法

街尘和径流颗粒物中重金属的测定方法如下:称取0.250 0 g样品,精确到0.000 1 g,往聚四氟消煮管依次加入浓硝酸9 mL,盐酸2 mL,氢氟酸3 mL,密封后放入微波萃取系统(型号:MARS,CEM, America)消煮,消煮后定容至25 mL,存放4℃保存待测。

重金属赋存形态分析采用BCR分级提取法<sup>[19]</sup>,依次提取重金属的弱酸可提取态、可还原态、可氧化态和残渣态。分级提取过程如表1所示。

表1 连续化学浸提重金属赋存形态的操作步骤

Table 1 Four-step sequential extraction of heavy metals

步骤	形态	提取步骤
1	弱酸可提取态	40 mL 0.11 mol·L <sup>-1</sup> 乙酸溶液(22±5)℃,220 r·min <sup>-1</sup> 条件下振荡16 h后,3 000 r·min <sup>-1</sup> 离心20 min
2	可还原态	40 mL 0.5 mol·L <sup>-1</sup> 盐酸羟氨(pH 1.5)振荡16 h,3 000 r·min <sup>-1</sup> 离心20 min
3	可氧化态	10 mL 30%的H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (pH 2~3)在22℃左右条件下消化1 h后置于(85±2)℃水浴锅中1.5 h,使溶液体积<3 mL;再次加入10 mL H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (85±2)℃水浴锅中2 h,使溶液体积约1 mL;加入50 mL 1 mol·L <sup>-1</sup> 的乙酸铵(pH 2.0)振荡16 h,3 000 r·min <sup>-1</sup> 离心20 min
4	残渣态	3 mL蒸馏水、7.5 mL 6 mol·L <sup>-1</sup> 盐酸和14 mol·L <sup>-1</sup> 硝酸;20℃下静置过夜,逆流下煮沸2 h,冷却后过滤

### 1.2.3 重金属浓度测定与质量控制

以上滤液和消煮液均采用Perkin-Elmer Elan 6000 ICP-OES测定。为减少实验误差,实验所用试剂均为优级纯,所有容器均预先在10%稀硝酸溶液中浸泡24 h以上,依次用自来水、去离子水、超纯水

冲洗,以减少污染。分析过程中,采用土壤标准物(GSS-1)重复测定和试剂空白来进行质量控制。土壤标准物质中重金属测定的回收率范围在90%~110%,样品重复之间的相对标准偏差介于5%~10%之间。

## 2 结果与分析

### 2.1 街尘与径流冲刷过程中不同粒径颗粒物中重金属的含量

粒径影响着重金属污染物在街尘和径流颗粒物中的分布特征. 表 2 是 7 种不同粒径的颗粒物在街尘-径流系统中重金属含量的变化. 总体上, 街尘和径流颗粒物中的重金属浓度随粒径的减小而增大, 说明街尘粒径越小, 污染富集能力越强. 同一粒径的

颗粒物从“静态”街尘到“动态”径流的冲刷过程中, 重金属浓度均呈下降趋势, 这主要是由街尘颗粒物冲刷进入径流的过程中, 有部分赋存形态的重金属溶解和解吸造成的. 5 种重金属 (Cr、Cu、Ni、Pb、Zn) 在街尘径流冲刷过程中的平均减少比率分别为 24.3%、56.8%、34.3%、22.8%、27.3%. 同时, 街尘颗粒物粒径越小, 减少比率越大. 这是因为小粒径街尘比表面积大, 吸附态较多, 在水化学条件下更易发生解吸现象.

表 2 街尘-径流系统中重金属含量<sup>1)</sup> /mg·kg<sup>-1</sup>  
Table 2 Heavy metal concentrations in street dust and runoff/mg·kg<sup>-1</sup>

项目	粒径/ $\mu\text{m}$	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
街尘	<44	84.9	98.2	29.3	110.6	397.3
	44~62	68.8	71.0	28.2	91.5	539.9
	62~105	55.3	59.6	19.7	75.1	411.9
	105~149	47.0	44.7	25.7	85.1	336.5
	149~250	45.1	33.9	11.6	84.7	343.2
	250~450	35.3	27.4	19.1	67.3	269.7
	450~1000	40.1	20.4	20.8	50.3	359.6
径流	<44	57.5(32%)	18.3(81%)	8.7(70%)	85.1(23%)	314.5(21%)
	44~62	59.1(14%)	23.5(67%)	19.2(32%)	80.2(12%)	387.1(28%)
	62~105	43.5(21%)	27.1(55%)	14.9(25%)	53.6(29%)	252.3(39%)
	105~149	36.1(23%)	12.9(71%)	19.2(25%)	55.9(34%)	224.8(33%)
	149~250	28.3(37%)	15.3(55%)	7.7(34%)	51.5(39%)	223.5(35%)
	250~450	28.3(20%)	11.6(58%)	13.5(30%)	62.4(7%)	212.1(21%)
	450~1000	31.0(23%)	11.7(42%)	15.9(24%)	42.2(16%)	309.5(14%)

1) 括号内数据为重金属的减少比率, 即(街尘中浓度 - 径流颗粒物中浓度) / 街尘中浓度

### 2.2 街尘与径流冲刷过程中不同粒径颗粒物中重金属的赋存形态变化

街尘在径流冲刷过程中重金属赋存形态比例(质量分数)也产生了变化. 从图 1 可以看出, 5 种重金属的生物活性(弱酸可提取态比例可作为生物活性指标)顺序是: Zn(30.7%) > Ni(18.9%) > Pb(9.8%) > Cu(7.0%) > Cr(4.4%). 街尘中的弱酸可提取态比例要略大于径流颗粒物中弱酸可提取态比例, 5 种重金属 (Cr、Cu、Ni、Pb、Zn) 的弱酸可提取态比例平均减少率分别为 0.03%、5.6%、4.7%、4.0%、1.6%. 部分重金属以可溶态进入水体中. 另外重金属赋存形态受颗粒物粒径大小影响, 小粒径段的径流颗粒物非残渣态比例大于街尘中, 大粒径段则反之. 小粒径街尘进入水体中比大粒径街尘的活性更大.

### 2.3 径流冲刷过程中重金属及赋存形态的动态变化

在径流冲刷过程中存在着不同粒径颗粒物上不同赋存形态的固液分配的动态变化. 图 2 为径流冲刷过程中固相颗粒物、水相可溶态、水相颗粒态的重

金属含量随降雨时间的变化. 可以看出, 水相可溶态含量较小, 变化幅度不大. 水相颗粒态重金属含量在小粒径时含量最高, 并随降雨时间的增加重金属浓度迅速降低. 固相颗粒物的重金属浓度随降雨时间总体上呈下降趋势, 径流初始阶段 <149  $\mu\text{m}$  颗粒物的 Cu 下降很快, 随着时间的增长, 降低幅度减缓. <44  $\mu\text{m}$  颗粒物中的 Ni 在径流过程初始下降很快, 但 >44  $\mu\text{m}$  颗粒物中重金属浓度随降雨时间缓慢下降. 而 Cr、Pb、Zn 都是随着降雨时间缓慢下降, 说明 Cr、Pb、Zn 及大粒径 Cu、Ni 的解吸时间较长.

从图 3 中可以看出, 小粒径的颗粒物在降雨径流过程中, 各重金属的赋存形态比例没有太大变化. 说明径流颗粒物的重金属形态比例是稳定的, 受降雨时间影响不大.

### 2.4 径流冲刷过程中不同粒径颗粒物的迁移能力

粒径决定着颗粒物在径流冲刷过程中的迁移能力. 粒径越小, 冲刷率越大(最大为 62.1%, 最小为 4.6%) [见图 4(a)]. 降雨初期, 粒径越小, 径流中含的 TSS 浓度越高, <44  $\mu\text{m}$  颗粒物的 TSS 浓度为 4.3  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而 450~1000  $\mu\text{m}$  颗粒物的 TSS 浓度仅

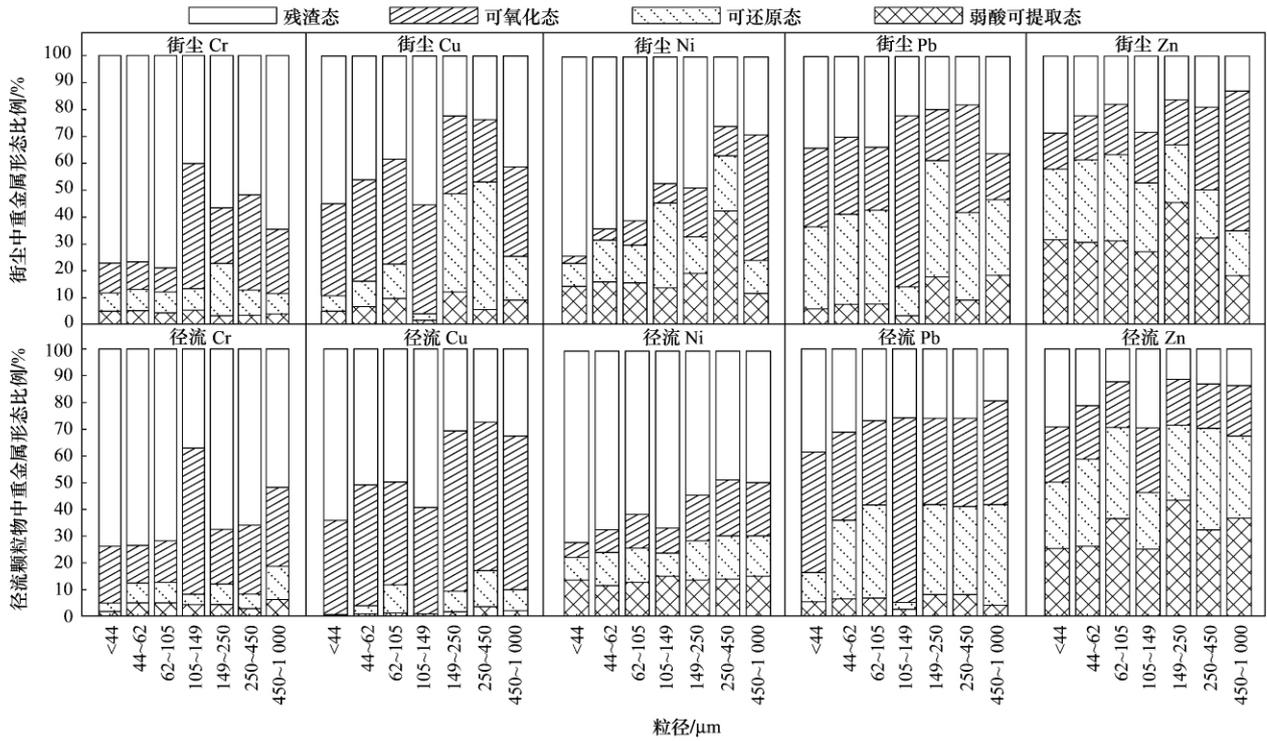


图1 街尘-径流中重金属的赋存形态质量分数

Fig. 1 Percentages of the heavy metals bound to each speciation fraction in street dust and runoff

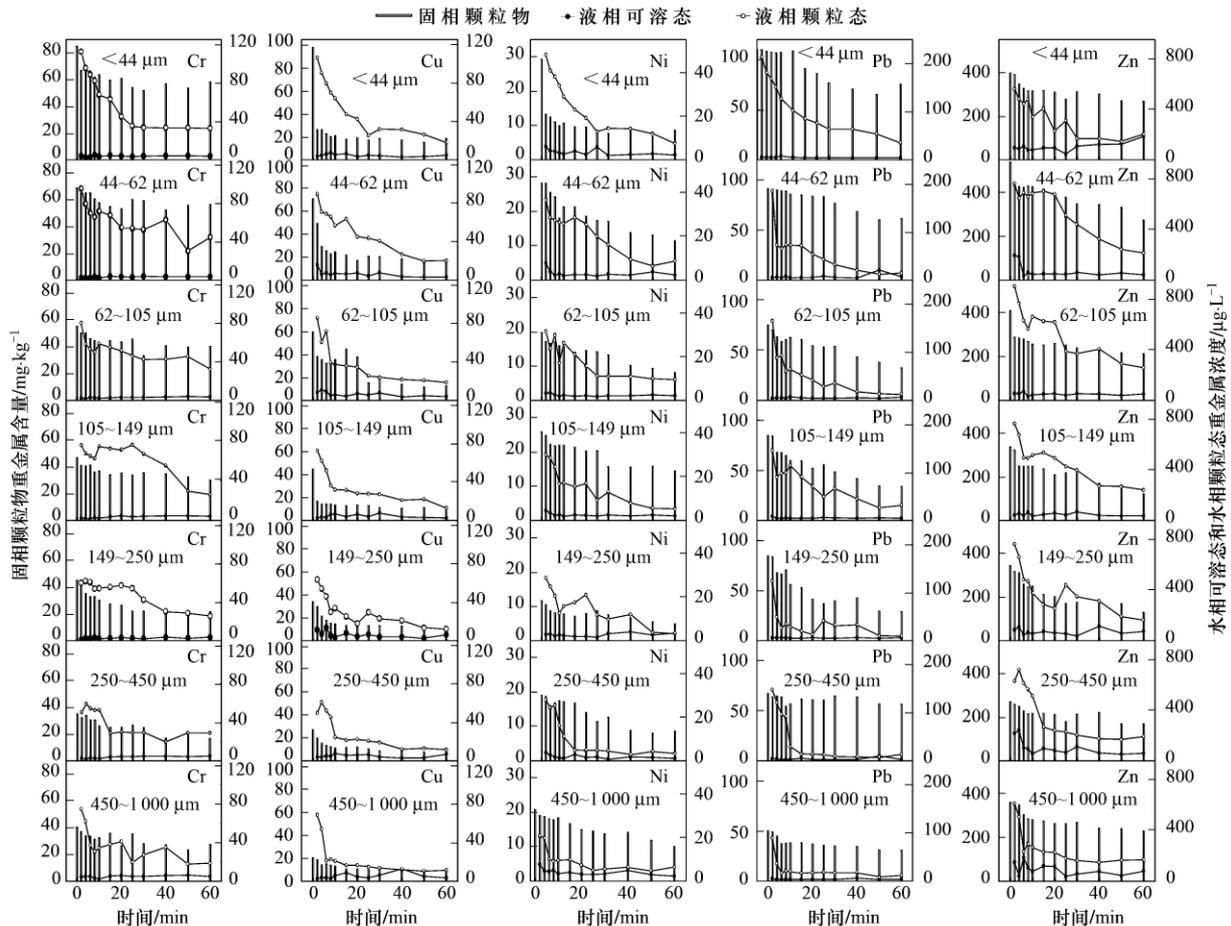


图2 固相颗粒物、水相可溶态和水相颗粒态的重金属含量随径流冲刷过程的动态变化

Fig. 2 Changes of heavy metals in particulate matter, soluble state and particle state by runoff time

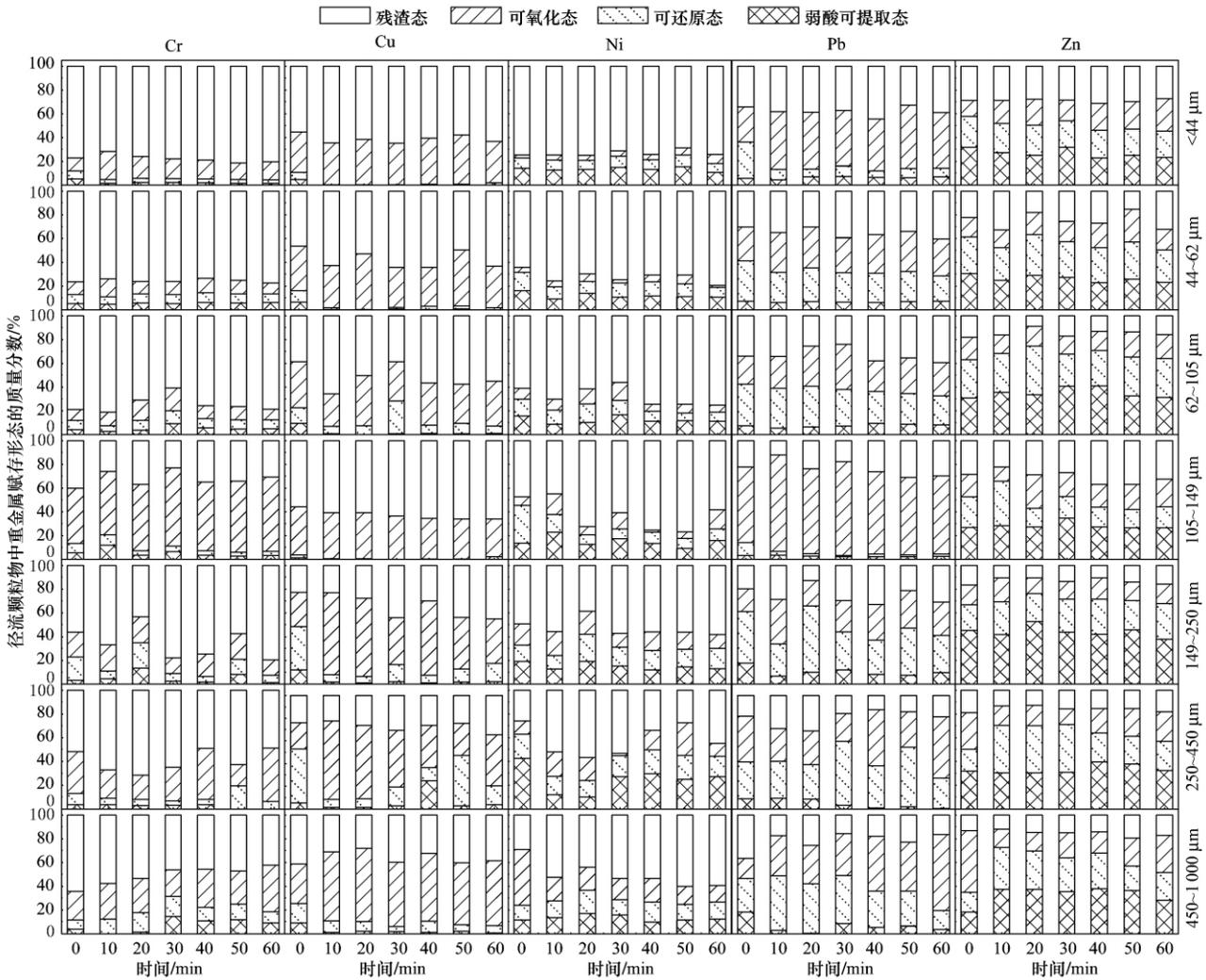


图3 不同粒径颗粒物中重金属赋存形态随径流冲刷过程的动态变化

Fig. 3 Changes of percentages of the heavy metals bound to different particle size particulates by runoff time

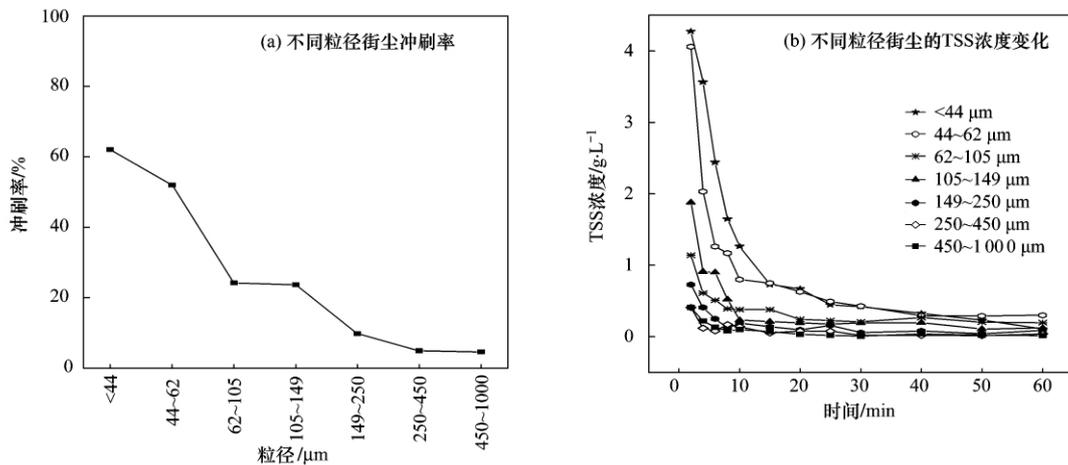


图4 不同粒径街尘在降雨径流中 TSS 的冲刷率和随时间的变化

Fig. 4 Erosion rate and change of TSS by time in runoff time

0.4 g·L<sup>-1</sup>. 随着降雨时间的增加,径流中 TSS 浓度迅速下降,15 min 后 TSS 浓度降低缓慢. 粒径越小

下降速度越快,在降雨冲刷过程中,小粒径颗粒物更易进入水体,对水体造成污染.

### 3 讨论

目前已有关于街尘-径流的研究大多关注街尘或降雨冲刷本身,对街尘与降雨冲刷污染之间的关系认识相对不足<sup>[20]</sup>.降雨冲刷是街尘地表径流污染的诱因,而街尘是不同粒径颗粒物的组合体,粒径决定着街尘颗粒在径流中的移动和转化<sup>[21-22]</sup>.街尘对地表径流污染的贡献取决于被径流冲刷流进水体的那部分粒径的街尘所负载的污染物,而不是所有粒径所负载的污染物<sup>[23]</sup>.利用人工控制实验模拟单粒径的街尘降雨冲刷行为可以揭示不同粒径街尘在降雨冲刷过程中的重金属及其赋存形态的变化.天然降雨是一个复杂的过程,具有很多不可控制因素,人工模拟降雨冲刷控制实验结合天然降雨雨水的温度、pH 值、电导率等基本理化指标以及北京市道路的粗糙度和坡度进行调整和配置,模拟不同粒径街尘的冲刷行为,由于人工模拟降雨冲刷控制实验的降雨雨强稳定、降雨均匀、具有可重复性<sup>[24-26]</sup>,可以在严格控制实验条件下进行分析街尘中各粒径的迁移变化规律,为研究街尘及其负载的不同形态的重金属在径流冲刷过程的动态变化规律提供了技术保障.

重金属赋存形态是评价重金属污染程度和潜在生态危害的重要因素.重金属在从街尘到径流的迁移过程中会受到如 pH、Eh、水温及离子强度等因素的影响,颗粒物不断地经受着分选、混合以及储存等与水动力有关的界面过程,导致产生吸附-解吸、水解、沉淀等一系列环境行为<sup>[27]</sup>.街尘经过降雨冲刷后,重金属浓度有所降低.粒径越小,重金属的减少比率越大.重金属各形态在不同环境介质也有了新的分配,街尘中的弱酸可提取态比例要略大于径流颗粒物中弱酸可提取态比例,其中 Zn 的活性形态含量最高,其次是 Ni、Pb,这在降雨过程中汇入水体会对环境造成威胁.随着粒径的增大,各重金属的非残渣态比例也在增加,水环境条件变化时大粒径颗粒物也会对水体造成污染.降雨径流过程中颗粒物的重金属浓度随时间呈下降趋势,但重金属形态随着降雨时间的变化不是很大,说明降雨时间对重金属形态比例的变化影响不大.小粒径段的径流颗粒物非残渣态比例大于街尘中,大粒径段则反之.小粒径街尘进入水体中比大粒径街尘的活性更大.

### 4 结论

(1) 同一粒径颗粒物从“静态”街尘到“动态”

径流冲刷的过程中,重金属浓度呈下降趋势.

(2) 街尘中重金属在径流冲刷过程中,存在溶解与解吸现象.5种重金属(Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)在街尘径流冲刷过程中的平均减少比率分别为24.3%、56.8%、34.3%、22.8%、27.3%.同时,街尘颗粒物粒径越小,减少比率越大.街尘中的弱酸可提取态比例要略大于径流颗粒物中弱酸可提取态比例,部分以水溶态进入水体中.

(3) 在径流冲刷过程中,水相溶解态重金属变化不大,而水相颗粒态重金属含量在小粒径时含量最高,并随降雨时间径流过程重金属浓度迅速降低.固相颗粒物的重金属浓度随降雨时间总体上呈下降趋势.

(4) 在径流冲刷过程中,粒径越小,冲刷率越大,最大为62.1%,最小为4.6%,小粒径颗粒物具有较强的迁移能力.

参考文献:

- [1] 刘春华,岑况.北京市街道灰尘粒度特征及其来源探析[J].环境科学学报,2007,27(6):1006-1012.
- [2] Zhao H T, Yin C Q, Chen M X, et al. Risk assessment of heavy metals in street dust particles to a stream network [J]. Soil & Sediment Contamination, 2009, 18(2): 173-183.
- [3] 车武,刘燕,李俊奇.北京城区面源污染特征及其控制对策[J].北京建筑工程学院学报,2002,18(4):5-9.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Goonetilleke A, Thomas E, Ginn S, et al. Understanding the role of land use in urban stormwater quality management [J]. Journal of Environmental Management, 2005, 74(1): 31-42.
- [7] 田鹏,杨志峰,李迎霞.公路地表灰尘及径流中颗粒物附着重金属对比研究[J].环境污染与防治,2009,31(6):14-18.
- [8] 赵剑强,邱艳华.公路路面径流水污染与控制技术探讨[J].长安大学学报(建筑与环境科学版),2004,21(3):50-53.
- [9] 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):1295-1300.
- [10] Lee H, Lau S L, Kayhanian M, et al. Seasonal first flush phenomenon of urban stormwater discharges [J]. Water Research, 2004, 38(19): 4153-4163.
- [11] Soller J, Stephenson J, Olivieri K, et al. Evaluation of seasonal scale first flush pollutant loading and implications for urban runoff management [J]. Journal of Environmental Management, 2005, 76(4): 309-318.
- [12] 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.
- [13] 常静. 城市地表灰尘-降雨径流系统污染物迁移过程与环境效应[D]. 上海: 华东师范大学, 2007. 66-71.
- [14] 谢云, 林小鹏, 刘英娜, 等. 槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨机的雨强及其空间分布率定[J]. 水土保持通报, 2008, 28(4): 1-6.
- [15] Herngren L F. Build-up and wash-off process kinetics of PAHs and heavy metals on paved surfaces using simulated rainfall[D]. Brisbane: Queensland University of Technology, 2005. 53-65.
- [16] Egodawatta P K. Translation of small-plot scale pollutant build-up and wash-off measurements to urban catchment scale [D]. Brisbane: Queensland University of Technology, 2007. 70-84.
- [17] 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.
- [18] 魏复盛, 徐晓白, 阎吉昌. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 370-384.
- [19] Sutherland R A, Tack F M G. Fractionation of Cu, Pb and Zn in certified reference soils SRM 2710 and SRM 2711 using the optimized BCR sequential extraction procedure[J]. Advances in Environmental Research, 2003, 8(1): 37-50.
- [20] 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.
- [21] Furumai H, Balmer H, Boller M. Dynamic behavior of suspended pollutants and particle size distribution in highway runoff[J]. Water Science & Technology, 2002, 46(11-12): 413-418.
- [22] Aryal R K, Furumai H, Nakajima F, et al. Dynamic behavior of fractional suspended solids and particle-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in highway runoff[J]. Water Research, 2005, 39(20): 5126-5134.
- [23] Bian B, Cheng X J, Li L. Investigation of urban water quality using simulated rainfall in a medium size city of China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 183(1-4): 217-229.
- [24] Sandahl J F, Baldwin D H, Jenkins J J, et al. A sensory system at the interface between urban stormwater runoff and salmon survival [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(8): 2998-3004.
- [25] Bian B, Zhu W. Particle size distribution and pollutants in road-deposited sediments in different areas of Zhenjiang, China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009, 31(4): 511-520.
- [26] Herngren L, Goonetilleke A, Ayoko G A. Understanding heavy metal and suspended solids relationships in urban stormwater using simulated rainfall [J]. Journal of Environmental Management, 2005, 76(2): 149-158.
- [27] 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.