

城市地表灰尘-降雨径流系统重金属生物有效性研究

常静^{1,2}, 刘敏^{1*}, 李先华², 林啸¹, 王丽丽¹, 高磊¹

(1. 华东师范大学资源与环境科学学院, 教育部地理信息科学重点实验室, 上海 200062; 2. 上海大学通信与信息工程学院, 遥感与空间信息科学研究中心, 上海 200072)

摘要:以上海中心城区为例, 定点采集地表灰尘、径流悬浮物、雨水口和河流沉积物, 探讨重金属在地表灰尘-降雨径流系统中的环境行为及其生物有效性变化。研究表明, 研究区域地表灰尘重金属浓度高于上海土壤背景值, 其中 Zn、Pb、Cd 和 Cu 高出 5~7 倍, Cr 和 Ni 高出 2 倍, 径流非点源污染 Pb、Cr 和 Ni 贡献较大, Cd、Cu 和 Zn 污染程度较轻。多介质赋存形态研究表明, 重金属生物有效性依次为 $Zn > Ni > Cd > Cu > Pb > Cr$ 。其中 Cr、Zn 和 Cu 在 4 种介质中分别以残渣态、碳酸盐态和有机态为主; Ni 地表灰尘以残渣态为主, 其它 3 种介质以碳酸盐态为主; Cd 地表灰尘以有机态为主, 径流悬浮物以非稳定形态为主; Pb 在迁移过程中主导形态由铁锰结合态变为有机态。非稳定形态(F1 + F2)在径流悬浮物组分中占有最高比例, 6 种重金属迁移比率平均值为 1.74, 说明从地表灰尘到径流颗粒物, 重金属生物有效性明显升高, 径流水体毒性和潜在生态效应值得关注; 雨水口和河流沉积物残渣态含量较高, 成为重金属在城市地表环境迁移的蓄积库。

关键词: 重金属; 地表灰尘-降雨径流系统; 多介质环境; 生物有效性

中图分类号: X502 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)08-2241-07

Bioavailability of Heavy Metals in Urban Surface Dust and Rainfall-Runoff System

CHANG Jing^{1,2}, LIU Min¹, LI Xian-hua², LIN Xiao¹, WANG Li-li¹, GAO Lei¹

(1. Key Laboratory of Geographic Information Science of Ministry of Education, School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Research Center of Remote Sensing and Spatial Information Science, School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: A sequential digest was used to examine the speciation of particulate-associated heavy metals in multi-media environment of surface dust and rainfall-runoff system. Within the Shanghai central district, different environment medium in four sites were sampled including street dust, runoff suspended particles, gully pot sediment and river sediment during April 2006. The result shows that in the study area, heavy metal concentrations of surface dusts are significantly higher than the Shanghai soil background values and the nonpoint runoff pollution of Pb, Cr and Ni are serious while Cd, Cu and Zn pollution degree relatively light. In the multi-media transport process, the order of heavy metal bioavailability is $Zn > Ni > Cd > Cu > Pb > Cr$. For Cr, Zn and Cu, the dominated chemical forms of the four different environmental media remain the same phase of residual, carbonates and organic fractions respectively. For Ni, the main fraction of surface dust is associated with residual form, while the other three media become associated with carbonate fractions. For Cd, the surface dust is mainly associated with carbonates, while runoff particles mainly with labile fractions. The dominated chemical form of Pb also changes from Fe/Mn oxides phase to organic phase. The runoff particles contain the highest percentage of the labile fraction (F1 + F2), and the mean value of transporting ratio of the runoff suspended particles equals to 1.74, indicating that in urban runoff water, the high bioavailability of the heavy metals and the potential toxicity effect deserves our attention greatly. In gutter inlet and rivers deposit components, the low percentages of the labile fraction and the higher content of residual fraction reduce the environmental risk of the heavy metals and act as the sink of these elements.

Key words: heavy metal; surface dust and rainfall-runoff system; multi-media environment; bioavailability

城市非点源污染指降雨径流淋洗与冲刷大气和汇水面各种污染物引起的受纳水体污染, 是城市水环境污染的重要因素。城市地表环境是多介质交互作用、多界面汇集的复杂系统, 污染物在各自然要素中的分布具有多源性和不均匀性, 从物质迁移的系统角度认识非点源污染物在各个环节的分配特征有着重要意义。国外不少研究做出了有益的尝试^[1~10], Charlesworth 等^[1~3]以英国考文垂为例, 采集“地表灰尘-雨水口沉积物-河流沉积物”, 研究了重金属迁移转化特征; Duzgoren 等^[4,5]研究了广州“地表灰尘-交通隧道灰尘-雨水口沉积物”重金属分布特征与来

源。目前国内关于单一介质如地表灰尘、降雨径流、河流沉积物等环境介质的重金属污染研究较多^[11~19], 但有关重金属物质迁移的整体性研究较少。鉴于此, 本实验从物质源汇迁移的角度出发, 在建立污染物城市地表环境系统循环概念模式的基础上, 定点采集不同环境介质样品, 研究重金属在“地表灰尘-降雨径流”系统迁移过程中生物有效性的变

收稿日期: 2008-08-16; 修订日期: 2008-10-15

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40730526)

作者简介: 常静(1980~), 女, 博士, 主要研究方向为城市环境与多界面过程, E-mail: cj1221@yahoo.cn

* 通讯联系人, E-mail: mliu@geo.ecnu.edu.cn

化,以期从总体上把握重金属污染物在城市地表多介质环境系统的环境行为,为城市非点源污染控制与治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 地表污染物迁移概念模式

从城市地表环境格局和物质循环角度出发,建

立污染物地表迁移的路线和概念模式(如图 1).不透水地面是城市下垫面分布最广的组成部分,广泛分布其上的地表灰尘成为污染物的主要载体^[1],降雨是城市地表环境物质循环的动力因素,雨水口成为连接地表环境和雨水管网之间的通道,城市汇水流域(urban catchment)是控制污染物城市地表环境迁移转化的基本单元.

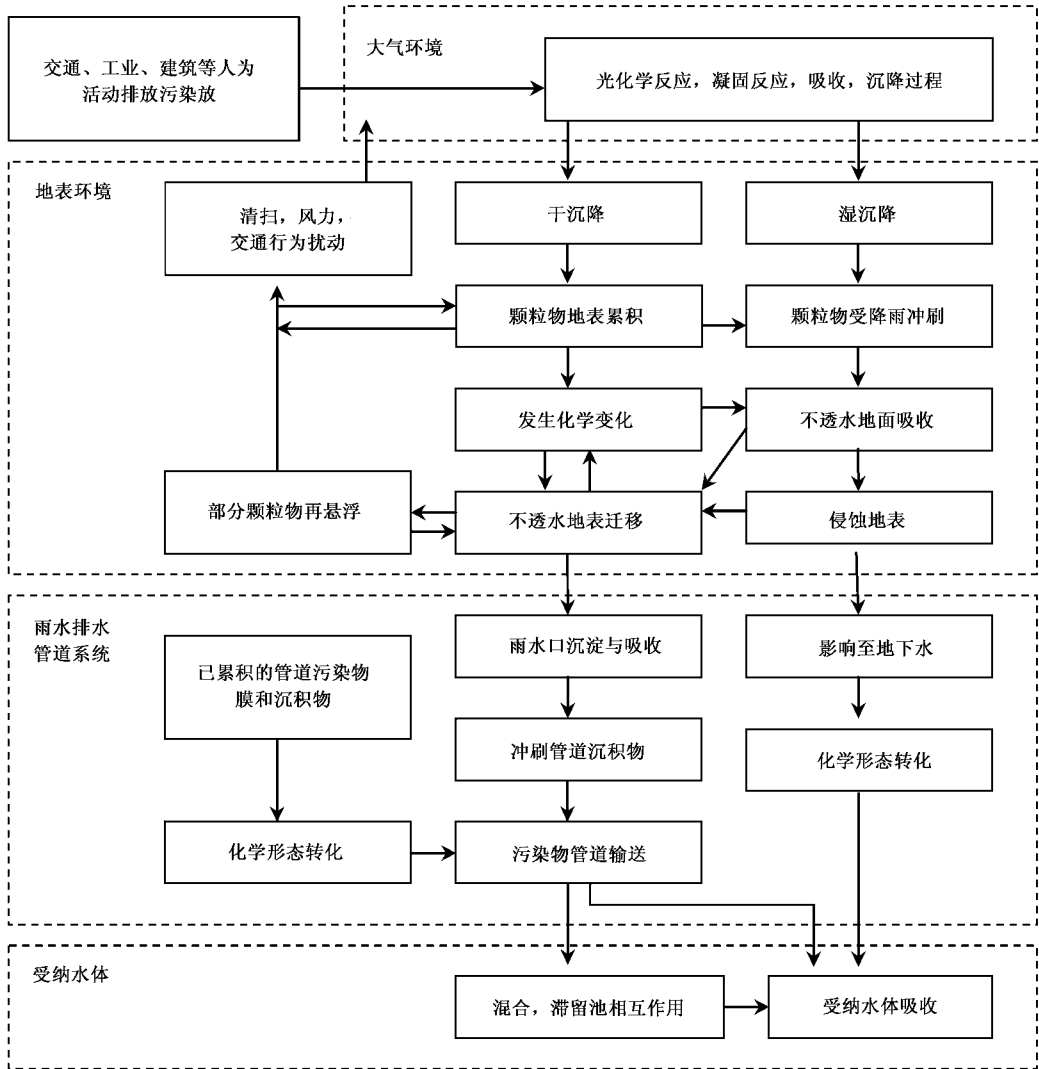


图 1 污染物城市地表环境系统循环模式

Fig.1 Transport processes of pollutants in urban surface dust and rainfall-runoff system

在污染物城市地表环境循环过程中,降雨径流成为各个环境介质之间的有机联系,触发了污染物在各个介质之间的动态迁移,在这个过程中,复杂的水化学条件不断地作用于各个界面过程,影响着污染物在不同组分中的环境行为,最终形成整个流域地表环境系统内物质的再分配.

1.2 样品采集与分析

选择位于上海市中心区苏州河沿岸的 4 个不同功能区样点作为采样区域,华东师范大学校园(XY)为典型文教区内部道路,周围绿化覆盖率较好;中山北路华东师范大学路段(JT)为典型交通区,城市内环高架道路,交通流量较大;中山北路天山茶城(TS)为小商业聚集区,人流较多;枣阳路华东师范大学路段(ZY)为学校周围街道,人流及餐饮摊点较多.分

别在上述 4 个样点采集地表灰尘(S1)、径流悬浮物(S2)和雨水口沉积物(S3),苏州河沉积物(S4)采样点设于芙蓉江雨水泵站溢流口附近,靠近上述 4 个样点所在汇水域的出口.按照物质迁移路线采集不同环境介质,在一定程度上反映出了污染物从地表累积到径流冲刷、雨水口输送,直至排水管道输出、进入受纳水体等一系列界面过程中的物质源-汇迁移关系.

采样时间为 2006 年 4 月,用塑料铲和毛刷在每个样点固定的路缘石区域采集地表灰尘,混合均匀作为该样点代表性样品,将低于 500 μm 粒径颗粒物作为地表灰尘有效样品^[14].径流采样区域为采集地表灰尘的相同区域雨水口附近,降雨事件为 2006-04-04 及 2006-04-08 降雨,在降雨全过程中采用 2 L 聚乙烯瓶人工采集地表径流样品,混合均匀作为每个样点径流样品.在实验室内用真空抽滤装置将充分摇匀的径流水样过 0.45 μm 微孔滤膜,不锈钢刮刀刮取悬浮颗粒物样品,低温烘干后研磨均匀待测.雨水口沉积物采集方法参考文献[1],用专用维护工具打开雨水口井盖,将绑有 1 m 长伸缩杆的专用勺状采样器伸入水面以下,静置数 min,待水体与颗粒

物充分混合均匀,取出采样器,将沉积物样品装入密封袋,带回实验室冷冻保存.用抓斗式采泥器在芙蓉江泵站溢流口采集苏州河沉积物样品,装入可密封的聚乙烯塑料袋中,带回实验室冷冻保存,所有沉积物样品在低于 40℃ 条件下烘干后研磨均匀待测.重金属赋存形态分析采用改进的 Tessier 分级提取法^[3],依次提取重金属的可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残渣态.采用 AANALYST800 型原子吸收光谱仪测定,其中 Cu、Zn、Ni、Cr 及 Pb 测定采用火焰法,Cd 采用石墨炉法.

2 结果与分析

2.1 重金属多介质总量

图 2 为不同环境介质重金属总量变化.可以看出,4 个样点重金属显示出较一致的空间分布特征,总体上重金属从源到汇,浓度呈下降趋势.Zn 和 Cd 在径流颗粒物中浓度最高;Pb、N、Cu 和 Cr 在地表灰尘中浓度最高,其次为雨水口沉积物,径流颗粒物中最低,这种相似的多介质分布特征在一定程度上反映了重金属元素物质来源和环境行为的相似性.

Charlesworth 等^[1]对 < 2 mm 和 < 63 μm 两组粒径

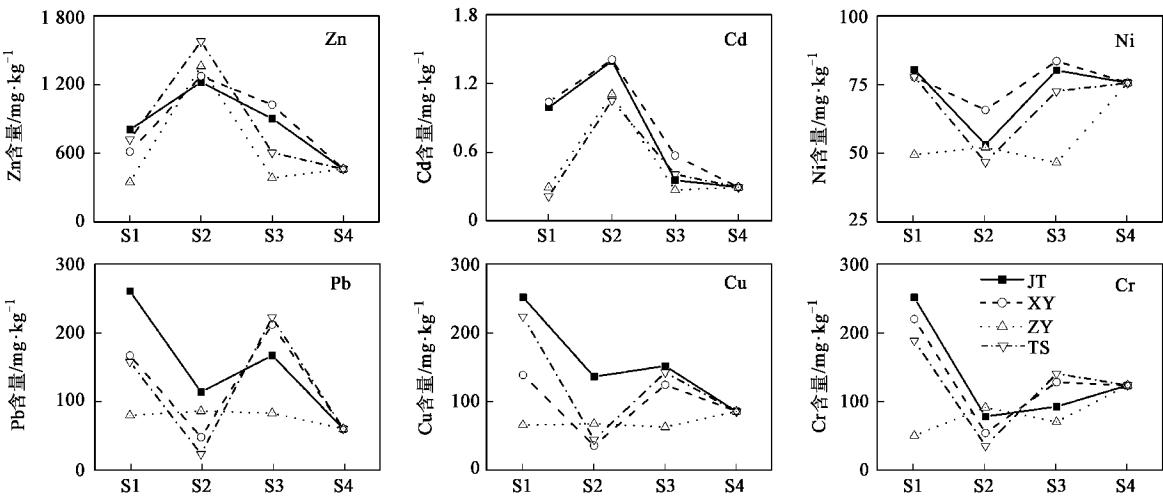


图 2 不同环境介质重金属总量变化

Fig.2 Variation of heavy metal concentration in the different environmental components

分布的不同环境介质研究表明,Pb、Cu 及 Cd 在雨水口和河流沉积物中含量最高,Zn 和 Ni 则在雨水管道沉积物中浓度最高,重金属总量变化受到粒径分布的影响,而其赋存形态在不同环境介质中的变化趋势相同,与粒径分布无关.Duzgoren 等^[4]研究表明,不同样点地表灰尘和雨水口沉积物重金属含量的高低并非一一对应,反映了粒径分布、多源性物质

输入等多种因素对污染物含量的影响.章明奎等^[20]研究表明,土壤重金属总量与径流中重金属浓度相关并不明显,反映了 pH 等环境化学条件以及颗粒物本身重金属形态特征对其多介质含量的影响.表 1 为 4 个样点不同环境介质重金属总量浓度的平均值,同时给出了上海土壤重金属背景值和苏州河沉积物重金属平均值.

表 1 地表灰尘、降雨径流系统颗粒态重金属总量浓度平均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 1 Mean values of heavy metal concentrations in the different environmental components/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

环境介质与指标	Zn	Cd	Pb	Cu	Cr	Ni
地表灰尘(S1)	621.89	0.64	166.63	170.30	178.01	66.31
径流悬浮颗粒物(S2)	1 116.71	0.83	67.76	70.87	64.59	54.63
雨水口沉积物(S3)	973.47	0.41	171.51	120.34	107.89	68.88
苏州河芙蓉江路段沉积物(S4)	460.86	0.30	60.04	85.54	123.65	74.06
上海土壤背景值 ^[17]	86.10	0.13	25.47	28.59	75.00	31.90
苏州河沉积物平均值 ^[18]	512.7	2.0	39.2	234.4	44.2	48.1

可以看出,地表灰尘重金属含量远高于上海土壤背景值,其中 Zn、Pb、Cd 和 Cu 高出 5~7 倍,Cr 和 Ni 高出 2 倍.与苏州河沉积物重金属平均值相比,Cd 和 Cu 的 4 种环境介质含量都低于苏州河总体污染水平.Zn 的径流和雨水口组分较高,河流沉积物低于苏州河沉积物平均水平;Pb、Cr 和 Ni 的径流悬浮物、雨水口和河流沉积物浓度都高于苏州河平均水平,说明在苏州河芙蓉江路段,这 3 种重金属的降雨径流非点源污染贡献较大.

2.2 重金属多介质赋存形态

赋存形态是评价重金属污染程度及潜在生态危害的重要因素.可交换态(F1)最易被生物吸收利用;碳酸盐结合态(F2)在 pH 变化时较易重新释放进入水体,铁锰氧化态(F3)在还原环境变化时会部分释放;有机结合态(F4)不易被生物吸收利用;残渣态(F5)主要来源于天然矿物,稳定存在于矿物晶格里,对生物无效.因此,可交换态和碳酸盐结合态含量(F1 + F2)可作为重金属生物有效性指标,称为“非稳定态”^[19].重金属在各个赋存形态中的分配通常以

各形态含量占总量的百分比,即各形态重金属浓度的质量分数来表示,表 2 和图 3 为重金属在 4 个环境组分中赋存形态质量分数的变化,表 2 中黑体数字为重金属在不同环境介质中的主导形态,即 5 种形态中质量分数最大值,其中对 Ni 的雨水口沉积物而言,其主导形态为非稳定形态(F1 + F2).

从表 2 和图 3 可以看出,Cr、Zn 和 Cu 在 4 种环境介质中的主导形态未发生变化.Cr 在 4 种介质中都以残渣态为主,其余 4 种形态含量较低且较为稳定,说明 Cr 在迁移过程中主导形态以残渣态为主,生物有效性较低,对环境危害相对较小.Zn 和 Cu 在 4 种介质中都分别以碳酸盐态和有机结合态为主,说明 Zn 的生物有效性要高于 Cu,在 4 种环境介质中,Zn 为径流悬浮物的碳酸盐态含量最高,径流水体可以析出更多的活性态 Zn 进入环境;而 Cu 则是径流悬浮物的有机结合态和残渣态含量最低,与其他 3 种环境介质相比,Cu 在径流水体的生物活性更高.Pb、Cd 和 Ni 则在迁移过程中主导形态发生了变化.Pb 在 4 种介质中主导形态由铁锰结合态变为有

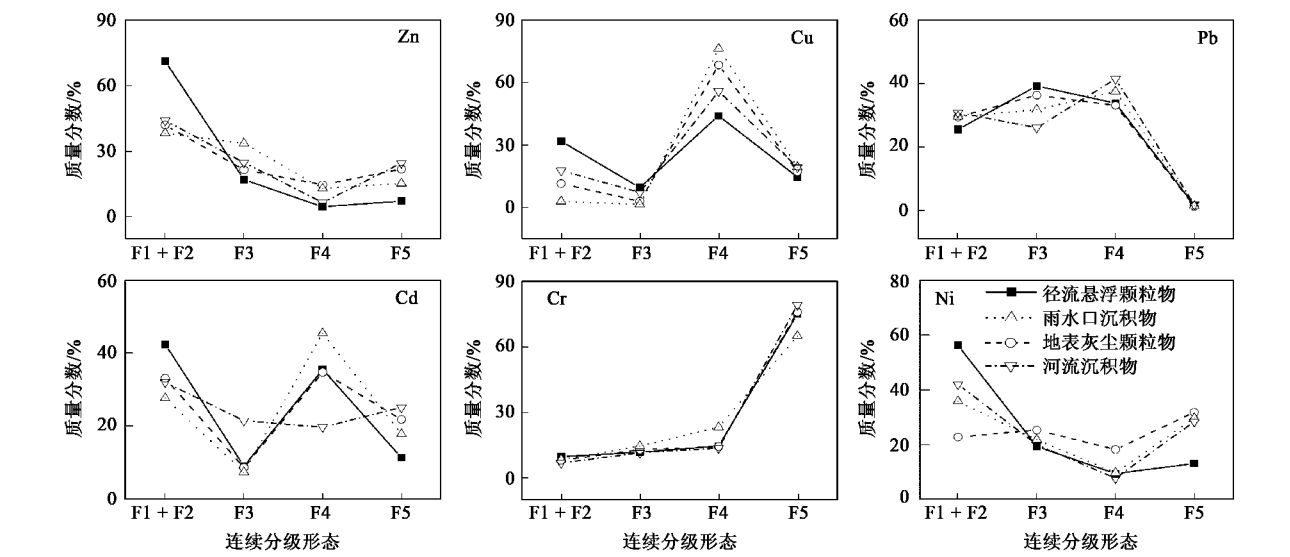


图 3 不同环境介质重金属赋存形态质量分数

Fig.3 Percentages of the heavy metals bound to each speciation fraction in different environmental components

表 2 不同环境介质重金属赋存形态质量分数/%

Table 2 Percentages of the heavy metals bound to each speciation fraction in different environmental media/%

重金属	环境介质	F1	F2	F3	F4	F5
Zn	地表灰尘(S1)	1.52	40.45	21.51	14.69	21.84
	径流悬浮颗粒物(S2)	3.74	67.51	16.99	4.61	7.15
	雨水口沉积物(S3)	1.61	36.67	33.54	12.91	15.27
	苏州河沉积物(S4)	1.05	42.99	24.78	6.53	24.64
Cu	地表灰尘(S1)	2.93	8.54	2.94	68.42	17.17
	径流悬浮颗粒物(S2)	9.99	21.83	9.58	44.07	14.53
	雨水口沉积物(S3)	1.42	1.44	1.43	76.30	19.40
	苏州河沉积物(S4)	5.48	12.21	7.21	55.82	19.28
Pb	地表灰尘(S1)	3.22	26.20	36.28	33.08	1.23
	径流悬浮颗粒物(S2)	13.31	12.19	39.16	33.78	1.57
	雨水口沉积物(S3)	1.88	27.63	31.70	37.43	1.36
	苏州河沉积物(S4)	3.43	27.39	25.99	41.44	1.76
Cd	地表灰尘(S1)	1.44	32.11	9.02	35.20	22.23
	径流悬浮颗粒物(S2)	0.89	41.98	9.42	35.92	11.79
	雨水口沉积物(S3)	0.64	27.44	7.78	45.93	18.20
	苏州河沉积物(S4)	0.65	31.82	21.88	20.13	25.52
Cr	地表灰尘(S1)	2.35	1.96	9.38	10.80	75.52
	径流悬浮颗粒物(S2)	4.45	1.60	8.28	11.08	74.58
	雨水口沉积物(S3)	2.31	2.26	11.13	20.25	64.05
	苏州河沉积物(S4)	1.51	1.54	7.90	10.13	78.92
Ni	地表灰尘(S1)	5.60	17.65	25.770	18.66	32.32
	径流悬浮颗粒物(S2)	10.30	46.50	19.78	9.83	13.60
	雨水口沉积物(S3)	8.00	28.27	22.28	10.11	30.16
	苏州河沉积物(S4)	11.49	31.05	20.40	8.19	28.86

机结合态,生物有效性依次降低.Ni 地表灰尘以残渣态为主,其它介质以碳酸盐态为主,生物有效性有所升高.Cd 地表灰尘和雨水口沉积物以有机结合态为主,径流悬浮物和河流沉积物以碳酸盐态为主,且径流悬浮物碳酸盐含量最高,表明径流水体中 Cd 活性态析出更多.

可以看出,除 Pb 以外,非稳定形态(F1 + F2)在其它 5 种重金属的径流悬浮物组分中都占有最高的比例.Zn 的非稳定形态在 4 种环境介质中差别较大,悬浮物为 71.3%,其它 3 种介质为 40% 左右;Cd 径流悬浮物为 42.8%,其它 3 种介质为 30% 左右;Cu 地表灰尘为 11.5%,悬浮物上升至 31.8%,之后雨水口下降为 2.9%,河流沉积物为 17.9%.Ni 地表灰尘非稳定态为 23.3%,悬浮物上升至 56.8%,雨水口和河流沉积物则下降为 40% 左右.Charlesworth 等^[2,3]研究表明,重金属在迁移过程中表现出了共同的变化趋势,即从地表灰尘到雨水口和河流沉积物,非稳定形态含量依次升高,其中 Cu 以雨水口沉积物非稳定形态最高.

2.3 重金属多介质生物有效性

地表灰尘是径流污染的主要来源,从重金属在城市多介质环境中源汇迁移的角度出发,定义重金

属赋存形态的迁移比率.分别将径流悬浮物、雨水口以及河流沉积物 3 种环境介质的赋存形态含量与地表灰尘相应的形态含量相比,得到重金属在不同环境介质中赋存形态的迁移比率,比值 > 1,说明在迁移过程中此形态含量有所上升,反之则下降.图 4 为 6 种重金属在不同环境介质中各赋存形态迁移比率的变化,曲线为 6 种重金属迁移比率的平均值.

可以看出,重金属赋存形态在迁移过程中表现出了不同的变化趋势.其中非稳定形态(F1 + F2)和铁锰氧化态(F3)变化趋势类似,4 种介质中径流悬浮物迁移比率最高,雨水口有所下降,河流沉积物略有回升.有机结合态(F4)径流悬浮物的迁移比率最低,河流沉积物次之,雨水口环节迁移比率最高.残渣态(F5)径流悬浮物的迁移比率最低,经雨水口逐渐增加,河流沉积物迁移比率最高.

从变化范围看,非稳定形态(F1 + F2)迁移比率变化最为明显,除 Pb 外,其余 5 种金属径流悬浮物迁移比率都大于 1,其中 Cu 和 Ni 在 2 ~ 3 之间,其次 Zn 为 1.8, Cr 和 Cd 在 1.4 左右,6 种重金属迁移比率平均值为 1.74,说明从地表灰尘到径流悬浮物,重金属生物有效性呈明显上升趋势.铁锰氧化态(F3)变化相对而言比较缓和,Cu 由于铁锰氧化态含

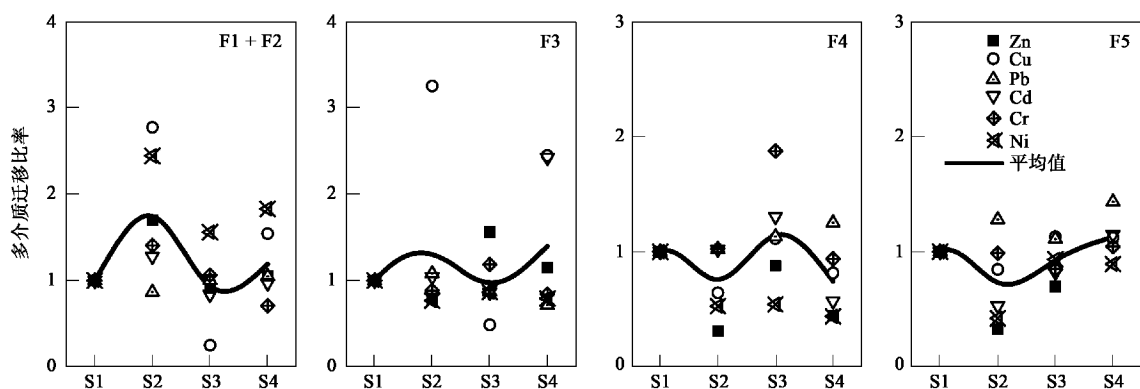


图4 不同环境介质重金属赋存形态迁移比率

Fig.4 Heavy metal transport ratios in different environmental components

量比较低,地表灰尘 2.9% 上升至径流悬浮物 9.5%,达到了 3 倍以上,雨水口 Zn、Cr 为 1.6 和 1.2,河流沉积物 Cu、Cd 为 2.4,其余重金属各组分 F3 迁移比率都小于 1. 有机结合态(F4)变化趋势较为明显,雨水口环节显著上升,其原因可能与晴天雨水口的人为污染的有机物输入较多,对重金属吸附作用较为明显,径流环节重金属迁移比率都小于 1,河流沉积物除 Pb 以外迁移比率也都小于 1.

残渣态(F5)变化趋势中 Pb 比较特殊,径流悬浮物、雨水口和河流沉积物迁移比率都大于 1,说明 Pb 在迁移过程中,各个环节都起到了去除作用,生物有效性逐渐降低.而其它 5 种重金属径流悬浮物组分残渣态显著下降,增加了径流水体的生态毒性;雨水口和河流沉积物组分残渣态迁移比率逐渐上升,说明这 2 个环节对重金属生物有效性都起到了一定的去除作用,成为重金属“蓄积库”.

3 讨论

在以降雨径流为主要驱动力的污染物地表环境迁移过程中,污染物进入下一个环境组分时,总要有新的污染源加入,出现新的控制因子,使得污染物在不同环境组分间的分配和理化特征更为复杂.颗粒物不断经受着分选、混合以及储存等各种与水动力条件有关的界面过程^[1],重金属的吸附-解吸、水解、沉淀等一系列环境行为也都要受到水化学条件,如 pH、Eh、水温及离子强度等因素的影响.

地表灰尘颗粒物来源于自然降尘、交通活动以及人为丢弃物等,处于较为干燥的环境,以交换态存在的重金属元素在中性条件下可释放出来,而碳酸盐结合态对 pH 最敏感,在酸性条件下易释放.在降雨条件下,受到较低酸性水环境条件的影响,重金属

溶出量均随 pH 的降低而增大^[21],使得径流悬浮物的非稳定形态比例明显增加.雨水口是非点源污染物进入水环境的首要通道,其干湿交替的微观环境,成为一个“较为封闭的生物化学反应器”^[9],无雨时间长短,降雨事件以及外源物质输入等,都可以使其 pH 和 Eh 值变化频繁,而且雨水口沉积物中有机物含量较高,使得铁锰氧化态易于被还原,影响重金属的形态分布^[9].

雨水管道沉积物是排水系统溢流污染很重要的物质来源^[15,16],上海市多数分流制系统均存在不同程度的雨污混接现象,而且其管道沉积状况也十分严重^[22].管道内表面、管底沉积物和污水中存在大量高活性的微生物,与有机污染物质之间进行着复杂的物理、化学和生物学过程,对重金属的吸附-解析过程也有很重要的影响.河流沉积物作为污染物汇水域迁移的汇,在条件合适的时候,由于沉积物-水界面的扰动,使得底泥重金属有二次释放的可能.

综上所述,由于污染物在城市地表环境中的迁移过程较为复杂,不同环境介质重金属赋存形态的变化影响因素众多,本研究只是粗浅提出了多介质研究的基本思路,还应加强以城市汇水域为基本单元的污染物环境行为分析,尤其是对降雨径流水体的长期监测,为城市非点源污染控制与治理提供科学依据.

4 结论

(1) 研究区地表灰尘重金属浓度高于上海土壤背景值,其中 Zn、Pb、Cd 和 Cu 高出 5~7 倍,Cr 和 Ni 高出 2 倍,Pb、Cr 和 Ni 径流非点源污染贡献较大,Cd、Cu 和 Zn 污染程度较轻.

(2) 在重金属多介质迁移过程中,生物有效性

依次为 Zn > Ni > Cd > Cu > Pb > Cr. 其中 Cr、Zn 和 Cu 在 4 种介质中主导形态未发生变化, 分别以残渣态、碳酸盐态和有机结合态为主. Ni 地表灰尘以残渣态为主, 其它 3 种介质以碳酸盐态为主. Cd 地表灰尘以有机态为主, 径流悬浮物以非稳定形态为主. Pb 在迁移过程中主导形态由铁锰结合态变为有机态.

(3) 从地表灰尘到径流悬浮物, 非稳定形态比例(F1 + F2)明显增加, 6 种重金属迁移比率平均值为 1.74, 生物有效性呈上升趋势, 径流水体毒性和潜在生态效应值得关注; 雨水口和河流沉积物组分残渣态含量较高, 一定程度上降低了重金属生物有效性, 成为重金属在地表环境迁移中的蓄积库.

参考文献:

[1] Charlesworth S M, Lees J A. The distribution of heavy metals in deposited urban dusts and sediments, Coventry, England [J]. Environmental and Geochemistry and Health, 1999, **21**: 97-115.

[2] Charlesworth S M, Lees J A. Particulate-associated heavy metals in the urban environment: Their transport from source to deposit, Coventry, UK [J]. Chemosphere, 1999, **39**(5): 833-848.

[3] Charlesworth S M, Lees J A. The transport of particulate-associated heavy metals from source to deposit in the urban environment, Coventry, UK [J]. Science of the Total Environment, 1999, **235** (1): 351-353.

[4] Duzgoren-Aydin N S, Wong C S, Aydin A, *et al.* Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2006, **28**(4): 375-391.

[5] Duzgoren-Aydin N S. Sources and characteristics of lead pollution in the urban environment of Guangzhou [J]. Science of the Total Environment, 2007, **385**: 182-195.

[6] Jartun M, Ottesen R T, Steinnes E, *et al.* Runoff of particle bound pollutants from urban impervious surfaces studied by analysis of sediments from stormwater traps [J]. Science of the Total Environment, 2008, **396**: 247-263.

[7] Birch G F, Scollen A. Heavy metals in road dust, gully pots and

parkland soils in a highly urbanized sub-catchment of Port Jackson, Australia [J]. Australian Journal of soil research, 2003, **41**: 1329-1342.

[8] Dexter K S, Ward N I. Mobility of heavy metals within freshwater sediments affected by motorway stormwater [J]. Science of the Total Environment, 2004, **334**: 271-277.

[9] Morrison G M, Revitt D M, Ellis J B. The gully pot as a biochemical reactor [J]. Water Science and Technology, 1995, **31**(7): 229-236.

[10] Garnaud S, Mouchel J M, Chebbo G. Heavy metal concentrations in dry and wet atmospheric deposits in Paris district: comparison with urban runoff [J]. Science of the Total Environment, 1999, **235**: 235-245.

[11] 王春梅, 欧阳华, 王金达, 等. 沈阳市多介质环境铅污染研究 [J]. 中国环境科学, 2003, **23**(4): 358-362.

[12] 车伍, 刘燕, 李俊奇. 城市雨水口垃圾污染调查与研究 [J]. 城市环境与城市生态, 2003, **16**(6): 153-155.

[13] 常静, 刘敏, 许世远, 等. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应 [J]. 地理研究, 2006, **25**(6): 994-1002.

[14] 常静, 刘敏, 侯立军, 等. 城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应 [J]. 应用生态学报, 2007, **18**(5): 1153-1158.

[15] 李贺, 李田. 上海高密度居民区合流制系统雨天溢流水质研究 [J]. 环境科学, 2006, **27**(8): 1565-1569.

[16] 徐贵泉, 陈长太, 张海燕. 苏州河初期雨水调蓄池控制溢流污染影响研究 [J]. 水科学进展, 2006, **17**(5): 705-708.

[17] 史贵涛, 陈振楼, 许世远, 等. 上海城市公园土壤及灰尘中重金属污染特征 [J]. 环境科学, 2007, **28**(2): 238-242.

[18] 周立旻, 郑祥民, 殷效玲. 苏州河沉积物中重金属的污染特征及其评价 [J]. 环境化学, 2008, **27**(2): 269-270.

[19] Lee P K, Yu Y H, Yun S T, *et al.* Metal contamination and solid phase partitioning of metals in urban roadside sediments [J]. Chemosphere, 2005, **60**: 672-689.

[20] 章明奎, 夏建强. 土壤重金属形态对径流中重金属流失的影响 [J]. 水土保持学报, 2004, **18**(4): 1-3.

[21] 冯素萍, 张玉玲. 降尘中重金属的形态及其在模拟酸雨下的溶出规律 [J]. 环境科学研究, 2007, **20**(4): 40-44.

[22] 谭琼, 李田, 高秋霞. 上海市排水系统雨天出流的初期效应分析 [J]. 中国给水排水, 2005, **21**(11): 26-30.