

镇江城市道路沉积物中重金属污染的来源分析

朱伟^{1,2}, 边博^{1*}, 阮爱东²

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 道路沉积物是一重要环境介质, 其颗粒物积累的潜在毒性对于城市水体是一重要危害, 因此, 识别道路沉积物重金属的含量及来源就显得尤其重要. 分析了采集于镇江市商业区、河滨公园、居民区和交通繁忙区的 62 个样品中的 Zn、Pb、Cu、Cr 和 Ni 5 种重金属, 它们在交通繁荣区含量最大, Zn、Cu、Cr 和 Ni 含量在商业区、河滨公园和居民区并无明显差异. 通过主成分分析识别道路沉积物中重金属的来源, 发现不同功能区的重金属来源有所差别, 各功能区中第一主成分(贡献率 70% 以上)代表来自交通活动产生的污染源, 或者是与工业污染源共同产生的混合污染源; 第二主成分代表来自工业污染源或者是生活污染源, 并且道路沉积物中重金属与有机质显著相关, 最后计算了重金属浓度富集率(CER), 以评价人类活动对于重金属污染的影响程度. 结果表明, 有机质是镇江城市道路沉积物中重金属的重要载体, 人类活动对于该地区重金属污染影响达到中等或中等以上的程度.

关键词: 道路沉积物; 重金属来源; 主成分分析; 浓度富集率

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)07-1584-06

Analysis of Sources of Heavy Metal Contamination in Road-Deposited Sediment from Zhenjiang

ZHU Wei^{1,2}, BIAN Bo¹, RUAN Ai-dong²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract Road-deposited sediments (RDS) were an important environmental medium which particulates accumulated potentially toxic pollutants, ultimately posing a threat to urban water-bodies, and therefore it was important to recognize sources and concentrations of heavy metal. 62 samples from commercial areas, residential areas, intense traffic areas and riverside park respectively in Zhenjiang were analyzed for Zn, Pb, Cu, Cr and Ni. The results indicated remarkably high levels of five metals in the intense traffic area, whilst Zn, Cu, Cr and Ni did not show any discernible variations in other three areas. Principal component analysis was applied to identify the sources of heavy metal contamination. The first factor (source) spanning the greater amount of variance (70%) should be vehicular source or source of mixed origin including industrial and vehicular, and the second factor should be industrial or life sources. The metals are strongly correlated to the amount of organic matter. Finally, concentration enrichment ratio was used to assess degree of metal contamination affected by anthropogenic. The results showed that organic matter was the carrier of heavy metal in RDS and RDS in Zhenjiang had a moderate anthropogenic signals or excess moderate anthropogenic signals.

Key words: road-deposited sediment (RDS); sources of heavy metal; principal component analysis (PCA); concentration enrichment ratio (CER)

随着中国城市人口的急剧增长和工业生产的快速发展, 城市水体污染日益严重, 而降雨径流污染已经逐渐成为城市水体污染的主要来源之一^[1], 对于降雨径流污染的控制, 由于其发生时的随机性和污染源的不易确定性, 控制起来较为复杂.

城市降雨径流污染主要来自于降雨冲刷城市道路沉积物(RDS)^[1~3], RDS 中含有很高的重金属, 这些污染物对于接纳水体的污染起着决定性的作用^[4~6]. 因此, 若要控制城市水体污染, 就需识别 RDS 的污染源. 由于 RDS 的特性比较复杂, 不同特性对于其吸附行为有不同程度的影响, 而有机质亦为影响 RDS 吸附的重要特性^[7~9], 同时, 城市不同土地利用类型的功能分区, 构成了复杂的城市区域, 影响着 RDS 的重金属来源及其分布. 因此, 本文在了解 RDS 重金属和有机质含量水平的基础上, 应用主成分分析法研究了城市功能区 RDS 中重金属来源的可能途径, 旨在为评价 RDS 污染的人为影响程度及城市降雨径流污染的控制和管理提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究区的概况和选择

镇江市地处长江三角洲顶端, 长江和京杭大运

收稿日期: 2006-08-11; 修订日期: 2006-11-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601100); 浅水湖泊治理与资源开发教育部重点实验室开放研究基金项目

作者简介: 朱伟(1962~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为污染水体的生态修复技术, E-mail: weizhu863@126.com

* 通讯联系人, E-mail: bianbo1@163.com

河在此交汇,城市已形成商业区、居民区、河滨公园、交通主干道等功能区布局(图 1),商业区位于市中心,旁边有交通干道,平均人流量为2 561 人/h;居民区为老住宅区,区内道路为临时停车场,平均人流量为 651 人/h,平均交通流量汽车 121 辆/h,摩托车 306 辆/h;河滨公园处于老城区,毗邻城市交通要道;选取市区重要的 4 条主干道:长江路、解放路、中山路和电力路作为交通繁忙区,平均车流量为1 438辆/h,其中大型车辆所占比例为 18.6%.

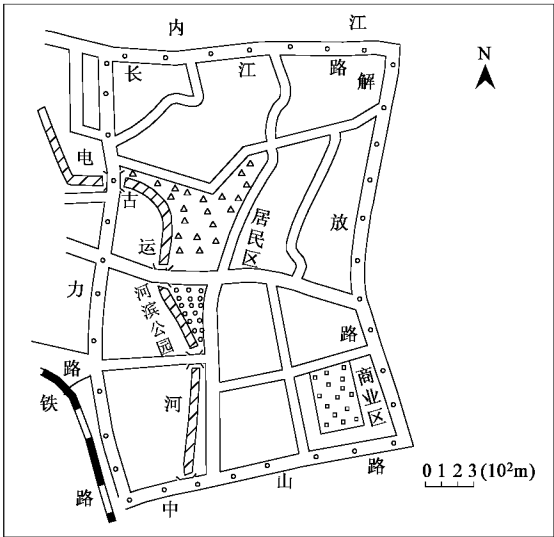


图 1 采样点分布示意

Fig.1 Map of study areas and sampling locations

1.2 样品采集和分析

2006-03 在所选功能区随机布点进行采样,采样点布于距离街道边坎 1 m 以内(1 m 内聚集绝大部分 RDS),采样时间远离道路清扫时段,在 1 m² 范围内,用干净的细毛刷分别采集大约 60~500 g 样品,共 62 个,装入样品袋待测,同时采集土壤原样作为对照样.样品在 105℃ 条件下烘干 48 h^[10],取粒径 < 2 000 μm 的 RDS 样品 0.3 g^[11,12],置于微波消解罐中,加入 6 mL HNO₃, 3 mL HF, 3 mL HClO₄,在 speed wave MWS-3⁺ 消解炉中进行消解,待冷却至室温后,于电热板加热赶酸后,加入少量硝酸溶液,温热溶解残渣,其后用原子吸收法测定重金属的含量.

过 1 mm 孔径筛后的样品与超纯水按质量比 1:2.5 放于烧杯中混合,用玻璃棒剧烈搅动 1~2 min,静置 30 min 后,用 pH 计测定.

称取 0.1~0.5 g 过 1 mm 孔径筛的样品置于硬质试管中,采用重铬酸钾-外加热法测定样品中的有机质^[13].

1.3 城市 RDS 人为污染程度的评价

利用浓度富集率(concentration enrichment ratio, CER)来评价 RDS 的人为污染程度,以人类活动影响较小的保守元素——锰为背景参比元素,采用下式计算 RDS 重金属的 CER 值,其污染程度分级标准如表 1 所示^[12,14].

CER = (c_{n, RDS}/c_{Mn, RDS}) / (c_{n, B}/c_{Mn, B})

c_{n, RDS} 为样品中金属的含量; c_{n, B} 为土壤中重金属的背景值.

表 1 CER 值的分级标准
Table 1 Grade standard of CER

CER 范围	影响程度
CER < 2	没有或最小限度的人为影响
CER 2~5	中等程度的人为影响
CER 5~20	显著人为影响
CER 20~40	非常强烈人为影响
CER > 40	极其强烈人为影响

2 结果与讨论

2.1 功能区道路沉积物中重金属的含量

由图 2 可见,功能区之间重金属平均含量各不相同.其中 Zn 的平均含量最高(687 mg/kg),变化幅度最大;Pb 的平均含量次之(589 mg/kg),变化幅度也比较大;Cr、Ni 和 Cu 的平均含量依次减少,变化幅度相对较小.5 种金属平均含量的最大值均在交通繁忙区,Zn、Cr、Ni 和 Cu 平均含量在商业区、河滨公园和居民区并无太大差异.功能区 RDS 的 Zn、Pb、Cr、Ni 和 Cu 平均含量分别为镇江市土壤重金属背景值的 7.6、6.8、5.3、1.5 和 1.3 倍;从它们的标准差来看,空间分布差异较大,局部污染严重;从功能区重金属含量的平均值来看,交通繁忙区最大,河滨公园、居民区、商业区含量依次减小.分析表明,交通繁忙区以 Zn、Pb 强污染为特征;其它功能区的重金属污染特征为 Zn 污染.

2.2 城市功能区道路沉积物的 pH 变化

pH 是反映 RDS 基本化学性质的指标之一,pH 值的大小影响重金属的吸附作用以及赋存形态的变化^[7].由表 2 可知,镇江市 RDS 的 pH 平均值为 9.04,范围在 7.10~11.56 之间均呈碱性,高于同一区域土壤的 pH,平均值大小顺序为:交通繁忙区 > 河滨公园 > 居民区 > 商业区.RDS 的物质组成具有多源性的特点,包括含有碱性颗粒的土壤颗粒、有机颗粒、工业产生的烟雾颗粒;路面磨损,路面涂料或

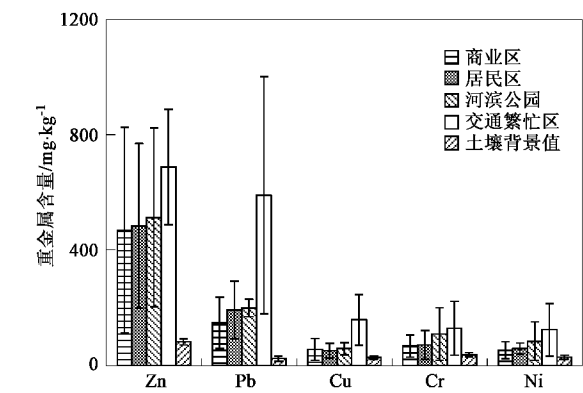


图2 镇江城市功能区 RDS 和土壤背景值重金属元素含量分布

Fig.2 Concentrations of heavy metals in RDS and soil background of Zhenjiang urban different areas

油漆的剥蚀,汽车磨损等产生的碱性物;含有碱性物质的城市建筑材料(如石灰粉),因此 RDS 中 pH 一般高于同一区域土壤的 pH^[12].其中在交通繁忙区道路的两边还有一些污染比较严重的企业,例如蓄电池厂、钛白粉厂、印染厂等,它们所产生的工业灰尘,带有的碱性物质以及路面磨损后所产生的细小颗粒都沉积于道路表面,从而交通繁忙区 RDS 的 pH

值明显高于其它功能区.

2.3 城市功能区道路沉积物的有机质含量

镇江 RDS 中有机质(organic matter, OM)含量范围为 3.44% ~ 17.81%,平均值为 5.62%(表 2),商业区 RDS 的有机质含量明显高于其它功能区,河滨公园、居民区和交通繁忙区有机质含量依次减小. RDS 中有机质主要来源于交通释放的有机污染物质如碳氢化合物、轮胎的磨损、土壤颗粒、风化的建筑材料、植物的残体以及城市垃圾^[14,15],研究发现^[7,9,14,15],不同城市 RDS 有机质含量在 1% ~ 20% 范围之间,平均值为 5% 左右,镇江市 RDS 的有机质含量范围和平均值与上述研究结果比较接近.其中商业区位于市中心闹市区车流量较大,人口密集, RDS 样品颜色明显发黑,组成颗粒较小,其有机质含量最高,主要可能源自于城市生活垃圾、汽车尾气排放以及工业降尘;河滨公园 RDS 颗粒组成细颗粒最多,周边植被较好,其较高的有机质含量可能是来源于大气降尘、土壤颗粒以及植物残体;居民区和交通繁忙区 RDS 的样品颜色发黄,含有沙砾较多,有机质含量较低,其来源可能与相对较集中的生活垃圾、

表2 镇江城市功能区 RDS 的 pH 值和有机质含量

功能区	样本数	pH			有机质%		
		范围	平均值	标准方差	范围	平均值	标准方差
商业区	15	7.10 ~ 8.69	8.42	0.62	8.94 ~ 14.45	12.55	1.35
河滨公园	16	7.83 ~ 10.96	9.13	0.89	6.19 ~ 17.81	9.11	1.54
居民区	21	7.86 ~ 9.67	8.89	0.73	6.55 ~ 9.16	7.39	0.87
交通繁忙区	36	8.20 ~ 11.56	9.72	1.06	3.44 ~ 9.79	8.77	0.91
土壤背景值	8	5.15 ~ 6.73	6.23	0.68	3.12 ~ 5.61	4.56	0.52

交通活动和建筑材料有关.

2.4 城市道路沉积物重金属的相关分析

在同一功能区内,各重金属含量不尽相同,若金属元素之间存在相关关系,说明它们的来源可能是相似的,若不存在相关关系则来源是不同的^[16,17].有机质影响着 RDS 重金属的分布状况,因此将有机质和重金属结合起来,分析它们之间的相关关系,结果如表 3 ~ 6 所示.商业区 5 种金属两两相关,都具有较好的显著性,说明它们的来源可能是相同的;居民区 Pb、Zn 和 Cu 两两相关,说明它们来源可能相同, Cr 和 Ni 相关,且和 Pb 都不相关,说明它们与 Pb 来源可能不同;河滨公园中 Zn 与 Pb、Cu 和 Ni 都具有显著的相关性, Cu-Ni、Cu-Cr 和 Cr-Ni 具有较好相关性且都与 Pb 不相关,它们的来源与 Pb 可能是不同的;交通繁忙区中 Zn-Pb、Zn-Cu、Zn-Ni 和 Pb-Ni 都有

很好的相关性,说明它们可能具有相同的来源, Pb 和 Ni 与 Cu 和 Cr 都不具有相关性,它们的来源是不同的,而 Cu-Cr 具有很强的相关性并达到极显著水平,因此它们可能具有相同的来源. RDS 中的有机质对重金属具有较强的络合能力,重金属以不同形式进入或吸附在有机颗粒上,与有机质络合生成复杂的络合态金属,这种络合态金属绝大多数被固定在沉积物中,较稳定,不易释放^[7,18],镇江 RDS 中有机质与 Zn、Pb、Cu、Cr、Ni 两两相关,说明有机质对于重金属具有很强的吸附性,是 RDS 中重金属的重要载体.

2.5 城市 RDS 重金属来源的主成分分析

目前对于 RDS 重金属来源已基本形成共识: Pb 主要来自汽车燃料的燃烧, Zn 和 Ni 源于汽车轮胎老化磨损、车体的磨损及冶金工业等; Cu、Cr 和 Ni

表 3 商业区 RDS 中重金属和有机质的 pearson 相关系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficients of heavy metals and organic matter in RDS of commercial area

	Zn	Pb	Cu	Cr	Ni
Zn	1				
Pb	0.90 * *	1			
Cu	0.81 *	0.82 *	1		
Cr	0.64 *	0.79 *	0.79 *	1	
Ni	0.96 * *	0.86 *	0.94 * *	0.74 *	1
OM	0.78 *	0.93 *	0.86 *	0.90 * *	0.76 * *

1) * * 相关系数在 0.01 概率水平上显著; * 相关系数在 0.05 概率水平上显著,下同

表 4 居民区 RDS 中重金属和有机质的 pearson 相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients of heavy metals and organic matter in RDS of residential area

	Zn	Pb	Cu	Cr	Ni
Zn	1				
Pb	0.96 * *	1			
Cu	0.80 *	0.92 * *	1		
Cr	0.85 *	0.54	0.51	1	
Ni	0.84 *	0.42	0.37	0.96 * *	1
OM	0.84 *	0.77 *	0.84 *	0.84 *	0.84 *

表 5 河滨公园 RDS 中重金属和有机质的 pearson 相关系数

Table 5 Pearson correlation coefficients of heavy metals and organic matter in RDS of riverside park

	Zn	Pb	Cu	Cr	Ni
Zn	1				
Pb	0.77 * *	1			
Cu	0.97 * *	0.54	1		
Cr	0.76 *	0.47	0.86 *	1	
Ni	0.96 * *	0.64	0.74 *	0.79 *	1
OM	0.81 *	0.96 *	0.84 * *	0.67 *	0.76 *

表 6 交通繁忙区 RDS 中重金属和有机质的 pearson 相关系数

Table 6 Pearson correlation coefficients of heavy metals and organic matter in RDS of intense traffic area

	Zn	Pb	Cu	Cr	Ni
Zn	1				
Pb	0.87 *	1			
Cu	0.93 * *	0.35	1		
Cr	0.36	0.45	0.95 *	1	
Ni	0.91 * *	0.94 * *	0.64	0.43	1
OM	0.79 *	0.94 * *	0.93 * *	0.87 *	0.87 * *

来自电子、冶金工业以及工业废料^[7,19~23].由表 7 可知,商业区第一主成分(PC1),5 种重金属都具有较高的正荷载,同时具有显著的相关性,它们源于工业污染和交通污染,由此认为 PC1 代表了交通污染和工业污染组成的混合污染源;PC2 上只有有机质有

很高的正荷载,由于商业区 RDS 的有机质含量很高且可能源于生活垃圾,认为 PC2 代表生活污染源,PC1 上有机质具有 0.53 的正荷载,由于其可能源于汽车的尾气以及工业降尘,说明有机质是重金属的 1 个重要载体.居民区 PC1 上 Zn、Cu 和 Pb 具有高正荷载且与 Pb 具有显著的相关性,认为 PC1 代表了交通污染源;PC2 上 Cr 和 Ni 具有正荷载,且和 Pb 来源不同,认为 PC2 代表了工业污染源;PC3 上有机质为较大的正荷载,考虑到居民区有机质的可能来源背景,认为 PC3 代表了生活污染源.河滨公园 PC1 上和有机质都具有比较高的正荷载且两者来源可能相同,认为 PC1 代表了交通污染源,同时 Zn、Pb 与有机质显著相关,说明有机质对于它们具有强吸附性;PC2 上 Cu、Cr 和 Ni 具有高正荷载,它们可能源于工业污染,认为 PC2 代表了工业污染源.交通繁忙区 PC1 上 Zn、Pb、Ni 具有高的正荷载,Zn、Pb 和 Ni 来源都可能与交通污染有关,认为 PC1 代表交通污染源,PC2 上 Cu 和 Cr 具有正荷载,认为 PC2 代表了工业污染源.

城市 RDS 中重金属的来源与人类活动密切相关,通过重金属元素间的相关分析和主成分分析初步识别了 RDS 中重金属的可能来源.结果表明,商业区是与商业有关的人为活动,位于市中心,人流量及车流量比较大,该区重金属为工业污染和交通污染组成的混合污染源,且与生活污染源可能有关.居民区位于老城区,区内设有临时停车场,旁边有一小型废料加工厂,其中 Zn、Pb 和 Cu 可能主要源于交通污染源,Cr 和 Ni 源于工业污染源,它们还可能与生活污染源有关.河滨公园也位于老城区,旁边是交通要道,RDS 中 Zn、Pb 含量较高,可能主要源于交通污染源,Cu、Cr 和 Ni 可能与工业污染源有关.交通繁忙区 RDS 中 Zn、Pb 和 Ni 含量很高,主要来自交通污染,Cu 和 Cr 的含量较高,可能来自工业污染源.因此,镇江市 RDS 中重金属主要源于交通污染源和工业污染源,部分可能来源于生活污染源.RDS 中重金属来源非常复杂,同时,金属元素自然来源变化及沉积物粒度可能会对重金属含量产生部分影响,因此,对于 RDS 中重金属的来源分析目前主要局限于定性的描述.最近,有研究通过铅同位素(²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb)示踪技术来确定某区域环境重金属的自然背景值及定量地评价环境现状及演变趋势^[24~26],认为 Pb 主要源于汽车尾气污染和工业污染,这与镇江市 RDS 中 Pb 的来源结论基本一致.

表 7 城市功能区 RDS 中重金属因子得分表

Table 7 Factor load of the heavy metals and organic matter on the former three principal components									
重金属	商业区		居民区			交通繁忙区		河滨公园	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC1	PC2
	(72.44%)	(18.15%)	(70.15%)	(15.88%)	(10.13%)	(78.65%)	(16.36)	(71.98%)	(21.80%)
Zn	0.919	0.243	0.938	0.058	0.217	0.990	-0.127	0.891	0.327
Pb	0.961	-0.082	0.956	-0.177	0.173	0.916	0.098	0.967	0.465
Cu	0.937	0.016	0.893	-0.159	-0.231	0.235	0.862	0.435	0.821
Cr	0.859	-0.224	0.032	0.899	0.347	0.38	0.842	0.541	0.891
Ni	0.972	0.166	0.312	0.768	0.231	0.963	0.123	0.337	0.920
OM	0.534	0.972	0.483	0.552	0.871	0.824	0.639	0.856	0.687

2.6 浓度富集率(CER)的分析

重金属的浓度富集率提供了 1 个评价重金属污染水平的有效手段.图 3 为镇江 RDS 中 5 种重金属元素的 CER 值,符号小方框表示 CER 的平均值,方框由数列的 25 和 75 百分位数确定,须状线由数列的 5 和 95 百分数确定.图 3 中重金属的 CER 值顺序为: Pb> Zn> Cr> Ni> Cu,其中 Pb 的平均 CER 值表现为非常强烈人为影响;Zn 的平均 CER 值表现为显著人为影响;Cr、Ni 和 Cu 均表现为中等程度的人为影响.在交通繁忙区,Pb 的最大 CER 值达到了 46.7 表现为极其强烈的人为影响.

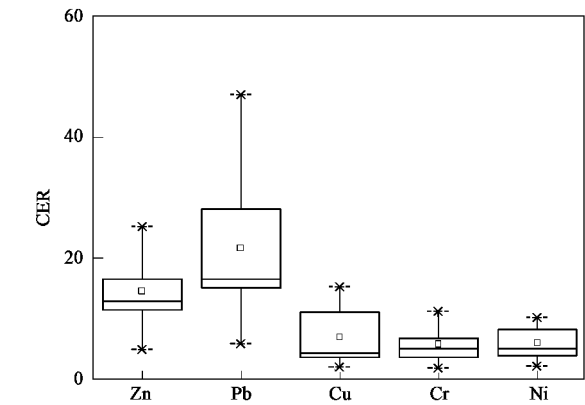


图 3 镇江市 RDS 中重金属元素的 CER 值

Fig.3 CER values of heavy metals in RDS of Zhenjiang

3 结论

镇江市 RDS 中锌和铅的平均含量分别为 687 mg/kg和 589 mg/kg,含量变化幅度大,远大于该市土壤中重金属的环境背景值. RDS 的 pH 平均值为 9.04,范围在 7.10~11.56 之间,有机质含量范围为 3.44%~17.81%,平均值 5.62%,在不同功能区分布差异较大,其中商业区含量最高.镇江市 RDS 中重金属主要来源与交通污染和工业污染有关,或者是两者产生的混合污染源,其中居民区和商业区

RDS 中重金属来源可能还与生活污染源有关,且有机质是 RDS 中重金属的主要载体.通过 CER 值评价 RDS 中重金属的人为污染程度,Pb 和 Zn 分别表现为非常强烈和显著人为影响,Cr、Ni 和 Cu 均表现为中等程度的人为影响.

参考文献:

[1] Brezonik L P. Analysis and predictive models of storm water runoff volumes, loads, and pollution concentration from watersheds in the Twins Cities metropolitan area, Minnesota, USA [J]. Water Research, 2002, 36: 1743 ~ 1757.

[2] Legret M, Pagotto C. Evaluation of pollutant Loadings in the runoff waters from a major rural highways [J]. Science of the Total Environment, 1999, 235: 143 ~ 150.

[3] Some L, Lagerkvist R. Source of heavy metals in urban wastewater in Stockholm [J]. Science of the Total Environment, 2002, 298: 131 ~ 145.

[4] Stone M, Marsalek J. Trace metal composition and speciation in street sediment: Sault Ste, Marie, Canada [J]. Water, Air and Soil Pollution, 1996, 87: 149 ~ 169.

[5] Kim K W, Myung J H, Ahn J S, et al. Heavy metal contamination in dusts and stream sediments in the Taejon Area [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1998, 64(1): 409 ~ 419.

[6] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, et al. PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. Organic Geochemistry, 2002, 33 (4): 489 ~ 515.

[7] Al-Chalabi A S, Hawker D. Retention and exchange behaviour of vehicular lead in street dusts form major roads [J]. Science of the Total Environment, 1996, 87: 105 ~ 119.

[8] Sutherland R A, Tack F M G, Ziegler A D, et al. Metal extraction from road-deposited sediments using nine partial decomposition procedures [J]. Applied Geochemistry, 2004, 19: 947 ~ 955.

[9] Xie S, bearing J A, Bloemendal J. The organic of content of street dust in Liverpool, UK, and its association with dust magnetic properties [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(2): 269 ~ 275.

[10] Kouji Adachi, Yoshiaki Tainosho. Single particle characterization of size—fractionated road sediments [J]. Applied Geochemistry, 2005, 20: 849 ~ 859.

[11] Droppo L G, Irvine K N, Murphy T P, et al. Fractional metals in street dust of a mixed land use sewershed , Hamilton , Ontario .

Hydrology in a Changing Environment III [M]. NewYork: John Wiley&Sons, Inc, 1998. 383 ~ 394.

[12] Sutherland R A, Tolosa C A. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii [J]. Environmental Pollution, 2000, **110**: 483 ~ 495.

[13] GB 7857-87, 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算[S].

[14] Fergusson J E, Ryan D E. The elemental composition of street dust from large and small urban areas related to city type, source and particle size [J]. Science of the Total Environment, 1984, **34**: 101 ~ 116.

[15] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 3. Road dust, tire debris and organometallic brake lining dust: roads as sources and sinks[J]. Environmental Science & Technology, 1993, **27**(9): 1892 ~ 1904.

[16] Robertson D J, Taylor K G, Hoon S R. Geochemical and mineral magnetic characterization of urban sediment particulates, Manchester, UK[J]. Applied Geochemistry, 2003, **18**: 269 ~ 282.

[17] Markus J A, Mcbratney A B. An urban Heavy metals in Glebe, Australia[J]. Australian Journal of Soil Research, 1996, **34**(3): 453 ~ 465.

[18] De Miguel E, Llamas J F, Chacon E, *et al.* Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust: unleaded petrol and urban lead[J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(17): 2733 ~ 2740.

[19] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属染来源[J]. 环境科学, 2006, **27**(1): 137 ~ 141.

[20] Li X, Poon C, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong[J]. Applied Geochemistry, 2001, **16**: 79 ~ 90.

[21] Anju D K, Banerjee D. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India [J]. Environmental Pollution, 2003, **123**: 95 ~ 105.

[22] Sutherland R A. Lead in grain size fractions of road-deposited sediment[J]. Environmental Pollution, 2003, **121**: 229 ~ 237.

[23] Yeung Z L L, Kwok R C W, Yu K N. Determination of multi-element profiles of street dust using energy dispersive X-ray fluorescence (EDXRF) [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2003, **58**(3): 339 ~ 346.

[24] 路远发, 杨红梅, 周国华, 等. 杭州市土壤铅污染的铅同位素示踪研究[J]. 第四纪研究, 2005, **25**(3): 355 ~ 362.

[25] Adgate J L, Rhoads G, Liyo P J. The use of isotope ratios to apportion sources of lead in Jersey City, NJ, house dust wipe samples[J]. Science of the Total Environment, 1998, **221**(2): 171 ~ 180.

[26] Varrica D, Dongarrà G, Sabatino G, *et al.* Inorganic geochemistry of roadway dust from the metropolitan area of Palermo, Italy [J]. Environmental Geology, 2003, **44**: 222 ~ 230.