

方凤满, 林跃胜, 王海东, 谢宏芳. 城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应. 生态学报 2011, 31(23): 7301-7310.

Fang F M, Lin Y S, Wang H D, Xie H F. Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust. Acta Ecologica Sinica 2011, 31(23): 7301-7310.

城市地表灰尘中重金属的来源、 暴露特征及其环境效应

方凤满^{1,2,*}, 林跃胜¹, 王海东¹, 谢宏芳¹

(1. 安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 芜湖 241003; 2. 安徽自然灾害过程与防控研究实验室, 芜湖 241003)

摘要: 地表灰尘是城市环境重金属的“源”、“汇”载体, 与环境质量和人类健康有着密切关系。分析了城市地表灰尘重金属污染研究的意义, 综述了国内外城市地表灰尘重金属地球化学行为研究进展, 包括地表灰尘重金属来源、暴露特征及其影响因素分析、环境效应等方面。提出应加强时间序列及小尺度微观研究; 地理因素对地表灰尘中重金属暴露特征、环境效应的影响机理研究。

关键词: 地表灰尘; 重金属; 暴露特征; 分布差异; 环境效应

Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust

FANG Fengman^{1,2,*}, LIN Yuesheng¹, WANG Haidong¹, XIE Hongfang¹

1 College of Territorial Resources and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China;

2 Anhui Key Laboratory of Natural Disaster Process and Protection Research, Wuhu 241003, China

Abstract: Surface dust is the “source”, “sink” carrier of heavy metals in urban environments, which has a close relationship with the environmental quality and human health. Heavy metal geochemistry characteristics in urban surface dust were analyzed, and an overview of heavy metal geochemical behavior of surface dust in domestic and abroad was generalized, including source of heavy metals in surface dust, exposure characteristics, influencing factors, and environmental effect etc. Heavy metals in surface dust have natural and anthropogenic sources, and the anthropogenic source accounts for a large proportion. The main anthropogenic sources are traffic pollution, industrial pollution and urban construction. Metals sources are different. Now, heavy metals content in urban dust are increasing gradually, particularly for the anthropogenic element of Zn, Cu, Pb and Cd. Meanwhile, platinum family element (PGEs) such as Pt, Rh and Pd have also enrichment gradually. Heavy metals in urban surface dust have three exposure characteristics: (a) Spatial distribution difference. Generally, heavy metals in urban dust in industrial zone have higher concentration than those in residential area, cultural and educational area and commercial district. And heavy metals in urban dust in high traffic flow area have higher concentration than those in medium traffic flow and low traffic flow area. (b) Size distribution difference. Overall, heavy metal content in urban surface dust decreases with the increasing of the dust particle size. Different heavy metals, due to their different source, have different enrichment regularity in different particle size dust. Zn, Pb and Cr anthropogenic source elements mainly distributed in particle size dust, and natural source elements such as Fe and Mn frequently uniform enriched in different particle size. (c) Existence speciation difference. Heavy metal element in surface

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901258); 安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2009A137); 自然地理学省级重点学科资助

收稿日期: 2010-10-27; 修订日期: 2011-04-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ffm1974@mail.ahnu.edu.cn

dust mainly exists in the residue form. Exposure of heavy metals in surface dust mainly affected by urban traffic activities (including traffic flow , speed and variable frequency and vehicles features) , street location and terrain , and meteorological factors (such as rainfall , wind etc) . Atmospheric particles , ground surface soil , surface rainoff have obvious influence mechanism with the urban dust , which the migration processes of dust between these media often directly caused atmosphere , soil , water pollution with heavy metals. It is suggested that we should increase our emphasis on the time-series and small-scale research , and the affect of geographical factor to the exposure characteristics and migration mechanism of heavy metals in surface dust.

Key Words: surface dust; heavy metal; exposure characteristics; distribution difference; environmental effect

1 城市地表灰尘重金属污染研究意义

城市地表灰尘是一种物质组成和来源复杂的环境介质,累积了大量的重金属,是城市环境重金属污染的“源”、“汇”载体^[1-2],在城市环境中发生迁移与转化,形成重金属灾害链。城市地表灰尘粒径基本都小于1mm,很容易在外力作用下“扬起—沉降—扬起”往复交替循环,并含有大量的有毒有害元素,对城市环境质量和人体健康产生较大危害,尤其是通过手-口和其他途径危害儿童健康^[3-6]。地表灰尘在城市环境中无处不在,尤其是交通引起的地表灰尘重金属污染日益严重。

城市地表灰尘中重金属污染不可忽视,开展其研究具有重要的理论和现实意义。首先,地表灰尘易于被行人和居住于周边的居民所吸收,危害人群健康,对其研究有一定的现实意义。其次,地表灰尘的冲刷是水体重金属的非点源污染之一,再扬起是大气颗粒物的一个重要来源。因此,对城市地表灰尘重金属地球化学特征的研究,一方面为城市区重金属污染预防与控制对策的制定提供理论依据;另一方面,对城市地表灰尘中重金属的暴露特征、环境行为、迁移途径与环境效应的认识,对推动城市重金属的环境地球化学学科发展有重要的科学意义。

2 城市地表灰尘中重金属主要来源

城市地表灰尘重金属的来源是多方面的,并且不同城市性质、规模,地表灰尘中的元素组成、分布模式及其可能的来源都不尽相同,随环境特征而变化,因此对其中重金属的来源识别难度较大。目前对地表灰尘重金属的源解析通常采用多元统计、主成分分析、聚类分析、因子分析、富集因子分析、相关性分析以及氮氧化物示踪等手段^[7-13]。地表灰尘中的重金属来源可归结为自然源和人为源。自然源主要有周围的土壤水运输、大气的干湿沉降等过程,如城市灰尘中V、Co和Mn主要来源于自然因素^[8,11]。人为源相当复杂,也是导致灰尘中重金属暴露差异的主要原因,总体上来源于汽车交通污染、工业污染和城市建设^[7-8,12,14-18]。

2.1 汽车交通污染源

汽车交通污染源主要表现为汽车尾气排放、汽车橡胶轮胎老化磨损、车体自身的磨损和腐蚀、油类润滑剂的使用、路面材料的老化、磨损等。刹车里衬的磨损会造成灰尘中Cd、Pb和Cu污染^[16-18]。含铅汽油燃烧后的尾气排放和轮胎磨损是灰尘中Pb的主要来源^[19],汽油中75%的Pb以颗粒态的形式随汽车尾气进入到环境中^[20]。轮胎磨损、路面安全栏的腐蚀以及防腐镀锌汽车板的广泛使用导致Zn污染^[21];在总的交通排放中,有90%的Cu来自于制动器的磨损,90%的Pb、80%的Ni和40%的Zn来自于尾气排放^[22]。交通排放还会造成铂族元素(PGEs)在灰尘中的明显累积,其主要来源于汽车尾气净化装置(VECs)中Rh、Pd、Pt的排放^[23-24]。

2.2 工业与城市建设污染源

工业污染主要表现为金属冶炼厂以及电镀厂、轧钢厂等金属加工厂的废气排放。某知名汽车工业园区内地表灰尘中Cu的含量相当高^[4]。Han等^[8]报道西安城市灰尘Cu、Pb、Zn、Cr主要来源于工业源;Hg和Ag则与商业和家庭源有关。城市建设主要表现为建筑扬尘、建筑物金属部分的风蚀或腐蚀脱落、各种建筑材料(如油漆)的老化脱落等^[7-8]。北京市街道灰尘中金属元素很大一部分与工业污染源、建筑材料及废弃物的排

放有关^[12]。韩国蔚山市有色金属区地表灰尘中镉铜铅含量最高,镍和锌分别在石油化工和造船区最高^[25]。

从元素角度分析,Mn、V、Ni、Co 和 Ba 主要来源于自然源;而 Cd、Pb、Cr 和 Zn 主要来源于人类活动^[11]。Zn 和 Cd 主要来自汽车轮胎磨损和发动机润滑油;Fe 主要来自车辆及道路钢机构(如桥梁和护栏等)生锈;Cu 主要来自于金属电镀、轴承及制动部件磨损、杀菌剂和杀虫剂;Cd 主要来自于轮胎磨损、杀虫剂的使用;Cr 主要来自于电镀金属、制动部件磨损;Ni 主要来自于柴油和汽油、润滑油、金属电镀、轴衬磨损、制动部件磨损、沥青路面;As 主要来源于矿物燃料的燃烧、颜料和杀虫剂的广泛使用以及人类其他活动;Hg 主要来源于煤的燃烧、固体垃圾的焚烧、电子工业、造纸业和医药工业的排放^[15 26-29]。

3 地表灰尘重金属的暴露特征及影响因素分析

3.1 地表灰尘重金属的暴露水平

对城市地表灰尘中研究较多的为 Cu、Cr、Pb、Cd、Ni 和 Zn 等,这些元素的富集具有重要的环境指示意义和较大的环境污染危害^[1,12 30-32]。表 1 是目前国内外部分城市地表灰尘中重金属含量的分布情况,不同元素在不同城市地表灰尘中的含量差异较大。主要与城市人口规模、交通量、城市地形与气象以及各地的土壤背景值等有关。Charlesworth 等^[30]发现,伯明翰(人口数 23 万)城市道路灰尘中 Pb、Zn、Cu 和 Cd 的平均含量均高于考文垂(人口数 3 万)道路灰尘中的含量,尤其是公路十字路口处灰尘中重金属含量较高。上海市地表灰尘 Zn、Pb、Cu 和 Cd 平均值分别为上海市土壤背景值的 6—8 倍,Cr 和 Ni 超出 2—3 倍^[1]。总体上,国内灰尘中 Cr 含量较国外城市处于较高水平,主要是由于土壤背景值高所造成。而西方发达国家由于汽车拥有量较大,来源于尾气排放的 Pb 和 Zn 在地表灰尘中的含量较国内城市高得多。

另外,汞砷等毒性较大的元素在城市地表灰尘中也呈明显的富集状况,不同区域差异较大。西安城市地表灰尘中 Hg 含量为 0.638mg/kg,As 含量为 10.62 mg/kg,远超出土壤背景值的 5—10 倍^[8];北京市地表灰尘中 Hg 的最大值达到北京地区土壤背景值的 64 倍^[12]。灰尘中除检测到常规的重金属,还检测到铂族元素(PGEs),上海市道路灰尘 Rh、Pd、Pt 含量分别是参照点的 19.48、12.17 和 64.94 倍^[23],比国际上其他国家 Pt、Rh 浓度低,而 Pd 浓度在国际上属于较高水平^[24 33],可见灰尘中 PGEs 的累积已相当明显。

表 1 国内外不同城市区地表灰尘中重金属质量浓度/(mg/kg)
Table 1 Heavy metal concentrations in surface dust in different city

城市 City	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn	Hg	As	文献 References
利雅得 Riyadh	2.3	61.7	32.5	45.0	2134	338	—	—	[34]
马德里 Madrid	—	188	61	44	192.7	476	—	—	[10]
奥斯陆 Oslo	1.4	123	—	41	180	412	—	—	[10]
伦敦 London	—	111—512	—	—	544—1637	988—3358	—	—	[35]
华沙 Warsaw	—	154.3	100.3	55.7	174	1286.7	—	—	[36]
渥太华 Ottawa	0.37	65.84	43.3	15.2	39.05	112.5	0.029	1.3	[37]
香港 Hong Kong	—	110	124	28.6	120	3840	—	—	[7]
悉尼 Sydney	4.4	147	83.6	27.2	389	657	—	—	[38]
约旦 Jordan	6.36	91.9	65.5	—	59.5	639.8	—	—	[39]
喀拉克 Karak	—	26.7	—	4.15	50.5	39.9	—	—	[40]
罗安达 Luanda	1.1	42	26	10	351	317	0.13	5	[6]
埃莫西约 Hermosillo	4.24	26.34	11.15	4.7	36.15	387.98	—	—	[11]
西安	—	94.98	167.28	—	230.52	421.46	0.638	10.62	[12]
达卡 Dahak	—	22±9	99±17	23±4.2	35±7.8	97±29	—	—	[41]
重庆	4.95	79.38	87.26	22.17	75.62	169.67	0.11	6.82	[42]
北京	4.3	21	62	20.4	98	680	0.045	—	[15 2]
上海	0.97	186.41	218.91	64.91	212.94	687.25	—	—	[43]
沈阳	4.35	81.33	—	—	106.26	334.47	—	—	[44]
芜湖	1.95	135.42	110.31	21.38	138.61	313.53	0.230	15.37	[45-46]

3.2 地表灰尘中重金属暴露差异

不同城市区域、经济发展规模、工业类型导致其地表灰尘中各重金属在空间和粒径分布上存在差异。

3.2.1 空间暴露差异

不同类型、不同规模城市的地表灰尘中重金属种类及含量差异明显,主要受车辆载荷和街道附近的工业生产及其他人类活动影响^[30-31, 41, 47]。目前主要有按城市功能区区域型(或面型)和沿交通要道的线型分布特征。按城市功能区的区域型分布,其研究对象是对城市区内不同的功能类型区(如工业区、商业区、居住区和交通区等)进行对比研究分析其来源。大量研究表明,大部分重金属在商业区、交通区、工业区的灰尘中污染最突出,居住区和文教区相对较低^[30, 47-48]。如 Omar 等^[31]报道约旦安曼市地表灰尘中重金属含量最高值出现在交通活动最频繁的区域,最低值出现在医院、健康中心以及校园内。Charlesworth 等^[30]报道伯明翰市工业区以及环线以内的街道灰尘重金属含量明显高于其它地区,而在居住区和公园中地表灰尘重金属的含量偏低。李海雯等^[47]报道上海城市灰尘中重金属平均含量工业区、商业区以及交通繁忙区最突出。郑小康等^[49]报道河北地表灰尘中重金属含量商业区>交通区>工业区>办公区>居住区。不同来源元素,在不同功能区的暴露特征不同。韦炳干等^[48]报道乌鲁木齐市 Cr、Cu、Pb 和 Zn 在商业区灰尘中的污染水平最高(主要为交通污染源);Cd 在工业区灰尘中的污染水平最高(主要为工业污染源);Ni 和 Co 在居住区灰尘中的污染水平最高(与生活污染源有关)。

沿交通要道的线型分布研究,一方面是同一条道路不同路段如红绿灯、十字路口处,车辆经常怠速、刹车的情况下,红绿灯使得车辆加速、减速、停止、形成排队以及驾驶员的驾驶模式影响着灰尘的排放和其中重金属的含量,尤其是 Pb 的富集^[50]。另一方面是交通道路横断面的分布规律研究。目前主要侧重于高速公路及一般公路两侧土壤中重金属的分布规律,如研究表明公路两侧的土壤中 Pb 含量随垂直距离的外延呈指数形式下降。公路交通对道路两侧土壤产生严重和轻度 Pb 污染的范围分别为距公路 0—10 m 和 10—65 m^[51]。受交通因素影响,地表灰尘重金属在人行道边几公尺、十几公尺内浓度较高,然后急剧减少。目前由于道路清扫力度较大,以及受街道局地的地形、气象等条件的影响,对街道灰尘重金属横断面的分布规律研究较缺乏,如机动车道、自行车道、步行道等的纵向分布规律目前难以被认识。

3.2.2 粒径分布差异

灰尘粒径特征在一定程度上决定了重金属的可移动性,国外学者自 20 世纪 80 年代以来对地表灰尘重金属粒径分布规律就展开了相关研究^[36, 52]。Deletic 等^[52]报道阿拉伯地表灰尘重金属在 2—63 μm 级别中含量最高, Pb 在这个级别占 70% 以上。芜湖市地表灰尘中 As 和 Hg 在 <75 μm 粒径上的平均富集比例分别为 55.8% 和 63.5%^[46]。上海市地表灰尘重金属含量随着粒径的降低呈现出明显增加趋势,其中 150 μm 和 75 μm 是主要污染粒径级别^[53]。McKenzie 等^[22]报道小于 1.5 μm 的极细颗粒灰尘中 Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 的富集程度最高。在 0.1—0.3 μm 的粒径上 Zn 的最大富集系数为 4900。尽管极细颗粒物的质量很小,但由于它们易移动且富集大量的有毒金属,其环境效应极显著,而 Fe、Mn 在细粒径上的富集不高。总体上,城市地表灰尘中重金属含量随灰尘粒径的减小而增加。但不同元素由于其来源不同,在不同粒径上的富集规律存在一定差异。一般人为源重金属主要富集在细粒径灰尘上,如 Zn、Pb、Cr 在 <150 μm 粒径上的富集比例均大于 60% 以上(图 1);而自然源金属如 Fe、Mn 往往均匀富集在不同粒径上。

3.2.3 赋存形态差异

不同形态的重金属化合物,其环境行为和生物有效性不同,对环境的效应也不同。同样,灰尘重金属的存在形态是衡量其环境效应的关键参数。研究报道地表灰尘中的不同重金属的赋存形态有一定差异,但大部分金属均以非残渣态形式存在,其中又以结合在有机-硫化物结合态和铁锰氧化物结合态中为主^[6, 52-54],说明其比较稳定,不易迁移转化,对环境的危害比较持久。常静等^[52]报道上海城市地表灰尘中 Zn 以碳酸盐态为主;Pb 主要为铁锰结合态存在,Cu 和 Cd 则以有机态为主;Cr、Ni 主要以残渣态存在。众多研究表明^[6, 25, 54]:街道灰尘中 Cd、Cu、Ni、Zn、Cr 和 Pb 的生物有效性顺序大致为: Cd>Zn≈Pb>Ni>Cu>Cr。

3.3 地表灰尘重金属暴露特征的影响因素分析

3.3.1 交通活动

交通活动是影响地表灰尘重金属含量及其分布的主要因素之一。主要体现在以下三方面:(1) 交通流

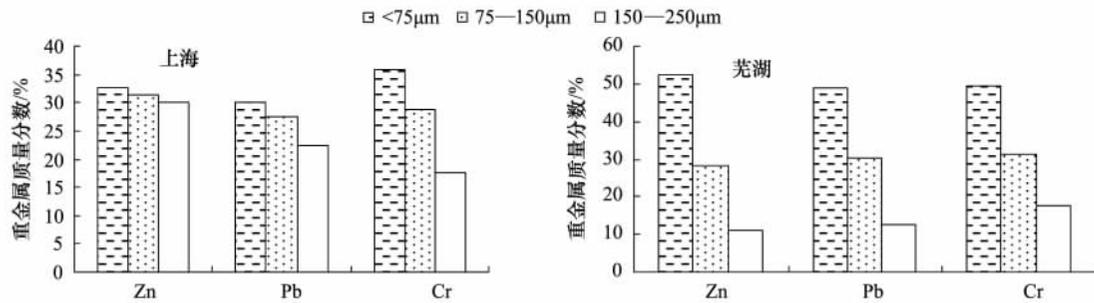


图1 城市地表灰尘重金属污染粒级效应

Fig. 1 Heavy metal contents in different particle size fraction of urban surface dusts

上海根据文献 53 数据绘制, 芜湖根据文献 4 数据绘制

量。Ogunsola 等^[55]报道尼日利亚拉各斯某道路(车流量为 10 万辆/d)灰尘中 Pb 和 Zn 含量均高于车流量为 3.4 万辆/d 的贝尼奥尼沙道路。总体上,街道的日交通流量与灰尘中来源于交通排放的 Pb、Cu、Zn 等元素含量呈正相关^[56-57]。张建强等^[57]报道日本东京城市道路粉尘中重金属浓度随交通量的增加而上升(表 2)。(2) 车速及变速的频率。城市内交通拥挤,不断的停车和启动方式,导致燃料释放和机车磨损(特别是轮胎和刹车片磨损)过程中许多重金属元素的释放,使得城市内交通繁忙区地表灰尘中的重金属含量高^[58]。(3) 车辆自身的特点,如车辆类型、大小、年龄、发动机状况以及使用的燃料质量都直接影响街道灰尘的重金属含量。Legret 等^[59]研究表明,街道重型车辆占总机动车辆的比例与该街道灰尘重金属含量呈正相关关系。

表 2 道路灰尘重金属浓度与交通量的比较(mg/kg)^[57]

Table 2 The relationship of heavy metal concentration in road dust and traffic flux

交通流量 Traffic flow /(辆/h)	Mn	Cu	Zn	Cd	Pt	Pb
3983	510	300	890	0.49	3.1	180
2088	350±28	160±59	430±59	0.34±0.12	0.5±0.3	58±7
1218	340±16	180±84	310±27	0.23±0.04	0.1±0.1	53±19

3.3.2 街道地形与地理位置

街道所处的地理位置直接影响地表灰尘中重金属的含量及其分布格局^[51]。山区和丘陵地带的城市,机动车辆排放的重金属颗粒物,不易被大气稀释,容易滞留在街道表面。平坦地形有利于重金属的扩散和稀释。城市建筑设计对风环境因素考虑不周,使得城市中污染最严重的地方往往发生在两侧有紧密高大建筑物的街道峡谷内,街道两侧建筑物的密集程度、高度及高度分布均匀度,街道的高宽比等对街渠内的大气流场有很大影响,从而决定了街道污染物浓度分布。Johansson 等^[13]报道斯德哥尔摩街道峡谷的灰尘金属含量比街道建筑物屋顶中的含量高 2—4 倍,Cu 在街道峡谷灰尘中含量是街道建筑物屋顶中含量的 7 倍,说明街道峡谷不利于交通产生的含重金属颗粒的扩散。建筑物的峡谷直接影响机车释放重金属的稀释和分散途径,往往导致城市高建筑物中道路灰尘重金属含量比高交通密集区还要高^[58]。

3.3.3 气象因素

降雨事件是影响灰尘污染积累的主要因素。地表灰尘积累受降雨类型影响较大,强度大、持续时间长的降雨对其有明显的去除作用,而小雨则会起到相反的作用,使其颗粒变细,而重金属主要富集在细颗粒物上^[60]。在雨后,吸收在直径小于 40 μm 的灰尘上重金属浓度比>40 μm 灰尘重金属浓度高^[61]。在干期累积过程中,地表灰尘中重金属浓度随着前晴数的增加在不同的区域出现不同的变化,在交通流量较高的地区,灰尘重金属浓度呈现降低趋势,而交通流量相对较低的区域灰尘重金属浓度则有所升高^[11]。

风的影响。交通排放的含重金属颗粒物可以扩散到周边较远的区域。Othman 等^[62]研究表明,含 Pb 颗粒物主要沉降在距公路 5m 内,在风的作用下,将迁移到更远的地方。公路两侧灰尘污染呈高度异质性,随着

距离道路中心越远灰尘重金属含量逐渐降低, Pb、Zn 和 Cd 含量随距公路的距离呈指数形式下降, 且受区域主导风向的影响, 下风向街道灰尘重金属的平均含量比上风向地区高^[63]。

4 地表灰尘重金属环境效应研究

城市地表尘与大气颗粒物、表层土壤、地表径流之间存在明显的相互影响机制, 这些迁移过程往往直接造成大气、土壤、水体等重金属污染效应, 与人类健康密切相关。

4.1 地表灰尘重金属的大气污染效应

地表灰尘在风及人类活动的扰动下, 容易再次扬起进入大气, 尤其是细颗粒物。灰尘的再扬起与物质的粒径、道路水分含量、相对湿度、当地气候(降雨、风速等)、车辆特征相关^[64]。机动车所排放的 Pb 超过 50% 沉积于道路及附近土壤中, 这些颗粒物会因机动车驶过或风的作用而再次悬浮, 从而成为大气 Pb 的主要来源之一。Han 等^[2]报道北京市地表灰尘有 60%—80% 可以进入大气悬浮搬运, 是北京市大气颗粒物的主要来源, 尤其是对大气中 Cu、Zn、Ni、Pb 和 Cd 污染元素的贡献率达到 75% 以上。而对地壳元素 Fe、Mn 的贡献率较小, 只有 45% 和 51%。Amato 等^[65]论述了交通排放颗粒物对大气中 PM_{2.5}—PM₁₀ 的粒径颗粒物上重金属的贡献。Thorpe 等^[66]报道伦敦多车道高速上的灰尘再扬起占大气中 PM₁₀ 总排放量的 20%—22%, 并且主要受交通量的影响。来源于交通释放的地表灰尘分别有 37%、15% 和 3% 的 PM₁₀、PM_{2.5}、PM₁ 粒径大小的颗粒再释放到大气中^[67]。

4.2 地表灰尘重金属的径流效应

降雨时, 地表灰尘中的 Pb、Zn、Cu、Cd、Cr 等被径流冲刷, 进入水体, 造成水体重金属污染^[68-70]。国外学者在公路路面径流重金属含量、影响因素、污染源以及从路面到受纳水体的迁移过程, 污染物对受纳水体水质的影响方面进行了大量的研究^[68-70]。Sansalone 和 Buchberger^[69]报道道路径流中的铜锌铅的平均浓度超过了 EPA 的地表水排放标准。赵洪涛等^[71]报道太湖流域城镇街径流受纳水体中 Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 浓度较降雨前提升了 43%—166%。据 Ellis 和 Revitt^[72]报道英国城市受纳水体中金属含量的 35%—75% 来自于公路路面径流; 这些重金属对水生态的影响很大, 尤其夏季暴雨后, 造成短时冲击负荷对水环境影响严重^[73]。地表灰尘直接影响到降雨径流重金属含量, 两者之间耦合关系明显。

影响地表径流重金属污染的因素很多, 如灰尘粒径大小、降雨量、降雨时间、交通量及大气污染程度、前晴期、路面宽度、路面性质等^[74-79], 而且各种因素随机性很强, 偶然性大, 至今尚无普遍适用的统一评测方法。前晴期影响可冲刷地表颗粒物的量和重金属的积累(图 2)^[74]。地表灰尘粒径大小决定了重金属在径流中的迁移行为, 大颗粒很难被雨水冲刷掉, 细颗粒($<10\mu\text{m}$ 或 $<1.5\mu\text{m}$)及其中的组分很容易随雨水迁移。 $<250\mu\text{m}$ 粒径的颗粒物对径流中重金属的贡献率达到 80% 以上, $<44\mu\text{m}$ 粒径的悬浮颗粒占到径流中总悬浮颗粒的 70% 以上^[77]。Chui 等^[78]报道美国华盛顿的路面径流中重金属的排污负荷与降雨期间累积交通量成正比, 同时路面径流重金属的浓度受路面类型的影响较大,

沥青路面径流中的 Pb、Zn 浓度是相同条件下水泥混凝土路面径流的 3—5 倍。Maestri 和 Lord^[79]报道采用多孔沥青路面后, 其径流中重金属的浓度大大减少, 因此研制和使用各种类型的多孔路面有利于降低路面径流污染。

道路地表径流重金属污染大部分存在一定的初期效应, 初期效应与重金属存在形态有关^[53, 80], 初期效应的存在对城市非点源污染控制有重要的指导意义。Kayhanian 等^[80]报道径流中有 83% 的 Pb、60%—65% 的 Zn、50%—55% 的 Cu 和 Ni 以颗粒态形式存在于径流中; 50% 左右的重金属可以通过颗粒物的方式得以去除。

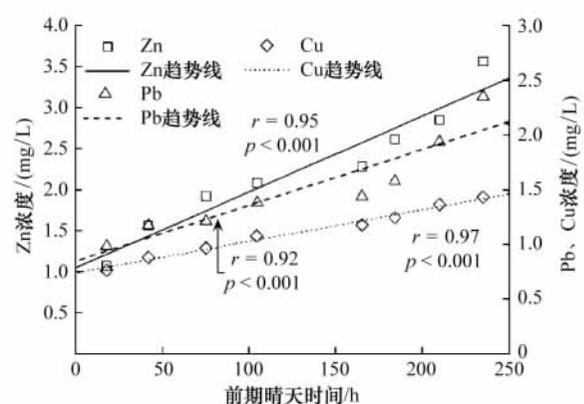


图 2 地表径流中重金属浓度与前期晴天时间的关系^[74]

Fig. 2 Metal concentrations in runoff and antecedent dry periods

Harrison 和 Wilson^[81] 等报道大部分降雨事件中前 1h 的径流含有 50% 的总 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的污染负荷; Sansalone 和 buchberger^[69] 等对美国辛辛那提城市道路径流研究表明颗粒态重金属的初期效应不显著, 而溶解态 Cu 和 Zn 具有明显的初期效应; Flint 和 Davis^[82] 等对美国马里兰州一处郊区公路研究表明, 分别有 21%、13% 和 14% 降雨事件的前 25% 的径流中含带了超过 50% 总 Cu、Pb 和 Zn 污染负荷。

4.3 地表灰尘重金属人体健康风险效应

地表灰尘含有大量的细颗粒物, 在一定的外力下扬起, 很容易通过皮肤干沉降、呼吸道进入人体内, 对人体健康造成危害。近年来, 国内外学者开始关注地表灰尘重金属健康风险研究^[3-4, 6, 43]。目前对地表灰尘重金属健康风险评价主要采用美国 EPA 土壤重金属健康风险评价模型和 CDI 模型^[4, 43, 49]。基于美国 EPA 人体暴露风险评价方法的上海市地表灰尘重金属非致癌风险指数均小于非致癌风险阈值 1, 致癌重金属致癌风险指数均低于癌症风险阈值, 表明其对人体健康危害不大^[43]。基于 CDI 模型的河北保定城区地表灰尘 Cd 的平均致癌风险指数达到 1.25×10^{-5} , 超过美国 EPA 10^{-6} 的标准, 已对当地居民的身体健康造成了严重的威胁^[49]。手-口摄入途径是芜湖市区儿童对细粒径地表灰尘重金属暴露的主要途径, 其次为皮肤吸收, 经空气吸入的暴露量最小。不同重金属非致癌风险大小顺序依次为: Pb>Cr>Mn>V>Cu>Cd>Co>Ni>Zn, 均不构成明显的风险, 但各重金属对儿童的叠加非致癌风险度达 0.753, 其复合污染及潜在风险不可忽视; 芜湖经济技术开发区地表灰尘各重金属叠加风险度达 1.266, 存在非致癌风险^[4]。

重金属的健康风险评价涉及到众多参数, 而各参数的选取因自然环境条件、年龄、性别和人种不同而不同, 如目前国内对人体皮肤暴露面积的测定还相当少, 选择合适的参数很难。另外地表灰尘排放因子 (PEF) 的选取由于缺乏实验研究, 目前主要引用土壤污染健康风险评价的 PEF, 因此存在估算误差的问题。人体对重金属的有效吸收量与重金属在灰尘中的赋存形态有很大关系, 而目前暴露量的计算模型均是采用全量来计算的。以上诸因素均会造成评价的变异性和不确定性。

城市地表灰尘重金属污染产生的环境效应越来越突出, 影响其环境效应的因子很多。目前国外比较关注道路清扫对灰尘中重金属累积效应的影响^[83-85]。清扫技术不同对灰尘中重金属负荷有一定影响, 但重金属主要富集在细灰尘中, 而目前的清扫技术对细小颗粒物的清除能力有限, 因此清扫对灰尘中的重金属负荷无明显影响。同时公路交通污染的灰尘对道路两边土壤中重金属含量及其形态分布也存在一定的影响^[86]。

5 城市地表灰尘重金属污染研究展望

近年来城市地表灰尘重金属研究不断得到重视, 但仍存在一些科学问题需要探索。

5.1 地表灰尘重金属的交通污染指示意义研究

目前国内外研究主要考虑不同流量以及流速的街道灰尘重金属含量的差异, 而对街道横断面灰尘中重金属的分布特征关心较少, 不能很好地了解交通运输造成灰尘重金属污染的影响区域有多大, 如交通干道的机动车道、自行车道、人行道等范围内的灰尘中重金属含量水平的差异等。以及交通排放造成的灰尘重金属污染受周边地形、地貌、气候条件等地理因素的影响研究需进一步加强。

5.2 时间序列研究以及小尺度微观的研究不足

目前的研究均是建立在认为城市地表灰尘具有稳定来源和沉降累积过程, 很少考虑灰尘中重金属的含量是否随时间变化。地表灰尘重金属的含量是否具有季节性变化, 或者受其他因素控制从而具有非季节性的时间变化规律还需要进一步探讨。时间序列研究的缺乏以及小尺度微观的研究不足, 导致对地表灰尘中重金属含量与气象条件、土地利用类型等因素的定量关系研究未取得明显进展, 从而影响对灰尘重金属环境效应与归宿的研究。

5.3 地表灰尘重金属的生态效应研究缺乏系统性

城市地表灰尘重金属作为城市环境的源、汇作用逐渐凸显。由于其过程复杂, 目前对其造成的灾害链的认识不足, 尤其是将地表灰尘、地表径流、叶面积尘、大气颗粒物等作为一个整体的多介质环境系统进行综合研究较缺乏, 从而影响人们对地表灰尘中重金属的环境行为、迁移过程及来源分析等方面的认识。同时, 对地

表灰尘的生态风险与毒理方面的研究仍处在不断探索之中。

References:

- [1] Chang J , Liu M , Li X H , Yu J , Lin X , Wang L L , Gao L. Heavy metal mass accumulation of urban surface dust in Shanghai city. *Environmental Science* , 2008 , 29(12) : 3483-3488.
- [2] Han L H , Zhuang G S , Cheng S Y , Wang Y , Li J. Characteristics of re-suspended road dust and its impact on the atmospheric environment in Beijing. *Atmospheric Environment* , 2007 , 41: 7485-7499.
- [3] Zheng N , Liu J S , Wang Q C , Liang Z Z. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district , North east of China. *Science of the Total Environment* , 2010 , 408: 726-733.
- [4] Fang F M , Jiang B Y , Wang H D , Xie H F. Particle size distribution and health risk assessment of heavy metals in surface dust of Wuhu urban area. *Geographical Research* , 2010 29(7) : 1193-1202.
- [5] Fang F M , Xie H F , Wang H D , Jiang B Y. Concentrations and health risk assessment of arsenic in soil and road dust in Wuhu urban. *Environmental Chemistry* , 2010 , 29(5) : 880-883.
- [6] Ferreira-Baptista L , De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda , Angola: A tropical urban environment. *Atmospheric Environment* , 2005 , 39: 4501-4512.
- [7] 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) . *Applied Radiation and Isotopes* , 2003 , 58: 339-346.
- [8] Han Y M , Du P X , Cao J J , Posmentier E S. Multivariate analysis of heavy metal contamination in urban dusts of Xi'an , Central China. *Science of the Total Environment* , 2006 , 355: 176-186.
- [9] Serife T , Senol K. Multivariate analysis of the data and speciation of heavy metals in street dust samples from the Organized Industrial District in Kayseri (Turkey) . *Atmospheric Environment* , 2006 , 40: 2797-2805.
- [10] De Miguel E , Llamas J F , Chacon E. Berg T , Larssen S , Royset O , Marit vdsset. Origin and patterns of distribution of trace elements in street dust unleaded petrol and urban lead. *Atmospheric Environment* , 1997 , 31: 2733-2740.
- [11] Diana Meza-Figueroa , Margarita De la O-Villanueva , Maria Luisa De la parra. Heavy metal distribution in dust from elementary schools in Hermosillo , Sonora , Mexico. *Atmospheric Environment* , 2007 , 41: 276-288.
- [12] Liu C H , Cen K. Chemical composition and possible sources of elements in street dusts in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae* , 2007 , 27(7) : 1181-1188.
- [13] Johansson C , Norman M , Burman L. Road traffic emission factors for heavy metals. *Atmospheric Environment* (2008) , doi: 10. 1016/j. atmosenv. 2008. 10. 024.
- [14] Li X D , Poon Chi-sun , Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong. *Applied Geochemistry* , 2001 , 16: 1361-1368.
- [15] Zhang X M , Luo K L , Sun X Z , Tan J A , Lu Y L. Mercury in the topsoil and dust of Beijing City. *Science of the Total Environment* , 2006 , 368: 713-722.
- [16] Weckwerth G. Verification of traffic emitted aerosol components in the ambient air of Cologne (Germany) . *Atmospheric Environment* , 2001 , 35(32) : 5525-5536
- [17] Sternbeck J , Sj din A , Andrasson K. Metal emissions from road traffic and the influence of resuspension results from two tunnel studies. *Atmospheric Environment* , 2002 , 36(30) : 4735-4744.
- [18] Harrison R M , Tilling R B , Romero M S C , Harrad S , Jarvis K. A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment. *Atmospheric Environment* , 2003 , 37(17) : 2391-2402.
- [19] Drapper D , Tomlinson R , Williams P. Pollutant concentrations in road runoff southeast Queensland case study. *Journal of Environment Engrg. ASCE* , 1999 , 126(4) : 313-320.
- [20] Ali M M , Ishiga H , Wakatsuki T. Distribution and changes in heavy metal contents of paddy soils in different physiographic units of Bangladesh. *Soil Science and Plant Nutrition* , 2003 49 (4) : 527-538.
- [21] Al-Khashman O A. The investigation of metal concentrations in street dust samples in Aqaba City , Jordan. *Environment Geochemistry Health* , 2007 , 29: 197-207.
- [22] McKenzie E R , Wong C M , Green P G , Kayhanian M , Young T M. Size dependent elemental composition of road-associated particles. *Science of the Total Environment* , 2008 , doi: 10. 1016/j. scitotenv. 2008. 02. 052.
- [23] Liu Y Y , Liu M , Cheng S B. Short-term changes in the contents of platinum group elements (PGEs) in road dust. *Acta Scientiae Circumstantiae* , 2009 , 29(9) : 1864-1870
- [24] Whiteley J D. Seasonal variability of platinum , palladium and rhodium (PGE) levels in road dusts and roadside soils , Perth , Western Australia. *Water Air Soil Pollution* , 2005 , 160: 77-93
- [25] Duong Trang T T , Lee Byeong-Kyu. Partitioning and mobility behavior of metals in road dusts from national-scale industrial areas in Korea. *Atmospheric Environment* , 2009 , 43: 3502-3509
- [26] Wilcke W , Muller S , Kanchanakool N , Zech W. Urban soil contamination in Bangkok: heavy metal and aluminium partitioning in topsoils. *Geoderma* , 1998 , 86: 211-228.
- [27] Al-Shayep S M , Seaward M R D. Heavy metal content of roadside soils along ring road in Riyadh (Saudi Arabia) . *Asian Journal of Chemistry* , 2001 , 13: 407-423.
- [28] Akhter M S , Madany I M. Heavy metal in street and house dust in Bahrain. *Water , Air , and Soil Pollution* , 1993 , 66: 111-119.
- [29] Tsai Y I , Kuo S C , Lin Y H. Temporal characteristics of inhalable mercury and arsenic aerosols in the urban atmosphere in southern Taiwan. *Atmospheric Environment* , 2003 , 37: 3401-3411.
- [30] Charlesworth S , Everett M , McCarthy R , Ordóñez A , de Miguel E. A comparative study of heavy metal concentration and distribution in deposited street dusts in a large and a small urban area: Birmingham and Coventry , West Midlands UK. *Environment International* , 2003 , 29: 563-573
- [31] Omar Ali Al-Khashman. Determination of metal accumulation in deposited street dusts in Amman , Jordan. *Environment Geochemistry Health* , 2007 , 29: 1-10.

- [32] Amato F, Pandolfi M, Viana M, Querol X, Alastuey A, Moreno T. Spatial and chemical patterns of PM₁₀ in road dust deposited in urban environment. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 1650-1659.
- [33] Motelica-Heino M, Rauch S, Morrison G M, Donard O F X. Determination of palladium, platinum and rhodium concentrations in urban road sediments by laser ablation-ICP-MS. *Analytica Chimica Acta*, 2001, 436: 233-244.
- [34] Al-Raihi M A, Al-shayeb S M, Seaward M R D, Edwards H G M. Particle size effect for metal pollution analysis of atmospherically deposited dust. *Atmospheric Environment*, 1996, 30: 145-153.
- [35] Wang W H, Wong M H, Leharne S, Fisher B. Fractionation and biotoxicity of heavy metals in urban dusts collected from Hong Kong and London. *Environmental Geochemistry and Health*, 1998, 20: 185-198.
- [36] Lisiewicz M, Heimburger R, Golimowski J. Granulometry and the content of toxic and potentially toxic elements in vacuum-cleaner collected, indoor dusts of the city of Warsaw. *Science of the Total Environment*, 2000, 263: 69-78.
- [37] Rasmussen P E, Subramanian K S, Jessiman B J. A multi-element profile of house dust in relation to exterior dust and soils in the city of Ottawa, Canada. *Science of the Total Environment*, 2001, 267: 125-140.
- [38] Chattopadhyay G, Lin K C, Feitz A J. Household dust metal levels in the Sydney metropolitan area. *Environmental Research*, 2003, 93: 301-307.
- [39] Qasem M J, Kamal A M Abdel-Aziz Q, Adnan M. Inorganic analysis of dust fall and office dust in an industrial area of Jordan. *Environmental Research*, 2004, 96: 139-144.
- [40] Omar A. Al-Khashman. Heavy metal distribution in dust, street dust and soils from the work place in Karak Industrial Estate, Jordan. *Atmospheric Environment*, 2004, 38: 6803-6812.
- [41] Ahmed F, Ishiga H. Trace metal concentrations in street dusts of Dhaka city, Bangladesh. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 3835-3844.
- [42] Li Z P, Chen Y C, Yang X C, Wei S Q. Heavy metals contamination of street dusts in core zone of Chongqing municipality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(1): 114-118.
- [43] Chang J, Liu M, Li X H, Lin X, Wang L L, Gao L. Primary research on health risk assessment of heavy metals in road dust of Shanghai. *China Environmental Science*, 2009, 29(5): 548-554.
- [44] Li Ch, Li F Y, Zhang Y, Liu T W, Hou W. Spatial distribution characteristics of heavy metals in street dust in Shenyang city. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 560-564.
- [45] Jiang B Y, Fang F M, Wang L L. Sources of heavy metals and their spatial distribution on the surface dust in Wuhu urban areas. *Journal of Safety and Environment*, 2010, 10(5): 578-582.
- [46] Fang F M, Zhang Z M, Chen W J, Yang D. Spatial and particle size distribution of mercury and arsenic on surface dust in spring in the Wuhu urban district. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(9): 1871-1877.
- [47] Li H W, Chen Z L, Wang J, Xu S Y, Shi G T, Zhang J, Wang L. Research of spatial variability of heavy metal pollution of dust in Shanghai urban area based on the GIS. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(5): 803-809.
- [48] Wei B G, Jiang F Q, Li X M, Mu S Y. Geochemical characteristics and assessment of heavy metal pollution in road dusts in different function zones of Urumqi city. *Environmental Chemistry*, 2009, 28(5): 721-727.
- [49] Zheng X K, Li C H, Huang G H, Yang Z F, Pang A P, Lu Y. Pollutant distribution in urban dusts of Baoding and health risk assessment. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(10): 2195-2202.
- [50] Pandians, Gokhale, Ghoshal A K. Evaluating effects of traffic and vehicle characteristics on vehicular emissions near traffic intersections. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2009, 14: 180-196.
- [51] Guo G H, Lei M, Chen T B, Song B, Li X Y. Effect of road traffic on heavy metals in road dusts and roadside soils. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10): 1937-1945.
- [52] Deletic A B, Orr D W. Pollution buildup on road surfaces. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, 131(1): 49-59.
- [53] Chang J, Liu M, Li X H, Lin X, Wang L L, Gao L. Fractionation and bioavailability of heavy metal contamination of urban surface dusts in Shanghai city. *Environmental Science*, 2008, 29(12): 3489-3495.
- [54] Emanuela Manno, Daniela Varrica, Gaetano Dongarra. Metal distribution in road dust samples collected in an urban area close to a petrochemical plant at Gela, Sicily. *Atmospheric Environment*, 2006, 40: 5929-5941.
- [55] Ogunsola O J, Oluwole A F, Asubiojo O I, Olaniyi H B, Akeredolu F A, Akanle O A, Spyrou N M, Ward N I, Ruck W. Traffic pollution: preliminary elemental characterization of roadside dust in Lagos, Nigeria. *Science of the Total Environment*, 1994, 146-147: 175-184.
- [56] Viard B, Pihan F, Promeprat S et al. Integrated assessment of heavy metal (Pb, Zn, Cd) highway pollution: bioaccumulation in soil graminaceae and land snails. *Chemosphere*, 2004, 55(10): 1349-1359.
- [57] Zhang J Q, SHIRAISHI Sayaka, WATANABE zumi. Heavy metal pollution of dust, topsoil and roadside tree near by main city roadways. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2006, 41: 68-73.
- [58] Ewen C, Anagnostopoulou M A, Ward N I. Monitoring of heavy metal levels in roadside dusts of Thessaloniki, Greece in relation to motor vehicle traffic density and flow. *Environment Monitoring Assessment*, 2009, 157(1/4): 483-498.
- [59] Legret M, Pagotto C. Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway. *Science of the Total Environment*, 1999, 235(1/3): 143-150.
- [60] Hergren L, Goonetilleke A, Ayoko G A. Analysis of heavy metals in road-deposited sediments. *Analytica Chimica Acta*, 2006, 571: 270-278.
- [61] Tian P, Li Y X, Yang Z F. Effect of rainfall and antecedent dry periods on heavy metal loading of sediments on urban roads. *Frontiers of earth Science in China*, 2009, 3(3): 297-302.
- [62] Othman I, Al-Oudat M, Al-Masri M S. Lead levels in roadside soils and vegetation of Damascus City. *Science of the Total Environment*, 1997, 207(1): 43-48.
- [63] Saeedi M, Hosseinzadeh M, Jamshidi A, Pajooheshfar S P. Assessment of heavy metals contamination and leaching characteristics in highway side soils, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 151: 231-241.
- [64] Karin E, Rolf M. Monitoring of dust emission on gravel roads: Development of a mobile methodology and examination of horizontal diffusion. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 889-896.
- [65] Amato F, Querol X, Johansson C, Nagl C, Alastuey A. A review on the effectiveness of street sweeping, washing and dust suppressants as urban PM control methods. *Science of the Total Environment*, 2010, 408: 3070-3084.
- [66] Thorpe A J, Harrison R M. Sources and properties of non-exhaust particulate matter from road traffic: a review. *Science of the Total Environment*,

- 2008, 400: 270-82.
- [67] Amato F, Pandolfi M, Escrig A, Querol X, Alastuey A, Pey J, Perez N, Hopke P K. Quantifying road dust resuspension in urban environment by Multili near Engine: A comparison with PMF2. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 2770-2780.
- [68] Gan H Y, Zhuo M N, Li D Q, Zhou Y Z. Quality characterization and impact assessment of highway runoff in urban and rural area of Guangzhou, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 140(1/3): 147-159.
- [69] Sansalone J J, Buchberger S G. Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. *Journal of Environmental Engineering*, 1997, 123(2): 134-143
- [70] Stotz G. Investigations of the properties of the surface water runoff from federal highways in the FRG. *Science of the Total Environment*, 1987, 59: 329-337
- [71] Zhao H T, Li X Y, Wang W D, Chen M X, Yin C Q. The source-sink effects of street dust pollution in a stream network. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(6): 1295-1301.
- [72] Ellis J B, Revitt D M. The contribution of highway surfaces to urban storm water sediments and metal loadings. *Science of the Total Environment*, 1987, 59: 339-349.
- [73] Lindstrom M, Hfikanson L. A model to calculate heavy metal load to lakes dominated by urban runoff and diffuse inflow. *Ecological Modelling*, 2001, 137: 1-21.
- [74] Bian B. Effect of antecedent dry period on water quality of urban storm runoff pollution. *Environmental Science*, 2009, 30(12): 3522-3526.
- [75] Fu D F, Shi J Q, Li H. First flush analysis of heavy metals in expressway storm water runoff. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(8): 1672-1677.
- [76] Chang J, Liu M, Li X H, Lin X, Wang L L, Gao L. Bioavailability of heavy metals in urban surface dust and rainfall-runoff system. *Environmental Science*, 2009, 29(30): 2241-2247.
- [77] Zhao H T, Li X Y, Wang X M, Tian D. Grain size distribution of road-deposited sediment and its contribution to heavy metal pollution in urban runoff in Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 183: 203-210.
- [78] Chui T W, Mar B W, Horner R R. Pollutant loading model for highway runoff. *Journal of Environmental Engineering, Division, ASCE*, 1982, 108(6): 1193-1210.
- [79] Maestri B, Lord B N. Guide for mitigation of highway storm water runoff pollution. *Science of the Total Environment*, 1987, 59: 467-476.
- [80] Kayhanian M, Suverkropp C, Ruby A, Tsay K. Characterization and prediction of highway runoff constituent event mean concentration. *Journal of Environmental Management*, 2007, 85(2): 279-295.
- [81] Harrison R M, Wilson S J. The chemical composition of highway drainage waters I, Major ions and selected trace metals. *Science of the Total Environment*, 1985, 41(1/2): 63-67.
- [82] Flint K R, Davis A P. Pollutant mass flushing characterization of highway storm water runoff from an ultra-urban area. *Journal of Environmental Engineering*, 2007, 133(6): 616-626.
- [83] Selbig W R, Bannerman R T. Evaluation of street sweeping as a stormwater-quality-management tool in three residential Basins in Madison, Wisconsin, U. S. Geological Survey, Middleton, Wisconsin. *Water Resource Investigations Report. 2007-5156*, 2007.
- [84] Yee C. Road surface pollution and street sweeping. *University of California, Berkeley Environmental Sciences*, 2005.
- [85] Grottker M. Runoff quality from a street with medium traffic loading. *Science of the Total Environment*, 1987, 59: 457-66.
- [86] Zhi Y B, Wang Z L, Ma Z, Wang Z S, Deng Z F, Li H L. The speciation and bioavailability of heavy metals pollutants in soil along highway in Erdos. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 2030-2039.

参考文献:

- [1] 常静, 刘敏, 李先华, 余婕, 林啸, 王丽丽, 高磊. 上海城市地表灰尘重金属污染累积过程与影响因素. *环境科学*, 2008, 29(12): 3483-3488.
- [4] 方凤满, 蒋炳言, 王海东, 谢宏芳. 芜湖市区地表灰尘中重金属粒径分布规律及健康风险评价. *地理研究*, 2010, 29(7): 1193-1202.
- [5] 方凤满, 谢宏芳, 王海东, 蒋炳言. 芜湖市区土壤和地表灰尘中 As 污染特征及健康风险评价. *环境化学*, 2010, 29(5): 880-883.
- [12] 刘春华, 岑况. 北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源. *环境科学学报*, 2007, 27(7): 1181-1188.
- [23] 刘玉燕, 刘敏, 程书波. 道路灰尘铂族元素含量的短期变化过程分析. *环境科学学报*, 2009, 29(9): 1864-1870.
- [42] 李章平, 陈玉成, 杨学春, 魏世强. 重庆市主城区街道地表物中重金属的污染特征. *水土保持学报*, 2006, 20(01): 114-118.
- [43] 常静, 刘敏, 李先华, 林啸, 王丽丽, 高磊. 上海地表灰尘重金属污染的健康风险评价. *中国环境科学*, 2009, 29(5): 548-554.
- [44] 李崇, 李法云, 张营, 刘桐武, 侯伟. 沈阳市街道灰尘中重金属的空间分布特征研究. *生态环境*, 2008, 17(2): 560-564.
- [45] 蒋炳言, 方凤满, 汪琳琳. 芜湖市区地表灰尘中重金属空间分布特征及来源分析. *安全与环境学报*, 2010, 10(5): 578-582.
- [46] 方凤满, 张志明, 陈文娟, 杨丁. 芜湖市区地表灰尘中汞和砷的空间及粒径分布规律研究. *环境科学学报*, 2009, 29(9): 1871-1877.
- [47] 李海雯, 陈振楼, 王军, 许世远, 史贵涛, 张菊, 王利. 基于 GIS 的上海城市灰尘重金属空间分布特征研究. *环境科学学报*, 2007, 27(5): 803-809.
- [48] 韦炳干, 姜逢清, 李雪梅, 牟书勇. 城市不同功能区道路沙尘重金属污染地球化学特征与评价. *环境化学*, 2009, 28(5): 721-727.
- [49] 郑小康, 李春晖, 黄国和, 杨志峰, 庞爱萍, 吕莹. 保定城区地表灰尘污染物分布特征及健康风险评价. *环境科学学报*, 2009, 29(10): 2195-2202.
- [51] 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 宋波, 李晓燕. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响. *环境科学学报*, 2008, 28(10): 1937-1945.
- [52] 常静, 刘敏, 李先华, 林啸, 王丽丽, 高磊. 上海城市地表灰尘重金属污染粒级效应与生物有效性. *环境科学*, 2008, 29(12): 348-3495.
- [57] 张建强, 白石清, 渡边泉. 城市道路粉尘、土壤及行道树的重金属污染特征. *西南交通大学学报*, 2006, 41: 68-73.
- [71] 赵洪涛, 李叙勇, 王为东, 陈海雪, 尹澄清. 城镇街尘污染与平原河网水体的源-汇效应研究. *环境科学学报*, 2010, 30(6): 1295-1301.
- [74] 边博. 前期晴天时间对城市降雨径流污染水质的影响. *环境科学*, 2009, 30(12): 3522-3526.
- [75] 傅大放, 石俊青, 李贺. 高速公路雨水径流重金属污染初期效应. *环境科学学报*, 2009, 29(8): 1672-1677.
- [76] 常静, 刘敏, 李先华, 林啸, 王丽丽, 高磊. 城市地表灰尘-降雨径流系统重金属生物有效性研究. *环境科学*, 2009, 29(30): 2241-2247.
- [86] 智颖帆, 王再岚, 马中, 王中生, 邓自发, 李红丽. 鄂尔多斯地区公路沿线土壤重金属形态与生物有效性. *生态学报*, 2007, 27(5): 2030-2039.