

武夷山市公路路面沉积物重金属污染与评价^{*}

李 灵¹, 张 玉², 连艳雪¹, 林权英¹

(1. 福建省高校绿色化工技术重点实验室, 武夷学院 生态与资源工程学院, 福建 武夷山 354300;

2. 武夷学院 土木工程与建筑学院, 福建 武夷山 354300)

摘要: 为了解武夷山市公路路面沉积物重金属含量及其污染危害程度, 在研究区内共采集了 61 个样品, 测试了 Cu, Zn, Pb, Cr 和 Ni 共 5 种重金属元素含量, 用主成分分析探讨了路面沉积物中重金属的来源, 并用地积累指数法和潜在生态风险指数法评价了其污染程度和生态风险。结果表明: 武夷山市公路路面沉积物中 Cu, Zn, Pb, Cr 和 Ni 的平均质量分数分别为 32.09, 242.05, 107.97, 173.22, 15.10 mg/kg, 分别是福建省土壤元素背景值的 1.49, 2.93, 3.09, 4.19 和 1.12 倍。地积累指数评价结果显示, 5 种重金属的污染程度由强至弱依次为: Cr > Zn > Pb > Cu > Ni, 其中 Cr, Zn, Pb 处于中度污染, Cu 处于无—中度污染, Ni 处于无污染。潜在生态风险指数评价结果表明: 单项潜在生态风险系数 E_r^i 从大到小的顺序为: Pb > Cr > Cu > Ni > Zn, 5 种重金属元素单项潜在生态风险系数 $E_r^i < 40$, 综合潜在生态风险指数 RI < 150, 武夷山市公路路面沉积物重金属含量处于轻微潜在生态风险; 公路路面沉积物中 Cu, Zn, Pb 和 Ni 主要来自于交通源, Cr 主要来源于土壤风化和建筑源。因此, 应及时清理道路沉积物、积极发展公共交通, 最大限度地降低道路沉积物中的污染物浓度, 为城市提供一个良好的生存环境。研究结果对区域环境重金属污染的控制、环境质量评价和合理城市规划布局有重要的现实指导意义。

关键词: 路面沉积物; 重金属; 地积累指数; 潜在生态风险指数

中图分类号: X 502 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004–390X (2015) 06–0916–08

Pollution and Assessment of Heavy Metals in Roadside Pavement Sediment of Wuyishan City

LI Ling¹, ZHANG Yu², LIAN Yanxue¹, LIN Quanying¹

(1. Provincial Key Laboratory of Green Chemical Industry Technology, College of Ecology and Resources Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Wuyi University, Wuyishan 354300, China)

Abstract: In order to determine the concentration of heavy metals in road sediments of Wuyishan city and the pollution harm degree, 61 samples were obtained and analyzed for Cu, Zn, Pb, Cr and Ni. By the methods of principal component analysis, this paper approached the possible sources of heavy metals in the road sediment. In the meantime, the index of geoaccumulation and the potential ecological risk index were used to evaluate the degree of pollution and the ecological risk of heavy metals. The results indicated that the mean concentrations of Cu, Zn, Pb, Cr and Ni were 32.09, 242.05, 107.97, 173.22 and 15.10 mg/kg. The mean concentrations of heavy metal were 1.49, 2.93, 3.09, 4.19 and

收稿日期: 2014–09–12

修回日期: 2014–12–24

网络出版时间: 2015–11–03 14:26

^{*} 基金项目: 南平市科技局项目 (N2009Z10–3); 武夷学院对接南平产业发展专项项目 (2011DJ08); 武夷山风景名胜区管理委员会资助项目 (2008–03)。

作者简介: 李灵 (1973—), 女, 河南南阳人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持和土壤生态学研究。

E-mail: haodou_025@126.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20151103.1426.014.html>

1. 12 times of the Fujian soil background values, respectively. The index of geoaccumulation analysis results showed that the pollution degree of 5 kinds of heavy metals followed the order $\text{Cr} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni}$ and the Cr, Zn and Pb were medium pollution, the Cu was non-to moderate-pollution, the Ni was non-pollution. The Potential Ecological Risk Index analysis results showed that single potential ecological risk coefficient E_r^i of 5 kinds of heavy metals was described as follows: $\text{Pb} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Zn}$. Single potential ecological risk coefficient E_r^i was less than 40 and potential ecological risk index RI was less than 150. Five kinds of heavy metal in the road sediments of Wuyishan city belonged to a light potential ecological risk. The Cu, Zn, Pb and Ni in road sediments mainly came from transportation source, the Cr mainly came from weathering soil and architecture source. To provide a good living environment for the city through timely cleaning road deposited sediment, the positive development of public transport and reducing the concentration of pollutants in the sediments of the road. The research results had important realistic meaning of heavy metal pollution control, environmental quality assessment and reasonable city planning.

Keywords: road sediments; heavy metals; index of geoaccumulation; potential ecological risk index

随着社会经济的飞速发展和城市化水平的大幅提高, 城市机动车数量剧增, 给城市环境造成越来越大的压力。城市化进程中的工业活动、交通运输、煤炭燃烧、废弃物堆积、大气沉降等人类活动产生大量的重金属最终会积聚在路面的沉积物中^[1-3], 从而成为城市环境重金属污染的重要来源。交通运输是公路路面沉积物重金属的重要来源之一。汽车汽油、发动机、轮胎、润滑油和镀金部分等的燃烧或磨损而释放出含有大量 Pb, Cd, Cu 和 Zn 等重金属的有害气体和粉尘, 这些重金属元素经过大气沉降进入路面沉积物中^[4-6]。研究表明, 人流量和车流量大的交通干线道路沉积物重金属的含量高于人流量和车流量较小的道路沉积物的^[7-9]。重金属浓度较高的路面沉积物容易在风力或径流作用下进入大气或水体环境中造成大气或水的重金属污染^[10], 因此城市道路路面沉积物重金属污染问题已逐渐引起了世界各国的关注^[11]。国外学者对澳大利亚^[12]、伊斯坦布尔^[13]、沙特阿拉伯^[14]等国家的城市道路路面沉积物重金属污染状况进行了研究, 中国学者也分别对上海^[15]、北京^[5]、南昌^[16]、石家庄^[17]等城市土壤进行了相关研究。

武夷山位于中国福建省西北部, 包括东部自然与文化景观保护区 (即风景名胜区)、中部九曲溪生态保护区、西部生物多样性保护区以及城村闽越王城遗址保护区等 4 个保护区, 区内工业污染较少。随着武夷山市基础建设和城市居民的

汽车消费热, 将不可避免地造成城市环境的污染。本文以武夷山市公路路面沉积物为研究对象, 在重金属含量测试的基础上, 用主成分分析法解析了重金属的可能来源, 评价其污染程度和潜在生态风险。研究结果不仅填补了目前武夷山市公路路面沉积物重金属污染研究方面的空白, 而且为武夷山市的城市环境污染防治、环境质量评价、城市规划提供了可靠的科学依据。

1 研究方法

1.1 采样点选择

武夷山市城市道路网主骨架如图 1 所示。武夷大道是一条纵横市区南北的主干道, 是市区连接火车站、机场、武夷山国家级风景名胜区和旅游度假区的唯一通道, 从市区环岛至赤石路口, 全长 8 km。武夷大道北与武夷山市区的五九路相接, 南与旅游度假区的大王峰路相接, 来往车辆多, 交通压力大。武夷山百花路于 2013 年 12 月通车, 有效缓解了武夷大道的交通压力。武夷山市现有 3 条高速公路和 2 条省道: G3 京台高速公路、G1514 宁上高速公路、武邵高速公路、S303, S205 省道。根据武夷山市城市道路网主骨架特征, 在实地考察和合理布点的基础上, 选择市区的五九路、武夷大道、百花路、火车站站前大道、大王峰路、S303 和 S205 省道、G1514 宁上高速公路、上梅乡路共布设 61 个采样点 (图 1), 每个取样点以 GPS 精确定位, 并记录周围的社会特征和环境状况。

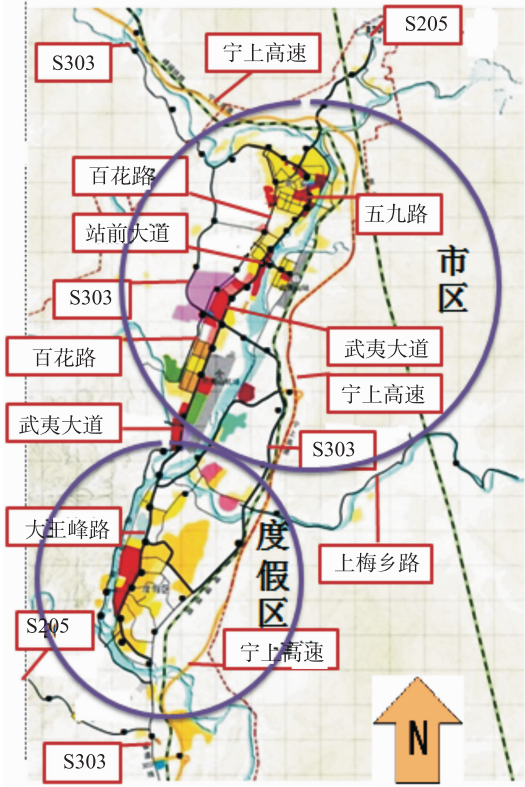


图 1 采样点分布
Fig. 1 Distribution of sampling sites

1.2 样品的采集与测试

2013 年 12 月在天气保持晴朗干燥至少 3 d 后, 选择晴朗无风的天气, 在每个采样点用塑料铲和塑料刷清扫一定面积的路面沉积物, 采样量约 200 g, 装入聚乙烯采样袋中, 于实验室内自然风干。用塑料镊子去除沉积物中的树叶、烟头、头发等杂物, 自然风干后过 0.149 mm 的尼龙筛。分析方法为国家土壤环境

质量标准 (GB 15618—1995) 规定的分析方法: Cu, Zn, Pb, Cr 和 Ni 均采用火焰原子吸收分光光度法进行测定。

1.3 重金属污染评价方法

重金属污染评价采用地积累指数法 (index of geoaccumulation, I_{geo}), 地积累指数法被广泛应用于沉积物中重金属污染的评价, 该法比较直观地反映了外源重金属在沉积物中的富集程度^[5]。

重金属潜在生态风险评价采用 HAKANSON 的潜在生态危害指数 (RI) 法, 该方法利用沉积物中重金属相对于背景值的比值及重金属的生物毒性系数进行加权求和得到生态危害指数, 是目前较多学者采用的方法^[18]。

$$I_{geo} = \log_2 [C_i (k \times B_i)]$$

式中, I_{geo} 为地积累指数; C_i 为单一重金属的实测值, mg/kg; 常数 K 是考虑造岩运动可能引起背景值变动而取的系数, 此处取 1; B_i 为参比值。

$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \cdot C_f^i = \sum T_r^i \cdot C_s^i / C_n^i$$

式中, RI 为多种金属的潜在生态风险指数; E_r^i 为第 i 种重金属的潜在生态风险系数; C_f^i 为第 i 种重金属的富集系数 ($C_f^i = C_s^i / C_n^i$); C_s^i 为第 i 种重金属的实测值, mg/kg; C_n^i 为第 i 种重金属的背景值, mg/kg; T_r^i 为第 i 种重金属的毒性系数, 主要反映重金属的毒性水平和环境对重金属污染的敏感程度。Cu, Zn, Pb, Cr, Ni 毒性系数分别为: 5, 1, 5, 2, 5^[19]。

地积累指数与潜在生态风险指数的分级标准见表 1。地积累指数法中的 B_i 和潜在生态风险指数法中的 C_n^i 均采用福建省土壤元素背景值^[20]。

表 1 地积累指数、潜在生态风险指数与分级

Tab. 1 Classification of index of geoaccumulation and potential ecological risk index

地积累指数 index of geoaccumulation			潜在生态风险指数 potential ecological risk index		
I_{geo}	级数 level	污染程度 pollution degree	E_i	RI	危害程度 hazard degree
≤ 0	0	无 non	≤ 40	< 150	轻微 light
$> 0 \sim 1$	1	无—中度 non-to-moderate	$> 40 \sim 80$	$\geq 150 \sim 300$	中等 moderate
$> 1 \sim 2$	2	中度 moderate	$> 80 \sim 160$	$\geq 300 \sim 600$	强 strong
$> 2 \sim 3$	3	中度—强度 moderate-strong	$> 160 \sim 320$	≥ 600	很强 very strong
$> 3 \sim 4$	4	强度 strong	> 320		极强 highly strong
$> 4 \sim 5$	5	强度—极强 strong-highly strong			
$> 5 \sim 6$	6	极强 highly strong			

1.4 数据处理与分析

本研究数据的统计与分析使用 SPSS 16.0 统计软件进行不同重金属元素间的相关性（采用 Pearson 相关模型）分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 武夷山市公路路面沉积物重金属含量

2.1.1 铜和锌含量

路面沉积物中 Cu 和 Zn 的平均质量分数分

别为 32.09 和 242.05 mg/kg（表 2），与福建省元素背景值相比，Cu 和 Zn 的平均质量分数分别是福建省元素背景值的 1.49 和 2.93 倍，Cu 和 Zn 的超标率分别达到 62.30% 和 96.72%。这表明武夷山市公路路面沉积物中的 Cu 与福建省元素背景值相比略有增加，而 Zn 已经存在一定程度的积累。Cu 和 Zn 的变异系数分别为 57% 和 29%，Zn 的变异系数在 5 种元素中最小。

表 2 路面沉积物重金属质量分数

Tab. 2 Concentrations of heavy metals in sediment on road sediments

元素 element	最小值/ (mg · kg ⁻¹) Min.	最大值/ (mg · kg ⁻¹) Max.	平均值/ (mg · kg ⁻¹) $\bar{x}$	标准差/ (mg · kg ⁻¹) SD	变异系数/% CV	福建省元素背景值 background value of Fujian soil	超标率/% exceeding standard rate
Cu	3.78	96.43	32.09	18.43	0.57	21.6	62.30
Zn	77.85	417.34	242.05	69.41	0.29	82.7	96.72
Pb	32.33	533.18	107.97	90.75	0.84	34.9	95.08
Cr	25.38	525.44	173.22	91.87	0.53	41.3	96.72
Ni	1.47	36.72	15.10	9.68	0.64	13.5	45.90

2.1.2 铅含量

路面沉积物中 Pb 的平均质量分数分别为 107.97 mg/kg（表 2），是福建省元素背景值的 3.09 倍，超标率达到 95.08%。Pb 的变异系数在 5 种元素中最大，为 84%。Pb 的最大值是福建省元素背景值的 15.28 倍，出现在 S303 省道武夷山市佳宏竹业有限公司附近，来往运输频繁，且附近有橘园、稻田和苗圃，农忙时节，大量的农用车增加了交通运输量。另外武夷山市区的五九路及武夷大道从环岛向南至火车站站前大道所在市区段，机动车以及人流量较大，路面沉积物中 Pb 质量分数也整体偏高。

2.1.3 铬含量

路面沉积物中 Cr 的平均质量分数为 173.22 mg/kg（表 2），是福建省元素背景值的 4.19 倍，Cr 的超标率达到了 95% 以上，Cr 的变异系数为 53%。Cr 的最大值是福建省土壤背景值的 12.72 倍，出现在 S303 省道战备路的武夷学院附近。铬广泛用于制不锈钢、铝合金、玻璃、陶瓷的着色剂、耐热的涂料、耐火材料、汽车零件等，广泛用于建筑、家具、汽车等行业。武夷学院近年来进行教学楼、实验楼、学生公寓、教师公寓等工程建设，公路边有废弃的建筑材料的堆

积。施工过程中产生的扬尘以及含铬的钢铁材料和管材等建筑材料也会造成 Cr 的富集，因此 Cr 可能受到建筑工程的影响。

2.1.4 镍含量

路面沉积物中 Ni 的平均质量分数为 15.10 mg/kg（表 2），Ni 的平均质量分数是福建省元素背景值的 1.12 倍，Ni 的超标率达到 45.90%，Ni 的变异系数为 64%。Ni 的最大值出现在武夷大道环岛南一家停车场附近，是福建省元素背景值的 2.72 倍。该停车场作为武夷山市通向管辖乡镇的交通运输车辆的主要停放地点。

由以上分析可知，以福建省土壤元素背景值为标准，5 种重金属元素超标倍数表现为 Cr > Pb > Zn > Cu > Ni，超标率表现为 Zn = Cr > Pb > Cu > Ni。

2.2 重金属污染程度评价

由地积累指数计算结果（表 3）可知，Ni 在所有采样点均为中度污染及以下，Cu 元素在个别样点受到中—强度污染，Zn 元素部分样点受到中—强度污染，Pb 和 Cr 在个别样点受到强度污染。各采样点所有元素的 I_{geo} 值均未达到中—强度以上污染。从 I_{geo} 平均值来看，武夷

山市公路路面沉积物中 5 种重金属的污染程度由强至弱依次为: Cr > Zn > Pb > Cu > Ni, 其中 Cr、Zn、Pb 处于中度污染, Cu 处于无—中度

污染, Ni 处于无污染。总的来说, 武夷山市公路路面沉积物中重金属污染处于无污染至中度污染。

表 3 路面沉积物重金属元素的地积累指数

Tab. 3 Index of geoaccumulation among heavy metal concentrations in road sediments

元素 element	I_{geo}			各级别及污染程度所占的比例/% the proportion of each grade and pollution degree					
	最小值	最大值	平均值	0 级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 ~ 6 级
	Min.	Max.	$\bar{x}$	level 0	level 1	level 2	level 3	level 4	level 5 ~ 6
Cu	-2.51	2.16	0.34	37.70	40.98	18.03	3.28	0	0
Zn	-0.09	2.34	1.48	3.28	3.28	81.97	11.48	0	0
Pb	-0.11	3.93	1.29	4.92	39.34	29.51	19.67	6.56	0
Cr	-0.70	3.67	1.88	3.28	3.28	49.18	37.70	6.56	0
Ni	-3.20	1.44	-0.20	54.10	29.51	16.39	0	0	0

2.3 重金属潜在生态风险评价

武夷山市公路路面沉积物中 5 种重金属的单项潜在生态风险系数 (E_i) 和综合潜在生态风险指数 (RI) 见表 4。依据 HAKANSON 潜在生态风险指数等级 (表 1) 可知, 5 种重金属元素的 E_i 的平均值范围为 2.93 ~ 15.47 (表 4), 低于 40, 属于轻微污染程度。 E_i 从大到小的顺序为: Pb >

Cr > Cu > Ni > Zn, Pb 的潜在生态风险程度最大, 其次是 Cr。

武夷山市公路路面沉积物中 5 种重金属元素的 RI 变化范围为 15.82 ~ 113.05, 平均值为 39.80, RI < 150 (表 4), 表明武夷山市公路路面沉积物生态环境处于轻微潜在生态风险, 其中 Pb 对 RI 值的贡献最突出。

表 4 路面沉积物重金属潜在生态风险指数

Tab. 4 Potential ecological risk index of heavy metals in road sediments

元素 element	重金属的单项污染系数 single pollution coefficient			单项潜在生态风险系数 single potential ecological risk coefficient			潜在生态风险指数 potential ecological risk index		
	(C_i^i)			(E_i^i)			(RI)		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
	Min.	Max.	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{x}$
Cu	0.18	4.46	1.49	0.88	22.32	7.43	15.82	113.05	39.80
Zn	0.94	5.05	2.93	0.94	5.05	2.93	—	—	—
Pb	0.93	15.28	3.09	4.63	76.39	15.47	—	—	—
Cr	0.61	12.72	4.19	1.23	25.45	8.39	—	—	—
Ni	0.11	2.72	1.12	0.54	13.60	5.59	—	—	—

2.4 重金属元素的相关性分析和主成分分析

对武夷山市公路路面沉积物 5 种重金属元素进行相关性分析 (表 5) 可以看出: Cu, Zn, Pb 和 Ni 之间呈极显著的正相关 ($P < 0.01$), 说明这 4 种元素的来源有较大的相似性; 而 Cr 与其他 4 种重金属的相关性较差, 说明 Cr 与其他 4 种重金属元素的主要来源不同。

表 5 重金属元素间的相关系数

Tab. 5 Correlation coefficients among heavy metal contents

项目 item	Cu	Zn	Pb	Cr
Cu	1			
Zn	0.707 **	1		
Pb	0.473 **	0.623 **	1	
Cr	-0.167	-0.104	-0.063	1
Ni	0.664 **	0.557 **	0.507 **	-0.101

注/ Note: “ ** ”. $P < 0.01$ ($n = 61$).

对重金属元素含量进行主成分分析,结果表明第1,2主成分的累计贡献率达75.594%(表6),即5种重金属可以由前2个主成解释总变量的绝大部分信息。第1个主成分的贡献率为

55.946%,Cu,Zn,Pb和Ni在第1主成分上有较高的正载荷,分别为0.864,0.870,0.766和0.816。第2个主成分的贡献率为19.648%,Cr在该主成分上有较高的正载荷,为0.974。

表6 重金属元素的主成分分析

Tab.6 Principal component analysis of heavy metal concentrations

主成分 component	初始特征值 initial eigenvalue			提取后特征值 eigenvalue after extracted			因子载荷 factor loading		
	特征值 eigenvalue	解释方差 explained variance	累计方差 cumulative variance	特征值 eigenvalue	解释方差 explained variance	累计方差 cumulative variance	元素 element	主成分1 component 1	主成分2 component 2
1	2.797	55.946	55.946	2.797	55.946	55.946	Cu	0.864	-0.036
2	0.982	19.648	75.594	0.982	19.648	75.594	Zn	0.870	0.078
3	0.565	11.298	86.892	—	—	—	Pb	0.766	0.153
4	0.427	8.541	95.433	—	—	—	Cr	-0.203	0.974
5	0.228	4.567	100.000	—	—	—	Ni	0.816	0.054

在相关分析中Cu,Zn,Pb和Ni之间表现出显著的正相关,结合以上重金属元素含量的分析可知,Cu,Zn,Pb和Ni在车流量较大的武夷大道含量均较高,且Pb和Zn为一般亲Cu元素,且常被作为交通污染源的标识元素^[21],因此第1主成分可能反映了交通污染的影响。第1主成解释的原变量方差最多,可以认为第1主成分是污染的主要来源,因此交通源是造成武夷山市公路路面沉积物重金属污染的主要原因。

3 讨论

3.1 重金属的来源分析

本研究显示:Cu和Zn的最大值出现在武夷大道中州加油站附近,分别是福建省元素背景值的4.46和5.05倍。有研究表明,城市灰尘中的Cu,Zn来自车辆的减速活动^[18]。Cu常被用于汽车润滑剂中的添加剂^[5],且汽车金属部件和引擎的磨损也可导致大量含Cu粉尘的产生。Zn主要来源于汽车轮胎的老化磨损、机动车制动器衬片和其他零部件的磨损^[4,6],以及润滑油燃烧。加油站附近车辆种类多且行驶缓慢、刹车与启动频繁,尾气排放加重,轮胎和刹车里衬及其他零部件磨损加剧,形成了铜、锌等大量的金属颗粒物^[22-23],这可能是加油站附近公路路面沉积物Cu和Zn污染的主要来源。

研究证实:交通频繁、机动车尾气排放(四乙

基铅)、零部件的损耗等是造成Pb超标的主要原因^[24-25]。因此,交通车辆是影响城市道路路面沉积物Pb水平的主要因素。Ni主要来自汽车制动器衬片和其他零部件等^[26],多数研究者认为Ni主要源于汽车轮胎的老化和车体的磨损,停车场附近机动车以及人流量较大可能是Ni污染的主要来源。土壤中大部分的Cr与矿物牢固结合且不同的土壤含铬量差异甚大,Cr属于亲岩元素,容易形成稳定的含氧阴离子,对风化过程具有较强的抵抗力^[15]。结合以上Cr元素含量分析可知,Cr的主要来源为土壤的风化和建筑源。

本研究表明:Cu,Zn,Pb和Ni的来源有较大的相似性,而Cr与其他4种重金属元素的主要来源不同。秦松^[27]在研究兰州西固城区街道灰尘重金属含量时有类似的发现。与在北京^[5]、上海^[15]、兰州^[27]及其他国内外城市^[16]开展的研究相比,武夷山市道路沉积物中重金属Cu,Zn和Ni浓度较低,Pb含量高于北京而低于上海,但Cr的含量明显偏高,说明不同城市人为活动的方式与强度、污染物来源、环境特点及各研究者的研究方法等不同,所得道路沉积物中重金属的污染不能反映各城市人类活动干扰的实际强度。因此,急需制定一个城市道路沉积物中污染物的标准分析方法。

车流量和人流量较大的武夷大道,路面沉积物中Cu,Zn,Pb,Cr和Ni含量在研究区域内整体上均偏高,这与国内外多数的研究结果^[2,8,28]相吻合,

说明武夷山公路沉积物中重金属元素的来源与交通污染源关系密切。因此武夷山百花路的开通有效缓解了武夷大道的交通压力,是未来降低武夷山市道路沉积物中重金属含量的有效措施之一。

3.2 重金属的空间变异性

变异系数可以反映不同采样点平均变异程度。变异系数越大,说明受人类活动干扰越强,在空间上的分布有较大的差异。研究区 5 种重金属元素中 Pb 的变异系数最大,为 84%,而 Zn 的变异系数最小,这与石家庄市道路沉积物重金属元素 Pb 含量的变异系数最大(80.5%)^[17]和南昌市街道灰尘 7 种重金属元素中 Zn 的变异系数最小(30.81%)^[16]研究结果基本一致。同时说明研究区内 Pb 含量受外界干扰较大,在空间分布上有较大的差异,而 Zn 虽然区域差异性不大,为干扰不明显,但由于其含量相对较高,故仍需要引起足够重视。

武夷山度假区道路路面沉积物中重金属含量相对较低,而武夷山市区内车流量和人流量较大的武夷大道,路面沉积物中重金属含量相对较高,研究结果对未来武夷山市交通工程规划具有现实的指导意义。但本研究仅对武夷山市道路路面沉积物中重金属含量的分布做了静态的研究,对重金属的来源判断主要采用定性的描述和统计学上的分析。今后进一步加强对城市道路灰尘重金属污染治理所密切关注的赋存形态、迁移转化规律、粒径分布、环境效应及对河流水体重金属污染的贡献等的研究,为区域环境重金属污染治理提供更加坚实的理论基础。

3.3 重金属污染不同评价方法的差异性

用潜在生态风险评价法与地积累指数法对武夷山公路路面沉积物中的 5 种重金属评价的结果不一致,这是因为潜在生态风险评价中考虑了不同重金属的毒性系数。Pb 的毒性系数($T_i = 5$)较大,因此其潜在生态风险程度升为最高,而 Zn 的毒性响应系数较小($T_i = 1$),故其潜在生态风险程度降为最低。地积累指数法侧重于重金属含量与背景值的对比评价,而 HAKANSON 生态风险指数法除考虑重金属含量之外,更考虑了不同重金属的生物毒性影响,相比较而言,后者的评价结果更符合实际^[29]。

4 结论

(1)武夷山市公路路面沉积物 5 种重金属的

污染程度由强至弱依次为:Cr > Zn > Pb > Cu > Ni,其中 Cr, Zn, Pb 处于中度污染, Cu 处于无—中度污染, Ni 处于无污染。

(2)5 种重金属单项潜在生态风险系数 E_r^i 从大到小的顺序为: Pb > Cr > Cu > Ni > Zn,作为交通污染源特征元素的 Pb,其潜在生态危害最大。5 种重金属元素 $E_r^i < 40$, RI < 150,武夷山市公路路面沉积物重金属含量处于轻微潜在生态风险。

(3)武夷山市公路路面沉积物中 Cu, Zn, Pb 和 Ni 主要来自交通源, Cr 主要来自土壤风化和建筑源。

[参考文献]

- [1] 张一修,王济,秦樊鑫,等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1): 204–212.
- [2] 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.
- [3] 任玉芬,王效科,欧阳志云,等. 北京城区道路沉积物污染特性[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2365–2371.
- [4] 郭广慧,雷梅,陈同斌,等. 交通活动对公路两侧土壤和灰尘中重金属含量的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 1937–1945.
- [5] 向丽,李迎霞,史江红,等. 北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析[J]. 环境科学, 2010, 31(1): 159–167.
- [6] 史兴民,王建辉. 咸阳市区街道灰尘重金属污染及评价[J]. 地理科学进展, 2009, 28(3): 435–440.
- [7] FAKAYODE S O, OLU-OWOLABI B I. Heavy metal contamination of roadside topsoil in Osogbo, Nigeria: Its relationship to traffic density and proximity to highways[J]. Environmental Geology, 2003, 44(2): 150–157.
- [8] LI Xiangdong, POON C S, LIU P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hongkong[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16: 1361–1368.
- [9] BANERJEE A K. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India[J]. Environmental Pollution, 2003, 123(1): 95–105.
- [10] DUZGOREN-AYDIN N S, WONG C S, SONG Z G, et al. Fate of heavy metal contaminants in road dusts and gully sediments in Guangzhou, SE China: A chemical and mineralogical assessment[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2006, 12(2): 374–389.
- [11] JAYAPRAKASH M, URBAN B, VELMURUGAN P M, et al. Accumulation of total trace metals due to rapid urbanization in microtidal zone of Pallikaranai marsh, South of Chennai, India[J]. Environmental Monitoring and As-

- essment, 2010, 170(1/2/3/4): 609 – 629.
- [12] AL-CHALABI A S, HAWKER D. Response of vehicular lead to the presence of street dust in the atmospheric environment of major roads [J]. *The Science of the Total Environment*, 1997, 206(2): 195 – 202.
- [13] AL-RAJHI M A, AL S M, SEAWARD M D, et al. Particle size effect for metal pollution analysis of atmospherically deposited dust [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(1): 145 – 153.
- [14] SEZGIN N, OZCAN H K, DEMIR G, et al. Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway [J]. *Environment International*, 2004, 29(7): 979 – 985.
- [15] 张菊, 邓焕广, 陈振楼, 等. 上海市区街道灰尘重金属污染研究 [J]. *土壤通报*, 2007, 38(4): 727 – 731.
- [16] 唐凤舞. 南昌市街道灰尘重金属污染特征及形态分析研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2010.
- [17] 赵宙. 石家庄市街道积尘重金属污染研究 [D]. 石家庄: 河北师范大学, 2009.
- [18] HJORTENKRANS D, BERGB Ä CK B, HÄGGERUD A. New metal emission patterns in road traffic environments [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 117(1/2/3): 85 – 98.
- [19] 李灵, 梁彦兰, 张玉, 等. 武夷岩茶核心种植区土壤重金属污染特征及土壤质量评价 [J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 730 – 736.
- [20] 陈振金, 陈春秀, 刘用清, 等. 福建省土壤元素背景值及其特征 [J]. *中国环境监测*, 1992, 8(3): 107 – 110.
- [21] MIGUEL E D, LLAMAS J F, CHACÓN 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.
- [22] 马建华, 李剑. 郑汴公路路尘、路沟底泥和路旁土壤重金属分布 [J]. *西南交通大学学报*, 2008, 43(2): 285 – 291.
- [23] SAEEDI M, HOSSEINZADEH M, JAMSHIDI A A. Assessment of heavy metals contamination and leaching characteristics in highway side soils, Iran [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 151(1/4): 231 – 241.
- [24] AL – RAJHI M A. SEAWARD M R D, AL – AAMER A S. Metal levels in indoor and outdoor dust in Riyadh, Saudi Arabia [J]. *Environment International*, 1996, 22(3): 315 – 324.
- [25] 张志红, 杨文敏. 汽油车排出颗粒物的化学组分分析 [J]. *中国公共卫生*, 2001, 17(7): 623 – 624.
- [26] PRECIADO H F, LI L Y. Evaluation of metal loadings and bioavailability in air, water and soil along two highways of British Columbia, Canada [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2006, 172(1/2/3/4): 81 – 108.
- [27] 秦松. 西固城区街道灰尘重金属含量的分布、来源及质量评价 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [28] 刘春华, 岑况. 北京市街道灰尘的化学成分及其可能来源 [J]. *环境科学学报*, 2007, 27(7): 1181 – 1188.
- [29] 许振成, 杨晓云, 温勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价 [J]. *环境科学*, 2009, 30(11): 3262 – 3268.