

区域尺度的城市灰尘重金属分布

陈莉, 李凤全, 叶玮, 朱丽东, 王天阳

(浙江师范大学 地理过程实验室, 浙江 金华 321004)

摘要: 根据 47 个城市的灰尘重金属 Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, Ni 的监测资料, 分析了重金属在区域尺度的分布规律。结果表明, 灰尘重金属浓度分为 5 个等级, 并在 1~4 倍的标准差内变化, 在空间上呈西高东低, 南高北低, 自西南向东北减少的特征。各地区灰尘重金属含量依次呈: 西南>西北>华南>华东>华北>华中>东北, 且某些元素的空间分布还与我国阶梯地势相吻合。自然背景和人类活动都是重要的影响因素, 前者对华北、华中和东北地区影响较大, 后者对西北、西南和华南地区作用程度较高。另外, 各重金属元素受人类活动的作用强度也不同, 受影响强度依次呈: Cd>Hg>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr。

关键词: 城市灰尘; 重金属; 空间分布

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0194-05

中图分类号: X513

Distribution of Heavy Metals in Urban Dust on Regional Scale

CHEN Li, LI Feng-quan, YE Wei, ZHU Li-dong, WANG Tian-yang

(Geography Process Laboratory, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China)

Abstract: Distribution and characteristic of Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, Ni of urban dust were analyzed on regional scale coming from forty-seven cities. The results showed that heavy metal concentrations were divided into five grades, and change from one to four times standard deviation. In space scale, they were high in western and southern, and low in eastern and northern, and reduced from southwest to northeast. The order of heavy metal content in each region was Southwest China>Northwest China>South China>East China>North China>Central China>Northeast China. In addition, some elements, spatial distribution was consistent with the stepped topography of China. Soil background and human activity were important factors, the former mainly influenced North China, Central China and Northeast China, the latter played an important role in Northwest, Southwest and South China. The order of disturbance on heavy metal was Cd>Hg>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr.

Keywords: urban dust; heavy metal; spatial distribution

城市灰尘重金属是城市灰尘研究的重要内容之一。许多学者从多个角度对灰尘重金属进行研究, 包括来源判析、赋存形态、含量与分布及生态风险评价等。空间尺度是地理信息科学研究的重要内容, 是地理学空间数据处理和分析的前提^[1]。相同的地理事物在不同的空间尺度上表现出明显的变化特性。因此, 多尺度空间数据分析已成为描述和表达地理数据的重要方法。目前, 城市灰尘重金属空间尺度研究主要集中在城市功能区。如李海雯, 常静等^[2-3]对上海城区灰尘研究表明, Pb, Cr, Cu 和 Zn 的含量在工业区、交通区和商业区较高, 城市绿地略低。郑小康

等^[4]对河北省保定城区地表灰尘研究表明, Cd, Cr, Pb 和 Zn 的含量依次为: 屋顶灰尘>商业区>交通区>公园区>办公区>居住区, 且在各区域的变化趋势一致, 呈显著相关关系。城市灰尘重金属不同区域尺度研究, 对于宏观掌握灰尘重金属含量特征和空间分布状况, 了解自然和人类活动的影响作用具有重要意义。

1 研究方法

1.1 数据来源与处理

研究中采用的数据主要来自文献资料, 这些研究

收稿日期: 2010-12-20

修回日期: 2011-03-14

资助项目: 国家自然科学基金项目“中国南方晚第四纪风尘沉积的物质联系”(41071002); 浙江省自然科学基金项目“良渚文化发育环境研究”(Y5080307)。

作者简介: 陈莉(1987—), 女(汉族), 山东省枣庄市人, 硕士研究生, 研究方向为城市生态环境。E-mail: binghuno.1@163.com。

通信作者: 李凤全(1971—), 男(汉族), 黑龙江省五常市人, 博士, 副教授, 研究方向为城市生态环境。E-mail: lygl45@zjnu.cn。

的样品采集方法和测试技术基本一致,即毛刷、不锈钢铲采样法和原子吸收光谱仪测定法,系统误差较小。统计出 47 个城市的地表灰尘数据,其中大部分数据来自城市灰尘,少部分是城区表土层 0—5 cm 或 0—10 cm 的测试数据(这部分重金属含量受城市灰尘影响较大,可以间接代表城市灰尘的状况)。根据数据分布特征,以北京、上海、广州、武汉、沈阳、西安和重庆市为中心,把 34 个省级行政单位分为 7 大区域。华北地区包括:北京市,天津市,河北省,内蒙古自治区和山西省;华东地区包括:上海市,安徽省,浙

江省,江苏省,山东省,福建省,江西省和台湾省;华南地区包括:广东省,海南省,广西省,香港地区和澳门地区;华中地区包括:湖北省,河南省和湖南省;东北地区包括:辽宁省,黑龙江省和吉林省;西北地区包括:陕西省,新疆维吾尔自治区,甘肃省,宁夏回族自治区和青海省;西南地区包括:重庆市,四川省,云南省,贵州省和西藏自治区。选取 Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn 和 Ni 这 7 种重金属元素,对每一个区域的灰尘重金属含量进行统计,为避免异常值,做平均处理,用平均值^[5-35]表征各区域城市灰尘重金属浓度(表 1)。

表 1 各区域城市灰尘重金属平均浓度

mg/kg

区域	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
华北地区	3.68	113.53	78.30	0.34	41.10	112.32	306.84
华中地区	1.00	144.20	55.49	0.37	23.63	85.90	276.78
东北地区	2.17	77.12	63.25	0.29	35.15	75.35	270.70
西南地区	7.07	87.78	95.25	11.36	—	160.70	434.25
西北地区	2.36	118.35	146.61	0.88	264.19	82.92	294.92
华南地区	11.64	55.82	82.32	0.66	20.04	131.43	479.04
华东地区	1.45	83.02	84.15	0.57	82.83	147.88	392.37
平均值	4.20	97.12	86.48	2.06	77.82	113.78	350.70

1.2 分析方法

应用 GIS 空间处理技术,对城市灰尘重金属的空间配置状况进行分析,采用标准差分类法绘制重金属元素的空间分区图(图 1)。以距均值的 0.5 个标准差距离($\bar{X} \pm 0.5\sigma$)为单位,以 1 个标准差距离为组距,(大于 \bar{X} 记为“+”,小于 \bar{X} 记为“-”)。把各重金属元素的浓度由低到高分为 5 个等级区间,分别是 $-2.5 \sim -1.5$, $-1.5 \sim -0.5$, $-0.5 \sim 0.5$, $0.5 \sim 1.5$, $1.5 \sim 2.5$ 。并规定小于 -0.5σ 为低值区,大于 0.5σ 为高值区, $-0.5 \sim 0.5\sigma$ 为中值区。

2 结果与分析

2.1 分布规律

2.1.1 重金属元素浓度变化特征 Hg 分为 $-0.5 \sim 0.5$, $1.5 \sim 2.5$ 两个区间。西南地区为高值区,浓度为 11.36 mg/kg,其它区域的浓度在 1 mg/kg 以下。高值和低值相差 3 倍,区域间浓度变化明显。

Pb 分为 $-1.5 \sim -0.5$, $-0.5 \sim 0.5$, $0.5 \sim 1.5$ 这 3 个区间,西南、华东地区属于高值区,浓度范围为 135.99~160.70 mg/kg。华北和华南地区属于中值区,浓度为 105.42~135.98 mg/kg,其它地区属于低值区,浓度范围为 75.35~105.41 mg/kg。区域浓度在偏离均值 1.5 倍内浮动。Cu 和 Ni 元素分为 $-1.5 \sim -0.5$, $-0.5 \sim 0.5$, $1.5 \sim 2.5$ 这 3 个区间。西北地

区 Cu 和 Ni 元素浓度最高,分别为 146.61 和 264.19 mg/kg,远大于均值。华中和东北地区 Cu 的浓度范围是 55.49~76.43 mg/kg,为低值区。西南、华南、华东和华北地区 Cu 浓度为 76.44~102.50 mg/kg,属于中值区。Ni 的中值在东北、华北和华东地区,浓度为 30.44~114.61 mg/kg,低值在华中和华南地区,最低浓度 20.04 mg/kg,是高值的 1/13,浓度变化幅度大。Zn 和 Cd 元素分为 $-1.5 \sim -0.5$, $-0.5 \sim 0.5$, $0.5 \sim 1.5$, $1.5 \sim 2.5$ 这 4 个区间。高值都在华南和西南地区,最大浓度分别是 479.04 和 11.64 mg/kg。Zn 的中值在华东地区,浓度为 326.42~400.45 mg/kg,低值在东北、西北、华北和华中地区,浓度范围是 270.7~326.41 mg/kg。Cd 的中值在华北地区,浓度为 2.47~6.06 mg/kg,低值在西北、东北、华东和华中地区,浓度为 1~2.46 mg/kg。Zn 和 Cd 元素的等级区相同,高低值分布基本一致,但各地区 Zn 元素浓度远高于 Cd 元素。Cr 元素分为 $-2.5 \sim -1.5$, $-1.5 \sim -0.5$, $-0.5 \sim 0.5$, $0.5 \sim 1.5$, $1.5 \sim 2.5$ 这 5 个区间。西北、华北和华中地区属于高值区,最高浓度为 144.20 mg/kg。华南地区浓度最低,为 55.82~56.36 mg/kg,其次是东北地区,浓度为 56.37~81.64 mg/kg。西南和华东地区为中值区,浓度范围为 81.65~106.92 mg/kg。区域浓度变化幅度小,相对稳定。

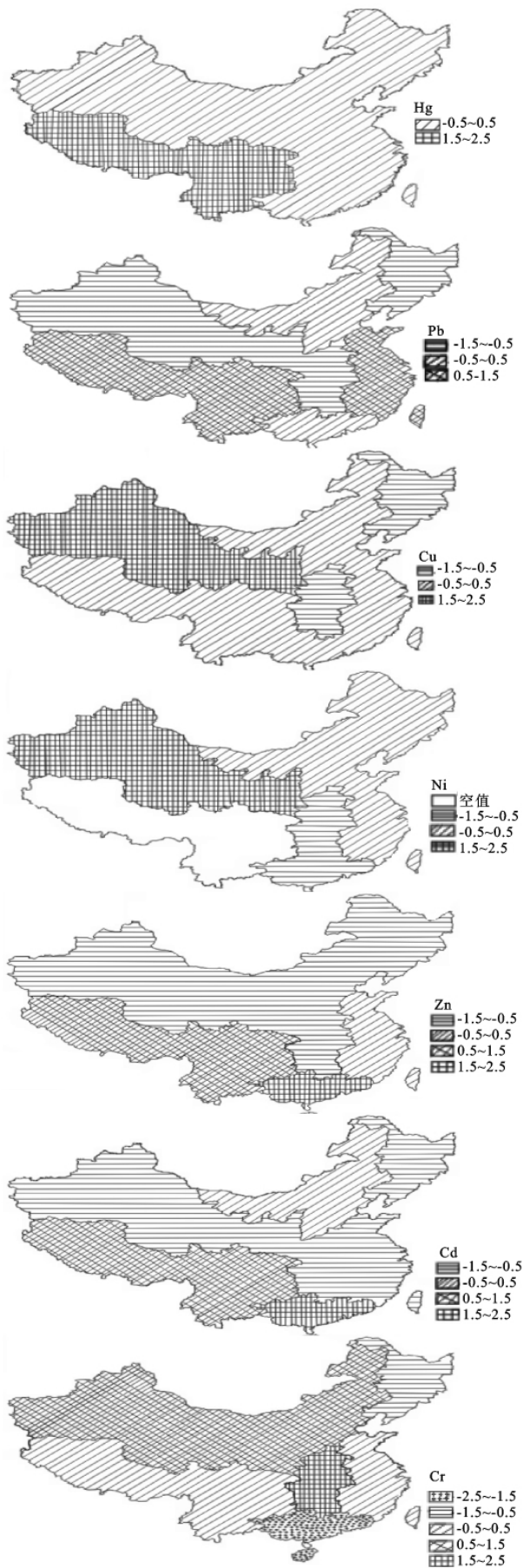


图 1 研究区重金属元素的空间分区图

2.1.2 重金属元素空间分布状况 空间分布是指一段时间内灰尘重金属在各区域的配置状况及变化特征。把每个地区的 7 种重金属浓度相加,取均值作为该地区的灰尘重金属含量。则各地区的灰尘重金属含量由大到小依次为:西南(116.58 mg/kg) > 西北(115.72 mg/kg) > 华南(111.56 mg/kg) > 华东(101.16 mg/kg) > 华北(84.78 mg/kg) > 华中(75.64 mg/kg) > 东北(67.31 mg/kg),在空间上大体呈西高东低,南高北低,自西南向东北逐渐减少的趋势。如 Cu 和 Ni 在西北地区偏高,华东、华中和华北地区偏低,空间分布表现为西部高中东部低;Zn 和 Cd 在西南和华南地区浓度高,东北和华北地区浓度低,体现出西南高东北低的特征。某些元素的空间分布还与我国阶梯地势相吻合,即一、二阶梯浓度高,第三阶梯浓度低。如 Cu, Ni, Cr 和 Hg 表现为广大的西北内陆、内蒙古高原、云贵高原、四川盆地和青藏高原等地区浓度高,东北和东部沿海地区浓度低。体现在地形上,就表现为高原、盆地、沙漠和丘陵地区浓度高,平原、湿地和冻土广布的地区浓度低。可见,灰尘重金属在各地区分布状况不同,但具有明显的变化规律,并与区域地形、海陆位置等地理环境密切相关。

2.2 重金属元素分布的影响因素分析

2.2.1 自然背景 土壤尘是城市灰尘的主要来源^[36],灰尘重金属的空间分布应要受到区域自然背景的影响。根据各区域土壤元素背景值(表 2),结合表 1,分析不同地区重金属元素浓度的变化。

由表 1—2 可以看出,土壤元素背景值由低到高的排列为: $Hg < Cd < Cu < Pb < Ni < Cr < Zn$; 灰尘重金属由低到高排序为: $Hg < Cd < Ni < Cu < Cr < Pb < Zn$ 。除 Cu, Pb, Ni 和 Cr 排序有变动外,其它元素的位序没有变化,尤其是两个端点值 Hg 和 Zn 没有变动,说明灰尘重金属总的分布趋势要受到区域自然背景的影响。从地区分析,属于内陆的华北、华中和西北地区自然背景值排序相同,均表现为: $Hg < Cd < Pb < Cu < Ni < Cr < Zn$; 对应的灰尘重金属由低到高的顺序分别为: $Hg < Cd < Ni < Cu < Pb < Cr < Zn$, $Hg < Cd < Ni < Cu < Pb < Cr < Zn$, $Hg < Cd < Pb < Cr < Cu < Ni < Zn$ 。可以看出,华北和华中地区灰尘重金属排序相同,且 Hg, Cd, Cr 和 Zn 与土壤背景值位序一致,吻合较好。西北地区的 Hg, Cd, Pb 和 Zn 与背景值对应。东北和华东地区自然背景值一致,均表现为: $Hg < Cd < Cu < Ni < Pb < Cr < Zn$; 对应的灰尘重金属也基本一致,由小到大分别表现为: $Hg < Cd < Ni < Cu < Cr < Pb < Zn$, $Hg < Cd < Ni < Cr < Cu < Pb < Zn$; 且 Hg, Cd 和 Zn 与背景值位序吻合。华南地区

自然背景值由小到大的顺序为: $Hg < Cd < Ni < Cu < Pb < Cr < Zn$, 灰尘重金属由小到大则表现为: $Hg < Cd < Ni < Cr < Cu < Pb < Zn$; 除 Cu, Pb 和 Cr 外, 其它元素对应一致。西南地区自然背景值由小到大表现

为: $Hg < Cd < Cu < Pb < Cr < Zn$, 灰尘重金属则表现为: $Cd < Hg < Cr < Cu < Pb < Zn$, 元素变动比较大。可见, 除西南地区外, 其它地区灰尘重金属与土壤元素都存在不同程度的吻合, 尤其是华北、华中和东北地区。

表 2 各区域土壤元素背景值

mg/kg

区域	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
华北地区	0.09	64.76	23.10	0.05	28.92	20.18	78.98
华中地区	0.12	73.73	25.90	0.08	31.97	25.33	79.37
东北地区	0.10	54.40	18.97	0.04	23.27	24.80	71.53
西南地区	0.11	79.18	32.83	0.05	36.58	33.95	87.43
西北地区	0.12	62.42	23.30	0.01	31.34	20.22	69.16
华南地区	0.13	53.37	18.50	0.11	17.17	33.07	60.73
华东地区	0.10	56.19	22.09	0.10	24.84	28.70	69.97
平均值	0.11	63.44	23.53	0.06	27.73	26.61	73.88

注: 数据来源于根据《中国土壤元素背景值》。

就元素而言, 土壤元素背景与灰尘重金属在空间上有一定的关联。相关分析结果表明, 相关性比较高的是: $Pb(R=0.742)$, $Cd(R=0.456)$, $Ni(R=0.447)$, $Cr(R=0.355)$ 。可见, 土壤元素背景与灰尘重金属含量之间存在一定的相关性, 并且 Pb, Cd, Ni 和 Cr 的相关性高。

2.2.2 人类活动的干扰强度 评价人类活动的影响程度, 可采用地质累积指数来表示。地质累积指数计算公式^[37]为:

$$I_{geo} = \log_2(C_n / 1.5B_{En})$$

式中: C_n ——元素 n 的浓度; B_{En} ——元素 n 的地球化学背景值。其实质是从现在的金属含量除去相应的天然含量或背景含量, 得到因人为活动所造成的金属元素的总富集程度^[38]。因此, I_{geo} 值越大, 重金属在该地区富集程度越高, 受人类活动干扰越强(表 3)。

当 $I_{geo} > 1$, 就表明该元素在该地区受到了人类活动的影响^[39]。由表 3 可以看出, 除 Cr 外其它元素都受到不同程度的人类活动干扰。其中 Cd 和 Hg 元素在大部分地区 $I_{geo} > 2$, 说明人类活动是灰尘中 Cd 和

Hg 元素的重要影响因素。对 Cd 元素影响最强的地区是华南地区 $I_{geo} = 5.9$, 其次是西南地区 $I_{geo} = 5.4$, 其它地区依次为: 华北 > 东北 > 西北 > 华东 > 华中。对 Hg 元素作用最强的地区是西南地区 $I_{geo} = 7.3$, 其次是西北地区 $I_{geo} = 5.5$, 其它地区依次为: 东北 > 华北 > 华南 > 华东 > 华中。Pb, Zn 和 Cu 受影响程度分别为: 华北 > 华东 > 西南 > 西北 > 华南 > 华中 > 东北, 华南 > 华东 > 西南 > 西北 > 华北 > 东北 > 华中, 西北 > 华南 > 华东 > 华北 > 东北 > 西南 > 华中。对 Ni 元素而言, 人类活动影响的区域差异较大, 影响最大的是西北地区 $I_{geo} = 2.5$, 其次是华东地区 $I_{geo} = 1.2$, 其它地区 $I_{geo} < 0$ 。可见, 不同地区人类活动对灰尘重金属作用程度不同。显然, 西南、西北和华南地区人为干扰较强。将每一种重金属在各地区的地质累积指数相加就得到该重金属在整个区域上受人类活动的干扰强度, 依次为: $Cd(29.4) > Hg(22.9) > Zn(11.5) > Pb(10.4) > Cu(8.8) > Ni(2.2) > Cr(-0.1)$ 。可见, Cd 和 Hg 受干扰程度远大于其它元素, 说明灰尘中 Cd 和 Hg 的空间分布易受人类活动的影响。

表 3 各地区重金属元素地质累积指数

区域	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
华北地区	4.8	0.2	1.2	2.1	-0.1	1.9	1.4
华中地区	2.4	0.4	0.5	1.7	-1.0	1.2	1.2
东北地区	3.9	-0.1	1.2	2.4	0	1.0	1.3
西南地区	5.4	-0.4	1.0	7.3	—	1.7	1.7
西北地区	3.8	0.3	2.1	5.5	2.5	1.5	1.5
华南地区	5.9	-0.5	1.6	2.0	-0.4	1.4	2.4
华东地区	3.3	-0.1	1.3	1.9	1.2	1.8	1.9

3 结论

(1) 整体而言,灰尘重金属浓度分为 5 个等级区间,并在 1~4 倍的标准差内变化,在空间上呈西高东低,南高北低,自西南向东北减少的变化特征。各地区灰尘重金属含量由大到小依次为:西南>西北>华南>华东>华北>华中>东北。某些元素的空间分布还与我国阶梯地势相吻合,如 Zn、Cd 和 Hg 元素。

(2) 灰尘重金属的空间分布明显受到自然背景的影响,受土壤背景影响较大的地区主要是华北、华中和东北地区,与土壤背景相关性较高的元素主要有 Pb、Cd、Ni 和 Cr 元素。

(3) 人类活动也是灰尘重金属分布的重要影响因素,灰尘重金属受人类活动的干扰程度排序为: Cd>Hg>Zn>Pb>Cu>Ni>Cr。受人类活动影响较强的地区是西北、西南和华南地区。

(4) 土壤是城市灰尘重金属的重要影响因素,人类活动的强烈干扰则改变某些地区重金属的相对含量。城市灰尘重金属元素的空间分布是各种自然现象和人类活动综合作用的结果。另外,由于数据资料的有限性和时间限制,城市灰尘重金属时空分布特征等方面还有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 李霖,应申. 空间尺度基础性问题研究[J]. 武汉大学学报,2005,30(3):199-203.
- [2] 李海雯,陈振楼,王军,等. 基于 GIS 的上海城市灰尘重金属空间分布特征研究[J]. 环境科学学报,2007,27(5):803-809.
- [3] 常静,蒋海燕,刘敏,等. 上海中心城区地表灰尘与土壤中重金属累积及污染评价[J]. 华东师范大学学报,2007,7(4):56-63.
- [4] 郑小康,李春晖,黄国和,等. 保定城区地表灰尘污染物分布特征及健康风险评价[J]. 环境科学学报,2009,29(10):2195-2202.
- [5] 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]. 甘肃 兰州:兰州大学,2008.
- [6] 李崇. 沈阳城市灰尘中金属的空间分布特征研究[D]. 辽宁 沈阳:辽宁大学,2008.
- [7] 杨忠平. 长春市城市重金属污染生态地球化学特征及其来源分析[D]. 吉林 长春:吉林大学,2008.
- [8] 王学良. 重庆市主城区街道灰尘的污染分析研究[D]. 重庆:西南大学,2008.
- [9] 赵宙. 石家庄市街道积尘重金属污染研究[D]. 河北 石家庄:河北师范大学,2008.
- [10] 张丽. 淄博城区土壤及街道灰尘重金属地球化学研究[D]. 山东 淄博:山东理工大学,2006.
- [11] 潘虹梅. 金华城市灰尘的理化特征及环境影响[D]. 浙江 金华:浙江师范大学,2006.
- [12] 韩永明. 西安市城市灰尘环境污染和环境质量评价[D]. 陕西 西安:长安大学,2003.
- [13] 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.
- [14] 韩东昱,岑况,龚庆杰. 北京市公园道路粉尘 Cu、Pb、Zn 含量及其污染评价[J]. 环境科学研究,2004,17(2):10-13.
- [15] 王利. 上海高架道路沿线街道灰尘中重金属分布及污染评价[D]. 上海:华东师范大学,2007.
- [16] 施泽明,倪师军,张成江,等. 成都市近地表大气尘的地球化学特征[J]. 地球与环境,2004,32(3/4):53-58.
- [17] 崔昆燕,张家荣. 城区道路灰尘 Hg 污染特征研究[J]. 分析测试学报,2006,25(S):51-52.
- [18] 庞博,张银龙,王丹,等. 城市不同功能区内叶面尘与地表灰尘的粒径和重金属特征[J]. 生态环境学报,2009,18(4):1312-1317.
- [19] 张慧敏,章明奎. 杭州不同功能区道路灰尘中污染物的分布和有效性[J]. 广东微量元素科学,2007,14(2):4-18.
- [20] 刘玉燕,刘浩峰,刘敏,等. 乌鲁木齐市地表灰尘重金属含量及其健康风险[J]. 干旱区研究,2009,26(5):750-754.
- [21] 方凤满,张志明,陈文娟,等. 芜湖市春季地表灰尘中汞和砷的空间及粒径分布规律[J]. 环境科学学报,2009,29(9):1871-1877.
- [22] 吴辰熙,祁士华,方敏,等. 福建省泉州湾大气降尘中的重金属元素的沉降特征[J]. 环境科学研究,2006,19(6):27-30.
- [23] 张伟. 阜新市城区降尘中重金属含量的研究[J]. 赤峰学院学报,2009,25(3):148-149.
- [24] 邱媛,管东生. 经济快速发展区域的城市植被叶面降尘粒径和重金属特征[J]. 环境科学学报,2007,27(12):2080-2087.
- [25] 邱媛,管东生,陈华,等. 惠州市植物叶片和叶面降尘的重金属特征[J]. 中山大学学报,2007,46(6):98-102.
- [26] 罗莹华,戴塔根,梁凯. 广东韶关市大气降尘及尘中金属元素分布特征研究[J]. 地质调查与研究,2006,29(1):64-65.
- [27] 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.
- [28] 杨水秀. 贵阳市大气降尘中某些金属元素分布状况初探[J]. 贵州环保科技,2002,8(1):13-19.
- [29] 黄璜,南忠仁,胡小娜,等. 金昌市城区土壤重金属空间分布及潜在生态危害评价[J]. 环境监测管理与技术,2009,21(5):30-34.
- [30] 王志坤,宁福政,付巧玲,等. 洛阳城区土壤重金属污染现状评价[J]. 物探与化探,2008,32(4):412-416.

(下转第 212 页)

工作,而这样的工作在国内又鲜见报道。本研究仅对徐州地区的河岸带绿化结构作了初步的调查和分析,并且存在着调查点偏少,覆盖不够广泛,研究不够深入的缺点,但仍可作为其它城市开展相关工作的参考和比较。

[参 考 文 献]

- [1] 岳隽,王仰麟,彭建. 城市河流的景观生态学研究:概念框架[J]. 生态学报,2005,6(25):1422-1429.
- [2] Naiman R J, Decamps H, Pollock M. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity [J]. Ecological Applications,1993,3(2):209-212.
- [3] 陈吉泉. 河岸植被特征及其在生态系统和景观中的作用[J]. 应用生态学报,1996,7(4):439-448.
- [4] Gobster P H. Perception and use of a metropolitan greenway system for recreation[J]. Landscape and Urban Planning, 1995,33: 401-413.
- [5] 王玉松,卢芳. 浅谈徐州市侧柏纯林林相改造的途径[J]. 江苏林业科技,2003,30(6):53-54.
- [6] Thomas J W, Maser C, Rodiek J E. Riparian zones [C]//Thomas J W. Wild Life Habitats in Managed Forests: The Blue Mountains of Oregon and Washington. Washington: USDA Forest Service Agricultural Handbook, 1979:41-47.
- [7] 杨胜天,王雪蕾,刘昌明,等. 岸边带生态系统研究进展[J]. 环境科学学报,2007,27(6):894-905.
- [8] 陈廷贵,张金屯. 山西关帝山神尾沟植物群落物种多样性与环境关系的研究 I: 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 应用与环境生物学报,2000,6(5):406-411.
- [9] Davies P E, Nelson M. Relationships between riparian buffer widths and the effect of logging on stream habitat, invertebrate community composition and fish abundance[J]. Australian Journal of Marine and Freshwater Research, 1994, 45(5):1289-1305.
- [10] Schultz R C, Colletti J P, Isenhardt T M, et al. Riparian forest buffer practices [M]. North American Agroforestry: An Integrated Science and Practice. American Society of Agronomy, Madison, WI, USA, 2000:189-281.
- [11] 韩壮行. 不同宽度森林河岸带对土壤氮素截留转化效率影响[D]. 黑龙江 哈尔滨:东北林业大学,2007:20-22.
- [12] Borin, M, Bigon, E. Abatement of NO₃-N concentration in agricultural water by arrow buffer strips[J]. Environmental Pollution, 2002,117:165-168.
- [13] Lane R R, Mashriqui H S, Kemp G. P, et al. Potential nitrate removal from a river diversion into a Mississippi delta forested wetland[J]. Ecological Engineering, 2003, 20(3):237-249.
- [14] David L C. Principles of planning and establishment of buffer zones[J]. Ecological Engineering, 2005,24(5):433-439.
- [15] Lowrance R, Altier L S, Newbold J D, et al. Water quality functions of riparian forest buffers in Chesapeake Bay watersheds [J]. Environmental Management,1997,21(5):687-712.

(上接第 198 页)

- [31] 曾静静,杨苏才,徐文青,等. 兰州市不同功能区表层土壤 Cu、Zn、Pb 污染特征分析[J]. 兰州大学学报,2007,43(1):24-27.
- [32] 王学松,陈文宾,王欢,等. 连云港市城市表层土壤 Pb 污染评价与赋存形态[J]. 淮海工学院学报,2004,13(3):51-53.
- [33] 滕彦国,倪师军,张成江,等. 攀枝花地区不同工业区表层土壤中重金属分布的特征[J]. 物探化探计算技术,2002,24(3):254-256.
- [34] 姚德,孙梅,杨富贵,等. 青岛城区土壤重金属环境地球化学研究[J]. 中国地质,2008,35(3):539-540.
- [35] 王学松,秦勇. 徐州城市表层土壤中重金属元素的富积特征与来源识别[J]. 中国矿业大学学报,2006,35(1):84-88.
- [36] 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.
- [37] 张江华,赵阿宁,王仲复,等. 内梅罗指数和地质累积指数在土壤重金属评价中的差异探讨:以小秦岭金矿带为例[J]. 黄金,2010,31(8):43-46.
- [38] 姚志刚,鲍征宇,高璞,等. 洞庭湖沉积物重金属环境地球化学[J]. 地球化学,2006,35(6):629-638.
- [39] 姬亚芹,朱坦,冯银厂,等. 应用地质累积指数分析城市颗粒物源解析土壤风沙尘的污染[J]. 农业环境科学学报,2006,25(4):949-953.