

交通污染对城市土壤和植物的影响

康玲芬¹, 李锋瑞^{1*}, 张爱胜¹, 谈建安², 杨发旺², 黑文龙², 刘江斌²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 2. 甘肃省中心实验室, 兰州 730050)

摘要: 以我国西北地区大气污染严重的兰州市为研究区, 分别采集了交通主干道两侧及远离交通主干道的公园及大学校园里的槐树(*Sophora japonica* L.) 叶片和土壤样品, 研究了交通污染对城市土壤理化性质和重金属积累以及植物叶片中重金属、氮、磷积累的影响。结果表明: ①交通主干道两侧土壤的电导率和有机碳含量显著高于公园土壤而 pH 值显著低于公园土壤; ②交通主干道两侧土壤中 Zn、Cd、Hg、Pb、Cu、Cr 和 As 等 7 种微量元素的含量显著高于公园土壤, 表明交通污染导致了这些元素在土壤中的异常积累; ③生长在交通主干道两侧的槐树叶片中 Zn、Cd、As、Hg、Pb、Ni、Co、Cr、N 等 9 种元素的含量显著高于生长在公园的槐树叶片, 同样表明交通污染导致了这些元素在槐树叶片中的异常积累, 但是不同元素在土壤和植物叶片中的积累程度存在着差异。

关键词: 交通污染; 土壤; 槐树叶片; 重金属积累; 城市生态环境

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)03-0556-05

Effects of Traffic Pollution on Urban Soils and Plants

KANG Ling-fen¹, LI Feng-rui¹, ZHANG Ai-sheng¹, TAN Jian-an², YANG Fa-wang², HEI Wen-long², LIU Jiang-bin²

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Center Laboratory of Gansu province, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Soil samples and plant samples (leaves of *Sophora japonica* L.) were collected from the main trunk roadsides and parks far away from main trunk road in Lanzhou City of northwest China to examine the effect of traffic pollution on variation of physico-chemical properties and heavy metal contents in soils and on variation of the contents of heavy metals, nitrogen and phosphorus in leaves of *S. japonica* in the two sites. The results show that: ①soil samples from the roadsides are significantly higher in electric conductivity and organic carbon content but lower in pH compared with those from the parks; ②soil samples from the roadsides have significantly higher contents of Zn, Cd, Hg, Pb, Cu, Cr and As than those from the parks, suggesting that traffic pollution results in a considerable accumulation of these elements in the roadside soils; ③leaf samples from the roadsides have significantly higher contents of Zn, Cd, As, Hg, Pb, Ni, Co, Cr and N than those from the parks, again indicating that traffic pollution results in a considerable accumulation of these elements in leaves of *S. japonica* growing in the roadside soils. However, there are different responses of different elements in soils and leaves of *S. japonica* to the effects of traffic pollution.

Key words: traffic pollution; soils; leaves of *Sophora japonica*; heavy metal accumulation; urban eco-environments

随着汽车工业的快速发展和机动车拥有量的快速增长, 交通污染已成为城市污染的主要组成部分, 并严重威胁着城市居民的身体健康和城市生态环境的安全^[1~3]。交通污染不仅仅是指机动车排放的尾气所造成的 CO、HC、SO₂、NO_x、苯并芘等物质的污染, 而且越来越多的研究表明^[4~12], 机动车尾气的排放、机械部件及轮胎的磨损等同样会对道路两侧的土壤和植物产生重金属污染。一般而言, 交通污染主要限于道路两侧 150 m 以内的范围, 且交通污染的程度随着距交通主干道空间距离的增加以及交通流量的减少而下降。近年来, 尽管对城市污染的危害性、污染物的种类以及污染物来源等有较多的研究报道^[13~17], 但有关交通污染对城市土壤和植物的影响研究报道甚少^[6, 12]。

本文以我国西北地区大气污染程度严重的兰州市为研究区, 分别采集了生长在交通主干道两侧及远离交通主干道的公园和大学校园里的槐树(*Sophora japonica* L.) 叶片及树冠下的土壤样品, 通过测定土壤样品理化性质和重金属含量以及槐树叶片样品中重金属及氮、磷元素含量, 系统地研究了交通污染对城市土壤和植物的污染程度及特征, 旨在为城市生态系统的污染诊断以及污染的综合防治提供科学依据。

收稿日期: 2005-02-18; 修订日期: 2005-04-11

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目(2000025); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所知识创新工程项目(2004121)

作者简介: 康玲芬(1968~), 女, 博士研究生, 主要从事污染生态学

研究。
* 通讯联系人

1 材料与方法

1.1 样品的采集

在兰州市主要交通干线两侧(距离车道约 1m), 确定近几年来未受人为活动干扰(如挖掘和填埋等)的路段为采样区, 共确定了 41 个采样点. 在每个采样点用不锈钢铲随机采集 9 个子样品(深度为 0~10cm)等量混合均匀后, 按四分法取 500g 样品形成 1 个土壤样品, 共采集土壤样品 41 个. 同时, 随机选择生长在主要交通干线两旁树龄在 15a 以上的槐树 54 株, 共采集槐树叶片样品 54 个. 另外, 在距离主要交通干线 150 m 以外的公园及大学校园内运用上述的同样方法随机采集土壤样品和槐树叶片样品各 41 个(简称公园样品).

1.2 样品的处理与分析

土壤样品经风干, 一部分样品直接用于土壤颗粒组成的分析, 其余样品磨碎后过 2mm 尼龙筛, 弃去杂物, 其中一部分样品过 20 目筛用于土壤 pH 值、电导率的分析, 一部分样品过 60 目筛用于 CaCO_3 、有机质的分析^[18], 其余样品过 100 目尼龙筛用于元素全量的分析^[19]. 对采集的槐树叶片样品未经冲洗, 置于烘箱中(在 75°C)烘干, 磨碎后过 60 目尼龙筛^[20].

土壤理化性质分析参照《土壤理化分析与剖面描述》^[18]. 土壤样品中 Co、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn、Al、Fe 元素的含量采用理学 3080E3 型 X 荧光光谱仪(日本理学株式会社)测定; 土壤及树叶样品中的 As、Hg 元素含量采用 XGY-1011A 型原子荧光光度计(北京海光光学仪器厂)测定; 土壤样品中的 Cd 及树叶样品中的 Cd、Zn 元素含量采用日立 180-80 原子吸收分光光度计(日本日立公司)测定; 树叶样品中 Co、Cr、Cu、Ni、Pb 的含量采用 PE-4300DV 等离子发射光谱仪(美国珀金-埃尔默公司)测定; 树叶样品中 N 的测定采用靛酚蓝比色法, P 的测定采用钼锑抗比色法, 二者所用仪器是 TU-1800SPC 型分光光度计(北京普析通用仪器厂). 在测定过程中, 树叶样品的测定采用标准物质 GSV-2 及 GSV-3 进行质量控制, 土壤样品的测定采用二级标准样品 40-3、40-5、40-9、40-10 进行质量控制, 所有项目的检出率为 100%, 重复测定百分数为 9%~14%, 分析误差符合要求. 所有测定结果均以样品干重计.

1.3 数据处理

数据处理应用 SPSS 软件, 对主要交通干线两侧和公园内土壤与树叶样品平均值的差异显著性检

验采用 Student-*t* 检验. 检验前对所有数据进行正态分布检验, 对不符合正态分布的数据经对数转换后再进行 Student-*t* 检验.

2 结果与讨论

2.1 交通污染对土壤理化性质的影响

对交通干线两侧及公园土壤样品理化性质的测定结果如表 1 所示. 从表 1 可以看出, 道路两侧土壤和公园土壤的理化性质存在较大差异. 道路两侧土壤的 pH 值和细微粒(0.25~0.002mm 和 <0.002mm)含量均显著低于公园土壤而其电导率、有机碳含量和粗颗粒(>2mm 和 2~0.25mm)含量则显著高于公园土壤. 造成道路两侧土壤 pH 值低于公园土壤而其电导率高于公园土壤的一个可能原因是, 汽车排放的尾气中含有 NO_x 、 SO_2 等气体, 这些气体与水结合形成酸性物质, 从而使道路两侧土壤 pH 值降低, 同时, 这些酸性物质与土壤中的 CaCO_3 等碱性化合物发生化学反应, 导致土壤中游离的离子数量增多, 从而使土壤电导率升高. Klumpp 等对排放 SO_2 、 NO_x 等酸性气体的炼铜厂周围土壤 pH 值的研究结果也表明, 炼铜厂周围土壤的 pH 值显著低于远离炼铜厂的土壤^[21].

由表 1 还可见, 尽管道路两侧土壤的细微粒含量低于公园土壤, 但其有机碳含量却显著高于公园土壤. 这主要是因为汽车尾气中有机污染物的沉降以及汽车燃料、润滑油等有机物的泄漏导致了有机物在道路两侧土壤中的积累. Benfenati、Dierkes 和 Tuháčková 等的研究结果都表明交通污染造成了道路两侧土壤中有机污染物的积累^[22~24]. 另外, Klumpp 等认为, 重金属及有机污染物在土壤中的大量积累, 会降低土壤微生物的活性及其种群数量^[21], 从而造成土壤微生物对有机物的分解速率减慢, 这可能也是道路两侧土壤有机碳含量高于公园土壤的一个原因.

2.2 交通污染对土壤重金属元素含量的影响

对道路两侧土壤和公园土壤中 Zn、Cd、As、Hg、Pb、Cu、Ni、Co、Cr、Mn、Fe、Al 等元素含量的测定结果显示(表 2), 道路两侧和公园土壤中的 Fe、Co 和 Ni 的含量无明显差异, Al 和 Mn 的含量是公园土壤高于道路两侧土壤, 这表明交通污染并未造成上述元素在道路两侧土壤中的异常积累. 另外, 道路两侧土壤和公园土壤中的 Fe、Co 2 种元素的含量与当地土壤背景值和中国土壤背景值十分接近, 说明它们的含量主要受成土母质的影响^[27, 28], 该区的成土母

表 1 道路两侧土壤和公园土壤的理化参数¹⁾ (n= 12)

Table 1 Physicochemical properties of soils of roadsides and parks(n= 12)

项目		道路两侧土壤		公园土壤		t	p
		平均值 ±标准误	CV/ %	平均值 ±标准误	CV/ %		
理化参数	pH	7.95 ±0.05 [*]	2.37	8.12 ±0.04	1.78	2.421	0.024 4
	电导率/ μs·cm ⁻¹	1 278 ±353 [*]	95.84	373 ±42	39.47	2.804	0.010 3
	有机碳/ %	2.02 ±0.29 [*]	49.19	1.08 ±0.07	14.66	2.506	0.020 1
	CaCO ₃ / %	12.24 ±0.69	19.41	13.02 ±0.33	8.88	1.236	0.229 4
颗粒组成	> 2mm/ %	11.16 ±1.93 [*]	60.12	3.08 ±0.56	62.73	3.985	0.002 0
	2~ 0.25mm/ %	13.86 ±1.26 [*]	31.46	6.23 ±0.83	45.88	4.277	0.000 3
	0.25~ 0.002mm/ %	67.60 ±2.72 [*]	13.95	80.29 ±1.35	5.83	4.740	0.000 1
	< 0.002mm/ %	7.36 ±0.58 [*]	27.05	10.40 ±0.28	9.19	3.833	0.000 9

1) * 为与公园土壤相比, 平均值差异显著(p < 0.05)

质主要是黄土母质^[25].

然而, 道路两侧土壤中的 Zn、Cd、As、Hg、Pb、Cu、Cr 的含量显著高于公园土壤, 说明交通污染导致了上述各元素在道路两侧土壤中的积累. 许多研究同样发现, 城市交通干线两侧土壤中重金属元素的含量要显著高于远离交通干线的土壤. 例如, Fakayode 等对尼日利亚奥索波市道路两侧土壤重金属元素含量的研究结果表明, 道路两侧土壤中的 Pb、Cd、Cu、Ni 和 Zn 元素有不同程度的积累^[1]. Ho 等对香港交通干线两侧土壤的研究结果亦表明, 路边土壤中的 Pb、Cu、Zn、Fe、Mn、Cd 的含量显著高于

非交通干线两侧的土壤^[6].

从表 2 还可以看出, 无论是道路两侧土壤还是公园土壤, Zn、Cd、Hg、Pb、Cu、Cr 的含量均显著高于当地背景值和中国土壤背景值, 这说明除了交通污染的影响外, 还存在着其它的污染来源. 许多研究者认为工业粉尘的沉降、工业废水和工业垃圾的排放会造成工业区及其周围土壤中重金属元素的积累^[13, 15], 而兰州市是我国西北地区典型的工业城市, 工厂企业众多^[25], 其粉尘的沉降是造成该地区公园土壤中重金属积累的主要原因.

2. 3 交通污染对槐树叶片中元素含量的影响

表 2 道路两侧土壤和公园土壤中重金属元素的含量¹⁾ (n= 41)

Table 2 Means for heavy metal concentrations in soils of roadsides and parks(n= 41)

元素	道路两侧土壤	公园土壤	兰州市土壤背景值 ^[25]	中国土壤背景值 ^[26]
	平均值 ±标准误	平均值 ±标准误	平均值 ±标准差	平均值 ±标准差
Zn/ mg·kg ⁻¹	131.6 ±8.5 [*]	90.3 ±2.1	67.1 ±6.9	74.2 ±32.8
Cd/ mg·kg ⁻¹	0.45 ±0.04 [*]	0.30 ±0.01	0.14 ±0.03	0.097 ±0.079
As/ mg·kg ⁻¹	11.1 ±0.2 [*]	10.0 ±0.2	10.6 ±1.6	11.2 ±7.9
Hg/ μg·kg ⁻¹	118.4 ±16.6 [*]	67.2 ±5.4	30 ±14	65 ±80
Pb/ mg·kg ⁻¹	45.0 ±3.5 [*]	27.6 ±0.6	22.0 ±3.1	26.0 ±12.4
Cu/ mg·kg ⁻¹	36.9 ±1.7 [*]	29.2 ±0.5	22.9 ±2.2	26.6 ±11.4
Ni/ mg·kg ⁻¹	30.0 ±0.6	30.0 ±0.3	26.5 ±2.2	26.9 ±14.4
Co/ mg·kg ⁻¹	10.5 ±0.2	10.6 ±0.1	12.1 ±0.9	12.7 ±6.4
Cr/ mg·kg ⁻¹	78.7 ±1.2 [*]	73.2 ±0.6	59.9 ±3.5	61.0 ±31.1
Mn/ mg·kg ⁻¹	611 ±4 [*]	632 ±2.9	567 ±22	583 ±363
Al/ %	5.80 ±0.08 [*]	6.00 ±0.06	—	6.62 ±1.63
Fe/ %	2.98 ±0.07	2.91 ±0.02	—	2.94 ±0.95

1) * 为与公园土壤相比, 平均值差异显著(p < 0.05)

对生长在道路两侧和公园里的槐树叶片中 Zn、Cd、As、Hg、Pb、Cu、Ni、Co、Cr 等 9 种重金属元素及 N、P 含量的测定结果表明(表 3), 道路两侧槐树叶片中的 Zn、Cd、As、Hg、Pb、Ni、Co、Cr 等 8 种重金属元素以及 N 的含量显著高于公园槐树叶片, 表明交通污染导致了上述元素在道路两侧槐树叶片中的积累. 然而, 道路两侧和公园槐树叶片中的 Cu 和 P 的

含量无显著差异.

对于 Co 和 Ni 2 种元素, 虽然它们在道路两侧土壤和公园土壤中的含量无显著差异, 但它们在道路两侧槐树叶片中的含量却显著高于公园槐树叶片. 一个可能的原因是, 这 2 种元素主要与土壤粘粒结合在一起, 其含量与土壤粘粒的含量存在显著的正相关^[28, 29], 而汽车行驶形成的气流更易使土壤粘

表 3 道路两侧槐树叶片和公园槐树叶片中微量元素的含量¹⁾

Table 3 Means for microelement contents in leaves of *Sophora japonica* growing in roadside and park soils

元素	道路两侧树叶(<i>n</i> = 54)		公园树叶(<i>n</i> = 41)		<i>t</i>	<i>P</i>
	平均值 ± 标准误	<i>CV</i> / %	平均值 ± 标准误	<i>CV</i> / %		
Zn/ mg·kg ⁻¹	27.9 ± 1.5*	40.60	20.6 ± 0.4	11.05	4.047	0.000 1
Cd/ mg·kg ⁻¹	0.098 ± 0.007*	48.98	0.077 ± 0.003	24.68	2.637	0.009 8
As/ mg·kg ⁻¹	1.19 ± 0.11*	69.75	0.57 ± 0.03	29.79	4.661	0.000 0
Hg/ μg·kg ⁻¹	77.1 ± 5.2*	49.88	51.2 ± 1.8	22.48	4.162	0.000 1
Pb/ mg·kg ⁻¹	5.34 ± 0.32*	44.76	3.86 ± 0.10	17.10	3.866	0.000 2
Cu/ mg·kg ⁻¹	8.45 ± 0.26	22.84	7.76 ± 0.25	20.36	1.849	0.067 6
Ni/ mg·kg ⁻¹	2.48 ± 0.14*	41.94	1.63 ± 0.11	42.33	4.520	0.000 0
Co/ mg·kg ⁻¹	0.38 ± 0.02*	45.05	0.18 ± 0.01	21.43	7.297	0.000 0
Cr/ mg·kg ⁻¹	3.45 ± 0.22*	46.09	2.62 ± 0.08	19.47	3.208	0.001 8
N/ %	3.09 ± 0.08*	18.45	2.74 ± 0.06	12.77	3.468	0.000 8
P/ %	0.19 ± 0.01	10.81	0.18 ± 0.01	8.84	1.192	0.236 2

1) * 为与公园树叶相比, 平均值差异显著(*p* < 0.05)

粒悬浮于空气中, 并沉降在道路两侧的树叶表面, 从而使道路两侧槐树叶片中这 2 种元素的含量显著高于公园叶片. 这种解释只是根据元素的特征、环境条件的差异所做的推理, 对其全面准确的原因还有待进一步的研究.

3 结论

(1) 交通主干道两侧土壤的电导率和有机碳含量显著高于公园土壤, 而 pH 值显著低于公园土壤, 说明交通污染造成了道路两侧土壤某些理化性质的变化.

(2) 交通主干道两侧土壤中 Zn、Cd、Hg、Pb、Cu、Cr、As 的含量显著高于公园土壤, 表明交通污染造成了这些元素在道路两侧土壤中的积累. 交通主干道两侧和公园土壤中 Co、Ni、Fe 的含量无显著差异, 表明交通污染对这些元素的影响很小. Al、Mn 2 种元素的含量是公园土壤显著高于交通主干道两侧土壤, 对其原因有待于进一步的研究.

(3) 交通主干道两侧槐树叶片与公园槐树叶片相比, 除 Cu 和 P 含量无显著差异外, Zn、Cd、Hg、Pb、Co、As、Ni、Cr、N 的含量在道路两侧槐树叶片中均显著高于公园槐树叶片, 表明交通污染造成了这些元素在道路两侧槐树叶片中的积累.

(4) 在所研究的 Zn、Cd、Hg、Pb、Co、As、Cu、Ni、Cr 等 9 种重金属元素中, Zn、Cd、Hg、Pb、Co、As、Cr 等 7 种元素的含量在 2 个地点(道路两侧与公园)的土壤和槐树叶片中的变异特征相同, 均表现为道路两侧元素含量显著高于公园; Co、Ni 2 种元素在 2

个地点土壤中的含量无显著差异, 但它们在道路两侧槐树叶片中的含量显著高于公园叶片.

参考文献:

[1] 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: 150~ 157.

[2] 杨巧艳, 陈尚云, 王正彬. 我国城市交通污染分析及其对策研究[J]. 四川环境, 2004, 23(1): 84~ 87.

[3] 赵晓红, 闫春生. 兰州市汽车尾气污染状况调查[J]. 干旱环境监测, 1997, 11(2): 83~ 86.

[4] Garcia R, Millón E. Assessment of Cd, Pb, and Zn Contamination in Roadside Soils and Grasses from Gipuzkoa (Spain) [J]. Chemosphere, 1998, 37(8): 1615~ 1625.

[5] Jim C Y. Urban soil characteristics and limitations for landscape planting in Hong Kong [J]. Landscape and Urban Planning, 1998, 40: 235~ 249.

[6] Ho Y B, Tai K M. Elevated levels of lead and other metals in roadside soil and grass and their use to monitor aerial metal depositions in Hong Kong [J]. Environmental Pollution, 1988, 49(1): 37~ 51.

[7] Ndiokwere C L. A study of heavy metal pollution from motor vehicle emissions and its effect on roadside soil, vegetation and crops in Nigeria [J]. Environmental Pollution Series B, Chemical and Physical, 1984, 7(1): 35~ 42.

[8] 阮宏华, 姜志林. 城郊公路两侧森林类型铅含量及分布规律[J]. 应用生态学报, 1996, 10(3): 362~ 364.

[9] 索有瑞, 黄雅丽. 西宁地区公路两侧土壤和植物中铅含量及其评价[J]. 环境科学, 1996, 17(2): 74~ 77.

[10] Viard B, Pihan F, Promeyrat S, et al. Integrated assessment of heavy metal (Pb, Zn, Cd) highway pollution: bioaccumulation in soil, Graminaceae and land snails [J]. Chemosphere, 2004, 55: 1349~ 1359.

- [11] Yassoglou N, Kosmas C, Asimakopoulos J, *et al.* Heavy metal contamination of roadside soils in the Greater Athens area[J]. *Environmental Pollution*, 1987, **47**(4): 293~ 304.
- [12] Zhang H, Ma D, Xie Q, *et al.* An approach to studying heavy metal pollution caused by modern city development in Nanjing, China [J]. *Environmental Geology*, 1999, **38** (3): 223~ 228.
- [13] Imperato M, Adamo P, Naimo D, *et al.* Spatial distribution of heavy metals in urban soils of Naples city (Italy) [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **124**: 247~ 256.
- [14] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, *et al.* Heavy metals in urban soils: a case study from the city of Palermo (Sicily), Italy [J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, **300**: 229~ 243.
- [15] Möller A, Müller H W, Abdullah A, *et al.* Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta [J]. *Geoderma*, 2005, **124**: 63~ 71.
- [16] Li X D, Lee S L, Wong S C, *et al.* The study of metal contamination in urban soils of Hong Kong using a GIS-based approach [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **129**: 113~ 124.
- [17] Hanescha M, Scholger R, Reyc D. Mapping dust distribution around an industrial site by measuring magnetic parameters of tree leaves [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**: 5125~ 5133.
- [18] 刘光菘. 土壤理化分析与剖面描述[M]. 北京: 中国标准出版社, 1996, 112~ 145.
- [19] 李连仲. 岩石矿物分析(第二分册)(第三版)[M]. 北京: 地质出版社, 1991, 338~ 352.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 312~ 336.
- [21] Klumpp A, Hintemann T, Santana L, *et al.* Bioindication of air pollution effects near a copper smelter in Brazil using mango trees and soil microbiological properties [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **126**: 313~ 321.
- [22] Benfenati E, Valzacchi S, Mariani G, *et al.* PCDD, PCDF, PCB, PAH, cadmium and lead in roadside soil: relationship between road distance and concentration [J]. *Chemosphere*, 1992, **24**(8): 1077~ 1083.
- [23] Dierkes C, Geiger W F. Pollution retention capabilities of roadside soils[J]. *Water Science and Technology*, 1999, **39**(2): 201~ 208.
- [24] Tuháčková J, Cajthaml T, Novák K, *et al.* Hydrocarbon deposition and soil microflora as affected by highway traffic [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **113**: 255~ 262.
- [25] 何乱水, 马炳祥, 杜文奎, 等. 西北黄土高原干旱半干旱条件下城市污染特点[J]. *中国地质*, 2003, **30**(4): 442~ 448.
- [26] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990, 87~ 90.
- [27] Carlosena A, Andrade J M, Prada D. Searching for heavy metals grouping roadside soil as a function of motorized traffic influence [J]. *Talanta*, 1998, **47**: 753~ 767.
- [28] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖, 等. 南京城市土壤重金属含量及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(1): 123~ 126.
- [29] Wilcke W, Müller S, Kanchanakool N, *et al.* Urban soil contamination in Bangkok: heavy metal and aluminum partitioning in topsoils [J]. *Geoderma*, 1998, **86**: 211~ 228.