

# 太原市绕城高速公路路域土壤特性 与重金属污染评价研究<sup>\*</sup>

余海龙<sup>1</sup>, 顾卫<sup>2</sup>

(1. 宁夏大学 资源环境学院, 银川 750021; 2. 北京师范大学 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘 要:** 为了揭示高速公路路域内部不同功能区强烈人为活动对土壤环境质量的影响, 以太原市绕城高速路域内不同功能区为研究对象, 于各功能区内随机布点, 采集表层土壤样品 72 个, 并对其土壤剖面结构、土壤 pH 值、土壤质地、土壤有机质、土壤重金属元素含量等理化性质和分布规律进行了测定和分析。结果表明, 路域内土壤母质来源复杂, 剖面层次混乱, 土壤反应偏碱性、粗粒化、有机质含量升高和表聚现象较明显。路域土壤重金属污染较为严重, 不同功能区的污染元素和污染程度有显著差异。综合污染程度以绿化带含量最高, 依次为中央隔离带、互通、路堤边坡、路堑边坡、自然坡。路域土壤的随机空间变异十分突出, 无论是土壤性质还是重金属污染积累都如此。路域中存在一些高度污染的区域, 必须予以密切关注。

**关键词:** 路域土壤; 土壤特性; 重金属污染

中图分类号: S153; X53

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)03-0049-04

## The Basic Properties and Heavy Metal Pollution Assessment of Road Area Soils in Taiyuan City Belt Expressway

YU Hai-long<sup>1</sup>, GU Wei<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** To investigate influence of intensive human activities on soil environment quality in different functional zones in expressway road area, the study was conducted in different functional zones from Taiyuan city belt expressway. Toally 72 samples were collected from different functional zones. Analysis of physical-chemical properties including structure of profile, pH, soil texture, soil organic matter, the concentration of heavy metals of the soils were conducted. The results indicated that the source of the parent material of the road area soils was complicated and the soil profiles were disordered. Compared with soils from natural zone, the road area soils showed a trend of increasing soil pH, coarse particle contents, soil organic matter. The pollution by heavy metals in the road area soils was dramatic with the greening belt being the worst. The comprehensive pollution degree, as indicated by the pollution index calculated from the different heavy metal accumulation, is higher for the greening belt and central isolated belt and transaction and upslope and down slope and natural slope. Both the soil properties and the content of heavy metals exhibited a very remarkable spatial variability among the functional zones. Some 'zones' with extremely polluted soil with heavy metals might exist in some locations. This should be taken into account of the environmental concerns.

**Key words:** road area soil; soil property; heavy metal pollution

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2010-01-03

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“我国北方地区岩质工程创面生态恢复机理与方法的实验研究”(30870467)

作者简介: 余海龙(1979-), 男, 甘肃酒泉人, 博士, 讲师, 研究方向为路域生态恢复与重建技术。E-mail: yhl@nxu.edu.cn

通信作者: 顾卫(1956-), 男, 吉林长春人, 教授, 博士, 博导, 研究方向为生态恢复工程与技术。E-mail: weigu@bnu.edu.cn

随着我国交通运输业的快速发展,重金属的环境污染问题已经引起人们的高度重视。公路重金属污染的主要来源是目前已经得到公认的汽油、柴油燃烧后的废气扩散,同时车辆轮胎成分中亦含有多种重金属元素,因此,轮胎磨损也是重金属元素的重要物质来源。这些重金属在自然环境中沉降,从而对人类、家畜、农业生态及自然环境产生严重的潜在影响和危害<sup>[1]</sup>。重金属的积累状况对区域绿地建设、环境质量以及人类健康都有十分重要的影响<sup>[2]</sup>。

公路运输和汽车尾气扩散沉降所产生的大气和土壤重金属污染是城市化过程中倍受人们关注的环境问题之一。交通污染不仅仅是指机动车排放的尾气所造成的 CO、HC(碳氢化合物)、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、苯并芘等物质的污染,而且越来越多的研究表明,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<sup>[3]</sup>。其中, Pb 是交通用地最严重的土壤环境污染物之一,而汽车含 Pb 汽油的燃烧是 Pb 污染的重要来源。研究资料表明, Pb 污染呈上升趋势,汽车每年向空气中排放的 Pb 约 40 万 t。

了解路域土壤微量金属元素含量对跟踪调查土壤环境状况的变迁,分析人为活动对土壤的影响程度,对土壤资源合理利用和保护有重要意义<sup>[4]</sup>。国内外就公路绿地土壤重金属的研究已有报道,如:陈维新等研究了沈阳东郊沈抚公路两侧土壤铅含量分布规律<sup>[5]</sup>; Smith<sup>[6]</sup>等报道了公路边土壤 Pb 含量普遍较高,有的公路边土壤 Pb 含量高达 100~500 mg/kg;殷云龙<sup>[7]</sup>等研究比较了南京市不同城乡公路绿地土壤环境质量现状和城市化过程中存在的环境污染问题以及关于城市土壤因不同土地利用方式而引起的不同程度的重金属污染问题。本研究采集太原绕城高速公路内多种功能区的土壤样品,着重调查了研究区土壤重金属(Cd、Pb、Cu、Cr、Zn、As)的污染种类和程度,对路域内部不同功能区在道路建成初期土壤重金属含量的变化趋势和污染的原因进行分析,期望为路域土壤性质的认识和土壤环境质量的认识积累科学依据,并对路域环境质量评价与保护提供科学依据。

## 1 路域及路域土壤的定义

公路路域是指公路永久性征地和临时占地范围内的所有区域,包括公路路基、边坡、两侧隔离带、互通立交、公路沿线附属设施、特殊防护地段、取弃土场等。其空间范围是公路用地界之内,宽约 50~70 m(互通立交、附属设施、特殊防护地段、取弃土

场等宽度可达数百米),长数十至数百公里的条形地带<sup>[8]</sup>。

在路域内存在的各种土壤称为路域土壤。路域土壤并不是土壤分类学上的术语,它是指出现在路域范围内,受多种人为活动方式的影响,原有继承特性得到强烈改变的土壤总称。路域土壤主要分布在公路的边坡(路堤边坡、路堑边坡)、路基、隔离带(中央隔离带、两侧隔离带)、互通立交、服务区、取弃土场,它包括由于机械挖掘所暴露出来的原生土壤的母质(风化壳、基岩、心土)、由于填埋碾压所形成的回填土、由于绿化所移入的客土以及部分未受工程扰动的原生土壤<sup>[9]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 路域功能分区与土壤样本采集

由于人为因素的影响,路域土壤分布往往具有非连续性,土壤层次混乱,土壤物质来源复杂等特征<sup>[10]</sup>。2006 年 8 月,根据路域不同功能将路域分为路堑边坡、路堤边坡、中央隔离带、互通、自然坡、绿化带等功能区划分采样单元;每一功能区内样点随机布设,各功能区的剖面点尽可能选择在代表性地段,回避人工填充物(如沙层、砖瓦砾层、混凝土碎屑层、生活垃圾等)。土壤采样按多点混合法(同一地点采 3 个样品,就地混合为一个样品)为便于分析比较,按 0~10 cm、10~20 cm 两个深度采集土样<sup>[11]</sup>。采样点共 18 个,土壤样品共 72 个。土壤风干后磨碎,分别过 10 目和 20 目塑料土筛保存备用。用四分法取部分土样进一步用玛瑙研钵研磨,过 100 目塑料筛,备用。

### 2.2 土壤样本分析

土壤样本分析参照中国土壤学会推荐的方法<sup>[11]</sup>:颗粒组成分析使用比重计法;pH 值测定采用 1:1 水土比浸提 pH 计法,有机碳测定采用 K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 外加热法。所研究的重金属元素选择典型人类活动源元素 Pb、Cu、Cr、Zn、Cd、As 六种,全量分析采用 HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>-HF 三酸消化法。重金属元素样本消化液和浸提液均在 TAS-986 原子吸收分光光谱仪上测定。

## 3 结果与讨论

### 3.1 路域不同功能区土壤的理化性质

各剖面的主要理化性质如表 1 所示。这些路域土壤具有与农业和自然土壤显著不同的剖面结构和土壤性质,其主要表现在以下几个方面。

表 1 供试土壤的剖面特性和理化性质

样区	深度/ cm	颗粒组成/ %			侵入体类型 及数量	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	pH
		2~ 0.02 mm	0.02~ 0.002 mm	< 0.002 mm			
路堑边坡	0- 10	12	35	53		5.6C	8.91A
	10- 20	5	48	47		3.4e	8.21bc
路堤边坡	0- 10	26	32	42	砾石、建筑垃圾; 13%	8.8C	7.96B
	10- 20	36	28	36	砾石、建筑垃圾; 7%	5.6de	7.80cd
中央隔离带	0- 10	34	23	33	砾石、建筑垃圾; 22%	15.9B	9.26A
	10- 20	26	32	42	砾石、建筑垃圾; 9%	9.8bc	8.84a
互通	0- 10	29	22	49	砾石、建筑垃圾; 19%	27.0A	8.89A
	10- 20	22	38	40	砾石、建筑垃圾; 11%	14.30a	8.68ab
自然坡	0- 10	12	48	37		16.9B	7.86B
	10- 20	9	57	33		8.6cd	7.28de
绿化带	0- 10	21	43	36	砾石、建筑垃圾; 5%	17.8B	7.95B
	10- 20	12	56	32	砾石、建筑垃圾; 2%	8.4cd	7.15e

注: 同层次性质显著性分析中, 相同字母表示在  $P < 0.05$  水平差异不显著, 下表同。

3.1.1 成土母质来源复杂, 发生层次混乱 根据 18 个土壤剖面统计分析和多点观察记录, 路域土壤母质来源有 4 大类型, 其具体特性如表 2。可见, 人为侵入体丰富是路域土壤的一大特点。人类活动带来

的干扰使中央隔离带、互通、绿化带以及路堤边坡土壤剖面结构最为复杂, 受人类建筑和生活活动影响明显, 其次是路堤边坡, 自然坡和绿化带受人类活动影响最小, 剖面较为原始、完整。

表 2 路域土壤成土母质特性

母质特征	弃土填充物	人类生活废弃物	客土填充物	母岩风化物
母质组成特性	内含一定量的建筑垃圾和废弃物	煤渣、碎瓦砾和废弃的生活用品	风积物、堆积物和风化物等	风化物、风积物、坡积物和各种沉积物
分布	路堤边坡、互通、绿化带、中央隔离带	中央隔离带、互通	互通	路堤边坡
层次性	层次分化不明显, 土层含砖瓦砾	层次复杂且混乱	表土层均一, 表下层复杂, 多为建筑弃土	风化程度高, 层次分化明显: 上壤下粘, 土层厚

3.1.2 土壤 pH 值较高, 石灰性较明显 路域土壤 pH 值明显高于同地带自然土壤, 土壤趋向碱性是路域土壤的显著特征。图 1 表明, 在所测试的 6 个功能区的 72 土样中, 除自然坡和绿化带受人为扰动较少在 7.5 附近(7.15~ 7.95)外, 占 33.3%; 而大于 7.5 的有 48 个, 占 66.7%。土壤 pH 值变幅为 7.1~ 9.26, 土壤趋向碱性, 这与已有北方城市土壤研究成果相近<sup>[12]</sup>。不同层次土壤 pH 值变化也有所不同, 0- 10 cm 表层 pH 值普遍高于亚表层 pH 值。说明土壤表层明显受到建筑废弃物的影响, 石灰、水泥、煤渣的丢弃和覆盖使路域土壤化学环境向石灰性演变。

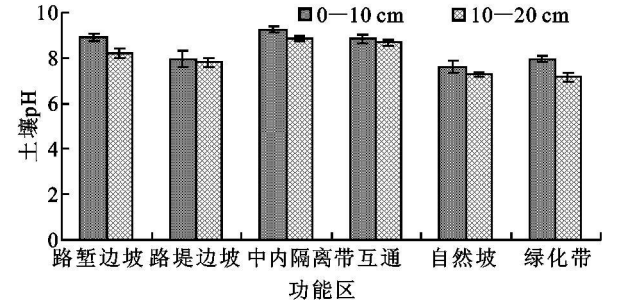


图 1 不同功能区土壤 pH 的对比

3.1.3 土壤质地粗化 本地区自然土壤多属黄绵土, 质地以黏壤土为主。但供试路域土壤的颗粒组成变化幅度大(表 1)。由于人为废弃物、建筑垃圾等侵入物的影响, 中央隔离带、互通和绿化带的部分土壤明显较富砂粒, 使土壤质地变粗, 而且部分功能区内颗粒组成的较大差异表明路域土壤人为影响的复杂性和多变性, 这导致在同一功能区内土壤质地差异显著, 这也是路域土壤性质空间变异性的基本特点。

3.1.4 土壤有机质有积累的趋势 图 2 分析可知, 中央隔离带和互通有机质含量相对较高, 但表层和亚表层变异幅度大, 是因为中央隔离带和互通作为后期绿化用地, 人工回填的土壤来自附近农田, 但土层较薄, 因而表现出上下分层而导致有机质含量上下两层差异显著。路堤边坡由于回填土多是废弃工程土, 尽管表层混杂了一些当地表土, 但依旧有机质含量较低。路堑边坡由于机械切割导致表土剥离, 因而土壤有机质含量极低, 亚表层部分几乎接近土壤母质或母岩石。绿化带和自然坡受人为干扰较小, 基本

代表了当地自然土壤的土壤有机质含量状况。样本间的变异性代表了人为干扰的随机空间差异。

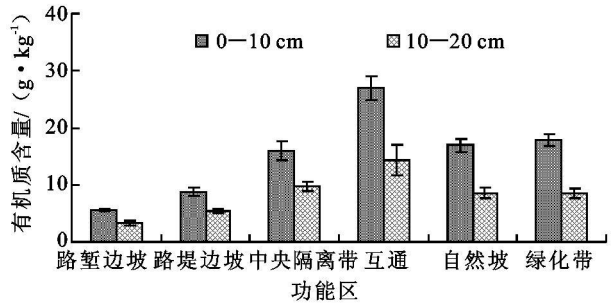


图 2 不同功能区土壤有机质含量对比

表 3 路域不同功能区土壤重金属含量比较

重金属	深度/cm	立地类型						背景值
		中央隔离带	路堑边坡	路堤边坡	互通	自然坡	绿化带	
As/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0- 10	17. 01±2. 72a	19. 54±1. 68b	15. 4±1. 037ac	16. 53±2. 34a	14. 82±0. 71c	44. 22±2. 81d	25
	10- 20	10. 01±1. 24a	13. 04±2. 31b	7. 36±0. 86c	8. 29±2. 13c	8. 67±1. 32c	29. 2±3. 72d	
Cr/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0- 10	56. 70±3. 58a	57. 02±2. 69a	62. 17±3. 21b	64. 93±2. 87b	53. 25±2. 34a	60. 35±5. 16ab	300
	10- 20	37. 3±1. 36ad	29. 36±2. 47b	45. 16±2. 27c	46. 78±2. 26c	33. 41±1. 89ab	39. 46±3. 23d	
Zn/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0- 10	86. 04±3. 56a	61. 67±2. 78b	61. 38±2. 66b	65. 19±3. 61b	52. 97±2. 49c	73. 5±5. 24d	250
	10- 20	67. 33±3. 87a	51. 49±2. 17b	43. 26±1. 97c	38. 71±3. 27cd	31. 27±2. 49d	55. 43±3. 23b	
Pb/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0- 10	18. 17±5. 43a	15. 35±3. 16b	16. 11±3. 11ab	17. 55±4. 38a	14. 45±1. 97b	15. 67±6. 18b	300
	10- 20	10. 14±2. 43ac	7. 34±3. 16b	9. 56±3. 11a	12. 59±4. 38c	8. 95±1. 97b	11. 37±4. 14c	
Cd/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0- 10	0. 3843±0. 132a	0. 132±0. 071b	0. 2498±0. 082c	0. 2739±0. 11c	0. 141±0. 09b	0. 0875±0. 031d	0. 3
	10- 20	0. 2143±0. 073a	0. 071±0. 043b	0. 1753±0. 073c	0. 172±0. 086c	0. 047±0. 05d	0. 0471±0. 021d	
Cu/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	0- 10	26. 26±4. 33ab	21. 48±2. 54a	29. 26±1. 83bd	28. 69±5. 76bd	11. 45±1. 42c	32. 25±4. 09d	100
	10- 20	16. 37±3. 24a	16. 38±1. 37a	19. 62±2. 67b	17. 64±2. 71a	8. 37±1. 08c	23. 31±3. 41d	
综合污染指数	0- 10	0. 776a	0. 5006b	0. 5587bc	0. 6039c	0. 3538d	0. 9294e	
	10- 20	0. 5662a	0. 4123b	0. 4626b	0. 4559b	0. 2742c	0. 8989d	

3.2.2 土壤重金属的综合评价——综合污染指数分析 为了量化路域土壤污染程度,令功能区号为*j*,重金属污染物为*i*,则根据内梅罗公式<sup>[13-14]</sup>

$$P_{ij} = \{[(\max C_i/S_{ij})^2 + (1/n \sum C_i/S_{ij})^2] \times 0.5\}^{0.5}$$

式中: $P_{ij}$ ——*j* 功能区综合污染指数; $C_i$ ——*i* 重金属实测浓度; $S_{ij}$ ——环境背景值; $n$ ——重金属种类( $n=6$ )。计算路域不同功能区的土壤重金属污染指数。

表 4 综合污染指数分级

分级	1	2	3	4	5
综合污染指数分级	$P_{综} \leq 0.7$	$0.7 < P_{综} \leq 1$	$1 < P_{综} \leq 2$	$2 < P_{综} \leq 3$	$P_{综} > 3$
污染等级	安全	警戒级	轻度污染	中度污染	重度污染

4 结 论

(1)路域土壤母质来源复杂,剖面层次混乱,与自然土壤相比存在石灰性趋势和粗粒化趋势,并且有机质含量有升高和表聚现象,导致部分功能区表层和亚表层土壤有机质含量差异显著,其中以互通和中央隔离带表现最为显著。

3.2 路域土壤重金属含量及其评价

3.2.1 土壤重金属在路域内不同功能区分布特征

自然土壤中的重金属元素主要来源于成土母质,其含量主要由成土母质和成土过程决定。但在路域范围内,各种各样的人为活动,如道路修建和交通运输等,将大量的重金属元素带入路域内部,造成这些元素的积累。鉴于路域土壤的混杂性,不同功能区土壤的重金属含量上存在显著性差异。As、Cu 两元素在绿化带含量最高,而 Pb、Zn、Cd 以中央隔离带最高,互通绿地 Cr 含量最高。距道路相对较远的自然坡则含量相对较少。

结果表明0- 10 cm 层以绿化带最高,依次为中央隔离带> 互通> 路堤边坡> 路堑边坡> 自然坡;10- 20 cm 层与上层相似,污染指数大小顺序依次为绿化带> 中央隔离带> 路堤边坡> 互通> 路堑边坡> 自然坡;从表 4 可以看出,绿化带和中央隔离带已处于警戒级的污染等级,在路域土壤中很可能存在一些重金属严重污染、出现重金属含量异常高的局部区域。

(2)路域部分功能区土壤重金属污染较为严重,综合污染指数以绿化带含量最高。0- 10 cm 层以绿化带最高,依次为中央隔离带> 互通> 路堤边坡> 路堑边坡> 自然坡;10- 20 cm 层与上层相似,污染指数大小顺序依次为绿化带> 中央隔离带> 路堤边坡> 互通> 路堑边坡> 自然坡。其中绿化带和中央隔离带已达警戒级,需密切注意。

理, 2004, 26(3): 26-30.

[ 4 ] 邵颂东, 王礼先, 周金星. 国外土壤侵蚀研究的新进展 [ J ]. 水土保持科技情报, 2000( 1 ): 32-36.

[ 5 ] 柳礼奎, 张国云, 路紫. 城镇水土保持生态建设的理论探索 [ J ]. 河北水利, 2006( 6 ): 18-19.

[ 6 ] 王继增, 吴志峰, 朱立安, 等. 关于城市水土流失研究中若干问题的探讨 [ J ]. 水土保持通报, 2005, 25( 4 ): 106-110.

[ 7 ] 刘得俊, 李润杰, 王文卿, 等. 基于地理信息系统的西宁市土壤侵蚀监测的实现 [ J ]. 水土保持研究, 2006, 13( 5 ): 111-114.

[ 8 ] 孙希华. 济南城市扩展对水土流失的影响研究 [ J ]. 水土保持研究, 2004, 11( 1 ): 50-53.

[ 9 ] 杨德生, 肖卫国, 陈冬, 等. 深圳市水土流失动态变化遥感监测分析 [ J ]. 人民珠江, 2002( 6 ): 55-57.

[ 10 ] 卓慕宁, 李定强, 郑煜基. 高速公路弃土场的水土流失监测及其生态治理 [ J ]. 水土保持通报, 2007, 27( 4 ): 96-99.

[ 11 ] Renard K G. RUSLE: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation. USDA Agricultural Handbook No. 703 [ M ]. Washington D C: USDA, 1995.

[ 12 ] 高杨, 吕宁, 薛重生, 等. 不同区域土地利用与土壤侵蚀空间关系研究 [ J ]. 中国水土保持, 2006( 11 ): 21-23.

[ 13 ] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion loss cropland east of the Rocky Mountains [ M ]. USDA Agricultural Handbook, 1965.

[ 14 ] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation ( RUSLE ) [ M ]. Washington: USDA Handbook, 1997.

[ 15 ] 王万中, 焦菊英, 郝小品, 等. 中国降雨侵蚀力  $R$  值的计算与分布 ( I ) [ J ]. 水土保持学报, 1995, 9( 4 ): 5-18.

[ 16 ] 朱立安, 李定强, 魏秀国, 等. 广东省土壤可蚀性现状及影响因素分析 [ J ]. 亚热带水土保持, 2007, 19( 4 ): 4-8.

[ 17 ] 卜兆宏, 唐万龙, 潘贤章. 土壤流失量遥感监测中 GIS 像元地形因子算法的研究 [ J ]. 土壤学报, 1994, 31( 3 ): 322-329.

[ 18 ] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算: 以江西省泰和县灌溪乡为例 [ J ]. 自然资源学报, 1999, 14( 1 ): 62-68.

[ 19 ] 许月卿, 邵晓梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的土壤侵蚀量计算: 以贵州省猫跳河流域为例 [ J ]. 北京林业大学学报, 2006, 28( 4 ): 67-71.

[ 20 ] Zhang Yan, Liu Baoyuan. Effect of Different Vegetation Types on Soil Erosion by Water [ J ]. Acta Botanica Sinica, 2003, 45( 10 ): 1204-1209.

[ 21 ] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究 [ J ]. 水土保持学报, 2000, 14( 2 ): 19-24.

[ 22 ] 陈法杨. 城市水土流失强度分级标准商榷 [ J ]. 中国水土保持, 1999( 3 ): 30-36.

( 上接第 52 页 )

参考文献:

[ 1 ] 鲁春霞, 谢高地, 李双成, 等. 青藏铁路沿线土壤重金属的分布规律初探 [ J ]. 生态环境, 2004, 13( 4 ): 546-548.

[ 2 ] 张甘霖. 城市土壤研究的深化和发展: 简评首届“城市、工业、交通和矿区土壤”国际会议 [ J ]. 土壤, 2001, 33( 2 ): 111-112.

[ 3 ] 王金达, 刘景双, 于君宝, 等. 沈阳市城区土壤和灰尘中铅的分布特征 [ J ]. 中国环境科学, 2003, 23( 3 ): 300-304.

[ 4 ] 汪权方, 陈百明, 李家永, 等. 城市土壤研究进展与中国城市土壤生态保护研究 [ J ]. 水土保持学报, 2003, 17( 4 ): 142-145.

[ 5 ] 陈维新, 张玉龙. 沈阳东郊沈抚公路两侧土壤铅含量分布规律的初步研究 [ J ]. 农业环境保护, 1990, 9( 2 ): 10-13.

[ 6 ] Smith M A B. An urban soil study: Heavy metals Glebe [ J ]. Australia Aust. J. Soil Res., 1996, 34: 453-465.

[ 7 ] 殷云龙, 宋静, 骆永明, 等. 南京市城乡公路绿地土壤重金属变化及其评价 [ J ]. 土壤学报, 2005, 42( 2 ): 206-210.

[ 8 ] 陈爱侠. 路域生态系统环境功能与稳定性的初步研究 [ J ]. 长安大学学报, 2003, 20( 1 ): 11-13.

[ 9 ] 余海龙, 顾卫, 姜伟, 等. 高速公路路域土壤质量退化演变的研究 [ J ]. 水土保持学报, 2006, 20( 4 ): 195-198.

[ 10 ] 马建华, 张丽, 李亚丽. 开封市城区土壤性质与污染的初步研究 [ J ]. 土壤通报, 1999, 30( 2 ): 93-96.

[ 11 ] 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: 147-211.

[ 12 ] 张甘霖, 朱永官, 傅伯杰. 城市土壤质量演变及其生态环境效应 [ J ]. 生态学报, 2003, 23( 3 ): 539-546.

[ 13 ] 中华人民共和国国家标准. 土壤环境质量标准 ( GB 15618-1995 ) [ S ]. 北京: 中国标准出版社, 1995.

[ 14 ] 李天杰, 宫室国, 潘根兴, 等. 土壤环境学 [ M ]. 北京: 高等教育出版社, 1995.