

## 南京市城乡公路绿地土壤重金属变化及其评价\*

殷云龙 宋 静 骆永明 张桃林

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

贺剑锋 徐建华

(江苏省中国科学院植物研究所, 南京 210014)

**摘 要** 通过对南京市公路绿地系统(城市干线、绕城公路和城郊公路)土壤重金属的调查和分析,并与相对清洁点植物园植被土壤进行比较,研究了公路绿地土壤重金属分布的特点:公路绿地土壤重金属元素含量一般高于“清洁区”,其中土壤 Mo、Zn、As、Cd、Cr、Cu、Fe、Mn 的含量以绕城公路最高,土壤 Pb 的含量以城市干线最高,土壤 Al 的含量以城郊公路最高。城市干线、绕城公路、城郊公路和相对清洁点的土壤重金属多样性指数分别为 0.261、0.293、0.238、0.236,仍以绕城公路最高,城市干线次之,城郊公路最低,公路土壤重金属多样性指数均高于“相对清洁点”。应用主成分分析方法对土壤样本进行了排序和聚类分析,结果表明:样本点表现了较好的以取样路线聚类的特点,各取样点土壤重金属含量存在明显的演变分异。土壤重金属演变的趋势可解释为:绕城公路是高 Zn、Mo、Cd、As、Cr、Fe、Mg、Cu、Mn、Pb 区,城市干线是高 Pb 区,城郊公路是高 Al 和 Fe 区,相对清洁点是低重金属区。

**关键词** 公路土壤;土壤重金属;环境评价

中图分类号 X171.5 文献标识码 A

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<sup>[1~3]</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<sup>[4]</sup>研究了沈阳东郊沈抚公路两侧土壤铅含量分布规律;Smith 等<sup>[5]</sup>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<sup>-1</sup>;张辉<sup>[6]</sup>研究比较了南京地区公路干线、金属冶炼厂、大型生活垃圾场和江河滩涂土壤及沉积物中重金属(Cu、Pb、Fe、Co、Ni、Mn)的形态;Marcel 等<sup>[7]</sup>通过对公路周围环境中的重金属测定,发现污染物主要沉降在距路边 30 m 之内;吴永刚等<sup>[8]</sup>测定了南京城郊 312 国道旁土壤和茶树不同器官中重金属含量和分布规律,发现在公路两侧 100 m 范围内土壤 Pb 含量均超过南京市土壤 Pb 背景值。而针对城乡不同类型公路绿地土壤重金属分布规律的研究还鲜见报道。

本文以南京市城乡不同类型公路绿地土壤为例,对土壤重金属元素含量的变化趋势进行了测定

和研究,以揭示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。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究线路的确定

对南京市城郊不同公路绿地现状进行了实地勘察,并以距市中心远近和交通繁忙程度为原则确定以下线路为试验路段:(1)城市干线。以南京市城东干线为调查线路。该线路为市区大流量运输公路,日车流量约 40 000 辆,以客运车为主,其中 90% 为小汽车,货运车占 4.5%。(2)绕城公路。该线路介于城郊结合部,日车流量约为 25 000 辆,其中 55% 为货运车,45% 为小汽车。(3)城郊公路。以宁溧公路南段为调查路段,该线路交通流量较少,日车流量为 10 000 辆,其中货运车占 50%,小汽车占 45%。(4)相对清洁对照点。选择土壤和植被相对稳定、非公路环境的中山植物园树木园作为相对清洁点。

\* 江苏省自然科学基金“公路环境污染与绿化植物防护效应、防护模式研究”(BK2002074)和国家科技部重大基础项目“典型区土壤和植物中重要化学物质的时空分布规律和风险预测”(2002CB410810)资助

作者简介:殷云龙(1964~),男,江苏丹阳人,副研究员,中国科学院南京土壤研究所博士生。主要从事植物资源与环境方面的研究工作。E-mail: xhh3027@jlonline.com, Tel: 025-84347066

收稿日期:2004-02-23;收到修改稿日期:2004-06-05

## 1.2 采样点的布局

在上述三个不同类型的公路段,以 300 m 左右的间距设置采样点,并用 GPS 定位,详细记录该点的土壤和植物情况。城市干线和绕城公路各设 10 个采样点,城郊公路和中山植物园树木园各设 5 个采样点。

## 1.3 采样时间和方法

于 2002 年 9 月下旬进行土壤和植物的同步采样。每个采样点在植物根际外围挖掘深 20.0 cm 的土壤剖面,用塑料铲刮取剖面土样,以 5 处剖面的土样混合为一个土样,鲜重约 1.0 kg。

## 1.4 土壤分析样品的准备

首先将新鲜土样内的石粒和新生体拣出,平摊于室内通风处,使其自然风干。土样风干后,经压碎、碾细,过 100 目尼龙筛。最后将样品装入具内塞的瓶内,保存于干燥器内。同时测定每个土壤样品的含水率。

## 1.5 土壤重金属测定

土壤样本经体积比为 4:1 盐酸、硝酸的混合消解液在 2040 型程控消解仪上消解并定容后,采用 POEMSR 等离子体光谱质谱仪(ICP-MS)测定。在测定过程中抽取 20% 的样本进行平行双样测定,并在每批试样中插入数个标样(GSS-6)进行监控,确保测

定结果的准确可靠。

## 1.6 数据处理方法

采用 Shannon-Weaver 指数法<sup>[9]</sup>计算各条公路及相对清洁点土壤样方重金属元素的多样性及丰富程度,应用 SPSS10.0 主成分分析方法进行重金属元素的空间变异分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 不同城乡公路绿地土壤重金属评价

(1) 土壤 Al、Fe、Cu、Mn、Mo、Zn 等一般重金属元素。在 Al、Fe、Cu、Mn、Mo 和 Zn 等 6 种重金属元素中,除 Al 元素外都是植物所必需的矿质营养微量元素,这些元素若在土壤中的含量过高,也会导致生态环境的污染问题<sup>[10]</sup>。从表 1 可以看出,三条不同公路土壤环境中的 Al 元素的含量与非公路环境的相对清洁点相比差异不显著。城市干线和绕城公路土壤中的 Fe、Cu、Mn、Mo 和 Zn 等 5 种重金属元素的含量除个别元素 Fe 和 Mn 外,均显著高于相对清洁点,而城郊公路土壤中除 Fe 元素显著高于相对清洁点外,其余 Cu、Mn、Mo 和 Zn 等元素在土壤中的含量与相对清洁点相比,无显著差异。

表 1 城乡公路土壤中 Al、Fe、Cu、Mn、Mo、Zn 等一般重金属元素含量

Table 1 Al, Fe, Cu, Mn, Mo and Zn contents in the greenbelt soils alongside urban rural roadways

采样地点 Sampling site	样本数 Samples	Al (mg kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	Mo (mg kg <sup>-1</sup> )	Zn (mg kg <sup>-1</sup> )
城市干线 Urban trunk roads	10	2.476	1.458	54.22**	452.2	0.92**	154.19**
绕城公路 Belt highways	10	2.533	2.017**	56.79**	595.1**	1.39**	276.43**
城郊公路 Suburban roads	5	3.280	1.656**	22.08	476.4	0.09	82.46
植物园 Botanical garden	5	2.810	1.390	19.01	407.3	0.10	54.44

\*  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$ , 与相对清洁点(植物园)比较的差异显著性, Significance level compared with reference(the botanical garden)

(2) 土壤 As、Cd、Cr 和 Pb 等有害重金属元素。土壤中 As、Cd、Cr 和 Pb 等重金属元素均不是植物所必需的养分元素,但对生态环境的影响较大,故这些元素在环境中的去向值得关注。

从表 2 可以看出,与相对清洁点相比,三条公路

土壤中 As 和 Cd 元素的含量均有显著增加;城市干线和绕城公路土壤中的 Pb 含量也显著增加;绕城公路土壤中的 Cr 含量显著增加;城市干线土壤中的 Cr 和城郊公路土壤中的 Cr 和 Pb 含量均无显著增加。

表2 城乡公路土壤中As、Cd、Cr和Pb等有害重金属元素含量

采样地点 Sampling site	样本数 Samples	As (mg kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg kg <sup>-1</sup> )
城市干线 Urban trunk roads	10	9.57*	1.44**	23.78	68.90**
绕城公路 Belt highways	10	14.85***	2.46***	30.84**	50.64**
城郊公路 Suburban roads	5	11.02**	1.51**	21.17	22.90
植物园 Botanical garden	5	8.01	1.11	23.25	24.86

## 2.2 土壤重金属的综合评价——多样性指数分析

采用 Shannon-Weaver 指数<sup>[9]</sup> 统计方法计算每条线路和相对清洁点土壤样方的重金属的多样性:

$D_j = - \sum P_i \lg(P_i/n)$ , 式中  $D_j$  为样方  $j$  的重金属多样性指数, 反映土壤中重金属元素的丰富性;  $P_i$

为  $i$  种重金属离子浓度(mol kg<sup>-1</sup>) 的比例, 等于重金属离子浓度除以所有重金属离子浓度的和, 即 Al、Fe、Cu、Mn、Mo、Zn、As、Cd、Cr 和 Pb。

计算结果表明: 三条不同类型的公路重金属平均多样性指数均不同程度高于相对清洁点植物园。其中绕城公路的土壤重金属平均多样性指数最高, 为 0.293; 城市干线次之, 为 0.261; 表明这两条公路土壤中重金属较丰富。城郊公路土壤重金属平均多样性指数为 0.238, 略高于植物园(0.236), 表明该路段土壤受重金属污染影响很小。

## 2.3 公路绿地土壤中重金属的变化趋势分析——主成分分析

为了进一步了解公路土壤重金属的分异规律, 就不同城乡公路及相对清洁点共 25 个土壤样本的 Al、Fe、Cu、Mg、Mn、Mo、Zn、As、Cd、Cr 和 Pb 等 11 个重金属元素的含量值, 进行主成分分析, 其主成分的描述见表 3。

在表 3 所描述的主成分中, 第一主成分的贡献

表3 公路土壤中重金属的主成分描述及提取

Table 3 Principal components of heavy metals in greenbelt soils as was described and extracted

	主成份 Principal component									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
特征根 Eigenvalue	6.30	1.93	6.21	4.13	2.99	2.02	1.33	5.191E-02	3.372E-02	1.622E-02
贡献率 % of Variance	63.02	19.28	6.21	4.13	2.99	2.02	1.33	0.52	0.33	0.16
累积贡献率 Cumulative %	63.02	82.30	88.51	92.64	95.63	97.65	98.98	99.50	99.84	100

率 63.02%, 第二主成分的贡献率 19.28%, 第一、二主成分所描述的信息已达总信息量的 82.30%, 且特征根均大于 1, 说明已包含大部分重金属元素信息, 具有较显著的概括性。因此可以采用第一、二主成分进行排序分析。

从表 4 土壤重金属的主成分负荷矩阵可以看出, 在第一主成分中, Fe、Cu、Mg、Mn、Mo、Zn、As、Cd、

Cr 和 Pb 等 10 种重金属元素均与主成分呈正相关 ( $p < 0.01$ ), 说明这些重金属元素在公路土壤中的演变方向是一致的, 而 Al 则不同, 它的演变方向则与上述元素相反。在第二主成分中, Al、Fe 和 Mn 与主成分呈正相关, 在公路土壤环境中演变的方向也是一致的, 而 Pb 和 Cu 则不同, 与主成分呈负相关, 与 Al、Fe 和 Mn 的演变方向相反。

表4 公路土壤中重金属的主成分矩阵

Table 4 Component matrix for heavy metals in greenbelt soils alongside roadways

变量 Variable	Zn	Cd	As	Mo	Cr	Fe	Mn	Cu	Pb	Al
主成分 1 Principal component 1	0.95**	0.88**	0.86**	0.86**	0.84**	0.82**	0.76**	0.75**	0.68**	-0.43*
主成分 2 Principal component 2	7.67E-03	0.28	0.33	-0.32	4.69E-02	0.54**	0.44*	-0.45*	-0.64**	0.73**

以公路土壤样本的重金属含量在主成分上的得分值进行重金属元素的空间变异趋势分析和样本的排序分析(见图 1)。从第一主成分为横坐标,第二主成分为纵坐标绘制的土壤重金属的样本排序图可以看出,三条城乡公路和相对清洁点各土壤样本在重金属主成分上得分值的分布位置表现了较好的聚类特点,图中的 4 块区域分别代表了三条城乡公路和相对清洁点的土壤样群,说明不同城乡公路和相对清洁点之间土壤中重金属存在明显的分异特征。参照表 4 主成分负荷矩阵资料,图 1 表明:第一主成分(横轴坐标)由左向右表示 Zn、Mo、Cd、As、Cr、Fe、Mg、Cu、Mn 和 Pb 的逐渐升高,而 Al 则逐渐减少。绕城公路土壤样本群在第一主成分上得分值较高,是除 Al 之外的高重金属区,相对清洁点是低重金属区。第二主成分(纵轴坐标)从下向上表示 Al、Fe 和 Mn 元素的得分值逐渐上升,而 Pb 和 Cu 则逐渐降低。城市干线样本群在第二主成分上得分值较低,是 Al、Fe 和 Mn 元素的低含量区,而 Pb 和 Cu 元素则相反,是富集区;城郊公路土壤样本群在第一主成分上得分值较低,说明除 Al 元素外的重金属含量较低,但在第二主成分上的得分值较高,即表现出 Al、Fe、Mn 元素升高而 Pb、Cu 元素下降的趋势,其中以 Al 的高含量较明显。相对清洁点土壤样本群在第一主成分上的得分值最低,在第二主成分上的平均得分值接近于零点,说明该土壤尚未受到重金属污染,基本上保持了自然土壤的特点。

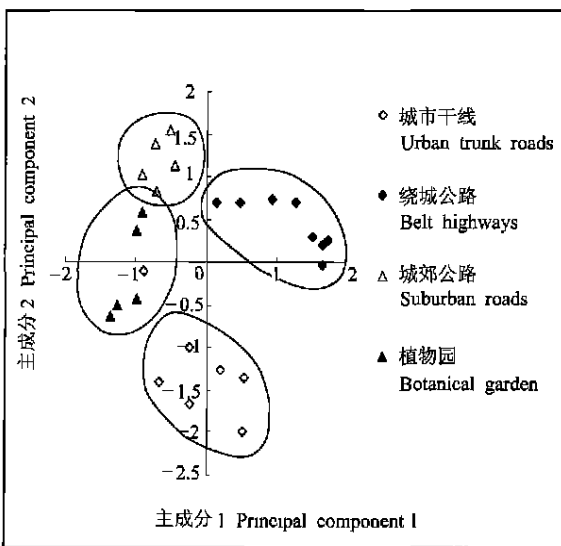


图 1 土壤样本排序图

Fig 1 Order of samples in principal components

### 3 结 论

与非公路环境的相对清洁点比较时,城乡公路土壤中一般重金属元素除 Al 增加不显著外,其余 Fe、Cu、Mn 和 Zn 等 5 种元素均显著增加;有害重金属元素 As 和 Cd 含量均显著增加,城市干线和绕城公路土壤中 Pb 含量显著增加,绕城公路土壤中 Cr 含量也显著增加。

绕城公路土壤重金属平均多样性指数最高,城市干线次之,城郊公路最小,接近相对清洁点,反映了交通量不同的公路土壤环境受重金属污染影响的综合差异性。

根据土壤重金属在主成分上的得分值而绘制的样本排序图,显示出较好的聚类特点,反映三条城乡公路和相对清洁点的四个土壤样本群的分布规律,表明各个样本群之间土壤重金属具有明显的分异特征。对土壤样本的排序和聚类图的进一步解释是:绕城公路是高重金属区,城市干线是富 Pb 区,城郊公路是高 Al、Fe 区,对照点是低重金属区。这一研究结果可为有关决策部门在进行有针对性的公路土壤重金属的污染防治时提供科学依据。

### 参 考 文 献

- [1] 陈怀满,陈能杨,陈英旭,等.土壤-植物系统中的重金属污染.北京:科学出版社,1996.159~160. Chen H M, Chen N Y, Chen Y X, et al. Heavy Metal Pollution of Soil-plant System(In Chinese). Beijing: Science Press, 1996. 159~160
- [2] Zhao Q G. Global change and environmental quality of soils. In: Cao Z H, Pawlowski L. eds. Chemistry for Protection of the Environment. Nanjing: Nanjing University Press, 1999. 1~8
- [3] Blum W E H. Land use A chemical threat to the environment. In: Cao Z H, Pawlowski L. eds. Chemistry for Protection of the Environment. Nanjing: Nanjing University Press, 1999. 9~19
- [4] 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.农业环境保护,1990,9(2):10~13. Chen W X, Zhang Y L. A study on the Pb contents in the soil and its distribution along the both sides of the Sher Fu Highway in the eastern suburb of Shenyang (In Chinese). Agr environmental Protection, 1990, 9(2): 10~13
- [5] Smith D R, Koeppe D E. Pb in biologic circle: The latest current. Ambio, 1995, 34(1):20~22
- [6] 张辉,马东升.南京地区土壤沉积物中重金属形态研究.环境科学学报,1997,17(3):346~351. Zhang H, Ma D S. Fractionation of heavy metals in soils from Nanjing(In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiae, 1997, 17(3):346~351
- [7] Koeleman M, vd Laak W J, Ietswaart H. Dispersion of PAH and

- heavy metals along motor ways in the Netherlands An overview. *The Science of the Total Environment*, 1999, 23(5): 347~ 349
- [ 8 ] 吴永刚, 姜志林, 罗强. 公路边茶园土壤与茶树中重金属的积累与分布. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2002, 26(4): 39~ 42. Wu Y G, Jiang Z L, Luo Q. The accumulation and distribution of heavy metals in teas on both sides of highway (In Chinese). *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Ed.)*, 2002, 26(4): 39~ 42
- [ 9 ] 张金屯, Pouyat R. “城—郊—乡”生态林带森林土壤重金属变化格局. *中国环境科学*, 1997, 17(5): 410~ 413. Zhang J T, Pouyat R. Heavy metal pattern in forest soils along urban rural ecological transect (In Chinese). *China Environmental Science*, 1997, 17(5): 410~ 413
- [ 10 ] 李天杰, 宫世国, 潘根兴, 等. *土壤环境学*. 北京: 高等教育出版社, 1995. Li T J, Gong S G, Pan G X, *et al.* *Soil Environment Science (In Chinese)*. Beijing: Higher Education Press, 1995

## ASSESSMENT ON VARIATION OF HEAVY METALS IN THE GREENBELT SOILS ALONGSIDE URBAN RURAL ROADWAYS IN NANJING CITY

Yin Yunlong Song Jing Luo Yongming Zhang Taolin  
(*Institute of Soil Science, the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

He Jianfeng Xu Jianhua  
(*Institute of Botany of Jiangsu Province and the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210014, China*)

**Abstract** Soils of greenbelts alongside in road system (urban trunk roads, belt highways and suburban roads) as well as of the Nanjing Botanical Garden cited as a clean zone were surveyed and assessed for heavy metals. The results show that the contents of most heavy metals in the soils of on the roadside are higher than in the soil of the clean zone. The highest concentrations of Mo, Zn, As, Cd, Cr, Cu, Fe and Mn are found in the soils alongside the belt highways, that of Pb in the soils alongside the urban trunk roads and that of Al in the soils alongside the suburban roads. This phenomenon could be further confirmed with the Shannon-Weaver Index, indicating a declining order of belt highways (0.293) > urban trunk roads (0.261) > suburban roads (0.238) > “clean zone” (0.236). This result reflects significant variation of soils accumulating heavy metals; The principal component plot reveals that the belt highways are areas high in heavy metals; the urban trunk roads areas high in Pb, the suburban roads areas in Al and Fe, and the clean zone “Botanical Garden” an area low in heavy metals.

**Key words** Roadside soils; Heavy metals; Environmental quality assessment