

连霍高速郑商段路旁土壤重金属积累及潜在风险

马建华, 谷蕾, 李文军

(河南大学资源与环境研究所, 开封 475004)

摘要:以连霍高速郑商段不同通车时间的湾刘(通车 11 a)和小王庄断面(通车 4 a)为研究对象, 根据距离公路远近不同布设土壤采样点, 用原子吸收分光光度法测定土壤 Cd、Cu、Pb、Zn、Ni 和 Cr 含量. 在计算表层土壤重金属积累速率和通量的基础上, 探讨了路旁土壤重金属的分布特征、积累状况及潜在污染风险. 结果表明, Cu、Pb 和 Cd 是典型的交通源重金属, 其含量在公路两侧随距离的增加呈先增加后减少的趋势, 含量峰值出现在离路基 25 ~ 50 m 之间. 湾刘断面土壤 Pb、Cd、Cu 的平均含量分别为 14.52、1.32、73.54 mg·kg⁻¹, 小王庄断面分别为 12.41、0.98、43.64 mg·kg⁻¹. 大部分样点 Pb、Cu 和 Cd 的积累速率和通量为正值, 且 Cu > Pb > Cd, 小王庄断面大于湾刘断面. 2 个断面土壤 Cd 已经发生污染; Cu 的潜在污染风险在百年时间尺度之内, 大部分样点在未来 5 ~ 30 a 中可能发生污染, 潜在风险大; Pb 的潜在污染风险都在千年尺度以上, 潜在风险极小.

关键词:连霍高速; 路旁土壤; 重金属积累; 重金属潜在污染风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)03-0894-06

Accumulation and Potential Risk of Heavy Metals in Roadside Soils Along the Section of Zhengzhou-Shangqiu, Lianyungang-Huoerguosi Highway

MA Jian-hua, GU Lei, LI Wen-jun

(Institute of Natural Resources and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: Two typical sampling transects along the Zhengzhou-Shangqiu section, Lianyungang-Huoerguosi highway, were chosen to investigate the accumulation of heavy metals in roadside soils. The highway section at Wanliu transect has been operated since 1994, and that at Xiaowangzhuang section since 2001. Soil samples were collected along the two transects according to the distances from the highway. In laboratory, the concentrations of Cd, Cu, Pb, Zn, Ni and Cr in the soils were measured using AAS. The accumulation of these metals in roadside soils is analyzed in terms of annual accumulation rates and fluxes. The spatial patterns and potential risk of the metals are also discussed. There are several findings in this case study. Along the two transects, the concentrations of Cd, Cu and Pb in the soils increase from the highway first, and then decrease to the control values gradually. So they are typical traffic-source (anthropogenic) heavy metals. In contrast, Cr, Ni and Zn are nature-source metals. The highest concentrations of the anthropogenic metals in the soils occur between 25-50 m from the highway. The average values of concentration of Pb, Cu and Cd in the soils along Wanliu transect are 14.52 mg·kg⁻¹, 1.32 mg·kg⁻¹, and 73.54 mg·kg⁻¹ respectively, and 12.41 mg·kg⁻¹, 0.98 mg·kg⁻¹, and 43.64 mg·kg⁻¹ along Xiaowangzhuang transect respectively. The annual accumulation rates and fluxes of Pb, Cu and Cd in most samples are positive, Cu > Pb > Cd, and the values on Xiaowangzhuang transect are higher than those on Wanliu transect. Potential risk of Cd in all sample are negative, indicating that the soils have been polluted by Cd. In contrast, potential risk of Cu and Pb in most sample sites are positive, but the potential risk of Cu in the soils is much higher than that of Pb. Most sample sites within 300 m from the highway should be polluted by Cu in the future of five to thirty years, but polluted by Pb in the future of many more than one thousand years.

Key words: Lianyungang-Huoerguosi highway; roadside soils; heavy metal accumulation; potential risk of heavy metal

国内外研究表明, 很多地方公路两侧的土壤(路旁土壤)已经发生不同程度的重金属污染, 大部分重金属的含量自路基向两侧呈递减趋势, 污染晕带在距路基 50 ~ 200 m 之间^[1~12]. 还有一些学者研究了路旁土壤重金属含量与多种植物体内重金属含量的关系, 也发现距路基 50 ~ 200 m 范围内的植物发生了不同程度的重金属积累^[12~18]. 但是, 路旁土壤重金属污染与道路通车时间、车流量大小、路旁防护林状况以及当地自然环境条件等多种因素有关, 还有很多科学问题没有得到解决. 特别是不同通车时间对路旁土壤重金属积累速率与积累通量方面的研究

很少, 用路旁土壤重金属积累速率进行其潜在风险估计还鲜见报道.

本研究以连云港-霍尔果斯高速公路(连霍高速)不同通车时间的郑州-商丘段(郑商段)为例, 在野外调查采样和实验室分析的基础上, 计算路旁土壤重金属积累速率和积累通量, 探讨通车密度和通车时间对土壤重金属积累的影响, 开展路旁土壤重

收稿日期: 2008-03-15; 修订日期: 2008-06-16
基金项目: 河南省重点科技攻关项目(72102150029); 河南大学自然科学基金项目(07YB2R020)
作者简介: 马建华(1958 ~), 男, 教授, 主要研究方向为环境土壤学, E-mail: njh@henu.edu.cn

金属潜在污染风险估计,对路旁农田生态系统保护、保障公路两侧居民健康安全具有一定参考价值。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

2005年11月,分别在连霍高速郑商段的中牟县湾刘段(1994年12月通车)和民权县小王庄段(2001年12月通车)布设土壤采样断面(图1)。采样断面与高速公路相垂直,地势开阔、平坦,路旁基本上无防护林带。采样时,小王庄段南北两侧和湾刘段北侧是种植小麦的农田,湾刘段南侧是混合种植小麦和大蒜的农田;据现场调查,2路段南北两侧的秋季作物均为玉米和棉花。在采样断面上,按照离路基0、5、15、25、35、50、100、200、300 m和>1 000 m在公路两侧对称布设采样点,其中离路基>1 000 m的样点为对照样点。为了避免采样误差,在监测样点上首先画出一条与公路平行、长约50 m的线段;然后在线段上等距布设5个面积为1 m²的采样单元,在采样单元内按“梅花形”布点采集5个土壤表层(0~15 cm)样;最后将5个单元获得的25个样品充分混合,按“四分法”舍弃多余样品,获得1 kg左右的土壤分析样品。同时在50 m线段上随机采集5个环刀样品。在对照样点上,选择一块地势平坦、土壤类型和利用方式与监测样点相同、面积较大的田块,按“蛇形布点法”布点采集20个左右的子样,然后将其充分混合,按“四分法”获得1 kg左右的土壤分析样品。

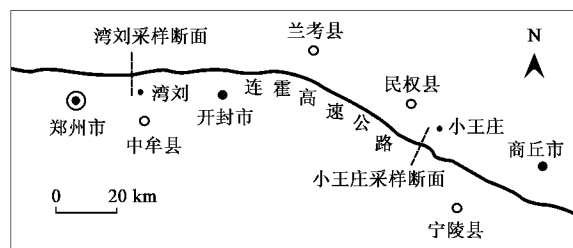


图1 采样断面位置
Fig.1 Location of the sampling transects

在实验室,先把土壤样品风干、磨碎,全部通过1 mm尼龙筛。然后将1 mm样品充分混合,从中多点取样约5 g,用玛瑙研钵研磨,全部通过0.149 mm尼龙筛。土壤样品消解采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸体系。

1.2 试验方法

将环刀样品放入105℃烘箱中烘至恒重后,取

出环刀中的土壤,用重量法计算土壤容重。土壤总铬、铜、锌和镍的测定采用AAS法,土壤铅和镉的测定采用GF-AAS法。使用仪器是日本岛津产AA-6601F型原子吸收分光光度计。在测定过程中,所有样品均由空白样、二次平行样和加标回收率进行质量控制。二次平行样的相对偏差均小于5%,样品加标回收率在96.4%~103.1%之间。

1.3 重金属积累及潜在污染风险计算方法

虽然路旁土壤重金属积累在时间上是变化的,但在一定时段内可以根据其平均积累率计算出任意时刻土壤中的重金属含量,计算公式为^[19]:

$$c_{it} = c_{0i} + k_i t \tag{1}$$

式中, c_{it} 为 t 时刻土壤重金属 i 的含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), c_{0i} 为重金属 i 的变化起始含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), t 为积累时间(a), k_i 为土壤重金属 i 在某一时段内的平均积累速率 $[\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}]$,即:

$$k_i = (c_{it} - c_{0i})/t \tag{2}$$

土壤重金属年积累通量是指每年单位面积上积累的重金属量,单位常用 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 表示^[19]。考虑到本研究样点之间的距离小,空间变化显著,如果用 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 表示通量,不能客观地反映公路两侧不同距离处的重金属积累状况,故根据文献[19]将计算公式修改为:

$$w_i = k_i \cdot \rho \cdot D \cdot 10 \tag{3}$$

式中, w_i 为土壤重金属 i 的积累通量 $[\text{mg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$, ρ 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), D 为耕作层厚度(cm),10是量纲换算系数。

将土壤重金属含量与国家标准相比较,利用积累率可以大致计算出重金属污染风险的大小,计算公式为:

$$N_i = (c_{si} - c_{ii})/k_i \tag{4}$$

式中, N_i 为重金属 i 的风险值(a)。 N 值可正可负,负值表示已经发生重金属污染,负值绝对值越大,污染越严重;正值则表明采样时尚未发生重金属污染,但在未来 N 年后将发生轻度污染,其值越小潜在污染风险越大。由于 N 值是负值时已经发生污染,所以潜在污染风险是指正值时的情况。 c_{si} 为重金属 i 的国家标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),考虑到研究区为一般农田,故选用国家二级标准。

2 结果与讨论

2.1 重金属含量特征及通车时间对重金属积累的影响

第一,除土壤 Ni、Cr 和 Zn 外,其它重金属的含量在路旁两侧随着距离的增加呈先增加后减少的趋势,含量峰值出现在离路基 25~50 m 之间(图 2)。这可能与车辆排放的烟尘颗粒分布与沉降有关。据研究,在汽车所排放的烟尘颗粒物中, $>9\ \mu\text{m}$ 的颗粒迅速沉降在公路两侧, $1\sim9\ \mu\text{m}$ 之间的颗粒在空中进行短距离扩散,而 $<1\ \mu\text{m}$ 的颗粒则能较长时间地停留在大气中,迁移距离较远。 $>9\ \mu\text{m}$ 的颗粒主要沉降在距公路 10 m 以内的区域, $<1\ \mu\text{m}$ 的颗粒主要沉降在距路基 50 m 以外的区域, $10\sim50\ \text{m}$ 之间的区域则为 2 种颗粒物的混合沉降区域。因此,重金属含量峰值出现在离开路基某一距离处,而不在路基处。另外,汽车通过时,公路表面的气流出现湍流,不利于空气中的颗粒物沉降;离开路基某一距离,气流速度下降,颗粒物沉降增多。不同重金属常常赋存在不同大小的颗粒物上,因此不同重金属的含量峰值在路旁两侧出现的位置也有差异^[20,21]。土壤 Ni 和 Cr

含量在公路两侧分布主要受土壤母质的影响而波动性变化,无确定规律,属于非交通源重金属。这与 Turer 等^[4]、Wang 等^[5]和 Sutherland 等^[21]的研究结论相一致。需要指出的是,本研究中的 Zn 分布与 Ni 和 Cr 相似,也没有明显规律可循,这可能是采样地区 Zn 的背景含量高,自然变动幅度大,湮没了公路源 Zn 的影响。

第二,与中国土壤(河南潮土类)元素背景值(单位 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 21.9, Cd 0.10, Cr 66.6, Ni 29.6, Cu 24.1, Zn 71.1)相比^[22],各样点的 Pb 含量均低于背景值, Cr 含量大部分低于背景值,其它重金属均超过背景值。与中国《土壤环境质量标准》中的二级标准(单位 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, Pb 350, Cd 0.60, Cr 250, Ni 60, Cu 100, Zn 300)相比^[23],所有样点的 Cd 含量均超标,湾刘断面只有少数样点的 Ni 含量超标,其它重金属均不超标。

第三,通车 11 a 的湾刘断面的各个重金属平均

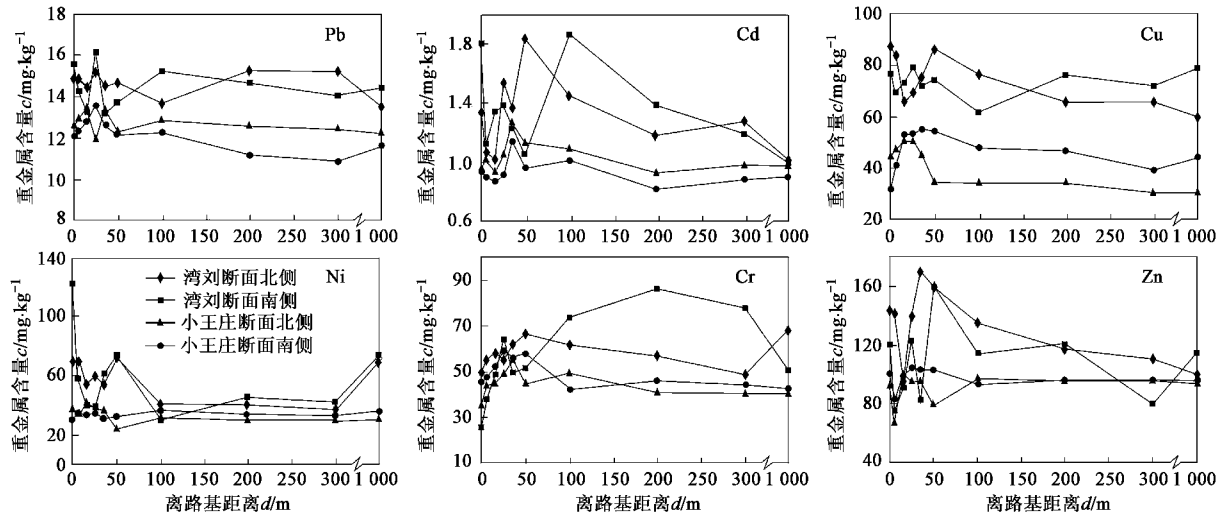


图 2 各断面土壤重金属含量
Fig.2 Heavy metal concentrations in soils along the sample transects

含量都高于通车时间 4 a 的小王庄断面。例如,湾刘断面 Pb、Cd 和 Cu 的平均含量分别为 14.52、1.32 和 73.54 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,而小王庄断面分别为 12.41、0.98 和 43.64 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。表明通车时间长短对路旁土壤重金属积累具有决定性作用。

2.2 重金属积累速率及其影响因素分析

考虑到 2 个研究路段相距 90 km,区域背景值存在一定差异,所以分别选用 2 个断面的对照样重金属平均含量作为初始含量(c_{0i}),按式(2)计算重金属积累速率。由于多数重金属在离路基 25~50 m 处出现峰值,故又计算了距路基 0~15、25~50、100~

300 m 范围的平均积累速率(图 3),以便更真实地反映路旁土壤的重金属积累状况。

由图 3 可以看出,土壤 Ni 和 Zn 在 2 个断面上既出现正积累也出现负积累;Cr 在湾刘断面出现一定数量的负积累,但在小王庄断面出现正积累;其它重金属几乎都是正积累。这种情况说明,除 Ni 和 Cr 是非交通源重金属以外,Zn 受公路交通的影响也不太明显,其含量主要受非均质土壤母质的影响,属于自然变动的范畴,而 Pb、Cu 和 Cd 则是典型的交通源重金属。2 个断面交通源重金属平均积累速率的大小顺序都是 $\text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd}$ 。据 Van Bohemen 等^[20]报

道,公路旁土壤中的 Cu 主要来源于汽车制动系统和散热系统,Pb 和 Cd 主要来源于汽车尾气排放.

交通源重金属积累速率峰值出现的位置与其含量峰值一致.距路基 50 m 范围内,特别是 25 ~ 50 m 之间的地带,重金属积累速率高于 100 m 以外的地带.例如,2 个断面土壤 Pb 的最大积累速率出现在距路基 25 m 处,Cu 和 Cd 的最大积累速率出现在 25 ~ 50 m 之间.

重金属积累速率可以反映通车密度大小或机动车类型.通车密度越大、机动货车比例越高,交通源重金属积累速率就越大.对比 2 个断面交通源重金属的平均积累速率后发现,小王庄断面的 Cu 和 Pb 积累远大于湾刘断面,而 Cd 略低于湾刘断面.小王庄断面 Cu、Pb 和 Cd 的平均积累速率分别为 1.76、

0.13 和 0.01 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$,而湾刘断面分别为 0.423、0.06 和 0.03 $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$. 这种情况表明,连霍高速开封-商丘段(开商段)和郑州-开封段(郑开段)通车密度或车型比例存在差别.据作者在采样路段实际测算,湾刘断面和小王庄断面的白天通车密度分别为 1 014 辆 $\cdot\text{h}^{-1}$ 和 440 辆 $\cdot\text{h}^{-1}$.显然,该数据不能解释上述差别.花鹏等^[24]依据不同车型(小汽车按辆收费,货车按吨位收费)和通车里程,分别计算了开商段和郑开段的交通运输年收入.结果表明,开商段和郑开段年收入分别为 3.76 亿元和 4 亿元,两者相差并不明显.综合上述实测通车密度,可以得出如下结论:虽然开商段通车密度小于郑开段,但大货车比例却高于郑开段,从而造成小王庄断面公路源重金属年积累速率大于湾刘断面.

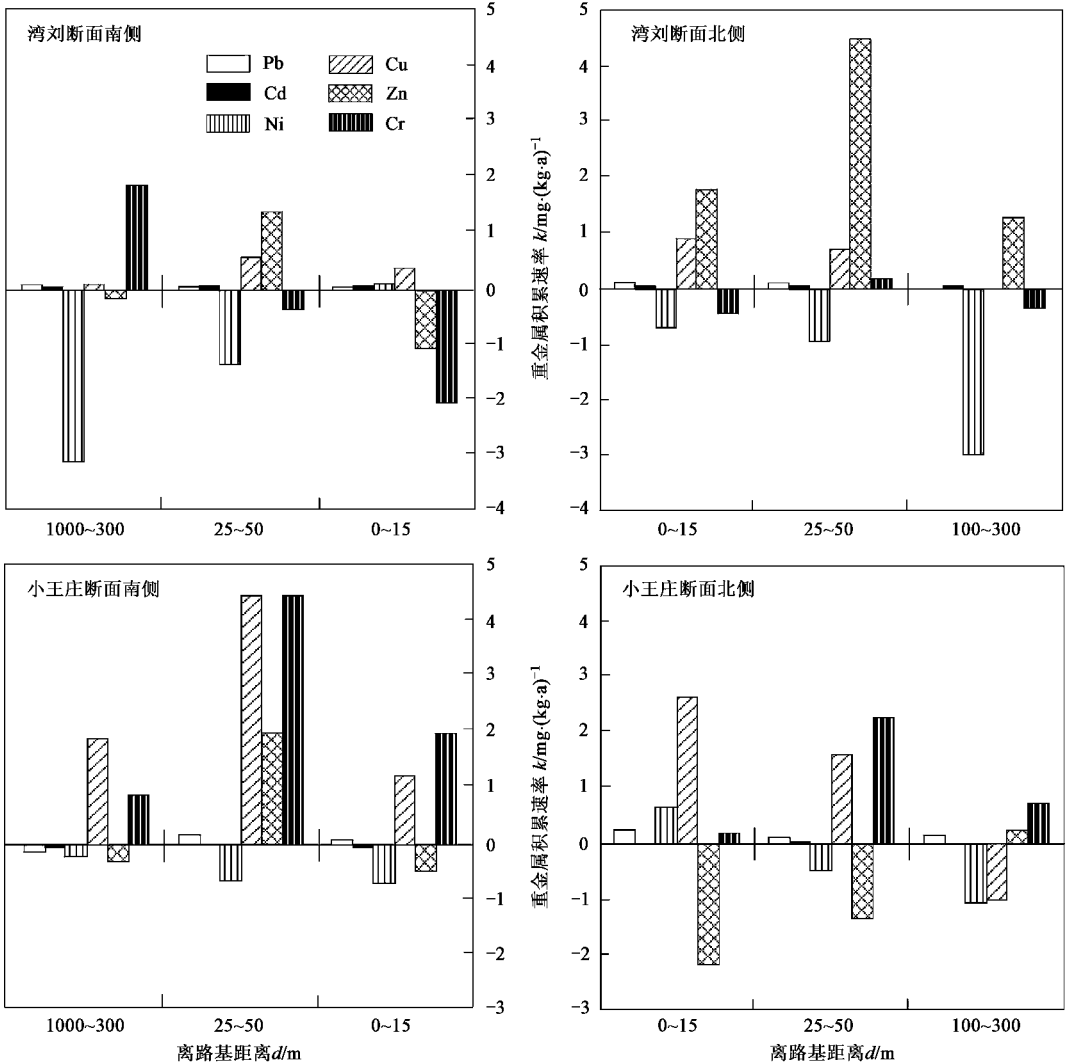


图 3 采样断面不同地带土壤重金属积累速率

Fig.3 Accumulation ratios of soil heavy metals in different zones along the sampling transects

2.3 重金属积累通量分析

耕作层厚度按 15 cm 计,根据式(3)可计算出各个样点的重金属积累通量.结果表明,各样点重金属积累通量正负情况及其大小与年积累速率相一致,2 个断面 Cu、Cd 和 Pb 的通量基本为正值,去掉极少数负值后的平均通量见图 4.从中可知,小王庄断面的重金属积累通量大于湾刘断面,大小顺序均是 Cu > Pb > Cd.小王庄断面 Cu、Pb 和 Cd 的平均年通量分别为 587.55、26.07 和 6.20 mg•(m²•a)⁻¹,湾刘断面分别是 120.16、15.94 和 5.74 mg•(m²•a)⁻¹.2 个断面交通源重金属最大积累通量出现在距路基 15~35 m 处,与最大含量和最大积累速率出现位置基本一致.

一些学者曾计算过不同地区正常土壤的重金属积累通量.Mench^[25]研究指出,英国洛桑实验站 Cd 的积累通量为 0.02~0.72 mg•(m²•a)⁻¹,法国国家农业研究院凡尔赛中心 Cd 的积累通量为 0.27~0.68 mg•(m²•a)⁻¹.李恋卿等^[19]报道了我国太湖地区水稻土表层(长期施用化肥,无工业“三废”污染)Cu、Pb 和 Cd 的平均积累通量分别为 50、50 和 0.08 mg•(m²•a)⁻¹.与之对比后发现,连霍高速公路两侧土壤 Cd 和 Cu 的积累通量远远超过正常土壤,只有极个别样点的 Pb 积累通量稍微超过正常土壤,说明公路交通对路旁土壤重金属积累具有重要影响.

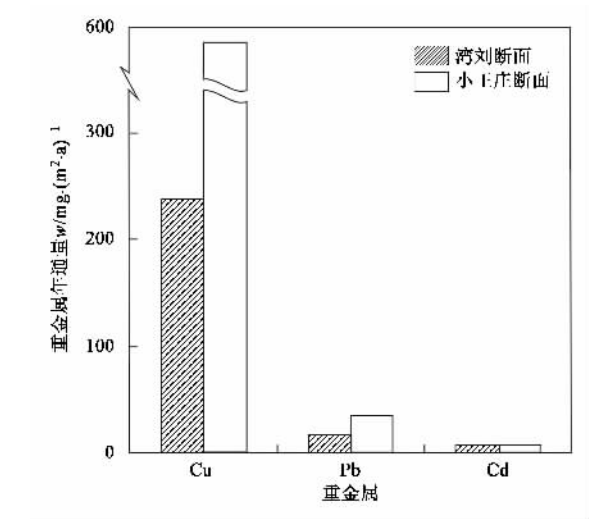


图 4 土壤 Cu、Pb 和 Cd 平均积累通量
Fig.4 Average accumulation fluxes of Cu, Pb and Cd in the soils

2.4 重金属潜在污染风险估计

用 2 个断面各自的对照样重金属平均含量作为变化起始含量,按式(4)可计算出各样点 Cd、Cu 和 Pb 的潜在污染风险年数(表 1).在重金属积累速率是正值且数值越大的情况下,样点超过国家土壤环

境质量标准从而发生污染的时间就越短,潜在污染风险就越大,反之潜在风险就越小.由表 1 可以看出,2 个断面 Cd 的风险年数大部分为负值,表明 2 个断面距路基 300 m 范围内已经发生不同程度的土壤 Cd 污染.

表 1 各采样点土壤 Cd、Cu 和 Pb 的污染风险				
Table 1 Pollution risk of Cd, Cu and Pb of the soil samples				
断面	距路基距离 d/m	风险年数/a		
		Cd	Cu	Pb
湾刘断面北侧	0	-18	15	4 245
	5	-105	19	4 103
	15	-917	—	8 592
	25	-13	973	3 051
	35	-17	50	6 481
	50	-10	16	5 276
	100	-14	44	—
	200	-31	—	2 953
湾刘断面南侧	300	-22	—	3 001
	0	-20	40	2 428
	5	-57	9 626	14 212
	15	-28	84	—
	25	-27	31	1 707
	35	-36	119	—
	50	-144	61	—
	100	-19	—	2 977
小王庄断面北侧	200	-27	44	5 432
	300	-38	126	52 799
	0	-44	22	1 921
	5	-26	13	1 341
	15	-143	7	896
	25	-22	8	45 061
	35	-15	19	976
	50	-18	—	4 215
小王庄断面南侧	100	-19	—	1 475
	200	-12	—	2 170
	300	-37	—	2 693
	0	-12	—	13 510
	5	—	51	4 214
	15	—	5	1 580
	25	—	5	861
	35	-17	3	2 101
小王庄断面南侧	50	-77	4	9 647
	100	-28	12	4 351
	200	—	16	—
	300	—	109	—

湾刘断面和小王庄断面 Cu 和 Pb 的潜在污染风险大部分为正值,说明这些样点在采样时尚未发生污染.但在将来数年后可能发生污染.土壤 Cu 和 Pb 的潜在污染风险年数差别巨大,分属不同时间尺度.两断面土壤 Cu 的潜在风险几乎都在百年尺度之内,距路基 200 m 内的大部分样点在未来 5~30 a 中可能发生 Cu 污染,潜在污染风险较大,并且小王庄断面大于湾刘断面.湾刘断面土壤 Cu 的最大潜在风险

出现在距路基 25 ~ 50 m 之间,小王庄断面均在距路基 15 m 处.2 个断面土壤 Pb 的潜在污染风险都在千年时间尺度之上,潜在风险较小,甚至可以忽略.

3 结论

(1) 土壤 Cu、Pb 和 Cd 含量在公路两侧随着距离的增加,呈先增加后减少的趋势,含量峰值出现在离路基 25 ~ 50 m 之间,是典型的交通源重金属.公路运营时间越长,土壤中的交通源重金属含量就越高.

(2) 2 个断面土壤 Pb、Cu 和 Cd 的积累速率大部分为正值,Ni、Cr 和 Zn 既出现正值也出现负值.2 个断面交通源重金属平均积累速率的大小顺序都是 Cu > Pb > Cd.小王庄断面 Cu 和 Pb 的平均积累速率大于湾刘断面.

(3) 2 个断面重金属年积累通量的大小均是 Cu > Pb > Cd,小王庄断面大于湾刘断面.

(4) 2 个断面土壤 Cd 污染风险均为负值,已经发生污染.2 个断面土壤 Cu 潜在污染风险大部分样点在百年时间尺度之内,距路基 200 m 内的大部分样点在未来 5 ~ 30 a 中可能发生 Cu 污染,小王庄断面的 Cu 污染潜在风险更大.2 个断面土壤 Pb 的潜在风险都在千年尺度以上,风险极小.

参考文献:

- [1] Al-Chalabi A, Hawker D. Distribution of vehicular lead in roadside soils of major roads of Brisbane, Australia [J]. Water, Air, Soil Pollution, 2000, **118**(3/4): 299-310.
- [2] Fakayode S O. 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.
- [3] Kocher B, Wessolek G, Stoffregen H. Water and heavy metal transport in roadside soil[J]. Pedosphere, 2005, **15**(6): 746-753.
- [4] Turer D G, Mqaynard B J. Heavy metal contamination in highway soils: comparison of Corpus Christi, Texas and Cincinnati, Ohio shows organic matter is key to mobility[J]. Clean Techn Environ Policy, 2003, **4**(4): 35-45.
- [5] Wang X S, Qin Y, Chen Y K. Heavy metals in urban roadside soils, Part 1: effect of particle size fractions on heavy metals partitioning [J]. Environmental Geology, 2006, **50**(7): 1061-1066.
- [6] Hashisho Z, El-Fadel M. Impacts of traffic-induced lead emissions on air, soil and blood lead levels in Beirut [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2004, **93**(1-3): 185-202.
- [7] Massadeh A, Tahat M, Jaradat Q, et al. Lead and cadmium contamination in roadside soils in Inbid City, Jordan [J]. Soil and Sediment Contamination, 2004, **13**(4): 347-359.
- [8] Ozaki H, Watanabe I, Kuno K. As, Sb, and Hg distribution and pollution sources in the roadside soil and dust around Kamikochi, Chubu Sangaku National Park, Japan [J]. Geochemical Journal, 2004, **38**(5): 473-484.
- [9] Howari F M, Abu-Rukah Y P, Goodell C. Heavy metal pollution of soils along North Shuna-Aqaba Highway, Jordan [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2004, **22**(5): 597-607.
- [10] Oztas T, Ata S. Distribution patterns of lead accumulation in roadside soils: a case study from Erzurum, Turkey [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2002, **18**(2): 190-196.
- [11] 马建华, 李剑, 宋博. 郑汴路不同运营路段路旁土壤重金属分布及污染分析[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(10): 1734-1743.
- [12] 朱建军, 崔保山, 杨志峰, 等. 纵向岭谷区公路沿线土壤表层重金属空间分异特征[J]. 生态学报, 2006, **26**(1): 146-153.
- [13] Swaileh K M, Hussein R M, Abu-Elhaj S. Assessment of heavy metal contamination in roadside surface soil and vegetation from the West Bank[J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2004, **47**(1): 23-30.
- [14] Guang D S, Peart M R. Heavy metal concentrations in plants and soils at roadside locations and parks of urban Guangzhou [J]. Journal of Environmental Science, 2006, **18**(3): 495-502.
- [15] Nabulo G, Oryemoriga H, Diamond M. Assessment of lead, cadmium, and zinc contamination of roadside soils, surface films, and vegetables in Kampala City, Uganda [J]. Environmental Research, 2006, **101**(1): 42-52.
- [16] Li F R, Kang L F, Gao X Q, et al. Traffic-related heavy metal accumulation in soils and plants in northwest China [J]. Soil and Sediment Contamination, 2007, **16**(5): 473-484.
- [17] Öncel M S, Zedef V, Mert S. Lead contamination of roadside soils and plants in the highways between Istanbul and Sakarya, NW Turkey [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2004, **13**(12b): 1525-1529.
- [18] 李波, 林玉锁, 张孝飞, 等. 宁连高速公路两侧土壤和农产品中重金属污染的研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, **24**(2): 266-269.
- [19] 李恋卿, 潘根兴, 张平究, 等. 太湖地区水稻表层土壤 10 年尺度重金属元素积累速率的估计[J]. 环境科学, 2002, **23**(3): 119-123.
- [20] Van Bohemen H D, Van De Laak W H J. The influence of road infrastructure and traffic on soil, water, and air quality [J]. Environmental Management, 2003, **31**(1): 50-68.
- [21] Sutherland R A, Tolosa C A. Variation in total and extractable elements with distance from roads in an urban watershed, Honolulu, Hawaii [J]. Water, Air, Soil Pollution, 2001, **127**(1-4): 315-338.
- [22] 国家环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 93-256.
- [23] GB 15618-1995, 土壤环境质量标准[S].
- [24] 花鹏, 赵芳, 赵静, 等. 高速公路联网收费资金拆分模型的建立及应用[J]. 中外公路, 2006, **26**(6): 229-231.
- [25] Mench M J. Cadmium availability to plants in relation to major long-term changes in agronomy systems [J]. Agriculture, Ecosystem & Environment, 1998, **67**(2): 175-187.