

川西北高原路侧土壤重金属分布特征及污染评价*

阳小成¹ 赵桂丹¹ 熊曼君¹ 彭幼红^{2**}

¹成都理工大学环境学院 成都 610059

²中国科学院成都生物研究所, 中国科学院山地生态恢复与生物资源利用重点实验室, 生态恢复与生物多样性保育四川省重点实验室 成都 610041

摘要 道路交通活动可导致道路两侧土壤重金属污染。为了解川西北高原路侧土壤重金属污染状况, 以四川省阿坝州红原县为例, 研究不同车流量区域路侧重金属镉(Cd)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)、锌(Zn)的分布特征与规律, 并采用单项污染指数法、尼梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法评价公路交通导致的重金属污染情况。结果表明: 车流量增加对区域路侧土壤重金属含量产生了一定程度的影响, 路侧土壤Cd和Zn含量均高于高寒草甸土壤的背景值含量, 并随车流量增加呈上升趋势。基于单项污染指数法的结果显示3种车流量等级区域路侧都受到Cd重度污染, 部分区域受Ni、Pb、Zn轻度污染。基于尼梅罗综合污染指数法的结果显示车流量大的区域路侧土壤存在重金属中度污染, 车流量中等和车流量低的区域路侧土壤存在重金属轻度污染。总体上, 由于本地区道路建设和使用年限相对较短, 与其他重金属污染严重的城市或地区比较, 路侧重金属污染生态风险中等, 但部分重金属元素(如Cd和Zn)的生态风险较大, 随着道路使用年限的增加势必对当地生态平衡产生影响, 需引起重视。(图2 表8 参27)

关键词 川西北高原; 车流量; 重金属污染; 风险评价

CLC X53

Spatial distribution and risk assessment of soil heavy metal contamination along roadsides of the northwestern Sichuan Plateau, China*

YANG Xiaocheng¹, ZHAO Guidan¹, XIONG Manjun¹ & PENG Youhong^{2**}

¹ College of Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

² CAS Key Laboratory of Mountain Ecological Restoration and Bioresource Utilization & Ecological Restoration and Biodiversity Conservation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

Abstract Traffic activities in roadways are the major source of heavy metal contamination on the northwestern Sichuan Plateau, China. To characterize the spatial pattern of heavy metal distribution, we collected soil samples and measured the concentrations of five heavy metals (Cd, Cu, Ni, Pb, and Zn) from nine sites in Hongyuan County, Sichuan Province, including three transects that reflected typical gradients of traffic density. Each transect consisted of three levels of traffic density sites. We calculated single pollution index, Nemerow multi-factor index, and potential ecological risk index, to assess the ecological risk of the heavy metal contamination. Results showed that the soils were contaminated by Cd and Zn, with higher concentrations than that of the natural soil background values in all sampling sites. Moreover, Cd and Zn concentrations increased with increasing traffic density, suggesting that traffic activities were potentially responsible for the metal contaminations. The single pollution index indicated that the study sites were heavily contaminated by Cd and slightly polluted by Ni, Pb, and Zn, and the Nemerow multi-factor and potential ecological risk indexes indicated moderate potential ecological risks at the study sites. Specifically, the sites with high traffic density were moderately contaminated and the sites with low traffic density were mildly contaminated. In general, Cd and Zn were highly accumulated in soils of the study region; therefore focus should be on the high ecological hazard associated with soil heavy metal contamination, even in undeveloped regions.

Keywords northwestern Sichuan Plateau; traffic density; heavy metal contamination; risk assessment

收稿日期 Received: 2017-04-24 接受日期 Accepted: 2017-06-02

*环境保护部生物多样性保护专项、国家自然科学基金项目(31100397)和四川省重点研发项目(2017SZ0080)资助 Supported by the Biodiversity Conservation Project of Department of Environmental Conservation of China, the National Natural Science Foundation of China (31100397), and the Key Project of Research and Development of Sichuan, China (2017SZ0080)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: Pengyh@cib.ac.cn)

随着经济快速发展,交通运输业日益繁荣,其所造成的环境污染也日益严重.研究表明,道路交通活动可导致道路两侧土壤和植物系统重金属污染^[1-2],土壤一旦受到重金属污染,不仅会在土壤中累积,还将通过土壤-植物体系和土壤-水体系向农作物和地下水或地表水转移,损害人体健康^[3].道路两侧土壤重金属污染物来源主要包括交通排放物汽车尾气、轮胎磨损、制动器磨损、汽车外壳和油漆磨损等^[4].目前,对公路两侧土壤、作物等重金属污染状况的研究大多数是针对高速公路、市区交通干道或车流量大的公路区域^[5],而对于高原高海拔特殊地理环境下土壤重金属污染的特征和规律的研究较少.

川西北藏民族地区地处高原和山区,平均海拔3 000 m以上,地理环境特殊且生态环境脆弱,对环境变化敏感.川西北高寒草甸地区以放养大型牲畜牦牛为主,是我国五大牧区之一.随着近年来高原旅游业的兴起,当地交通设施和通讯设施等得到大力改善,车流量大幅增加.公路的修建与高频率运营产生了大量的扬尘、废水、废气以及噪声、振动等,对原有的生态和景观结构产生了极大的干扰^[6].道路交通产生的重金属对当地生态环境产生负面影响,同时还可能通过食物链给人类健康带来损害.然而,人们对这些地区土壤重金属的分布及迁移规律尚不清楚.本研究以四川省阿坝州红原县为例,分析不同车流量路侧的土壤主要重金属含量,明确土壤重金属分布特征和规律,评价重金属元素污染情况,评估其对周边环境的潜在威胁,为当地的土壤重金属污染评估与防治提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于四川省西北部的红原县境内.红原县位于青藏高原尾脊的东侧,是我国重要的草原湿地保护区之一,也是连接我国西北、西南地区的交通枢纽和汉藏文化交融的重要区域^[7].地处东经101°51′-103°23′、北纬31°50′-33°22′,平均海拔在3 500 m左右.属大陆性高原温带季风气候,主要特征是气候寒冷,春秋短促不明显,冷暖季节比较明显.区域内草地类型为高寒草甸.当地以农牧业为主,工业污染源极少.近30年来,区域交通得到了有力的发展(修建大量旅游公路、修建红原机场和鹧鸪山穿山隧道等),在带动矿业、旅游业和湿地资源等产业发展的同时^[8],车流量的增加也对其生态环境产生了负面影响.

1.2 样品的采集

2015年7-8月沿着红原县交通干线(S209)设3个样带,包括位于交通干线S209的高车流量(S1, S4, S7)、位于次级公路的中车流量(S2, S6, S8)、位于偏远村路的低车流量(S3, S5, S9)3个梯度9个样点,样点分布如图1.各样点车流量按非特殊日统计时的均值,中车、小车分别按0.8、0.5折合成大车进行车流量大小的统计,如表1所示.

在每个样点,距所选的道路中心线10 m左右范围内,选择平坦地段布设5个1 m × 1 m的采样单元,每个采样单元内用土钻取5次表层(0-10 cm)土壤样品,混合后按“四分法”舍弃多余样品,保留0.5 kg左右的样品用于重金属含量的分析.



图1 采样点分布示意图.样带1: S1、S2、S3;样带2: S4、S5、S6;样带3: S7、S8、S9.

Fig. 1 The sampling sites. Transect 1: S1, S2, S3; Transect 2: S4, S5, S6; Transect 3: S7, S8, S9.

表1 采样点车流量统计

Table 1 Traffic flow in each sampling site

采样点 Sampling site	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
车流量 Traffic flow (n/h ⁻¹)	508	21.17	10.33	534.83	45.67	2.17	499.5	66	1.17

1.3 样品处理及分析

依据《土壤元素的近代分析方法》^[9]的规定,土样经过自然风干、去杂、研磨和过筛等预处理.采用混合酸(硝酸-高氯酸-氢氟酸)进行消解处理,分解法-原子吸收光谱法(采用仪器为PinAAcle 900T,美国Perkin-Elmer公司生产)测定镉(Cd)、铜(Cu)、镍(Ni)、铅(Pb)、锌(Zn)等重金属含量.用SPSS20.0统计软件和Excel2010数据分析软件对重金属含量数据进行比较(单因素方差分析)、对重金属元素之间的Pearson相关性进行分析.

1.4 污染评价标准

红原草原属于生态自然区,其土壤质量符合土壤环境质量标准(GB 15618-1995)^[10],但鉴于其土壤属于草甸土质,因而以《中国土壤元素背景值》中草甸土的背景值^[11]为比较基准,采用单项污染指数法、尼梅罗综合污染指数法和潜在生态危害污染指数法^[12-15]对红原县公路旁侧土壤重金属污染情况进行评价.

1.4.1 单项污染指数法 单项污染指数法是以土壤元素背景值为评价标准来评价单一重金属元素的累计污染程度,能确定出主要的污染物及污染程度,便于各污染物之间的比较分析.计算公式如下:

$$P_i = C_i/S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为重金属元素*i*的单项污染指数, C_i 为重金属元素*i*在路与表层土壤中的实测浓度, S_i 为重金属元素*i*的土壤环境背景值.

1.4.2 尼梅罗综合污染指数法 尼梅罗综合污染指数法是将单因子污染指数按一定方法综合起来进行评价的方法,能全面、综合反映土壤污染程度,突出高浓度污染物对土壤环境质量的影响.计算公式如下:

$$N_p = \sqrt{\frac{P_{\max}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, N_p 为土壤综合污染指数, $P_{\max}$ 为土壤中单项污染物的最大污染指数, P_{ave} 为土壤中各污染物的指数平均值。

1.4.3 潜在生态危害指数法 潜在生态危害指数法针对重金属对环境的生态效应方面, 考虑了不同种金属对环境产生的生态危害, 具有全面评价土壤重金属的污染程度的重要意义。计算公式如下:

$$E_i = T_i \times P_i, I_R = \sum E_i \quad (3)$$

式中, E_i 为重金属元素*i*的潜在生态风险指数, T_i 为重金属元素*i*的毒性响应系数, I_R 为多种重金属的潜在生态危害指数。5种重金属的毒性响应系数^[16]中, Cd、Cu、Ni、Pb、Zn分别为30、5、5、5、1。污染等级划分标准见表2^[12]。

表2 污染等级划分标准^[12]

Table 2 Pollution grading standards^[12]

污染指数 Pollution index	污染等级 Pollution degree	等级描述 Degree description
$P_i < 1$ $N_p \leq 0.7$ $E_i < 40, I_R < 50$	1	无污染 Non-pollution 安全, 清洁 Safety and cleanliness 轻微污染 Slight pollution
$1 \leq P_i < 2$ $0.7 < N_p \leq 1$ $40 \leq E_i < 80$ $50 \leq I_R < 300$	2	轻度污染 Mild pollution 警戒, 尚清洁 On alert and a slight level 中等污染 Moderate pollution
$2 \leq P_i < 3$ $1 < N_p \leq 2$ $80 \leq E_i < 160$ $300 \leq I_R < 600$	3	中等污染 Moderate pollution 轻度污染 Mild pollution 强污染 Strong pollution
$P_i \geq 3$ $2 < N_p \leq 3$ $160 \leq E_i < 320, I_R > 600$	4	重度污染 Serious pollution 中度污染 Moderate pollution 很强污染 Very strong pollution
$N_p > 3$ $E_i \geq 320, I_R > 600$	5	重度污染 Serious pollution 极强污染 Extremely strong pollution

2 结果与分析

2.1 路侧土壤重金属分布特征与规律

由表3可知, 总体上不同车流量道路路侧土壤重金属含量大小变化趋势与土壤元素背景值变化趋势一致, 排序为Zn > Ni > Pb > Cu > Cd, 表明成土母质是造成本区域土壤重金属含量差异的主导因素。与草甸土壤元素背景值相比, Cd、Zn含量明显偏高, 其余各元素差异不明显。与国内外其他污染地区路侧重金属含量相比较(表3和表4), 本研究区域重金属积累属于中等含量水平^[1, 17-23]。

自然条件下, 土壤中重金属元素含量波动范围较小。样点间的平均变异系数值越大反映变异程度越大, 说明受人为活动影响越大。本研究各样地重金属元素含量的变异系数介于4.53-14.92(表3), 表明重金属含量在一定程度上受到了人为因素的影响。对不同车流量区域的比较分析显示, 各金属元素之间的变异系数呈现相对复杂的变化趋势。如Cd和Cu的变异系数随车流量的减少而增加; Ni的变异系数在车流量低区域数值最大, 其次是在车流量高区域, 再次是车流量中等区域; Pb的变异系数在车流量中等区域数值最大, 在车流量多区域数值最小; Zn的变异系数表现趋势则与Pb相反。

表3 不同车流量路侧土壤重金属含量

Table 3 Soil heavy metal concentrations in roadside with different traffic flows

车流量 Traffic flow	统计指标 Statistical indicator	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
高 High	平均值 Mean (w/mg kg ⁻¹)	0.22	17.67	23.03	24.81	86.85
	标准差 Standard deviation	0.03	0.80	2.24	1.75	13.76
	变异系数 Coefficient of variation (CV/%)	12.27	4.53	9.73	7.05	15.84
中 Medium	平均值 Mean (w/mg kg ⁻¹)	0.17	15.45	21.94	21.68	74.38
	标准差 Standard deviation	0.02	0.82	1.44	2.38	6.01
	变异系数 Coefficient of variation (CV/%)	13.53	5.31	6.56	10.98	8.08
低 Low	平均值 Mean (w/mg kg ⁻¹)	0.16	16.64	23.61	23.29	74.09
	标准差 Standard deviation	0.02	1.97	3.22	1.91	7.83
	变异系数 Coefficient of variation (CV/%)	14.38	11.84	13.64	8.20	10.57
草甸土背景值 Background value of meadow soil element		0.08	19.80	23.30	22.40	70.00
(w/mg kg ⁻¹)						

表4 国内外其他城市与地区土壤重金属含量

Table 4 Soil heavy metal concentrations (w/mg kg⁻¹) in roadside soils in other cities

地点 Location	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	Reference
Beijing, China	0.22	29.70	26.70	35.40	92.10	[1]
Wuhan, China	3.22	18.80	-	28.20	88.10	[17]
Galway, Ireland	-	16.60	22.10	40.80	81.80	[18]
Jeddah, Saudi Arabia	-	-	46.70	47.50	222.20	[19]
Ibadan, Nigeria	1.36	31.40	38.90	30.70	86.10	[20]
Kampala, Uganda	1.12	-	-	45.30	140.90	[21]
West Bank, Palestine	0.27	60.40	18.90	87.40	82.20	[22]
全球背景值 Background values of the world	0.35	30.00	50.00	35.00	90.00	[23]

图2为3组不同车流量实验样带重金属元素含量分析结果。由图可知, 车流量对路域重金属含量变化造成了一定程度的影响, 但不同的重金属元素表现出不一致的响应趋势。Cd含量随车流量的升高而增加, 车流量高区域的Cd含量显著高于中等车流量或低车流量区域($P < 0.05$), 3组实验样带中呈一致的趋势。在样带1和样带3中, Zn元素含量在车流量高区域显著高于中等车流量或低车流量区域($P < 0.05$), 在样带2中差异不显著。其余元素(Cu、Ni、Pb)在3组样带中则没有呈现随车流量变化的规律。

2.2 不同重金属之间的相关性

利用SPSS20.0分析不同车流量条件下重金属含量的相关性, 分析结果如表5所示。从表中可以看出, 不同车流量等级路域重金属之间相关性有较大的差异。在车流量低的路侧土壤中, 大部分元素之间的相关性显著或极显著($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 但车流量高区域元素之间的相关性低, 仅Cd和Cu之间呈极显著相关性($P < 0.01$)。

2.3 不同车流量路侧表土重金属污染评价

采用土壤元素背景值作为土壤环境质量安全性评价的标准, 分别采用单项污染指数法、尼梅罗综合污染指数法和潜在生态危害指数法评价不同车流量路域土壤的污染状况。单项污染指数法结果(表6)显示, 3种车流量等级公路均不同程度地受到重金属Cd、Ni、Pb、Zn污染, 其中Cd污染最突出, 不同等级公路超标率均为100%。3种车流量等级公路大

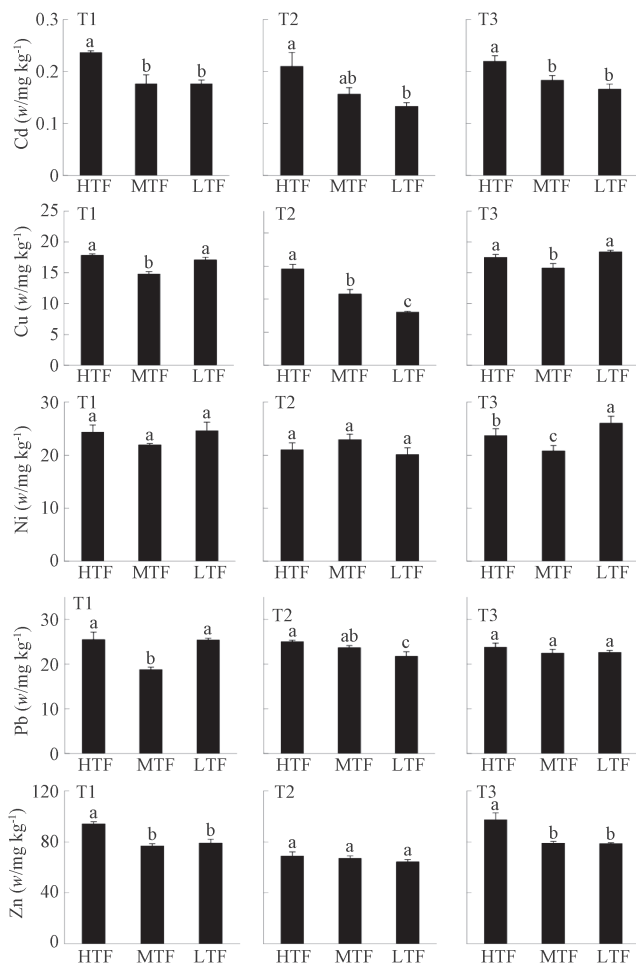


图2 不同样带重金属元素含量(平均值±标准误)。T1: 样带1; T2: 样带2; T3: 样带3。HTF: 高车流量; MTF: 中车流量; LTF: 低车流量。柱状图上方不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 2 Soil heavy metal concentrations in different transects (mean ± SE). T1: Transect 1; T2: Transect 2; T3: Transect 3. HTF: High traffic flow; MTF: Medium traffic flow; LTF: Low traffic flow. Different lowercase letters above the bars indicate significant difference at 0.05 level.

表5 不同车流量区域的重金属之间的相关性

Table 5 Relationships among different heavy metals in roadside with different traffic flows

车流量高 High traffic flow		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Cd	-					
Cu	0.809**	-				
Ni	0.351	0.182	-			
Pb	0.231	0.531	-0.068	-		
Zn	0.433	0.102	0.534	0.139	-	
车流量中 Medium traffic flow		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Cd	-					
Cu	0.236	-				
Ni	-0.437	0.295	-			
Pb	-0.314	0.656	0.186	-		
Zn	0.613	-0.226	-0.655	-0.496	-	
车流量低 Low traffic flow		Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Cd	-					
Cu	0.799**	-				
Ni	0.799**	0.936**	-			
Pb	0.770*	0.461	0.434	-		
Zn	0.924**	0.906**	0.838**	0.656	-	

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$.

部分受Ni、Pb、Zn轻度污染;车流量中等路域受Ni轻度污染较少,趋于无污染;此外,3种车流量等级公路都没有受Cu的污染。尼梅罗综合污染指数法结果(表7)显示,车流量大的路域属于重金属中度污染,车流量中等和车流量低路域属于重金属轻度污染。生态危害指数法评价结果(表8)显示,3种车流量等级公路旁土壤均受到Cd中等潜在生态危害,受Cu、Ni、Pb、Zn轻微潜在生态污染。综合而言,红原公路土壤受重金属中等潜在生态危害,且危害程度随车流量的增大而增加。

3 讨论与结论

川西北高寒草甸地区由于地理条件特殊,人口稀少,经济落后,长期以来都属公路运营低地区。该地区其他工业污染极少,土壤重金属污染源较为简单。研究表明,试验区域较之国内外其他污染地区^[1, 17-23],路侧重金属积累程度相对较轻,这可能是由于本研究区总体上公路建设和使用年限不是很长。本研究路侧重金属含量总体上变化趋势与土壤背景值(来源于高原草甸土)变化趋势一致,进一步说明该地区土壤环境极少受到其他因素影响,各重金属含量主要由成土母质因素决定。由于当地土壤重金属的背景值直接决定了重金属含量数量级的大小,本研究采用比较不同车流量等级路侧重金属含量的方法,可以排除由于成土母质不同导致的差异,更好地反映交通源导致的重金属含量变化趋势和迁移的规律。

近几十年来研究区域内交通量的增加主要来源于快速的旅游经济发展,游客自驾车数量剧增。川西北高寒草甸高海拔地区空气稀薄,部分路段地势起伏较大,交通量增加产生的尾气污染和轮胎磨损问题相对严重。本研究表明车流量的增加对区域内路侧土壤重金属Cd和Zn含量产生了一定程度的影响,Cd和Zn含量随车流量增加而增加,累积明显。路侧Cd污染物主要来源于机动车发动机润滑油的燃烧和轮胎的磨损^[24-25],且Cd具有活性强,易被土壤吸附,颗粒较大易于就近累积等特征,因此车流量增加显著增加了路侧Cd累积。Zn污染物主要来源于轮胎的磨损以及车辆的镀锌零部件(如油箱、汽车的防腐镀锌板)^[26-27],因此车流量大区域Zn污染物散发更多。本研究中Cd和Zn含量显著高于草甸土壤的背景值含量,对车流量增加反应灵敏,对于该地区污染有较好的指示作用。车流量高路域土壤中重金属含量都较高,但有的样带中车流量低路域的部分重金属(如Ni)含量反而更高,这可能与当地复杂的路况有关。在本研究中,车流量低的路域往往属于偏远小路,比车流量高或中等区域的公路更易造成轮胎磨损和机械摩擦,车量少但散发出更多污染物,从而导致土壤中部分重金属含量反而更高。交通密集的地带,Pb累积一直被认为是最重要的交通污染之一,但是,本研究没有发现明显的Pb污染和积累,这可能是由于当地机动车数量的剧增时期,恰好是在使用无铅汽油后。

本研究区域为川西北重要的旅游景区,除了交通源导致的重金属污染外,可能还受到其他自然或人为因素的影响。结果显示,各取样区重金属元素的变异系数呈现相对复杂的变化趋势,这可能与红原当地的生态、人畜活动,高寒草甸

表6 单项污染指数法评价

Table 6 Evaluation of the single factor pollution index method

车流量 Traffic flow	元素 Element	评价数目 Number of evaluation	P_i 范围 Range of P_i	P_i 平均值 P_i Mean	$P_i < 1$ 未污染数目 Number of non-pollution	$1 \leq P_i < 2$ 轻污染数目 Number of mildpollution	$2 \leq P_i < 3$ 中污染数 Number of moderatepollution	超标率 Over standard rate ($r/\%$)
高 High	Cd	9	1.90-2.98	2.65	0	1	8	100.0
	Cu	9	0.82-0.94	0.89	9	0	0	0
	Ni	9	0.83-1.11	0.99	4	5	0	56.6
	Pb	9	1.00-1.22	1.11	0	9	0	100.0
	Zn	9	0.93-1.39	1.24	2	7	0	77.8
中 Medium	Cd	9	1.67-2.50	2.05	0	4	5	100.0
	Cu	9	0.72-0.84	0.78	9	0	0	0
	Ni	9	0.82-1.06	0.94	8	1	0	11.1
	Pb	9	0.80-1.09	0.97	4	5	0	55.6
	Zn	9	0.92-1.15	1.06	2	7	0	77.8
低 Low	Cd	9	1.43-2.26	1.89	0	4	5	100.0
	Cu	9	0.65-0.95	0.84	9	0	0	0
	Ni	9	0.76-1.34	1.04	4	5	0	55.6
	Pb	9	0.91-1.16	1.04	3	6	0	66.7
	Zn	9	0.88-1.21	1.07	3	6	0	66.7

表7 尼梅罗综合污染指数评价

Table 7 Evaluation of the Nemerow synthetical pollution index method

车流量 Traffic flow	N_p	$P_{\max}$	P_{ave}
高 High	2.65	1.38	2.11 (中度污染 Moderate pollution)
中 Medium	2.05	1.16	1.67 (轻度污染 Mild pollution)
低 Low	1.89	1.18	1.58 (轻度污染 Mild pollution)

表8 潜在生态危害评价

Table 8 Evaluation of the potential ecological harm index method

车流量 Traffic flow	E_i					I_R
	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	
高 High	79.50	4.45	4.95	5.55	1.24	95.69 (中度污染 Moderate pollution)
中 Medium	61.50	3.90	4.70	4.85	1.06	76.01 (中度污染 Moderate pollution)
低 Low	56.70	4.20	5.20	5.20	1.07	72.37 (中度污染 Moderate pollution)
危害 Hazard	中等 Moderate	轻微 Slight	轻微 Slight	轻微 Slight	轻微 Slight	

植物群落生长状况相对复杂有关。当地夏季和冬季牧场分布不均、牧民居住和迁徙等因素都会对路域表土重金属含量造成或多或少的影响。相关性分析也显示,车流量高区域重金属元素之间的相关性弱,说明区域内重金属来源具有非同源性。红原大草原属开放景区,并未设特定游览接待区和游步道,自驾游客可随意停车观景,由此造成的人为踩踏、游客鞋底的携带物质及其磨损、丢弃的垃圾(如塑料、电池等)都可能随机地将重金属污染源带入土壤。

本研究中,车流量低的路侧土壤重金属元素之间的相关性高于车流量高的路侧土壤。这可能是由于车流量低区域重金属元素主要由成土母质的性质决定,而在车流量高区域各元素对交通污染的敏感程度不一,加之更多的人为因素干扰,降低了重金属元素之间的相关性。研究重金属之间的相关性可以推测重金属来源是否相同。本研究中,尽管Cd和Zn都随车流量的升高而降低,说明这些重金属积累主要来源于交通污染,但在高车流量区域与中等车流量区域两元素之间相关性不显著,这可能是由于两元素所来源的机动车组分不尽相同,从而导致两元素之间相关性不明显。

总体上,由于研究地区道路建设和使用年限相对较短,与其他重金属污染严重的城市与地区相比较,本区域路侧公路土壤受重金属轻度至中度的潜在生态危害,危害程度随车流量的增大而增加。但是需要引起重视的是,有的重金属元素的生态风险较大,如Cd的毒性响应系数高达30^[16],因而造成的污染贡献比其他重金属大,随着道路使用年限增加势必对当地生态平衡产生影响。重金属积累造成土壤的胶质结构改变,营养流失对当地草场的产草量及品质都造成极大的不良影响。为综合全面评价交通量对道路两侧土壤-植物系统的影响,草场植物对重金属元素的吸收与富集能力、土壤重金属含量和理化性质之间的相互关系等问题都有待进一步深入研究和讨论。

致谢 感谢南京大学孙书存教授和吴新卫博士对本文撰写提出了重要的修改意见。

参考文献 [References]

1 Chen X, Xia X, Zhao Y, Zhang P. Heavy metal concentrations in roadside soils and correlation with urban traffic in Beijing, China [J]. *J Hazard Mater*, 2010, **181**: 640-646

2 Khan AB, Kathi S. Evaluation of heavy metal and total petroleum hydrocarbon contamination of roadside surface soil [J]. *Int J Environ Sci Technol*, 2014, **11**: 2259-2270

3 Wang GX, Yan XD, Zhang F, Zeng C, Gao D. Traffic-related trace element accumulation in roadside soils and wild grasses in the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Int J Environ Res Public Health*, 2014, **11**: 456-472

4 Xia XH, Chen X, Liu RM, Liu H. Heavy metals in urban soils with various types of land use in Beijing, China [J]. *J Hazard Mater*, 2011, **186**: 2043-2050

5 郭广慧, 陈同斌, 宋波, 杨军, 黄泽春, 雷梅, 陈玉成. 中国公路交通的重金属排放及其对土地污染的初步估算[J]. 地理研究, 2007, **26** (5): 922-930 [Guo GH, Chen TB, Song B, Yang J, Huang ZC, Lei M, Chen YC. Emissions of heavy metals from road traffic and effect of emitted lead on land contamination in China: a primary study [J]. *Geogr Res*,

- 2007, **26** (5): 922-930]
- 6 陆东晖. 南京市公路旁土壤-植物系统重金属污染研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006 [Lu DH. Study on heavy metals pollution of the roadside plant-soil system in Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006]
- 7 杨爽. 阿坝州雪山草地红色旅游产品深度开发研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007 [Yang S. The deep exploitation of the Red Tourism product in the snow-capped mountain and meadow of Aba autonomous region [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007]
- 8 屈洪斌. 20世纪甘阿地区交通演替与社会经济发展[D]. 成都: 四川大学, 2006 [Qu HB. Traffic transformation and social economic development in Ganzi and Aba prefectures in the 20th century [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006]
- 9 中国环境监测总站. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 81-126 [China National Environmental Monitoring Centre. The modern analysis method of soil elements [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992: 81-126]
- 10 国家环境保护局南京环境科学研究所. GB 15618-1995. 土壤环境质量标准[S] [State Environmental Protection Agency of Nanjing Institute of Environmental Science. GB 15618-1995. Environmental quality standard for soils [S]]
- 11 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990 [China National Environmental Monitoring Centre. China's Soil Element Background Values [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990]
- 12 徐铭焰, 林涛, 余爱华, 周舒宇, 佟蕾. 南京市不同功能区路域表土重金属污染评价及相关惯性分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, **38** (6): 65-71 [Xu MH, Lin T, Yu AH, Zhou SY, Tong L. Assessment and correlation on heavy metals contamination in urban road topsoils of different city zones in Nanjing [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2014, **38** (6): 65-71]
- 13 程芳, 程金平, 桑恒春, 于金莲, 席磊, 皮帅帅. 大金山岛土壤重金属污染评价及相关性分析[J]. 环境科学, 2013, **34** (3): 1062-1066 [Cheng F, Cheng JP, Sang HC, Yu JL, Xi L, Pi SS. Assessment and correlation analysis of heavy metals pollution in soil of Dajinshan island [J]. *Environ Sci*, 2013, **34** (3): 1062-1066]
- 14 Lars H. An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approach [J]. *Water Res*, 1980, **14** (8): 975-1001
- 15 Banerjee ADK. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dust of Delh, India [J]. *Environ Pollut*, 2003, **123** (1): 95-105
- 16 徐争启, 倪师军, 虞先国, 张成江. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, **31** (2): 112-115 [Xu ZQ, Ni SJ, Tuo XG, Zhang CJ. Calculation of heavy metals toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index [J]. *Environ Sci Technol*, 2008, **31** (2): 112-115]
- 17 Zhang C, Yang Y, Li W, Zhang C, Zhang R, Mei Y, Liao X, Liu Y. Spatial distribution and ecological risk assessment of trace metals in urban soils in Wuhan, central China [J]. *Environ Monit Assess*, 2015, **187**: 556
- 18 Dao L, Morrison L, Zhang C. Spatial variation of urban soil geochemistry in a roadside sports ground in Galway, Ireland [J]. *Sci Total Environ*, 2010, **408**: 1076-1084
- 19 Kadi MW. "Soil Pollution Hazardous to Environment": a case study on the chemical composition and correlation to automobile traffic of the roadside soil of Jeddah city, Saudi Arabia [J]. *J Hazard Mater*, 2009, **168**: 1280-1283
- 20 Olajire AA, Ayodele ET. Contamination of roadside soil and grass with heavy metals [J]. *Environ Int*, 1997, **23**: 91-101
- 21 Nabulo G, Oryem-Origa H, Diamond M. Assessment of lead, cadmium, and zinc contamination of roadside soils, surface films, and vegetables in Kampala City, Uganda [J]. *Environ Res*, 2006, **101**: 42-52
- 22 Swaileh KM, Hussein RM, 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**: 23-30
- 23 China National Environmental Monitoring Center. The Backgrounds of Soil Environment in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990
- 24 Hjortenkrans D, Bergbäck B, Häggerud A. New metal emission patterns in road traffic environments [J]. *Environ Monit Assess*, 2006, **117**: 85-98
- 25 Hewitt CN, Rashed MB. An integrated budget for selected pollutants for a major rural highway [J]. *Sci Total Environ*, 1990, **93**: 375-384
- 26 Li X, Poon C, Liu PS. Heavy metal contamination of urban soils and street dusts in Hong Kong [J]. *Appl Geochem*, 2001, **16**: 1361-1368
- 27 Malinowska E, Jankowski K, Wisniewska-Kadzaj B, Sosnowski J, Kolczarek R, Jankowska J, Ciepiela GA. Content of zinc and copper in selected plants growing along a motorway [J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2015, **95**: 638-643