



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

西藏一江两河流域中部地区土壤重金属生态风险评价

王伟鹏, 卢宏伟, 冯三三

引用本文:

王伟鹏, 卢宏伟, 冯三三. 西藏一江两河流域中部地区土壤重金属生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 970-980.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0421>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价

周勤利, 王学东, 李志涛, 王夏晖, 何俊, 季国华

农业资源与环境学报. 2019, 36(4): 513-521 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0191>

云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评价

刘小燕, 陈棉彪, 李良忠, 胡国成, 黄建洪, 刘珊, 张丽娟, 于云江

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 221-229 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0306>

安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价

江宏, 马友华, 尹国庆, 王强, 聂静茹, 马铁铮, 胡宏祥

农业资源与环境学报. 2017, 34(4): 352-359 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0302>

安徽省某市农田土壤与农产品重金属污染评价

岳蛟, 叶明亮, 杨梦丽, 崔俊义, 马友华

农业资源与环境学报. 2019, 36(1): 53-61 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0336>

湘江株洲-湘潭-长沙段河床沉积物重金属污染特征及生态风险评价

张坤, 杨霞, 吴雅霁, 吴蓓娟, 匡晓亮

农业资源与环境学报. 2015(1): 62-67 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0230>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王伟鹏, 卢宏伟, 冯三三. 西藏一江两河流域中部地区土壤重金属生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 970–980.

WANG Wei-peng, LU Hong-wei, FENG San-san. Ecological risk assessment of soil heavy metals in the middle of the “One River and Two Tributaries” basin in Tibet[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6): 970–980.



开放科学 OSID

西藏一江两河流域中部地区土壤重金属生态风险评价

王伟鹏^{1,2}, 卢宏伟^{2*}, 冯三三¹

(1. 华北电力大学可再生能源学院, 北京 102206; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京 100101)

摘要: 为了深入研究西藏一江两河流域中部地区土壤重金属的污染特征, 以该地区农田土壤为研究重点, 对41个点的四层土壤 S1(0~10 cm)、S2(10~20 cm)、S3(20~30 cm) 和 S4(30~40 cm) 进行采样, 分析测定了 Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Zn、Ni 和 Mn 8 种重金属含量。运用多元统计法分析重金属来源, 并采用地积累指数、富集因子及潜在生态风险指数等方法对土壤重金属进行生态风险评价。结果表明: 研究区各土层中 S1 土层的 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 和 Mn 含量较高, 均值分别为 0.21、82.95、34.67、35.81、75.31、49.99 mg·kg⁻¹ 和 697.39 mg·kg⁻¹, 但四层土壤各元素平均含量均低于国家农用地土壤污染风险筛选值。土壤重金属含量随土层加深而降低, S4 土层含量最低, 整体呈低水平分布。来源分析表明: 浅层(S1、S2、S3) 土壤中 Cd、Cu、Pb 主要受人为活动影响, Cr、Ni、Zn、Mn 主要受自然源控制; S4 土层受人为影响较小, 重金属元素主要是自然来源。生态风险分析表明: S1 土层中 Cd 的地积累指数、富集因子与单项生态风险参数相较于其他元素均处于较高水平, 均值分别为 0.790、1.973 和 77.782, 有较明显的污染且属中度生态风险水平, 其他土层的各元素参数均低于 S1, 呈轻微污染或无污染且属轻微生态风险水平。4 个土层综合潜在生态风险指数均值最大为 103.959, 土壤整体处于轻微生态风险水平。研究表明, 研究区土壤环境质量整体较好, Cd 与 Pb 累积较重, 值得关注。

关键词: 土壤; 重金属; 来源分析; 生态风险评价; 一江两河

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)06-0970-11

doi: 10.13254/j.jare.2019.0421

Ecological risk assessment of soil heavy metals in the middle of the “One River and Two Tributaries” basin in Tibet

WANG Wei-peng^{1,2}, LU Hong-wei^{2*}, FENG San-san¹

(1. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Related Surface Process, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: This study focused on the characteristics of soil heavy metal pollution in the middle area of the “One River and Two Tributaries” basin in Tibet. Four layers of soil, namely S1(0~10 cm), S2(10~20 cm), S3(20~30 cm), and S4(30~40 cm), at 41 points in the farmland soil were sampled; then, the concentrations of Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn, Ni, and Mn were determined. The sources of heavy metals were analyzed using the multivariate statistical method, and the soil heavy metal ecological risk was evaluated based on the geo-accumulation index, enrichment factor, and potential ecological risk index. The results showed that the concentrations of Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Ni, and Mn in soil layer S1 were higher, with mean values of 0.21, 82.95, 34.67, 35.81, 75.31, 49.99 mg·kg⁻¹, and 697.39 mg·kg⁻¹, respectively. The average concentration of each element in all four layers was lower than the risk screening values of soil contamination in farmland. The concentration of soil heavy metals decreased as the soil layer increased. Thus, the lowest concentration was observed in layer S4. Source analysis showed that Cd, Cu, and Pb in the surface (S1, S2, and S3) soil were mainly affected by human activities, while Cr, Ni, Zn, and Mn were mainly controlled by natural sources. Layer S4 was less affected by human activities, and the sources of its heavy metal elements

收稿日期: 2019-08-19 录用日期: 2019-10-24

作者简介: 王伟鹏(1994—), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 从事水文水资源、流域水土保持研究。E-mail: wangwp501@126.com

*通信作者: 卢宏伟 E-mail: luhw@igsnrr.ac.cn

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20040301)

Project supported: Strategic Leading Science and Technology Project of the Chinese Academy of Sciences, China(XDA20040301)

were mainly natural. The ecological risk analysis showed that the geo-accumulation index, enrichment factor, and single ecological risk parameter of Cd in soil layer S1 were higher than those of the other elements with mean values of 0.790, 1.973, and 77.782, respectively. This indicated that layer S1 had significant contamination and a moderate ecological risk level. All the parameters of each element in the other soil layers were lower than those in layer S1, thereby implying that slight contamination and lower ecological risk. The average value of the comprehensive potential ecological risk index of the four soil layers was 103.959, thereby indicating that the soil in the study area was characterized by slight ecological risk. Generally, the quality of the soil in the study area was good, but the concentrations of Cd and Pb showed serious accumulation.

Keywords: soil; heavy metals; sources analysis; ecological risk assessment; “One River and Two Tributaries” basin

土壤是人类生存发展必不可少的物质基础,是农产品赖以生长的重要载体^[1],土壤作为环境系统中最活跃的组成部分和枢纽,影响着整个生态系统的物质循环和能量流动。近年来,随着我国工业化飞快发展以及各种肥料、农药的不合理施用,我国土壤已受到Cd、Hg、Cr、As、Zn、Pb、Ni、Cu等重金属的污染^[2-3]。重金属在土壤中具有稳定、滞留时间长等特点,且很难被植物吸收或微生物降解^[4-5],能够通过食物链危害人体健康,其生态风险不可小觑^[6]。

青藏高原作为世界平均海拔最高的高原区,具有众多独特的环境特征,例如土壤发育年轻、地势起伏、海拔高、生态脆弱等。作为世界的“第三极”,青藏高原是受人类活动影响最小的地区之一^[7]。然而,随着社会经济发展、人类活动及气候变化等,青藏高原的生态环境逐渐受到影响。王冠星等^[8]研究表明青藏线109国道公路交通导致道路两侧土壤Cu、Zn、Pb、Cd污染。孙曦等^[9]分析发现林芝谷地农业生产活动造成了表层土壤Cu、Zn、Cd的富集。一江两河流域中部地区位于青藏高原中南部的藏南谷地,是西藏重要的农牧区,耕地集中。作为农业相对发达的两个最主要的地区之一(另一个是林芝地区),该地区受到人类活动和气候变化影响较复杂,同时,该地区是西藏自然环境系统中的重要脉络和核心纽带,也是西藏生态环境最为脆弱的地区之一,因而具有独特的研究价值。目前,对重金属的研究主要集中在工矿区和经济发展快速的发达地区^[10-12],而对一江两河流域中部土壤重金属污染及生态风险评价的研究还较少,且只集中于一个城市区域,未对大面积区域土壤重金属进行研究。

一江两河流域中部地区是青藏高原主要的经济发展集中地,其农业资源开发和经济建设发展较快,因而该地生态环境所受到的影响也较为明显,深入研究这一区域不同深度下土壤重金属含量的污染特征,并对其进行生态风险评价,能够为该地区生态环境保

护和农业生产提供科学指导和量化评价^[13]。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析方法

1.1.1 样品采集

西藏一江两河流域中部地区位于青藏高原中南部的藏南谷地(28°18′~30°34′ N, 87°21′~92°10′ E),东部约至山南市桑日县,西到日喀则市拉孜县,主要包括雅鲁藏布江、拉萨河及年楚河等流域地区,其河谷地区属高原温带季风半干旱气候^[14],年均降水量在200~500 mm之间,年均温为5~10℃,年均相对湿度为40%~50%^[15]。一江两河流域中部地区的河谷底部海拔在3 500~4 400 m之间,土壤多以砾质的沙壤土或轻壤土为主,有机质含量低,多有石灰反应,呈中性至碱性^[16]。

以研究区内的乡镇和村庄中的草地、农田、大棚等作为采样重点,于2018年9月9日—2018年9月19日采集土壤,样品采用“梅花型”取样,采样点垂直方向以10 cm为一层,利用取土钻取S1(0~10 cm)、S2(10~20 cm)、S3(20~30 cm)、S4(30~40 cm)四层土壤样品,所有样点采用GPS定地理坐标。各个取样点土壤均匀混合后,采用四分法取土约1 kg左右混合,将土样密封于聚乙烯塑料袋中保存,带回实验室待用。采样点具体分布见图1。

1.1.2 样品处理测定

将袋中保存的土壤样品中的小石块和植物根系去除,在实验室阴凉处将土壤样品自然风干后,放入研磨钵中混合均匀后用木棒研磨,再经过200目土壤筛后,保存待测。

土壤Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni和Mn分析:测定前利用HCl-HNO₃-HF消解法进行微波消解后,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,安捷伦7500)对其含量进行测定;重金属Hg经王水水浴消解,采用AFS-920原子荧光光度计对其含量进行测定^[17]。重金属

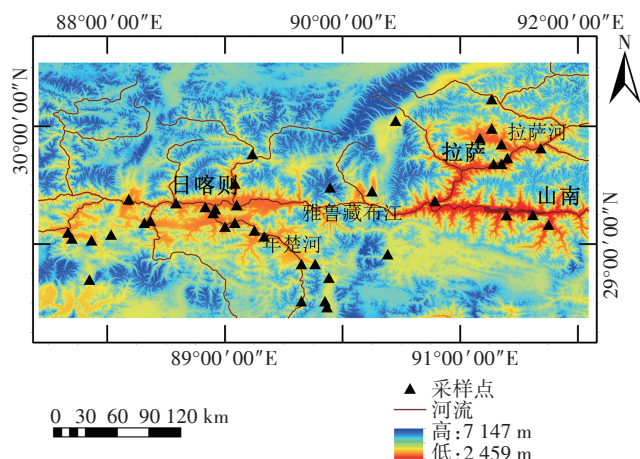


图1 研究区域采样点分布

Figure 1 Distribution of sampling points in the study area

Hg在测定时出现失误导致汞数据出现错误,因而本文重金属分析中未加入Hg元素。测定样品重金属的土壤样选择国家标准土壤样品(GBW07408)进行参比。

1.1.3 数据处理分析

利用SPSS 19对数据进行Pearson相关性分析、主成分分析等处理;利用Origin 2016对数据的相应图表进行绘制;利用ArcGIS 10.2对分析数据进行空间表征。

1.2 重金属来源分析

研究重金属来源是分析土壤重金属污染的必要环节,本研究通过多元统计分析方法^[18](主要包含相关性分析和主成分分析),来分析识别研究区土壤重金属的来源。其中相关性分析主要选择的是Pearson相关系数,可以通过重金属元素间的相关系数判断多种重金属元素是否具有相似的来源。

1.3 生态风险评价方法

1.3.1 地积累指数法(I_{geo})

地积累指数是1969年德国学者Muller提出,广泛用于研究土壤及沉积物中重金属污染程度的定量指标。它不仅包括了沉积成岩作用等自然地质运动过程造成的对背景值的影响,而且充分考虑了人为活动对重金属污染的影响^[19-20]。计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right) \quad (1)$$

式中: C_n 为目标重金属在土壤中的含量; B_n 为西藏当地该重金属的土壤含量背景值。1.5是考虑各地岩石差异可能会导致背景值的变动而采用的系数^[21]。

1.3.2 富集因子(EF)

富集因子(EF)是评价土壤中重金属富集程度

受人类活动影响的参数^[22],为确保各指标间的可比性与等效性不受取样和处理等人为活动的影响,本研究选取性质比较稳定且地壳中含量丰富的Al元素作为参比元素,对样品重金属进行归一化处理。计算公式如下:

$$EF = \frac{(C_i/C_n)_{sample}}{(C_i/C_n)_{background}} \quad (2)$$

式中:EF为元素的富集因子; C_i 是目标元素的含量; C_n 是参比元素的含量;下标sample和background分别表示目标样与参比样。

1.3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法是1980年瑞典学者Hakanson提出的一套基于沉积学原理评价重金属污染与生态危害的方法^[23-24]。计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_s^i}{C_n^i} \quad (3)$$

式中:RI为n种重金属的综合生态风险指数; E_r^i 为单一金属的生态风险指数; T_r^i 为单个污染物的毒性响应参数,Mn=Zn=1,Cr=2,Pb=Cu=Ni=5,As=10,Cd=30,Hg=40; C_r^i 是第i种重金属的污染系数; C_s^i 为土壤中第i种重金属的实测含量; C_n^i 为计算所需的参考背景值。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量分布

对研究区41个采样点的四层土壤重金属含量进行统计(表1),结果表明:在S1土壤层中,Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni、Mn的平均含量分别为0.21、82.95、34.67、35.81、75.31、49.99 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和697.39 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均高于西藏土壤背景值,因而重点选择S1层做插值图,来反映各重金属的空间分布(图2);S2土壤层中Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni、Mn的平均含量分别为0.15、73.86、28.67、34.49、70.81、39.31 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和667.69 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中Cd、Cu、Pb、Ni、Mn高于西藏土壤背景值^[25];S3、S4土壤层中各重金属平均含量低,除S3土壤层中Cd和Cu略高于西藏土壤背景值,其余元素均低于背景值,且4个土壤层重金属的平均含量全部低于农用地土壤污染风险筛选值。

重金属含量变异系数越大,其差异与离散程度越大,分布越不均匀;相反,则其差异与离散程度越小,分布越均匀。统计显示,S1、S2土壤层中Cu、Pb,S3土壤层的Cu、Pb、Zn,S4土壤层的Cr、Cu、Pb、Zn的变异系数为0.50~0.67,属中等变异系数,表明这几种重

表1 研究区土壤重金属统计分析
Table 1 Statistical analysis of soil heavy metals in the study area

土层 Soil layer	项目 Item	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni	Mn
S1	范围/(mg·kg ⁻¹)	0.04~0.85	32.21~144.20	14.61~86.00	13.85~97.96	20.58~210.70	17.36~88.33	154.68~1 197.00
	均值±标准差/(mg·kg ⁻¹)	0.21±0.18	82.95±23.38	34.67±18.35	35.81±21.43	75.31±28.11	49.99±14.07	697.39±254.48
	变异系数	0.85	0.28	0.53	0.60	0.37	0.28	0.36
S2	范围/(mg·kg ⁻¹)	0.01~0.90	18.64~119.45	9.31~64.70	11.10~84.79	21.79~253.75	16.30~83.74	123.07~1 079.32
	均值±标准差/(mg·kg ⁻¹)	0.15±0.18	73.86±22.71	28.67±14.38	34.49±18.83	70.81±33.23	39.31±12.58	667.69±245.67
	变异系数	1.17	0.31	0.50	0.55	0.47	0.32	0.37
S3	范围/(mg·kg ⁻¹)	0~0.90	29.88~114.25	6.68~52.65	10.06~62.35	10.32~155.90	13.20~49.22	110.28~764.12
	均值±标准差/(mg·kg ⁻¹)	0.13±0.20	58.48±21.69	23.23±12.66	26.11±13.42	49.89±29.38	28.37±8.74	477.03±177.66
	变异系数	1.60	0.37	0.54	0.51	0.59	0.31	0.37
S4	范围/(mg·kg ⁻¹)	0~0.75	18.64~102.00	7.17~56.50	9.90~60.95	12.30~106.85	11.47~39.10	123.07~555.58
	均值±标准差/(mg·kg ⁻¹)	0.07±0.15	32.05±16.63	14.74±9.86	18.14±10.68	28.01±18.48	19.09±5.51	292.71±104.15
	变异系数	2.22	0.52	0.67	0.59	0.66	0.29	0.36
西藏土壤背景值/(mg·kg ⁻¹)		0.08	77.40	21.90	28.90	73.70	32.10	626.00
农用地风险筛选值/(mg·kg ⁻¹)		0.30	150.00	50.00	70.00	200.00	60.00	—

注:国家标准中未规定 Mn 元素的筛选值。
Note: The risk screening value of Mn is not regulated in the national standard.

金属在相应土层具有一定的离散程度,其含量变化受成土母质和人为的双重影响;Cd在四层土壤层的变异系数分别为0.85、1.17、1.60和2.22,表明Cd在研究区的不同点的污染有很大差异,且受人为影响明显。

分析结果表明:S1土壤层的重金属含量最高,富集最为明显,随着土层的加深,土壤中重金属元素含量逐渐减少,S4土壤层含量基本低于或稳定在土壤背景值。卢瑛等^[26]研究也表明:重金属元素在土壤剖面中的分布以表层含量较高,尤以0~10 cm的表层为最高,并逐层向下递减。同时,表层土壤(S1、S2)的Cd、Cu与Pb受人为因素影响较为明显,其他元素可能主要受土壤母质和超基性岩发育影响。

2.2 土壤重金属来源

2.2.1 相关性分析

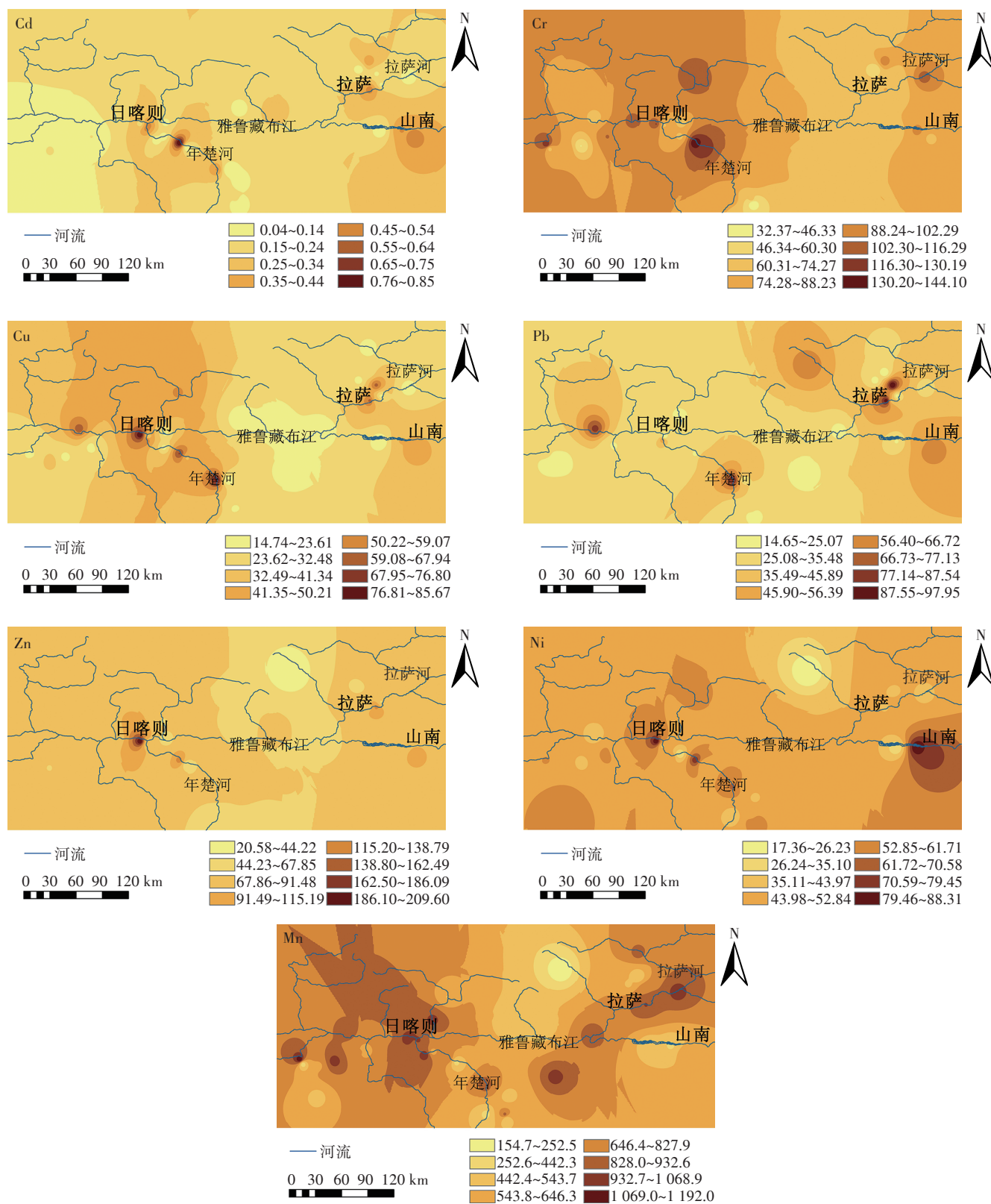
对研究区四层土壤层重金属含量之间的Pearson相关分析结果(表2)表明:S1土壤层中重金属Cd与Cu、Ni之间存在极显著正相关($P<0.01$),推断三者可能同源。Cu与Pb、Zn、Ni,Ni与Zn之间存在极显著正相关($P<0.01$),说明几种元素有同源可能性。Zn与Ni之间存在极显著正相关($P<0.01$),说明二者来源可能相同。由于多种元素间相关系数为0.335~0.597,说明各元素存在复合污染或者发生协同作用,可能受到自然与人为双重影响。S2、S3土壤层中重金属Cd与Cu、Zn两两之间存在极显著正相关($P<0.01$)且相关系数较大,说明三者极有可能同源。Cu与Pb、Zn

之间存在极显著正相关($P<0.01$),说明Cu与Pb、Cu与Zn之间存在一定的相互关联,同时S3土壤层Cr与Cu、Zn两两之间极显著正相关($P<0.01$),表明Cr与Cu、Zn有极大同源可能性且与其他重金属来源不同。S4土壤层中,重金属Cd与Cr、Cu、Zn、Pb之间存在极显著正相关($P<0.01$)且相关系数均大于0.87,推断极有可能同源。综合推断,表层土壤受人为和自然双重影响,各重金属元素之间来源复杂,其中Cd、Cu、Pb、Zn等极大可能有相同的来源。农田长期施用农药、化肥和使用地膜等易导致土壤Cd、Cu、Pb、Zn积累^[27~28]。本研究中S2、S3、S4土壤层中Ni和Mn与其他元素均不存在显著相关性,且两者之间相关性也不显著,说明两者存在单独的来源。

2.2.2 主成分分析

为探究土壤重金属的来源成因,基于相关性矩阵进行判断^[29]。通过之前相关性分析可知,大部分重金属之间具有显著的相关性,且4个土壤层中Bartlett球形度检验均为 $P<0.05$,KMO检验统计值均大于0.5,说明数据适合作主成分分析。本研究通过Varimax旋转法对四层土壤层重金属含量进行主成分分析,前三层土壤提取3个主成分,S4土壤层提取2个主成分,得到成分矩阵(表3)。

S1土壤层中,第一主成分F1的贡献率为33.263%,Cr、Zn、Ni、Cu和Cd的荷载因子较高,其中以Cr、Zn和Ni为主导,主要反映了3种元素的富集状

图2 研究区S1土层各重金属含量空间分布($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Figure 2 Spatial distribution of heavy metal contents in soil layer S1 in the study area($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

况。有研究表明,超基性岩发育的土壤一般情况下会富集Ni与Cr^[30],这可能是因为亚欧和印度洋板块的

碰撞造成了青藏高原的隆起和抬升,地层推覆形成逆断层致其超基性岩在青藏高原大面积分布和发

表2 四个土层重金属含量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of heavy metal contents in four soil layers

土层 Soils layer	重金属 Heavy metals	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Ni	Mn
S1	Cd	1						
	Cr	0.271	1					
	Cu	0.527**	0.381*	1				
	Pb	0.258	-0.049	0.585**	1			
	Zn	0.374*	0.335*	0.585**	0.033	1		
	Ni	0.456**	0.384*	0.407**	-0.093	0.597**	1	
	Mn	0.124	0.125	0.209	0.030	0.342*	0.151	1
S2	Cd	1						
	Cr	0.175	1					
	Cu	0.638**	0.323*	1				
	Pb	0.277	0.087	0.473**	1			
	Zn	0.799**	0.323*	0.550**	0.258	1		
	Ni	0.237	0.203	0.387*	-0.061	0.183	1	
	Mn	0.269	0.246	0.320*	0.088	0.295	0.206	1
S3	Cd	1						
	Cr	0.493**	1					
	Cu	0.727**	0.658**	1				
	Pb	0.400*	0.079	0.564**	1			
	Zn	0.769**	0.629**	0.807**	0.345	1		
	Ni	0.160	0.431*	0.243	-0.201	0.279	1	
	Mn	0.261	0.374*	0.321	0.082	0.450*	0.321	1
S4	Cd	1						
	Cr	0.898**	1					
	Cu	0.884**	0.824**	1				
	Pb	0.876**	0.783**	0.812**	1			
	Zn	0.904**	0.869**	0.867**	0.801**	1		
	Ni	-0.096	-0.157	-0.248	-0.309	-0.127	1	
	Mn	0.311	0.376	0.288	0.251	0.477*	-0.158	1

注:**表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关,*表示在 $P<0.05$ 水平显著相关。Note:**indicates extremely significant correlation at $P<0.01$ level, *indicates significant correlation at $P<0.05$ level.

表3 研究区土壤重金属含量成分矩阵

Table 3 Principal component analysis of heavy metal concentration in soil of the study area

重金属 Heavy metals	S1成分 S1 component			S2成分 S2 component			S3成分 S3 component			S4成分 S4 component	
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2
Cd	0.484	0.684	-0.022	0.916	0.049	0.054	0.866	-0.026	0.067	0.957	0.190
Cr	0.701	0.003	-0.012	0.089	0.855	-0.015	0.495	0.689	0.158	0.928	0.105
Cu	0.503	0.760	0.188	0.789	0.331	-0.046	0.931	-0.021	0.153	0.927	0.027
Pb	-0.173	0.940	0	0.465	0.122	-0.714	0.557	-0.682	0.108	0.903	-0.046
Zn	0.698	0.172	0.443	0.828	0.201	0.002	0.862	0.107	0.285	0.951	0.107
Ni	0.850	-0.004	0.105	0.351	0.234	0.728	0.224	0.795	0.216	-0.259	0.930
Mn	0.066	0.039	0.959	0.219	0.656	0.111	0.195	0.139	0.965	0.451	-0.275
初始特征值	2.328	1.728	1.164	2.542	1.383	1.057	3.241	1.368	1.123	4.625	1.003
方差贡献率/%	33.263	24.683	16.632	36.321	19.762	15.104	46.297	19.546	16.048	66.078	14.324
累积方差贡献率/%	33.263	57.945	74.577	36.321	56.082	71.187	46.297	65.843	81.891	66.078	80.402

育^[31-32]。同时,基岩风化易导致Zn富集,Šajin等^[33]发现Zn元素受到岩石地质背景的控制。对比重金属含量的相关系数矩阵,Cu和Cd可能是由研究区富含铜岩石衍生而来^[34]。因而,F1视为自然源因子。主成分F2贡献率为24.683%,主要反映Cd、Cu和Pb的富集状况。本研究中农田是采样重点区域,3种重金属的富集最可能是由于农田长期施用农药、化肥,使用地膜与大棚,以及周围工业与交通产生的粉尘通过迁移和大气沉降进入土壤。研究表明,长期施用Cd、Cu化肥农药,农田土壤金属元素易富集^[27],同时地膜大棚中加入Pb、Cd作为稳定剂^[28]导致其含量增加都可以很好解释F2。因而,F2视为人为因子。主成分F3中Mn与Zn的因子值为0.959和0.443,所以Mn是主控变量。基于稳定的物化性质,通常将Mn作为土壤自然源的标识性元素(Mn、Al和Fe是在地壳中含量丰富的常量元素,主要受到土壤地质的影响),Šajin等^[33]发现Mn元素受到地质背景的控制。因而,F3视为土壤母质因子。

S2与S3土壤层中,主成分F1的贡献率分别为36.321%和46.297%,远高于F2、F3,说明F1对重金属来源具有决定作用。F1中的Cd、Cu、Pb、Zn在S2、S3土壤层中荷载因子较大,通过上述分析,S2、S3中Cd、Cu、Pb、Zn主要是由农业施用化肥、农药和使用地膜、大棚以及工业与交通等产生的粉尘经过迁移和大气沉降进入土壤S1中累积并向S2、S3迁移。研究区土壤中的黏粒与粉粒含量较低,砂粒含量高,重金属元素容易迁移。胡省英等^[35]指出重金属元素的富集或贫化与成土母质、土壤环境等因素密切相关。而重金属向下垂直迁移至深层土壤能力逐渐减弱,S2的主成分F2中Cr和Mn、主成分F3中Ni,S3的主成分F2中Cr和Ni、F3中Mn的荷载因子较高,主要是受超基性岩发育和土壤母质因素等控制,可视为自然源因子。

S4土壤层中,主成分F1的贡献率为66.078%,其中Cd、Cr、Cu、Pb、Zn和Mn的荷载因子较高,由于表层重金属向下迁移逐渐减弱,到S4土壤层几乎不受迁移影响,所以土层元素主要受土壤母质控制,而主成分F2中Ni基本受超基性岩发育控制。

2.3 土壤重金属生态风险评价

2.3.1 地积累指数

地积累指数的计算结果(图3)表明,研究区4个土壤层重金属整体上污染水平等级在0~2之间,绝大多数无污染,少部分轻微到中度污染。其中S1土壤层中Cd、Cu和Ni的 I_{geo} 均值在0~1之间,分别为

0.790、0.078和0.054,说明S1土壤层存在Cd、Cu和Ni的轻微污染;S2、S3土壤层中只有Cd的 I_{geo} 均值在0~1之间,其余重金属 I_{geo} 均值均小于0,说明重金属Cd从表层土壤迁移至S2、S3土壤层,导致土壤轻微污染;S4土壤层中所有元素的 I_{geo} 均值全部低于0,说明S4层土壤不受污染影响。通过之前多元统计分析,研究区Cd和Cu主要来源于人为因素。

2.3.2 富集因子

由于Al具有稳定的化学性质,且在地壳中的含量丰富,具有代表性,因此本研究选用Al作为参比元素计算各重金属元素富集因子。由图4可知,在研究区的四个土壤层中,重金属元素的富集(扰动)水平小于5,说明土壤重金属呈轻微到中度富集程度。S1、S2土壤层中只有重金属Cd、Cu、Pb和Ni的富集因子均值在1~2之间,说明这几种元素在土壤中轻微富集,其他元素无富集;S3土壤层中只有Cd的富集因子均值大于1,为1.089,属于轻微扰动,其他元素无富集;S4土壤层所有金属元素均无富集。七种重金属的富集因子均值由高到低,依次为Cd>Cu≈Ni>Pb>Mn≈Cr>Zn。其中Cd在每层土壤中的富集程度相较于其他元素偏高,说明土壤中Cd元素来源受到人为影响的可能性最大,存在的污染风险程度也最大。

2.3.3 潜在生态风险指数

潜在生态风险指数可以反映区域单要素之外的整体土壤生态环境状况,其计算过程同时权衡了不同且相互独立的单一重金属元素,克服了单要素评价结果的局限性^[36-37]。本研究以西藏土壤背景值为参比值,计算得到单项生态风险参数和综合生态风险指数。结果(图5)表明,S1、S2土壤层中Cd单项潜在生态风险系数 E_i^r 总体平均值分别为77.782和56.620,在40~80之间,呈中度生态风险水平,其余重金属的 E_i^r 均值均小于40,属于轻微生态风险水平;S3、S4土壤层的七种重金属元素单项潜在生态风险系数 E_i^r 均值全部小于40,属于轻微生态风险水平。在四层土壤层中,综合生态风险指数RI总体平均值为37.037~103.959,低于160,因而四层土壤全部属于轻微生态风险水平。由图5可知,从空间分布上看,较高综合生态风险指数主要集中于拉萨、日喀则、山南及附近地区,这可能是由于该区域农田取样点距离城市较近,土壤重金属易受人为因素影响。结合上述地积累指数和富集因子分析可知,Cd在S1和S2土壤层中存在的潜在生态风险指数最高,伴随着重金属Cd向下迁移能力减弱,S3与S4土壤层Cd污染减小甚至消

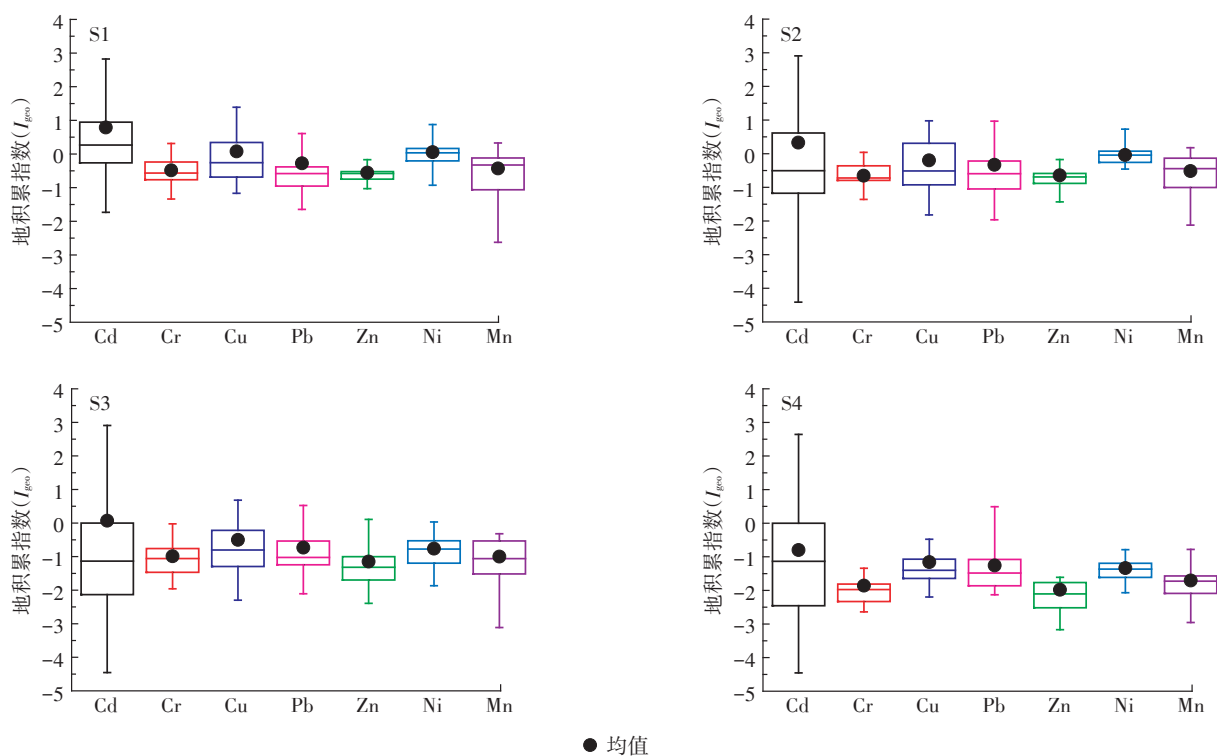


图3 研究区各土层重金属地积累指数分布

Figure 3 Distribution of heavy metal geoaccumulation index in the four soil layers

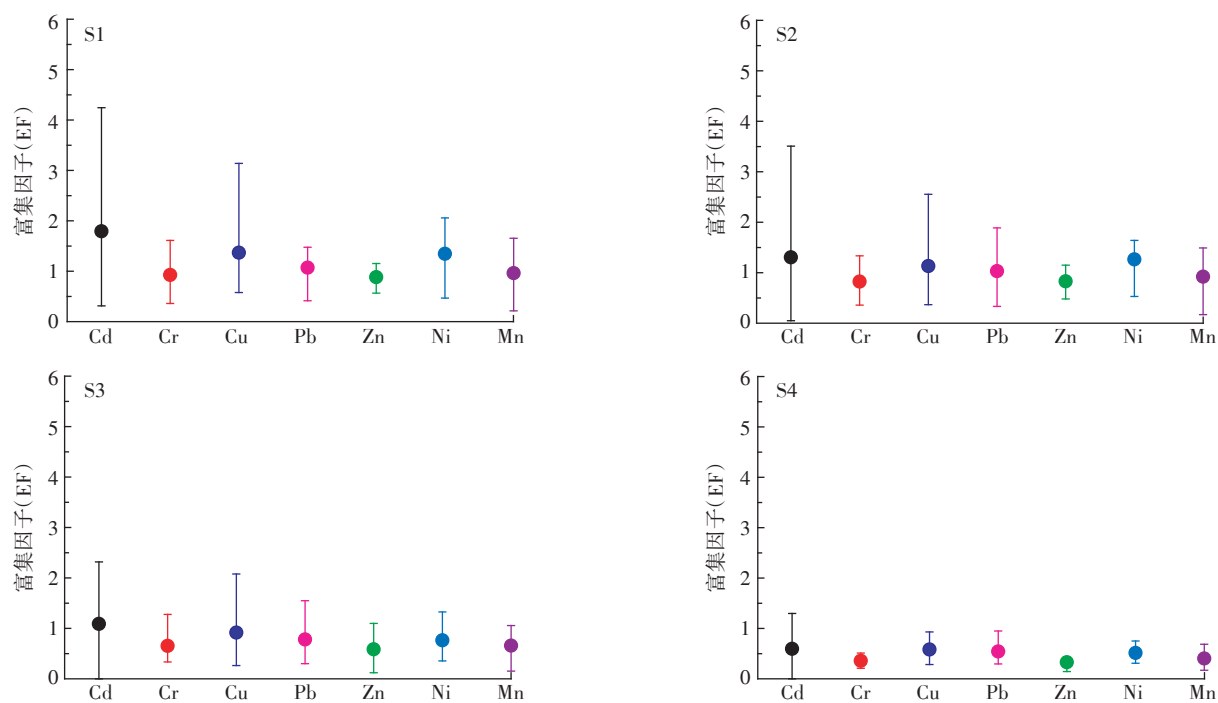


图4 研究区各土层重金属富集因子分布

Figure 4 Distribution of heavy metal enrichment factors in the four soil layers

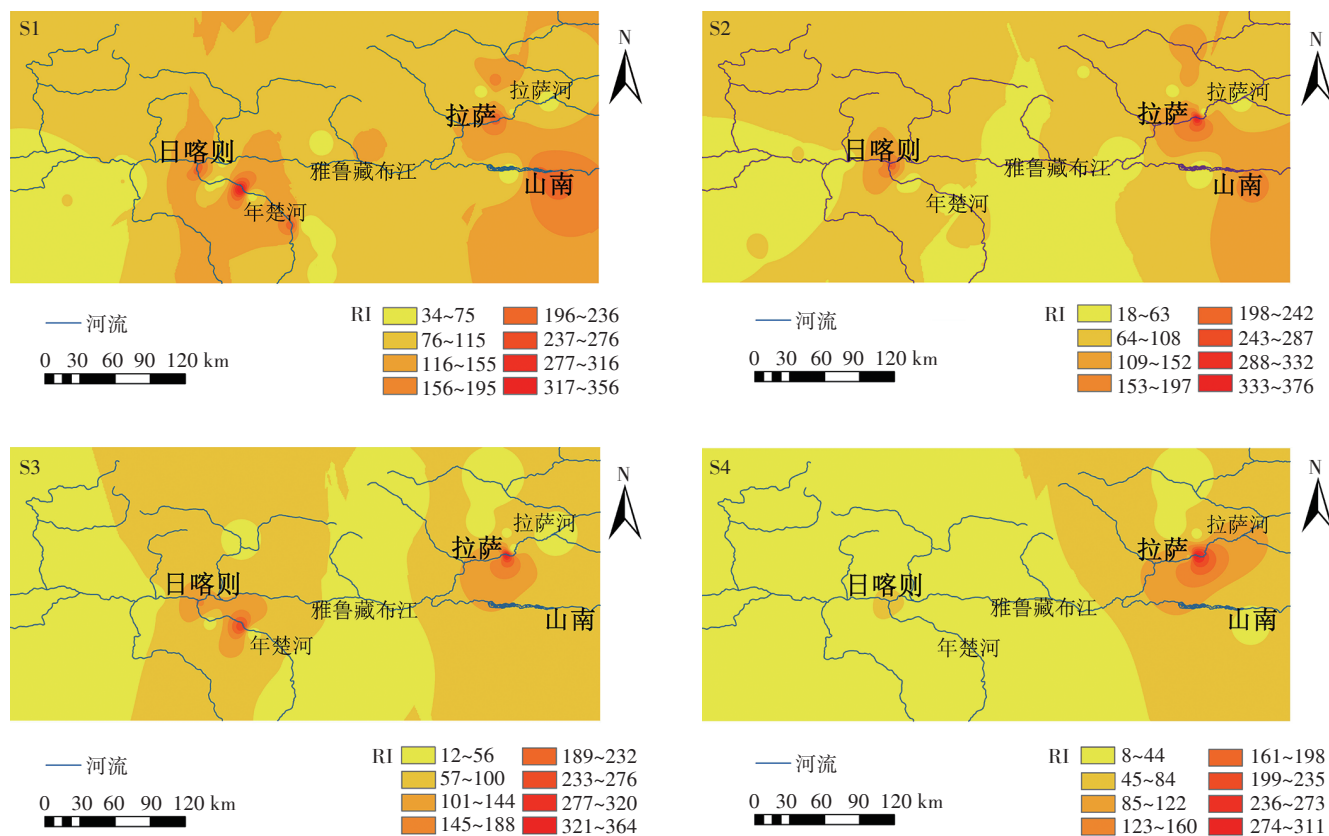


图5 研究区各土层重金属综合生态风险指数(RI)分布

Figure 5 Distribution of the comprehensive ecological risk index(RI) of heavy metals in the four soil layers

失,土层的潜在生态风险指数属于轻微水平甚至不受影响。

3 结论

(1)西藏一江两河流域中部地区土壤重金属总体呈低含量分布,整体土质较好。土壤表层(S1)的重金属含量平均值均超出西藏土壤背景值,受到扰动程度较为明显,随着土层的加深,土壤中重金属元素含量逐渐减少,高低顺序依次为S1>S2>S3>S4,S4土壤层重金属含量基本低于或稳定在土壤背景值。4个土壤层中各重金属元素的平均含量均低于国家农用地土壤污染风险筛选值。

(2)多元统计分析表明各土壤层中多种重金属元素具有同源性(Pb、Cd、Cu具有相同来源),但重金属污染来源并不完全一致。各土层中Cr、Zn、Ni主要受自然源控制且污染程度低,而Pb、Cd、Cu主要受到人为因素和自然源共同影响且污染程度相对较高。而Mn与其他元素相关性不显著,主要受土壤母质的控制。

(3)土壤重金属生态风险分析表明,Cd在S1、S2

和S3土壤层有轻微的污染与富集;Cu、Pb、Ni在S1、S2层有轻微富集,其他重金属元素在各土层中无富集与污染;Cd只在S1和S2土壤层存在中度潜在风险,其他重金属在各土层只有轻微的潜在生态风险。空间上以拉萨、日喀则、山南及附近地区的生态风险水平最为突出。研究区土壤整体潜在生态风险等级为轻微水平。

参考文献

- [1] 苟体忠, 张文华. 贵州省麻江县蓝莓基地土壤重金属污染及风险评价[J]. 地球与环境, 2019, 47(5): 680-688.
GOU Ti-zhong, ZHANG Wen-hua. Ecological risk evaluation of heavy metal contamination in blueberry planting soil of the Majiang County, Guizhou, China[J]. *Earth and Environment*, 2019, 47(5): 680-688.
- [2] 周勤利, 王学东, 李志涛, 等. 宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(4): 513-521.
ZHOU Qin-li, WANG Xue-dong, LI Zhi-tao, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal in Helan County of Ningxia, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(4): 513-521.
- [3] Fang A M, Dong J H, An Y L. Distribution characteristics and pollution assessment of soil heavy metals under different land-use types in Xu-

- zhou City, China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(7):1832.
- [4] 陈同斌, 雷梅, 杨军, 等. 关于重金属污染土壤风险控制区划的研究与建议[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3):321-326.
- CHEN Tong-bin, LEI Mei, YANG Jun, et al. Discussion on zoning of soil environmental risk control and remediation contaminated by heavy metals on regional scale[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(3):321-326.
- [5] Huang S S, Liao Q L, Hua M, et al. Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong District, Jiangsu Province, China[J]. *Chemosphere*, 2007, 67(11):2148-2155.
- [6] 刘瑞雪, 乔冬云, 王萍, 等. 湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7):1523-1530.
- LIU Rui-xue, QIAO Dong-yun, WANG Ping, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of farmland soils in Xiangtan County in Hunan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7):1523-1530.
- [7] Yan X D, Gao D, Zhang F, et al. Relationships between heavy metal concentrations in roadside topsoil and distance to road edge based on field observations in the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, 10(3):762.
- [8] 王冠星, 闫学东, 张凡, 等. 青藏高原路侧土壤重金属含量分布规律及影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2):431-438.
- WANG Guan-xing, YAN Xue-dong, ZHANG Fan, et al. Influencing factors of heavy metal concentration in roadside-soil of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(2):431-438.
- [9] 孙曦, 刘合满, 周通, 等. 林芝河谷地区典型农田土壤主要性质及重金属状况初探[J]. 土壤, 2016, 48(1):131-138.
- SUN Xi, LIU He-man, ZHOU Tong, et al. Preliminary study on soil fertility and heavy metal concentrations of croplands in Nyingchi valley of Tibet[J]. *Soils*, 2016, 48(1):131-138.
- [10] 黄小娟, 江长胜, 郝庆菊. 重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价及植物吸收特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15):4201-4211.
- HUANG Xiao-juan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju. Assessment of heavy metal pollutions in soils and bioaccumulation of heavy metals by plants in Rongxi manganese mineland of Chongqing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(15):4201-4211.
- [11] 戴彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J]. 环境科学, 2015, 36(2):507-515.
- DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong Province, eastern China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2):507-515.
- [12] 钟晓兰, 周生路, 赵其国. 长江三角洲地区土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价——以江苏太仓市为例[J]. 地理科学, 2007, 27(3):395-400.
- ZHONG Xiao-lan, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo. Spatial characteristics and potential ecological risk of soil heavy metals contamination in the Yangtze River Delta: A case study of Taicang City, Jiangsu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(3):395-400.
- [13] 高丹. 青藏高原路侧土壤及植物的重金属含量分布特征与规律研究[D]. 北京:北京交通大学, 2013.
- GAO Dan. Study on distribution patterns and of heavy metals concentrations in roadside soils and plants in Qinghai-Tibet Plateau[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [14] 杜军, 杨志刚, 马鹏飞, 等. 西藏自治区县级气候区划[M]. 北京:气象出版社, 2011:6-12.
- DU Jun, YANG Zhi-gang, MA Peng-fei, et al. County-level climate division in Tibet Autonomous Region[M]. Beijing: Meteorological Press, 2011:6-12.
- [15] 西藏自治区气象局. 西藏自治区气候图集 1971—2000 年[M]. 北京:气象出版社, 2013.
- Tibet Autonomous Region Meteorological Bureau. Climate atlas of the Tibet Autonomous Region, 1971—2000[M]. Beijing: Meteorological Press, 2013.
- [16] 中国科学院长春地理研究所. 西藏植被[M]. 北京:科学出版社, 1988:305-307.
- Changchun Institute of Geography, Chinese Academy of Sciences. Tibetan vegetation[M]. Beijing: Science Press, 1988:305-307.
- [17] 郭朝晖, 涂卫佳, 彭驰, 等. 典型铅锌矿区河流沿岸农田土壤重金属分布特征及潜在生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(10):2029-2038.
- GUO Zhao-hui, TU Wei-jia, PENG Chi, et al. Distribution characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in paddy soil along both sides of river from typical lead/zinc mine area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(10):2029-2038.
- [18] 谢志宜, 张雅静, 陈丹青, 等. 土壤重金属污染评价方法研究——以广州市为例[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7):1329-1337.
- XIE Zhi-yi, ZHANG Ya-jing, CHEN Dan-qing, et al. Research on assessment methods for soil heavy metal pollution: A case study of Guangzhou[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(7):1329-1337.
- [19] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969(2):108-118.
- [20] 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价攀枝花地区土壤重金属污染[J]. 重庆环境科学, 2002, 24(4):25-27, 31.
- TENG Yan-guo, TUO Xiao-guo, NI Shi-jun, et al. Applying the index of geoaccumulation to evaluate heavy metal pollution in soil in Panzhihua region[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2002, 24(4):25-27, 31.
- [21] Ji Y Q, Feng Y C, Wu J H, et al. Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20(5):571-578.
- [22] 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 等. 北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价[J]. 环境科学, 2018, 39(9):4051-4059.
- XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, et al. Enrichment levels and comprehensive pollution assessment of dust heavy metals in winter in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(9):4051-4059.
- [23] 江宏, 马友华, 尹国庆, 等. 安徽省某县农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(4):352-359.
- JIANG Hong, MA You-hua, YIN Guo-qing, et al. Evaluation on

- heavy metal pollution and potential ecological risk of farmland soil in a county of Anhui Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(4):352-359.
- [24] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12):2365-2378.
WANG Yu-jun, WU Tong-liang, ZHOU Dong-mei, et al. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12):2365-2378.
- [25] 柏建坤, 王建力, 李潮流, 等. 藏北可可西里地区土壤元素背景值研究[J]. 环境科学, 2014, 35(4):1498-1501.
BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, et al. Study on soil element background values of the Hoh Xil area in north Tibet[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(4):1498-1501.
- [26] 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.
LU Ying, GONG Zi-tong, ZHANG Gan-lin, et al. Heavy metal concentration in Nanjing urban soils and their affecting factors[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(1):123-126.
- [27] 谢国雄, 应金耀, 章明奎. 大气沉降与施肥方式对梨园重金属平衡的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(16):88-94.
XIE Guo-xiong, YING Jin-yao, ZHANG Ming-kui. Mass balance of heavy metals in typical pear orchard ecological system affected by fertilization and atmospheric deposition[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(16):88-94.
- [28] 于立红, 王鹏, 于立河, 等. 地膜中重金属对土壤-大豆系统污染的试验研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3):86-90.
YU Li-hong, WANG Peng, YU Li-he, et al. Experimental study of pollution by heavy metals of plastic film in soil-soybean system[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(3):86-90.
- [29] 李志涛, 王夏晖, 何俊, 等. 四川省江安县某硫铁矿周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6):1272-1279.
LI Zhi-tao, WANG Xia-hui, HE Jun, et al. Source identification and pollution assessment of heavy metals in farmland soils around a pyrite mining area in Jiang'an County, Sichuan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6):1272-1279.
- [30] Sheng J J, Wang X P, Gong P, et al. Heavy metals of the Tibetan top soils[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2012, 19(8):3362-3370.
- [31] Patterson J B E. Trace elements in soils, plants and animals[J]. *Nature*, 1957, 180(4575):23-25.
- [32] 郑度, 姚檀栋. 青藏高原隆升及其环境效应[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5):451-458.
ZHENG Du, YAO Tan-dong. Uplifting of Tibetan Plateau with its environmental effects[J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5):451-458.
- [33] Šajn R, Halamić J, Peh Z, et al. Assessment of the natural and anthropogenic sources of chemical elements in alluvial soils from the Drava River using multivariate statistical methods[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 110(3):278-289.
- [34] 王晓亮, 赵元艺, 柳建平, 等. 德兴铜矿大坞河流域土壤中Cd的环境地球化学特征及意义[J]. 地质论评, 2013, 59(4):781-788.
WANG Xiao-liang, ZHAO Yuan-yi, LIU Jian-ping, et al. Characteristics and significance of cadmium environmental geochemistry in soil of Dawu River basin in the Dexing copper orefield[J]. *Geological Review*, 2013, 59(4):781-788.
- [35] 胡省英, 冉伟彦, 范宏瑞. 土壤-作物系统中重金属元素的地球化学行为[J]. 地质与勘探, 2003, 39(5):84-87.
HU Sheng-ying, RAN Wei-yan, FAN Hong-rui. Geochemical behaviour of heavy metals in soil-crop system[J]. *Geology and Exploration*, 2003, 39(5):84-87.
- [36] Tadesse A W, Gereslassie T, Xu Q, et al. Concentrations, distribution, sources and ecological risk assessment of trace elements in soils from Wuhan, central China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(12):2873.
- [37] Kahal A Y, El-Sorogy A S, Alfaifi H J, et al. Spatial distribution and ecological risk assessment of the coastal surface sediments from the Red Sea, northwest Saudi Arabia[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 137:198-208.