

## 某市公路两侧土壤垂直剖面处重金属污染特征研究

黄蕾<sup>1</sup>, 刘伟<sup>1\*</sup>, 杜伟伟<sup>2</sup>

(1. 新疆工程学院化学与环境工程学院, 新疆乌鲁木齐 830091; 2. 新疆工程学院数理学院, 新疆乌鲁木齐 830091)

**摘要** 以某市公路两侧土壤垂直剖面处重金属 Cu、Cr、Zn 和 Pb 为研究对象, 探讨其垂直分布特征; 运用内梅罗指数评价重金属的污染指数; 并根据重金属的形态含量结果分析其对土壤的污染程度; 利用 SPSS 对重金属形态和理化性质进行 Pearson 相关分析, 研究理化性质对重金属形态含量变化的影响。结果表明, 剖面重金属含量主要累积在土壤表层, 重金属含量随土壤深度的增加呈减少趋势; 对剖面土壤产生影响的 Zn 来自机动车轮胎磨损; Zn 以残渣态为主, 含量占总量的 98.60%, 活性态含量较低, 占总量的 1.40%, 对生物有效性和潜在危害性较小; 可交换态随土壤 pH、阳离子交换量和有机质含量的增加而降低, 铁-锰氧化物结合态随土壤 pH 和阳离子交换量升高而增加, 有机物结合态随土壤 pH 和有机质含量上升而递增, 碳酸盐结合态仅随土壤 pH 增加而增大。

**关键词** 重金属; 土壤垂直剖面; 污染指数; 分布特征; 相关分析; 形态分析

**中图分类号** X53 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2021)21-0101-04

**doi:** 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.21.025



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Study on the Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Vertical Section of the Soil on Both Sides of the Highway in a City

HUANG Lei<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, DU Wei-wei<sup>2</sup> (1. College of Chemical and Environmental Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830091; 2. College of Mathematics and Science, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi, Xinjiang 830091)

**Abstract** Taking the heavy metals Cu, Cr, Zn and Pb in the vertical section of the soil on both sides of the highway in a certain city as the research object, the vertical distribution characteristics of heavy metals were discussed, the pollution index of heavy metals were evaluated by nemerow index method, and according to the results of the form content of heavy metals, the pollution degree was analyzed, Pearson correlation analysis on the morphology and physicochemical properties of heavy metals were made by SPSS to explore the influence of physicochemical properties on the changes in the morphology. The result showed that the heavy metal contents of the profile mainly accumulated in the soil surface, and the content of heavy metals showed a decreasing trend with the increase of soil depth. The Zn that affected the profile soil came from wear of motor vehicle tires. Zn was mainly in residual fraction, accounting for 98.60% of the total, and the content of active state was lower, accounting for 1.40% of the total, Zn had little bioavailability and potential harm. The exchangeable state decreases with the increase of soil pH, cation exchange capacity and organic matter content, iron-manganese oxidation state denoted a upward trend with the promotion in soil pH and cation exchange capacity, organically bound state was enhanced with soil pH and organic matter content, carbonate combined indicated an ascending trend with the soil pH.

**Key words** Heavy metal; Soil vertical profile; Pollution index; Distribution characteristics; Correlation analysis; Morphological analysis

随着国家机动车数量迅猛增长, 公路交通引起的公路两侧农田土壤及作物中铅、锌、镉、铜等重金属以及有机废气污染也日趋严重<sup>[1]</sup>。重金属在土壤中的积累不仅影响着植物、动物的生长和发育, 对陆生生态系统构成潜在的巨大威胁, 影响植物的产量与品质<sup>[2-4]</sup>, 并且由于重金属在一定条件下可被释放进入水体, 导致重金属从土壤向水体迁移, 污染地表水和地下水, 并通过食物链危害人类的生命和健康, 对人类的生存和健康构成威胁<sup>[5]</sup>。

由于该公路车流量大, 污染较为严重, 且公路两侧均为农业用地, 因此农作物的质量受土壤影响较大, 继而周边居民的身体健康也会受到直接影响, 并且目前表层土壤重金属污染研究较多, 而对于土壤剖面重金属污染研究的报道甚少。笔者以某市公路两侧农田土壤为研究对象, 通过对公路两侧土壤剖面重金属(Cu、Cr、Pb和Zn)和土壤理化性质(pH和有机质)进行分析测定, 研究公路沿线土壤剖面重金属的空间分布, 运用内梅罗污染指数评价土壤剖面重金属的污染程度, 并对土壤产生影响的重金属讨论了其形态含量分布, 进一步揭示重金属对土壤环境产生污染的影响程度, 以期为

公路重金属污染的防治提供科学依据。

## 1 材料与方法

**1.1 样品采集** 以某市公路沿线两侧农田土壤为研究对象, 根据地形特征、公路两侧植被及监测规范, 分别选择在公路十字路口、公交站点、公路上坡段等两侧农田土壤作为此次采样的重点地区, 共计选择5个采样断面。

沿公路两侧采集土壤, 垂直公路30m处对称布设采样点。每个采样点沿着公路方向间隔10m设置4个采样剖面, 从0~15、15~30、30~45cm不同深度处分别采集土壤样品, 然后将这4个剖面处同一深度的土壤样品分别混合在一起, 组成3个不同深度剖面土样, 共计采集土壤样品30个<sup>[5-6]</sup>。在采样的过程中使用木铲挖取土壤样品来减少试验的误差。样品取回后置于背光通风处自然风干, 人工捡出石块和植物残体, 磨碎过100目尼龙筛, 备用。

**1.2 样品分析** 研磨过筛后的样品用王水-高氯酸消解<sup>[7]</sup>, 然后用火焰原子吸收分光光度计(HITACHIZ-5000)测定土壤重金属Cu、Cr、Pb和Zn总量<sup>[8]</sup>; pH用1:2.5水土比浸提pH玻璃电极法测定<sup>[9]</sup>; 有机质测定用重铬酸钾法<sup>[10]</sup>, 采用Tessier等<sup>[11]</sup>同步提取法对重金属形态含量进行测定。

## 1.3 土壤重金属污染评价方法

**1.3.1 单因子污染指数。**单因子污染指数采用土壤环境质量标准(GB 15618—1995)<sup>[12]</sup>中的方法来评价。计算公式

**基金项目** 新疆工程学院科研基金项目(2020xgy172302)。

**作者简介** 黄蕾(1982—), 女, 天津人, 讲师, 硕士, 从事环境污染修复研究。\*通信作者, 讲师, 博士, 从事土壤污染修复研究。

**收稿日期** 2021-04-09

如下:

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

式中,  $I_i$  为土壤污染物  $i$  的环境质量指数;  $C_i$  为土壤污染物  $i$  的实测值;  $S_i$  为土壤污染物  $i$  的评价标准。

**1.3.2 内梅罗指数评价法。**内梅罗指数法能够较为全面地反映研究区各重金属对土壤的综合危害程度<sup>[13-15]</sup>。其计算公式如下:

$$P_N = [(P_{imax}^2 + P_{iave}^2) / 2]^{1/2} \quad (2)$$

式中,  $P_N$  为内梅罗指数;  $P_i$  为单因子指数;  $P_{imax}$  为各重金属元素单因子指数的最大值;  $P_{iave}$  为各重金属元素单因子指数的平均值。  $P_N$  分级标准如表 1 所示。

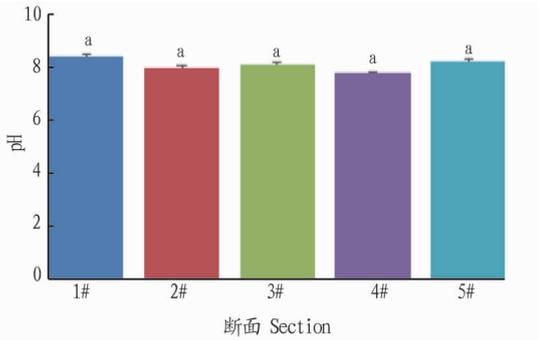
表 1 内梅罗指数法污染程度分级

Table 1 Pollution degree classification by Nemeiro index method

内梅罗指数 Nemeiro index	级别 Grade	污染程度 Pollution degree
$P_N < 0.7$	1	清洁
$0.7 \leq P_N < 1.0$	2	警戒
$1.0 \leq P_N < 2.0$	3	轻度污染
$2.0 \leq P_N < 3.0$	4	中度污染
$P_N \geq 3.0$	5	重度污染

## 2 结果与分析

**2.1 土壤剖面理化性质特征** 对公路旁不同断面 pH 和有机质含量结果进行统计分析, 结果发现(图 1), 不同断面 pH 之间的差异性不显著( $P > 0.05$ ), 可见 5 个采样断面土壤剖面处的理化性质(pH)基本相似, 这是因为路旁土壤均作为农田使用, 周边无其他大的外来污染源<sup>[5]</sup>。



注: 相同小写字母表示差异不显著( $P > 0.05$ )

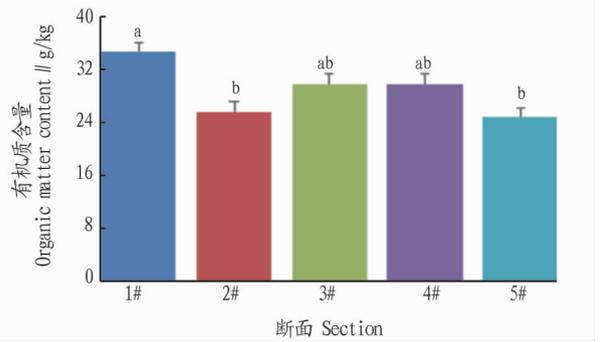
Note: The same lowercase letter means that the difference is not significant ( $P > 0.05$ )

图 1 不同断面 pH 比较

Fig. 1 Comparison of pH of different sections

对于有机质来说(图 2), 5 个采样断面有机质含量较高, 可能是由于当地雨水比较充沛, 农田土壤较长时间处于还原状态有利于土壤有机质的累积, 并且良好的轮作制度也利于提高土壤有机质含量<sup>[16-17]</sup>。1#断面有机质含量最高, 显著高于 2#、5#断面( $P < 0.05$ ), 3#、4#断面有机质含量差异不显著( $P > 0.05$ )。可见除了与土壤质地、管理制度有关外, 有机质含量之间存在差异性还可能与施肥、公路交通污染有关。

**2.2 土壤剖面重金属特征** 经测定, 垂直公路方向南北两侧土壤剖面重金属 Cu、Cr、Zn 和 Pb 分布特征如图 3 所示。



注: 不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )

Note: Different lowercase letters indicate significant differences ( $P < 0.05$ )

图 2 不同断面有机质含量比较

Fig. 2 Comparison of organic matter content in different sections

由图 3 可知, 土壤重金属垂直分布呈现特征与前人研究结论相似, 4 种重金属含量均主要累积在土壤剖面的上层(0~15 cm), 重金属含量均随土壤深度的增加而呈逐渐下降趋势, 但下降的幅度不是很大<sup>[6,18]</sup>。如 Cu 含量, 与 15~30 cm 深度相比, 30~45 cm 深度处 Cu 含量降低程度较小, 主要在于进入土壤的重金属污染物受土壤胶体吸附、代换、络合和螯合作用及生物作用, 大部分被固定在耕作层中, 向下迁移的能力减弱, 被截留在土壤剖面表层 0~15 cm 处<sup>[6,19]</sup>。并且也可以说明表层土壤中较高含量的重金属并不是由于成土作用造成的, 即地球化学背景原因, 可能是人为活动叠加的结果<sup>[20]</sup>。Besnard 等<sup>[21-22]</sup>对法国石灰质的葡萄园土壤研究表明, 农田土壤 Cu 含量可随有机肥(动物粪便和堆肥)的施用而得到明显提高。刘伟等<sup>[5]</sup>研究发现土壤表层有机质含量高于中层, 可能使得重金属易与表层土壤有机质结合起来, 通过吸附、代换、络合和螯合等作用在表层富集, 导致表层土壤重金属出现累积。

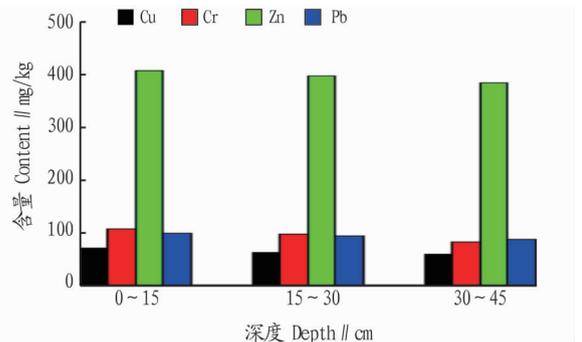


图 3 土壤剖面重金属含量分布

Fig. 3 Distribution of heavy metal content in soil profile

**2.3 土壤重金属污染评价** 根据内梅罗污染指数的结果(表 2)可看出, 1#、2#和 5#断面的污染指数  $P_N < 0.7$ , 说明 Cu、Cr、Zn 和 Pb 对公路两侧土壤剖面未产生污染; 3#和 4#断面的污染指数  $1.0 \leq P_N < 2.0$ , 说明 4 种重金属已经对公路两侧农田土壤剖面产生了轻度污染。结合单项污染指数(表 2)可推断出, 产生轻度污染的主要重金属是 Zn。

根据文献<sup>[5,23-24]</sup>,Cu 主要来自刹车和散热器的腐蚀磨损,Cr 主要来自废气和轮胎磨损,Zn 主要来自轮胎磨损,Pb 主要来自废气,由此可见公路交通对路旁土壤剖面的污染主要来自机动车轮胎的磨损,排放到空气中的重金属 Zn 扩散后引起土壤污染。

表 2 土壤剖面重金属污染指数

Table 2 Heavy metal pollution index of soil profile

采样断面 Sampling section	单项污染指数( $I_i$ )				内梅罗污 染指数 ( $P_N$ )
	Cu	Cr	Zn	Pb	
1#	0.63	0.14	0.66	0.22	0.55
2#	0.63	0.20	0.63	0.17	0.53
3#	0.55	0.77	2.51	0.34	1.92
4#	0.68	0.47	2.48	0.30	1.89
5#	0.53	0.42	0.40	0.33	0.48

## 2.4 土壤 Zn 形态分析

**2.4.1 土壤 Zn 形态测定结果。**结合土壤剖面重金属 Zn 的含量分布以及内梅罗污染指数可知,重金属 Zn 对 3#、4#剖面土壤构成了轻度污染,以 3#断面重金属 Zn 为例,对其形态进行测定,结果包含形态含量平均值、标准差和变异系数等参数,具体见表 3。

表 3 土壤 Zn 形态特征统计结果

Table 3 Statistical results of soil Zn form characteristics

序号 No.	元素形态 Element form	含量均值			分布范围 Distribution range mg/kg
		Mean content mg/kg	标准差 SD( $\sigma$ )	变异系数 CV//%	
1	可交换态	4.82	1.30	27.00	2.52~5.77
2	碳酸盐结合态	2.71	1.11	41.15	1.65~5.22
3	铁-锰氧化物结合态	2.27	0.58	25.87	1.42~3.07
4	有机物结合态	0.90	0.32	36.08	0.40~1.45
5	残渣态	759.00	331.28	59.26	203.60~ 1 107.83

**2.4.2 土壤 Zn 形态特征分析。**土壤重金属元素的生物毒性、生态效应与其赋存形态密切相关<sup>[25]</sup>,因此研究重金属元素的存在形态具有重要意义。从表 3 可以看出,土壤中 Zn 的形态主要以残渣态为主,占总量的 98.61%,可交换态、碳酸盐结合态、铁-锰氧化物结合态和有机物结合态的含量相对较低,分别占总量的 0.63%、0.35%、0.29%和 0.12%。Zn 的 5 种形态变异系数均为中等变异,与刘伟等<sup>[23-24]</sup>的研究结论一致,残渣态的变异系数较大,为 59.26%,说明在 Zn 总量相同的情况下,残渣态受到公路交通影响的程度较大。

重金属的 5 种形态分为活性态和残渣态 2 种<sup>[26]</sup>,活性态包括可交换态、碳酸盐结合态、铁-锰氧化物结合态和有机物结合态 4 种形态,在土壤中的生物有效性高,可在一定程度上反映土壤重金属活性;生物有效性低的残渣态是植物几乎不能利用的形态。由表 3 可知,Zn 活性态含量占总量的 1.39%,由此可见,土壤 Zn 的活性态含量较低,而残渣态含量占较大比重,结合“2.3”可知,Zn 虽是公路两侧剖面土壤产生轻度污染的主要重金属元素,但由于其活性态含量较低,生物有效性和潜在危害性均较小。

**2.4.3 土壤重金属 Zn 形态影响因素。**土壤重金属形态的含量特征不仅与其总量密切相关,还受土壤理化性质的影响<sup>[27]</sup>。因此,此次研究选择与土壤重金属形态含量密切相关的土壤酸碱度、阳离子交换量和有机质含量作为主要影响因素<sup>[28]</sup>,分析它们对重金属 Zn 形态变化的影响。利用 SPSS 对剖面土壤重金属 Zn 的 5 种形态含量和土壤理化性质 pH、阳离子交换量和有机质进行 Pearson 相关分析,结果见表 4。

表 4 土壤 Zn 形态和理化性质的相关系数

Table 4 Correlation coefficients of soil Zn forms and physical and chemical properties

形态 Form	pH	阳离子 交换量 CEC	有机质 OM
可交换态 Commutative state	-0.835 **	-0.683 **	-0.752 **
碳酸盐结合态 Carbonate bound state	0.847 **	0.257	-0.584
铁-锰氧化物结合态 Iron-manganese oxide combined state	0.798 **	0.785 **	0.376
有机物结合态 Organic matter bound state	0.753 **	0.424	0.758 **
残渣态 Residue state	0.485	0.436	0.524

注: \* 表示显著相关( $P<0.05$ ); \*\* 表示极显著相关( $P<0.01$ )

Note: \* means significant correlation ( $P<0.05$ ); \*\* means extremely significant correlation ( $P<0.01$ )

**2.4.3.1 pH。**从表 4 可以看出,pH 与 Zn 的可交换态含量呈极显著负相关,而与碳酸盐结合态、铁-锰氧化物结合态和有机物结合态含量均呈极显著正相关,与残渣态含量相关性不显著。表明土壤 pH 的升高有利于可交换态 Zn 的转变,残渣态较为稳定,不受 pH 的影响,其余形态含量均随着 pH 的升高而呈增加趋势。这与高译丹等<sup>[29-30]</sup>对重金属形态与 pH 的相关性研究相一致。

土壤 pH 升高导致土壤中胶体表面的负电荷数量增加,借静电引力作用而被吸附的土壤中可交换态重金属随之增多<sup>[23]</sup>,进而使可交换态重金属含量降低;pH 可以影响土壤中碳酸盐的生成与溶解,pH 升高有利于碳酸盐的生成和重金属元素在碳酸盐矿物上的共沉淀<sup>[31]</sup>,且利于铁-锰氧化物结合态重金属的生成,主要在于土壤中重金属离子在 pH 升高、OH<sup>-</sup>增多的情况下易于形成沉淀,因此碳酸盐结合态和铁-锰氧化物结合态含量随 pH 升高而呈增多趋势;且随着 pH 升高,有机质溶解度增大,络合能力增强,因此重金属被络合的程度增加,有机物结合态重金属含量随之增加<sup>[32]</sup>。以上说明 pH 是影响公路土壤剖面重金属 Zn 的形态含量中除残渣态外其余形态含量的主要因素。

**2.4.3.2 阳离子交换量。**从表 4 可看出,阳离子交换量与 Zn 的可交换态含量呈极显著负相关,与铁-锰氧化物结合态含量呈极显著正相关,与碳酸盐结合态、有机物结合态和残渣态含量关系不显著。这与李进玲<sup>[33]</sup>对重金属形态与阳离子交换量的相关性研究相一致。

土壤阳离子交换量的大小主要与土壤表面胶体负电荷的多少有关<sup>[34]</sup>,随着土壤 pH 的升高,土壤中氧化物、矿物等物质表面的负电荷数量会增多,阳离子交换量增大,一方面静电引力作用导致可交换态重金属含量降低<sup>[28]</sup>,另外铁-锰

氧化物土壤胶体表面负电荷增多,增加了对阳离子的吸附程度<sup>[23]</sup>。可见阳离子交换量是影响公路土壤剖面重金属可交换态和铁-锰氧化物结合态 Zn 含量的主要因素。

**2.4.3.3 有机质。**从表4可以看出,有机质与 Zn 的可交换态含量呈极显著负相关,与有机物结合态含量呈极显著正相关,而与其形态含量关系均不显著。这与 Covelo 等<sup>[35]</sup>对重金属形态与有机质的相关性研究相一致。

有机质影响土壤中重金属形态的原因主要是有机质含有大量的活性官能团,如羟基、羧基等,在释放出 H<sup>+</sup> 后自身带负电荷,对于带正电的金属离子有很好的吸附作用以及离子交换作用<sup>[28]</sup>,通过静电引力和离子交换作用导致可交换态 Zn 含量降低,而通过吸附、络合作用与有机物结合态的 Zn 含量呈上升趋势,说明土壤剖面重金属可交换态和有机物结合态 Zn 含量受土样有机质的影响较大。

### 3 结论

以某市公路两侧土壤剖面重金属 Cu、Cr、Zn 和 Pb 为例,探讨了其垂直分布特征、分析了其形态含量对土壤的污染程度,并讨论了理化性质对重金属形态含量变化的影响,结果表明,重金属含量主要累积在土壤剖面表层,含量随土层深度的增加逐渐下降;Zn 是影响剖面土壤最主要的重金属污染物,来源主要是机动车轮胎的磨损;土壤 Zn 以残渣态为主,活性态含量较低,对环境危害性较小。对 Zn 的形态含量影响程度上,可交换态随土壤 pH、阳离子交换量和有机质含量的增加而降低,铁-锰氧化物结合态随土壤 pH 和阳离子交换量的升高而增加,有机物结合态随土壤 pH 和有机质含量的上升而递增,碳酸盐结合态仅随土壤 pH 增加而增大。

### 参考文献

- [1] 张永春,孙丽,苏国峰,等.公路两侧农田土壤及作物中重金属的累积[J].江苏农业学报,2005,21(4):336-340.
- [2] 张丙华.公路沿线土壤中重金属的含量分布[J].环境科学与技术,2007,30(2):55-56,118.
- [3] 李艳利,李成杰,杨小燕.焦克公路沿线土壤中重金属的污染分布及形态分析[J].河南理工大学学报(自然科学版),2010,29(6):831-836.
- [4] 常鹏云,谢英荷,程红艳,等.镉对6种根菜类蔬菜生长状况及品质的影响研究[J].天津农业科学,2012,18(1):126-130.
- [5] 刘伟,刘汉湖,邱超,等.徐州市三环南路沿线土壤重金属污染及相关性分析[J].环境科学与管理,2012,37(10):67-70.
- [6] 邱超,刘汉湖,刘伟.徐州市三环南路土壤重金属污染特征[J].徐州工程学院学报(自然科学版),2010,25(4):36-41.
- [7] 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.
- [8] 刘伟,张洋,孟昭福,等.两性-阴离子复配修饰对黄棕壤吸附 Cd<sup>2+</sup> 的影响[J].中国环境科学,2017,37(12):4620-4629.
- [9] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000.

- [10] 郭平,谢忠雷,康春莉,等.利用化学萃取法研究长春市土壤重金属化学形态及其影响因素[J].吉林大学学报(理学版),2005,43(1):116-120.
- [11] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [12] 刘凤枝.农业环境监测实用手册[M].北京:中国标准出版社,2001:35-37.
- [13] 罗芳,伍国荣,王冲,等.内梅罗污染指数法和单因子评价法在水质评价中的应用[J].环境与可持续发展,2016,41(5):87-89.
- [14] 薛志斌,李玲,张少凯,等.内梅罗指数法和复合指数法在土壤重金属污染风险评估中的对比研究[J].中国水土保持科学,2018,16(2):119-125.
- [15] 陈露丹,邓良基,周伟,等.3种有机物料配肥下的宅基地复垦土壤重金属污染风险评估[J].四川农业大学学报,2019,37(2):199-207.
- [16] 陈凤,濮劭杰.昆山市农业土壤基本性质与重金属含量及二者的关系[J].土壤,2007,39(2):291-296.
- [17] 陈穗玲,李锦文,邓红梅.福建沿海地区农田土壤理化性质与重金属含量的关系[J].湖北农业科学,2014,53(13):3025-3029.
- [18] 付丽丽,姚常琦,李学斌,等.沈阳农用地土壤重金属污染评价与来源分析[J].广东农业科学,2013,40(16):178-181.
- [19] 刘文拔.有机肥对土壤-小麦、高粱系统中重金属污染的环境效应研究[D].贵阳:贵州大学,2008:8-10.
- [20] 袁新田,张春丽,孙倩,等.宿州市煤矿区农田土壤重金属含量特征[J].环境化学,2011,30(8):1451-1455.
- [21] BESNARD E, CHENU C, ROBERT M. Influence of organic amendments on copper distribution among particle-size and density fractions in Champagne vineyard soils [J]. Environmental pollution, 2001, 112(3): 329-337.
- [22] 李仰征.高速公路路旁土壤重金属污染及林带防护效应分析:以连霍高速中牟段为例[D].开封:河南大学,2007:29-30.
- [23] 刘伟,蔡香丽,刘汉湖,等.徐州市三环南路土壤 Cd 的形态特征及影响因素研究[J].安徽农业科学,2013,41(11):4806-4807,4810.
- [24] 魏永军.某市三环南路土壤 Cu 的形态特征及影响因素研究[J].广东化工,2015,42(2):43-44,42.
- [25] 陈牧霞,地里拜尔·苏力坦,杨潇,等.新疆污灌区重金属含量及形态研究[J].干旱区资源与环境,2007,21(1):150-154.
- [26] 郭观林,周启星.污染黑土中重金属的形态分布与生物活性研究[J].环境化学,2005,24(4):383-388.
- [27] 钱翌,张玮,冉德超.青岛城市土壤重金属的形态分布及影响因素分析[J].环境化学,2011,30(3):652-657.
- [28] 赵一鸣,董颖博,林海,等.土壤理化性质对重金属形态的影响[J].农业工程,2018,8(12):38-43.
- [29] 高译丹,梁成华,裴中健,等.施用生物炭和石灰对土壤镉形态转化的影响[J].水土保持学报,2014,28(2):258-261.
- [30] 蔡奎,张倩,吴云霞,等.河北平原农田土壤重金属形态分布特征及控制因素研究[J].生态毒理学报,2017,12(2):155-168.
- [31] 智颖颀,王再岚,马中,等.鄂尔多斯地区公路沿线土壤重金属形态与生物有效性[J].生态学报,2007,27(5):2030-2039.
- [32] 毛竹,王浩.土壤重金属形态分布特性及其影响因素[J].科技资讯,2013,11(8):163-164.
- [33] 李进玲.上海滨海农业区土壤重金属分布特征的解析与评价[D].上海:上海交通大学,2009:45-50.
- [34] 王逸群,许端平,薛杨,等. Pb 和 Cd 赋存形态与土壤理化性质相关性研究[J].地球与环境,2018,46(5):451-455.
- [35] COVELO E F, VEGA F A, ANDRADE M L. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components[J]. Journal of hazardous materials, 2007, 140(1/2): 308-315.

(上接第100页)

- [6] 乌尔里希·贝克.什么是全球化?全球主义的曲解一应对全球化[M].常和芳,译.上海:华东师范大学出版社,2008:197.
- [7] 张丽苹.灾疫伦理学:改变生活世界的当代启蒙方式[J].阴山学刊,2013,26(3):96-99.

- [8] 霍尔姆斯·罗尔斯顿 III.哲学:走向荒野[M].刘耳,叶平,译.长春:吉林人民出版社,2000:189.
- [9] 马克思,恩格斯.马克思恩格斯文集:第1卷[M].北京:人民出版社,2009:161.
- [10] 田应奎.2049中国治理[M].北京:中共中央党校出版社,2019:185.
- [11] 颜昌峣.管子校释[M].长沙:岳麓出版社,1996:365.