

卡房尾矿库土壤重金属化合物对 微团聚体稳定性的影响

彭沛宇,王卫华

(昆明理工大学农业与食品学院,云南 昆明 650500)

摘要:为了探究云南省卡房尾矿库土壤微团聚体结构稳定性的影响因素,合理反映尾矿库土壤整体稳定性情况,以卡房尾矿库土壤微团聚体和重金属化合物(As_2O_3 、 Co_3O_4 、 Cr_2O_3 、 CuO 、 NiO 、 ZnO)为研究对象,分析了微团聚体结构稳定性与重金属化合物含量之间的关系。结果表明,尾矿库土层深度0~2、2~5、5~8、8~15 m的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均值分别为0.086 mm和0.048 mm、0.083 mm和0.052 mm、0.031 mm和0.019 mm、0.048 mm和0.029 mm,土层深度0~5 m的微团聚体结构稳定性最强。不同土壤深度6种重金属化合物含量变异系数为0.106~0.743,均呈现中等变异,且所测得的样本中75%数据的拱高基台比大于0.75,具有较强程度的空间自相关。6种重金属化合物在尾矿库土壤中呈现2种不同的分布规律:随土层深度的增加, As_2O_3 与 NiO 的含量逐渐降低;在0~8 m深度内 CuO 、 ZnO 、 Co_3O_4 与 Cr_2O_3 的含量均匀分布或者逐层下降,在8~15 m深度内各重金属化合物含量上升。对卡房尾矿库土壤微团聚体结构稳定性产生影响的重金属化合物为 CuO 和 ZnO ,在0~8 m深度内 CuO 对微团聚体稳定性的贡献水平为 ZnO 的2倍,在8~15 m深度内两者贡献水平相同。综上,土壤中 CuO 和 ZnO 的含量会对微团聚体结构稳定性造成影响,其中 CuO 对土壤微团聚体结构稳定性的贡献水平最高。

关键词:微团聚体;重金属化合物;平均重量直径;几何平均直径;卡房尾矿库

中图分类号:S153.6⁺1 **文献标志码:**A

Effects of soil heavy metal compounds on the micro-aggregate stability in Kafang tailing pond

PENG Peiyu, WANG Weihua

(Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: In order to explore the factors affecting the structural stability of soil micro-aggregates in the Kafang tailing pond in Yunnan Province, and reasonably reflect the overall stability of the soil in the tailing pond, the relationship between the structural stability of the micro-aggregates and the content of heavy metal compounds was analyzed by taking the soil micro-aggregates and heavy metal compounds (As_2O_3 , Co_3O_4 , Cr_2O_3 , CuO , NiO , and ZnO) in the Kafang tailing pond as the test object. The results showed that the mean values of mean weight diameter (MWD) and geometric (GMD) in the layers of 0~2 m, 2~5 m, 5~8 m, and 8~15 m in the tailing pond were 0.086 mm and 0.048 mm, 0.083 mm and 0.052 mm, 0.031 mm and 0.019 mm, 0.048 mm and 0.029 mm, respectively. The micro-aggregates structure within the depth of 0~5 m was the most stable one. The variation coefficients of the contents of six heavy metal compounds in soil at different depths were 0.106~0.743, showing moderate variation, and 75% of the measured samples had $[C/(C_0+C)]$ values greater than 0.75, showing a strong spatial autocorrelation. The six heavy metal compounds showed two different distribution patterns in tailing pond soil, with increasing soil depth, the content of As_2O_3 and NiO decreased gradually. The contents of CuO , ZnO , Co_3O_4 , and Cr_2O_3 were uniformly distributed or decreased from layer to layer in the depth of 0~8 m, while the contents of each heavy metal compound increased at the depth of 8~15 m. The CuO and ZnO were the heavy metal compounds that af-

affected the structural stability of soil micro-aggregates in the Kafang tailing pond. The contribution level of CuO to the stability of the micro-aggregates was twice that of ZnO at the depth of 0~8 m, and both contribution levels were the same within a depth of 8~15 m. In summary, the contents of CuO and ZnO in soil affected the structural stability of micro-aggregates, of which CuO had the most contribution to the structural stability of micro-aggregates.

Keywords: micro-aggregate; heavy metal compounds; MWD; GMD; Kafang tailing pond

土壤团聚体是土壤当中土粒直径<10 mm 的结 构体,通常以直径 0.25 mm 为界,将其分成微团聚体 与大团聚体,土壤中粒径≤0.25 mm 的团聚体为土 壤微团聚体,作为土壤结构的颗粒单位,能够有效 反映出土壤的团聚性,是良好土壤结构的物质基 础^[1-2]。云南省地质地理条件复杂且矿产资源丰 富,云南省个旧市是全国著名的“锡都”,因此个旧 地区存在数量众多的尾矿库。人类的矿物开采活 动从物理上改变了土壤微团聚体的结构形态,而伴 随着生产排放物渗透入土壤的化学元素又使得土 壤微团聚体的化学性质产生了一定变化。土壤微 团聚体的化学结构和组成特点对土壤物理和化学 变化有重要的影响^[3]。

土壤整体稳定性与土壤微团聚体的稳定性有 着密切的关系。近年来,一些学者针对土壤团聚结 构稳定性的影响因素展开了大量研究。陈晓东等^[4] 通过对原生盐碱土进行试验发现施用有机物料 能够显著增加土壤微团聚体结构稳定性。Guo 等^[5] 发现秸秆还田在提高团聚体内有机碳含量的 同时,显著提高了水稳性团聚体的稳定性。张世祺 等^[6] 研究表明土壤团聚体与有机碳含量关系密切, 是影响团聚体水稳性的重要因素。Wang 等^[7] 在 比较不同种类作物土壤后发现蔬菜土壤中有有机 碳含量与水稳性团聚体之间的相关性低于水稻土 壤。综合来看,土壤团聚体结构稳定性主要受土壤 有机质含量的影响最大,但目前对于有机质以外的 影响因素研究较为薄弱,尤其对于基本不含有机 质而富含重金属的尾矿库土壤团聚体的相关研究 鲜见报道。本研究以云南省个旧市卡房尾矿库为 例,通过检测尾矿库的土壤各项数据,分析土壤微 团聚体在垂向不同深度的稳定性,同时探究尾矿 库土壤中的重金属化合物与微团聚体稳定性之间 的关系,为尾矿库土体结构稳定维护、解决尾矿 库稳定性评价难题提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于云南省个旧市南部的卡房镇, 103°03′~103°24′E, 23°07′~23°17′N, 最高海拔为 2 494 m,属上半山区,地势北高南低,年平均气温

17.5℃,年降雨量 1 600 mm。研究区域为云锡卡房 分公司管理和使用的云南锡业集团有限责任公司 卡房尾矿库,下文简称卡房尾矿库。卡房尾矿库库 区面积为 91.3 万 m²,设计库容为 1 853 万 m³,目前 共堆放约 1 000 万吨尾矿。

1.2 样品采集及测量方法

测点均处库区沉积淤泥区,环绕库区均匀布 设 28 个测点,利用钻井收集表层至地下 15 m 深的土 柱。采样点利用手持 GPS 定位记录经纬度。将采 样土柱分别进行标记,用环刀取土柱从顶端往下 2、 5、8 m 及 15 m 处的土层土壤样品送往云南省分析 测试中心。运用湿筛法过滤粒径>0.25 mm 大团聚 体,然后使用吸管法测定水稳性微团聚体的分 布^[8-9]。通过能谱仪测定重金属化合物含量。

其他物理性质测定:通过烘干法测定土壤含 水率,土壤质地和颗粒组成使用马氏激光分析仪 测定,土粒比重采用比重瓶法测定。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 基本参数统计分析 以经典统计学理论为 基础,使用 SPSS 25 软件对所测得样品数据进 行分析、处理^[10],结果如表 1 所示。

使用 GS+ 9.0 软件的 Autocorrelation 模块对研 究区域不同土层深度下重金属化合物含量进行半 方差的拟合,将数据导入 Surfer 11 软件,结合 Kriging 插值法将离散数据进行网格化计算,绘制出 重金属化合物含量空间分布图;利用 SPSS 25 软件 对重金属化合物含量与土壤微团聚体稳定性指标 进行方差分析(ANOVA)和回归分析。

1.3.2 平均重量直径(MWD)和几何平均直径 (GMD) 平均重量直径(MWD)计算公式^[11]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n w_i d_i \quad (1)$$

几何平均直径(GMD)计算公式^[12]:

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \ln d_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right] \quad (2)$$

式(1)、(2)中, d_i 是筛分出来的任意粒径范围内微 团聚体的平均直径(mm); w_i 是任意粒径范围内微

团聚体的质量占土样干重的百分比(%)。

2 结果与分析

2.1 土壤水稳性团聚体的评价指标

土壤团聚体是构成土壤的最基本的结构单位,反映了土壤结构状况的好坏。非水稳性团聚体会在水中破碎分解为小粒径的水稳性团聚体,因而水稳性团聚体较非水稳性团聚体更能反映土壤结构整体稳定性。

由表2可知,研究区域土壤中以 ≤ 0.25 mm粒级的微团聚体为主,在不同深度的土壤中,微团聚体基本集中在0.25~0.01 mm 粒径区间, >0.25 mm粒级的土壤大团聚体仅占总体的3.26%。结合表2数据,研究区域土壤中的大团聚体分布情况并未表现出任何的规律性,甚至在5~8 m 土层深度中的土壤大团聚体仅有0.44%,故本文选取对研究区域土壤整体状况起到真正影响的水稳性微团聚体作为研究对象。

平均重量直径(*MWD*)和几何平均直径(*GMD*)是用来描述土壤微团聚体稳定性的常见指标。一般而言,平均重量直径(*MWD*)与几何平均直径

(*GMD*)的取值越大,土壤平均粒径的团聚程度越高,抗侵蚀能力越强,结构越稳定。从图1中可以看出,深度在0~5 m 土层的土壤的*MWD*和*GMD*值明显高于5~15 m 土层的土壤,并且5~8 m 深度处土壤的*MWD*和*GMD*值远低于其他三层土壤。由此可见,研究区域土层深度0~5 m 内的土壤团聚性最好,土壤抗侵蚀性最强,微团聚体结构最稳定。

2.2 土壤重金属化合物含量统计值

本文采用传统统计学的方式来描述土壤重金属化合物含量的总体变化情况,通过Kolmogorov-Smirnov 正态性检验 [$P(K-S) > 0.05$] 来检验样本的正态分布特征,土壤重金属化合物含量的描述性统计分析见表3。根据K-S 检验值可以看出土壤重金属化合物含量在各土层深度均呈现正态分布。

样本变异程度可分为强变异性、中等变异性与弱变异性。由表3可以看出,6种重金属化合物整体变异程度强弱性为: $CuO > As_2O_3 > Cr_2O_3 > NiO > ZnO > Co_3O_4$,各种重金属化合物含量在0~15 m 土层内变异系数值全部介于0.1与1.0之间,均呈现中等变异性。

表1 供试土样基本理化性质

Table 1 Basic properties of soil samples

砂粒 Clay/%	粉粒 Silty/%	黏粒 Loam/%	土壤质地 Soil texture	土粒比重 Specific gravity	孔隙比 Porosity ratio	含水率 Water content /(g·kg ⁻¹)	有机质 SOM/(g·kg ⁻¹)
44.82±14.20	49.80±20.61	5.38±2.57	粉壤土 Silt loam	3.085±1.204	1.10±0.43	326.5±122.7	0.14±0.07

表2 不同深度土壤水稳性团聚体分布/%

Table 2 Distribution of water-stable micro-aggregate in soil at different depths

土层深度 Soil depth/m	>0.25 mm	0.25~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.002 mm	<0.002 mm
0~2	5.40±3.33a	56.31±11.52a	22.65±7.70c	9.52±2.77c	6.12±2.17b
2~5	3.51±3.42bc	55.43±14.58ab	25.74±13.17c	12.42±5.88bc	2.90±1.20c
5~8	0.44±0.43d	17.00±20.15d	40.75±8.58b	31.26±14.56a	10.55±5.49a
8~15	3.69±5.61b	25.05±19.36c	48.41±19.64a	18.51±8.39b	4.345±0.76bc

注:同列不同小写字表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Notes: The different lowercase letters within same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

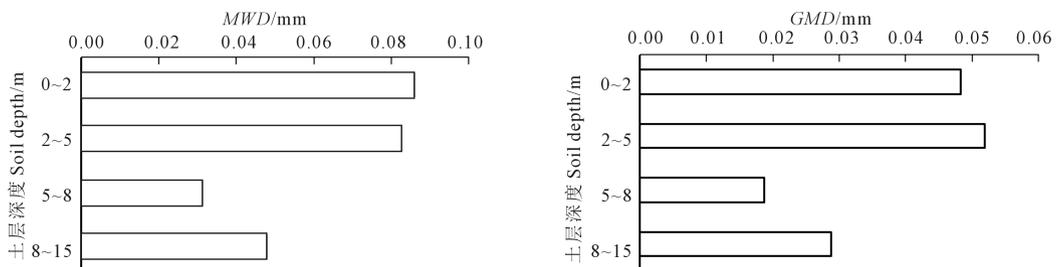


图1 不同土层深度下的平均重量直径(*MWD*)和几何平均直径(*GMD*)

Fig.1 Mean weight diameter (*MWD*) and geometric mean diameter (*GMD*) of water-stable micro-aggregate in soil at different depths

2.3 土壤重金属化合物空间变异特征

采用 GS⁺ 9.0 对尾矿库不同土层深度重金属化合物含量进行半方差分析,表 4 为分析拟合结果。各种重金属化合物的半方差拟合类型以高斯 (Gaussian) 模型为主。尾矿库土壤中重金属化合物含量的块金值 (C_0) 均很小,表明在试验测定中由各种随机因素导致的空间变异程度很低。基台值

(C_0+C) 反映了重金属化合物在研究区域内的空间总变异程度,除了土层深度 0~2 m 的 Co_3O_4 、 Cr_2O_3 的拱高基台比 $0.25 \leq [C/(C_0+C)] \leq 0.75$,土层深度 2~5 m 的 ZnO 和 5~8 m 的 Co_3O_4 、 CuO 、 ZnO 以及 8~15 m 的 Cr_2O_3 的拱高基台比 $[C/(C_0+C)] < 0.25$,其余数据拱高基台比均大于 0.75,说明尾矿库土壤重金属化合物在研究尺度上具有较强的空间自相关。

表 3 土壤重金属化合物含量描述性统计分析

Table 3 Descriptive statistics of content of heavy metal compounds in soil

土层深度 Soil depth/m	化合物 Compound	平均值 Mean /(g·kg ⁻¹)/(g·kg ⁻¹)	标准差 Std. /(g·kg ⁻¹)/(g·kg ⁻¹)	变异系数 CV	K-S	土层深度 Soil depth/m	化合物 Compound	平均值 Mean /(g·kg ⁻¹)/(g·kg ⁻¹)	标准差 Std. /(g·kg ⁻¹)/(g·kg ⁻¹)	变异系数 CV	K-S
0~2	As ₂ O ₃	3.70	0.39	0.106	0.112	5~8	As ₂ O ₃	0.58	0.26	0.439	0.124
	Co ₃ O ₄	0.13	0.06	0.429	0.099		Co ₃ O ₄	0.10	0.07	0.743	0.187
	Cr ₂ O ₃	0.20	0.06	0.314	0.108		Cr ₂ O ₃	0.23	0.08	0.357	0.142
	CuO	1.26	0.28	0.223	0.097		CuO	0.24	0.05	0.228	0.158
	NiO	0.85	0.39	0.454	0.141		NiO	0.41	0.25	0.623	0.279
	ZnO	0.40	0.16	0.403	0.153		ZnO	0.23	0.05	0.238	0.125
2~5	As ₂ O ₃	2.75	0.82	0.297	0.132	8~15	As ₂ O ₃	1.20	0.63	0.527	0.135
	Co ₃ O ₄	0.17	0.03	0.165	0.077		Co ₃ O ₄	0.18	0.09	0.498	0.241
	Cr ₂ O ₃	0.21	0.06	0.300	0.158		Cr ₂ O ₃	0.46	0.17	0.370	0.108
	CuO	0.87	0.25	0.291	0.121		CuO	1.73	0.97	0.561	0.124
	NiO	0.64	0.16	0.254	0.106		NiO	0.44	0.17	0.394	0.148
	ZnO	0.33	0.10	0.291	0.168		ZnO	0.50	0.25	0.502	0.122

表 4 土壤重金属化合物半方差函数模型

Table 4 Semi-variance model and fitted parameters of heavy metal compounds in soil

土层深度 Soil depth/m	化合物 Compound	拟合模型 Model	块金 C_0	基台 C_0+C	变程 A_0	拱高基台比 $C/(C_0+C)$
0~2	As ₂ O ₃	Gaussian	1.00×10^{-6}	1.41×10^{-3}	0.0036	0.9993
	Co ₃ O ₄	Gaussian	1.79×10^{-5}	3.59×10^{-5}	0.0009	0.5014
	Cr ₂ O ₃	Exponential	1.84×10^{-5}	6.87×10^{-5}	0.0045	0.7322
	CuO	Gaussian	8.10×10^{-5}	7.92×10^{-4}	0.0004	0.8977
	NiO	Spherical	9.10×10^{-5}	1.51×10^{-3}	0.0005	0.9398
	ZnO	Spherical	1.00×10^{-7}	2.55×10^{-4}	0.0005	0.9996
2~5	As ₂ O ₃	Gaussian	1.00×10^{-6}	7.12×10^{-3}	0.0004	0.9986
	Co ₃ O ₄	Gaussian	0.00	9.40×10^{-6}	0.0005	1.0000
	Cr ₂ O ₃	Gaussian	1.00×10^{-7}	3.62×10^{-5}	0.0006	0.9972
	CuO	Gaussian	1.00×10^{-6}	7.40×10^{-4}	0.0003	0.9986
	NiO	Spherical	1.57×10^{-5}	2.54×10^{-4}	0.0016	0.9383
	ZnO	Linear	1.05×10^{-4}	1.05×10^{-4}	0.0046	0.0000
5~8	As ₂ O ₃	Gaussian	1.00×10^{-6}	5.32×10^{-4}	0.0004	0.9981
	Co ₃ O ₄	Linear	5.18×10^{-5}	5.18×10^{-5}	0.0046	0.0000
	Cr ₂ O ₃	Spherical	1.05×10^{-5}	7.60×10^{-5}	0.0005	0.8618
	CuO	Linear	3.35×10^{-5}	3.35×10^{-5}	0.0046	0.0000
	NiO	Gaussian	1.00×10^{-6}	6.02×10^{-4}	0.0003	0.9983
	ZnO	Linear	3.20×10^{-5}	3.20×10^{-5}	0.0046	0.0000
8~15	As ₂ O ₃	Spherical	9.00×10^{-5}	3.91×10^{-3}	0.0005	0.9770
	Co ₃ O ₄	Gaussian	1.00×10^{-7}	7.52×10^{-5}	0.0003	0.9987
	Cr ₂ O ₃	Linear	2.97×10^{-4}	2.97×10^{-4}	0.0046	0.0000
	CuO	Spherical	4.80×10^{-4}	9.46×10^{-3}	0.0006	0.9493
	NiO	Gaussian	2.80×10^{-5}	2.80×10^{-4}	0.0000	0.9000
	ZnO	Gaussian	9.40×10^{-5}	6.48×10^{-4}	0.0003	0.8549

2.4 土壤重金属化合物在各土层的分布情况

根据各种重金属化合物在尾矿库土层不同深度处的含量分布变化规律,结合普通克里金法内插取最优值,通过 Surfer 11.0 软件绘制出土壤重金属化合物含量空间插值分布图,并将其调整成为不同土壤深度下的垂向切片图(图 2)。

由图 2 可见,卡房尾矿库土壤中各种重金属化合物的空间分布总体上差异较大。As₂O₃ 与 NiO 在尾矿库中随土层深度的增加,含量逐渐降低;CuO 与 ZnO 在尾矿库中的变化趋势为随着土层深度增加,含量先在 0~8 m 深度中逐渐降低,后在 8~15 m

深度内增加;Cr₂O₃ 与 Co₃O₄ 在尾矿库 0~8 m 深度中分布相对均匀,在 8~15 m 深度中含量增加。

2.5 土壤重金属化合物含量对水稳性微团聚体特征指标贡献水平分析

多元逐步回归分析方法能够获取各个解释变量对被解释变量的影响程度,并在回归方程出现异方差性,影响拟合效果,则会将此解释变量剔除^[13]。本文以 As₂O₃(X₁)、Co₃O₄(X₂)、Cr₂O₃(X₃)、CuO(X₄)、NiO(X₅)、ZnO(X₆) 等 6 种重金属化合物含量作为自变量,以 MWD 和 GMD 作为应变量 Y,采用多元逐步回归分析进行拟合。由表 5 计算结果可

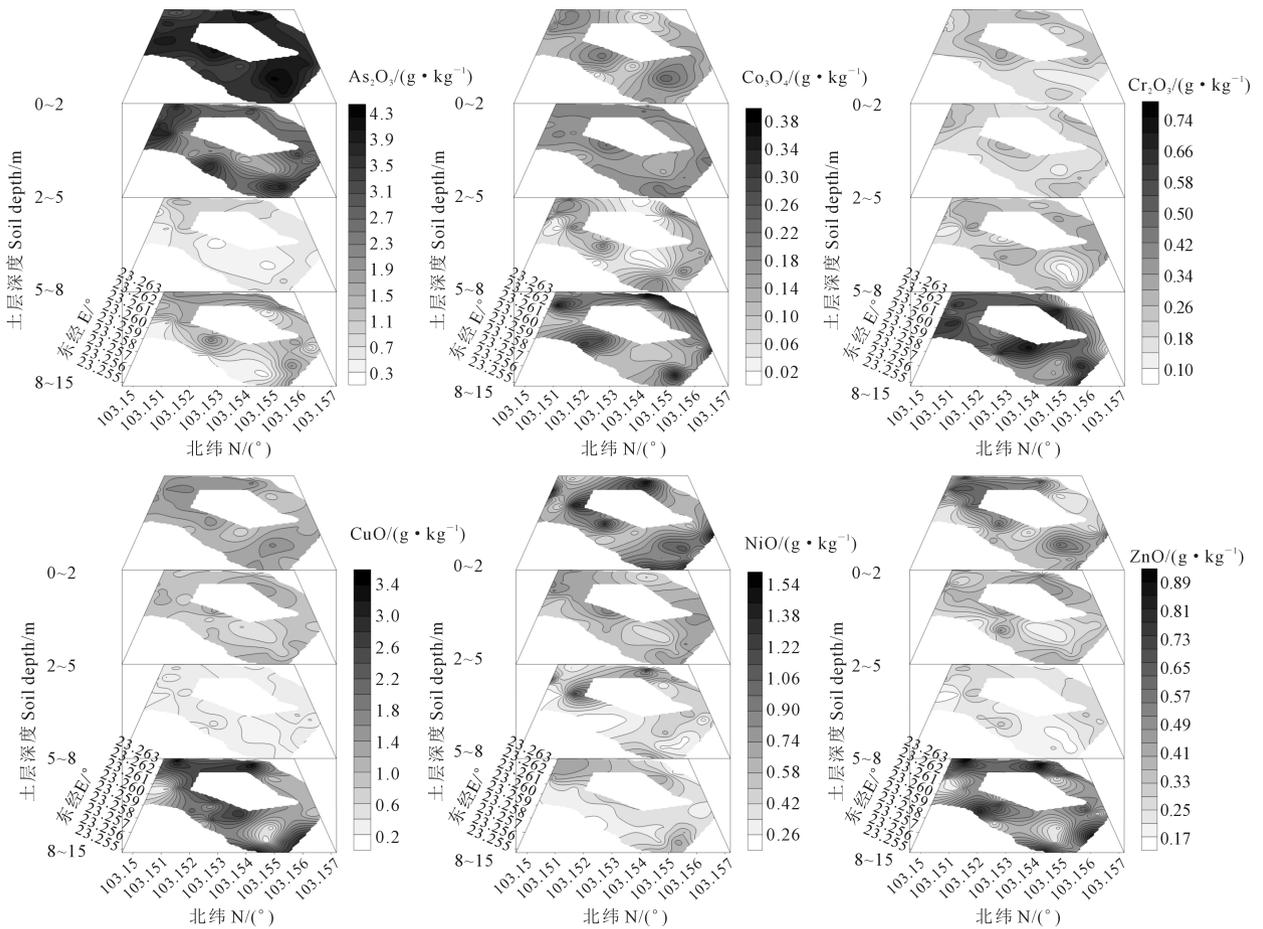


图 2 土壤重金属化合物含量空间插值垂向切片图
Fig.2 Vertical slice map of heavy metal compounds in soil at different depths

表 5 逐步回归分析拟合结果

Table 5 Fitting results of stepwise regression analysis

土层深度 Soil depth/m	平均重量直径 MWD		几何平均直径 GMD	
	回归方程 Regression equation	决定系数 R ²	回归方程 Regression equation	决定系数 R ²
0~2	Y=0.217X ₄ +0.205X ₆ +0.051	0.812 **	Y=0.173X ₄ +0.172X ₆ +0.022	0.746 **
2~5	Y=0.364X ₄ +0.527X ₆ +0.033	0.847 **	Y=0.279X ₄ +0.393X ₆ +0.012	0.736 **
5~8	Y=1.892X ₄ +1.131X ₆ -0.04	0.880 **	Y=1.191X ₄ +0.539X ₆ -0.021	0.806 **
8~15	Y=0.106X ₄ +0.33X ₆ +0.013	0.839 **	Y=0.213X ₄ +0.046X ₆ +0.01	0.674 **

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Notes: ** indicates a significant correlation at the 0.01 level (bilateral).

以看出,回归方程的拟合效果较好,且经过方程筛选后的变量表明,尾矿库土壤中的 CuO 与 ZnO 含量是对水稳性微团聚体特征指标 *MWD* 与 *GMD* 产生影响的主要变量。

表 6 是回归方程中的两个自变量 CuO (X_4) 与 ZnO (X_6) 的标准化回归系数。标准化回归系数可以解释为当自变量 X 变化 1 个标准差时,应变量 Y 将会随之变化相应标准化回归系数数值的标准差,因此本文采用标准化回归系数来解释重金属化合物对水稳性微团聚体特征指标 *MWD* 与 *GMD* 的贡献水平。

根据表中数据可以看出,尾矿库 0~8 m 深度内,在 ZnO 保持不变的前提下,当 CuO 增加 1 个标准差时,*MWD* 和 *GMD* 增加约 0.6 个标准差;在 CuO 保持不变的前提下,当 ZnO 增加 1 个标准差时,*MWD* 和 *GMD* 增加约 0.3 个标准差,CuO 含量对 *MWD* 和 *GMD* 的贡献水平大约是 ZnO 含量的 2 倍。尾矿库 8~15 m 土层深度内,CuO 和 ZnO 含量对水稳性微团聚体特征指标 *MWD* 和 *GMD* 的贡献水平基本持平。

表 6 标准化回归系数

Table 6 Standardized regression coefficient

土层深度/m Soil depth	<i>MWD</i>		<i>GMD</i>	
	X_4	X_6	X_4	X_6
0~2	0.617	0.331	0.583	0.330
2~5	0.623	0.347	0.590	0.319
5~8	0.611	0.361	0.643	0.288
8~15	0.541	0.437	0.483	0.403

3 讨论

卡房尾矿库土壤中的重金属化合物主要来自经过采选之后的尾矿,在土壤中随自然作用和人为影响迁移至尾矿库各处位置,各种重金属化合物对土壤的性质产生了不同程度的影响。关于土壤重金属对团聚体或微团聚体的影响已有了一些研究,但是不同学者的研究结果各有不同。韩馥^[14]发现部分重金属元素在土壤微团聚体中含量较高,微团聚体在黏结形成大团聚体后会增加重金属的质量荷载;黄斌^[15]通过试验发现游离氧化铁对土壤团聚体中重金属含量变化没有重要作用,与许多研究观点相反;侯彪^[16]发现成都地区部分土壤重金属与团聚体稳定性呈现负相关;本研究发现,在卡房尾矿库中土壤的 CuO 和 ZnO 含量皆对微团聚体平均重量直径(*MWD*)和几何平均直径(*GMD*)影响极为明显,As₂O₃、Co₃O₄、Cr₂O₃、NiO 对 *MWD* 和 *GMD* 的影响不明显,表明土壤中重金属化合物对土壤微团聚体的影响十分复杂,在尾矿库的特殊土壤环境下尤其如此。

在常规环境的土壤中,土壤微团聚体结构稳定性主要受到有机质含量的影响^[17-18]。前人的大量试验表明有机质在土壤微团聚体中形成的胶结结构还会影响重金属的分布状况^[19-21]。由于土壤有机质主要分布于微团聚体中,并且粒径越小越集中^[22],导致部分学者对大团聚体的研究结果为重金属含量与团聚体结构稳定性呈负相关。对于此种现象,国内外已有相关研究证明重金属元素对大团聚体稳定性、微团聚体稳定性具有相反的影响作用^[23-24]。在卡房尾矿库的土壤中有有机质含量极低而重金属含量较高,可以判断卡房尾矿库土壤团聚结构的形成基本未受有机质的作用,且尾矿库土壤内以微团聚体为主,由此看出微团聚体的形成主要受到土壤重金属化合物的影响^[25]。基于此原因,卡房尾矿库土壤中 CuO 和 ZnO 含量与微团聚体结构稳定性呈现显著正相关。而研究结果中 As₂O₃、Co₃O₄、Cr₂O₃、NiO 这 4 种重金属化合物对土壤微团聚体稳定性影响不显著的原因,在查阅相关资料后,推测可能与这几种重金属阳离子在土壤中离子交换敏感性较低有关,导致土壤正电荷性质较弱,降低了其在土壤团聚过程中的静电吸附作用^[26]。

4 结论

1) 卡房尾矿库的土壤中以水稳性微团聚体为主,占总体的 96.74%。土层深度 0~5 m 的微团聚体团聚程度最高,结构最稳定。

2) 卡房尾矿库土壤重金属化合物含量属于中等变异程度,在各土层深度中均服从正态分布。

3) 通过地统计学方法分析出卡房尾矿库土壤重金属化合物含量具有较强程度的空间自相关。

4) 重金属化合物含量在卡房尾矿库的土壤中出现 2 种分布规律:As₂O₃ 与 NiO 的含量随土层深度的增加而逐渐降低;CuO、ZnO、Co₃O₄ 与 Cr₂O₃ 的含量在 0~8 m 深度内均匀分布或者逐层下降,在 8~15 m 深度内含量上升。

5) 影响卡房尾矿库土壤微团聚体结构稳定性的重金属化合物为 CuO 和 ZnO,CuO 与 ZnO 在 0~8 m 深度内呈现对微团聚体稳定性的贡献水平为 2:1,在 8~15 m 深度内呈现贡献水平为 1:1。

参考文献:

- [1] 唐茹,孙钰翔,戴齐,等.土壤团聚体微结构研究方法及其进展[J].河南农业科学,2018,47(9):8-15.
- [2] 梁卫,袁静超,张洪喜,等.东北地区玉米秸秆还田培肥机理及相关技术研究进展[J].东北农业科学,2016,41(2):44-49.