

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2017082107

邓霞, 崔东, 王兴磊, 等. 伊犁煤矿土壤重金属累积对土壤酶活性的影响[J]. 环境化学, 2018, 37(7): 1554-1564.

DENG Xia, CUI Dong, WANG Xinglei, et al. Effects of heavy metal accumulation on soil enzyme activities in Yili coal mines[J]. Environmental Chemistry, 2018, 37(7): 1554-1564.

## 伊犁煤矿土壤重金属累积对土壤酶活性的影响\*

邓霞<sup>1</sup> 崔东<sup>1,2\*\*</sup> 王兴磊<sup>1</sup> 刘海军<sup>2</sup> 汪满菊<sup>2</sup> 赵阳<sup>3</sup>

(1. 污染物化学与环境治理重点实验室, 伊犁师范大学化学与环境科学学院, 伊宁, 835000;

2. 伊犁师范大学生物与地理科学学院, 伊宁, 835000; 3. 天山西部国有林管理局, 伊宁, 835000)

**摘 要** 本文以伊犁地区的庆华煤矿、铁厂沟煤矿和达达木图煤矿为研究区,对矿区周边土壤 4 个土壤深度 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm 的重金属含量(铜、锌、铅、镉、铬、镍)和土壤酶活性(脲酶、蔗糖酶、过氧化氢酶)进行分析,结果表明:(1)3 个矿区中,重金属铜的含量为 21.72—31.85 mg·kg<sup>-1</sup>,是国家土壤背景值的 0.6—0.9 倍;重金属锌的含量为 79.28—114.94 mg·kg<sup>-1</sup>,是国家土壤背景值的 0.8—1.1 倍;重金属铅的含量为 44.39—60.19 mg·kg<sup>-1</sup>,是国家土壤背景值的 1.7—2.3 倍;重金属镉的含量为 0.54—2.33 mg·kg<sup>-1</sup>,是国家土壤背景值的 0.9—3.9 倍;重金属铬的含量为 27.71—48.08 mg·kg<sup>-1</sup>,是国家土壤背景值的 0.4—0.8 倍;重金属镍的含量为 9.25—18.07 mg·kg<sup>-1</sup>,是国家土壤背景值的 0.15—0.3 倍;(2)铜、锌、铬、镍、铅与脲酶活性呈显著相关( $P < 0.01$ ),相关系数分别为-0.391, -0.547, -0.502, -0.656, 0.477, 铜、锌、铬、镍、铅与过氧化氢酶活性呈显著相关( $P < 0.01$ ),相关系数分别为-0.384, -0.563, -0.559, -0.693, 0.447,这表明过氧化氢酶活性和脲酶活性可以反映重金属铜、锌、铬、镍、铅 5 种重金属元素的污染程度;蔗糖酶活性与锌、铬、镍、铅呈显著相关( $P < 0.05$ ),相关性系数分别为-0.359, -0.404, -0.371, 0.312,这表明蔗糖酶活性能反映锌、铬、镍、铅 4 种重金属元素的污染程度.

**关键词** 煤矿, 重金属含量, 土壤酶活性, 新疆伊犁.

## Effects of heavy metal accumulation on soil enzyme activities in Yili coal mines

DENG Xia<sup>1</sup> CUI Dong<sup>1,2\*\*</sup> WANG Xinglei<sup>1</sup> LIU Haijun<sup>2</sup> WANG Manju<sup>2</sup> ZHAO Yang<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Pollutant Chemistry and Environmental Treatment, College of Chemistry & Environmental Sciences,

YiLi Normal University, Yining, 835000, China; 2. College of Biology and Geography, Yili Normal University, Yining, 835000, China

3. State Owned Forest Management Bureau of Western Tianshan, Yining, 835000, China)

**Abstract:** This paper analyzed the total content of heavy metals (copper, zinc, lead, cadmium, chromium, nickel) and soil enzyme activities (urease, invertase, catalase) in Qinghua, Tiechanggou, and Dadamutu coal mines in Yili area, using the outdoor sampling method combined with laboratory analysis of mining area soil of four soil depths (0—10 cm, 10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm). In the three mining areas, copper content was 21.72—31.85 mg·kg<sup>-1</sup>, 0.6 to 0.9 times of the national soil background value. The content of heavy metal zinc was 79.28—114.94 mg·kg<sup>-1</sup>, 0.8 to 1.1 times the national soil background value. The content of Pb is 44.39—60.19 mg·kg<sup>-1</sup>, 1.7 to 2.3 times the national soil background value. The content of cadmium was

2017 年 8 月 21 日收稿(Received: August 21, 2017).

\* 伊犁师范学院污染物化学与环境治理重点实验室开放课题科研项目(2017HJZD03)资助.

Supported by the Research Project of Key Laboratory of Pollutant Chemistry and Environmental Control, Yili Normal University(2017HJZD03).

\*\* 通讯联系人, Tel: 15199226970, E-mail: cuidongw@126.com

Corresponding author, Tel: 15199226970, E-mail: cuidongw@126.com

0.54—2.33  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 0.9 to 3.9 times the national soil background value. The content of chromium was 27.71—48.08  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 0.4 to 0.8 times of the national soil background value; and nickel content of heavy metals was 9.25—18.07  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 0.15 to 0.3 times of the national soil background value. Copper, zinc, chromium, nickel, lead and urease activity were significantly correlated ( $P < 0.01$ ), the correlation coefficients were  $-0.391$ ,  $-0.547$ ,  $-0.502$ ,  $-0.656$ ,  $0.477$ , copper, zinc, chromium, nickel, lead and catalase activity were significantly correlated ( $P < 0.01$ ), and the correlation coefficients were  $-0.384$ ,  $-0.563$ ,  $-0.559$ ,  $-0.693$ , and  $0.447$ , This shows that catalase activity and urease activity can reflect the pollution degree of the five heavy metals—copper, zinc, chromium, nickel, and lead; The invertase activity was significantly correlated with zinc, chromium, nickel, and lead ( $P < 0.05$ ), the correlation coefficients were  $-0.359$ ,  $-0.404$ ,  $-0.371$ , and  $0.312$ ,. This indicates that the invertase activity can reflect the degree of pollution of zinc, chromium, nickel, and lead.

**Keywords:** coal mine, all amount of heavy metals, soil enzyme activity, Yili of Xinjiang.

煤矿的开采虽然给国家和当地的经济作出巨大的贡献,可是在经济发展的同时,也伴随着矿区土壤的大面积破坏及各种环境污染问题的产生<sup>[1]</sup>.在煤矿开采、运输过程中,重金属间接或直接进入土壤环境中,一旦超过土壤重金属的背景值,就会造成矿区土壤的重金属污染.重金属在土壤中易积累,不易被微生物分解,通过食物链和食物网造成环境的长期污染,同时危害人们的身体健康<sup>[2-5]</sup>.土壤酶是土壤微生物分泌出的一种活性物质,在土壤环境中的各种生化反应中起到不可替代的作用,因此其活性是可以反映土壤受污染状况<sup>[6-7]</sup>.相关的文献表明,土壤酶活性的强弱在一定程度上是可以作为指示土地被重金属污染程度的有效指标<sup>[8]</sup>.近年来,矿区的重金属污染成为学者关注的热点,如贾赵恒等<sup>[9]</sup>对大冶矿区农田土壤重金属形态及含量的研究,表明农田中重金属锰、铜、锌、铅和镉的污染是由于硫化物矿采造成的;苏文焱等<sup>[10]</sup>通过两种污染评价指数和生态风险评价法对赣州稀土矿山废弃地的土壤重金属进行评价,结果表明其综合潜在风险度为轻度,堆浸场和母液处理车间的汞含量超标.

新疆的矿产资源比较丰富,其中煤炭资源占全国探明储量的 35.7%,而伊犁地区的煤炭资源又占新疆预测储量的 18.84%,属于新疆预测储量丰富的地区,伊犁地区大大小小的煤矿有 100 多家,在伊宁市周边就有 10 家煤矿<sup>[11]</sup>.但是在开采、运输、储存等过程中,大量煤粉尘进入矿区及周边土壤,再通过食物链和食物网进入人体,对人的身体健康和生命安全造成威胁.

本文以伊犁地区的铁厂沟煤矿、庆华煤矿、达达木图煤矿为研究对象,分析其 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 和 30—40 cm 等 4 个深度的重金属污染状况及酶活性.不仅探讨了伊犁河谷地区煤矿的开采对矿区周边的土壤重金属含量的影响,还探讨了矿区土壤重金属污染和酶活性之间的关系.期望该研究对矿区土壤重金属污染监测及其修复提供科学的依据.

## 1 实验部分 (Experimental section)

### 1.1 样品采集

在伊宁市周边的庆华煤矿、达达木图煤矿及铁厂沟煤矿设定采样点,在每个矿区的东、南、西、北四个方向上各设定 3 个采样点,共采集 36 个土壤剖面.采用常规采样法,取样点 0—40 cm 的剖面土壤,每个采样点采集 4 个样品,按 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 和 30—40 cm 将土壤分层采样,3 个剖面同一土层的土样经混合后,取适量土样装袋密封.在实验室,剔除动、植物残体与石块后,将样品经通风阴凉风干处理后研磨,过 1mm 筛后装袋,用于分析土样重金属含量和土壤酶活性.研究区位置及采样分布图如图 1 所示.样品的理化性质和土壤类型如表 1 所示,3 个研究区的土壤的 pH 值都在中性范围左右,庆华煤矿的有机质含量的变异系数相对较大;3 个煤矿的速效磷和速效氮含量的变异系数相对较大;而速效钾含量的变异系数相对较小,变异系数较大说明样点之间的含量差异较大,变异系数较小说明样点之间的含量差异较小.

## 1.2 测定方法

### 1.2.1 土壤重金属全量的测定

称取 0.5 g 左右的土壤样品于聚四氟乙烯烧杯中,加 7 mL  $\text{HNO}_3$ 、3 mL  $\text{HClO}_4$  和 10 mL HF,放置过夜,电热板上高温档加热近干,冷却到常温,然后再加 3 mL  $\text{HNO}_3$ 、2 mL  $\text{HClO}_4$  和 5 mL HF,高温继续加热,直至完全排除各种酸,既当  $\text{HClO}_4$  白烟冒尽,加 1 mL 50% 的盐酸溶解固体,完全转移到 25 mL 的容量瓶中,再加入 0.5 mL  $100 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液,定容,采用 AAS 法测定样品浓度。

### 1.2.2 土壤酶活性测定

蔗糖酶活性用 DNS 做显色剂,其颜色深浅能确定样品中蔗糖酶的含量;脲酶活性用苯酚钠做显色剂,根据颜色深浅确定样品中脲酶的含量;过氧化氢酶活性以  $\text{KMnO}_4$  为指示剂,间接的测定土壤样品中过氧化氢酶的含量<sup>[12]</sup>。

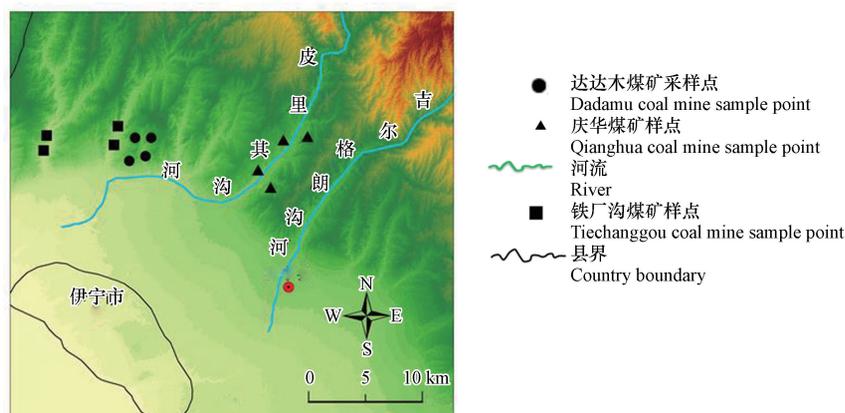


图 1 土壤研究区位置及采样点分布图

Fig.1 Location of the study area and distribution of sampling sites

表 1 土壤样品的理化性质和土壤类型

Table 1 The physical and chemical properties of the soil samples and soil types

采样区域 Sampling area	有机质 Organic matter/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效磷 Available phosphorus/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效钾 Available potassium/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	速效氮 Available nitrogen/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	pH	土壤类型 Soil type
铁厂沟煤矿	平均值	11.35	58.83	33.72	53.79	7.52
	最大值	16.37	136.12	50.88	91.00	7.80
	最小值	2.05	20.40	22.94	20.99	7.20
	变异系数	0.369	0.530	0.241	0.453	0.023
达达木图煤矿	平均值	17.39	38.58	29.94	63.56	7.54
	最大值	25.92	76.90	51.94	126.00	7.75
	最小值	7.96	19.75	14.96	34.97	7.20
	变异系数	0.287	0.429	0.351	0.439	0.024
庆华煤矿	平均值	15.69	53.58	17.21	41.99	7.53
	最大值	33.39	105.79	24.96	84.00	7.75
	最小值	7.05	26.49	10.96	20.99	7.20
	变异系数	0.586	0.437	0.258	0.508	0.586

## 1.3 实验数据分析与处理

所有数据采用 SPSS17.0 和 Microsoft Excel 2010 软件进行分析与处理。

## 1.4 评价方法

### 1.4.1 地累积评价法

地累积指数法是在 1969 年由德国科学家 Muller 考虑到人为因素和地质背景值对土壤重金属含量

的影响而提出的,它不仅能反应重金属在自然界中的分布特征,还能区分人为因素和自然因素对环境质量的影响<sup>[13-14]</sup>.近几年来,这种方法成为国内外学者研究重金属对土壤污染程度的一种方法<sup>[15-16]</sup>.其公式为(1):

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

其中, $I_{\text{geo}}$ 为地累积指数, $C_n$ 为土壤样品  $n$  的实际重金属含量,1.5 为波动系数, $B_n$ 为在沉积岩中重金属的地球化学背景值,这里  $B_n$ 取新疆土壤背景值<sup>[17-18]</sup>.重金属地累积指数分级与污染等级分类如表 2 所示.

表 2 地累积指数评价标准分级

Table 2 Classification of evaluation criterion of geoaccumulation index

地累积指数分级 Classification of geoaccumulation index							
$I_{\text{geo}}$	< 0	0—1	1—2	2—3	3—4	4—5	5—6
污染等级	无污染	轻-中度污染	中度污染	中-强度污染	强度污染	强-极强度污染	极强污染

## 2 结果与讨论 (Results and discussion)

### 2.1 伊犁煤矿土壤重金属含量分析

#### 2.1.1 土壤重金属含量统计特征

通过对铁厂沟、庆华和达达木图 3 座煤矿的 36 个采样点,144 个样品的土壤分析,结果如表 3 所示,从 3 座矿区的水平方向来看,土壤中含有量最高的是 Zn,最低的是 Cd;平均值含量从高到低依次为 Zn、Pb、Cr、Cu、Ni、Cd.其中,3 座矿区的 Pb 含量均超过国家土壤背景值<sup>[17-18]</sup>,超标倍数在 1.7—2.3 倍;铁厂沟煤矿和达达木图煤矿的 Zn 含量超过国家土壤背景值,超标倍数在 1.06—1.12 倍,Cd 含量超过国家土壤背景值的 1.38—3.9 倍,但庆华煤矿的 Zn、Cd 含量小于国家土壤背景值,可以看出研究区受 Pb、Zn、Cd 的污染较为严重.3 座矿区的 Cu、Cr、Ni 含量都低于国家土壤背景值.而对照点(远离矿区的,受采矿影响较小)的 Pb、Zn、Cd 含量大于新疆土壤背景值,同时也大于国家土壤背景值;而 3 座矿区的 Zn、Pb、Cd 的平均值大都比对照点的含量要高,由此可见,3 个研究区受这 3 种重金属的污染.

表 3 伊犁煤矿土壤重金属基本信息

Table 3 Basic information of soil heavy metal content in Yili mine

元素 Element	采样区域 Sampling area	采样深度 Sampling depth/cm	平均值 Average value/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	极大值 Maxium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	极小值 Minium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数 Coefficient of Variation	对照点 Control point/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	新疆土壤 背景值 Background value of Xinjiang/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	国家土壤 背景值 National background value/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
铜(Cu)	铁厂沟煤矿	0—10	30.81	34.08	29.00	0.07	24.06	26.7	35
		10—20	31.30	34.96	29.31	0.08			
		20—30	31.45	33.88	29.01	0.07			
		30—40	31.85	38.48	27.02	0.16			
	庆华煤矿	0—10	24.71	33.29	19.51	0.30			
		10—20	21.72	35.66	13.08	0.56			
		20—30	28.20	33.97	22.17	0.21			
		30—40	22.30	33.65	15.12	0.45			
	达达木图煤矿	0—10	25.06	28.43	22.82	0.08			
		10—20	28.11	30.63	26.19	0.06			
		20—30	27.38	30.28	21.54	0.12			
		30—40	28.82	30.54	26.22	0.06			

续表3

元素 Element	采样区域 Sampling area	采样深度 Sampling depth/cm	平均值 Averagevalue/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	极大值 Maxium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	极小值 Minium/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	变异系数 Coefficient of Variation	对照点 Control point/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	新疆土壤 背景值 Background value of Xinjiang/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	国家土壤 背景值 National background value/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
锌(Zn)	铁厂沟煤矿	0—10	106.58	114.20	97.87	0.08	110.11	68.8	100
		10—20	109.73	116.41	105.73	0.04			
		20—30	112.30	117.46	106.84	0.05			
		30—40	106.30	113.01	99.21	0.05			
	庆华煤矿	0—10	92.82	122.72	73.86	0.28			
		10—20	79.28	124.50	51.59	0.50			
		20—30	112.23	112.23	98.97	0.10			
		30—40	89.30	121.71	60.49	0.34			
	达达木图煤矿	0—10	110.75	120.14	102.11	0.07			
		10—20	114.94	119.30	107.22	0.04			
		20—30	106.81	115.15	91.08	0.08			
		30—40	112.34	120.49	101.67	0.06			
铅(Pb)	铁厂沟煤矿	0—10	49.66	54.48	43.82	0.09	58.21	19.4	26
		10—20	51.29	55.50	46.19	0.08			
		20—30	58.61	75.79	51.30	0.20			
		30—40	52.18	55.30	49.22	0.05			
	庆华煤矿	0—10	47.18	56.39	39.44	0.18			
		10—20	44.39	58.62	33.53	0.29			
		20—30	52.66	54.16	51.50	0.03			
		30—40	44.41	53.52	32.66	0.24			
	达达木图煤矿	0—10	58.06	64.02	51.57	0.08			
		10—20	60.19	66.02	55.63	0.06			
		20—30	53.64	62.13	44.87	0.11			
		30—40	54.00	58.56	48.94	0.06			
镉(Cd)	铁厂沟煤矿	0—10	2.33	4.51	1.11	0.65	0.636	0.12	0.6
		10—20	1.49	2.85	2.65	0.65			
		20—30	1.23	0.61	0.43	0.80			
		30—40	0.87	1.43	0.43	0.52			
	庆华煤矿	0—10	1.13	1.44	0.82	0.28			
		10—20	1.25	1.83	0.78	0.42			
		20—30	1.38	1.55	1.22	0.12			
		30—40	0.54	1.23	0.19	1.11			
	达达木图煤矿	0—10	0.83	1.25	0.22	0.57			
		10—20	1.28	1.68	1.04	0.17			
		20—30	0.83	1.86	0.22	0.66			
		30—40	0.87	1.88	0.15	0.65			
铬(Cr)	铁厂沟煤矿	0—10	42.89	52.94	34.09	0.21	36.93	49.3	61
		10—20	41.41	46.46	38.11	0.09			
		20—30	46.93	58.93	38.64	0.21			
		30—40	42.02	50.44	35.19	0.17			
	庆华煤矿	0—10	27.71	53.19	11.18	0.81			
		10—20	26.24	46.78	15.53	0.68			
		20—30	42.82	57.20	15.96	0.54			
		30—40	30.12	50.87	17.07	0.60			
	达达木图煤矿	0—10	48.08	52.32	40.30	0.10			
		10—20	46.80	64.74	36.17	0.22			
		20—30	43.58	51.62	39.02	0.12			
		30—40	44.50	47.59	38.94	0.08			



元素 Zn 和 Pb 大部分为轻-中度污染,污染频率分别为 81%和 94%;在庆华煤矿,元素 Cd 的污染等级最高为强度污染,强度、中-强度、轻-中度污染频率依次是 16%、67%、17%,说明在庆华煤矿重金属 Cd 污染较为分散,且大部分为中-强度污染,重金属 Pb 大部分为轻-中度污染,少部分为中度污染,重金属 Zn 有 58%的频率为无污染,42%为轻-中度污染;达达木图煤矿的污染情况与庆华煤矿相似,元素 Cd 的污染等级最高为强度污染,其强度、中-强度、中度、轻-中度、无污染频率依次为 13%、50%、21%、12%、4%,说明重金属元素 Cd 的污染较为分散且污染严重,元素 Pb 的污染等级为轻-中度污染的频率为 62%,中度污染的频率为 38%,元素 Zn 的轻-中度污染的频率为 79%,21%的频率为无污染。

## 2.2 伊犁矿区土壤酶活性分析

### 2.2.1 土壤脲酶活性

脲酶因其只针对土壤中的尿素具有分解能力,故其活性强弱与土壤中氮含量高低呈正相关关系,所以脲酶在氮循环中有着不可替代的作用<sup>[20-21]</sup>。如图 2 所示,在 0—10 cm,达达木图煤矿的脲酶活性比铁厂沟煤矿高出 56.3%,比庆华煤矿高出 194.1%,铁厂沟煤矿的脲酶活性比庆华煤矿高出 88.2%;在 10—20 cm,达达木图煤矿的脲酶活性比铁厂沟煤矿高出 69.0%,比庆华煤矿高出 113.0%,铁厂沟煤矿的脲酶活性比庆华煤矿高出 26.1%;在 20—30 cm,达达木图煤矿的脲酶活性比铁厂沟煤矿高出 69.0%,比庆华煤矿高出 78.5%,铁厂沟煤矿的脲酶活性比庆华煤矿高出 6%;在 30—40 cm,达达木图煤矿的脲酶活性比铁厂沟煤矿高出 67.0%,比庆华煤矿高出 131.4%,铁厂沟煤矿的脲酶活性比庆华煤矿高出 38.6%。总的来说,达达木图煤矿的脲酶活性最高,庆华煤矿的脲酶活性较低,这与煤矿开采面积以及运输和堆放有一定的关系;比较铁厂沟煤矿和庆华煤矿可发现,在 0—10 cm,铁厂沟煤矿的脲酶活性比庆华煤矿要高出将近 1 倍,但 10—40 cm,两个煤矿的脲酶活性相差较小,这可能是由于铁厂沟煤矿开采时间较长,现在又处于复垦时段,表层有新生植物,给微生物提供一个较好生存环境;庆华煤矿现处于大量开采时段,且为露天开采,地表植被被破坏且受人为影响较大,因而脲酶活性较低。

### 2.2.2 土壤过氧化氢酶活性

在土壤环境中,有些生化反应会产生  $H_2O_2$ , $H_2O_2$  会使植物根系腐烂而导致死亡,而过氧化氢酶能分解  $H_2O_2$ ,保护植物根系,减少  $H_2O_2$  对植物根系的损伤<sup>[22-23]</sup>。如图 3 所示,在 0—10 cm,达达木图煤矿的过氧化氢酶活性比铁厂沟煤矿高 35.4%,比庆华煤矿高 37%,铁厂沟煤矿的过氧化氢酶活性比庆华煤矿高 1.2%;在 10—20 cm,达达木图煤矿的过氧化氢酶活性比铁厂沟煤矿高 48.8%,比庆华煤矿高 122%,铁厂沟煤矿的过氧化氢酶活性比庆华煤矿高 49.1%;在 20—30 cm,达达木图煤矿的过氧化氢酶活性比铁厂沟煤矿高 68.4%,比庆华煤矿高 148.3%,铁厂沟煤矿的过氧化氢酶活性比庆华煤矿高 47.4%;在 30—40 cm,达达木图煤矿的过氧化氢酶活性比铁厂沟煤矿高 77.8%,比庆华煤矿高 150.9%,铁厂沟煤矿的过氧化氢酶活性比庆华煤矿高 41.1%。总的来说,过氧化氢酶活性由强到弱依次为达达木图煤矿 > 铁厂沟煤矿 > 庆华煤矿。这可能与土壤质地、开采方式及植被种类和覆盖面积有关。

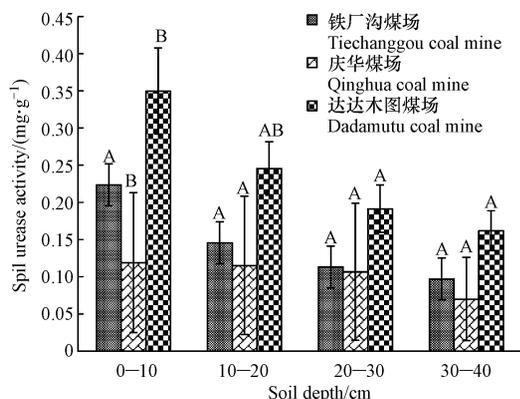


图 2 土壤脲酶活性

A、B 表示同一矿区不同土壤深度的显著差异 ( $P < 0.05$ )

Fig.2 Activity of urease activity

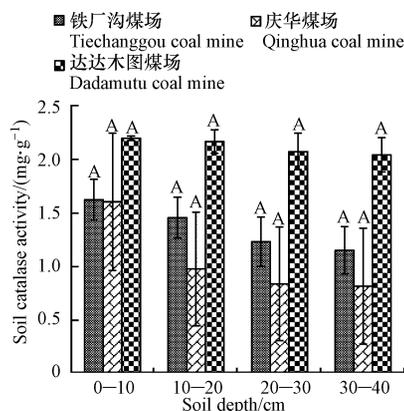


图 3 过氧化氢酶活性

A、B 表示同一矿区不同土壤深度的显著差异 ( $P < 0.05$ )

Fig.3 Activity of catalase

### 2.2.3 土壤蔗糖酶活性

蔗糖酶以蔗糖为底物,分解产物为葡萄糖和果糖,据相关研究可知,土壤蔗糖酶活性与微生物数量及其活性呈线性相关关系,蔗糖酶的存在能增加土壤中可溶性养分的含量,蔗糖酶活性也与土壤肥力密不可分,在一定程度上可以说蔗糖酶活性可以反映土壤的健康质量<sup>[24-25]</sup>.图4是铁厂沟煤矿、庆华煤矿和达达木图煤矿在0—10、10—20、20—30、30—40 cm等4个深度的蔗糖酶活性。

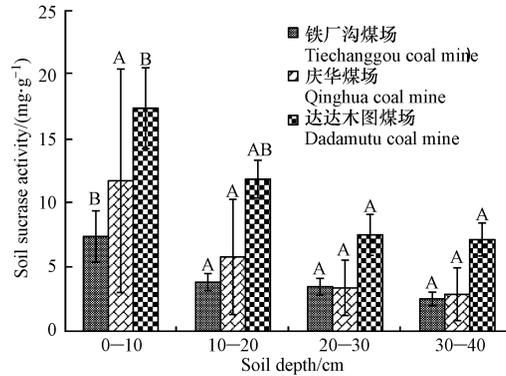


图4 蔗糖酶活性

A、B表示同一矿区不同土壤深度的显著差异( $P < 0.05$ )

Fig.4 Activity of sucrase

从图4中可以看出,在0—10 cm,达达木图煤矿的蔗糖酶活性比庆华煤矿高48.1%,比铁厂沟煤矿高134.1%,庆华煤矿的蔗糖酶活性比铁厂沟煤矿高58.1%;在10—20 cm,达达木图煤矿的蔗糖酶活性比庆华煤矿高103.8%,比铁厂沟煤矿高205.9%,庆华煤矿的蔗糖酶活性比铁厂沟煤矿高50.1%,在20—30 cm,达达木图煤矿的蔗糖酶活性比庆华煤矿高119.2%,比铁厂沟煤矿高114.2%,铁厂沟煤矿的蔗糖酶活性比庆华煤矿高2.2%;在30—40 cm,达达木图煤矿的蔗糖酶活性比庆华煤矿高144.9%,比铁厂沟煤矿高178.9%,庆华煤矿的蔗糖酶活性比铁厂沟煤矿高13.8%.总的来说,蔗糖酶活性由强到弱依次为达达木图煤矿、庆华煤矿、铁厂沟煤矿.这可能与煤矿的开采年限、开采方式、煤的种类及开采面积有关。

### 2.3 伊犁矿区土壤重金属与土壤酶活性的相关性分析

许多文献表明,由于地理自然因素与人为外界干扰因素的不同程度的影响,造成了不同地区土壤酶活性与土壤中的重金属之间具有不同的相关性<sup>[26-28]</sup>.本文对3个煤矿区的6种重金属和3种土壤酶进行相关性分析,结果如表5和表6所示。

表5 不同土层重金属总量与土壤酶活性之间的相关性

Table 5 Correlation between total amount of heavy metals and the total soil enzyme activities in different soil layers

采样深度 Sampling depth/cm	酶活性 Enzyme activities	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
0—10	脲酶 Urease	-0.692 **	-0.575 *	0.640 *	-0.051	-0.749 **	-0.644 *
	蔗糖酶 Sucrase	0.180	-0.651 *	0.662 *	-0.170	-0.668 *	-0.599 *
	过氧化氢酶 Catalase	0.047	-0.471	0.715 **	-0.312	-0.436	0.384
10—20	脲酶 Urease	-0.574 *	-0.701 **	0.700 **	-0.327	-0.522	-0.661 *
	蔗糖酶 Sucrase	-0.420	-0.655 *	0.812 **	0.072	-0.625 *	-0.675 *
	过氧化氢酶 Catalase	-0.798 **	-0.825 **	0.847 **	-0.105	-0.761 **	-0.803 **
20—30	脲酶 Urease	0.693 **	0.279	0.189	-0.043	-0.532	-0.506
	蔗糖酶 Sucrase	-0.201	0.009	-0.158	-0.364	0.154	0.295
	过氧化氢酶 Catalase	0.071	0.095	0.226	-0.365	-0.419	-0.639 *
30—40	脲酶 Urease	-0.506 *	-0.668 *	0.525	-0.355	-0.736 **	-0.587 *
	蔗糖酶 Sucrase	0.160	0.465	0.494	0.268	-0.463	0.498
	过氧化氢酶 Catalase	-0.651 **	-0.761 **	0.687 **	-0.046	-0.717 **	-0.747 **

注: \*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ .

表 6 矿区土壤重金属总量与土壤酶活性之间的相关性

Table 6 Correlation between total amount of heavy metals and the soil enzyme activity

	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
脲酶 Urease	-0.391 **	-0.547 **	0.477 **	-0.065	-0.502 **	-0.656 **
蔗糖酶 Sucrase	-0.147	-0.359 **	0.312 *	-0.052	-0.404 **	-0.371 **
过氧化氢 Catalase	-0.384 **	-0.563 **	0.447 **	-0.089	-0.550 **	-0.693 **

注: \*\*  $P < 0.01$ , \*  $P < 0.05$ .

从表 5 看,在 0—40 cm,元素 Cd 与脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶基本呈负相关,但相关性不显著,元素 Cu 与蔗糖酶的相关性不显著,元素 Pb 与脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶基本呈正相关;但在 20—30 cm,6 种重金属与 3 种酶活性之间的相关性大都不显著.而从表 6 可以看出,重金属 Cu、Zn、Cr、Ni、Cd 等 5 种元素与脲酶活性呈负相关,其中 Cu、Zn、Cr、Ni 与脲酶活性呈极显著负相关,但 Cd 与脲酶活性的相关性不显著,元素 Pb 与脲酶活性呈正极显著相关,说明脲酶可以反映重金属 Cu、Zn、Cr、Ni、Pb 这 5 种重金属的污染程度,其中 Cu、Zn、Cr、Ni 等 4 种元素对脲酶有一定的抑制作用,而元素 Pb 对脲酶活性有一定的刺激作用;元素 Zn、Cr、Ni 等 3 种元素和蔗糖酶活性呈极显著负相关,元素 Cu 和 Cd 与蔗糖酶呈负相关,其相关性不显著,元素 Pb 和蔗糖酶呈显著正相关关系,说明蔗糖酶活性能反映 Zn、Cr、Ni、Pb 等 4 种重金属的污染程度,其中 Zn、Cr、Ni 等 3 种元素对蔗糖酶活性有一定的抑制作用,而 Pb 对蔗糖酶活性有一定的刺激作用;过氧化氢酶与 Cu、Zn、Pb、Cr、Ni、Cd 等 6 种重金属之间的相关性与脲酶相一致.

重金属污染对酶活性的影响一般是抑制作用,但是重金属与土壤酶活性之间复杂的交互作用机理及部分重金属对酶活性的刺激机理尚不清楚,还需要进一步去探索矿区重金属超标对土壤酶活性的影响<sup>[29-31]</sup>.

### 3 结论 (Conclusion)

(1)通过对重金属全量特征分析可知,土壤中重金属受人为干扰最大的矿区是庆华煤矿,铁厂沟煤矿与达达木图煤矿区重金属受人为干扰较大;通过地累积指数评价可知,研究区受锌、铅、镉等 3 种重金属的污染,其中重金属镉的污染情况最严重.

(2)通过对土壤酶活性的分析可知,3 个矿区的过氧化氢酶活性和脲酶活性依次为达达木图煤矿 > 铁厂沟煤矿 > 庆华煤矿;蔗糖酶活性为达达木图煤矿 > 庆华煤矿 > 铁厂沟煤矿.

(3)通过对研究区的重金属全量和土壤酶活性分析可知,过氧化氢酶活性和脲酶活性可以反映重金属铜、锌、铬、镍、铅等 5 种重金属元素的污染程度;蔗糖酶活性能反映锌、铬、镍、铅等 4 种重金属元素的污染程度.

#### 参考文献 (References)

- [1] 庞文品,秦樊鑫,吕亚超,等.贵州兴仁煤矿区农田土壤重金属化学形态及风险评估[J].应用生态学报,2016,27(5):1468-1478.  
PANG W P, QIN F X, LV Y C, et al. Chemical speciations of heavy metals and their risk assessment in agricultural soils in a coal mining area from Xingren County, Gui Zhou Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(5): 1468-1478 (in Chinese).
- [2] 杨勇.锡林郭勒露天煤矿区土壤重金属分布特征与植被恢复研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.  
YANG Y. Study on spatial pattern of soil heavy metal and revegetation of Xilingol opencast coal mining [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016 (in Chinese).
- [3] 刘硕,吴泉源,曹学江,等.龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J].环境科学,2016,37(1):270-279.  
LIU S, WU Q Y, CAO X J, et al. Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City [J]. Environmental Science, 2016, 37(1): 270-279 (in Chinese).
- [4] 胡海文.煤矿区土壤重金属的迁移分布及污染溯源研究[D].合肥:合肥工业大学,2015.  
HU H W. Research on pollution source and transfer distribution of heavy metals to the soil in Huainan mining area [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [5] 贾亚琪,程志飞,刘品祯,等.煤矿区周边农田土壤重金属积累特征及生态风险评价[J].土壤通报,2016,47(2):474-479.  
JIA Y Q, CHEN Z F, LIU P Z, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in agricultural soil around the mining area and ecological risk assessment [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(2): 474-479 (in Chinese).

- [ 6 ] 舒媛媛,黄俊胜,赵高卷,等.青藏高原东缘不同树种人工林对土壤酶活性及养分的影响[J].生态学报,2016,36(2):394-402.  
SHU Y Y,HUANG J S,ZHAO G J, et al.Effects of afforestation with different tree species on soil enzyme activities and nutrient content in eastern Qinghai-Tibetan Plateau, China[J].Acta Ecologica Sinica,2016,36(2):394-402(in Chinese).
- [ 7 ] 申万墩,吴永贵,黄波平,等.贵州兴仁废弃煤矿区表层土壤重金属污染及其土壤酶活性[J].贵州农业科学,2011,39(3):111-115.  
SHEN W D,WU Y G,HUANG B P, et al.Heavy metal contamination and enzyme activity of topsoil in abandoned coal mining area in Xingren county of Guizhou Province[J].Guizhou Agricultural Sciences,2011,39(3):111-115(in Chinese).
- [ 8 ] 王广林,王立龙,沈章军,等.冶炼厂附近水稻田土壤重金属污染与土壤酶活性的相关性研究[J].安徽师范大学学报,2004,27(3):310-313.  
WANG G L,WANG L L,SHEN Z J, et al.Study on relation of heavy metal pollution in soils of rice lands near smeltery and enzyme activities [J].Journal of Anhui Normal University(Natural Science),2004,27(3):310-313(in Chinese).
- [ 9 ] 贾赵恒,罗瑶,沈友刚,等.大冶龙角山矿区农田土壤重金属形态分布及其来源[J].农业环境科学学报,2017,36(2):264-271.  
JIA Z H,LUO Y,SHEN Y G, et al.Speciation, distribution and sources of heavy metals in agricultural soils from the mining area of Longjiao Mountain in Daye City[J].Journal of Agro-Environment Science,2017,36(2):264-271(in Chinese).
- [ 10 ] 苏文焱,祝怡斌.赣州稀土矿山废弃地土壤重金属污染现状评价[J].有色金属,2016,68(4):81-85.  
SU W Q,ZHU Y B.Evaluation of the soil heavy metal pollution in Ganzhou rare earth mine wasteland[J].Nonferrous Metal,2016,68(4):81-85(in Chinese).
- [ 11 ] 郑海林.伊犁地区煤矿开采现状分析及改进安全生产的建议[J].今日科苑,2009(12):50.  
ZHEN H L. Present situation analysis of coal mining in Yili area and suggestions for improving safety production [J].Modern Science,2009(12):50(in Chinese).
- [ 12 ] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.  
GUAN S Y.Soil enzymes and their research methods[M].Beijing: Agricultural Press,1986(in Chinese).
- [ 13 ] 李倩,秦飞,季宏兵,等.北京市密云水库上游金矿区土壤重金属含量、来源及污染评价[J].农业环境科学学报,2013,32(12):2384-2394.  
LI Q,QIN F,JI H B, et al.Contents, sources and contamination assessment of soil heavy metals in gold mine area of upstream part of Miyun reservoir, Beijing, China[J].Journal of Agro-Environment Science,2013,32(12):2384-2394(in Chinese).
- [ 14 ] 刘庆.湖北某矿区土壤重金属污染状况研究[D].武汉:武汉工程大学,2015.  
LIU Q.Research on pollution state of heavy metal to the soil of mining area in Hubei province[D].Wuhan:Wuhan Institute of Technology,2015(in Chinese).
- [ 15 ] LOSKA K. Metal contamination of farming soils affected by industry [J].Environment International,2004,30:159-165.
- [ 16 ] 胡恭任,于瑞莲.应用地积累指数法和富集因子法评价 324 国道塘头段两侧土壤的重金属污染[J].中国矿业,2008,17(4):47-51.  
HU G R,YU R L. Application of index of geo-accumulation and enrichment factor in assessment of heavy metal contamination in soil of Tangtou section on No. 324 main roads [J].China mining magazing,2008,17(4):47-51(in Chinese).
- [ 17 ] 高宇潇,塔西甫拉提·特依拜,夏楠,等.新疆东天山北坡工业带土壤重金属污染评价[J].中国矿业,2017,26(3):86-92.  
GAO Y X,TASHPOLAT T,XIA N, et al. Analysis of soil heavy metal pollution assessment in the northern slope of eastern Tianshan mountains industrial belt in Xinjiang [J].China Mining Magazing,2017,26(3):86-92(in Chinese).
- [ 18 ] 赖营帅,马媛媛,王卫,等.新疆“金三角”地区重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境化学,2016,35(7):1381-1389.  
LAI Y S,MA Y Y,WANG W, et al.Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in the “Golden Triangle” region, injiang [J].Environmental Chemistry,2016,5(7):1381-1389(in Chinese).
- [ 19 ] 姚峰,包安明,古丽·加帕尔,等.新疆准东煤田土壤重金属来源与污染评价[J].中国环境科学,2013,33(10):1821-1828.  
YAO F,BAO A M,GULI J, et al.Soil heavy metal sources and pollution assessment in the coalfield of East Junggar Basin in Xin Jiang [J].China Environmental Science,2013,33(10):1821-1828(in Chinese).
- [ 20 ] 王莹,刘淑英,王平,等.不同土地利用方式对秦王川灌溉区土壤酶活性及土壤养分的影响[J].甘肃农业大学学报,2013,48(05):107-113.  
WANG Y,LIU S Y,WANG P, et al.Influence of land utilization type on soil nutrients and soil enzyme activity in Qinwangchuan irrigation area of Gansu Province [J].Journal of Gansu Agricultural University,2013,48(5):107-113(in Chinese).
- [ 21 ] 王兵,刘国彬,薛莲.退耕地养分和微生物量对土壤酶活性的影响[J].中国环境科学,2010,30(10):1375-1382.  
WANG B,LIU G B,XUE S.Effects of soil nutrient and soil microbial biomass on soil enzyme activities in abandoned croplands with different restoration age [J].China Environmental Science,2010,30(10):1375-1382(in Chinese).
- [ 22 ] 陈彩虹,叶道碧.4 种人工林土壤酶活性与养分的相关性研究[J].中南林业科技大学学报,2010,30(6):64-68.  
CHEN C H,YE D B.Study on the relationship between soil enzymes and nutrient of four artificial forests in Changsha urban-rural fringe [J].Journal of Central South University of Forestry and Technology,2010,30(6):64-68(in Chinese).
- [ 23 ] 方晰,田大伦,秦国宣,等.杉木林采伐迹地连栽和撂荒对林地土壤养分与酶活性的影响[J].林业科学,2009,45(12):65-71.  
FENG X,TIAN D L,QIN G X, et al.Nutrient contents and enzyme activities in the soil of *Cunninghamia lanceolata* forests of successive rotation and natural restoration with follow after clear-cutting [J].Scientia Silvae Sinicae,2009,45(12):65-71(in Chinese).
- [ 24 ] 吕桂芬,吴永胜,李浩,等.荒漠草原不同退化阶段土壤微生物、土壤养分及酶活性的研究[J].中国沙漠,2010,30(1):104-109.  
LV G F,WU Y S,LI H, et al.Microorganisms, soil nutrient and enzyme activity changing with the proceeding of desert steppe degradation in

- inner mongolia[J].Journal of Desert Research,2010,30(1):104-109(in Chinese).
- [25] 李文凤,房翠翠,牛玉昊,等.高原地区不同农作物土壤酶活性与土壤养分关系研究[J].北方园艺,2014(12):159-161.  
LI W F, FANG C C, NIU Y H, et al. The feature of soil enzyme activities with different crops and soil nutrient in the plateau region[J]. Northern Horticulture,2014(12):159-161(in Chinese).
- [26] 蒋颖,胡雪峰,舒颖,等.采矿活动对稻田土壤重金属累积与酶活性的影响[J].土壤通报,2015,46(2):494-501.  
JIANG Y, HU X F, SHU Y, et al. Effects of mining activities on heavy metal pollution and soil enzyme activities of paddy fields[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 494-501(in Chinese).
- [27] 李江遐,张军,谷勋刚,等.尾矿区土壤重金属污染对土壤酶活性的影响[J].土壤通报,2010,41(6):1476-1478.  
LI J X, ZHANG J, GU X G, et al. Study on the effects of tail mineral heavy metals pollution on soil enzymes' activities[J]. Chinese journal of Soil Science,2010,41(6):1476-1478(in Chinese).
- [28] 张平,甘国娟,廖柏寒,等.铅锌矿区重金属复合污染对土壤酶活性的影响[J].安全与环境学报,2013,13(3):147-150.  
ZHANG P, GAN G J, LIAO B H, et al. Impact of heavy-metal resulted pollution on soil enzyme activities in lead/zinc mining area[J]. Journal of Safety and Environment,2013,13(3):147-150(in Chinese).
- [29] 胡学玉,孙宏发,陈德林.大冶矿区土壤重金属积累对土壤酶活性的影响[J].生态环境,2007,16(5):1421-1423.  
HU X Y, SUN H F, CHEN D L. Influence of heavy metals pollution on the activities of soil enzyme in Daye mineral district in Hubei province, China[J]. Ecology and Environment, 2007,16(5):1421-1423(in Chinese).
- [30] 腾应,黄昌勇,龙健,等.铜尾矿污染区土壤酶活性研究[J].应用生态学报,2003,14(11):1976-1980.  
TENG Y, HUANG C Y, LONG J, et al. Enzyme activities in soils contaminated by abandoned copper tailings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2003,14(11):1976-1980(in Chinese).
- [31] 秦建桥,夏北成,周绪,等.粤北大宝山矿区尾矿场周围土壤重金属含量对土壤酶活性影响[J].生态环境,2008,17(4):1503-1508.  
QIN J Q, XIA B C, ZHOU X, et al. Soil enzymatic activities in heavy metals contaminated soils around Dabaoshan mine tailings, northern Guangdong[J]. Ecology and Environment,2008,17(4):1503-1508(in Chinese).