

## 银山铅锌矿对土壤微生物代谢活性的影响

张弛<sup>1</sup>,高东升<sup>2\*</sup>,赵明哲<sup>3</sup>,朱米家<sup>1</sup>,姚俊<sup>1</sup>

1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083

2. 山东农业大学 园艺学院, 山东 泰安 271018

3. 北京中交桥宇科技有限公司, 北京 100102

**摘要:** 本文以银山铅锌矿为研究对象, 土样采自三个不同功能区(主采矿区, 酸性废水沟附近, 农田土壤), 每个功能区采集 3 个不同深度的剖面样品 (0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm), 利用内梅罗土壤综合污染指数法对土壤样品进行重金属污染评价。结果显示: 主采矿区由于长期重金属开采污染情况较严重, 内梅罗指数范围为 3.75~6.17, 达到了中度污染以上水平。其他地区污染相对较轻, 除了农田土壤 20~40 cm 土样外, 基本都处于轻度污染或安全水平。应用微量热法和脲酶相结合的方法对土壤中的微生物活性进行研究, 发现微生物代谢活性受到土壤重金属污染的抑制, 主采矿区土壤中总放热量  $Q$  和生长速率常数  $k$  均为三个地区最低。用 SPSS 软件进行相关性分析表明, 生长速率常数  $k$ , 总放热量  $Q$  与内梅罗指数有显著的相关性。生长速率常数  $k$  为微生物代谢中具有代表性的指标。

**关键词:** 铅锌矿; 土壤污染; 微生物

**中图分类号:** X53

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2016)06-0814-06

## Impacts of Pb and Zn from Yinshan Mine on the Microbial Metabolic Activities in Soil

ZHANG Chi<sup>1</sup>, GAO Dong-sheng<sup>2\*</sup>, ZHAO Ming-Zhe<sup>3</sup>, ZHU Mi-jia<sup>1</sup>, YAO Jun<sup>1</sup>

1. School of Civil & Environmental Engineering/Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China

2. College of Horticulture/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

3. Beijing CCCC Qiaoyu Science and Technology Co., Ltd, Beijing 100083, China

**Abstract:** This study mainly focus on Yinshan mine. Soil samples were collected from three different areas ( main mining area, area near acid mine drainage pipe, farmland near Jishui river). From each site, three different samples were collected from different depth (0-20 cm, 20-40 cm, 40-60 cm). Nemerow index was applied to assess the heavy metal pollution in soil samples. The results revealed that heavy metal pollution in main mining area was serious due to long-term mining activity. The nemerow index ranged from 3.75 to 6.17, which was above middle high pollution. The other areas had relatively lighter pollution, which were light or warning level except sample 8. The combination of microcalorimetry and urease method were used to study the microbial metabolism activity in soils. The results showed that microbial activity was inhibited by heavy metal pollution, the total released heat  $Q$ , the constant growth rate  $k$  were lowest among the three areas. The SPSS software was used to analyze correlation between different parameters, which showed that the total released heat  $Q$ , the constant growth rate  $k$  had high correlation with nemerow index. The constant growth rate  $k$  was representative indicator in microbial metabolism.

**Keywords:** Pb and Zn mine; soil pollution; microbial

铅锌矿资源是国民经济发展中的重要资源。我国铅锌矿无论在储量、生产和消费能力上都处于世界前列。目前探明的全国铅矿储量约为 4141 万 t, 居世界第 2 位。而锌矿资源储量为 9711 万 t, 居世界第 1 位。但随着我国铅锌矿产业的迅速发展, 铅锌矿山大量开采, 使得矿山周边的环境污染日益严重<sup>[1]</sup>。铅锌矿区的重金属污染常常表现为 Pb、Zn、Cd、Cu 等多种重金属复合污染的特点。长期的矿业开采活动会造成重金属的富集、造成地下水污染等环境问题, 进而影响当地的土壤生态系统。不像水和空气污染一样, 土壤重金属难以降解, 一旦污染, 很难从土壤中清除, 长期的重金属累积, 不仅对植物和微生物造成危害, 还会通过食物链对人类的健康造成影响<sup>[2]</sup>。因此对于铅锌矿区的重金属污染情况非常有必要进行研究和检测<sup>[3,4]</sup>。

土壤中微生物群落占土壤生物量中很大一部分, 因为跟土壤紧密接触, 所以对土壤中污染情况

**收稿日期:** 2016-05-20

**修回日期:** 2016-05-29

**基金项目:** 中国国家自然科学基金重点项目(41430106); 中国环保部公益项目(201509049)

**作者简介:** 张弛(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事重金属污染土壤研究. E-mail: zhangchiustb@foxmail.com

**\*通讯作者:** Author for correspondence. E-mail: dsgao@sdau.edu.cn

会有很好的响应。相对于土壤中的动植物,微生物对于重金属的刺激要敏感的多<sup>[5,6]</sup>,已经被认为最有潜力评价土壤环境质量的指标<sup>[7]</sup>。传统的监测土壤微生物活性的方法包括土壤呼吸作用、土壤酶作用等,但这些方法都操作较繁琐,不能实时在线的反映微生物群落活性<sup>[8]</sup>。微量热法是近年来兴起的一种实时、在线原位监测土壤中微生物活性的方法。可以有效的监测土壤中的污染物,被广泛应用于土壤中污染物的毒性评价,前人对于微量热的使用方法做了大量的报道。微量热法对于研究重金属对土壤中微生物代谢活性的影响有着非常好的作用<sup>[9,10]</sup>。

银山铅锌矿位于江西省德兴市,隶属于江西铜业公司,有着40多年的开采历史,常年的开采活动给周围的生态环境造成了一定的影响。前人对银山铅锌矿的重金属污染情况做了一些研究,但大都集中于酸性矿坑水,对该矿区功能区域缺乏研究<sup>[11-13]</sup>。本文利用内梅罗指数法评价了银山铅锌矿三个不同功能区域的重金属污染情况,利用微量热和脲酶相结合的方法,探讨了重金属污染与土壤中微生物群落活性之间的相互关系,以期对矿区重金属生态风险评价提供一定的理论依据。

## 1 研究方法

### 1.1 采样地点

银山铅锌矿现在日产矿石2500多t,铅锌矿石1500多t,铜硫矿石1000t。银山铅锌矿位于汲水河附近。汲水河汇入乐安河,最终流入中国最大的淡水湖泊鄱阳湖。本次研究从银山铅锌矿的3个不同的功能区域选取了3个典型点位,每个点位采集了3个不同深度的剖面样品(0~20 cm, 20~40 cm, 40~60 cm),总共9个土壤样品。YS1点(1~3号土样)位于采矿中心区,YS2点(4~6号土样)位于银山铅锌矿的酸性废水沟附近,YS3(7~9号土样)位于下游汲水河农田附近。所有样品均用塑料密封袋封存。其中一部分土壤样品经风干,研磨,过筛后用于土壤理化性质和重金属含量的测定。另外一部分土壤样品立刻放入-20℃冰冻箱中保存,用于分子生物学的研究。其余所有样品均放入4℃下保存。

### 1.2 土壤理化性质和重金属含量的测定

采用常规方法测定土壤的基本理化性质。把土壤样品放于105℃的烘箱中烘干,测定土壤的含水率。 $WC = (m_w - m_d) / m_d \times 100\%$ 。WC为土壤含水率,%;  $m_w$ 为湿土质量;  $m_d$ 为干土质量<sup>[14]</sup>。

土壤pH值采用pH计(OHAUS Starter 2C)测定。往10g土样加入25mL蒸馏水,混匀后用pH计测定悬浮液中的pH值。土壤总氮(TN)通过凯氏定氮法进行测定。有机磷(AP)测定通过钼锑抗比色法进行测定。测定有机碳(TOC)时先通过HCl酸化处理48h去除无机碳,然后用CHNS/O元素分析仪(Perkin-Elmer,美国)进行测定。

所有的土壤样品先用浓硝酸酸化,然后用ICP-OES法测定各种主要重金属的含量(Cd, Cr, Zn, Mn, Pb和Ni)。

### 1.3 微量热测定土壤中微生物活性

测定土壤中微生物的代谢活性采用TAM III多通道微量量热仪(瑞典)。4.0 mL的不锈钢安瓿瓶在灭菌锅中高压灭菌后置于100℃烘箱中烘干。称取1.0g土壤样品置于安瓿瓶中,加入5.0mg硫酸铵和5.0mg的葡萄糖的混合溶液0.2mL。安瓿瓶用不锈钢盖封装好放入微量量热计中,实验室温度保持28℃。微量热仪会记录下微生物生长过程的时间-热功率曲线。总放热量 $Q_{total}$ ,微生物生长速率常数 $k$ 和微生物代谢焓 $\Delta H_{met}$ 可以从时间-热功率曲线中计算得出。生长速率常数 $k$ 可以从公式 $\ln Pt = \ln P_0 + kt$  (1)中计算得出。 $t$ 是时间, $P$ 是时间 $t$ 时的热功率, $P_0$ 对数生长期开始的功率。从时间-热功率曲线中可以直接得出达到最大输出功率的时间( $t_{max}$ )和最大输出功率 $P_{max}$ 。

### 1.4 土壤脲酶活性的测定

取5g土壤样品放入50mL离心管中,加入1mL甲苯后混匀静置15min<sup>[5]</sup>。然后加入10mL10%的尿素和20mL的柠檬酸盐缓冲液(pH=6.7),混匀,置于37℃的培养箱中放置24h。之后用37℃的水稀释混匀后,过滤。取3mL滤液转移到50mL容量瓶中,加入10mL蒸馏水,4mL的苯酚钠

溶液 (1.35 M) 和 3 mL 的次氯酸钠溶液, 静置 20 min 后稀释到刻度。用紫外分光光度计测吸光度。测出数值用标准曲线换算成脲酶活性。

### 1.5 内梅罗指数法

本研究中, 内梅罗指数法被用来评价土壤的环境质量。内梅罗综合指数法是基于重金属总量和中国环境质量标准所得出。计算公式为:  $P = \{[(p_{iav})^2 - (p_{imax})^2 / 2]\}^{1/2}$ 。  $p_{iav}$  是各重金属单因子指数法的平均值,  $p_{imax}$  是重金属单因子指数法的最大值。

## 2 结果和讨论

### 2.1 土壤理化性质分析

表 1 土壤理化性质参数

Table 1 Physical-chemical parameters of soil samples

土壤样品 Samples	总有机碳(g/kg) TOC	有机质(g/kg) Organic matter	pH	电导率(μs) Conductivity	有效磷(mg/kg) AP	总氮(g/kg) TN
1	12.200	21.033	5.93	2405.0	32.13	0.099
2	18.037	31.096	5.93	2147.5	35.31	0.068
3	14.159	24.410	7.19	2365.0	23.42	0.132
4	8.272	14.261	3.00	1197.0	87.52	0.339
5	17.812	30.708	4.63	775.0	17.33	0.688
6	8.038	13.858	3.14	754.5	16.65	0.326
7	11.783	20.314	4.44	146.0	17.23	0.514
8	10.375	12.156	5.12	180.5	21.23	0.613
9	9.379	16.169	5.01	190.7	59.65	0.774

从表 1 可以看出土壤样品总体呈酸性, 尤其是 4~6 号样品位于酸性排水沟附近, pH 值最低达到 3, 可见周围土壤受到了酸性排水沟一定的影响。此外, 土壤的总氮和有效磷含量会对微生物的生长产生一定影响。

### 2.2 重金属污染评价

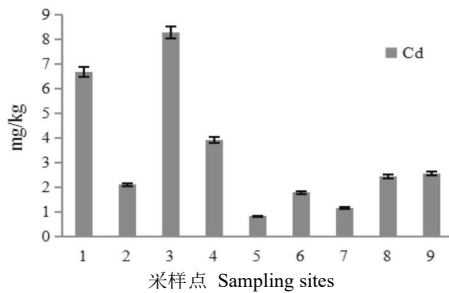


图 1 各土壤样品重金属含量 (Cd)  
Fig.1 Cd content in soil sample sites

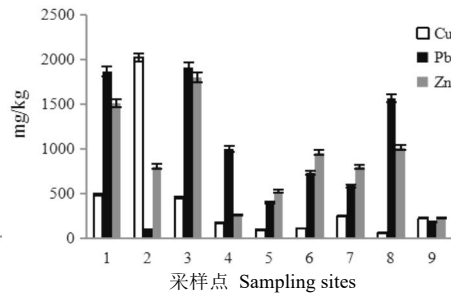


图 2 各土壤样品重金属含量 (Cu, Pb, Zn)  
Fig.2 Cu, Pb, Zn contents in soil sample sites

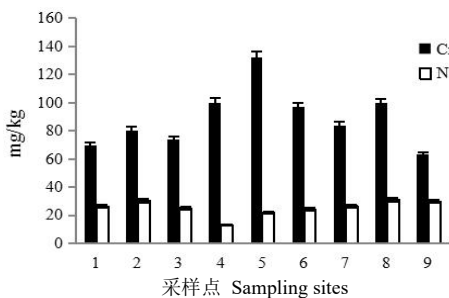


图 3 各土壤样品重金属含量 (Cr, Ni)  
Fig.3 Cr, Ni contents in soil sample sites

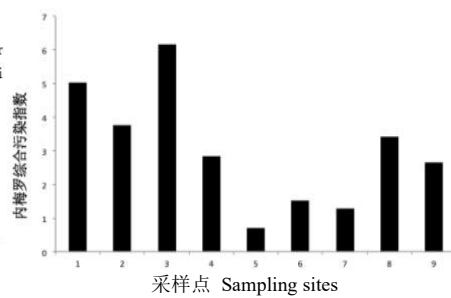


图 4 各采样点内梅罗综合污染指数  
Fig.4 Nemerow indexes in soil sample sites

本研究采用内梅罗指数法来评价银山铅锌矿区的土壤重金属综合污染情况。内梅罗指数法 ( $P$  值) 被广泛应用于土壤的环境污染评价。重金属的污染程度越大, 内梅罗综合污染指数也就越大。基于这个指数, 土壤被划分为 5 个污染等级: 清洁 ( $P < 0.7$ ), 预防 ( $0.7 < P < 1.0$ ), 轻度污染 ( $1.0 < P < 2.0$ ),

中度污染 ( $2.0 < P < 3.0$ ), 重度污染 ( $P > 3.0$ ) [15]。图 4 表示本研究中土壤的内梅罗指数从 0.71 到 6.17 不等。图 4 中可以明显看出, 采矿区的土壤重金属污染情况最为严重, 依据深度不同, 分别为 5.03, 3.75 和 6.17。采矿区的污染程度均达到了重度污染水平。酸性排水沟附近的土壤污染具有较大差异。其中表层土样 4 污染程度较高, 达到了中等污染程度。中层和表层土壤只是受到了轻微的污染。洎水河附近的农田土壤则是表层受污染较轻, 中层和底层土壤受污染较重。本文以 GB15618-1995 II 级标准作为污染程度的评价标准, 同时参考江西省土壤环境背景值进行分析发现, 三个采样区中 Cd 均比较严重, 其中采矿区的  $w(Cd)$  的平均值达到 5.68, 超出 II 级评价标准 20 倍之多, 为造成当地重金属污染的主要元素。另外的主要污染元素为 Pb, Zn, Cu, 这与银山铅锌矿主产铅锌铜矿石相符合。污染情况中主采矿区的 Pb, Zn, Cu 污染均为最严重, 分别超出 II 级标准的 5 倍, 6 倍和 19 倍。说明主采矿区的土壤由于长期的矿石采集, 受到了严重的重金属污染, 急需治理。江西省土壤环境背景值均要低于 GB15618-1995 II 级标准。

2.2 微量热代谢活性

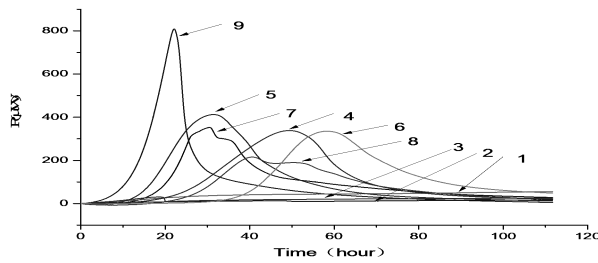


图 5 各采样点的微量热时间-功率曲线

Fig.5 Power-time curves of the soil samples

表 2 各采样点的微量热代谢参数

Table 2 Microcalorimetric parameters of soil sample sites

土壤样品 Samples	$Q^a$ (J/g)	$P_{max}^b$ ( $\mu W$ )	$T_m$ (h)	$k^c$ (/h) $\times 10^{-3}$	$r^2_d$
1	15.61 $\pm$ 0.20	54.9 $\pm$ 0.89	110.51 $\pm$ 2.12	0.08581 $\pm$ 0.0013	0.9785
2	4.48 $\pm$ 0.07	17 $\pm$ 0.22	110.55 $\pm$ 0.77	0.04482 $\pm$ 0.0011	0.91916
3	7.81 $\pm$ 0.12	30.5 $\pm$ 0.46	18.28 $\pm$ 0.13	0.06377 $\pm$ 0.0053	0.99739
4	41.03 $\pm$ 0.86	337.94 $\pm$ 2.56	49.67 $\pm$ 0.87	0.10985 $\pm$ 0.0063	0.99044
5	42.4 $\pm$ 1.23	412.14 $\pm$ 2.38	31.45 $\pm$ 0.46	0.17736 $\pm$ 0.0071	0.99173
6	41.36 $\pm$ 2.12	335.065 $\pm$ 3.66	58.21 $\pm$ 0.52	0.11591 $\pm$ 0.0051	0.99128
7	38.13 $\pm$ 1.34	352.489 $\pm$ 4.21	30.52 $\pm$ 0.31	0.21584 $\pm$ 0.0068	0.99727
8	29.92 $\pm$ 0.76	215.372 $\pm$ 1.76	40.71 $\pm$ 0.78	0.13889 $\pm$ 0.0046	0.98249
9	39.55 $\pm$ 0.53	808.417 $\pm$ 9.31	22.10 $\pm$ 0.23	0.17317 $\pm$ 0.0049	0.9906

土壤微生物的活动会受到土壤性质的影响。当土壤的化学性质、物理性质和其他一些环境因素变化时, 土壤的微生物代谢活动也相应受到影响, 进而影响到微生物代谢热的释放程度。这些代谢热的变化便可以通过微量热仪器检测出来[16]。

由图 3 可知, 除了样品 1, 2, 3 之外, 其余土样都符合土壤微生物的典型生长曲线, 大致可以分为延迟期、增殖期、对数生长期、延缓期、营养耗尽期、内源代谢期、典型衰亡期、潜伏期[17]。根据生长曲线的不同, 大致可以分为三类: 1.土壤样品 1、2、3, 此三个土壤样品采集于采矿集中区, 通过热功率曲线可见, 此地土壤样品放热量非常低, 一直处于延迟期, 没有呈现出典型的微生物生长曲线, 说明此地受重金属的污染程度较重, 微生物的活性非常低。2.土壤样品 4、6、8 达到最大输出功率  $P_{max}$  的时间较为接近, 生长速率常数  $k$  相近, 说明此三土样的土壤微生物活性较为相似。3. 土样 5、7、9 延迟期较短, 达到最大输出  $P_{max}$  的时间较短, 其中 9 号土样的最大输出功率  $P_{max}$  超过了 800  $\mu W$ , 生长速率常数均大于 0.17, 说明此三个土样的微生物代谢活性较高。值得注意的是, 8 号土样时间热功率曲线具有两个峰值, 说明当 8 号土样中的微生物利用营养物质进行代谢完后, 代谢活性降低, 转而转入内源代谢期, 利用其他营养源进行生长代谢 (如土壤中的有机质等), 这与前

人的研究相一致<sup>[18]</sup>。

各个土壤的土壤微量热代谢参数差别较大。但仍有一定的规律性，总放热量  $Q$  受内梅罗土壤综合污染指数的影响。在内梅罗指数较高的土壤 1, 2, 3 中总放热量  $Q$  值较低。其他土壤样品中，除了土样 8 以外，其余样品总放热量差别不大。由此可见，在内梅罗指数低于 3 的情况下，重金属污染对于微生物总放热量影响不大。而高于 3 时，内梅罗指数随着重金属污染的加剧，逐渐降低。生长速率常数  $k$  随着内梅罗指数的增加而下降。 $k$  的最高值出现在内梅罗指数较低的 7 号土样中(0.216)，而第二高的值出现在 5 号土样中 (0.177)。说明在低浓度重金属污染下，土壤中微生物的代谢活性较高。对于污染较为严重的主采矿区 1~3 号土样，生长速率常速  $k$  最低 (0.045~0.086)，说明在主采矿区的土壤样品中，受土壤中重金属的影响，基本观测不到微生物的生长代谢情况。本研究说明，生长速率常数  $k$  能很好的表征微生物的生长代谢过程，由热动力学方程计算得出的，可以定量的表征微生物生长活性的指标，此结论与前人研究相一致<sup>[19]</sup>。生长速率常数  $k$  是微量热中最具代表性的代谢热活性指标。

### 2.3 土壤脲酶活性分析

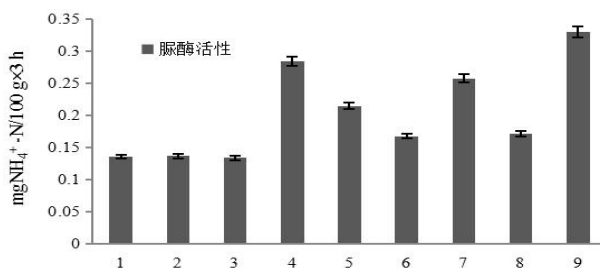


图 6 采样点脲酶的活性

Fig.6 Urease activity in sampling sites

脲酶活性可以看做是微生物向土壤中释放氨的能力。当土壤受到污染物污染时，脲酶活性会受到抑制，所以脲酶活性可以看做是一个土壤中表征微生物状态的一个指标。从图 4 中可以看出，1, 2, 3 号土样由于高重金属含量，严重抑制了脲酶的活性。而 9 号土样位于农田土壤中，呈现了最高的脲酶的活性。酸性废水沟附近的土样则是表层土样呈现最高活性，随着深度加深，土壤脲酶活性依次降低。

### 2.4 相关性分析

表 3 热力学参数与脲酶活性、内梅罗指数的相关性分析

Table 3 Correlation analysis on microcalorimetric parameters, urease activity and Nemerow index

内梅罗指数 Nemerow index	$Q$	$P_m$	$T_m$	$k$	脲酶
1					
$Q$	1				
$P_m$	-0.831**	1			
$T_m$	-0.614	0.785*	1		
$k$	0.272	-0.518	-0.561	1	
脲酶	-0.751*	0.796*	0.729*	-0.797*	1
	-0.710*	0.729*	0.884*	-0.526	0.613

采用 SPSS 软件对内梅罗综合污染指数法，脲酶活性以及微量热各代谢参数之间的相关性进行分析。由表 3 中相关性分析可以得出对微生物代谢活性的最大影响因子。由表可见，内梅罗指数跟总放热量之间呈显著负相关，为-0.831 ( $P<0.01$ )，与生长速率常速  $k$  以及脲酶活性呈明显负相关分别为-0.751 ( $P<0.05$ )，-0.710 ( $P<0.05$ )。说明重金属污染对土壤中的微生物代谢活性影响较大，显著的影响了微生物的生长及代谢过程。内梅罗指数跟  $P_m$  和  $T_m$  并无显著相关性，这与 XING 等<sup>[14]</sup>的研究相一致。

各微量热参数之间，生长速率常数  $k$  与其他热代谢参数相关性都很高，说明生长速率常数  $k$  是微生物生长代谢中最具代表性的参数<sup>[14]</sup>。

### 3 讨论

通过内梅罗指数法可以看出,银山铅锌矿主采矿区重金属含量较高,属于中度污染到重污染水平。其他区域中,随着深度不同,土样受到的污染程度不同,酸性废水沟附近的土壤表层受到了重金属轻度污染,而中层以下污染较轻。洎水河附近的农田土壤中下层为轻度污染水平。

微量热法研究了重金属污染土样中的微生物代谢活性,发现微生物活性随着重金属污染程度的不同而改变。主采矿区因为重金属污染程度高,所以微生物的活性非常低。生长速率常数  $k$  范围只有 0.044~0.086。酸性废水沟附近  $k$  值明显升高,而农田附近土样最高。总放热量  $Q$  显示高重金属浓度因为抑制了微生物的生长,而对放热量有明显抑制作用,在轻度污染水平及以下,对微生物放热量影响不大。

相关性分析显示,总放热量  $Q$ ,生长速率常数  $k$  和脲酶活性与内梅罗指数法有很好的相关性。可以对重金属污染具有一定的指示作用。该不同区域中受到了不同程度的重金属污染,应该采取相应措施对其进行防范,治理。

### 参考文献

- [1] 梁桂莲,钱建平,张 力.我国铅锌矿污染特点及修复技术[J].矿业研究与开发,2011(4):84-87
- [2] 莫福金,钱建平,王远炜,等.广西阳朔铅锌矿周边土壤和白菜汞含量及污染评价[J].生态环境学报,2016,25(1):156-161
- [3] 黄国勤.江西省土壤重金属污染研究//中国环境科学学会.“加快经济发展方式转变—环境挑战与机遇”[C].乌鲁木齐:中国环境科学学会学术年会,2011
- [4] Nabulo G, Young SD, Black CR. Assessing risk to human health from tropical leafy vegetables grown on contaminated urban soils[J]. Science of The Total Environment, 2010,408(22):338-5351
- [5] Guo H, Yao J, Cai M, *et al.* Effects of petroleum contamination on soil microbial numbers, metabolic activity and urease activity[J]. Chemosphere, 2012,87(11):1273-1280
- [6] Chen H, Zhuang R, Yao J, *et al.* Short-term effect of aniline on soil microbial activity: a combined study by isothermal microcalorimetry, glucose analysis, and enzyme assay techniques[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014,21(1):674-683
- [7] Andreoni V, Cavalca L, Rao MA, *et al.* Bacterial communities and enzyme activities of PAHs polluted soils[J]. Chemosphere, 2004,57(5):401-412
- [8] Brohon B, Delolme C, Gourdon R. Complementarity of bioassays and microbial activity measurements for the evaluation of hydrocarbon-contaminated soils quality[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001,33(7-8):883-891
- [9] Chen H, Rao H, He P, *et al.* Potential toxicity of amphenicol antibiotic: binding of chloramphenicol to human serum albumin[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014,21(19):11340-11348
- [10] Wang F, Yao J, Chen H, *et al.* Influence of short-time imidacloprid and acetamiprid application on soil microbial metabolic activity and enzymatic activity[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014,21(17):10129-10138
- [11] 刘木顺.银山铅锌矿矿坑水质水量变化规律初探[J].铜业工程,2000(4):59-63
- [12] 夏 青.银山铅锌矿尾矿处理实践[J].有色金属:选矿部分,2001(4):29-32
- [13] 曹琳辉.银山铅锌矿酸性矿坑水微生物群落结构分析[D].长沙:中南大学,2007
- [14] 邢 奕,张莹莹,司艳晓,等.铁矿区重金属污染对土壤微生物代谢活性的影响[J].环境科学研究,2015,28(12):1879-1886
- [15] 姚荣江,杨劲松,孟庆峰,等.苏北沿海某滩涂区土壤重金属含量及其污染评价[J].环境科学研究,2012,25(5):512-518
- [16] 余文文,姚 俊,王 飞,等.等温微量热法研究石油污染对土壤微生物活性的影响[J].环境工程学报,2013,7(9):3624-3628
- [17] Prado AGS, Airolidi C. Effect of the pesticide 2,4-D on microbial activity of the soil monitored by microcalorimetry[J]. Thermochemica Acta, 2000,349(1):17-22
- [18] 刘晓梅,马嘉奇,张 婧,等.等温微量热法在土壤微生物研究方面的进展[J].冰川冻土,2008(4):710-716
- [19] Chen Y, Yao J, Chen K, *et al.* Microcalorimetric investigation of the toxic action of pyrene on the growth of PAH-degrading bacteria *Acinetobacter junii*[J]. J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng, 2010,45(6):668-673