

电镀厂附近土壤重金属污染特征及其对微生物与酶活性的影响

杭小帅^{1,2}, 王火焰¹, 周健民¹, 杜昌文¹, 陈小琴¹

(1.中国科学院南京土壤研究所土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 南京 210008; 2.环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042)

摘要:通过野外调查和室内分析,对苏南某电镀厂附近旱地土壤重金属的时空变化特征及其对土壤微生物与酶活性的影响进行了研究。结果表明,研究区域土壤重金属 Zn 和 Cu 的全量与 DTPA 提取态含量形成明显以电镀厂为中心的扩散梯度分布,皆随距电镀厂距离的增加,浓度逐渐降低,其中 Zn 的全量由最高值 $1\ 305\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降至最低值 $273\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。由于电镀厂重金属污染物的作用,研究样点表层土壤 Zn 的浓度逐年增加,土壤 Zn 含量明显高于前期研究结果,且都达到污染水平,最高超标 4.2 倍,表明近年来 Zn 向土壤的扩散速度较快。研究区域土壤过氧化氢酶活性与提取态 Zn 呈显著正相关($P=0.016$),表现为激活;土壤微生物群落功能多样性及脱氢酶的活性与土壤重金属 Zn 的相关性不显著。因此,在研究区域微生物群落功能多样性与脱氢酶的活性不能用来指示土壤 Zn 污染。

关键词:土壤;重金属污染;微生物功能多样性;过氧化氢酶;脱氢酶

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2133-06

Heavy Metal Contamination Characteristics and Its Impacts on Microbial and Enzymatic Activities in the Soil Surrounding an Electroplating Factory

HANG Xiao-shuai^{1,2}, WANG Huo-yan¹, ZHOU Jian-min¹, DU Chang-wen¹, CHEN Xiao-qin¹

(1.State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2.Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection of China, Nanjing 210042, China)

Abstract: Based on the field investigation and laboratory analysis, this paper studied the characteristics of soil heavy metal temporal-spatial variation, and subsequent changes of microbial and enzymatic activities in the upland surrounding an electroplating factory located in south Jiangsu Province, China. The results indicated that total and DTPA-extractable concentrations of Zn and Cu in studied soils were distributed along a gradient, and the concentration decreased as the radius from the electroplating factory increased. There was a decrease of total Zn concentration from the highest ($1\ 305\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) to the lowest ($273\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Because of effects from factory contamination, Zn concentrations in studied sites increased year by year, and the contents exceeded last results in the corresponding sites. The contents of Zn in all sites exceeded the contamination level, and the highest value of Zn in a sampling site was 4.2 times higher than its maximum allowable concentration of Zn in agricultural land, suggesting that Zn diffusion speed from the factory was high in recent years. In soils of studied area, a significant positive correlation ($P = 0.016$) was found between catalase activity and DTPA-extractable Zn, indicating that Zn exhibits stimulating effect on catalase activity. However, the microbial community functional diversity and dehydrogenase activity in soils were not sensitive to the levels of Zn, implying that the diversity and dehydrogenase could not serve as appropriate indicators of Zn stress in soils of the study area.

Keywords: soil; heavy metal contamination; microbial community functional diversity; catalase; dehydrogenase

重金属污染是困扰全球的重要环境问题,随着社

会和经济的发展,重金属污染危害日益加重。在我国土壤重金属污染形势严峻,已引起了社会各界的广泛关注^[1]。由于相关污染源所产生的重金属污染物可在周围环境中发生迁移、转化,并最终进入土壤,导致土壤成为重金属污染物的源与汇^[2-4]。因此,对相关污染源,尤其对典型重金属污染源附近土壤重金属的研

收稿日期:2010-04-13

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB410810);中央级公益性科研院所基本科研业务专项

作者简介:杭小帅(1980—),男,博士,助理研究员,研究方向为重金属的环境行为与风险评价。E-mail:hangxiaoshuai@yahoo.com.cn

通讯作者:周健民 E-mail:jmzhou@issas.ac.cn

究,已成为众多学者关注的焦点。

土壤微生物是养分循环的重要组成部分,而一定范围内的重金属污染对土壤微生物可产生影响。酶作为土壤重要组成部分,其活性大小可较灵敏地反映土壤中生化反应的方向和强度,当土壤受到重金属污染时,土壤酶活性会随之发生变化。因此,土壤中某些微生物和酶活性的变化可在一定程度上反映土壤重金属的污染程度,进而可以作为其评价的指标。近年来,随着土壤微生物研究的不断深入,采用微生物学指标评价土壤重金属污染备受关注。当前,Biolog 测试系统已被广泛应用于不同生境土壤微生物群落功能多样性研究,其中,平均吸光值对土壤环境胁迫的反应比较敏感,尤其是重金属胁迫环境下^[5]。过氧化氢酶广泛存在于土壤中,它酶促过氧化氢的分解,有利于防止过氧化氢对生物体的毒害,其活性不同程度地受到土壤重金属的影响^[6-8]。土壤脱氢酶活性作为土壤质量和微生物活性的一个重要指标,也常用于反映重金属污染物对土壤微生物的影响程度^[9]。

电镀业是长江三角洲较为常见的企业之一,在电镀日常生产过程中,向周围环境排放含有重金属的废弃物^[10]。对苏南某电镀厂(近 30 a 厂史)的前期研究表明,该电镀厂已对周围环境构成了一定的影响,包括土壤、作物、水体和底泥等^[10-12]。本文进一步研究了电镀厂附近土壤重金属污染及其时空变化特征;分析了土壤微生物群落功能多样性、过氧化氢酶与脱氢酶活性的变化特征及其对重金属污染的响应,旨在为生物学评价土壤重金属污染提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集与保存

研究区域为苏南某电镀厂附近旱地。2005 年 7 月,土壤样品采集时间为当季作物大豆的盛花期,土壤样点分布如图 1 所示,根据地形地貌在旱地布置了 30 个样点。每个样点取表层(0~20 cm)土壤,土样分为两份。其中一份保存在 4℃条件下,以供短期内分析土壤酶的活性;另一份经风干,分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛,以供分析重金属提取态与全量。

2008 年 11 月,土壤样品采集时间为当季作物油菜的生长期。根据 2005 年研究结果,研究区域土壤已明显受到电镀厂以 Zn 为主的重金属污染,并且整个调查区域呈扇形分布,随着半径的增加,Zn 浓度有规律地下降,形成明显的梯度分布。按重金属 Zn 积累的梯度布点取样(图 1),样点分布在以电镀厂某拐角为

原点的射线上,距电镀厂距离如表 1 所示。共设置 5 个样点,每个样点 3 个重复,均匀分布在射线的垂线上。并在距电镀厂较远区域设置 3 个对照。共 6 个样点,18 个土样。每个样点取表层(0~20 cm)土壤,土样分为两份。其中一份在 4℃条件下保存,以供短期内分析微生物和酶的活性;另一份风干,分别过 2 mm 和 0.149 mm 筛,以供分析重金属提取态与全量。

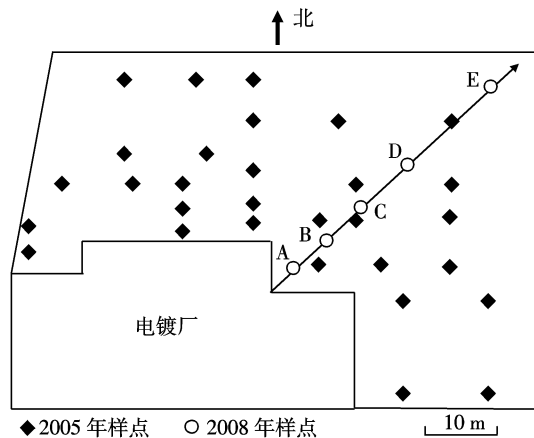


图 1 样点分布图

Figure 1 The distribution of sampling sites

表 1 样点与电镀厂距离

Table 1 The distance of sampling sites away from the electroplating plant

样点	A	B	C	D	E
距电镀厂距离/m	10	20	30	45	70

1.2 化学分析

1.2.1 土壤重金属全量与提取态

分析了土壤中 Pb、Zn、Cu、Ni 和 Cr 的全量和 DTPA 提取态。其中,土壤重金属全量采用反王水与高氯酸消煮^[13],加标准土壤样品(GBW-07403)进行质量控制;土壤提取态重金属含量采用 DTPA 法提取^[14]。重金属采用 ICP-AES 测定^[15-16]。

1.2.2 土壤微生物群落功能多样性

称取相当于 10 g 干重的混匀(过 2 mm 筛)新鲜土壤于含 100 mL 0.85% 的 NaCl 溶液的三角瓶,振荡 20~30 min。分别用梯度稀释法稀释至 10^{-3} 倍。在无菌室中用专用排孔加样器在 Biolog-eco 微平板上进行接种,接种量为 150 μ L,在 25℃条件下培养 7 d。期间,每隔 12 h 用 Biolog 自动读数装置在 590 nm 下测定吸光值。其中,培养 12 h 无吸光值,培养 96 h 不同处理间吸光值的差异性达到最大。反应孔的平均吸光

值、Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数及其均度参照 Zak 等^[17]和 Yang 等^[18]方法进行计算。

1.2.3 土壤酶活性

土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法^[19]测定。土壤脱氢酶(DHA)活性采用 TTC 还原法^[20-22]测定。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属

2.1.1 土壤重金属的含量与空间分布

2.1.1.1 重金属全量

2005 年研究^[12]表明,研究区域土壤重金属全量顺序为 $Zn > Cr > Cu > Ni > Pb$; 研究区域土壤已明显不同程度地受到电镀厂重金属污染物的污染,其中以 Zn 最为明显;且随着距电镀厂距离的增加,Zn 的浓度呈现规律梯度下降。2008 年研究区域对照土壤重金属全量如表 2 所示,Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 5 种重金属全量均高于前期的背景值,表明该区域土壤已受到人为活动的影响。电镀厂附近旱地 5 个点表层土壤(0~20 cm)2008 年的重金属全量如图 2 所示,重金属全量顺序为 $Zn > Cr > Cu > Ni > Pb$,与 2005 年研究的重金属全量顺序结果相一致。重金属 Cr、Ni 和 Pb 没有表现出梯度分布,5 个样点浓度相近,均接近于对照。而 Zn 与 Cu 呈现明显的梯度分布,表现为距离电镀厂最近的样点 A 浓度最高,分别达到 $1\,305\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $70.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,随着距电镀厂距离的增加,浓度逐渐降低。其中,Zn 在所研究的 5 个样点均高于对照值,且在距电镀厂 10~30 m 间急剧下降到 $442\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,在 30~70 m 间缓慢下降到 $273\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而 Cu 在样点 B,即距电镀厂 20 m 处已降至对照值的 $58.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。表明电镀厂已导致研究区域表层土壤出现了 Zn 和 Cu 的积累,但未出现其他重金属的积累。根据食用农产品产地环境质量标准^[23],Cr、Cu 和 Pb 都未出现超标;Ni 接近土壤环境质量标准;Zn 在 5 个样点含量均高于其标准,最高超标 4.2 倍。表明电镀厂已对附近土壤产生了 Zn 的污染。因此,电镀厂对附近土壤重金属的积累造成了影响,这与电镀厂产生的重金属污染物及其迁移扩散有关。

2.1.1.2 重金属提取态

2005 年土壤重金属 DTPA 提取态浓度如表 3 所示,其顺序为 $Zn > Cu > Pb > Ni > Cr$,与全量不完全一致,表明不同重金属在土壤中的移动性和生物有效性受其种类的影响。土壤重金属全量与其提取态相关性

(表 4)显示,土壤重金属全量(除 Pb)与其 DTPA 提取态呈显著相关,表明重金属 DTPA 提取态受其全量的影响。

2008 年土壤重金属 DTPA 提取态浓度见图 3,其顺序为 $Zn > Cu > Pb > Ni > Cr$,与土壤重金属全量顺序不

表 2 污染土壤重金属含量与标准、背景值的比较($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 2 The concentrations of heavy metals in the polluted soil as compared with some standards and/or backgrounds($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
全量	107±10	58.4±2.2	49.1±2.9	29.7±2.0	204±4
DTPA 提取态	0.080 8±0.003 6	7.80±0.33	1.77±0.06	3.49±0.08	1.83±0.15
背景值 ^a	49.0±5.9	24.6±0.5	29.1±3.8	15.5±3.6	78.3±6.9
标准 ^b	200	100	50	80	250

注:^a 参考 Hang 等^[12];^b 食用农产品产地环境质量评价标准(HJ332—2006)^[23],土壤环境质量评价限值, $6.5 < \text{pH} < 7.5$ 。

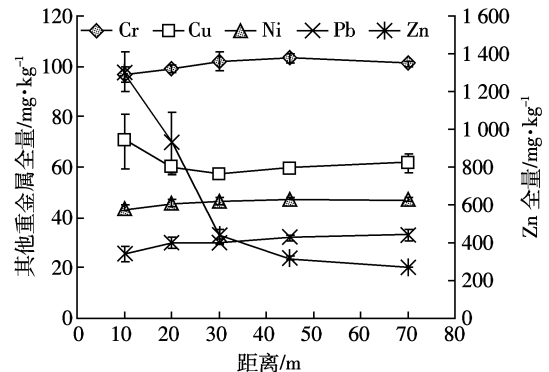


图 2 研究区域土壤重金属全量分布图

Figure 2 The distribution of total soil heavy metal concentrations in the study area

表 3 研究区域土壤重金属 DTPA 提取态含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 3 DTPA-extractable soil heavy metal concentrations in the study area($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

项目	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Mean	0.030	7.15	1.14	1.61	47.6
Std. deviation	0.012 7	3.68	0.524	0.469	50.9
Min	0.003 6	2.93	0.260	0.664	2.32
Max	0.054 1	22.6	2.12	2.70	188
CV/% ^a	41.9	51.4	46.1	29.1	107

注:^a CV 变异系数(%)。

表 4 研究区域土壤重金属全量与 DTPA 提取态的关系($n=30$)

Table 4 Correlations between total and DTPA-extractable soil heavy metal concentrations in the study area($n=30$)

项目	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
r	0.443	0.930	0.547	0.016	0.824
P	0.014	0.000	0.002	0.932	0.000

完全一致,但与 2005 年研究结果一致,原因同上。土壤重金属 DTPA 提取态在 5 个样点的分布与全量一致,表现为重金属 Cr、Ni、Pb 没有出现梯度分布,5 个样点浓度相近,均接近于对照。而 Zn 与 Cu 有明显的梯度分布,随着距电镀厂距离的增加,浓度逐渐降低。其中 Zn 的 DTPA 提取态均高于对照含量,Cu 靠近电镀厂的两个样点 DTPA 提取态也高于对照。相关性分析表明,土壤重金属全量与提取态含量皆呈较好的正相关性,其中 Ni 达到显著水平($r=0.920, P=0.027$),Zn 达到极显著水平($r=0.980, P=0.003$)。表明土壤重金属 DTPA 提取态含量受其全量的影响,与前期结果一致。

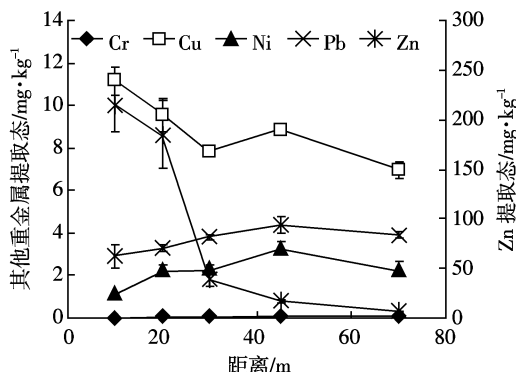


图 3 研究区域土壤重金属 DTPA 提取态分布图

Figure 3 The distribution of DTPA extractable soil heavy metal concentrations in the study area

2.1.2 土壤重金属的时空变化特征

因电镀厂未对研究区域产生 Cr、Ni 和 Pb 的影响,但对土壤 Zn 和 Cu 含量产生了影响。又由于 Cu 在 30 a 期间,仍然未对土壤形成污染。因此,只对土壤中 Zn 的时空变化进行分析。在 2005 年研究结果中,样点 A 处 Zn 的全量约在 $750 \sim 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围之间;样点 B 在 $500 \sim 750 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间;样点 C 约为 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;样点 D 和样点 E 低于 $200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而根据 2008 年研究结果(图 2)可知,5 个样点重金属全量均较 2005 年有所提高。表明研究区域 Zn 在表层土壤中出现了积累,浓度逐年增加,是由电镀厂重金属污染物所引起,且近年来扩散速度较快。

2.2 重金属对土壤微生物群落功能多样性的影响

2.2.1 平均吸光值及其与重金属的关系

平均吸光值 (AWCD, average well color development) 是微平板上反应孔的吸光值的平均数,其随时间的变化是微生物碳源利用强度的反映,也是微生物群落生理功能多样性的一个重要指标,最终的 AWCD 与土壤微生物群落中能利用单一碳源的微生物种类

及数目密切相关^[24]。Biolog-eco 培养过程中 2008 年不同样点土壤 AWCD 变化曲线如图 4 所示。微生物活性随培养时间的延长,不同样点土壤 AWCD 存在差异。其中,96 h 差异最为明显,样点 A 和 C 显著高于样点 B 和 D,而样点 E 与它们之间无显著差异,且样点 A 与 C 分别高于样点 B 与 D 约 1 倍,表明不同样点土壤微生物的碳底物利用能力不同。但不同土壤样点 AWCD 值的变化与重金属 Zn 浓度梯度分布变化并不一致,这与杨元根等^[25]研究结果相一致,可能是由于在长期重金属 Zn 的积累条件下,土壤本身对 Zn 具有较强的固定能力,抵御了 Zn 对土壤微生物的毒害;或是 Zn 的积累引起土壤微生物群落结构的显著改变而使其趋于均一化,导致不同样点土壤微生物的群落结构表现出较好的相似性。因而,不同样点之间 AWCD 值变化的差异可能主要是由其他影响因素所致。

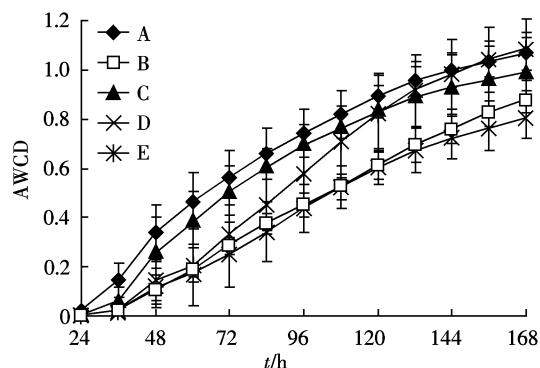


图 4 不同样点土壤微生物培养过程中 AWCD 变化

Figure 4 AWCD changes of soil microbial communities in different soil samples

2.2.2 微生物群落功能多样性与均匀度指数及其与土壤重金属的关系

Shannon 指数可表征土壤中微生物群落丰富度, Simpson 指数可评估土壤中微生物群落优势度, McIntosh 指数可反映土壤中微生物群落均匀度。表 5 为土壤微生物在培养 96 h 的 Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数及其均度。不同土壤样点 Shannon 指数、Simpson 指数和 McIntosh 指数及其均度之间差异有所不同,表现为样点 A 与 C 显著高于样点 B 与 D;而样点 E 与其他样点基本无显著差异,与土壤 AWCD 结果相一致,其原因同上。因此,该季节在研究区域土壤微生物群落功能多样性并不能反映土壤 Zn 的污染状况。

2.3 重金属对酶活性的影响

2.3.1 重金属对土壤过氧化氢酶的影响

通过对 2005 年土壤中过氧化氢酶的分析得出,

表 5 不同样点土壤微生物多样性与均匀度指数(96 h)

Table 5 Diversity and evenness indices for soil microbial communities in different sample sites(96 h)

样点	Shannon 指数	Shannon 均度	Simpson 指数	McIntosh 指数	McIntosh 均度
A	3.211±0.095a	0.935±0.028a	22.8±2.6a	4.819±0.395a	0.963±0.015a
B	2.979±0.116bc	0.868±0.034bc	16.3±2.4bc	3.486±0.120b	0.916±0.021bc
C	3.187±0.058a	0.928±0.016a	21.7±1.7a	4.658±0.467a	0.957±0.10a
D	2.836±0.135c	0.826±0.039c	14.3±2.2c	3.575±0.505b	0.895±0.025c
E	3.080±0.122ab	0.897±0.036ab	18.8±3.9ab	4.100±0.568ab	0.937±0.023ab

其活性的变幅为 3.91~14.4(以 1 h 后 1 g 土壤所消耗的 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KMnO}_4$ 毫升数表示)。土壤重金属含量与过氧化氢酶活性相关性分析表明,土壤过氧化氢酶活性与提取态 Cu 和 Zn 的相关系数分别为 0.700($P=0.000$)和 0.438($P=0.016$)。表现为土壤中提取态 Cu 和 Zn 激活了过氧化氢酶的活性,与杨志新等^[26]研究结果不一致。可能主要由于土壤的理化性质,以及室内培养污染土壤与原位污染土壤之间等的差异所致。

2.3.2 重金属对土壤脱氢酶的影响

土壤脱氢酶只存在于活微生物细胞内部,是表征土壤中微生物活性的一个重要指标^[27],也是催化土壤中有机物氧化还原反应的一种重要土壤酶^[21]。2008 年研究区域不同样点土壤脱氢酶活性(以 24 h 后 1 g 土壤产生 TPF 的毫克数表示)如图 5,样点 A 脱氢酶活性最高,显著高于样点 B、D、E,但与样点 C 无显著差异。总体上,脱氢酶活性与土壤 Zn 无显著相关,这与 Jiang 等^[20]在 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Zn 处理土壤中,脱氢酶活性之间无显著差异的结果相一致,原因可能为土壤对 Zn 具有较强的接纳能力,因而不至于改变脱氢酶的活性。因此,土壤脱氢酶在研究区域也不能指示土壤 Zn 的污染程度。

3 结论

研究区域重金属全量顺序为 $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb}$,

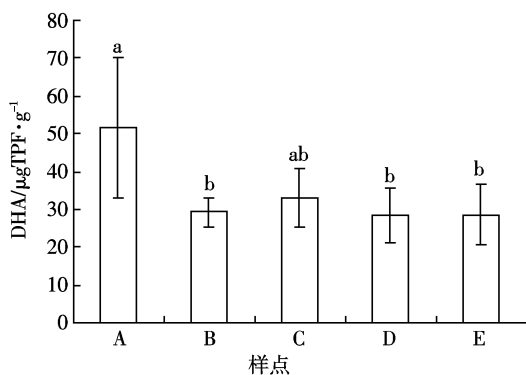


图 5 不同样点土壤脱氢酶的活性

Figure 5 Dehydrogenase activity of soils in different sample sites

重金属 Cr、Ni 和 Pb 没有表现出梯度分布,而 Zn 与 Cu 呈现明显的梯度分布,都随距电镀厂距离的增加,浓度逐渐降低,且 Zn 在 5 个样点含量均高于其环境质量标准。土壤重金属 DTPA 提取态在 5 个样点的分布与全量一致,表现为重金属 Cr、Ni、Pb 没有出现梯度分布,5 个样点浓度相近,均接近于对照。而 Zn 与 Cu 有明显的梯度分布,随着距电镀厂距离的增加,浓度逐渐降低。土壤重金属全量与 DTPA 提取态含量皆呈较好的正相关性,表明土壤重金属提取态含量受其全量的影响。由于电镀厂重金属污染物的迁移扩散,研究样点表层土壤 Zn 的浓度逐年增加,2008 年土壤 Zn 含量显著高于前期研究结果。

研究区域各样点平均吸光值、微生物群落功能多样性与均匀度指数在培养 96 h 差异最为显著,但不同土壤样点平均吸光值、微生物群落功能多样性与均匀度指数的变化与重金属 Zn 浓度梯度变化不一致。土壤过氧化氢酶活性与提取态 Zn 呈显著正相关,表现为激活效应;而脱氢酶的活性与土壤重金属 Zn 的梯度分布没能显示一定的相关性。在研究区域,微生物群落功能多样性与脱氢酶的活性不能用来指示土壤 Zn 的污染。

参考文献:

- [1] Wong S C, Li X D, Zhang G, et al. Heavy metals in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119:33-44.
- [2] Alloway B J. Heavy metals in soils[M]. London, UK:Blackie, 1995.
- [3] Govil P K, Reddy G L N, Krishna A K. Contamination of soil due to heavy metals in Patancheru industrial development area, Andhra Pradesh, India[J]. *Environmental Geology*, 2001, 41:461-469.
- [4] Krishna A K, Govil P K. Heavy metal distribution and contamination in soils of Thane-Belapur industrial development area, Mumbai, Western India[J]. *Environmental Geology*, 2005, 47:1054-1061.
- [5] 滕应,黄昌勇,骆永明,等. 铅锌银尾矿区土壤微生物活性及其群落功能多样性研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1):113-119.
TENG Ying, HUANG Chang-yong, LUO Yong-ming, et al. Microbial activities and functional diversity of community in soils polluted with

- Pb-Zn-Ag mine tailings[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1):113-119.
- [6] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社, 1986.
GUAN Song-yin. Soil enzymes and their study methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986.
- [7] 和文祥, 朱铭菽, 张一平. 土壤酶与重金属关系的研究现状[J]. 土壤与环境, 2000, 9(2):139-142.
HE Wen-xiang, ZHU Ming-e, ZHANG Yi-ping. Recent advance in relationship between soil enzymes and heavy metals[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2000, 9(2):139-142.
- [8] 卢显芝, 金建华, 郝建朝, 等. 不同土壤层土壤酶活性对重金属汞和镉胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9):1844-1848.
LU Xian-zhi, JIN Jian-hua, HAO Jian-chao, et al. Response of soil enzyme activities in different soil layers to single and combined stress of Hg and Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9):1844-1848.
- [9] Xie W J, Zhou J M, Wang H Y, et al. Short-term effects of copper, cadmium and cypermethrin on dehydrogenase activity and microbial functional diversity in soils after long-term mineral or organic fertilization[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129:450-456.
- [10] Hang X S, Wang H Y, Zhou J M, et al. Risk assessment of potentially toxic element pollution in soils and rice(*Oryza sativa*) in a typical area of the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:2542-2549.
- [11] 杭小帅, 王火焰, 周健民. 电镀厂下游水体中重金属的分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 2008, 29(10):2736-2742.
HANG Xiao-shuai, WANG Huo-yan, ZHOU Jian-min. Heavy metals distribution characteristics and risk assessment of water below an electroplating factory[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(10):2736-2742.
- [12] Hang X S, Wang H Y, Zhou J M. Soil heavy-metal distribution and transference to soybeans surrounding an electroplating factory[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 2010, 160:144-151.
- [13] Burt R, Wilson M A, Mays M D S. Major and trace elements of selected pedons in the USA[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32:2109-2121.
- [14] Lindsay W L, Norvell W A. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1978, 42, 421-428.
- [15] Li M S, Luo Y P, Su Z Y. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 147:168-175.
- [16] Demirak A, Yilmaz F, Tuna A L, et al. Heavy metals in water, sediment and tissues of *Leuciscus cephalus* from a stream in southwestern Turkey[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(9):1451-1458.
- [17] Zak J C, Willig M R, Moorhead D L, et al. Functional diversity of microbial communities: A quantitative approach[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26:1101-1108.
- [18] Yang Y H, Yao J, Hua X M. Effect of pesticide pollution against functional microbial diversity in soil[J]. *Journal of Microbiology*, 2000, 20(2):23-25.
- [19] 郑洪元, 张德生. 土壤动态生物化学研究法[M]. 北京:科学出版社, 1982.
ZHENG Hong-yuan, ZHANG De-sheng. Study methods of soil dynamic biochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [20] Jiang X J, Luo Y M, Liu S L, et al. Changes in soil microbial biomass and Zn extractability over time following Zn addition to a paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2003, 50:855-861.
- [21] Chaperon S, Sauvé S. Toxicity interaction of metals (Ag, Cu, Hg, Zn) to urease and dehydrogenase activities in soils[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39:2329-2338.
- [22] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京:科学出版社, 2008.
LI Zhen-gao, LUO Yong-ming, TENG Ying. Study methods of soil and environmental microorganism[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [23] 国家环保总局. 食用农产品产地环境质量评价标准[S]. HJ332-2006.
National Environmental Protection Agency of China. Farmland environmental quality evaluation standards for edible agriculture products [S]. HJ332-2006.
- [24] Choi K H, Dobbs F C. Comparison of two kinds of biolog microplates (GN and ECO) in their ability to distinguish among aquatic microbial communities[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 1999, 36:203-213.
- [25] 杨元根, 刘从强, 吴攀, 等. 贵州赫章土法炼锌导致的土壤重金属污染特征及微生物生态效应[J]. 地球化学, 2003, 32(2):131-138.
YANG Yuan-gen, LIU Cong-qiang, WU Pan, et al. Soil heavy metal accumulation induced by local smelting and its microbial environmental effects in Hezhang County, Guizhou Province[J]. *Geochimica*, 2003, 32(2):131-138.
- [26] 杨志新, 冯圣东, 刘树庆. 镉、锌、铅单元素及其复合污染与土壤过氧化氢酶活性关系的研究[J]. 中国生态农业学报, 2005, 13(4):138-141.
YANG Zhi-xin, FENG Sheng-dong, LIU Shu-qing. Effect of single element and compound pollution of Cd, Zn, Pb on soil catalase activity[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(4):138-141.
- [27] 申卫收, 林先贵, 张华勇, 等. 不同施肥处理下蔬菜塑料大棚土壤微生物活性及功能多样性[J]. 生态学报, 2008, 28(6):2682-2689.
SHEN Wei-shou, LIN Xian-gui, ZHANG Hua-yong, et al. Microbial activity and functional diversity in soils used for the commercial production of cucumbers and tomatoes in polytunnel greenhouse, under different fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6):2682-2689.