

铬渣堆放场中金属铬对周边土壤微生物毒性效应

黄顺红, 杨志辉, 柴立元, 彭兵, 邵博华

(中南大学 冶金科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

摘要: 通过野外调查和采样分析, 采用传统微生物平板培养方法, 研究某铁合金厂区铬渣堆放场及周边土壤铬污染情况及其金属铬对土壤微生物数量和多样性的影响。结果表明: 厂区内铬渣堆放场和厂外农业用地土壤总铬平均含量分别超过中国土壤环境质量二级标准的 396%和 173%, 分别是对照区的 17 倍和 9 倍。厂区铬渣堆放场水溶性六价铬平均含量是对照区的 67 倍。随着铬污染程度的增加, 土壤中 3 大类微生物细菌、真菌、放线菌均受到一定程度抑制, 其中, 对照区微生物总的数量分别是厂外污染区、厂内污染区的 16 倍和 3 倍, 厂外污染区微生物总的数量是厂内污染区的 5 倍。厂区内铬渣堆放场旁土壤细菌、真菌和放线菌数量比对照区分别下降 94%, 82%和 79%。厂区内铬渣堆放场旁土壤 3 大类微生物物种多样性最低。3 种微生物相比, 对重金属 Cr 的敏感程度由大至小依次是细菌, 真菌和放线菌。

关键词: 铁合金厂; 铬渣堆; 污染; 土壤; 土壤微生物

中图分类号: S154.36

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2009)01-0025-06

Toxicity of metal chromium to microorganism activities in soil around chromium-containing slag heap

HUANG Shun-hong, YANG Zhi-hui, CHAI Li-yuan, PENG Bing, SHAO Bo-hua

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Based on field investigation and sample analysis of chromium polluted soil in and around the slag heap of a steel-alloy factory, total Cr and water soluble Cr(VI) concentrations, microbial populations and diversity in soils were analyzed. The results show that mean concentrations of total Cr in the tested soil around the slag heap and farmland outside the factory exceed the Threshold of Secondary Environmental Quality Standard for Soil in China by 396% and 173% respectively and are 17 and 9 times higher than local background values respectively. Average water soluble Cr(VI) in soils around the slag heap is 67 times higher than that in control area. Bacteria, fungi and actinomycetes are inhibited with elevating Cr concentrations. The microbial populations in control areas are 16 and 3 times of the polluted soils outside and inside factory, respectively. The microbial populations in the polluted soils outside factory are 5 times of the heavily polluted soil inside factory. The populations of bacteria, fungi and actinomycetes decreased by 94%, 82% and 79%, respectively. Microbial diversity is the lowest in soils around the slag heap. Furthermore, various microorganisms show different sensitivity to chromium contamination. The sensitivity of microbial population to chromium contamination is in the order: bacteria > fungi > actinomycetes.

Key words: steel-alloy factory; chromium slag heap; pollution; soils; soil microorganism

铬渣是铬盐及铁合金等行业在生产过程中排放的有毒废渣^[1-2], 铬渣中的 Cr(VI)被列为对人体危害最大的 8 种化学物质之一, 是国际上公认的 3 种致癌金属

物之一, 同时也是美国 EPA 公认的 129 种重点污染物之一^[3-4]。我国是铬盐生产大国, 历年来铬渣堆存量已达 600 万 t, 由于铬渣排放点多、散乱, 堆积成山的

收稿日期: 2008-01-18; 修回日期: 2008-04-28

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2006AA06Z374, 2007AA021304); 湖南科技计划重点资助项目(2008SK2007); 长沙市科技计划资助项目(K0802144-31)

通信作者: 杨志辉(1965-), 女, 湖南桃江人, 副教授, 从事重金属污染土壤生物修复研究; 电话: 0731-8830875; E-mail: yangzhihui65@yahoo.com

铬渣不仅占用大量土地,而且由于雨水淋溶、冲刷使土壤、地下水受到严重污染,渣堆下土壤污染在地表径流和生物地球化学作用下还会发生迁移,危害毗邻地区的环境质量。随铬渣排放量的不断增加,铬渣污染土壤已达 1 250 万 t, Cr(VI)不仅严重影响农作物产品质量和人畜健康,而且对土壤性质尤其是土壤微生物产生明显不良影响,如影响土壤微生物的区系,改变微生物群落,降低生物量,影响其生物活性等^[5-9]。土壤微生物是维持土壤生物活性的重要组分,对土壤中营养物质循环的调控起重要作用,同时,它的变化能及早地反映土壤养分及环境质量的变化,也反映土壤的污染状况,它对重金属胁迫的生物反应远比动植物的生物反应敏感^[5-6, 8, 10-13]。微生物是表征土壤质量的敏感性指标之一^[14-15]。不同类群微生物对重金属污染的耐性也不同^[16-17]。国内外对于这一方面的研究主要针对于铜、镉、铅、锌、银等重金属,而对重金属铬的研究较少,况且这为数不多的研究大都是通过添加外源铬来模拟污染土壤,难以反映土壤的实际情况,对于铁合金厂重金属铬的污染情况以及铬渣堆放场中金属铬对周边土壤微生物毒性效应的报道更少。在此,本文作者对某铁合金厂区及周边土壤土壤微生物数量和多样性及土壤总铬含量及水溶性六价铬进行野外调查取样研究,旨在为铬渣污染土壤环境质量评价及土壤的生物修复研究提供理论依据。

1 实验

1.1 供试土壤

供试土样于 2007 年 3 月采自某铁合金厂内铬渣堆场及其周边的农田。土壤类型为第四纪红土发育的红壤。设置 3 个样区:厂外污染区,厂内污染区,逆风向距铁合金厂 6 km(设为对照区)。对照区土壤类型与污染区相同。采样深度为 0~20 cm,共采集土壤耕层样品 36 个,对照区采集耕层混合样 5 个。铁合金厂外农田污染区,按排污口与铁合金厂的距离,沿排污口

两侧,距排污口 50, 100, 200, 500, 1 000 和 2 000 m 采集混合样 23 个。铁合金厂内,按距铬渣堆远近采集混合样 8 个。每个区域按“S”型路线采集混合土样,土壤样品放在封口的无菌塑料袋中,带回实验室。湿土分为 2 部分:一部分放在 4 ℃冰箱中用于微生物学指标分析;另一部分风干磨细过 2 mm 和 0.16 mm 筛,分别用于测定土壤基本理化性质和土壤总铬及水溶性六价铬含量。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤可培养微生物数量(Colony forming units, CFU)测定

采用稀释平板法分离计数。好氧异养细菌、放线菌、真菌活菌分别采用牛肉膏蛋白胨培养基、淀粉铵盐培养基、孟加拉红培养基计数,具体方法参考文献[18]。

1.2.2 土壤总铬及水溶性六价铬的测定

采用中华人民共和国国家标准(GB/T 1737—1997)——火焰原子吸收分光光度法进行测定。

操作如下:称取 0.300 0 g 土壤样品于 50 mL 聚四氟乙烯坩埚中,用少量水润湿,加入 10 mL 浓硝酸、5 mL 1:1 硫酸,静置。待剧烈反应停止后,加盖,移至电热板上加热分解 1 h 左右,开盖,待土壤分解物粘稠状时,加入 5 mL 氢氟酸并中温加热除硅。飞硅完全后,取下坩埚,稍冷,加入盐酸 3 mL 溶解可溶性残渣,全量转移到 50 mL 容量瓶中,加入 5 mL 10% 的 NH₄Cl,冷却后定容,用原子吸收测定总铬浓度。

水溶性六价铬的测定:称取 10 g 土壤于 250 mL 三角瓶中,加入 50 mL 去离子水,于振荡器中振荡 1 h。离心,上清液用比色法测定。

所有的样品分析做 3 次重复实验。土壤总铬测定精度参照土壤 ESS—3 标准。

1.2.3 土壤基本理化性质

土壤基本理化性质按常规分析方法测定,结果列于表 1。

1.2.4 数据统计分析

数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 14.0 统计软件处理,采用 LSD 法对数据进行差异显著性检验。

表 1 土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical characteristics of studied soils

取样地	N	pH	w(有机质)/ (g·kg ⁻¹)	w(全 N)/ (g·kg ⁻¹)	阳离子交换量/ (cmol·kg ⁻¹)	土壤粘粒组成/%		
						>0.01 mm	0.01~0.001 mm	<0.001 mm
厂内污染区	8	9.15±1.23	15.9±2.6	1.5±0.2	8.9±1.2	59.2±9.1	21.6±4.2	19.2±3.6
厂外污染区	23	5.64±1.81	28.8±9.1	1.9±0.4	16.7±2.3	36.3±8.1	27.8±7.1	35.80±8.5
对照区	5	5.43±0.92	30.6±6.4	2.1±0.3	18.6±3.1	35.7±5.1	24.3±4.2	40.0±1.5

注: N 为样品数。

2 结果与分析

2.1 供试土壤中总铬含量

3个样地中,除对照地外,总铬含量都很高(表2)。不同区域相比,总铬含量差异较大,随着铬渣堆场的距离增加而减少。铁合金厂内污染区域,土壤总铬含量在(821.9±4.5) mg/kg 到(3 550.2±160.9) mg/kg 变动,平均为(1 735.7±1 269.5) mg/kg。铁合金厂外污染区域,土壤总铬含量在(137.8±8.9) mg/kg 到(6120.1±144.2) mg/kg 之间变动,平均为(956.2±1 591.1) mg/kg。而对照区域中,土壤总铬含量在(87.0±6.2) mg/kg 到(117.5±5.6) mg/kg 之间变动,平均为(104.7±15.2) mg/kg。与对照区域土壤相比,厂内污染区和厂外污染区域土壤总铬平均含量分别是对照区的17和9倍。与中国土壤环境质量二级标准相比,厂内污染区和厂外污染区域土壤总铬平均含量分别超过二级标准的396%和173%,厂内污染区样品超标率达100%。厂外污染区地23个样品中,有22个超标,超标率达95%,其中,有1个样品总铬含量是国家二级标准的18倍。这些结果表明,铬渣堆放场中铬已严重污染了周边土壤。邻近铬渣堆的土壤污染最严重,厂外农业用田污染程度土壤次之。

表2 供试土壤中总铬和水溶性六价铬的含量

Table 2 Contents of total Cr and water soluble Cr in

种类	取样地	N	tested soils w/(mg·kg ⁻¹)		
			平均值	最小值	最大值
总铬	厂内污染区	8	1 735.7±1 269.5	821.9±4.5	3 550.2±160.9
	厂外污染区	23	956.2±1 591.1	137.8±8.9	6120.1±144.2
	对照区	5	104.7±15.2	87.0±6.2	117.5±5.6
水溶性六价铬	厂内污染区	8	66.7±79.6	0.5±0.1	252.7±4.6
	厂外污染区	23	0.6±0.4	0.2±0.1	1.7±0.1
	对照区	5	1.0±0.5	0.1±0	1.4±0.2

注:表中数值为平均值±标准差;N为样品数。

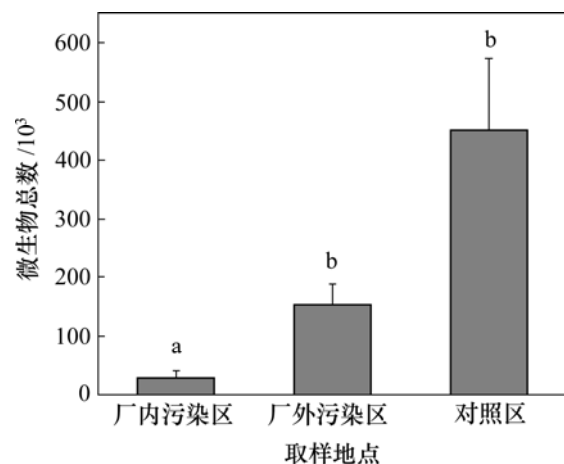
2.2 供试土壤中水溶性六价铬含量

供试土壤中水溶性六价铬含量列于表2。厂内污染区土壤样品中水溶性含量最高达(252.7±4.6) mg/kg,

最低含量为(0.5±0.1) mg/kg,平均含量(66.7±79.6) mg/kg,是对照区的67倍。结果进一步表明了铁合金厂区内土壤已被严重污染。而厂外污染区土壤六价铬含量较低,接近当地背景值,其含量在(0.2±0.1) mg/kg 到(1.7±0.1) mg/kg 之间变动,平均为(0.6±0.4) mg/kg。铬的化合物对植物高度毒害,可以损伤到植物的生长和发育^[19]。水溶性六价铬直接刺激和毒害人体组织,这是由于水溶性六价铬是一种强氧化剂且能够穿透生物膜^[20]。尽管厂外农业用地中水溶性六价铬含量很低,但该地总铬含量很高。有研究表明,当土壤中有MnO₂和氧气存在时,三价铬会被氧化成六价铬。同时,在土壤条件如pH、有机质改变时,六价铬的其他形态如交换态和碳酸盐结合态也能转化成水溶性六价铬。因此,厂外农用地土壤环境仍存在健康风险。

2.3 土壤微生物总数的变化

不同取样点土壤3大类微生物总数见图1,由图1可以看出,土壤3大类微生物(细菌、真菌和放线菌)总数在对照区达452.69×10³个/g,在厂外农业用地为155.38×10³个/g,而在厂内铬渣堆放场周边土壤仅为29.46×10³个/g,很明显,土壤微生物总数由大至小的顺序是对照区,厂外污染区和厂内污染区,其中,对照区微生物总量分别是厂内污染区、厂外污染区的16倍和3倍,厂外污染区微生物总量是厂内污染区的5倍。方差分析也表明这3个取样点土壤微生物总量差异显著。这些结果说明,金属铬明显降低了土壤微生物区系。铁合金厂内铬渣堆放场周围土壤由于雨水溶淋、冲刷,已受到严重污染,其土壤微生物活性抑制最严重。



注:不同的小写字母表示各土壤样品间检验差异达显著水平(P<0.05)

图1 不同采样地微生物总数量变化

Fig.1 Total microbial population in tested sites

2.4 土壤真菌数量和多样性的变化

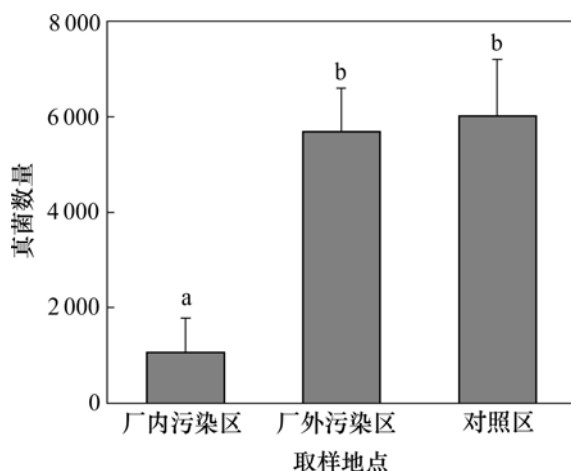
由表 3 及图 2 可以看出, 对照区真菌数量在 $29.20 \times 10^2 \sim 86.00 \times 10^2$ 个/g 之间变动, 平均为 60.36×10^3 个/g; 厂外污染区真菌数量在 $16.12 \times 10^3 \sim 195.00 \times 10^3$ 个/g 之间变动, 平均为 56.86×10^3 个/g; 厂内污染区真菌数量在 $0.08 \times 10^3 \sim 53.60 \times 10^3$ 个/g 之间变动, 平均为 10.69×10^3 个/g。与对照区样品比较, 厂内污染区真菌数量下降 82%, 厂外污染区真菌数量下降了 6%, 方差分析结果表明厂内重污染区域土壤真菌平均数量均与对照区内及厂外污染区差异极显著(图 2), 而厂外农业用地土壤真菌与对照区没有明显差异。这说明土壤重金属铬污染严重影响了土壤中真菌的生长, 且距污染源越近, 真菌受抑制的程度越强。

表 3 不同污染程度土壤微生物功能群数量

Table 3 Quantities of microbial functional population in soils with different contamination levels 数量/(10^3 个·g $^{-1}$)

取样地	性质	真菌	细菌	放线菌
厂内污染区 (n=8)	最大值	53.60±6.03	249.40±19.71	101.84±11.18
	最小值	0.08±0.01	2.56±0.74	0.04±0.01
	平均值	10.69±2.03	54.02±7.95	33.26±8.82
厂外污染区 (n=23)	最大值	195.00±26.71	2860.12±103.23	122.65±26.45
	最小值	16.12±1.21	54.99±23.49	71.52±11.03
	平均值	56.86±43.80	727.80±860.76	454.75±284.91
对照区 (n=5)	最大值	86.00±25.46	1483.50±236.78	1078.00±231.06
	最小值	29.20±9.36	512.00±89.12	268.80±36.23
	平均值	60.36±26.00	867.50±434.69	484.54±337.62

注: 表中数值为平均值±标准差



注: 不同的小写字母表示各土壤样品间 LSD 检验差异达显著水平($P < 0.05$)

图 2 不同采样地真菌总数量变化

Fig.2 Population of soil fungal in tested sites

Simpson 指数是用来表示物种多样性的指标之一, Simpson 指数越大, 说明物种多样性程度越低。许多微生物如果在 Cr(VI)持续升高的环境中数量不断减少甚至不能生存, 则会造成微生物种类的减少和单一物种微生物数量占总体数量比例的上升。若受到低浓度重金属污染的刺激, 反而会使一些本来处于劣势的物种大量生长, 就会造成微生物种类的增加和单一物种微生物数量占总体数量比例的下降。表 4 显示, 真菌的 Simpson 指数在厂内铬渣堆放场污染区最大, 在对照区最小。可见, 真菌菌种在对照区最多, 而在厂内铬渣堆放场污染区最少, 这表明重金属铬污染明显降低了真菌的多样性。

表 4 各采样区土壤中微生物的 Simpson 指数

Table 4 Simpson index of soil microorganism in tested sites

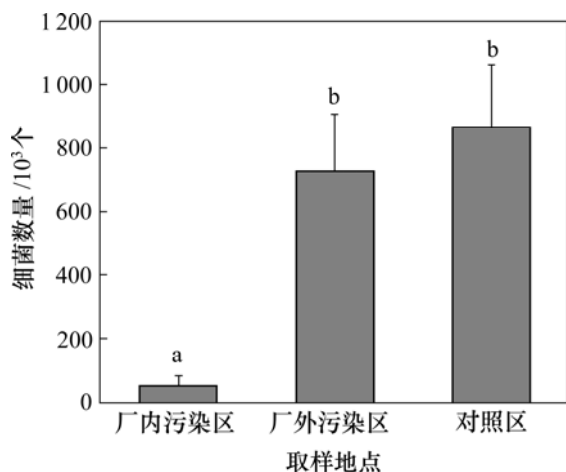
变量	厂内污染区 (n=8)	厂外污染区 (n=23)	对照区 (n=5)
真菌	0.653 8±0.134 2	0.475 6±0.012 4	0.321 8±0.121 0
细菌	0.618 2±0.065 1	0.561 0±0.036 4	0.536 6±0.112 3
放线菌	0.607 6±0.092 3	0.549 5±0.078 2	0.578 8±0.134 5

注: 表中数值为平均值±标准差。

2.5 土壤细菌数量和多样性的变化

细菌生理类群指的是相同或不同形态执行着同一种功能的一类细菌。土壤细菌生理类群直接参与土壤的物质循环, 细菌生理类群的种类和数量不同直接反映了土壤生态环境系统结构的稳定性差异, 在土壤污染方面具有重要的指示作用。由表 3 及图 3 可以看出, 对照区细菌数量在 $512.00 \times 10^3 \sim 1483.50 \times 10^3$ 个/g 之间变动, 平均为 867.50×10^3 个/g。厂外农业用地污染区细菌数量在 $54.99 \times 10^3 \sim 2860.12 \times 10^3$ 个/g 之间变动, 平均为 727.80×10^3 个/g。厂内铬渣堆放场污染区细菌数量在 $2.56 \times 10^3 \sim 249.40 \times 10^3$ 个/g 之间变动, 平均为 54.02×10^3 个/g。与对照区样品比较, 厂外农业用地污染区细菌数量下降 16%, 厂内铬渣堆放场区细菌数量平均值下降 94%。可见, 该铁合金厂铬渣堆放场重金属铬污染明显降低了土壤细菌的活性, 细菌对于重金属铬最敏感。且随着离铬渣堆放场的距离越近, 其土壤细菌数量减少得越多。方差分析结果表明, 厂内铬渣堆放场污染区细菌平均数量均与对照区及厂外农业用地污染区的细菌平均数量差异极显著。

不同取样地细菌 Simpson 指数表明(表 4), 细菌 Simpson 指数在厂内铬渣堆放场污染区最大, 说明该区域细菌菌种多样性最低, 而厂外农业用地污染区与对照区 Simpson 指数相近, 说明这 2 个区域细菌菌种



注: 不同的小写字母表示各土壤样品间 LSD 检验差异达显著水平($P < 0.05$)

图 3 不同采样地细菌总数量变化

Fig.3 Population of soil bacteria in tested sites

多样性差异不大。这表明低或中浓度铬污染对土壤细菌多样性的影响不是十分明显,而在重污染区,重金属铬不仅影响到细菌数量,而且影响了细菌的多样性。

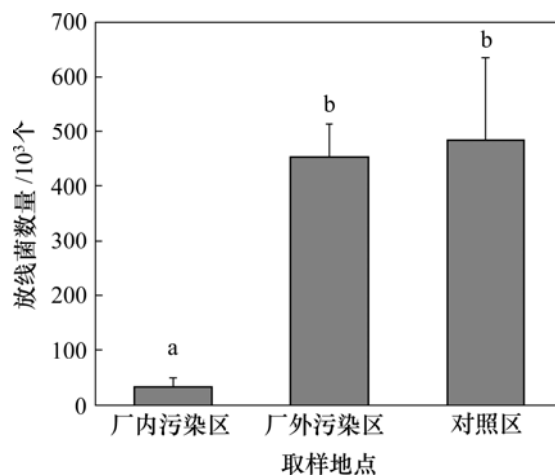
2.6 土壤放线菌数量和多样性的变化

由表 3 及图 4 可以看出,对照区放线菌数量最高可达 1078.00×10^3 个/g,最低为 268.80×10^3 个/g,平均为 484.54×10^3 个/g;厂外农业用地污染区放线菌数量最高为 122.65×10^3 个/g,最低为 71.52×10^3 个/g,平均为 454.75×10^3 个/g;厂内铬渣堆放场污染区放线菌数量最高为 101.84×10^3 个/g,最低仅 0.04×10^3 个/g,平均为 33.26×10^3 个/g。与对照区样品比较,厂内重污染区放线菌数量下降 79%,而厂外农业用地污染区放线菌数量下降 6%。这说明重金属对放线菌的数量有很强的抑制作用。

放线菌 Simpson 指数表明(表 4),厂内铬渣堆放场污染区放线菌 Simpson 指数最大,说明该区放线菌菌种多样性程度最低,这进一步表明从铬渣堆放场淋溶出的金属铬不仅影响到放线菌的数量,而且对其多样性也有很大的影响。而厂外农业用地污染区放线菌 Simpson 指数略低于对照区,说明厂外农业用地污染区放线菌菌种多样性程度略高于对照区。这些结果表明,在中等浓度铬污染中,放线菌表现为受到重金属铬刺激而激发了其多样性,一些原本劣势菌种由于具有对铬的耐性而大量生存。

2.7 土壤总铬与水溶性六价铬含量与微生物数量相关性

对照区、厂外污染区、厂内污染区土壤总铬及水溶性六价铬平均含量与微生物数量以及微生物群之间相关分析如表 5 所示。由表 5 可知,真菌和细菌与土



注: 不同的小写字母表示各土壤样品间 LSD 检验差异达显著水平($P < 0.05$)

图 4 不同采样地放线菌总数量变化

Fig.4 Population of soil actinomycetes in tested sites

壤总铬呈负相关关系,相关系数分别为 -0.181 和 -0.278 。而水溶性六价铬与这 3 种土壤微生物均呈负相关关系,其中放线菌与水溶性六价铬呈显著负相关关系。这进一步说明了金属铬不同程度地抑制微生物活性,影响微生物数量,而且水溶态铬对土壤微生物的毒性更强,表明土壤微生物可以用于表征土壤质量。由表 5 还表明,真菌、细菌、放线菌均呈一定正相关关系,其中真菌与细菌呈极显著正相关($r=0.853, P < 0.01$),说明在重金属污染下,微生物种群之间存在一定协同效应,其中,真菌与细菌协同效应最明显。

表 5 供试土壤总铬含量与土壤微生物数量之间的相关分析

Table 5 Correlation analysis between concentration of Cr and populations of microbes in tested soils

	真菌	细菌	放线菌	总铬	水溶性六价铬
真菌	1				
细菌	0.853 ¹⁾	1			
放线菌	0.211	0.081	1		
总铬	-0.181	-0.278	0.027	1	1
水溶性六价铬	-0.339	-0.245	-0.396 ²⁾	0.083	1

注: 1) $P < 0.01$; 2) $P < 0.05$

3 结论

a. 铁合金厂铬渣堆放场中铬严重污染了周边土壤,距铬渣堆越近,污染越严重。厂内铬渣堆放场污

染区和厂外农业用地污染区域土壤总铬平均含量分别超过中国土壤环境二级标准的396%和173%。厂内铬渣堆放场污染区样品超标率达100%，厂外农业用地污染区超标率达95%。

b. 厂内铬渣堆放场污染区水溶性六价铬平均含量是对照区的67倍，厂外污染区土壤六价铬含量与当地背景值含量相当。

c. 不同取样点微生物总量差异较大，总量由大至小的顺序是对照区，厂外污染区和厂内污染区，其中，对照区微生物总量分别是厂外污染区、厂内污染区的3和16倍，厂外污染区微生物总量是厂内污染区的5倍。同时，厂内污染土壤中细菌、真菌和放线菌数量和多样性较对照区都有不同程度的下降。

d. 不同的微生物种群对重金属污染的敏感程度不同，对重金属Cr的敏感程度由大至小依次是细菌，真菌和放线菌。

e. 真菌和细菌与土壤总铬呈负相关关系，相关系数分别为-0.181和-0.278。而水溶性六价铬与这3种土壤微生物均呈负相关关系，其中放线菌与水溶性六价铬呈显著负相关关系。

参考文献:

- [1] 成思危. 铬盐生产工艺[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.
CHENG Si-wei. Production techniques of chromium salts[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [2] 柴立元, 赵堃, 舒余德, 等. 铬渣NaCl浸出动力学[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(3): 445-449.
CHAI Li-yuan, ZHAO Kun, SHU Yu-de, et al. Kinetics of chromium-containing slag leached by NaCl[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(3): 445-449.
- [3] 韩英魁. 环保治理, 刻不容缓[J]. 铬盐工业, 2000(2): 22-30.
HAN Ying-kui. It is of great urgency for environmental protection and treatment[J]. Chromium Salts Industry, 2000(2): 22-30.
- [4] 柴立元, 龙腾发, 唐宁, 等. 微生物治理碱性含铬废水的试验研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(5): 816-820.
CHAI Li-yuan, LONG Teng-fa, TANG Ning, et al. Experimental study on microbial treatment of alkaline wastewater containing chromium (Cr(VI))[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(5): 816-820.
- [5] Viti C, Mini A, Ranalli G, et al. Response of microbial communities to different doses of chromate in soil microcosms[J]. Applied Soil Ecology, 2006, 34(2/3): 125-139.
- [6] Shi W, Bischoff M, Turco R, et al. Long-term effects of chromium and lead upon the activity of soil microbial communities[J]. Applied Soil Ecology, 2002, 21(2): 169-177.
- [7] Viti C, Giovannetti L. The impact of chromium contamination on soil heterotrophic and photosynthetic microorganisms[J]. Annals of Microbiology, 2001, 51(2): 201-213.
- [8] Muller A K, Westergaard K, Christensen S, et al. The diversity and function of soil microbial communities exposed to different disturbances[J]. Microbial Ecology, 2002, 44(1): 49-58.
- [9] Tokunaga T K, Wan J M, Hazen T C, et al. Distribution of chromium contamination and microbial activity in soil aggregates[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(2): 541-549.
- [10] Schmitt H, Van Beelen P, Tolls J, et al. Pollution-induced community tolerance of soil microbial communities caused by the antibiotic sulfachloropyridazine[J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(4): 1148-1153.
- [11] Gremion F, Chatzinotas A, Kaufmann K, et al. Impacts of heavy metal contamination and phytoremediation on a microbial community during a twelve-month microcosm experiment[J]. Fems Microbiology Ecology, 2004, 48(2): 273-283.
- [12] 郭学军. 微生物对土壤环境中重金属活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 105-110.
GUO Xue-jun. Effects of microorganisms on the mobility of heavy metals in soil environment[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002, 8(1): 105-110.
- [13] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[J]. 北京: 科学出版社, 1996: 71-75.
CHEN Huai-mang. Heavy metal contamination in soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996: 71-75.
- [14] Avidano L, Gamalero E, Cossa G. P, et al. Characterization of soil health in an Italian polluted site by using microorganisms as bioindicators[J]. Applied Soil Ecology, 2005, 30(1): 21-33.
- [15] Shukurov N, Pen-Mouratov S, Steinberger Y. The influence of soil pollution on soil microbial biomass and nematode community structure in Navoiy Industrial Park, Uzbekistan[J]. Environment International, 2006, 32(1): 1-11.
- [16] Gong P, Siciliano S D, Srivastava S, et al. Assessment of pollution-induced microbial community tolerance to heavy metals in soil using ammonia-oxidizing bacteria and biological assay[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2002, 8(5): 1067-1081.
- [17] Casucci C, Okeke B C, Frankenberger W T. Effects of mercury on microbial biomass and enzyme activities in soil[J]. Biological Trace Element Research, 2003, 94(2): 179-191.
- [18] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 上海: 上海科技出版社, 1986: 226-228.
XU Guang-hui, ZHEN Hong-yuan. Manual about analysis method of soil microorganism manual[M]. Shanghai: Science and Technology Press, 1986: 226-228.
- [19] Shanker A K, Cervantes C, Loza-Tavera H, et al. Chromium toxicity in plants[J]. Environment International, 2005, 31(5): 739-753.
- [20] Melaku S, Cornelis R, Vanhaecke F, et al. Method development for the speciation of chromium in river and industrial wastewater using GFAAS[J]. Microchimica Acta, 2005, 150(3/4): 225-231.