

重金属铅镉对玉米生长及土壤微生物的影响

李 勇¹, 黄占斌¹, 王文萍¹, 黄 震², 颜丙磊¹, 曹 杨¹, 王诗宇¹

(1.中国矿业大学(北京)化学与环境工程院, 北京 100083; 2.海南大学环境与植物保护学院, 海南 儋州, 571737)

摘 要:采用温室盆栽土培方法,研究了土壤中不同浓度重金属铅(Pb, 0~800 mg·kg⁻¹)、镉(Cd, 0~50 mg·kg⁻¹)单一及其复合处理对玉米(*Zea mays* L.)生长及土壤微生物(细菌、放线菌、真菌)数量的影响。结果表明,在重金属 Pb、Cd 单一及其复合处理下,玉米的株高、干重均低于对照,重金属 Pb、Cd 处理对玉米的生长存在负面影响。重金属 Pb、Cd 单一处理抑制细菌、真菌的生长,中低浓度 Pb (≤ 300 mg·kg⁻¹)、Cd (≤ 10 mg·kg⁻¹)单一处理促进放线菌数量的增加,高浓度(Pb ≥ 800 mg·kg⁻¹、Cd ≥ 50 mg·kg⁻¹)则呈现抑制效应; Pb、Cd 复合在高中低浓度下都抑制土壤微生物生长,减少微生物数量。玉米株高同土壤微生物之间相关性不显著;玉米干重同土壤细菌、真菌显著相关,同土壤放线菌之间相关性不显著。

关键词:重金属;铅;镉;土壤微生物;玉米(*Zea mays* L.);生长

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)11-2241-05

Effects of Heavy Metals Lead and Cadmium on *Zea mays* L. Growth and the Soil Microorganism

LI Yong¹, HUANG Zhan-bin¹, WANG Wen-ping¹, HUANG Zhen², YAN Bing-lei¹, CAO Yang¹, WANG Shi-yu¹

(1.School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2.College of Environmental Science and Plant Protecting, Hainan University, Danzhou 571737, China)

Abstract: Pot experiment was conducted to study the effects of different concentrations of lead (Pb, 0~800 mg·kg⁻¹), cadmium (Cd, 0~50 mg·kg⁻¹) single and their compound treatments on growth of maize (*Zea mays* L.) and soil microbe quantity including bacteria, actinomycetes, fungi. The results showed that the heavy metals Pb and Cd treatment have the negative influence on maize growth, plant height and drymass of maize were significantly lower than that of the control under Pb, Cd single and compound treatments. The Pb, Cd single treatment inhibited the growth of bacteria and fungi; Actinomycetes was increasing under middle and low concentration of Pb (below 300 mg·kg⁻¹), Cd (below 10 mg·kg⁻¹), while the high-concentration (Pb above 800 mg·kg⁻¹, Cd above 50 mg·kg⁻¹) presented the inhibitory effect; Growth of Soil microorganism was inhibited under the high, middle and low concentration of Pb and Cd compound treatments, and caused the microbe quantity decreased. The relationship between maize plant height and the soil microorganism wasn't related significantly; There was significant correlation among maize drymass and soil bacteria, fungi, but not and the soil actinomycetes.

Keywords: heavy metals; lead and cadmium; soil microorganism; maize(*Zea mays* L.); growth

重金属作为生物圈的重要组成部分,是土壤中固有的内在成分。过量浓度的重金属对大部分生物有明显的毒害作用,并污染自然和人工生态系统。土壤重金属污染是指由于人类活动使重金属含量明显高于原有含量,并造成环境质量恶化的现象^[1]。所有土壤重金属元素污染中以铅(Pb)、镉(Cd)为甚,其中 Cd 以移动性大、毒性高、污染面积最大被称为“五毒之首”,

成为最受关注的元素^[2-3],而 Pb 被一些学者列为我国土壤污染的最重要和典型的重金属污染物^[4-5]。

土壤中重金属与作物生长和土壤微生物有密切联系。重金属在土壤中不能被微生物降解而从环境中彻底消除,在土壤中积累到一定程度时,就会对土壤-植物系统产生毒害和破坏作用^[6]。重金属胁迫对作物生长影响的研究有较多报道, Bazzaz 等^[7]研究了不同浓度氯化铅处理水培的玉米和大豆,发现随着铅浓度的增加,光合作用和蒸腾作用强度降低,导致植株高、生物量、产量下降。镉胁迫能减少作物根系对水分和养分的吸收,也可抑制根系对氮的固定,从而危害作物的生长发育^[8]。土壤微生物是土壤中的活性胶体,具

收稿日期:2009-02-25

基金项目:国家“863”课题(2006AA100205)

作者简介:李 勇(1983—),男,湖南株洲人,汉,硕士研究生,主要研究方向为环境微生物。

通讯作者:黄占斌 E-mail:zbhuang2003@163.com

有较大的比表面积,代谢活动旺盛,通过积极参与土壤物质转化过程,在土壤形成、肥力演变、植物养分有效化和土壤结构的形成与改良、降解及净化有毒物质等方面起着重要作用^[9]。土壤中微生物的组成和数量与作物的生长有密切关系,尤其是作物根部周围的微生物,它们能直接将根系周围的有机物转化为作物可以吸收利用的无机物,并产生生长激素和抗生素而抑制病原微生物生长,刺激作物生长^[10]。

植物与微生物是相辅相成的,一方面植物可以提供土壤微生物生长所需的碳源和能源,同时又可提供微生物所需的氧气,使得根际环境中微生物数量丰富。另一方面,由于根际附近大量生长的微生物可以富集更多的金属离子,从而分担植物的压力,使植物生长得更好^[11]。因此,以植物和根际微生物为对象可以更好地研究重金属对作物-微生物的影响。

玉米是我国最重要的粮食作物之一,适应性强、单产量高,是重要的粮食、饲料、工业原料作物,在粮食作物中增值是最高的。本试验采用盆栽模拟试验,比较不同浓度梯度下土壤中重金属 Pb、Cd 单一及其复合处理对玉米生长、生物产量和收获期土壤中微生物类群数量的变化,探讨重金属 Pb、Cd 单一及其复合处理对玉米生长和对土壤微生物的影响,为重金属污染的环境质量评价及修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验处理设计

盆栽试验布置在中国矿业大学(北京)化环学院温室内进行。试验设置 Pb、Cd 单一及其复合 3 个试验组,每组内设置高中低 3 种重金属浓度梯度,以不加重金属的土壤为对照,试验形成 10 个处理(表 1),每个处理重复 3 次,共计 30 个盆栽。

试验按表 1 的浓度梯度将各重金属分别以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 金属盐形式均匀添加于盆中,同时添加底肥充分混匀,再调节土壤含水量至田间最大持水量,静置平衡两周,作为模拟不同浓度的重金属污染土壤。试验所用土壤取自北京市水科所通州永乐店节水试验站田间表土,土壤容重 $1.39 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量 19.3%,pH 值为 7.50,EC 值为 $0.28 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。经自然风干、捣碎、剔除杂物后过 2 mm 筛,于 $25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 塑料盆中装土 9 kg。试验作物采用玉米“纪元 1#”(河北新纪元种业有限公司育成),每盆播种 3 穴,每穴 1 株。自来水浇灌,当土壤含水量为田间持水量 50%左右时,即浇水至田间持水量 100%,准

表 1 盆栽试验处理元素和水平($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 1 Heavy metal treatment level in the pot experiment($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

处理 treatment	Cd	Pb	处理 treatment	Cd	Pb
CK	0	0	Pb②	0	300
Cd①	1	0	Pb③	0	800
Cd②	10	0	F①	1	100
Cd③	50	0	F②	10	300
Pb①	0	100	F③	50	800

注:本文所有表中 CK 表示空白对照;Cd①②③表示不同浓度的镉单一处理,同理 Pb①②③;F①②③表示不同浓度的铅镉复合处理。

确记录每次浇水量。试验在玉米收获期取植物样品测定生长指标,同期取根系土壤进行土壤微生物测定。

1.2 测定项目与方法

作物的生长指标包括株高、鲜重和干重。株高采用直尺法测定;鲜重和干重采用烘干称重法, 105°C 杀青 30 min, 76°C 恒温烘 18 h 以上;土壤微生物数量指标包括细菌、放线菌和真菌,分析采用平板稀释法^[12-13],牛肉膏蛋白胨培养基培养细菌,高氏一号培养基培养放线菌,马丁氏培养基培养真菌。

微生物多样性指数(H)采用香农-威纳指数法(Shannon-Wiener index)计算^[14],计算公式为:

$$H = -\sum (ni/N) \ln(ni/N)$$

式中: ni 为第 i 个物种的个体数; N 为群落中所有物种的个体数。

1.3 数据分析

试验所有数据采用统计分析软件 SPSS 13.0 进行分析,考虑 95% 的置信水平,应用最小显著差异法(LSD)进行单因素方差分析。土壤微生物主要对不同重金属处理下的土壤微生物以及同一重金属污染处理的不同梯度之间的差异进行分析。

2 结果与分析

2.1 重金属污染对玉米生长及产量的影响

表 2 是不同重金属和浓度处理下玉米的生长和产量情况,表中数据表明,在重金属 Cd 的高中低 3 个浓度处理下,玉米的株高、鲜重和干重都明显低于对照。其中,土壤中高浓度 Cd($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)时,玉米株高为对照的 57.5%、鲜重和干重分别为对照的 25.9% 和 27.4%,具有显著性差异。土壤中低浓度 Cd,即土壤 Cd 浓度为 1 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,玉米的株高与对照间差异不显著,但鲜重和干重都明显低于对照。说明土壤中 Cd 的存在,能明显抑制玉米生长,而且浓度越高,抑制作用越明显^[15]。

在中低浓度重金属 Pb 处理下,玉米株高各处理

表 2 不同重金属处理下玉米的生长情况

Table 2 The growth condition of maize under different treatments of heavy metals concentrations

处理方式 treatment	株高/cm plant height	鲜重/g fresh weight	干重/g dry mass
CK	97.83±14.58a	99.27±5.90a	42.47±6.70a
Cd①	74.27±12.63	61.53±20.56b	21.23±6.29bc
Cd②	76.10±13.85	65.00±24.87b	29.77±12.25ab
Cd③	56.30±1.75b	25.70±9.10c	11.67±1.85c
Pb①	86.83±29.31	73.60±21.97ac	32.07±13.33ab
Pb②	80.83±14.58	65.47±6.31c	27.67±6.47b
Pb③	71.90±15.29b	66.70±6.76bc	30.30±5.72ab
F①	83.10±20.78a	79.23±24.61ac	32.90±4.56ac
F②	76.53±5.87a	66.93±13.37c	29.17±9.40c
F③	39.50±6.25b	18.27±7.54b	8.33±2.48b

注:数据采用平均数和标准差,数字后的字母表示差异性,相同字母表示无显著性差异,不同字母表示有显著性差异。下同。

与对照之间差异不显著。土壤 Pb 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,玉米鲜重和干重与对照之间差异不显著;土壤 Pb 浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,玉米的鲜重和干重分别为对照的 65.9%和 65.1%,具有显著性差异;在高浓度土壤 Pb 浓度为 $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,玉米的株高、鲜重和干重明显低于对照。说明玉米的总体生长受到抑制作用,其大小与 Pb 浓度呈正相关,即 Pb 浓度越高,抑制玉米生长的作用越强,这点与苗明升等^[16]的结论相似。

重金属 Pb、Cd 复合处理下,玉米株高、干重等生长指标均显著低于对照。随着重金属 Pb、Cd 复合浓度的增加,其对玉米生长指标的抑制作用愈明显。其中当 Pb、Cd 复合浓度为 Pb $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、Cd $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,玉米株高、干重仅为对照的 40.3%、19.6%,严重抑制玉米植株的生长。彭鸣等^[17]用透射电镜观察发现,高浓度 Pb、Cd 对玉米细胞超微结构造成不可逆转的伤害,严重影响玉米的正常生长。

2.2 重金属污染对土壤主要微生物类群的影响

长期的生产实践使人们认识到,土壤中的物质转化,主要依赖于土壤的生物作用,特别是土壤动物、微生物的作用;而土壤中动物、微生物的活动除了取决于营养元素和能源物质外,还受土壤物理和化学性质的影响。土壤的物理、化学和生物等性质的综合作用将直接或间接的影响作物生长^[18]。在本研究中,根据试验设置土壤微生物的差异主要来源于重金属的类别以及浓度的不同。通常将细菌、真菌和放线菌看作是土壤的 3 大类群微生物,有研究表明,它们对重金属污染的敏感性大小表现为放线菌>细菌>真菌^[19]。

表 3 是不同处理下土壤中 3 大类群微生物变化

情况。可以看出,在重金属 Cd 处理下,相对于对照,随着土壤 Cd 浓度的增加,土壤中的细菌数量呈现下降的趋势。当在 Cd 浓度为低浓度 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,细菌的数量为对照的 66.8%,当土壤 Cd 浓度增加至 10 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,细菌数量分别为对照的 58.1%和 49.5%;在重金属处理下,当 Pb 浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,细菌数量为对照的 87.4%,细菌数量随 Pb 浓度的增加而降低;在 Pb、Cd 复合处理下,土壤中的细菌数量亦随着复合浓度的增加而呈现下降趋势。结果表明,Pb、Cd 单一及其复合处理减少土壤微生物数量,降低土壤的细菌化水平。

表 3 不同处理下土壤中 3 大类群微生物变化情况

Table 3 The changing condition of major kind of soil microorganisms in different treatments

处理方式 treatments	细菌/ $\times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ bacteria	放线菌/ $\times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ actinomycetes	真菌/ $\times 10^2 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ fungi	多样性指数 <i>H</i> diversity index
CK	27.52±7.00	51.07±51.75a	5.34±0.63a	0.43±0.26a
Cd①	18.39±0.67	197.99±82.58b	2.30±1.08	0.06±0.03b
Cd②	15.98±3.24	133.73±62.26b	3.12±1.22	0.07±0.01b
Cd③	13.61±5.45	40.85±63.06a	3.30±2.78	0.41±0.31ba
Pb①	24.04±7.87	205.89±1.32b	1.57±0.76b	0.05±0.01b
Pb②	19.63±6.08	104.92±25.58ac	2.20±0.96b	0.11±0.03ab
Pb③	19.34±7.14	18.04±51.75ac	2.56±2.25b	0.39±0.18a
F①	26.77±7.26	51.07±4.93	3.60±1.92	0.49±0.13
F②	22.57±12.93	25.037±12.81	2.13±0.19b	0.35±0.09
F③	16.43±15.75	7.43±0.64	2.03±0.73b	0.30±0.01

在放线菌方面,当土壤 Cd 浓度为 1 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,其数量分别为对照的 387.6%和 261.9%,当土壤 Cd 浓度增加至 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,放线菌的数量降为对照的 80.0%;在重金属 Pb 处理下,当 Pb 浓度为 100 和 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,放线菌的数量分别为对照的 403.1%和 205.4%,当 Pb 浓度为 $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,放线菌数量降为对照的 35.3%;在 3 种浓度梯度 Pb、Cd 复合处理下,放线菌数量分别为对照的 100.0%、49.0%和 14.5%。以上结果说明,低浓度的 Pb、Cd 单一处理能够促进土壤放线菌数量的增加,高浓度时则表现为抑制作用,这点与 FlieBbach^[20]、Baath^[21]等得出的结论相符;Pb、Cd 复合处理减少土壤的放线菌数量,Pb、Cd 复合处理的效应比单一的 Pb 或 Cd 强,具有一定的协同作用^[22]。

土壤中真菌的数量不及细菌和放线菌多,但真菌的生物量较大,在土壤中的作用不容忽视。由表 3 可见,在重金属 Pb、Cd 单一处理下,土壤真菌数量随着

重金属浓度的升高而增加;而在 Pb、Cd 复合处理下,随着重金属复合浓度的增加,真菌数量则出现降低的趋势。罗素群等的研究表明,真菌能吸附重金属,因而能忍耐较高浓度的重金属而生长^[23]。真菌是好气性微生物,其活性状况取决于土壤基础呼吸,当重金属复合浓度超过一定范围后,土壤基础呼吸就会受到抑制,从而抑制土壤真菌^[24]。

生物多样性指数是描述生物类型数和均匀度的指标,可在一定程度上反映生物群落中物种的丰富程度及各类型间的分布比例。在重金属 Pb、Cd 单一处理下,多样性指数均小于对照;在复合处理下,当 Pb、Cd 复合浓度为 Pb 100 mg·kg⁻¹、Cd 1 mg·kg⁻¹ 时,多样性指数达到最大值为对照的 114.0%,随着重金属复合浓度的增加多样性指数趋于降低。结果表明在土壤重金属复合污染较轻的条件下,土壤微生物多样性指数较高;随着土壤重金属复合污染浓度的增加,达到中度到重度污染时,微生物多样性指数呈下降趋势^[25]。

土壤微生物是土壤肥力的一个重要生态学指标。从土壤微生物 3 大类群总量来看,低浓度的 Pb、Cd 单一处理下的微生物数量较对照丰富;随着重金属浓度的增加,微生物数量有所降低。表明低浓度重金属促进了土壤肥力的增加,高浓度则产生抑制作用;另一方面,Pb、Cd 复合处理浓度虽为 Pb、Cd 单一浓度的加和,但其对土壤微生物的作用并非为各自作用的简单加和,说明 Pb、Cd 复合处理下其各自作用是影响土壤微生物的一个方面,最终影响土壤微生物的应该是重金属的相互作用与土壤和作物相互作用的结果。从微生物香农-威纳多样性指数来看,Pb、Cd 单一及其复合处理对土壤微生物的异质性有一定的负面影响。

2.3 玉米生长同土壤微生物的相关性

将相同重金属处理下盆栽玉米生长及产量指标与土壤微生物进行相关分析(表 4)。

表 4 表明,玉米株高与土壤细菌、放线菌、真菌以及土壤微生物多样性指数相关性不明显;玉米株高、鲜重、干重与土壤微生物多样性呈负相关;土壤细菌、真菌与玉米鲜重、干重呈显著相关。就已有的研究结果而言,土壤微生物的种类和数量与作物生长的关系到底如何尚没有一个明确的定论,所以针对这个问题还需要进一步研究。本研究通过采用稀释平板法测定和培养细菌、真菌和放线菌来分析微生物群落结构的变化,这一方法具有很多局限性^[26-27],如:很多微生物是与动植物共生而不能培养;各种微生物,如细菌对养分都有选择性,单一培养基上培养效率很低(<1%);细菌、真

表 4 玉米生长及产量同土壤微生物的相关系数

Table 4 The correlation coefficient among soil microorganism, growth and yield of maize

生长指标 growth index	细菌 bacteria	放线菌 actinomyceto	真菌 fungi	多样性指数 H diversity index
株高 plant height	0.321	0.354	0.306	-0.169
鲜重 fresh weight	0.437*	0.205	0.408*	-0.036
干重 dry weight	0.416*	0.194	0.379*	-0.065

注:* 相关性在 0.05 水平上显著;** 相关性在 0.01 水平上显著。

菌、放线菌的种群结构的变化难以辨别。本试验中不同重金属处理对大豆的生长及产量存在一定的影响,如果单从重金属的差异来考虑这种影响差异会发现这种规律不明显。作物生长是多种因素综合作用的结果,土壤微生物本身也是受多种因素影响的。

3 结论与讨论

(1)不同重金属处理对玉米的生长的影响。在重金属 Pb、Cd 单一及其复合处理下,玉米株高、干重均低于对照;其中当重金属 Pb 浓度为 800 mg·kg⁻¹ 或 Cd 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时,玉米株高与对照差异显著。说明 Pb、Cd 复合处理及一定浓度的 Pb(>300 mg·kg⁻¹)、Cd(≥10 mg·kg⁻¹)单一处理明显抑制玉米的生长。

(2)在土壤微生物方面,重金属 Pb、Cd 单一及复合处理抑制细菌、真菌的生长,细菌、真菌数量明显低于对照;中低浓度 Pb(≤300 mg·kg⁻¹)、Cd(≤10 mg·kg⁻¹)单一处理刺激放线菌生长,放线菌数量显著高于对照;Pb、Cd 复合及高浓度 Pb(≥800 mg·kg⁻¹)、Cd(≥50 mg·kg⁻¹)单一处理亦抑制放线菌的生长。

(3)重金属 Pb、Cd 复合与其单一处理相比,Pb、Cd 复合明显抑制土壤微生物的生长,且随着复合浓度的增加抑制作用越明显。说明 Pb、Cd 的相互作用对土壤肥力存在一定的负面影响。

(4)本试验中玉米株高同土壤微生物之间相关性不显著;玉米干重同土壤细菌、真菌显著相关,同土壤放线菌之间相关性不显著。

参考文献:

- [1] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京:科学出版社, 1996.
CHEN Huai-man. Heavy metal pollution of the soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [2] Moreno J L, et al. Effects of a cadmium-contaminated sewage sludge compost on dynamics of organic matter and microbial activity in an arid soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 28(3): 230-237.
- [3] 陈志良, 莫大伦, 仇荣亮. 镉污染对生物有机体的危害及防治对策[J]. 环境保护科学, 2001, 27(4): 37-39.
CHEN Zhi-liang, MO Da-lun, QIU Rong-liang. Biological damage of

- soil cadmium (Cd) pollution and its control[J]. *Environmental Protection Science*, 2001, 27(4):37-39.
- [4] 杜应琼, 何江华, 陈俊坚, 等. 铅、镉和铬在叶菜类蔬菜中的积累及其生长的影响[J]. 园艺学报, 2003, 30(1):51-55.
DU Ying-qiong, HE Jiang-hua, CHEN Jun-jian, et al. Effects of heavy metals of Pb, Cd and Cr on the growth of vegetables and their uptake[J]. *Acta Horticultura Sinica*, 2003, 30(1):51-55.
- [5] 张 民, 龚子同. 我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布[J]. 土壤学报, 1996, 33(1):85-93.
ZHANG Min, GONG Zi-tong. Contents and distribution of some heavy metal elements in the vegetable cultivated soils in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1):85-93.
- [6] 李录久, 许圣君, 李光雄, 等. 土壤重金属污染与修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2004, 32(1):156-158.
LI Lu-jiu, XU Sheng-jun, LI Guang-xiong, et al. Research progress of the pollution and phytoremediation for heavy metals in soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2004, 32(1):156-158.
- [7] Bazzaz F A. Differing sensitivity of corn and soybean photosynthesis and transpiration to lead contamination[J]. *Environment Quality*, 1974, 3:156-158.
- [8] Kahle H. Response of roots of trees to heavy metals [J]. *Environ Exper Bot*, 1993, 33:99-119.
- [9] 龚 平, 孙铁珩, 李培军. 重金属对土壤微生物的生态效应 [J]. 应用生态学报, 1997, 8(2):218-224.
GONG Ping, SUN Tie-heng, LI Pei-jun. Ecological effect of heavy metals on soil microbes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(2):218-224.
- [10] 章家恩, 徐 琪. 土壤与生物多样性及其保护对策[J]. 资源科学, 1998, 1:49-53.
ZHANG Jia-en, XU Qi. Soil and biodiversity and countermeasures for its conservation[J]. *Resources Science*, 1998, 1:49-53.
- [11] 孙嘉龙, 肖唐付, 周连碧, 等. 微生物与重金属的相互作用机理研究进展[J]. 地球与环境, 2007(4):367-374.
SUN Jia-long, XIAO Tang-fu, ZHOU Lian-bi, et al. Studies on the mechanism of interaction between microbes and heavy metals[J]. *Earth and Environment*, 2007(4):367-374.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
Microorganism room in the institute of soil science, Chinese Academy of Sciences. Soil microorganism research method[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [13] 许光辉, 郑元洪. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
XU Guang-hui, ZHENG Yuan-hong. Analysis manual of soil microorganism[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.
- [14] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其实验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
YAO Huai-ying, HUANG Chang-yong. Soil microbial ecology and its experimental technique[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [15] 孔祥生, 郭秀璞, 张妙霞. 镉胁迫对玉米幼苗生长及生理生化的影响[J]. 华中农业大学学报, 1999, 18(2):111-113.
KONG Xiang-sheng, GUO Xiu-pu, ZHANG Miao-xia. Effect of cadmium stress on seedling growth and physiology-chemistry of maize[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 1999, 18(2):111-113.
- [16] 苗明升, 朱圆圆, 曹明霞, 等. 重金属铅对玉米萌发和早期生长发育的影响[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2003, 18(1):82-84.
MIAO Ming-sheng, ZHU Yuan-yuan, CAO Ming-xia, et al. The influence of lead on the bourgeon and development of zea mays [J]. *Journal of Shandong Normal University (Natural Science)*, 2003, 18(1):82-84.
- [17] 彭 鸣, 王焕校, 吴玉树. 镉、铅诱导的玉米(*Zea mays* L.)幼苗细胞超微结构和变化[J]. 中国环境科学, 1991, 11(6):426-431.
PENG Ming, WANG Huan-xiao, WU Yu-shu. Seedling cell ultrastructure and changes of maize(*Zea mays* L.) under the induction of cadmium and lead[J]. *China Environmental Science*, 1991, 11(6):426-431.
- [18] 金 岚, 王振堂, 朱秀丽, 等. 环境生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
JIN Lan, WANG Zhen-tang, ZHU Xiu-li, et al. Environmental ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2001.
- [19] 藤 应, 黄昌勇, 龙 健, 等. 铅锌银尾矿污染区土壤微生物区系及主要生理类群研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4):408-411.
TENG Ying, HUANG Chang-yong, LONG Jian, et al. Microbial populations and major physiological groups in soils contaminated by Tailings from a Pb, Zn and Ag mine [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(4):408-411.
- [20] FlieBbach A, Martens R, Reber H H. Soil microbial biomass and microbial activity in soils treated with heavy. metal contaminated sewage sludge[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26:1201-1205.
- [21] Baath E, Diaz-ravina M, Frostegard A. Effect of metal-rich sludge amendments on the soil microbial community[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1998, 64:238-245.
- [22] Bliss C I. The toxicity of poisons applied jointly[J]. *Annual Applied Biology*, 1939, 26:585-615.
- [23] 罗素群. Hg、Cd、Pb、Cr 对放线菌、曲霉菌的影响及生物累积[J]. 农业环境保护, 1987, 6(5):12-15.
LUO Su-qun. Effects of Hg、Cd、Pb、Cr on actinomycetes, aspergillus and bioaccumulation[J]. *Agriculture Environmental Protection*, 1987, 6(5):12-15.
- [24] 刘 霞, 刘树庆, 王胜爱, 等. 重金属复合污染对土壤微生物生态特征的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊):17-21.
LIU Xia, LIU Shu-qing, WANG Sheng-ai, et al. Influence on ecological characteristics of microorganisms in soils polluted by compound heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Supplement):17-21.
- [25] 杨济龙, 祖艳群, 洪常青, 等. 蔬菜土壤微生物种群数量与土壤重金属含量的关系[J]. 生态环境, 2003, 12(3):281-284.
YANG Ji-long, ZU Yan-qun, HONG Chang-qing, et al. Relationship between microorganisms and heavy metal in vegetable soil in Chengong County[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, 12(3):281-284.
- [26] Taylor J P, Wilson B, Mills M S. Comparing of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoil using various techniques[J]. *Soil Biology & Biochemical*, 2002, 34:387-401.
- [27] Roper M M, Opel-Keller K M. Soil micro flora as bioindicators of soil health[C]//Pankhurst C, et al. eds. Biological indicators of soil health. CAB International, 1997:157-177.