

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第7期 Vol.33 No.7 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 7 期

2013 年 4 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 线虫转型发育和寄主识别的化学通讯研究进展..... 张 宾,胡春祥,石 进,等 (2003)
- 生物物种资源监测原则与指标及抽样设计方法..... 徐海根,丁 晖,吴 军,等 (2013)

个体与基础生态

- 呼伦贝尔草原人为火空间分布格局..... 张正祥,张洪岩,李冬雪,等 (2023)
- 青藏高原草地地下生物量与环境因子的关系..... 杨秀静,黄 玫,王军邦,等 (2032)
- 1961—2010 年桂林气温和地温的变化特征 陈 超,周广胜 (2043)
- 黄泥河自然保护区狗冬季卧息地选择..... 朱洪强,葛志勇,刘 庚,等 (2054)
- 青藏高原草地植物叶解剖特征..... 李全发,王宝娟,安丽华,等 (2062)
- 青藏高原高寒草甸夏季植被特征及对模拟增温的短期响应..... 徐满厚,薛 娴 (2071)
- 高温影响番茄小孢子发育的细胞学研究..... 彭 真,程 琳,何艳军,等 (2084)
- 黄土丘陵半干旱区柠条林株高生长过程新模型..... 赵 龙,王振凤,郭忠升,等 (2093)
- 柞属 7 种植物种子的发芽抑制物质研究..... 李庆梅,刘 艳,刘广全,等 (2104)
- 水分胁迫和杀真菌剂对黄顶菊生长和抗旱性的影响..... 陈冬青,皇甫超河,刘红梅,等 (2113)
- 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较..... 沈章军,欧祖兰,田胜尼,等 (2121)
- 云雾山典型草原火烧不同恢复年限土壤化学性质变化..... 李 媛,程积民,魏 琳,等 (2131)
- 根系分区交替灌溉条件下水肥供应对番茄果实硝酸盐含量的影响..... 周振江,牛晓丽,李 瑞,等 (2139)
- 喀斯特山区土地利用对土壤团聚体有机碳和活性有机碳特征的影响..... 李 娟,廖洪凯,龙 健,等 (2147)
- 自生固氮菌活化土壤无机磷研究..... 张 亮,杨宇虹,李 倩,等 (2157)
- 德国鳶尾对 Cd 胁迫的生理生态响应及积累特性 张呈祥,陈为峰 (2165)
- 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性..... 铁 梅,宋琳琳,惠秀娟,等 (2173)
- 基于叶面积指数改进的直角双曲线模型在玉米农田生态系统中的应用..... 孙敬松,周广胜 (2182)
- 中稻田三种飞虱的捕食性天敌优势种及农药对天敌的影响..... 林 源,周夏芝,毕守东,等 (2189)

种群、群落和生态系统

- 珠江口超微型浮游植物时空分布及其与环境因子的关系..... 张 霞,黄小平,施 震,等 (2200)
- 输水前后塔里木河下游物种多样性与水因子的关系..... 陈永金,刘加珍,陈亚宁,等 (2212)
- 南海西北部陆架区鱼类的种类组成与群落格局..... 王雪辉,林昭进,杜飞雁,等 (2225)
- 滇西北高原碧塔湖滨沼泽植物群落分布与演替 韩大勇,杨永兴,杨 杨 (2236)
- 石羊河下游白刺灌丛演替过程中群落结构及数量特征..... 靳虎甲,马全林,何明珠,等 (2248)

资源与产业生态

- 土壤深松和补灌对小麦干物质生产及水分利用率的影响..... 郑成岩,于振文,张永丽,等 (2260)

豆科绿肥及施氮量对旱地麦田土壤主要肥力性状的影响..... 张达斌,姚鹏伟,李 婧,等 (2272)

沟壑全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响..... 李 荣,侯贤清,贾志宽,等 (2282)

城乡与社会生态

北京北护城河河岸带的温湿度调节效应 吴芳芳,张 娜,陈晓燕 (2292)

西安太阳总辐射时空变化特征及对城市发展的响应..... 张宏利,张纳伟锐,刘敏茹,等 (2304)

研究简报

安徽琅琊山大型真菌区系多样性..... 柴新义,许雪峰,汪美英,等 (2314)

中国生态学会 2013 年学术年会征稿通知 (2320)

第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)

中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 318 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-04



封面图说: 金灿灿的小麦熟了——小麦是世界上最早栽培的农作物之一,是一种在世界各地广泛种植的禾本科植物,起源于中东地区。全世界大概有 43 个国家,近 35%—40% 的人口以小麦为主要粮食。小麦是禾谷类作物中抗寒能力较强的越冬作物,具有一定的耐旱和耐盐碱能力。中国的小麦分布于全国各地,主要集中于东北平原、华北平原和长江中下游一带。小麦秋季播种、冬季生长、春季开花、夏季结实。子粒含有丰富的淀粉、较多的蛋白质、少量的脂肪,还有多种矿物质元素和维生素 B,是一种营养丰富、经济价值较高的粮食。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201112312026

铁梅, 宋琳琳, 惠秀娟, 张朝红, 薛爽, 陈忠林, 王杰, 张莹. 施污土壤重金属有效态分布及生物有效性. 生态学报, 2013, 33(7): 2173-2181.

Tie M, Song L L, Hui X J, Zhang Z H, Xue S, Chen Z L, Wang J, Zhang Y. The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(7): 2173-2181.

施污土壤重金属有效态分布及生物有效性

铁梅*, 宋琳琳, 惠秀娟, 张朝红, 薛爽, 陈忠林, 王杰, 张莹

(辽宁大学 环境学院, 沈阳 110036)

摘要: 以城市污泥为研究对象, 将城市污泥与土壤按照一定的质量比配成污泥混合土壤。采用 6 种不同性质提取剂 (0.05 mol/L EDTA、0.1 mol/L CH₃COOH、0.01 mol/L CaCl₂、1 mol/L CH₃COONH₄、0.05 mol/L NaHCO₃ 和 0.05 mol/L Tris-HCl) 分别对污泥混合土壤中重金属 (Cd、Pb、Cu 和 Zn) 的螯合态、酸溶态、中性交换态、中性结合态、碱性交换态和蛋白质结合态进行提取, 考察污泥的添加对土壤中不同形态重金属的消长规律。通过黑麦草盆栽试验, 探究污泥混合土壤中不同形态重金属的植物可利用性。结果表明: 污泥混合土壤中重金属螯合态比例较大, 占总量的 20.3%—40.0%; 其次为酸溶态和中性结合态, 而中性交换态、碱性交换态和蛋白质结合态的含量较低。污泥的添加促进了黑麦草对 Cd、Cu 和 Zn 的吸收, 在污泥添加率为 44.4% 时根部对其吸收量达最大, 分别较 CK 处理增加了 0.3、2.3 和 6.5 倍。抑制了对 Pb 的吸收, 在污泥添加率为 37.5% 时, 根部对 Pb 的吸收较 CK 处理下降 0.4 倍。Pearson 相关系数分析结果表明: 污泥混合土壤中以螯合态、酸溶态和中性结合态存在重金属可被黑麦草吸收利用。

关键词: 城市污泥; 重金属形态; 黑麦草; 生物有效性

The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge

TIE Mei*, SONG Linlin, HUI Xiujuan, ZHANG Zhaohong, XUE Shuang, CHEN Zhonglin, WANG Jie, ZHANG Ying

College of Environmental Science, Liaoning University, Shenyang 110036, China

Abstract: This study, taking the soil amended with sewage sludge taken from the Northern Wastewater Treatment Plant (Shenyang, China) as research object, investigated the dose-response effects of sewage sludge on chemical form distribution of Cd, Pb, Cu and Zn in soil. Moreover, the bioavailability of different forms of heavy metals in soil amended with sewage sludge was studied by means of Perennial Ryegrass pot experiment. The soil samples amended with sewage sludge with a sludge dosage rate of 0, 9.1%, 16.7%, 28.6%, 37.5%, 44.4% and 50% (dry weight basis) were designated as CK, S₁, S₂, S₃, S₄, S₅, S₆, respectively. The chelated form, acid-soluble form, exchangeable form and bound form in neutral condition, alkali-soluble form and protein-binding form of heavy metals in soil amended with sewage sludge were extracted with 0.05 mol/L EDTA, 0.1 mol/L CH₃COOH, 0.01 mol/L CaCl₂, 1 mol/L CH₃COONH₄, 0.05 mol/L NaHCO₃ and 0.05 mol/L Tris-HCl, respectively. Results showed that the relative content of the chelated form of heavy metals in soil amended with sewage was the highest, accounting for 20.3%—40.0%, followed by alkali-soluble form and bound form in neutral of heavy metals. The contents of the exchangeable form in neutral, alkali-soluble form and protein-binding form of heavy metals were relatively low. The accumulation of Cd, Cu and Zn in ryegrass was found to increase with

基金项目: 辽宁省科技厅项目 (20102086); 辽宁大学“211”工程重点学科项目 (HJ211010)

收稿日期: 2011-12-31; 修订日期: 2012-06-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tiemei07@yahoo.cn

increase in sludge dosage rate. The highest content of Cd, Cu and Zn in ryegrass roots was observed with a sludge dosage rate of 44.4%, which was 0.3, 2.3 and 6.5 times higher than those at control (CK), respectively. In contrast, the accumulation of Pb in ryegrass decreased with the increase in sludge dosage rate. A decrease of 40% in Pb content in ryegrass roots was observed with a sludge dosage rate of 37.5% as compared to the control. In order to assess the bioavailability of metals, correlation analysis using SPSS statistical software was performed to investigate the relationship between the total accumulation of heavy metals in ryegrass and contents of available forms of heavy metals in soil amended with different sludge dosage rate. The results of Pearson correlation coefficient analysis showed that a significantly ($P < 0.01$) positive correlation was found between the contents of chelated form of Cu and Zn and plant accumulated metals. The content of heavy metals in ryegrass had significantly positive correlations with the content of Cu and Zn bound form under neutral condition in soil amended with sludge. There were power functions with positive coefficients relationships between the contents of Cd and Zn in ryegrass and the contents of acid-soluble form of Cd and Zn in artificial soil. Whereas, significantly ($P < 0.05$) negative correlation was observed between Pb content in ryegrass and available forms of Pb content. The overall correlation data showed that the contents of heavy metals existing in the chelated form, acid-soluble form and bound form under neutral condition in soil amended with sludge correlated with the contents of heavy metals in ryegrass, suggesting that the three available forms of heavy metals might be absorbed and used by ryegrass. Therefore, contents of chelated form, acid-soluble form and bound form under neutral of heavy metals could be used as the indicator of bioavailable fraction in soil amended with sewage sludge.

Key Words: sewage sludge; heavy metals forms; ryegrass; bioavailability

城市污泥是城市污水处理过程中的伴生产物,是一种由有机物质残片、细菌菌体、无机颗粒、胶体等组成的极其复杂的非均质体^[1],由于其浓缩了污水中大量的重金属,成为污泥资源化利用的最大障碍^[2-3]。污泥中重金属进入土壤后经溶解、沉淀、凝聚、络合、吸附等过程表现出不同的环境效应^[4-5],而仅凭总量信息较难对重金属的环境效应进行准确判断,但重金属的有效态却能更有效的体现重金属在污泥和土壤中的活性和生物有效性^[6]。“有效态重金属”主要指土壤中能被植物所吸收与同化的重金属形态^[7]。它不仅包括水溶态、酸溶态、螯合态和吸附态,也包括能在短期内释放为植物可吸收利用的某些形态,如某些易分解的有机态和易风化的矿物态等^[8]。确定土壤中有效态重金属含量及其对植物吸收重金属量的影响已成为目前研究的热点。进一步研究表明,通过化学溶剂提取法所得重金属有效态量与其产生的生物效应之间的相关性大小,可作为评价土壤重金属短期或中期所存在的危害性^[9-10]。段吴燕等^[11]和 Gupta 等^[12]研究发现 EDTA(乙二胺四乙酸二钠)提取的是土壤中植物可利用态重金属,其含量能较好的评价在一段时间内重金属对植物吸收的影响。也有研究^[13-15]表明,中性盐 CaCl_2 (氯化钙)和 $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (醋酸铵)能对土壤中交换态和水溶态重金属进行有效提取,其提取量与植物可吸收利用重金属含量密切相关。

目前一些国家已采用水溶态和交换态重金属含量来评价不同土壤重金属污染程度大小^[10,16],而我国目前仍利用总量来评价,相对而言对重金属形态的分析与评价研究比较滞后。本研究采用不同性质单一提取剂就污泥混合土壤中重金属的有效态进行提取和分析,以了解污泥中重金属进入土壤后的归趋及对土壤有效态重金属含量的影响,并通过黑麦草对污泥混合土壤中重金属的迁移转化情况来指示其生物有效性和环境效应,从而为污泥资源化利用提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤、污泥和植物

供试土壤采自辽宁沈阳棕壤土的耕表层土壤(0—20 cm);供试污泥取自沈阳市北部污水处理厂脱水污泥;供试植物为丹麦多年生黑麦草(品种名称:绅士)。

1.2 实验方法

将脱水污泥和土壤在自然条件下风干、研磨过 2 mm 筛后,将污泥与土壤按照不同质量比均匀混配,分别形成污泥添加率为 0% (CK)、9.1% (S_1)、16.7% (S_2)、28.6% (S_3)、37.5% (S_4)、44.4% (S_5) 和 50% (S_6) 7 种污泥混合土壤。将各污泥混合土壤分别放于塑料盆中,室温下定期以定量去离子水多次浇灌浸泡、风干,使其物相达平衡,历时 30d 后,各留取 100g 样,研磨过 0.15 mm 筛后,用于相关指标的测定;另取 800g 分别装入种植盆中,每组平行 3 个样品。定量播种黑麦草种子,生长 50 d 后采样,并将根和叶分开,去离子水洗净干燥备用。

1.3 分析方法

1.3.1 污泥、土壤和各混合样品有机质含量和 pH 值的测定

采用重铬酸钾氧化-外加热法测定各样品有机质含量;1:2.5 土水比法测定各样品 pH 值^[17]。

1.3.2 污泥、土壤、各混合样品和植物样品中重金属总量的测定

准确称取 0.5 g 各污泥土壤混合样品置于聚四氟乙烯溶样杯中,加入 6 mL 浓 HNO_3 ,在 85—95℃ 水浴预处理 30 min 后装入密闭消解罐,置于 MDS-2002A 型压力自控密闭微波系统中,采用梯度压力消解程序进行消解;消解结束后,取出冷却、定容、过滤,置于 4℃ 保存,每个样品设置 3 个平行样,并以相同条件做空白样。采用美国 Varian 公司 SpectrAA 220 型原子吸收光谱仪测定其含量。

准确称取黑麦草根(0.5 g)和叶(2.0 g)置于溶样杯中,加入 5 mL 浓 HNO_3 ,在 85—95℃ 水浴预处理 30 min 后再加入 1 mL H_2O_2 ,装入密闭消解罐中,消解和测定方法同上。

1.3.3 污泥、土壤和各混合样品中不同形态重金属的分离提取

采用 6 种提取剂分别对各处理样品中螯合态、酸溶态、中性交换态、中性结合态、碱性交换态和蛋白质结合态的重金属进行分离提取,见表 1。各样品在室温(25℃),120 r/min 下提取 3 h 后,4000 r/min 下离心 20 min,过滤,滤液测定方法同上。

表 1 污泥中重金属有效态的提取

Table 1 The extraction conditions of available form of heavy metals in sludge

提取剂 Extracting agent	0.05 mol/L EDTA(乙二 胺四乙酸二钠)	0.1 mol/L CH_3COOH (醋酸)	0.01 mol/L CaCl_2 (氯化钙)	1 mol/L $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (醋酸铵)	0.05 mol/L NaHCO_3 (碳酸氢钠)	0.05 mol/L Tris-HCl
形态 Chemical form	螯合态 Chelate form	酸溶态 Acid-soluble form	中性交换态 Neutral exchange form	中性盐结合态 Neutral bound form	碱溶态 Alkali-soluble form	蛋白质结合态 Protein binding form
固液比 Solid:liquid	1:5	1:5	1:5	1:5	1:5	1:5
pH(25℃)	4.6	2.8	7.0	7.0	8.5	8.0

1.4 数据统计分析

实验数据采用 Origin 7.5 作图。采用 SPSS 13.0 统计软件对实验数据进行单因素方差分析,即在平均值 ($N=3$) 比较基础上,采用 LSD 和 Duncan 方法,在 $P=0.05$ 或 0.01 水平进行数据差异显著性检验,以比较不同污泥比例混合基质间各指标的差异显著性,同时利用 Person(two-tailed)法进行相关性分析。

2 结果和分析

2.1 不同污泥配比对土壤理化性质的影响

由表 2 可知,随着污泥添加比例的增加,混合土壤的有机质含量和 pH 值逐渐增加。污泥的添加对土壤中 4 种重金属总量影响显著($P<0.05$),随着污泥添加比例的增加,混合土壤中 Cd、Cu 和 Zn 总量显著增加($P<0.05$),Pb 总量增幅较小。

2.2 不同污泥比对土壤重金属有效态的影响

2.2.1 不同污泥比对土壤重金属螯合态和酸溶态的影响

由表 3 可知,污泥中四种重金属螯合态含量均显著大于土壤。污泥的添加促进了土壤中重金属-螯合物

的生成,螯合态 Zn 含量增加最多,其次为 Cu 和 Cd,均在 S_5 组达最大值,分别为 223.83、34.57 和 0.92 mg/kg,较 CK 分别增加了 37.5、3.1 和 1.1 倍;污泥添加对 Pb 螯合态含量在 S_6 组出现最大值,为 39.77 mg/kg,但增幅较小,只较 CK 增加了 0.6 倍。污泥混合土壤中四种重金属螯合态存在比例大小表现为 $Pb > Zn > Cd > Cu$ 。

表 2 不同污泥配比对土壤理化性质的影响

Table 2 Effect of sludge dosage rate on physical and chemical characteristics of soil and contents of heavy metals in soil

理化指标 Physico-chemical properties	处理 Treatments							
	CK	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	污泥 Sludge
有机质 Organic matter /%	3.61±0.64a	4.57±0.48ab	5.34±0.97ab	7.12±0.74bc	9.27±0.50c	12.40±1.10d	15.54±0.48e	34.07±2.04f
pH	6.97±0.05a	7.06±0.02ab	7.17±0.11bc	7.26±0.06cd	7.39±0.06de	7.45±0.06ef	7.49±0.08ef	7.59±0.18f
Total Cd / (mg/kg)	1.50±0.02a	1.84±0.04b	1.96±0.04b	2.35±0.05c	3.02±0.04d	3.27±0.06e	3.42±0.03e	4.87±0.25f
Total Pb / (mg/kg)	88.86±2.91a	89.47±2.18a	94.90±4.34ab	96.10±1.60ab	99.53±4.43ab	105.21±3.38bc	110.74±2.58c	132.04±4.24d
Total Cu / (mg/kg)	51.97±0.44a	63.02±3.25b	79.06±2.95c	101.45±2.30d	136.61±1.56e	157.73±3.88f	163.15±1.37f	292.06±12.60g
Total Zn / (mg/kg)	90.85±3.98a	152.83±6.00b	210.27±9.43c	385.76±4.45d	500.43±0.88e	575.05±7.59f	584.31±7.79f	720.00±1.53g

同行中标有相同小写字母表示差异不显著 ($P > 0.05$); 表中数据为 mean ±SE, 重复数 $N=3$; CK、 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 S_6 分别代表施污土壤中污泥的添加率为 0%、9.1%、16.7%、28.6%、37.5%、44.4% 和 50%

表 3 不同污泥配比对土壤重金属螯合态和酸溶态含量的影响

Table 3 Effect of sludge dosage rate on contents of the chelated and acid-soluble forms of heavy metals in soil

形态 Chemical form	元素 Element	处理 Treatments							
		CK	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	污泥 Sludge
螯合态 Chelate form /(mg/kg)	Cd	0.43±0.03a (28.9)	0.57±0.04b (30.8)	0.55±0.03b (27.9)	0.59±0.04b (25.1)	0.82±0.09cd (27.3)	0.92±0.03e (28.2)	0.87±0.05ce (25.4)	0.76±0.05d (15.6)
	Pb	24.68±0.38a (27.8)	36.33±1.14b (40.6)	31.95±0.66c (33.7)	35.84±0.59b (37.3)	38.12±0.60d (38.3)	39.45±0.52e (37.5)	39.77±0.55e (35.9)	35.90±0.32b (27.2)
	Cu	8.39±0.43a (16.1)	12.78±0.29b (20.3)	16.35±0.43c (20.7)	23.06±0.16d (22.7)	31.99±0.55e (23.4)	34.57±0.60f (22.0)	33.19±0.59g (20.4)	17.25±0.33h (5.9)
	Zn	5.82±0.10a (6.4)	60.67±0.63b (40.0)	58.95±0.77c (28.0)	125.52±4.95d (32.5)	181.07±1.95e (36.2)	223.83±7.93f (39.0)	208.62±2.13g (35.7)	91.98±2.90c (12.8)
酸溶态 Acid-soluble form /(mg/kg)	Cd	0.19±0.03a (12.7)	0.37±0.05bc (19.9)	0.41±0.03b (21.1)	0.64±0.02d (27.4)	0.82±0.03e (27.3)	0.63±0.05d (19.4)	0.76±0.04e (22.2)	0.33±0.09c (6.7)
	Pb	1.38±0.04a (1.6)	2.82±0.10b (2.1)	2.16±0.06c (2.3)	2.77±0.06d (2.9)	3.31±0.03e (3.3)	3.60±0.06f (3.4)	4.35±0.15g (3.9)	3.75±0.09h (2.8)
	Cu	0.48±0.05a (0.9)	2.82±0.10b (4.5)	3.47±0.13c (4.4)	3.34±0.04c (3.3)	2.75±0.09b (2.0)	1.19±0.04d (0.8)	1.37±0.05e (0.8)	1.64±0.04f (0.6)
	Zn	12.18±0.78a (13.4)	59.05±2.18b (38.6)	67.06±1.02c (31.9)	101.84±2.36d (26.4)	110.41±0.96e (22.1)	92.07±1.74f (16.0)	96.31±0.69g (16.5)	84.14±1.49h (11.7)

括号内代表重金属各形态含量占全量的百分比

利用 CH_3COOH 对污泥混合土壤中酸溶态重金属提取结果如表 3 所示,污泥中 4 种重金属酸溶态含量均大于土壤,比例大小表现为 $Zn > Cd > Pb > Cu$ 。污泥添加对土壤酸溶态 Cd、Pb 和 Zn 含量影响显著,酸溶态 Cd 和 Zn 含量随污泥添加量的增加而显著增加,在 S_4 组达最大值 0.82 mg/kg 和 110.41 mg/kg,较 CK 分别增加了 3.3 和 5.1 倍,但当污泥添加量继续增加时,酸溶态 Cd 和 Zn 含量和比例却有所降低;酸溶态 Pb 含量和比例与污泥的添加量成正比,在 S_6 组达最大值 4.35 mg/kg,较 CK 增加了 2.2 倍;污泥的添加使酸溶态 Cu 含量呈现出先显著升高后显著降低的趋势,存在比例由 S_1 处理的 4.5% 下降到 S_5 处理的 0.8%。

2.2.2 不同污泥配比对土壤重金属中性交换态和结合态的影响

采用中性盐 $CaCl_2$ 对污泥混合土壤中性交换态重金属进行提取。结果由表 4 可知,污泥的添加对土壤中性交换态 Cd 和 Pb 含量和比例影响不显著,各污泥混合土壤中性交换态 Cd、Cu 和 Pb 含量分别在 0.3、0.7 mg/kg 和 1.2 mg/kg 以下,且中性交换态 Cu 和 Pb 比例低于 0.4% 和 1.3%。施污土壤中性交换态 Zn 含量未检出。

$\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 在溶液 pH 值呈中性时可提取介质中以中性结合态存在的重金属。由表 4 可看出,污泥混合土壤中 4 种重金属中性结合态比例大小为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu}$ 。污泥的添加对中性结合态 Cd 含量影响不显著(均在 0.25 mg/kg 以下),而中性结合态 Pb、Cu 和 Zn 含量有所增加,分别在 $1.13\text{—}3.03 \text{ mg/kg}$ 、 $0.90\text{—}2.10 \text{ mg/kg}$ 和 $6.62\text{—}12.19 \text{ mg/kg}$ 之间,但对土壤中性结合态 Pb 和 Cu 比例的变化率却在 1.4% 和 0.7% 以下。

表 4 不同污泥配比对土壤重金属中性交换态和结合态含量的影响

Table 4 Effect of sludge dosage rate on contents of the neutral exchange and neutral bound forms of heavy metals in soil

形态 Chemical form	元素 Element	处理 Treatments							
		CK	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	污泥 Sludge
中性交换态 Neutral exchange form /(mg/kg)	Cd	0.12±0.03a (7.8)	0.18±0.03bcd (9.6)	0.19±0.04be (9.7)	0.21±0.04de (8.8)	0.21±0.05ce (7.0)	0.13±0.02ab (4.1)	0.14±0.02ab (4.0)	0.24±0.03e (5.0)
	Pb	0.84±0.07a (1.0)	0.91±0.06a (1.0)	1.06±0.07b (1.1)	1.12±0.05b (1.2)	1.23±0.05c (1.2)	1.05±0.05b (1.0)	1.12±0.04b (1.0)	1.29±0.03c (1.0)
	Cu	nd	0.01±0.01a (0.0)	0.09±0.02b (0.1)	0.19±0.02c (0.2)	0.53±0.03d (0.4)	0.67±0.03e (0.4)	0.45±0.04f (0.3)	0.17±0.02c (0.1)
	Zn	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.30±0.02 (0.1)
中性结合态 Neutral bound form /(mg/kg)	Cd	0.19±0.02ab (12.9)	0.19±0.04ab (10.1)	0.19±0.02ab (9.5)	0.19±0.02ab (7.9)	0.19±0.01ab (6.3)	0.22±0.01a (6.6)	0.17±0.02b (5.1)	0.22±0.04a (4.5)
	Pb	1.32±0.04a (1.5)	1.13±0.04b (1.3)	1.49±0.04c (1.6)	1.57±0.05c (1.6)	1.97±0.09d (2.0)	3.03±0.13e (2.9)	2.76±0.12f (2.5)	2.83±0.08f (2.1)
	Cu	0.95±0.09a (1.8)	0.90±0.02a (1.4)	0.93±0.04a (1.2)	1.10±0.05b (1.1)	1.67±0.06c (1.2)	2.10±0.06d (1.3)	1.94±0.07e (1.2)	2.21±0.11d (0.8)
	Zn	4.85±0.48a (5.30)	6.62±0.56b (4.3)	7.38±0.19c (3.5)	8.69±0.41d (2.3)	12.19±0.20e (2.4)	11.78±0.38e (2.1)	11.66±0.31e (2.0)	18.93±0.34f (2.6)

括号内代表重金属各形态含量占全量的百分比; nd 代表仪器未检出

2.2.3 不同污泥配比对土壤重金属碱性交换态和蛋白质结合态的影响

NaHCO_3 提取的是污泥混合土壤中以碱性交换态形式存在的重金属。由表 5 可看出,污泥的添加对土壤碱性交换态 Pb 和 Cu 含量影响较小,分别介于 $0.24\text{—}0.41 \text{ mg/kg}$ 和 $1.02\text{—}2.45 \text{ mg/kg}$ 之间,存在比例分别低于 0.8% 和 2% ;污泥添加虽促进了碱性交换态 Zn 的溶出,但其含量也仅在 $0.11\text{—}1.55 \text{ mg/kg}$ 之间,比例

表 5 不同污泥配比对土壤重金属碱性交换态和蛋白质结合态含量的影响

Table 5 Effect of sludge dosage rate on contents of the alkali-soluble and protein-binding forms of heavy metals in soil

形态 Chemical form	元素 Element	处理 Treatments							
		CK	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	污泥 Sludge
碱性交换态 Alkali-soluble form /(mg/kg)	Cd	0.20±0.05a (13.6)	0.18±0.03ab (9.8)	0.18±0.04ab (9.4)	0.19±0.02ab (7.9)	0.18±0.03ab (6.1)	0.20±0.04a (6.2)	0.22±0.02a (6.3)	0.14±0.04b (2.9)
	Pb	nd	nd	0.26±0.03a (0.8)	0.25±0.03a (0.3)	0.24±0.04a (0.2)	0.41±0.05b (0.4)	0.35±0.04b (0.3)	0.80±0.05c (0.6)
	Cu	0.82±0.08a (1.6)	1.02±0.11b (1.6)	1.48±0.04c (1.9)	1.57±0.04c (1.6)	2.01±0.03d (1.5)	2.45±0.05e (1.6)	2.03±0.09d (1.2)	2.55±0.09e (0.9)
	Zn	0.01±0.01a (0.0)	0.11±0.02a (0.1)	0.23±0.02b (0.1)	0.73±0.05c (0.2)	1.10±0.12d (0.2)	1.32±0.08e (0.2)	1.55±0.08f (0.3)	1.31±0.06e (0.2)
蛋白质结合态 Protein binding form /(mg/kg)	Cd	0.02±0.02a (1.1)	0.01±0.01a (0.4)	0.01±0.01a (0.5)	0.02±0.01a (0.9)	0.03±0.02a (0.9)	0.02±0.02a (0.5)	0.02±0.01a (0.5)	0.02±0.01a (0.4)
	Pb	0.26±0.06a (0.3)	0.32±0.03a (0.4)	0.45±0.05b (0.5)	0.54±0.06bc (0.6)	0.66±0.06d (0.7)	0.51±0.05bc (0.5)	0.47±0.07b (0.4)	0.60±0.07cd (0.5)
	Cu	0.24±0.05a (0.5)	0.39±0.04b (0.6)	0.51±0.04c (0.7)	0.54±0.03c (0.5)	0.67±0.06d (0.5)	0.90±0.04e (0.6)	0.67±0.08d (0.4)	0.76±0.07d (0.3)
	Zn	nd	nd	nd	1.72±0.09a (0.5)	1.12±0.12b (0.2)	0.09±0.02c (0.1)	0.40±0.04d (0.1)	4.55±0.25e (0.6)

括号内代表重金属各形态含量占全量的百分比 nd 代表仪器未检出

低于 0.3%。而在碱性环境中, Cd 活性要高于其他 3 种重金属的活性。

采用 Tris-HCl 缓冲液对污泥混合土壤中重金属在碱性条件下可溶性蛋白态组分进行提取。结果表明, 污泥的添加对土壤中四种重金属的蛋白质结合态含量影响不显著, 其存在比例均在 1% 以下。

2.3 污泥添加对黑麦草体内重金属含量的影响

图 1 结果表明, 污泥的添加显著促进了黑麦草根对 Cd、Cu 和 Zn 的吸收 ($P < 0.05$), 在 S_5 组吸收量达最大, 分别为 9.65 mg/kg、101.09 mg/kg 和 976.90 mg/kg, 较 CK 增加了 0.3、2.3 和 6.5 倍; 而黑麦草根对 Pb 的吸收量却随污泥添加量的增加显著下降 ($P < 0.05$), 在 S_4 组时达 22.79 mg/kg, 是 CK 的 0.6 倍。

黑麦草叶部的重金属含量显著低于根部重金属含量。污泥的添加显著增加了叶部对 Cu 和 Zn 的吸收; 当污泥以较低比例 (S_1 — S_3) 添加到土壤中时, 叶部对 Cd 和 Pb 的吸收量与 CK 间无显著差异 ($P < 0.05$), 而以较高污泥比例添加 (S_4 — S_6) 时, 叶部对 Cd 的吸收量虽与 CK 之间差异显著 ($P < 0.05$), 但各处理之间的差异并不显著, 而叶部 Pb 含量却随污泥添加量的增加而显著降低。

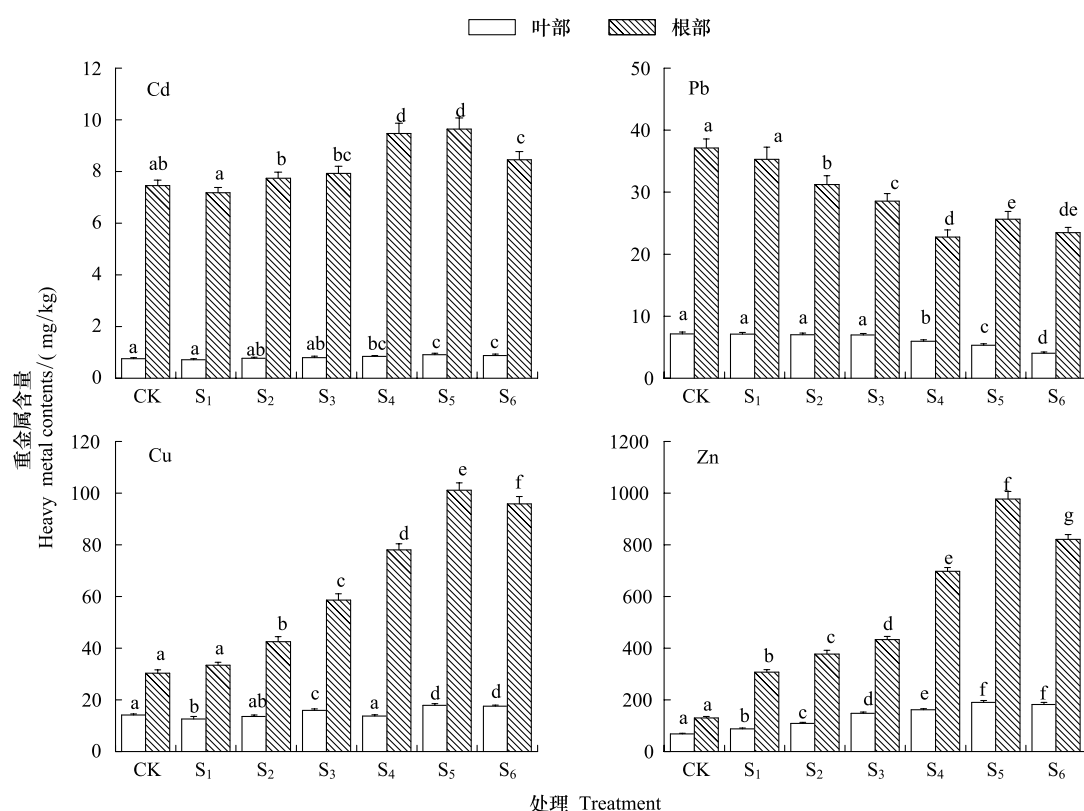


图 1 不同污泥配比处理下黑麦草根和叶的重金属含量

Fig. 1 The heavy metal contents in leaves and roots of ryegrass grown in soil with different sludge dosage rates

2.4 重金属的生物有效性与施污土壤有效态重金属的相关关系

通过对污泥混合土壤中重金属各有效态含量与植物体内重金属吸收量间的相关性大小进行比较可知 (表 6), 黑麦草体内对 Cd 吸收量仅与土壤中螯合态和酸溶态 Cd 含量存在显著正相关, 相关性大小为螯合态 > 酸溶态; 草体对 Zn 吸收量受土壤中螯合态、酸溶态和中性结合态和碱性交换态 Zn 含量影响显著, 相关性大小顺序为螯合态 > 中性结合态 > 碱性交换态 > 酸溶态; 对 Cu 吸收量除与土壤酸溶态 Cu 含量相关性不显著外, 与其它形态 Cu 含量呈显著正相关, 相关性大小表现为螯合态 > 中性结合态 > 中性交换态 > 碱性交换态 > 蛋白质结合态; 但草体对 Pb 吸收量却与各形态 Pb 含量均呈显著负相关。

3 讨论

土壤中的重金属可与土壤中不同组分相结合呈现出不同的化学形态, 对环境产生不同的生态效应^[18]。

表 6 黑麦草体内重金属含量与各形态重金属含量的相关性

Table 6 Correlation coefficient between the heavy metal contents and the contents of different forms of heavy metals in ryegrass

元素 Element	螯合态 Chelate form	酸溶态 Acidic exchange form	中性交换态 Neutral exchange form	中性盐结合态 Neutral bound form	碱溶态 Alkaline exchange form	蛋白质结合态 Protein binding form
Cd	0.884 **	0.764 *	-0.046	0.434	0.202	0.699
Pb	-0.798 *	-0.967 **	-0.864 *	-0.827 *	-0.851 *	-0.825 **
Cu	0.970 **	-0.262	0.954 **	0.975 **	0.954 **	0.923 **
Zn	0.982 **	0.775 *	—	0.954 **	0.952 **	0.166

* 表示 $P < 0.05$ 显著相关; ** 表示 $P < 0.01$ 极显著相关

当外源物质(例如污泥)进入土壤中时,能够引起土壤中诸如有机质类等物质组成发生变化,从而影响重金属在土壤环境中的存在形态、迁移转化趋势和生物有效性^[19]。本研究采用 6 种不同性质提取剂对污泥混合土壤中有有效态重金属的提取结果可看出,施污土壤中 Cd、Pb、Cu 和 Zn 以螯合态存在比例较大,说明污泥进入土壤后,在降解过程中会产生大量的有机酸类物质,改变了土壤的表面性质,提供了更多的吸附点位,有助于重金属-溶解性配合物和螯合物的形成。而 EDTA 可在一定程度上模拟土壤中有机酸类物质,在螯合作用下,其有机配体与重金属离子竞争土壤中的吸附点位,将土壤中固态重金属释放出来。但污泥的施入对土壤 4 种重金属螯合态的含量和存在比例影响有显著性的差异。螯合态 Zn 含量和比例增幅最大,而对螯合态 Cu 影响却较小,这可能是因为污泥的施入对土壤有机质含量增加的同时,也使更多的 Cu^{2+} 与土壤中生物大分子有机官能团(主要是羧基、胺基和酚基等)形成稳定的配位化合物,由于 Cu 的配合物溶度积较小,进而影响到 Cu 的生物活性,抑制了可溶性 Cu 的形成,这与 Gupta 等^[4]和 Nomeda 等^[20]的研究结果一致。研究发现,污泥的添加能够显著提高土壤中酸溶态 Cd、Pb 和 Zn 的含量,却使其占总量的比例下降,这与污泥中酸溶态重金属存在比例较低有关。酸溶态重金属存在比例低于螯合态重金属存在比例是因为土壤环境中不同种类有机酸作为配体时与重金属络合强度存在差异。

从表 3、表 4 和表 5 来看,土壤溶液的 pH 值不仅决定了各种土壤矿物的溶解度,而且也影响着土壤溶液中各种离子在固相表面的吸附程度。当土壤溶液 pH 值呈酸性时,有助于溶解性金属配合物和螯合物的生成,增强了重金属的移动性和生物有效性;土壤溶液 pH 值在中性条件时,有效态重金属的提取量却显著低于螯合态和酸溶态;而溶液在碱性条件下,更不利于重金属有效态的析出。这是因为当周围土壤溶液环境 pH 值呈碱性时,重金属会与施污土壤中溶解度较低的氢氧化物、碳酸盐、磷酸盐等结合的能力增加,而使得重金属阳离子的交换能力降低,抑制了重金属的活性和迁移能力。

探究施污土壤中重金属有效态的含量与植物实际吸收重金属量的相关性能更好的表征土壤中重金属的植物可利用性^[21]。实验结果表明,黑麦草体内 Cd 含量与施污土壤中螯合态和酸溶态 Cd 含量密切相关;草体 Zn 含量与施污土壤中螯合态、酸溶态和中性结合态 Zn 含量相关性显著;草体内 Cu 含量与施污土壤螯合态、中性结合态 Cu 含量之间存在显著相关性;黑麦草 Pb 含量也与施污土壤酸溶态和中性结合态 Pb 含量密切相关。Žemberyová^[22]和 Merrs 等^[23]通过探究污泥和土壤中有有效态重金属含量可知,EDTA 可提取土壤中交换态和碳酸盐结合态的金属,并将其转化为水溶态,参与植物对重金属的吸收、运输等生理代谢过程;醋酸作为低分子量有机酸能够模拟土壤的根际环境,更好的体现重金属生物有效性。本研究采用土壤中重金属螯合态和酸溶态的含量和比例来表征不同重金属的有效性大小,依次分别为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Pb}$ 、 $\text{Zn} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Pb}$ 。而在酸性条件下,重金属有效性大小存在差异是因为重金属离子与不同配体形成的配合物与土壤表面结合能力大小不同,以及配合物在离解过程不同重金属离解常数的差异共同影响了重金属的有效性。通过相关性分析结果还可看出草体对 Pb 吸收量与各形态 Pb 含量均呈显著负相关,说明污泥的添加虽使土壤中各形态 Pb 含量增加,但植物根系分泌的有机酸类物质使得根际周围土壤中 Pb 形态发生了重构,形成溶解度较小的 PbCO_3 和 PbSO_4 等沉淀物,抑制了植物对 Pb 吸收和迁移,钝化了 Pb 的活性,此研究结果与王兆炜等^[24]一致。

目前,污泥的土地施用被认为是一种使自然资源循环的理想方法,将一定量的污泥施用于土壤中能够增

加土壤有机质含量并改善土壤肥力,但同时也改变了土壤中重金属的含量和生物有效性。就本研究而言,污泥的施入对土壤中螯合态和酸溶态 Cd、Cu 和 Zn 的含量影响较大,而对中性和碱性条件下的有效态重金属起到一定的钝化作用,不利于重金属的溶出。因此,将污泥施用于中性和碱性的土壤中时,能够固化污泥中重金属的活性,限制其向植物和环境的迁移,增加污泥施用的安全性。

References:

- [1] MacNicol R D, Beckett P H T. The distribution of heavy metals between the principal components of digested sewage sludge. *Water Research*, 1989, 23(2):199-206.
- [2] Bai L P, Fu Y P. Research progress of the application of urban sewage sludge to terrestrial ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1):416-426.
- [3] Ahumada I, Gudenschwager O, Carrasco M A, Castillo G. Copper and zinc bioavailabilities to ryegrass (*Lolium perenne* L.) and subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) grown in biosolid treated Chilean soils. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(8):2665-2671.
- [4] Gupta A K, Sinha S. Chemical fractionation and heavy metal accumulation in the plant of *Sesamum indicum* (L.) var. T55 grown on soil amended with tannery sludge: selection of single extractants. *Chemosphere*, 2006, 64(1):161-173.
- [5] Karvelas M, Katsoyiannis A, Samara C. Occurrence and fate of heavy metals in the wastewater treatment process. *Chemosphere*, 2003, 53(10):1201-1210.
- [6] Pueyo M, López-Sánchez J F, Rauret G. Assessment of CaCl_2 , NaNO_3 and NH_4NO_3 extraction procedures for the study of Cd, Cu, Pb and Zn extractability in contaminated soils. *Analytica Chimica Acta*, 2004, 504(2):217-226.
- [7] Koo B J, Chen W P, Chang A C, Page A L, Granato T C, Dowdy R H. A root exudates based approach to assess the long-term phytoavailability of metals in biosolids-amended soils. *Environmental Pollution*, 2010, 158(8):2582-2588.
- [8] Liu L, Gao X H, Song C Y, Li F S. Progress in the study of Cadmium occurrence and transportation in soils. *Energy Environmental Protection*, 2006, 20(2):6-9.
- [9] Chu Z D, Zhang G Y, Xue P Y, Xu G M, Bi S Q. Comparison of available Pb, Cd results extracted by different extractions in rhizosphere and non-rhizosphere soils. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(4):298-302.
- [10] Meers E, Samson R, Tack F M G, Ruttens A, Vandeghechuchte M, Vangronsveld J, Verloo M G. Phytoavailability assessment of heavy metals in soils by single extractions and accumulation by *Phaseolus vulgaris*. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 60(3):385-396.
- [11] Duan W Y, Ding Y, Shu H Y, Liao S Y, Yuan Y, Zeng T. Optimization on characterization method of heavy metal plant availability in yellow brown soil. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2009, 37(4):1760-1762.
- [12] Gupta A K, Sinha S. Assessment of single extraction methods for the prediction of bioavailability of metals to *Brassica juncea* L. Czern. (var. Vaibhav) grown on tannery waste contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 149(1):144-150.
- [13] Sahuquillo A, Rigol A, Rauret G. Overview of the use of leaching/extraction tests for risk assessment of trace metals in contaminated soils and sediments. *Trends in Analytical Chemistry*, 2003, 22(3):152-159.
- [14] Houba V J G, Temminghoff E J M, Gaikhorst G A, Vark W V. Soil analysis procedures using 0.01M calcium chloride as extraction reagent. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31(9/10):1299-1396.
- [15] Gommy C, Perdrix E, Galloo J C, Guillermo R. Metal speciation in soil: extraction of exchangeable cations from a calcareous soil with a magnesium nitrate solution. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1998, 72(1):27-45.
- [16] Sahuquillo A, López-Sánchez J F, Rubio R, Rauret G, Thomas R P, Davidson C M, Ure A M. Use of a certified reference material for extractable trace metals to assess sources of uncertainty in the BCR three-stage sequential extraction procedure. *Analytica Chimica Acta*, 1999, 382(3):317-327.
- [17] Zhang X F. *Practical Analysis of Agricultural*. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 112-165.
- [18] Zhi Y B, Wang Z L, Ma Z, Wang Z S, Deng Z F, Li H L. The speciation and bioavailability of heavy metals pollutants in soil along highway in Erdos. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5):2030-2039.
- [19] Zhou L X, Shen Q R, Chen T B, Zhang S. Distribution and chemical form of heavy metals in the principal components of undigested sludge. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2000, 20(3):269-274.
- [20] Nomeda S, Valdas P, Chen S Y, Lin J G. Variations of metal distribution in sewage sludge composting. *Waste Management*, 2008, 28(9):1637-1644.

- [21] Wang J, Zhang C B, Ke S S, Liu W L, Qian B Y. Effects of sewage sludge amendment on physico-chemical properties of mine tailings and physiological responses of *Cinnamomum camphora*. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2593-2602.
- [22] Žemberyová M, Barteková J, Závzdská M, Šišoláková M. Determination of bioavailable fractions of Zn, Cu, Ni, Pb and Cd in soils and sludges by atomic absorption spectrometry. *Talanta*, 2007, 71(4): 1661-1668.
- [23] Meers E, Laing G D, Unamuno V, Ruttens A, Vangronsveld J, Tack F M G, Verloo M G. Comparison of cadmium extractability from soils by commonly used single extraction protocols. *Geoderma*, 2007, 141(3/4): 247-259.
- [24] Wang Z W, Nan Z R, Zhao C J, Wang S L, Wu W F, Liao Q. Characteristics of heavy metal's uptake and accumulation by celery under single and combined pollution of Cd and Pb in arid oasis soils. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(5): 1256-1262.

参考文献:

- [2] 白莉萍, 伏亚萍. 城市污泥应用于陆地生态系统研究进展. *生态学报*, 2009, 29(1): 416-426.
- [8] 刘俐, 高新华, 宋存义, 李发生. 土壤中镉的赋存行为及迁移转化规律研究进展. *能源环境保护*, 2006, 20(2): 6-9.
- [9] 褚卓栋, 张桂银, 薛培英, 徐国明, 毕淑芹. 根际和非根际土壤有效铅镉的浸提剂筛选. *中国农学通报*, 2008, 24(4): 298-302.
- [11] 段吴燕, 丁园, 舒红英, 廖世玉, 袁勇, 曾涛. 黄棕壤重金属植物可利用性表征方法的优化. *安徽农业科学*, 2009, 37(4): 1760-1762.
- [17] 张行峰. 实用农化分析. 北京: 化学工业出版社, 2005: 112-165.
- [18] 智颖颢, 王再岚, 马中, 王中生, 邓自发, 李红丽. 鄂尔多斯地区公路沿线土壤重金属形态与生物有效性. *生态学报*, 2007, 27(5): 2030-2039.
- [19] 周立祥, 沈其荣, 陈同斌, 章申. 重金属及养分元素在城市污泥主要组分中的分配及其化学形态. *环境科学学报*, 2000, 20(3): 269-274.
- [21] 王江, 张崇邦, 柯世省, 刘文莉, 钱宝英. 添加污泥对尾矿砂理化性质及香樟生理特性的影响. *生态学报*, 2010, 30(10): 2593-2602.
- [24] 王兆伟, 南忠仁, 赵转军, 王胜利, 武文飞, 廖琴. 干旱区绿洲土壤 Cd、Pb 单一与复合污染下芹菜重金属累积特征研究. *土壤通报*, 2011, 42(5): 1256-1262.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 7 April, 2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Research progress on chemical communication of development and host-finding of nematodes ZHANG Bin, HU Chunxiang, SHI Jin, et al (2003)
- Principles, indicators and sampling methods for species monitoring XU Haigen, DING Hui, WU Jun, et al (2013)

Autecology & Fundamentals

- Spatial distribution pattern of human-caused fires in Hulunbeir grassland ZHANG Zhengxiang, ZHANG Hongyan, LI Dongxue, et al (2023)
- Belowground biomass in Tibetan grasslands and its environmental control factors YANG Xiuqing, HUANG Mei, WANG Junbang, et al (2032)
- Analysis on variation characteristics of air temperature and ground temperature in Guilin from 1961 to 2010 CHEN Chao, ZHOU Guangsheng (2043)
- Winter bed-site selection by roe deer (*Capreolus capreolus*) in Huangnihe Nature Reserve ZHU Hongqiang, GE Zhiyong, LIU Geng, et al (2054)
- Leaf anatomical characteristics of the plants of grasslands in the Tibetan Plateau LI Quanfa, WANG Baojuan, AN Lihua, et al (2062)
- A research on summer vegetation characteristics & short-time responses to experimental warming of alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau XU Manhou, XUE Xian (2071)
- Cytological study on microsporogenesis of *Solanum lycopersicum* var. Micro-Tom under high temperature stress PENG Zhen, CHENG Lin, HE Yanjun, et al (2084)
- A new plant height growth process model of *Caragana* forest in semi-arid loess hilly region ZHAO Long, WANG Zhenfeng, GUO Zhongsheng, et al (2093)
- Germination inhibitory substances extracted from the seed of seven species of *Quercus* LI Qingmei, LIU Yan, LIU Guangquan, et al (2104)
- Effects of water stress and fungicide on the growth and drought resistance of *Flaveria bidentis* CHEN Dongqing, HUANGFU Chaohe, LIU Hongmei, et al (2113)
- Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat ... SHEN Zhangjun, OU Zulan, TIAN Shengni, et al (2121)
- Changes of soil chemical properties after different burning years in typical steppe of Yunwun Mountains LI Yuan, CHENG Jimin, WEI Lin, et al (2131)
- Effects of water and fertilizers on nitrate content in tomato fruits under alternate partial root-zone irrigation ZHOU Zhenjiang, NIU Xiaoli, LI Rui, et al (2139)
- Effect of land use on the characteristics of organic carbon and labile organic carbon in soil aggregates in Karst mountain areas LI Juan, LIAO Hongkai, LONG Jian, et al (2147)
- Mobilization of inorganic phosphorus from soils by five azotobacters ZHANG Liang, YANG Yuhong, LI Qian, et al (2157)
- Physiological-ecological responses of *Iris germanica* L. to Cd stress and its accumulation of Cd ZHANG Chengxiang, CHEN Weifeng (2165)
- The available forms and bioavailability of heavy metals in soil amended with sewage sludge TIE Mei, SONG Linlin, HUI Xiujuan, et al (2173)
- LAI-based photosynthetic light response model and its application in a rainfed maize ecosystem SUN Jingsong, ZHOU Guangsheng (2182)
- The dominant species of predatory natural enemies of three kinds of planthoppers and impact of pesticides on natural enemies in paddy field LIN Yuan, ZHOU Xiazhi, BI Shoudong, et al (2189)

Population, Community and Ecosystem

- Spatial and temporal variation of picophytoplankton in the Pearl River Estuary ZHANG Xia, HUANG Xiaoping, SHI Zhen, et al (2200)

Analysis of the relationship between species diversity and hydrologic factors during an interval of intermittent water delivery at the Lower Reaches of Tarim River, China	CHEN Yongjin, LIU Jiazhen, CHEN Yaning, et al (2212)
Fish species composition and community pattern in the continental shelf of northwestern South China Sea	WANG Xuehui, LIN Zhaojin, DU Feiyan, et al (2225)
Distribution and succession of plant communities in Lake Bita coastal swamp on the plateau region, northwestern Yunnan	HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang (2236)
Analysis on community structure and quantitative characteristics of <i>Nitraria tangutorum</i> nebkhas at different succession stage in lower reaches of Shiyang River	JIN Hujia, MA Quanlin, HE Mingzhu, et al (2248)
Resource and Industrial Ecology	
Effects of subsoiling and supplemental irrigation on dry matter production and water use efficiency in wheat	ZHENG Chengyan, YU Zhenwen, ZHANG Yongli, et al (2260)
Effects of two years' incorporation of leguminous green manure on soil properties of a wheat field in dryland conditions	ZHANG Dabin, YAO Pengwei, LI Jing, et al (2272)
Effects of planting with ridge and furrow mulching on maize growth, yield and water use efficiency in dryland farming	LI Rong, HOU Xianqing, JIA Zhikuan, et al (2282)
Urban, Rural and Social Ecology	
Effects of riparian buffers of North Mort of Beijing on air temperature and relative humidity	WU Fangfang, ZHANG Na, CHEN Xiaoyan (2292)
Characteristics of spatial and temporal variations of global solar radiation in Xi'an and relevant response in urban development	ZHANG Hongli, ZHANG Naweirui, LIU Minru, et al (2304)
Research Notes	
A analysis of macrofungal flora diversity in Langyashan Nature Reserve, Anhui Province, China	CHAI Xinyi, XU Xuefeng, WANG Meiyong, et al (2314)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 陈利顶

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 7 期 (2013 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 7 (April, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元