

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.029

陕西某关闭冶炼厂土壤重金属污染评价与工程修复*

李荣华 冯 静 李晓龙 张增强 沈 锋 李 念

(西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 实地采集了 15 个土壤剖面样品,并对其中的 Pb、Cd、Hg、As、Cu、Cr、Zn 和 Ni 含量进行分析监测,采用潜在生态危害风险评价法对研究区域土壤中重金属的污染状况进行了评价,并通过工程措施进行了污染土壤修复治理。结果表明,在 0~20 cm 土层范围内,Zn 质量比在 89.80~724.03 mg/kg 之间,Cu 质量比在 28.89~1 271.81 mg/kg 之间,Hg 质量比介于 0.04~4.48 mg/kg 之间,Pb 质量比介于 48.69~12 021.15 mg/kg 之间。Cd 质量比在 0~120 cm 范围内均超过了土壤环境质量二级标准,而且 Pb、Cd、Hg、Cu 和 Zn 在 0~120 cm 范围内全部超过了关中壤土背景值。潜在生态危害风险评价表明,Cd 的潜在生态危害系数范围为 26.0~21 118.6,轻微、中等、较强、很强和极强的生态危害频率分别为 4.3%、15.2%、19.6%、15.2% 和 37%;Pb 的潜在生态危害系数范围为 0.1~120.2,轻微、中等和较强的生态危害频率分别为 93.5%、4.3% 和 2.2%;Hg 的潜在生态危害系数范围为 0.1~83.4,轻微、中等和较强的生态危害频率分别为 59.3%、39.4% 和 1.3%;As、Ni、Zn 和 Cu 均具有轻微生态危害。研究区域土壤重金属污染主要是 Cd、Hg 和 Pb 等形成的复合污染。采用原位挖掘-异位固化-客土回填法,对研究区域进行污染土壤工程修复,可获得良好的修复效果。

关键词: 土壤 重金属 潜在生态风险评价 工程修复

中图分类号: X825 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)10-0223-06

Heavy Metals Polluted Soil Environment Assessment and Engineering Remediation Practice in Closed Smelter in Shaanxi Province

Li Ronghua Feng Jing Li Xiaolong Zhang Zengqiang Shen Feng Li Nian

(College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: To remediate the heavy metals polluted soil around a closed smelter in Shaanxi Province, 15 soil profile samples were collected in the site and analyzed for heavy metals content, including Pb, Cd, Hg, As, Cu, Cr, Zn and Ni. The pollution situation was assessed by using the ecological hazard risk assessment method, and the contaminated soil was finally remediated by in-situ replacement engineering methods. The results showed that within top 0~20 cm soil layer, Zn contents ranged from 89.80 mg/kg to 724.03 mg/kg, Cu contents varied from 28.89 mg/kg to 1 271.81 mg/kg, Hg contents changed from 0.04 mg/kg to 4.48 mg/kg, and the Pb contents were around 48.69~12 021.15 mg/kg. Cd contents in the top soil layer of 0~120 cm were above the secondary standard value of soil environment quality, while Pb, Cd, Hg, Cu and Zn contents in soil within 0~120 cm were higher than those of the Lou soil background values. The results of potential ecological risk implicated that the potential ecological risk factor for Cd ranged from 26.0 to 21 118.6, and its slight, moderate, strong, very strong and extremely strong ecological hazards frequencies were 4.3%, 15.2%, 19.6%, 15.2% and 37%, respectively. The potential ecological risk factor of Pb ranged from 0.1 to 120.2, and its slight, moderate and strong ecological hazards frequencies were 93.5%, 4.3% and 2.2%, respectively. The potential ecological

收稿日期: 2015-03-18 修回日期: 2015-04-30

* 国家自然科学基金资助项目(41101288)、中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014YB064)和西北农林科技大学博士科研启动专项资金资助项目(2013BSJJ120)

作者简介: 李荣华,副教授,博士,主要从事污染环境修复和固体废弃物资源化利用研究,E-mail: rh.lee@nwsuaf.edu.cn

通讯作者: 张增强,教授,博士生导师,主要从事污染环境修复和固体废弃物资源化利用研究,E-mail: zhangzq58@126.com

risk factor of Hg ranged from 0.1 to 83.4, and its slight, moderate and strong ecological hazards frequencies were 59.3% , 39.4% and 1.3% , respectively. Elements As, Ni, Zn and Cu, all had slight ecological hazards. The soil heavy metals pollution in the study area was mainly contributed by Cd, Pb and Hg. The in-situ replacement method was proved to be an efficient method for the smelter polluted soil remediation and it could achieve satisfactory performance.

Key words: Soil Heavy metal Potential ecological risk assessment Engineering remediation

引言

随着工农业生产的发展特别是金属矿产资源的开发,使得土壤重金属污染问题日益严重,受污染的土地面积也越来越广^[1-3]。目前,我国遭受不同程度污染的耕地面积已接近 2 000 万 hm²,约占耕地面积的 1/5,其中以矿物的开采和冶炼活动造成的影响尤为严重^[4],土壤重金属污染问题面临严重的挑战。

地处陕西省关中平原东段的潼关县,是我国著名的贵金属矿区,其中小秦岭金矿为陕西省当前最大的黄金产区,由于过去矿区生产秩序混乱,无序开采对周边土壤、水体和大气等造成不同程度的污染^[5-7]。2008 年以来,根据国家文件要求,经过多次整改,现已关闭了数家铅锌冶炼厂和黄金选矿厂,重金属污染源虽已被切断,但土壤重金属污染问题仍有待解决。为此,国务院、环保部于 2012 年实施的中央重金属污染防治专项——“潼关县重金属污染防治重点示范区”项目,正式表明通过工程修复治理重金属污染土壤已成为国家层面关注的重点。目前,国外有关重金属污染土壤的修复治理已有大量文献报道^[8-9],而我国已有的研究较多关注于重金属的土壤化学过程、受污染土壤及矿区的土壤和农作物重金属污染评价较多^[5-7,10-17],而有关的工程修复实例研究仍鲜见报道。

本文选取某铅锌冶炼厂及其周边土壤为研究对象,通过测定土壤中重金属 Cd、Pb、Hg、As、Ni、Cr、Zn 和 Cu 的含量,运用潜在生态风险评价法评价该铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染状况,并进一步通过工程措施对该区域土壤污染进行修复,旨在阐明有色金属冶炼厂周边土壤重金属污染类型以及危害程度,促进受污染土壤的修复利用,并为土壤重金属污染修复提供科学依据和工程借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与样点布设

研究区域地处黄河、渭河交汇处,位于北纬 34°36'38",东经 110°14'44",海拔高度 326.1 ~ 340.8 m,北邻渭河南岸浅滩、南邻公路,厂区东西长

约 400 m,南北宽约 77.5 ~ 100 m,占地面积约 31 000 m²(图 1),原生产工艺以粗铅锌选炼为主。区域土壤为沙质土,土层较浅。该冶炼厂于 2012 年关停,并对厂区土壤重金属污染进行修复治理。

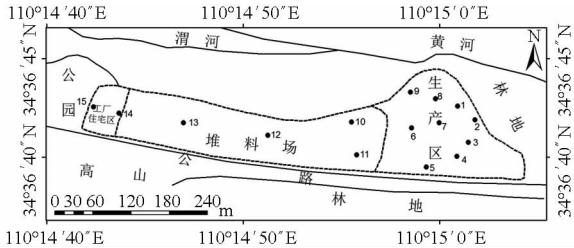


图 1 土壤样品采样点示意图

Fig. 1 Distribution of soil sample points

1.2 样品采集及分析处理方法

在研究区域内布设剖面点 15 个(图 1),采样深度 0 ~ 120 cm,每 20 cm 土层采集一个剖面土壤样品约 3 kg,土壤样品除去杂物后按照四分法留取 1 kg 装于聚乙烯自封袋,带回实验室并自然风干后,用木棒研压并过 100 目尼龙筛,密封保存备用。重金属含量采用优级纯浓酸 HNO₃ - HCl - HClO₄^[18] 于 Milestone 1 型微波消解仪上消解土壤后分析,同时随机抽取 30% 样品采用标准加入法进行质量控制, Cd、Pb、Zn、Cu 和 Ni 用日立 Z-2000 型原子吸收分光光度计测定, Hg 和 As 用 AFS-930 型双通道原子荧光分光光度计测定,每个样品重复测量 3 次,并用 SPSS Statistics 20.0 软件在 α < 0.05 水平下进行数据显著性检验。

1.3 重金属污染潜在生态风险评价

潜在生态危害评价法是土壤、沉积物重金属污染研究中较为常见的风险评估方法,它不仅反映了沉积物中单一污染物的环境影响,也反映了多种污染物的综合效应,并可定量计算出潜在的生态风险程度^[19-20]。根据研究区域的修复目标和土地用途,采用国家土壤质量二级标准^[21]和陕西关中壤土背景值^[22]为标准,进行单个重金属的潜在生态风险系数 E_rⁱ及多种重金属的潜在生态风险指数 R_i评价,其计算式为

E_r^i = T_r^i C_s^i / C_n^i \tag{1}

R_i = \sum_{i=1}^m E_r^i = \sum_{i=1}^m T_r^i C_s^i / C_n^i \tag{2}

式中 T_r^i ——重金属 i 的毒性响应系数
 C_s^i, C_n^i ——重金属 i 的实测值、背景值

1.4 研究区域修复及效果评价

根据 HJ 25.4—2014《污染场地土壤修复技术导则》要求,以及本研究区域污染现状评价和修复的目标,确定采用客土法,即原位挖掘-异位固化-客土回填法修复技术进行污染场地修复,并以 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中的二级质量标准进行评价;对于受污染土壤固化后的重金属淋出状况,以 HJ 557—2010《固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法》进行浸提,提取液重金属含量根据 GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》进行评价。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属分布特征

土壤环境质量标准中的二级质量标准规定 Cd、Pb、Zn、Cu、Ni、Hg、As 的限值分别为 0.60、350、300、100、60、1.0、20 mg/kg,关中壤土的 Cd、Pb、Zn、Cu、Ni、Hg、As 背景值分别为 0.118、16.3、73.2、26.6、39.7、0.086、13.6 mg/kg。本研究涉及的冶炼厂场区土壤重金属含量分析结果见图 2。由图 2 可知,Zn 在 0~20 cm 范围内超出土壤环境质量二级标准,Cd、Cu 和 Hg 在 0~20 cm、20~40 cm 范围内超出土壤环境质量二级标准,部分 Cu 还在 40~60 cm 和 60~80 cm 范围内超出土壤环境质量二级标准,Cd 含量在 0~120 cm 范围内全部超出了土壤环境质量二级标准,且 Pb、Cd、Hg、Cu 和 Zn 在 0~120 cm 范围内全部超出了关中壤土背景值,检测结果还发现在料场区和生产区个别 0~20 cm 土壤样品存在 As 和 Ni 超出关中壤土背景值和土壤环境质量二级标准的现象,Cr 含量基本接近关中壤土背景值。以

上结果说明重金属在土壤中存在一定的向下迁移趋势,这与杜平等^[22]研究铅锌冶炼厂剖面土壤重金属含量基本呈现从上到下含量递减的特征相一致。

研究区域土壤 Pb、Cd、Hg、Cu 和 Zn 含量以表层 0~20 cm 土壤中最高,其中最高质量比分别达 12 021.15、703.95、4.48、1 271.89、724.03 mg/kg,土壤重金属的含量随着采样深度的增加逐渐降低。另外,土壤 Pb、Cd、Hg、Cu 和 Zn 含量较高的区域集中在生产区和料场区,而在生活区和检测区相对含量较低,例如表层 0~20 cm 土壤中含量较高的第 5 个采样点(生产区高炉)的 Pb 和 Zn 含量为研究区域最高,第 9 采样点(生产区)的 Cu 含量为研究区域最高,第 10 采样点(料场区)的 Cd 含量为研究区域最高,第 2 采样点(生产区)和第 5 采样点(生产区高炉)的 Hg 含量为研究区域最高,而检测区和生活区土壤重金属含量相对较低,这可能与研究区域的厂区功能规划有关,也与当地的地形和气候条件有关。本研究中,生活区和检测区分别分布在生产区和料场区的西侧和东侧,而生产区和料场区的冶炼废水、废渣较多,当地地形受限于南部的高山、北部的黄河和渭河北侧高山,导致当地常年风向以东西方向的峡谷风为主,生产区的重金属可通过烟尘沉降等过程进入两侧的生活区和检测区的土壤中,故土壤重金属含量呈现出了由生产区向生活区和检测区两侧递减的趋势。这与前人^[12-13,23-24]的研究调查结果相印证。例如,刘翠华等^[12]发现,葫芦岛冶炼厂冬季以北风、偏北风和西北风为主,而春夏季盛行东南风和南风,因而导致葫芦岛冶炼厂南部和北部污染严重,西部土壤中重金属含量相对较低。吴双桃等^[13]研究了株洲市铅锌冶炼厂生产区土壤污染,发现冶炼厂场区重金属多富集在表层土壤中,

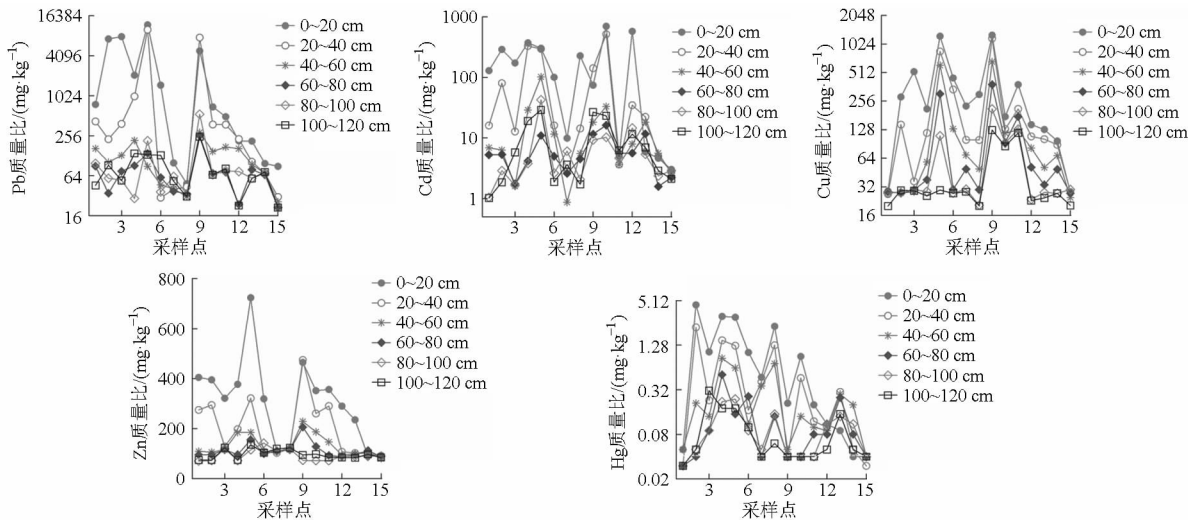


图 2 采样点不同深度土壤重金属含量

Fig. 2 Heavy metals contents in different depths of collected soil samples

可能是由于冶炼厂长年排放大量带有重金属的灰尘,大气污染严重,由于大气尘降和雨水淋洗等过程使得重金属进入土壤,且重金属不断积累,含量增加。Li 等^[23]和 Stefanowicz 等^[24]分别在华南和波兰某铅锌冶炼厂的污染现状研究中也指出,土壤 Cd、Zn 及 Pb 等重金属的含量也随着与污染源的距离增加和土层深度的增加而降低。

总体上,本研究区域内土壤 Pb、Cd、Hg、Cu 和 Zn 含量均呈现出由污染源(废渣堆、堆料场和生产区)向周边逐渐递减且在污染源处有向下迁移的特点,污染源部分区域土壤还存在 Ni 和 As 超标现象。

2.2 土壤重金属污染潜在生态风险评价

由于土壤中的重金属可以通过食物链传递最终对人体健康造成危害,因此评价重金属污染土壤的潜在生态危害至关重要。国内外学者根据不同重金

属元素的生物毒性响应系数和元素丰度等原则,对单个重金属潜在生态风险系数(E_r^i)和多种重金属的潜在生态风险指数(R_I)做了分级^[19-20]。为了反映特定区域的差异性,选择陕西关中塬土背景值作为比较基准,对研究区域 Cd、Pb、As、Hg、Ni 和 Zn 的潜在生态风险进行评价。由表 1 可知,Cd 的潜在生态风险系数范围为 26.0~21 118.6,轻微、中等、较强、很强和极强的生态危害频率分别为 4.3%、15.2%、19.6%、15.2%和 37.0%;Pb 的潜在生态风险系数范围为 0.1~120.2,轻微、中等和较强的生态危害频率分别为 93.5%、4.3%和 2.2%;Hg 的潜在生态风险系数范围为 0.1~83.4,轻微、中等和较强的生态危害频率分别为 59.3%、39.4%和 1.3%;As、Ni、Zn 和 Cu 均具有轻微的生态风险。因而可认为,本研究区域土壤重金属污染主要是 Cd、Hg 和 Pb 等形成的复合污染。

表 1 潜在生态风险系数及评价等级
Tab.1 Ecological risk factor and assessment standards

潜在生态危害 系数 E_r^i	污染等级	频率分布/%					
		Cd	As	Pb	Hg	Ni	Cu
$E_r^i < 40$	轻微	4.3	100	93.5	59.3	100	100
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	15.2	0	4.3	39.4	0	0
$80 \leq E_r^i < 160$	较强	19.6	0	2.2	1.3	0	0
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	15.2	0	0	0	0	0
$E_r^i \geq 320$	极强	37.0	0	0	0	0	0
潜在生态危害系数范围		26.0~21 118.6	3.4~9.0	0.1~120.2	0.1~83.4	0.2~0.3	0.1~15.9

金属冶炼导致的周边土壤污染类型,也与矿物来源和种类、冶炼厂的性质及服务期限等因素有关。例如,吴双桃等^[13]对株洲市铅锌冶炼厂生产区土壤污染进行的评价表明,冶炼厂场区土壤重金属污染以 Cd 污染为主,其次是 Pb 污染。王利军等^[15]研究了宝鸡市青镇铅锌冶炼厂周边土壤 Cu、Pb、Zn、Mn、Co、Ni、Cr 污染情况,结果表明只有 Pb 具有轻度污染。尹仁湛等^[25]对广西泗顶铅锌矿周边土壤重金属污染的潜在生态风险评价表明,该铅锌矿区土壤已受到 Pb、Zn 的严重污染,矿区土壤中的 Pb 潜在生态危害系数大于 320,为极强生态危害,Cu、Cr 的潜在生态危害系数都小于 40,为轻微生态危害。本研究中 Cd 的潜在生态危

害系数大于 320,具有极强的生态危害,Pb 具有较强的生态危害,As、Hg、Ni 和 Cu 具有轻微的生态危害。本研究的冶炼厂主要生产工艺以粗铅锌选炼为主,土法冶金是该地区的主要冶金方式,因而其污染主要以 Cd、Hg 和 Pb 等形成的复合污染为主。

该污染场地土壤重金属的综合潜在生态风险指数见表 2。从表 2 可以看出,土壤样品的潜在生态风险指数范围为 38.9~21 129.2,均值为 1 684.2,轻微、中等、较强和很强的生态风险的频率分别为 39.2%、16.7%、17.9%和 26.2%。当土壤受多种重金属污染时,其生态毒性危害剧增,亟需对该区域受重金属污染土壤进行修复和治理^[26-27]。

表 2 潜在生态风险指数及评价等级
Tab.2 Potential ecological risk index and assessment standards

潜在生态风险指数 R_I	$R_I < 150$	$150 \leq R_I < 300$	$300 \leq R_I < 600$	$R_I \geq 600$
频率分布/%	39.2	16.7	17.9	26.2
污染等级	轻微	中等	较强	很强
潜在生态风险指数范围	38.9~21 129.2			
潜在生态风险指数均值	1 684.2			

2.3 污染场地的修复及效益

根据土壤修复的要求、本研究区域污染现状评价和修复目标,采用原位挖掘-异位固化-客土回填法进行污染土壤修复。将受污染土壤原位挖掘(120~160 cm)移除,并在含水率 15%~20% 下将受污染土壤与重金属钝化剂(CaO-Na₂S 等)按照一定比例混匀固化 2 周,按照 HJ 557—2010 标准进行浸提,提取液中 Cd 和 Pb 的平均质量比分别为 1.73、3.11 μg/L,提取液中 Hg 的含量未检出(低于仪器检测限 0.01 μg/L)。由此可见,提取液中的 Cd、Hg 和 Pb 质量比远低于 GB 5084—2005《农田灌溉水质标准》规定的限值 0.01、0.001、0.2 mg/L,说明对污染土壤的稳定化处理具有良好的效果,经过稳定化的污染土壤可以运输至填埋场进行异位安全填埋。在污染土壤挖掘干净的区域回填新鲜素土,并种植牧草和林木恢复土壤肥力。期间采集回填新鲜素土样品进行重金属含量测定,结果显示 Cd、Pb、Zn、Cu、Ni、Hg、As 的平均质量比分别为 0.122、16.8、76.3、27.2、40.3、0.08、10.7 mg/kg,这些重金属含量远低于 GB 15618—1995 中的二级质量标准限值。表明该修复措施具有良好的修复效果。

3 结论

(1)研究区域土壤重金属在 0~120 cm 范围内

受到不同程度的污染,Cd 为主要污染物,其次是 Pb 和 Hg。土壤 Pb、Cd、Hg、Cu 和 Zn 含量均呈现出由污染源(废渣堆、堆料场和生产区)向周边逐渐递减且在污染源处有向下迁移的特点。

(2)研究区域土壤重金属污染主要是 Cd、Hg 和 Pb 等形成的复合污染。土壤重金属 Cd 的轻微、中等、较强、很强和极强生态危害频率分别为 4.3%、15.2%、19.6%、15.2% 和 37.0%;Pb 的轻微、中等和较强的生态危害频率分别为 93.5%、4.3% 和 2.2%;Hg 的轻微、中等和较强的生态危害频率分别为 59.3%、39.4% 和 1.3%;As、Ni、Zn 和 Cu 均具有轻微的生态风险。土壤样品的潜在生态风险指数范围为 38.9~21 129.2,均值为 1 684.2,轻微、中等、较强和很强的生态危害频率分别为 39.2%、16.7%、17.9% 和 26.2%,亟需对该区域受重金属污染的土壤进行修复治理。

(3)采用原位挖掘-异位固化-客土回填法,对研究区域进行了污染土壤工程修复,修复后的土壤重金属含量满足土壤环境质量二级标准,获得良好的修复效果,该工程实践具有显著的环境效益和社会效益。

参 考 文 献

1 Qu C S, Sun K, Wang S R, et al. Monte Carlo simulation-based health risk assessment of heavy metal soil pollution: a case study in the Qixia Mining area, China [J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2012, 18(4):733 - 750.

2 Teng Y, Wu J, Lu S, et al. Soil and soil environmental quality monitoring in China: a review [J]. Environment International, 2014, 69:177 - 199.

3 Zhang H, Luo Y, Makino T, et al. The heavy metal partition in size-fractions of the fine particles in agricultural soils contaminated by waste water and smelter dust [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 248 - 249: 303 - 312.

4 Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 49(2):750 - 759.

5 王爽,李荣华,张增强,等. 陕西潼关农田土壤及农作物重金属污染及潜在风险[J]. 中国环境科学, 2014,34(9): 2313 - 2320

Wang Shuang, Li Ronghua, Zhang Zengqiang, et al. Assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazardous in agricultural soils and crops of Tongguan, Shaanxi Province [J]. China Environmental Science, 2014, 34(9):2313 - 2320. (in Chinese)

6 徐友宁,柯海玲,赵阿宁,等. 小秦岭某金矿区农田土壤重金属污染评价[J]. 土壤通报, 2007,38(4):732 - 736.

Xu Youning, Ke Hailing, Zhao Aning, et al. Assessment of heavy metals contamination of farmland soils in some gold mining area of Xiao Qinling [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007,38(4):732 - 736. (in Chinese)

7 徐友宁,张江华,赵阿宁,等. 小秦岭某金矿区农田土壤重金属污染的潜在生态危害评价[J]. 地质通报, 2008,27(8): 1272 - 1278.

Xu Youning, Zhang Jianghua, Zhao Aning, et al. Evaluation of the potential ecological risk of heavy metals in farmland soils in a certain gold mining area, Xiaoqinling, China [J]. Geological Bulletin of China, 2008,27(8): 1272 - 1278. (in Chinese)

8 Nachtegaal M, Marcus M A, Sonke J E, et al. Effects of in situ remediation on the speciation and bioavailability of zinc in a smelter contaminated soil [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(19): 4649 - 4664.

9 Bolan N, Kunhikrishnan A, Thangarajan R, et al. Remediation of heavy metal (loid)s contaminated soils—to mobilize or to immobilize? [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 266: 141 - 166.

10 马红艳. 陕西凤县铅锌尾矿库复垦作物重金属污染研究[D]. 西安:西安科技大学, 2007.

Ma Hongyan. Study on the heavy metal pollution of tailing reclamational crops in Fengxian, Shannxi [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Techonology, 2007. (in Chinese)

11 Li Z Y, Ma Z W, Yuan Z W, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2014,468-469:843-853.

12 刘翠华, 依艳丽, 张大庚, 等. 葫芦岛锌厂周围土壤污染现状研究[J]. 土壤通报, 2003,34(4):326-329.
Liu Cuihua, Yi Yanli, Zhang Dageng, et al. Cadmium pollution of soil in the surrounding area of Huludao Zinc Plant[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003,34(4):326-329. (in Chinese)

13 吴双桃, 吴晓芙, 胡曰利, 等. 铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究[J]. 生态环境, 2004,13(2):156-157,160.
Wu Shuangtao, Wu Xiaofu, Hu Yueli, et al. Studies on soil pollution around Pb-Zn smelting factory and heavy metals hyperaccumulators [J]. Ecology and Environment, 2004,13(2):156-157,160. (in Chinese)

14 李静, 俞天明, 周洁, 等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J]. 环境科学, 2008,29(8):2327-2330.
Li Jing, Yu Tianming, Zhou Jie, et al. Assessment of health risk for mined soils based on critical thresholds for lead, zinc, cadmium and copper [J]. Environmental Sciences, 2008,29(8):2327-2330. (in Chinese)

15 王利军, 卢新卫, 荆淇, 等. 宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2012,31(2):325-330.
Wang Lijun, Lu Xinwei, Jing Qi, et al. Heavy metals pollution in soil around the lead-zinc smelting plant in Changqing Town of Baoji City, China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012,31(2):325-330. (in Chinese)

16 Wang Y C, Qiao M, Liu Y X, et al. Health risk assessment of heavy metals in soils and vegetables from wastewater irrigated area, Beijing-Tianjin city cluster, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012,24(4):690-698.

17 Hu H, Jin Q, Kavan P. A study of heavy metal pollution in China; current status, pollution-control policies and counter measures [J]. Sustainability, 2014, 6(9):5820-5838.

18 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

19 Zhu H N, Yuan X Z, Zeng G M, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2012,22(6):1470-1477.

20 Li Q S, Cai S S, Mo C, et al. Toxic effects of heavy metals and their accumulation in vegetables grown in a saline soil[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2010,73(1):84-88.

21 GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 1995.

22 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国科学出版社, 1990:329-380.

23 Li P, Lin C, Cheng H, et al. Contamination and health risks of soil heavy metals around a lead/zinc smelter in southwestern China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 113:391-399.

24 Stefanowicz A M, Woch M W, Kapusta P. Inconspicuous waste heaps left by historical Zn-Pb mining are hot spots of soil contamination [J]. Geoderma, 2014, 235-236:1-8.

25 尹仁湛, 罗亚平, 李金城, 等. 泗顶铅锌矿周边土壤重金属污染潜在生态风险评价及优势植物对重金属累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2008,27(6):2158-2165.
Yin Renzhan, Luo Yaping, Li Jincheng, et al. Evaluation of the potential ecological risk of heavy metal pollution in soil and bioaccumulation characteristics of dominant plants insiding Pb-Zn mine [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008,27(6):2158-2165. (in Chinese)

26 Burges A, Epelde L, Garbisu C. Impact of repeated single-metal and multi-metal pollution events on soil quality [J]. Chemosphere, 2015,120:8-15.

27 Mahar A, Wang P, Li R, et al. Immobilization of lead and cadmium in contaminated soil using amendments: a review [J]. Pedosphere, 2015, 25(4):555-568.

(上接第 284 页)

11 Watanabe J, Uehara K, Mogi Y. Adaptation of the osmotolerant yeast *Zygosaccharomyces rouxii* to an osmotic environment through copy number amplification of FLO11D [J]. GENETICS, 2013,195(2):393-405.

12 Wei Y H, Wang C, Wang M, et al. Comparative analysis of salt-tolerant gene HOG1 in a *Zygosaccharomyces rouxii* mutant strain and its parent strain [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(11):2765-2770.

13 Tokuoka K. Sugar- and salt-tolerant yeasts [J]. Journal of Applied Bacteriology, 1993, 74(2):101-110.

14 Ok T, Hashinaga F. Identification of sugar-tolerant yeasts isolated from high-sugar fermented vegetable extracts [J]. Journal of General and Applied Microbiology, 1997, 43(1):39-47.

15 Vermeulen A, Daelman J, Van Steenkiste J, et al. Screening of different stress factors and development of growth/no growth models for *Zygosaccharomyces rouxii* in modified Sabouraud medium, mimicking intermediate moisture foods (IMF) [J]. Food Microbiology, 2012,32(2):389-396.