

# 白银区农田土壤 Cd 污染研究概述

王 婷<sup>1</sup>, 倪鼎文<sup>2</sup>

(1. 甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州财经大学, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:** 对甘肃白银区农田土壤Cd污染来源、现状及研究进展进行了综述, 并从加强Cd污染与土壤理化、生物性状的关系研究, 加强土壤Cd赋存形态的改变及其迁移、传输变化研究, 加强Cd在土壤—作物系统的积累、分配和迁移规律研究, 加强重金属复合污染及其联合毒理作用研究等方面展望了今后的研究方向。

**关键词:** Cd污染; 现状; 分布与累积; 赋存形态; 白银区

**中图分类号:** X131.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1463(2015)09-0080-05

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-1463.2015.09.030

## Research Advances on Cd Pollution in Farmland Soil in Baiyin District

WANG Ting<sup>1</sup>, NI Dingwen<sup>2</sup>

(1. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Lanzhou University of Finance and Economics, Lanzhou Gansu 730020, China)

**Abstract:** This paper summarized the sources, present situation and research advances of Cd pollution in farmland soil in Baiyin district, Gansu province, and also the future research direction are proposed, which relationship between Cd pollution, physical and chemical properties and physiological characteristics of soil, changes in the occurrence of Cd in soil and its migration and transmission, Cd in the accumulation, distribution and soil-crop system shift rule, heavy metal pollution and their combined effects and so on.

**Key words:** Cd pollution; Present situation; Distribution and accumulation; Occurrence mode; Baiyin district

甘肃省白银市地处黄河上游, 甘肃中部, 因矿得名, 因企设市, 是我国重要的有色金属冶炼基地之一, 主要生产金、银、铜、铁、锌、铅、镍等金属, 曾创造了铜产量、产值、利税连续 18 a 同行业全国第 1 的业绩。由于历史条件限制, 在长期的矿产开采、加工以及工业化进程中积累形成的重金属污染问题日益突出, 留下了巨额的生态环境欠账。白银区城郊耕地总面积 1.07 万  $\text{hm}^2$ , 有效灌溉面积 0.47 万  $\text{hm}^2$ , 主要分布在城东、西

两大流域冲洪积阶地面上, 农业生产中有不同程度地利用污水灌溉的历史, 土壤环境也表现出不同程度的 Cd、Cu、Zn、Hg 和 Ni 污染, 其中尤以 Cd 污染最为严重<sup>[1]</sup>。众多学者针对该区土壤 Cd 污染来源、分布特征、污染程度与评价、Cd 污染土壤的生物性状、土壤 Cd 的分布迁移及其赋存形态和 Cd 污染土壤对作物的影响等方面开展了大量研究。归纳这些研究成果旨在为科学有效控制土壤 Cd 污染, 全力推进白银区重金属污染防治工

**收稿日期:** 2015-5-12

**基金项目:** 甘肃省青年科技基金计划“白银矿区土壤镉迁移转化与粮食质量安全的耦合规律研究”(2013GS06935); 甘肃科技计划软科学项目“白银矿区土壤重金属污染现状、趋势及对策研究”(1305ZCRA174)

**作者简介:** 王 婷 (1982—), 女, 甘肃秦安人, 助理研究员, 硕士, 主要从事农业环境与作物栽培及生理方面的研究工作。联系电话: (0931)7614846。E-mail: wt1982\_2000\_2000@163.com

[13] 全云飞, 龚佩珍, 缪美林. 棉花专用包膜应用试验初报[J]. 江苏农业科学, 1996(2): 42-43.

[14] 徐秋明, 曹 兵, 牛长青, 等. 包衣尿素在田间的溶出特征和对夏玉米产量及氮肥利用率影响的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 357-359.

[15] 杨新强, 包兴国, 杨文玉, 等. 缓释包衣尿素对保护性耕作玉米的影响[J]. 甘肃农业科技, 2014(10):

23-25.

[16] 钱伯章. 缓控释肥农业节能减排的利器[J]. 化工设计通讯, 2010, 36(1): 19-23.

[17] GAINES TP, GAINES ST. Soil Texture effect on nitrate leaching in soil percolates [J]. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 1994, 25(13-14): 2 561-2 570.

(本文责编: 郑立龙)

作, 切实解决土壤重金属污染和危害群众健康的突出环境问题提供参考。

## 1 Cd 污染源

污水灌溉、大气沉降、农化产品和农家肥的施用及矿物废料废渣的不合理堆放, 均是白银区农田土壤重金属污染的潜在来源<sup>[2-3]</sup>, “污灌”对白银地区农田土壤重金属浓度的贡献程度最大, 因而被认为是当地农田土壤污染的主要来源<sup>[4]</sup>。白银区东、西两大沟原为洪水沟道, 分别从水川乡的金沟口附近和四龙乡的梁庄附近入黄河, 现在已成为白银市西区和东区的排污河。沿排污河分布着金属矿山和冶金、石油化工、制酸、制碱、化肥、农药、塑料、煤气、纺织、印染、机械、陶瓷、玻璃、建材及发电等工业企业, 有色金属冶炼污水和部分城市生活污水均排入东大沟。铜加工废水和大部分城市生活污水则排入西大沟。自 2000—2010 年废水中 Cd 排放量可以看出 (图 1)<sup>[5-6]</sup>, Cd 排放量整体呈下降趋势, 多年排放量平均值为 10.97 t, 最大值出现在 2005 年, 为 19.11 t, 最小值为 2009 年仅 3.87 t。郭淑文报道, 自 1957 年, 白银区的王岷、四龙乡就利用东、西大沟污水开始灌溉<sup>[7]</sup>, 因此, 尽管 Cd 排放量在逐年减少, 但长期习惯用污水灌溉, 使得土壤内重金属日渐积累, 所产生的土壤重金属污染问题日益突现。同时, 废水中含有 Cd、Cu、Zn、Pb 和 Ni 等多种有害物质, 浓度超出国家污水排放标准的数倍至数百倍, 形成土壤重金属复合污染<sup>[8]</sup>。

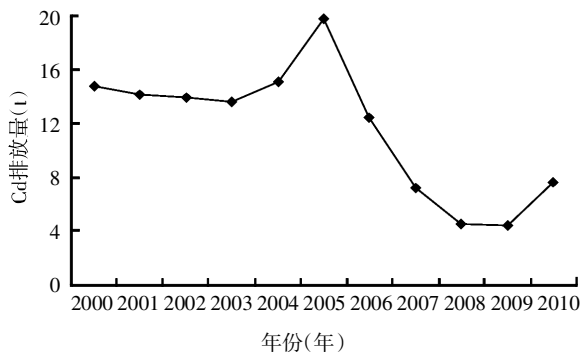


图 1 白银区 2000—2010 年废水中 Cd 排放量

## 2 Cd 污染现状

### 2.1 空间分布特点

白银市中心区土壤污染类型的空间分布特征, 是由该区的工业布局特征和地势地形格局控制的。按照白银市行政区划和工业布局, 东大沟流域的氟化盐厂以北、赫家川、砂坡岗、崖渠水、苏家

墩、观音崖、民勤、一堵墙、临时二泵房、李家台子一带 Cd 污染极重。西大沟流域引灌西北铜加工厂工业及生活废水的西北铜、东台子, 以及引灌城市污水及部分工业废水的郝家川部分、王岷、吊地沟等地 Cd 污染明显较轻。引灌东大沟混合废水的崖渠水, 是白银区污染最严重的区域<sup>[9]</sup>。南忠仁利用模糊聚类与模式识别方法, 进行土壤环境质量评价<sup>[10]</sup>, 评价结果将全区划分为清洁, 轻污染, 严重污染 3 类。其中清洁类所占面积大, 这些评价单元大多为远离污染源的山区, 没有利用污水灌溉的历史, 如市区北部的大井子沟一带, 西部的狄家台、双崖子沟、狼家沟一带, 东部的煤洞沟、赵家沟一带; 少数为川谷平地, 具有利用污水灌溉的条件, 如四龙口区和二十四医院附近区域。这些地区土壤之所以表现为未受污染, 是因为四龙口紧邻黄河, 长期利用黄河水提灌; 而二十四医院区域为工农渠经过之地, 长期使用工农渠的黄河水。轻污染类的评价单元主要分布在西大沟上游两侧, 西北铜加工厂附近。由于该区使用西北铜加工厂排出的污水灌溉农田, 使得该类型清晰地表现为受 Cu、Zn 两元素相对污染的程度较大。严重污染类型几乎全部集中在东大沟中、上游地区, 这些区域地处白银公司第二冶炼厂、第三冶炼厂排污口附近, 具备利用污水灌溉的地形地势条件, 长期利用污水灌溉。

李红英等研究认为, 白银市土壤中 Cd 的分布特点表现为土壤中污染物浓度遵循自上游到下游浓度递减规律。污染物浓度随着离污染源距离的减小而递增, 且递增的总趋势中, 每出现一个新的污染源, 递降曲线就相应地出现一个浓度高峰, 当高峰过后又继续呈现出递增的总趋势<sup>[11]</sup>。

### 2.2 时间变化规律

从图 2 可以看出, 白银市土壤 Cd 含量 1978—

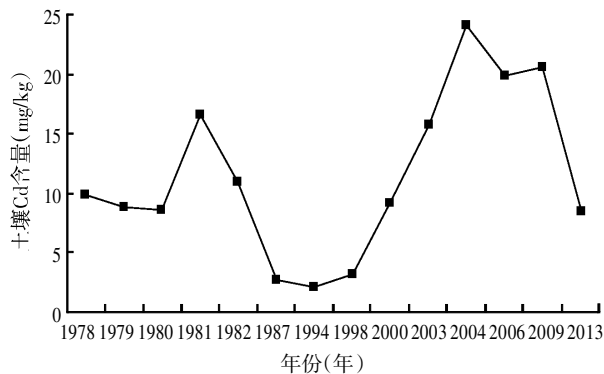


图 2 白银区 1978—2013 年表层土壤中 Cd 含量

1981 年呈总体上升趋势, 1981—1994 年呈下降趋势, 1998—2004 年呈上升趋势, 2004—2013 年又呈下降趋势, 这种变化趋势与经济发展速度、排污情况变化、排污管理和土壤中重金属的迁移变化有关<sup>[12]</sup>。1978—2013 年土壤 Cd 含量超过国家土壤环境三级标准 10~120 倍, 超过国家土壤环境二级标准 3.5~40.0 倍, 由此可见, 白银区土壤已属严重 Cd 污染土壤<sup>[11-14]</sup>。

### 2.3 污染程度

白银区污水灌溉地面积共约 1 133.3 hm<sup>2</sup>, 已受到重金属污染的约 1 060.0 hm<sup>2</sup>, 严重污染的达 546.7 hm<sup>2</sup><sup>[9]</sup>, 土壤污染深度在 0~60 cm<sup>[15]</sup>。南忠仁按照不同水源将 Cd 污染区域划分为西大沟黄河水灌区、东大沟黄河水灌区、西大沟清污混合灌区、东大沟清污混合灌区<sup>[16]</sup>。西大沟黄河水灌区 Cd 监测平均值 0.16 mg/kg, 低于一级标准, 属未污染区域; 西大沟清污混合灌区 Cd 监测平均值 0.58 mg/kg, 高于国家土壤环境质量一级标准, 属轻度污染; 东大沟黄河水灌区 Cd 监测平均值 0.25 mg/kg, 均高于一级标准, 属轻度污染, 东大沟污水灌区土壤 Cd 严重超标 10.36 mg/kg, 大于四级标准, 属于极严重污染状态。田庆春等运用单因子污染指数评价法对土壤中 Cd 进行评价, 重金属 Cd 在氟化盐厂以北、郝家川、沙坡家岗、崖渠水、苏家墩、观音崖、民勤三队、一堵墙、临时二泵房、李家台子的污染指数均大于 3, 而污染等级均为 5, 即重金属 Cd 在这些区域都为重污染<sup>[15]</sup>。

## 3 Cd 污染研究进展

### 3.1 Cd 在土壤中的分布、累积与迁移

土壤剖面重金属 Cd 具有明显的表层富集型分布规律, 随着土壤深度的增加, 各剖面层 Cd 含量逐渐减少<sup>[17]</sup>。在东、西两大沟农田中, Cd 含量随剖面深度的增加, 土壤深到达 25 cm 或 45 cm 左右后含量分布变化明显<sup>[18]</sup>。从不同污染区来看, 东、西两大沟耕作土壤表层 Cd 含量高于以下各层。各土层间 Cd 含量分布差异程度以东大沟灌区为最大, 其次是西大沟灌区, 黄灌区 Cd 分布差异程度规律性不明显<sup>[18]</sup>。

Cd 元素进入量愈多, 表土层的累积量愈大。东大沟灌区耕作层 Cd 元素淋失比率相对较小, 但东、西两大沟淋失比率明显高于黄灌区。Cd 迁移深度在 40~60 cm, 具有显著的负乘幂迁移规律, Cd 为高剂量时迁移率小, 低剂量时迁移率大<sup>[17]</sup>, 这主要由于受土壤物理、化学、生物截留作用,

污染物大量滞留在土壤表层, 使表层土壤溶液中离子溶解度处于饱和状态, 尽管 Cd 元素向下层迁移的绝对量大, 但其相对淋失下移量则比较小。

### 3.2 Cd 对土壤酶活性和微生物多样性的影响

刘姣等研究表明<sup>[19]</sup>, 白银污灌区土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性均表现出随重金属质量分数增高而降低的趋势, 且 4 种酶活性与 Cd 质量分数均呈现负相关关系, 但没有达到显著水平, 并指出总体酶活性可以表征该区土壤的重金属污染状况。鲁海燕等采用分子生物学方法探讨了白银地区重金属与细菌多样性之间的内在关系<sup>[8]</sup>, 结果表明污染程度不同的土壤, 细菌遗传多样性差异不大, 但细菌多样性指数差异显著, 显著改变了细菌群落的多样性指数。细菌群落的多样性指数随着污染程度的升高, 大体呈现出先升高后降低的趋势。0~20 cm 土层细菌多样性指数高于 20~40 cm 土层。

### 3.3 土壤 Cd 的赋存形态及其土壤剖面分布

连续提取法是一种最为完整的描述重金属在土壤中的行为及评价其潜在的有效性及移动性的方法<sup>[20]</sup>, 主要有 Tessier 五步连续提取法和 BCR 三步(优化的为四步)连续提取法。按提取顺序, Tessier 连续提取法将土壤中重金属分为可交换态(EX)、碳酸盐结合态(CAB)、铁锰氧化物结合态(FMO)、有机物结合态(OM)和残渣态(RES)五种形式<sup>[21]</sup>。夏增禄研究了中国不同土壤类型的 Cd 形态<sup>[22]</sup>, 发现在未污染土壤中, Cd 主要以残渣态形式存在, 之后依次为铁锰氧化物结合态、碳酸盐结合态、可交换态、有机物结合态。在污染土壤中 Cd 形态是以有机物结合态、铁锰氧化物结合态以及可交换态为主, 残渣态含量最少。杨冰凡等研究认为, 白银区污染土壤 Cd 以酸溶态即可交换态和碳酸盐结合态为主, 其含量占全量的 74.90%<sup>[23]</sup>。刘白林等采用优化 BCR 连续提取法, 分析了甘肃省白银市黄灌农业区农田土壤 5 个土层重金属 Cd 的 4 种赋存形态, 结果表明, Cd 的 4 种赋存形态在不同土层中没有呈现规律性分布, 每层土壤中 Cd 的可交换态和碳酸盐结合态比例都较高, 且表层中最高(38.95%)<sup>[24]</sup>。Cd 的铁锰氧化物结合态以 0~20 cm 土层浓度最高(0.95 mg/kg)。有机物结合态 Cd 比例相对较高, 除表层 8.71%外, 其它层的含量在 20.00%左右。Cd 残渣态质量分数则相对较低(26.44%~42.46%), 这也从侧面反应了次生相 Cd 水平较高。由此可以推

测, 当地农田土壤中 Cd 的潜在风险很高。

#### 3.4 Cd 在土壤—作物体系中的累积、分布与运转

一般来说, 在土壤 Cd 总量相同的情况下, 不同作物对 Cd 吸收和积累的量有很大差别, 这主要和 Cd 在土壤中的形态有关<sup>[25]</sup>。1994—1997 年的调查结果表明, 白银区 12 个村生产的小麦籽粒中 Cd 检出率均在 80% 以上, 且含量均高于对照引黄灌区所生产的小麦<sup>[26]</sup>。白银区生产的玉米籽粒中重金属 Cd 超标率为 100%。根据不同污染区域, 东大沟污水灌溉区小麦和玉米籽粒 Cd 含量最大, 算术平均值分别为 0.61 mg/kg 和 0.52 mg/kg, 小麦和玉米籽粒 Cd 含量分别是背景值的 12 倍和 226 倍, 是国家食品卫生标准的 3.0 倍和 2.6 倍, 西大沟清污混合灌区和东大沟黄河水灌区小麦籽粒中 Cd 含量小于全国平均背景值, 其余 3 个类型区玉米籽粒 Cd 的含量虽大于背景值, 但均小于国家食品卫生标准值<sup>[16]</sup>。戴昕鹏 2013 年对白银区小麦 Cd 污染的研究表明<sup>[2]</sup>, 小麦籽粒中 Cd 平均浓度 14 个样点全部超标, 均达到国家标准限定值 (GB2715-2005) 的 8 倍及以上, 检测结果远远高出 NanZhongRen 等 1999 年在白银地区测得的小麦籽粒中 Cd (0.29 mg/kg) 平均含量<sup>[27]</sup>, 表明本地区近 10 多年来小麦的 Cd 污染状况在加剧。

春小麦对 Cd 的积累显著高于土壤中 Cd 含量, 富集能力最强。西大沟污灌区土壤及小麦根、茎、叶和籽粒中 Cd 平均含量分别为 0.30、0.32、0.12、0.67 和 0.06 mg/kg, 东大沟分别为 3.50、6.00、4.30、7.40 和 0.26 mg/kg<sup>[28]</sup>。多元逐步回归分析表明, 小麦根系对非必需重金属元素 Cd 的吸收累积主要取决于该种元素在土壤中的含量<sup>[29]</sup>。研究区域土壤 Cd 浓度较高, Cd 的富集系数也较高, 所以造成了 Cd 在小麦籽粒中的高富集, 且小麦籽粒中 Cd 浓度和土壤中 Cd 浓度具有显著相关性 ( $p < 0.05$ ), 表明小麦籽粒中的 Cd 可能通过土壤进入小麦内<sup>[2]</sup>。

#### 4 今后研究重点

综上所述, 有关甘肃省白银区土壤 Cd 污染问题众多学者已经开展了大量研究, 在土壤 Cd 污染来源、分布特征和污染程度与评价等方面研究较为详尽, 可为该区进行土壤重金属防治工作提供依据。但 Cd 在土壤和作物中的行为、过程与机理等方面研究仍然不够深入, 今后还需从以下几方面加强研究。

#### 4.1 Cd 污染与土壤理化、生物性状的关系

目前针对白银区土壤重金属污染分布和现状研究较多, 但究竟土壤质地、理化性质 (pH、Eh、CEC 等)、土壤胶体、有机质含量、矿物特征等因素是如何影响 Cd 含量、分布与形态, 如何影响 Cd 污染物的截留、迁移、转化等问题仍然不清楚。土壤生物主宰着土壤环境物理化学和生物化学过程、特征和结果, 它的活性在很大程度上影响着污染物在土壤中的转化、降解和归宿。因此, 采用分子生物学技术进一步研究环境生物与 Cd 污染土壤的关系对揭示微生物群落对重金属污染的响应机制具有重要意义。

#### 4.2 土壤 Cd 赋存形态的改变及其迁移、传输变化

重金属元素进入土壤系统后, 通过与土壤中其他物质 (如矿物质、有机物及微生物等) 发生吸附—解吸、溶解—沉淀、氧化—还原、络合、矿化等各种反应, 伴随有能量的变化, 从而引起重金属赋存形态的改变及其迁移、传输的变化<sup>[30]</sup>。借助形态分析来阐明重金属在土壤环境中的迁移和转化规律, 以揭示重金属污染物在土壤中的行为特性, 对研究重金属的环境效应及其污染土壤的修复治理具有重要意义。此外, 重金属在土壤中的赋存形态及其相互间的比例关系, 不仅与来源有关, 而且与土壤质地、理化性质 (pH、Eh、CEC 等)、土壤胶体、有机质含量、矿物特征、环境生物等因素有关。

#### 4.3 Cd 在土壤—作物系统的积累、分配和迁移规律

已有的研究通过对不同年份或种植作物前后测定的土壤和作物 Cd 含量变化, 说明了 Cd 在量上的增减趋势, 指出了 Cd 对人体健康可能的危害。由于没有从土壤—作物系统整体去考虑, 因此很难揭示 Cd 在土壤—作物系统的积累、分配和迁移规律。同时, 重金属的浓度及其在土壤中的存在形态, 农作物种类、生育期, 复合污染, 施肥等均是影响 Cd 在土壤—作物系统的积累、分配和迁移的因素, 已有的研究资料缺乏, 需要进一步研究。

#### 4.4 重金属复合污染及其联合毒理作用

已有研究表明<sup>[17, 20]</sup>, 白银区土壤受多种重金属元素的复合污染严重, 针对两种以上重金属复合污染特点的研究也有涉及。但总体来看, 揭示重金属之间的相互拮抗作用和协同作用、影响生

物对某种金属的累积过程或不同层次上的生物毒性等方面仍然缺乏资料,而研究重金属相互作用的意义在于根据研究成果评价重金属潜在的毒性和改进重金属污染生物修复技术等。此外,研究重金属与其他污染物的联合毒性作用,对进一步阐述重金属联合毒性机理,更好地评价和预测重金属联合毒性作用也具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 李红英,郭良才,党春霞.白银市土壤重金属污染综合整治[J].环境研究与监测,2006,19(4):37-39.
- [2] 戴昕鹏.甘肃白银农业区重金属富集水平及对当地居民健康风险评价[D].兰州:兰州大学,2013.
- [3] 雷思维,吴国振,王兴峰.白银区土壤和春小麦中重金属分布规律调查分析[J].甘肃冶金,2007,29(4):86-88.
- [4] 司万童,冯磊,杨峰,等.人工湿地去污对灌溉农田土壤重金属污染的修复[J].兰州大学学报(自然科学版),2012,48(5):85-88.
- [5] 祝合勇,杨太保,郭小花,等.白银市环境质量现状及对策措施[J].北方环境,2011,23(7):167-169;175.
- [6] 石培宏,杨太保,田庆春,等.白银市工业污染源重金属排放特征分析[J].中国环境监测,2012,28(5):9-15.
- [7] 郭淑文.白银市农业面源污染现状与防治对策[J].中国水土保持,2007(10):24-26.
- [8] 鲁海燕,曹靖,杨鑫,等.白银地区污灌对农田土壤细菌多样性的影响[J].长春理工大学学报(自然科学版),2010,33(2):110-116.
- [9] 吴国振,卢国俭.白银污灌区土壤重金属污染的调查与防治措施[J].甘肃有色金属,2001,16(4):8-14.
- [10] 南忠仁.甘肃省白银市中心区土壤环境质量评价[J].西北师范大学学报,1994,30(1):83-88.
- [11] 中国环境科学学会.中国环境科学学会学术年会优秀论文集[C].北京:中国环境出版社,2007.
- [12] 刘白林.白银黄灌区农田土壤重金属空间分布及其污染风险评价[D].兰州:兰州大学,2014.
- [13] NAN ZHONGREN, ZHAO CHUANYAN. Heavy metal concentrations in gray calcareous soils of Baiyin region, Gansu province, PR China [J]. Water, air, and soil pollution, 2000, 118(1-2): 131-142.
- [14] LI YU, WANG YAN-BIN, GOU XIN, et al. Risk assessment of heavy metals in soils and vegetables around non-ferrous metals mining and smelting sites, Baiyin, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(6): 1124-1134.
- [15] 田庆春,杨太保,石培宏,等.白银市土壤重金属污染源分析及防治措施[J].中国环境监测,2012,28(6):40-45.
- [16] 南忠仁,张建民,程国栋.白银市区土壤作物系统中重金属污染分析与防治对策与研究[J].环境污染与防治,2002,24(3):170-173.
- [17] 薛粟尹,李萍,王胜利,等.工矿型绿洲农田土壤中氟和Cd的剖面行为研究[J].中国环境科学,2014,34(1):195-200.
- [18] 南忠仁,李吉均.干旱区耕作土壤中重金属Cd铅镍剖面分布及行为研究—以白银市区灰钙土为例[J].干旱区研究,2002,17(4):39-44.
- [19] 刘皎,曹靖,南忠仁,等.白银市郊区重金属复合污染对土壤酶活性的影响[J].兰州大学学报(自然科学版),2010,46(5):39-43.
- [20] 李非里,刘丛强,宋照亮.土壤中重金属形态的化学分析综述[J].中国环境监测,2005,21(4):21-27.
- [21] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry. 1979, 51(7): 844-851.
- [22] 夏增禄.土壤环境容量及其信息系统[M].北京:气象出版社,1991.
- [23] 杨冰凡.白银市城郊重金属污染农田土壤的化学淋洗修复研究[D].北京:中国科学院大学,2013.
- [24] 刘白林,马新旺,朱赛勇,等.白银黄灌农业区不同土层重金属赋存形态及其风险评价[J].兰州大学学报(自然科学版),2014,50(3):431-436.
- [25] 何振立,周启星,谢正苗.污染及有益元素的土壤化学平衡[M].北京:中国环境科学出版社,1998.
- [26] 郭淑文.白银市郊区土壤与主要粮食作物污染情况调查[J].甘肃农业科技,2002(12):32-33.
- [27] NAN Z R, ZHAO C Y, LI J J, et al. Field survey of Cd and Pb contents in spring wheat (*Triticum aestivum* L.) grain grown in Baiyin City, Gansu province, People's Republic of China[J]. Bull Environ Contam Toxicol. 1999, 63: 546-552.
- [28] 雷思维,吴国振,王兴峰.白银区土壤和春小麦中重金属分布规律调查分析[J].甘肃冶金,2007,29(4):86-88.
- [29] 南忠仁,李吉均,张建民.干旱区土壤小麦根系界面Cd行为的环境影响研究—以甘肃省白银市区耕作灰钙土为例[J].土壤与环境,2001,10(1):14-16.
- [30] CHARY N S, KAMALA, C T, et al. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, 69(3): 513-524.