

我国《土壤环境质量标准》中重金属污染相关问题探讨

聂静茹, 马友华*, 徐露露, 付欢欢, 马铁铮

(安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036)

摘要:我国《土壤环境质量标准》(GB 15168—1995)的颁布促进了土壤资源的保护、管理与监督,但由于时间跨度过长社会发展较快,已经不能满足目前实际应用的需要。本文概述了发达国家关于土壤重金属污染的相关指导值/筛选值,并总结了我国现行土壤环境质量标准实施以来存在的问题及近年来的研究进展,对我国《土壤环境质量标准》的修订进行了探讨。

关键词:土壤环境质量标准;重金属污染;存在问题;修订建议

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2013)06-0044-06

Discussion About Heavy Metal Pollution in Soil Environmental Quality Standard in China

NIE Jing-ru, MA You-hua*, XU Lu-lu, FU Huan-huan, MA Tie-zheng

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The formulation of *Soil Environment Quality Standard* (GB 15168—1995) has promoted the protection, management and supervision of the soil resources. But the time span is too long and the social development is too fast, it is not satisfied the need of practical application at present. This paper summarized the guidelines and standards on soil heavy metal pollution in developed countries and the existing questions on heavy metal standard since the implementation of current soil environmental quality standards in China. In addition, several proposals were given to the revision of the *Soil Environmental Quality Standards*.

Keywords: soil environment quality standard; heavy metal pollution; existing problem; revision proposal

随着“血铅中毒”、“镉米超标”等污染事件的曝光,土壤重金属污染越来越受到人们的关注。据报道,全国每年重金属污染的粮食多达1 200万t,因重金属污染而导致粮食减产高达1 000多万t,合计经济损失至少200亿元^[1]。此外,中国的非耕地土壤环境,包括工矿区、城市中心商业区和老居民区,甚至是风景区都受到了不同程度的重金属污染^[2]。目前,国家已将重金属污染防治纳入“十二五”规划,要求到2015年重点区域铅、汞、铬、镉和类金属砷等重金属污染物的排放要比2007年削减15%。因此,土壤重金属污染防治及修复工作已不容忽视。

然而,评价一块地是否受到重金属污染,污染的程度是否严重,或者受到污染的土壤修复到何种程度才算不污染,目前还没有一个完善的、科学的、成熟的评价标准。我国现行的《土壤环境质量标准》(GB 15168—1995)因时间的跨度较长以及经济社会的快速发展已经远不能满足实际应用的需要,国家环境保护部也于2009年发布了“关于修订《土壤环境质量标准》公开征求意见”的通知,基于此,本文综述了现行土壤质量标准实施以来有关重金属标准存在的问题及近年来的研究进展,并对我国《土壤环境质量标准》(下文简称《标准》)的修订进行了探讨。

1 国内外研究现状

1.1 国外土壤质量指导值/筛选值概述

美国环保总署于2004年颁布了旨在保护生态受体安全的土壤生态筛选导则以及人体健康的土壤筛选导则,这些土壤筛选导则是基于风险的土壤污染物

收稿日期:2013-06-14

基金项目:农业部农业生态环境保护项目(农科教发[2012]3号);华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室开放课题(KLGIS2012A02)

作者简介:聂静茹(1991—),女,安徽东至人,硕士研究生,主要从事资源环境与信息技术研究。E-mail:niejingru922@126.com

*通信作者:马友华 E-mail:yhma@ahau.edu.cn

浓度而制定的,美国许多州也据此制订了各州的土壤质量指导值^[3]。英国环境署在考虑不同土地利用方式下以保护人体健康为原则制定了土壤指标值,该指标值只用于评价土壤中污染物对人体健康的长期暴露风险,其保护对象不包括建筑工人或者非人类受体,并且未涵盖短期急性暴露风险,而且不可作为修复标准使用^[4]。澳大利亚国家环境保护委员会制定了基于人体健康的调研值和基于生态的调研值,澳大利亚和新西兰环境保护委员会/国家健康和医疗研究委员会最早将调研值定义为:当土壤或地下水中污染物的浓度超过这一浓度时,需要开展进一步的调研和评估^[5]。加拿大环境部长理事会在考虑保护生态物种安全和人体健康风险的基础上分别制定了保护生态的土壤质量指导值和保护人体健康的土壤质量指导值,取两者中的最低值作为最终的综合性土壤质量指导值^[6]。荷兰环境部应用基于风险的方法建立了标准土壤中污染物的目标值、干预值及部分污染物造成土壤严重污染的指示值^[7]。日本于1970年颁布农用地土壤污染防治法以及土壤质量环境标准和分析方法,目前日本土壤环境质量标准检测指标已达27项,其中特别设立了浸出液(将土壤和10倍量的水混合,将污染物浸出)标准,同时规定了浸出液中24种污染物的浓度^[8]。

1.2 我国现行《土壤环境质量标准》概况

我国《土壤环境质量标准》于1996年3月颁布实施,按土壤应用功能和保护目标不同,将土壤环境质量划分为三个等级。一级标准主要依据地球化学法,其值主要参照土壤背景值,即污染物含量 \leq 背景值,该法能较全面的考虑到不同地理区域的差异状况^[9];二、三级标准主要依据生态环境效应法,其中二级标准值是从全国范围内选用诸多类型土壤中最小的土壤环境基准值,即土壤中污染物含量在背景值和最高允许值之间,三级标准是根据国内某些高污染物含量但尚未发生危害地区土壤(或人工外源污染的试验资料)制订的,土壤中污染物浓度 \geq 最高允许值^[10]。

与国外土壤污染的大环境相比,我国人口众多,经济发展相对粗放,还接受着发达国家的一些高污染产业转移,整体形势更加复杂严峻;而较之国外的土壤质量筛选值/指导值,我国《土壤环境质量标准》只关注了农田、蔬菜地、园地、牧场、林地及自然保护区等地的土壤,从人体健康和生态风险的角度考虑的较少,而且所涉及的重金属种类不全面,因而《土壤环境质量标准》的修订和完善已经迫在眉睫。

2 《标准》中重金属标准制定的影响因素和存在问题

我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)实施至今已有17年,为我国土地资源的发展与管理以及土壤环境质量的提升起到了重要的作用^[11],但由于当时的科研水平和经费条件有限、土壤本身性质复杂以及土壤污染情况日益严重,现行标准在很大程度上已不能满足实际应用需要。其存在问题和影响因素主要有以下几方面。

2.1 一级标准过于统一化

我国地域辽阔,不同的土壤类型、气候条件下重金属在土壤中的迁移转化规律不同,用一种标准来界定土壤中某种污染元素的临界值较为缺乏科学性。一级标准主要是依据“七五”国家科技攻关课题《土壤环境容量研究》提供的资料制定,资料显示土壤中镉等8种元素的背景值在我国4000多个样点(表层土壤)中含量分布范围极广,最高值为最低值的 $2.3 \times 10^2 \sim 6.3 \times 10^4$ 倍不等^[12]。因此,仅依靠各地区土壤背景值而统计出的土壤环境质量一级标准在实际应用中可能会出现偏差^[13]。此外,部分地区背景值含量比国家标准值高,在实际操作中可能会出现本身没有污染的土壤被评价为元素含量超标,而实际污染严重的土壤可能会因背景值含量比国家标准低则被定性为没有污染^[14]。这对政府决策以及城市经济发展都会带来很大的影响。

2.2 二级标准缺乏操作性

二级标准是从全国范围内选用诸多类型土壤中最小的土壤环境基准值而制定的,用它来评价土壤是否受到污染过于严苛,同时也未考虑土壤有一定的环境容量。具体表现在低于国家二级标准值可以说明土壤没有受到污染,但如果高于该标准值,土壤是否受到污染不能明确界定,尤其对于一些污染物含量未超过其临界含量的土壤来说,难以反映实际情况。在农业生产中,往往因此造成经济损失,不利于农业发展。

2.3 重金属形态选用单一

现行的《标准》以污染物的总量表示,而土壤性质复杂,重金属存在形态较多,全量指标很难反映植物真正的受害效应。近30年来,国内外在土壤重金属有效态方面进行了大量研究,李宗利等^[15]用Sposito提取方法研究结果认为:交换态、吸附态Cd、Pb对黑麦幼苗吸收量贡献最大,有机结合态Cd、Pb是对植物潜在有效的形态。Steele等^[16]对生活在城市周边及铅

冶炼场周围儿童的流行病学调查结果表明,在相同铅污染浓度的条件下,生活在城市的儿童血铅浓度普遍高,表明土壤中铅的形态和化合物组成要比总含量对生物的危害性更大。借助于区间线性规划理论,李冰等^[17]以稻谷 Cd 限量卫生标准为限制条件,筛选出了各活性形态 Cd 的限量区间,如可交换态 $Cd \leq 0.0865 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碳酸盐结合态 $Cd \leq 0.2641 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为成都平原土壤重金属污染提供了有效的参考。

2.4 重金属标准值制定不合理

2.4.1 Pb 标准值制定偏高

综合世界各国的土壤环境质量标准值发现,铅的范围在 $50 \sim 550 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,中值为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而我国铅的二级标准值在 $250 \sim 350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,明显高于其他国家标准。万洪富等^[18]分别以《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准和《食品中污染物限量》(GB 2762—2005)作为广东酸性土壤和作物污染状况评价标准时发现,作物中 Pb 含量超标最严重,超标率达 3.90%,而土壤中 Pb 的含量超标率却仅为 0.13%,当以土壤 Pb 含量标准为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 进行评价时,超标率为 5.25%,与作物中 Pb 含量超标情况基本一致。

2.4.2 Cd 标准值制定应细化 pH 值

我国《土壤环境质量标准》中 Cd 的二级标准值仅以 pH 值为 7.5 时作了划分,pH 值 < 7.5 时标准值为 $0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值 > 7.5 时标准值为 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。已有大量研究表明土壤中 Cd 含量与 pH 值有显著的相关性^[19]。张红振等^[20]人在研究 Cd 在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全时推导出稻田镉环境基准值,与 GB 15168—1995 的二级标准相比,二级标准在低 pH 值段(pH < 6.5)略微偏宽,在中高 pH 值段(pH > 6.5)略微偏严。

2.5 重金属的交互作用

2.5.1 重金属-重金属交互作用

重金属元素间的交互作用对生物有效性的有效性非常复杂,土壤中重金属复合污染既可以是两元素、也可是三元素和多元素共存^[21]。Cakmak 等^[22]通过¹⁰⁹Cd 示踪技术研究 Cd、Zn 交互作用对小麦 Cd 吸收影响时发现,当土壤中施入的 Zn 浓度从 $1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,小麦籽粒吸收¹⁰⁹Cd 的比例从 6.50%降低到 4.13%。武文飞等^[23]通过模拟基于干旱区绿洲土壤 Cd-Pb-Zn-Ni 复合污染下的油菜盆栽试验发现,随着 Cd-Pb-Zn-Ni 复合胁迫水平的升高,油菜的干重先增加后减小,根系的生长由促进作用转变为

抑制作用。

2.5.2 重金属-有机污染物交互作用

有机污染物-重金属复合污染是一种普遍存在的环境污染形式,比如污水处理厂的污泥、工业废水等,对其进行研究具有重要的理论意义和实践价值^[24]。Sun 等^[25]研究了土壤中重金属和有机物的吸附行为,发现 Cd 和 Cu 共存的土壤抑制了 1,4-二氯苯的吸收,而且抑制效果随 Cd 和 Cu 浓度升高而变得更加明显,得出了金属共存能极大影响土壤疏水性有机化合物的吸附行为的结论。

2.6 土壤性质的影响

土壤中重金属的不同形态决定了其对植物的毒性效应和生物利用率,当土壤中的重金属离子由固相形态转移到土壤溶液时,该离子对植物的有效性将增加,而影响土壤中固液相平衡的因子非常复杂,包括土壤 pH 值、有机质、阳离子交换量、氧化还原电位、土壤矿物成分及黏粒含量等。

2.6.1 pH 值和氧化还原电位(Eh)

我国土壤环境质量二级标准按 pH 值 < 6.5、6.5~7.5、> 7.5 将土壤划分为 3 类,三级标准只有 pH 值 > 6.5 的区分。吴启堂^[26]认为此种分法过于简单,因强酸性(pH 值 < 5.0)与弱酸性(6.0 < pH 值 < 6.5)土壤的环境容量相差较大,采用同一标准不太合适;而弱酸性和中性土壤的环境容量相差不是很大,标准上却有 1~3 倍差异。

土壤 Eh 值不仅可以直接改变重金属的氧化状态,还可通过影响土壤微生物的活性来改变土壤的 pH 值^[27]。McBride^[28]在研究土壤性质对 Cd 吸收影响时发现,水稻对 Cd 的吸收总量随着 Eh 值的增加和 pH 值的降低而增加,在淹水条件下,减产 25% 时的土壤添加 Cd 浓度为 $320 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而在非淹水条件下减产同样幅度时的添加 Cd 浓度则为 $17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.6.2 有机质

有机质的含量和组成不仅可以影响重金属在土壤中的积累,还能通过螯合作用与重金属离子形成络合物,从而影响其在土壤中的迁移转化。章明奎等^[29]用物理与化学相结合的方法研究了 2 个污染土壤剖面中有机质结合重金属(Cd、Cu、Pb 和 Zn)的分布,研究结果显示土壤颗粒状有机质对重金属有明显的富集作用,且颗粒状有机质中重金属的富集程度与土壤重金属的积累呈正相关。徐龙君等^[30]对土壤溶解性有机质的研究表明,水溶性 Cd 和有机质结合态 Cd 含量会随着土壤中溶解性有机质的增加而逐渐增加。

2.6.3 阳离子交换量(CEC)与粒径组成(黏粒含量)

一般而言,重金属的有效性随着土壤中CEC含量的提高而降低,原因是由于随着阳离子交换容量上升,土壤对于重金属离子吸附固持作用增大,使得其有效性降低^[27]。李冰等^[31]在分析水稻子实对不同形态重金属的累积差异及其影响因素时发现活性态Cr含量与CEC密切相关。

从黏粒含量来看,土壤的黏粒含量越高,其重金属交换态含量会越低,对生物有效性的影响会变小。何腾兵等^[32]在贵阳市乌当区研究了不同种类重金属与CEC、黏粒含量的相关性;今后若能通过细分阳离子交换量指标并考虑土壤的粒径组成会对新标准的制定更有意义。

2.7 作物效应

不同的作物品种对其所生长的土壤环境中重金属的形态有着不同程度的影响。殷宪强等^[33]通过研究不同蔬菜地中Cu、Zn累积差异发现,在相同处理水平下,生菜地土壤中Cu的累积高于油菜地土壤,油菜地土壤中Zn的累积高于生菜地土壤。另外,根际环境的不同对土壤重金属在作物体内的富集也会有差异,一般情况下的分布规律是根>茎叶>籽粒,但并不适用于所有作物,其差异性与重金属在作物体内迁移及生长周期有关。目前我国土壤环境标准的制订中,旱地供试作物主要以小麦和叶菜类蔬菜为主,水田以水稻为对象,供试植物品种较单一,不能满足现代环境质量评价的要求,因此,应适当增加供试作物种类和可食真菌类在环境标准制订中的研究^[34]。

3 对《标准》中重金属标准修订的探讨

3.1 考虑土壤性质差异

我国土壤从南到北地域性特点不同,土壤类型差异也很大,在标准制定时应考虑,能准确定值的给出国家标准,不能准确定值的则给出操作原则。在I类标准制定时,建议仍沿用背景值,但要对各地的土壤背景值重新摸清,因为工业的蓬勃发展已经给土壤环境带来巨大变化。II类标准要考虑的因素较多,包括pH值、Eh、有机质、CEC以及黏粒含量等,可以按主要土壤类型或地域特点来定值,也要考虑具有代表性植物的临界值^[35]。

3.2 增加重金属有效态含量

由于污染物对人体和动植物的影响主要取决于其有效态成分的多少,各标准值的制定应主要采用有效态。目前,有关土壤重金属有效态和生物有效性研

究已逐渐成为科研热点,但仍存在一些难点,主要在于寻找较合适的浸提剂和浸提方法,在标准制定的同时还要考虑其他一些工作,例如测定方法的规范化和临界值的积累等。目前ISO标准组织出台了一些土壤质量方面的标准,包括DTPA提取土壤中的重金属离子(ISO 14780—2001(E))和王水法浸提法(ISO 11466—1995(E))^[36]。

3.3 修订重金属标准值

(1)Pb。很多实际研究表明,土壤Pb含量大于 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,儿童体内血Pb大于 $15\text{ }\mu\text{g}\cdot 100\text{ mL}^{-1}$,已对儿童健康产生了不良影响。美国、荷兰、瑞典等国家在研究土壤中Pb允许含量时均以铅对儿童的危害、剂量-效应关系及血Pb水平与土壤Pb关系作为基础^[37],故我国可借鉴其他国家经验将Pb标准值降低到至少 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

(2)Cd。对于Cd的修改意见可参照张红振等^[20]的研究成果,将农用地的土壤环境质量标准按pH值分为4段:pH值 <5.5 , $5.5\leq\text{pH}$ 值 <6.5 , $6.5\leq\text{pH}$ 值 ≤ 7.5 ,pH值 >7.5 ,在pH值低于5.5时,将镉的标准控制在略微高于土壤Cd的环境背景值;在 $5.5\leq\text{pH}$ 值 < 6.5 时应略低于现行标准值; $6.5\leq\text{pH}$ 值 ≤ 7.5 时可采用现行标准值;当pH值 >7.5 时可适当放宽镉的最高允许含量。

3.4 考虑不同土地利用方式

现行《标准》主要关注于保护农业用地,对其他土地利用方式缺乏考虑。美国各州是以联邦标准为基础来制定适合本州的污染土壤清洁标准,其中纽约州的土壤清洁目标综合考虑了5种土地利用方式:非限制性用地、居住用地、受限制的居住用地、商业用地和工业用地。我国可借鉴国外经验,从农业用地、居住用地、商业用地、工业用地、保护地下水这5个方面来对现行标准进行完善和修订。

3.5 增加健康风险指数

从国际发展形势看,建立基于人类健康风险评估的土壤环境质量指导值/标准是必然趋势,但需考虑不同的土地利用方式,设置各种土地利用方式下的一般暴露途径、暴露参数(如暴露周期和暴露频率)和临界风险受体等^[37]。如加拿大在建立土壤质量指导值时就保护人体健康方面考虑了农业用地、居住/公园用地、商业用地和工业用地这4种土地利用类型下对人体健康的影响程度。我国宜吸取国外经验,对不同污染物分别找出有显著影响的主要途径进行剂量-效应关系研究,得出主要途径的土壤污染危害临界值;并

以此数值进行其他途径的验证,最后得出土壤的污染危害临界值^[38]。

3.6 建立区域土壤重金属环境质量标准

我国幅员辽阔,各地土壤性质差异较大,重金属元素的背景值相差也很大,国家统一的标准一般只能起筛选作用,难以真实反映当地情况^[39]。各地区可首先筛选出当地对重金属具有高度敏感性的供试作物,通过盆栽试验或小区示范外源添加重金属污染物,以《GB 2762—2012 食品安全国家标准》或其他适宜当地农产品的污染物限量标准为限制条件来反映重金属的毒害效应值,借助于区间线性规划理论得到重金属有效态含量进而推算出土壤中重金属的毒害临界值或是效应阈值。福建省于 2008 年颁布了《福建省农业土壤重金属污染分类标准》(DB 35/T 859—2008),各省可参照制定出适应本省的地方标准。

4 展望

2012 年党的十八大报告提出要大力推进生态文明建设,并首次以独立篇章系统地阐述今后 5 年大力推进生态文明的总体要求,而土壤安全无疑在整个生态文明建设中占据着重要地位。目前,全国《农产品产地土壤重金属污染防治》普查与修复项目正在各省紧张开展,到 2015 年就铅、镉、砷、铬、汞等重金属元素将会获得海量数据,而如何评价这些数据以及如何建立科学的评价标准是接下来面临的主要问题,同时在很大程度上也会推动我国土壤环境质量标准、土壤重金属污染修复标准以及地方标准的尽快出台。

国家环保部正在积极推进土壤环境保护的立法工作,制定和颁布土壤环境保护法不仅能加快土壤污染防治与修复工作的步伐,还能带动整个污染场地修复行业的发展。今后,国家相关部门可考虑开设地方信息平台,让公众积极参与到重金属污染的监督与防治中,同时便于制定和管理地方标准,若能形成此机制,不仅在一定程度上能解决一些民众农田污染无处反映的局面,也有利于国家获取地方信息并及时采取措施。

参考文献:

[1] 骆永明,滕 应. 我国土壤污染退化状况及防治对策[J]. 土壤, 2006, 38(5): 505-508.
 [2] 卢 瑛,龚子同,张甘霖. 南京城市土壤重金属活性及其影响因素 [C]. 中国土壤学会第十次全国会员代表大会暨第五届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会文集,沈阳:中国土壤学会,2004.

[3] USEPA. An examination of EPA risk assessment principles and practices [S]. EPA/100/B-04/001, 2004.
 [4] EA (Environment Agency). Using soil guideline values [R]. London: 2009.
 [5] NEPC (National Environmental Protection Council). National environmental Protection (assessment of site contamination). measure review [R]. Canberra: 2006.
 [6] CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines[R]. Winnipeg: 1996.
 [7] VROM (Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment). Annexes circular on target values and intervention values for soil remediation[R]. The Hague: 2000.
 [8] 陈 平,陈 研,白 璐. 日本土壤环境质量标准与污染现状[J]. 中国环境监测,2004, 20(3): 63-66.
 [9] 孟凡乔,史雅娟,吴文良. 我国无污染农产品重(类)金属元素土壤环境质量标准的制定与研究进展[J]. 农业环境保护,2000, 19(6): 356-359.
 [10] 王降辉,陈 凯,马义兵,等. 土壤环境质量标准的有关问题探讨 [J]. 山东农业科学,2007(5): 131-134.
 [11] 袁建新,王 云. 我国《土壤环境质量标准》现存问题与建议[J]. 中国环境监测,2000, 16(5): 41-44.
 [12] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1996: 11-12.
 [13] 高怀友,赵玉杰,师荣光,等. 区域土壤环境质量评价基准研究[J]. 农业环境科学学报,2005, 24(增刊): 342-345.
 [14] 张文具,范华义. 天津市土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn、Ni 环境标准制定[J]. 城市环境与城市生态,2002, 15(3): 47-48.
 [15] 李宗利,薛澄泽. 用黑麦幼苗法研究土壤中铅镉的化学形态与其有效性的关系[J]. 农业环境保护,1991, 10(5): 203-207.
 [16] Steele M J B D, Beck B L, Murphy, et al. Assessing the contribution from lead in mining wastes to blood lead [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1990, 11(1): 158-190.
 [17] 李 冰,王昌全,代天飞,等. 基于区间线性规划理论的水稻土重金属 Cd 形态限量标准研究[J]. 水土保持学报,2008, 22(3): 141-145.
 [18] 万洪富,周建民,陈能场,等. 我国酸性土壤地区土壤环境质量标准实践中的修改建议——以铅、镍和镉的标准研究为例[J]. 土壤, 2009, 41(2): 192-195.
 [19] 赵其国,史学正. 土壤资源概论[M]. 北京:科学出版社,2007: 93-117.
 [20] 张红振,骆永明,章海波,等. 土壤环境质量指导值与标准研究 V. 镉在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全[J]. 土壤学

- 报,2010,47(4):628-638.
- [21] 周东美,王玉军,仓 龙,等. 土壤及土壤-植物系统中复合污染的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备,2004,5(10):1-8.
- [22] Cakmak I, Welch R M, Erenoglu B. Influence of varied zinc supply on re-translocation of ^{109}Cd and ^{86}Rb applied on mature leaf of durum wheat seedlings [J]. *Plant and Soil*,2000,219(2):279-284.
- [23] 武文飞,南忠仁,王胜利,等. 绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性[J]. 生态学报,2013,33(2):619-630.
- [24] 周东美,王慎强,陈怀满. 土壤中有机污染物-重金属复合污染的交互作用[J]. 土壤与环境,2000,9(2):143-145.
- [25] Sun Fuhong, Zhou Qixing. Interactive effects of 1,4-dichlorobenzene and heavy metals on their sorption behaviors in two Chinese soils[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*,2010,58(1):33-41.
- [26] 吴启堂. 土壤重金属的生物有效性和环境质量标准[J]. 热带亚热带土壤科学,1992,1(1):45-53.
- [27] 利 锋,张学先,戴睿志. 重金属有效态与土壤环境质量标准制订[J]. 广东微量元素科学,2008,15(1):7-10.
- [28] McBride M B. Cadmium uptake by crops estimated from soil total Cd and pH [J]. *Soil Science*,2002,167(1):62-66.
- [29] 章明奎,利 平,周 翠. 污染土壤中有机质结合态重金属的研究[J]. 生态环境,2005,14(5):650-653.
- [30] 徐龙君,袁 智. 外源镉污染及水溶性有机质对土壤中 Cd 形态的影响研究[J]. 土壤通报,2009,40(6):1442-1445.
- [31] 李 冰,王昌全,代天飞. 水稻子实对不同形态重金属的累积差异及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(4):602-610.
- [32] 何腾兵,董玲玲,刘元生. 贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究[J]. 水土保持学报,2006,20(6):157-162.
- [33] 殷宪强,张增强,孙慧敏,等. 施用污泥堆肥对土壤中 Cu、Zn 形态分布的影响研究[J]. 农业环境科学学报,2004,23(4):448-451.
- [34] 王降辉,陈凯,马义兵,等. 土壤环境质量标准的有关问题探讨[J]. 山东农业科学,2007(5):131-134.
- [35] 何忠俊,梁社往,洪常青,等. 土壤环境质量标准研究现状及展望[J]. 云南农业大学学报,2004,19(6):700-704.
- [36] 蔡彦明,刘凤枝,王跃华,等. 我国土壤环境质量标准之探讨[J]. 农业环境科学学报,2006,25(增刊):403-406.
- [37] 王国庆,骆永明,宋 静,等. 土壤环境质量指导值与标准研究 I. 国际动态及中国的修订考虑[J]. 土壤学报,2005,42(2):666-672.
- [38] 夏家淇,骆永明. 我国土壤环境质量研究几个值得探讨的问题[J]. 生态与农村环境学报,2007,23(1):1-6.
- [39] 王诚曦,王 济,蔡雄飞,等. 农田土壤环境质量标准值制定与健康风险评估[J]. 广西农业科学,2009,40(9):1199-1202.