

客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状 ——关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议

王玉军, 刘存, 周东美, 陈怀满*

(中国科学院南京土壤研究所 土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008)

摘要:《全国土壤污染状况调查公报》是调查样点真实而客观的反映。之所以说它是真实的,因为它是从大约 630 万 km² 实际调查面积中所取土壤样品分析结果所获得的结论;继之说它是客观的,因为它对于数据形成的原因缺乏必要的深度分析,因而对土壤环境质量现状的描述需要客观而理性的对待。文章第一部分就有关标准、耕地超标判别的关键因素、高背景值土壤样点问题、污染或超标点位的溯源性分析等进行了讨论,提出了下列见解:(1)需要明确评价标准。就耕地土壤重金属而言,其标准受到多种因素的影响,故当在公报中表明质量状况时,应该说明评估的标准,它应该与土壤和农作物类型密切相关。(2)需要给出对应土壤样点农产品中有关元素的含量。农产品可食部分重金属含量是判断土壤重金属影响的关键指标,缺乏相关数据则无法判断土壤是否污染。(3)高背景值土壤不应列为污染土壤。根据土壤污染的定义,它不具有污染的特征要素。在一些地区因母质和自然成土过程所形成的高背景值,通常归属于环境异常;在利用方面应属于“土宜学”范畴。(4)污染或超标点位的原因应该慎重甄别。从物料平衡的角度考虑,区域性 Cd 增量要达到 50% 或者 40% 的可能性需要进一步考虑。文章的第二部分讨论了采用负载容量管理法对土壤环境质量的管控的优势和可行性。从正常土壤考虑,有利于从单一标准过渡到双标准管理,从而兼顾土壤自然环境质量的可持续性和土壤资源的可持续利用;从污染土壤考虑,有利于修复标准的确定;从污染源影响的赔偿考虑,根据外源物质所消耗的容量值,可量化有偿利用和恢复容量的经济评估;从责任主体考虑,有利于责任主体的认定和保护措施的落实;从方法的简便性和可操作性考虑,简单易行。

关键词: 调查公报; 土壤污染; 土壤环境质量; 重金属; 容量管理法

中图分类号: X825 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)08-1465-09 doi:10.11654/jaes.2014.08.001

A Critical View on the Status Quo of the Farmland Soil Environmental Quality in China: Discussion and Suggestion of Relevant Issues on Report on the national general survey of soil contamination

WANG Yu-jun, LIU Cun, ZHOU Dong-mei, CHEN Huai-man*

(Key Lab of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: The Report on the national general survey of soil contamination was a reflection of the reality and appearance of the survey's samples and methodologies conducted by the Ministry of Environmental Protection and the Ministry of Land and Resources. Since the soil samples were collected from the de facto survey area about 6.3 million km², the conclusion drawn from the analytical results of such large sample size was fairly representative of the current status of China's soil; while there was an apparent lack of necessary in-depth analysis of the formation of data. Thus an objective and rational viewpoint on the description of the status quo of the soil environment quality is needed. In the first part of this article, we discussed the standards, the key factor to identify whether the heavy metal levels in farmland exceed the national standards, the problems about soil samples collected from high background areas and the traceability analysis of contaminants where the levels of contaminants exceed the standards. Based on our discussion, the following opinions were put forward: (1) The evaluation standards need to be clarified, as in terms of heavy metals in the cultivated land, the choice of standards is affected by many factors, which is closely related to the type of soil and crops. (2) The corresponding content of heavy metal in agricultural products where the soil samples were collected need to be evaluated, since the heavy metal content in the edible part of the agricultural products is the key indicator to determine the impact of heavy metals in the soil. Lacking the corresponding data, it cannot determine whether the soil is contaminated or not. (3) Soils with high

收稿日期: 2014-06-27

基金项目: 江苏省杰出青年基金(BK20130050); 环保部公益性行业科研专项(20140941)

作者简介: 王玉军(1977-), 男, 研究员, 主要从事重金属的环境土壤化学过程研究。E-mail: yjwang@issas.ac.cn

* 通信作者: 陈怀满 E-mail: hmchen@issas.ac.cn

background levels of heavy metals should not be classified as the contaminated soil. According to the definition of soil contamination, such area does not have the characteristic feature of contamination, as the high background values of heavy metals in the area come from the natural parent materials or the soil formation processes. It should be generally attributed to the environmental exceptions, and in the term of soil utilization, it should belong to the category of "science of soil adaptability". (4) The sources of soil pollution where the standards were exceeded should be carefully screened. When the Cd content in soil increased 40% or 50%, the possible Cd input from external sources should be considered from the viewpoint of material balance.

The loading capacity of soil for contaminants was suggested to be adopted as guideline principle in the management of soil environmental quality, and its advantage and feasibility was discussed in the second part of the article. For the consideration of general soil management, it is advantageous to transit from a single standard to composite standards, which takes into account the sustainability of natural soil quality and sustainable utilization of soil resources. Regarding the contaminated soil, the incorporation of the concept of loading capacity will be beneficial for determining the remediation criteria. In the economic assessment of the pollution compensation, the compensated utilization and the restoring capacity could be quantified according to the capacity consumed by exogenous substances. It will also help to assess the liability and implement the protection measures in identifying the legal responsibility subject of soil pollution. The procedure of calculating the loading capacity of soil for contaminants is practical and feasible, and thus it is recommended to be incorporated in the future management of soil environmental quality.

Keywords: report on the national general survey on soil contamination; soil pollution; soil environmental quality; heavy metal; management method by loading capacity

2014年4月17日,环境保护部和国土资源部发布了《全国土壤污染状况调查公报》,认为“全国土壤环境状况总体不容乐观,部分地区土壤污染严重,耕地土壤环境质量堪忧,工矿业废弃地土壤环境问题突出。工矿业、农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因”。“耕地土壤点位超标率为19.4%,其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为13.7%、2.8%、1.8%和1.1%,主要污染物为镉、镍、铜、砷、汞、铅、滴滴涕和多环芳烃”。这是从2005年4月至2013年12月近9年时间首次全国土壤污染状况调查样点真实而表观的反映。之所以说它是真实的,因为它是从大约630万 km^2 实际调查面积中所取土壤样品分析结果所获得的结论;继之说它是表观的,因为它是一个“数据成果”,对于数据形成的原因缺乏必要的深度分析,因而对土壤环境质量现状的描述显然存在一些可商榷之处。本文针对公报中的评价标准、耕地超标判别的关键因素、高背景值土壤样点问题、污染或超标点位的溯源性分析等进行了讨论,并对土壤环境质量有效管控提出了建议;但由于我们不掌握公报中的原始数据,仅能根据有关文献资料进行考虑与分析,未免有不当之处,仅供进一步开展后续工作时参考。

1 关于公报中有关问题的讨论

1.1 需要明确评价标准

公报注释表明,“本次调查土壤污染程度分为5

级:污染物含量未超过评价标准的,为无污染;在1倍至2倍(含)之间的,为轻微污染;2倍至3倍(含)之间的,为轻度污染;3倍至5倍(含)之间的,为中度污染;5倍以上的,为重度污染。”然而,公报并没有给出具体的标准,没有说明是一个标准还是多种标准?由于标准赋值的独立性与依存性^[1],故标准的选择是一个十分繁杂的系统工程。就耕地土壤重金属而言,主要依赖于农产品中污染物的限量标准,通过试验获得产品可食部分重金属浓度与土壤中相应元素含量的关系,从而推算出土壤重金属的临界值。土壤重金属的临界值是指在特定目标和特定条件下土壤中某种重金属的最大安全浓度。除了土壤利用目的不同具有不同的质量标准外,重金属临界值亦受到多种因素的影响,故当在公报中表明质量状况时,应该说明评估的标准,它应该是一个系列标准或者标准系列,与土壤和种植农作物类型密切相关。以江苏潮土和水稻土为例,当以小白菜、小萝卜和水稻为指示作物时,潮土Pb临界值分别为110、220 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和230 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而水稻土分别为36.5、140 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和110 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对于Cd,潮土分别为1.09、6.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和1.63 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;水稻土分别为0.30、3.43 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和0.74 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。表明以水稻为指示物时,潮土Pb临界值较高,而以小萝卜为指示物时,潮土Cd的临界值较高。水稻土以小萝卜为指示物时,Cd和Pb均具有较大的临界值^[2-4]。在实际调查中亦不乏其例,对昆明阳宗海污灌区的研究表明,根据蔬菜食品卫生标准评价时,如果种植芹菜,

则所有土壤均为重污染;而如果种植白芸豆或豆尖,则不构成污染^[5]。

另一方面,由于生理、生化和遗传特性等不同,即使同一种作物的不同品种之间对重金属的胁迫亦可能有不同的反映,因而临界值亦可能不同。对不同品种大白菜的研究表明,地上部 Pb 和 Cd 含量存在显著品种差异^[6-7]。水稻亦是如此,7 种类型水稻糙米含镉量从高到低依次为特种稻、常规早籼稻、三系杂交晚稻、两系杂交晚稻、常规晚籼稻、常规粳稻、爪洼稻^[8]。Cd 在不同类型品种和不同器官中的含量均存在显著差异,在常规籼稻精米、稻谷中的含量最高,在杂交稻精米和稻谷中的含量居中,常规粳稻中的含量最低,而 Pb 在常规籼稻稻米和稻谷中的含量显著高于在粳稻和杂交稻中的含量^[9]。32 个不同品种水稻的研究表明,糙米 Cd 含量为 0.06~0.59 mg·kg⁻¹,Pb 含量为 0.25~3.15 mg·kg⁻¹,品种之间存在显著差异,高含量品种分别为低含量的 9.8 倍和 12.6 倍,从而不难发现,根据农产品中污染物限量和糙米重金属含量计算的土壤重金属临界值亦有显著不同。上述例证虽然不是影响临界值的全部因素,但足以说明土壤重金属临界值(基准)或标准受制于多种因素,因而具有依存性和相对性,很难给出一个全国的统一标准,使之适用于不同利用条件和不同地区。

1.2 对应农产品质量:耕地土壤样点判别的关键因素

公报给出的土壤点位超标没有说明农产品的质量状况,故不能客观地反映重金属的影响。农产品可食部分重金属含量是判断土壤重金属影响的关键指标,缺乏相关数据则无法判断土壤是否污染。依据土壤污染的定义,在耕地土壤重金属影响评估中,除了土壤中重金属的含量(判断有无明显增高)和污染源的监测与甄别外(判断有无外源人为影响),其危害或后果是十分重要的,即农产品的重金属含量或减产程度。根据农产品中的含量与食品中污染物的限量标准或允许减产的程度进行比较,凡是超过者,则认为存在危害后果。目前相当多的调查工作和文献中往往仅有土壤中重金属的含量,没有与之相对应的土地利用信息,亦缺乏污染物的溯源性,故将这样的数据用于耕地土壤重金属影响评估显得依据不足。需要强调的是,在土壤环境质量重金属影响的调查中,应该密切与土地利用相结合,关注主要受影响的对象;在耕地土壤-农作物的系统中进行重金属影响评估时,一定要将土壤和农产品可食部分同时“点对点”的采集,才能确切地给出土壤重金属对农产品质量的影响。农产

品可食部分重金属的含量与其生长的土壤和环境条件密切相关,由于土壤的时空变异性,故点对点的同时采样才能客观而准确地反映土壤-植物系统中重金属的行为。一般认为,随着时间的推移,土壤中重金属的可提取态逐步减小,植物对重金属的吸收亦可能变化,但由于环境条件影响的复杂性,这种变化并不总是吸收量的减少,例如,当黄棕壤外源 Cd 含量为 5 mg·kg⁻¹ 时,1983、1985 年和 1986 年的糙米 Cd 含量分别为 0.74、1.05 mg·kg⁻¹ 和 0.49 mg·kg⁻¹,可见在某一时间进行土壤样品的采集,而另一时间采集农产品的安排是不合适的^[10]。

内蒙古自治区河套地区土地资源丰富,地势平坦土层厚,土壤较肥沃,光热资源丰富,是内蒙古自治区重要的商品粮基地。粮食作物以小麦、玉米为主,是内蒙古自治区特色农业产区的主要经济支柱产业之一。张青等^[11]根据土壤类型、地貌特征设置采样点,在 2006 年 6 月上旬小麦收割时进行采样,采集了根、茎叶和子实。他们所有重金属元素含量平均值均符合《食品安全国家标准:食品中污染物限量》(GB 2672—2012);整体上看河套地区为绿色食品基地的土壤,适宜发展 AA 级绿色食品。一个值得关注的现象是,尽管小麦籽粒中 Hg、Cd、As 元素含量均符合国家小麦标准,但小麦籽粒中有部分样品 Pb 元素超标。然而,由于土壤中的 Pb 含量并无异常,因而小麦籽粒 Pb 含量超标的原因应该进行溯源性分析,可惜该文献未有进一步的研究。这一结果再次说明了无论是土壤环境质量的评述或者农产品的安全性,“点对点”采样都是十分重要的,单纯的土壤或者农产品质量分析都不可能土壤环境质量状况作出较为客观的评价,但在实际工作中并未引起足够重视。

1.3 高背景值土壤不应列为污染土壤

公报在分析土壤污染或超标的原因时,将工矿业、农业等人为活动以及高土壤环境背景值列为主要因素。然而,高背景值土壤的问题是一种特殊情况^[12]。根据土壤污染的定义,由于它不符合污染的特征要素,故不能归属于污染土壤的范围。土壤元素背景值是土壤化学性质的重要组成部分,影响土壤元素背景值的因素很多,包括成土母质、成土过程、土壤类型、土壤性质、不同的自然地理单元和气候条件、以及土地利用等。中国土壤元素背景值研究是国家“七五”重点科技攻关课题之一,获得了主要土类 60 余种元素可比的背景值,探讨了区域分异及影响因素。通过全国范围内大面积和大样本量的研究,表明土壤微量元

素背景值在石英质岩石发育的土壤主要为母质所控制,在碳酸盐类岩石发育的土壤中母质的控制作用不强;而大部分土壤微量元素背景值既为母岩,又为成土过程所影响。在一些地区因母质和自然成土过程所形成的高背景值,通常归属于环境异常。

云南东南部、贵州大部、广西西部、湖南西部和重庆东南部,无论是岩石、土壤还是水系沉积物,不仅具有汞的高背景,而且还具有砷、锑、硒、镉、氟等元素的高背景,与这里分布的中国最大的低温成矿域相吻合^[13]。总体上,中国土壤环境汞含量背景值的分布特征是:从西北向东南呈逐渐增高的趋势;新疆、甘肃、内蒙古中西部、西藏西部等属低背景值区;松辽平原和华北平原接近全国平均水平;云南、湖北、江西、浙江、福建、广东,尤其湖南、广西、贵州等省区,属高背景值区。如华南-西南的黄壤和红壤分别为 $102 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $78 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤汞异常还与土壤性质有关,富含有机质和腐殖质的土壤与汞结合的能力强,汞含量高,如华东、华南的水稻土中汞含量最高为 $183 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。此外,富含有机质的生油岩,有富集汞的能力。当生油岩进入生油门限后,其中的有机质通过热解作用,使其向油气转化,生成石油和天然气时,有机质中以不同形式富集的汞也随之发生变化,即从生油岩中转化到石油、天然气中,并同石油、天然气一起运移到有利于油、气储藏的构造圈闭中富集和储存。油气藏中的汞与外界保持着某种物理和化学平衡,汞通过油气藏上方盖层岩石孔隙、周边断层和裂隙,以及伴随地下水的循环作用穿透巨厚的岩石向上扩散、迁移到地表,并在地表土壤层中富集形成汞异常^[14]。

云南省 As、Cd 土壤背景含量远远大于地壳平均含量,其中以石灰土及石灰岩最高,是全省土壤平均值的 1.5 倍,随着 pH 值的升高,背景含量呈上升态势。As、Cd 地球化学高值区与岩溶发育区对应较好。全省共圈出 7 个 As 异常带和 12 个 Cd 异常区,而面积、幅值最突出的 As、Cd 元素异常均位于石漠化重度发育的滇东南地区。As、Cd 异常主要来源于高背景含量的母岩(碳酸盐岩),其富集的主要原因是由于碳酸盐岩土壤具有高 pH 和 CEC 值,质地黏重,有机质含量高,因而 As、Cd 迁移速率降低,造成碳酸盐岩发育区土壤 As、Cd 高度富集,一般从岩石到土壤的富集量约为 4~5 倍。在小江流域泸西 As、Cd 元素高异常区,农作物 As 吸收超标率为 14.8%,而 Cd 元素吸收超标率高达 74.1%^[15-16]。

江苏省是我国经济较发达省份之一,近几十年来环境问题日益突出,各种环境污染已对全省土壤质量和生态功能产生了明显影响。据江苏省农田生态环境调查结果显示^[17],就耕作层土壤中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8 种重金属而言,全省约有 5% 的农田土壤安全生产可受到明显影响。江苏省北部地区是全省重要的粮油、蔬菜作物产地,其粮油、蔬菜年产量超过了全省总产的 50%。江苏省苏北地区工矿企业要少于苏中和苏南地区,来源于工业活动的重金属影响相对较轻,而由于土壤母质地质异常引起的农田耕作层土壤重金属的富集可能对区内农产品质量安全存在一定风险^[18]。通过对连云港的灌云、灌南地区,淮安的盱眙西部地区和徐州的丰县、沛县地区的采样监测发现,这些地质异常区耕层土壤中 As、Pb、Cr 等元素含量虽然高于全省背景值和平均值,但尚没有超过国家土壤质量二级标准。地质异常区内采集的水稻样品中,大米和米糠 Hg 和 Cd 含量均小于国家限量标准,但是部分样品的大米和米糠中 As、Pb 或 Cr 含量已经超出国家限量标准。小麦籽粒中 Hg 和 Cr 含量均没有超过国家限量标准,但部分样品中的 As、Pb 和 Cd 含量已经超过了国家限量标准。在地质异常区采集的大蒜、茼蒿、韭菜、四季葱和小白菜等蔬菜样品中,重金属含量均较低,远远小于国家限量标准。这些结果表明,地质异常区耕层土壤 As、Pb 等重金属富集对区内水稻和小麦存在一定的安全风险,但它不是由于外源污染所造成的。

上述背景值异常区土壤中有关元素的富集来源于成土母质、成土过程和特定的地质环境条件,不是人为活动的结果,故不宜列入污染的范畴;将高背景值列入土壤污染的来源,显然有可能夸大土壤污染的现状。然而,在农业利用中,这类土壤有可能造成某些农产品中一些物质的含量超过卫生限量标准,是一种“问题土壤”,对其利用应该在“土宜”方面下功夫。

1.4 污染或超标点位的原因应该慎重甄别

土壤污染或者污染土壤总是与污染源密切相连。据中央政府门户网站 2014 年 4 月 17 日有关《两部门负责人就全国土壤污染状况调查答记者问》中指出,“为掌握我国土壤污染变化情况,本次调查根据‘七五’时期全国土壤环境背景值调查的点位坐标,开展了对比调查。结果表明,表层土壤中无机污染物含量增加比较显著,其中镉的含量在全国范围内普遍增加,在西南地区和沿海地区增幅超过 50%,在华北、东北和西部地区增加 10%~40%。”对于“普遍增加”的描

述,应该首先考虑增量的来源和可能性。这里不妨具体计算一下,以“七五”时期全国土壤环境背景值为基础,要提高50%或者40%需要输入的外源Cd量。西南地区以贵州省为例,Cd的算术平均值为 $0.659 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 $1.4055 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,顺序统计量的90%值为 $1.990 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;沿海地区以江苏省为例,算术平均值为 $0.126 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 $0.3231 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,顺序统计量的90%值为 $0.244 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;华北地区以河北省为例,算术平均值为 $0.094 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 $0.0792 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,顺序统计量的90%值为 $0.201 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;东北地区以吉林省为例,算术平均值为 $0.099 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 $0.0387 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,顺序统计量的90%值为 $0.154 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;西部地区以青海省为例,算术平均值为 $0.137 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,标准差为 $0.0335 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,顺序统计量的90%值为 $0.185 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。现以顺序统计量的90%值为背景值,考虑Cd在土壤中的残留率为0.90或者0.99,两个测量时间相距20年,耕层土壤重量为 $2250 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,则要提高50%或者40%时Cd的年输入量之计算公式如下:

若不考虑土壤自净能力,则与“七五”期间相比 n 年后土壤中Cd浓度为:

$$W_n = B + nx \quad (1)$$

式中: W_n 为第 n 年土壤中的Cd残留量,即相同位点中Cd的现有浓度, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; x 为特定点位土壤Cd的平均年输入量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; B 为土壤相同点位“七五”Cd浓度, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

若土壤有一定的自净能力,即Cd在土壤中的残留率小于1,则Cd在土壤中第 n 年的残留量,即相同位点中Cd的现有浓度($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)为:

$$W_n = BK^n + xK^n + xK^{n-1} + \dots + xK = BK^n + xK \frac{1-K^n}{1-K} \quad (2)$$

式中: W_n 则为第 n 年土壤中的Cd残留量,即相同位点中Cd的现有浓度, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; B 为土壤相同点位“七五”Cd浓度, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; K 为Cd平均残留率; x 为Cd平

均年输入量, $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 或 $\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$,则

$$x = 2250 \times \frac{W_{20} - (B \times K^{20})}{K \times \frac{1-K^{20}}{1-K}} \quad (3)$$

式中 W_{20} 为第20年土壤中的Cd残留量。通过计算可知(表1),如果考虑残留率为0.90,贵州省背景值由 $1.990 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高50%到 $2.985 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,则每年每公顷需要输入的Cd量为 $781 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,换算成点位($8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$)输入量为 4998 kg ;吉林省背景值由 $0.154 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 提高40%到 $0.216 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,则每年每公顷需要输入的Cd量为 $56.1 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$,换算成点位($8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$)年输入量为 359 kg ,如此大输入量的外源从何而来,需要仔细分析。就耕地而言,肥料特别是磷肥是土壤外源Cd的主要来源之一,在充分满足我国磷肥需要时,大约需要磷肥800万 $\text{t}(\text{P}_2\text{O}_5)$,假定90%是过磷酸钙及其他高浓度磷肥,10%为钙镁磷肥,则每年随磷肥带入土壤的总Cd量为 37.3 t ,相当于每公顷土壤随磷肥带入的Cd量为 $0.497 \sim 0.746 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ [19],可见这样的输入量是十分有限的。对于“镉的含量在全国范围内普遍增加”,特别是40%~50%增量的现状描述应该谨慎对待,因为它有可能存在一些不确定因素,其中可能包括:(1)点位之间没有很好的对应关系,由于土壤的空间变异性,两者无可比性,所谓的“增加”没有实质意义;(2)数据的可信度,由于土壤中Cd的含量大多在 <0.1 或者 $0.1 \sim 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内,测定时允许的最大相对偏差在25%~30%,使得所说的“增加”也可能是一种假象。另一方面,与污染源紧密联系的“局部增加”是存在的,属于公报中的“典型地块及其周边土壤污染状况”,它不具有普遍性的可能,例如大气污染严重的太原市,大气干湿沉降对土壤系统Cd的年输入量为 $6.34 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ [20],在不考虑输出的情况下,20年可使土壤Cd浓度增加 $0.056 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;而太原盆地农田大气降尘中Cd的年输入量为 $4.33 \text{ g}\cdot\text{hm}^{-2}$ [21],在不考虑输出的情况下,20年可使土

表1 有关地区的Cd增量和需要输入外源Cd量的计算

Table 1 Calculation of the increment and the input exogenous Cd in some region

地区	背景值 $B/$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	设定增量 $50\%W_{20}/$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	设定增量 $40\%W_{20}/$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$K=0.90$		$K=0.99$	
				外源Cd年需要量 $x1/\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$	($8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 点位)外源 Cd年需要量 $x2/\text{kg}$	外源Cd年需要量 $x1/\text{g}\cdot\text{hm}^{-2}$	($8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$ 点位)外源 Cd年需要量 $x2/\text{kg}$
贵州省	1.990	2.985		781	4998	169	1084
江苏省	0.244	0.366		95.7	612	21	133
河北省	0.201		0.281	73.0	467	15	93
吉林省	0.154		0.216	56.1	359	11	72
青海省	0.185		0.259	67.3	431	13	86

壤 Cd 浓度增加 $0.038 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 焦作是以煤炭为主要能源的重工业城市,是典型的“煤烟型”污染城市,其大气污染在全国大中城市中排在前列,大气沉降对土壤 Cd 的年输入量为 $5.70 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[22],在不考虑输出的情况下,20 年可使土壤 Cd 浓度增加 $0.051 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;在复合污染型地区,通过降尘、污水灌溉和施肥的 Cd 年输入量分别为 6.33 、 $20.36 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $0.64 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$,合计可达 $27.33 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[23],在不考虑输出的情况下,20 年可使土壤 Cd 浓度增加 $0.246 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是需要特别关注的典型情况。它表明只有充分了解污染物来源的情况下,才能有效地进行土壤污染的防控。

2 负载容量管理法——土壤环境质量的管控的有效措施

调查公报表明,我国有关部门已经基本掌握了全国土壤环境质量的总体状况,给出了不同土地利用类型土壤的环境质量、典型地块及其周边土壤污染的有关信息,凸显了重金属的环境问题,为土壤污染防治的后续工作打下了良好的基础。人们对于土壤污染防治无论是较早时期^[24]还是近期^[25]都曾经用“刻不容缓”来呼吁重视土壤环境保护问题,而公报中的“总体不容乐观”、“污染严重”、“质量堪忧”、“问题突出”等描述,较为充分地体现了政府有关部门的重视与焦虑心情,亦体现了防治土壤污染“刻不容缓”的共同心声。人们对于土壤污染防治的共识为土壤环境质量保护提供了充分的舆论准备,而科学、有效、简便、具有良好可操作性的管控措施,则是土壤污染防治的核心内容。

有关土壤环境质量的有效管控问题,《农业环境科学学报》曾经组织有关人员从法律法规的建立^[26]、环境标准或基准基础研究^[27]、标准的独立性与依存性^[1]、土壤环境质量重金属影响研究中的突出问题^[12]等进

行过较为系统的讨论。在全面考量土壤环境质量的独立性和依存性的基础上,建议土壤环境质量的保护可以从简单的依靠质量标准,过渡到以污染物负载容量为依据的新的管理模式^[1]。在 20 世纪 70 年代,国家有关部门曾经组织过土壤污染物负载容量攻关研究,并取得了虽然是初步的、但却十分重要的基础性资料^[28-29]。长期以来,人们似乎忽略了土壤负载容量的重要性,一方面是因为原有的工作偏重于基础性和有关标准制订,而在土壤环境保护方面的实际应用缺乏深层次的考虑。其实,土壤负载容量在土壤环境质量管理、环境损害赔偿、负载容量的有偿使用以及土壤环境保护责任主体的认定等方面都具有良好的可操作性,对于土壤的可持续利用、坚守 18 亿亩耕地红线和保障粮食安全具有重要意义。由于水和大气的环境容量控制问题并没有取得所希望的成果,如何将容量管理法在土壤环境质量的管控中取得成效则需要认真思考。相对于大气和水而言,土壤是一个相对固定的环境要素,虽然组成十分复杂,但在特定条件下表观负载容量的确定却相对简单;同时,从管理角度考虑它具有一定的优势。

2.1 从正常土壤考虑,有利于从单一标准过渡到双标准管理

负载容量管理法可以确保良好的土壤环境质量,从而兼顾土壤自然环境质量持续性和资源的可持续利用。目前以生态效应法制定的土壤资源利用污染物限量标准是计算土壤对外源污染物负载容量的最大值,它是在特定利用条件下的土壤污染起始值,但不应该视为土壤允许污染的限量值,故单一标准的管理不能保证土壤资源的保护和可持续利用;而负载容量管理法,既考虑了污染物的临界值(基准值、标准值),又考虑了土壤背景值(自然质量基准值、标准值),是控制污染物在一定范围内的动态平衡。作为例证,根据有关资料^[28,30-31]表列了一些土壤 Cd 的表观静

表 2 土壤 Cd 临界值和表观静容量的计算^[28,30-31]

Table 2 Soil Cd critical value and the apparent static loading capacity

土壤	指示作物	添加 Cd 的形态	糙米和土壤 Cd 的相关方程	决定系数(R^2)和显著性	临界值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	背景值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	静容量/ $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$
红壤	晚稻	CdCl_2	$Y = -0.014 1 + 0.099 3x$	0.915 2 ($P < 0.01$)	2.16	0.11	4613
红壤	早稻	CdCl_2	$Y = 0.015 6 + 0.105 1x$	0.984 1 ($P < 0.01$)	1.28	0.11	2633
红壤性水稻土	早稻	CdSO_4	$Y = 0.039 2 + 0.211 6x$	0.972 0 ($P < 0.01$)	1.13	0.68	1013
红壤性水稻土	早稻	CdCl_2	$Y = 0.028 4 + 0.052 8x$	0.993 5 ($P < 0.01$)	3.25	0.68	5783
草甸褐土	水稻	CdCl_2	$Y = 0.038 1 + 0.009 1x$	0.933 4 ($P < 0.01$)	18.01	0.122	40 248
草甸褐土	小麦	CdCl_2	$Y = 0.022 7 + 0.215 3x$	0.990 9 ($P < 0.01$)	0.36	0.122	536
草甸棕壤	水稻	CdCl_2	$Y = 0.076 2 + 0.056 8x$	0.904 2 ($P < 0.05$)	2.18	0.086	4712

容量(表2):

$$Q_a = S_w \times (C_{ci} - C_{mi}) \quad (4)$$

式中: Q_a 为土壤表观静容量, S_w 为耕层土壤重量($2250 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$), C_{ci} 为外源物质*i*的临界值, C_{mi} 为土壤中*i*的自然质量基准值(表观背景值),它表明不同类型土壤负载容量之间有着明显的区别,这是由于临界值和背景值的差异所引起的,故在外源物质对土壤污染的管控中,应该同时考虑背景值和临界值,才能有效地进行土壤环境质量管理。

2.2 从污染土壤考虑,有利于修复标准的确定

就耕地土壤而言,修复的基本要求是恢复其原有的容量。由于临界值受多种因素的影响,如采用的修复或者改良措施能减少外源物质的含量或者提高特定指示作物的临界值,使得容量值处于动态平衡,则农产品品质便可获得基本保证。

2.3 从污染源影响的赔偿考虑,可量化有偿利用和恢复容量的经济评估

根据外源物质所消耗的容量值(表3),可将外源物质输入造成的容量损失作为经济赔偿的依据。作为例证,表观静容量的消耗可根据式(5)和式(6)计算:

$$Q_x = S_w \times [C_{ci} - (C_{mi} + R \times X / S_w)] \quad (5)$$

式中: Q_x 为一定外源输入量*X*年后的表观静容量, S_w 为每公顷耕层土壤的重量, C_{mi} 为土壤中*i*的自然质量基准值(表观背景值), C_{ci} 为外源物质*i*的临界值, R 为年输入量(不考虑净化作用)。

$$Q_L = 1 - Q_x / Q_a \quad (6)$$

式中: Q_L 为一定外源输入量*R*的情况下*X*年表观静容量的消耗值,%(表3), Q_a 为土壤原有的表观静容量(公式4),它表明不同土壤和作物在相同年输入量的情况下,静容量的消耗有着较大的差别,因而追溯污染源的经济赔偿或者修复成本的评估时亦应采用不同的尺度。

2.4 从责任主体考虑,有利于责任主体的认定和保护措施的落实

土壤环境质量的保护除了政府部门的主导作用之外,一个重要的方面是具体责任的落实,在耕地使用制度和流转制度中,往往关注的是耕地土壤的肥力质量,而忽略了土壤的环境质量。在实行负载容量管理法的基础上,可明确土地使用者即为土壤环境保护的主体,对承包土地的环境质量具有不可推卸的保护义务,并可通过负载容量的测算量化保护的目标,明确赔偿责任。若能如此,则可强化责任主体的环境保护意识,有益于肥料的施用量和质量的控制、污染源的追踪和举报网络的形成。

2.5 从方法的简便性和可操作性考虑,简单易行

基层有关组织,例如环境监测站、土肥站等均可在表观负载容量的获取中发挥作用。不少土肥站在测土施肥方面已经形成了良好的网络咨询体系,若能补充地区主要污染物的负载容量值,则可十分有益于耕地土壤环境质量的保护。表观负载容量的确定可采用温室盆栽实验来完成,实践表明,虽然模拟结果与田间实际情况有着较大的差异,然而用添加纯化学试剂的方法来模拟污染土壤对生态与环境的影响时,操作较为简单,在实验条件下它对供试植物的影响最明显,所确定之土壤负载容量最安全,并在区域环境评价中有一定的可比性^[32]。此外,容量管理法可以不涉及统一的国家标准,基层单位可在有关法律法规的授权下主动进行相关工作,小到一块农田,大至区域尺度均可进行,以弥补统一标准的不足。

通过上述分析,人们不难发现,在没有明显外源污染的情况下,我国耕地土壤环境质量的状况基本良好;如果能够合理地、科学地加以利用和管理,认真而有效地进行污染防治,尊重科学、尊重自然,关注耕地土壤的适宜性和规范化,将追求经济利益和切实保护

表3 根据表2数据利用式(5)和式(6)计算的表观静容量消耗值(假设年输入量为 $120 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 3 The consumption of the apparent static loading capacity in table 2 which was calculated by formula 5 and 6 (annual input: $120 \text{ g} \cdot \text{hm}^{-2}$)

土壤	指示作物	静容量/ $\text{g} \cdot \text{hm}^{-2}$	静容量消耗/%					
			1年	5年	10年	20年	30年	35年
红壤	晚稻	4613	2.61	13.02	26.02	52.04	78.05	91.06
红壤	早稻	2633	4.58	22.81	45.59	91.17	136.75	
红壤性水稻土	早稻	1013	11.90	59.28	118.51			
红壤性水稻土	早稻	5783	2.08	10.38	20.76	41.51	62.26	72.64
草甸褐土	水稻	40 248	0.30	1.49	2.98	5.96	8.94	10.44
草甸褐土	小麦	536	22.48	112.03				
草甸棕壤	水稻	4712	2.56	12.74	25.48	50.94	76.41	89.14

土壤资源相统一,一定能够获得良好的回报。

参考文献:

- [1] 周东美,王玉军,陈怀满. 论土壤环境质量重金属标准的独立性和依存性[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3): 205-216.
ZHOU Dong-mei, WANG Yu-jun, CHEN Huai-man. Independence and dependence of soil environmental quality standard for heavy metals [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 205-216.
- [2] 范中亮,季辉,杨菲,等. 不同土壤类型下Cd和Pb在水稻籽粒中累积特征及其环境安全临界值[J]. 生态环境学报, 2010, 19(4): 792-797.
FAN Zhong-liang, JI Hui, YANG Fei, et al. Accumulation characteristics of Cd and Pb in rice grain and their security threshold values in paddy field under different soil types[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2010, 19(4): 792-797.
- [3] 杨菲,吴琦,季辉,等. 土壤重金属Pb和Cd在小白菜中的富集特征及产地环境安全临界值[J]. 中国农学通报, 2011, 27(13): 194-198.
YANG Fei, WU Qi, JI Hui, et al. Soil Pb and Cd accumulation characteristics of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) and their environmental critical values in pakchoi production area for food security[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(13): 194-198.
- [4] 吴琦,杨菲,季辉,等. 土壤重金属Pb和Cd在小萝卜中的富集特征及产地环境安全临界值[J]. 江苏农业科学, 2010(4): 322-325.
WU Qi, YANG Fei, JI Hui, et al. Enrichment characteristics and environmental safety criteria of *Raphanus sativus* L. for Pb and Cd in soil[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2010(4): 322-325.
- [5] 陆琳,邹炳礼,李茂莹,等. 典型污灌区土壤重金属污染与蔬菜质量相关性研究[J]. 江西农业学报, 2010, 22(1):152-155.
LU Lin, ZOU Bing-li, LI Mao-xuan, et al. Correlation between soil heavy metal pollution and quality of vegetable in representative sewage irrigation farming district[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(1): 152-155.
- [6] 刘维涛,周启星,孙约兵,等. 大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1): 63-67.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Variety difference of lead accumulation and translocation in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L.)[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1): 63-67.
- [7] Liu W T, Zhou Q X, An J, et al. Variations in cadmium accumulation among Chinese cabbage cultivars and screening for Cd-safe cultivars[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1-3): 737-743.
- [8] 曾翔,张玉焯,王凯荣,等. 不同品种水稻糙米含镉量差异[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 67-69, 83.
ZENG Xiang, ZHANG Yu-zhu, WANG Kai-rong, et al. Genotype difference of brown rice in Cd content[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1): 67-69, 83.
- [9] 仲维功,杨杰,陈志德,等. 水稻品种及其器官对土壤重金属元素Pb、Cd、Hg、As积累的差异[J]. 江苏农业学报, 2006, 22(4): 331-338.
ZHONG Wei-gong, YANG Jie, CHEN Zhi-de, et al. Differences in accumulation and distribution of Pb, Cd, Hg and As in rice cultivars and their organs (*Oryza sativa* L.)[J]. *Jiangsu of Agricultural Science*, 2006, 22(4): 331-338.
- [10] 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 in soil-plant system[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [11] 张青,段海龙,廖蕾,等. 内蒙古河套地区小麦重金属含量与土壤质量的关系研究[J]. 安全与环境工程, 2010, 17(1): 36-40.
ZHANG Qing, DUAN Hai-long, LIAO Lei, et al. Research on the relationship between the heavy metal content of wheat and the quality of soil in Hetao Area, Inner Mongolia[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2010, 17(1): 36-40.
- [12] 王玉军,陈怀满. 我国土壤环境质量重金属影响研究中一些值得关注的问题[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7):1289-1293.
WANG Yu-jun, CHEN Huai-man. Several critical issues in the studies of soil environmental quality affected by heavy metals[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7): 1289-1293.
- [13] 文雪琴,迟清华. 中国汞的地球化学空间分布特征[J]. 地球化学, 2007, 36(6): 621-627.
WEN Xue-qin, CHI Qing-hua. Geochemical spatial distribution of mercury in China[J]. *Geochimica*, 2007, 36(6): 621-627.
- [14] 李广之,袁子艳,庄原,等. 汞元素的石油地质意义[J]. 物探与化探, 2008, 32(2):143-146.
LI Guang-zhi, YUAN Zi-yan, ZHUANG Yuan, et al. Geological significance of mercury element for petroleum exploration[J]. *Geophysical & geochemical Exploration*, 2008, 32(2):143-146.
- [15] 李丽辉,王宝禄. 云南省土壤As、Cd元素地球化学特征[J]. 物探与化探, 2008, 32(5):497-501.
LI Li-hui, WANG Bao-lu. Geochemical characteristics of As and Cd in soils of Yunnan Province[J]. *Geophysical & geochemical Exploration*, 2008, 32(5):497-501.
- [16] 王宇,彭淑惠,杨双兰. 云南岩溶区As、Cd元素异常特征[J]. 中国岩溶, 2012, 31(4): 377-381.
WANG Yu, PENG Shu-hui, YANG Shuang-lan. The anomaly features of As and Cd in the karst area in Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2012, 31(4): 377-381.
- [17] 廖启林,范迪富,金洋,等. 江苏农田土壤生态环境调查与评价[J]. 江苏地质, 2006, 30(1): 32-40.
LIAO Qi-lin, FAN Di-fu, JIN Yang, et al. On investigation and appraisal of ecological environment of farmland soil in Jiangsu[J]. *Journal of Jiangsu Geology*, 2006, 30(1):32-40.
- [18] 余云飞. 苏北地质异常区土壤和作物重金属富集特征及产地环境安全风险评价[D]. 南京:南京农业大学, 2011.
YU Yun-fei. Heavy metal enrichment characteristics of soil and crop and environmental security risk evaluation of production area in geological anomaly of north part, Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [19] 鲁如坤,时正元,熊礼明. 我国磷矿磷肥中镉的含量及其生态环境影响的评价[J]. 土壤学报, 1992, 29(2): 150-157.
LU Ru-kun, SHI Zheng-yuan, XIONG Li-ming. Cadmium contents of rock phosphates and phosphate fertilizer of China and their effects on

- ecological environment[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(2): 150-157.
- [20] 张乃明. 大气沉降对土壤重金属累积的影响[J]. *土壤与环境*, 2001, 10(2): 91-93.
- ZHANG Nai-ming. Effects of air settlement on heavy metal accumulation in soil[J]. *Soil and Environmental Science*, 2001, 10(2): 91-93.
- [21] 赖木收, 杨忠芳, 王洪翠, 等. 太原盆地农田区大气降尘对土壤重金属元素累积的影响及其来源探讨 [J]. *地质通报*, 2008, 27(2): 240-245.
- LAI Mu-shou, YANG Zhong-fang, WANG Hong-cui, et al. Effects of atmospheric fallouts on heavy metal elements accumulation in soils in farmland areas in the Taiyuan Basin, Shanxi, China and sources of fallouts[J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(2):240-245.
- [22] 邹海明, 李粉茹, 官楠, 等. 大气中 TSP 和降尘对土壤重金属累积的影响[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(5): 393-395.
- ZOU Hai-ming, LI Fen-ru, GUAN Nan, et al. Effects of TSP and dust-fall on heavy metal accumulation in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(5): 393-395.
- [23] 张乃明, 陈建军, 常晓冰. 污灌区土壤重金属累积影响因素研究[J]. *土壤*, 2002(2):90-93.
- ZHANG Nai-ming, CHEN Jian-jun, CHANG Xiao-bing. Influential factors of soil heavy metal accumulation in sewage irrigation area[J]. *Soils*, 2002(2):90-93.
- [24] 陈怀满. 防治土壤污染, 保护土壤环境刻不容缓[J]. *农业科技要闻*, 北京: 中国农业科学院, 总 583 期, 1989.
- CHEN Huai-man. Admit of no delay on prevention of soil pollution and environmental protection[J]. *Highlights of Agricultural Science*, Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science. No.583, 1989.
- [25] 周宜开. 土壤污染防治刻不容缓[J]. *环境保护*, 2012(7): 26-27.
- ZHOU Yi-kai. Admit of no delay on soil pollution prevention and control[J]. *Environmental Protection*, 2012(7):26-27.
- [26] 王学军, 龙文静. 我国农产品产地环境安全法规和政策的现状与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(4): 617-622.
- WANG Xue-jun, LONG Wen-jing. Current status and prospect of environmental safety legislations and policies for farming lands in China [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2014, 33(4): 617-622.
- [27] 周启星, 滕涌, 展思辉, 等. 土壤环境基准/标准研究需要解决的基础性问题[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(1): 1-14.
- ZHOU Qi-xing, TENG Yong, ZHAN Si-hui, et al. Fundamental problems to be solved in research on soil-environmental criteria/standards [J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2014, 33(1): 1-14.
- [28] 夏增禄. 中国土壤环境容量[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- XIA Zeng-lu. Loading capacity of soil for contaminants in China[M]. Beijing: Seismological Press, 1992.
- [29] Chen H M, Zheng C R, Tu C, et al. Studies on loading capacity of agricultural soils for heavy metals and its applications in China[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11-12): 1397-1403.
- [30] 夏增禄. 土壤环境容量研究[M]. 北京: 气象出版社, 1986.
- XIA Zeng-lu. Studies on soil loading capacity for contaminants[M]. Beijing: Meteorological Press, 1986.
- [31] 夏增禄. 土壤环境容量及其信息系统[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- XIA Zeng-lu. Soil loading capacity for contaminants and its information system[M]. Beijing: Meteorological Press, 1991.
- [32] 陈怀满, 郑春荣, 王慎强, 等. 不同来源重金属污染的土壤对水稻的影响[J]. *农村生态环境*, 2001, 17(2): 35-40.
- CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, WANG Shen-qiang. et al. Effect of soils polluted by different heavy metal sources on rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2001, 17(2): 35-40.