

土壤环境基准/标准研究需要解决的基础性问题

周启星, 滕涌, 展思辉, 佟玲

(南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要:土壤环境基准/标准研究是一个复杂的系统工程,涉及到多方面的基础性问题。了解和解决其所涉及的这些基础性问题,是土壤环境基准/标准是否科学准确并在国家层面上能否全面应用的前提。本文从土壤环境基准/标准研究相关的概念及其内涵、基础方法标准化、生物受体的选择和变量归一化4大方面阐述了土壤环境基准/标准研究需要解决的基础性问题,从而为全面系统地开展此项研究工作提供思想、理论、方法和技术等依据。具体来说,包括“环境质量”、“土壤环境质量”、“土壤质量”、“土壤污染”、“污染土壤”、“土壤环境质量基准”、“污染土壤修复基准”等诸多相关概念,采样、前处理、分析步骤和测试方法等的统一与标准化,敏感种与优势种等生物受体的正确选择,以及涉及到总量与有效态或提取态、复合污染与交互作用的情况、土壤本身的一些影响因素(土壤类型、有机质、粘粒、pH、Eh和CEC等)、土壤外部的一些影响因素(地理区域、温度、水分或湿度、施肥或农业措施等)诸多变量的基础数据的归一化处理。最后,结合这些基础性问题,对土壤环境基准/标准的研究进行了展望。

关键词:土壤;土壤环境基准;修复基准;方法学;环境标准;生态安全

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)01-0001-14 doi:10.11654/jaes.2014.01.001

Fundamental Problems to be Solved in Research on Soil-environmental Criteria/standards

ZHOU Qi-xing, TENG Yong, ZHAN Si-hui, TONG Ling

(Ministry of Education Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Research on soil-environmental criteria/standards is a complex systems engineering, involving in many fundamental problems. To understand and solve these fundamental problems is the requisite and premise whether soil-environmental criteria/standards are scientific and accurate or not, and can be fully applied at the national level. In this review, these fundamental problems including relevant basic concepts of soil-environmental criteria/standards and their connotations, standardization of basic analytical and measuring methods, correct selection of biological receptors, and normalization of various data and variables were firstly expounded, thus providing with the thought, theory, method and technology basis for comprehensive and systematical study on soil-environmental criteria/standards. Concretely speaking, the relevant concepts including "environmental quality", "soil-environmental quality", "soil quality", "soil pollution", "contaminated soil", "soil-environmental quality standard", and "remediation standards for contaminated soils", the unity and standardization of sample-collecting, pretreatment, analytical procedures and experimental methods, the correct selection of sensitive and dominant species as biological receptors, as well as the normalization of basic data and many variables including total amount and bioavailable or extracted forms of toxic pollutants, and their combined pollution and interaction, some influences of soil intrinsic factors (soil types, organic matter, clay, pH, Eh and CEC, etc), and some external factors affecting soil environment (geographical area, temperature, water or moisture, fertilizer application or agricultural measures, etc), are the most challenging fundamental problems of soil-environmental criteria/standards researches. Finally, combined with these fundamental problems, the future study on soil environmental criteria/standards are prospected.

Keywords: soil; soil-environmental criteria; remediation criteria; methodological problem; environmental standard; ecological safety

收稿日期:2013-12-23

基金项目:国家自然科学基金重点项目(21037002);南开大学重大培育项目(65030051)

作者简介:周启星(1963—),男,博士,教授,博士生导师,长江学者特聘教授,国家杰出青年科学基金获得者,现任南开大学环境科学与工程学院院长,主要从事污染生态、生态地学、环境基准和污染环境修复等方面的研究。E-mail: Zhouqx@nankai.edu.cn

环境标准在整个环境管理体系中处于非常重要的位置,对于环境管理的方向、模式和公平性等都具有直接或间接的指导性作用,从而关乎到国民经济和社会的可持续发展和国家安全等问题。制定全面系统的环境标准体系,对于开展环境保护工作具有十分重要的意义。土壤环境基准作为土壤环境标准制修订的数据基础和科学依据,全面系统地开展土壤环境基准研究势在必行。然而,我国自1995年颁布土壤环境质量标准以来,土壤环境标准的制修订工作至今没有取得实质性进展。究其原因,在于我们对土壤环境基准/标准研究中需要解决的基础性问题重视不够、解决不力。因此,为了促进、推动全面系统的土壤环境基准/标准研究,我们就其需要解决的基础性问题进行论述和探讨。

1 概念与内涵的基础性问题

在土壤环境基准/标准研究的过程中,涉及到“环境质量”、“土壤环境质量”、“土壤质量”、“土壤污染”、“污染土壤”、“土壤环境质量基准/标准”、“污染土壤修复基准/标准”等诸多相关概念。很有必要明确一下各自的科学内涵,这对于基准/标准研究是很有必要的;同时,这也是一切研究工作的思想准备和理论基础。

1.1 环境质量/土壤环境质量/土壤质量的内涵

对于环境质量的内涵,目前存在多种不同的说法。普遍认为,环境质量是指环境的优劣程度,是对人类的生存和繁衍以及社会发展的适宜程度,是反映人类的具体要求而形成的对环境评定的一种概念。也有学者认为,环境质量是环境系统客观存在的一种本质属性,是环境系统所处状态的整体性表述^[1]。总的来看,前者是基于人类的需求而言,是从主观的角度来描述,后者是基于环境系统本身,是一种客观的认识。我们认为,这两种不同角度的理解都是可行的。但毫无疑问的是,环境质量水平的高低与人类的生存、生活和生产条件以及生态系统健康是密切相关的。按照自然环境要素,环境质量又可分为大气环境质量、水环境质量、土壤环境质量等。因此,土壤环境质量是环境质量的一个具体介质类别,它既具有环境质量的一般内涵,同时又体现土壤环境本身的具体特点。

20世纪90年代以来,随着人口对土地压力的不断增大,人类对土地资源的过度开发利用导致了土壤资源的严重退化,并对农业可持续发展造成严重威胁的情况下,人们对土壤质量这一概念有了新的认识^[2]。

应该说,“土壤质量”与“土壤环境质量”是两个内涵并不相同的概念,国内外有相关文献都对其进行了阐述,尤其是国内对“土壤质量”这一概念更是进行了深入广泛的探究。归结起来,主要有以下3种表述:一种认为土壤质量与土壤健康是同义语,土壤质量包括土壤肥力质量和土壤环境质量。如张桃林等^[3]认为,土壤质量或土壤健康是指维持生态系统生产力和动植物健康而不发生土壤退化及其他生态环境问题的能力,因为侧重点的不同,农学家和生产者强调土壤的生产性,使用土壤健康这一概念;而土壤学家、环境科学家强调与生态系统和环境的联系,则倾向于使用土壤质量。第二种观点,以Cornell学派^[4]为主,他们认为,土壤作为重要生命系统行使各种功能的需要,包括维持生物生产力、改善环境质量、促进植物和动物健康等3个方面,因此,土壤质量包括土壤肥力质量、土壤环境质量和土壤健康质量这3个既相互独立、又相互联系的部分^[5-7]。如我国土壤学家赵其国等^[8]早先给出的土壤质量定义,就是“土壤在生态系统的范围内,维持生物的生产力、保护环境质量以及促进动植物健康的能力”,曹志洪和周建民^[9]也认为,土壤质量是土壤提供食物、纤维、能源等生物物质的土壤肥力质量,是保障粮食生产的根本,土壤保持周边水体和空气洁净的土壤环境质量,土壤容纳消解无机和有机有毒物质、提供生物必需的养分元素、维护人畜健康和确保生态安全的土壤健康质量的综合量度。徐建明等^[10]也指出,土壤质量是土壤肥力质量、土壤环境质量和土壤健康质量3个方面的综合质量。其中,土壤肥力质量是指土壤提供植物养分保障生物生产的能力,土壤环境质量是土壤容纳、吸收和降解各种环境污染物质的能力,土壤健康质量则是指土壤影响和促进人类和动植物健康的能力。还有一种观点则认为,土壤健康质量可以包括在土壤环境质量里,也就是说,土壤肥力质量和土壤环境质量是土壤质量的两大组成部分。如陈怀满等^[2, 11]基于土壤质量评价的实用角度,把土壤质量归为土壤肥力质量和土壤环境质量(包括土壤健康质量)两个部分。他们认为,土壤环境质量指的是在一定的时空范围内,土壤自身性状对其持续利用以及对其他环境要素,特别是对人类或其他生物的生存、繁衍以及社会经济发 展的适宜性,是土壤环境“优劣”的一种概念,是特定需要的“环境条件”的量度。

总之,目前我国土壤学所用的“土壤质量”定义基本上是沿用Doran和Parkin(1994)的概念^[5],也即:土壤质量是指在生态系统内或者特定土地利用方式下

土壤支撑其生物生产力、维持环境质量和促进动植物及人类健康的能力。也就是说,土壤肥力质量和土壤环境质量是包含于土壤质量中的,这是当前普遍认同的一点。此外,土壤质量也可以针对不同的使用者,不同的土地利用目的,具有某一个或几个方面的具体含义。可见,在土壤环境质量基准/标准的研究中,可以认为,主要关注的是土壤环境质量,而不是土壤肥力质量,尽管有时也涉及土壤健康质量。

1.2 土壤污染/污染土壤的内涵

对于土壤污染和污染土壤这两个概念,国内外存在多种不同的理解。如对于污染土壤,英国环境污染皇家委员会(RCEP)^[12]认为,污染土壤是指人类活动引起的物质和能量输入土壤,并引起土壤结构或“和谐”受到损害,人体健康受到伤害,资源和生态系统受到破坏、对环境的合理使用受到干扰。并进一步指出,输入环境的物质成为污染物时,其分布、浓度和物理行为能导致令人不快的或有害的后果。美国国家环境保护局(US EPA)20世纪90年代关于“污染土壤”的定义^[13],认为尽管土壤中存在有害物质,如果不产生危害,或者通过适当控制不产生危害,该土壤就可以认为没有受到污染。但值得注意的是,有些危害是潜在的,至少在一定的时间和空间范围内不容易察觉这些潜在的危害。因此,准确地说,在给污染土壤下定义时,应该考虑土壤的使用功能、使用状态、地理位置、社会属性和污染历史等因素^[14],只有充分考虑这些因素,才会下一个正确的定义。总体来讲,污染土壤是指被污染了的土壤,其内在含义是经过量化指标或其他评估方法评价之后,确认土壤已经受到了污染^[15]。

尤其是对于“土壤污染”的内涵争议更大。如国际多语言环境大词典(GEMET)中指出,土壤污染是指污染物质的排放,导致土壤特性的改变,更为通常的是引起化学和生物学平衡的打破。中国台湾《土壤及地下水污染整治法》中对“土壤污染”所下的定义,认为土壤污染是指土壤因物质、生物或能量之介入,致变更品质,有影响其正常用途或危害国民健康及生活环境之虞。夏家洪和骆永明^[16]阐述了土壤污染和土壤玷污的区别,认为土壤污染表明土壤已对植物或环境造成危害或污染,土壤玷污表明土壤中已有外源污染物进入,有玷污而未达污染。周启星^[17]指出,土壤污染应该具有以下5个方面的基本特征:(1)人体健康效应。正在显著地对人体健康产生危害或引起这种危害的可能性很大,其中这里的显著“危害”主要是指死亡、疾病、严重伤害、基因突变、先天性致残或对人的

生殖功能造成损害等不良健康效应;(2)动物或作物效应。正在显著地对动植物生长发育和繁殖产生危害或引起这种危害的可能性很大,包括导致家畜、野生动物、作物或其他生命体的死亡、疾病或其他物理损害;(3)水污染效应。正在导致主要水体受到污染或可能受污染,也就是说,只要存在与该土壤接壤的各种水体(包括地表水和地下水)都有受到污染的风险;(4)生态系统效应。正在显著地影响或危害生态系统及其他重要组分,而且这种危害使生态系统功能产生不可逆转的不良变化,涉及对特有或珍稀生物物种的不良效应;(5)“财产损失”效应。主要是指对人类拥有的各种财产的损害作用,如对建筑物结构的损害、对房产占有权的干扰等。

综合国内外相关论述^[17-20],我们认为,一般来说,只要土壤环境中受到外来有害物质或能量的侵害,就表明该土壤受到了污染。依据受到侵害的程度不同,又分为轻微污染、轻度污染、中度污染、严重污染和极度污染等多个范畴。当土壤中污染物的含量略微超过其背景含量而没有引起土壤特性的改变,在一定条件下这些外来污染物反而有刺激生物生长的作用,这时可认为土壤发生了轻微污染;当土壤中污染物的含量较为明显超过其背景含量时,而没有引起土壤特性的改变,则认为土壤发生了轻度污染;当土壤外来污染物正在导致主要水体受到污染或可能受污染,也就是说,只要该土壤接壤的各种水体(包括地表水和地下水)存在受到污染的风险,表明土壤已经到了中度污染;当土壤正在导致显著地对动植物生长发育和繁殖产生危害或引起这种可能性很大,包括导致家畜、野生动物、作物或其他生命体患病、其他物理损害以至死亡,或者正在导致显著地影响或危害生态系统其他重要组分,而且这种危害使生态系统功能产生不可逆转的不良变化,涉及对特有或珍稀生物物种的不良效应,表明土壤受到严重污染;当土壤正在导致显著地对人体健康产生危害或引起这种危害的可能性很大,其中这里的显著“危害”主要是指死亡、疾病、严重伤害、基因突变、先天性致残或对人生殖功能造成损害等不良健康效应,如致癌、肝脏功能紊乱和皮肤病等,甚至包括污染导致的精神紊乱或分裂症,表明土壤受到极度污染。

在土壤环境基准/标准的研究中,就土壤环境质量基准/标准而言,更多地关注土壤是否污染以及土壤轻微污染和轻度污染的情况;而在研究污染土壤修复的基准/标准时,更多地涉及污染土壤以及土壤严

重污染和极度污染的情况。

1.3 土壤环境质量基准/标准和污染土壤修复基准/标准的内涵

一般认为,环境基准是指环境中污染物对特定保护对象(人或其他生物)不产生不良或有害影响的最大剂量或浓度,或者超过这个剂量或浓度就对特定保护对象产生不良或有害的效应^[21-25]。

基于上述定义,环境基准应该包括不因有害物质的作用而产生急性、亚急性或亚慢性和慢性毒害的最大剂量(无作用剂量)或浓度。也就是说,其内涵应该包括环境质量基准和污染环境修复基准2个方面^[26]。因此,土壤环境基准不等同于土壤环境质量基准,土壤环境基准应该包括土壤环境质量基准和污染土壤修复基准两个方面。其中,土壤环境质量基准遵循土壤环境质量长期自身演变的规律,反映污染物或有害物质长期的胁迫和慢性的影响或作用,一般是指当土壤环境中某一有害物质的含量为一阈值范围时对人或者生物长期生活在其中不会发生不良或有害的影响;而污染土壤修复基准,反映土壤环境系统受到严重污染或发生突发事件后恢复其自然生态功能的过程中,污染物急性、亚急性毒性的危害与作用,一般是指当污染物超过一定阈值范围导致人或生物产生不良或有害的反应(图1)^[27]。

土壤环境质量基准对应的是土壤环境质量标准,我国制定的《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)是为了防止土壤污染,保护生态环境,保障农林生产,维护人体健康。污染土壤修复基准对应的则是污染土壤修复标准,是指由技术和法规所确定、确立的环境清洁水平,通过生态修复或利用各种清洁技术手段,使环境中污染物的浓度降低到对人体健康和生态系统不构成威胁的、技术和法规可接受的水平。它是在

综合考虑技术清洁水平、环境背景水平、法规可调控清洁水平、污染物的选择、分析检测方法、修复标准的分类、对地下水的保护和生态毒理学评价方面等因素而制定的^[28-29],以达到污染修复与治理,消减污染的目的^[25,30]。

国外修复基准/标准研究与我国相比起步较早。美国早在1993年^[31]便建立了风险导向矫正行动RBCA和CalTOX法,来推导、建立土壤清洁水平,并且还开展了大量污染土壤修复标准制定的模型方法研究^[32-37]。加拿大在1991年^[38]就发布了(污染)土壤临时修复标准,后又在1996年^[39]制定了土壤质量指导值(Canadian soil quality guidelines)。荷兰发布了“荷兰清单”(“Dutch List”),后又制定了干涉值(Intervention value)来指导修复行动^[14]。丹麦也制定了污染土壤消减标准(Cut-off criteria)^[14]。

我国过去把环境基准等同于环境质量基准,致使我国环境标准体系中只有环境质量标准,而忽视了污染环境修复标准的制定,在污染土壤修复效果的评价中,一直以土壤环境质量标准为依据,但是依据背景值建立的土壤环境质量标准并没有给出污染土壤中污染物的允许值,这样对于有一定吸纳污染物能力的土壤资源是一种浪费^[28,30]。可见,污染土壤修复基准的研究十分必要,其意义重大。我国尽管开展了一些零星的开拓性工作^[40-44],但至今却没有在国家层面上系统开展过污染土壤修复基准的研究。因此,为了推动我国土壤环境质量标准的修订和污染土壤修复标准的制订工作,需要从国家层面上系统地开展土壤环境质量基准和污染土壤修复基准方面的研究。

总之,在今后土壤环境基准/标准的研究中,要特别注意土壤环境质量基准/标准和污染土壤修复基准/标准之间的区别和联系。

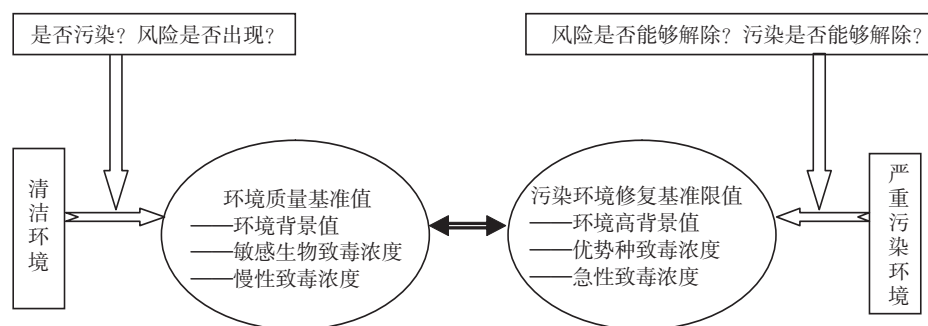


图1 环境基准的赋值及与污染和风险的关系

Figure 1 The evaluation of environmental criteria and its relationship with pollution and risk

2 方法标准化的基础性问题

我国目前有关土壤临界浓度数值与土壤环境基准相关的基础资料等数据不足,质量更差,大多没有可比性。要使这些数据有可比性,土壤采样、前处理、分析步骤和测试方法等必须统一和标准化(图 2)。

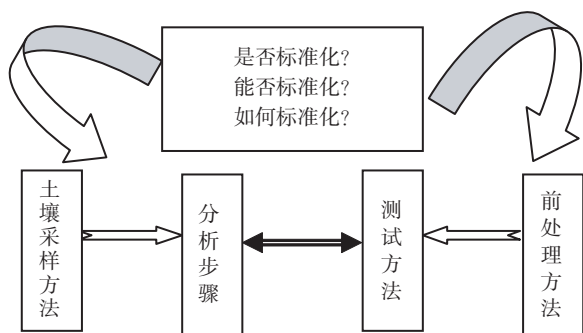


图 2 环境基准研究方法的标准化基础性问题

Figure 2 The fundamental problem about the standardization of environmental criteria researching methods

在土壤采样环节,要涉及到样品数、布点数、布点方法和样品采集方法等多个方面的选择。采样点、布点数量的多少、布点方法的选择和具体的采集方法,都会直接影响到所取样品的代表性和质量问题。因此,既要做到具体问题具体分析,还要加强实践过程中具体细节的规范化。当前,环境保护行业和农业行业均发布了相关的监测技术规范,如《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)和《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2012),进行了规范化要求。因此,各部门之间有必要建立统一和协同,包括在执行过程中遇到的问题。这就是说,在前处理、分析步骤和测试方面,方法标准化工作显得尤为必要。前处理是一个非常重要的环节之一^[45],它包括分解法和提取法两种。其中,分解法又有酸分解法、碱熔分解法、高压釜分解法和微波炉分解法等多种方法,提取法主要涉及的是提取剂的选择问题,一方面,主要有有机溶剂、水和酸三类常用提取剂;另一方面,有机溶剂和酸的种类也具有多样化。此外,提取组分的净化与浓缩方法中,净化方法又有层析法和蒸馏法等,浓缩方法也有 K-D 浓缩器法和蒸发法等。方法选择性多,固然是科研进步与发展的一个体现,但同时也增加了不同方法选择所带来的诸多不确定性因素。是否可以对某些待测物,尤其是对于那些可以采用以上多种方法、面临多种不同选择问题的物质的相关方法,如分

解法的选择,或提取剂的选择,或者净化浓缩方法的选择等进行统一规定,既可以基于最优方法,也可以考虑其他因素,从而选择比较合适的方法等对其进行相关方法的标准化,从而避免不同研究者出于不同考虑做出不同的选择,最终影响到数据间的可比性。当然,分析步骤在标准化方面也是要考虑的一个重要方面。应该有相应的统一化规定,以减少因为实验方法和人为等因素所带来的误差。

目前,测试方法也有很多种。普遍采用的现代仪器分析法主要包括光谱法、色谱法、电化学分析法和放射分析法等几大类。在污染物分析中最常用的光谱分析法又涉及紫外-可见分光光度法、荧光分析法、原子吸收光谱法、原子发射光谱法、红外吸收光谱法、核磁共振波谱法、顺磁共振波谱法和质谱法等。色谱法从基本原理上分为吸附色谱法、分配色谱法、离子交换色谱法和分子排阻色谱法等以及液-质、气-质和毛细管电泳-质谱等联用技术^[46]。而往往一种项目会有多种测定方法,每种方法的灵敏度不同,而且由于方法原理不同,干扰因素也不同,甚至结果的表示含义也不尽相同,当采用不同方法测定同一项目时就会产生结果不可比的问题,因此要进行严格的方法标准化^[47]。

过去几十年来,一些国家和国际组织已建立了大量的测试标准方法。例如,美国试验与材料学会(ASTM)、美国国家环境保护局(US EPA)、经济合作发展组织(OECD)和世界卫生组织(WHO)等。我国也陆续制定和修订了一些标准化的土壤监测规范方法,发布的《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004),规定了布点、样品采集、样品处理、样品测定、环境质量评价和质量保证相关规范。与土壤环境基准/标准研究工作比较密切相关的,还有一些行业标准,如农业行业、食品卫生行业和医疗卫生行业等。如农业部 2012 年也发布了最新的《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T 395—2012),这一农业行业标准,代替了 2000 年发布的标准(NY/T 395—2000),其中也对农田土壤环境质量监测的布点采样、分析方法、质控措施、数理统计、结果评价、成果表达与资料整编等技术内容作了规定。环境保护行业发布的标准方法,涉及的类别有土壤的理化参数的测试方法,包括有机碳(2011 年和 2013 年两种方法)、可交换酸度(2011 年和 2013 年两种方法)、硫酸盐(2012 年)、氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮(2012 年)、干物质和水分(2011 年)、总磷(2011 年);有机物的测试方法,包括二噁英

(2008 年对 2001 年进行修订后的方法, 2013 年发布的另一种方法)、挥发性有机物(2011 年和 2013 年两种方法)、毒鼠强(2011 年)、六六六和滴滴涕(1993 年);(类)金属的测试方法, 则包括总铬(2009 年对 1997 年修订后的方法)、总砷(1997 年的两种方法)、总汞(1997 年)、铜和锌(1997 年)、镍(1997 年)、铅和镉(1997 年发布的两种方法)。由此可见, 当前对于土壤环境, 国家环保部和环境保护行业制定的标准方法, 主要是针对当前普遍关注的重金属, 如砷、镍、铜、锌、铅、镉、汞和铬等, 所涉及的有机物种类的标准方法很少, 还需要加大对其他有机物, 尤其是新型污染物监测规范方法的标准化。

总之, 要不断加大相关分析测试方法的标准化, 使得从土壤样品采集、前处理、分析步骤和测试方法等全过程统一化、标准化, 得到的数据才具有可比性, 也更适用于土壤环境基准的推导和制修订工作, 推动土壤环境质量和污染土壤修复标准的修订与制定进程。

3 生物受体选择的基础性问题

生态毒理学实验的基础是生物受体的选择, 到底是选择灵敏的物种, 还是生态系统的优势种? 针对某些污染物, 哪些是灵敏的物种? 针对某些生态系统, 哪些是优势种? 都是值得研究和探讨的问题。

从优势种和敏感种的定义^[48]来看, 优势种是指在群落功能中占有重要的位置, 决定着群落的内部结构和特殊环境的物种, 如果把群落中的优势种去除, 必然导致群落性质和环境的变化; 而敏感种则是指对环境条件变化反应敏感的物种, 这种生物对环境因素有一个特定的适应范围。因此, 优势种是针对生态系统而言的, 更多地强调其在整个群落系统中的地位和功能特点, 没有明确给定自身必须具有的属性特点, 但是在当前的环境条件下又是具有优势地位的, 因此, 优势种的确定要具体问题具体分析; 而敏感种则强调了物种自身的属性, 即其环境适应能力, 与之相对应的是耐污种(在某一污染条件下生存的物种), 它们是相对于特定污染物而言的, 或者说是相对于引起环境发生变化的污染物而言的。因此, 敏感种和耐污种是相对的, 需要用一种动态的观点来看待敏感种和耐污种, 它们的变化会直接影响到生态系统的群落变化, 影响群落的组成和结构, 从而使得群落中的优势种也发生变化, 也就是说, 优势种也是一种动态的概念, 它主要是基于特定生态系统进行判断, 不能一概而论。

在进行生态毒理学实验选择受体生物时, 对优势种和敏感种, 要根据实际情况加以确定。即要针对所研究的生态系统当前特点及污染现状, 结合保护的目的地和具体目标, 来确定优势种和敏感种。也就是说, 要把优势种、敏感种放在具体生态系统中, 针对特定污染物, 而不是僵化地用优势种和敏感种的概念来判断。

对于不同种类的生态系统, 其生物组分是不同的, 其优势种也有差异。但群落优势种是可以通过计算特定生态系统中物种的优势度或重要值来确定。优势度一般由植物种的密度、盖度、频度、高度、重量等多个指标进行综合评定, 常用图解法表示; 也常常用计算出的具体数值来测度, 采用什么数量指标作为优势度的标准无一致规定。对各物种的优势度进行排序, 排在前几名的为优势种和亚优势种。如果排在前几名的几个物种的优势度相差很小, 可共同作为优势种; 如果相差较多, 只可选择最前面的植物种作为优势种, 其他作为亚优势种。重要值是相对密度、相对显著度(或相对盖度)以及相对频度三者之和, 对群落各物种的重要值从大到小进行排序, 从前往后依次累加重要值, 重要值之和超过群落所有重要值总和的 50% 时的所有物种定为优势种; 如果根据重要值差别的优势种排序与实际情况存在较大出入, 则需要根据具体群落特点参考其他数量指标^[49]。但一般情况下, 如果是针对农业生态系统的研究, 常常选用作物作为试验对象, 这些作物包括小麦、玉米、水稻、大豆、大麦、土豆、地瓜和油菜等, 因为农业生态系统污染的发生, 无非就是这些作物的受害。如果是针对渔业生态系统的研究, 常常选用易于获取、有一定代表性的生物材料作为指示生物, 如斑马鱼、鲫鱼、鲢鱼、草鱼、鳙鱼、海藻、对虾和螃蟹等。在多个化学污染物联合毒性的研究中, 一般试验动物均采用大鼠和小鼠, 而很少选用狗和猴等其他动物。与狗和猴等试验材料相比, 大鼠和小鼠不但易于获取和便于管理, 而且有许多现成的单因子试验资料以进行相互的比较。总之, 试验生物种类的选用通常应考虑以下几个方面: 具有代表性, 易于获取和便于管理, 有可以作比较的单因子试验资料。

对于不同污染物, 物种的耐受性也是不同的。对于单一污染物, 通过相关的毒理实验很容易判断出哪些是该种污染物较敏感的生物。有研究发现^[50], 以植物根伸长抑制率为指标, 研究污染物毒性与植物响应的剂量-效应关系, 进而发现对污染具有敏感指示作用的植物, 该研究可为土壤污染生态毒理诊断提供有

效的生态学方法,不同植物对有机污染物的毒性响应具有明显差异,这为敏感植物种的筛选提供了可能。但是,在复合污染条件下,则要复杂得多,复合污染本身就是一个非常复杂的研究领域,存在协同、拮抗、独立、加和等交互作用。这实际上又应分为两个研究层次,第一层次是要在相同的复合污染条件下,基于多个物种来判断复合污染的敏感种,另一层次则是要在第一层次的基础上,确定该物种是对复合污染中的哪种污染物敏感,这种情况则需要同时开展多种污染物的单一毒性试验和复合污染毒性试验进行研究分析。

总之,生物受体的正确选择,对于环境基准/标准的研究极为关键。要把优势种、敏感种选择好,才能科学、准确地确定土壤环境质量基准/标准和污染土壤修复基准/标准的临界值和限值。

4 变量归一化的基础性问题

在土壤环境基准的研究中,逐渐积累了一批基础数据和资料。但这些数据的获得,是基于一定的条件,包括实验和自身条件的限制。因此,对于众多不同来源和表达形式的基础数据,需要进行归一化处理,以使得在土壤环境基准的推导和赋值过程中,能够充分利用当前已有的科研成果,避免不必要的科研资源浪费。但同时,数据的归一化是一项十分重要而又复杂的工作,涉及的变量很多,如总量与有效态或提取态的问题、复合污染的情况、土壤本身的一些影响因素(土壤类型、有机质、粘粒、pH、Eh和CEC等)、土壤外部的一些影响因素(不同区域、温度、水分或湿度、施肥或农业措施等)。怎样把涉及到这诸多变量的基础数据进行归一化处理,是当前要研究解决的一大难点。

4.1 总量与有效态或提取态的关系及其归一化

我国当前实施的《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)虽然也考虑了土壤pH的影响,但主要是基于总量的。有效态/提取态是总量的一部分,尤其是对于有效态含量较低的土壤,有效态更能反映土壤的实际风险,因此,在土壤环境基准的研究和标准的制定过程中,有效态/提取态也应该作为科学依据之一。尤其是对于重金属,土壤-植物-人体是其对人类产生影响的主要途径,而植物只是吸收重金属的某一形态,特别是重金属的有效态,而不是重金属的全量,易被植物吸收的这部分重金属^[51],也常称为“可提取态”。

近年来,人们清楚地认识到重金属的环境行为和

生态效应与重金属在土壤中存在的有效态密不可分^[51-53]。多方面的研究结果表明,土壤中有效态与植物体内含量的相关性比土壤中全量显著,也就是说,有效态或提取态是污染物毒害效应大小的决定性因素,而与其总量没有十分密切的关系。宋玉芳等^[50]研究菲、芘、1,2,4-三氯苯复合污染结果显示,植物根伸长抑制率与污染物的水中溶解度显著相关,说明有效态形式的污染物才能对植物造成直接毒害,也是植物毒性作用显著增强的重要影响因子。但值得注意的是,有效态与总量之间也是有一定关系的。高怀友等^[54]研究发现,在其供试的3类土壤条件下,土壤中Zn的有效态含量与全量之间均存在显著的相关性,且均能在Zn有效态含量与全量之间建立起有意义的回归方程。因此,在土壤环境基准研究或标准制定时,应该综合考虑总量和有效态/提取态两个方面。

总地来看,有效态按照提取方法有单一提取法和连续提取法两类。单一提取法的提取剂又有单一提取剂和复合提取剂,单一提取剂包括HCl、CaCl₂、MgCl₂和NH₄OAc等,复合提取剂包括DTPA、M₃等。而连续提取法广泛使用的是Tessier提取法,按照提取顺序,重金属在土壤中的形态分为水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态和残留态等。其中,水溶态、离子交换态统称为有效态,重金属在土壤中的有效态含量与土壤类型、土壤质地和土地利用类型密切相关^[55],因此有效态也不是绝对的,会因为环境条件的改变而有变化。例如,何峰等^[56]研究发现,植物主要是吸收交换态Pb,碳酸盐态Pb及铁锰氧化态Pb在一定条件下也是植物可利用的Pb,但因土而异。在提取态研究中,提取剂的种类和提取条件是两大主要研究方向,如张利香等^[57]研究发现在一定条件下,NH₄OAc萃取的土壤中有有效态汞与玉米中汞含量有显著的相关性。王婷等^[58]研究发现混合提取剂(M₃)、DTPA都能够很好地表征油麦菜中Cd的生物有效性,其中M₃预测能力强,提取用时短,可推广应用。荆延德等^[59]认为,30 min可作为提取剂提取土壤有效态汞的最佳平衡时间,1:5为较适宜的土水比,对供试土壤,提取剂提取能力的大小顺序为:CaCl₂>HCl>NH₄OAc>DTPA。因此,不同学者在提取剂的种类和提取条件的选择方面的差异都会直接影响到最终得到的毒理数据,而且即使是采用相同提取剂和提取条件,对于不同的土壤类型,其结果也未必具有可比性,故土壤重金属通用提取剂的研究应用是建立以“有效态”为评价标准的基础^[60]。

当前总量与有效态/提取态,尤其是有效态/提取态变量的归一化要解决以下几个方面的问题:(1)怎样将总量或有效态/提取态相关的基础数据进行归一化?(2)如何对不同提取剂得到的基础数据进行归一化?(3)如何对不同提取条件得到的基础数据进行归一化?这些都是值得研究的基础性问题。

4.2 复合污染和交互作用对土壤环境基准限值的影响及其归一化

随着土壤环境中污染物的种类和数量不断增加,复合污染已成为土壤环境污染最为突出的特点之一^[61]。

首先,复合污染使得土壤环境中污染物的形态发生改变。有研究发现^[60],无污染黑土中 Cd、Cu、Zn 和 Pb 重金属的形态分布一般为残渣态>有机结合态>铁锰结合态>碳酸盐结合态>可交换态,但外源污染可交换态重金属的含量增加。而且污染愈严重的土壤,重金属的生物活性和自身的淋溶能力相对较强,在非耕层中也表现出较高的生物活性。其次,复合污染的生物毒性与单一污染也存在差异,如 Cd-Zn 作为复合体和 Cd(或 Zn)作为单体对土壤-水稻系统污染的生态毒理差异,其具体表现在对水稻生物产量和糙米中 Cd 与 Zn 浓度的影响以及水稻生物产量、糙米 Zn/Cd 比值的指数对数值之间的相关程度等 3 个方面^[63]。事实上,复合污染相当复杂,往往是多种污染物共存,不仅存在二元素的交互作用,还有二元以上的交互作用^[64-65]。此外,对于不同的作物种类,其交互作用也不太一样,在不同土地类型下,作物 Cd 风险商值为水稻>深色蔬菜>浅色蔬菜>水果>玉米^[66]。

多项研究表明,在单因子污染胁迫下,环境毒物或污染物对生物的毒害效应,基本上决定于其本身的理化性质,但受到暴露浓度水平极为重要的影响,这应该是明确一致的。同样,在多元复合污染条件下,除了污染物的理化性质本身的作用外,污染物的浓度起了至关重要的作用。如随着镉浓度的增加,小麦株高、地上部鲜重与干重以及根的鲜重与干重表现出下降的趋势,小麦生物量呈现下降的趋势,镉和豆磺隆对小麦生物量的抑制与影响起到协同作用^[67]。但是,到底是污染物的浓度还是浓度组合关系起了至关重要的作用,这是有争论的^[68]。周启星等^[69]采用全生育期土培毒性试验、全生育期水培毒性试验、陆生生态毒性试验、水生生态毒性试验和 DGGE 指纹图谱分析方法,以乙草胺-Cu 和 Cd-Zn 两组污染物为代表,分别进行复合污染暴露,并结合污染现场进行较为系统

的定量分析,结果发现污染物本身的化学性质对复合污染生态效应所起的作用,要比其浓度组合关系的影响小得多;污染物暴露的浓度组合关系更为直接,在一定条件下甚至起决定作用。因此,我们认为,以产量、微生物群落等影响为指标的复合污染生态毒理效应,更为直接和更为重要的是取决于其存在浓度水平的组合关系。此外,周启星^[70]在研究酚、甲胺磷对对虾毒性时,还发现复合污染生态效应应该是一个具有作用方向的矢量。应该指出,建立在矢量分析基础上的复合污染生态效应将更有利于我们系统地分析复合污染生态效应。

由于复合污染普遍存在,土壤环境中化学污染物通常发生交互作用,一方面导致污染土壤的生态毒性发生变化,另一方面则影响生物对土壤污染物的可利用性及在生物体内的赋存状态。因此,有必要引入“互作态”的新概念^[46],即是指环境介质中污染物之间交互作用形成对其生物有效性在数量上产生影响的形态。例如土壤 Cd-Pb 互作态,是指土壤中污染物 Cd-Pb 交互作用对其生物有效性在数量上的影响等于用另一污染物铅或镉的盐溶液浸提土壤而进入溶液中的量减去其水溶态的量。在这种意义上,水、大气和土壤/沉积物等环境介质和生物分室中除了以往所报道的各种形态外,还应该存在一个“互作态”。对污染物互作态开展研究,对于弄清生态系统中复合污染的具体存在形态,掌握产生毒性效应的作用机理有重要的科学意义,而且针对污染物的治理制定的修复措施也会更加具体化、明确化和有效化。

总之,在土壤环境基准研究时,不仅要考虑复合污染对污染物的毒性产生影响,还要考虑到复合污染的矢量特点,以便于针对复合污染的情况,在推导某些污染物的土壤环境基准限值时有一个权衡的依据。当前,复合污染的研究资料较多,不同污染物类型组合,不同浓度组合得到的数据,怎样把它们进行归一化处理,以便于更好地应用于土壤环境基准限值的推导,这是当前要解决的一大问题,也是一大难点。

4.3 土壤类型、有机质、粘粒、pH、Eh 和 CEC 等土壤本身影响因素及其归一化

值得注意的是,土壤污染物的毒理效应,尤其是重金属,主要取决于其有效态,而有效态又受到多种因素的影响,包括重金属元素本身性质和含量、土壤组成成分(有机质、粘土矿物、锰铁铝氧化物、碳酸盐和微生物等)和土壤环境条件(pH、Eh、温度和湿度)^[52]。因此,土壤本身存在的一些影响因素,如土壤

类型、有机质、粘粒、pH、Eh 和 CEC 等,对土壤环境基准基础数据的影响也是要重点考虑的问题,对相关因素进行归一化研究极其必要。

不同的土壤类型,具有不同的土体结构、内在理化性质和肥力特征。有研究表明,黑土与棕壤相关,具有较高的有机质含量和粘粒含量,黑土对 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 的吸附固定能力明显强于棕壤^[71-72],而且相比于棕壤,黑土吸附态 Cd^{2+} 、 Cu^{2+} 、氯喹磺隆的解吸具有更长的滞后阶段,且解吸率更低,土壤受到污染后,对土壤和农作物存在长期和潜在的威胁^[73-75]。土壤类型的不同,还可通过元素循环、微生物活性等途径起到间接影响,如草地土壤类型、土壤质地、土壤性质等因子影响微生物功能群的分布、活性等,而它们又直接参与土壤中 C、N 等营养元素循环和能量流动,其数量和活性直接关系到土壤肥力的高低^[76]。土壤酸碱度是土壤的一个基本性质,pH 的变化会直接影响到形态的分布和含量。一般情况下,pH 增加,会使得土壤重金属的有效态含量下降;pH 降低,则使重金属有效态含量增加。有研究发现,pH 值变化 0.5 个单位左右,有效态铜含量变化约 0.5~1 倍,有效态锰含量变化约 3~5 倍,有效态锌含量变化 9~15 倍之多^[77]。有机质也是一个比较重要的影响因素。研究发现,去除有机质后能降低土霉素在土壤中的吸附容量,但增加了吸附强度,土霉素在土壤上的解吸过程存在明显的滞后现象,去除有机质后的褐土和红壤对土霉素的解吸滞后现象显著增强^[78]。但也有报道,土壤有机质和土壤 N 含量与 Cu、Zn、Pb 和 Cd 污染对小麦根伸长抑制率显著负相关,土壤 pH 和阳离子交换量与 Cu、Zn、Pb 和 Cd 污染对小麦根伸长抑制率的相关性不显著^[79]。也有学者对浙江富阳市几种土地利用类型的调查发现^[80],在农业用地中,全氮、有机质和 pH 对 Zn 全量影响显著,而全量、有效磷和速效钾对 Zn 有效态影响显著,在工业用地中,土壤理化性质对全量和有效态 Zn 含量无明显影响,有效态 Zn 含量只与全量 Zn 含量显著相关。土壤本身的性质与土壤污染物的生态毒理效应之间的关系仍然是一项需要不断深入研究的课题。

国内一些学者在数据归一化方面做了一些相关工作。如李波^[81]通过大量的实验研究,建立了土壤性质(pH、CEC、OM 等)和生物毒害之间的量化关系以及多个物种的生物毒害模型。王小庆等^[82-83]应用这些建立的生物毒害模型对铜、镍等毒理学数据进行了归一化研究,通过数据库搜索了相关的数据资料,然后将这些毒理学数据归一化到不同土壤条件下,以消除

土壤性质差异的影响。此外,还应用这些模型来推算其他土壤类型的毒性阈值,实现归一化处理。

总之,怎样找到土壤本身的这些影响因素与土壤污染物的生态毒性之间的关系,建立起一定的联系,这仍是有待进一步广泛研究的课题;同时,也是实现这方面基础数据归一化的一大突破口。

4.4 地理区域、温度、水分或湿度、施肥或农业措施等土壤外部影响因素及其归一化

土壤一些外部影响因素,给土壤环境基准研究基础数据带来的不确定性也是要加以考虑的。如地理区域特点,温度、水分或湿度的影响,施肥或农业措施的影响等,如何对这些相关变量的基础数据进行归一化也是一大难点。

我国幅员辽阔,区域分异往往是起决定性的影响因素,从而导致相同的污染物、受体在不同区域条件下,其生态效应会完全不同,因此需要充分考虑到这些基础数据的区域性特点。例如,徐海娟等^[84]研究了我国南北 5 区 Cd 对水稻生长的影响,发现水稻株高、产量受土壤 Cd 污染的影响具有明显的南北区域分异。师荣光等^[85]研究发现,苏北优势农业区土壤砷含量存在明显的空间相关性并且实验半变异函数表现为各向同性,区域内土壤砷含量最高的区域在研究区的西北部,而最低值在研究区的中北部。戴明新等^[86]对四川泸县及附近水稻产区土壤 Cd 含量的空间变异性也进行了研究,结果表明本区域农业土壤 Cd 含量存在明显的空间异质性。因此,区域性特点是不可忽视的影响因素之一。

有机体所处的环境也存在许多影响因素,而且这些影响因素在外源化学物质对机体的毒性作用中表现较为明显。其中,环境温度的变化对生物转化过程的影响主要表现在环境温度升高时,一般外源化学物质的毒性增强;但在有些情况下,温度升高和降低都可引起外源化学污染物毒性增高。不过,各种环境因素本身和它们对机体以及外源化学物质生物转化过程的影响极为复杂,特别是考虑到各种环境因素之间的相互作用或联合作用所产生的后果。一般认为,环境因素的变化可能是使机体处于应激状态,因而可影响外源化学物质的生物转化过程及其对机体的毒性作用。环境因素通过改变机体的生理功能,继而影响机体对毒物的反应^[68]。

施肥和其他农措施的影响也很重要。肥料的施用也是土壤环境污染的来源之一,肥料的种类、用量、

使用年限等都会产生或大或小的影响,直接关系到土壤环境基准数据的可用性。赵明等^[87]研究发现,施用有机肥可降低土壤有效态 Pb 含量、提高 Cd 含量;有机无机肥配施可提高大棚土壤有效态 Cu、Cd 和 Cr 的含量、降低 Pb 的含量;施用无机肥可提高土壤有效态 Cu 和 Cr 含量。不同施肥处理黄瓜中 Cu 和 Zn 含量的变化规律基本相同,其含量随无机肥配施量的提高而增加;有机无机肥配施处理黄瓜中 Pb、Cd 和 Cr 含量随无机肥配施量的提高而呈逐渐降低的趋势。王新等^[52]研究发现,外源重金属污染土壤投加石灰和钙镁磷肥后使土壤中的交换态 Cd、Pb、Cu、Zn 下降,而碳酸盐结合态 Cd、Pb、Cu、Zn 含量增加,因此,石灰+钙镁磷肥改性剂对重金属活性起到钝化作用。晁雷等^[88]对猪粪施用研究发现,猪粪的施用可以增加土壤中有机的含量并使土壤 pH 值升高,且施用浓度的增加与 pH 值的升高表现为极显著正相关。施用猪粪土壤中 Cd 和 Zn 在不同深度土层中呈“峰”型分布,而 Cu 在不同深度土层中表现为上部富集。除了肥料,杀虫剂、除草剂等的影响也是不可忽视的,如周启星等^[89]研究发现,随着农业活动中施入高剂量的乙草胺这一除草剂,黑土中具生物学活性的水溶态和可交换态铅的含量则大幅上升,其原因是铅在与乙草胺交互作用过程中来自有机质-硫化物结合态铅释放有效态铅。

总之,怎样对这些外部影响因素相关的基础数据进行归一化处理,从而找到实际问题的理论出口,同时为土壤环境基准的研究提供可供参考的数据来源。这些都是需要进一步研究的问题。

5 今后研究展望

土壤环境基准/标准研究是一项比较系统而复杂的“工程”,涉及到方方面面的问题。需要解决好一系列的基础性问题,以做好思想、理论、方法和技术等多方面的储备。具体来说,应该包括以下几大方面:

(1)要明确一些基本概念的内涵。包括“环境质量”、“土壤环境质量”、“土壤质量”;“土壤污染”、“污染土壤”;“土壤环境质量标准”、“污染土壤修复标准”等,这些概念既相互联系又有所区别,要从多方面、多角度进行正确的理解,不要以偏概全,影响到土壤环境基准研究各项工作的系统全面的开展;

(2)不断推进土壤环境基准研究相关方法的标准化工作。这涉及土样的采集、前处理、分析步骤和检测方法等各个方面,尤其是土壤有机污染物相关的标

准化方法,还远远不能满足当前的需要,需要分层次、有重点地加大相关标准化工作的速度和力度;

(3)选择合适、适当的“标准化”生态受体。要从研究“优势种”和“敏感种”方面找到突破口,要以生物多样性的研究作为基础,选择好有代表性的物种,特别是建立优势种和敏感种的生态目录,为生态毒理数据的可比性打下基础;

(4)要充分利用当前已取得的科研成果。要充分搜集各种文献资料,整理好相关基础数据,全面系统地开展数据的归一化工作,同时又要充分考虑到总量与有效态或提取态、复合污染与交互作用、土壤本身影响因素(土壤类型、有机质、粘粒、pH、Eh 和 CEC 等)、土壤外部影响因素(地理区域、温度、水分或湿度、施肥或农业措施等)等多种变量。

这几大方面可以同时开展,多管齐下,共同推动土壤环境基准相关工作又好又快发展,以为我国土壤环境标准的制修订工作提供系统的数据基础和科学依据。

参考文献:

- [1] 叶文虎,张月娥.论环境科学中一些基本概念[J].中国人口·资源与环境,1993,3(4):14-18.
YE Wen-hu, ZHANG Yue-e. On some basic concepts in environmental science[J]. *China Population Resources and Environment*, 1993, 3(4): 14-18.
- [2] 陈怀满,郑春荣,周东美,等.土壤环境质量研究回顾与讨论[J].农业环境科学学报,2006,25(4):821-827.
CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, ZHOU Dong-mei, et al. Soil environmental quality: a review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):821-827.
- [3] 张桃林,潘剑君,赵其国.土壤质量研究进展与方向[J].土壤,1999(1):1-7.
ZHANG Tao-lin, PAN Jian-jun, ZHAO Qi-guo. Progress and orientation of soil quality research[J]. *Soils*, 1999(1):1-7.
- [4] <http://soilhealth.cals.cornell.edu/>
- [5] Doran J W, Parkin T B. Defining soil quality for a sustainable environment[A]. Proceedings, Symposium of Division S-3, S-6, S-2, Soil Science Society of America, Division A-5 of the American Society of Agronomy, and the North Central region Committee on Soil Organic Matter(NCR-59)[C]. 4-5 November 1992, Minneapolis MN. SSSA Special Publication No. 35, 1994.
- [6] Doran J W, Zeiss M R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2000, 15(1): 3-11.
- [7] Karlen D L, Andrews S S, Doran J W. Soil quality: current concepts and applications[J]. *Advances in Agronomy*, 2001, 74(1): 1-39.
- [8] 赵其国,孙波,张桃林.土壤质量与持续环境 I. 土壤质量的定义与评价方法[J]. 土壤,1997(3): 113-120.

- ZHAO Qi-guo, SUN Bo, ZHANG Tao-lin. Soil quality and sustainable environment I. The definition and evaluation methodology of soil quality [J]. *Soils*, 1997(3):113-120.
- [9] 曹志洪, 周建民, 等. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- CAO Zhi-hong, ZHOU Jian-ming, et al. Soil quality of China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [10] 徐建明, 张甘霖, 谢正苗, 等. 土壤质量指标与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- XU Jian-ming, ZHANG Gan-lin, XIE Zheng-miao, et al. Indices and assessment of soil quality[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [11] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- CHEN Huai-man. Environmental soil science[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [12] RECP. Sustainable use of soil [R]. Royal Commission on Environmental Pollution. 19th Report. London, HMSO. 1996.
- [13] US Environmental Protection Agency. NATO/CCMS pilot study: demonstration of remedial action technologies for contaminated land and groundwater[R]. Final Report. Volume 1, USEPA (Cincinnati). EPA/600/R-93/012a, 1993.
- [14] 周启星, 宋玉芳, 等. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- ZHOU Qi-xing, SONG Yu-fang, et al. Remediation of contaminated soils: principles and methods[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [15] 周启星, 魏树和, 张倩茹, 等. 生态修复[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- ZHOU Qi-xing, WEI Shu-he, ZHANG Qian-ru, et al. Ecological remediation[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [16] 夏家洪, 骆永明. 关于土壤污染的概念和3类评价指标的探讨[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(1): 87-90.
- XIA Jia-qing, LUO Yong-ming. Definition and three evaluation guidelines of soil contamination[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1): 87-90.
- [17] 周启星. 健康土壤学—土壤健康质量与农产品安全[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- ZHOU Qi-xing. Health soil science — soil health quality and the safety of agricultural products [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [18] 孙铁珩, 李培军, 周启星, 等. 土壤污染形成机理与修复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- SUN Tie-heng, LI Pei-jun, ZHOU Qi-xing, et al. Formation mechanisms and remediation technology of soil pollution[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [19] Mirsal I. Soil pollution: origin, monitoring and remediation[M]. Berlin and Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.
- [20] http://en.wikipedia.org/wiki/Soil_contamination
- [21] UK Environmental Standards [S/OL]. [2009-12-15]. <http://www.wfduk.org/> UK Environmental Standards/.
- [22] USEPA. Ambient water quality criteria (Series) [R]. Washington D C: Office of Regulation Standard, 1980.
- [23] 环境科学大词典编辑委员会. 环境科学大词典[K]. 北京: 中国环境科学出版社, 1991.
- Environmental Science Dictionary Editorial Board. Environmental Science Dictionary [K]. Beijing: China Environmental Science Press, 1991.
- [24] 周生贤, 等. 环境科学大辞典[K]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008, 293:325-326.
- ZHOU Sheng-xian, et al. Environmental Science Dictionary[K]. Beijing: China Environmental Science Press, 2008, 293:325-326.
- [25] 周启星, 罗义, 祝凌燕. 环境基准值的科学研究与我国环境标准的修订[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(1):1-5.
- ZHOU Qi-xing, LUO Yi, ZHU Ling-yan. Scientific research on environmental benchmark values and revision of national environmental standards in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(1):1-5.
- [26] 周启星, 安婧, 何康信. 我国土壤环境基准研究与展望[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 1-6.
- ZHOU Qi-xing, AN Jing, HE Kang-xin. Research and prospect on soil-environmental criteria in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):1-6.
- [27] 周启星. 环境基准研究与环境标准制定进展及展望[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 1-8.
- ZHOU Qi-xing. Advances and prospect of research on environmental criteria/benchmarks and enactment of environmental standards [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(1):1-8.
- [28] 周启星. 污染土壤修复标准建立的方法体系研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(2): 316-320.
- ZHOU Qi-xing. Methodology of enacting standards for remediation of contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2):316-320.
- [29] 晁雷, 周启星, 陈苏. 建立污染土壤修复标准的探讨[J]. 应用生态学报, 2006, 17(2): 331-334.
- CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, CHEN Su. An approach to the establishment of remediation standards for contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(2):331-334.
- [30] 周启星. 污染土壤修复基准与标准进展及我国农业环保问题[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):1-8.
- ZHOU Qi-xing. Progresses in remediation criteria and standards for contaminated soils and agro-environmental protection in China: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):1-8.
- [31] California EPA. CalTOX: A multimedia total exposure Model for hazardous waste Site[R]. Sacramento, CA, 1993.
- [32] Chang S H, Kuo C Y, Wang J W, et al. Comparison of RBCA and CalTOX for setting risk-based cleanup levels based on inhalation exposure [J]. *Chemosphere*, 2004, 54: 359-367.
- [33] Shan C, Javandel I. A multilayered box model for calculating preliminary remediation goals in soil screening[J]. *Risk Analysis*, 2005, 25(2): 339-349.
- [34] Pascoe G A, Riley M J, Floyd T A, et al. Use of a risk-based hydro-geologic model to set remedial goals for PCBs, PAHs, and TPH in soils during redevelopment of an industrial site[J]. *Environ Sci Technol*, 1998, 32: 813-820.
- [35] Korfiatis G P, Talimcioglu N M. Impact: a model for calculation of soil cleanup levels[J]. *Remediation Journal*, 1994, 4(2): 175-188.

- [36] Chen W, Kan A T, Newell C J, et al. More realistic soil clean-up standards with dual-equilibrium desorption[J]. *Ground Water*, 2002, 40(2): 153-164.
- [37] Connor J A, Bowers R L, Paquette S M. Soil attenuation model for derivation of risk-based soil remediation standards[J]. *Groundwater Services, Inc.*, 1997.
- [38] CCME. Interim Canadian environmental quality criteria for contaminated sites [R]. CCME, Winnipeg, 1991.
- [39] CCME. A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines [R]. CCME, Winnipeg, 1996.
- [40] 晁雷, 周启星, 陈苏, 等. 基于小麦产品质量的土壤铅修复基准[J]. *生态科学*, 2006, 25(6): 554-557.
CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, CHEN Su, et al. Probabilistic remediation criterions of contaminated soil for Pb derived from quality standards in wheat[J]. *Ecologic Science*, 2006, 25(6): 554-557.
- [41] 刘尧. 土壤 BTEX 污染的分子诊断及修复基准研究[D]. 天津:南开大学, 2011.
LIU Yao. The study of molecular diagnosis and remediation criteria for BTEX contaminated soils[D]. Tianjin: Nankai University, 2011.
- [42] 晁雷. 污染土壤修复基准建立的方法体系、案例研究与评价[D]. 沈阳:中国科学院沈阳应用生态研究所, 2007.
CHAO Lei. Methodology and case study of enacting benchmarks for remediation of contaminated soils and its effectivity assessment [D]. Shenyang: Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2007.
- [43] 晁雷, 周启星, 陈苏. 污染土壤修复效果评定方法的研究[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2006, 7(4): 7-11.
CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, CHEN Su. Research on evaluation methods for effectiveness of contaminated soil remediation[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2006, 7(4): 7-11.
- [44] 周启星, 滕涌, 林大松. 污染土壤修复基准值推导和确立的原则与方法[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(2): 205-214.
ZHOU Qi-xing, TENG Yong, LIN Da-song. The principles and methods of deriving and determining remediation criteria for contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(2): 205-214.
- [45] 奚旦立, 孙裕生, 刘秀英. 环境监测[M]. 北京:高等教育出版社, 2004.
XI Dan-li, SUN Yu-sheng, LIU Xiu-ying. Environmental monitoring [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004.
- [46] 周启星, 罗义. 污染生态化学[M]. 北京:科学出版社, 2011.
ZHOU Qi-xing, LUO Yi. Pollution eco-chemistry[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [47] 吴邦灿, 李国刚, 邢冠华. 环境监测质量管理[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2011.
WU Bang-can, LI Guo-gang, XING Guan-hua. Management of environmental monitoring quality[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [48] 孔繁翔. 环境生物学[M]. 北京:高等教育出版社, 2000.
KONG Fan-xiang. Environmental biology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [49] 中国生态系统研究网络科学委员会. 陆地生态系统生物观测规范[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2007.
The Chinese ecosystem research network science committee. Protocols for standard biological observation and measurement in terrestrial ecosystems[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [50] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 等. 菲、蒽、1,2,4-三氯苯对土壤高等植物根伸长抑制的生态毒性效应[J]. *生态学报*, 2002, 22(11): 1945-1950.
SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, XU Hua-xia, et al. Eco-toxicological effects of phenanthrene, pyrene and 1,2,4-trichlorobenzene in soils on the inhibition of root elongation of higher plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11): 1945-1950.
- [51] 刘铭, 刘凤枝, 刘保峰. 土壤中有态铅和镉的测定[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(增刊): 300-302.
LIU Ming, LIU Feng-zhi, LIU Bao-feng. Determination of available lead and cadmium in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl): 300-302.
- [52] 王新, 周启星. 外源铅铜锌在土壤中形态分布特性及改性剂的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(5): 541-545.
WANG Xin, ZHOU Qi-xing. Distribution of forms for cadmium, lead, copper and zinc in soil and its influences by modifier[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(5): 541-545.
- [53] Chojnacka K, Chojnacki A, Górecka H, et al. Bioavailability of heavy metals from polluted soils to plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 337(1-3): 175-182.
- [54] 高怀友, 师荣光, 赵玉杰. 不同土壤中 Zn 有效态含量与全量关系的统计研究[J]. *环境科学学报*, 2006, 26(8): 1400-1403.
GAO Huai-you, SHI Rong-guang, ZHAO Yu-jie. Statistical relationship between bio-available Zn and total Zn concentration in soil under non-continuous spatiotemporal condition[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(8): 1400-1403.
- [55] 王祖伟, 张辉, 张文具. 天津地区土壤环境中有效态重金属的分布特征与生态意义[J]. *土壤通报*, 2005, 36(1): 101-103.
WANG Zu-wei, ZHANG Hui, ZHANG Wen-ju. The distribution of available heavy metals in soil in Tianjin area and ecological significance[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(1): 101-103.
- [56] 何峰, 涂从, 苗金燕. 土壤铅有效态临界含量的研究[J]. *农业环境保护*, 1992, 11(2): 84-87.
HE feng, TU cong, MIAO Jin-yan. Study on critical concentration of available Pb in soils[J]. *Agro-environmental Protection*, 1992, 11(2): 84-87.
- [57] 张利香, 侯明. 土壤中有态汞的最佳萃取条件研究[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(6): 1675-1678.
ZHANG Li-xiang, HOU Ming. Study on the optimal extraction conditions of bioavailable Hg in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(6): 1675-1678.
- [58] 王婷, 王静, 孙红文, 等. 天津农田土壤镉和汞污染及有效态提取剂筛选[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(1): 119-124.
WANG Ting, WANG Jing, SUN Hong-wen, et al. Contamination of cadmium and mercury in farmland of Tianjin and extraction methods for predicting their bioavailability[J]. *Journal of Agro-Environment Sci-*

- ence, 2012, 31(1):119-124.
- [59] 荆延德,何振立,杨肖娥. 稻菜轮作制下土壤有效态汞提取剂和提取条件研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 185-189.
- JING Yan-de, HE Zhen-li, YANG Xiao-e. Extractants and extraction conditions for available Hg in soil of a rice-vegetable rotation system [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(4):185-189.
- [60] 陈飞霞, 魏世强. 土壤中有效态重金属的化学试剂提取法研究进展[J]. 干旱环境监测, 2006, 20(3): 153-158.
- CHEN Fei-xia, WEI Shi-qiang. Study of chemical extraction of heavy metals in soil[J]. *Arid Cnuironment Monitoring*, 2006, 20(3):153-158.
- [61] 周启星. 复合污染生态学[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1995.
- ZHOU Qi-xing. Combined pollution ecology[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1995.
- [62] 郭观林, 周启星. 污染黑土中重金属的形态分布与生物活性研究[J]. 环境化学, 2005, 24(4):383-388.
- GUO Guan-lin, ZHOU Qi-xing. Speciation distribution and bioactivity of heavy metals in contaminated phaeozem[J]. *Environmental Chemistry*, 2005, 24(4):383-388.
- [63] 周启星, 高拯民. 土壤-水稻系统 Cd-Zn 的复合污染及其衡量指标的研究[J]. 土壤学报, 1995, 32(4):430-435.
- ZHOU Qi-xing, GAO Zheng-min. Combined pollution and its indexes of Cd and Zn in soil-rice systems[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, 32(4):430-435.
- [64] 王 新, 梁仁禄, 周启星. Cd-Pb 复合污染在土壤-水稻系统中生态效应的研究[J]. 农村生态环境, 2001, 17(2):41-44.
- WANG Xin, LIANG Ren-lu, ZHOU Qi-xing. Ecological effect of Cd-Pb combined pollution on soil-rice system[J]. *Rural Eco-Environment*, 2001, 17(2):41-44.
- [65] 周启星. 镉-砷污染苜蓿的联合效应及机理的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 1994, 2(1):81-87.
- ZHOU Qi-xing. Joint effects and mechanisms of Cd and As simultaneously polluting alfalfa[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1994, 2(1):81-87.
- [66] 师荣光, 赵玉杰, 彭胜巍, 等. 不同土地利用类型下土壤-作物镉含量积累及其健康风险分析[J]. 资源科学, 2008, 30(12):1904-1909.
- SHI Rong-guang, ZHAO Yu-jie, PENG Sheng-wei, et al. Cadmium accumulation in soil and crops and pollution risks to human health under different land use types[J]. *Resources Science*, 2008, 30(12): 1904-1909.
- [67] 金彩霞, 周启星, 王 新. 镉-豆磺隆复合污染对小麦生物学性状与品质的胁迫[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6):1160-1163.
- JIN Cai-xia, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Stress of combined pollution of cadmium-chlorimuron-ethyl on biological characteristics and quality of wheat triticum aestivum L[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(6):1160-1163.
- [68] 周启星, 孔繁翔, 朱 琳. 生态毒理学[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- ZHOU Qi-xing, KONG Fan-xiang, ZHU Lin. Ecotoxicology[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [69] 周启星, 程 云, 张倩茹, 等. 复合污染生态毒理效应的定量关系分析[J]. 中国科学(C 辑), 2003, 33(6):566-573.
- ZHOU Qi-xing, CHENG Yun, ZHANG Qian-ru, et al. The quantitative relationship analysis on the ecotoxicological effects of combined pollution[J]. *Science in China: Series C*, 2003, 33(6):566-573.
- [70] Zhou Q X, Dai L M. Joint effects of chromium and phenol on marine prawns (*Penaeus japonicus*) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 31(4-12): 387-389.
- [71] 郭观林, 周启星. 镉在黑土和棕壤中吸附行为比较研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12):2403-2408.
- GUO Guan-lin, ZHOU Qi-xing. Adsorption behavior of cadmium in phaeozem and burozem [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(12):2403-2408.
- [72] 于 颖, 周启星, 王 新, 等. 黑土和棕壤对铜的吸附研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5):761-765.
- YU Ying, ZHOU Qi-xing, WANG Xin, et al. Cu adsorption by phaeozem and burazem [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4):761-765.
- [73] 郭观林, 周启星. 重金属镉在黑土和棕壤中解吸行为比较[J]. 环境科学, 2006, 27(5):1013-1019.
- GUO Guan-lin, ZHOU Qi-xing. Comparison on desorptive behavior of cadmium in phaeozem and burozem [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(5):1013-1019.
- [74] 于 颖, 周启星. 重金属铜在黑土和棕壤中解吸行为的比较[J]. 环境科学, 2004, 25(1):128-132.
- YU Ying, ZHOU Qi-xing. Comparison on desorptive behavior of copper in phaeozem and burozem [J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1): 128-132.
- [75] Ren W, Wang M, Zhou Q. Effect of soil pH and organic matter on desorption hysteresis of chlorimuron-ethyl in two typical Chinese soils [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2011, 11: 552-561.
- [76] 丁玲玲, 祁 彪, 尚占环, 等. 东祁连山不同高寒草地型土壤微生物数量分布特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6):2104-2111.
- DING Ling-ling, QI Biao, SHANG Zhan-huan, et al. The characteristics of soil microorganism quantity under different alpine grasslands in eastern qilian mountain [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2104-2111.
- [77] 于君宝, 王金达, 刘景双, 等. 典型黑土 pH 值变化对微量元素有效态含量的影响研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2):93-95.
- YU Jun-bao, WANG Jin-da, LIU Jing-shuang, et al. Effect of soil pH value variation on effective content of trace elements in typical black soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2):93-95.
- [78] 鲍艳宇, 周启星, 万 莹, 等. 土壤有机质对土霉素在土壤中吸附-解吸的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(6):651-655.
- BAO Yan-yu, ZHOU Qi-xing, WAN Ying, et al. Effect of soil organic matter on adsorption and desorption of oxytetracycline in soils [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(6):651-655.
- [79] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 等. 重金属对土壤中小麦种子发芽与根伸长抑制的生态毒性[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4):459-462.
- SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, XU Hua-xia, et al. Eco-toxicology of heavy metals on the inhibition of seed germination and root elongation of wheat in soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4):

- 459-462.
- [80] 韩 凝, 张秀英, 蒋玉根, 等. 土地利用方式及土壤理化性质对有效态锌累积的影响[J]. 水土保持通报, 2009, 29(1):70-73.
- HAN Ning, ZHANG Xiu-ying, JIANG Yu-gen, et al. Influence of land use and soil properties on the available Zn concentration in soils[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(1):70-73.
- [81] 李 波. 外源重金属铜、镍的植物毒害及预测模型研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- LI Bo. The phytotoxicity of added copper and nickel to soils and predictive models[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [82] 王小庆, 韦东普, 黄占斌, 等. 物种敏感性分布在土壤中镍生态阈值建立中的应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1):92-98.
- WANG Xiao-qing, WEI Dong-pu, HUANG Zhan-bin, et al. Application of species sensitivity distribution in deriving of ecological thresholds for nickel in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(1):92-98.
- [83] 王小庆, 韦东普, 黄占斌, 等. 物种敏感性分布法在土壤中铜生态阈值建立中的应用研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(6):1787-1794.
- WANG Xiao-qing, WEI Dong-pu, HUANG Zhan-bin, et al. Application of species sensitivity distribution in deriving of ecological thresholds for copper in soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(6):1787-1794.
- [84] 徐海娟, 师荣光, 赵玉杰, 等. 土壤重金属 Cd 作物效应的区域分异研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(19):8272-8274.
- XU Hai-juan, SHI Rong-guang, ZHAO Yu-jie, et al. Study on regional differentiation in effect of heavy metal Cd in soil on plant[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2008, 36(19):8272-8274.
- [85] 师荣光, 赵玉杰, 周启星, 等. 苏北优势农业区土壤砷含量空间变异性研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1):80-84.
- SHI Rong-guang, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-xing, et al. Spatial variability of soil arsenic content in predominant agricultural area in the north of Jiangsu Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(1):80-84.
- [86] 戴明新, 师荣光, 赵玉杰, 等. 四川泸县农业土壤 Cd 含量空间变异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):1093-1099.
- DAI Ming-xin, SHI Rong-guang, ZHAO Yu-jie, et al. Spatial variability of soil cadmium in Luxian agricultural area, Sichuan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):1093-1099.
- [87] 赵 明, 蔡 葵, 王文娇, 等. 施肥对大棚土壤有效态重金属含量及生物效应的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊):26-31.
- ZHAO Ming, CAI Kui, WANG Wen-jiao, et al. Effects of fertilization on soil available heavy metal content and biological effects in greenhouse[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl):26-31.
- [88] 晁 雷, 周启星, 陈 苏, 等. 施用猪粪农田重金属分布迁移和污染评价[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(6):951-954.
- CHAO Lei, ZHOU Qi-xing, CHEN Su, et al. Distribution, transfer and pollution assessment of heavy metals in farmland with swine manure applied[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(6):951-954.
- [89] 周启星, 孙福红, 郭观林, 等. 乙草胺对东北黑土铅形态及生物有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10):1883-1886.
- ZHOU Qi-xing, SUN Fu-hong, GUO Guan-lin, et al. Influence of acetochlor on Pb forms and their bioavailability in phaeozem of northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10):1883-1886.

欢迎投稿《天津科技》

《天津科技》是由天津市科学技术委员会主管、天津市科学技术信息研究所主办的涵盖各科技领域、行业的科技类综合性期刊,是 CNKI 中文期刊全文数据库全文收录期刊, CNKI 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊, 万方数字期刊群入网期刊, 维普中文科技期刊数据库收录期刊, 天津市一级期刊。

本刊创刊于 1974 年, 月刊, 每月 25 日出版, 16 开本, 每期 80 页, 每期定价 6.50 元, 全年定价 78.00 元, 公开发行人, 国内邮发代号 18-204, 全国各地邮局均可订阅; 河北省廊坊市邮政局负责发行。如漏订, 可向本刊编辑部补订。

本刊设有科技论坛、科学观察、环保前线、建设科技、编辑之窗、信息时代、创新技术等栏目, 内容涵盖天津市各领域、各行业、各专业的科技最新动态, 是宣传天津科技成就、进行学术交流的窗口。

《天津科技》欢迎企事业单位广大科研人员、科技管理工作者的刊登论文。

刊号: CN12-1203/N ISSN 1006-8945

发行范围: 国内外公开发行

邮发代号: 18-204

邮寄地址: 天津市河西区吴家窑大街 22 号《天津科技》编辑部

邮 编: 300074

联系人: 刘 梅

电 话: 022-23529856-607

传 真: 022-23532933-612

E-mail: tianjinkejikan@126.com