

我国土壤环境基准研究与展望

周启星^{1,2}, 安 婧², 何康信¹

(1.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; 2.中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016)

摘 要:土壤环境基准的研究, 对于环境保护和食品安全具有极为重要的战略意义。为了推动我国今后在国家层面上开展土壤环境基准的系统研究, 本文还对土壤环境基准的概念和内涵进行了阐述和辨析, 并首次提出了分类开展土壤环境基准的设想并进行尝试性分类。在此基础上, 对我国土壤环境基准研究现状和动态进行了概述, 提出了今后本领域的研究方向、路线和重点。

关键词:环境基准; 土壤环境质量基准; 污染土壤修复基准; 生态毒理效应; 食品安全

中图分类号: X-651 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)01-0001-06

Research and Prospect on Soil-environmental Criteria in China

ZHOU Qi-xing^{1,2}, AN Jing², HE Kang-xin¹

(1.Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria at Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2.Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

Abstract: The study on soil-environmental criteria has an extremely important strategic significance for environmental protection and food safety. In order to promote the systematic research of soil-environmental criteria at the national level in the future, the concept and connotation of soil-environmental criteria is expounded and discriminated. In particular, the classification system of soil-environmental criteria is firstly put forward. On this basis, the current situation and researching trends of soil-environmental criteria in China are summarized, and researching direction, route and highlights in this field are suggested.

Keywords: environmental criteria; soil-environmental quality criteria; contaminated soil remediation criteria; ecotoxicological effect; food safety

环境基准是制定环境标准的基础和科学依据^[1]。环境基准和环境标准之间存在着必然的联系和一定的数值关系, 两者都需要开展系统的研究。目前, 国际社会已经将环境基准的研究和环境标准的制定作为反映一个国家环境科学研究水平的主要标志之一^[2-3]。因此, 美国、英国、德国、法国、加拿大和澳大利亚等发达国家投入了极大的人力、物力和财力来研究环境基准和开展环境标准制定与修订的相关工作,

并在环境保护方面取得了事半功倍的效果。

1 土壤环境基准研究对环境保护的战略意义

长期以来, 我国环境保护工作一直都是在充满矛盾和效果不是很理想的状态下运转的。由于不曾开展环境基准的系统研究, 已经制定的环境标准无法真实反映客观规律和我国环境的实际, 导致了我国环境保护工作一直存在着“欠保护”和“过保护”之间的严重矛盾, 其凸显的许多生态环境问题, 其根源均来自于环境标准中存在的问题, 都集中反映了需要迫切开展环境基准的系统研究^[4]。

特别是, 由于土壤环境的开放性和复杂多变的特点^[5], 土壤历来被认为是生活废弃物及各种毒物堆积和处理的场所, 是一个大“垃圾箱”, 这种传统的认识和偏见, 束缚了人们正确认识土壤环境问题。另外, 土

收稿日期: 2010-12-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40930739); 高等学校科技创新工程重大项目培育资金项目(707011)

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、中国科学院陆地生态过程重点实验室主任。主要从事污染生态、环境基准和污染环境修复等方面的研究。E-mail: Zhouqx@nankai.edu.cn

壤环境污染对人体健康的影响是间接的、潜在的^[6],因而也容易使人们从主观上忽视土壤环境问题,影响了土壤环境基准的研究。因此从总体上来看,我国土壤环境基准的研究大大滞后于大气、水环境基准的研究。已经实施了十多年的土壤环境质量标准在制定时基本缺乏土壤环境质量基准的指导,存在着诸多的缺点和不足,已无法适应新形势下土壤环境保护工作的需要;污染土壤修复基准研究是污染土壤修复标准制定的基础,因而也是污染土壤修复效果检验和风险评价的基础性工作^[7]。近年来,对于污染土壤修复的研究一直是热点领域^[8],但是对于污染土壤修复标准制定却远远落后于其修复技术的研究,这就很难说清楚污染土壤修复到什么程度可以认为是清洁的,污染土壤修复效果的检验与评价已经成为检验污染土壤修复工程实际效果的瓶颈。由此可见,我国当务之急是要进行土壤环境标准的修订和污染土壤修复标准的制定。而为了做好这项工作,迫切需要在国家层面上开展系统的土壤环境基准的研究。

历史和经验教训告诉我们,随着社会的进步和经济的发展,环境标准应该不断得到修订,包括一些参数的调整和补充^[4]。也就是说,好的环境标准总是在发展和进步之中。因此,环境基准的研究是一项长期的任务^[2-3]。国家应该从环境保护战略的高度重视此项工作,并作为一项长期的科研任务给予布置,并坚持不懈。

2 土壤环境基准的概念、内涵与分类

所谓环境基准,目前一般认为,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(无作用剂量)或浓度,或者超过这个剂量或浓度就导致特定保护对象产生不良或有害的效应^[4-9]。多方面的资料和研究表明,环境基准值是在反映并考虑环境原初状况与历史演变的前提下,由污染物与生态系统特定对象之间的剂量-反应关系确定的。因此,环境基准值不是所谓的不产生不良或有害影响的最大单一浓度或单一的无作用剂量,也不是超过该剂量或浓度就导致不良或有害的效应,而是一个基于不同保护对象的多目标函数或一个范围值^[1]。

根据上述环境基准的概念,土壤环境基准应该包括由于有害物质的作用不产生急性、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,其内涵应该包括土壤环境质量基准和污染土壤修复基准两个方面(图1)。其中,土壤环境质量基准应

该遵循土壤环境质量长期自身演变的规律,应该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生物生活在其中不会发生不良的或有害的影响;而对于污染土壤修复基准来说,是指土壤环境受到严重污染或突发事件后恢复其自然生态功能的过程,反映了急性、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生物产生不良或有害的效应。因此,土壤环境质量基准的赋值应该建立在大量土壤环境背景值调查,系统的敏感生物致毒浓度和低水平、长期或慢性暴露生物学效应或生态效应的基础上;而污染土壤修复基准的赋值则应该建立在系统的急性、亚急性毒性试验以及大量优势种群致毒浓度研究的基础上,并适当参照矿区和高背景地区的背景水平(对于重金属元素和无机营养元素来说)^[10-13]。

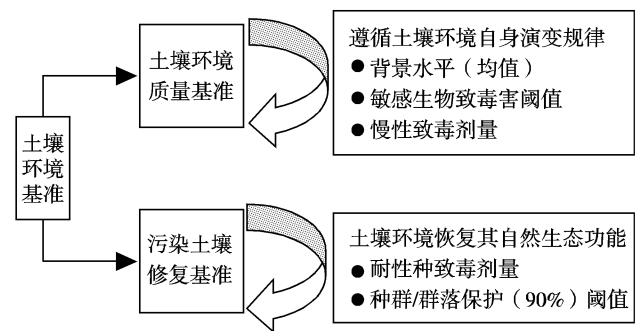


图1 土壤环境基准的内涵与赋值

Figure 1 The connotation and evaluation of soil-environmental criteria

我国地域辽阔,从北到南,从东到西,不仅土壤类型众多,而且土壤环境因子差异巨大。如何对土壤环境基准进行分类,是土壤环境基准研究首先要解决的问题。但是,土壤环境基准分类又不能太细。否则,将给环境管理带来许多困难和不便。从整体性考虑,土壤环境基准可以按照地貌类型划分,分为平原、丘陵、山地、高原和盆地等5种类型。应该说,这是纯自然地理的划分,其对应应该成为“土壤生态基准”。当考虑人为活动这一因素时,尤其与污染土壤修复基准相联系,土壤环境基准可以按照土地利用类型划分,分为城镇土壤环境基准(包括工商业用地土壤环境基准和居住与公园土壤环境基准)、农业土壤环境基准和污染场地土壤环境基准(图2)。

然而,遗憾的是,我国过去仅仅涉及土壤环境质量基准的研究,往往把土壤环境基准等同于土壤环境

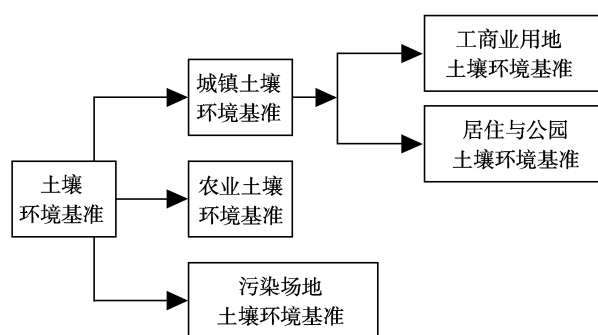


图 2 基于土地利用的土壤环境基准分类系统

Figure 2 The classification system of soil-environmental criteria based on land utilization

质量基准,而没有涉及污染土壤修复基准,更没有土壤环境基准的分类。在许多环境科学词典或教科书中,都这么认为,“环境质量基准简称环境基准”,或者“环境基准即环境质量基准”。其实,这是不完全的甚至错误的理解。正是这种不完善的认识,致使我国土壤环境标准体系中只有土壤环境质量标准,而忽视了污染土壤修复标准的制定。

3 我国土壤环境基准的研究现状

与国外相比,我国关于土壤环境质量基准的研究起步较晚,有关污染土壤修复基准的研究更为缺乏。20 世纪 80 年代末和 90 年代初,周启星、吴燕玉等提出了采用作物生态效应方法、土壤环境背景值方法和食品卫生标准反推法开展土壤环境质量基准的研究^[14]。1991 年,吴燕玉等基于土壤环境背景值研究成果,并考虑作物生态效应,提出了我国土壤 Cd、Hg 的环境质量基准值^[15];1992 年,又进一步推导、提出了 Pb 和 As 的土壤环境质量基准值^[16]。1994 年,周启星等以苜蓿为受试生物,推导、提出了复合污染条件下 Cd 和 As 的土壤环境质量基准值^[17-18]。杨居荣等在“七五”科技攻关期间,主要根据重金属元素在土壤-植物体系、土壤-微生物体系、土壤-水体系中的生态学效应和环境效应,确定了主要土壤重金属元素生态基准值^[19]。他们的主要研究思路和方法特点^[20]有:(1)注意到土壤类型的地带性分异,有针对性地确定了区域性土壤环境中部分重金属的质量基准值;(2)采用污染生态学的方法,主要考虑个体水平的影响,进行生态毒理实验、盆栽试验和大田调查,研究重金属的污染生态效应,来求出一些临界含量的值;(3)选取适于不同等级层次的指标体系及与之相应的评定标准,最后根据相对稳定的最低限量性法则确定土壤环境质

量基准值。所有这些工作,均为我国建立并于 1996 年颁布的土壤环境质量标准提供了基础数据和科学依据。

此后,国内其他学者运用环境地球化学法或运用生态地球化学法确定了浙江省、成都市、宜宾市、冀东地区的土壤中以重金属为主要元素的环境质量基准值。研究表明,各种元素的土壤环境质量基准值与全国土壤环境背景平均值存在很大差异,与土壤环境质量标准也存在较大差异。由于该方法既强调自然因素对土壤地球化学环境的决定作用,又强调人为因素对土壤地球化学环境的巨大影响,因而近年来更受研究者的青睐^[20]。例如,石俊仙和张青(2007)^[21]运用生态地球化学法,借助 GIS 以内蒙古自治区呼和浩特市 5 713 km² 为研究区域,将土壤中镉的空间分布规律与相关统计规律相结合,确定了研究区内 4 种典型的土壤亚类表层中重金属镉的环境质量基准值。她们通过对 933 个样品的分析,得到以下结论:呼和浩特市表层土壤中镉的环境质量基准值在洪积新积土中最高,达 0.117 mg·kg⁻¹;在淡栗褐土中最低,为 0.084 mg·kg⁻¹。

为了使获得的土壤环境质量基准更能反映我国环境污染的实际,周启星还开展了农业环境 Cr-酚复合污染条件下相关的土壤环境质量基准研究,并于 1996 年推导、提出了复合污染条件下 Cr 和酚的土壤环境质量基准值^[22];1997 年,周启星等还从食品安全的角度,进一步验证了复合污染条件下 Cr 和酚的土壤环境质量基准值^[23]。2001 年,周启星对我国有机染料的污染限值,从水环境到土壤环境,提出了最大允许浓度和相应的基准值的建议^[24]。2003 年,梁继东和周启星对除草剂乙草胺和杀虫剂甲胺磷的土壤环境质量基准限值也进行了推算和建议^[25]。2006 年,陈华等^[26]基于环境风险评价的目的开展了土壤风险基准值的研究工作,已得出污染场地的土壤中不对人体健康产生危害风险的污染物浓度界限值。土壤风险基准值的建立需要综合考虑污染物的生态毒理学效应、污染物在多相介质中的迁移转化规律、土壤污染控制和修复水平等多方面因素。

2003 年,周启星等率先开展了我国污染土壤修复基准的研究,以我国南太湖地区为例,提出了水稻土磷的推荐临界水平,即磷污染土壤修复基准值^[27]。同一年,周启星等在第 212 次香山科学会议上正式提出了关于系统开展污染土壤修复基准研究的建议^[28],标志着我国污染土壤修复基准研究的开端。2004 年,

周启星在我国又率先提出了开展污染土壤修复标准建立的方法体系研究^[29],呼吁从国家层面开展污染土壤修复标准制定的研究工作。与此同时,还启动了《污染土壤修复基准建立的方法体系、案例研究与评价》的博士论文^[30]。特别是2010年,周启星从我国农业环保问题的角度,对国内外污染土壤修复基准研究与标准制定进展进行了分析与总结^[31],为我国开展这一方向的研究奠定了基础。

然而,我国土壤生态毒理研究的起步较晚,至今还没有针对我国的土壤类型和土地利用类型开展过较为系统的土壤生态毒理研究,甚至自发针对1~2种土壤类型或1~2种不同土地利用类型开展的生态毒理研究也比较少见,这导致了基于我国人群特点、自有物种特性和土壤类型以及土地利用方式的土壤环境基准基础数据十分匮乏,至今还没有能够建立一套可用于支撑土壤质量评价和生态风险评估的环境质量基准值,严重影响了我国土壤环境标准制定的准确性和科学性^[32]。其主要原因在于,长期以来我国对土壤环境污染的重视程度远不及水污染和大气环境污染,对土壤环境污染造成的人体健康风险和生态环境破坏重视不够。与发达国家相比,我国在土壤环境基准研究成果与生态风险管理决策上的技术成就和管理水平相去甚远。尤其是,由于土壤环境基准和标准的严重缺失,我国现有土壤污染的风险评价技术和方法显得无法操作和运转,这对我国土壤环境质量管理及土地的可持续利用显然不利。因此,适时开展全面、

系统的,特别是国家层面的土壤环境基准研究,对构建土壤环境标准、制定土壤环境保护对策,开展污染土壤综合治理、搞好土地环境规划和保护土地资源等,都具有重要的现实意义。

近年来,为了使土壤环境基准研究得到有关方面的重视,有关方面连续召开了多场相关学术会议,相关领域专家在会上做了重要学术报告,对系统开展土壤环境基准研究给予了呼吁。例如,2008年7月,由中国工程院、中国科学院沈阳应用生态研究所、南开大学和沈阳大学共同主办的首届土壤环境基准国际研讨会和中国科学院污染环境修复基准研究学术研讨会分别在沈阳召开;2009年1月和11月,“环境基准与生态修复”高层论坛和“首届全国环境基准与生态修复博士生论坛”分别在南开大学举行。2010年,我国环境保护部还启动了“我国土壤环境基准体系及其支撑技术研究计划框架”的研究项目,并得到有关方面的全力支持。

4 今后研究展望

我们认为,在我国,今后土壤环境基准及相关研究可以分为两个阶段(图3)进行。第一阶段是围绕土壤环境基准开展系统研究。具体包括:(1)土壤环境保护、污染防治对策与决策支持系统研究;(2)土壤环境背景研究及其与质量基准的关系及高背景土壤环境基准研究;(3)土壤污染的生物生态诊断指标体系研究;(4)基于食物链暴露途径的农业土壤环境质量基准研究;(5)符合我国环境实际的污染土壤修复基准的系统研究;(6)基于风险的农田灌溉水质基准研究;(7)污染场地蒸发质量基准研究;(8)以风险为导向的地下水水质基准研究;(9)以风险为导向的污泥农用准则与基准研究;(10)基于直接接触土壤与土壤-地下水暴露途径下的土壤环境质量基准研究。

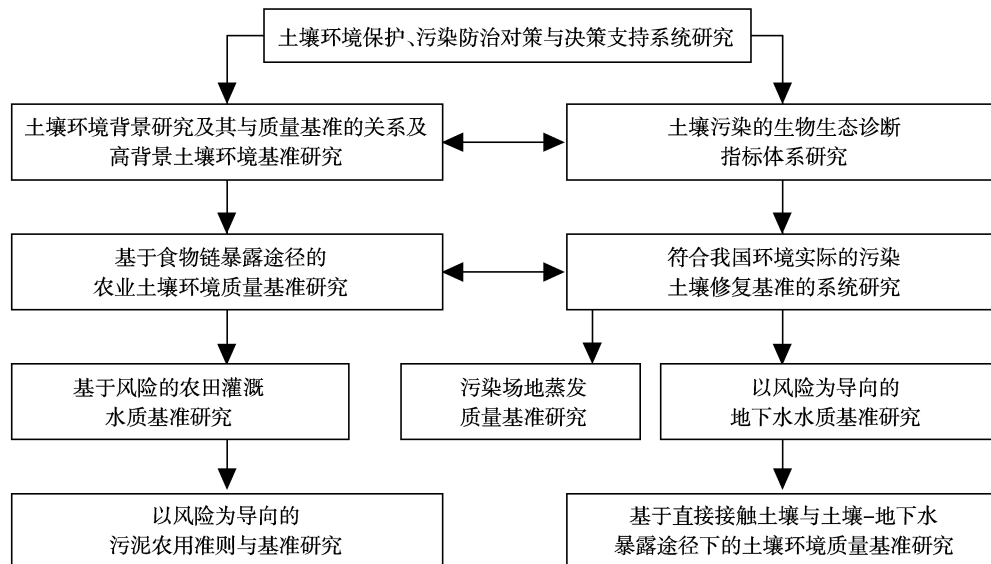


图3 土壤环境基准研究路线图及开展研究的先后顺序

Figure 3 The researching route and sequence of soil-environmental criteria

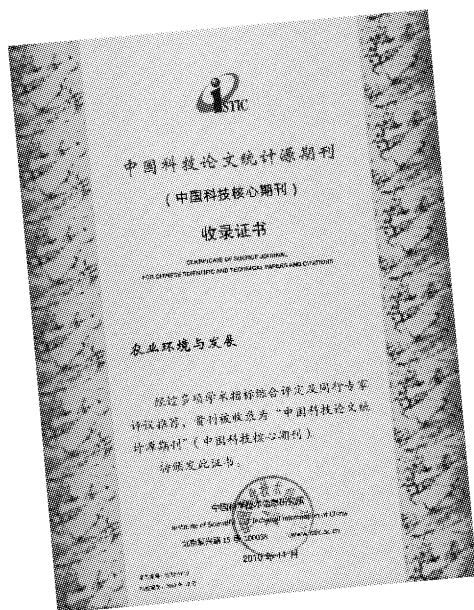
土壤环境质量基准研究;(5)基于直接接触土壤与土壤-地下水暴露途径下的土壤环境质量基准研究;(6)符合我国环境实际的污染土壤修复基准的系统研究。第二阶段是与土壤环境基准有关的外围研究,包括:(1)以风险为导向的地下水水质基准研究,包括污染场地地下层地下水的基准研究;(2)污染场地蒸发质量基准研究;(3)基于风险的农田灌溉水质基准研究;(4)以风险为导向的污泥农用准则与基准研究。

一般来说,土壤环境基准研究是一个相互联系的系统工程^[13,33],各研究内容之间相互联系、互为参照,最好同时开展和进行。但考虑到轻重缓急,建议首先、尽快开展农业土壤环境质量基准的综合研究和污染耕地土壤修复基准的系统研究,从农业土壤环境质量基准和污染耕地土壤修复基准研究方面积累经验与方法学,为土壤环境基准的进一步研究打下基础。为了节约研究资源,建议对现有的土壤环境基准相关研究成果进行数据质量的评价^[2,33],特别是对目前已有的涉及我国土壤种类的基础生态毒理数据进行广泛收集、整理、筛选和评价。也就是说,为了更好利用已有的土壤环境基准研究成果,当前特别需要加强开展基于我国主要地貌类型以及地带性土壤类型的生态毒理学基础研究^[34-35],这也是近期内能够尽快建立起适用于我国各地区使用的土壤环境基准的首要办法。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wood G. Thresholds and criteria for evaluating and communicating impact significance in environmental statements: "See no evil, hear no evil, speak no evil"[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2008, 28(1): 22-38.
- [3] Bhattacharya R N, Pal R. Environmental standards as strategic outcomes: A simple model[J]. *Resource and Energy Economics*, 2010, 32(3): 408-420.
- [4] 夏青. 水质基准与水质标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [5] 孙铁珩, 李培军, 周启星. 土壤污染形成机理与修复技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [6] 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.
- [7] Gan S, Lau E V, Ng H K. Remediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172(2-3): 532-549.
- [8] Gavrilescu M, Pavel L V, Cretescu I. Characterization and remediation of soils contaminated with uranium[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(2-3): 475-510.
- [9] 孟伟, 刘征涛, 张楠, 等. 流域水质目标管理技术研究(II): 水环境基准、标准与总量控制[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 1-8.
MENG Wei, LIU Zheng-tao, ZHANG Nan, et al. The study on technique of basin water quality target management II: Water environmental criteria, standard and total amount control[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(1): 1-8.
- [10] Acton D F, Gregorich L J. The health of our soils. Towards sustainable agriculture in Canada [R]. Agriculture and Agri-Food Canada, Ottawa, Canada, 1995.
- [11] Karlen D L, Mausbach M J, Doran J W, et al. Soil quality: A concept, definition and framework for evaluation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61: 4-10.
- [12] Doran J W. Soil quality and health: The international situation and criteria for indicators[A]. Proceedings, Workshop on Soil Quality Indicators for New Zealand Agriculture[C]. 8-9 February 1996, Lincoln University, Christchurch, New Zealand, 1996.
- [13] Fernández M D, Vega M M, Tarazona J V. Risk-based ecological soil quality criteria for the characterization of contaminated soils. Combination of chemical and biological tools[J]. *Science of The Total Environment*, 2006, 366(2-3): 466-484.
- [14] 周启星. 用土壤背景值制订土壤环境质量基准的研究(硕士论文)[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 1989.
- [15] Wu Y Y, Zhou Q X, Adriano D C. Interim environmental guidelines for cadmium and mercury in soils of China[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1991, 57-58: 733-743.
- [16] Wu Y Y, Tian J L, Zhou Q X. Study on the proposed environmental guidelines for Cd, Hg, Pb, and As in soil of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1992, 4(1): 66-73.
- [17] Zhou Q X, Gao Z M. Compound contamination and secondary ecological effects of Cd and As in soil-alfalfa ecosystems[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 1994, 6(3): 330-336.
- [18] 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.
- [19] 杨居荣, 许嘉琳. 灰钙土重金属生态基准[J]. 中国环境科学, 1995, 15(3): 177-182.
YANG Ju-rong, XU Jia-lin. Ecological criteria for heavy metals in sierozem[J]. *China Environmental Science*, 1995, 15(3): 177-182.
- [20] 石俊仙, 郜翻身, 何江. 土壤环境质量铅镉基准值的研究综述[J]. 中国土壤与肥料, 2006, (3): 10-15.
SHI Jun-xian, GAO Fan-shen, HE Jiang. Review of the research on environmental quality criteria of lead and cadmium in soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006, (3): 10-15.
- [21] 石俊仙, 张青. 呼和浩特市表层土壤重金属镉的基准值研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(6): 577-581.
SHI Jun-xian, ZHANG Qing. The reference value of Cd in surficial soil

- of Hohhot [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2007, 26 (6): 577–581.
- [22] Zhou Q X. Soil–quality guidelines related to combined pollution of chromium and phenol in agricultural environments[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 1996, 2(3): 591–607.
- [23] Zhou Q X, Zhu Y M, Chen Y Y. Food–security indexes related to combined pollution of chromium and phenol in soil–rice systems[J]. *Pedosphere*, 1997, 7(1): 15–24.
- [24] Zhou Q X. Chemical pollution and transport of organic dyes in water–soil–crop systems of the Chinese Coast[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2001, 66(6): 784–793.
- [25] Liang J D, Zhou Q X. Single and binary–combined toxicity of methamidophos, acetochlor and copper acting on earthworms *Esisenia Foelide* [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 71 (6): 1158–1166.
- [26] 陈华, 刘志全, 李广贺. 污染场地土壤风险基准值构建与评价方法研究[J]. 水文地质工程地质, 2006(2): 84–88.
CHEN Hua, LIU Zhi–quan, LI Guang–he. A study of the establishment and evaluation method of the soil risk guideline of contaminated sites [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006(2): 84–88.
- [27] Zhou Q X, Zhu Y M. Potential pollution and recommended critical levels of phosphorus in paddy soils of the southern Lake Tai area, China [J]. *Geoderma*, 2003, 115(1–2): 45–54.
- [28] 周启星, 孙铁珩. 关于系统开展污染土壤修复基准研究的建议[C]//香山科学会议第 212 次学术研讨会论文集. 2003: 126–135.
- [29] 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.
- [30] 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]. 北京和沈阳: 中国科学院博士论文, 2007.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] van Straalen N M, Denneman C A J. Ecotoxicological evaluation of soil quality criteria[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1989, 18 (3): 241–251.
- [34] Allen H E. The significance of trace metal speciation for water, sediment and soil quality criteria and standards[J]. *Science of The Total Environment*, 1993, 134(1): 23–45.
- [35] Kuperman R G, Amorim M J B, Römbke J, et al. Adaptation of the enchytraeid toxicity test for use with natural soil types[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42(Suppl 1): 234–243.



《农业环境与发展》 入选中国科技核心期刊

欢迎踊跃投稿!