

我国农业环境研究中值得关注的几个科学问题

唐世荣, 高尚宾, 丁永祯, 邓小芳, 赵玉杰, 李中阳

(农业部环境保护科研监测所生态毒理与环境修复研究中心, 天津 300191)

摘要:我国农业环境保护研究经历 30 余年的发展,在许多方面已取得显著的成就。但随着全球化环境保护问题的出现,我国农业环境研究面临越来越严峻的挑战。因此,需要发展农业环境科学。在此背景下,本文提出我国农业环境研究中值得关注的 4 个科学问题:不同尺度条件下农业污染物的时空变异、有毒有害物质的生物有效性与植物毒性、以污染农田生态修复或安全生产为目标的功能作物物种选育与作物种植结构调整以及农业产地禁产区“边生产、边修复、边监测”的综合防治途径,并对以上 4 个科学问题的国内外研究现状进行了综述,在此基础上探讨了其今后的发展趋势。

关键词:农业环境;研究;科学问题

中图分类号:X-1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)01-0001-07

Some Scientific Issues Concerning the Agro-environmental Research in China

TANG Shi-rong, GAO Shang-bin, DING Yong-zhen, DENG Xiao-fang, ZHAO Yu-jie, LI Zhong-yang

(The Centre for Research in Ecotoxicity and Environmental Remediation, Agro-Environmental Protection Institute of Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: Much progress has been made in many aspects of agro-environmental protection in China following more than thirty years of development. The occurrence of global environmental protection issues makes the agro-environmental research in China face increasing challenge. Therefore, it is necessary to develop the agro-environmental sciences. Taking this into consideration, we proposed and analyzed four scientific issues worthy of receiving attention in the field of agro-environmental research. They were as follows: spatio-temporal variations in agricultural contaminants in agro-environments under various scale conditions; bioavailability of toxic and hazardous substances and their phyto-toxicity; screening of function crop species for ecoremediation and food safety production, and crop plantation adjustment; comprehensive ways of protection and remediation focusing on “excising remediation while keeping production and monitoring”. The state of the art as well as the developing trends concerning the above mentioned four scientific issues were also summarized and discussed in the paper.

Keywords: agro-environment; research; scientific issues

人们开始关注农业环境的时间大约始于上世纪 60 年代初期,经过 40 余年的曲折历程,农业环境的保护和治理已取得显著成就。但经济全球化和全球化环境保护问题的出现,则对农业环境保护提出了更大的挑战。在我国,长期高速和超高速的经济增长,使农业环境污染问题日益严重:由原来单纯的生产业污染过渡到生产和生活污染并存,工业污染过渡到工业、

农业复合污染并存,特别是农药和农用化学物质的大量使用使环境和生态问题异常突出,波及范围越来越大;城市化、气候异常、生物多样性减少等使农业生态系统变得越来越脆弱;新化学品的使用加速了生物抗性基因的消失;工业化和乡镇企业的迅速发展使得数以十万公顷的良田受到严重污染……。我国开展农业环境研究已有 30 年余年的历史,已在该领域取得较大的成就。在上世纪 70 年代初,就开始组建国家级和地方级监测所、研究所,并在一些大专院校及科研院所设立相应的研究机构从事农业环境研究。尽管如此,我国的农业环境污染形势仍然严峻,不容乐观,农业环境研究面临重大挑战。本文在参阅大量国内外文

收稿日期:2008-12-20

基金项目:国家自然科学基金(40773078,20477035);广州市科技局计划项目(2005J1-C0021)

作者简介:唐世荣(1963—),男,博士,研究员,从事污染环境生态修复学方面的研究工作。E-mail: tangshirong@cae.org.cn

献的基础上,提出我国农业环境研究中需要特别关注的4个问题。

1 不同尺度条件下农业污染物的时空变异

农业环境中有毒有害物质,由于其参与地球化学循环的背景和自身的地球化学性质不同而展示出较大的时空变异性^[1]。由于所有的农业环境问题都发生在一定的时间与空间范围内,时空变异性问题始终是农业环境研究的关键问题之一^[2]。对农业污染物时空变异规律的认识在环境污染物监测、污染农田修复、农业产地禁产区划分与农作物结构调整中具有重要意义,同时,也是对农业污染物实施从源头控制到末端治理的重要依据。

农业污染物研究涉及到不同的时空尺度,可以在厘米、微米、纳米尺度上开展微观研究,也可以在数米、数十米、数百米甚至跨区域、跨流域尺度上开展宏观研究。要全面认识农业污染物的迁移、聚集与归趋途径,不仅要站在微观尺度上看到“一棵树木”的细微、超微结构,还要站在宏观尺度上看到整个“森林”的概貌。现代科学技术的发展(如“3S”技术——“GIS, RS, GPS”技术的总称)使人们在跨流域、大区域甚至全球水平上研究农业污染物的迁移转化及归趋途径成为可能,也使得世界各国科学家的大区域性或全球性合作研究成为可能。由于一个尺度上研究得出的结论,不一定适合于另一个尺度的情况。因此,农业环境问题研究一定要与时空尺度紧密结合。如探讨土壤中粘土矿物对有毒有害物质的吸附与解吸问题适合纳米尺度上进行,而研究土壤剖面中有毒有害物质的垂直分布更适合在厘米级尺度上进行,开展大田条件或者污染场地的土壤质量调查时则宜在米级尺度上进行,开展区域或者跨区域的土壤污染制图等则是在数十米到数百米的尺度上进行。再如小区域溪流中硝酸盐含量的短期变化与土壤湿度、温度和区内降雨强度关系密切;大区域河流盆地中硝酸盐的长期搬运变化则受居民的数量、废水处理情况、流域盆地内农业作业强度以及基岩、土壤质地、年净沉降量等多种因素的影响;而从全球尺度上看,硝酸盐年平均含量和硝酸盐向海洋的输入主要与流域盆地内人口有关。一般说来,时空尺度越大,研究的方法与手段综合性更强,集成度更高,涉及到的学科也就越多。

目前国外对环境污染物的时空变异研究主要集中在沉积物、地下水和野生水体环境中动物体内有毒有害物质的时空变异性^[3-7]。这类研究中,使用的方法和

手段非常有限,多采用野外采样分析辅以“3S”数据处理与制图技术。

目前国外对天然沉积物、地下水和水体环境中动物体内有毒有害物质的时空变异性^[3-7],多采用野外采样分析辅以“3S”数据处理与制图技术。如 Kumar et al^[1]利用地球化学聚类分析和基于GIS的光栅图像方法研究了五种重金属的时空变异。结果发现,标准化差异分散系数图(Normalized Difference Dispersal Index (NDDI) maps)能够较好地反映地下水环境中多种重金属的时空变异性。农业污染物的时空变异研究也大多采用类似的方法与手段^[8]。在农业污染物时空变异研究中,取样方法与技术及代表性是最关键的环节之一。同时,“3S”技术的渗透,极大地增强了数据表达能力、时空数据挖掘能力和时空数据管理与支持能力,为动态揭示农业污染物的分布、迁移、转化规律提供了强有力的研究手段。

近十年来我国对农业环境中的重金属、放射性核素、有机污染物等的分布、迁移、转化规律进行了大量研究。在农业污染物时空变异性方面做过一些探索^[9-13],但由于资金、人力和技术等因素,研究广度和深度受到很大的限制。因此,今后仍需要运用多学科的理论与方法,深入研究农业污染物的时空分布、变异及影响因素,风险分析与评价理论、方法及数学模型,农业环境质量和农产品安全的信息管理与风险预测预警机制等,探讨不同尺度条件下,农业污染物在水-土-气介质中的特征-环境行为-生物积累之间的时空耦合关系。

2 有毒有害物质的生物有效性与植物毒性

农业环境中有毒有害物质的含量可大致分成两大部分,生物有效性部分和生物无效部分。生物有效性是指能够被生物可利用的部分,绝对生物有效性特指能被特定生物利用的部分。生物有效性受气候、pH值、氧化还原电位、生物(植物、微生物等)、矿物组成、温度、元素存在形式、元素之间的相互干扰等的影响。

土壤中污染物生物有效性研究历史不长,多以重金属为主。在农业环境中有毒有害物质的生物有效性研究方面,受到关注的重金属元素包括Al、As、Be、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Se、Sb、Ag、Ba、Co、Mn、Mo、Ti、V和Zn等。重金属的生物有效性是衡量其迁移性和生态影响的关键参数,在植物毒性、禁产区农产品安全生产、污染农田生物调控等方面起着关键作用。

生物有效性评价比较复杂,尚缺乏统一标准。常

用的评价方法主要有物理化学法和土壤生物学评价法两大类。经常使用的物理化学法包括化学总量预测法、化学一步提取法、顺序提取法^[14-15]、自由离子活度法(唐南膜平衡法)等^[16-18]。通过土壤中金属元素形态分析或分级分析的化学提取法获得土壤中金属元素的形态分布,并与植物中金属元素的含量建立相关分析是评价土壤中重金属元素生物有效性的常用方法。模型计算也是预测或评价环境介质中污染物生物有效性与生物毒性的重要方法,该方法主要用于水体中污染物的生物毒性评价^[19],对土壤中污染物的生物有效性或毒性评价研究涉及较少^[20]。唐南膜平衡技术(Donnari Membrane Technique, DMT)也是测定土壤溶液中金属离子浓度,评价土壤中金属元素植物有效性的重要方法^[17]。最近发展起来的同位素示踪(稀释)技术测定土壤中污染重金属或痕量微量元素有效性,被认为是一种很有应用前景的方法。该方法具有干扰性少、灵敏度和准确度高、直接和准确等优点^[21-23]。随着同位素技术的进一步发展,利用同位素技术测定土壤中无机及有机污染物有效性将会拥有更为广阔的应用前景。

土壤生物学评价法是一种最直观的方法,主要包括生物指数法(BI)、微生物指示法、植物指示法、土壤指示动物监测法^[24]。其中植物指示法是依据指示植物体中重金属元素的含量直接评价污染土壤中重金属的生物有效性,因其经济、简便、可靠而成为目前最有应用前景的方法之一。由于不同植物对重金属的吸收能力差异较大,且植物不同生长阶段和不同部位吸收重金属能力都有差别,所以植物指示法的关键是要解决指示植物及其指示器官的选定、适用范围、典型性和代表性等问题。目前用得较多的是黑麦幼苗法,小麦被认为是黑麦的替代植物^[24-25]。由于现有的高效指示植物数量有限,要推广使用植物指示法,需继续深入研究,以推出更多新的指示植物。

虽然重金属污染土壤的生物有效性研究国内外已做了大量的工作,但仍有许多问题需要深入探讨:(1)生物有效性是受生物体本身及污染物种类决定的,忽略生物体而仅仅依靠单一的化学分析方法评价重金属的生物有效性难以令人信服,必须在更详细研究的基础上,融合土壤学、化学、生物学、毒理学等相关学科的优势和技术手段,提出更为合理的生物有效性评价方法;(2)受经费、人力、物力等条件的限制,目前许多研究都是以室内或小区试验为主,对重金属含量较高的典型污染区关注较多,而相对忽视了轻度污

染区。实际情况是重金属含量较高,长期受单一污染元素影响强烈的典型污染区较少,多数情况下农田污染区为大面积的轻度污染区。因此,如何从微尺度、小区尺度拓展到田间尺度甚至流域尺度上对重金属的生物有效性开展研究,是今后应关注的重要问题。尤其是结合农业产地禁产区划分、农产品安全生产、生态修复和预测预警开展的重金属有效性研究,意义更为重大;(3)各种农艺措施(土壤中添加石灰和新型化学肥料、增施二氧化碳气肥、轮作和套作、选种不同作物品种等)对污染土壤中重金属元素的生物有效性的影响及改造程度与范围亟需深入研究,因为这方面的研究成果直接关系到禁产区农产品安全生产和产地的可持续发展。因此,进一步加强重金属生物有效性的理论研究,实现土壤学、化学和生物学的融合,对禁产区划分、农产品安全生产、生态修复和预测预警具有十分重要的应用价值。

污染土壤的植物毒性研究对污染土壤生态修复和污染土地上农产品安全生产具有十分重要的理论与现实指导意义。国外在植物毒害特别是重金属的植物毒害研究方面已做了大量的工作^[26-30],已建立的高等植物毒理试验方法包括植物根伸长试验、种子发芽试验和植物幼苗早期生长试验。研究表明,生长在重金属污染环境中的植物,随着重金属胁迫时间的延长和重金属浓度升高,植物受害程度加剧。当重金属在植物体内积累到一定数量时,发芽率、根伸长、幼苗生长、植物蒸腾作用和光合作用等正常生理活动受到明显干扰,对植物造成伤害甚至引起植物死亡^[31]。国内在污染土壤植物毒性研究方面也做了一些工作^[32-33]。如宋玉芳^[34]测定了水溶液和4种土壤条件下铜、锌、铅和镉单一污染对白菜种子发芽与根伸长的抑制率;薛培英等^[35]研究不同钾肥对Cd在根际土壤-植物系统中转移及植物有效性的影响等。

虽然国内外对植物毒性的研究取得了较大的进展,但某些方面仍需加强,尤其是研究尺度和研究深度等方面,有较大的拓展空间。从研究尺度上看,应从微尺度、小区尺度、田间尺度逐渐走向流域尺度(包括禁产区尺度);从研究深度上看,应从对植物生物量、根伸长研究逐渐拓展到分子水平,包括对植物细胞、酶、DNA等的损害、对植物根际营养的吸收等方面,并逐步形成以植物生长受抑或生物量减少、死亡或形态变异到土壤生态系统出现损伤等为依据的预测预警系统。根系扫描和基因工程技术是开展相关研究的重要手段。前者可以用来研究植物根系生物量、根伸

长等根参数与污染胁迫的关系^[36-38];后者可以通过将特殊基因转移到寄主植物获得重组基因的植物,以大幅度减少或增加作物对农业环境污染物的蓄积能力,从而适应在日益污染耕地中进行粮食安全生产的需要或提高植物修复污染耕地的效率^[39-41]。随着人们对土壤污染的重视,特别是对土壤修复及农产品安全生产的重视,污染土壤的植物毒性研究将会得到快速发展。

3 以污染农田生态修复或安全生产为目标的功能作物物种选育与作物种植结构调整

从农产品安全的角度来看,不同作物、同种作物不同品系之间蓄积污染物的能力差异很大^[42-49]。如杨居荣等^[50]认为,禾谷类作物对镉的耐性普遍高于蔬菜类;Athur et al^[51]根据体内 Cd 的积累量,把植物分为低积累型(如豆科)、中等积累型(如禾本科)和高积累型(如十字花科);Liu et al^[52]研究表明,莴苣、亚麻、向日葵、小麦、花生等作物较易积累 Cd。因此,功能物种的筛选显得尤为重要。所谓功能作物物种,是指那些具有低吸收、低积累遗传特性的物种和高吸收、超积累特性的物种。前者可用来保障中轻度污染的产地禁产区内农产品的安全生产。如 Li et al^[53]通过选育和推广 Cd 低积累向日葵品种,解决了美国向欧洲出口向日葵籽 Cd 含量过高的农产品贸易问题。这一方向已成为国际农业生物与环境科学交叉的前沿领域,对解决我国大面积农田中轻度污染和初级农产品安全生产矛盾问题具有重大意义^[54]。后者可用来为划分出的农业产地禁产区生态修复提供修复物种。如 Diao WP et al^[55]利用盆栽方法对 200 多种水稻品种进行了筛选,初步筛选到一些超积累镉的水稻基因型品种。王激清等^[56]利用水培方法从 22 个油菜品种中筛选出镉超积累油菜品种川油 II-10、白芥和绵阳蛮油菜。这些筛选出的超积累型作物可用于污染农田生态修复的功能物种。

超积累作物和超低量积累作物的筛选(即富集重金属的超积累植物和超低量吸收重金属的排除型植物筛选)主要有两条途径:一是采用传统的土培或水培方法查明植物对重金属的蓄积能力^[57];另一途径是直接到重金属污染土壤上进行大面积植物样品采集,再通过一系列的化学分析方法筛选出超积累重金属和超低量积累重金属的植物^[31]。以上两种方法存在着一定缺陷:针对性不强、筛选面窄、耗时耗力,难以满足重金属污染土壤治理和农产品安全生产的迫切需

求。更为重要的是,上述两种方法都对植物的遗传因素考虑过少,更多地强调环境因素对植物蓄积重金属的影响。而事实上,植物演化出耐受或富集重金属的特性往往受遗传因素和环境因素的双重影响。从某种意义上讲,遗传因素的影响可能更为重要。植物系统发育特征分析是目前揭示遗传因素对植物蓄积重金属影响的重要手段之一^[58-61]。该方法主要原理是:以参比植物(如印度芥菜)为桥梁,通过一定的数学方法将影响植物蓄积金属的因素标准化到同一平台上,最大程度限制环境因素的作用,突显遗传因素的重要性,并在此基础上研究遗传因素对植物蓄积重金属的影响。农业部环境保护科研监测所唐世荣博士及团队与英国西英格兰大学 Willey 教授合作,建立了 300 余种被子植物中的 $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ 比活度数据库,并对其进行相应的植物系统发育特征分析,结果筛选出近 60 种铯积累植物,查明超低量吸收 $^{137}\text{Cs}/^{134}\text{Cs}$ 的植物 20 余种。这项研究表明,植物系统发育特征分析在筛选超低量积累农作物用于污染农田的直接生产或筛选超积累植物用于污染土壤植物修复方面具有明显优势^[62]。随着计算机软件技术的飞速发展,将植物系统发育特征分析应用于超积累作物和超低量积累作物筛选将成为今后功能物种筛选的重要研究方向。

4 农业产地禁产区“边生产、边修复、边监测”的综合防治途径

我国土壤污染的总体形势严峻,土壤污染程度加剧。据不完全调查,目前全国受污染的耕地约有 0.1 亿 hm^2 ,污水灌溉污染耕地 216.7 万 hm^2 ,固体废弃物堆存占地和毁田 13.3 万 hm^2 ,合计约占耕地总面积的 1/10 以上,其中多数集中在经济较发达的地区^[61]。建设以人为本的和谐社会,对农业环境质量提出越来越高的要求。因此,修复与改善现已污染的农业环境尤其是污染的土壤已成为我国农业环境保护领域关注的热点,显现新的发展势头。总的趋势是建立生物修复为核心的集成修复技术,融合各种物理修复、化学修复以及工程技术措施,通过优化组合和技术再造,使之成为一种低成本、快速、高效的环境修复技术。需要重点关注的研究方向包括:(1)植物-微生物联合修复过程中植物根际环境的作用。植物微生物联合作用下根际环境中有毒有害物质的生物可获得性,根际微生物提高植物对重金属的积累或降解有机污染物的机理,根系分泌物调节与控制根际微生物对有毒有害物质的降解机理等;(2)生产过程中污染农田的调控

机理。产地环境质量与作物品质安全是世界各国均面临的严峻问题,在我国二者的矛盾也非常突出。目前大多数国家对污染农田处置办法主要是闲置处理,以避免出现农产品安全事故。但这种土地闲置处理办法对人口众多、耕地相对较少的中国来说是行不通的。污染受损耕地的被动闲置意味着农民可使用地减少,土地减少,就业机会随之减少,由此还会带来诸如治安、贫困等一系列社会问题。因此,将污染耕地大片地丢荒在中国是行不通的,唯一可行的办法是实施“边生产、边修复、边监测”的综合防治措施。但是我国目前在这方面的研究还比较少见,只有黑亮等^[63]、Wu et al^[64]和 Pan et al^[65]开创了这方面研究的先例,预计这方面的探索将成为今后的研究重点之一。

5 结语

综上所述,我国农业环境保护研究经过几十年的发展已经颇有成就,仍有许多重要的科学问题需要深入探索,这需多方面多学科理论与方法的渗透与融合。可以预见,再经过全国同行的共同努力,农业环境研究将一定会出现一个崭新的局面。

参考文献:

- [1] Kumar S and Pawar N J. Quantifying spatio-temporal variations in heavy metal enormity of groundwaters from Ankaleshwar area: GIS-based Normalized Difference Dispersal Index mapping[J]. *Current SCI*, 2008, 94(7):905-910.
- [2] Van der Perk M. Soil and Water Contamination From Molecular to Catchment Scale. Routledge, UK, ISBN: 978-0-415-40943-8 (hard-back), 2006.
- [3] Chase M E, Jones S H, Hennigar P, et al. Gulfwatch monitoring Spatial and temporal pattern of trace metal and organic contaminants in the Gulf of Maine (1991—1997) with the blue mussel *Mytilus edulis* L[J]. *Mar Pollut Bull*, 2001, 42:491-505.
- [4] Bleeker E A J, van Gestel C A M. Effects of spatial and temporal variation in metal availability on earthworms in floodplain soils of the river Dommel, The Netherlands[J]. *Environ Pollut*, 2007,148: 824-832.
- [5] Lansard B, Charmasson S, Gascó C, et al. Spatial and temporal variations of plutonium isotopes (²³⁸Pu and ^{239, 240}Pu) in sediments off the Rhone River mouth (NW Mediterranean)[J]. *Science the Total Environ*, 2007, 376:215-227.
- [6] Lucas L, Jauzein M. Use of principal component analysis to profile temporal and spatial variations of chlorinated solvent concentration in groundwater[J]. *Environ Pollut*, 2008,151:205-212.
- [7] Carro N, García I, Ignacio M, Mouteira A. Spatial and temporal trends of PCDDs and PCDFs in bivalve mollusc coming from Galicia (2000—2005). Possible relationship between biometric parameters and PCDDs and PCDFs levels[J]. *Chemosphere*, 2008,73: 43-49.
- [8] Pilar B, Engracia M, Alfredo P, et al. Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation[J]. *Geoderma*, 2006,30: 57-175.
- [9] 胡克林, 张凤荣, 吕贻忠, 等. 北京市大兴区土壤重金属含量的空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(3):463-468.
HU K L, ZHANG F R, LV Y Z, et al. Spatial distribution of concentrations of soil heavy metals in Daxing county, Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004,24(3):463-468.
- [10] 赵玉杰, 师荣光, 白志鹏, 等. 淄博优势玉米监测区土壤砷元素空间变异性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(1):187-191.
ZHAO Y J, SHI R G, BAI Z P, et al. Spatial variability analysis on soil arsenic in dominant maize monitoring area, Zibo[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(1):187-191.
- [11] 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 R G, ZHAO Y J, ZHOU Q X, et al. Spatial variability analysis of soil arsenic content in predominant agricultural area in the north of Jiangsu Province[J]. *Transactions of the CSAE*, 2008, 24(1): 80-84.
- [12] Zhao Y F, Shi X Z, Huang B, et al. Spatial distribution of heavy metals in agricultural soils of an industry-based peri-urban area in Wuxi, China[J]. *Pedosphere*, 2007,17(1): 44-51.
- [13] Wu C F, Wu J P, Luo Y M, et al. Statistical and geo-statistical characterization of heavy metal concentrations in a contaminated area taking into account soil map units[J]. *Geoderma*, 2008,144: 171-179.
- [14] Feng M H, Shan X Q, Zhang S Z et al. A comparison of the rhizosphere-based method with DTPA, EDTA, CaCl₂ and NaNO₃ extraction methods for prediction of bioavailability of metals in soil to barley[J]. *Environ Pollut*, 2005a, 137(2): 231-240.
- [15] Feng M H, Shan X Q, Zhang S Z et al. Comparison of a rhizosphere-based method with other one-step extraction methods for assessing the bioavailability of soil metals to wheat[J]. *Chemosphere*, 2005b, 59(7): 939-949.
- [16] Temminghoff E J M, Plette A C C, Van Eck R, et al. Determination of the chemical speciation of trace metals in aqueous systems by the Wangenigen Donnan Membrane Technique[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000, 417: 149-157.
- [17] Nolan A L, McLaughlin M J and Mason S D. Chemical speciation of Zn, Cd, Cu, and Pb in pore waters of agricultural and contaminated soils using Donnan dialysis[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37: 90-98.
- [18] 赵磊, 崔岩山, 杜心, 等. 利用道南膜技术(DMT)研究土壤中重金属自由离子浓度[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(11): 1565-1569.
ZHAO L, CUI Y S, DU X, et al. Study on free ion concentrations of heavy metals in soils by Donnan Membrane Technique[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(11): 1565-1569.
- [19] Arnold W R, Santore R C, and Cotsifas J S. Predicting copper toxicity in estuarine and marine waters using the Biotic Ligand Model[J]. *Mar Pollut Bull*, 2005, 50(12): 1634-1640.
- [20] Lock K, Van Eeckhout H, De Schampelaere K A C, et al. Development of a biotic ligand model (BLM) predicting nickel toxicity to barley (*Hordeum vulgare*)[J]. *Chemosphere*, 2007, 66(7): 1346-1352.
- [21] Ma Y B, Lombi E, Nolan A L, et al. Determination of labile Cu in soils

- and isotopic exchangeability of colloidal Cu complexes[J]. *Eur J Soil Sci*, 2006, 57 (2): 147–153.
- [22] Oliver I, Ma Y B, Lombi E, Nolan A, et al. Stable isotope techniques for assessing labile Cu in Soils: development of an L-value procedure, its application, and reconciliation with E values[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40: 3342–3348.
- [23] Hamon R, Bertrand I, McLaughlin M. Use and abuse of isotopic exchange data in soil chemistry[J]. *Aust J Soil Res*, 2002, 40: 1371–1381.
- [24] 窦磊, 周永章, 高全洲, 等. 土壤环境中重金属生物有效性评价方法及其环境学意义[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 576–583.
DOU L, ZHOU Y Z, GAO Q Z, et al. Methods and environmental implications of measuring bioavailability of heavy metals in soil environment [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(3): 576–583.
- [25] 薛澄泽, 刘俊华, 李宗利, 等. 用黑麦幼苗法测定土壤中污染元素的生物有效性[J]. 环境化学, 1995, 14(1): 32–37.
XUE C Z, LIU J H, LI Z L, et al. Determination of the bioavailability of pollutants in soil using the rye seedling method[J]. *Environmental Chemistry*, 1995, 14(1): 32–37.
- [26] Kashem A and Kawai S. Alleviation of cadmium phytotoxicity by magnesium in Japanese mustard spinach[J]. *Soil Sci Plant Nutr*, 2007, 53 (3): 246–251.
- [27] Corrêa A X R, Rörig L R, Verdinelli M A, et al. Cadmium phytotoxicity: Quantitative sensitivity relationships between classical endpoints and antioxidative enzyme biomarkers[J]. *Sci Total Environ* 2006, 357 (1–3): 120–127.
- [28] Cargnelli D, Tabaldi L A, Spanevello R M, et al. Mercury toxicity induces oxidative stress in growing cucumber seedlings[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(6): 999–1006.
- [29] Shanker A K, Cervantes C, Loza-Tavera H. Chromium toxicity in plants[J]. *Environ Int*, 2005, 31(5): 739–753.
- [30] Boonyapookana B, Upatham E S, Kruatrachue M, et al. Phytoaccumulation and phytotoxicity of cadmium and chromium in Duckweed *Wolffia globosa*[J]. *Int J Phytoremediat*, 2002, 4(2): 87–100.
- [31] 唐世荣. 污染环境植物修复的原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1–298.
TANG S R. The theory and method of phytoremediation for polluted environment. Beijing: Science Press, 2006: 1–298.
- [32] 翁磊, 方海兰, 江海绥. 污染土壤的植物毒性试验方法研究进展及其在城市土壤上的应用意义[J]. 上海农业科技, 2006(4): 20–22.
WENG L, FANG H L, JIANG H H. The research progress of the method of phytotoxicity on polluted soils and its applications on urban soils. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2006(4): 20–22.
- [33] 杨世勇, 王方, 谢建春. 重金属对植物的毒害及植物的耐性机制[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2004, 27(1): 71–74, 90.
YANG S Y, WANG F, XIE J C. Plant toxicity of heavy metals and the tolerant mechanisms of plants [J]. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, 2004, 27(1): 71–74, 90.
- [34] 宋玉芳, 许华夏, 任丽萍, 等. 土壤重金属对白菜种子发芽与根伸长抑制的生态毒性效应[J]. 环境科学, 2002, 23(1): 103–107.
SONG Y F, XU H X, REN L P, et al. Eco-toxicological effects of heavy metals on the inhibition of seed germination and root elongation of Chinese Cabbages in Soils[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(1): 103–107.
- [35] 薛培英, 张桂银, 褚卓栋, 等. 钾肥对小麦根际土壤镉的吸收及其植物毒性的影响. 生态环境, 2007, 19(6): 1424–1428.
XUE P Y, ZHANG G Y, CHU Z D, et al. Effect of potassium fertilizers on the absorption of cadmium in rhizosphere soils and its phytotoxicity [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 19(6): 1424–1428.
- [36] Aggarwal P, Choudhary K K, Singh A K, et al. Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management [J]. *Geoderma*, 2006, 136: 353–363.
- [37] Islam E, Yang X E, Li T Q, et al. Effect of Pb toxicity on root morphology, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 147: 806–816.
- [38] Perriguet J, Sterckeman T, Morel J L. Effect of rhizosphere and plant-related factors on the cadmium uptake by maize (*Zea mays* L.)[J]. *Environ Experi Botany*, 2008, 63: 333–341.
- [39] Cherian S and Oliveira M M. Transgenic plants in phytoremediation: recent advances and new possibilities[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39: 9377–9390.
- [40] Macek T, Kotrba P, Svatoš A, Nováková M, et al. Novel roles for genetically modified plants in environmental protection[J]. *Trends in Biotechnology*, 2007, 26 (3): 146–152.
- [41] Eapen, S, Singha Sand D'Souza SF. Advances in development of transgenic plants for remediation of xenobiotic pollutants[J]. *Biotechnol Adv*, 2007, 25: 442–451.
- [42] 王果, 李建超, 杨佩玉, 等. 有机物料影响下土壤溶液镉形态及其有效性研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(5): 621–626.
WANG G, LI J C, YANG P Y, et al. Study on the species in soil solutions and the availability of cadmium as affected by organic materials [J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2000, 20(5): 621–626.
- [43] Belimov A A, Safronova V I, Tsyganov V E, et al. Genetic variability in tolerance to cadmium and accumulation of heavy metals in pea (*Pisum sativum* L.)[J]. *Euphytica*, 2003, 131: 25–35.
- [44] Chafei C H, Gorbil M H. Nitrogen metabolism of tomato under cadmium stress conditions[J]. *J Plant Nutr*, 2003, 26: 1617–1634.
- [45] 曾敏, 廖柏寒, 张永, 等. CaCO₃ 对黄豆生长过程中 Cd 毒害的缓解效应[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2004, 30(5): 453–456.
ZENG M, LIAO B H, ZHANG Y, et al. Mitigative effects of CaCO₃ to growth of clycine max in Cd-polluted soils [J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2004, 30(5): 453–456.
- [46] 谢建治, 张书廷, 刘树庆, 等. 潮褐土重金属 Cd 污染对小白菜营养品质指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 678–682.
XIE J Z, ZHANG S T, LIU S Q, et al. A effects of heavy metal cadmium on nutrition quality indicators of Non-Heading Chinese Cabbage in a polluted cinnamon soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(4): 678–682.
- [47] 孙北海, 郑春荣, 周东美, 等. 土壤 Cd 污染对青菜和蕹菜生长及 Cd 含量的影响. 农业环境科学学报, 2005, 24(3): 417–420.
SUN Z H, ZHENG C R, ZHOU D M, et al. Phyto-toxicity and uptake of cadmium by *Brassica chinensis* and *Ipomoea aquatica* in soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(3): 417–420.

- [48] Liu YG, Ye F, Zeng G M, et al. Effects of added Cd on Cd uptake by oilseed rape and pai-tsai co-cropping[J]. *Transactions of Nonferrous Metals of China*, 2007, 17(4): 846–852.
- [49] 朱芳, 方 炜, 杨中艺. 番茄吸收和积累 Cd 能力的品种间差异[J]. *生态学报*, 2006, 26 (12): 4071–4081.
- ZHU F, FANG W, YANG Z Y. Variations of Cd absorption and accumulation of 36 *Lycopersicon esculentum* cultivars[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (12): 4071–4081.
- [50] 杨居荣, 贺建群, 黄 翌, 等. 农作物 Cd 耐性的种内和种间差异—II [J]. *应用生态学报*, 1995, 6: 132–136.
- YANG J R, HE J Q, HUANG Y, et al.. Inter- and intraspecific differences of crops in cadmium tolerance—II [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6: 132–136.
- [51] Athur E, Crews H, and Morgan C. Optimizing plant genetic strategies for minimizing environmental contamination in the food chain[J]. *Int J Phytoremediat*, 2000, 2(1): 1–21.
- [52] Liu J G, Li K Q, Xu J K, et al. Interaction of Cd and five mineral nutrients for uptake and accumulation in different rice cultivars and genotypes [J]. *Field Crop Res*, 2003, 83(3): 271–281.
- [53] Li Y M, Chaney R L, Schnitzer A A, et al. Genotypic variation in kernel cadmium concentration in sunflower germplasm under varying soil conditions [J]. *Crop Sci*, 1995, 35: 137–141.
- [54] Yu H, Wang J L, Fang W, et al. Cadmium accumulation in different rice cultivars and screening for pollution-safe cultivars of rice[J]. *Science the Total Environ* 2006, 370(2–3): 302–309.
- [55] Diao W P, Ni W Z, Ma H Y, et al. Cadmium pollution in paddy soil as affected by different rice (*Oryza sativa* L.) cultivars [J]. *B Environ Contam Tox*, 2005, 75 (4): 731–738.
- [56] 王激清, 张宝悦, 苏德纯. 修复镉污染土壤的油菜品种的筛选及吸收累积特征研究——高积累镉油菜品种的筛选(I) [J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2005, 21(1): 58–61.
- WANG J Q, ZHANG B Y, SU D C. The study on selection of rape species in phytoremediated cadmium contaminated soil and their cadmium absorbing characters selection of oilseed rape species with higher cadmium accumulation[J]. *Journal of Hebei North University(Natural Science Edition)*, 2005, 21(1): 58–61.
- [57] Utmazian M N D S, Wieshammer G, Vega R, et al. Hydroponic screening for metal resistance and accumulation of cadmium and zinc in twenty clones of willows and poplars [J]. *Environ Pollut*, 2007, 148: 155–165.
- [58] Broadley M R, Bowen H C, Cotterill H L, et al. Phylogenetic variation in the shoot mineral concentration of angiosperms[J]. *J Exp Bot*, 2004, 55 (396): 321–336.
- [59] Hodson M J, White P J, Mead A, et al. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants[J]. *Ann Bot*, 2005, 96 (6): 1027–1046.
- [60] Willey N, Fawcett K. A phylogenetic effect on strontium concentrations in angiosperms[J]. *Environ Exp Bot*, 2006, 57: 258–269.
- [61] Willey N, Fawcett K. Species selection for phytoremediation of $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ using angiosperm phylogeny and inter-taxa differences in uptake [J]. *Int J Phytoremediat*, 2005, 7 (4): 295–306.
- [62] Willey N, Tang S, and Watt N R. Predicting inter-taxa differences in plant uptake of cesium-134/137[J]. *J Environ Qual*, 2005, 34: 1478–1489.
- [63] 黑亮, 吴启堂, 龙新宪, 等. 东南景天和玉米套种对 Zn 污染污泥的处理效应[J]. *环境科学*, 2007, 28(4): 852–858.
- HEI L, WU Q T, LONG X X, et al. Effect of co-planting of sedum alfredii and zea mays on Zn-contaminated sewage sludge[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 852–858.
- [64] Wu Q T, Hei L, Wong J W C, et al. Co-cropping for phyto-separation of zinc and potassium from sewage sludge [J]. *Chemosphere*, 2007, 68: 1954–1960.
- [65] Pan S W, Wei S Q, Yuan X et al. The removal and remediation of phenanthrene and pyrene in soil by mixed cropping of alfalfa and rape [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(11): 1355–1364.