第 43 卷 第 1 期　　土 壤 学 报　　Vol. 43 ,No. 1
2006 年 1 月　　ACTA PEDOLOGICA SINICA　　Jan. ,2006

土壤环境质量指导值与标准研究
Ⅱ. 污染土壤的健康风险评估 *

李志博[1,2]　骆永明[1,2†]　宋　静[1]　赵其国[1]　刘志全[3]
(1 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心,土壤与农业可持续发展国家重点实验室,南京　210008)
(2 中国科学院研究生院,北京　100039)
(3 国家环境保护总局科技标准司,北京　100035)

摘　要　快速城市化进程与工业发展,使得土壤污染日益严重。污染物进入土壤后,经水、气、生物等介质传输,通过饮水、呼吸、饮食、皮肤吸收等途径引起人体暴露,带来健康风险。污染土壤健康风险评估是制定土壤环境质量标准的基础,是一项新的环境管理技术与手段。我国污染土壤的健康风险评估还非常欠缺,为了推动其发展,本文讨论了其研究进展、方法、存在问题与发展趋势。当前,还缺乏准确定量的风险表征方法,评估过程中还具有较大不确定性。污染土壤的健康风险评估正在向多介质、多途径以及多种污染物暴露的方向发展,模型模拟的方法将会得到更多的应用。为了建立准确定量风险评估方法,在未来研究中需要加强对风险评估相关机理研究。这包括污染物的迁移传输规律、污染物的剂量 - 效应关系和人群生活方式等。

关键词　污染土壤;暴露;健康风险评估;土壤环境质量标准
中图分类号　S651　　**文献标识码**　A

风险评估是近几十年来兴起的一项管理技术与政策,着重于权衡风险级别与减少风险成本,解决风险级别与社会所能接受风险之间的关系[1]。环境健康风险评估是表征因环境污染所致的潜在健康效应过程[2],主要评估区域内或场地污染对人体健康造成的影响与损害,以便确定环境风险类型与等级,预测污染影响范围及危害程度,为风险管理提供科学依据与技术支持。早在 1986 年联合国环境规划署(UNEP)、世界卫生组织(WHO)、国际原子能机构(IAEA)就联合呼吁各国开展环境风险评估与管理活动[3~5]。许多国家均在环境风险评估理论和方法取得了一系列重要成果,其中以美国最为显著[6,7]。日本、荷兰、英国等国家已开始应用风险评估理论与方法来制定环境标准与法规,管理本国广泛复杂的环境问题[8~10]。

土壤是自然地理要素之一,能够为人类提供食物等生产资料,是社会经济可持续发展的基础[11]。随着经济快速发展和人类活动加剧,各种人为源释放的污染物进入土壤[12],并通过水、气、生物等介质传输引起人体暴露。人体长期暴露于重金属污染物(如 Pb、Cd、Hg、As 等)会引起神经系统、肝脏、肾脏等损害[13~15],而暴露于多氯联苯(PCBs)、多环芳烃(PAHs)等持久性有机污染物(POPs),癌症发病机率大大升高,并干扰与损害内分泌系统[16]。因此,人们对土壤环境污染所带来的健康效应越来越关注,污染土壤的健康风险评估越来越多应用于污染控制与风险管理[9,17,18]。我国土壤污染形势日益严峻,开展健康风险评估可以为我国土壤环境政策与法规制定提供基础,并为污染土壤修复与管理服务[19]。目前,这方面的工作在我国还非常欠缺。因此,评述污染土壤的健康风险评估研究进展与内容,探究当前存在问题,展望其发展趋势,对于推动我国污染土壤健康风险评估无疑具有重要意义。

1　污染土壤健康风险评估研究进展

1.1　健康风险评估方法概况

1983 年美国国家科学院提出了健康风险评估的定义与框架,以及危害判定、剂量 - 效应关系评

* 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB410810/09)、国家杰出青年科学基金项目(40125005)、国家自然科学基金重点项目(40432005)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-429)资助
† 通讯作者, E-mail: ymluo@issas.ac.cn
作者简介:李志博(1978～),山东淄博人,博士研究生,主要从事土壤污染的风险评估和修复研究
收稿日期:2005-03-30;收到修改稿日期:2005-08-30

估、暴露评估和风险表征的风险评估四步法[2]。这对健康风险评估具有里程碑意义,被许多国家健康风险评估程序所采用。随后,美国环境保护署(USEPA)颁布了一系列技术性文件、导则和指南,来系统介绍环境健康风险评估方法、技术,如《健康风险评估导则》、《暴露风险评估指南》、《暴露因子手册》、《超级基金场地健康风险评估手册》等[7]。美国有毒物质与疾病登记署(ATSDR)也提出了健康风险评估方法体系[20]。荷兰、英国等欧洲国家的风险评估体系也相继建立起来[9,10]。欧洲环境署(EEA)于 1999 年颁布了环境风险评估的技术性文件,系统介绍健康风险评估的方法与内容[21]。总体来说,健康风险评估的理论框架与方法已经建立起来,并已应用于实际风险管理。但是,当前评估过程中以定性和半定量为主,缺乏定量化的风险评估方法,风险评估过程中也具有较大的不确定性。

1.2　污染土壤健康风险评估概况

污染物进入土壤后,会经呼吸、饮水、直接摄入、皮肤吸收以及摄入食物等暴露途径引起风险,其中食物链传递风险一直是污染土壤健康风险评估中关注的重点内容[22]。总体来看,污染土壤健康风险评估在各个阶段的研究内容和侧重也各不相同。

20 世纪 90 年代初期,研究重点集中于重金属污染物。儿童摄入土壤风险是主要研究内容,其中儿童 Pb 暴露尤为被关注[23~25]。随着对环境内分泌干扰物研究的深入,有机污染物健康风险评估也相继开展起来,USEPA 于 1993 年颁布了《多环芳烃的临时定量风险评估指南》[26],并于 1995 年建立了综合风险信息系统,其中就包括许多重金属与有机污染物风险信息[27]。

20 世纪 90 年代中期,污染物经土壤向地下水迁移引起的暴露、挥发性有机物经土壤向空气释放引起的暴露、以及土壤污染物的皮肤吸收与暴露受到关注[28~31]。但由于对皮肤吸收的机理缺乏足够了解,在暴露计算中存在着较大的不确定性,皮肤吸收暴露仍然是目前研究的一项重要内容。这一时期,污染土壤的健康风险评估开始关注多来源、多介质、多途径、复合污染的健康风险。但是,对于多种污染物的相互作用来说,往往采取简单的加和效应,其协同或拮抗效应还不清楚,因此带来了较大的不确定性。

20 世纪 90 年代末期,模型方法被越来越多应用于评估污染土壤的暴露风险,例如随机模拟模型、模糊理论模型以及基于 GIS 技术的评估模型等,许多应用于污染土壤风险管理的模型也被开发出来,例如荷兰的 CSOIL 模型[9]。蒙特卡罗等模拟方法被更多地用于风险评估中不确定性分析[32]。

进入本世纪,污染土壤健康风险评估更加注重定量化和减小评估过程中的不确定性。污染物的协同或拮抗效应影响着污染的暴露风险,因此许多学者和机构开始研究混合污染物暴露中的相互作用与风险评估方法[33]。随着 GIS、RS、GPS 技术的发展,大尺度暴露风险的空间分布规律受到关注,例如 Pennington等建立了多介质归宿与空间分异结合的暴露模型,来研究西欧污染物释放—传输的多介质暴露风险[34]。风险评估者与公众以及管理决策部门进行风险交流可以更好地进行风险管理,有利于降低环境风险。因此,风险交流也开始受到关注与重视[35]。

1.3　国内污染土壤健康风险评估进展

污染土壤风险评估在我国也取得了一定进展,这主要体现在评估方法、评估基准、具体评估工作等方面。例如,胡二邦等较详细介绍了健康风险评估的技术与方法[36],马宝艳在其博士论文中论述了风险评估的理论、方法,并评估了 Pb 的暴露风险(1)。为保护在工业企业中工作或在工业企业附近生活的人群以及工业企业界区内的土壤和地下水,对工业企业生产活动造成的土壤污染危害进行风险评估,国家环保总局制定了《工业企业土壤环境质量风险评价基准》[37]。

对于具体的风险评估工作,国内学者对重金属与持久性有机污染(POPs)的土壤均开展了相关风险评估研究。赵肖等评估了因污水灌溉引起的土壤 As 污染暴露风险[38],任慧敏等评估了沈阳市土壤 Pb 污染所致儿童 Pb 中毒的潜在风险[39],李正文等通过研究水稻籽粒中 Cd、Cu 与 Se 的含量,简单估计了人类膳食摄入风险[40]。郭淼等估算了天津地区人群对六六六的暴露剂量[41]。总体来看,我国土壤环境健康风险评估多以应用国外评估方法为主,还没有建立完善的适合中国国情的评估方法与程序,当前所研究的污染物的范围还比较小。

当前,我国还没有一套成熟的污染土壤健康风险评估方法,这使得我国在健康风险评估中多采用国外方法。由于污染状况、饮食结构、人们的生活行为等

(1) 马宝艳. 区域生态风险评价研究. 中国科学院博士学位论文, 2000

特征不同,在暴露途径以及剂量效应方面都会不同,因此国外风险评估方法在我国的适用性值得商榷。

1.4 风险评估模型概况

污染土壤健康风险评估需要合理应用模型。根据功能不同,可以将风险评估模型分为模拟模型与管理模型。

1.4.1 模拟模型 当前主要有随机模拟模型、模糊理论模型等。随机模型是风险评估过程中常用的方法,主要是通过蒙特卡罗模拟来实现[42,43],并可进行不确定性分析与敏感性分析,确定敏感性变量。例如 Batchelor 等应用随机模型评估了污染场地上多氯联苯(PCBs)污染所致概率风险[44]。基于模糊理论的风险分析模型可以有效地反映风险的不确定性,但它很难确定风险的概率分布。Chen 等应用模糊理论模型进行石油污染场地风险评估[45],还建立了基于模糊理论的专家系统来估算污染物的非致癌风险[46]。应用 GIS 技术,可以有效识别与评估污染物各种暴露途径,对于评估污染土壤健康风险的空间变异具有独特优势,Su 将 GIS 技术与模糊理论结合起来对石油污染场地的风险进行了评估(2)。

1.4.2 管理模型 目前,许多综合管理模型被开发出来用于风险评估。这些模型包含许多模块,如污染物传输模块、暴露模块、风险计算模块等。荷兰的 CSOIL 模型可以对污染场地进行风险评估,并可用来推导与制定土壤污染标准[9]。荷兰 Van Hall 研究所开发的 Risc Human 模型可以计算不同土地利用类型和不同途径暴露剂量与风险水平。英国的 CLEA模型可以推导与制定土壤污染标准,并可进行特定场地风险评估[47]。美国加利福尼亚州环保局开发的 CalTOX 模型主要应用 USEPA 超级基金计划风险评估指南中的公式来计算暴露与风险,能够进行蒙特卡罗模拟,对于每一暴露因子都可以通过概率分布来表示,因此可以反映风险的不确定性与变异性。CalTOX 模型也可以计算给定目标健康风险水平时的特定场地土壤污染程度[48~50]。

2 污染土壤健康风险评估方法

土壤污染物在迁移过程中引起的暴露风险是污染土壤健康风险评估的核心。污染土壤健康风险评估包括危害判定、剂量-效应评估、暴露评估、风险表征四步骤(图 1)[6]。

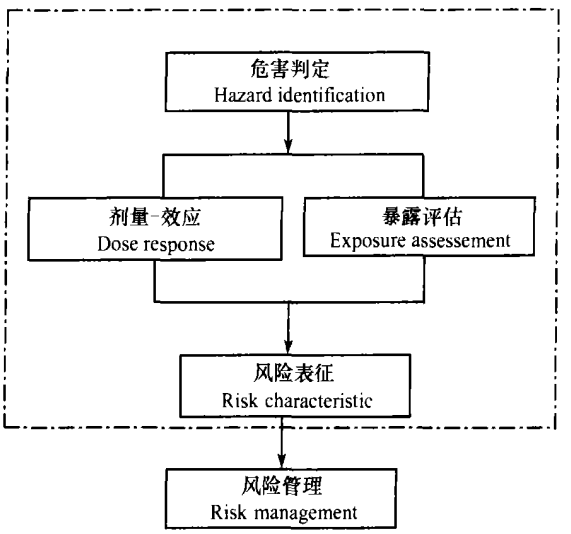

图 1 健康风险评估框架

Fig. 1 Health risk assessment framework

2.1 危害判定

危害判定是根据污染物的生物学和化学资料,判定某种特定污染物是否产生危害与风险,是致癌性效应还是非致癌性效应等[36]。危害判定的关键内容是设定风险评估方向与评估范围[36],建立风险评估的概念模型,其内容如下。

2.1.1 研究区界定与信息收集 首先确定评价目的,恰当准确界定评价区边界范围与时间范围[1]。然后进行实地考察,收集相关信息:(1)土壤污染信息;(2)评估场地信息;(3)受体信息(人群)。

2.1.2 制定实施采样计划,分析环境样品 在实地考察、信息收集的基础上,考虑土地利用状况、土壤污染特征以及人群行为模式,识别潜在暴露途径,进行暴露场景分类。在此基础上,制定与实施采样计划。采样计划中,不仅仅要考虑采集土壤样品,还要联系其他介质,考虑污染物从土壤到水、作物等介质的传输。对所采集样品(如水、植物、大气等样品)进行处理与分析,测定内容应包括各介质中污染物的浓度与形态,以及土壤基本性质。

2.1.3 分析污染特征,建立概念模型 概念模型是对现实的抽象与简化,是识别污染物传输行为与风险的关键过程[52,53],是表示污染土壤与人体暴露之间实际与潜在的、直接与间接的相互关系。根据

(2) Su C. GIS-supported environmental risk assessment for the management of petroleum-contaminated sites. Doctoral Dissertation, The University of Regina, Canada, 2002

环境样品分析结果,分析区域污染特征、污染物迁移模式、暴露方式,建立风险评估概念模型[36,51]。例如,图 2 就是一个评估污染土壤暴露风险的概念模型,模型中的箱体和箭头不仅表示评估过程中的步骤,还是具体的数学与经验模型,这些模型可分为迁移传输模块、暴露模块、食物链模块等。

2.2　剂量-效应评估

人体暴露于一定剂量的污染物与其产生反应之间的关系称为剂量-效应关系。剂量-效应评估是对有害因子暴露水平与暴露人群中不良健康反应发生率之间关系进行定量估算的过程,是风险评估的依据。每种污染物依据其毒性终点的不同,具有不同的剂量-效应关系,毒理学研究中一般将剂量-效应关系分为两类:(1)指暴露某一化学品的剂量与群体中出现某种反应强度之间的关系;(2)指某一化学品的剂量与群体中出现某种反应的个体在群体中所占比例,可以用百分号或比值表示,如死亡率、癌症发病率等[36]。剂量-效应属毒理学研究范畴,对于污染土壤健康风险评估来说,主要是收集与选取合适的剂量-效应资料应用于风险评估中。

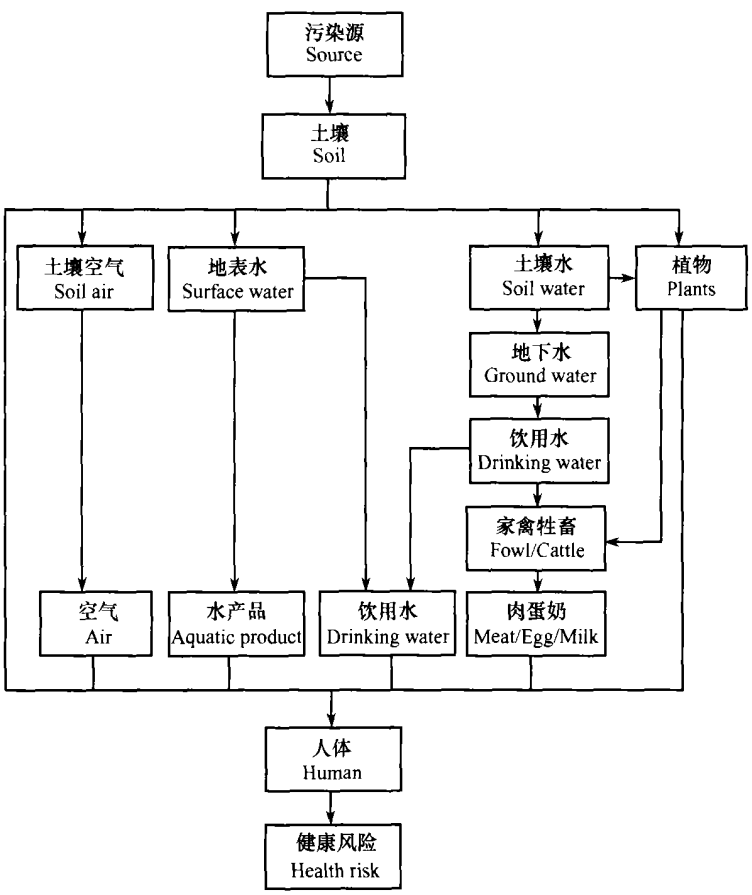

图 2　污染土壤暴露的概念模型

Fig. 2　Conceptual model for exposure of polluted soil

2.3　暴露评估

污染土壤的健康风险评估需要详细的暴露评估过程,来确定或估算(定性或定量)暴露剂量的大小、暴露频度、暴露持续时间和暴露途径,应当考虑到过去、当前和将来的暴露情况。土地利用类型不同使得主要暴露途径也不相同,例如农田污染土壤认为其健康危害主要是通过食物链传递途径。因此,暴露评估中应根据土地利用类型确定污染物从土壤到人体的暴露途径,对每条暴露途径确定暴露点与暴露方式,选择合适的模型与公式计算污染物从土壤到其他介质中的传输,计算水、气、土壤、食物等介质的污染物水平。尽管由土壤污染引起的其他介质(水、气、作物)的污染水平可以通过采样分析获取,但是通过模型计算不失为一种好的手段,可以预测

当前与将来污染物的浓度或没有监测数据地点的浓度。因此,暴露评估需要建立土壤污染物的多介质传输模型,模型的参数主要为污染物的含量、物理/化学性质、土壤基本性质以及研究区自然条件等。这方面的模型已有较多报道,如污染物在土壤—作物系统中迁移分配模型[54,55]、污染物逸度模型[56,57]、农田生态系统随机模型[58]等。在得到污染介质浓度后,根据暴露人群特征来计算暴露剂量,暴露剂量以单位时间单位体重与人体暴露的污染物的量来表示(mg kg^{-1} d^{-1})。通常暴露剂量的计算采用如下公式计算:

暴露剂量 = (污染物浓度 ×摄入速率 ×暴露持续时间 ×吸收因子) / (体重 ×平均时间)。

2.4 风险表征

风险表征是对前面评估步骤进行总结,并综合进行风险水平定性与定量表达。由于致癌物质和非致癌物质的毒性方式不同,应分别考虑致癌效应和非致癌效应。风险表征要对每一污染物每一暴露途径的癌症风险和非癌症风险进行表征,评估每一暴露途径癌症风险与非癌症风险及总癌症风险与非癌症风险。表征健康风险的方法有商值法、大量证据法、模拟模型法、经济-费用分析法等(1)。商值法是应用最广的半定量表征方法,但是它在进行混合污染风险评估时没有考虑污染物之间的协同或拮抗效应,因此其估计的风险水平会因污染物之间的相互作用而偏低或偏高[33]。大量证据法是根据化学物质大量可得的风险信息作为依据确定该化学物质是否存在风险以及风险度的大小,具有一定的合理性,但仍是一种半定量的方法,不具有任何预测未来风险状况的能力[33,59]。模拟模型法具有预测风险的能力,是一种定量的风险表征方法,但是在应用过程中需要较多的参数。经济-费用分析法主要从环境污染水平给人类造成的经济损失和费用支出两方面对污染物所致健康效应进行分析[60]。

表 1 健康风险评估实例

Table 1 Examples of health risk assessment

致癌风险 Excess cancer risk	非致癌风险商 Hazard Quotient for nocarcinogens
Risk = SF ×CDI	HQ = E/ RfD
Risk 为个人终生得癌概率	HQ 为风险商(Hazard Quotient)
SF 为致癌斜率(mg kg^{-1} d^{-1})	E 为暴露剂量
CDI 为终生日平均摄入剂量	RfD 为参考剂量
实例:摄入 As 含量为 0.24 mg kg^{-1}的食物的致癌风险	实例:摄入 Cd 含量为 0.02 mg kg^{-1}的食物的非致癌风险
CDI = (CC ×IR ×EF ×ED) / (BW ×AT)	E = (CC ×IR ×EF ×ED) / (BW ×AT)
CC 为污染物浓度(0.24 mg kg^{-1})	CC 为污染物浓度(0.02 mg kg^{-1})
IR 为摄入率 (0.40 kg d^{-1})	IR 为摄入率 (0.40 kg d^{-1})
EF 为暴露频率(350 d a^{-1})	EF 为暴露频率(350 d a^{-1})
ED 为暴露持续时间(30 a)	ED 为暴露持续时间(30 a)
BW 为体重(70 kg)	BW 为体重(70 kg)
AT 为平均时间(70 a ×350 d)	AT 为平均时间(30 a ×350 d)
CDI = (0.24 ×0.40 ×350 ×30) / (70 ×70 ×350) = 5.88 ×10^{-4} mg kg^{-1} d^{-1}	E = (0.02 ×0.40 ×350 ×30) / (70 ×30 ×350) = 1.14 ×10^{-4} mg kg^{-1} d^{-1}
SF = 1.5 (mg kg^{-1} d^{-1})	RfD = 1 ×10^{-3}
Risk = CDI ×SF = 8.82 ×10^{-4}	HQ = E/ RfD = 0.114
则个人终生致癌机率为 8.82 ×10^{-4}	则风险商为 0.114
注:实例中 SF 与 RfD 均来自与 USEPA[17]	

根据 USEPA 的商值评估方法[6],分别给出了致癌与非致癌效应评估的两个简单实例(表 1)。另外,在整个风险评估过程中,需要评估关键变量和假设的不确定性程度,并采取必要措施进行质量控制

与质量保证[36]。

3　存在问题

尽管健康风险评估已经发展了几十年,但仍有许多问题要解决。

3.1　健康风险评估方法

尽管许多国家和机构已经建立了较系统的健康风险评估体系,但是如何准确定量评估及预测仍是当前存在的最大问题。当前风险表征多以定性与半定量方法为主,缺乏简单而又能将定性与准确定量结合的方法,还不能很好地定量表征风险水平与等级,如被广泛应用的商值法[33]。而模拟模型方法需要较多的参数,在实际评估中很难获得,限制了其推广应用。另外,由于缺乏对污染土壤未来风险的预测预警模式与方法,使得对污染土壤风险现状评估较多,未来风险变化与趋势研究较少。

3.2　评估过程中的不确定性

健康风险评估涉及众多学科,需要多方面的信息与数据,如环境污染规律、污染物健康效应、人群行为方式等。众多复杂因素使评估过程中存在较大变异性与不确定性[7]。一般说来,风险评估中的不确定性主要来自于评估区的异质性、评估模式、毒性资料以及评估中的参数等。目前,已经有许多方法来评估不确定性及其影响因素[32]。不确定性削减也是当前所面临的一个重要问题。

3.3　风险交流

风险评估是风险管理的工具,是制定相关标准、法规与政策的基础。因此风险评估者与公众、决策者进行风险交流对于风险管理是非常重要的。尽管风险交流活动已经开展并受到重视,但目前还缺乏及时有效的风险交流方式与机制。

3.4　风险信息

污染土壤健康风险评估需要各方面的资料与数据,但当前存在着风险资料数据缺乏与陈旧等问题。许多应用于推导参考剂量(RfD)或致癌斜率(SF)的资料大都比较陈旧,像 USEPA 的综合风险信息系统所提供的风险信息均来自数年前的研究成果[27]。另外,对于污染物低剂量暴露所带来的效应还没有很好的资料可供参考。

3.5　环境风险问题认识不足

当前存在数以万计的化学品,人们已经比较清楚认识其环境健康风险的仅占少数,仍有大量的化学品正在危害人类健康而不为人知。许多研究也证实环境中大量化学品所带来的健康风险在以往被低估了。例如 Liu 等研究表明许多手性有机杀虫剂中的异构体具有高的毒性,并能在环境中长期滞留[61]。最近有研究表明以前被认为安全的有机砷杀虫剂在特定土壤中会降解为有毒的无机砷,并通过食物链传递引起健康风险,目前加拿大与美国正对其进行重新评估登记[62]。这些均表明,由于受技术手段与方法所限制,当前对环境中存在化学品的健康风险问题认识还停留于相对较低的阶段,许多环境健康风险问题被人们所低估,或者还不被人们所了解。

4　研究展望

4.1　国际动态

新技术的发展以及对环境风险认识的深化,使得污染土壤健康风险评估不断地向前发展与进步。展望未来发展趋势,主要体现在污染的环境行为、剂量-效应关系、方法学、模型以及风险信息等几个方面。

4.1.1　土壤污染物环境行为　随着新的监测手段与技术的发展,人们应该加强对污染物在土壤中的迁移转化行为研究,建立污染物的归宿模型。这包括污染物从土壤到水、气、生物介质中的传输与转化。土壤污染的生物有效性研究尤其需要关注与加强,以便于了解污染物的食物链传递规律,定量计算和预测食物链暴露水平。

4.1.2　剂量-效应关系　剂量-效应是健康风险评估中的基础与关键,健康风险评估的突破点在很大程度上依赖于建立准确的剂量-效应关系。因此应用机理模型和数据来减少危害识别和剂量-效应评估中的不确定性将是今后健康风险评估研究中迫切需要解决的问题。这要求准确地计算目标器官暴露剂量,建立目标器官暴露剂量的定量预测模型。通过发展和评估新的毒理学测试方法来识别表征污染物的危害与毒理机制,形成机理模型来取代致癌与非致癌风险评估中的默认值方法。今后研究内容主要集中在以下几方面:(1)建立与完善低成本和快速反应方法,以准确估算暴露剂量,如生物标记物(血、发、DNA)、生物传感器等;(2)应用药理动力学模型(PBPK)研究污染物的剂量-效应关系;(3)建立多种污染物的相互作用关系研究手段与方法,准确评估多种污染物之间对人体效应的协同或拮抗作用;(4)通过新技术和新方法加强对低暴露剂量效应

研究。

4.1.3 健康风险评估方法 以污染物的土壤环境行为过程、毒性效应为基础,建立准确定量的多途径、多介质、多物质的健康风险评估方法是今后的主要目标。为了便于不同风险评估者之间以及评估者与管理者之间进行交流,今后需要开展合作协调和统一风险评估的方法学。未来健康风险评估方法的努力方向:

(1) 要充分考虑到不同人群之间与个体之间(年轻/年老,男/女,健康/患者,不同种族等)的生活方式、人群特征的差异,有效地减少评估过程中的不确定性。

(2) 在风险评估过程中,要着重应用概率方法,同时探索经济学方法[59]。

(3) 风险评估过程中的假定需要重新研究,以更好地提供评估风险的数据,如目前应用的土壤摄取、植物对污染物吸收模式等假定[62]。

4.1.4 健康风险评估模型 当前土壤污染日益严重和复杂,对区域土壤污染风险预测与预警的要求不断加强,数学模型在研究中所起的作用也越来越重要,未来模型的开发与应用需要关注的关键问题是:简单化、推广能力强,能够适应不同的时空尺度,具有较高的可信度。应用 GIS 技术建立多途径多介质模拟系统将是未来的趋势之一。所建立的模型具有多模块模拟功能,能够将监测数据、人群的行为方式数据、人口统计数据、污染物释放-传输-转化过程集成于一体,并兼备评估、预测与预警功能。

4.1.5 数据的收集与监测 定量评估土壤污染的健康风险需要收集和应用大量的数据,不仅包括环境污染数据,同时也包括污染物剂量效应、人群的生活行为等数据。因此今后一方面要加强对环境污染的监测,建立区域尺度上的监测网络,例如欧洲土壤监测网络[63];另一方面要加强对风险信息资料收集与累积,建立为风险评估与管理提供支持的数据库系统,尽管美国 EPA 已经建立了综合风险信息系统[28],但在将来还需要不断地补充和完善。人类的生活方式以及人群特征很大程度上影响污染物的暴露与效应,在未来发展中需要建立一个全国尺度上的人类活动模式数据库。

4.2 国内展望

根据我国当前的土壤污染现状、污染土壤健康评估研究基础,今后我国研究内容应该主要集中于以下几方面。

(1) 方法体系 成熟完善的方法体系是开展风险评估的基础,建立一套适合中国国情的健康风险评估方法与程序是当前亟需解决的。

(2) 当前我国关注的热点 我国还存在理论与实际的脱节现象,特别我国绝大多数污染场地并未进行健康风险评估,这给污染的风险消减与管理带来了困难。另外,我国已经开展了近 40 年的土壤污染为主的研究,土壤污染物的环境行为过程研究取得的成果显著[65,66],这些研究成果可应用于污染土壤健康风险评估。根据我国当前污染土壤状况与研究基础,可优先开展的研究工作有:土壤 Cd 污染的食物链风险;As 污染土壤引起的地下饮用水 As 污染的健康风险;土壤中 Pb 的直接摄入风险;土壤 Hg 污染所致水体 Hg 污染的暴露风险;评估土壤中持久性有机污染的食物链传递风险,以及土壤中挥发性有机污染物的呼吸风险;另外,污染土壤风险评估中尤其需要关注的是高风险污染物,如部分地区土壤中已经监测到存在的二噁英类物质[67];工业用地土壤普遍污染严重,对其开展风险评估、实行风险管理也是一项重要的研究内容。

(3) 风险管理 风险评估是风险管理的手段与工具,是制定环境标准与法规的基础,而我国在这方面还相当欠缺。因此,需要将健康风险评估应用于污染土壤风险管理,特别是制定我国新的土壤环境标准,以及相关污染土壤法规。

(4) 数据库建立 与国外相比,国内研究工作开展时间较短,基础非常薄弱,所以需要加强相关数据资料的累积,形成信息量齐全的数据库。

5 结 语

随着污染土壤风险评估相关研究工作的不断深化,需要更加强调多个学科之间的交叉与融合。这特别需要运用毒理学、生态学、流行病学家、统计学、人口统计学、地理学等学科的知识与方法,完善当前的污染土壤健康风险评估方法。土壤是一个复杂的环境体系,许多新的土壤环境问题正在涌现,许多以往被低估的风险物质被重新认识。这包括重金属污染物,更包括许多持久性有机污染物。它们具有不同的环境归宿行为与健康风险效应,因此今后有必要分别深入细致讨论这些持久性毒害污染的污染土壤健康风险评估方法。

参 考 文 献

[1] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价. 地球科学进展, 2001,

16(2): 267～271. Fu Z Y, Xu X G. Regional ecological risk assessment (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2001, 16(2): 267～271

[2] National Research Council. Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process. Committee on the Institutional Means for Assessment of Risks to Public Health, Commission on Life Sciences, NRC. Washington DC: National Academy Press, 1983

[3] UNEP/WHO/IAEA. Inter-agency Project on the Assessment and Management of Health and Environmental Risk from Energy and Other Complex Industrial Systems. IAEA-2216d/0015d. Vienna, 1987

[4] IAEA. In Perspective: The Role of Safety Assessment and Management. IAEA-Bulletin 2. Vienna, 1987

[5] Novegno A, Nienhaus F. Integrated Approach for Risk Assessment and Management in Highly Industrialized Regions in a Country. IAEA-2158d. Vienna, 1987

[6] USEPA. Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS) Part A. EPA/540/1-89/002, 1989

[7] USEPA. An Examination of EPA Risk Assessment Principles and Practices. EPA/100/B-04/001, 2004

[8] Yokoyama E. Risk assessment and management practices and researches on environmental pollution with hazardous chemicals in Japan. Japanese Journal of Risk Analysis, 1997, 8(2): 1～7

[9] Otte P F, Lijzen J P A, Otte J G, *et al*. Evaluation and Revision of the CSOIL Parameter Set. RIVM Report 711701021. The Netherlands, 2001

[10] Pollard S, Rogeryearsley, Nickreynard, *et al*. Current directions in the practice of environmental risk assessment in the United Kingdom. Environmental Science and Technology, 2002, 36(4): 530～538

[11] **陈晶中, 陈杰, 谢学俭, 等. 土壤污染及其环境效应. 土壤**, 2003, 35(4): 298～303. Chen J Z, Chen J, Xie X J, *et al*. Soil pollution and its environmental impact (In Chinese). Soils, 2003, 35(4): 298～303

[12] Hao X Z, Zhou D M, Si Y B. Revegetation of copper mine tailings with ryegrass and willow (In Chinese). Pedosphere, 2004, 14(3): 283～288

[13] Castelli M, Rossi B, Corsetti F, *et al*. Levels of cadmium and lead in blood: an application of validated methods in a group of patients with endocrine/metabolic disorders from the Rome area. Microchemical Journal, 2005, 79(1/2): 349～355

[14] Robson M. Methodologies for assessing exposures to metals: Human host factors. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2003, 56(1): 104～109

[15] Lauwerys R R, Bernard A, Roels H, *et al*. Health risk assessment of long-term exposure to non-genotoxic chemicals: Application of biological indices. Toxicology Letters, 1999, 77(1/3): 39～44

[16] **周景明, 秦占芬, 丛琳. 多氯联苯内分泌干扰作用及机理研究进展. 科学通报**, 2004, 49(1): 34～39. Zhou J M, Qin Z F, Cong L. Advances in endocrine disrupting effects and mechanism of polychlorinated biphenyls (In Chinese). Chinese Science Bulletin, 2004, 49(1): 34～39

[17] USEPA. Soil Screening Guidance: User's Guide. EPA/540/R-96/018, 1996

[18] Lijzen J P A, Baars A J, Otte P F, *et al*. Technical Evaluation of the Intervention Values for Soil/Sediment and Groundwater. RIVM Report 711701023. The Netherlands, 2001

[19] **王国庆, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 Ⅰ. 国际动态及中国的修订考虑. 土壤学报**, 2005, 42(4): 666～673. Wang G Q, Luo Y M, Song J, *et al*. Study on soil environmental quality guidelines and standard Ⅰ. International trend and suggestions for amendment in China (In Chinese). Acta Pedolgica Sinica, 2005, 42(4): 666～673

[20] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). ATSDR Public Health Assessment Guidance Manual. Atlanta, GA, 1996

[21] European Environment Agency. Environmental Risk Assessment-Approaches, Experiences and Information Sources. Environmental Issue Report No 4. London, 1999

[22] Kulhánek A, Trapp S, Sismilich M, *et al*. Crop-specific human exposure assessment for polycyclic aromatic hydrocarbons in Czech soils. Science of the Total Environment, 2005, 339(1/3): 71～80

[23] Davis S, Waller P, Buschom R, *et al*. Quantitative estimates of soil ingestion in normal children between the ages of 2 and 7 years: Population-based estimates using Al, Si, and Ti as soil tracer elements. Archives of Environmental Health, 1990, 45(2): 112～122

[24] Wijnen V, Clausing P, Brunekreef B, *et al*. Estimated soil ingestion by children. Environmental Research, 1990, 51(2): 147～162

[25] Calabrese E J, Stanek E J, Gilbert C E. Evidence of soil-pica behavior and quantification of soil ingestion. Human and Experimental Toxicology, 1991, 10(2): 245～249

[26] USEPA. Provisional Guidance for the Quantitative Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons. Office of Health Effects Assessment, Washington DC, 1993

[27] USEPA. Integrated Risk Information System (IRIS). 1995

[28] Ferguson C C, Krylov V V, McGrath P T. Contamination of indoor air by toxic soil vapours: A screening risk assessment model. Building and Environment, 1995, 30(3): 375～383

[29] Waitz M F W, Freijer J I, Kreule P, *et al*. The Volasoil Risk Assessment Model Based on CSOIL for Soils Contaminated with Volatile Compounds. RIVM Report 715810014l. The Netherlands, 1996

[30] Kissel J C, Richter K Y, Fenske R A, *et al*. Field measurement of dermal soil loading attributable to various activities: Implications for exposure assessment. Risk Analysis, 1996, 16(1): 115～125

[31] Kissel J C, Shirai J H, Richter K Y, *et al*. Investigation of dermal contact with soil in controlled Trials. Journal of Soil Contamination, 1998, 7(6): 737～752

[32] **曾光明, 钟政林, 曾北危. 环境风险评价中的不确定性问题. 中国环境科学**, 1998, 18(3): 252～255. Zeng G M, Zhong Z L, Zeng B W. Research of the uncertainty in environmental risk assessment (In Chinese). China Environmental Science, 1998, 18(3): 252～255

[33] Wilbur S B, Hansen H, Pohl H, *et al*. Using the ATSDR guidance manual for the assessment of joint toxic action of chemical mixtures. Environmental Toxicology and Pharmacology, 2004, 18(3): 223～230

[34] Pennington D W, Margni M, Ammann C, *et al*. Multimedia fate and human intake modeling: Spatial versus nonspatial insights for chemical emissions in western Europe. Environmental Science and Technology, 2005, 39(4): 1 119～1 128

[35] Beecher N, Harrison E, Goldstein N, *et al*. Risk perception, risk communication, and stakeholder involvement for biosolids management and research. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(1): 122～128

[36] **胡二邦主编. 环境风险评价实用技术和方法. 北京: 中国环境科学出版社**, 2000. Hu E B. ed. Technology and Method of Environmental Risk Assessment (In Chinese). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2000

[37] **中国国家环境保护总局. 工业企业土壤环境质量风险评价基准** (HJ/T 25-1999), 1999. State Environmental Protection Administration of China. Environmental Quality Risk Assessment Criteria for Soil at Manufacturing Facilities (HJ/T 25-1999), 1999

[38] **赵肖, 周培疆. 污水灌溉土壤中** As **暴露的健康风险研究. 农业环境科学学报**, 2004, 23(5): 926～929. Zhao X, Zhou P J. Health risk analysis of arsenic exposure in soils using sewage for irrigation (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(5): 926～929

[39] **任慧敏, 王金达, 张学林. 沈阳市土壤铅的空间分布及风险评价研究. 地球科学进展**, 2004, 19(**增刊**): 429～433. Ren H M, Wang J D, Zhang X L. Spatial distribution of Pb in soils and its risk assessment in Shenyang City (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2004, 19(Suppl.): 429～433

[40] **李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒** Cd、Cu **和** Se **的含量差异及其人类膳食摄取风险. 环境科学**, 2003, 24(3): 112～115. Li Z W, Zhang Y L, Pan G X, *et al*. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake (In Chinese). Environmental Science, 2003, 24(3): 112～115

[41] **郭淼, 陶澍, 杨宇, 等. 天津地区人群对六六六的暴露分析. 环境科学**, 2005, 26(1): 164～167. Guo M, Tao S, Yang Y, *et al*. Population exposure to HCH in Tianjing area (In Chinese). Environmental Science, 2005, 26(1): 164～167

[42] USEPA. Guiding Principles for Monte Carlo Analysis. EPA/630/R-97/001, 1997

[43] Tressou J, Crépet A, Bertail P, *et al*. Probabilistic exposure assessment to food chemicals based on extreme value theory: Application to heavy metals from fish and sea products. Food and Chemical Toxicology, 2004, 42(8): 1 349～1 358

[44] Batchelor B, Member A, Valdes J, *et al*. Stochastic risk assessment of site contaminated by hazardous wastes. Journal of Environmental Engineering, 1998, 124(4): 380～389

[45] Chen Z, Huang G H, Chakma A. Integrated environmental risk assessment for petroleum contaminated sites-A North American case study. Water Science and Technology, 1998, 38(4/5): 131～138

[46] Huang G H, Chen Z, Tontiwachwuthicul P, *et al*. Environmental risk assessment for underground tanks through an interval parameter fuzzy relation analysis approach. Energy Sources, 1999, 21(1): 75～96

[47] CLEA. The Contaminated Land Exposure Assessment Model (CLEA): Technical Basis and Algorithms. Report prerared for the Department of Environment, Transport, and the Regions and the Environment Agency. Draft in confidence, 1998

[48] CalTOX. Draft Final Reports. A Multimedia Total Exposure Model for Hazardous-waste Sites. Technical Reports. California Environmental Protection Agency, Sacramento, California, 1993

[49] Eisenberg N S, Mckone T E. Decision tree method for the classification of chemical pollutants: Incorporation of across-chemical variability and within-chemical uncertainty. Environmental Science and Technology, 1998, 32(21): 3 396～3 404

[50] Hertwich E G, Mateles S F, Pease W S, *et al*. Human toxicity potentials for life-cycle assessment and toxics release inventory risk screening. Environmental Toxicology and Chemistry, 2001, 20(4): 928～939

[51] Iscan M. Hazard identification for contaminants. Toxicology, 2004, 205(3): 195～199

[52] El-Ghonemy H, Watts L, Fowler L. Treatment of uncertainty and developing conceptual models for environmental risk assessments and radioactive waste disposal safety cases. Environment International, 2005, 31(1): 89～97

[53] Cirone P A, Duncan P B. Integrating human health and ecological concerns in risk assessments. Journal of Hazardous Materials, 2000, 78(1/3): 1～17

[54] **潘根兴**, Andrew C C, Albert L P. **土壤-作物污染物迁移分配与食物安全的评价模型及其应用. 应用生态学报**, 2002, 13(7): 854～858. Pan G X, Chang A C, Page A L. Modelling transfer and partitioning of potentially toxic pollutants in soil-crop system for human food security (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(7): 854～858

[55] Brus D J, Gruijter J J, Walvooer D J J, *et al*. Mapping the probability of exceeding critical thresholds for cadmium concentrations in soils in the Netherlands. Journal of Environmental Quality, 2002, 31(6): 1 875～1 884

[56] **康强, 汤友志. 多种媒介环境模型的逸度方法. 广东工业大学学报**, 1997, 14(2): 9～15. Kang Q, Tang Y Z. Fugacity approach in multimedia environmental modelling (In Chinese). Journal of Guangdong University of Technology, 1997, 14(2): 9～15

[57] **曹红英, 龚钟明, 曹军, 等. 估算天津环境中** γ-HCH **归趋的逸度模型. 环境科学**, 2003, 24(2): 77～81. Cao H Y, Gong Z M, Cao J, *et al*. Evaluating the fate of γ-HCH using fugacity model in Tianjin environment (In Chinese). Environmental Science, 2003, 24(2): 77～81

[58] Keller A, Steiger B, Zee S E, *et al*. A stochastic empirical model for regional heavy metal balances in agroecosystems. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(6): 1 976～1 989

[59] Forbes V E, Calow P. Applying weight-of-evidence in retrospective. Human and Ecological Risk Assessment, 2002, 8(7): 1 625-1 639

[60] Stahl R G, Guiseppi-Elie A, Bingman T S. The U. S. Environmental Protection Agency's examination of its risk assessment principles and practices: A brief perspective from the regulated community. Integrated Environmental Assessment and Management, 2005, 1(1): 86～92

[61] Liu W P, Gan J Y, Schlenk D, *et al*. Enantioselectivity in environmental safety of current chiral insecticides. Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America, 2005, 102(3): 701～706

[62] Florida Department of Environmental Protection. Environmental Risks from Use of Organic Arsenical Herbicides at South Florida Golf Courses. 2002

[63] Schoof R A, Houkal D. The evolving science of chemical risk assessment for land-applied biosolids. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(1): 114～121

[64] European Environment Agency. European Soil Monitoring and Assessment Framework. Technical Report 67. 2001

[65] 陈怀满, 郑春荣, 周东美, 等. 关于我国土壤环境保护研究中一些值得关注的问题. 农业环境科学学报, 2004, 23 (6): 1 244～1 245. Chen H M, Zheng C R, Zhou D M, *et al*. About some problems worthy of concern in soil environmental protection in China (In Chinese). Journal of Agro-Environmental Science, 2004, 23(6): 1 244～1 245

[66] Chen H M, Zhou D M, Luo Y M, *et al*. The progresses and problems in soil environmental protection in China. *In*: Luo Y M, *et al*. eds. Proceedings of Soil Rem: the 2nd International Conference on Soil Pollution and Remediation. 2004. 129～131

[67] 骆永明, 滕应, 李清波, 等. 长江三角洲地区土壤环境质量与修复研究 Ⅰ. 典型污染区农田土壤中多氯代二苯并二噁英/呋喃 (PCDD/Fs) 组成和污染的初步研究. 土壤学报, 2005, 42(4): 52～58. Luo Y M, Teng Y, Li Q B, *et al*. Soil environmental quality and remediation in Yangtse River Delta Region Ⅰ. Composition and pollution of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans (PCDD/Fs) in a typical farmland (In Chinese). Acta Pedolgica Sinica, 2005, 42(4): 52～58

STUDY ON SOIL ENVIRONMENTAL QUALITY GUIDELINES AND STANDARDS Ⅱ. HEALTH RISK ASSESSMENT OF POLLUTED SOILS

Li Zhibo[1,2]　Luo Yongming[1,2†]　Song Jing[1]　Zhao Qiguo[1]　Liu Zhiquan[3]

(1 Soil and Environment Bioremediation Research Center, State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(3 Department of Standards, Science and Technology, State Environmental Protection Administration of China, Beijing 100035, China)

Abstract Soil pollution is deteriorating due to rapid urbanization and industrial development. Once released into soils, pollutants are transferred to other environmental media such as water, air and biota. They pose health risks to humans via various exposure pathways including drinking water, inhalation, food, dermal contact etc. As a new environmental management tool, health risk assessment (HRS) of polluted soil forms the base for establishing soil environmental quality standards. So far, limited research work has been done in China in relation to HRS of polluted soils. As an effort to boost its development in China, this article reviewed the advance in related research, methodology, existing problems and future trends. HRS of polluted soils is moving towards multi-media, multi-pathways and multi-pollutants risk assessment. Model simulation will be widely used in HRS. Currently, many uncertainties still remain in the quantification of HRS. To make it reliable, future research should focus on developing quantitative methods including pollutants transport models, dose-response relationship, and time-activity patterns of population etc.

Key words Polluted soils; Exposure; Health risk assessment; Soil environmental quality standards