

文章编号:1673-1212(2006)04-0188-04

污泥土地利用的风险评价探讨

刘常青^{1,2}, 黄游³, 张江山⁴, 赵由才⁵

(1.3.4.5 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092, 2. 福建师范大学, 福建 福州 350007)

摘要: 污泥土地利用是一种比较经济的处置方式, 目前已为大多数国家所接受。如何根据我国的具体情况分析污泥土地利用过程带来的风险并制定相应的政策法规, 是我国污泥合理、科学地进行土地利用的前提。美国历时11年对污泥中23种重点污染物进行了系统的风险评价, 并建立了一套较为完整的风险评价方法。本文主要介绍美国环保局(EPA)如何通过风险评价的方法制定土壤中污染物的浓度, 并对这些方法应用于我国应注意的问题进行了讨论。

关键词: 污泥; 处置; 土地利用; 风险评价

中图分类号: X703 X825

文献标识码: A

随着工业化的迅速发展, 城市人口的急剧增长, 城市生活污水和工业废水处理量日益增多, 由此产生的污水污泥也不断增加, 致使污泥处理成了人类对环境的一大影响。污泥中含有氮、磷等植物生长需要的营养物质, 污泥土地施用是一种使自然资源循环的理想方法。但是污泥中含有的重金属、病原菌和寄生虫等可能造成土壤污染的物质, 因此在污泥大规模土地利用之前, 需要制定相关的法规与标准以确保公众安全。美国通过环境风险评价方法规定了一套与污泥处置(污泥施用、地表处置、焚烧)相关的各种重要污染物的控制标准, 并由此制定了相应政策法规。本文主要介绍美国环保局(EPA)如何通过风险评价的方法制定污泥中污染物浓度, 并对这些方法应用于我国应注意的问题进行了讨论。

1 美国污泥风险评价的历史

最早的污泥风险评价开始于20世纪70年代中期, 但当时并没有得到蓬勃的发展。直到1982年, 污泥问题引起了广泛的关注, 此时EPA成立了一个小组专门致力于制定与污泥标准和管理相关的法规。接着该小组对40个城市的污泥作了调查研究^[1]。他们首先确定了污泥中200种需要研究的污染物, 然后又从这200种污染物中选定50种做进一步研究。1985年, 美国国家科学学会对EPA起草的风险评价的方法进行审核。接着遵循美国国家科学学会推荐的风险评价方法, 通过模拟14种暴露途径, 对污泥中的23种污染物做了完整、系统的风险评价^[2]。1989年2月, 公布了第一个与污泥标准和管理相关的503法规(试行)。此后又对原有的风险评价方法进行了改进, 1993年2月正式公布503法规(40CFR Part 503), 该法规中对污泥施用、地表处置和焚烧等处置方法中

的污染物浓度做了规定, 并制定了相关的管理要求、污泥处置工艺运行标准、监测频率、报告制度、记录要求和其他常规要求。

2 污泥土地利用风险评价的四个步骤

2.1 危害鉴定(Hazard identification)

危害鉴定主要是考查某种毒性化学物质对人体健康或生态环境产生的危害及其后果, 即对该毒性化学物质的固有特性作确认。作危害鉴定时, 有关毒性化学物质资料可从流行病学资料、动物实验资料、短期实验研究及分子结构的比较等方法获得^[3]。在对污泥进行风险评价时, 危害鉴定的过程需要对所要评估的污染物进行充分的实验研究以确定其毒性。例如, 对污泥进行危害判定时发现镉对植物的生长并没有明显的毒性, 但是当人体通过植物摄入超过一定剂量的镉时会导致肾脏及其他系统疾病。

2.2 剂量—效应评价(Dose—Response Assessment)

剂量—效应评价是对有害因子暴露水平与暴露人群或生态系统中的种群、群落等出现不良效应发生率间的关系进行定量估算的过程。它主要研究毒效应与剂量之间的定量关系, 是进行风险评价的定量依据^[3]。剂量—效应关系是在长期的动物毒性试验资料和调查的基础上建立起来的。从动物毒性实验得到剂量效应关系后, 利用一定的模式外推得到人群, 进而得出近世的人群剂量—效应关系。EPA对污泥土地利用的风险评价是以风险参考剂量(Risk reference doses, RfDs)和致癌有效量(Cancer potency values, q1*s)为基础的。风险参考剂量指人体每日暴露剂量的推估值, 预测长期或终生暴露在该毒性化学物质中不会导致(除癌症外)疾病。

收稿日期: 2006-03-05

基金项目: 福建省科技厅重点项目(2005Y012)部分研究成果

作者简介: 刘常青(1970—), 女, 副教授, 同济大学在读博士研究生, 主要研究方向为固体废物污染控制与资源化。

致癌有效剂量指持续暴露人群可能会引发或导致癌症风险的某一毒性化学物的可接受剂量。

2.3 暴露程度评价(Exposure Assessment)
暴露评价重点研究人体(或其他生物)暴露于某种化学物

质或物理因子条件下,对暴露量的大小、暴露频率、暴露的持续时间和途径等进行测量、估算或预测,是进行风险评价的定量依据^[4,5]。通常对污泥进行暴露评价时,主要研究高度暴露生物(Highly Exposed Individuals, HEI)在与污泥

表 1 土地利用风险评价的暴露途径

暴露途径	高度暴露生物的描述
1 污泥→土壤→植物→人体	食用污泥土壤上种植的植物的人(种植者除外)
2 污泥→土壤→植物→人体	食用污泥土壤上种植的植物的人(种植者)
3 污泥→人体	直接摄入(皮肤吸收或食用)污泥的人(主要是儿童)
4 污泥→土壤→植物→动物→人体	食用动物制品的人(动物以污泥土壤上种植的植物为食)
5 污泥→土壤→动物→人体	食用动物制品的人(动物直接以含污泥的土壤为食)
6 污泥→土壤→植物→动物	动物食用污泥土壤上种植的植物
7 污泥→土壤→动物	动物直接以含污泥的土壤为食
8 污泥→土壤→植物	因吸收污泥中的污染物而使其生长受到危害的植物
9 污泥→土壤→土壤→微生物	直接食用污泥土壤中的有机质(主要指微生物)
10 污泥→土壤→土壤→有机质→土壤→有机质→食肉动物	食用污泥的土壤生物被食肉动物食用
11 污泥→土壤→空气飞灰→人体	吸入土壤中的尘埃的人(例如田间耕作的司机)
12 污泥→土壤→地表水→人体	饮入污泥污染过的水或者食用污染过的鱼类
13 污泥→土壤→空气→人体	吸入从污泥挥发到空气中的污染物
14 污泥→土壤→地表水→人体	饮用被污泥污染的水源

中的有害物质接触的途径中受到的危害的程度。表1列出了污泥土地利用的暴露评价过程中涉及的14种暴露途径。

2.4 风险度评定(Risk Characterization)

风险度评定是风险评价的最后一个环节,它必须把前面三个步骤的资料和分析结果加以综合,以确定有害结果发生的概率,可接受的风险水平及评价结果的不确定性等。同时,风险度评定也是连接风险评价和风险管理的桥梁。风险度评定主要包括两方面的内容:一是对有害因子的风险大小作出定量估算与表达;二是对评定结果的解释与对评价过程的讨论,特别是对前面三个步骤中存在的不确定性作出评价,即对风险评价结果本身的风险作出评价和解释。

例如,在土地施用的第二种暴露途径下,选择的高度暴露人群属于那些长期在自家庭院(施加污泥)里种植蔬菜并将之作为主要蔬菜来源的人。在进行风险度评定时作了解释说明:在美国,拥有足够大的庭院并以种植蔬菜为主食的人数占美国人口的5.5%。假如这些人中有不到2%的人一生中从未换过住所,那么第二种暴露途径下的高度暴露人群(HEI)占人口总数的0.1~0.2%(5.5×0.02)。实际的HEI人数会更低。事实上,很少有人一生中的全部时间都在种植蔬菜,并且这些人持续70年食用含最高污染物浓度(污泥中)的蔬菜的情形几乎是不可能的。这一解释表明通过这一途径计算出的污染物浓度限值保守且安全的,其致癌风险水平低于1×10⁻⁴。

3 运用风险评价的方法计算污染物的控制标准

EPA先确定需要研究的各种污染物,并确定其暴露途径,然后再考查污染物在各种暴露途径下的迁移情况,计算出各种暴露途径下的污染物浓度限值,最后通过比较得出污染物的浓度限值。计算过程分为三步:首先确定用于计算污染物限值的相关参数,然后选择相关的数据和方法进行风险评价的计算,算出污染物的浓度限值。本节将以非致癌性无机物(As)为例,阐述其在土地施用过程中第一种暴露途径下的污染物浓度限值。从这些例子可以认识如何运用科学数据,基本假设和相关的政策规定进行风险评价,并阐明了通过风险评估得出的数据的可靠性。

3.1 非致癌性无机物

非致癌性无机物在环境中并不降解,而是随着污泥的施加不断累积,本例子通过计算在第一种暴露途径下(污泥→土壤→植物→人体),成年人食用种植于施加污泥的土壤中的植物而摄入的As的量,并由此推算出非致癌性无机物As的浓度限值。

3.1.1 计算修正参考吸收量(Adjusted Reference Intake, RIA)

在对一污染物进行风险评价时,要确定人体对其能接收剂量。修正参考吸收量,是人体能接受的来自污泥的该种污染物的剂量。它是污泥土地利用过程中的主要健康参照值,用于保护最为敏感的暴露人群,是一个比较保守的数值。之所以称之为“参照”吸收量是因为它扣除了从环境中(如食

物、水、空气)中摄取的污染物,同时用于计算的70kg是标准(平均)成年男子的体重,也是一个参照值。具体计算见公式3-1

$$RIA = \left(\frac{Rfd \cdot BW}{RE} - TBI \right) \cdot 10^3 = \left(\frac{0.0008 \cdot 70}{1.0} - 0.012 \right) \cdot 10^3$$

$$= 44 \mu g As/g \cdot d \quad (3-1)$$

上式中各个参数的意义如下:

RfD,参照剂量(Reference dose),即除癌症外对人类健康造成危害的污染物浓度。它表示每人每天能摄入的对其一生不会引起疾病的污染物的计量。在第一种暴露途径下,人体对砷的吸收不会致癌,但可能会引起其他疾病。砷的RfD为0.0008mg/kg body weight·d。这是一个参照其他医学和毒理学实验数据而定的比较保守的参照值。

BW即体重,(Human Body Weight)。不同暴露途径下暴露对象的体重不同。对于成年男子,BW取值70kg;对于儿童,BW取值为16kg。

RE,暴露量的相对影响参数(Relative Effectiveness of Exposure)。RE表示在暴露途径的各个环节中,污染物对人体的毒性影响差异。例如,当食物中还有锌时,人体对镉的吸收量将大大减少^[6]。在对污泥土地利用的风险评价中,通过规定RE为1,是相对谨慎的,即认为污染物能100%的被吸收。

TBI,食物中污染物吸收背景值(Total Background Intake Rate of Pollutant From All other sources of Exposure)。即除污泥外,从其它环境中(如饮用水、空气、食物)吸收的污染物的量。TBI是依据国家对饮用水中的各种重金属的限制以及国家食品医药管理部门对食品和医疗的市场调查分析数据制定的。为保险起见,在该风险分析中,TBI选用的是平均值0.012mgcd/day,它代表了污染物的平均摄入量。

3.1.2 污泥中As浓度限值(RP, Reference Application Rate of Pollutant)

根据人体可接受的来自污泥的As的浓度和其食用的所有污泥土壤上种植的植物中的As的总量等参数计算的浓度限值,计算公式如下:

$$RP_c = \frac{RIA}{\sum(UC_i \cdot DC_i \cdot FC_i)} = \frac{44}{0.00654} = 6,700 kgAs/ha \quad (3-2)$$

上式中的参数的意义如下:

UC,植物从含污泥的土壤中吸收污染物的量(Plant Uptake Slope for Pollutant Soil/Biosolids)。单位为($\mu g/gDW$)(kg/ha)⁻¹。该参数用于预测因食用生长于含污泥的土壤中的蔬菜而富集的污染物的量。UC由下(3-3)式计算:

$$UC = \frac{\text{植物摄入量}(\mu g\text{-pollutant/g-plant-tissue})}{\text{污泥中金属投入量}(\mu g\text{-pollutant/hectare of land})} \quad (3-3)$$

表2 第一种暴露途径中的用于计算As浓度的参数

食物名称	UC	DC	FC	UC·DC·FC
土豆	0.002	15.5954	0.25	0.00073
食叶蔬菜	0.018	1.9672	0.25	0.00091
豆类	0.001	8.7462	0.25	0.00024
食根蔬菜	0.004	1.5950	0.25	0.00015
庭院水果	0.001	4.1517	0.25	0.00015
甜玉米	0.001	2.2538	0.25	0.00006
谷类作物	0.002	96.6802	0.25	0.00430
Sum UC·DC·FC	0.00654			

在第一种暴露途径中,主要计算7种庭院中常种蔬菜的UC值。这7种蔬菜分别为:土豆、食叶蔬菜、豆类、食根蔬菜、水果、甜玉米和谷类作物。表2列出上述7种蔬菜的UC值。

DC(Daily consumption),每天对各种瓜果、蔬菜(生长于含污泥的土壤)的摄取量。DC是参照美国国家食品与饮料管理部门公布的总食品菜单列表中每人每天的食量制定的。

FC,食用添加污泥土壤中种植的瓜果、蔬菜占所食用的同类产品中的比率。(Fraction of Food Group Produced on Biosolids-Amended soil, FC)。FC是根据美国农业部对庭院蔬菜量占全国蔬菜总产量的比率定的。

4 我国对污泥处置风险评价存在的问题

4.1 数据缺乏

关于污泥土地处置的风险评价,在国内还没有建立起象美国那样比较健全的研究体系,可用数据不充分。我国目前对于污泥处置的风险研究主要涉及污泥土地施用对植物的影响、重金属从土壤到植物的迁移和重金属和氮、磷在土壤中的迁移^[7-10]。这些数据通常是基于短期(1~3年)的实验获得,而长期(10年以上)的田间实验数据较为缺乏。若用短期的实验数据预测长期的影响,其本身就存在一定的风险。此外,对于污泥土地施用后,周围相关暴露人群的消费资料,可用数据几乎为零。

4.2 开发建立适合我国污泥处置方式的模型

由于基础数据的匮乏,我们只能在借鉴国外污泥风险评价的基础上,开发建立适合我国污泥处置风险评价的模型。例如,我们的饮食结构与美国相差很大,所研究的食物种类的选取与其消耗量也应相应的改变;同时由于人种类型的差异,体重和皮肤暴露表面积也与他们也有着很大区别,因而所选择的人体可接受的污染物浓度也需要作相应的修正。

4.3 不确定性问题的解决

污泥处置的风险评价中的涉及的风险标准,即风险可接受水平问题,由于涉及不同人群的利益,不同区域的自然条件和社会经济水平存在的差异,评价标准也存在很大不确定性。例如,我国目前污泥的产量大多集中在大中城市,这些地方人口密度比较大,此时将可接受的风险水平定为 10^{-4} ,即表

示每10000个人中,可能有一人会因为污泥的施加而产生疾病。虽然,这种情形不一定会出现,但若出现一次,对于施用污泥的地区周围的人群来说是无论如何不能接受的。因此,如何解决这些不确定性问题,并结合我国实际,以实现合适的定量表达,是我们将来对污泥进行风险评价应注意的问题。

5 结语

近年来,随着污水排放量的增加,污泥的产量也日益增加,污泥的处理已经成为大家关注的问题。由于我国的农用污泥重金属标准是在参照国外研究成果的基础上结合我国国情制定的,其对重金属的限制较严格,虽具有一定科学意义,但是这个标准并不完备^[11]。因此,我国应加强环境风险评价的基础理论和技术方法的研究及法制管理,尽快建立适合我国污泥处置风险评价的标准方法和技术指南。进行污泥处置风险评价实例研究,制定相应的处置标准,以实现污泥的处置与经济的发展、环境的保护的和谐统一。

参考文献:

[1] A Guide to the Biosolids Risk assessment for the EPA Part 503 rule [M] EPA/832-B-93-005, September 1995.

[2] Bill McCANN. Sludge to Land Signals. Water, 2001, 11: 19-20.

[3] 毛小荃, 刘阳生. 国内外环境风险评价研究进展[J] 应用基础与工程科学学报 2003, 11(3): 266-273.

[4] 胡二邦. 环境风险评价实用技术和方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000: 1-482.

[5] US EPA Guidelines for Exposure Assessment [M] FRL-4129-5, 1992, 186.

[6] ATSDR. Biological indicators of exposure to cadmium and lead, Palmerton, PA, Part II. U. S. Dept. Health Human Service, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Atlanta, GA.

[7] 孟昭福, 张增强. 用幼苗法指示污泥和土壤中重金属的植物有效性[J] 环境化学, 2001, 20(2): 129-137.

[8] 王新, 陈涛, 梁仁禄, 等. 污泥土地利用对农作物及土壤的影响研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(2): 163-166.

[9] 陈同斌, 李艳霞, 金燕. 城市污泥复合肥的肥效及其对小麦重金属吸收的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 643-648.

[10] 吴新民, 陈德明. 施用城市污泥对土壤中重金属积累和迁移的影响[J]. 环境与健康杂志, 2005, 22(3): 177-179.

[11] 乔显亮, 骆永明. 我国部分城市污泥化学组成及其农用标准初探. 土壤, 2001(4): 205-209.

The Study on the Risk Assessment of Sludge Land Application

LIU Chang-qing^{1,2}, HUANG You³, ZHANG Jiang-shan⁴, ZHAO You-cai⁵

(1.3.4 The State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Fujian Normal University, Fuzhou, 350007, China)

Abstract: Land application is one of economical way in the disposition of sewage sludge. It's important to assess the risk coming from sludge land application, which is the precondition to establish reasonable rules. This paper introduced how EPA proposed pollutant limits by risk assessment methodologies and discussed some problems when these methods are used in China.

Key words: sludge; disposition; land application; risk assessment

欢迎订阅 2006 年《环境科学与管理》杂志

地址: 黑龙江省哈尔滨市道外区南直路 356 号

电话: 0451-53925810 传真: 0451-53925800

联系人: 李景风 孙健 曹越