

基于风险的石油烃污染土壤环境管理与标准值确立方法

曹云者, 李发生

(中国环境科学研究院土壤污染与控制研究室, 北京 100012)

摘要:目前我国对石油烃污染土壤的环境监管十分薄弱,环境管理标准的缺位成为制约这类场地评价与修复问题的瓶颈。为此系统分析了国际上尤其是发达国家在石油烃污染土壤的环境管理方法以及标准制修订实践方面的相关动态,并结合评价指标选取、目标风险水平设定、标准取值和标准细分等方面对各相关国家的标准体系进行了比较研究,以期对我国石油烃污染土壤的环境管理与标准制订有所启发。

关键词:石油烃;污染场地;环境管理;环境风险;土壤标准

中图分类号:X84 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)07-1225-07

Risk-based Environmental Management of Petroleum Hydrocarbons Contaminated Soil and Development of Standards: A Review

CAO Yun-zhe, LI Fa-sheng

(Department of Soil Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Petroleum hydrocarbons are a typical kind of soil pollutants, the effects of petroleum contaminated soils on ecological systems and human health are the great concern at present. The current environmental management on these pollutants is rather weak in China. At the same time, the lack of standards is a bottleneck in the assessment and remediation of petroleum contaminated sites. In this review, current situation in environmental management of petroleum contaminated sites and related soil quality standards in developed countries (regions) were analyzed. In general, the derivation methodologies in most countries are basically the same; risk-based approaches are commonly used and the differences led by land-use types have all been taken into account. Risk assessment models are widely used in deriving soil environmental standards. Tiered approach is adopted and both generic standards and site-specific standards can be developed and used in assessment and remediation according to site conditions. Although common in many aspects, differences do exist among standards of different countries (regions), such as target risk level, assessment indicators selection and quantifying of the standard values. The development of soil environmental standards of petroleum hydrocarbon pollutants in China should follow international trend in methodologies, while specific conditions in China should also be fully taken into account in certain technical issues. The review aims to help improve environmental management of petroleum contaminated sites and shed light on ongoing development of the soil environmental standards in China.

Keywords: petroleum hydrocarbons; contaminated site; environmental management; environmental risk; soil standards

近年来,我国土壤污染形势严峻,石油烃作为一类量大面广、危害较大的土壤有机污染物,其环境问题受到越来越多的关注。然而,由于我国在污染场地方面的研究尚处于起步阶段,目前针对这类典型污染场地的环境管理尚缺乏行之有效的技术方法,特别是

由于土壤中石油烃污染物的环境监管标准缺位,使得石油烃污染场地的风险评价和修复受到制约^[1-2]。本文旨在研究国际上尤其是发达国家在石油烃污染土壤的环境管理方法以及标准制修订实践方面的相关动态,以期对我国石油烃污染土壤的环境管理与标准制修订研究有所启发。

1 基于风险的土壤石油烃污染环境管理现状及发展趋势

1.1 石油烃污染场地的环境管理理念

美国试验与材料协会(ASTM)1995年发布的《石

收稿日期:2010-04-25

基金项目:国家环保公益性行业科研专项(200709033);科技基础性工作专项(2007FY240200);科技部社会公益研究专项(2005DIB3J161)

作者简介:曹云者(1972—),女,河北辛集人,博士,副研究员。

E-mail: caoyz@craes.org.cn

通讯作者:李发生 E-mail: lifs@craes.org.cn

油泄露场地基于风险的矫正行动标准指南》^[3] 为许多国家和机构所采用,特别在北美和欧洲被广泛应用,成为石油烃污染场地评价与管理的行动指南。该标准方法力推基于风险的管理理念,其方法以毒理学和环境暴露风险的评估为依据,制定基于风险的土壤筛选标准(RBSLs)和特定场地的修复目标(SSTLs)。这一风险管理理念和制定标准的基础方法学已逐渐为其他国家所接受。

1.2 土壤石油烃环境标准现状

目前发达国家几乎都建立有石油烃污染物的土壤环境标准,其中有些国家是在一般性的土壤环境标准中包括了石油烃类污染物,如美国和荷兰等,也有的是由于原来的土壤环境标准中未能涵盖石油烃类污染物而补充制定的石油烃评价和管理标准,如新西兰和加拿大。英国虽然已经建立了有关评价与标准制定的理论方法^[4],但正式的标准仍在研究过程之中,目前发布的石油烃类污染物的土壤环境质量标准只有4种苯系物(苯、甲苯、乙苯和二甲苯),多环芳烃类的标准仍在建立之中。

表1给出了一些发达国家或地区已颁布的土壤中石油烃污染物的环境质量标准。从表1可以看出,国际上对土壤中污染物的控制标准因制定的原理和用途不同而命名各不相同。如加拿大的土壤质量指导值(Soil Quality Guideline)、美国曾用的土壤筛选值(Soil Screening Level)和初步修复目标(Preliminary Remediation Goals),后来统一称为区域筛选水平(Regional Screening Levels)、英国的土壤指导值(Soil Guideline Value)、澳大利亚的土壤调研值(Investigation Value)、荷兰的干预值(Intervention Value)等。最近国内学者也有将其称为土壤指导限值^[14]或土壤环境

质量指导值^[15],鉴于中国目前标准体系中仍习惯把这类值叫做标准值,本文以下统称为土壤环境标准。

2 土壤中石油烃污染物标准值确立的基本方法

2.1 基于风险的制订方法

综观世界各国或地区的土壤环境标准,不难发现建立基于风险的土壤环境质量标准,并以此作为指导污染土地风险识别、评价和修复的依据,是目前制定土壤环境质量标准的主流方法,并已成为国际发展的趋势^[16-17]。但各国在制订基于风险的土壤环境质量指导值时又有一些差异,即在保护目标上。一些国家以同时保护生态环境和人体健康为目标,如加拿大的土壤质量指导值(Soil Quality Guidelines)、荷兰的干预值(Intervention values)。也有一些国家分别发布了以保护人体健康为目标和以保护生态环境为目标的指导值,如美国既有基于健康风险的土壤筛选水平(Soil Screening Level,SSLs),也有生态筛选浓度值(Ecological Soil Screening Level,Eco-SSLs),澳大利亚既有健康调研水平(Health Investigation Levels,HILs),也有生态调研水平(Ecological Investigation Level,EILs);还有一些国家只有保护人体健康的标准,如英国的土壤指导限值(Soil Guideline Values,SGVs)、新西兰的土壤临界值(Soil Acceptance Criteria)等。总之,各国普遍考虑了保护人体健康的目标需求,在此基础上,或单独考虑生态风险管理需求,或将二者结合起来出台综合的土壤标准。

各国(地区)在制定土壤环境质量标准过程中,考虑到不同土地利用类型的功能定位不同,导致污染物进入人体的途径和暴露参数存在差异^[18-19],相同浓度的污染物对人群造成的健康风险也存在差异。一般来

表1 一些国家(地区)已颁布的土壤中石油烃污染物的环境质量标准
Table 1 Soil standards of petroleum hydrocarbons in some countries(regions)

国家或地区	标准名称	用途	发布机构	发布年份	包括的污染物
新西兰	Soil acceptance criteria ^[5]	场地评价	MoE	1999	苯系物4种、多环芳烃3种和石油馏分3种
澳大利亚	Assessment levels for soil ^[6]	场地评价	DoE	2003	苯系物4种、多环芳烃7种和石油馏分6种
加拿大	Soil Quality Guidelines ^[7]	场地评价	CCME	2004	苯系物4种、多环芳烃9种
美国	Standards for petroleum hydrocarbons(PHC) ^[8]	场地评价	CCME	2001	石油馏分4种
	Soil screening levels(SSLs) preliminary ^[9]	筛选水平	EPA	1996	包括苯系物和多环芳烃等,未考虑石油馏分
	Remediation goals ^[10]	修复目标	EPA	2004	包括苯系物和多环芳烃等,未考虑馏分
英国	Soil Guideline Value(SGVs) ^[11]	场地评价	EA	2005	目前只有4种苯系物的标准,其他在制定中
荷兰	Target values and Intervention values for soil remediation ^[12]	修复目标	VROM	2000	苯系物4种、多环芳烃1种,未考虑石油馏分
中国香港	Risk-based remediation goals(RBRGs) for soil & soil saturation limit ^[13]	修复目标	EPD	2006	苯系物4种、多环芳烃18种和石油馏分3种

说,住宅用地标准普遍比工业用地标准更加严格,不同用地方式的标准值在有的国家可相差 1~2 个数量级,如英国住宅用地和工业用地土壤甲苯标准分别为 $8.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $350 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,新西兰住宅用地和工业用地土壤苯并(a)芘标准分别为 $0.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $110 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。然而,不同国家在土地利用类型划分方面存在一些差异(表 2)。荷兰土壤环境标准不区分土地利用类型,其他国家划分的土地利用类型种类从 2 种到 4 种不等。可以看出,各国划分的土地利用类型都普遍涵盖了住宅用地、商业/工业用地两种,而加拿大则将工业和商业用地分开考虑。

表 2 不同国家(地区)在制定土壤石油烃标准时的
土地利用类型划分方法

Table 2 Types of land use considered in standard derivation in
different countries(regions)

国家或地区	划分种类	土地利用类型
美国	2	住宅用地、商业/工业用地
加拿大	4	农业用地、住宅/公园、商业用地、工业用地
英国	3	住宅用地(又细分为含植物吸收/无植物吸收)、公园用地、商业/工业用地
新西兰	3	农业用地、住宅用地、商业/工业用地
澳大利亚	4	标准住宅用地、高面积覆盖住宅用地、公园/娱乐用地、商业/工业用地
中国香港	4	城市住宅、乡村住宅、工业用地、公园用地
荷兰		不区分

2.2 通用场地标准和特定场地标准相结合

各国目前的土壤石油烃污染物标准多为分层次的标准(Tiered Standards),其中以美国试验和材料协会(ASTM)1995 年制定的《石油泄露场地基于风险的矫正行动标准指南》为代表。随后,其他国家纷纷借鉴该方法制定了相关标准,如新西兰石油烃污染场地评价与管理指南^[9]、加拿大土壤中石油烃标准^[6]、英格兰和威尔士污染场地环境管理的流程^[20]等。标准以分 3 个层次最为普遍,第 1 层次(Tier 1)的标准为通用场地的标准(Generic Standards)或称筛选水平(Screening Level),一般为“查阅表”(Look-up Table)格式。在“查阅表”中,列出了针对一定暴露途径(如地下水摄取、蒸汽吸入等)和暴露状况(如工商业用地、住宅用地等)各种石油类化学品在土壤、地下水和蒸汽暴露等方面的筛选水平;第 2 层次(Tier 2)的标准为在进行场地调查的基础上应用部分特定场地(Site-Specific)的数据对通用标准(Tier 1)进行修正后的标准;第 3 层次(Tier 3)的标准为特定场地标准(Site-Specific Standards),是通过进行更详尽的场地调查和评价,取得该场地详细的

参数、暴露信息后建立的特定场地标准。从第 1 层次开始,依次往上,由保守的假设和简单的预测模型发展到基于更多的特定场地信息而获得标准取值。一般来说,层次越低,标准越保守,对人类和环境的保护程度越高,不确定性因素越多,用于修复的成本越高。随着层次的升高,评价的复杂程度增加,需要的数据增加,调查和评价成本增加,通过复杂数值模型的应用及对特定地点数据的概率分析以减少风险评估的不确定性,管理中不确定性因素则减少,修复的费用可能得到优化。通过应用分层次的标准,在很大程度上降低了场地评价和修复的成本。新西兰 70%的石油烃污染场地仅需进行初始评价^[9],英国仅有 2%~5%的污染场地需要采取修复行动^[4]。

美国的 Oklahoma 州还建立了分层次的总石油烃 TPH 标准(见表 3)^[21]。在第 1 层次的评价中使用一般性的 TPH 标准,如超过这一标准,则进行第 2 层次分析,根据各自的标准对各馏分进行细化评价。第 2 层次又分为初级和高级两种,初级的评价仍为“查阅表”格式,高级评价则是依据场地特定参数修正后的特定场地的清除标准,第 3 层次则要求进行更细化的定量风险评价。

表 3 美国 Oklahoma 州建立的分层次总石油烃 TPH
场地评价标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Risk-based cleanup levels for TPH in Oklahoma,
USA($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

层次 1 通用的清除水平			
土地利用类型		总石油烃 TPH	
住宅用地		50.0	
工业用地		500.0	
层次 2a 简单的特定场地清除水平			
土地利用类型		0~60.96 cm 表土	60.96 cm 以下土壤
住宅用地	汽油(C6-C12)		
	柴油(C13-C28)	50.0	500.0
	润滑油(>C28)		
工业用地	汽油(C6-C12)	500.0	
	柴油(C13-C28)	2 500.0	
	润滑油(>C28)	5 000.0	
层次 2b 特定场地清除水平			
层次 3 定量化的风险评价			

3 不同国家(地区)土壤中石油烃环境质量标准体系的比较

3.1 评价指标选取的差异

石油组成十分复杂,石油烃以复杂的混合物形式

存在,含有许多种单一组分,每种化合物有其特定的毒理学特性^[22]。图 1 以原油为例,给出了石油烃的基本组成。石油烃组成中烃类占绝大部分,而烃类中又以烷烃和环烷烃为主。芳香烃(包括单环芳烃和多环芳烃)占石油烃组成的比例很小(5%~10%)。然而由于烷烃类物质毒性较小,而芳香烃类物质毒性较大,有些物质具有致癌性(如苯和以苯并(a)芘为代表的多环芳烃),有些物质甚至具有持久性污染的特征。因此,几种代表性的芳香烃普遍出现在各国土壤标准的污染物名单中。

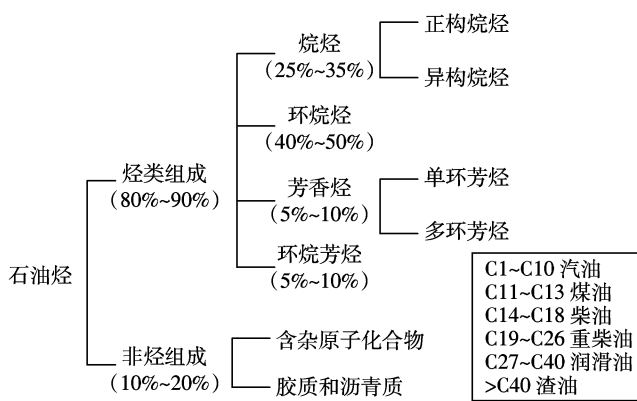


图 1 石油烃的组成(以原油为例)

Figure 1 Constituents of petroleum hydrocarbon(e.g. crude oil)

表 4 列出了各国石油烃污染评价的指标。评价指标一般均包括指示化合物和 TPH 馏分两类。其中指

示化合物普遍包括 4 种苯系物(苯、甲苯、乙苯和二甲苯)和多环芳烃。多环芳烃一般限于美国 EPA 提出的 16 种优先控制的 PAHs。各国的标准中,又分两种情况,即给出单种 PAHs 的值,或给出总值 Σ PAHs,即将各种多环芳烃根据其相对于苯并芘 Bap 的毒性当量因子(TEF)进行折算。此外,从表中还可以看到,各国对于总石油烃 TPH 馏分的划分方法很不统一,馏分种数和划分方法均存在很大差异。一些国家区分脂肪族和芳香族,一些国家则不区分,馏分划分种数也从 3 到 16 种不等。不过各国馏分的划分基本依据美国总石油烃工作组的方法^[22]。

3.2 目标风险水平设定的差异

在“人群可接受风险”的设定方面,国际上尚未有统一的标准。一般来说,设定的风险值越小,风险水平越低,制定的土壤标准就越严格,越有利于保护人体健康。但是,风险的设定绝不是简单的技术问题,更多在于经济和社会因素的综合考虑。标准越严格,意味着达到该标准需要花费的资金和其他成本会显著提高,关系到一国的经济承受能力。如果风险值设定过高,则达不到应有的保护人体健康的效果。因此,美国环保署给出了致癌物质可接受风险的范围为 10^{-6} ~ 10^{-4} ,即可接受致癌风险水平下限为 10^{-6} ,上限为 10^{-4} 。关于非致癌物质,危害商的标准为 1。在制定土壤标准时,不同国家采用的目标风险水平存在一定差异,如美国、中国香港地区将风险水平设定为 10^{-6} ,荷兰、澳大利亚为

表 4 土壤石油烃类标准值的指示化合物选取和馏分划分		
Table 4 Indicator compounds and fractions of petroleum hydrocarbons for soil guideline values		
国家或地区	指示化合物	石油烃馏分划分
美国	多环芳烃(萘、苊、芴、蒽、荧蒽、苝、苯并(a)蒽、蒾、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a,h)苝、二苯并(a,h)蒽、苯并(g,h,i)苝、茚并(1,2,3-cd)苝);苯系物(苯、甲苯、乙苯、二甲苯)	总石油烃标准工作组已制定,但尚未实施
加拿大	多环芳烃(苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)苝、二苯并(a)蒽、茚并(1,2,3,-c,d)苝、萘、菲、苝);苯系物(苯、甲苯、乙苯、二甲苯)	C6~C10;>C10~C16;>C16~C34;>C34
荷兰	总多环芳烃;苯系物(苯、甲苯、乙苯、二甲苯)	脂肪族(>C5~C8;>C8~C16;>C16~C35;>C35) 芳香族(>C5~C9;>C9~C16;>C16~C35)
英国(标准正在制定过程中)	致癌物质(苯、苯并(a)苝、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、蒾、二苯并(a,h)蒽、茚并(1,2,3-cd)苝);非致癌物质(甲苯、乙苯、二甲苯、萘、蒽、菲、苝)	脂肪族(>C5~C6;>C6~C8;>C8~C10;>C10~C12;>C12~C16;>C16~C35;>C35~C44) 芳香族(>C5~C7;>C7~C8;>C8~C10;>C10~C12;>C12~C16;>C16~C21;>C21~C35;>C35~C44);>C44~C70
新西兰	多环芳烃(苯并(a)苝、萘、苝);苯系物(苯、甲苯、乙苯、二甲苯)	C7~C9;>C10~C14;>C15~C36
澳大利亚	多环芳烃(总多环芳烃、苯并(a)苝、萘、蒽、菲、苝);苯系物(苯、甲苯、乙苯、二甲苯)	C6~C9;>C10~C14;>C15~C28 脂肪族(>C16~C35;>C35) 芳香族(>C16~C35)
中国香港	多环芳烃(萘、苊、苊烯、芴、菲、蒽、荧蒽、苝、苯并(a)蒽、蒾、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、苯并(a)苝、二苯并(a,h)蒽、苯并(g,h,i)苝、茚并(1,2,3-cd)苝);苯系物(苯、甲苯、乙苯、二甲苯)	C6~C8;C9~C16;C17~C35

10^{-4} , 新西兰为 10^{-5} , 加拿大则分别给出了 10^{-5} 和 10^{-6} 等两种目标风险水平下的标准取值。

3.3 标准取值上的差异

由于标准制定的用途、方法原理差异以及各国(地区)土壤气候及水文地质条件等的不同,不同国家(地区)制定的土壤石油烃污染物标准值存在较大的差异。以住宅用地类型苯系物标准为例,最高差异甚至可达到几个数量级(图 2)。

3.4 标准细化程度上的差异

土壤石油烃污染物的环境标准限值受土壤性质影响显著,因此一些国家在划分土地利用类型的基础上给出了更细化的标准。如加拿大土壤质量指导值区分粗粒土和细粒土^[8],因质地不同一些污染物的限值可能相差 4~5 倍。英国的土壤指导值则按有机质含量不同而加以区分^[23-24],有机质含量分别为 1%和 5%的指导值可相差 5 倍左右(如甲苯在土壤 1%SOM 和 5% SOM 时的 SGVs 值分别为 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。新西兰的苯系物土壤指导限值划分得更细致(见表 5),分砂土、砂质粉土、粉质粘土、粘土、轻石质土和泥炭土等 6 种^[5],不同质地的土壤苯系物指导限值最高可相差 5~6 倍。新西兰甚至给出了不同土层深度的指导限值,包括表层土壤(<1 m)、亚表层(1~4 m)和深层土壤(>4 m)。荷兰的土壤环境限值也依据土壤质地和有机质的实际情况而定,还专门发布了相应的计算方法^[12]。

4 借鉴和启示

我国土壤环境质量标准目前正在制修订过程中。一直沿用至今的《中华人民共和国土壤环境质量标

表 5 新西兰住宅用地土壤中苯的临界值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 5 Soil acceptance criteria of benzene in soil, New Zealand ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土壤质地	土壤深度		
	<1 m	1~4 m	>4 m
砂土	1.1	1.9	2.4
砂质粉土	1.1	1.9	2.4
粉质粘土	1.7	4.6	12
粘土	2.7	8.8	26
轻石质土	1.2	2.4	3.1
泥炭土	5.7	10	13

准》(GB15618—1995),由于当时条件所限,并未涵盖石油烃类污染物。然而,由于近年来土壤污染形势的变化,土壤中石油烃污染物环境管理标准的缺失已经影响到工业污染场地评价和修复工作的开展,我国业已开展的污染场地评价和修复也不得不借鉴其他国家已有的标准。因此,尽快出台土壤中石油烃类污染物的环境标准,十分必要。近年来我国一些专家和学者针对土壤环境质量标准制修订已经开展了一些有益的探讨^[14-15,21-24],从不同的角度对我国土壤环境质量的制修订提出了很好的建议。夏家淇等^[25]提出建立区域和场地土壤污染评价的 3 类指标的建议,即土壤环境背景值、土壤环境质量第二级标准值和土壤污染临界值;周启星^[27]建议,我国应自主开展污染土壤修复基准的系统研究,制定科学的、合乎我国实际的污染土壤修复标准;罗启仕^[14]应用 CLEA 模型对上海建设用地的土壤指导限值进行了初步探讨;李丽和等^[28]应用英国的 CLEA 模型对典型石油化工污染场地多环芳烃土壤指导限值获取的方法进行了探讨。

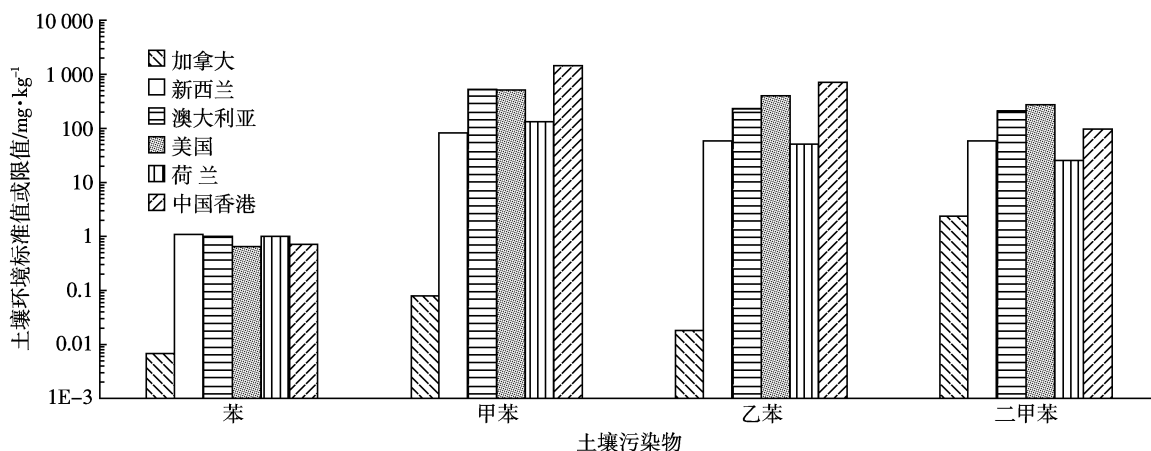


图 2 不同国家(地区)苯系物土壤环境标准的比较

Figure 2 Comparison of soil environmental standards of BTEX in different countries (regions)

建立基于风险的土壤环境质量标准已经成为各位专家的共识。

综合国内外土壤中石油烃污染物标准制订的进展和发展动态,我们认为我国土壤石油烃污染物的环境质量标准的制订应在方法上与国际接轨,但在具体技术问题上应充分考虑中国国情,在此提出几点考虑,供同行专家探讨:①评价指标应涵盖石油类指示化合物和馏分,其中指示化合物应至少包括4种苯系物(苯、甲苯、乙苯和二甲苯)和多环芳烃。目前情况下多环芳烃仅限于美国EPA提出的16种优先控制PAHs。②考虑到各国对于总石油烃TPH馏分的划分方法很不统一,我国应该兼顾科学性、分析测试方法可达性、实际污染状况以及标准的可操作性等多方面的因素,在这方面还要开展很多的研究工作。③根据国际上普遍考虑土地利用类型的做法,建议我国在土地利用类型上分为住宅用地和商业/工业用地等。④在目标风险水平设定上,考虑到我国经济的快速发展以及严格保护人群健康的需求,建议致癌物质风险基准定为 10^{-6} ,非致癌物质危害商定为1。⑤在区域差异及标准的细化程度方面,较之于其他国家,我国幅员辽阔,地区间的土壤类型、气象条件和水文地质条件差异较大,建议充分考虑标准的区域差异,但也要同时兼顾可操作性。

总之,石油烃污染土壤的环境监管和标准制订是一个复杂的问题,需要考虑多种因素的影响。在标准的指标选取和取值方面,需要十分慎重,既需要借鉴吸收国外先进的理念、方法论和经验,又要充分考虑中国的自然环境条件和技术经济水平等实际情况。

参考文献:

- [1] 张胜田,林玉锁,华小梅,等.中国污染场地管理面临的问题及对策[J].环境科学与管理,2007,32(6):5-7.
ZHANG Sheng-tian, LIN Yu-suo, HUA Xiao-mei, et al. The facing problems and countermeasures of Chinese contaminated site management[J]. *Environmental Science and Management*, 2007, 32(6):5-7.
- [2] 曹云者,施烈焰,李发生.石油烃污染场地环境风险评价与风险管理[J].生态毒理学报,2007,2(3):265-272.
CAO Yun-zhe, SHI Lie-yan, LI Fa-sheng. Petroleum hydrocarbons-contaminated sites and related risk-based management strategy[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2007, 2(3):265-272.
- [3] ASTM standard:E1739-95 (reapproved 2002) Standard Guide for Risk-Based Corrective Action Applied at Petroleum Release Sites[S].
- [4] UK. Environment Agency. The UK Approach for Evaluating Human Health Risks from Petroleum Hydrocarbons in Soils, UK-EA Science Report P5-080/TR3. 2005[S].
- [5] NZME. Guidance for Assessing and Managing Petroleum Hydrocarbon Contaminated Sites in New Zealand, module 4, Tier1 Soil Acceptance Criteria[S]. 1999.
- [6] NEPC. Schedule B(1):Guideline on the investigation levels for soil and groundwater. Department of Environment(DoE), Australia[S].1999.
- [7] CCME. (Canadian Council of the Ministers of Environment). A protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines. CCME, Winnipeg[S]. 1996.
- [8] Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). Canada-wide standards for petroleum hydrocarbons (PHC) in soil, Atrial, 2001, Winnipeg[S].
- [9] U. S. EPA. Soil Screening Guidance:Technical Background Document. EPA/540/R-95/128 [S]. Office of Emergency and Remedial Response, Washington, DC. PB96-963502. 1996.
- [10] U. S. EPA. Region IX preliminary remediation goals (PRGs) tables[S], Region IX of the U. S. Environmental Protection Agency, San Francisco, CA. 2002.
- [11] UK EA. Progress table for delivery of toxicological and soil guideline value reports [EB/OL]. http://www.environment-agency.gov.uk/commondata/acrobat/progress_13_681325.pdf, 2006.
- [12] VROM. Circular on target values and intervention values for soil remediation[S]. Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, The Hague, the Netherlands. 2000.
- [13] HK EPD. Guidance Manual for use of risk-based remediation goals for contaminated land management[S]. Hong Kong SAR Government Environmental Protection Department. 2007.
- [14] 罗启仕,李小平,耿春女,等.上海建设用地土壤指导限值及其应用研究[J].农业环境科学学报,2007,26(5):1952-1957.
LUO Qi-shi, LI Xiao-ping, GENG Chun-nv, et al. Derivation of soil guideline values and their application in management and remediation of contaminated urban land in Shanghai [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5):1952-1957.
- [15] 李志博,骆永明,宋静,等.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[J].土壤学报,2006,43(1):143-149.
LI Zhi-bo, LUO Yong-ming, SONG Jing, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards II. Health risk assessment of polluted soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(1):143-149.
- [16] Carlon, C. (Ed.) Derivation methods of soil screening values in Europe. A review and evaluation of national procedures towards harmonization [R]. 2007. European Commission, Joint Research Centre, Ispra, EUR 22805-EN, 2007. 306.
- [17] Chen M F. Review of Risk Based Guidance and Modeling Approaches in The UK and USA [R]. Proceedings of the 3rd International Conference on Soil Pollution and Remediation. 2008:198-208.
- [18] Swartjes F. Insight into the variation in calculated human exposure to soil contaminants using seven different European models[J]. *Integrated Environmental Assessment Management*, 2007, 3(3):322-332.
- [19] Chen Y C, Ma H W. Model comparison for risk assessment: A case study of contaminated groundwater[J]. *Chemosphere*, 2006, 63:751-761.
- [20] DETR. Circular 2/2000, Environmental Protection Act 1990-Part IIA-

- Contaminated Land [R], Department of Environment, Transport and the Regions, London. 2000.
- [21] Risk-based cleanup levels for total petroleum hydrocarbons (TPH) fact sheets[S]. Oklahoma Department of Environmental Quality, May, 2009.
- [22] TPHCWG. Selection of representative TPH fractions based on fate and transport considerations, Volume 3. Total petroleum hydrocarbon criteria working group series[R]. Amherst: Amherst Scientific Publishers. 1997.
- [23] EA(The Environment Agency). Soil guideline values for ethylbenzene contamination[R]. Science Report SGVs 16, December 2004a(Updated April 2005).
- [24] EA (The Environment Agency). Soil guideline values for toluene contamination[R]. Science Report SGVs 15, December 2004b.
- [25] 夏家淇, 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-qi, LUO Yong-ming. Definition and three evaluation guidelines of soil contamination[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1):87-90.
- [26] 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[J]. 土壤学报, 2005, 42(1):666-673.
- WANG Guo-qing, LUO Yong-ming, SONG Jing, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards I. International trend and suggestions for amendment in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(1):666-673.
- [27] 周启星. 污染土壤修复基准与标准研究进展 [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.
- [28] 李丽和, 曹云者, 李发生. 典型石油化工污染场地多环芳烃土壤指导限值的获取与风险评价[J]. 环境科学研究, 2007, 20(1):30-35.
- LI Li-he, CAO Yun-zhe, LI Fa-sheng. Deriving of soil guideline values and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons at a typical petrochemical-contaminated site [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(1):30-35.