# 污染场地土壤再利用风险评估技术导则

将修复后或为经修复的土壤作为基坑回填用土、覆盖材料等被使用的过程。

# 编制说明

北京市环境保护科学研究院 北京市固体废物和化学品管理中心 2015年3月

# 目 录

1.	本导则制定	三的背景、原则和技术路线	1
	1.1. 項	5目背景	1
	1.2.	定原则	2
	1.3. 技	支术路线	2
2.	国外污染场	6地土壤再利用调研	4
	2.1. 💆	大洲	4
	2.2. □	<b>]</b> 萨诸塞州	13
	2.3. 组	H约州	14
	2.4. 新	所泽西州	17
3.	国外基于保	R护地下水的土壤筛选值调研	20
	3.1. 美	長国	20
	3.1.1.	美国 EPA	20
	3.1.2.	新泽西州	23
	3.1.3.	怀俄明州	24
	3.2. 加	『拿大	24
	3.3. 新	所西兰	26
4.	北京市污染	è场地土壤再利用风险评估技术导则的制定	28
	4.1. 导	异则的适用范围	28
	4.2. 污	5染场地土壤再利用概念模型	28
	4.3. ¥	<b>5染场地土壤再利用工作程序</b>	29
	4.4. 第	5一阶段——土壤再利用风险筛选	29
	4.4.1.	再利用土壤污染状况分析	29
	4.4.2.	场内土壤再利用	30
	4.4.3.	场外土壤再利用	30
	4.4.4.	场外土壤再利用筛选值	30
	4.	4.4.1. 关注污染物	30
	4.	4.4.2. 土壤再利用情景	30
	4.	4.4.3. 筛选值分级及使用	31
	4.	4.4.4. 筛选值计算	32
	4.	.4.4.5. 土壤再利用筛选值及与国外对比	42
	4.5. 第	5二阶段——再利用区域环境概况调查	48
	4.5.1.	评价等级与调查范围的确定	48
	4.5.2.	自然环境状况调查	49

4.5.3	5. 环境	色敏感区调查	50
4.5.4	上 土壌	星/地下水环境现状调查	50
4.5.5	5. 水文	工地质调查	50
	4.5.5.1.	气象、水文	51
	4.5.5.2.	水文地质条件	51
4.5.6	5. 地下	水防污性能评估	52
	4.5.6.1.	孔隙潜水防污性能评估	52
	4.5.6.2.	岩溶水防污性能评估	53
	4.5.6.3.	裂隙水防污性能评估	57
	4.5.6.4.	承压水防污性能评估	57
4.6.	第三阶段	b——特定场地土壤再利用风险评估	58
4.6.1	. 人体	x健康风险评估	58
4.6.2	地下	水风险评估	58
	4.6.2.1.	第一层次	60
	4.6.2.2.	第二层次	61
	4.6.2.3.	第三层次	62
	4.6.2.4.	第四层次	63
	4.6.2.5.	基于保护地下水的土壤再利用修复目标值计算	63
4.7.	污染防治	计对策及长期监测	64
附录 A 污染物	勿理化性质	质参数	65
附录 B 地下力	k中污染 <sup>4</sup>	物含量限值	69
参考文献			72

# 1. 本导则制定的背景、原则和技术路线

### 1.1. 项目背景

2014年4月环境保护部和国土资源部联合发布了《全国土壤污染状况调查公报》,数据显示全国的土壤环境状况不容乐观,部分地区土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧,工矿业废弃地土壤环境问题突出。全国土壤总的点位超标率为16.1%,其中轻微、轻度、中度和重度污染点位比例分别为11.2%、2.3%、1.5%和1.1%。从土地利用类型看,耕地、林地、草地土壤点位超标率分别为19.4%、10.0%、10.4%。从污染类型看,以无机型为主,有机型次之,复合型污染比重较小,无机污染物超标点位数占全部超标点位的82.8%。工矿业、农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因。

随着国家"退二进三"政策的实施,城市中出现大量遗留、遗弃的污染场地,公报数据显示,全国重污染企业用地土壤超标率为 36.3%最高,工业废弃地土壤为 34.9%,采矿区为 33.4%、工业园区为 29.4%等。2001-2008 年间我国关停并转迁企业数由 6611 迅速增加到 22488 个,增速为 1984 个/年,总数达 10 万个以上。2008 年之前北京市四环路以内就有 200 多家污染企业搬迁,2014 年年底之前,仍有 300 家污染企业将完成搬迁,遗留的土壤污染问题亟待解决。2014 年 5 月 14 日,环境保护部发布了《关于<加强工业企业关停、搬迁及原址场地再开发利用过程中污染防治工作>的通知》(环发[2014]66 号)要求场地治理修复从业单位必须按照相关环保标准规范开展调查、风险评估及治理修复工作。

近年来北京市也积极探索污染场地环境管理工作,发布了一系列关于污染场地环境管理的标准导则和技术规范,包括《场地环境评价导则》(DB11/T656-2009)、《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T811-2011)、《污染场地修复验收技术规范》(DB11/T783-2011)和《重金属污染土壤填埋场建设与运行技术规范》(DB11/T810-2011)等,并初步建设了污染场地标准体系,为北京市污染土壤的管理工作提供支持。同时开展了大量污染场地调查工作,仅"十一五"期间就对近70块待开发利用场地进行了环境评价。同时,原北京化工二厂和北京有机化工厂有机污染场地也已完成修复,原北京炼焦化学厂污染场地的修复工作正在进行。然而,昂贵的修复费用及修复后土壤的去向问题已成为制约污染场地修复工作可持续开展的主要因素。利用这些污染土壤代替开挖新土用于工程建设或基坑回填等,不仅在风险可控的情况下实现了污染土壤的再利用,还能节约了不必要的修复资金,将产生良好的环境效应和经济效应。

目前北京市仍缺乏关于污染场地土壤再利用的相关导则标准,导致污染场地土壤再利用过程无法可依。因此,开展北京市《污染场地土壤再利用风险评估技术导则》研究工作,建立污染场地土壤再利用筛选值及风险评估方法尤为必要,同时本研究将有助于北京市污染场地管理水平的进一步提高和相关法规与标准体系的完善。本研究是北京市中意合作二期项目10个北京市场地环境管理地方标准之一,同时已被列为2013年北京市环保局折子工程。

## 1.2. 制定原则

### (1) 同时保护人体健康和地下水

土壤中污染物若达不到一定限值,其再利用过程会对人体健康产生危害,同时在降雨淋溶作用下向下迁移污染地下水,进一步危害地下水使用人群的健康,因此,本导则的制定同时考虑了对人体健康和地下水的保护。

# (2) 基于层次风险评估的原理

土壤及地下水风险评估均采用层次化方法,低层次风险评估相对简单,所需参数较少,但评估结果往往偏保守;随着风险评估层次的提高,风险评估过程变得复杂,所需的特征场地参数较多,但风险评估结果更加客观。

### (3) 具有一定的保守型

由于土壤再利用筛选值为地方性统一标准,在制定时无法考虑到每一种情况,因此在对复杂情况进行简化的基础上,尽量考虑较为保守的情况,以确保制定的筛选值能充分保护人体健康及地下水。

### (4) 与国内及国际标准具有一致性

北京市《场地环境评价导则》和《场地土壤环境风险评价筛选值》为本导则的制定提供了一定的基础,同时污染场地土壤再利用评估方法及筛选值的确定借鉴了国外发达国家和地区的经验。

# 1.3. 技术路线

本标准制定的技术路线如图 1-1。

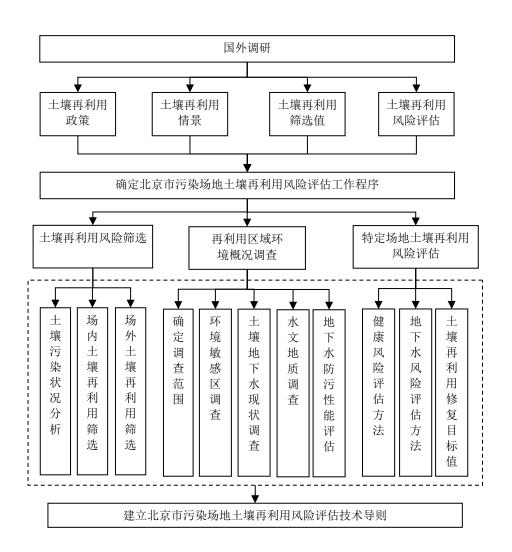


图 1-1 技术路线

# 2. 国外污染场地土壤再利用调研

本部分调研了欧洲 8 个国家、美国马萨诸塞州、纽约州和新泽西州关于污染场地土壤再利用的情景、筛选值及相关政策。总体来看,目前污染土壤的再利用情景包括垃圾填埋场覆土、建筑材料、生产沥青的骨料、开挖地回填等;在判断污染土壤是否符合再利用筛选值时,不仅考虑人体健康的保护,同时考虑了地下水、地表水保护或无公害特性(如异味、着色等)等限制因素;有的地区制定了专门的土壤再利用筛选值,有的则直接采用现有的土壤指导值。

### 2.1. 欧洲

2011年,哥本哈根技术与环境管理部门(Technical and Environmental Administration)调研了阿姆斯特丹(荷兰)、哥本哈根(丹麦)、汉堡(德国)、赫尔辛基(芬兰)、伦敦(英国)、奥斯陆(挪威)、斯德哥尔摩(瑞士)、维也纳(奥地利)共8个欧洲国家关于污染场地土壤再利用的情况。总体来看,除伦敦以外其他7个国家都有关于污染场地土壤再利用的国家阈值/指导值,但该值适用于所有土壤,而非仅针对污染场地。大部分国家土壤再利用情景存在差异,且土壤再利用污染物种类、数量和阈值/指导值存在较大差异。

### (1) 阿姆斯特丹

阿姆斯特丹将土壤再利用筛选值称为阈值(Threshold value),且根据再利用情景的不同分为清洁土壤阈值、居住用地土壤阈值和工业用地土壤阈值,同时还提供了土壤中污染物含量的低阈值(背景值)和高阈值(干预值),见表 2-1。不同再利用类型根据相应的阈值执行,若土壤中污染物含量小于清洁低阈值,则可被无限制再利用,若土壤中污染物含量大于高阈值,则必须被修复。

表 2-1 土壤再利用阈值 (mg/kg)

污染物	清洁土壤阈值	居住用地土壤	工业用地土壤	低阈值	高阈值
		阈值	阈值	以図頂	可网但
砷	20	27	76	20	76
钡	190	550			
铅	50	210	530	50	530
镉	0.6	1.2	13	0.6	13
铬 (III)	55	62	180	55	180
铬 (VI)			78	55	78
钴	15	35			
铜	40	54	190	40	190
汞 (有机)	0.15	0.83	36	0.15	36
汞 (无机)			4		4
锰	1.5	88			
镍	35	39	100	35	100

锌	140	200	720	140	720
PAH (10)	1.5	6.8	40	1.5	40
烃类	190	190	5000	190	5000
PCB (7)	0.02	0.02			

### (2) 哥本哈根

哥本哈根将土壤再利用筛选值称为阈值(Threshold value),包括污染物含量阈值和浸出量阈值,且根据污染物含量及浸出液浓度将浸出量阈值分为1、2、3 三级,见表 2-2。1级标准为清洁土壤标准,可无限制使用;满足2、3级标准的土壤再利用对工程使用量及距饮用水井的距离有相应的要求,且工程表面需要密封覆盖,其中浸出量阈值是基于保护地下水和地表水环境所制定的。土壤的再利用情景一般包括路堤、道路、轨道、堤坝、斜坡等。

表 2-2 土壤再利用阈值

	含量阈值(mg/kg)					
	1级	2 级	3 级			
砷	0-20	>20	>20			
铅	0-40	>40	>40			
镉	0-0.5	>0.5	>0.5			
总铬	0-500	>500	>500			
铬 (VI)	0-20	>20	>20			
铜	0-500	>500	>500			
汞	0-1	>1	>1			
镍	0-30	>30	>30			
锌	0-500	>500	>500			
	浸出量阈值	直(µg/L)				
氯化物	0-150000	0-150000	150000-3000000			
硫酸盐	0-250000	0-250000	250000-4000000			
钠	0-100000	0-100000	100000-1500000			
砷	0-8	0-8	8-50			
钡	0-300	0-300	300-4000			
铅	0-10	0-10	10-100			
镉	0-2	0-2	2-40			
总铬	0-10	0-10	10-500			
铜	0-45	0-45	45-2000			
汞	0-0.1	0-0.1	0.1-1			
锰	0-150	0-150	150-1000			
镍	0-10	0-10	10-70			
硒	0-10	0-10	10-30			
锌	0-100	0-100	100-1500			

汉堡将污染土壤分为 Z0、Z1、Z2、Z3、Z4、Z5 共 6 级, 其中 Z0~Z2 的土壤可以被再利用, Z3~Z5 的土壤只能被填埋处置,满足 Z3 的土壤需在 1 类填埋场处置,满足 Z4 的土壤需在 2 类填埋场处置,满足 Z5 的土壤仅能在危险废物填埋场处置。同时该阈值还包括部分易迁移污染物的浸出量阈值,见表 2-3。

Z0 分不同土质(砂土、亚粘土、粘土)的阈值和砾石坑填充的阈值 Z0\*。通常情况下,满足 Z0 的土壤可以被无限制利用,但如果土壤来自于污染场地或污水净化厂,则不能再利用于特别敏感的区域,如儿童游乐场、运动场、学校操场、家庭花园、农业区、地下水保护区等。

满足 Z1 的土壤再利用时有一定的限制,如用于矿区复垦、道路建设、工业区域、有绿植覆盖的公园、杂草区,但饮用水源地、泉水疗养区域、洪水频发区和自然保护区除外。同时, Z1 级根据水文地质状况的不同又分为 Z1.1 和 Z1.2 浸出量阈值, Z1.2 级阈值是针对地下水含水层之上至少有 2m 厚的粘土层或亚粘土层阻隔的地区。

满足 Z2 的土壤再利用时有限制且需要一定的技术预防措施,如噪声防护墙(矿物顶板 >0.5m, $k<5\times10^9$ m/s)、路基(防渗层或矿物顶板>0.5m, $k<5\times10^9$ m/s)、废物处置场的施工措施。

表 2-3 土壤再利用阈值

污染物	Z0 砂土	Z0 亚粘土	Z0 粘土	Z0*	Z1.1/2	Z1.2	Z2	单位
含量阈值								
砷	10	15	20	15	45		150	mg/kg
铅	40	70	100	140	210	)	700	mg/kg
镉	0.4	1	1.5	1	3		10	mg/kg
铬	30	60	100	120	180	)	600	mg/kg
铜	20	40	60	80	120	)	400	mg/kg
汞	0.1	0.5	1	1	1.5	5	5	mg/kg
镍	15	50	70	100	150	)	500	mg/kg
锌	60	150	200	300	450	)	1500	mg/kg
铊	0.4	0.7	1	0.7	2.1		7	mg/kg
氰化物					3		10	mg/kg
TOC	0.5(1)1)	0.5(1)1)	0.5(1)1)	0.5(1)1)	1.5	;	5	%
可萃取有机 卤化物	1	1	1	1	3		10	mg/kg
PAK16	3	3	3	3	3(9	)	30	mg/kg
苯并(a)芘	0.3	0.3	0.3	0.6	0.9	)	3	mg/kg
烃类	100	100	100	200(400)2)	300 (60	00)2)	1000 (2000) 2)	mg/kg
苯系物	1	1	1	1	1		1	mg/kg
LHKW	1	1	1	1	1		1	mg/kg
PCB6	0.05	0.05	0.05	0.1	0.1	5	0.5	mg/kg
			ě	是出量阈值				
pH 值		6.5	5-9.5		6.5-9.5	6-12	5.5-12	

电导率	250	250	1500	/	1500
砷	14	14	20	60	μg/l
铅	40	40	80	200	μg/l
镉	1.5	1.5	3	6	μg/l
铬	12.5	12.5	25	60	μg/l
铜	20	20	60	100	μg/l
汞	<0.5	< 0.5	1	2	μg/l
镍	15	15	20	70	μg/l
锌	150	150	200	600	μg/l
苯酚	20	20	40	100	μg/l
氰化物	5	5	10	20	μg/l
氯化物	30	30	50	100	mg/l
硫酸盐	20	20	50	200	mg/l

注: <sup>1)</sup>如果 C/N>25, 则采用 1%; <sup>2)</sup>C10~C22 采用 200mg/kg, C10~C40 采用 400mg/kg, 下同。

# (4) 赫尔辛基

赫尔辛基土壤再利用阈值分为 3 级,阈值、指导值下限、指导值上限,见表 2-4。污染物含量低于阈值的土壤被认为非污染,可无限制使用,污<mark>染物含量低于指导值下限(lower guideline value)的可被用于庭院(yards)或存储,高于指导值上限(upper guideline value)的可被用于垃圾填埋场封场覆土。</mark>

表 2-4 土壤再利用阈值 (mg/kg)

污染物	阈值	指导值下限	指导值上限
192619		mg/kg TS	
重金属和半金属			
锑	2	10(t)	50(e)
砷	5	50(e)	100(e)
汞	0.5	2(e)	5(e)
镉	1	10(e)	20(e)
钴	20	100(e)	250(e)
铬	100	200(e)	300(e)
铜	100	150(e)	200(e)
铅	60	200(t)	750(e)
镍	50	100(e)	150(e)
锌	200	250(e)	400(e)
钒	100	150(e)	250(e)
其他无机物			
氰化物	1	10	50
芳香烃	•		
苯	0.02	0.2(t)	1(t)
甲苯		5(t)	25(t)
乙苯		10(t)	50(t)

二甲苯		10(t)	50(t)
TEX	1		
含氯脂肪烃			
二氯甲烷	0.01	1(t)	5(t,e)
氯乙烯	0.01	0.01(t)	0.01(t)
二氯乙	0.01	0.05(t)	0.2(t)
三氯乙烷	0.01	1(e,t)	5(e)
四氯乙烯	0.01	0.5(t)	2(t)
蔥	1	5(e)	15(e)
苯并(a) 蒽	1	5(e)	15(e)
苯并(a) 芘	0.2	2(t)	15(e)
苯并(k)荧蒽	1	5(e)	15(e)
菲	1	5(e)	15(e)
荧蔥	1	5(e)	15(e)
萘	1	5(e)	15(e)
多环芳烃	15	30(e)	100(e)
PCB、PCDD/F			
多氯联苯	0.1	0.5(t)	5(e)
二噁英	0.00001	0.001(t)	0.0015(e)
氯苯类			
三氯苯	0.1	5 (t)	20 (e)
四氯苯	0.1	1 (t)	5 (e)
五氯苯	0.1	1 (t)	5 (e)
六氯苯	0.01	0.05 (t)	2 (e)
氣酚		•	
一氯酚	0.5	5 (e,t)	10(e)
二氯酚	0.5	5(t)	40(e)
三氯酚	0.5	10(e,t)	40(e)
四氯酚	0.5	10(e,t)	40(e)
五氯酚 (P)	0.5	10(e,t)	20(e)
农药和杀菌剂			
锈去津(P)	0.05	1(e)	2(e)
DDT-DDD-DDE	0.1	1(e)	2(e)
狄氏剂	0.05	1(e)	2(e)
硫丹	0.1	1(e)	2(e)
七氯	0.01	0.2(e)	1(e)
林丹	0.01	0.2(e)	2(e)
三丁基锡-三苯基锡	0.1	1(e)	2(e)
石油烃			
MTBE-TAME	0.1	5(t)	50(t)
汽油馏分(C5-C10)		100	500
中间馏分(>C10-C21)		300	1000
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		i

石油馏分(>C10-C40)	300	
	500	

注: (t)表示基于健康风险, (e)表示基于生态风险, (f)表示浓度低于指导值下限时, 对地下水产生的风险较大。

### (5) 奥斯陆

奥斯陆污染土壤阈值分为 5 级,分别为 1 级(非常好)、2 级(好)、3 级(中等)、4 级(差)、5 级(非常差),见表 2-5。其中污染物含量低于 1 级标准的土壤可无限制使用,满足 2 级标准的土壤可被用于住宅、幼儿园、公园和其他敏感用地情景,满足 3 级标准的土壤可被用于市中心、写字楼、商店等用地情景,满足 4 级标准的土壤可被用于工业、交通道路等用地情景,满足 5 级标准的土壤只能经过风险评估后用于非敏感区。

表 2-5 污染土壤阈值 (mg/kg)

	1级	2 级	3 级	4级	5 级
污染物	非常好	好	中等	差	非常差
砷	<8	8-20	20-50	50-600	600-1000
铅	<60	60-100	100-300	300-700	700-2500
镉	<1.5	1.5-10	10-15	15-30	30-1000
汞	<1	1-2	2-4	4-10	10-100
铜	<100	100-200	200-1000	1000-8500	8500-25000
锌	<200	200-500	500-1000	1000-5000	5000-25000
铬(Ⅲ)	<50	50-200	200-500	500-2800	2800-25000
铬 (VI)	<2	2-5	5-20	20-80	80-1000
镍	<60	60-135	135-200	200-1200	1200-2500
PCB7	< 0.01	0.01-0.5	0.5-1	1-5	5-50
滴滴涕	< 0.04	0.04-4	4-12	12-30	30-50
PAH16	<2	2-8	8-50	50-150	150-2500
苯并(a)芘	< 0.1	0.1-0.5	0.5-5	5-15	15-100
脂肪烃 C8-C10	<10	<10	10-40	40-50	50-20000
脂肪烃>C10-C12	<30	30-60	60-130	130-300	300-20000
脂肪烃>C12-C35	<100	100-300	300-600	600-2000	2000-20000
邻苯二甲酸二异辛酯	<2.8	2.8-25	25-40	40-60	60-5000
二噁英/呋喃	< 0.00001	0.00001-0.00002	0.00002-0.0001	0.0001-0.00036	0.00036-0.015
酚	< 0.1	0.1-4	4-40	40-400	400-25000
苯	< 0.01	0.01-0.015	0.015-0.04	0.04-0.05	0.05-1000
三氯乙烷	<0.1	0.1-0.2	0.2-0.6	0.6-0.8	0.8-1000
	无限制使用	住宅、幼儿园、 公园和其他敏 感用地区	市中心、写字楼、商店	工业、交通 道路	经过风险评 估后用于非 敏感区

# (6) 斯德哥尔摩

斯德哥尔摩污染土壤阈值称为指导值,分为2级标准,如表2-6。分别适用于**无限制使**用、敏感用地(KM,可确保儿童、成年、老人终生居住)、不敏感用地(MKM,办公楼、

# 工业或道路用地)。

表 2-6 污染土壤阈值 (mg/kg)

污染物	KM	MKM	备注
锑	12	30	
砷	10	25	
钡	200	300	
铅	50	400	
	0.5	15	
 钴	15	35	
 铜	80	200	
总铬	80	150	如果 Cr (VI) 占总铬的1%, 应同时考虑Cr (VI)
铬(VI)	2	10	2
汞	0.25	2.5	
钼	40	100	
镍	40	120	
钒	100	200	
锌	250	500	
总氰化物	30	120	
氰化物 (游离态)	0.4	1.5	2
苯酚和甲酚	1.5	5	2
总氯酚 (五氯酚)	0.5	3	2
总二氯苯	5	15	1+2
三氯苯	1	10	
Sum of tetra- och	0.5	2	
pentachlorbenzenes	0.5	2	
六氯苯	0.035	2	
二氯甲烷	0.08	0.25	1+2
二溴氯甲烷	0.5	2	1+2
一溴二氯甲烷	0.06	1	1+2
三氯乙烷	0.4	1.2	1+2
Koltetraklorid (Tetraklormetan)	0.08	0.35	1+2
1,2-二氯乙烷	0.02	0.06	1+2
1,2-二溴乙烷	0.0015	0.025	1+2
1,1,1-三氯乙烷	5	30	1+2
Trichloretene	0.2	0.6	1+2
Tetrachloretene	0.4	1.2	1+2
二硝基甲苯(2,4)	0.05	0.5	2
PCB-7	0.008	0.2	PCB-7 约占总 PCB 的 20%
二噁英(TCDD-ekv WHO-TEQ)	0.00002	0.0002	包括二噁英类 PCB
PAH L	3	15	低环 PAH
PAH M	3	20	中环 PAH

PAH	1	10	高环 PAH
苯	0.012	0.04	1+2
甲苯	10	40	1+2
乙苯	10	50	1+2
二甲苯	10	50	1+2
脂肪烃>C5-C8	12	80	1+2
脂肪烃>C8-C10	20	120	1
脂肪烃>C10-C12	100	500	1
脂肪烃>C12-C16	100	500	
脂肪烃>C5-C16	100	500	
脂肪烃>C16-C35	100	1000	
脂肪烃>C8-C10	10	50	
脂肪烃>C10-C16	3	15	
脂肪烃>C16-C35	10	30	
甲基叔丁基醚	0.2	0.6	2

注:备注中1表示该污染物大部分存在于土壤空隙气体中,因此推荐对室内外空气也进行分析;2表示该污染物大部分存在于地下水中,因此推荐对地下水也进行分析。

### (7) 维也纳

维也纳土壤阈值分为 A1、A2 两级。其中 A1 级阈值为无限制使用,且根据土质不同分别制定了砂土、混合土、粘土的相应标准; A2 级阈值为有限制使用(只能被用作下层土壤),若土壤再利用于地下水饮用水源地,部分易淋溶迁移的污染物,必须同时满足额外的阈值,见表 2-7 和 2-8。

表 2-7 A1 级无限制使用阈值(mg/kg)

	砂土	混合土	粘土
砷	20	20	20
铅	30	50	70
镉	0.5	0.7	1.1
铬(III+VI)	40	40	70
铜	30	30	40
镍	30	30	50
汞	0.2	0.3	0.7
锌	100	100	140
总烃类	20/50/100/2001		
总 PAHs(16 种)	2		
苯并(a)芘	0.2		
苯系物	0.1		
PCB (6)	0.1		
可吸附有机卤素(Cl)	0.3		

¹TOC≤0.3 % 或 0.3 %≤TOC≤0.5% 或 0.5%≤ TOC≤ 2 %或 TOC≥2 %

# 表 2-8 A2 级有限制使用标准(mg/kg)

	总量	浸出部分
砷	30	0.3
铅	100	0.3
镉	1.1	0.03
铬	90	0.3
钴	30	$0.5^{3}$
铜	60/901	0.6
镍	55	0.6
汞	0.7	0.01
锌	300/4501	18
总烃类	20/50/100/2002	5-13
总 PAHs(16 种)	2	0.023
苯并(a)芘	0.2	
苯系物	1	0.33
PCB (6)	0.1	0.0053
可吸附有机卤素(Cl)		0.3
Anionic tensides		13
TOC	5000	1003
苯酚		0.053
地下水饮用水源地		
pH 值		6.5-9.5
电导率		50
铝		5
锑		0.1
钡		5
铍		0.05
硼		5
铬		0.2
铁		5
锰		0.5
铯		0.1
银		0.2
铊		0.1
钒		0.5
锡		0.5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		1
NO <sub>3</sub> -		70
NO2-		0.5
挥发性氰化物		0.1
总氰		
氟		15
Cl		1000

PO <sub>4</sub> <sup>3</sup> -	1
SO <sub>4</sub> <sup>2</sup> -	1500

<sup>「</sup>若 pH>7,则采用较高值; <sup>2</sup>TOC≤0.3 % 或 0.3 %≤TOC≤0.5% 或 0.5%≤ TOC≤ 2 %或 TOC≥2 %; <sup>3</sup>仅用于饮用水源地。

### 2.2. 马萨诸塞州

美国马萨诸塞州环保局于 1997 年 8 月发布了《污染土壤在垃圾填埋场中的再利用及处置》政策。该政策将垃圾填埋场分为有衬层和无衬层两类,污染土壤在垃圾填埋场中的再利用包括每日覆土、中间覆土及封顶前外部覆盖材料(pre-capping contour material)三种情况,并分别制定了污染土壤中重金属、总石油烃(TPH)、多氯联苯(PCBs)、总半挥发性有机污染物(SVOCs)、总挥发性有机污染物(VOCs)在两类填埋场中的再利用水平,如表 2-1。若土壤中污染物浓度低于表 2-9 中规定的标准值,可直接在垃圾填埋场中被再利用。

污染物	有衬层垃圾填埋场	无衬层垃圾填埋场
总砷	40	40
总镉	80	30
总铬	1000	1000
总铅	2000	1000
总汞	10	10
总石油烃	5000	2500
PCBs	<2	<2
总 SVOCs	100	100
总 VOCs	10	4

表 2-9 土壤再利用水平 (mg/kg)

该标准的制定部分基于风险评估结果,同时,污染土壤在垃圾填埋场再利用的过程必须 遵守以下程序:

- (1) 当污染土壤用于每日覆土,必须满足马萨诸塞州《固体废物管理设施规定》(310 CMR 19.130(15)) 对覆盖材料的要求,包括覆盖材料应无气味。
  - (2) 用作每日覆土的污染土壤量不应超过单日处理固体废物量的 25%。
- (3) 当污染土壤用于中间覆土,必须满足马萨诸塞州《固体废物管理设施规定》(310 CMR 19.130(15)(c)) 对覆盖材料的要求,包括覆盖材料应符合统一的土壤分类系统级别:G.C.; S.C.; C.H.; C.L.; O.H.。
- (4) 无衬层垃圾填埋场接收污染土壤作为每日覆土、中间覆土或封顶前外部覆盖材料应得到地方部门关于侵蚀控制和挖掘安置计划的许可。此外,无衬层垃圾填埋场接收污染土壤作为每日覆土的量应得到部门的批准。
  - (5)每日覆土或其他含污染土壤的再利用材料应于90天内被处置。
- (6)污染土壤不论在存储或再利用过程中,都应采取防护措施以保证以外的区域不被 污染。

- (7)逸散的灰尘水平应控制在最佳管理措施(如添加化学试剂或其他经过批准的方法)的最低水平,污染土壤不能被用于运输道或其他有交通道路。
- (8) 计划用于有衬层垃圾填埋场的污染土壤应存储在有衬层的地方,计划用于无衬层垃圾填埋场的污染土壤应存储在垃圾填埋场内部的指定区域。
  - (9) 已接受封场覆盖的垃圾填埋场不能存储污染土壤。
  - (10) 污染土壤不能与垃圾填埋场衬层接触。
- (11)污染土壤不应含能自由排放的液体,这种情况下可通过视觉判断,同时 EPA 9095 方法可用于确定土壤样品中是否存在自由排放的液体。
- (12) 污染土壤中不应含固体废物(如拆迁废物或其他易腐烂废物),马萨诸塞州《固体废物管理设施规定》(310 CMR 16.05(3)(i))中有关于有条件豁免碎石处理(破碎)的规定。

此外,该政策规定了污染土壤产生者需提供给垃圾填埋场管理者关于污染土壤检测数据和文件等一般资料的种类、制定及实施采样计划需考虑的因素、针对 TCLP 处理后土壤及来自于住宅用地铅污染土壤的规定、污染土壤运输记录、垃圾填埋场运行条例等,以确定污染土壤是否符合填埋场的接收标准。

### 2.3. 纽约州

美国纽约州环保局于 1992 年发布了《石油污染土壤指导政策》,该指导政策包括石油污染土壤危险废物的确定、石油污染土壤清理导则、土壤指导值、实验室分析、样品采集、异位污染土壤及原位污染土壤的管理政策等。其中对于异位非危险废物的石油污染土壤,按照工业固体废物管理,为妥善处理这种污染土壤,通常有以下几种方案:

(1) 土壤中污染物含量高于指导值

对于污染物含量高于指导值的情况,该类污染土壤可按照环保部的有效利用决议 (Beneficial Use Determination),如在被认可的热混合沥青配料厂、冷混合沥青厂被再利用,在环保部授权的垃圾填埋场处理或原地处理等。

### ①有效利用决议

利用石油污染土壤生产可销售的产品符合有效利用决议,各生产过程都必须按照有效利用决议的要求进行,目前热混合和冷混合沥青生产是石油烃污染土壤有效利用决议的两个主要途径。

a.在许可的沥青搅拌厂再利用

通常情况下,只要沥青搅拌厂符合有效利用决议中关于设备的管理要求,就能被授权允许接收非危险废物的污染土壤用作骨料。例如利用石油污染土壤作为骨料的工厂需要改变设备的废气排放许可证等。

b.生产冷混合沥青

泄露响应计划(Spill Response Program) 中允许将石油污染土壤用于生产冷混合沥青,但同时规定申请人在收到批准前必须满足特定的测试要求。每一个有效利用决议都规定了生产的冷混合沥青的允许用途、合格情况及后处理测试协议等。

### ②在授权的垃圾填埋场处理

环保部授权的垃圾填埋场是指有经营许可或同意令的填埋场,尽管这种方法不是处理污染土壤的最好方法,但在场地受限的条件下却是最为经济且唯一选择。垃圾填埋场运营者可基于运行设施的情况,对预接收的污染土壤设定其他要求。

### ③原位处理

对于非危险废物的石油污染土壤,可在原地进行原位处理。土壤处理的过程通常包括挖掘、安全存储、在地面以上处理或将土壤放回已开挖的坑内处理。如果开挖的坑内未受到污染,则应在坑内铺设衬层以防止污染土处理过程中造成污染,如果开挖的坑内已受到污染,则应经过调查后决定是否需要铺设衬层。

所有挖掘出的土壤应该放置在防渗材料上,且对表层进行苫盖。同时应该评估挖掘土壤 对周围空气的影响,如果场地内空间有限或处理过程会对人体健康产生危害,则应禁止污染 土壤的原位处理。

### (2) 土壤中污染物含量低于指导值

满足特定指导值的土壤可被再利用于高速公路路基材料、填补原有的开挖、填补原场地任何地方或填补到其他预先批准的场外等。首先区域泄露检查员(Regional Spill Supervisor)或由区域检察员指派的人员将审查所有的土壤采样数据,以确定该土壤是否符合再利用要求,相关责任方应保留场地数据、实验室检测结果及最终处置记录三年。此外,在未接到实验室数据之前,无法确认土壤中污染浓度是否低于指导值,被再利用于场外的土壤不能被随意运输。

以下是几种常见的土壤再利用类型:

### ①建筑材料

再利用于建筑材料的土壤需同时满足基于保护地下水和人体健康的指导值,且无公害特征,建筑材料包括热沥青、冷拌沥青、水泥、路边地基等。

### ②原开挖地回填

回填到原开挖地的土壤需同时满足基于保护地下水和人体健康的指导值,且无公害特征。

### ③原场地任何地方放置

在原场地任何地方放置的土壤必须同时满足基于保护地下水和人体健康的指导值,且无公害特征。

### ④再利用于预先批准的场地

区域泄露工程师 (Regional Spill Engineer) 和区域固废工程师 (Regional Waste Engineer)

可以批准将土壤再利用于预先批准场地,但土壤必须同时满足基于保护地下水和人体健康的指导值,且无公害特征。该类场地通常是工业场地、授权的拆迁废料垃圾填埋场、石油存储设施、授权的垃圾填埋场或公众访问受限的其他地方,开展该类再利用行动前必须收到场地业主的书面批准。责任方必须向区域泄露工程师提交请求,之后区域泄露工程师与区域固废工程师协商以批准或拒绝请求。

纽约州环保局固废管理部门规定,对于低污染物含量的土壤,再利用类型取决于所满足的特定指导值,如表 2-10。

表 2-10 土壤再利用类型及需满足的指导值

五利田米刑	需满足的指导值			
再利用类型	保护地下水	保护人体健康	防止公害特性	
生产沥青或混凝土				
冷拌沥青				
建筑材料	√	√	√	
原开挖地回填	√	√	√	
原场地任何地方放置	√	√	√	
预先批准的其他场地	√	√	√	

公害特性: 石油类气味或土壤中单个污染物浓度大于 10000mg/kg。

各石油类污染物基于保护地下水和人体健康的指导值见表 2-11。

表 2-11 石油类污染物基于保护地下水和人体健康的指导值(mg/kg)

污染物	保护人体健康指导值	保护地下水指导值
汽油类		
苯	0.06	0.06
正丁基苯	12.0	12
仲丁基苯	11.0	11
乙苯	1.0	1
异丙基苯	2.3	/
对甲基异丙基苯	10.0	/
甲基叔丁基醚	0.93	0.93
萘	12.0	12
正丙苯	3.9	3.9
叔丁基苯	5.9	5.9
甲苯	0.7	0.7
1,2,4-三甲苯	3.6	3.6
1,3,5-三甲苯	8.4	8.4
总二甲苯	0.26	1.6
重油类		
苊	20	98
苊烯	100	107
蒽	100	1000
苯并(a)蒽	1.0	1

二苯并(a,h)蒽	0.33	1000
苯	0.06	0.06
正丁基苯	12.0	12
仲丁基苯	11.0	11
叔丁基苯	5.9	5.9
屈	1.0	1
乙苯	1.0	1
荧蒽	100	1000
苯并(b)荧蒽	1.0	1.7
苯并(k)荧蒽	0.8	1.7
芴	30	386
异丙基苯	2.3	/
甲基异丙基苯	10.0	/
萘	12.0	12
正丙苯	3.9	3.9
苯并(g,h,i)菲	100	1000
菲	100	1000
芘	100	1000
苯并(a)芘	1.0	22
茚并(1,2,3-cd)芘	0.5	8.2
1,2,4-三甲苯	3.6	3.6
1,3,5-三甲苯	8.4	8.4
甲苯	0.7	0.7
总二甲苯	0.26	1.6

经验表明,已满足清理水平的土壤可能存在异味或着色等公害特性,因此环保部门要求 对该类土壤采取附加修复措施,以除掉其公害特性。

### (3) 岩屑

该政策中岩屑指直径大于 4 英寸的石块,将附着于其表面的石油污染土壤被清理后可被 当作拆迁废料处理,而非固体废物。如果岩屑表面的石油污染土壤不能被分离,则应作为固 体废物处理。

### 2.4. 新泽西州

美国新泽西州于 1998 年发布的《污染土壤修复导则》(Guidance Document for the Remediation of Contaminated Soils)中介绍了土壤再利用的内容,该导则将土壤分为三类:

- ▶ 含危险废物的土壤;
- ▶ 不含危险废物,但污染物含量高于控制标准的土壤;
- ➢ 污染物含量低于控制标准的土壤。
  对于含危险废物的土壤,只能原位处理或作为危险废物在场外处理。

其他类型土壤再利用包括:

### (1) 不含危险废物土壤

对于污染程度较小的土壤,最常见的再利用方式包括道路地基材料、垃圾填埋场覆土和 回收设施。若土壤中污染物含量高于特定场地最严格标准(该标准由新泽西环保局制定), 在经新泽西环保局允许之后才能被再利用。所有情况下土壤的再利用都必须同时考虑对地下 水、地表水、下层结构(如地下室和室内区域)及其他潜在人群和生态受体的保护。

### (2) 特定场地土壤再利用建议

如果需将土壤再利用于特定场地(如没有土壤再利用许可的场址),需要向新泽西州环保部门场地修复组织提供土壤再利用提议。在提议被批准之前,污染土产生者必须提交废物的分级及依据;对于正在审查中的提议,可与实地行动部门的相关签批人员联系获得批准。

所有的土壤利用/再利用申请必须满足以下标准:

### ①松林地区域

如果来自于松林地或以外区域土壤的污染物含量小于或等于新泽西州环保部门最严格 的修复标准,则该土壤只能在污染物含量低于接收地土壤背景值的情况下由产生地运出。如 果来自于松林地土壤的污染物含量高于其背景值,则该土壤不能继续留在原地,且在新泽西 州环保部门同意的情况下可被用于其他地方。

### ②有异味或异形

有异味(如石油或化学合成臭味)或异形(影响视觉效果)的土壤不能被用于住宅区、 其他有公众暴露或对正常活动有影响的地方,尤其要注意的是土壤的再利用不能违反空气污 染规定或当地的损害准则等。

### ③遵从的法规

土壤的利用必须与所有适用的联邦、州及地方的要求一致。

### ④允许的储存时间

不含危险废物的土壤自挖掘之日起,在产生地或其他地方的存储时间不能超过 6 个月, 所以关于土壤再利用的考虑及后续行动必须尽早提上日程。

#### (3)被认证的新泽西污染土壤回收中心

被土壤回收中心接收的土壤不需要得到固废管理管理部门的豁免或特定场地再利用批准。

### (4) 州外回收

对于在州外回收的土壤,需得到新泽西环保部门关于固废管理法规不适用的书面同意。 对于没有场地修复项目负责人的场地,若土壤作为固体废物处理,则需要与资源回收与技术 程序部门联系;对于有场地修复项目负责人的场地,需向签批部门提供这些信息而非土壤再 利用提议。

以下是根据新泽西相关政策提出的关于批准土壤州外回收的规范要求:

- ①由土壤产生者提供给资源回收与技术程序部门的关于土壤已经过分析且不含危险废物的证明材料,包含相关土壤检测结果的附件。
- ②由污染土壤接收者提供给固体及危险废物部门的证明材料,材料中应说明他们同意接收特定数量的土壤及土壤最优利用或再利用的目的、方法、时间安排等。此外,应向土壤来源地的固废协调部门提供该信息的副本。
- ③由接收州监督机构提供给固体和危废部门关于当前运行设备符合相关规定,能够实现土壤的利用/再利用的证明材料。
- ④一旦土壤被运至确定的利用/再利用设施,再利用设施拥有者应向固体和危废管理部门、固废协调部门提供关于接收污染土壤的日期及量的信息。
  - (5) 运营中的垃圾填埋场覆土

运营中垃圾填埋场可利用 ID 27 类废物(干的工业废物且非危险废物)作为垃圾填埋场每日覆土,而易被侵蚀或被风吹起的细粒土壤则不允许被用作每日覆土。同时,垃圾填埋场需向垃圾填埋及回收部门提供以下信息以得到批准:

- ①声明已接收该土壤,且审阅了关于污染土壤的所有技术资料。
- ②土壤检测结果副本。
- ③来自于资源回收与技术程序部门的关于土壤废物分级的说明。
- (6) 污染物含量低于控制标准的土壤

除松林地以外,污染物含量低于特定场地控制标准的土壤可不经处理或批准被原地再利用。而潜在或已确定污染的土壤只有在得到新泽西州环保部门批准后才能被场外再利用,或不经批准在已认证的回收中心被回收。此外,"特定场地土壤再利用提议"对污染物含量低于控制标准的土壤同样适用。

污染物含量低于控制标准且非石油污染的土壤能在原场地与混凝土、砖、块混合作为干净的填料,根据想回收法规,这种情况不需要获得环保部门的批准,但必须经相关县或市政部门的审批。

# 3. 国外基于保护地下水的土壤筛选值调研

土壤再利用风险评估包括基于保护人体健康的风险评估和基于保护地下水的风险评估, 且再利用风险评估采用的方法和污染场地风险评估相同。北京市 2009 年发布了《场地环境评价导则》(DB11/T 656-2009),规定了污染场地风险评价的工作程序和一般要求,但导则中仅给出了基于保护人体健康的风险评价方法,关于保护地下水的风险评价方法却并未提出。因此,本研究重点调研其他国家和地区基于地下水保护的风险评价方法,作为基于地下水保护的土壤再利用风险评估依据。

### 3.1. 美国

### 3.1.1. 美国 EPA

美国 EPA 在制定区域筛选值(RSL)时,<mark>将土壤中污染物迁移至地下水分为两个过程:</mark> (1)污染物从土壤解吸进入土壤液相,(2)液相中污染物向下迁移进入含水层后到达受体水井,见图 3-1。

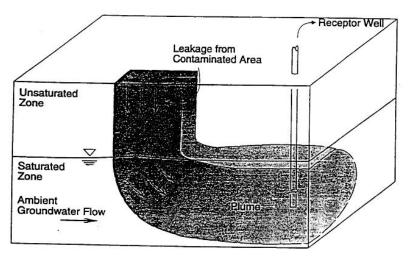


图 3-1 土壤进入地下水概念模型

### 该过程有以下假设:

- 污染源为无限源;
- 污染物在整个区域均匀分布;
- 从地表到地下水的土壤均受到污染;
- 非饱和带不存在化学或生物降解;
- 污染物的土/水平衡分配是瞬时、线性的;
- 受体水井在污染源的边缘且在污染羽中;
- 含水层松散、非承压;
- 含水层均匀且各项同性:

- 含水层中污染物无衰减(吸附或降解);
- 场地中无 NAPLs。

### (1) 过程一: 污染物从土壤解吸进入土壤液相

污染物从土壤解吸进入土壤液相的过程采用三相平衡模拟,对于无机物采用公式(3-1), 对于有机物采用公式(3-2):

$$c_{\rm w} = c_{\rm t} \times \frac{\rho_{\rm d}}{\theta_{\rm w} + H' \times \theta_{\rm a} + \rho_{\rm d} \times K_{\rm d}} \quad (3-1)$$

$$c_{\rm w} = c_{\rm t} \times \frac{\rho_{\rm d}}{\theta_{\rm w} + H' \times \theta_{\rm a} + \rho_{\rm d} \times K_{\rm oc} \times f_{\rm oc}} \quad (3-2)$$

式中:

 $c_{\rm w}$ ——土壤孔隙水中污染物含量,mg/L;

 $c_t$ ——土壤中污染物总含量,mg/kg;

 $\rho_d$ ——土壤干容重, $g/cm^3$ ;

 $\theta_{\rm w}$ ——土壤中水的体积含量,无量纲;

 $\theta_a$ ——土壤中空气的体积含量,无量纲;

H'——污染物亨利常数,无量纲,对于除汞以外的重金属,H'为零;

 $K_d$ —一污染物土-水分配系数,L/kg;

 $K_{oc}$ ——污染物有机碳-水分配系数, L/kg;

foc——土壤有机碳含量, 无量纲。

其中,三相平衡理论是建立在以下假设基础上的:

- 污染源为无限源,污染物不存在挥发或降解损失;
- 吸附量与污染物浓度呈线性关系(该假设对于大多数污染物来说在 低浓度时有效,随着污染物浓度增加,等温吸附将不再是线性关系);
- 系统处于吸附平衡状态(假设土壤和孔隙水中污染物浓度处于平衡水平);
- 吸附-解吸附是可逆的。

### (2)过程二:液相中污染物向下迁移进入含水层后到达受体水井

土壤中污染物浸出穿过土壤和地下水经历了一系列物理、化学和生物过程,使得最终到达受体的污染物浓度降低。该过程包括在土壤和含水层介质中的吸附、化学转化(如水解、沉淀)、生物降解、稀释等,污染物浓度降低的整个过程可用稀释衰减稀释(Dilution/Attenuation Factor,DAF)表示。但美国 EPA 在推导区域筛选值时不考虑污染物在下层土壤中的衰减作用,因此 DAF 仅代表地下水的稀释过程,且推荐了 4 个可选择的简单水平衡公式计算地下水稀释系数,如下:

方法一: ASTM 的方法

$$DF = 1 + \frac{U_{\rm gw}d}{IL} \quad (3-3)$$

其中,

$$U_{\rm gw} = Ki \quad (3-4)$$

式中:

 $U_{\text{gw}}$ ——地下水达西速度,m/yr;

d──混合层深度, m;

*I*──渗透速率, m/yr;

L——平行于地下水流向的长度,m。

K—一含水层渗透系数,m/yr;

*i*——水力梯度, m/m。

### 方法二: EPA 地下水论坛的方法

$$DF = (Q_P + Q_A)/Q_P$$
 (3-5)

其中,

$$Q_{\rm p} = IA \ (3-6)$$

$$Q_{A} = WdKi \quad (3-7)$$

式中:

 $Q_P$ ——渗流流量, $m^3/yr$ ;

 $Q_A$ —一含水层流量, $m^3/yr$ ;

A——污染源面积, $m^2$ 。

### 方法三: 萨默斯模型

$$C_{\rm w} = (Q_{\rm p} C_{\rm p})/(Q_{\rm p} + Q_{\Delta})$$
 (3-8)

其中,

$$C_{\rm w} = C_{\rm P} / {\rm DF} \ (3-9)$$

$$DF = (Q_P + Q_A)/Q_P$$
 (3-10)

式中,

Cw——地下水污染物浓度, mg/L;

CP——土壤渗出液中污染物浓度, mg/L。

# 方法四: EPA ORD/RSKERL

$$DF = (Q_P + Q_A)/Q_P = RX/RL$$
 (3-11)

式中,

R——补给率 (渗透率, I), m/yr;

X——地下水界限到受体水井的距离, m。

美国 EPA 采用证据权重的方法(weight of evidence)得出的 DAF 值为 20,该过程基于 OSW EPACMTP 模型的模拟结果和美国 300 个地下水场地采用地下水稀释模型计算的结果 所得到的。

### 3.1.2. 新泽西州

新泽西州在制定基于保护地下水的土壤筛选值时与美国 EPA 一致,假定污染土壤紧邻地下水含水层,因此土壤中污染物迁移至地下水分为两个过程: (1) 污染物从土壤解吸进入土壤液相,(2) 液相中污染物向下迁移进入含水层后到达受体水井,且不考虑污染物在非饱和带中的衰减。同样,污染物的解吸采用三相平衡公式,如公式(3-1)和(3-2);衰减因子的计算采用 ASTM 的箱式模型,如公式(3-3)。

但对于特定场地,在制定基于保护地下水的土壤修复标准时,为了使结果更加符合特定场地实际情况,所采用的方法与制定筛选值有不同,土壤中污染物迁移至地下水分为三个过程: (1)污染物从土壤解吸进入土壤液相: (2)土壤孔隙水中污染物经非饱和带对流弥散、吸附衰减等,浓度降低: (3)液相中污染物向下迁移进入含水层后到达受体。其中过程(1)可采用 SPLP 的方法预测污染物在土-水间的分配,过程(2)考虑污染物在非饱和带中的衰减作用。

### (1) 过程一:污染物从土壤解吸进入土壤液相

该过程可采用以下两种方法:

①三相平衡模型法

同 3.1.1 中公式 (3-1)、(3-2)。

②SPLP 浸出实验法

对于无机物和低挥发性有机物( $K_{oc}$ >2000L/kg),由于易吸附在土壤且难溶于水不易浸出,因此可采用 SPLP 方法(USEPA SW-846 Method 1312),该方法同样适用于挥发性有机物。通过 SPLP 实验计算出污染物  $K_{d}$  值,见公式(3-12),之后代入三相平衡公式(3-1)中计算特定场地浸出液中污染物浓度。

$$K_{\rm d} = \frac{(c_{\rm s} M_{\rm s} - c_{\rm L} V_{\rm L})/M_{\rm s}}{c_{\rm L}}$$
 (3-12)

式中,

 $M_s$ ——测试土壤样品质量,kg;

 $c_L$ ——浸出液中污染物浓度,mg/L;

 $V_L$ ——浸出液体积,L。

该方法可有效减小模型的不确定性,但不适用于挥发性有机物甲醇的测定,因为挥发性 有机物的采集需要使用甲醇采集。

### (2)过程二:土壤孔隙水中污染物经非饱和带对流弥散、吸附衰减

当污染土壤与地下水之间存在"干净"或"缓冲"区域时,这层清洁土壤的存在,能够在很大程度上对污染物进行吸附截留,导致实际进入地下水中污染物的浓度大大降低。因此,新泽西州建议在进行特定场地风险评估时考虑污染物在该区域的衰减作用,并推荐采用SESOIL模型预测,该模型是一维溶质运移模型,由美国环保署水质和有毒废物管理办公室于 1981年开发,同时也被俄勒冈州、新罕布什尔威斯康辛马萨诸塞和夏夷等州的环保部门所接受。SESOIL模型考虑了污染物的挥发、对流弥散、吸附降解等过程,能较客观地描述污染物在非饱和带中的迁移转化过程,同时由于该模型相对于其他模型来说需要更少的场地参数,因此常被用作筛选级模型。一维溶质运移模型的主要公式见(3-13):

$$R\frac{\partial c}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v\frac{\partial c}{\partial z} - \mu c \quad (3-13)$$

式中:

c——非饱和带土壤孔隙水中污染物含量,mg/L;

D——非饱和带土壤中水动力弥散系数, $cm^2/s$ ;

v——垂直方向孔隙水流速,cm/s;

 $\mu$ ——一级衰减系数,1/s;

z——距污染源下方的距离,cm;

R——延迟系数。

### 过程三:(3)液相中污染物向下迁移进入含水层后到达受体

在制定统一筛选值时,新泽西推荐采用箱式模型,模拟污染物在地下水中的混合稀释,同公式(3-3)。对于特定场地,新泽西州推荐采用 AT123D 模型预测污染物在地下水含水层中的对流、弥散、吸附和降解作用,该模型可估算污染物在含水层中浓度的时空分布,并可预测污染物在含水层中的瞬时分布,但该模型适用于地下水已经受到污染的某一特定场地,在地下水未被污染的场地或指定区域通用标准时不适用。

### 3.1.3. 怀俄明州

怀俄明州在制定基于保护地下水的土壤筛选值时与 USEPA 采用的方法基本一致,但不考虑地下水的混合稀释作用,同时加入了土壤衰减因子表示污染物在清洁土壤中的吸附作用,该方法适用于地下水埋深较深或有明显的清洁非饱和带土壤存在的状况,见公式(3-14)。

$$AF = \frac{L_2}{L_1}$$
 (3-14)

式中,

 $L_1$ —一受污染土壤厚度, cm;

 $L_2$ ——受污染土壤表层到地下水含水层面的距离,cm。

### 3.2. 加拿大

加拿大制定基于保护地下水的指导值时采用英属哥伦比亚污染场地土壤工作组(CSST)的地下水模型,该模型基于 USEPA 土壤筛选指导值采用的方法,并且采用了保护地下水迁移公式。该模型是基于一维地下水流,包含弥散、生物降解、吸附解吸、稀释等一系列过程。

### 该模型中, 土壤中污染物进入地下水包括以下四个步骤:

- (1) 污染物在土壤、土壤气和土壤孔隙水间分配:
- (2) 污染物通过非饱和带迁移至地下水面;
- (3) 污染物在地下水中混合稀释;
- (4) 污染物在饱和带中迁移至下游受体。

但并非所有情景都包括以上四个过程,特别是过程(2)和(4),只有当污染层与地下水层之间有清洁非饱和带时才考虑过程(2),只有当地下水受体与污染源间有一定的横向距离时才考虑过程(4)。因此,加拿大在制定基于保护地下水的通用指导值仅考虑过程(1)和过程(3)。

### (1)污染物在土壤、土壤气和土壤孔隙水间分配(DF1)

该过程采用三相平衡,见公式(3-15):

$$SQG_{GW} = C_{L} \left\{ K_d + \frac{\theta_w + H'\theta_a}{\rho_b} \right\}$$
 (3-15)

因此,

$$DF1 = K_d + \frac{\theta_w + H'\theta_a}{\rho_h} \quad (3-16)$$

式中,

SQG<sub>GW</sub>——保护地下水的土壤质量指导值, mg/kg;

 $C_1$ —污染源处土壤孔隙水中污染物浓度,mg/L:

其他参数含义同上。

# (2)污染物通过非饱和带迁移至地下水面(DF2)

$$C_{L} = \frac{C_{z}}{\exp\left[\frac{b}{2\partial_{u}} - \frac{b}{2\partial_{u}} \left(1 + \frac{4\partial_{u}L_{\text{US}}}{v_{u}}\right)^{1/2}\right]}$$
(3-17)

因此,

DF2 = exp
$$\left[\frac{b}{2\partial_{u}} - \frac{b}{2\partial_{u}} \left(1 + \frac{4\partial_{u}L_{\text{US}}}{v_{u}}\right)^{1/2}\right]^{-1}$$
 (3-18)

式中,

Cz——地下水面处土壤孔隙水中污染物浓度, mg/L:

b——污染带下方清洁非饱和带厚度, m;

d——表层土壤到地下水含水层厚度, m;

Z——表层土到污染土底层厚度, m;

∂" ——非饱和带中弥散度 (=0.1b);

 $L_{\text{US}}$ —非饱和带中污染物降解常数,1/y。

### (3) 污染物在地下水中混合稀释 (DF3)

该过程采用箱式模型,公式如下:

$$C_{z} = C_{gw} \left\{ 1 + \left( \frac{Z_{d} K_{H} i}{IX} \right) \right\}$$
 (3-19)

因此,

$$DF3 = 1 + \frac{Z_{d}K_{H}i}{IX}$$
 (3-20)

式中,

 $Z_d$ ——混合层平均厚度, m;

 $K_H$ —一饱和带水力传导系数, m/y;

X——平行于地下水流向的污染带长度, m;

*I*──年降雨入渗率, m/y。

### (4)污染物在饱和带中迁移至下游受体(DF4)

采用多米尼克和罗宾斯解析方程模拟污染物在地下水水平方向的迁移,公式如下:

$$C_{w}(x,y,z) = \left(\frac{C_{gw}}{4}\right) \exp\left\{\left(\frac{x}{2\partial_{x}}\right) \left[1 - \left(1 + \frac{4L_{s}\partial_{x}}{v}\right)^{1/2}\right]\right\} erfc \left[\frac{x - vt\left(1 + \frac{4L_{s}\partial_{x}}{v}\right)^{1/2}}{2(\partial_{x}vt)^{1/2}}\right] \left\{erf\left[\frac{(y + Y/2)}{2(\partial_{y}x)^{1/2}}\right] - erf\left[\frac{y - Y/2}{2(\partial_{y}x)^{1/2}}\right]\right\}$$
(3-21)

式中,

 $C_{\rm w}$ ——受体处污染物浓度允许值, mg/L;

x——污染源到受体距离, m;

x,y,z——污染源到受体的笛卡尔坐标系 (y, z) 0);

t——从污染物释放的时间, y;

 $C_{\text{gw}}$ —污染源处污染物浓度允许值,mg/L;

 $\delta_{\rm v}$ ——纵向弥散度 (0.1x), m;

 $\delta_v$ ——横向弥散度 (0.1  $\delta_x$ ), m;

 $L_s$ —一饱和带降解常数。

### 3.3. 新西兰

新西兰将污染物从土壤到地下水的迁移分为三个过程,与新泽西州类似,其中过程(1)采用三相平衡模型,过程(3)采用箱式模型。过程(2)考虑污染物在清洁非饱和带中的挥发、降解、吸附、弥散等衰减作用,采用一维溶质迁移模型,见公式(3-22):

$$R\frac{\partial c}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - v\frac{\partial c}{\partial z} - \mu c \quad (3-22)$$

式中:

 $c_{\rm w}$ —土壤孔隙水中污染物初始浓度,mg/L;

 $c_{\text{wl}}$ ——进入地下水之前非饱和带土壤中污染物浓度,mg/L;

c——非饱和带土壤中污染物浓度,mg/L;

D——非饱和带土壤中水动力弥散系数, cm²/s;

v——垂直方向孔隙水流速, cm/s;

 $\mu$ ——一级衰减系数,1/s;

z——距污染源下方的距离, cm;

R——延迟系数。

# 4. 北京市污染场地土壤再利用风险评估技术导则的制定

### 4.1. 导则的适用范围

本导则适用于北京市辖区内<mark>污染土壤作为基坑回填用土或覆盖材料被再利用时的风险</mark> 评估,不适用于修复后失去土壤基本性质和功能的土壤再利用时的风险评估,如固化稳定化。

# 4.2. 污染场地土壤再利用概念模型

污染场地土壤再利用时,土壤中污染物: 1)可直接暴露于人体对人体健康产生危害,2) 也可在降雨淋溶作用下向下迁移进入地下水,对地下水造成污染并对地下水使用人群的人体 健康产生危害,典型概念模型见图 4-1:

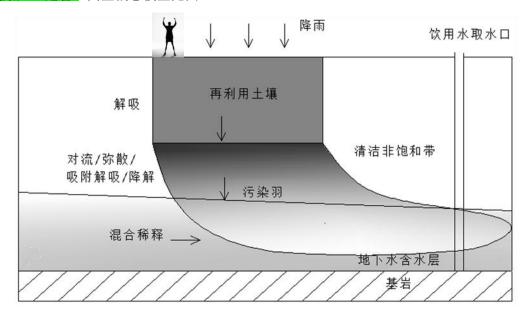


图 4-1 典型污染场地土壤再利用概念模型

其中,污染物迁移进入地下水的过程包括以下四个子过程:

- (1) 土壤中污染物的解吸过程, 即再利用土壤在降雨淋溶作用下,污染物从土壤解吸至土壤孔隙水中;
- (2) <mark>污染物在非饱和带的迁移转化过程</mark>,即土壤孔隙水中污染物随降雨入渗向下迁移, 在清洁非饱和带经对流、弥散、吸附解吸和生物降解等一系列迁移转化过程,到达地下水水 面处;
- (3) <mark>污染物被地下水混合稀释过程,</mark>即土壤孔隙水中污染物进入地下水后,在水流作用下被混合稀释;
- (4) <mark>污染物在地下水的扩散迁移过程,</mark>即污染物在地下水含水层中通过对流和弥散作用发生迁移扩散,最终到达环境敏感点。

## 4.3. 污染场地土壤再利用工作程序

根据国外调研情况,本研究将北京市污染场地土<mark>壤再利用的判</mark>断分为三个阶段:土壤再利用风险筛选、再利用区环境状况调查及特定场地土壤再利用风险评估。

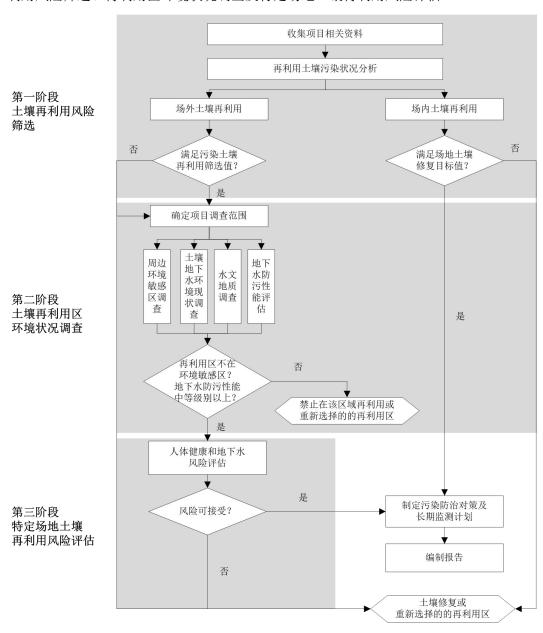


图 4-2 污染场地土壤再利用判断程序

### 4.4. 第一阶段——土壤再利用风险筛选

再利用风险筛选是在对再利用土壤采样分析的基础上,根据场地修复目标值(场内再利用)或再利用土壤筛选值(场外再利用)对再利用土壤进行初步筛选,满足相应限值的土壤才能再利用,否则需进行修复、改变再利用场地或特定场地污染场地土壤再利用风险评估。

### 4.4.1. 再利用土壤污染状况分析

对于再利用的土壤需进行采样和实验室检测分析,了解其污染状况。参照《场地环境调查技术导则》(HJ 25.1-2014)中 6.4.3 对原地异位治理修复工程验收监测点布设的要求,本导则对再利用土壤污染状况分析的采样要求每个样品代表的土壤体积应不超过 500 m³。分析项目为再利用土壤中含量超过本导则制定的土壤再利用筛选值的污染物,分析方法参照《场地环境评价导则》(DB11/T 656-2009)附录 F,如该附录中缺少,可优先选用国标方法或美国环保局采用的方法。

### 4.4.2. 场内土壤再利用

当土壤在场地内再利用时,应根据再利用区域未来的用地情景,按照风险评估阶段制定的修复目标值进行风险筛选。如果土壤中污染物含量小于相应的修复目标值,可在该场地内再利用,反之应对土壤进行修复或重新选择再利用区域。

### 4.4.3. 场外土壤再利用

当土壤在场外再利用时,应根据不同的再利用情景,采用污染场地土壤再利用筛选值进行风险筛选。如果土壤中污染物含量小于相应的土壤再利用筛选值,可进行再利用,反之应进行特定场地土壤再利用风险评估。

### 4.4.4. 场外土壤再利用筛选值

### 4.4.4.1. 关注污染物

关注污染物的选取应考虑以下几方面因素: 1) 所选择的评价要素和因子应能满足预定的目的和要求; 2) 涵盖土壤污染源调查和评价所确定的主要污染源的主要污染物; 3) 发达国家环境质量标准所规定的主要指标; 4) 对土壤-地下水体系危害大,应优先控制的污染物; 5) 现阶段能提供的监测和测试条件。

本导则中确定的关注污染物与北京市现有导则保持一致,直接采用《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T 811-2011)中的88种污染物,其中无机污染物14个、挥发性有机污染物27个、半挥发性有机污染物31个、农药/多氯联苯及其他污染物16个。

### 4.4.4.2. 土壤再利用情景

根据对国外土壤再利用情况的调研,污染场地土壤再利用的主要情景主要包括**无限制再利用、**敏感用地再利用(如居住用地、幼儿园、公园等)和非敏感用地再利用(如商业用地、工业用地、道路路基、基坑回填、沥青搅拌厂、垃圾填埋场覆土、噪声防护墙等),此外,部分国家对土壤再利用的土方量及距饮用水井的距离等有特殊要求,见图 4-3:

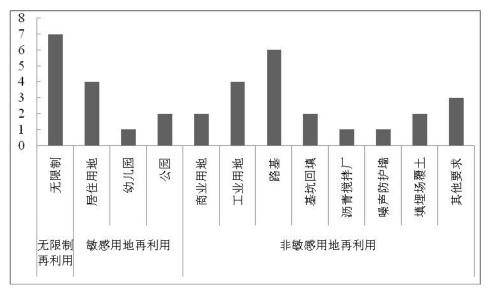


图 4-3 土壤再利用情景

我国《城市用地分类与规划建设用地标准》中将城市建设用地共分为以下8大类:

- ①居住用地:住宅和相应服务设施的用地。
- ②公共管理与公共服务用地:行政、文化、教育、体育、卫生等机构和设施的用地,不包括居住用地中的服务设施用地。
- ③商业服务业设施用地:商业、服务、娱乐康体等设施用地,不包括居住用地中的服务设施用地。
- ④工业用地:工矿企业的生产车间、库房及其附属设施用地,包括专用铁路、码头和附属道路、停车场等用地,不包括露天矿用地。
- ⑤物流仓储用地:物质储备、中转、配送等用地,包括附属道路、停车场以及货运公司 车队的站场等用地。
- ⑥道路与交通设施用地:城市道路、交通设施等用地,不包括居住用地、工业用地等内部的道路、停车场等。
  - ⑦公共设施用地:供应、环境、安全等设施用地。
  - ⑧绿地与广场用地:公共绿地、防护绿地、广场等公共开放空间用地。

根据以上调研结果,本导则将污染场地土壤再利用情景分为三类:

- ①居住与公共服务用地再利用,包括住宅、学校、医院、旅馆和相应服务设施等用地;
- ②绿地与广场用地再利用,包括公园绿地、防护绿地、广场等用地以及生活垃圾填埋场 封场覆土;
- ③工业/商服及其他用地再利用,包括工业、商业服务业、物流仓储、道路路基等用地以及生活垃圾填埋场每日覆土。

### 4.4.4.3. 筛选值分级及使用

本导则根据土壤再利用情景不同,将污染场地土壤再利用筛选值分为三级:

- 一级筛选值:应用于住宅、学校、医院、旅馆和相应服务设施等再利用情景的判定;
- 二级筛选值:应用于公园绿地、防护绿地、广场等再利用情景的判定;
- 三级筛选值:应用于工业、商业服务业、物流仓储、道路路基、生活垃圾填埋场每日覆土等再利用情景的判定。

# 4.4.4.4. 筛选值计算

污染场地土壤再利用筛选值的制定基于同时保护人体健康和地下水环境。

### 4.4.4.4.1. 基于保护人体健康的筛选值

其中基于保护人体健康的筛选值直接采用《场地土壤环境风险评价筛选值》(DB11/T811-2011)的值,其中一级、二级、三级筛选值分别对应住宅用地、公园与绿地、工业/商服用,见表 4-1。

表 4-1 污染场地土壤筛选值(mg/kg)

序号	污染物	一级筛选值	二级筛选值	三级筛选值
无机污染	· · · 物			
1	砷	20	20	20
2	铍	4	4	8
3	镉	8	9	150
4	铬	250	800	2500
5	铬 (VI)	30	30	500
6	铜	600	700	10000
7	铅	400	400	1200
8	汞	10	10	14
9	镍	50	80	300
10	锌	3500	5000	10000
11	锡	3500	7000	10000
12	氰化物	300	350	6000
13	氟化物	650	650	2000
14	石棉	7000	10000	10000
挥发性有	机污染物	·		
15	二氯甲烷	12	21	18
16	苯	0.64	0.64	1.4
17	甲苯	850	1200	3300
18	乙苯	450	890	860
19	氯仿	0.22	0.22	0.5
20	溴仿	62	62	220
21	氯苯	41	93	64
22	四氯化碳	2	2.4	5.4
23	1,1-二氯乙烷	140	360	200
24	1,2-二氯乙烷	3.1	3.7	9.1

序号	污染物	一级筛选值	二级筛选值	三级筛选值
25	1,1,1-三氯乙烷	580	1300	980
26	1,1,2-三氯乙烷	0.5	0.5	15
27	1,1,2,2-四氯乙烷	1.6	6.8	6.8
28	三氯乙烯	7.5	9.5	9.2
29	四氯乙烯	4.6	6.7	12
30	二溴乙烯	0.19	0.23	1.4
31	苯乙烯	1200	2200	2700
32	二甲苯 (总)	74	190	100
33	氯乙烯	0.25	0.3	1.7
34	氯甲烷	12	12	25
35	1,2-二氯乙烯(顺式)	43	150	390
36	1,2-二氯乙烯 (反式)	150	240	360
37	1,1-二氯乙烯	43	100	61
38	1,2-二氯丙烷	5	5	50
39	1,2,3-三氯丙烷	0.05	0.07	0.5
40	二溴氯甲烷	5	6	50
41	一溴二氯甲烷	6	8	70
半挥发	性有机污染物			1
42	六氯苯	0.2	0.3	1
43	苯胺	4	10	4
44	硝基苯	7	9	35
45	苯酚	80	200	90
46	2,4-二硝基甲苯	0.6	0.7	1
47	邻苯二甲酸二丁酯	750	1800	800
48	邻苯二甲酸二辛酯	13	25	30
49	邻苯二甲酸正辛酯	500	700	9000
50	萘	50	60	400
51	菲	5	6	40
52	蒽	50	60	400
53	荧蒽	50	60	400
54	芘	50	60	400
55	屈	50	60	400
56	芴	50	60	400
57	苯并[b]荧蒽	0.5	0.6	4
58	苯并[k]荧蒽	5	6	40
59	苯并[a]芘	0.2	0.2	0.4
60	茚并[1,2,3-cd]芘	0.2	0.6	4
61	苯并[g,h,i]菲	5	6	40
62	苯并[a]蒽	0.5	0.6	4
63	二苯并[a, h]蔥	0.05	0.06	0.4
64	2-氯酚	80	90	350
65	2,4-二氯酚	40	50	400

序号	污染物	一级筛选值	二级筛选值	三级筛选值
66	2,4-二硝基酚	25	35	450
67	2-硝基酚	20	30	20
68	4-硝基酚	4	9	4
69	五氯酚	3	4	10
70	2,4,5-三氯酚	600	1600	700
71	2,4,6-三氯酚	35	40	50
72	4-甲酚	60	80	80
农药/多	5氯联苯及其他			
73	多氯联苯	0.2	0.2	1
74	二恶英类(PCDDs/PCDFs)	0.000002	0.000003	0.00002
75	六六六α	0.2	0.2	0.3
76	六六六β	0.2	0.2	0.7
77	六六六δ	2	2	3
78	林丹 (六六六γ)	0.3	0.4	3
79	DDT(包括 o,p'-DDT,	1	1	11
19	p,p'-DDT)	1	1	11
80	p.p'-DDE	1	1	11
81	p,p'-DDD	2	2	15
82	狄氏剂	0.02	0.03	0.2
83	艾氏剂	0.02	0.03	0.2
84	异狄氏剂	4	5	11
85	敌敌畏	1	1	9
86	乐果	2	3	35
87	总石油烃(脂肪族): <c16< td=""><td>230</td><td>6000</td><td>620</td></c16<>	230	6000	620
88	总石油烃(脂肪族): >C16	10000	10000	10000

# 4.4.4.4.2. 基于保护地下水的筛选值

#### (1) 基本假设

根据"图 4-1 典型污染场地土壤再利用概念模型图",在已知污染物地下水含量限值的情况下可直接反推计算基于保护地下水的污染物筛选值,该值的计算将基于以下假设条件:

- ①土壤中污染物迁移至地下水包括"土壤中污染物的解吸过程"以及"污染物在非饱和带的迁移转化过程",不考虑"地下水的混合稀释过程",且地下水敏感点就在污染土壤正下方;
- ②污染物在非饱和带中的迁移转化过程仅包括对流-弥散和线性平衡吸附作用,不考虑 生物降解作用及非平衡非线性吸附;
- ③回填的污染土深度为 10m,且清洁非饱和带土壤厚度分别为 1m、2m、3m、4m、5m、6m、7m、8m、9m、10m,回填土及清洁非饱和带土质均为粉土。

## (2) 模型选择

#### ①土壤中污染物的解吸过程

采用三相平衡理论模型预测,见公式(4-1):

$$c_{\text{wl}} = c_{\text{s}} \times \frac{\rho_{\text{bl}}}{\theta_{\text{wl}} + H \times \theta_{\text{al}} + \rho_{\text{bl}} \times K_{\text{d}}} \times 10^{-6}$$
 (4-1)

式中:

 $c_{\text{wl}}$ ——再利用土壤孔隙水中污染物浓度, $mg/cm^3$ ;

cs——再利用土壤中污染物初始总浓度, mg/kg;

 $\rho_{bl}$ ——再利用土壤干容重, $mg/cm^3$ ;

 $\theta_{wl}$ ——再利用土壤中水的体积含量,无量纲;

 $\theta_{al}$ ——再利用土壤中空气的体积含量,无量纲;

H——污染物亨利常数, 无量纲;

 $K_d$ —一污染物土-水分配系数, $cm^3(水)/mg(±)$ 。

②污染物在非饱和带的迁移转化过程

采用非饱和带一维水流-溶质运移模型进行预测:

## a) 水流控制方程

假设水流在包气带中的运动服从一维稳态方程,采用 Richards 方程描述一维平衡水流运动,见公式(4-2):

$$\frac{\partial \theta_{w2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h, z) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (4-2)$$

其中,

$$K(h,z) = K_s(z)K_r(h,z)$$
 (4-3)

初始条件与边界条件分别为:

初始条件以水头形式

$$h(z,0) = h_0(z)$$
 (t=0, z\ge 0)

(4-4)

上边界条件为定通量边界 
$$-K(h,z)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)=q(t) \qquad \qquad (t \geq 0, \ z=L)$$

(4-5)

下边界条件为零水头边界 
$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \qquad (t \ge 0, z=0)$$

(4-6)

式中:

 $\theta_{w2}$ ——非饱和带土壤中水的体积含量,无量纲;

h——压力水头, cm;

*S*——源汇项, cm<sup>3</sup>/(cm<sup>3</sup>·s);

K(h,z)——非饱和带渗透系数函数, cm/s:

 $K_s(z)$ ——非饱和带饱和渗透系数, cm/s;

 $K_t(h,z)$ ——非饱和带相对渗透率,无量纲:

 $h_0$ ——初始时刻包气带压力水头, cm;

q(t)——边界上已知的水通量函数, $cm^3/s$ ;

L——下边界处。

## b) 溶质运移控制方程

溶质运移基本控制方程见公式 (4-7):

$$(1 + \frac{\rho_{b2}k_{d}}{\theta})\frac{\partial c_{w}}{\partial t} = D\frac{\partial^{2}c_{w}}{\partial z^{2}} - u\frac{\partial c_{w}}{\partial z} \quad (4-7)$$

初始条件与边界条件分别为:

初始条件为浓度形式

$$c_{w}(z,0) = c_{w0}$$

$$c_{\rm w}(z,0) = c_{w0}$$
 (t=0, z>0) (4-8)

上边界条件为浓度通量边界

$$\theta_{\mathbf{w}} D \frac{\partial c_{\mathbf{w}}}{\partial z} = q_0(t) c_0$$
 (t>0, z=L) (4-9)

$$(t \ge 0, z = L) (4-9)$$

下边界条件为零浓度梯度边界

$$\frac{\partial c_{\mathrm{w}}}{\partial z} = 0$$

$$(t \ge 0, z=0) (4-10)$$

式中:

 $c_w$ ——非饱和带土壤孔隙水中污染物浓度, $mg/cm^3$ (到达地下水面处为  $c_{w2}$ );

 $\theta$ ——非饱和带土壤有效孔隙度,无量纲;

 $\rho_{b2}$ ——非饱和带土壤干容重, mg/cm<sup>3</sup>;

s——非饱和带土壤固相吸附浓度, mg/mg;

D——非饱和带土壤水动力弥散系数, cm²/s;

u——垂直方向非饱和带土壤孔隙水渗流流速, cm/s;

z——相对于基准面的高度,向上为正,cm;

 $c_{w0}$ ——初始状态非饱和带土壤孔隙水中污染物浓度, $mg/cm^3$  (取值为 0);

 $c_0$ ——边界上已知水通量中污染物浓度, $mg/cm^3$ (取值为0)。

#### ③筛选值的计算

筛选值的计算公式如下:

$$c = c_{\text{gw}} \times \text{AF} \times \frac{\theta_{\text{wl}} + H \times \theta_{\text{al}} + \rho_{\text{bl}} \times K_{\text{d}}}{\rho_{\text{bl}}} \times 10^{6} \quad (4-11)$$
其中, AF =  $\frac{c_{\text{wl}}}{c_{\text{w2}}}$  (4-12)

#### 式中:

c——污染场地土壤再利用筛选值,mg/kg;

 $c_{gw}$ ——地下水中污染物含量限值,mg/L;

AF——污染物在清洁非饱和的衰减系数,无量纲;

其他参数含义同上。

## (3)参数取值

计算过程用到的主要参数及取值见表 4-2。

表 4-2 参数取值

参数	含义	单位	取值	来源
$Q_{\rm r}$	残余含水率	无量纲	0.034	
$Q_{ m s}$	饱和含水率	无量纲	0.46	
α	土壤持水曲线参数	cm	0.016	Hydrus 数据库
n	土壤持水曲线参数	无量纲	1.37	粉土默认值
$K_{\rm s}$	饱和导水率	cm/s	2190	
1	曲折因子	无量纲	0.5	
$ ho_{ m s1}/ ho_{ m s2}$	土壤干容重	mg/cm <sup>3</sup>	1500	Hydrus 数据库默认值
$D_L$	纵向弥散度	cm	10	J 42- 478
$f_{ m oc}$	土壤有机碳含量	无量纲	0.012	北京市土壤有机碳含量 平均值
pН	土壤酸碱度	无量纲	7.1	北京市土壤平均值
$D_{ m w}$	污染物在水中分子扩散系数	cm <sup>2</sup> /s	附录 A	
$D_{a}$	污染物在气体中分子扩散系数	cm <sup>2</sup> /s	附录 A	US EPA 2014 Regional
Koc	污染物有机碳-水分配系数	cm <sup>3</sup> /mg	附录 A	Screening Level
Н	亨利系数	无量纲	附录 A	
I	年降雨量	cm/a	60.06	北京市多年统计值
$E_{ m v}$	年蒸发量	cm/a	48	假定为年降雨量的 80% 蒸发,其余 20%入渗

地下水中污染物含量限值优先选用我国《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006)、《地下水质量标准》(GB/T 14848-1996)中III类水质标准,缺少的依次参考我国《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)、美国地下水标准、新泽西州、佛罗里达州等的地下水质量标准,具体见附录 B。

## (4) 基于保护地下水的筛选值计算结果

基于保护地下水的筛选值初步计算结果见表 4-3。对于迁移性较大的污染物(如苯系物和氯代烃类),随着清洁非饱和带厚度的增加,筛选值变化不明显;而对于迁移性较小的污染物(如重金属和多环芳烃类),1-2m的清洁非饱和带即可拦截向下迁移的污染物。因此,在制定筛选值时基于保守考虑,采用 1m 清洁非饱和的计算结果。

表 4-3 基于保护地下水的筛选值(mg/kg)

È □	ν <u>−</u> γπ. βλπ				清	青洁非饱和 <sup>*</sup>	#厚度				
序号	污染物	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
1	砷	29.3	/	/	/	/	/	/	/	/	/
2	铍	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
3	镉	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
4	铬	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
5	铬 (VI)	11.7	212596	/	/	/	/	/	/	/	/
6	铜	22186	/	/	/	/	/	/	/	/	/
7	铅	0.25	44	/	/	/	/	/	/	/	/
8	汞	41.9	55978	/	/	/	/	/	/	/	/
9	镍-溶解盐	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
10	锌	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
11	锡	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
12	氰化物	0.95	8.55	274	23625	/	/	/	/	/	/
13	氟化物	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
14	石棉	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
15	二氯甲烷	0.010	0.011	0.012	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.017	0.018
16	苯	0.021	0.039	0.062	0.088	0.12	0.15	0.19	0.23	0.29	0.34
17	甲苯	2.28	39.4	180	575	1542	3722	8379	17991	37347	75698
18	乙苯	1.95	5.9	13.4	25.5	44.3	72.4	114	173	257	373
19	氯仿	0.037	0.041	0.044	0.048	0.051	0.055	0.058	0.061	0.064	0.067
20	溴仿	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003
21	氯苯	0.96	1.18	1.57	2.19	3.18	4.71	7.07	10.68	16.14	24.30
22	四氯化碳	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003

序号	↓— シカ、メナ/m				清	青洁非饱和 f	<b></b>				
	污染物	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
23	1,1-二氯乙烷	0.032	0.036	0.039	0.042	0.045	0.049	0.052	0.055	0.058	0.061
24	1,2-二氯乙烷	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
25	1,1,1-三氯乙烷	1.71	1.89	2.06	2.23	2.40	2.56	2.73	2.89	3.06	3.22
26	1,1,2-三氯乙烷	0.0027	0.0027	0.0028	0.0029	0.0031	0.0036	0.0043	0.0055	0.0072	0.0099
27	1,1,2,2-四氯乙烷	0.0013	0.0013	0.0014	0.0016	0.0021	0.0024	0.0066	0.015	0.041	0.128
28	三氯乙烯	0.073	0.081	0.089	0.097	0.104	0.112	0.119	0.126	0.134	0.141
29	四氯乙烯	0.061	0.068	0.075	0.082	0.088	0.094	0.101	0.109	0.118	0.127
30	二溴乙烯	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00003	0.00004	0.00005	0.00006
31	苯乙烯	0.13	0.23	0.45	0.95	2.12	4.89	11	27	63	144
32	二甲苯(总)	2.74	7.0	14.8	27.9	47.9	77.6	121	183	271	392
33	氯乙烯	0.0030	0.0032	0.0034	0.0037	0.0039	0.0041	0.0043	0.0046	0.0048	0.0050
34	氯甲烷	0.0011	0.0012	0.0013	0.0014	0.0013	0.0016	0.0017	0.0017	0.0018	0.0019
35	1,2-二氯乙烯 (顺式)	0.051	0.056	0.062	0.067	0.071	0.076	0.081	0.085	0.090	0.094
36	1,2-二氯乙烯 (反式)	0.073	0.081	0.088	0.095	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.13
37	1,1-二氯乙烯	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04
38	1,2-二氯丙烷	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
39	1,2,3-三氯丙烷	0.000046	0.000047	0.000048	0.000068	0.00011	0.00022	0.00053	0.0016	0.0054	0.021
40	二溴氯甲烷	0.054	0.054	0.055	0.056	0.057	0.058	0.059	0.060	0.065	0.073
41	一溴二氯甲烷	0.035	0.037	0.039	0.041	0.043	0.045	0.047	0.049	0.051	0.054
42	六氯苯	150	/	/	/	/	/	/	/	/	/
43	苯胺	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.14	0.23	0.56	2.2	14
44	硝基苯	0.05	0.06	0.14	0.92	18	1071	/	/	/	/
45	苯酚	4.89	5.39	8.76	31.3	309	9065	/	/	/	/

<b>☆</b> □	\ \tag{\tau}_1 \tau \tau \tau				清	青洁非饱和	<b>带厚度</b>				
序号	污染物	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
46	2,4-二硝基甲苯	0.10	1.04	180	/	/	/	/	/	/	/
47	邻苯二甲酸二丁酯	0.19	138	/	/	/	/	/	/	/	/
48	邻苯二甲酸二辛酯	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
49	邻苯二甲酸正辛酯	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
50	萘	39	13343	/	/	/	/	/	/	/	/
51	菲	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
52	蒽	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
53	荧蒽	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
54	芘	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
55	屈	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
56	芴	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
57	苯并[b]荧蒽	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
58	苯并[k]荧蒽	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
59	苯并[a]芘	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
60	茚并[1,2,3-cd]芘	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
61	苯并[g,h,i]菲	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
62	苯并[a]蒽	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
63	二苯并[a, h]蒽	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
64	2-氯酚	0.16	0.29	1.64	43.8	5514	/	/	/	/	/
65	2,4-二氯酚	0.16	0.85	49.18	30873	/	/	/	/	/	/
66	2,4-二硝基酚	0.28	1.24	49.37	19696	/	/	/	/	/	/
67	2-硝基酚	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
68	4-硝基酚	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

	\\\h.\h/m				清	青洁非饱和	带厚度				
序号	污染物	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m
69	五氯酚	720	/	/	/	/	/	/	/	/	/
70	2,4,5-三氯酚	193	/	/	/	/	/	/	/	/	/
71	2,4,6-三氯酚	55	737500	/	/	/	/	/	/	/	/
72	4-甲酚	0.01	0.02	0.13	3.50	475	293405	/	/	/	/
73	多氯联苯	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
74	二噁英类(PCDDs/PCDFs)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
75	六六六α	0.07	116760	/	/	/	/	/	/	/	/
76	六六六β	0.11	105783	/	/	/	/	/	/	/	/
77	六六六8	11068	/	/	/	/	/	/	/	/	/
78	林丹 (六六六γ)	0.11	175140	/	/	/	/	/	/	/	/
79	DDT(包括 o,p'-DDT, p,p'-DDT)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
80	p.p'-DDE	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
81	p,p'-DDD	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
82	狄氏剂	168217	/	/	/	/	/	/	/	/	/
83	艾氏剂	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
84	异狄氏剂	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
85	敌敌畏	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.008
86	乐果	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
87	总石油烃(脂肪族): <c16< td=""><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></c16<>	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
88	总石油烃(脂肪族): >C16	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

注: "/"由于污染物迁移性小,几乎没有可能入渗进入地下水。

#### 4.4.4.4.3. 北京市土壤环境重金属背景值

区域土壤背景值和区域土壤自然含量均代表了土壤中某一物质的现代含量水平。它允许 土壤受到一定程度的人为干扰,并具有显著的区域特点,符合评价区的实际情况。世界各地 土壤的形成与发育千差万别,且受到其他自然条件的影响,因而土壤背景值也存在较大差异。

"六五"期间,作为国家重点科技攻关项目一"我国九省市主要经济自然区农业土壤及粮食作物中污染元素环境背景值的研究"中,对北京市各元素的土壤环境背景值及其分布特征和分异规律进行了分析。另外中国环境监测总站,陈同斌课题组等对北京市各元素的土壤环境背景值也做了研究,见表 4-4。各重金属土壤筛选值均大于北京市背景值。

元素种类 F As Cd Cr Cu Ni Zn Hg Mn Mo Co 0.044 背景值 7.09 0.119 56.47 18.7 26.8 24.6 57.5 519 337.3 0.71 10.1

表 4-4 北京土壤环境重金属背景值(单位: mg/kg)

# 4.4.4.4.1 污染物方法检出限

US EPA 8260 检测方法(VOCs)和 US EPA 8270 检测方法(SVOCs)的方法检出限分别为 0.0005 mg/kg 和 0.005 mg/kg,将表 4-3 中低于方法检出限的替换为方法检出限。主要是 VOCs 类污染物,具体包括:二溴乙烯和 1,2,3-三氯丙烷。

#### 4.4.4.5. 土壤再利用筛选值及与国外对比

综合考虑基于保护人体健康和保护地下水(1m 清洁非饱和带)的筛选值,取较小者作 为污染场地土壤再利用筛选值,其值与国外一些国家和地区基于保护地下水的土壤筛选值对 比结果见表 4-5。

大部分污染物土壤再利用筛选值与国外基于保护地下水土壤筛选值相当,但有以下几个原因造成个别污染物筛选值与国外的差异:

#### (1) 水质标准的差异

如我国生活饮用水标准中苯胺的含量限值是 0.1mg/L, 比佛罗里达 0.0061mg/L 大 16.7 倍,导致本导则计算的苯胺筛选值偏大。类似的情况还有邻苯二甲酸二丁酯、五氯酚、2,4,6-三氯酚、乐果。

#### (2) 土壤-水分配系数 (Kd) 的差异

 $K_d=K_{oc}\times f_{oc}$ ,本导则  $K_{oc}$  的取值来自美国 2014 年 Regional Screening Levels 污染物性质数据库, $f_{oc}$  取为北京市平均值 0.012。如六六六- $\alpha$ 的  $K_d$  值为 33.72L/kg,是新泽西州 2.46L/kg 的 14 倍,导致本导则计算的筛选值比新泽西州大一个数量级。类似的情况还有邻苯二甲酸二丁酯、六六六- $\delta$ 、林丹、狄氏剂、乐果。

#### (3) 是否考虑清洁非饱和带的存在

本导则筛选值的计算结果基于再利用土壤下方有 1m 清洁土的情况,而新泽西等假定土壤中污染物经解吸后直接进入地下水,未考虑污染物在非饱和带中的迁移转化,研究表明,清洁非饱和带的存在对于迁移性弱的污染物影响较大,且  $K_d$  值越大影响越明显。

表 4-5 污染场地土壤再利用筛选值(mg/kg)

序号	污染物	初步领	筛选值(mg/k	g)		国外基于伯	呆护地下水的土 <sup>5</sup>	襄筛选值(mg/k	g)	
片写	75案初 	一级	二级	三级	EPA-RSL2014	新泽西州	阿拉斯加州	佛罗里达州	怀俄明州	马里兰州
1	砷	20	20	20	0.29	19	3.9	/	0.0013	0.026
2	铍	4	4	8	3.2	0.5	42	63	58	4
3	镉	8	9	150	0.38	1	5	7.5	1.4	5
4	铬	250	800	2500	180000	/	25	38	/	100
5	铬 (VI)	12	12	12	/	/	25	/	2.1	100
6	铜	600	700	10000	46	7300	460	/	51	1300
7	铅	400	400	1200	14	59	/	/	/	/
8	汞	10	10	14	0.1	0.1	1.4	2.1	0.033	/
9	镍-溶解盐	50	80	300	/	31-溶解盐	86	130	48-溶解盐	/
10	锌	3500	5000	10000	/	600	4100	/	680	14000
11	锡	3500	7000	10000	/	/	/	/	5500	/
12	氰化物	0.95	0.95	0.95	2-自由态	13	27-自由态	0.8	7.4-(CN-)	150
13	氟化物	650	650	2000	600	/	/	6000	330	/
14	石棉	7000	10000	10000	/	/	/	/	/	/
15	二氯甲烷	0.01	0.01	0.01	0.0013	0.007	0.016	0.02	0.0012	0.019
16	苯	0.021	0.021	0.021	0.0026	0.005	0.025	0.007	0.00023	0.0019
17	甲苯	2.3	2.3	2.3	0.69	4	6.5	0.5	1.7	27
18	乙苯	2	2	2	0.78	8	6.9	0.6	0.0019	15
19	氯仿	0.037	0.037	0.037	0.022	0.2	0.46	0.4	0.000055	0.00091
20	溴仿	0.0021	0.0021	0.0021	0.021	0.02	0.34	0.03	0.0023	0.067
21	氯苯	0.96	0.96	0.96	0.068	0.4	0.63	1.3	0.068	0.68
22	四氯化碳	0.0018	0.0018	0.0018	0.0019	0.005	0.023	0.04	0.000079	0.0021

序号	污染物	初步的	筛选值(mg/k	g)	国外基于保护地下水的土壤筛选值(mg/kg)						
序号	/方 <del>架</del> 物	一级	二级	三级	EPA-RSL2014	新泽西州	阿拉斯加州	佛罗里达州	怀俄明州	马里兰州	
23	1,1-二氯乙烷	0.032	0.032	0.032	/	0.2	25	0.4	0.0007	5.1	
24	1,2-二氯乙烷	0.02	0.02	0.02	0.0014	0.005	0.016	0.01	0.000044	0.001	
25	1,1,1-三氯乙烷	1.7	1.7	1.7	0.07	0.2	0.82	1.9	3.3	32	
26	1,1,2-三氯乙烷	0.0027	0.0027	0.0027	0.0016	0.01	0.018	0.03	0.000082	0.00078	
27	1,1,2,2-四氯乙烷	0.0013	0.0013	0.0013	/	0.005	0.017	0.001	0.000028	0.00068	
28	三氯乙烯	0.073	0.073	0.073	0.0018	0.007	0.02	0.03	0.00061	0.00026	
29	四氯乙烯	0.061	0.061	0.061	0.0023	0.005	0.024	0.03	0.000052	0.0047	
30	二溴乙烯	0.0005	0.0005	0.0005	0.000014	0.005	0.00016	0.0001	0.0000019	0.00006	
31	苯乙烯	0.13	0.13	0.13	0.11	2	0.96	3.6	2	57	
32	二甲苯 (总)	2.7	2.7	2.7	9.8	12	63	0.2	0.23	3	
33	氯乙烯	0.003	0.003	0.003	0.00069	0.005	0.0085	0.007	0.0000056	0.00012	
34	氯甲烷	0.0011	0.0011	0.0011	/	/	0.21	0.01	0.00046	0.93	
35	1,2-二氯乙烯(顺式)	0.051	0.051	0.051	0.021	0.2	0.24	0.4	0.11	/	
36	1,2-二氯乙烯 (反式)	0.073	0.073	0.073	0.029	0.4	0.37	0.7	0.034	0.72	
37	1,1-二氯乙烯	0.022	0.022	0.022	0.0025	0.005	0.03	0.06	0.12	2.9	
38	1,2-二氯丙烷	0.001	0.001	0.001	0.0017	0.005	0.018	0.03	0.00013	0.0034	
39	1,2,3-三氯丙烷	0.0005	0.0005	0.0005	/	/	0.00053	0.0001	0.0000044	/	
40	二溴氯甲烷	0.054	0.054	0.054	0.021	0.005	0.032	0.003	0.00022	0.00083	
41	一溴二氯甲烷	0.035	0.035	0.035	0.022	0.005	0.044	0.004	0.0003	0.0011	
42	六氯苯	0.2	0.3	1	0.013	0.2	0.047	2.2	0.00029	0.052	
43	苯胺	0.1	0.1	0.1	/	/	/	0.03	0.0034	/	
44	硝基苯	0.05	0.05	0.05	/	0.2	0.094	0.02	0.002	0.023	
45	苯酚	4.9	4.9	4.9	/	5	68	0.05	8.1	67	

序号	污染物	初步领	筛选值(mg/k	(g)		国外基于伯	保护地下水的土 <sup>5</sup>	裏筛选值(mg/k	g)	
	75条初	一级	二级	三级	EPA-RSL2014	新泽西州	阿拉斯加州	佛罗里达州	怀俄明州	马里兰州
46	2,4-二硝基甲苯	0.1	0.1	0.1	/	/	0.0093	0.0004	0.068	0.57
47	邻苯二甲酸二丁酯	0.19	0.19	0.19	/	620	80	47	11	5000
48	邻苯二甲酸二辛酯	13	25	30	1.4	790	13	3600	1.6	2900
49	邻苯二甲酸正辛酯	500	700	9000	/	3300	3800	480000	/	/
50	萘	39	39	39	/	16	20	1.2	0.00055	0.15
51	菲	5	6	40	/	/	3000	250	/	470
52	蒽	50	60	400	/	1500	3000	2500	450	470
53	荧蒽	50	60	400	/	840	1400	1200	210	6300
54	芘	50	60	400	/	550	1000	880	150	680
55	屈	50	60	400	/	52	360	77	1.4	48
56	芴	50	60	400	/	110	220	160		140
57	苯并[b]荧蒽	0.5	0.6	4	/	2	12	2.4	0.047	1.5
58	苯并[k]荧蒽	5	6	40	/	16	120	24	0.46	15
59	苯并[a]芘	0.2	0.2	0.4	/	0.2	2.1	8	0.0046	0.12
60	茚并[1,2,3-cd]芘	0.2	0.6	4	/	5	41	6.6	0.16	4.2
61	苯并[g,h,i]菲	5	6	40	/	/	38700	32000	/	680
62	苯并[a]蒽	0.5	0.6	4	/	0.5	3.6	0.8	0.014	0.48
63	二苯并[a, h]蔥	0.05	0.06	0.4	/	0.5	4	0.7	0.015	0.46
64	2-氯酚	0.16	0.16	0.16	/	0.5	1.5	0.7	0.2	/
65	2,4-二氯酚	0.16	0.16	0.16	/	0.2	1.3	0.003	0.18	1.2
66	2,4-二硝基酚	0.28	0.28	0.28	/	0.3	0.54	0.06	0.068	/
67	2-硝基酚	0.024	0.024	0.024	/	/	/	/	/	/
68	4-硝基酚	0.01	0.01	0.01	/	/	/	0.3	/	/

序号	污染物	初步的	筛选值(mg/k	g)		国外基于伯	呆护地下水的土 <sup>5</sup>	襄筛选值(mg/k	(g)	
	75条初	一级	二级	三级	EPA-RSL2014	新泽西州	阿拉斯加州	佛罗里达州	怀俄明州	马里兰州
69	五氯酚	3	4	10	0.01	0.3	0.047	0.03	0.0039	/
70	2,4,5-三氯酚	193	193	193	/	44	67	0.07	9.4	/
71	2,4,6-三氯酚	35	40	50	/	0.2	1.4	0.06	0.016	/
72	4-甲酚	0.014	0.014	0.014	/	/	1.5	0.03	0.19	/
73	多氯联苯	0.2	0.2	1	/	0.2	/	17	/分7类	0.41
74	二噁英类(PCDDs/PCDFs)	0.000002	0.000003	0.00002	0.000015-TCDD	/	0.000058	0.003	0.00000015	/
75	六六六α	0.071	0.071	0.071	/	0.002	0.0064	0.0003	0.000074	0.00089
76	六六六β	0.11	0.11	0.11	/	0.002	0.022	0.001	0.00026	0.0031
77	六六六8	2	2	3	/	/	/	0.2	/	0.0043
78	林丹 (六六六γ)	0.11	0.11	0.11	0.0012	0.002	0.0095	0.009	0.00043	0.0043
79	DDT(包括 o,p'-DDT, p,p'-DDT)	1	1	11	/	7	7.3	11	0.086	1.2
80	p.p'-DDE	1	1	11	/	12	5.1	18	0.06	35
81	p,p'-DDD	2	2	15	/	3	7.2	5.8	0.086	11
82	狄氏剂	0.02	0.03	0.2	/	0.003	0.0076	0.002	0.00009	0.0022
83	艾氏剂	0.02	0.03	0.2	/	0.1	0.07	0.2	0.00084	0.0077
84	异狄氏剂	4	5	11	0.081	0.6	0.29	1	0.23	5.4
85	敌敌畏	0.0008	0.0008	0.0008	/	/	/	0.0006	0.000065	/
86	乐果	0.024	0.024	0.024	/	/	/	0.006	0.0018	/
87	总石油烃(脂肪族): <c16< td=""><td>230</td><td>6000</td><td>620</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td><td>/</td></c16<>	230	6000	620	/	/	/	/	/	/
88	总石油烃(脂肪族): >C16	10000	10000	10000	/	/	/	/	/	/

# 4.5. 第二阶段——再利用区域环境概况调查

再利用区域环境概况调查内容主要包括: **再利用区域自然环境状况、周边敏感环境区以及再利用区域土壤/地下水环境现状,**通过调查了解再利用区域的环境概况,初步判断土壤在该区域的再利用是否符合国家现有环境保护条例和规定。

## 4.5.1. 评价等级与调查范围的确定

- (1)项目类型:根据《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610-2009),污染场地土壤再利用项目分类属于 I 类(项目建设、生产运行和服务期满后的各个过程中,可能造成地下水水质污染的建设项目)。
- (2)项目等级:参照《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610-2009)"6.2 I 类建设项目工作等级划分",根据"项目场地的包气带防污性能、含水层易污染特征、地下水环境敏感程度"划分项目工作等级,各指标的分级见表 4-6~4-8。

#### 表 4-6 包气带防污性能分级

分级	包气带岩(土)的渗透性能
强	岩(土)层单层厚度 $M$ b $\geqslant$ 1.0 m,渗透系数 $K$ $\leqslant$ 10 $^{-7}$ cm/s,且分布连续、稳定
中	岩(土)层单层厚度 $0.5 \mathrm{m} \leq Mb < 1.0 \mathrm{m}$ ,渗透系数 $K \leq 10^{-7} \mathrm{cm/s}$ ,且分布连续、稳定
T	岩(土)层单层厚度 $M$ b $\geqslant$ 1.0 m,渗透系数 $10^{-7}$ cm/s $<$ $K$ $\leqslant$ $10^{-4}$ cm/s,且分布连续、稳定
弱	岩(土)层不满足上述"强"和"中"条件
注:表中"岩	(土)层"是指建设项目场地地下基础之下第一岩(土)层;包气带岩(土)的渗透系数是指包气带岩土

# 表 4-7 含水层易污染特征分级

分级	项目场地所处位置与含水层易污染特征
易	潜水含水层且包气带岩性(如粗砂、砾石等)渗透性强的地区;地下水与地表水联系密切地区;不利于地下水中污染物稀释、自净的地区
中	多含水层系统且层间水力联系较密切的地区
不易	以上情形之外的其他地区

#### 表 4-8 地下水环境敏感程度分级

分级	项目场地的地下水环境敏感特征
敏感	集中式饮用水水源地(包括已建成的在用、备用、应急水源地,在建和规划的水源地)准保护区;除集中式饮用水水源地以外的国家或地方政府设定的与地下水环境相关的其他保护区,如热水、矿泉水、温泉等特殊地下水资源保护区
较敏感	集中式饮用水水源地(包括已建成的在用、备用、应急水源地,在建和规划的水源地)准保护区以外的补给径流区;特殊地下水资源(如矿泉水、温泉等)保护区以外的分布区以及分散式居民饮用水水源等其他未列入上述敏感分级的环境敏感区 <sup>3</sup>
不敏感	上述地区之外的其他地区
注: 如建	设项目场地的含水层(含水系统)处于补给区与径流区或径流区与排泄区的边界时,则敏感程度上调一级。
a "环境	敏感区"是指《建设项目环境影响评价分类管理名录》中所界定的涉及地下水的环境敏感区。

I 类建设项目评价工作的等级分级见表 4-9。

表 4-9 [ 类建设项目评价工作等级

评价 级别	建设项目场地包气 带防污性能	建设项目场地的含水 层易污染特征	建设项目场地的地下 水环境敏感程度	建设项目污水排放量	建设项目水质复杂程度
	弱-强	易-不易	敏 感	大-小	复杂-简单
	X-	100	较敏感	大-小	复杂-简单
		勐		大	复杂-简单
		ān	不撤感	中	复杂-中等
			0.00000000	小	复杂
	95	22	较敏感	大-中	复杂-简单
	39	ф	老女教(25)	小	复杂-中等
		Т.	THE		大
			不敏感	中	复杂
200		不易	较敏感	大	复杂-中等
	-	小物	50,400,009	中	复杂
				大	复杂-简单
			较敏感	中	复杂-中等
	-t-	易		小	复杂
	中		不敏感	大	复杂
		ф	较敏感	大	复杂-中等
				ф	复杂
强	易	较敏感	大	复杂	
二级			了一级和三级以外的基	其他组合	
	弱	不易	不敏感	中	简单
				小	中等-简单
	ф	易	不敏感	小	简单
		中	不敏感	中	简单
				小	中等-简单
		不易	45.44.00	ф	简单
			较敏感	小	中等-简单
				大	中等-简单
			不敏感	中-小	复杂-简单
三级			较敏感	小	简单
				大	简单
		易	不敏感	中	中等-简单
			- 1.00 August	小	复杂-简单
	<u>00</u>		15.20 (a)	中	简单
	强	5,40	较敏感	小	中等-简单
		中	75.44	大	中等-简单
			不敏感	中-小	复杂-简单
		2002	74.17.0	大	中等-简单
		不易	较敏感	中-小	复杂-简单
		]	不敏感	大-小	复杂-简单

# (3)调查范围

参照《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610-2009)中"8.2 调查与评价范围",根据项目等级确定调查范围,必要时还应扩展至完整的水文地质单元,如表 4-10。

表 4-10 再利用区域环境概况调查范围

评价等级	调查评价范围/km²	备注
一级	≥50	环境水文地质条件复杂、含水层渗透性能较强的地区
二级	20~50	(如砂卵砾石含水层、岩溶含水系统等),调查评价范
三级	≤20	围可取较大值, 否则可取较小值

# 4.5.2. 自然环境状况调查

自然环境调查以资料收集为主,重点收集调查范围内的水文地质资料和气候气象资料,主要包括(但不限于): 再利用区域地理位置、地形地貌、土壤及土层结构、水文地质条件、地表水、气温、降水量、蒸发量、主导风向、平均风速等内容。

# 4.5.3. 环境敏感区调查

环境敏感区调查以资料收集和场地踏勘为主,重点对调查范围内敏感环境区的数量、分布等进行详细调查,禁止污染场地土壤在环境敏感区内再利用。

根据《环境影响评价技术导则 总纲》(HJ 2.1-2011)及北京市土壤再利用实际情况,对环境敏感区的定义如下:指依法设立的各级各类自然、文化保护地,以及对土壤的某类污染因子或者生态影响因子特别敏感的区域,主要包括: a)自然保护区、风景名胜区、世界文化和自然遗产地; b)饮用水水源保护区及其补给径流区、特殊地下水资源保护区、生态脆弱区重点保护区域、地质灾害易发区、水土流失重点防治区、沙化土地封禁保护区; c)基本农田保护区、基本草原、森林公园、地质公园、重要湿地、天然林、珍稀濒危野生动植物天然集中分布区。

#### 4.5.4. 土壤/地下水环境现状调查

土壤/地下水环境现状调查的目的是了解再利用区域土壤和地下水中污染物的现状。

# (1) 采样布点

土壤现状调查采样点可按照《场地环境评价导则》(DB11/T 656-2009)中"简化布点"的原则布设, 见表 4-11。采样深度可依据土层结构、污染物进入土壤的途径及在土壤中的迁移规律确定, 样品的采集参见 DB11/T 656 中 6.3.4,主要包括采样器的选择、表层土壤采样、深层土钻孔与采样技术、挥发性有机污染物采样方法等的具体要求。

场地面积(m²)	土壤采样点个数
5000 以下	3
5000	8 (25m×25m)
25000	17 (40m×40m)
100000	28 (60m×60m)
500000	50 (100m×100m)
大于 1000000	69 (120m×120m)

表 4-11 简化布点

地下水现状监测井的布设原则、采样深度、监测频率、现场采样与测定参见《环境影响评价技术导则 地下水环境》(HJ 610)中8.3.4的具体要求。可充分利用再利用区域及周边已有地下水水质监测井,对于水文地质条件复杂或存在于多个水文地质单元的调查对象,要根据实际情况增加监测点数量。

#### (2) 分析指标

分析指标为再利用土壤中有检出(超过方法检出限)的污染物。

#### (3) 分析方法

分析方法参照《场地环境评价导则》(DB11/T 656-2009) 附录 F 和《地下水环境监测技术规范》(HJ/T 164-2004) 附录 B, 如缺少,可优先选用国标方法,其次为美国环保局采用的方法。

#### 4.5.5. 水文地质调查

分别对土壤再利用场地及所在区域进行水文地质调查,调查方法参见《岩土工程勘查规范》 (GB50021)和《区域水文地质工程地质环境地质综合勘查规范(1:50000)》(GB/T 14158),调查宜 采用精度不小于 1:50000 的比例尺,应充分利用场地土壤/地下水环境现状调查阶段及周边已有的钻孔、 监测井(孔)。

#### 4.5.5.1. 气象、水文

- (1) 气象: 再利用区及周边地区气象站近三十年来的降水量、降雨频度、雨强、蒸发量、气温、湿度、冻结深度及暴雨等气象资料。
- (2) 水文:再利用区及周边河流、水库、湖泊等地表水体的分布;主要河流的流域面积、径流量、流量、水位、水质、水温含砂量及动态变化;水库、湖泊的容量、水质;地表水与地下水(含暗河、泉等)的补排关系;水利工程类型、分布、规模、用途和利用情况;现状水利工程和地表水作为人工补给地下水的可能性。

#### 4.5.5.2. 水文地质条件

# 4.5.5.2.1. 水文地质结构

水文地质结构包括包气带、含水层、相对隔水层、隔水层的岩性、厚度及其变化情况。

# 4.5.5.2.2. 地下水补径排条件

- (1) 地下水补给条件:包括降水、人工回灌、地表水等因素。应以收集资料为主,收集场地所在地区的降水量及其水化学变化资料(月、年),调查灌溉制度,收集或观测地表水水位、流量、水质变化资料,分析地表水与地下水的相互关系。
  - (2) 地下水径流条件: 应注意关注含水层渗透系数、水力坡度、厚度等因素在场内的变化。
- (3) 地下水排泄条件:包括蒸发、开采、径流等因素,应主要收集场地所在地区的蒸发量变化资料(月、年),获取地下水开采利用信息,收集或观测地下水水位及水化学变化资料。

#### 4.5.5.2.3. 水流场特征

地下水流场特征包括地下水埋深、地下水水位标高、地下水流向、水力坡度及其动态变化。

#### 4.5.5.2.4. 水文地质参数

- (1)水文地质参数优先通过土工试验或水文地质试验获取,试验方法参见《供水水文地质勘查规范》(GB 50027)和《土工试验方法标准》(GB/T 50123),较难获取的参数可采用经验值。
- (2) 水文地质参数主要包括包气带的土壤容重、孔隙度、孔隙体积含水率、孔隙体积含气率、残留含水量、饱和含水量、有机碳含量、pH、渗透系数、弥散度、岩土类型等,以及含水层的渗透系数、弥散系数、水力坡度、有效孔隙度、地下水流速等。

#### 4.5.6. 地下水防污性能评估

基于已获得的水文地质资料,对再利用区地下水系统防污性能进行评估,禁止污染场地土壤在防污性能级别为差和较差的区域再利用。地下水防污性能评估方法主要参考《城市环境地质调查评价规范》 (送审稿)和国内一些学者的研究。

#### 4.5.6.1. 孔隙潜水防污性能评估

孔隙水潜水防污性能评估建议采用 DRASTIC 模型。该模型在应用时假设以下条件成立: (1) 污染物由地表经土壤层、包气带进入含水层; (2) 污染物随水流入渗到地下水中; (3) 污染物随水流动。

DRASTIC 模型由地下水位埋深 D、净补给量 R、含水层厚度 A、土壤带介质 S、地形 T、包气带介质类型 I 和含水层渗透系数 C 共 7 个水文地质参数组成。模型中每个指标都分成几个区段,每个区段赋予 1-10 的评分,然后根据每个指标对防污性能的权重,通过加权求和得到地下水防污性能指数(DI),见公式(4-13)。

$$DI = D_W D_R + R_W R_R + A_W A_R + S_W S_R + T_W T_R + I_W I_R + C_W C_R$$
 (4-13)

式中, DI 表示地下水防污性能指数;下标 R 表示指标值(各项指标等级划分和赋值见表 4-12);W 表示指标的权重值(见表 4-13)。根据 DI 值将地下水防污性能分为低、较低、中等、较高和高 5 个级别, DI 值越高,地下水防污性能越低(见表 4-14)。

指		评分								
标	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D	>30	(25,30]	(20,25]	(15,20]	(10,15]	(8,10]	(6,8]	(4,6]	(2,4]	≤2
R	0	(0,51]	(51.71,]	(71,92]	(92,117]	(117,147]	(147,178]	(178,216]	(216,235]	>235
Α	>50	(45,50]	(40,45]	(35,40]	(30,35]	(25,30]	(20,25]	(15,20]	(10,15]	≤10
S	非胀缩和非 凝聚性粘土 (岩石)	粘质壤 土(粘 土)	粉质壤 土	壤土	砂质壤 土(砂 土)	胀缩或凝 聚性粘土	粉砂、细砂	砾石/中砂、粗砂	卵砾石	薄或缺失
T	>10	(9,10]	(8,9]	(7,8]	(6,7]	(5,6]	(4,5]	(3,4]	(2,3]	(0,2]
I	粘土	亚粘土	亚砂土	粉砂	粉细砂	细砂	中砂	粗砂	砂砾石	卵砾 石
С	(0,4]	(4,12]	(12,20]	(20,30]	(30,35]	(35,40]	(40,60]	(60,80]	(80,100]	>100

表 4-12 孔隙水防污性能评估指标等级划分和赋值

#### 表 4-13DRASTIC 模型各指标说明和权重建议值

指标	数据来源	说明	推荐
1日7小	数1h不t/s	以 ·为	权重
地下水位埋深	水平年高水位期地下水水位	此处地下水位埋深指地表到潜水面的距离,单位为m,精度	5
(D)	统测资料	按 10-15 个井/100 km <sup>2</sup>	3
地下水垂向净补	降水量减去地表径流量和蒸	以大气降水为区域潜水补给最主要来源时,可近似采用降水	
	散量或降水量乘以降水入渗	入渗补给量替代垂向净补给量;在有其他主要的补给途径时,	4
给量(R)	系数	要综合考虑各种补给来源对潜水的补给量。在农灌区需迭加	

		灌溉回归量,在地表水和地下水有水力联系的评估区需迭加		
		地表水渗漏量,单位为 mm/a		
含水层厚度(A)	含水层顶底板等值线图或钻	含水层厚度可以从含水层顶、底板等直线图中计算得到,或	3	
古小坛序及(A)	孔资料	从钻孔资料分析得出,单位为 m,按 2-4 个钻孔/100 km²分析	3	
1. 抽点 € (S) 钻孔柱状图或区域土壤分区		土壤层为地表厚度 2 m 或小于 2 m 的风化成,按 4-10 个钻孔	2	
土壤介质(S) 	图	/100 km <sup>2</sup>	2	
地形坡度(T) DEM 坡度提取		利用 1:5 万或 1:1 万地形图的 DEM 提取后,在 ArcGIS 中可	1	
地形坡度(1)	DEM 圾浸旋取	自动生成坡度值,单位为%	1	
		此处包气带是指前水位以上或承压含水层顶板以上、土壤层		
与与世人氏光刑		以下的非饱和区或非连续饱和区的岩层,根据钻孔资料获取		
包气带介质类型   (I)	钻孔柱状图或野外剖面	包气带介质类型,按 4-10 个钻孔/100 km <sup>2</sup> 分析,以专家和有	5	
(1)		经验的水文地质工作者进行判断定名,或者收集当地国土部		
		门已完成的包气带岩性图		
含水层渗透系数	<b>タルはま取りサルナル</b>	含水层渗透系数从野外抽水试验获取,或从钻孔资料分析得	3	
(C)	经验值或野外抽水试验 	出,按 2-4 个钻孔/100 km <sup>2</sup> 分析,单位为 m/d	3	

## 表 4-14 孔隙水防污性能评价标准

地下水防污性能指数 DI	[20,70]	(70,100]	(100,120]	(120,150]	(150,200]
地下水防污性能级别	高	较高	中等	较低	低

#### 4.5.6.2. 岩溶水防污性能评估

目前,岩溶水的防污性能评估研究尚处于起步阶段,推荐采用 PLEIK 模型,不同类型的评估区可根据自然地理特征和水文地质特征对评估指标进行适当调整。

PLEIK 模型共 5 个指标: P 为保护性盖层厚度, L 为土壤利用类型, E 为表层岩溶带发育强度, I 为补给类型, K 为岩溶网络系统发育程度。首先根据实际情况对每个指标权重赋值, 之后对每个指标评分, 计算方法见公式 (4-14):

$$DI = w_1 \times P_i + w_2 \times L_i + w_3 \times E_k + w_4 \times I_m + w_5 \times K_l$$
 (4-14)

其中,DI 为防污性能等级;  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$ 、 $w_4$ 、 $w_5$  为各指标的权重赋值;  $P_i$ 、 $L_j$ 、 $E_k$ 、 $I_m$ 、 $K_l$  为等级分值。根据 DI 值将地下水防污性能分为低、较低、中等、较高和高 5 个级别(见表 4-15),DI 值越高,地下水防污性能越低。

表 4-15 岩溶地下水防污性能评估标准

地下水防污性能指数 DI	[1,2]	(2,4]	(4,6]	(6,8]	(8,10]
地下水防污性能级别	高	较高	中等	较低	低

各项指标的评分标准及权重值的确定如下:

## 1) 各指标的评分标准

#### ①保护性盖层厚度(P)

保护性盖层是指地下水位以上的非岩溶地层(如第四系松散沉积物等土层)。土层性质(包括结构、

构造、有机质和粘土矿物及饱水度和导水率等)使土层对大部分污染物具有潜在的降解或吸附功能,因此增加阳离子交换容量(CEC)这一指标,与覆盖层厚度属性共同构成评分矩阵(见表 4-17)。分值越低,系统的防污性能越高。

表 4-16 土层厚度属性分类

保护性盖层	特性描述				
分级	A. 土层直接覆盖于灰岩或高渗透率的碎石上	B. 土层覆盖于低渗透率的底层上,如湖积物、粘土等			
$\mathbf{P}_1$	土层厚度 0~20 cm	不超过 1 m 的底层上土层厚度 0~20 cm			
P <sub>2</sub>	土层厚度 20~100 cm	不超过 1 m 的底层上土层厚度 20~100 cm			
P <sub>3</sub>	土层厚度 100~150 cm	超过 1 m 的底层上土土层厚度 100 cm 左右			
D	土层厚度 >150 cm	低渗透率的底层上覆土层厚度超过 100 cm,或者超过 8			
$P_4$	上坛序及 ~130 cm	m 的粘土或淤泥,或者非岩溶岩石地层			

表 4-17 保护性盖层评分矩阵

保护性盖层		CEC 含量/(meq/100 g)				
分级	<10	10~100	100~200	>200		
P <sub>1</sub>	1	3	5	7		
P <sub>2</sub>	2	4	6	8		
P <sub>3</sub>	3	5	7	9		
P <sub>4</sub>	4	6	8	10		

# ②土壤利用类型(L)

表 4-18 土地利用程度属性分类

土地利用程度及评分			特性描述	
	林地	$L_1$	10	以乔木为主、植被覆盖率大于60%的有林地(不包括幼林)
Irr	草地	$L_2$	8	以灌木、荒草为主的土地(包括幼林)
低	园地	L <sub>3</sub>	6	用于种植果树的土地
】     	耕地	L <sub>4</sub>	4	用于耕种的土地(包括菜地)
同	裸地	$L_5$	2	几乎无植被覆盖
	村镇及工矿用地	L <sub>6</sub>	1	包括居民区、工厂和矿山用地、公路等工程建设用地

## ③表层岩溶带发育强度(E)

表层岩溶带的发育程度主要受岩性、岩石结构、构造、地貌、水动力条件、土层及植被覆盖情况等因素影响。表层岩溶带发育程度可以通过垂直相交溶蚀通道(包括岩溶节理、溶蚀裂缝、小溶沟、溶隙、溶管、小溶坑、竖井等)在特定尺度内的平均深度和频率来度量。

表 4-19 表层岩溶带属性分级

表层岩溶带类型及评分			特性描述
强烈发育的表层岩溶带	E <sub>1</sub>	10	最小溶蚀间距(<0.25 m),典型溶蚀深度>2 m
高度发育的表层岩溶带	E <sub>2</sub>	8	较近的溶蚀间距(<0.5 m), 平均溶蚀深度 1~2 m
中等发育的表层岩溶带	E <sub>3</sub>	6	中等溶蚀间距(<1 m), 平均溶蚀深度 0.5-1.0 m
轻度发育的表层岩溶带	E <sub>4</sub>	4	较大的溶蚀间距(>2 m),平均溶蚀深度小于 0.5 m

不明显发育的表层岩溶带	E <sub>5</sub>	2	在基岩上观察不到表层岩溶的溶蚀发育
发育不清楚的表层岩溶带	E <sub>6</sub>	1	表层岩溶带不可见或被厚层沉积物所覆盖

当表层岩溶带定量测量难度较大时,可以以区域岩溶层组类型为基础进行分级(表 4-20)。

表 4-20 表层岩溶带区域属性分级

	岩溶组类型	K	备注		
拓石华结理	灰岩连续型,表层岩溶带强烈发育	10	中-厚层纯灰岩		
均匀状纯碳酸盐岩类	灰岩夹白云岩型,表层岩溶带高度发育	[8,9]	无非碳酸盐岩夹层,不纯碳酸盐岩		
<b></b>	灰岩-白云岩交互(间隔)型,表层岩溶带中等发育	[6,7]	夹层小于 10%		
	断续状不纯碳酸盐岩型,表层岩溶带轻度发育	[4.5]	非碳酸盐岩夹层小于 15%,		
间层状碳酸		[4,5]	不纯碳酸盐岩厚度大于 50%		
盐岩类	非碳酸盐岩-不纯碳酸盐岩交互型,表层岩溶带不明	[2 2]	非碳酸盐岩夹层大于 30%,		
	显发育	[2,3]	不纯碳酸盐岩厚度大于 50%		
不纯碳酸盐	表层岩溶带不发育	1	非碳酸盐岩夹层大于 50%,		
岩类	农坛石俗市小及目	1	不纯碳酸盐岩厚度小于 30%		

## ④补给类型(I)

补给类型既包括岩溶含水层的补给类型,又包括补给强度。

表 4-21 补给类型分级

补给类型		属性描述							
I <sub>1</sub> 落水洞或漏斗周围 500 m 区域或伏流两侧各 500 m 距离									
集中补给	т	落水洞或漏斗周围 500~1000 m 之间,且向落水洞汇流坡度>10%的耕作区和坡度>25%的草地区							
<b>↓</b>	I <sub>2</sub>	和伏流两侧 500~1000 m 之间							
分散补给	I <sub>3</sub>	落水洞或漏斗周围 500~1000 m 之间,且汇流坡度<10%的耕作区和坡度<25%的草地区							
	I <sub>4</sub>	上述之外的汇水区域							

表 4-22 入渗补给强度分级与评分

补给类型	雨强特征(mm/d)								
<b>作结头型</b>	<9.9	10-24.9	>25						
I <sub>1</sub>	4	[5,9]	10						
$I_2$	3	[4,7]	8						
I <sub>3</sub>	2	[3,5]	6						
$I_4$	1	[2,3]	4						

# ⑤岩溶网络系统发育程度(K)

含水层岩溶网络或洞穴系统是由直径或宽度超过 10 mm 的溶蚀空间组成的,也是自然条件下产生紊流的最小有效尺寸。空洞在岩溶网络系统中或多或少发育并相互连通,岩溶网络的发育及其结构对水流速度起重要作用,并因此影响岩溶水系统防污性能。表 4-23~4-25 均可进行岩溶网络发育评分,其中4-23 的分类比较宏观,适于资料不足时判断评分;表 4-24 采用地下水径流模数作为反映含水层岩溶网

络发育的参数,可定量地评价含水层岩溶网络发育特征,建议采用;另外还可根据岩溶含水层组类型划分结果简单地确定含水层岩溶网络发育系统(表 4-25)。

表 4-23 岩溶网络发育程度分类

发育类型及	评分	属性描述					
强烈发育的岩溶网络	[8,10]	存在良好发育的岩溶网络(由分米到米级的管道组成,连通性极好,很少阻塞)					
弱发育的岩溶网络	[4,7]	存在微弱发育的岩溶网络(小型管道,连通性较差或被重填,分米级的或更小 尺寸的空间)					
混合和裂隙含水层	[1,3]	孔隙度出露泉水, 无岩溶发育, 仅存裂隙含水层					

表 4-24 岩溶网络属性的径流模数分类

溶岩网络类型	!与评分	径流模数/(L•s <sup>-1</sup> •km <sup>-2</sup> )
强烈发育的岩溶网络	[8,10]	<1
中等发育的岩溶网络	[6,7]	1~7
弱发育的岩溶网络	[4,5]	7~15
混合和裂隙含水层	[1,3]	>15

地下水径流模数,也称"地下径流率",是1平方公里含水层分布面积上地下水的径流量;表示一个地区以地下径流形式存在的地下水量的大小。年平均地下径流模数可用式(4-15)计算:

$$M = O/(86.4F) \tag{4-15}$$

式中,M表示地下水径流模数,L $\bullet$ s $^{-1}\bullet$ km $^{-2}$ ; F表示含水层分布面积,km $^{-2}$ ; Q表示地下水天然径流量,m $^{3}$ /d。

类型及评分 备注 灰岩连续型 10 灰岩夹白云岩型 9 无非碳酸盐岩夹层, 不纯碳酸盐岩夹层 均匀状纯碳酸盐岩类 灰岩-白云岩交互型 小于 10% 8 灰岩-白云岩间隔型 7 非碳酸盐岩夹层小于15%,不纯碳酸盐 断续状不纯碳酸盐岩型 [4,6] 岩厚度大于 50% 间层状不纯碳酸盐岩类 非碳酸盐岩厚度大于30%,不纯碳酸盐 非碳酸盐岩-不纯碳酸盐岩交互型 [1,3] 岩厚度大于 50%

表 4-25 岩溶网络属性的岩溶含水层组类型划分

#### 2) 各指标权重确定

各指标权重赋值采用模糊综合矩阵法确定,方法如下:

- ①构造指标集:将 5 项地下水防污性能评价指标组成指标集:D=(d1,d2,d3,d4,d5)=(保护性盖层, 土地类型及利用程度,表层岩溶带,补给类型,岩溶网络发育程度)。
- ②根据覆盖性岩溶区的水文地质条件,确定5个指标的相对重要性为:保护性盖层>土地类型及利用程度>表层岩溶带>补给类型>岩溶网络发育程度。
  - ③通过两两比较确定优先矩阵,对优先矩阵进行一致矩阵转化并利用方根法进行归一化,得到最

终的权重矩阵 (w=(w1, w2, w3, w4, w5))。

#### 4.5.6.3. 裂隙水防污性能评估

裂隙水是指保存在坚硬岩石裂隙中的地下水,主要分布于基岩山区,平原区埋藏于松散沉积物之下的极严重,地表很少出露。裂隙水具有强烈的非均匀性、各项异性和随机性,推荐采用 DRASTIC 模型评估其防污性能。

#### 4.5.6.4. 承压水防污性能评估

对于有承压性的地下水,根据承压层地下水污染主要影响因子,推荐采用 DLCT 模型(该模型在 DRASTIC 模型原理的基础上进行改进)。DLCT 模型选择的主评估指标包括:承压含水层埋深 D、隔水层岩性 L、隔水层的连续性 C、隔水层厚度 T,首先对各指标评分,然后根据每个指标对防污性能的权重(表 4-26),通过加权求和得到承压地下水防污性能指数(DI),见公式(4-16):

$$DI = D_W D_R + L_W L_R + C_W C_R + T_W T_R$$
 (4-16)

式中, DI 表示地下水防污性能指数;下标 R 表示指标值(各项指标等级划分和赋值见表 4-26);W 表示指标的权重值(见表 4-27)。根据 DI 值将地下水防污性能分为中等、较高和高 3 个级别,DI 值越高,地下水防污性能越低(见表 4-28)。

承压含水层埋深 D 隔水层岩性 L 隔水层连续型 C 隔水层厚度 T 埋深/m 评分 岩性 评分 连续性 评分 厚度/m 评分 < 40粉砂、页岩 10 连续 10  $\leq$ 2 10 9 9 5 9 [40,60)粉土、泥质页岩 不连续 [2,4)亚砂土、泥岩 8 8 [60,80)[4,6)8 7 7 [80,100) 亚粘土 [6,8)7 [100,120) 粘土 [8,10)6 > 1205 > 105

表 4-26DLCT 模型指标等级划分和赋值

#### 表 4-27DLCT 模型指标权重

指标	承压含水层埋深 D	隔水层岩性 L	隔水层连续型 C	隔水层厚度 T
权重	5	4	5	4

## 表 4-28 承压水防污性能评价标准

地下水防污性能指数 DI	<120	[120,160]	>160
地下水防污性能级别	高	较高	中等

# 4.6. 第三阶段——特定场地土壤再利用风险评估

如果土壤中污染物含量超过相应的再利用筛选值,应结合再利用区域的具体用地规划、 水文地质条件等开展特定场地土壤再利用风险评估,包括人体健康风险评估和地下水风险评估。

#### 4.6.1. 人体健康风险评估

污染场地土壤再利用时,土壤中的污染物可通过直接或间接方式与人体接触,并对人体健康产生危害,基于保护人体健康的污染场地土壤再利用风险评估方法参照《场地环境评价导则》(DB11/T 656-2009)。

#### 4.6.2. 地下水风险评估

目前北京市《场地环境评价导则》(DB11/T 656-2009)中未考虑污染物淋溶进入地下水对地下水及下游敏感点造成危害的过程,导则中缺乏相应的地下水风险评价方法;国家《污染场地风险评估技术导则》(HJ 25.3-2014)中增加了污染物淋溶进入地下水的过程,但并未考虑污染物在非饱和带中的迁移转化过程以及污染物在地下水中迁移扩散至下游敏感点的过程。本导则中对土壤中污染物经解吸、非饱和带迁移转化、地下水混合稀释、迁移扩散至下游敏感点的整个过程风险评价方法进行了完善,并提出层次化地下水风险评价方法,见图4-4。

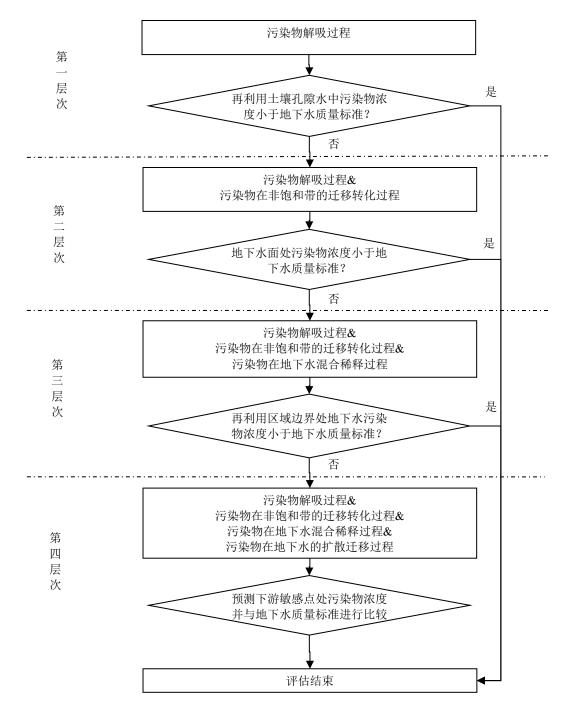


图 4-4 层次化地下水风险评估

- a)第一层次风险评估仅考虑再利用土壤中污染物的解吸过程,达标点为再利用土壤孔隙水中。采用三相平衡模型或浸出测试的方法确定再利用土壤孔隙水中或浸出液中污染物浓度,如果该浓度小于相应的地下水质量标准,则评估过程结束,否则可进入第二层次风险评估。
- b) 第二层次风险评估进一步考虑污染物在非饱和带的迁移转化过程,达标点为地下水面处。采用一维溶质运移模型预测土壤孔隙水中污染物到达地下水面处的浓度,如果该浓度小于相应的地下水质量标准,则评估过程结束,否则可进入第三层次风险评估。
  - c) 第三层次风险评估进一步考虑污染物被地下水混合稀释的过程, 达标点为再利用区

域边界处。采用箱式模型预测经混合稀释后地下水中污染物浓度,如果该浓度小于相应的地下水质量标准,则评估过程结束,否则可进入第四层次风险评估。

d) 第四层次风险评估进一步考虑污染物在地下水的扩散迁移过程,达标点为距离再利用区域最近的环境敏感点处。采用地下水溶质运移模型预测下游敏感点处污染物浓度,如果该浓度小于相应的地下水质量标准,则评估过程结束,否则土壤再利用会对地下水造成危害。

具体项目地下水风险评估应根据场地概念模型及相应的环境管理要求,选择达标点并确定评估层次。

#### 4.6.2.1. 第一层次

第一层次达标点污染物浓度可采用三相平衡理论模型法或浸出测试法进行预测。

a) 三相平衡理论模型法

$$c_{\text{wl}} = c_{\text{s}} \times \frac{\rho_{\text{bl}}}{\theta_{\text{wl}} + H \times \theta_{\text{al}} + \rho_{\text{bl}} \times K_{\text{d}}} \times 10^{-6} \quad (4-17)$$

式中:

 $c_{\text{wl}}$ ——再利用土壤孔隙水中污染物浓度, $mg/cm^3$ ;

cs——再利用土壤中污染物初始总浓度, mg/kg;

 $\rho_{bl}$ ——再利用土壤干容重, $mg/cm^3$ ;

 $\theta_{\text{wl}}$ ——再利用土壤中水的体积含量,无量纲;

 $\theta_{al}$ ——再利用土壤中空气的体积含量,无量纲;

H——污染物亨利常数, 无量纲;

 $K_d$ ——污染物土-水分配系数, cm<sup>3</sup>(水)/mg(土);

对于有机物, $K_d$ 的计算方法见公式(4-18),对于无机物和迁移性低的有机物( $K_{oc}>20$  cm<sup>3</sup>/mg), $K_d$ 可通过浸出实验获得,浸出方法按 HJ/T299 中规定的执行,计算方法见公式(4-19):

$$K_{\rm d} = K_{\rm oc} \times f_{\rm oc} \quad (4-18)$$

$$K_{\rm d} = \frac{(c_{\rm s} M_{\rm s} - c_{\rm L} V_{\rm L}) / M_{\rm s}}{c_{\rm L}} \times 10^{-6} \quad (4-19)$$

式中:

 $K_{\text{oc}}$ —一污染物有机碳-水吸附系数,  $\text{cm}^3(\text{水})/\text{mg}(\vec{\kappa})$ ;

foc---土壤有机碳含量, 无量纲;

Ms——浸出测试土壤样品质量, kg;

 $c_L$ ——浸出液中污染物浓度,mg/cm³;

 $V_{\rm L}$ ——浸出液体积, cm<sup>3</sup>。

#### b) 浸出测试法

考虑再利用土壤在酸性降雨影响下污染物的浸出过程,浸出测试方法按照《固体废物 浸 出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》中规定的执行,浸出浓度可视为再利用土壤孔隙水中目标污 染物浓度。

## 4.6.2.2. 第二层次

第二层次达标点污染物浓度可采用非饱和带一维水流-溶质运移模型进行预测。

#### a) 水流控制方程

假设水流在包气带中的运动服从一维稳态方程,采用 Richards 方程描述一维平衡水流运 动, 见公式 (4-20):

$$\frac{\partial \theta_{w2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(h, z) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \quad (4-20)$$

其中,

$$K(h,z) = K_s(z)K_r(h,z)$$
 (4-21)

初始条件与边界条件分别为:

初始条件为

$$h(z,0) = h_0(z)$$

$$(t=0, z \ge 0)$$
 (4-22)

$$-K(h,z)\left(\frac{\partial h}{\partial z}+1\right)=q(t) \qquad (t \ge 0, z=L) \quad (4-23)$$

$$(t \ge 0, z = L) (4-23)$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \qquad (t \ge 0, z=0) \quad (4-24)$$

式中:

 $\theta_{w2}$ ——非饱和带土壤中水的体积含量,无量纲;

h——压力水头, cm:

*S*——源汇项, cm<sup>3</sup>/(cm<sup>3</sup>·s);

K(h,z)——非饱和带渗透系数函数, cm/s;

 $K_s(z)$ ——非饱和带饱和渗透系数,cm/s;

 $K_r(h,z)$ ——非饱和带相对渗透率,无量纲;

 $h_0$ ——初始时刻包气带压力水头, cm;

q(t)——边界上已知的水通量函数, $cm^3/s$ ;

L——下边界处。

b) 溶质运移控制方程

溶质运移基本控制方程见公式 (4-25):

$$\theta \frac{\partial c_{\rm w}}{\partial t} + \rho_{\rm b2} \frac{\partial s}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 c_{\rm w}}{\partial z^2} - u\theta \frac{\partial c_{\rm w}}{\partial z} - \mu_1 c_{\rm w} \quad (4-25)$$

如果吸附作用为线性吸附,则  $\rho_{b2} \frac{\partial s}{\partial t} = \rho_{b2} k_d \frac{\partial c_w}{\partial t}$  (4-26)

公式 (4-25) 可改写为

$$(1 + \frac{\rho_{b2}k_{d}}{\theta})\frac{\partial c_{w}}{\partial t} = D\frac{\partial^{2}c_{w}}{\partial z^{2}} - u\frac{\partial c_{w}}{\partial z} - \mu_{1}c_{w} \quad (4-27)$$

或

$$R\frac{\partial c_{\rm w}}{\partial t} = D\frac{\partial^2 c_{\rm w}}{\partial z^2} - u\frac{\partial c_{\rm w}}{\partial z} - \mu_1 c_{\rm w} \quad (4-28)$$

初始条件与边界条件分别为:

初始条件为  $c_{w}(z,0) = c_{w0}$  (t=0, z $\geqslant$ 0) (4-29)

上边界条件为  $\theta D \frac{\partial c_{w}}{\partial z} = q(t)c_{0} \qquad (t \ge 0, z=L) (4-30)$ 

下边界条件为  $\frac{\partial c_{\mathbf{w}}}{\partial z} = 0 \qquad (t \ge 0, z=0) (4-31)$ 

式中:

 $c_{\text{w}}$ ——非饱和带土壤孔隙水中污染物浓度, $mg/cm^3$ (到达地下水面处为  $c_{\text{w2}}$ );

 $\theta$ ——非饱和带土壤有效孔隙度,无量纲;

 $\rho_{b2}$ ——非饱和带土壤干容重, mg/cm<sup>3</sup>;

s——非饱和带土壤固相吸附浓度, mg/mg;

D——非饱和带土壤水动力弥散系数, cm<sup>2</sup>/s;

u——垂直方向非饱和带土壤孔隙水渗流流速, cm/s;

 $\mu_1$ ———阶生物降解系数,1/s(如果不考虑生物降解作用,则取值为0,可通过实验获得);

z——相对于基准面的高度,向上为正,cm:

R——延迟系数,无量纲;

 $c_{w0}$ ——初始状态非饱和带土壤孔隙水中污染物浓度, $mg/cm^3$ (清洁的非饱和带取值为0);

c<sub>0</sub>——边界上已知水通量中污染物浓度, mg/cm<sup>3</sup>(上边界水通量不含污染物时取值为 0)。 由于溶质运移模型难以解析求解,实际问题中多靠数值方法求解。

#### 4.6.2.3. 第三层次

第三层次达标点污染物浓度可采用箱式混合模型进行预测,见公式(4-32):

$$c_{\text{w3}} = \frac{c_{\text{w2}}}{\text{DF}} \quad (4-32)$$

其中,

DF = 1 + 
$$\frac{U_{\text{gw}} \times \delta_{\text{gw}}}{I \times W_{\text{gw}}}$$
 (4-33)

$$\delta_{gw} = \min(B, 0.10583 \times W_{gw} + B \times (1 + \exp(\frac{-W_{gw} \times I}{U_{gw} \times B}))) \quad (4-34)$$

式中:

 $c_{w3}$ ——经混合稀释后地下水中污染物浓度, $mg/cm^3$ ;

DF——地下水混合稀释因子, 无量纲;

 $U_{gw}$ ——地下水流速,cm/s;

 $\delta_{gw}$ ——地下水混合层厚度,cm;

 $W_{\text{sw}}$ ——平行于地下水流向的污染土壤长度, cm;

B──含水层厚度, cm。

#### 4.6.2.4. 第四层次

第四层次达标点污染物浓度可按照《环境影响评价技术导则 地下水环境》中 F.3 和 F.4 规定的方法进行预测,由于溶质运移模型难以解析求解,实际问题中多靠数值方法求解。

#### 4.6.2.5. 基于保护地下水的土壤再利用修复目标值计算

如果风险评估的结果表明土壤再利用会对地下水产生危害,应根据选择的达标点制定基于保护地下水的土壤再利用修复目标值,指导土壤修复。

不同层次土壤再利用修复目标值的计算方法见公式(4-35)-(4-38):

第一层次: 
$$SRL_{gw} = c_{gw} \times \frac{\theta_{w1} + H \times \theta_{a1} + \rho_{b1} \times K_d}{\rho_{b1}} \times 10^6$$
 (4-35)

第二层次: 
$$SRL_{gw} = c_{gw} \times AF \times \frac{\theta_{w1} + H \times \theta_{a1} + \rho_{b1} \times K_d}{\rho_{b1}} \times 10^6$$
 (4-36)

第三层次: 
$$SRL_{gw} = c_{gw} \times AF \times DF \times \frac{\theta_{w1} + H \times \theta_{a1} + \rho_{b1} \times K_d}{\rho_{b1}} \times 10^6$$
 (4-37)

第四层次: 
$$SRL_{gw} = c_{gw} \times AF \times DF \times LDF \times \frac{\theta_{w1} + H \times \theta_{a1} + \rho_{b1} \times K_d}{\rho_{b1}} \times 10^6$$
 (4-38)

其中,

$$AF = \frac{c_{w1}}{c_{w2}}$$
 (4-39)

LDF = 
$$\frac{c_{\text{w2}}}{c_{\text{w3}}}$$
 (4-40)

式中:

SRL<sub>gw</sub>——基于保护地下水的土壤再利用修复目标值, mg/kg;

 $c_{\text{gw}}$ ——地下水中污染物含量限值, $mg/cm^3$ ;

AF——污染物在非饱和带中的衰减因子, 无量纲;

LDF——污染物在地下水中的衰减因子, 无量纲;

其他参数的含义同上。

# 4.7. 污染防治对策及长期监测

- a) 土壤再利用区底部应设计防渗措施,建议铺设厚度不小于 0.5 m 的粉质粘土;土壤 再利用区顶部不能直接暴露于环境,应根据实际情况对表面进行硬化或覆盖至少 1 m 的清洁 土壤。
- b)制定地下水风险事故应急响应预案,明确风险事故状态下应采取的措施,提出防止 受污染的地下水扩散和对受污染的地下水进行治理的具体方案。
- c)提出防治地下水污染的环境监测方案,包括对项目的主要污染源、影响区域、主要保护目标和与环保措施运行效果有关内容提出具体的监测计划(监测井点布置、取样深度、监测的指标、监测频率等),以及对环境监测机构和人员装备的建议。
- d)提出向环境保护行政主管部门报告的制度,包括报告的方式、程序、频次和内容(土壤再利用区域及其影响区地下水环境监测数据,排放污染物的种类、数量、浓度,以及排放设施、治理措施运行状况和运行效果等)。

# 附录 A 污染物理化性质参数

表 A.1 部分污染物理化性质参数

序号	中文名	英文名	CAS 号	H'	数据来源	$D_{ m w}$ cm <sup>2</sup> /s	数据来源	$D_{ m a}$ cm $^2/{ m s}$	数据来源	$K_{\rm oc}$ cm <sup>3</sup> /mg	数据来源
1	砷	Arsenic	7440-38-2								
2	铍	Beryllium	7440-41-7								
3	镉	Cadmium	7440-43-9								
4	铬	Chromium (total)	7440-47-3								
5	铬 (VI)	Chromium (VI)	18540-29-9							1.44E-03	CRC89
6	铜	Copper	7440-50-8								
7	铅	Lead (inorganic)	7439-92-1								
8	汞	Mercury	7439-97-6	4.67E-01	SSL	6.30E-06	SSL	3.07E-02	SSL	6.37E-04	EPI
9	镍-溶解盐	Nickel	7440-02-0								
10	锌	Zinc	7440-66-6								
11	锡	Tin	7440-31-5								
12	氰化物	Cyanide	57-12-5	5.44E-03	EPI	2.46E-05	WATER9	2.11E-01	WATER9	9.90E-03	EPI
13	氟化物	Fluorine (soluble fluoride)	7782-41-4							1.50E-01	EPI
14	石棉	Asbestos	1332-21-4								
15	二氯甲烷	Methylene chloride	75-09-2	1.33E-01	EPI	1.25E-05	WATER9	9.99E-02	WATER9	2.17E-02	EPI
16	苯	Benzene	71-43-2	2.27E-01	EPI	1.03E-05	WATER9	8.95E-02	WATER9	1.46E-01	EPI
17	甲苯	Toluene	108-88-3	2.71E-01	EPI	9.20E-06	WATER9	7.78E-02	WATER9	2.34E-01	EPI
18	乙苯	Ethyl benzene	100-41-4	3.22E-01	EPI	8.46E-06	WATER9	6.85E-02	WATER9	4.46E-01	EPI

序号	中文名	英文名	CAS 号	H'	数据来源	$D_{ m w}$ cm <sup>2</sup> /s	数据来源	$D_{ m a}$ cm $^2/{ m s}$	数据来源	$K_{ m oc}$ cm <sup>3</sup> /mg	数据来源
32	二甲苯 (总)	Xylenes (mixed isomers)	1330-20-7	2.12E-01	EPI	9.90E-06	WATER9	8.47E-02	WATER9	3.83E-01	EPI
33	氯乙烯	Vinyl chloride	75-01-4	1.14E+00	EPI	1.20E-05	WATER9	1.07E-01	WATER9	2.17E-02	EPI
34	氯甲烷	Chloromethane	74-87-3	3.61E-01	EPI	1.36E-05	WATER9	1.24E-01	WATER9	1.32E-02	EPI
35	1,2-二氯乙烯 (顺式)	Dichloroethylene, cis-1,2-	156-59-2	1.67E-01	EPI	1.13E-05	WATER9	8.84E-02	WATER9	3.96E-02	EPI
36	1,2-二氯乙烯 (反式)	Dichloroethylene, trans-1,2	156-60-5	1.67E-01	EPI	1.12E-05	WATER9	8.76E-02	WATER9	3.96E-02	EPI
37	1,1-二氯乙烯	Dichloroethylene, 1,1-	75-35-4	1.07E+00	EPI	1.10E-05	WATER9	8.63E-02	WATER9	3.18E-02	EPI
38	1,2-二氯丙烷	Dichloropropane, 1,2-	78-87-5	1.15E-01	EPI	9.73E-06	WATER9	7.33E-02	WATER9	6.07E-02	EPI
39	1,2,3-三氯丙烷	Trichloropropane, 1,2,3-	96-18-4	1.40E-02	EPI	9.24E-06	WATER9	5.75E-02	WATER9	1.16E-01	EPI
40	二溴氯甲烷	Dibromochloromethane	124-48-1	3.20E-02	EPI	1.06E-05	WATER9	3.66E-02	WATER9	3.18E-02	EPI
41	一溴二氯甲烷	Dibromochloromethane	75-27-4	8.67E-02	EPI	1.07E-05	WATER9	5.63E-02	WATER9	3.18E-02	EPI
42	六氯苯	Hexachlorobenzene	118-74-1	6.95E-02	EPI	7.85E-06	WATER9	2.90E-02	WATER9	6.20E+00	EPI
43	苯胺	Aniline	62-53-3	8.26E-05	EPI	1.01E-05	WATER9	8.30E-02	WATER9	7.02E-02	EPI
44	硝基苯	Nitrobenzene	98-95-3	9.81E-04	EPI	9.45E-06	WATER9	6.81E-02	WATER9	2.26E-01	EPI
45	苯酚	Phenol	108-95-2	1.36E-05	EPI	1.03E-05	WATER9	8.34E-02	WATER9	1.87E-01	EPI
46	2,4-二硝基甲苯	Dinitrotoluene, 2,4-	121-14-2	2.21E-06	EPI	7.90E-06	WATER9	3.75E-02	WATER9	5.76E-01	EPI
47	邻苯二甲酸二丁酯	Di-n-butyl phthalate	84-74-2	7.40E-05	EPI	5.33E-06	WATER9	2.14E-02	WATER9	1.16E+00	EPI
48	邻苯二甲酸二辛酯	Bis (2-ethyl-hexyl) phthalate	117-81-7	1.10E-05	EPI	4.18E-06	WATER9	1.73E-02	WATER9	1.20E+02	EPI
49	邻苯二甲酸正辛酯	Di-n-octyl phthalate	117-84-0	1.05E-04	EPI	4.15E-06	WATER9	3.56E-02	WATER9	1.41E+02	EPI
50	萘	Naphthalene	91-20-3	1.80E-02	EPI	8.38E-06	WATER9	6.05E-02	WATER9	1.54E+00	EPI
51	菲	Phenanthrene	85-01-8	5.40E-03	TX11	7.47E-06	TX11	3.33E-02	TX11	1.41E+01	TX11
52	蒽	Anthracene	120-12-7	2.27E-03	EPI	7.85E-06	WATER9	3.90E-02	WATER9	1.64E+01	EPI
53	荧蒽	Fluoranthene	206-44-0	3.62E-04	EPI	7.18E-06	WATER9	2.76E-02	WATER9	5.55E+01	EPI

序号	中文名	英文名	CAS 号	H'	数据来源	$D_{ m w}$ cm <sup>2</sup> /s	数据来源	$D_{ m a}$ cm <sup>2</sup> /s	数据来源	$K_{ m oc}$ cm <sup>3</sup> /mg	数据来源
54	芘	Pyrene	129-00-0	4.87E-04	EPI	7.25E-06	WATER9	2.78E-02	WATER9	5.43E+01	EPI
55	屈	Chrysene	218-01-9	2.14E-04	EPI	6.75E-06	WATER9	2.61E-02	WATER9	1.81E+02	EPI
56	芴	Fluorene	86-73-7	3.93E-03	EPI	7.89E-06	WATER9	4.40E-02	WATER9	9.16E+00	EPI
57	苯并[b]荧蒽	Benzo-b-fluoranthene	205-99-2	2.69E-05	EPI	5.56E-06	WATER9	4.76E-02	WATER9	5.99E+02	EPI
58	苯并[k]荧蒽	Benzo-k-fluoranthene	207-08-9	2.39E-05	EPI	5.56E-06	WATER9	4.76E-02	WATER9	5.87E+02	EPI
59	苯并[a]芘	Benzo-a-pyrene	50-32-8	1.87E-05	EPI	5.56E-06	WATER9	4.76E-02	WATER9	5.87E+02	EPI
60	茚并[1,2,3-cd]芘	Indeno-1,2,3-cd-pyrene	193-39-5	6.56E-05	SSL	5.23E-06	WATER9	4.48E-02	WATER9	3.47E+03	SSL
61	苯并[g,h,i]菲	Benzo-g,h,i-perylene	191-24-2	5.82E-06	TX11	5.65E-05	TX11	4.90E-02	TX11	1.58E+03	TX11
62	苯并[a]蒽	Benz-a-anthracene	56-55-3	4.91E-04	EPI	5.94E-06	WATER9	5.09E-02	WATER9	1.77E+02	EPI
63	二苯并[a, h]蒽	Dibenz-a,h-anthracene	53-70-3	5.76E-06	EPI	5.21E-06	WATER9	4.46E-02	WATER9	1.91E+03	EPI
64	2-氯酚	Chlorophenol, 2-	95-57-8	4.58E-04	EPI	9.48E-06	WATER9	6.61E-02	WATER9	3.07E-01	EPI
65	2,4-二氯酚	Dichlorophenol, 2,4-	120-83-2	1.75E-04	EPI	8.68E-06	WATER9	4.86E-02	WATER9	4.92E-01	EPI
66	2,4-二硝基酚	Dinitrophenol, 2,4-	51-28-5	3.52E-06	EPI	9.08E-06	WATER9	4.07E-02	WATER9	4.61E-01	EPI
67	2-硝基酚	Nitrophenol, 2-	88-75-5	2.21E-05	TX11	8.47E-06	TX11	6.87E-02	TX11	2.09E-02	TX11
68	4-硝基酚	Nitrophenol, 4-	100-02-7	3.24E-08	TX11	8.66E-06	TX11	6.73E-02	TX11	3.16E-03	TX11
69	五氯酚	Pentachlorophenol	87-86-5	1.00E-06	EPI	8.01E-06	WATER9	2.95E-02	WATER9	4.96E+00	EPI
70	2,4,5-三氯酚	Trichlorophenol, 2,4,5-	95-95-4	6.62E-05	EPI	8.09E-06	WATER9	3.14E-02	WATER9	1.78E+00	EPI
71	2,4,6-三氯酚	Trichlorophenol, 2,4,6-	88-06-2	1.06E-04	EPI	8.09E-06	WATER9	3.14E-02	WATER9	1.78E+00	EPI
72	4-甲酚	Cresol, p-	106-44-5	4.09E-05	EPI	9.24E-06	WATER9	7.24E-02	WATER9	3.00E-01	EPI
73	多氯联苯	Polychlorinated biphenyls (liquid)	1336-36-3	7.77E-03	EPI	5.04E-06	WATER9	4.32E-02	WATER9	7.81E+01	SSL
74	二噁英类(PCDDs/PCDFs)	Dioxin (2,3,7,8-TCDD)	1746-01-6	2.04E-03	EPI	4.73E-06	WATER9	4.70E-02	WATER9	2.49E+02	EPI
75	六六六α	Hexachlorocyclohexane,	319-84-6	2.10E-04	EPI	5.06E-06	WATER9	4.33E-02	WATER9	2.81E+00	EPI

序号	中文名	英文名	CAS 号	H'	数据来源	$D_{ m w}$ cm <sup>2</sup> /s	数据来源	$D_{ m a}$ cm <sup>2</sup> /s	数据来源	K <sub>oc</sub> cm <sup>3</sup> /mg	数据来源
		alpha									
76	六六六β	Hexachlorocyclohexane, beta	319-85-7	2.10E-04	EPI	7.40E-06	WATER9	2.77E-02	WATER9	2.81E+00	EPI
77	六六六	Hexachlorocyclohexane, delta	319-86-8	1.77E-04	TX11	6.20E-06	TX11	4.50E-02	TX11	8.51E+00	TX11
78	林丹(六六六γ)	Hexachlorocyclohexane, gamma	58-89-9	2.10E-04	EPI	5.06E-06	WATER9	4.33E-02	WATER9	2.81E+00	EPI
79	DDT(包括 o,p'-DDT, p,p'-DDT)	DDT	50-29-3	3.40E-04	EPI	4.43E-06	WATER9	3.79E-02	WATER9	1.69E+02	EPI
80	p.p'-DDE	DDE	72-55-9	1.70E-03	EPI	4.76E-06	WATER9	4.08E-02	WATER9	1.18E+02	EPI
81	p,p'-DDD	DDD	72-54-8	2.70E-04	EPI	4.74E-06	WATER9	4.06E-02	WATER9	1.18E+02	EPI
82	狄氏剂	Dieldrin	60-57-1	4.09E-04	EPI	6.01E-06	WATER9	2.33E-02	WATER9	2.01E+01	EPI
83	艾氏剂	Aldrin	309-00-2	1.80E-03	EPI	4.35E-06	WATER9	3.72E-02	WATER9	8.20E+01	EPI
84	异狄氏剂	Endrin	72-20-8	4.09E-04	EPI	4.22E-06	WATER9	3.62E-02	WATER9	2.01E+01	EPI
85	敌敌畏	Dichlorvos	62-73-7	2.35E-05	EPI	7.33E-06	WATER9	2.79E-02	WATER9	5.40E-02	EPI
86	乐果	Dimethoate	60-51-5	9.93E-09	EPI	6.74E-06	WATER9	2.61E-02	WATER9	1.28E-02	EPI
87	总石油烃(脂肪族): <c16< td=""><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></c16<>										
88	总石油烃(脂肪族): >C16										

注: (1) H'为无量纲亨利常数; Da 为空气中扩散系数; Dw 为水中扩散系数; Koc 为土壤-有机碳分配系数;

<sup>(2) &</sup>quot;EPI" 代表美国环保局"化学品性质参数估算工具包(Estimation Program Interface Suite)"数据;"WATER 9"代表美国环保局"废水处理模型(the wastewater treatment model)"数据;CRC89 代表"美国 CRC 的化学和物理手册(Handbook of Chemistry and Physic)"数据;SSL 代表"美国土壤筛选值(Soil Screening Level)"数据库;TX11 代表德克萨斯州"毒性因子和化学/物理参数(Toxicity Factors and Chemical/Physical Parameters)数据。

# 附录 B 地下水中污染物含量限值

表 B.1 地下水中污染物含量限值(mg/L)

			O,		
序号	中文名	英文名	CAS 号	污染物含量限值	来源
1	砷	Arsenic	7440-38-2	0.01	1
2	铍	Beryllium	7440-41-7	0.0002	2
3	镉	Cadmium	7440-43-9	0.005	1
4	铬	Chromium (total)	7440-47-3	0.07	4
5	铬 (VI)	Chromium (VI)	18540-29-9	0.05	1
6	铜	Copper	7440-50-8	1	1
7	铅	Lead (inorganic)	7439-92-1	0.01	1
8	汞	Mercury	7439-97-6	0.001	1
9	镍	Nickel	7440-02-0	0.02	1
10	锌	Zinc	7440-66-6	1	1
11	锡	Tin	7440-31-5	4.2	5
12	氰化物	Cyanide	57-12-5	0.05	1
13	氟化物	Fluorine (soluble fluoride)	7782-41-4	1	1
14	石棉	Asbestos	1332-21-4		6
15	二氯甲烷	Methylene chloride	75-09-2	0.02	1
16	苯	Benzene	71-43-2	0.01	1
17	甲苯	Toluene	108-88-3	0.7	1
18	乙苯	Ethyl benzene	100-41-4	0.3	1
19	氯仿(三氯甲烷)	Chloroform	67-66-3	0.06	1
20	溴仿	Bromoform	75-25-2	0.004	4
21	氯苯	Chlorobenzene	108-90-7	0.3	1
22	四氯化碳	Carbon tetrachloride	56-23-5	0.002	1
23	1,1-二氯乙烷	Dichloroethane, 1,1-	75-34-3	0.05	4
24	1,2-二氯乙烷	Dichloroethane, 1,2-	107-06-2	0.03	1
25	1,1,1-三氯乙烷	Trichloroethane, 1,1,1-	71-55-6	2	1
26	1,1,2-三氯乙烷	Trichloroethane, 1,1,2-	79-00-5	0.003	4
27	1,1,2,2-四氯乙烷	Tetrachloroethane, 1,1,2,2-	79-34-5	0.001	4
28	三氯乙烯	Trichloroethylene	79-01-6	0.07	1
29	四氯乙烯	Tetrachloroethylene	127-18-4	0.04	1
30	二溴乙烯	Ethylene dibromide	106-93-4	0.00005	1
31	苯乙烯	Styrene	100-42-5	0.02	1
32	二甲苯 (总)	Xylenes (mixed isomers)	1330-20-7	0.5	1
33	氯乙烯	Vinyl chloride	75-01-4	0.005	1
34	氯甲烷	Chloromethane	74-87-3	0.0027	5
35	1,2-二氯乙烯(顺式)	Dichloroethylene, cis-1,2-	156-59-2	0.07	4
36	1,2-二氯乙烯(反式)	Dichloroethylene, trans-1,2	156-60-5	0.1	4

È					717
序 号	中文名	英文名	CAS 号	污染物含量限值	来源
37	1,1-二氯乙烯	Dichloroethylene, 1,1-	75-35-4	0.03	1
38	1,2-二氯丙烷	Dichloropropane, 1,2-	78-87-5	0.001	4
39	1,2,3-三氯丙烷	Trichloropropane, 1,2,3-	96-18-4	0.00003	4
40	二溴氯甲烷	Dibromochloromethane	124-48-1	0.1	1
41	一溴二氯甲烷	Bromodichloromethane	75-27-4	0.06	1
42	六氯苯	Hexachlorobenzene	118-74-1	0.001	1
43	苯胺	Aniline	62-53-3	0.1	3
44	硝基苯	Nitrobenzene	98-95-3	0.017	1
45	苯酚	Phenol	108-95-2	2	4
46	2,4-二硝基甲苯	Dinitrotoluene, 2,4-	121-14-2	0.01	4
47	邻苯二甲酸二丁酯	Di-n-butyl phthalate	84-74-2	0.003	1
48	邻苯二甲酸二辛酯	Bis (2-ethyl-hexyl) phthalate	117-81-7	0.008	1
49	邻苯二甲酸正辛酯	Di-n-octyl phthalate	117-84-0	0.1	4
50	萘	Naphthalene	91-20-3	0.3	4
51	菲	Phenanthrene	85-01-8	0.1	4
52	蒽	Anthracene	120-12-7	2	4
53	荧蒽	Fluoranthene	206-44-0	0.3	4
54	芘	Pyrene	129-00-0	0.2	4
55	屈	Chrysene	218-01-9	0.005	4
56	芴	Fluorene	86-73-7	0.3	4
57	苯并[b]荧蒽	Benzo-b-fluoranthene	205-99-2	0.0002	4
58	苯并[k]荧蒽	Benzo-k-fluoranthene	207-08-9	0.0005	4
59	苯并[a]芘	Benzo-a-pyrene	50-32-8	0.00001	1
60	茚并[1,2,3-cd]芘	Indeno-1,2,3-cd-pyrene	193-39-5	0.0002	4
61	苯并[g,h,i]菲	Benzo-g,h,i-perylene	191-24-2	0.1	4
62	苯并[a]蒽	Benz-a-anthracene	56-55-3	0.0001	4
63	二苯并[a, h]蒽	Dibenz-a,h-anthracene	53-70-3	0.0003	4
64	2-氯酚	Chlorophenol, 2-	95-57-8	0.04	4
65	2,4-二氯酚	Dichlorophenol, 2,4-	120-83-2	0.02	4
66	2,4-二硝基酚	Dinitrophenol, 2,4-	51-28-5	0.04	4
67	2-硝基酚	Nitrophenol, 2-	88-75-5	0.06	1
68	4-硝基酚	Nitrophenol, 4-	100-02-7	0.056	5
69	五氯酚	Pentachlorophenol	87-86-5	0.009	1
70	2,4,5-三氯酚	Trichlorophenol, 2,4,5-	95-95-4	0.7	4
71	2,4,6-三氯酚	Trichlorophenol, 2,4,6-	88-06-2	0.2	1
72	4-甲酚	Cresol, p-	106-44-5	0.0035	5
73	多氯联苯	Polychlorinated biphenyls (liquid)	1336-36-3	0.0005	1
74	二噁英类(PCDDs/PCDFs)	Dioxin (2,3,7,8-TCDD)	1746-01-6	0.00000003	1
75	六六六α	Hexachlorocyclohexane, alpha	319-84-6	0.00002	4

序号	中文名	英文名	CAS 号	污染物含量限值	来源
76	六六六β	Hexachlorocyclohexane, beta	319-85-7	0.00004	4
77	六六六δ	Hexachlorocyclohexane, delta	319-86-8	0.0021	5
78	林丹(六六六γ)	Hexachlorocyclohexane, gamma	58-89-9	0.00003	4
79	DDT(包括 o,p'-DDT, p,p'-DDT)	DDT	50-29-3	0.001	1
80	p.p'-DDE	DDE	72-55-9	0.0001	4
81	p,p'-DDD	DDD	72-54-8	0.0001	4
82	狄氏剂	Dieldrin	60-57-1	0.00003	4
83	艾氏剂	Aldrin	309-00-2	0.00004	4
84	异狄氏剂	Endrin	72-20-8	0.002	4
85	敌敌畏	Dichlorvos	62-73-7	0.001	1
86	乐果	Dimethoate	60-51-5	0.08	1

注: 1 为我国《生活饮用水卫生标准》(GB5749-2006), 2 为《地下水质量标准》(GB/T 14848-93), 3 为《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002), 4 为新泽西州地下水质量标准(Ground Water Quality Standards), 5 为佛罗里达州地下水/地表水清理目标值(Groundwater and Surface Warer Cleanup Target Levels), 6 为怀俄明州地下水修复标准(Water Cleanup Levels), 7 为美国硝基酚环境水质标准(Ambient Water Quality Criteria for Nitrophenols)。

# 参考文献

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 生活垃圾填埋场渗滤液处理工程技术规范(试行). 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2010.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 生活垃圾填埋场污染控制标准. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2008.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 环境影响评价技术导则 地下水环境. 北京:中华人民共和国环境保护部, 2011.
- [4] 中华人民共和国环境保护部. 环境影响评价技术导则 总纲. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2011.
- [5] 中华人民共和国环境保护部. 场地环境调查技术导则. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2014.
- [6] 中华人民共和国环境保护部. 污染场地风险评估技术导则. 北京: 中华人民共和国环境保护部. 2014.
- [7] 国家环境保护总局. 固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法. 北京: 国家环境保护总局. 2007.
- [8] 国家环境保护总局. 固体废物 浸出毒性浸出方法 醋酸缓冲溶液法. 北京: 国家环境保护总局, 2007.
- [9] 国家技术质量监督局. 地下水质量标准. 北京: 国家技术质量监督局, 1994.
- [10] 中华人民共和国卫生部. 生活饮用水卫生标准. 北京: 中华人民共和国卫生部, 2007.
- [11] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准. 北京: 国家环境保护总局, 2002.
- [12] 中华人民共和国建设部. 生活垃圾卫生填埋技术规范. 北京: 中华人民共和国建设部, 2004.
- [13] 中华人民共和国建设部. 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范. 北京: 中华人民 共和国建设部, 2007.
- [14] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘查规范. 北京: 中华人民共和国建设部, 2001.
- [15] 中华人民共和国建设水利部. 土工试验方法标准. 北京: 中华人民共和国建设水利部, 1999.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市用地分类与规划建设用地标准. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012.
- [17] 北京市环保局. 2009 北京市环境状况公报. 北京: 北京市环保局,2009.
- [18] 北京市环保局. 2010 北京市环境状况公报. 北京: 北京市环保局, 2010.
- [19] 北京市环保局. 2011 北京市环境状况公报. 北京: 北京市环保局. 2011.
- [20] 北京市环保局. 2012 北京市环境状况公报. 北京: 北京市环保局, 2012.

- [21] 北京市环境保护局. DB11/T 811-2011 场地土壤环境风险评价筛选值. 北京: 北京市质量技术监督局, 2011.
- [22] 北京市环境保护局. DB11/T 656-2009 场地环境评价导则. 北京: 北京市质量技术监督局, 2009.
- [23] 中国地质调查局. 城市环境地质调查评价规范(送审稿), 2005.
- [24] Technical and Environmental Administration. Questionnaire regarding handling of contaminated soil. Copenhagen: Technical and Environmental Administration, 2011.
- [25] Commonwealth of Massachusetts Executive Office of Environmental Affairs. Reuse and disposal of contaminated soil at Massachusetts landfills. Department of Environmental Protection, Boston, 1997.
- [26] New York State Department of Environmental Conservation. Environmental Remediation Programs. Division of Environmental Remediation, New York, 2006.
- [27] New York State Department of Environmental Conservation. Petroleum-Contaminated Soil Guidance Policy. Division of Environmental Remediation, New York, 1992.
- [28] New York State Department of Environmental Conservation. Soil Cleanup Guidance. Division of Environmental Remediation, New York, 2010.
- [29] New Jersey State Department of Environmental Protection. Guidance Document for the Remediation of Contaminated Soils. Department of Environmental Protection, New Jersey, 1998.
- [30] US EPA. Soil Screening Guidance: User's Guide. Office of Solid Waste and Emergency Response United States Environmental Protection Agency. Washington, DC, 1996.
- [31] US EPA. Supplement Guidance for Developing Soil Screening Levels for Superfund Sites. Office of Solid Waste and Emergency Response United States Environmental Protection Agency. Washington DC, 2002.
- [32] US EPA. Regional Screening Levels. http://www.epa.gov/region9/superfund/prg/.
- [33] New Jersey State Department of Environmental Protection. Using the SESOIL transport model to assess the impact to ground water pathway. Department of Environmental Protection, New Jersey, 2008.
- [34] New Jersey State Department of Environmental Protection. Guidance for determination of the dilution-attenuation factor for the impact to ground water. Department of Environmental Protection, New Jersey, 2008.
- [35] New Jersey State Department of Environmental Protection. Development of site-specific impact to ground water soil remediation standards using the soil-water partition equation. Department of Environmental Protection, New Jersey, 2008.
- [36] CCME. Summary of a protocol for the derivation of environmental and human health soil quality guidelines. CCME, Manitoba, 2006.
- [37] Florida Department of Environmental Protection. Groundwater and surface water cleanup target levels. Department of Environmental Protection, Gainesville, 2005.

- [38] US EPA. Ambient water quality criteria for nitrophenols. Office of Water Regulations and Standards Criteria and Standards Division, Washington D C, 1980.
- [39] Alaska Department of Environmental Conservation. Groundwater cleanup levels. Division of Spill Prevention and Response, Juneau, 2008.
- [40] Alaska Department of Environmental Conservation. Cleanup levels guidance. Division of Spill Prevention and Response, Juneau, 2008.
- [41] Alaska Department of Environmental Conservation. Soil cleanup levels table. Division of Spill Prevention and Response, Juneau, 2008.
- [42] Alaska Department of Environmental Conservation. Soil-Water Partition Equation. Division of Spill Prevention and Response, Juneau, 2008.
- [43] New Jersey State Department of Environmental Protection. Ground Water Quality Standards. Department of Environmental Protection, New Jersey, 2010.
- [44] New Jersey State Department of Environmental Protection. Guidance for the use of the Synthetic Precipitation Leaching Procedure to Develop New Jersey Site-Specific Impact to Ground Water Remediation Standards. Department of Environmental Protection, New Jersey, 2013.
- [45] Florida Department of Environmental Protection. Soil Cleanup Target Levels. Department of Environmental Protection, Gainesville, 2005.
- [46] Wyoming Department of Environmental Protection. Using fate and transport models to evaluate cleanup levels. Voluntary Remediation Program, Cheyemme, 2000.
- [47] Wyoming Department of Environmental Protection. Soil Cleanup Levels. Voluntary Remediation Program, Cheyemme, 2012.
- [48] Wyoming Department of Environmental Protection. Groundwater Cleanup Levels. Voluntary Remediation Program, Cheyemme, 2012.
- [49] Maryland Department of the Environment. Cleanup Standards for Soil and Groundwater. Department of the Environment, Baltimore, 2008.
- [50] Florida Department of Environmental Protection. Development of Cleanup Target Levels. Division of Waste Management, Gainesville, 2005.
- [51] US EPA. D RASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. http://yosemite.epa.gov/water/owrccatalog.nsf/7322259e90d060c885256f0a0055db68/9f6b7f 250b4fbc4585256b0600723559!opendocument.
- [52] The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. J. Šimůnek, M. Šejna, H. Saito, et al. California: Department of Environmental Sciences University of California Riverside, 2009.
- [53] 田宁宁,张海燕,王凯军等.北京市浅层地下水资源评价及开发利用.中国给水排水,2001,17(7):65-67.

- [54] 纪华, 夏立江, 王进安等. 垃圾填埋场硫化氢恶臭污染变化的成因研究. 生态环境, 2001, 13(2): 173-176.
- [55] 杨玉飞, 陈玉成, 王琪等. 垃圾填埋场渗滤液回流技术研究进展. 新疆环境保护, 2004, 26(1): 35-38.
- [56] 赵振振, 蒋建国, 黄云峰等. 零价铁法处理垃圾填埋场渗滤液. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(12): 1987-1990.
- [57] 夏立江,温小乐.生活垃圾堆填区周边土壤的形状变化及其污染状况.土壤与环境, 2001,10(1):17-19.
- [58] 杨庆, 栾茂田. 地下水易污性评价方法——DRASTIC 指标体系. 水文地质工程地质, 1999, (2): 4-9.
- [59] 孙闪闪, 贺玉龙. 地下水易污性评价方法——DRASTIC 指标体系法及改进方法. 中国新技术新产品, 2011, (22): 11.
- [60] 徐亚, 刘景财, 刘玉强, 等. 基于 Monte Carlo 方法的污染场地风险评价及不确定性研究. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1579-1584.
- [61] 季文佳, 杨子良, 王 琪, 等. 危险废物填埋处置的地下水环境健康风险评价. 中国 环境科学, 2010, 30(4): 548-552.
- [62] 于长江. 医疗废物处理处置过程中若干环境风险问题的研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [63] 钟左桑. 地下水防污性能评价方法探讨. 地学前沿, 2005, 12: 3-11.