

ICS 点击此处添加 ICS 号

点击此处添加中国标准文献分类号



中国风景园林学会团体标准

T/CHSLA XXXX—2022

修复后土壤绿化土再利用环境风险 评估技术指南

Environmental risk assessment guideline for remediated soil reuse in planting soil

(征求意见稿)

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国风景园林学会

发布

目 次

前言	II
1 范围	3
2 规范性引用文件	3
3 术语和定义	3
4 总体要求与工作程序	4
5 再利用生态环境调查	5
6 再利用环境风险筛选	7
7 再利用改良技术要点	8
8 再利用环境风险评估	9
9 环境风险管控与监测	11
附录 A（规范性）修复后土壤绿化土再利用筛选值	13
附录 B（规范性）达标点浓度预测法	14
附录 C（规范性）修复后土壤绿化土再利用植物生态风险评估指标达标值	17
附录 D（规范性）修复后土壤植物生态风险评估指标检测分析方法	18
附录 E（资料性）修复后土壤绿化土再利用环境风险评估报告编制提纲	19

前言

本文件参照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国风景园林学会提出。

本文件由中国风景园林学会标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：××××、××××、……

本文件主要起草人：×××、×××、××、……

国家标准征求意见稿

修复后土壤绿化土再利用环境风险评估技术指南

1 范围

本文件规定了修复后土壤绿化土再利用环境风险评估的工作程序、方法、内容及要求。
本文件适用于修复后土壤在非环境敏感绿地内绿化土再利用的评估。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T14848 地下水质量标准

GB36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB55014 园林绿化工程项目规范

CJJ/T283 园林绿化工程盐碱地改良技术标准

CJ/T340-2016 绿化种植土壤

HJ25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复监测技术导则

HJ25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ164 地下水环境监测技术规范

HJ/T166 土壤环境监测技术规范

T/CHSLA50005 园林绿化用城镇搬迁地土壤质量分级

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

修复后土壤 remediated soil

污染场地修复治理后达标的土壤，不包括采用水泥窑协同处置修复的土壤。

3.2

绿化土 planting soil

绿地中发挥地形塑造和植物生长支持作用的土壤，包括绿化种植土壤和绿化下填土。

3.3

绿化土再利用 planting soil reuse

修复后土壤用作绿化土，置于绿地内直接使用，或者将其进行改良以后再进行使用。

3.4

绿化土再利用区 remediated soil reuse zone of planting soil

修复后土壤在绿地内绿化土再利用的集中区域。

3.5

绿化种植土壤 planting soil for greening

用于种植花卉、草坪、地被、灌木、乔木、藤本等植物所使用的自然土壤或人工配制土壤。

3.6

绿化下填土 underfill planting soil

各类绿地中，在种植区域绿化种植土壤层以下用于地形塑造的回填土壤。

3.7

环境敏感绿地 environmental sensitive area green space

国家公园、自然保护区、风景名胜区等自然保护地区域、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、基本农田保护区、重要湿地、滨水空间等区域内的以植物覆盖为主的区域。

3.8

土壤再利用筛选值 screening value for soil reuse

判定修复后土壤再利用环境风险评估是否启动的污染物浓度限值。

3.9

污染物残留浓度 residual concentration of contaminants

修复达标后土壤中所残留的目标污染物浓度以及其他非目标污染物浓度。

3.10

地下水水位 underground water level

指地下水相对于基准面的高程，单位为厘米（cm）。

3.11

棕地 brownfield

指城市中曾经利用过的、可能受到一定程度污染，经清理后具有重复使用开发可能的土地，主要是指城镇建设区域内为功能更新而被再次开发的建设用地，含园林绿化用城镇搬迁地。

3.12

土壤改良 soil amelioration

针对土壤的不良性状和障碍因素，采取物理或化学、生物措施，来改善土壤性状，提高土壤肥力的过程。

4 总体要求与工作程序

4.1 总体要求

4.1.1 评估启动条件

修复后土壤绿化土再利用过程中对环境、人和动物的安全影响应符合 GB55014 的总体要求，修复后土壤进行原址或异地绿化土再利用之前，应根据本文件要求开展再利用环境风险评估。

4.1.2 评估总体原则

修复后土壤绿化土再利用环境风险评估应坚持分类分级实施，突出对绿化土再利用情景的环境风险

系统识别与管控；应坚持风险评估、过程管控和长期监测相结合，确保绿化土再利用区的环境安全。

4.1.3 评估情景选择

应根据修复后土壤绿化土再利用的具体类型开展环境风险评估情景的选择。修复后土壤绿化种植土再利用应开展人体健康风险评估、地下水环境风险评估和植物生态风险评估。修复后土壤绿化下填土再利用应开展人体健康风险评估和地下水环境风险评估。

4.2 工作程序

修复后土壤绿化土再利用环境风险评估工作程序见图 1，主要包括再利用生态环境调查、再利用环境风险筛选及再利用环境风险评估三个阶段。

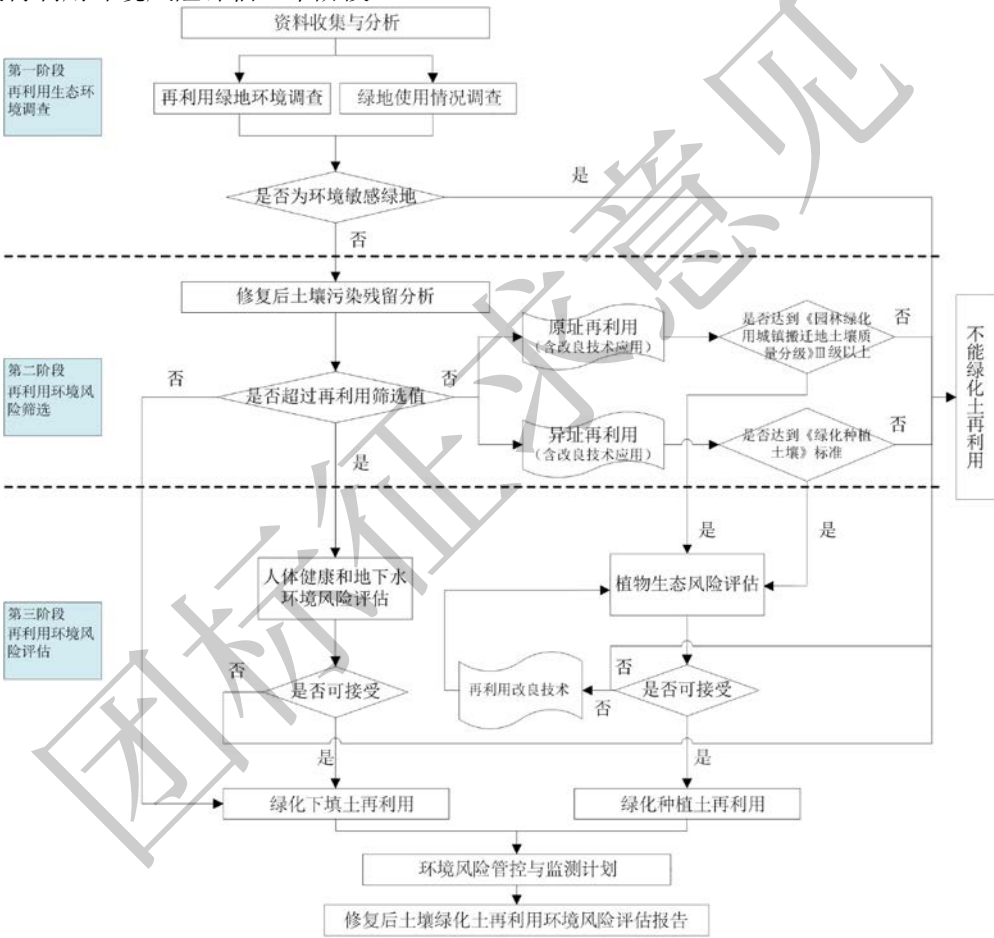


图 1 修复后土壤绿化土再利用环境风险评估工作程序

5 再利用生态环境调查

5.1 资料收集与分析

5.1.1 再利用绿地

收集修复后土壤绿化土再利用所在绿地相关资料，结合环境与使用情况调查，分析再利用的影响、

风险与响应策略，主要包括：

- a) 绿地土地利用现状图、规划图、土壤类型分布图；
- b) 绿地土壤环境背景值资料；
- c) 气象水文资料，包括多年降雨量、蒸发量、气温及暴雨等，地下水水位、水质、保护等级等，以及周边河流、水库、湖泊等地表水体的分布、径流量、水位及动态变化等资料；
- d) 工程地质资料，绿地所在区域地质情况、地勘报告等；
- e) 绿地所在区域环境保护规划等与土壤环境质量相关的其他资料、周边地块土地利用现状及规划资料，以及所在区域的自然和社会信息资料等。

5.1.2 修复后土壤

收集拟再利用修复后土壤的修复前后及过程资料，分析修复后土壤的结构、功能、环境变化特征，主要包括：

- a) 污染修复土壤来源场地情况（用地性质、场地调查报告、风险评估报告、修复方案等资料）；
- b) 采用修复技术情况（工艺、工况、修复药剂、助剂等）、修复后土壤抽样检测报告等；
- c) 修复后土壤的机械组成、养分、有机质、CEC、盐分、pH 等。

5.2 再利用绿地环境调查

5.2.1 环境敏感类型调查

调查再利用绿地及周边环境条件类型、数量和分布，明确再利用绿地环境敏感类型，修复后土壤不应在环境敏感绿地再利用。

5.2.2 绿地环境现状调查

详细调查再利用绿地的环境现状，主要包括土壤、植被和地下水方面。

5.2.2.1 土壤现状

对修复后土壤绿化土再利用所在绿地土壤条件开展系统调查，主要包括：

- a) 理化特性调查，主要包括成土母质（成土母岩和成土母岩类型）、土壤组成（有机质、N、P、K 以及主要微量元素含量）、土壤特性（土壤质地、结构、pH 值和 Eh 值，土壤代换量及盐基饱和度等）；
- b) 土壤环境调查，调查的布点采样应符合 HJ25.1 中第二阶段土壤污染状况调查的规定。土壤样品分析项目重点应为超过土壤再利用筛选值的污染物。

5.2.2.2 植被现状

对修复后土壤绿化土再利用所在绿地植被现状开展系统调查，主要包括：

- a) 各植物种类、株（丛）数、高度、多度、盖度等群落特征，统计群落类型、分布情况；
- b) 各类乔木、灌木、草本植物长势情况，各群落类型土壤植物根系分布情况。

5.2.2.3 地下水现状

对修复后土壤绿化土再利用区易受污染的第一层连续含水层进行现状调查，要求如下：

- a)地下水现状调查的布点采样应符合 HJ164 的要求。地下水调查可利用再利用区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，应根据实际情况增加监测点数量；
- b)地下水样品分析项目为地下水质量常规指标以及超过再利用土壤筛选值的污染物。

5.3 绿地使用情况调查

以座谈、问卷、现场抽样等形式，调查绿地使用者、管理者、相关方对绿地的使用意愿、方式和环境需求，明确敏感目标人群空间分布、时间规律。

6 再利用环境风险筛选

6.1 修复后土壤污染物残留分析

拟用于绿化土的修复后土壤污染物残留分析要求如下：

- a)土壤样品分析项目为修复方案中确定的目标污染物，检测结果应参考修复后土壤出场调查报告中的目标污染物修复值或修复方案的目标值，分析方法应按 GB36600 规定的土壤污染物分析方法执行；
- b)原址再利用的修复后土壤，宜利用土壤修复过程中相关效果评估数据开展污染物残留分析，当结果不足以支撑再利用风险筛选判定时，再开展调查取样。异址再利用的修复后土壤，应开展采样分析；
- c)采用系统布点法设置采样点，每个采样单元（每个样品代表的土方量）不应超过 500m³，再利用土壤残留污染物采样点数量按表 1 执行。重金属和半挥发性有机物可在采样单元内土壤混合采样，采样方法应按 HJ 25.2 执行；

表 1 再利用土壤残留污染物采样点数量

堆体体积 m³	<100	100～300	300～500	500～1000	每增加 500
采样单元数量 个	1	2	3	4	增加 1

- d) 土壤污染物残留分析应在单个修复范围或批次内进行。

6.2 绿化土再利用环境风险筛选

按附录 A 的再利用筛选值对绿化土再利用的修复后土壤进行环境风险筛选，修复后土壤绿化土再利用判断过程见图 2，具体内容如下：

- a)若土壤中污染物含量低于一级再利用筛选值，可在公园绿地、居住/公服、工/商业、道路/设施用地等附属绿地、郊野公园等区域绿地及棕地类型用地开展绿化土再利用；再利用为绿化种植土壤应开展植物生态风险评估；
- b)若土壤中污染物含量高于一级再利用筛选值且低于二级再利用筛选值，可在高精尖工业、大型公共商业设施以外的工/商业、道路/设施用地等附属绿地、郊野公园等区域绿地及棕地类型用地开展绿化土再利用，再利用为绿化种植土壤应开展植物生态风险评估；在公园绿地、居住/公服附属绿地绿化土再利用时应进行风险评估；
- c)若土壤中污染物含量高于二级再利用筛选值且低于三级再利用筛选值，各类城市绿地进行绿化土

再利用时均应进行风险评估；用于棕地绿化种植土再利用时，应开展植物生态风险评估；

d)若土壤中污染物含量高于三级再利用筛选值，除园林绿化用城镇搬迁地情景外，各类城市绿地中不应绿化土再利用；用于棕地（含园林绿化用城镇搬迁地）绿化下填土再利用时应进行风险评估；

e)有异味的土壤不应在居住区、学校、幼儿园、医院、养老场所等区域再利用，其他情景再利用时应满足相关的空气质量标准要求。



图 2 修复后土壤绿化土再利用判断过程

7 再利用改良技术要点

7.1 一般要求

7.1.1 修复后土壤绿化种植土再利用时宜根据不同修复技术来源采取相应的改良措施，降低绿化土再利用过程中的人体健康、地下水环境和植物生长的综合风险。

7.1.2 修复后土壤绿化种植土经改良后，应符合 CJ/T340-2016 中 4.1 一般要求，4.2 的通用要求、土壤肥力相关要求及障碍因子指标。

7.2 改良措施

7.2.1 修复后土壤污染物残留浓度达到土壤再利用筛选值要求，受修复技术、工艺影响，仍存在物理结构、理化性质、生态功能等方面衍生问题时（表 2），绿化土再利用过程中可实施针对性的改良措施。

a)土壤肥力改良，宜有机、无机肥料配施，以有机肥为主。鼓励使用控释、缓释肥料、液体肥料等利用率高的新型肥料和新技术；

b)微生物活性改良，可施用土壤微生物改良剂，补充土壤有益微生物；

c)砾砂质地改良，可采用拌土措施，土壤与改良剂的体积比例根据砾砂含量确定；

d)偏酸土壤改良，土壤 pH 值小于 6.5 时，可增施中性或者偏碱性有机改良剂缓解酸害，可配施生石灰调酸；

e)盐碱土壤改良，土壤 pH 值大于 8 或土壤含盐量大于 2g/kg 时，宜按照 CJJ/T283 的规定实施改良。

表 2 修复技术与修复后土壤衍生问题

类别	修复技术	污染物类型	修复后土壤衍生问题					
			有机质含量降低	微生物活性降低	砾砂质地	pH 降低	pH 升高	盐化
化学修复	淋洗修复	重金属和有机污染	●	●	●	●	●	-
	化学氧化/还原修复		●	●	-	●	●	●
物理修复	热脱附修复	有机污染	●	●	-	-	●	-
	固化/稳定化修复	重金属污染	●	●	-	●	●	-

7.2.2 针对风险评估阶段中未达到植物生态风险评估效果的修复后土壤，采用土壤改良技术，进一步降低污染物浓度，提高土壤再利用环境风险可接受性，主要包括重金属污染土壤改良和有机污染土壤改良。

8 再利用环境风险评估

8.1 人体健康风险评估

- 8.1.1 根据绿化土再利用绿地类型，将土壤再利用场地分为敏感用地和非敏感用地 2 种暴露情景：
- a)敏感用地包括公园绿地、居住/公服附属绿地、高精尖工业/大型公共商业设施附属绿地、郊野公园等区域绿地；
 - b)非敏感用地包括除高精尖工业/大型公共商业设施外的工/商业、道路/设施用地等附属绿地，以及防护绿地。
- 8.1.2 人体健康风险评估按照 HJ25.3 的规定执行。土壤作为绿化土再利用时，即使有表层覆土，也应包括直接摄入、皮肤接触和呼吸吸入土壤尘等直接接触途径。
- 8.1.3 计算修复后土壤单一污染物致癌风险低于 10^{-6} 且非致癌危害商小于 1，即可认为修复后土壤在该再利用区的人体健康风险处于可接受范围，可在相关的风险管控措施下安全再利用；当单一污染物致癌风险高于 10^{-6} 或非致癌危害商大于 1 时，不应绿化土再利用。

8.2 地下水环境风险评估

- 8.2.1 土壤再利用过程中对地下水的环境风险评估采用污染物迁移进入地下水的淋溶模型，主要包括污染物的解吸、迁移转化和混合稀释三个子过程：
- a)污染物的解吸，即再利用土壤中污染物解吸至土壤孔隙水中；
 - b)污染物的迁移转化，在降雨、灌溉情境下土壤孔隙水中污染物伴随水文过程向下迁移，并发生对流、弥散、吸附解吸和生物降解等一系列迁移转化，到达地下含水层水面处；
 - c)污染物的混合稀释，即土壤孔隙水中污染物进入地下水后，被地下水混合稀释。
- 修复后土壤绿化土再利用区底部设置隔水层时，只分析解吸过程。
- 8.2.2 根据淋溶模型和环境管理要求，确定解吸层次、迁移层次和混合层次的达标点，各层次达标点及评估方法见图 3 和表 3。

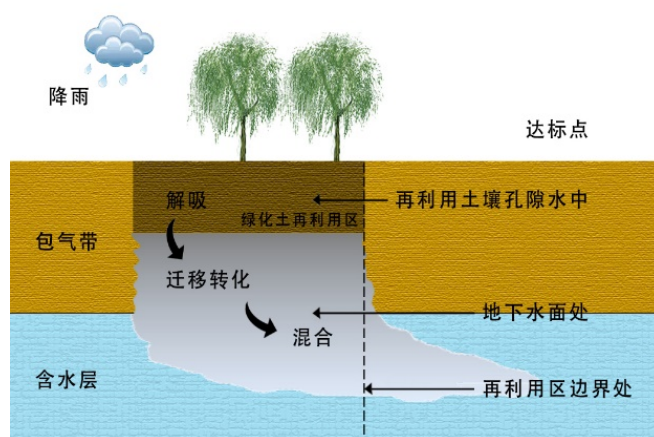


图3 各层次达标点示意

表 3 各层次达标点评估方法

评估层次	达标点	评估方法
解吸层次	再利用土壤孔隙水中	三相平衡模型（见附录 B.1）
迁移层次	地下水水面处	三相平衡模型+一维溶质运移模型（见附录 B.2）
混合层次	再利用区边界处	三相平衡模型+一维溶质运移模型+箱式混合模型（见附录 B.3）

8.2.3 计算再利用区边界处污染物浓度，未超过再利用区所在地的地下水保护等级浓度限值即为环境风险可接受，可在该区域绿化土再利用。地下水保护等级浓度限值按 GB/T14848 规定执行。

8.3 植物生态风险评估

8.3.1 土壤再利用过程对植物生态危害的典型概念模型主要内容包括以下两个方面:

a)受修复技术和工艺影响,再利用土壤理化性质较常规绿化种植土壤发生显著变化,土壤酸化/盐碱化、板结、容重增加、团聚性差、养分和有机质含量下降,对植物生长发育的生态支持风险提高;

b)修复措施造成修复后土壤微生物、动物的养分制造、物质分解、结构改良等作用降低,甚至灭失,污染物残留对土壤环境、植物生存生长形成潜在风险,土壤生态系统功能受损。

8.3.2 选取对植物生长具有生态支持功能的理化指标，以及表征土壤生态系统功能的指标因子，按照单一指标达标法开展修复后土壤再利用植物生态风险评估。

a)修复后土壤再利用植物生态风险评估按式(1)计算:

$$S_{re} = W_1 \sum SP_i W_2 + W_1 \sum SE_i W_2 \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

式中:

S_{rp} ——修复后土壤绿化土再利用植物生态风险评估值;

SP_i ——修复后土壤植物生长生态支持指标达标值, 无量纲;

 SE_i ——修复后土壤生态系统功能指标达标值, 无量纲;

W_l ——分类权重;

W_2 ——指标权重。

S大于或等于4.2时为修复后土壤绿化土再利用植物生态安全值。

b)修复后土壤绿化土再利用植物生态风险评估指标权重及计算标准值见表4。

c)修复后土壤绿化土再利用植物生态风险评估指标达标值参见附录 C, 满足达标值的指标项按表 4

计算标准值取值，不满足的取值为 0；修复后土壤植物生态风险评估指标检测分析方法参见附录 D。

表 4 修复后土壤绿化土再利用植物生态风险评估指标权重与计算标准值

指标类型	分类权重 (W_1)	指标项	指标权重 (W_2)	计算标准值
修复后土壤植物生长生态支持指标 (SP)	0.45	pH 值	0.05	10
		EC 值	0.05	10
		有机质	0.05	10
		密度	0.05	10
		通气孔隙度	0.05	10
		石砾含量	0.05	10
		水解性氮	0.05	10
		有效磷	0.05	10
		速效钾	0.05	10
		阳离子交换量	0.05	10
修复后土壤生态系统功能指标 (SE)	0.55	C/N	0.20	10
		微生物生物量碳	0.10	10
		种子发芽指数	0.20	10

注：C/N 为土壤有机碳与土壤全氮的比值。

8.4 环境风险可接受性评估

8.4.1 修复后土壤绿化土再利用环境风险可接受条件包括：

- a)评估结论表明土壤再利用不会对人体健康、地下水环境和植物生长造成危害；
- b)评估结论表明土壤再利用会对植物生长造成危害，经采取改良或进一步修复措施后，危害能够消除。

8.4.2 修复后土壤绿化土再利用环境风险不可接受条件包括：

- a)评估结论表明土壤再利用会对人体健康、地下水环境造成危害；
- b)评估结论表明土壤再利用会对植物生长造成危害，且经采取改良或进一步修复措施后，危害仍不能消除。

8.5 风险评估报告编制

风险评估报告应包括修复后土壤来源及概况、工作依据、再利用场地概况、再利用环境风险筛选、再利用环境风险评估、结论及建议等，编制提纲见附录 E。

9 环境风险管控与监测

9.1 风险管控要点

9.1.1 经环境风险评估为可接受的修复后土壤，绿化土再利用过程中还需满足的风险管控技术要点包括：

- a)绿化土再利用区宜远离河溪、湖池等水体分布区域，以及铺装广场等游人密集区域；
- b)绿化土再利用区应为非开敞型绿地，并设立警示说明标志，避免游人进入；
- c)绿化土再利用区植物种植宜选择抗污性强植物，不应种植食源植物，降低食物链环境风险；
- d)绿化土再利用区顶部不应直接暴露于环境，宜覆盖种植表土 10cm，底部应至少高于地下水最高水位 100cm，且底部宜铺设厚度不小于 50cm 的粘土阻隔层（压实度 90%）。
- e)穿过绿化土再利用区的各类给排水管道需加设套管。

9.1.2 绿化土再利用风险管控技术要点示意图 4。

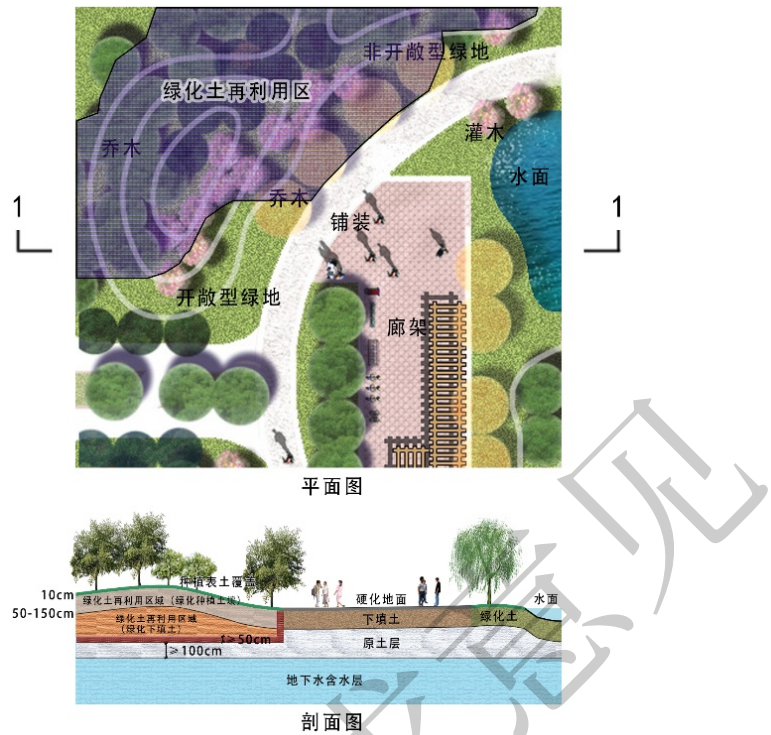


图 4 绿化土再利用风险管控技术要点示意

9.2 监测管理要点

- 9.2.1 制定绿化土再利用区植物生长与土壤环境监测方案，重点监测指示性植物生长情况、实生苗繁衍情况和土壤质量与环境情况。应长期跟踪监测土壤质量与环境情况，监测项目和频次按 HJ/T166 的规定执行，随着监测时间的延长，可根据结果适当降低监测频次或缩减监测项目。
- 9.2.2 制定绿化土再利用区地下水环境质量监测方案，包括监测井点布置、监测指标、监测频率等。绿化土再利用区域按三角形或四边形至少布置 3 个~4 个监测点位，应在地下水上游的一定距离设置对照监测井。长期监测的时长不少于 5 年，每半年监测 1 次，随着监测时间的延长，可根据结果适当降低监测频次或缩减监测项目。样品采集与分析应按 HJ25.2 执行。
- 9.2.3 制定绿化土再利用区绿地养护专门操作规程，采用节水灌溉、免耕施肥、园林废弃物单独收运处置等精细化养护措施，提高环境风险管控保障。

附录 A

(规范性)

修复后土壤绿化土再利用筛选值

表 A.1 规定了修复后土壤绿化土再利用筛选值。

表 A.1 修复后土壤绿化土再利用筛选值

单位为毫克每千克

序号	污染物	一级	二级	三级
无机污染物				
1	砷	30	35	45
2	镉	0.8	1.2	2.0
3	铬	200	250	400
4	铜	300	400	600
5	铅	300	450	530
6	汞	1.2	1.5	2.0
7	镍	80	150	220
8	锌	350	500	800
有机污染物				
9	苯	1	4	10
10	甲苯	1200	1200	1200
11	乙苯	7.2	28.0	72.0
12	三氯乙烯	0.7	2.8	7.0
13	氯苯	68	270	680
14	多氯联苯（总）	0.14	0.38	1.40
15	DDT（包括 o,p'-DDT, p,p'-DDT）	2.0	6.7	21.0

附录 B

(规范性)

达标点浓度预测法

B.1 三相平衡模型

再利用土壤孔隙水中污染物浓度可采用三相平衡模型进行预测，见式 (B.1) ~ (B.2)：

$$c_{w1} = c_s \times \frac{\rho_{b1}}{\theta_{w1} + H \times \theta_{a1} + \rho_{b1} \times K_d} \times 10^{-3} \dots\dots\dots (B.1)$$

$$K_d = K_{oc} \times f_{oc} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

c_{w1} ——再利用土壤孔隙水中污染物浓度，mg/cm³；

c_s ——再利用土壤中污染物总浓度，mg/kg；

ρ_{b1} ——再利用土壤干容重，g/cm³；

θ_{w1} ——再利用土壤中水的体积含量，无量纲；

θ_{a1} ——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，cm³(水)/g(土)；

K_{oc} ——污染物有机碳-水吸附系数，cm³(水)/g(碳)；

f_{oc} ——土壤有机碳含量，无量纲。

B.2 一维溶质运移模型

水流控制方程和溶质迁移模型如下：

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，见式 (B.3) ~ (B.7)：

$$\frac{\partial \theta_{w2}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h, z) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] - S \dots\dots\dots (B.3)$$

$$K(h, z) = K_s(z) K_r(h, z) \dots\dots\dots (B.4)$$

$$\text{初始条件 } h(z, 0) = h_0(z) \quad (t=0, z \geq 0) \dots\dots\dots (B.5)$$

$$\text{上边界条件 } -K(h, z) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) = q(t) \quad (t \geq 0, z=L) \dots\dots\dots (B.6)$$

$$\text{下边界条件 } \frac{\partial h}{\partial z} = 0 \quad (t \geq 0, z=0) \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：

θ_{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， $\text{cm}^3/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})$ ；

$K(h, z)$ ——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式 (B.8) ~ (B.14)：

$$\theta \frac{\partial c_w}{\partial t} + \rho_{b2} \frac{\partial s}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 c_w}{\partial z^2} - u \theta \frac{\partial c_w}{\partial z} - \mu_1 c_w \dots \dots \dots (B.8)$$

如果吸附作用为线性吸附，则

$$\rho_{b2} \frac{\partial s}{\partial t} = \rho_{b2} k_d \frac{\partial c_w}{\partial t} \dots \dots \dots (B.9)$$

式 (B.8) 可改写为

$$(1 + \frac{\rho_{b2} k_d}{\theta}) \frac{\partial c_w}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_w}{\partial z^2} - u \frac{\partial c_w}{\partial z} - \mu_1 c_w \dots \dots \dots (B.10)$$

或

$$R \frac{\partial c_w}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c_w}{\partial z^2} - u \frac{\partial c_w}{\partial z} - \mu_1 c_w \dots \dots \dots (B.11)$$

$$\text{初始条件 } c_w(z, 0) = c_{w0} \quad (t=0, z \geq 0) \dots \dots \dots (B.12)$$

$$\text{上边界条件 } \theta D \frac{\partial c_w}{\partial z} = q(t) c_0 \quad (t \geq 0, z=L) \dots \dots \dots (B.13)$$

$$\text{下边界条件 } \frac{\partial c_w}{\partial z} = 0 \quad (t \geq 0, z=0) \dots \dots \dots (B.14)$$

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} ）；

θ ——非饱和带土壤有效孔隙度，无量纲；

ρ_{b2} ——非饱和带土壤干容重， mg/cm^3 ；

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^2/s ；

u ——垂直方向非饱和带土壤孔隙水渗流流速， cm/s ；

μ_1 ——一阶生物降解系数， $1/\text{s}$ （可通过实验获得，不考虑生物降解作用时取值为0）；

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_0 ——边界上已知水通量中污染物浓度， mg/cm^3 （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吸求解，实际问题中多靠数值方法求解。

B.3 箱式混合模型

箱式混合模型见式（B.15）~（B.17）：

$$c_{w3} = \frac{c_{w2}}{\text{DF}} \dots\dots\dots (\text{B.15})$$

$$\text{DF} = 1 + \frac{U_{\text{gw}} \times \delta_{\text{gw}}}{I \times W_{\text{gw}}} \dots\dots\dots (\text{B.16})$$

$$\delta_{\text{gw}} = \min(B, 0.10583 \times W_{\text{gw}} + B \times (1 + \exp(\frac{-W_{\text{gw}} \times I}{U_{\text{gw}} \times B}))) \dots\dots\dots (\text{B.17})$$

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/a ；

δ_{gw} ——地下水混合层厚度， cm ；

W_{gw} ——平行于地下水流向的污染土壤长度， cm ；

I ——土壤中水的入渗率， cm/a ；

B ——含水层厚度， cm 。

附录 C

(规范性)

修复后土壤绿化土再利用植物生态风险评估指标达标值

C.1 修复后土壤植物生长生态支持指标达标值见表 C.1。

表 C.1 修复后土壤植物生长生态支持指标达标值

项目	pH 值	EC 值 mS/cm	有机质 g/kg	密度 mg/m ³	通气孔隙度 %	石砾含量 %	水解性氮 mg/kg	有效磷 mg/kg	速效钾 mg/kg	阳离子交换量 cmol (+)/kg
异址绿化土再利用	5.0~8.3	0.15~0.90	12.0~80.0	≤1.35	5~25	≤20	40~200	5~60	60~300	≥10
原址绿化土再利用	4.5~8.5	0.03~1.00	2.5~55.5	≤1.60	≥3	≤30	10~385	5~60	50~400	≥3

C.2 修复后土壤生态系统功能指标达标值见表 C.2。

表 C.2 修复后土壤生态系统功能指标达标值

项目	C/N	微生物生物量碳 mg/kg	种子发芽指数 %
异址绿化土再利用	10~20	>50	≥80
原址绿化土再利用	10~30	>25	≥70

附录 D

(规范性)

修复后土壤植物生态风险评估指标检测分析方法

修复后土壤植物生态风险评估指标检测分析方法见表D. 1。

表 D. 1 修复后土壤植物生态风险评估指标检测分析方法

序号	项 目	分 析 方 法	方 法 来 源
1	pH	电位法（水土体积比 2.5: 1）	LY/T1239
2	EC 值	电导法（水土质量比 5: 1）	LY/T1251
3	有机质	重铬酸钾氧化-外加热法	LY/T1237
4	密度	环刀法	LY/T1215
5	通气孔隙度	环刀法	LY/T1215
6	石砾含量	筛分法	CJ/T340
7	水解性氮	碱解-扩散法	LY/T1228
8	有效磷	钼锑抗比色法	LY/T1232
9	速效钾	火焰光度法	LY/T1234
10	有机碳	重铬酸钾-硫酸消化法	LY/T1257
11	全氮	凯氏定氮法	LY/T1228
12	阳离子交换量	乙酸铵交换法（酸性和中性土壤） 氯化铵-乙酸铵交换法（酸性和中性土壤）	LY/T1243
13	微生物生物量 碳	重铬酸钾氧化法	GB/T39228
14	种子发芽指数	生物毒性法	CJ/T340

附录 E

(资料性)

修复后土壤绿化土再利用环境风险评估报告编制提纲

1 土壤来源及概况

简要概括修复后土壤来源及修复前污染情况、现状修复标准等基本信息，土壤修复时间、采用的修复技术、相关批复情况等。

2 工作依据

2.1 法律法规

2.2 标准规范

2.3 项目文件

3 再利用场地概况

3.1 再利用场地环境敏感评价

3.2 绿地环境现状

3.3 绿地使用情况

4 再利用环境风险筛选

4.1 修复后土壤环境质量调查

4.2 修复后土壤再利用条件分析

4.3 绿化土再利用环境风险筛选

4.4 再利用土壤改良措施

5 再利用环境风险评估

5.1 人体健康风险评估

5.2 地下水环境风险评估

5.3 植物生态风险评估

6 结论及建议

6.1 风险评估结论

6.2 环境监测监管建议