ICS 13.020.40
CCS Z00

T/CS

中 国 商 品 学 会 团 体 标 准

T/CS 476—2026

盾构土环境风险评价规范

Specification for environmental risk assessment of shield tunneling muck

2026－07－30 发布　　2026－07－30 实施

中国商品学会　　发 布

目　　次

前言 III
引言 IV
1　范围 1
2　规范性引用文件 1
3　术语和定义 1
4　总体要求 3
5　危害识别 4
5.1　一般规定 4
5.2　有害物质识别 4
5.3　采样检测 4
6　暴露评价 5
6.1　一般规定 5
6.2　健康暴露评价 5
6.3　生态暴露评价 5
7　危害表征 6
7.1　健康毒性评价 6
7.2　生态效应表征 6
8　风险表征 6
8.1　健康风险表征 6
8.2　生态风险表征 7
9　人工智能风险评价 7
9.1　一般规定 7
9.2　核心技术 7
9.3　数据准备与预处理 7
9.4　模型构建与训练 8
9.5　模型验证与性能评估 8
9.6　应用场景与技术要求 8
9.7　注意事项 9
10　盾构土处理工艺污染防治要求 9
10.1　一般规定 9
10.2　脱水处理 9
10.3　筛分处理 10
10.4　固化/稳定化处理 10
10.5　贮存管理 10
11　盾构土资源化利用污染防治要求 10
11.1　一般规定 10

11.2 路基材料利用 11
11.3 建材原料利用 11
11.4 绿化用土利用 11
11.5 回填材料利用 11
12 监测要求 11
12.1 一般规定 11
12.2 产品监测 12
12.3 环境监测 12
13 不确定性分析 12
14 环境风险基准 12
15 评价报告编制 13
附录A（资料性） 盾构土环境风险评价流程图 14
附录B（资料性） 盾构土特征污染物清单 15
附录C（资料性） 有害物质识别可参考文件及数据库 16
C.1 国内相关文件 16
C.2 国际相关数据库 16
附录D（规范性） 盾构土资源化产物常见暴露场景 17
附录E（资料性） 暴露量计算公式 18
附录F（资料性） 剂量-反应关系参数的估算方法 20
附录G（资料性） 健康风险表征方法 21
附录H（资料性） 生态风险表征方法 22
H.1 风险商（RQ）核心计算方法 22
H.2 不同环境介质的生态风险表征要求 22
H.3 多污染物联合生态风险评估 23
H.4 生态风险等级判定与管控要求 23
H.5 表征流程 24
附录I（资料性） 监测频次要求 25
附录J（资料性） 评价报告框架 26

前　言

本文件按照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。

请注意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。

本文件由苏州大学提出。

本文件由中国商品学会归口。

本文件起草单位：苏州大学、北京科技大学、中铁十五局集团有限公司、中交隧道工程局有限公司、中国科学院武汉岩土力学研究所、苏州市市政设施管理处、长沙理工大学、苏州科技大学、保利长大工程有限公司、中国路桥工程有限责任公司、无锡地铁建设有限责任公司、南京市测绘勘察研究院股份有限公司、苏州睿道智材信息科技有限公司、苏州新高城市发展有限公司。

本文件主要起草人：唐强、邢奕、黄昌富、赵洋、李江山、王昊、黄钰程、栾焕强、孙俊芳、洪晨、魏义青、蔡羚杰、李健、姜博、顾凡、曹诗玉、赵毅伟、刘璎琳、陈重军、吕化冰、徐一夫、周耘天、宋晓东、宗正阳、胡英俊、俞晓东、刘巍巍、冯哲源、田盎然、辛颜、沈伟、董可丽、郝晋序、李星、徐光伟、周晓峰、李雪刚、蔡业华、汤恒亮、鞠达、何平、陈宗思哲、吴晓君、杨银培、胡日明、陈晟、戈若愚、李逸飞、周俊、翁振雷、宋辞、曾超、许峰炜、马虹、张盛。

引　言

为贯彻《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》等法律法规，落实《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》要求，防治盾构土处理处置及资源化利用过程的环境污染，保障人体健康与生态安全，规范盾构土环境风险评价工作，制定本标准。

盾构土环境风险评价规范

1 范围

本文件规定了盾构土环境风险评价的术语和定义、总体要求、危害识别、暴露评价、危害表征、风险表征、处理工艺污染防治要求、资源化利用污染防治要求、监测要求、不确定性分析、环境风险基准及评价报告编制等内容。

本文件适用于盾构土处理处置和资源化利用前的环境风险评价，可作为盾构土资源化利用建设项目环境影响评价、工程设计、施工验收及运行管理的技术依据。

其他类型工程盾构土资源化产物作为产品、替代原料管理和使用前的环境风险评价可参照本文件执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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。

GBZ 2.1 工作场所有害因素职业接触限值 第1部分：化学有害因素

GB 5085.3 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别

GB 5085.6 危险废物鉴别标准 毒性物质含量鉴别

GB/T 6679 固体化工产品采样通则

GB/T 6680 液体化工产品采样通则

GB/T 14848 地下水质量标准

GB 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准

GB/T 27921 风险管理 风险评估技术

GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 876 儿童土壤摄入量调查技术规范 示踪元素法

HJ 877 暴露参数调查技术规范

HJ 1091 固体废物再生利用污染防治技术导则

SL/Z 467 生态风险评价导则

WS/T 777 化学物质危害评估导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

盾构土 shield tunneling muck

各类建（构）筑物、管网、地铁、隧道等工程施工中采用盾构施工工艺所产生的弃土，包括泥水平衡盾构施工产生的泥浆。

3.2

盾构土处理 treatment of shield tunneling muck

对盾构土进行收集、贮存、运输、预处理及处置的全过程。按处理场地的不同可分为现场处理和集中处理；按处理方式的不同可分为物理处理、化学处理和生物处理。

3.3

盾构土资源化利用 recycling of shield tunneling muck

将盾构土直接作为原料或替代材料利用，或者通过分离、脱水、固化等工艺处理后进行物质资源化利用的过程。主要包括用作路基材料、建材原料、绿化用土、回填材料等用途。

3.4

风险评价 risk assessment

对盾构土及其资源化产物中有害物质在特定暴露条件下，对人体健康和生态环境产生不良影响的可能性及其程度进行系统分析、计算或估计的过程，包括危害识别、暴露评价、危害表征和风险表征四个基本步骤。

3.5

危害识别 hazard identification

识别和确定盾构土中有害物质的种类、来源、赋存形态及其对人体健康和生态环境产生不良影响的类型、性质和程度的过程。

3.6

暴露评价 exposure assessment

确定有害物质的暴露场景、暴露途径、暴露频率和暴露周期，并估算或测定评价受体（含敏感人群）暴露量的过程。

3.7

暴露场景 exposure scenario

描述有害物质经由不同途径迁移转化并到达评价受体（含敏感人群）接触界面的假设性场景，包括暴露源特征、环境介质条件、受体活动模式等一系列用于评估和量化暴露发生的事实、推定和假设。

3.8

评价受体 receptor of assessment

暴露于有害物质并可能受到不良影响的对象，包括人群（职业人群、周边居民、敏感人群等）、生物物种、生态系统功能特征及特殊生境等。

3.9

危害表征 hazard characterization

对有害物质引起评价受体产生有害效应的固有毒性特征进行定性描述或定量分析的过程，主要通过建立剂量-反应关系来表征。

3.10

风险表征 risk characterization

综合危害识别、暴露评价和危害表征的结果，对有害物质引起评价受体产生健康风险或生态风险的可能性及其程度进行定量计算或定性判断，并进行不确定性分析的过程。

3.11

致癌风险 carcinogenic risk（CR）

人群在特定暴露条件下，因接触具有致癌效应的有害物质而诱发癌症的超额终生概率。

3.12

危害商 hazard quotient（HQ）

有害物质的实际暴露剂量与其参考剂量的比值，用于表征人体经单一途径暴露于单一有害物质所产生的非致癌风险水平。

3.13

预测无效应浓度 predicted no effect concentration（PNEC）

根据现有毒理学数据推导的、预期不会对评价受体产生不良效应的有害物质最高环境浓度。

3.14

特征污染物 characteristic pollutants

盾构土中具有代表性的、能够反映其污染特征的有害物质，包括源于原状地层的重金属元素和源于施工添加剂的有机污染物等。

3.15

不确定性 uncertainty

由于科学认知局限、评估方法固有缺陷、基础数据不完备、模型简化假设等因素，导致风险评价结果与实际情况之间存在的偏差程度。

3.16

人工智能辅助风险评价 AI-aided risk assessment

基于历史监测数据、数值模拟结果等构建智能模型，实现污染物浓度预测、风险动态评估及管控建议生成的过程。

3.17

长短期记忆网络 long short-term memory network

一种特殊的循环神经网络，通过门控机制捕捉长序列数据的时序依赖关系，适用于污染物浸出浓度等时间序列预测。

3.18

动态风险指数 Dynamic Risk Index

结合AI预测的污染物浓度时序数据与风险评价框架，反映风险随时间演变的量化指标；

3.19

耦合模型 Coupling Model

融合物理机理数值模拟（如 GeoStudio）与数据驱动模型（如 LSTM）的综合评价工具，兼具机理解释性和预测精准性。

4 总体要求

4.1 盾构土环境风险评价应遵循环境安全优先的原则，保障盾构土处理处置及资源化利用全过程的环境安全与人体健康。

4.2 开展风险评价前，应明确盾构土的来源地层特征、施工工艺类型、添加剂使用情况等基本信息，并采取相应的安全防护措施。

4.3 风险评价的数据和信息应根据盾构土处理处置及资源化利用的暴露场景，结合评价目的和类型，通过以下途径获取，并确保信息的真实性、可靠性及适用性：

——国内外权威数据库和文献资料；

——环境归趋模型预测和室内模拟试验；

——现场调查监测和工程实践数据。

4.4 开展风险评价时应全面识别盾构土中有害物质的来源、赋存形态、迁移转化规律和评价受体的潜在暴露途径。

4.5 盾构土资源化产物存在多种用途的，应针对不同用途分别建立暴露场景并开展评价。典型资源化用途包括：

a) 路基材料：用于道路基层、垫层填筑；
b) 建材原料：用于制砖、制陶粒、生产水泥等；
c) 绿化用土：用于园林绿化、土壤改良；
d) 回填材料：用于基坑回填、场地平整。

4.6 风险评价的区域范围应根据评价受体的分布状况、有害物质的迁移扩散特征及可能产生危害的空间范围等因素综合确定。若评价区域外存在需要特别关注的敏感受体，评价范围应延伸至相关区域。

4.7 盾构土环境风险评价需覆盖全生命周期各关键阶段，明确区分不同阶段的评价重点，具体要求如下：

a) 预处理阶段（脱水、筛分、固化/稳定化等）：评估预处理工艺对污染物的去除或固定效果，识别二次污染风险（如固化剂添加导致的化学污染、筛分过程的扬尘污染）；
b) 处置阶段（填埋等）：重点评价处置场地的防渗、渗滤液处理、气体收集等设施的环境安全性，预测长期运行过程中污染物迁移对地下水、土壤的潜在影响；
c) 资源化利用阶段：针对不同利用场景（路基、建材、绿化、回填等），评价产物中有害物质的释放风险、暴露途径及对受体的危害程度，明确利用过程的污染控制要求。

4.8 盾构土环境风险评价包括健康风险评价和生态风险评价两个方面。评价受体涉及人群的应开展健康风险评价；评价受体涉及生态系统及其组成要素的应开展生态风险评价。

4.9 盾构土资源化产物作为产品使用的，应符合 GB 34330 规定的相关产品质量标准要求，以及国家和地方污染控制标准或技术规范的要求。

4.10 当缺乏适用的污染控制标准或技术规范时，应以盾构土中的特征污染物为评价对象，综合考虑其在资源化过程中的迁移转化行为及产物用途，按以下步骤开展环境风险评价：

a) 开展环境风险定性评价，识别产物中的有害成分；
b) 确定环境保护目标，建立评价场景；
c) 构建污染物释放模型和环境介质迁移转化模型；
d) 开展环境风险定量评价，计算健康风险和生态风险；
e) 对于无法明确产品用途的情形，应依据最不利暴露条件开展保守评价。

4.11 盾构土环境风险评价流程见附录 A。

5 危害识别

5.1 一般规定

5.1.1 危害识别应系统辨识盾构土中可能存在的有害物质及其潜在危害效应，为后续暴露评价和危害表征提供基础。

5.1.2 危害识别应综合考虑以下因素：

a) 原状地层的地质背景和土壤环境质量状况；
b) 施工穿越区域的土地利用历史和潜在污染源分布；
c) 盾构施工工艺类型和盾构土改良剂使用情况；
d) 盾构土处理过程可能引入的二次污染物。

5.2 有害物质识别

5.2.1 盾构土中有害物质识别应重点关注以下类别：

a) 重金属类：铅（Pb）、镉（Cd）、铬（Cr）、汞（Hg）、砷（As）、铜（Cu）、锌（Zn）、镍（Ni）等，需同步明确重金属的化学形态（如可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态、残渣态），不同形态的迁移性和生物有效性差异显著，是风险评估的关键依据；
b) 有机污染物类：源于土壤改良剂的表面活性剂、高分子聚合物降解产物、发泡剂残留物、TPHs、PAHs、PAEs 等；
c) 其他有害物质：氨氮、硫化物、氰化物等，需明确其存在状态（溶解态、固态等）及环境稳定性。

5.2.2 有害物质识别可参考以下资料：

a) 盾构土及其处理产物的检测报告；
b) 施工企业的环境影响报告书、环境管理台账、生产工艺资料；
c) 盾构土改良剂的产品安全技术说明书（SDS）；
d) 资源化产物所替代原料或产品的质量标准；
e) 相关科学研究文献和技术报告。

5.2.3 盾构土特征污染物清单见附录 B。有害物质筛选可优先参考附录 C 中的文件和数据库；对于新发现的有害物质，应收集毒理学数据后进行危害判定。

5.3 采样检测

5.3.1 盾构土及其资源化产物的采样应符合以下要求：

a) 优先采用资源化产物同类产品或所替代原料相应标准中规定的采样方法；
b) 无相关标准时，固态样品参照 GB/T 6679、半固态及液态样品参照 GB/T 6680 执行；
c) 采样点位应具有代表性，能够反映盾构土的整体污染特征；不同施工阶段需在污染高风险区域加密采样：收集阶段聚焦掘进工作面、临时堆土区，每 500m^2布设 1 个采样点；贮存阶段在防渗层边缘、排水口周边加密至每 50m1 个点位；预处理阶段在各工艺进出料端各设 1 个点位，固化/稳定化工艺每批次额外增设 3 个点位；资源化利用阶段按场景在作业面每 500-1000m^2布设 2 个点位。

5.3.2 有害物质含量检测应符合以下要求：

a) 优先采用相应产品质量标准或替代原料标准规定的检测方法；

b） 无相应标准时，参照 GB 5085.3、GB 5085.6 规定的方法执行；
c） 尚无标准检测方法的有害物质，可参考国内外权威实验室机构认可的方法。

5.3.3 检测项目应涵盖附录 B 所列特征污染物，并可根据具体工程情况适当增加检测项目。

5.3.4 有害物质监测频次应满足附录 I 的要求。

6 暴露评价

6.1 一般规定

6.1.1 暴露评价应系统分析有害物质从盾构土向评价受体迁移的途径和过程，定量估算评价受体的暴露水平。

6.1.2 暴露评价的内容应包括：暴露场景构建、暴露途径识别、环境介质浓度估算、暴露参数确定、暴露量计算等。

6.1.3 开展暴露评价时，应根据盾构土资源化产物的用途分析可能的暴露场景，调查评价受体的分布位置、活动模式、暴露频率等信息。

6.1.4 暴露评价应涵盖资源化产物所有暴露场景的全部暴露途径。若某暴露途径涉及多种评价受体，应选择最敏感的受体开展评价。盾构土资源化产物典型用途及暴露场景见附录 D。

6.2 健康暴露评价

6.2.1 健康暴露评价应全面考虑以下暴露途径，除非有充分证据证明某途径不存在或风险可忽略：

6.2.2 直接暴露途径：经口摄入、呼吸吸入、皮肤接触；

6.2.3 间接暴露途径：通过土壤、地下水、地表水、大气等环境介质的暴露，以及通过食物链的暴露。

6.2.4 评价受体应根据暴露场景和暴露途径确定，通常包括：

a） 职业人群：直接从事盾构土处理和资源化作业的工人；
b） 周边居民：资源化产物使用场地附近的居民；
c） 敏感人群：儿童、孕妇、老年人及慢性病患者等。

6.2.5 职业人群应按成年人暴露参数评价健康风险；周边居民和间接暴露人群应分别针对普通人群和敏感人群进行评价。

6.2.6 暴露浓度可通过以下方式获取：

a） 直接监测土壤、地下水、空气、食品等介质中有害物质的浓度；
b） 基于有害物质的释放、迁移转化特征，选择适当的环境归趋模型进行预测。

6.2.7 环境归趋模型的选取宜按以下优先顺序：

a） 国内外政府部门或权威机构发布的标准模型或模型工具包；
b） 国内外权威出版物推荐的模型；
c） 经同行评审的学术文献中开发的模型。

6.2.8 暴露参数应按以下优先顺序选取：

a） 《中国人群暴露参数手册》推荐的参数值；
b） 国内外相关标准推荐的暴露参数；
c） 科技文献或权威机构发布的参数推荐值；
d） 依据 HJ 876 和 HJ 877 等技术规范自行调查获得的参数。

6.2.9 不同暴露途径的暴露量计算公式见附录 E。

6.3 生态暴露评价

6.3.1 生态暴露评价应根据环境敏感区分布、保护目标和评价目的，合理选择评价受体。评价受体的选择应遵循以下原则：

a） 与暴露场景的生态相关性；
b） 对有害物质的敏感性；
c） 与环境管理目标的相关性；
d） 数据的可获得性。

6.3.2 涉及濒危物种的，应确保暴露评价涵盖全部濒危物种的全部个体；对于其他物种，应确保评价

涵盖该类群 95%以上物种。

6.3.3 不同环境介质需识别的敏感生物包括：

a) 水环境：藻类、溞类、鱼类等水生生物；
b) 沉积物：摇蚊幼虫、寡毛类、水生植物等底栖生物；
c) 土壤环境：土壤微生物、蚯蚓、植物等土壤生物；
d) 陆生生态系统：鸟类、哺乳动物等脊椎动物。

6.3.4 生态暴露评价应描述不同评价受体对有害物质的暴露途径和暴露量，并参照 6.2.4 和 6.2.5 的方法获取环境介质中有害物质的浓度。

7 危害表征

7.1 健康毒性评价

7.1.1 健康毒性评价应收集有害物质的毒理学数据，建立剂量-反应关系，为健康风险表征提供毒性参数。

7.1.2 应收集的毒理学数据包括：

a) 急性毒性、亚慢性毒性、慢性毒性数据；
b) 皮肤腐蚀性、刺激性、致敏性数据；
c) 特异性靶器官毒性数据；
d) 生殖细胞致突变性、生殖发育毒性数据；
e) 致癌性分类及相关数据；
f) 流行病学数据、毒代动力学和毒效动力学数据。

7.1.3 致癌效应的剂量-反应关系参数包括：

——致癌斜率因子（SF）：用于经口摄入和皮肤接触途径；
——吸入单位风险（IUR）：用于呼吸吸入途径。

7.1.4 非致癌效应的剂量-反应关系参数包括：

——参考剂量（RfD）：用于经口摄入和皮肤接触途径；
——参考浓度（RfC）：用于呼吸吸入途径。

7.1.5 毒性参数应优先从附录 C 所列数据库获取。对于缺乏现成参数的有害物质，可依据附录 F 所述方法进行估算。

7.2 生态效应表征

7.2.1 生态效应表征应收集有害物质对不同评价受体（含敏感人群）的生态毒理学数据，推导预测无效应浓度（PNEC）。

7.2.2 应收集的生态毒理学数据包括：

a) 水生生物毒性数据：急性毒性（LC_{50}、EC_{50}等）、慢性毒性（NOEC、LOEC 等）；
b) 陆生生物毒性数据：土壤微生物（呼吸抑制率、酶活性等）、陆生植物（种子发芽率、根伸长抑制率、急性毒性阈值、慢性生长抑制浓度等）、陆生无脊椎动物（蚯蚓存活率、繁殖抑制率等）、陆生脊椎动物（急性毒性 LC_{50}、慢性生殖毒性、行为毒性、神经毒性等）；
c) 其他生态效应数据：生物富集系数（BCF）、生物降解性（好氧/厌氧降解率）、沉积物-水分配系数（Koc）等。

7.2.3 PNEC 推导应根据毒理学数据的充分程度选择适当方法：

a) 评估因子法：适用于数据有限的情形；
b) 物种敏感度分布法（SSD）：适用于数据充分的情形；
c) 相平衡分配法：适用于沉积物和土壤介质。

7.2.4 应分别推导有害物质对水环境、沉积物、土壤环境等不同介质中生物体的 PNEC 值。

8 风险表征

8.1 健康风险表征

8.1.1 健康风险表征应综合暴露评价和健康毒性评价结果，分别计算致癌风险和非致癌风险。
8.1.2 致癌风险计算方法：
a) 单一污染物单一途径致癌风险：CR = ADD × SF 或 CR = EC × IUR；
b) 单一污染物多途径致癌风险：对各途径风险求和；
c) 多污染物总致癌风险：对各污染物风险求和。
8.1.3 非致癌风险计算方法：
a) 单一污染物单一途径危害商：HQ = ADD / RfD 或 HQ = EC / RfC；
b) 多污染物多途径危害指数：HI = ΣHQ。
8.1.4 健康风险表征的详细计算方法见附录 G。

8.2 生态风险表征

8.2.1 生态风险表征应综合生态暴露评价和生态效应表征结果，采用风险商法计算生态风险。
8.2.2 生态风险商计算见公式（1）：

$$RQ = PEC / PNEC \quad \cdots\cdots (1)$$

式中：
RQ——风险商，无量纲；
PEC——预测环境浓度，mg/L或mg/kg；
PNEC——预测无效应浓度，mg/L或mg/kg。
8.2.3 多污染物生态风险可采用风险商加和法或联合毒性模型进行评估。
8.2.4 生态风险表征的详细方法见附录 H。

9 人工智能风险评价

9.1 一般规定

9.1.1 为提升盾构土环境风险评价的精准性、时效性和动态性，可采用人工智能技术辅助开展污染物浓度预测、动态风险评估及管控策略优化，本章节规定相关技术要求和应用流程。
9.1.2 人工智能辅助风险评价应遵循 “数据驱动 - 机理融合” 原则，结合盾构土污染物迁移的物理化学特性，确保模型预测结果的科学性和工程适用性。
9.1.3 本章节适用于盾构土处理处置及资源化利用全过程的环境风险动态评价，包括污染物浸出浓度预测、动态风险指数计算、风险等级跃迁预警及差异化管控策略制定。
9.1.4 人工智能模型的构建与应用应符合本标准中危害识别、暴露评价、风险表征等核心要求，模型参数选取、验证方法需参考附录 E、G、H 等相关技术规定。

9.2 核心技术

人工智能辅助风险评价核心技术包括长短期记忆网络（LSTM）、数值模拟 - 机器学习耦合模型等，优先用于多污染物协同预测、长期风险演化分析等场景。

9.3 数据准备与预处理

9.3.1 数据集应涵盖盾构土特征污染物（重金属、有机污染物等）的浸出浓度时序数据，数据来源包括实验室加速浸出实验、现场监测数据、数值模拟结果，需满足附录 B 所列特征污染物覆盖要求。
9.3.2 通过质量守恒检验确保数据的物理合理性，剔除异常值和缺失率超过 10% 的样本进行数据有效性验证。
9.3.3 采用 Min-Max 标准化方法进行数据标准化处理。将不同量级的污染物浓度映射至 [0,1] 区间，公式见公式（2）：

$$C_{norm} = \frac{C - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} \quad \cdots\cdots (1)$$

式中：
Cnorm ——标准化后的浓度；

C ——原始浓度；

Cmin ——重金属的最小值；

Cmax ——重金属的最大值。

注1：时间窗口确定：通过自相关函数分析确定最优时间窗口，优先选择污染物浓度相关性最强的时段（推荐 120 分钟内），确保捕捉污染物快速释放期的动态特征；

注2：数据集划分：按时间顺序划分为训练集（80%）、验证集（10%）、测试集（10%），避免数据泄露影响预测合理性。

9.3.4 数据增强可采用添加高斯噪声（σ=0.01）等方式，提高模型对噪声数据的鲁棒性，适用于监测数据稀缺的场景。

9.4 模型构建与训练

9.4.1 LSTM 模型架构应符合以下技术要求（参考表 9-1）：

a) 输入层：接收多时间步、多特征（至少涵盖 3 种特征污染物浓度）的输入张量；

b) 隐藏层：采用双层 LSTM 结构，神经元数量分别为 128 和 64，激活函数选用 tanh，Dropout 率设为 0.2 以防止过拟合；

c) 全连接层：设置 2 层全连接层，神经元数量分别为 32 和 16，激活函数选用 ReLU；

d) 输出层：神经元数量与预测污染物种类一致，采用线性激活函数输出浓度预测值。

表 1 LSTM 模型架构参数

层级	类型	神经元数量	激活函数
输入层	Input	-	-
LSTM 层 1	LSTM	128	tanh
LSTM 层 2	LSTM	64	tanh
全连接层 1	Dense	32	ReLU
全连接层 2	Dense	16	ReLU
输出层	Dense	N（污染物种类）	Linear

9.4.2 模型训练参数设置如下：

——优化器：优先选用 Adam 优化器，初始学习率为 0.001，采用余弦退火策略调整学习率；

——批次大小：32，训练轮次：200，设置早停机制（patience=20）监控验证集损失；

——损失函数：采用加权均方误差（Weighted MSE），权重系数根据污染物毒性确定；

——正则化措施：L2 正则化系数设为 1×10-4，梯度裁剪最大范数设为 1.0，防止梯度爆炸。

9.4.3 耦合模型构建应融合物理机理与数据驱动优势：

——采用数值模拟工具提供机理解释和参数支撑（如渗透系数、吸附系数）；

——以数值模拟结果补充训练数据，提升模型对复杂迁移过程的适配性；

——通过交叉验证实现两种方法的结果互验，提高预测可靠性。

9.5 模型验证与性能评估

9.5.1 模型验证应采用多维度评价指标，包括平均绝对误差（MAE）、均方根误差（RMSE）、决定系数（R^2）、平均绝对百分比误差（MAPE），具体要求如下：

——验证集 $R^2 \geq 0.99$，MAPE≤3%；

——单一污染物预测的 RMSE 应低于对应安全阈值的 5%；

——训练集与验证集的 R^2 差异≤0.005，避免模型过拟合或欠拟合。

9.5.2 模型不确定性分析应采用蒙特卡洛模拟方法，通过在输入中添加 ±5% 随机扰动，运行不少于 1000 次模拟，统计预测结果的 95% 置信区间，确保结果稳定性。

9.5.3 模型可迁移性验证：当应用于不同来源盾构土时，需补充不少于 30 组本地数据进行微调，确保迁移后的模型 $R^2 \geq 0.95$。

9.6 应用场景与技术要求

9.6.1 污染物浸出浓度预测：

——预测周期：短期（1 年内）、长期（10 年内），重点关注污染物达标时间节点；

——输出结果应包括浓度时序曲线、达标时间（参考 GB 3838 等标准阈值）、浓度衰减速率。

9.6.2 动态风险评估：

——基于预测浓度计算动态风险指数（D-ERI），权重系数采用 AHP - 熵权组合赋权法确定；

——风险等级跃迁预警：明确 V 级（极高风险）→IV 级→III 级→II 级→I 级的关键时间节点，为差异化管控提供依据；

——风险贡献源分析：动态识别不同阶段的主导污染物（初期重金属、后期有机污染物）。

9.6.3 管控策略优化：

——基于模型预测结果制定分阶段管控方案：施工期（0-0.5 年）每周监测 1 次，稳定期（0.5-2 年）每月监测 1 次，长期运营期（2 年后）每季度监测 1 次；

——敏感参数预警：针对初始浓度、吸附系数等敏感性指数≥0.7 的参数，提出源头控制措施；

——应急响应支持：当模型预测风险等级跃升至 III 级及以上时，自动触发强化管控建议（如增加固化剂掺量、加密监测频次）。

9.7 注意事项

9.7.1 数据质量是模型可靠性的核心保障，监测数据需符合附录 I 的频次和方法要求，数值模拟结果需通过实验数据验证（相对误差≤5%）。

9.7.2 模型应用需结合工程实际场景，不同资源化用途（路基材料、绿化用土等）应针对性调整输入参数和预测场景，参考附录 D 的暴露场景要求。

9.7.3 人工智能模型结果不得单独作为环境管理依据，需与本标准规定的风险评价流程结合，经专家评审后使用。

9.7.4 模型应定期更新，当盾构土来源、处理工艺发生变化或积累新的监测数据时，需重新训练模型并验证性能。

10 盾构土处理工艺污染防治要求

10.1 一般规定

10.1.1 盾构土处理作业前，应明确盾构土的物理化学特性，包括含水率、粒径分布、矿物组成、重金属含量、有机物含量等，并采取相应的安全防护措施。

10.1.2 具有物理化学危险特性的盾构土，应首先进行稳定化预处理。

10.1.3 应根据盾构土的特性设置必要的防扬撒、防渗漏、防腐蚀设施，配备废气收集处理、废水处理、噪声控制等污染防治设施。

10.1.4 产生粉尘和有毒有害气体的作业区应采取密闭和收集措施，作业区空气中粉尘和有害气体浓度应满足 GBZ 2.1 的要求。

10.1.5 处理过程产生的废气排放应满足 GB 16297 的要求，特征污染物排放应满足环境影响评价批复要求。

10.1.6 周界恶臭污染物浓度应符合 GB 14554 的要求。

10.1.7 处理过程产生的废水应优先循环利用；排放时应满足 GB 8978 或地方排放标准的要求。

10.1.8 设备运行时厂界噪声应符合 GB 12348 的要求，作业场所噪声应符合 GBZ 2.2 的要求。

10.1.9 处理过程产生的二次固体废物应按照其管理属性分类处置，危险废物的贮存和处置应符合 GB 18597 和 HJ 2042 的要求。

10.2 脱水处理

10.2.1 盾构土脱水是采用机械或化学方法降低盾构土含水率的处理过程，适用于泥水盾构产生的高含水率泥浆。

10.2.2 脱水处理工艺包括重力沉淀、机械脱水（板框压滤、带式压滤、离心脱水等）和化学调理脱水等。

10.2.3 脱水处理应符合以下要求：

a) 应根据盾构土的粒径分布和含水率特征选择适宜的脱水工艺；

b) 使用絮凝剂时应选择环境友好型产品，控制添加量；

c） 脱水设备应具备防腐蚀、耐磨损性能。

10.2.4 脱水产生的滤液应收集处理，不得直接外排。处理后的水质应满足循环利用或排放标准要求。

10.3 筛分处理

10.3.1 盾构土筛分是将盾构土中不同粒径组分进行分离的处理过程。

10.3.2 筛分设备应加设防护罩或密封装置，防止粉尘逸散。

10.3.3 筛分作业区应设置喷淋抑尘或负压收尘系统。

10.3.4 筛分后的各粒径组分应分类堆存和利用。

10.4 固化/稳定化处理

10.4.1 盾构土固化/稳定化是通过添加固化剂使盾构土固结硬化或使有害成分转化为低溶解性、低迁移性形态的处理过程。

10.4.2 固化/稳定化处理适用于含水率较高或重金属含量超标的盾构土。

10.4.3 固化/稳定化处理应符合以下要求：

a） 应根据盾构土特性选择适宜的固化剂种类和配比；

b） 固化剂应优先选用水泥、石灰、粉煤灰等常规材料；

c） 固化处理设备应密闭作业，防止粉尘飞扬；

d） 固化产物应进行强度和浸出毒性检测。

10.4.4 不同固化剂处理效果对比见表 2。

表 2 不同固化剂处理效果对比

固化剂类型	重金属去除率（%）	固化产物抗压强度（MPa）	适用盾构土类型
普通硅酸盐水泥	60~80	1.0~2.5	重金属污染盾构土
石灰+粉煤灰（1:2）	50~70	0.5~1.5	低浓度重金属污染盾构土、高含水率盾构土
有机螯合剂	85~95	0.3~0.8	高浓度重金属污染盾构土（如六价铬、汞）
矿渣粉+水泥（1:1）	70~90	1.5~3.0	重金属+有机物复合污染盾构土

10.4.5 固化/稳定化施工质量控制要点：

a） 配料控制：严格按最佳配比投料，搅拌均匀，搅拌时间不少于 5 min

b） 养护控制：标准养护温度(20±2)℃，湿度≥95%，养护时间不少于 7 d

c） 现场监测：施工过程中实时监测固化体的含水率、温度，及时调整施工参数；

d） 抽样检测：每 1000m³ 固化产物抽样 1 次，检测抗压强度和浸出毒性。

10.5 贮存管理

10.5.1 盾构土临时贮存场地应满足以下要求：

a） 场地应进行防渗处理，防渗性能应满足相关标准要求；

b） 应设置雨水导排系统和渗滤液收集系统；

c） 应设置围挡和防扬撒覆盖措施；

d） 堆存高度和边坡坡度应满足稳定性要求。

10.5.2 不同来源或不同污染程度的盾构土应分区贮存，并设置明显标识。

10.5.3 贮存期限原则上不应超过一年。确需延长的，应采取加强管理措施并报告主管部门。

11 盾构土资源化利用污染防治要求

11.1 一般规定

11.1.1 盾构土资源化利用设施应配备必要的废气收集处理、废水处理、噪声控制、粉尘治理等污染防治装置。

11.1.2 资源化利用过程中的各工艺单元应按照 HJ 1091 相应要求执行污染防治措施。

11.1.3 资源化产物中有害物质含量应满足相关产品质量标准和环境保护要求。

11.2 路基材料利用

11.2.1 盾构土用作路基材料时，应满足道路工程相关技术标准对填料的要求。

11.2.2 污染防治要求：

a) 应进行重金属含量和浸出毒性检测，确保满足 GB 36600 第二类用地筛选值要求；
b) 施工过程应采取洒水抑尘等措施，控制扬尘污染；
c) 路基表面应设置不透水面层，减少雨水渗透；
d) 应设置地下水监测井，定期监测路基区域地下水质量。

11.2.3 路基施工污染控制流程如下：

a) 盾构土预处理：筛分（去除粒径＞40mm 颗粒）→ 固化 / 稳定化（重金属超标时）；
b) 摊铺作业：分层摊铺（厚度 20 cm~30cm），同步洒水抑尘（洒水强度 2 L/m²~3L/m²）；
c) 压实作业：采用振动压路机压实，压实度≥95%，避免扬尘扩散；
d) 防渗处理：路基表面铺设沥青或混凝土面层，边缘设置防渗沟；
e) 后期监测：设置地下水监测井，每季度监测 1 次，连续监测 3 年。

11.2.4 路基材料常见质量问题及解决方法见表 3。

表 3 路基材料常见质量问题及解决方法

质量问题	原因分析	解决方法
压实度不达标	盾构土含水率过高或过低，颗粒级配不合理。	调整含水率至最佳范围（12%~15%），掺加适量河沙优化级配。
重金属浸出超标	原状盾构土重金属含量高，未进行固化处理。	采用水泥+螯合剂复合固化，固化剂掺量15%~20%。
路基沉降	盾构土有机质含量过高，稳定性差。	去除有机质（焚烧或筛分），掺加 30%~40% 碎石增强稳定性。

11.3 建材原料利用

11.3.1 盾构土用作砖瓦、陶粒、轻骨料等建材原料时，应满足相应建材产品的原料技术要求。

11.3.2 利用盾构土生产建材的污染控制应满足 GB 30760 相关要求。

11.3.3 污染防治要求：

a) 原料预处理过程应采取密闭和除尘措施；
b) 烧结或煅烧过程应配备烟气净化设施，控制颗粒物、SO_2、NO_x等污染物排放；
c) 产品中有害物质浸出浓度应满足相关标准限值要求。

11.4 绿化用土利用

11.4.1 盾构土用作绿化用土时，应进行必要的预处理改良，使其理化性质满足植物生长要求。

11.4.2 污染防治要求：

a) 应进行重金属和有机污染物检测，含量应满足 GB 15618 农用地土壤污染风险管控标准要求；
b) 不应用于食用农产品种植区域；
c) 应控制盾构土中残留添加剂对植物和土壤生态系统的影响。

11.5 回填材料利用

11.5.1 盾构土用作回填材料时，应满足回填工程对材料的技术要求。

11.5.2 污染防治要求：

a) 回填区域应避开饮用水源保护区、自然保护区等环境敏感区；
b) 回填深度应考虑与地下水位的关系，防止污染地下水；
c) 回填完成后应进行表面覆盖和植被恢复。

12 监测要求

12.1 一般规定

12.1.1 盾构土处理和资源化利用单位应建立完善的环境监测制度，对污染物排放和环境质量开展定期监测。
12.1.2 监测项目应涵盖附录 B 所列特征污染物，并可根据具体情况增加监测项目。
12.1.3 监测方法应采用国家或行业标准方法；无标准方法的，可采用经过验证的分析方法。

12.2 产品监测

12.2.1 盾构土资源化产物应定期进行特征污染物含量和浸出毒性检测。
12.2.2 监测频次应满足以下要求：
a) 首次利用某批次盾构土时，产品监测频次不低于每天 1 次；
b) 连续一周监测结果均满足标准要求时，频次可调整为每周 1 次；
c) 连续两个月监测结果均满足标准要求时，频次可调整为每月 1 次；
d) 盾构土来源发生变化或利用中断超过半年时，应重新按首次利用频次执行。
12.2.3 详细监测频次要求见附录 I。

12.3 环境监测

12.3.1 盾构土处理和资源化利用单位应对设施周边的环境介质定期开展监测。
12.3.2 环境监测应包括：
a) 大气环境：厂界无组织排放浓度、周边环境空气质量；
b) 水环境：废水排放口、周边地表水体、地下水监测井；
c) 土壤环境：设施周边土壤中特征污染物含量。
12.3.3 地下水监测应符合 GB/T 14848 的要求，土壤监测应符合 GB 15618 或 GB 36600 的要求。
12.3.4 环境监测频次：大气和水环境不低于每季度 1 次，土壤环境不低于每年 1 次。

13 不确定性分析

13.1 风险评价过程在各阶段均可能存在不确定性，应系统识别不确定性来源，开展定性描述或定量分析。
13.2 不确定性的主要来源包括：
a) 危害识别阶段：有害物质识别不完全、检测数据代表性不足、检测机构资质等；
b) 暴露评价阶段：暴露场景假设的合理性、暴露途径识别的完整性、暴露参数的准确性、环境归趋模型的适用性等；
c) 危害表征阶段：毒性数据来源的可靠性、物种外推的不确定性、剂量-反应模型的选择等；
d) 风险表征阶段：风险计算方法的局限性、多污染物联合作用的复杂性等。
13.3 定量不确定性分析可采用以下方法：
——敏感性分析：识别对评价结果影响最大的关键参数；
——蒙特卡洛模拟：量化参数不确定性对风险估计的影响。
13.4 定量不确定性分析方法参照 GB/T 27921 执行，敏感性分析方法参照 HJ 875 执行。
13.5 评价报告应明确说明主要不确定性来源及其对评价结论的潜在影响。

14 环境风险基准

14.1 盾构土环境风险评价应采用以下风险可接受基准：
a) 致癌风险：职业人群可接受基准为 10^{-4}，周边居民（含敏感人群）可接受基准为 10^{-6}；
b) 非致癌风险：危害指数（HI）可接受基准为 1；
c) 生态风险：风险商（RQ）可接受基准为 1。
14.2 当计算的风险值超过可接受基准时，应采取以下措施：
a) 识别主要贡献污染物和关键暴露途径；
b) 采取工程控制措施降低暴露水平；
c) 限制资源化产物的使用范围或用途；

14.3 特定资源化产物的环境风险评价可根据实际暴露场景和敏感受体特征，确定更为严格的风险基准。

15 评价报告编制

15.1 盾构土环境风险评价应编制正式评价报告，报告应全面、系统、客观地反映评价过程和结论。

15.2 评价报告的主要内容应包括：

a) 项目概况：项目名称、地点、规模、盾构土来源及特征、资源化利用方式等基本信息；
b) 危害识别：有害物质清单、采样检测方案、检测结果及分析；
c) 暴露评价：暴露场景描述、评价受体（含敏感人群）识别、暴露途径分析、暴露参数选取、暴露量计算；
d) 危害表征：毒性参数来源、数据质量评价、剂量-反应关系确定；
e) 风险表征：健康风险和生态风险计算过程及结果；
f) 不确定性分析：不确定性来源识别、敏感性分析、定量不确定性分析；
g) 结论与建议：风险评价结论、风险管控建议、后续监测计划。

15.3 评价报告框架可参考附录J。

15.4 评价报告应由具备相应资质的技术人员编制，并经专家评审后作为环境管理的技术依据。

附 录 A
（资料性）
盾构土环境风险评价流程图

盾构土环境风险评价的一般流程主要包括危害识别、暴露评价、危害表征、风险表征和不确定性分析五个阶段。各阶段相互关联、循环迭代，共同构成完整的风险评价体系。

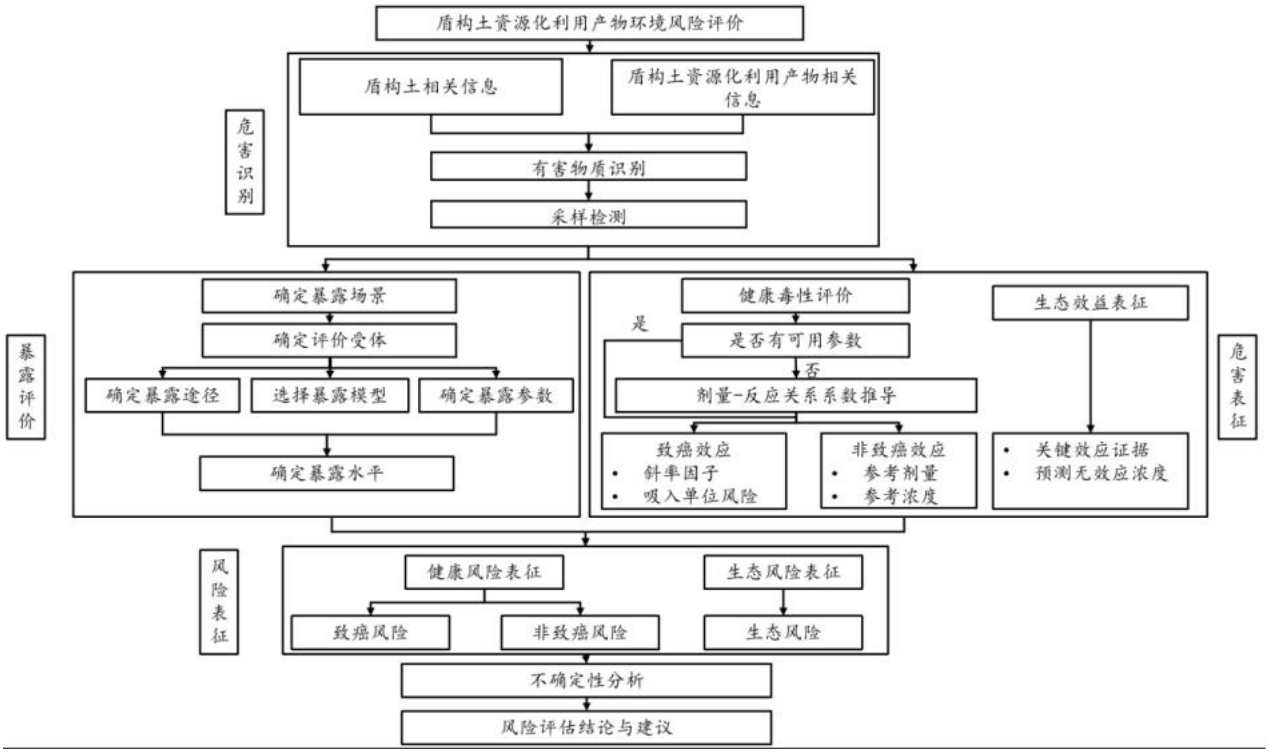


图 A.1 盾构土环境风险评价图

附 录 B
（资料性）
盾构土特征污染物清单

盾构土中应重点关注的特征污染物见表B.1。

表 B.1 盾构土中应重点关注的特征污染物

污染物类别	污染物名称	主要来源
重金属	铅（Pb）	原状地层背景、工业污染历史
	镉（Cd）	原状地层背景、农业面源污染
	铬（Cr）	原状地层背景、工业污染历史
	砷（As）	原状地层背景、农药残留
	铜（Cu）、锌（Zn）、镍（Ni）	原状地层背景、工业活动
有机污染物	表面活性剂	泡沫剂、分散剂等施工添加剂
	高分子聚合物	土壤调理剂、增稠剂等添加剂
其他	氨氮、硫化物	原状地层、施工添加剂

附 录 C
（资料性）
有害物质识别可参考文件及数据库

C.1 国内相关文件

国内相关文件包括以下内容：

a) 《国家危险废物名录》 ；
b) 《优先控制化学品名录》；
c) 《有毒有害大气污染物名录》；
d) 《有毒有害水污染物名录》；
e) 《重点管控新污染物清单》；
f) GB 36600 附录中的建设用地土壤污染风险筛选值和管制值。

C.2 国际相关数据库

国际相关数据库包括以下内容：

a) 美国环保署综合风险信息系统（US EPA IRIS）；
b) 美国毒物与疾病登记署毒理学概况数据库（ATSDR）；
c) 欧洲化学品管理局化学物质数据库（ECHA）；
d) 世界卫生组织国际化学品安全规划署数据库（WHO IPCS）；
e) 美国国家环境卫生科学研究所数据库（NIEHS）；
f) 美国环保署生态毒理学数据库（ECOTOX）。

附 录 D
（规范性）
盾构土资源化产物常见暴露场景

盾构土资源化产物的典型用途及对应的暴露场景见表D.1。

表 D.1 盾构土资源化产物常见暴露场景

用途类型	暴露场景	主要暴露途径	主要评价受体（含敏感人群）
路基材料	道路建设施工现场、道路运营期间	皮肤接触、呼吸吸入、地下水渗透	施工人员、周边居民
绿化用土	园林绿化施工、公共绿地使用	经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入	施工人员、游客、儿童
建材原料	建材生产加工、建筑施工	呼吸吸入、皮肤接触	生产工人、施工人员
回填材料	基坑回填作业、场地平整	地下水渗透、土壤迁移	施工人员、周边居民
填埋处置	填埋作业、封场后长期	地下水渗透、土壤迁移、气体释放	作业人员、周边居民、生态系统

附 录 E
（资料性）
暴露量计算公式

不同暴露途径的暴露量计算公式应根据具体情况选取。主要暴露途径的暴露量计算方法参见HJ 25.3附录C。

根据US EPA推荐的计算方法，不同暴露途径的平均日暴露剂量计算公式如下：

经口摄入暴露剂量计算见式（E.1）：

$$ADD_{ing} = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i \times IngR_i \times EF_i \times ED_i \times 10^{-6}}{BW \times AT_i} \quad \text{(E.1)}$$

式中：

ADD ——平均日暴露剂量，mg/(kg · d)；

C_i ——第 i 种有害物质浓度，mg/kg；

IngRi ——经口摄入量，mg/d；

EF_i ——暴露频率，d/a；

Ed_i ——暴露周期，a；

BW ——体重，kg；

AT_i ——平均暴露时间，d。

呼吸吸入暴露剂量计算见式（E.2）：

$$ADD_{inhale} = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i \times InhR_i \times EF_i \times ED_i \times 10^{-6}}{PEF_i \times BW \times AT_i} \quad \text{(E.2)}$$

式中：

ADD ——平均日暴露剂量，mg/(kg · d)；

Ci ——第i种有害物质浓度，mg/kg；

$IngR_i$ ——呼吸速率，mg/d；

EF_i ——暴露频率，d/a；

Edi ——暴露周期，a；

BW ——体重，kg；

AT_i ——平均暴露时间，d；

$InhR_i$ ——呼吸速率，m^3/d；

PEF_i ——颗粒物排放因子，m^3/kg。

皮肤接触暴露剂量计算见式（E.3）：

$$ADD_{dermal} = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i \times SA_i \times AF_i \times ABS_i \times EF_i \times ED_i \times 10^{-6}}{BW \times AT_i} \quad \text{(E.3)}$$

式中：

ADD ——平均日暴露剂量，mg/(kg · d)；

Ci ——第i种有害物质浓度，mg/kg；

$IngR_i$ ——皮肤接触面积，mg/d；

EF_i ——暴露频率，d/a；

Ed_i ——暴露周期，a；

BW ——体重，kg；

AT_i ——平均暴露时间，d；

$InhR_i$ ——呼吸速率，m^3/d；

PEF_i ——颗粒物排放因子，m^3/kg；
AF_i ——皮肤吸附因子，m^3/kg；
ABSi ——皮肤吸收系数，无量纲。
暴露参数取值见表E.1。

表 E.1 暴露参数取值

参数	定义	单位	儿童	成人
Ci	重金属浓度	mg/kg	实测值	实测值
IngR	经口摄入	mg/d	200	100
InhR	呼吸摄入	m^3/d	7.6	20
EF	接触频率	d/a	350	350
ED	暴露时间	a	6	24
BW	体重	kg	15.9	70
AT	平均时间	d	见注	见注
PEF	土壤粉尘扩散因子	$m^3 \cdot kg$	1.36×109	1.36×109
SA	皮肤接触面积	cm^2	2800	5700
AF	土壤与皮肤黏滞系数	mg / cm^2	0.2	0.07
ABS	皮肤吸收指数	-	0.001	0.001

注：平均作用时间（AT）对于非致癌效应取ED×365天，对于致癌效应取70×365=25550天。

附 录 F
（资料性）
剂量-反应关系参数的估算方法

当有害物质缺乏现成的剂量-反应关系参数时，可采用以下方法进行估算。详细估算方法参见WS/T 777。

重金属不同暴露途径的参考剂量（RfD）和斜率因子（SF）见表F.1。

表 F.1 重金属不同暴露途径的参考剂量（RfD）和斜率因子（SF）

RfD_i/mg·（kg·d）$^{-1}$			
	RfD_{ing}	RfD_{inh}	RfD_{der}
Cr	3×10^{-3}	6×10^{-5}	2.86×10^{-3}
Pb	3.50×10^{-3}	3.52×10^{-3}	5.25×10^{-4}
Ni	2×10^{-2}	5.40×10^{-3}	2.06×10^{-2}
Cd	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-6}	1.00×10^{-5}
Cu	4.00×10^{-2}	4.02×10^{-2}	1.20×10^{-2}
Zn	3×10^{-1}	4×10^{-2}	6×10^{-2}

附 录 G
（资料性）
健康风险表征方法

健康风险表征包括致癌风险和非致癌风险的计算。具体计算方法参见HJ 25.3附录D。

SF基于致癌动物实验数据，通过多种数学模型（如多阶段模型、Weibull模型等）拟合剂量-反应关系曲线获得。

表 G.1 SF 数据

SF_i / mg • （kg • d）$^{-1}$			
	SF_{ing}	SF_{inh}	SF_{der}
Cr	5.01×10^{-1}	4.20×10	2.00×10
Pb	8.5×10^{-3}	8.5×10^{-3}	4.20×10^{-2}
Ni	-	-	-
Cd	6.10	6.30	0.38
Cu	-	-	-
Zn	-	-	-

附 录 H
（资料性）
生态风险表征方法

生态风险表征的核心目的是综合生态暴露评价与生态效应表征结果，量化盾构土中有害物质对生态系统及组成要素的潜在危害程度，为生态风险管控提供科学依据。本附录基于 SL/Z 467《生态风险评价导则》，详细规定风险商（RQ）法的应用要求、计算逻辑、联合风险评估及风险判定规则。

H.1 风险商（RQ）核心计算方法

H.1.1 基本公式

生态风险商通过对比有害物质的预测环境浓度（PEC）与预测无效应浓度（PNEC）确定，核心公式如（H.1）：

$$RQ = \frac{PEC}{PNEC} \quad \text{(H.1)}$$

式中：

RQ —— 风险商，无量纲，反映有害物质对生态受体的潜在危害程度；

PEC —— 预测环境浓度（mg/L 或 mg/kg），即有害物质在评价介质（水、土壤、沉积物等）中实际或预测的浓度水平；

PNEC —— 预测无效应浓度（mg/L 或 mg/kg），即预期不会对评价受体产生不良生态效应的有害物质最高环境浓度。

H.1.2 参数确定要求

H.1.2.1 预测环境浓度（PEC）获取

PEC 应优先通过实际监测获取，监测方法需符合对应环境介质的国家或行业标准（如土壤监测符合 GB 15618/GB 36600、地下水监测符合 GB/T 14848）；若缺乏监测数据，可采用经验证的环境归趋模型（如土壤淋溶模型、水体扩散模型）进行预测，模型参数需结合评价区域的环境特征（如土壤质地、水文条件）校准。

H.1.2.2 预测无效应浓度（PNEC）推导

PNEC 推导需基于评价受体（含敏感人群）的生态毒理学数据，按以下优先顺序选择方法：

——物种敏感度分布法（SSD）：适用于获取至少 8 个不同营养级物种（如藻类、溞类、鱼类、蚯蚓、植物）的慢性毒性数据（NOEC/LOEC），通过拟合分布曲线计算 5% 危害浓度（HC_5），再除以评估因子（AF=2~5）得到 PNEC；

——评估因子法：适用于毒性数据有限（1~3 个物种）的场景，根据毒性数据类型确定评估因子（急性毒性数据 AF=1000，慢性毒性数据 AF=100，水生生物敏感物种 AF=5000）；

——相平衡分配法：适用于沉积物、土壤介质中的非极性有机污染物，通过污染物的辛醇 - 水分配系数（Kow）、有机碳吸附系数（Koc），结合水相 PNEC 推导土壤/沉积物 PNEC。

H.2 不同环境介质的生态风险表征要求

H.2.1 水环境（地表水 / 地下水）

评价受体（含敏感人群）：优先选择藻类（斜生栅藻）、溞类（大型溞）、鱼类（斑马鱼）等代表性水生生物；

PEC 取值：地表水取表层水体监测浓度，地下水取监测井中对应含水层浓度；

特殊要求：若评价区域存在饮用水源保护区，PNEC 需采用更严格的评估因子（AF 加倍），确保水生生态系统与饮用水安全协同保障。

H.2.2 土壤环境

评价受体（含敏感人群）：选择土壤微生物、蚯蚓（赤子爱胜蚓）、陆生植物（小麦 / 狗尾草）等土壤生物；

PEC 取值：取 0~20cm 表层土壤监测浓度（资源化利用场景需覆盖盾构土铺设深度）；

特殊要求：盾构土用作绿化用土或农业土壤改良时，需额外考虑植物吸收污染物后的食物链传递风险，PNEC 需结合植物富集系数调整。

H.2.3 沉积物环境

评价受体（含敏感人群）：摇蚊幼虫、寡毛类（颤蚓）、水生植物（芦苇）等底栖生物；

PEC 取值：沉积物干重中的污染物浓度，需扣除有机质吸附影响；

特殊要求：若沉积物周边存在鱼类产卵场、洄游通道，需提高监测频次，RQ 判定基准可收紧至 0.8。

H.3 多污染物联合生态风险评估

H.3.1 浓度加和模型（CA）

适用于作用机制相似的污染物（如同一类重金属、结构类似的有机污染物），联合风险商计算公式见（H.2）：

$$RQ_{total} = \sum_{i=1}^{n} RQ_i = \sum_{i=1}^{n} \frac{PEC_i}{PNEC_i} \quad \text{(H.2)}$$

式中：

RQi —— 单一污染物的风险商，n为联合作用的污染物种类数；

N ——污染物种类数。

H.3.2 独立作用模型（IA）

适用于作用机制不同、无协同 / 拮抗效应的污染物，联合风险商计算公式见（H.3）：

$$RQ_{total,\ IA} = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - RQ_i) \quad \text{(H.3)}$$

注：若某污染物 RQi ≥1，则直接判定联合风险不可接受。

H.3.3 模型选择原则

优先通过毒理学试验验证污染物作用机制，明确模型适用性；

若无试验数据，默认采用浓度加和模型（CA）进行保守评价；

联合风险商 RQtotal≥1时，需进一步识别贡献占比 ≥ 30% 的关键污染物，针对性采取管控措施。

H.4 生态风险等级判定与管控要求

生态风险等级判定与管控要求见表H.1。

表 H.1 生态风险等级判定与管控要求

风险商（RQ）	风险等级	生态效应描述	管控要求
RQ<0.1	低风险	无明显不良生态效应，评价受体（含敏感人群）生长繁殖正常	无需额外管控，按常规频次开展生态监测
0.1≤RQ<1	中风险	敏感生态受体可能出现轻微生长抑制，生态系统功能基本稳定	加强生态监测（如每季度监测生物多样性），优化污染防治措施（如强化盾构土固化 / 稳定化）

RQ≥1	高风险	多数评价受体(含敏感人群)出现明显中毒效应（如生长停滞、死亡），生态系统结构受损	立即暂停相关资源化利用 / 处置活动，切断污染途径（如防渗修复、污染物削减），开展生态修复(如种植耐污染植物、投放有益

H.5 表征流程

表征流程按以下方法操作：

a) 明确评价介质（水/土壤/沉积物）及对应的评价受体（含敏感人群）；
b) 获取 PEC（监测或模型预测）及 PNEC（按规定方法推导）；
c) 计算单一污染物风险商 RQi 及联合风险商 RQtotal
d) 对照风险等级判定标准，确定生态风险水平；
e) 针对高/中风险场景，提出针对性管控与修复措施。

附 录 I
（资料性）
监测频次要求

盾构土资源化产物监测频次要求见表I.1。

表 I.1 盾构土资源化产物监测频次要求

阶段	监测频次	调整条件
首次利用	不低于每天1次	—
稳定运行期（第1阶段）	不低于每周1次	连续一周结果达标
稳定运行期（第2阶段）	不低于每月1次	连续两个月结果达标
来源变化或中断恢复	重新按首次利用执行	来源变化或中断超半年

附 录 J
（资料性）
评价报告框架

盾构土环境风险评价报告宜包括以下章节：

1) 项目概况 1.1 项目基本信息 1.2 盾构土来源及特征 1.3 资源化利用方式；
2) 危害识别 2.1 有害物质清单 2.2 采样方案 2.3 检测方法与结果；
3) 暴露评价 3.1 暴露场景描述 3.2 评价受体（含敏感人群）识别 3.3 暴露途径分析 3.4 暴露参数选取 3.5 暴露量计算；
4) 危害表征 4.1 健康毒性评价 4.2 生态效应表征；
5) 风险表征 5.1 健康风险计算 5.2 生态风险计算 5.3 风险判定；
6) 不确定性分析 6.1 不确定性来源 6.2 敏感性分析；
7) 结论与建议 7.1 风险评价结论 7.2 风险管控建议；
8) 附件。