

团 体 标 准

T/CSES 159—2024

建设用 地土壤污染生态风险评估技术指南

Technical guidelines for ecological risk assessment of soil  
contamination of land for construction

2024-08-05 发布

2024-08-05 实施

中国环境科学学会 发布



## 目 次

前言 .....	II
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 工作原则和程序 .....	2
5 风险快速识别 .....	3
6 第一阶段评估 .....	4
7 第二阶段评估 .....	4
8 不确定性分析 .....	10
9 风险评估报告编制 .....	10
附录 A（资料性） 常用生态毒性数据库 .....	11
附录 B（资料性） 建设用地土壤污染生态风险评估方法示例 .....	12
附录 C（资料性） 建设用地土壤污染生态风险评估报告编制大纲 .....	24

## 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。

本文件由生态环境部环境规划院提出。

本文件由中国环境科学学会归口。

本文件起草单位：生态环境部环境规划院、天津大学、南开大学。

本文件主要起草人：於方、陈玖斌、张彤、齐霁、赵丹、吴畏达、孙倩、马瑞明、张文奇、袁玮、蔡虹明、姚义鸣、何晟、帅旺财、杨效鏊。

# 建设用地土壤污染生态风险评估技术指南

## 1 范围

本文件规定了建设用地土壤污染生态风险评估的工作原则和程序、风险快速识别、第一阶段评估、第二阶段评估、不确定性分析、风险评估报告编制等内容。

本文件适用于拟开发利用为工商业用地、住宅用地、公园绿地等建设用地土壤污染生态风险评估。

## 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。

- GB/T 31270.15 化学农药环境安全评价试验准则 第15部分：蚯蚓急性毒性试验
- GB/T 31270.16 化学农药环境安全评价试验准则 第16部分：土壤微生物毒性试验
- GB/T 31270.19 化学农药环境安全评价试验准则 第19部分：非靶标植物影响试验
- GB/T 39792.1 生态环境损害鉴定评估技术指南 环境要素 第1部分：土壤和地下水
- HJ 25.1—2019 建设用地土壤污染状况调查技术导则
- HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则
- HJ 710.1 生物多样性观测技术导则 陆生维管植物
- HJ 710.10 生物多样性观测技术导则 大中型土壤动物
- T/ACEF 087 建设用地土壤生态安全环境基准制定技术指南

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**土壤污染生态风险** ecological risk of soil contamination

土壤介质中的污染物危害动物、植物、微生物和其他生态系统过程与功能的概率或水平与程度。

### 3.2

**土壤污染生态风险评估** ecological risk assessment of soil contamination

应用定量的方法评估、预测土壤中各种污染物对生态系统可能产生的风险及其可接受程度的模式或方法。

### 3.3

**复合污染** combined contamination

人为因素导致多种污染物赋存于陆地表层土壤，且这些污染物都能引起土壤化学、物理、生物等方面特性的改变，影响土壤功能和有效利用，破坏生态环境。

### 3.4

**生态受体** ecological receptor

场地及周边环境中可能受到土壤中污染物影响的生物类群。

3.5

**暴露途径 exposure route**

土壤中污染物迁移到达和暴露于生态受体的方式，包括直接暴露和摄入等。

3.6

**保护水平 protection level**

根据不同土地利用方式下土壤所提供的生态服务功能的重要性所确定的生态物种或生态过程保护的程

3.7

**不确定性分析 uncertainty analysis**

针对风险评估过程中由输入参数误差和模型本身不确定性所引起的模型模拟结果的不确定性进行定性或定量分析，包括风险贡献率分析和参数敏感性分析等。

3.8

**预测无效应浓度 predicted no effect concentration**

污染物不会对生物产生不可接受效应的最高环境浓度。

3.9

**毒性参考值 toxicity reference value**

生物每日摄入某种污染物的对健康无任何已知不良效应的最大量。

3.10

**毒性终点 toxicity endpoint**

毒性试验中，与对照组相比，污染物使受试生物发生变化的特征指标，包括死亡、生理、生化、代谢等。

3.11

**效应浓度 effective concentration**

在生物毒性试验中，对一定比例受试生物产生毒性效应的污染物浓度。

3.12

**评估因子 assessment factor**

表征根据毒性数据外推预测无效应浓度（3.8）的不确定性的常数。

## 4 工作原则和程序

### 4.1 工作原则

#### 4.1.1 合法合规原则

风险评估过程中相关调查、分析等工作遵守国家 and 地方有关法律、法规和技术规范。

#### 4.1.2 适用可行原则

充分结合建设用地土壤污染特征、生态受体特征等，考虑相关方法可行性和相关参数可获得性，选择适合可行的方法开展评估。

#### 4.1.3 独立客观原则

独立客观开展风险评估，不受利益相关方影响。

### 4.2 工作程序

建设用地土壤污染生态风险评估工作包括风险快速识别、第一阶段评估、第二阶段评估、不确定性分析和风险评估报告编制等环节，具体见图 1。

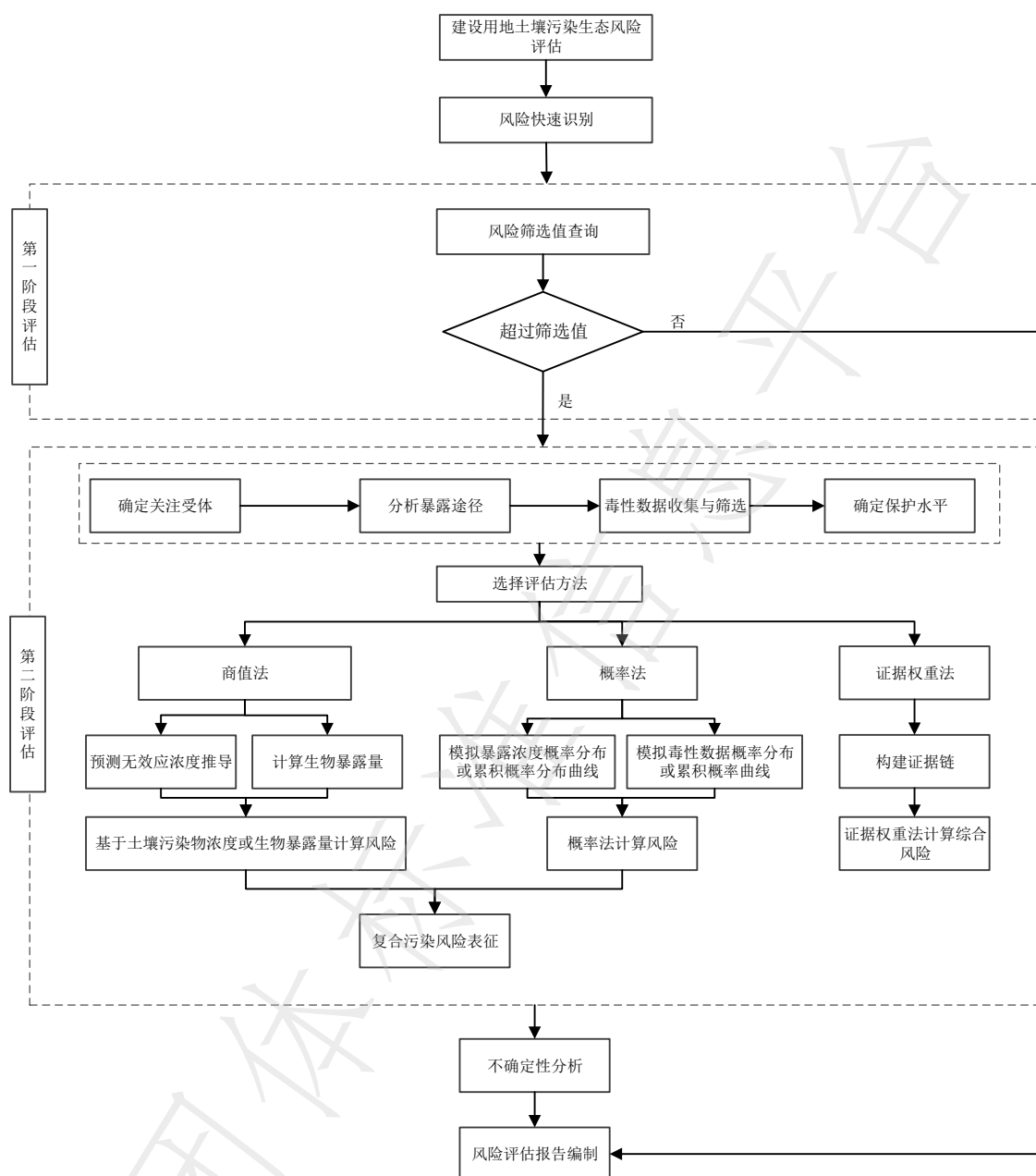


图1 建设用地土壤污染生态风险评估程序

## 5 风险快速识别

### 5.1 风险初步分析

#### 5.1.1 资料收集

5.1.1.1 收集已有土壤污染调查监测数据。

5.1.1.2 收集场地上方企业生产历史、原辅材料、生产工艺、产排污、三废处置、历史污染事故等相关资料 and 情况。

#### 5.1.2 关注污染物确定

分析场地历史生产工艺、原辅材料、产排污等情况以及已有的土壤污染调查监测数据，结合 HJ 25.1—2019 中附录 B，识别关注污染物。

### 5.1.3 风险分析

#### 5.1.3.1 土壤污染特征分析

已有对照区土壤(≥5个点)中关注污染物浓度时,通过统计学方法分析评估区土壤中关注污染物浓度与对照区土壤中关注污染物浓度差异。

缺少对照区土壤中关注污染物浓度时,采用土壤污染快速检测等手段获得对照区土壤(≥5个点)中关注污染物浓度,并通过统计学方法分析评估区土壤中关注污染物浓度与对照区土壤中关注污染物浓度差异。对照区要求和土壤布点方式参考 GB/T 39792.1,对照区应具有较好的时间和空间代表性,在地理位置、地形地貌、生态环境特征、土地利用类型、水文地质条件等方面应与评估区类似,其土壤的物理、化学、生物学性质应与评估区类似,土壤对照点应均匀布设于评估区外部。

#### 5.1.3.2 生物表现症状分析

采用生物观察等手段识别生物异常症状,并通过文献查阅、专家咨询等方式分析症状是否与土壤污染有关,生物观测方法参考 HJ 710.1、HJ 710.10。

### 5.2 风险评估启动情形

存在以下情况之一时,可启动风险评估:

- a) 评估区土壤中污染物浓度与对照区污染物浓度存在显著性差异;
- b) 生物出现因体内污染物浓度高导致的表现症状;
- c) 其他需要启动生态风险评估的情形。

## 6 第一阶段评估

### 6.1 生态风险筛选值获取

6.1.1 宜优先采用国内已发布的土壤污染生态风险筛选值,也可采用国际或国外发布的生态风险筛选值。

6.1.2 无法获取生态风险筛选值时,宜依据生态安全环境基准值推导获得生态风险筛选值,生态风险筛选值推导方法宜符合 T/ACEF 087 的规定。

### 6.2 风险评估

6.2.1 宜采用将土壤污染物浓度与该污染物的生态风险筛选值进行比对的方法进行风险评估。

6.2.2 当土壤污染物浓度超过生态风险筛选值时,表明可能存在不可接受的风险;当土壤污染物浓度未超过生态风险筛选值时,表明风险可接受,结束评估。

6.2.3 第一阶段风险评估结果为可能存在不可接受的风险时,应进行第二阶段风险评估。

## 7 第二阶段评估

### 7.1 关注受体确定

7.1.1 宜依据确定的场地规划土地利用类型确定关注受体。

7.1.2 工商业用地关注受体宜为土壤动物、植物;住宅用地关注受体宜为土壤动物、植物;公园绿地关注受体宜为土壤动物、微生物、植物、鸟类。

### 7.2 暴露途径分析

7.2.1 宜根据关注受体的类型确定生态受体对关注污染物的暴露途径。

7.2.2 植物的暴露途径宜为直接暴露（包括植物根部吸收、直接接触土壤等），动物的暴露途径宜为经口摄入（食物链），微生物的暴露途径宜为直接暴露（直接接触土壤）。

### 7.3 毒性数据收集与筛选

#### 7.3.1 毒性数据收集

查询毒性数据库，根据关注污染物和对应的关注受体等信息从数据库中筛选相应的毒性数据，包括 EC<sub>10</sub>、EC<sub>20</sub>、EC<sub>30</sub>、EC<sub>50</sub>、LC<sub>10</sub>、LC<sub>20</sub>、LC<sub>30</sub>、LC<sub>50</sub>、NOEC 等。常见的生态毒性数据库见附录 A。

#### 7.3.2 毒性数据筛选

按照以下要求对 7.3.1 收集到的毒性数据进行筛选：

- 毒性数据按照 GB/T 31270.15、GB/T 31270.16、GB/T 31270.19 或 OECD、ISO 规定的生态毒性实验标准方法获得；
- 至少 3 个处理水平，1 个对照，浓度差 $\leq$ 5 倍，有 3 个重复；
- 记录了生物暴露于土壤污染物的毒性终点和毒性效应，可根据剂量-效应关系估算毒性效应浓度，毒性效应浓度通过适宜的统计分析方法得到；
- 记录了毒性试验开展的条件，如土壤 pH、有机质、黏粒含量、温度等，记录了暴露时间和实际暴露浓度；
- 污染物的毒性效应能够归因于关注污染物，不存在非关注污染物的显著干扰。

#### 7.3.3 毒性数据处理

按照以下原则对毒性数据进行处理：

- 优先使用慢性毒性数据，仅在不存在慢性数据或慢性数据不足时再使用急性毒性数据；
- 同一物种的同一毒性终点有多个毒性数据，取几何平均值；
- 同一物种有多个不同毒性终点的毒性数据，选最敏感毒性终点对应的毒性数据。

### 7.4 保护水平确定

7.4.1 宜根据规划的土地利用类型，确定生态受体的保护水平。

7.4.2 工商业用地宜为 50%、住宅用地宜为 75%、公园绿地宜为 80%。

### 7.5 评估方法选择

根据评估需求选择第二阶段评估方法，具体见表 1。

表 1 生态风险评估方法

评估需求		适用的评估方法
评估范围	评估单个点位所代表区域	商值法、证据权重法
	评估整个场地	概率法
评估对象	评估特定生态受体	商值法、证据权重法
	评估多种生态受体	商值法、证据权重法、概率法

### 7.6 商值法风险评估

#### 7.6.1 预测无效应浓度推导

7.6.1.1 当暴露途径为直接暴露时，宜采用毒性数据外推方法进行预测无效应浓度推导。按照表 2 选择适宜方法对毒性数据进行外推，获得预测无效应浓度。评估因子的选取见表 3。

表 2 预测无效应浓度推导方法

毒性数据数量	优先适用的推导方法	方法说明
$n \geq 8$	物种敏感度分布法 (SSD, species-sensitivity distribution)	将满足一定概率分布 (如对数正态分布或 log-logistic 分布等) 的毒性效应浓度作累积概率分布曲线, 并选择 $p$ 百分位对应的效应浓度 ( $HC_p$ ) 作为预测无效应浓度, $p$ 为 $(1 - \text{保护水平}) \times 100$ 。
$n < 8$	评估因子法	采用毒性效应浓度除以评估因子 (AF, Assessment Factor) 的方法获得预测无效应浓度。

表 3 AF 取值

数据要求	评估因子
至少一组来自植物、无脊椎或昆虫的急性毒性数据 $L(E)C_{50}$	500
植物或无脊椎的单一慢性毒性数据 (NOEC 或 $EC_{10}$ )	100
2 组能代表 4 个物种的慢性毒性数据 (NOEC 或 $EC_{10}$ )	50
至少能代表三个营养级和 7 个物种的慢性毒性数据 (NOEC 或 $EC_{10}$ )	10

7.6.1.2 当暴露途径为摄入时, 宜采用暴露量计算模型进行预测无效应浓度推导。假定生物仅在受污染的土壤上方居住和觅食, 假定土壤和生物中污染物的吸收比例均为 1, 假定饮食仅包含一种生物类型, 推导预测无效应浓度, 见公式 (1)。

$$PNEC = \frac{TRV}{FIR} \times (P_s + P_i \times BAF) \dots\dots\dots (1)$$

式中:

$PNEC$  —— 预测无效应浓度;

$TRV$  —— 毒性参考值 ( $mg \cdot kg^{-1} \cdot bw \cdot d^{-1}$ );

$FIR$  —— 食物摄入量 ( $kg$  食物 (干重)  $\cdot kg^{-1}$  (鲜重)  $\cdot d^{-1}$ );

$P_s$  —— 土壤摄入占总饮食的比例;

$P_i$  —— 生物摄入占总饮食的比例;

$BAF$  —— 生物富集系数。

## 7.6.2 风险评估

7.6.2.1 当能够获取生物体中污染物浓度时, 将生物体中污染物浓度与查阅文献获得的毒性参考值进行比对, 比对结果  $< 1$ , 风险可接受; 比对结果  $\geq 1$ , 可能存在不可接受的风险。

7.6.2.2 当只能获取土壤中污染物浓度时, 将土壤污染物浓度与推导的预测无效应浓度进行比对, 比对结果  $< 1$ , 风险可接受; 比对结果  $\geq 1$ , 可能存在不可接受的风险。

## 7.6.3 复合污染风险表征

对于场地存在多种污染物的情况, 采用浓度加和 (CA, Concentration Addition) 模型表征复合污染风险, 见公式 (2)。

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ_i \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$HI$  —— 复合污染风险;

$HQ_i$  —— 第  $i$  种污染物的风险;

$n$  ——污染物种类。

商值法示例见附录 B 中 B.3.5。

## 7.7 证据权重法风险评估

### 7.7.1 构建证据链

7.7.1.1 宜根据场地实际情况以及相关指标调查、检测的可行性，构建化学、毒理和生态 3 条证据链。

7.7.1.2 化学证据链宜从污染物总浓度、污染物有效态浓度、生物体内污染物浓度等指标中选择适宜的指标作为化学指标；毒理证据链宜从生物标记物、DNA 损伤等指标中选择适宜的指标作为毒理指标；生态证据链宜选择潜在物种影响比例作为生态指标。

7.7.1.3 化学指标中不同污染物总浓度、不同污染物有效态浓度、生物体内不同污染物浓度等为分指标；毒理指标中不同生物标记物等为分指标。

### 7.7.2 证据链内各分指标风险计算

#### 7.7.2.1 化学分指标风险计算

各项化学分指标风险计算方法见公式 (3)。

$$RTR_{C_i} = \frac{C_i}{C_{ir}} \times w_i \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$RTR_{C_i}$  ——化学分指标  $i$  的风险；

$C_i$  ——化学分指标  $i$  的数值；

$C_{ir}$  ——化学分指标  $i$  在对照点  $r$  的数值；

$w_i$  ——化学分指标  $i$  的权重。

对照区要求同 5.1.3.1。权重通过专家咨询或文献查阅确定。

#### 7.7.2.2 毒理分指标风险计算

各项毒理分指标风险计算方法见公式 (4)。

$$RTR_{t_k} = \left| \frac{(T_k - T_{kr})}{T_{kr}} \right| \times \frac{w_k}{0.2} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$RTR_{t_k}$  ——毒理分指标  $k$  的风险；

$T_k$  ——毒理分指标  $k$  的数值；

$T_{kr}$  ——毒理分指标  $k$  在对照点  $r$  的数值；

$w_k$  ——毒理分指标  $k$  的权重；

0.2 ——毒理学指标诱导阈值，表明毒理学指标响应诱导超过 20% 视为效应显著。

对照区要求和权重确定方法同 7.7.2.1。

#### 7.7.2.3 生态指标风险计算

生态指标风险计算方法见公式 (5)。

$$msPAF_m = 1 - \prod_{l=1}^n (1 - PAF_l) \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$msPAF_m$  ——污染土壤的生态指标风险；

$PAF_l$  ——污染物  $l$  的潜在物种影响比例；

$n$  ——污染物数量。

## 7.7.3 证据链风险计算

## 7.7.3.1 化学证据链风险计算

基于化学证据链中各分指标的 RTR 等级，计算得到化学证据链的风险  $HQ_c$ ，具体计算方式见公式 (6)。

$$HQ_c = (\%param_{RTR_{C_i} < 1.3} \times 1) + (\%param_{1.3 \leq RTR_{C_i} < 2.6} \times 3) + (\%param_{2.6 \leq RTR_{C_i} < 6.5} \times 9) + (\%param_{6.5 \leq RTR_{C_i} < 13} \times 27) + (\%param_{RTR_{C_i} \geq 13} \times 81) \dots \dots \dots (6)$$

式中：

$\%param_{RTR_{C_i} < 1.3}$  ——化学分指标风险小于 1.3 的分指标数量占有所有分指标数量的比例；

$\%param_{1.3 \leq RTR_{C_i} < 2.6}$  ——化学分指标风险介于 1.3 至 2.6 的分指标数量占有所有分指标数量的比例；

$\%param_{2.6 \leq RTR_{C_i} < 6.5}$  ——化学分指标风险介于 2.6 至 6.5 的分指标数量占有所有分指标数量的比例；

$\%param_{6.5 \leq RTR_{C_i} < 13}$  ——化学分指标风险介于 6.5 至 13 的分指标数量占有所有分指标数量的比例；

$\%param_{RTR_{C_i} \geq 13}$  ——化学分指标风险大于 13 的分指标数量占有所有分指标数量的比例。

风险等级划分见表 4。

## 7.7.3.2 毒理证据链风险计算

基于毒理证据链中各分指标的 RTR 等级，计算得到毒理证据链的风险  $HQ_t$ ，具体计算方式见公式 (7)。

$$HQ_t = (\%param_{RTR_{t_k} < 0.7} \times 0.7) + (\%param_{0.7 \leq RTR_{t_k} < 1} \times 1) + (\%param_{1 \leq RTR_{t_k} < 2} \times 2) + (\%param_{2 \leq RTR_{t_k} < 3} \times 4) + (\%param_{RTR_{t_k} \geq 3} \times 8) \dots \dots \dots (7)$$

式中：

$\%param_{RTR_{t_k} < 0.7}$  ——毒理分指标风险小于 0.7 的分指标数量占有所有分指标数量的比例；

$\%param_{0.7 \leq RTR_{t_k} < 1}$  ——毒理分指标风险介于 0.7 至 1 的分指标数量占有所有分指标数量的比例；

$\%param_{1 \leq RTR_{t_k} < 2}$  ——毒理分指标风险介于 1 至 2 的分指标数量占有所有分指标数量的比例；

$\%param_{2 \leq RTR_{t_k} < 3}$  ——毒理分指标风险介于 2 至 3 的分指标数量占有所有分指标数量的比例；

$\%param_{RTR_{t_k} \geq 3}$  ——毒理分指标风险大于 3 的分指标数量占有所有分指标数量的比例。

风险等级划分见表 4。

### 7.7.3.3 生态证据链风险计算

生态证据链的风险 $HQ_e$ 直接由 $msPAF_m$ 计算得到，具体计算方式见公式（8）。

$$HQ_e = \frac{msPAF_m - msPAF_r}{1 - msPAF_r} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

$msPAF_m$ ——污染土壤的生态指标风险，计算方法见公式（5）；

$msPAF_r$ ——对照土壤的生态指标风险，计算方法和污染土壤的生态指标风险一致，见公式（5）。

### 7.7.4 多证据链综合风险计算

对三条证据链的 $HQ$ 进行标准化处理，赋予权重，得到综合风险 $EnvRI$ 。计算方式见公式（9）和公式（10）。

$$HQ_a = \frac{HQ - HQ_{min}}{HQ_{max} - HQ_{min}} \dots\dots\dots (9)$$

$$EnvRI = \frac{\sum_{a=1}^3 HQ_a \times w_a}{\sum_{a=1}^3 w_a} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$HQ_a$  ——第 a 条证据链的标准化 $HQ$ ；

$HQ_{min}$  ——每条证据链 $HQ$ 的最小值，见表 4；

$HQ_{max}$  ——每条证据链 $HQ$ 的最大值，见表 4；

$EnvRI$  ——三条证据链的综合风险；

$w_a$  ——第 a 条证据链的权重，权重根据证据链的风险等级赋值，等级越低，权重越小，等级越高，权重越大。

风险等级见表 4。

表 4 三条证据链 RTR、HQ 及综合指数 EnvRI 的风险等级划分建议

风险等级	可忽略	轻度	中度	较大	严重
$RTR_{chemistry}$	$0 < RTR < 1.3$	$1.3 \leq RTR < 2.6$	$2.6 \leq RTR < 6.5$	$6.5 \leq RTR < 13$	$RTR \geq 13$
$RTR_{biomaker}$	$RTR < 0.7$	$0.7 \leq RTR < 1$	$1 \leq RTR < 2$	$2 \leq RTR < 3$	$RTR \geq 3$
$HQ_{chemistry}$	$HQ < 100$	$100 \leq HQ < 300$	$300 \leq HQ < 900$	$900 \leq HQ < 2700$	$2700 \leq HQ$
$HQ_{biomaker}$	$HQ < 70$	$70 \leq HQ < 100$	$100 \leq HQ < 200$	$200 \leq HQ < 400$	$400 \leq HQ < 800$
$HQ_{community}$	$HQ = 0$	$0 < HQ < 0.3$	$0.3 \leq HQ < 0.7$	$0.7 \leq HQ < 1$	$HQ = 1$
EnvRI	$EnvRI < 0.1$	$0.1 < EnvRI < 0.25$	$0.25 \leq EnvRI < 0.5$	$0.5 \leq EnvRI < 0.75$	$0.75 \leq EnvRI < 1$

证据权重法示例见附录 B 中 B.3.6。

## 7.8 概率法风险评估

### 7.8.1 安全阈值法

7.8.1.1 基于前期收集的毒性数据和场地调查获取的污染物浓度数据，运用 Excel 或 Origin 等软件，模拟物种敏感度分布曲线以及土壤污染物浓度累计分布曲线，用物种敏感度分布曲线上 10% 处浓度与土壤污染物浓度累计分布曲线上 90% 处浓度的比值 ( $MOS_{10}$ ) 评价风险。

7.8.1.2  $MOS_{10} \leq 1$ ，可能存在不可接受的风险， $MOS_{10} > 1$ ，风险可接受。

## 7.8.2 概率密度函数重叠面积法

7.8.2.1 基于前期收集的毒性数据和场地调查获取的污染物浓度数据，运用 Excel 或 Origin 等软件，模拟土壤污染物浓度和毒性数据的概率密度曲线，将两条曲线置于同一坐标系下，计算其重叠部分面积，作为风险值。

7.8.2.2 风险值越大，表明风险越高。

## 7.8.3 概率曲线分布法

7.8.3.1 基于前期收集的毒性数据和场地调查获取的污染物浓度数据，运用 Matlab 等软件，以土壤污染物浓度超过相应效应的概率作为纵轴，以毒性效应的累积概率作为横轴绘制曲线，曲线下部的面积为风险值。

7.8.3.2 风险值越大，表明风险越高。

## 7.8.4 复合污染风险表征

具体评估方法同 7.6.3。

概率法示例见附录 B 中 B.3.7。

# 8 不确定性分析

## 8.1 不确定性来源分析

从参数取值变化、本场地关注生态受体毒性数据可获取性等方面分析识别风险评估结果不确定性的主要来源。

## 8.2 参数敏感性分析

8.2.1 宜识别对风险评估结果影响较大的参数，包括毒性数据、生物富集系数、食物摄入量、土壤摄入占总饮食的比例、生物摄入占总饮食的比例等，分析这些参数可能的变化范围，进行参数敏感性分析，具体方法参照 HJ 25.3 中模型参数敏感性分析的方法要求。

8.2.2 对于暴露途径为直接暴露的情形，宜进行毒性数据的敏感性分析。

8.2.3 对于暴露途径为摄入的情形，宜从 8.2.1 参数中选择必要的参数进行敏感性分析。

# 9 风险评估报告编制

## 9.1 报告编制要求

风险评估完成后，编制风险评估报告，报告包含风险快速识别以及风险评估各个阶段工作开展情况、获得的数据、结果和评估结论，并给出不确定分析的方法和结论，同时，根据评估结果给出相应的风险管控建议。

## 9.2 报告编制大纲

报告编制大纲见附录 C。

附录 A  
(资料性)  
常用生态毒性数据库

表 A.1 给出了常用生态毒性数据库。

表 A.1 常用生态毒性数据库

国家	数据库	链接或说明
美国	ECOTOX	<a href="https://cfpub.epa.gov/ecotox/">https://cfpub.epa.gov/ecotox/</a>
	DIALOG 中的 AGRICOLA	<a href="http://www.nal.usda.gov">http://www.nal.usda.gov</a> (美国国家农业图书馆)
	BIOSIS Previews	<a href="http://www.isinet.com/isi/products/biosis/index.html">http://www.isinet.com/isi/products/biosis/index.html</a>
	ChemAbstract 目标数据库	<a href="https://scifinder.cas.org/">https://scifinder.cas.org/</a>
	SilverPlatter 数据库	基于 windows 的检索软件
	Ovid 数据库	<a href="https://ovidsp.ovid.com/autologin.cgi">https://ovidsp.ovid.com/autologin.cgi</a>
	Toxnet	<a href="https://toxnet.nlm.nih.gov/">https://toxnet.nlm.nih.gov/</a>
	Current Contents Connect	基于 ISI Web of Knowledge
英国	IUCLID 国际统一化学品信息数据库	<a href="https://iuclid6.echa.europa.eu/">https://iuclid6.echa.europa.eu/</a>
荷兰	TOXLINE	<a href="https://toxnet.nlm.nih.gov/newtoxnet/toxline.htm">https://toxnet.nlm.nih.gov/newtoxnet/toxline.htm</a>
	e-tox	<a href="http://www.e-toxbase.com">http://www.e-toxbase.com</a>

附录 B  
(资料性)

建设用地土壤污染生态风险评估方法示例

### B.1 案例概况

某金属冶炼厂周围土壤中砷、铅等重金属超标严重。参考 GB/T 39792.1，从该场地共采集 11 个土样（包括 5 个对照区样品），样品浓度见表 B.1。为了评估场地土壤中污染物对周边生态受体的影响，采用本文件中的方法对场地土壤污染生态风险进行评估。

表 B.1 场地土壤污染物浓度数据

点位	As (mg/kg)	Pb (mg/kg)
S1	35.80	629.05
S2	15.40	114.23
S3	19.71	185.10
S4	15.29	255.70
S5	19.57	66.35
S6	19.03	64.95
对照区	7.05	13.44

### B.2 第一阶段评估

根据 B.1 中场地调查数据，关注污染物为砷和铅。

调研发达国家现有的土壤污染生态风险筛选值（见表 B.2），As 的最低生态风险筛选值为 12 mg/kg，Pb 的最低生态风险筛选值为 11 mg/kg，将 B.1 中调查获取的场地土壤污染物浓度与筛选值进行比对，结果显示，所有点位污染物浓度均超过表 B.2 中最低生态风险筛选值，场地 As 和 Pb 污染可能存在生态风险。因此，进入下一阶段风险评估。

表 B.2 针对砷和铅的生态风险筛选值

污染物	美国				荷兰（2000）		加拿大质量 指导值		澳大利亚（LOEC&EC <sub>30</sub> ）		
	植 物	无脊 椎动 物	野生动物		干 预 值	目 标 值	居 住	商 业/ 工 业 区	重 要 生 态 区	居 住 区/ 公 共 开 放 空 间	商 业/ 工 业 区
			鸟 类	哺 乳 动 物							
As (mg/kg)	18	—	43	46	29	—	12	—	40	100	160
Pb (mg/kg)	120	1700	11	56	530	85	140	260/600	470	1100	1800

### B.3 第二阶段评估

#### B.3.1 关注受体确定

根据本文件，工商业用地关注的受体包括土壤动物及植物。

#### B.3.2 暴露途径分析

根据本文件，本场地所关注受体土壤动物和植物的暴露途径主要为直接接触（根部吸收、直接接触土壤等）。

### B.3.3 毒性数据获取

通过查询美国 ECOTOX 毒性数据库和相关文献，获取到砷和铅的慢性毒性数据（NOEC 和  $EC_{10}$ ）（见表 B.3）。

表 B.3 敏感物种的慢性毒性数据

污染物	受体	类型	NOEC (mg/kg)	$EC_{10}$ (mg/kg)
砷	赤子爱胜蚓	土壤无脊椎动物	4.16	—
	陆正蚓	土壤无脊椎动物	100	—
	菠菜	植物	10.6	—
	四季豆	植物	—	30
	小麦	植物	25.09	—
	生菜	植物	—	23
	黄瓜	植物	—	12.16
	卷心菜	植物	48.3	—
铅	大麦	植物	—	50
	玉米	植物	—	173
	包菜	植物	—	512
	大豆	植物	—	500
	红毛枝蚯蚓	土壤无脊椎动物	—	129
	赤子爱胜蚯蚓	土壤无脊椎动物	—	1000
	跳虫	土壤无脊椎动物	—	1170
	线虫	土壤无脊椎动物	—	130

### B.3.4 保护水平确定

工商业用地的保护水平为 50%。

### B.3.5 商值法风险评估

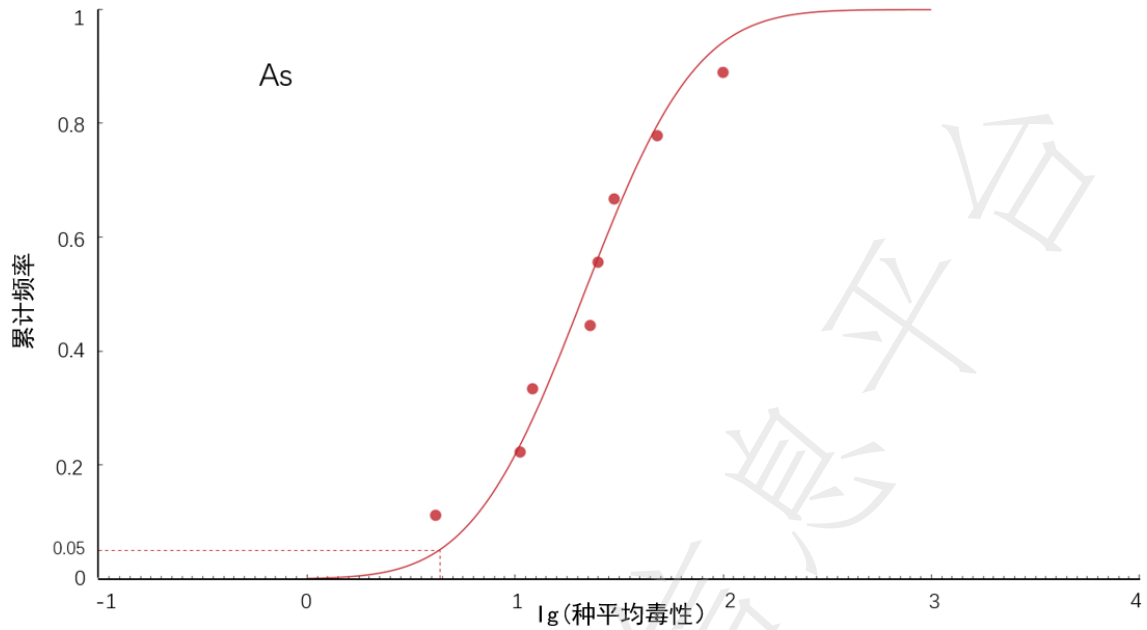
#### B.3.5.1 预测无效应浓度推导

利用正态分布、对数正态分布、逻辑斯蒂分布、对数逻辑斯蒂分布等 4 种常用函数分别拟合砷和铅的 SSD 曲线，比较 4 种模型的校正系数 ( $R^2$ )，由表 B.4 可知，对于砷、铅污染物，正态分布的拟合效果最好。因此，砷、铅的 SSD 曲线采用正态分布模型拟合。

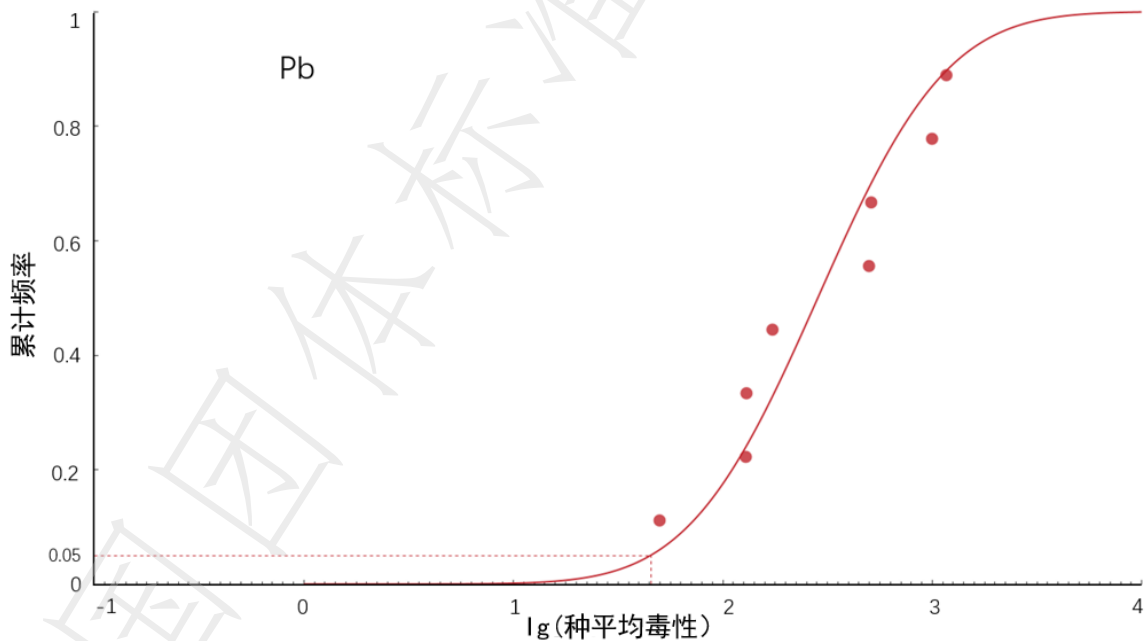
表 B.4 不同统计模型的拟合度比较

污染物	正态分布	对数正态分布	逻辑斯蒂分布	对数逻辑斯蒂分布
砷	0.97	0.96	0.96	0.96
铅	0.90	0.90	0.87	0.87

将毒性数据代入统计模型，得到砷和铅的 SSD 曲线（见图 B.1）。



样本数	HC <sub>5</sub>	HC <sub>25</sub>	HC <sub>50</sub>	HC <sub>95</sub>	R <sup>2</sup>	RMSE	p(K-S)
8	4.34	11.13	21.5	75.37	0.96	0.05	>0.05



样本数	HC <sub>5</sub>	HC <sub>25</sub>	HC <sub>50</sub>	HC <sub>95</sub>	R <sup>2</sup>	RMSE	p(K-S)
8	45.29	134.03	284.9	1792.67	0.89	0.08	>0.05

图 B.1 土壤中砷和铅的物种敏感分布曲线

根据 SSD 曲线，砷的 HC<sub>50</sub> 为 21.5 mg/kg，铅的 HC<sub>50</sub> 为 284.9 mg/kg。即基于保护 50% 物种的砷预测无效应浓度为 21.5 mg/kg，铅为 284.9 mg/kg。

### B.3.5.2 风险评估

将污染物浓度数据与上述预测无效应浓度进行比较（见表 B.5），可以得出，S1 点位的砷和铅商值大于 1，可能存在不可接受的生态风险，其他点位的砷和铅商值均小于 1，风险可接受。所有点位的复合污染风险商均大于 1，可能存在不可接受的复合生态风险。

表 B.5 商值法计算不同点位土壤生态风险

点位	土壤砷浓度 (mg/kg)	土壤铅浓度 (mg/kg)	土壤砷风险	土壤铅风险	土壤中砷和铅的复合污染生态风险 <sup>a</sup>
预测无效应浓度	21.5	284.9	—	—	—
S1	35.8	629.05	1.67	2.21	3.87
S2	15.4	114.23	0.72	0.40	1.12
S3	19.71	185.1	0.92	0.65	1.57
S4	15.29	255.7	0.71	0.90	1.61
S5	19.57	66.35	0.91	0.23	1.14
S6	19.03	64.95	0.89	0.23	1.11

<sup>a</sup>根据本文件，采用浓度加和模型计算土壤中砷和铅的复合污染生态风险。

### B.3.6 证据权重法

#### B.3.6.1 构建证据链

以重金属暴露浓度、生物标记物数据以及预计种群效应作为表征指标，综合评估场地的土壤污染生态风险。

重金属浓度见表 B.1，生物标记物数据见表 B.6。

表 B.6 蚯蚓体内标记物数据

样品编号	金属硫蛋白 MT (ng/L)	8-羟基脱氧鸟 昔 8-OHDG (ng/L)	超氧化物歧化 酶 SOD (U/mgprot)	还原型谷胱甘肽 GSH (mmol/gprot)	过氧化氢酶 CAT (U/mgprot)	过氧化物酶 POD (U/mgprot)	乙酰胆碱酯酶 AChE (U/mgprot)	总抗氧化能力 T-AOC (mmol/gprot)
S1	3728.78	56.63	116.53	5.71	1.18	14.80	1.25	0.08
S2	1834.50	104.46	117.18	21.53	0.25	0.56	0.69	0.06
S3	1506.11	76.30	179.90	10.50	2.71	0.40	0.14	0.12
S4	1313.94	117.89	116.40	6.37	3.40	1.22	0.42	0.08
S5	1583.19	63.46	142.94	5.25	4.01	1.57	0.07	0.14
S6	5033.87	92.70	131.22	5.33	2.66	1.98	0.35	0.10
对照组	3301.94	163.32	38.18	28.11	1.36	44.19	0.44	0.06

## B.3.6.2 证据链内各分指标风险计算

首先计算证据链内各分指标的参考比 (RTR)，具体如下：

## a) 土壤污染物总浓度

土壤中不同污染物总浓度的风险计算见公式 (B.1)。

$$RTR_{C_i} = \frac{C_i}{C_{ir}} \times w_i \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

$RTR_{C_i}$  —— 污染物 i 的总浓度风险；

$C_i$  —— 评土壤污染物 i 的总浓度，见表 B.1；

$C_{ir}$  —— 土壤污染物 i 在对照点的总浓度，见表 B.1；

$w_i$  —— 各项污染物的权重。权重基于污染物的土壤生态筛选值设定，受体越敏感的污染物权重越大，砷的权重设定为 1.2，铅的权重设定为 1.1。

污染物总浓度的 RTR 见表 B.7。

表 B.7 污染物总浓度 RTR

样品编号	$RTR_{As}$	$RTR_{Pb}$
S1	6.09	51.48
S2	2.62	9.35
S3	3.35	15.15
S4	2.60	20.93
S5	3.33	5.43
S6	3.24	5.32

## b) 生物标记物

生物标记物的风险计算见公式 (B.2)。

$$RTR_{t_k} = \left| \frac{(T_k - T_{kr})}{T_{kr}} \right| \times \frac{w_k}{0.2} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

$RTR_{t_k}$  —— 生物标记物 k 的相对风险；

$T_k$  —— 污染土壤点位蚯蚓体内生物标记物 k 的响应，见表 B.6；

$T_{kr}$  —— 对照区土壤点位蚯蚓体内生物标记物 k 的响应，见表 B.6；

$w_k$  —— 每个生物标记物的权重，根据其所在生物组织以及生物学重要性设定权重，其中金属硫蛋白 MT、8-羟基脱氧鸟苷 8-OHDG、超氧化物歧化酶 SOD、还原型谷胱甘肽 GSH、过氧化氢酶 CAT 的权重为 1，过氧化物酶 POD、总抗氧化能力 T-AOC 的权重为 1.2，乙酰胆碱酯酶 AChE 的权重为 1.5；

0.2 —— 毒理学指标诱导阈值，表明毒理学指标响应诱导超过 20% 视为效应显著。

生物标记物的 RTR 见表 B.8。

表 B.8 生物标记物的 *RTR*

样品编号	金属硫蛋白 MT (ng/L)	8-羟基脱氧鸟苷 8-OHdG (ng/L)	超氧化物歧化酶 SOD (U/mgprot)	还原型谷胱甘肽 GSH (mmol/gprot)	过氧化氢酶 CAT (U/mgprot)	过氧化物酶 POD (U/mgprot)	乙酰胆碱酯酶 AChE (U/mgprot)	总抗氧化能力 T-AOC (mmol/gprot)
S1	0.65	3.27	10.26	3.98	0.66	3.99	13.81	2.00
S2	2.22	1.80	10.35	1.17	4.08	5.92	4.26	0.00
S3	2.72	2.66	18.56	3.13	4.96	5.95	5.11	6.00
S4	3.01	1.39	10.24	3.87	7.50	5.83	0.34	2.00
S5	2.60	3.06	13.72	4.07	9.74	5.79	6.31	8.00
S6	2.62	2.16	12.18	4.05	4.78	5.73	1.53	4.00

c) 预计种群效应

预计种群效应的计算见公式 (B.3)。

$$msPAF_m = 1 - \prod_{l=1}^n (1 - PAF_l) \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

$PAF_l$ ——重金属 As 和 Pb 的潜在物种影响比例。

各个点位污染物浓度对应的潜在物种影响比例 ( $PAF_l$ ) 和相对生态风险 ( $msPAF_m$ ) 见表 B.9。

表 B.9 预计种群效应的  $PAF_l$  及  $msPAF_m$ 

序号	点位	潜在物种影响比例		相对生态风险
		$PAF_{As}$	$PAF_{Pb}$	$msPAF_m$
1	S1	0.49	0.6	0.99
2	S2	0.23	0.03	0.99
3	S3	0.2	0.11	0.99
4	S4	0.2	0.2	0.99
5	S5	0.2	0.02	0.99
6	S6	0.2	0.02	0.99
7	对照	0.18	0	0.61

### B.3.6.3 证据链风险计算

a) 化学证据链风险计算

化学证据链风险计算见公式 (B.4)。

$$HQ_c = (\%param_{RTR_{C_i} < 1.3} \times 1) + (\%param_{1.3 \leq RTR_{C_i} < 2.6} \times 3) + (\%param_{2.6 \leq RTR_{C_i} < 6.5} \times 9) + (\%param_{6.5 \leq RTR_{C_i} < 13} \times 27) + (\%param_{RTR_{C_i} \geq 13} \times 81) \dots\dots\dots (B.4)$$

化学证据链风险见表 B.10。

表 B.10 化学证据链风险

样品编号	RTR <sub>As</sub>	RTR <sub>Pb</sub>	HQ <sub>c</sub>	级别
S1	6.09	51.48	4500	严重
S2	2.62	9.35	1800	较大
S3	3.35	15.15	1800	较大
S4	2.60	20.93	1800	较大
S5	3.33	5.43	900	较大
S6	3.24	5.32	900	较大

根据表 B.10, S1 点位的风险水平为严重, 其他点位均为较大。

b) 毒理证据链风险计算

毒理证据链风险计算见公式 (B.5)。

$$\begin{aligned}
 HQ_t = & \left( \%param_{RTR_{t_k} < 0.7} \times 0.7 \right) + \left( \%param_{0.7 \leq RTR_{t_k} < 1} \times 1 \right) + \left( \%param_{1 \leq RTR_{t_k} < 2} \times 2 \right) + \\
 & \left( \%param_{2 \leq RTR_{t_k} < 3} \times 4 \right) + \left( \%param_{RTR_{t_k} \geq 3} \times 8 \right) \dots\dots\dots (B.5)
 \end{aligned}$$

毒理证据链风险见表 B.11。

表 B.11 毒理证据链风险

样品编号	金属硫蛋白 MT (ng/L)	8-羟基脱氧鸟 苷 8-OHdG (ng/L)	超氧化物歧化 酶 SOD (U/mgprot)	还原型谷胱 甘肽 GSH (mmol/gprot)	过氧化氢酶 CAT (U/mgprot)	过氧化物酶 POD (U/mgprot)	乙酰胆碱酯酶 AChE (U/mgprot)	总抗氧化能力 T- AOC (mmol/gprot)	HQ <sub>t</sub>	级别
S1	0.65	3.27	10.26	3.98	0.66	3.99	13.81	2.00	567.50	严重
S2	2.22	1.80	10.35	1.17	4.08	5.92	4.26	0.00	508.75	严重
S3	2.72	2.66	18.56	3.13	4.96	5.95	5.11	6.00	700.00	严重
S4	3.01	1.39	10.24	3.87	7.50	5.83	0.34	2.00	571.25	严重
S5	2.60	3.06	13.72	4.07	9.74	5.79	6.31	8.00	750.00	严重
S6	2.62	2.16	12.18	4.05	4.78	5.73	1.53	4.00	625.00	严重

根据表 B. 11，所有点位的风险都为严重。

c) 生态证据链综合风险计算

生态证据链的综合风险计算见公式 (B. 6)。

$$HQ_e = \frac{msPAF_m - msPAF_r}{1 - msPAF_r} \dots\dots\dots (B. 6)$$

式中：

$msPAF_m$ ——污染土壤的  $msPAF$  值；

$msPAF_r$ ——对照土壤的  $msPAF$  值。

将表 B. 9 中的  $msPAF$  结果代入公式 (B. 6)，得到不同点位的生态证据链风险  $HQ_e$ 。（见表 B. 12），根据表 B. 12，所有点位的风险都为较大。

表 B. 12 生态指标证据链综合风险

样品编号	$HQ_e$	级别
S1	0.97	较大
S2	0.97	较大
S3	0.97	较大
S4	0.97	较大
S5	0.97	较大
S6	0.97	较大

#### B. 3. 6. 4 多证据链的综合风险计算

对三条证据链的  $HQ$  进行标准化处理，赋予权重，得到综合风险  $EnvRI$ 。计算方式见公式 (B. 7) 和公式 (B. 8)。

$$HQ_a = \frac{HQ - HQ_{min}}{HQ_{max} - HQ_{min}} \dots\dots\dots (B. 7)$$

$$EnvRI = \frac{\sum_{a=1}^3 HQ_a \times w_a}{\sum_{a=1}^3 w_a} \dots\dots\dots (B. 8)$$

式中：

$HQ_a$  ——第 a 条证据链的标准化  $HQ$ ；

$HQ_{min}$  ——每条证据链  $HQ$  的最小值；

$HQ_{max}$  ——每条证据链  $HQ$  的最大值；

$EnvRI$  ——三条证据链的综合风险；

$w_a$  ——第 a 条证据链的权重，化学证据链和毒理证据链为 1，生态证据链为 1.2。

多证据链综合风险计算结果见表 B. 13。

表 B. 13 综合环境风险计算结果

样品编号	$HQ_e$	$HQ_t$	$HQ_e$	$HQ_{en}$	$HQ_{tn}$	$HQ_{en}$	EnvRI	级别
S1	4500	567.50	0.97	0.55	0.68	0.97	0.75	严重
S2	1800	508.75	0.97	0.21	0.60	0.97	0.62	较大
S3	1800	700.00	0.97	0.21	0.86	0.97	0.70	较大
S4	1800	571.25	0.97	0.21	0.69	0.97	0.65	较大
S5	900	750.00	0.97	0.10	0.93	0.97	0.69	较大
S6	900	625.00	0.97	0.10	0.76	0.97	0.63	较大

根据表 B. 13, S1 点位的风险水平为严重, 其他点位的风险水平为较大。

### B. 3.7 概率法

#### B. 3.7.1 安全阈值法

将前期调查数据 (见表 B. 1) 代入 EXCEL, 得出砷环境暴露浓度累积概率分布曲线 90% 处的临界值( $ECD_{90}$ )为 2800 mg/kg, 生物毒性数据累积概率分布曲线 10% 处的临界值( $SSD_{10}$ )为 7.54 mg/kg,  $MOS_{10} < 1$ , 存在较高的生态风险; 铅环境暴露浓度累积概率分布曲线 90% 处的临界值 ( $ECD_{90}$ ) 为 6500 mg/kg, 生物毒性数据累积概率分布曲线 10% 处的临界值 ( $SSD_{10}$ ) 为 217.13 mg/kg,  $MOS_{10} < 1$ , 存在较高的生态风险。

#### B. 3.7.2 概率曲线分布法

将表 B. 14 和表 B. 15 数据代入 Matlab, 得出砷浓度超过 5% 物种受到影响的概率、砷浓度超过 1% 物种受到影响的概率、铅浓度超过 5% 物种受到影响的概率、铅浓度超过 1% 物种受到影响的概率均为 1, 具体见图 B. 2, 表明该场地砷和铅污染的生态风险极高。

表 B. 14 污染物浓度数据及其对数

点位	As 浓度 (mg/kg)	Pb 浓度 (mg/kg)	lgAs	lgPb
S1	299.60	833.40	1.55	2.80
S2	142.80	963.70	1.19	2.06
S3	422.90	519.50	1.29	2.27
S4	910.00	4510.70	1.18	2.41
S5	900.60	5199.70	1.29	1.82
S6	1301.30	4241.60	1.28	1.81
均值	952.98	2846.56	1.30	2.19
标准差	961.15	2543.02	0.13	0.38

表 B. 15 污染物毒性数据及其对数

序号	As 毒性数据	Pb 毒性数据	lgAs	lgPb
1	4.16	50	1.18	2.58
2	100	129	1.48	2.48
3	10.6	130	1.40	2.71
4	30	173	1.36	3.07
5	25.09	500	1.08	2.11
6	23	512	2.00	3.00
7	12.16	1000	0.74	3.01
8	48.3	1170	1.68	2.65
均值	31.66	458.00	1.33	2.45
标准差	30.82	425.76	0.42	0.49

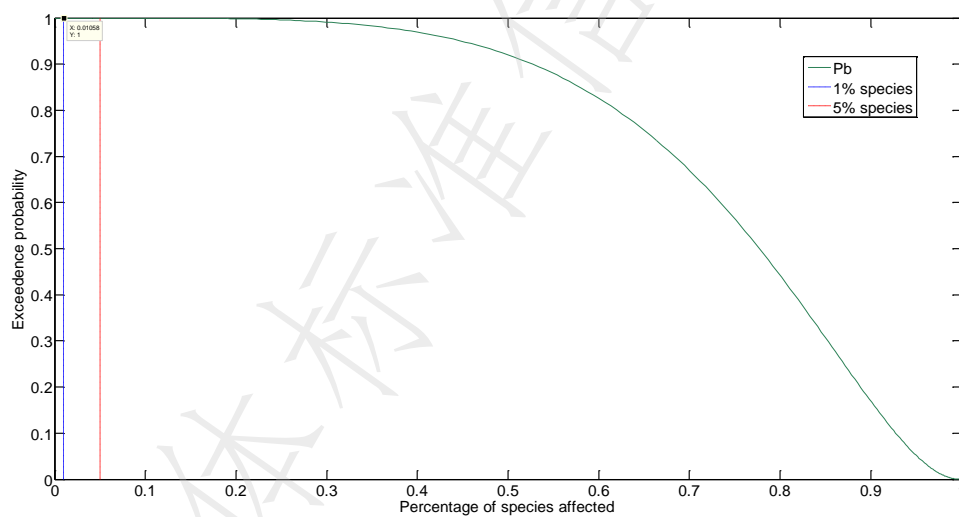
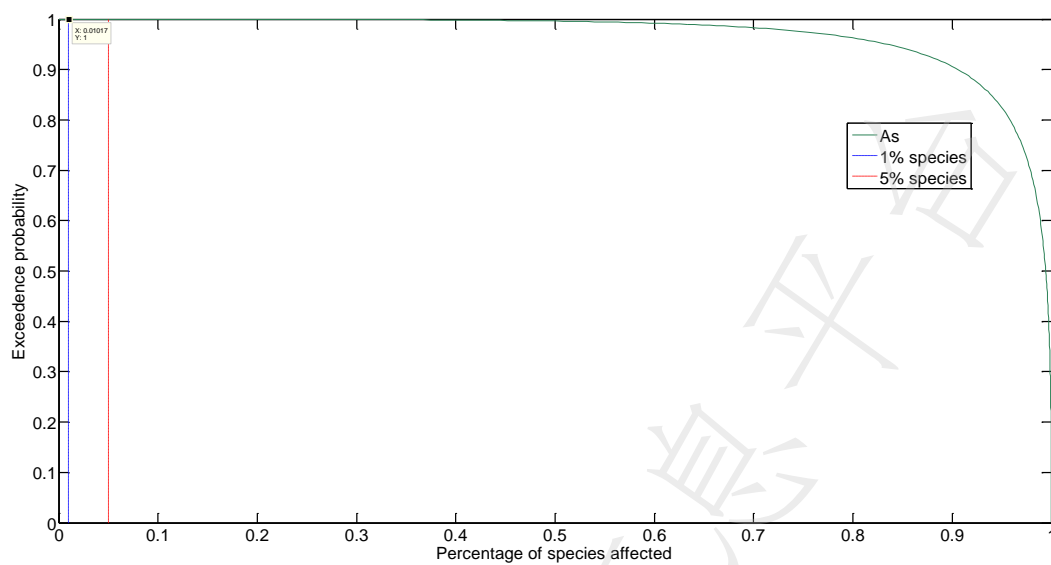


图 B.2 概率曲线分布图

附录 C  
(资料性)

建设用地土壤污染生态风险评估报告编制大纲

C.1 评估工作概况

C.1.1 任务由来

写明项目名称、项目所在位置、委托方、评估事项等。

C.1.2 评估目标

写明本次生态风险评估工作的目标。

C.1.3 评估内容

写明本次生态风险评估工作针对的对象和评估的主要内容。

C.1.4 评估范围

写明本次生态风险评估工作的空间范围，以及确定该范围的依据。

C.1.5 评估依据

写明开展本次生态风险评估工作所依据的法律法规、标准、技术规范以及项目相关文件等。

C.1.6 评估程序和方法

阐明开展本次生态风险评估工作的技术路线及评估工作所使用的技术方法。

C.2 场地问题识别

C.2.1 所在区域概况

描述待评估场地所在区域的基本情况，包括地理位置、自然环境条件等。

C.2.2 场地基本信息

描述待评估场地的基本情况，包括地理位置、生产和产排污历史等。

C.2.3 场地环境特征

描述待评估场地的基本情况，包括自然环境条件、前期已开展调查评估工作的情况及调查评估结果等。

C.3 风险快速识别

描述风险快速识别的过程和结果。

C.4 第一阶段风险评估

阐述土壤生态风险筛选值查询或推导过程及结果，给出第一阶段风险评估结论。

C.5 第二阶段风险评估

C.5.1 评估方法

阐述风险评估方法的选择过程及相关依据。

### C.5.2 评估过程

描述关注受体确定、暴露途径分析、毒性数据收集与筛选、保护水平确定过程及结果，阐述评估方法选择依据，对于商值法，描述预测无效应浓度推导过程及结果，最后给出风险评估结论；对于证据权重法，重点描述证据链的构建过程及依据、证据链内各指标的风险计算过程及结果、单条证据链的风险计算过程及结果以及多证据链的综合风险计算过程及结果；对于概率法，重点描述污染物浓度及毒性数据的概率分布模拟过程及结果。如果存在复合污染，阐述复合污染评估过程及结果。

### C.5.3 评估结论

根据评估过程及结果，给出第二阶段风险评估结论。

## C.6 不确定性分析

### C.6.1 不确定性来源

描述导致风险评估结果不确定性的主要来源。

### C.6.2 参数敏感性分析

描述参数敏感性分析过程及结果。

## C.7 风险管控建议

结合风险评估结果，提出后续风险管控建议。

---