

# 团 体 标 准

T/ACEF ×××—××××

## 重金属污染土壤生态风险评估技术指南

Technical guidelines for ecological risk assessment for  
heavy metal contaminated soil

(征求意见稿)

××××-×-×发布

××××-×-×实施

中华环保联合会 发布



# 目 次

引 言 .....	II
前 言 .....	III
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 生态风险评估程序 .....	3
6 风险识别 (T0) .....	4
7 暴露评估 .....	5
8 效应评价 .....	9
9 综合生态风险表征 .....	13
附 录 A (资料性) 不同土地利用方式的土壤污染生态受体、评价终点和测定终点 .....	15

# 引 言

为贯彻落实《中华人民共和国环境保护法》、《土壤污染防治法》、《土壤污染防治行动计划》和党中央、环保部关于加强土壤污染防治工作，污染土壤生态风险需得到全面管控的指示，作为有效实施土壤环境质量管理的重要手段，土壤污染风险评估急需纳入污染土壤管理框架中。然而，我国现行的污染土壤管理框架中还缺乏正式的生态风险评估内容，欧美等发达国家尽管具有较为完善的土壤污染生态风险评估框架和技术指南，但是由于方法学上大多沿袭了人体健康风险评估的思路，即以单物种种群、个体及以下的生物响应为评估终点，与陆地生态系统复杂的生物—物及生物—境相互作用的实际情况不符，导致在野外实际应用中出现不确定性高、可操作性不足的缺陷，因此，在污染土壤管理中实际应用较少。

为符合我国土壤环境特征、切合土壤环境管理工作的实际需求，在大量资料收集、实地调研、实验检测、数据分析的基础上，综合国内外有关经验，提出适用于我国国情的重金属污染土壤生态风险评估体系的研究框架与方法体系，优先制定并发布我国重金属污染土壤生态风险评估技术指南。



## 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。

本文件由中国科学院生态环境研究中心提出。

本文件由中华环保联合会归口。

本文件起草单位：中国科学院生态环境研究中心、中国环境科学研究院（生态环境部土壤中心）、生态环境部南京环境科学研究所、浙江工商大学、浙江大学。





# 重金属污染土壤生态风险评估技术指南

## 1 范围

本标准规定了重金属污染土壤生态风险评估的范围、规范性引用文件、术语和定义、总体要求和生态风险评估程序、风险识别、暴露评价、效应评价、综合生态风险表征。

本标准适用于重金属污染土壤生态风险评估。

## 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。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

GB/T 27921 风险管理 风险评估技术

GB 36600-2018 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB/T 21010 土地利用现状分类

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 土壤大中型动物

HJ 1111 生态环境健康风险评估技术指南

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查 技术导则

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复 环境监测技术导则

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 682 建设用地土壤污染风险管控和修复术语

HJ 804-2016 土壤 8 种有效态元素的测定 二乙烯三胺五乙酸浸提-一感耦合等离子体发射光谱法

HJ 964 环境影响评价技术导则 土壤环境

SL/Z 467-2009 生态风险评价导则

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

### 3.1

**土壤生态风险评估** soil ecological risk assessment

通过收集、组织和分析环境数据来评估土壤污染对陆地生态系统中土壤动物、微生物和植物个体、

种群、群落以及特定生态系统的风险的过程。

### 3.2

#### 证据-一重法 weight-of-evidence (WoE)

在评估中通过组合、评估和整合证据进行技术推断的过程，在评估中证据-一重法能够用来定量估算、模型选择或得出定性结论。

### 3.3

#### 生态暴露评价 ecological exposure assessment

对生态系统暴露于土壤环境中化学性因素的暴露量、频率及持续时间进行估计或测量的过程，也包括对土壤环境中化学性因素的来源、暴露途径、暴露生态系统和特征及不确定性的分析。

### 3.4

#### 生态效应评价 ecological effect assessment

对生态受体随不同程度风险源变化情况进行评价的过程，分为生物个体、种群、群落以及生态系统等多个评估水平。

### 3.5

#### 风险表征 risk characterization

定性或定量分析在特定暴露条件下，目标生态受体暴露于土壤环境中化学性因素而发生有害效应的可能性及其不确定性的过程。

### 3.6

#### 土壤重金属化学风险 soil heavy metal chemical risk

评估区样点土壤重金属污染物总浓度及 DTPA 有效态浓度超过对照区的概率或可能性。

### 3.7

#### 土壤重金属生物累积风险 soil heavy metal bioaccumulation risk

评估区样点重金属污染土壤在生物测试中模式生物的污染物组织累积量超过对照区的概率或可能性。

### 3.8

#### 土壤重金属生态毒理学风险 soil heavy metal ecotoxicological risk

评估区样点重金属污染土壤在生物测试中模式生物的生物标记物响应与对照区相比出现显著差异的概率或可能性。

### 3.9

#### 土壤重金属生态系统风险 soil heavy metal ecosystem risk

评估区不同空间位置基于野外实际生态调查的生物群落水平以上生态效应与对照区相比出现显著差异的概率或可能性。

### 3.10

### 土壤重金属有效态含量 bioavailable heavy metal concentration

土壤中在植物生长周期内能够被植物根系吸收的元素,即能够被 DTPA 缓冲液浸提出来的土壤重金属浓度。

[来源: HJ 804-2016, 术语 3.1]

### 3.11

#### 生态受体 ecological receptor

暴露于土壤重金属污染物胁迫下的生物个体、种群和群落。

## 4 总体要求

### 4.1 场地特异性

土壤污染物暴露与效应除了与污染物性质密切相关以外,还与生态受体的生命和生态特性、土壤性质、环境条件等具有场地特异性 (site-specific) 的性质参数有关。

### 4.2 评估过程分级递进

由于污染土壤环境风险管控需要兼顾经济性和有效性,因此,分层级递进的方法有助于节约成本,并能够有效、精准的识别危害和表征风险。

### 4.3 多尺度适用性

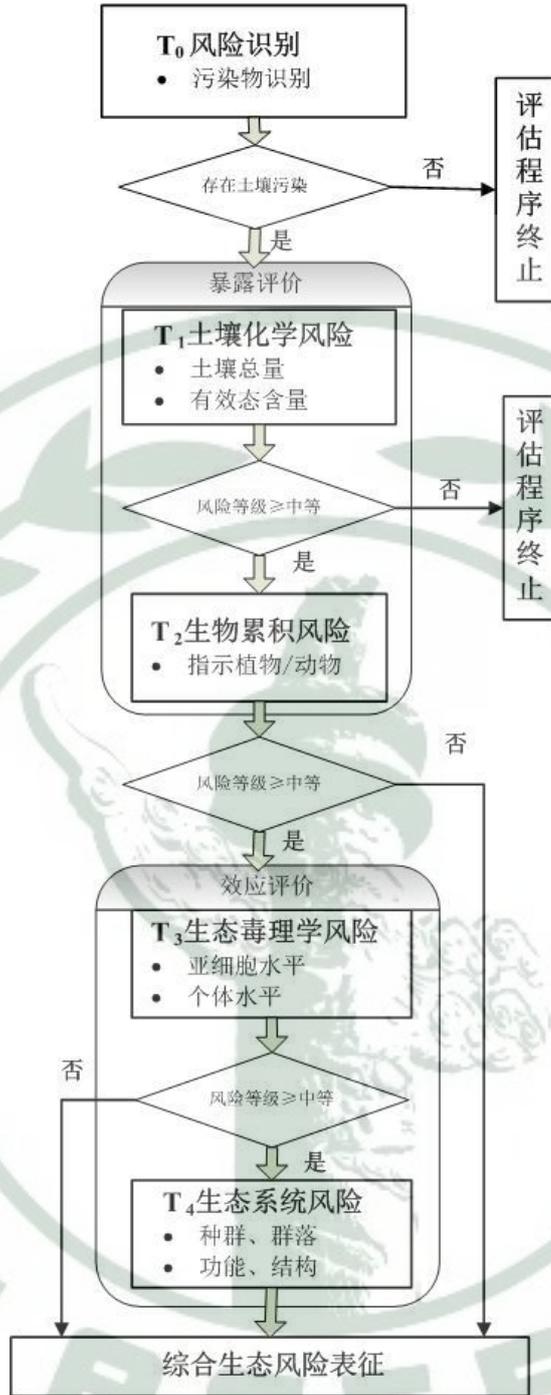
由于土壤污染物对生态受体及生态系统的暴露过程具有明显的空间多尺度特征,污染物的排放和归趋通常呈现出区域尺度上的空间异质性,迁移转化则具有典型的地块尺度上的空间异质性,生物个体对污染物的吸收和累积则表现为微观界面尺度;与不同尺度暴露相对应,生态效应也表现为不同生物水平上的生态受体和生态系统响应,具体可以概括为:生物个体一下生物水平的毒性效应往往与地块或围观界面尺度的暴露相对应,生物种群、群落和生态系统水平的毒性效应往往与地块或区域尺度暴露相对应。一般认为,低生物水平的毒性效应具有预警性,但是与生态功能的相关性较弱;而高生物水平的毒性效应更能体现生态功能,具有生态学意义。

### 4.4 证据—权重法的可靠性和可操作性

本文件基于野外实地污染土壤环境及毒性效应信息的可获得性,建立了由证据链、证据组及证据三个层级所组成的评估指标体系(资料性附录 A);采用多标准决策分析(MCDA)对权重进行定量化,即,根据数据获得方式对相关性进行定量分级,通过主成分分析、相关分析等统计学方法来定量分级强度,通过指标数据分析过程中的系统误差和随机误差来定量可靠性。

## 5 生态风险评估程序

生态风险评估程序主要包括:(1)风险识别;(2)暴露评价;(3)效应评价;和(4)综合生态风险表征。评估程序见图 1。



注：T<sub>0</sub>-T<sub>4</sub>指分级评估阶段 1-4。

图 1 重金属污染土壤生态风险评估技术框架

## 6 风险识别 (T<sub>0</sub>)

### 6.1 一般规定

风险识别主要包括以下步骤：（1）资料收集与现场踏勘；（2）污染物识别；（3）确定生态受体。通过风险识别确定是否存在土壤污染，以及污染物种类和污染程度、潜在的生态受体等，为后续是否要执行生态风险评估程序做出判断。

## 6.2 资料收集与现场踏勘

参照《建设用地土壤污染状况调查技术导则》（HJ 25.1）第一阶段土壤污染状况调查 5 的要求，以资料收集、现场踏勘和人员访谈为主的污染识别阶段，确认当前和历史有无潜在污染源。

## 6.3 污染物识别

对潜在污染源所在地块参照《建设用地土壤污染状况调查技术导则》（HJ 25.1）初步采样分析计划 6.1 的要求进行布点采样分析，布点方式及数量参考《建设用地土壤污染风险管控和修复 环境监测技术导则》（HJ 25.2）土壤监测点位布设方法 6.1.1 的要求，获得污染源地块土壤污染物的浓度数据及土壤 pH、有机质、土壤质地等理化性质数据；采用多元统计分析结合当地背景值，确定污染源地块土壤污染物种类、污染程度和范围。

## 6.4 生态受体确定

根据污染地块及周边土地利用类型确定效应评价的生态受体，土地利用类型包括三大类：林草地、农用地和建设用地。林草地的生态受体主要包括关键/目标物种、养分循环功能及自然消减功能；农用地的生态受体主要包括作物、菌根、土壤养分循环功能和土壤的自然消减功能等；建设用地的生态受体主要包括敏感植物如景观植物和草地物种、土壤养分循环、土壤自然消减功能等，具体如资料性附录 A 所示。

## 7 暴露评估

### 7.1 一般规定

暴露评估包括土壤化学风险评价（ $T_1$ ）和生物累积风险评价（ $T_2$ ）。当化学风险评价结果显示不存在风险时，评估过程终止；当结果显示存在一定风险时，继续下一阶段生物累积风险评价（ $T_2$ ）。化学风险和生物累积风险评价采用风险积分法，风险积分计算公式如下：

$$\begin{aligned} \text{Score}(HQ)_j = & \left( \%param_{RTR_w(ij) < 1.3} \times 1 \right) + \left( \%param_{1.3 \leq RTR_w(ij) < 2.6} \times 3 \right) \\ & + \left( \%param_{2.6 \leq RTR_w(ij) < 6.5} \times 9 \right) + \left( \%param_{6.5 \leq RTR_w(ij) < 13} \times 27 \right) \\ & + \left( \%param_{RTR_w(ij) \geq 13} \times 81 \right) \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

式中：

$i$ ——6.3 识别出的目标重金属污染物；

$j$ ——研究样点；

$\text{Score}(HQ)_j$ ——研究样点  $j$  的化学(生物累积) 风险积分；

$\%param_{RTR_w(ij)}$  表示样点  $j$  中处于某一风险等级下的证据数量占有所有评估证据数量的比例；

$RTR_w(i, j)$  ——经权重和 Z 值校正后的样点  $j$  中污染物  $i$  相对累积指数，计算公式见下述 7.2 和 7.3；其中化学风险及生物累积风险权重计算见图 2 及图 3：

T/ACEF ×××—××××

$$Z(i, j) = \begin{cases} 1, & 0 \leq p \leq 0.05 \\ 3.5 - 50 \times p(i, j), & 0.05 < p \leq 0.06 \dots\dots\dots(2) \\ 0.2 \times p(i, j)^{-0.3275}, & 0.06 < p \leq 1 \end{cases}$$

式中：

$p(i, j)$ 为样点  $j$  与对照之间污染物  $i$  累积浓度差异的显著性水平  $p$ 。

注：若野外调查及实验室分析时缺少重复，则默认  $Z$  为 1。

风险积分分级如表 1 所示

表 1 化学风险和生物累积风险分级表

相对累积指数 $RTR_w$	化学（生物累积）风险积分 Score (HQ)	级别
$0 < RTR_w < 1.3$	Score (HQ) < 100	无风险
$1.3 \leq RTR_w < 2.6$	$100 \leq \text{Score (HQ)} < 300$	轻微
$2.6 \leq RTR_w < 6.5$	$300 \leq \text{Score (HQ)} < 900$	中等
$6.5 \leq RTR_w < 13$	$900 \leq \text{Score (HQ)} < 2700$	严重
$RTR_w \geq 13$	$2700 \leq \text{Score (HQ)}$	极严重

## 7.2 化学风险评价 ( $T_1$ )

### 7.2.1 数据获取

依据污染物识别 6.3 的采样分析结果，参考《环境影响评价—土壤环境（试行）》（HJ964-2018）调查评价范围 7.2 污染影响型所规定，以污染源地块为中心向外辐射 1-2 Km 空间范围作为评估区域，采用分区布点法布置调查采样点，污染源地块为中心向外 100 m 范围内按照 40 m×40 m 布点采样；100 m 以外区域按照 200 m×200 m 网格布点，每个网格采集 10 m×10 m 表层 0-20 cm 混合土壤样品，同时记录周边环境及土地利用类型；分析土壤样品中 6.3 所识别的重金属总量及有效态（DTPA 提取态）含量，以及土壤 pH 值、有机质、土壤质地、CEC 等土壤理化性质。土壤重金属有效态含量采用《土壤 8 种有效态元素的测定—二乙烯三胺五乙酸浸提—电感耦合等离子体发射光谱法》（HJ 804-2016）

### 7.2.2 对照点确定

对照点选择参考《建设用地土壤污染风险管控和修复 环境监测技术导则》（HJ 25.2）土壤对照点位的布设方法 6.1.1.4 要求，相关土壤参数，例如质地、pH 值、有机质、持水能力、养分含量等方面，原则上应与污染土壤相似。

### 7.2.3 确定参考值

土壤污染物总量及有效态含量的参考值选择对照点土壤样品重金属污染物总量及有效态浓度。

### 7.2.4 化学风险指数（HQ 化学）计算

采用相对风险指数法计算重金属污染化学风险指数，见公式（3）-（5）：

$$HQ_{\text{化学-总量/有效态}}(j) = \frac{\sum_{i=1}^N RTR_w(i, j)_{1.3 \leq RTR_w < 2.6}}{N} + \sum_{i=1}^M RTR_w(i, j)_{RTR_w \geq 2.6} \dots\dots\dots(3)$$

$$RTR_w(i, j) = RTR(i, j) \times Z(i, j) \times w(i, j) \dots \dots \dots (4)$$

$$RTR(i, j) = \frac{C_{\text{总量/有效态}}(i, j)}{C_{\text{对照-总量/有效态}}(i)} \dots \dots \dots (5)$$

式中：

$i$ ——6.3 中识别出的目标重金属污染物；

$j$ ——研究样点；

$HQ_{\text{化学-总量/有效态}}(j)$  ——样点  $j$  的重金属污染物总量/有效态含量的化学风险指数，样点  $j$  的总化学风险指数为总量和有效态含量的化学风险指数的平均值；

$RTR_w(i, j)$  ——经权重和  $Z$  值校正后的样点  $j$  中污染物  $i$  相对累积指数；

$RTR(i, j)$  ——样点  $j$  中重金属污染物  $i$  的相对累积指数；

$N$ ——样点中重金属污染物的相对累计指数  $RTR_w$  在 1.3-2.6 之间的总数；

$M$ ——样点中重金属污染物的相对累计指数  $RTR_w$  超过 2.6 的总数；

$C_{\text{对照-总量/有效态}}(i)$  ——重金属污染物  $i$  土壤总浓度或有效性浓度的参考值；

$C_{\text{总量/有效态}}(i, j)$  ——样点  $j$  中重金属污染物  $i$  的实测土壤总浓度和生物有效性浓度；

$Z(i, j)$  ——样点  $j$  与对照之间重金属污染物浓度  $i$  的差异指数，与显著性水平  $p$  有关，计算公式见上述 7.1 公式 (2)；

$w(i, j)$  ——样点  $j$  重金属污染物  $i$  的权重，计算过程如图 2 所示。



图 2 化学风险指数计算中的权重确定过程

### 7.2.5 化学风险评价

基于经权重校正后的重金属污染物总量和有效态含量的相对累积指数  $RTR_w(i, j)$  进行化学风险评价。首先根据总量和有效态含量的  $RTR_w(i, j)$  值的数据分布分别计算土壤重金属污染物总量和有效态含量的

T/ACEF ×××—××××

化学风险积分，具体计算公式如 7.1 中的公式（1）所示；其次，每个样点  $j$  的化学风险积分为重金属总量和有效态含量的化学风险积分的平均值，根据积分分级表（表 1）的级别评价化学风险。

### 7.3 生物累积风险评价（ $T_2$ ）

#### 7.3.1 数据获取

参考 7.2 化学风险评价结果，在 7.2.1 所布置的调查样点中，按不同风险级别分别选取土壤样品供生物测试，每个风险级别的供试样品原则上不少于 3 个，如果样品总数不足 3 个，则全部用于生物测试，多于三个的可以按照最低比例 30% 确定数量。选择敏感生物蚯蚓为测试生物。

#### 7.3.2 确定参考值

以对 7.2.2 所确定的照点土壤培养试验样本数据作为参考值。

#### 7.3.3 生物累积风险（ $HQ_{生物累积}$ ）指数计算

采用相对风险指数法计算重金属污染的生物累积风险指数，见公式（6）-（8）：

$$HQ_{生物累积}(j) = \frac{\sum_{i=1}^N RTR_w(i,j)_{1.3 \leq RTR_w < 2.6}}{N} + \sum_{i=1}^M RTR_w(i,j)_{RTR_w \geq 2.6} \dots \dots \dots (6)$$

$$RTR_w(i,j) = RTR_{生物累积}(i,j)_{>0} \times Z(i,j) \times weight(i,j) \dots \dots \dots (7)$$

$$RTR_{生物累积}(i,j) = \frac{B_{样品}(i,j) - B_{对照}(i)}{B_{对照}(i)} \dots \dots \dots (8)$$

式中：

$i$ ——识别出的目标重金属污染物；

$j$ ——研究样点；

$HQ_{生物累积}(j)$ ——样点  $j$  的重金属污染生物累积风险指数；

$RTR_w(i,j)$ ——权重和  $Z$  值校正后的样点  $j$  中重金属污染物  $i$  的相对生物累积指数；

$RTR_{生物累积}(i,j)$ ——样点  $j$  中重金属污染物  $i$  的相对生物累积指数；

$N$ ——样点中污染物相对生物累积指数  $RTR_w$  在 1.3-2.6 之间的总数；

$M$ ——样点中污染物相对生物累积指数  $RTR_w$  超过 2.6 的总数；

$B_{样品}(i,j)$ ——样点  $j$  中污染物  $i$  的生物累积浓度平均值；

$B_{对照}(i)$ ——对照点的污染物  $i$  生物累积浓度平均值；

$Z(i,j)$ ——样点  $j$  与对照之间污染物  $i$  生物累积浓度的差异指数，与显著性水平  $p$  有关，计算公式见上述 7.1 公式（2）；

$w(i,j)$ ——样点  $j$  污染物  $i$  的权重，确定步骤如图 3 所示。



图 3 生物累积风险权重确定过程

### 7.3.4 生物累积风险评价

首先，根据重金属污染物  $i$  经权重和 Z 值校正后的污染物相对生物累积指数  $RTR_w(i,j)$  的数据分布计算积分，计算公式见上述 7.1 公式 (1)，其次，依据积分级别进行风险评价，见 7.1 表 1。

## 8 效应评价

### 8.1 一般要求

效应评估包括生态毒理学效应和生态系统效应两个方面，分别对应生态毒理学风险评价 (T3) 和生态系统风险评价 (T4)。生态毒理学风险指标包括个体及以下水平的毒性效应；生态系统风险指标包括生物种群、群落水平以上针对生态系统结构、过程和功能的毒性效应。生态毒理学风险和生态系统风险评价的层级关系如下：当生态毒理学风险评价结果显示为中等风险水平一下时，评估过程终止；当生态毒理学效应评价结果显示严重和极严重风险时，继续进行生态系统风险评价。一般评价过程包括数据获取；胁迫—效应关系（暴露—响应关系）分析；权重确定；风险指数计算；风险分级评价等四个步骤。

效应评价中生态毒理学风险和生态系统风险积分计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 \text{Score}(HQ)_j = & \left( \%param_{RTR_w(i,j) < 1.3} \times 1 \right) + \left( \%param_{1.3 \leq RTR_w(i,j) < 2.6} \times 3 \right) \\
 & + \left( \%param_{2.6 \leq RTR_w(i,j) < 6.5} \times 9 \right) + \left( \%param_{6.5 \leq RTR_w(i,j) < 13} \times 27 \right) \\
 & + \left( \%param_{RTR_w(i,j) \geq 13} \times 81 \right) \dots\dots\dots(9)
 \end{aligned}$$

式中：

$i$ ——生态毒理学及生态系统风险证据链中的有效证据；

$j$ ——研究样点；

$\text{Score}(HQ)_j$ ——研究样点  $j$  的生态毒理（生态系统）风险积分；

$\%param_{RTR_w(i,j)}$  表示样点  $j$  中处于某一风险等级下的证据数量占所有评估证据数量的比例；

$RTR_w(i, j)$  ——经权重和  $Z$  值校正后的样点  $j$  中证据  $i$  相对生态效应指数，计算公式见下述 8.2 和 8.3；其中权重计算见图 3， $Z$  值计算公式如下：

$$Z(i, j) = \begin{cases} 1, & 0 \leq p \leq 0.05 \\ 3.5 - 50 \times p(i, j), & 0.05 < p \leq 0.06 \\ 0.2 \times p(i, j)^{-0.3275}, & 0.06 < p \leq 1 \end{cases} \dots\dots\dots(10)$$

式中：

$p(i, j)$  为样点  $j$  与对照之间证据  $i$  差异的显著性水平  $p$ 。

注：若野外调查及实验室分析时缺少重复，则默认  $Z$  为 1。

风险积分分级如表 2 所示

表 2 生态毒理学风险和生态系统风险分级表

相对生态效应指数 $RTR_w$	生态效应风险指数积分 Score (HQ)	级别
$RTR_w < 0.7$	Score (HQ) < 70	无风险
$0.7 \leq RTR_w < 1$	$70 \leq \text{Score (HQ)} < 100$	轻微
$1 \leq RTR_w < 2$	$100 \leq \text{Score (HQ)} < 200$	中等
$2 \leq RTR_w < 3$	$200 \leq \text{Score (HQ)} < 400$	严重
$RTR_w \geq 3$	$400 \leq \text{Score (HQ)} < 800$	极严重

## 8.2 生态毒理学风险评价 (T<sub>3</sub>)

### 8.2.1 数据获取

采用 7.3.1 所确定的土壤样品进行生态毒理学生物测试，测试生物依据 6.4 所确定的生态受体，参考资料性附录 A 选择敏感植物以及土壤动物蚯蚓及响应的评价终点进行毒理学生物测试。

### 8.2.2 胁迫—效应关系分析

根据所确定的评价终点，采用实验室毒性测试、野外毒性测试和野外直接调查等手段进行相关测定终点（指标）的分析；采用相关分析方法对指标与土壤污染物浓度（包括总量、生物有效性浓度及组织残留浓度）及污染程度（如，综合污染指数）之间进行胁迫—效应关系分析，筛选出与主导污染物浓度或综合污染指数之间的呈显著关系的指标（ $p < 0.05$ ），作为有效的证据纳入到证据链中。

### 8.2.3 确定参考值

以 7.2.2 规定的对照点土壤培养试验样本数据作为参考值。

#### 8.2.4 生态毒理学风险指数(HQ 生态毒理学)计算

采用相对风险指数法计算生态毒理学风险指数，计算公式如下：

$$HQ_{\text{生态毒理学}}(j) = \frac{\sum_{i=1}^N RTR_w(i,j)_{0.7 \leq RTR_w < 1}}{N} + \sum_{i=1}^M RTR_w(i,j)_{RTR_w \geq 1} \dots \dots \dots (11)$$

$$RTR_w(i,j) = RTR_{\text{生态毒理学}}(i,j) \times \frac{Z(i,j) \times w(i,j)}{Th_{\text{抑制/诱导}}} \dots \dots \dots (12)$$

$$RTR_{\text{生态毒理学}}(i,j) = \left| \frac{T_{\text{样品}}(i,j) - T_{\text{对照}}(i)}{T_{\text{对照}}(i)} \right| \dots \dots \dots (13)$$

式中：

$i$ ——生态毒理学风险证据链中的有效证据；

$j$ ——研究样点；

$HQ_{\text{毒理学}(j)}$ ——样点  $j$  的生态毒理学风险指数；

$RTR_w(i,j)$ ——样点  $j$  中经过权重、 $Z$  值和毒性指标抑制/诱导阈值校正过的证据  $i$  的相对生态毒性指数；

$RTR_{\text{Ecotoxic}(i,j)}$ ——样点  $j$  证据  $i$  的相对生态毒性指数；

$N$ ——样点中证据的相对生态毒性指数  $RTR_w$  在 0.7-1 之间的总数；

$M$ ——样点中证据的相对生态毒性指数超过 1 的总数；

$Z(i,j)$ ——样点  $j$  指标  $i$  与对照生态毒性指标  $i$  的数据之间差异指数，与显著性水平  $p$  有关，计算公式见 8.1 公式 (10)；

$Th_{\text{抑制/诱导}}$ ——毒性指标抑制/诱导阈值，在这里分别设为 0.2 和 0.3，表明毒理学指标响应抑制/诱导分别超过 20% 和 30% 视为效应显著；

$T_{\text{样品}}(i,j)$ ——研究样点  $j$  生态毒性指标  $i$  的平均值；

$T_{\text{对照}}(i)$ ——对照点生态毒性指标  $i$  的平均值；

$w(i,j)$ ——毒性指标权重，生态毒理学风险指数的权重确定过程与生物累积风险权重确定过程一致，如图 3 所示。

#### 8.2.5 生态毒理学风险评价

首先，根据测定指标  $i$  经权重校正后的相对毒性指数  $RTR_w(i,j)$  的数据分布，计算生态毒理学风险积分 Score ( $HQ_{\text{Ecotoxic}}$ )，计算公式见上述 8.1 公式 (9)，其次，根据积分进行风险评价，见 8.1 表 2。

### 8.3 生态系统风险评价 (T<sub>4</sub>)

#### 8.3.1 数据获取

根据 7.2.1 所确定的评估空间范围，参考《土地利用现状分类》(GB/T 21010)，选择评估区内农用地(耕地+园地)、林草地和建设用地(商服用地+工矿仓储用地+住宅+交通+公共管理与公共服务用地+特殊用地)等三大类土地利用类型设置生态调查样地，样地尽可能覆盖 7.2.1 中的土壤调查样点，如果无法覆盖，在生态调查样地中按照 7.2.1 的土壤样品采集方法同时采集土壤样品。生态系统水平的生态受体选择根据 6.4 所确定结果，植物调查样方设置按照《生物多样性观测技术导则 陆生维管植物》

T/ACEF ×××—××××

(HJ 710.1)；土壤动物调查样方设置按照《生物多样性观测技术导则 土壤大中型动物》(HJ 710.10)。评估区范围内分布于不同空间位置的同一土地利用类型总数不少于 3 个。生态调查指标包括种群、群落组成、结构和功能性状。

### 8.3.2 胁迫—效应关系（暴露—响应关系）分析

通过主成分分析、蒙特卡洛模拟、*k-Means* 聚类分析等手段对生态调查指标与土壤污染物浓度（包括总量、生物有效性浓度及组织残留浓度）及污染程度（如，综合污染指数）之间进行胁迫—效应关系分析，筛选出与主导污染物浓度或综合污染指数之间呈显著关系的指标 ( $p < 0.05$ )，作为有效的证据纳入到证据链中。

### 8.3.3 对照点及确定参考值

对照点应从生境类型相似并具有可比性的点位中选择人类活动干扰最小，或胁迫因子产生影响最小的点位；对照点的相关土壤参数，例如质地、pH 值、有机质、持水能力、养分含量等方面，原则上应与污染土壤相似。

以对照点的生态调查数据作为参考值。

### 8.3.4 生态系统风险指数( $HQ_{\text{生态系统}}$ )计算

采用相对风险指数法计算生态系统风险指数，计算公式如下：

$$HQ_{\text{生态系统}}(j) = \frac{\sum_{i=1}^N RTR_w(i, j)_{0.7 \leq RTR_w < 1} + \sum_{i=1}^M RTR_w(i, j)_{RTR_w \geq 1}}{N} \dots\dots\dots (13)$$

$$RTR_w(i, j) = \frac{RTR_{\text{生态系统}}(i, j)}{Th(i)} \times Z(i, j) \times w(i, j) \dots\dots\dots (14)$$

$$RTR_{\text{生态系统}}(i, j) = \left| \frac{E_{\text{样点}}(i, j) - E_{\text{对照}}(i)}{E_{\text{对照}}(i)} \right| \dots\dots\dots (15)$$

式中：

$i$ ——生态系统风险证据链中的有效证据；

$j$ ——研究样点；

$HQ_{\text{生态系统}}(j)$ ——样点  $j$  的生态系统风险指数；

$RTR_w(i, j)$ ——经过权重、 $Z$  值和指标抑制/诱导阈值校正过的样点  $j$  证据  $i$  的相对生态系统效应指数；

$RTR_{\text{Ecotoxic}}(i, j)$ ——样点  $j$  中证据  $i$  的相对生态系统效应指数；

$N$ ——样点中证据的相对生态系统效应指数  $RTR_w$  在 0.7-1 之间的总数；

$M$ ——样点中证据的相对生态系统效应指数  $RTR_w$  超过 1 的总数；

$Z(i, j)$ ——样点  $j$  与对照的生态系统效应指标  $i$  之间差异指数，与显著性水平  $p$  有关，参考 8.1 公式 (10)；

$Th_{\text{抑制/诱导}}$ ——指标抑制/诱导阈值，在这里分别设为 0.2 和 0.3，表明生态系统效应指标响应抑制/诱导分别超过 20%和 30%视为效应显著；

$E_{\text{样点}}(i, j)$ ——样点  $j$  生态系统效应指标  $i$  的平均值； (M)

$E_{\text{对照}}(i)$ ——对照点生态系统效应指标  $i$  的平均值；

$w(i, j)$ ——效应指标权重确定过程同生物累积风险和生态毒理学风险评价，见图 3。

### 8.3.5 生态系统风险分级评价

首先，根据测定终点  $i$  经权重、 $Z$  值和阈值校正后的相对生态系统效应指数  $RTR_w(i, j)$  的数据分布，对相对效应指数进行积分，即，计算  $Score(HQ_{\text{生态系统}})$ ，计算公式见 8.1 公式 (9)；其次，根据风险分级表 (8.1 表 2) 进行评价。

## 9 综合生态风险表征

### 9.1 一般要求

当有效证据链达到 2 条及以上时计算综合生态风险，原则上对每一个调查样点分别进行所有证据链的综合生态风险评价，证据链之间如出现样点不一致的情况，应选择具备完整证据链的样点进行综合生态风险指数计算，使评估区范围内不同样点之间具有可比性；由于在评价每条证据链的风险时，已经对所包含的证据进行了可靠性、相关性和强度的控制，因此，综合生态风险计算中每条证据链的权重设置主要为了区别不同样点之间的差异，而不是为了区别不同证据链之间的重要性。根据以上原则，采用每个样点的每条证据链所包含的证据的权重取平均值的方法获得证据链的权重。

### 9.2 综合生态风险指数 ( $HQ_{\text{综合}}$ ) 计算

对每一条证据链的风险指数进行归一化处理，进行加权平均后计算综合生态风险指数，计算公式如下：

$$HQ_{\text{综合}}(j) = \frac{\sum_{i=1}^4 (HQ(i, j) - N \times W(i, j))}{\sum_{i=1}^4 W(i, j)} \dots\dots\dots (16)$$

$$HQ(i, j) - N = \frac{HQ(i, j) - \text{Min}(HQ(i))}{\text{Max}(HQ(i)) - \text{Min}(HQ(i))} \dots\dots\dots (17)$$

$$W(i, j) = (\sum_{k=1}^n w(k, i, j)) / n \dots\dots\dots (18)$$

式中：

$j$ ——研究样点；

$i$ ——证据链，包括化学风险、生物累积风险、生态毒理学风险和生态系统风险 4 条证据链；

$HQ_{\text{综合}j}$ ——第  $j$  个样点的综合生态风险指数；

$HQ(i, j) - N$ ——第  $j$  个样点中利用极值归一化处理后的第  $i$  条证据链风险指数；

$HQ(i, j)$ ——第  $j$  个样点中第  $i$  条证据链风险指数；

$\text{Min}(HQ(i))$ ——所有研究样点中第  $i$  条证据链风险指数的最小值；

$\text{Max}(HQ(i))$ ——所有研究样点中第  $i$  条证据链风险指数的最大值；

$W(i, j)$ ——第  $j$  个样点中第  $i$  条证据链的权重；

$w(k, i, j)$ ——第  $j$  个样点中第  $i$  条证据链中证据  $k$  的权重；

$k$ ——每条证据链中的证据；

T/ACEF ×××—××××

n——每条证据链中证据的个数

### 9.3 综合生态风险评价

基于不同土地利用类型的综合生态风险指数分级标准进行综合生态风险评价,综合生态风险指数分级标准见表3。

表3 综合生态风险指数划分等级表

证据链之间标准差 (D)	综合生态风险指数 ( $HQ_{综合}$ )	基于土地利用类型的评估结论	
		可接受	不可接受
D<0.4	$0.00 < HQ_{综合} \leq 0.25$	N, A, R, I	
	$0.25 < HQ_{综合} \leq 0.50$	A, R, I	N, A (存在特殊保护目标)
	$0.50 < HQ_{综合} \leq 0.75$	I (R)	N, A, R (特殊环保要求)
	$0.75 < HQ_{综合} \leq 1.00$	I (不透水地表)	N, A, R, I (特殊环保要求)
D>0.4, 或者进一步收集数据再次评估	$0.00 < HQ_{综合} \leq 0.25$	A, R, I	N, A (存在特殊保护目标)
	$0.25 < HQ_{综合} \leq 0.50$	I (R)	N, A, R (特殊环保要求)
	$0.25 < HQ_{综合} \leq 1.00$	I (R)	N, A, R (特殊环保要求)

注: N, A, R, I 分别指自然覆被、农业用地、住宅用地和工业用地

附录 A  
(资料性)  
不同土地利用方式的土壤污染生态受体、评价终点和测定终点

附表 A.1 不同土地利用方式的土壤污染生态受体、评价终点和测定终点

土地利用方式	生态受体	评价终点 (证据链/证据组)	测定终点 (证据组/证据)	
			个体水平	种群/群落/生态系统水平
林草地	关键/目标物种	土壤动物/植物生长与多样性	DNA 损伤、氧化酶活性、同工酶、自由基含量、mRNA、蛋白质、细胞/组织完整性、生长速率、器官衰竭	种群数量、密度、繁殖率、死亡率、丰富度、多样性指数、生物量、盖度
	养分循环功能	土壤微生物功能、功能微生物多样性 (碳/氮/磷/硫/铁)		土壤基础呼吸、诱导呼吸、微生物量碳、水解酶、氧化酶、腐殖酶、矿化氮、硝化潜势、反硝化酶、脲酶、磷酸酶、芳香硫酸酯酶、丰度、多样性指数、分子生态网络结构
		土壤蚯蚓生长与多样性	DNA 损伤、氧化酶活性、同工酶、自由基含量、mRNA、蛋白质、细胞/组织完整性、生长速率、致死率、生物量、运动行为	种群数量、密度、繁殖率、死亡率、丰富度、多样性指数、生物量
		土壤线虫生长与多样性	致死率、生物量生长速率、运动行为、细胞/组织完整性、氧化酶活性、同工酶、自由基含量、mRNA、蛋白质、抗性基因	种群数量、密度、繁殖率、死亡率、物种组成、丰富度、多样性指数、功能类群指数、生物量
	自然消减功能	土壤吸附/淋溶作用		土壤有机质 (碳)、总碳/总氮、黏粒、pH/电导率

附表 A.1 不同土地利用方式的土壤污染生态受体、评价终点和测定终点 (第 2 页/共 3 页)

土地利用方式	生态受体	评估终点 (证据链/证据组)	测定终点 (证据组/证据)	
			个体水平	种群/群落/生态系统水平
农用地 (耕地和园地)	敏感作物	发芽、生长、光合作用、 代谢作用	发芽率、根系伸长、产量、叶绿素含量、抗氧化 系统	
	菌根	生物多样性、生态功能	根外菌丝密度、菌丝量、孢子量、孢子发芽势、 丛枝数、泡囊数	丰富度、多样性指数、菌根侵染率、活性(琥珀酸脱氢 酶和碱性磷酸酶)、菌丝内 P 浓度、P 转运蛋白
	养分循环	土壤微生物功能、功能 微生物多样性(碳/氮/ 磷/硫/铁)		土壤基础呼吸、诱导呼吸、微生物量碳、水解酶、氧化 酶、腐殖酶、矿化氮、硝化潜势、反硝化酶、脲酶、磷 酸酶、芳香硫酸酯酶、丰度、多样性指数、分子生态网 络结构
		土壤蚯蚓生长与多样 性	DNA 损伤、氧化酶活性、同工酶、自由基含量、 mRNA、蛋白质、细胞/组织完整性、生长速率、 致死率、生物量、运动行为	种群数量、密度、繁殖率、死亡率、丰富度、多样性指 数、生物量
		土壤线虫生长与多样 性	致死率、生物量生长速率、运动行为、细胞/组织 完整性、氧化酶活性、同工酶、自由基含量、mRNA、 蛋白质、抗性基因	种群数量、密度、繁殖率、死亡率、物种组成、丰富度、 多样性指数、功能类群指数、生物量
自然消减功能	土壤吸附/淋溶作用		土壤有机质(碳)、总碳/总氮、黏粒、pH/电导率	

附表 A.1 不同土地利用方式的土壤污染生态受体、评价终点和测定终点 (第 3 页/共 3 页)

土地利用方式	生态受体	评价终点 (证据链/证据组)	测定终点 (证据组/证据)	
			个体水平	种群/群落/生态系统水平
建设用地 (商服用地+工矿 仓储用地+住宅+交通+公共管 理与公共服务用 地+特殊用地)	敏感植物 (路边植物/草地物 种/观赏植物)	植物生长与多样性	DNA 损伤、氧化酶活性、同工酶、自由基含量、 mRNA、蛋白质、细胞/组织完整性	种群数量、密度、繁殖率、丰富度、多样性指数、生物量、 盖度
	养分循环	土壤微生物功能、功能 微生物多样性 (碳/氮/ 磷/硫/铁)		土壤基础呼吸、诱导呼吸、微生物量碳、水解酶、氧化酶、 腐殖酶、矿化氮、硝化潜势、反硝化酶、脲酶、磷酸酶、芳 香硫酸酯酶、丰度、多样性指数、分子生态网络结构
		土壤蚯蚓生长与多样性	DNA 损伤、氧化酶活性、同工酶、自由基含量、 mRNA、蛋白质、细胞/组织完整性、生长速率、致 死率、生物量、运动行为	种群数量、密度、繁殖率、死亡率、丰富度、多样性指数、 生物量
		土壤线虫生长与多样性	致死率、生物量生长速率、运动行为、细胞/组织 完整性、氧化酶活性、同工酶、自由基含量、mRNA、 蛋白质、抗性基因	种群数量、密度、繁殖率、死亡率、物种组成、丰富度、多 样性指数、功能类群指数、生物量
自然消减功能	土壤吸附/淋溶作用		土壤有机质 (碳)、总碳/总氮、黏粒、pH/电导率	