

团 体 标 准

T/CQSES 01-2021

固体废物资源化健康风险 评估技术指南

Technical Guide for Health Risk Assessment of Solid Waste
Recycling

2021-10-11 发布

2021-10-11 实施

重庆市环境科学学会 发布

目 次

前 言.....	II
引 言.....	III
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	2
4 风险评估的程序.....	3
5 总体技术要求.....	4
6 资源化过程健康风险评估的技术要求.....	6
7 资源化产品健康风险评估的技术要求.....	6
8 不确定性分析.....	7
附录 A.....	9
附录 B.....	11
附录 C.....	14

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。

本文件由中央民族大学提出，重庆市环境科学学会归口。

本文件起草单位：中央民族大学、重庆交通大学、招商局生态环保科技有限公司、重庆博洲环境治理有限公司、昱源宁海环保科技股份有限公司、创环国际环境科技（北京）有限公司、安徽省通源环境节能股份有限公司。

本文件主要起草人：唐阵武、杨延梅、李广辉、秦燕、汪军、胡犇、徐昱熨、胡双林、安迪、岳晓露。

本文件为首次发布。

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》《中华人民共和国循环经济促进法》，加强固体废物资源化的风险管理，指导和规范固体废物资源化过程和资源化产品的健康风险评估工作，制定本文件。

固体废物资源化健康风险评估技术指南

1 范围

本文件规定了固体废物资源化过程和资源化产品健康风险评估的工作程序、内容、方法和技术要求。

本文件适用于尾矿（含放射性物质的尾矿除外）、粉煤灰、煤矸石、冶炼废渣、脱硫石膏、磷石膏、赤泥、表面处理污泥、煤粉炉炉渣、生活垃圾焚烧炉渣、生活垃圾焚烧飞灰等固体废物资源化的非职业人群健康风险评估。其它类似的固体废物资源化可参照执行。

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。所有引用文件，都以其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 8978 污水综合排放标准

GB 16297 大气污染物综合排放标准

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 27921 风险管理 风险评估技术

HJ 298 危险废物鉴别技术规范

HJ 169 建设项目环境风险评价技术导则

HJ 884 污染源源强核算技术指南 准则

HJ 2.2 环境影响评价技术导则 大气环境

HJ 964 环境影响评价技术导则 土壤环境（试行）

HJ 2.3 环境影响评价技术导则 地表水环境

HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

HJ 877 暴露参数调查技术规范

HJ 875 环境污染物人群暴露评估技术指南

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

固体废物 solid waste

在生产、生活和其他活动中产生的丧失原有利用价值或者虽未丧失利用价值但被抛弃或者放弃的固态、半固态和置于容器中的气态的物品、物质以及法律、行政法规规定纳入固体废物管理的物品、物质。经无害化加工处理，并且符合强制性国家产品标准，不会危害公众健康和生态安全，或者根据固体废物鉴别标准和鉴别程序认定为不属于固体废物的除外。

3.2

资源化过程 recycling process

将固体废物作为原料进行加工处理的过程。

3.3

资源化产品 recycling product

固体废物经加工处理后所形成的产品或原材料。

3.4

化学毒性物质 toxic chemical

进入人体体内或接触皮肤能与机体组织发生作用，破坏正常生理功能，引起机体暂时性或永久性病变，甚至死亡的化学物质。

3.5

特定可迁移量 specific migration

应用有关产品标准规定的方法，测定得到的从资源化产品迁移至模拟物中化学毒性物质的量。

3.6

暴露场景 exposure scenario

给定条件下用来辅助评估和量化受体暴露的一系列关于排放源和排放场景、暴露途径、暴露参数和暴露受体的事实、推定和假设。

3.7

间接暴露 indirect exposure

化学毒性物质释放至环境，再经环境进入人体的方式。

3.8

直接暴露 direct exposure

化学毒性物质通过人体接触而直接进入人体的方式。

3.9

健康风险 health risk

化学毒性物质暴露导致的人体未来发生某种特定伤害或因为某种特定伤害导致死亡的可能性。

3.10

不确定性 uncertainty

由于科学认识不足、评估方法局限和基础数据欠缺等因素，导致固体废物资源化健康风险评估结果的准确性受到影响的情况。

4 风险评估的程序

固体废物资源化健康风险评估按图 1 所示的程序进行。

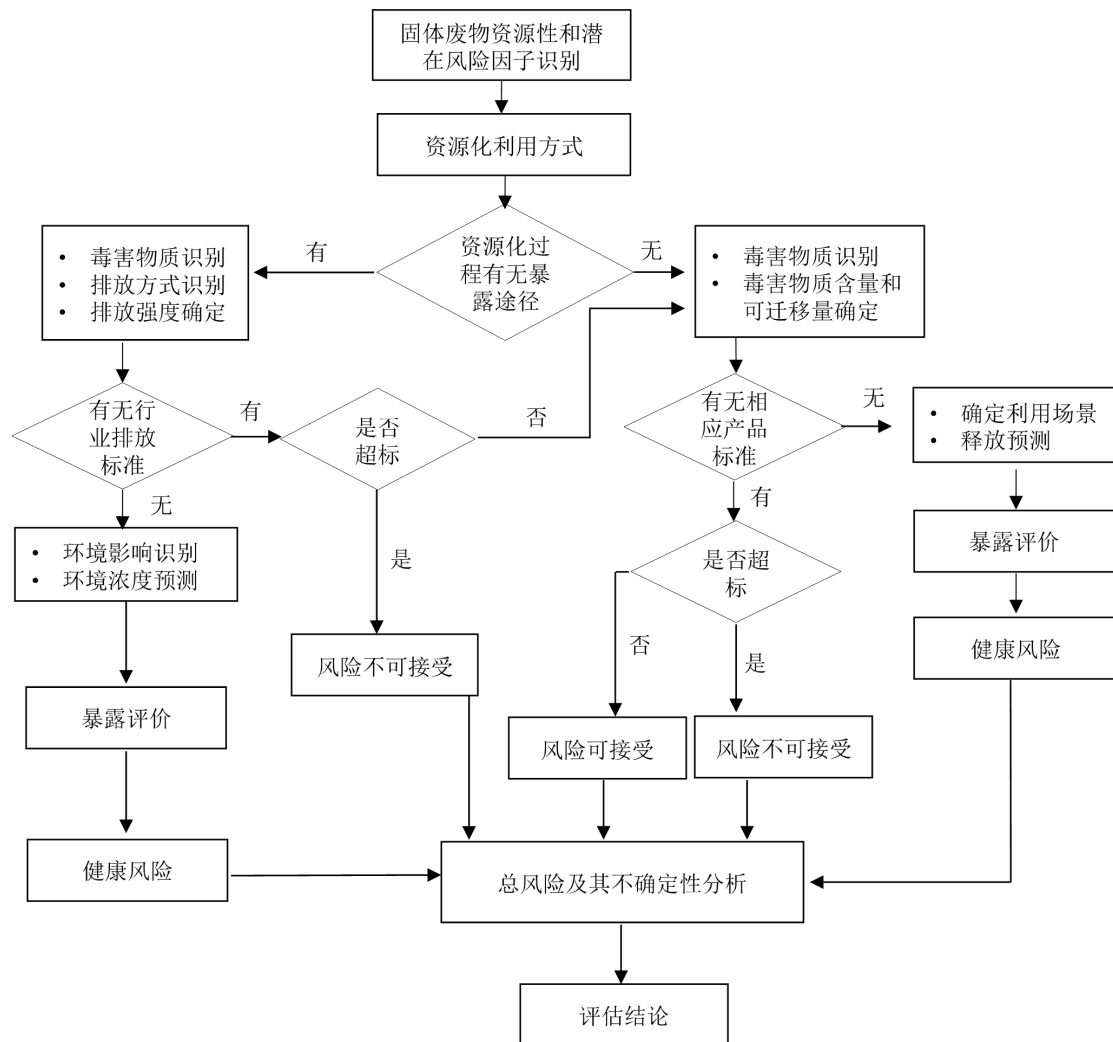


图 1 固体废物资源化健康风险评估工作程序

5 总体技术要求

5.1 化学毒性物质的筛选

依据 GB 5085.6、GB 5085.3、HJ 169、《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》以及固体废物资源化和资源化产品有关标准规定的化学毒性物质，筛选确定固体废物和资源化产品中存在的、资源化过程排放的化学毒性物质类别。

固体废物资源化产品中化学毒性物质，属于资源化产品的目标有价金属的，不应作为资源化产品健康风险评估的化学毒性物质。

5.2 化学毒性物质含量的确定

固体废物资源化过程和资源化产品健康风险评估中，检测的化学毒性物

质含量（特定迁移量）以均值的 95%置信区间上限计。

5.3 暴露参数的确定

5.3.1 暴露途径分为呼吸吸入、皮肤接触以及经口摄入途径。

5.3.2 固体废物资源化过程的暴露途径，依据当地非职业人群接触环境介质方式确定。固体废物资源化产品的暴露途径，依据资源化产品的使用场景确定。

5.3.3 暴露参数来源的优先顺序为：依据 HJ 877 现场调查获得数据、《中国人群暴露参数手册》推荐的参数值、国际权威组织（机构）推荐的参考值。

5.4 化学毒性物质相关参数的获取

5.4.1 理化性质参数可参考 HJ 25.3 或国际权威组织（机构）推荐的参考值。

5.4.2 参考剂量可直接引用国际权威组织（机构）推荐的最小参考值。无推荐值时，应先确定关键效应，再依据无可见有害作用水平或最小可见损害作用水平，选择不确定性系数计算参考剂量。

5.4.3 致癌斜率因子可查询 HJ 25.3 或国际权威组织（机构）的数据库，选取最大推荐值。无推荐值时可依据人群流行病学和有关毒理资料估算。

5.5 风险评估结果的判定

5.5.1 固体废物资源化过程排放的化学毒性物质，根据行业排放标准确定。达标排放的健康风险可接受，不达标排放的健康风险不可接受。

5.5.2 固体废物资源化产品中单一化学毒性物质含量（特定迁移量）或多个化学毒性物质总含量（总特定迁移量），满足产品标准要求健康风险可接受，不满足产品标准要求健康风险不可接受。

5.5.3 无标准或标准中无限值的，按健康风险评估结果判定。健康风险包括致癌风险和非致癌风险。单一化学毒性物质的总风险以各暴露途径的加和计，固体废物资源化过程或资源化产品的总风险以各单一化学毒性物质的风险加和计。致癌风险的可接受水平为小于 1.0×10^{-6} ，非致癌风险的可接受水平为小于 1.0。致癌风险或非致癌风险不可接受的，健康风险不可接受。

5.6 化学毒性物质的人体暴露估算

化学毒性物质的人体暴露估算及其有关参数值可参照 HJ 25.3。

6 资源化过程健康风险评估的技术要求

- 6.1 分析固体废物的资源性，确定资源化方式和识别健康风险因子，初步筛选化学毒性物质。
- 6.2 基于资源化方式，分析资源化过程排放化学毒性物质是否存在人体暴露途径。存在人体暴露途径的，对资源化过程进行工程分析，确定向周边排放化学毒性物质的主要方式及影响的环境介质类型。
- 6.3 依据文献资料采用类比等方法，进一步筛选固体废物资源化过程排放的化学毒性物质，确定毒性物质的浓度。再依据 HJ 884 等规定的方法，确定固体废物资源化过程中向大气、土壤、地表水和地下水排放的化学毒性物质的强度。
- 6.4 固体废物资源化过程排放的化学毒性物质，无排放标准或标准中无限值的，开展健康风险评估。
- 6.5 依据区域内非职业人群分布和活动特征，确定固体废物资源化过程排放的化学毒性物质的人体暴露途径和暴露方式。
- 6.6 采用模型计算推导人体暴露的环境介质中化学毒性物质浓度。分别参照 HJ 2.2、HJ 964、HJ 610 和 HJ 2.3 等规定，按人体暴露方式选用大气环境模型、土壤环境模型、地表水环境模型、地下水环境模型和有关参数。
- 6.7 固体废物资源化过程排放至土壤中的化学毒性物质，按照 HJ 25.3 规定的第二类用地估算人体暴露量。

7 资源化产品健康风险评估的技术要求

- 7.1 基于固体废物来源，分析固体废物资源化产品中化学毒性物质的种类和含量（特定迁移量），筛选化学毒性物质。
- 7.2 确定固体废物资源化产品中化学毒性物质的含量（特定迁移量）是否满足有关产品标准。无产品标准或标准中无目标毒性物质含量（特定

迁移量)限值的,开展健康风险评估。

- 7.3 依据固体废物资源化产品的用途,识别资源化产品的主要流向,确定作为建筑材料、工业原材料、农用肥料或其它土壤添加剂、日常消费品等使用场景。存在多种使用场景的,需依据使用场景分别进行健康风险评估。
- 7.4 建立特定暴露场景,分析固体废物资源化产品中化学毒性物质影响的受体以及人体暴露的途径。作为建筑材料,通常考虑人体通过地下水和土壤的间接暴露;作为工业原材料,通常考虑人体通过大气的间接暴露;作为农用肥料或其它土壤添加剂,通常考虑人体通过地下水和土壤的间接暴露;作为日常消费品,通常考虑人体通过皮肤接触产品的直接暴露。
- 7.5 通过实验模拟或模型模拟预测固体废物资源化产品中化学毒性物质的释放。
- 7.6 属于间接暴露的资源化产品,其化学毒性物质释放的大气环境、土壤环境或水环境条件,依据资源化产品使用区域的环境特征确定。
- 7.7 属于人体直接暴露的资源化产品,其化学毒性物质的释放需考虑汗液存在的条件。儿童接触的资源化产品,还应考虑儿童唾液存在的条件。
- 7.8 固体废物资源化产品中化学毒性物质释放后,可通过 6.6 提出的方法预测其在环境介质中迁移转化以及人体的暴露浓度。属于直接暴露的,可将释放浓度直接作为人体的暴露浓度。
- 7.9 固体废物资源化产品中化学毒性物质释放预测中,有关参数值难以确定的,可通过类比法从文献获取,或选取最不利条件下相关参数值。

8 不确定性分析

- 8.1 识别健康风险评估全过程不确定性的来源,定性描述或定量分析资源化过程中化学毒性物质的排放及其环境行为预测、资源化产品中化学毒性物质的释放及其环境行为预测、暴露评估和风险估计过程中的不确定性。
- 8.2 定量不确定性分析可按照 GB/T 27921 中规定的蒙特卡洛模拟方法。模

型参数敏感性分析可参照 HJ 875 中规定的方法。

附录 A

(资料性附录)

固体废物资源化健康风险评估大纲

A. 1 前言

A. 2 评估目的和评估依据

基于固体废物来源，分析固体废物中化学毒性物质的赋存，识别其资源性和风险因子。

A. 3 资源化利用方式

分析资源化利用方式、资源化过程的主流工艺，确定资源化过程是否存在暴露途径，明确资源化产品的去向等。

A. 4 资源化过程的健康风险评估

A. 4. 2 资源化利用的工程分析

分析资源化过程的工艺流程，确定资源化过程产生的化学毒性物质种类，筛选目标化学毒性物质。识别化学毒性物质排放方式，预测排放浓度和排放强度。分析化学毒性物质是否超出有关标准限值，确定是否开展下一步的风险评估。

A. 4. 3 项目的影响分析

无标准或标准无限值的，识别化学毒性物质的人体暴露方式，确定受影响的环境介质和受影响的人群范围。分析化学毒性物质的环境行为，预测环境受体中化学毒性物质的人体暴露浓度。

A. 4. 4 人体暴露评估

确定人体暴露途径、暴露频率和暴露时间，预测人体暴露量，分析毒害效应。

A. 4. 5 人体健康风险

表征健康风险，确定资源化过程的人体健康风险是否可接受。

A. 5 资源化产品的健康风险评估

A. 5.1 化学毒性物质识别

分析资源化产品中化学毒性物质的种类和含量（特定迁移量），筛选化学毒性物质。确定资源化产品中化学毒性物质是否超出有关标准的规定，确定是否开展下一步的健康风险评估。

A. 5.2 使用场景确定

依据资源化产品的用途，分析资源化产品主要流向和使用方式，确定资源化产品典型的使用场景。

A. 5.3 暴露方式识别

基于资源化产品使用场景，确定暴露人群和暴露方式。基于暴露方式，确定化学毒性物质影响的受体和人体暴露途径。存在多种使用场景的，按使用场景分别进行健康风险评估。

A. 5.4 毒性物质的释放

确定使用场景下资源化产品中化学毒性物质释放的环境条件。模拟资源化产品中化学毒性物质的释放，确定释放特征和释放量。

A. 5.5 化学毒性物质的环境行为

基于资源化产品中化学毒性物质释放特征，分析暴露场景下化学毒性物质的环境迁移转化规律，预测化学毒性物质的人体暴露浓度。

A. 5.6 化学毒性物质的人体暴露评估

确定人体暴露频率和暴露时间，预测人体暴露量，分析化学毒性物质对人体的毒害效应。

A. 5.7 人体健康风险

表征健康风险，确定资源化产品的人体健康风险是否可接受。

A. 6 健康风险评估的不确定性分析

A. 7 健康风险评估结论和控制对策

附录 B

(资料性目录)

资源化过程健康风险评估常用预测方法

B.1 大气中化学毒性物质的预测

通常使用 AERSCREEN 预测资源化过程（项目）中排放的化学毒性物质对大气的影 响范围和最大落地浓度。可以酌情选用 AERMOD、ADMS 和 Austal2000 预测周边大气中污染物浓度。所需参数优先选用生态环境主管部门发布的气象、地形、地表参数和土地利用等标准化数据。选用其它来源数据的，需要考虑数据的有效性。对于环境中存在二次转化的污染物，可按照 HJ 2.2 选取预测模型。

AERSCREEN、AERMOD 和 ADMS 的地表参数，依据项目周边一定范围内的占地面积最大的土地利用类型来确定。选用 AERSCREEN 模型时，对于项目存在多个大气排放源的，以其污染物等标排放量最大的点为污染源坐标位置。

B.2 土壤中化学毒性物质的预测

化学毒性物质输入土壤的，按公式 B1 进行计算。大气沉降进入土壤的化学毒性物质，按照 HJ 2.2 预测项目周边土壤的输入量，可不考虑土壤中化学毒性物质的径流输出。

$$\Delta S = 1000 n (I_s - L_s - R_s) / (\rho b \times A \times D) \quad (\text{公式 B1})$$

式中： ΔS ——调查评价范围内表层土壤化学毒性物质的增量，g/kg；

I_s ——单位年份输入至评价范围内表层土壤化学毒性物质含量，g；

L_s ——单位年份经淋溶排出评价范围表层土壤的化学毒性物质含量，g；

R_s ——单位年份经径流排出评价范围表层土壤的化学毒性物质含量，g；

ρb ——表层土壤容重，g/cm³；

A ——评价范围，m²；

D ——表层土壤深度，一般为 0.2 m；

n ——持续年份， a 。

土壤中化学毒性物质的垂向运移可按公式 B2 进行预测。其中，初始条件按公式 B3 计算，连续点源边界条件按公式 B4 计算，非连续点源边界条件按公式 B5 计算。

$$\frac{\partial(\theta c)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t}(\theta D \frac{\partial c}{\partial z}) - \frac{\partial}{\partial z}(qc) \quad (\text{公式 B2})$$

$$C(z, t)=0, t=0, L \leq z < 0 \quad (\text{公式 B3})$$

$$C(z, t)=C_0, t > 0, z=0 \quad (\text{公式 B4})$$

$$0 < t \leq t_0, C(z, t)=C_0; t > t_0, C(z, t)=0 \quad (\text{公式 B5})$$

式中： c ——污染物介质中的浓度， mg/L ；

D ——弥散系数， m^2/d ；

q ——渗流速率， m/d ；

z ——沿 z 轴的距离， m ；

t ——时间变量， d ；

θ ——土壤含水率， $\%$ 。

B.3 地下水中化学毒性物质的预测

地下水中化学毒性物质迁移的常用预测模型，参考 HJ 610 的附录 D。

B.4 地表水中化学毒性物质的预测

河流、湖库、感潮河段及近岸海域水中化学毒性物质迁移的常用数学模型基本方程及解法，参考 HJ.23 的附录 E。

B.5 化学毒性物质暴露量的估计方法

化学毒性物质暴露量估计方法包括单一途径和多途径暴露量，分别按公式 B6—B9 进行计算。各参数值优先选取当地人群的实测值，无实测值的参考 HJ 25.3 或国际权威组织（机构）推荐的参考值。

B.5.1 单一途径日均暴露量

(1) 经呼吸道吸入的日均暴露量

$$ADD_{\text{inh}} = \frac{C_a \times IR \times ET \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (\text{公式 B6})$$

式中： ADD_{inh} ——经呼吸道吸入空气中污染物的日均暴露量， mg/kg/d ；

C_a ——经呼吸道吸入空气中污染物浓度， mg/m^3 ；

IR ——呼吸量， m^3/h ；

ET ——每日暴露小时数， h/d ；

EF ——暴露频率， d/a ；

ED ——暴露持续时间， a ；

BW ——体重， kg ；

AT ——平均暴露时间， d 。

(2) 经口摄入的日均暴露量

$$ADD_{ing} = \frac{C_f \times IR_f \times EF_f \times ED}{BW \times AT} \quad (\text{公式 B7})$$

式中： ADD_{ing} ——经口摄入污染物的日均暴露量， $\text{mg}/\text{kg}/\text{d}$ ；

C_f ——经口摄入污染物浓度， mg/kg ；

IR_f ——食物摄入量， kg ；

EF_f ——食物暴露频率， a ；

ED 、 BW 和 AT 含义同公式 B6。

(3) 经皮肤接触的日均暴露量

$$ADD_{der} = \frac{C_s \times CF \times SA_s \times AF \times ABS_d \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (\text{公式 B8})$$

式中： ADD_{der} ——皮肤接触污染物的日均暴露量， $\text{mg}/\text{kg}/\text{d}$ ；

C_s ——皮肤接触污染物浓度， mg/kg ；

CF ——质量转换因子， $1 \times 10^{-6} \text{ kg}/\text{mg}$ ；

SA_s ——皮肤暴露表面积， cm^2 ；

AF ——皮肤对污染物的粘附因子， mg/cm^2 ；

ABS_d ——皮肤对污染物的吸收因子，无量纲；

EF ——皮肤接触频率， a ；

ED 、 BW 和 AT 含义同公式 B6。

B. 5. 2 多途径日均暴露量

$$ADD_T = \sum ADD_n \quad (\text{公式 B9})$$

式中： ADD_T ——不同暴露途径的化学毒害物质的日均总暴露量， $\text{mg}/\text{kg}/\text{d}$ ；

ADD_n ——暴露第 n 种途径的化学毒害物质的日均暴露量， $\text{mg}/\text{kg}/\text{d}$ 。

附录 C

(资料性目录)

资源化产品健康风险评估常用预测方法

C.1 化学毒性物质的释放

固体废物资源化产品作为建筑材料使用时，通常考虑有害金属对土壤和地下水的影响。固体废物资源化产品中有害金属的释放预测中，通常按 NEN 7375 浸出标准，并基于特定场景下环境条件开展实验模拟预测。NEN 7375 浸出标准由欧盟标准化组织制定，用于评价块状材料在一般应用场景下无机组分的释放机理及释放量。浸出实验中，浸提剂的 pH 值通常按资源化产品使用区域的降水 pH 值的多年（无具体时间要求）统计值确定；考虑最不利影响条件，通常选取最小的 pH 值。根据全国酸雨状况和自然成因以及 H₂SO₄ 和 HNO₃ 不同配比等对有害金属浸出的影响，通常选取 H₂SO₄:HNO₃=2:1（体积比）的浸提剂。

对于液固比，通常依据固体废物资源化产品使用区域的多年平均降水量确定。例如，固体废物资源化产品作为路基材料的，按公式 C1 确定液固比。

$$\text{液固比} = \frac{V(\text{浸提剂体积})}{M(\text{材料质量})} = \frac{\text{年降雨量} \times \text{入渗系数} \times \text{单位面积} \times \text{浸出时间}}{\text{材料厚度} \times \text{材料密度} \times \text{单位面积}} \quad (\text{公式 C1})$$

式中，浸出时间为道路使用年限，渗透系数可依据最不利条件取 0.15。若固体废物资源化产品掺和其它物质作为路基材料的，则公式 C1 中的材料即指固体废物资源化产品掺和其它物质组成的路基材料。

C.2 化学毒性物质的环境行为

地下水中有害金属的浓度可采用公式 C2 计算。

$$C_{\text{gw}} = C_{\text{sw}} \times NAF \quad (\text{公式 C2})$$

式中： C_{gw} 为地下水有害金属的质量浓度（mg/L）。 C_{sw} 为资源化产品中有害金属的质量浓度（mg/kg）。 NAF 为自然衰减系数（kg/L）。

整个过程的自然衰减系数可按公式 C3 计算：

$$NAF = LF \times DAF \quad (\text{公式 C3})$$

式中： LF 为土壤淋溶稀释因子 (kg/L)。 DAF 为地下水稀释衰减系数。按风险最大化考虑，忽略有害金属在地下水中的稀释作用（即只考虑土壤的淋溶稀释），即 $DAF=1$ 。

在综合考虑 pH、土壤吸附、土壤孔隙度、地下水流速、离子交换和其它因素的基础上，对浸出的有害金属迁移至地下水过程中的土壤淋溶稀释因子进行估算，估算方法如公式 C4。相关参数如表 1。

$$LF = \frac{\rho_s}{(H' \times \theta_{as} \times \theta_{ws} + K_d + \rho_s) \times \left(1 + \frac{U_{gw} \times \delta_{gw}}{I_f \times W_{gw}} \right)} \times \frac{L_1}{L_2} \quad (\text{公式 C4})$$

表 1 土壤淋溶稀释因子估算中相关参数的推荐值

参数	意义	参考值
ρ_s	土壤密度 (kg/dm ³)	按使用场景确定
H'	无量纲亨利常数	0
U_{gw}	地下水达西速率 (cm/a)	2500
δ_{gw}	地下水混合区厚度 (m)	0.2
θ_{as}	土壤非饱和层空气比	0.10
θ_{ws}	土壤非饱和层含水比	0.26
K_d	有害金属在土壤与水中的分配系数	Cr、Zn、As、Cd 和 Hg 分别为 14.1、15.8、25.1、15.1 和 52.5 cm ³ /g
I_f	土壤中水的入渗速率 (cm/a)	30
W_{gw}	污染源宽度 (m)	按使用场景确定
L_1	道路厚度 (m)	按使用场景确定
L_2	地下水埋深 (m)	按使用场景确定