

ICS 13.020.99

CCS Z 00

团 体 标 准

T/ACEF 088-2023

建设用地土壤人体健康环境基准制定 技术指南

Technical guidelines for deriving soil human health environmental
criteria for development land

2023-10-10 发布

2023-10-10 实施

中华环保联合会 发布

目 次

前 言III

1 范围1

2 规范性引用文件1

3 术语和定义1

4 建设用地土壤人体健康环境基准制定程序3

5 数据收集和筛选4

6 毒性评估5

7 暴露评估5

8 建设用地土壤人体健康环境基准值的推导6

9 建设用地土壤人体健康环境基准不确定性分析21

附录 A（资料性） 风险评估模型参数常用数据库及推荐值22

附录 B（资料性） 石油烃土壤环境基准制定25

附录 C（资料性） 建设用地土壤人体健康环境基准技术报告编制大纲29

前 言

本文件按照 GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分:标准化文件的结构和起草规划》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。

本文件由中华环保联合会提出并归口。

本文件起草单位:中国环境科学研究院、北京师范大学、广东工业大学、北京科技大学。

本文件主要起草人:马瑾、吴颐杭、刘奇缘、屈雅静、陈颖、程红光、袁勇、祁增华、陈智锋、王贝贝、赵洪芝。

建设用地土壤人体健康环境基准制定技术指南

1 范围

本文件规定了建设用地土壤人体健康环境基准制订的工作程序、内容、方法与技术要求。

本文件适用于我国住宅用地（城市住宅与农村住宅）、公园绿地（社区公园与其他公园）、商服/工业用地 3 类用地方式下土壤化学污染物的人体健康环境基准的制订。本文件不适用于放射性物质的建设用地。

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 21010 土地利用现状分类

GB 50137 城市用地分类与规划建设用地标准

CJJT 85 城市绿地分类标准

HJ 1231 土壤环境 词汇

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

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

土壤环境基准 soil environmental criteria

在特定土地利用方式和保护水平下，推导土壤中某一种或一类化学污染物不会对人体健康和/或生态安全产生不良影响的理论阈值的理论、技术和方法的统称，其表现形式为土壤环境基准值。

3.2

建设用地土壤人体健康环境基准 soil human health environmental criteria for development land

在特定土地利用方式和保护水平下，推导建设用地土壤中某一种或某一类化学污染物不会对人体健康产生不良影响的理论阈值的理论、技术和方法的统称，其表现形式为建设用地

土壤人体健康环境基准值。

3.3

敏感受体 sensitive receptor

指 HJ 682 规定的受地块污染物影响的潜在生物类群中，在生物学上对污染物反应最敏感的群体（如人群或某些特定类群的生态受体）、某些特定年龄的群体（如老年人）或某些处于特地发育阶段的人群（如 0-6 岁的儿童）。在本指南中不考虑生态受体。

3.4

暴露途径 exposure route

指 HJ 682 规定的建设用地土壤和地下水中污染物迁移到达和暴露于人体的方式。在本指南中，不考虑地下水中污染物的暴露途径。

3.5

致癌风险 carcinogenic risk

指 HJ 1231 规定的人群每日暴露于单位剂量的致癌效应污染物，诱发致癌性疾病或危害的概率。

3.6

非致癌风险 non-carcinogenic risk

指 HJ1231 规定的污染物每日摄入量与参考剂量的比值，用来表征人体经单一途径暴露于非致癌污染物而受到危害的水平，通常用危害商值来表示。

3.7

可接受风险水平 acceptable risk level

指 HJ 25.3 规定的对暴露人群不会产生不良或有害健康效应的风险水平，包括致癌物的可接受致癌风险水平和非致癌物的可接受危害商。

3.8

暴露参数 exposure parameter

指 HJ 682 规定的与人群行为相关的，用于反映地块污染物人体暴露特点的参数，如敏感人群结构特征（年龄、体重等）和人群通过各种环境介质暴露于污染物的时间、频率、周期等。

3.9

关注污染物 contaminant of concern

根据 HJ 1231 规定的根据地块污染特征、相关标准规范要求和地块利益相关方意见，确定需要进行土壤污染状况调查和土壤污染风险评估的污染物。

3.10

致癌斜率因子 cancer slope factor

根据 HJ 682 规定的人体终生暴露于剂量为每日每公斤体重 1 mg 化学致癌物时的终生超额致癌风险度。

3.11

吸入单位风险 inhalation unit risk

根据 HJ 682 规定的人体终生暴露在含有污染物浓度为 1 mg/m³ 的空气中的致癌风险值。

3.12

参考剂量 reference dose, RfD

根据 HJ 682 规定的日平均剂量的估计值，当人体终生暴露于该水平时，预期发生有害效应的危险度很低，或者实际上检测不到。吸入暴露的参考剂量称为参考浓度（Reference Concentration, RfC）。

3.13

每日摄入量 estimated daily intake, EDI

指人群每天摄入来自空气、水、食物和土壤的某种化学品的量。

3.14

室外空气 outdoor air

指 HJ 682 规定的建筑物外部的空气，与室内空气相对应。

3.15

室内空气 indoor air

指 HJ 682 规定的建筑物内部或其他相对比较密闭的空间内的空气，与室外空气相对应。

3.16

背景暴露 background exposure

指由于日常活动或自然来源，污染物可能广泛存在于环境中，而来源于非建设用地土壤的污染物暴露则为背景暴露。

4 建设用地土壤人体健康环境基准制定程序

建设用地土壤人体健康环境基准的制定主要包括 5 个步骤（图 1），具体如下：

- 1) 数据收集和筛选
- 2) 毒性评估
- 3) 暴露评估
- 4) 基准推导
- 5) 基准不确定性分析

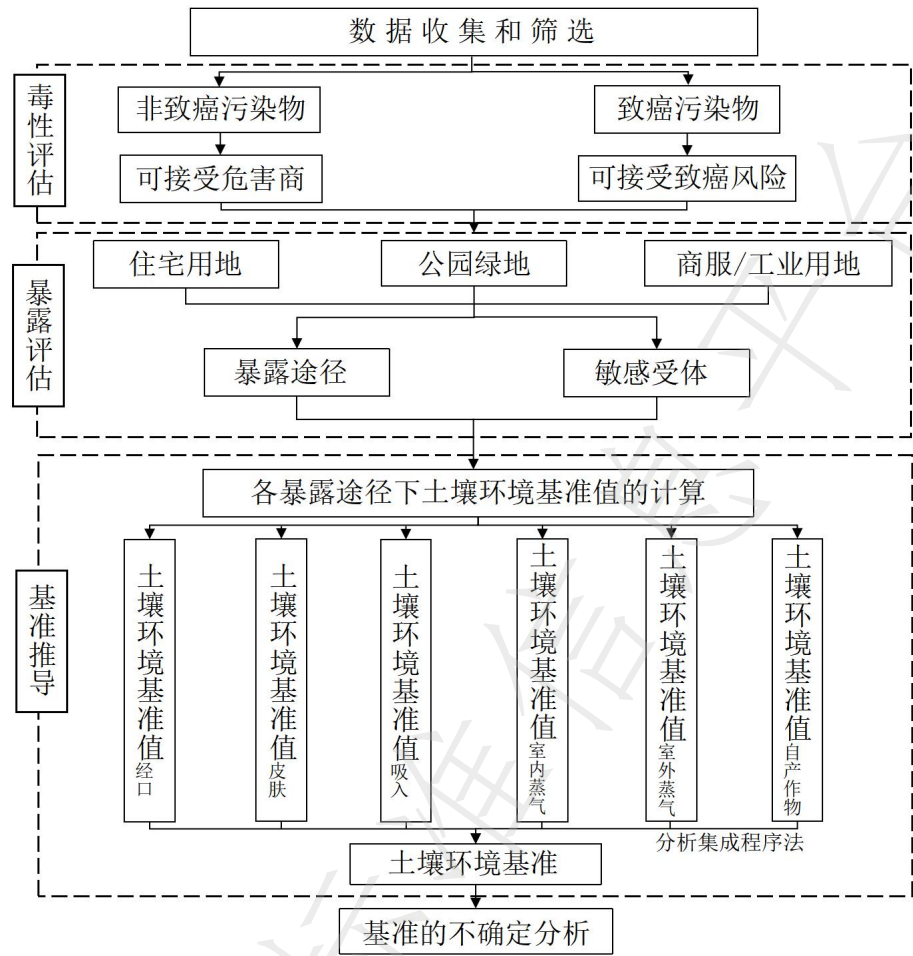


图 1 建设用地土壤人体健康环境基准制定程序

5 数据收集和筛选

5.1 数据来源

制定保护人体健康的土壤环境基准时，首先需要收集相关数据。所需要收集的数据主要包括：暴露参数、土壤性质参数、气象参数、建筑物参数、污染物理化性质及毒性参数等。

所需参数可通过以下 3 种途径获得：

- 1) 检索已有的参数数据库，常用数据库见附录 A；
- 2) 收集经同行评议公开发表的文献数据或出版物；
- 3) 经专家判断可靠的其他来源数据；
- 4) 建设用地实测参数。

5.2 数据的筛选原则

1) 本土化原则。优先选用我国《中国人群暴露参数手册》、《中国居民营养与健康状况调查报告》、《中国总膳食研究》等公开发行的出版物及气象数据库中的数据。在缺乏我国数据的情况下，可暂时采用国外权威机构发布的数据，后续及时筛选出我国最新数据进行更新。

2) 科学性原则。优先选用采用国家标准测试方法以及行业技术标准进行实验且操作过程规范的实验数据。对于非标准测试方法的实验数据,在评估其实验方法、结果科学合理后可采用。

3) 不确定性原则。毒性实验通常采用动物为实验物种,采用基于动物毒性实验的毒性数据推导保护人体健康的土壤环境基准通常会增加不确定。因此,优先选用人体毒性数据,对于缺乏足够人体毒性数据的可采用动物毒性数据。在选择人体毒性数据时,优先选用环境流行病学数据,若缺乏足够数据可选用职业流行病学数据。

6 毒性评估

通过查阅文献资料或毒理学实验获取关注污染物的毒理学参数,对污染物进行毒性评估,并将污染物分为非致癌污染物与致癌污染物。对于非致癌污染物,确定可接受危害商为 1;对于致癌污染物,确定可接受致癌风险为 10^{-6} 。

7 暴露评估

7.1 用地方式

住宅用地包括城市住宅与农村住宅。城市住宅是指位于城市地区、主要活动涉及个人居住的场所,包括 GB/T 21010 中的 071 (城镇住宅用地)。城市住宅典型的物理环境是位于一个住宅区的高层建筑,该住宅区有美化设施,如景观庭院和儿童游乐场。居民除了每天有一小段时间外,大部分时间都在室内,在此期间,他们有机会在住宅区的景观或游戏区域直接接触土壤。农村住宅是指位于农村地区、主要活动涉及个人居住的地点,包括 GB/T 21010 中的 072 (农村宅基地)。这些地点通常设有乡村式房屋或被开放空间包围的低层住宅。农村居民每天大多数时间均待在家里,只花一些时间进行户外活动。农村环境下的土壤接触强度或是接触频率均高于城市环境。

公园绿地,是指向公众开放,以游憩为主要功能,兼具生态、景观、文教和应急避难等功能,有一定游憩和服务设施的绿地。公园绿地包括社区公园与其他公园,社区公园主要是指 CJJT 85 中的 G12 (社区公园),其他公园包括 CJJT 85 中的 G11 (综合公园)、G13 (专类公园)、G14 (游园)。

商服/工业用地一指主要用于商业、服务业、工业生产、产品加工制造、机械和设备修理及直接为工业生产等服务的附属设施用地。商业用地包括 GB/T 21010 中的 051 (零售商业用地)、052 (批发市场用地)、053 (餐饮用地)、054 (旅馆用地)、055 (商务金融用地)、056 (娱乐用地)和 057 (其他商服用地)。工业用地包括 GB/T 21010 中的 061 (工业用地)和 064 (仓储用地)。

7.2 暴露途径

不同用地方式下的暴露途径如表 1 所示。

表 1 建设用地土壤人体健康环境基准制定时各类用地方式下的暴露途径和适用的情景

暴露情景		住宅用地		公园绿地		商服/工业用地
		城市住宅	农村住宅	社区公园	其他公园	
直接暴露途径	经口摄入土壤	√	√	√	√	√
	皮肤接触土壤	√	√	√	√	√
	吸入土壤颗粒物	√	√	√	√	√
间接暴露途径	吸入室外空气中来自表层及下层土壤的气态污染物	√	√	√	√	√
	吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物	√	√	×	×	√
	自产作物摄入	×	√	×	×	×

7.3 敏感受体

住宅用地以及公园绿地用地方式下，对于致癌效应，根据儿童期和成人期的暴露考虑人群的终生致癌风险；对于非致癌效应，根据儿童的暴露来评估污染物的非致癌风险。

商服/工业用地方式下，均以成人期的暴露分别评价污染物的致癌风险和非致癌风险。

8 建设用地土壤人体健康环境基准值的推导

8.1 背景暴露计算

当推导非致癌污染物的土壤环境基准时，需要考虑人群从土壤以外的来源接触同一种污染物的情况，即背景暴露。背景暴露通过每日摄入量（EDI）进行量化。EDI 估计了所有已知或可疑来源（空气、水、食物和土壤）通过所有已知或可疑途径（经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入）的典型背景暴露总量，不包括可能从污染地块或修复后地块发生的暴露。

EDI 根据未污染环境介质中污染物的环境浓度计算，具体计算公式如下：

$$EDI = \sum_{i=1}^n ED_i \quad (1)$$

$$ED_i = \frac{C \times CR \times BF \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (2)$$

式中：

ED_i——i 暴露途径的暴露剂量，mg/kg-day；

C——介质中污染物的浓度；

CR——接触率，与具体的暴露途径有关；

BF——生物利用度因子；

EF——暴露频率，d/y；

ED——暴露期，y；

BW——体重，kg；

AT——平均时间，d。

吸入途径：CR=空气吸入率，m³/d；

饮用水摄入途径：CR=饮用水摄入率，L/d；

食物摄入途径：CR=食物摄入率，计算每种食物的暴露量并求和，kg/d；

对于某些非致癌污染物，非土壤背景暴露可能已经占据了很大的比例，甚至超过 RfD，在此基础上提出土壤环境基准是不切实际的。因此，对于这些污染物的背景暴露最多为 RfD 的 50%。

8.2 直接暴露途径

直接暴露途径包括经口摄入土壤、皮肤接触土壤、吸入土壤颗粒物。

8.2.1 经口摄入土壤

1) 土壤暴露量计算

住宅和公园用地

致癌污染物：考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害

$$OISER_{ca} = \frac{\left(\frac{OSIR_c \times ED_c \times EF_c}{BW_c} + \frac{OSIR_a \times ED_a \times EF_a}{BW_a} \right) \times ABS_o}{AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (3)$$

非致癌污染物：考虑人群在儿童期暴露的危害

$$OISER_{nc} = \frac{OSIR_c \times ED_c \times EF_c \times ABS_o}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (4)$$

商服/工业用地

致癌污染物：考虑人群在成人期暴露的危害

$$OISER_{ca} = \frac{OSIR_a \times ED_a \times EF_a \times ABS_o}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (5)$$

非致癌污染物：考虑人群在成人期暴露的危害

$$OISER_{nc} = \frac{OSIR_a \times ED_a \times EF_a \times ABS_o}{BW_a \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (6)$$

2) 土壤环境基准值的计算

致癌污染物：

$$RSC_{OIS} = \frac{ACR}{OISER_{ca} \times SF_o} \quad (7)$$

非致癌污染物：

$$HSC_{OIS} = \frac{(RfD_o - ED_o) \times SAF \times AHQ}{OISER_{nc}} \quad (8)$$

式中：

RSC_{OIS}——经口摄入致癌风险土壤环境基准值，mg/kg；

HSC_{OIS}——经口摄入非致癌风险土壤环境基准值，mg/kg；

OISER_{ca}——经口摄入途径土壤暴露量（致癌效应），kg_{土壤}/(kg_{体重}·d)；

OISER_{nc}——经口摄入途径土壤暴露量（非致癌效应），kg_{土壤}/(kg_{体重}·d)；

OSIRc/OSIRa——儿童/成人每日土壤摄入量，mg/d；

ACR——可接受致癌风险水平，无量纲；

AHQ——可接受危害商值，无量纲，取值为1；

RfD_o——经口摄入参考剂量，mg_{污染物}/(kg_{体重}·d)；

SF_o——经口摄入致癌斜率因子，(kg_{体重}·d)/mg_{污染物}；

SAF——暴露于土壤的参考剂量的分配系数，无量纲；

ED_c/ED_a——儿童/成人暴露期，a；

EF_c/EF_a——儿童/成人暴露频率，d/a；

BW_c/BW_a——儿童/成人体重，kg；

AT_{ca}——致癌效应平均时间，d；

AT_{nc}——非致癌效应平均时间，d；

ABS_o——经口摄入吸收效率因子，无量纲；

ED_o——经口摄入途径的背景暴露量，mg/kg-day。

8.2.2 皮肤接触土壤

1) 土壤暴露量计算

住宅和公园用地

致癌污染物：考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害

$$DCSER_{ca} = \left(\frac{SAE_c \times SSAR_c \times EF_c \times ED_c \times E_v \times ABS_d}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{SAE_a \times SSAR_a \times EF_a \times ED_a \times E_v \times ABS_d}{BW_a \times AT_{ca}} \right) \times 10^{-6} \quad (9)$$

非致癌污染物：考虑人群在儿童期暴露的危害

$$DCSER_{nc} = \frac{SAE_c \times SSAR_c \times EF_c \times ED_c \times E_v \times ABS_d}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (10)$$

商服/工业用地

致癌污染物：考虑人群在成人期暴露的危害

$$DCSER_{ca} = \frac{SAE_a \times SSAR_a \times EF_a \times ED_a \times E_v \times ABS_d}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (11)$$

非致癌污染物：考虑人群在成人期暴露的危害

$$DCSER_{nc} = \frac{SAE_a \times SSAR_a \times EF_a \times ED_a \times E_v \times ABS_d}{BW_a \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (12)$$

式中 SAE_c 和 SAE_a 分别由下式计算得出：

$$SAE_c = 239 \times H_c^{0.417} \times BW_c^{0.517} \times SER_c \quad (13)$$

$$SAE_a = 239 \times H_a^{0.417} \times BW_a^{0.517} \times SER_a \quad (14)$$

其中 SF_d 和 RfD_d 分别由 SF_o 和 RfD_o 外推得出：

$$SF_d = \frac{SF_o}{ABS_{gi}} \quad (15)$$

$$RfD_d = RfD_o \times ABS_{gi} \quad (16)$$

2) 土壤环境基准计算

致癌污染物：

$$RSC_{DCS} = \frac{ACR}{DCSER_{ca} \times SF_d} \quad (17)$$

非致癌污染物：

$$HSC_{DCS} = \frac{RfD_d \times SAF \times AHQ}{DCSER_{nc}} \quad (18)$$

式中：

RSC_{DCS}——皮肤接触致癌风险土壤环境基准值，mg/kg；

HSC_{DCS}——皮肤接触非致癌风险土壤环境基准值，mg/kg；

RfD_d——皮肤接触参考剂量，mg_{污染物}/(kg_{体重} · d)；

SF_d——皮肤接触致癌斜率因子，(kg_{体重} · d)/mg_{污染物}；

DCSER_{ca}——皮肤接触途径土壤暴露量（致癌效应），kg_{土壤}/(kg_{体重} · d)；

DCSER_{nc}——皮肤接触途径土壤暴露量（非致癌效应），kg_{土壤}/(kg_{体重} · d)；

SAE_c/SAE_a——儿童/成人暴露皮肤表面积，cm²；

SSAR_c/SSAR_a——儿童/成人皮肤表面土壤粘附系数，mg/cm²；

SER_c/SER_a——儿童/成人暴露皮肤所占面积比；

ABS_d——皮肤接触吸收效率因子，无量纲；

E_v——每日皮肤接触事件频率，次/d；

H_c/H_a——儿童/成人平均身高，cm；

ABS_{gi}——消化道吸收效率因子，无量纲；

8.2.3 吸入土壤颗粒物

1) 土壤暴露量计算

住宅和公园用地

致癌污染物：考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害

$$PISER_{ca} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO_c + f_{spi} \times EFI_c)}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} + \frac{PM_{10} \times DAIR_a \times ED_a \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO_a + f_{spi} \times EFI_a)}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (19)$$

非致癌污染物：考虑人群在儿童期暴露的危害

$$PISER_{nc} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO_c + f_{spi} \times EFI_c)}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (20)$$

商服/工业用地

致癌污染物：考虑人群在成人期暴露的危害

$$PISER_{ca} = \frac{PM_{10} \times DAIR_a \times ED_a \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO_a + f_{spi} \times EFI_a)}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (21)$$

非致癌污染物：考虑人群在成人期暴露的危害

$$PISER_{nc} = \frac{PM_{10} \times DAIR_a \times ED_a \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO_a + f_{spi} \times EFI_a)}{BW_a \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (22)$$

式中 SF_i 和 RfD_i 分别由呼吸单位致癌因子 IUR 和呼吸吸入参考浓度 RfC 求出：

$$SF_i = \frac{IUR \times BW_a}{DAIR_a} \quad (23)$$

$$RfD_i = \frac{RfC \times DAIR_a}{BW_a} \quad (24)$$

2) 土壤环境基准计算

致癌污染物：

$$RSC_{PIS} = \frac{ACR}{PISER_{ca} \times SF_i} \quad (25)$$

非致癌污染物：

$$HSC_{PIS} = \frac{(RfD_i - ED_i) \times SAF \times AHQ}{PISER_{nc}} \quad (26)$$

式中：

 RSC_{PIS} ——吸入土壤颗粒物致癌风险土壤环境基准值，mg/kg； HSC_{PIS} ——吸入土壤颗粒物非致癌风险土壤环境基准值，mg/kg；

RfD_i ——呼吸吸入参考剂量, $\text{mg}_{\text{污染物}}/(\text{kg}_{\text{体重}} \cdot \text{d})$;

SF_i ——呼吸吸入致癌斜率因子, $(\text{kg}_{\text{体重}} \cdot \text{d})/\text{mg}_{\text{污染物}}$;

$PISER_{ca}$ ——吸入土壤颗粒物途径土壤暴露量 (致癌效应), $\text{kg}_{\text{土壤}}/(\text{kg}_{\text{体重}} \cdot \text{d})$;

$PISER_{nc}$ ——吸入土壤颗粒物途径土壤暴露量 (非致癌效应), $\text{kg}_{\text{土壤}}/(\text{kg}_{\text{体重}} \cdot \text{d})$;

PM_{10} ——空气中可吸入悬浮颗粒物含量, 也可采用 $PM_{2.5}$, mg/m^3 ;

$DAIR_c/DAIR_a$ ——儿童/成人每日空气呼吸量, m^3/d ;

$PIAF$ ——吸入土壤颗粒物在体内滞留比例, 无量纲;

f_{spi}/f_{spo} ——室内/室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例, 无量纲;

EFl_c/EFl_a ——儿童/成人的室内暴露频率, d/a ;

EFO_c/EFO_a ——儿童/成人的室外暴露频率, d/a ;

RfC ——呼吸吸入参考浓度, mg/m^3 ;

IUR ——呼吸吸入单位致癌因子, m^3/mg ;

ED_i 的参数含义见公式 1。

8.3 间接暴露途径

土壤间接暴露途径包括自产作物摄入、吸入室外空气中来自土壤的气态污染物以及吸入室内空气中来自土壤的气态污染物。其中室外空气中来自土壤的气态污染物包括来自表层土壤和来自下层土壤的污染物; 室内空气中来自土壤的气态污染物是指来自下层土壤的污染物。

8.3.1 自产作物摄入

1) 土壤暴露量计算

住宅用地

致癌污染物: 考虑人群在儿童期和成人期的终生危害

$$HP_{ca} = \left(\frac{CF \times CR \times HF \times EF_c \times ED_c \times ABS_o}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{CF \times CR \times HF \times EF_a \times ED_a \times ABS_o}{BW_a \times AT_{ca}} \right) \times 10^{-6} \quad (27)$$

非致癌污染物: 考虑人群在儿童期暴露的危害

$$HP_{nc} = \frac{CF \times CR \times HF \times EF_c \times ED_c \times ABS_o}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-6} \quad (28)$$

2) 土壤环境基准值计算

致癌污染物:

$$RSC_{HP} = \frac{ACR}{HP_{ca} \times SF_o} \quad (29)$$

非致癌污染物:

$$HSC_{HP} = \frac{RfD_o \times SAF \times AHQ}{HP_{nc}} \quad (30)$$

式中：

HP_{ca} ——人群致癌污染物自产作物摄入途径的土壤暴露量， $\text{kg}_{\text{土壤}}/(\text{kg}_{\text{体重}} \cdot \text{d})$ ；

HP_{nc} ——人群非致癌污染物自产作物摄入途径的土壤暴露量， $\text{kg}_{\text{土壤}}/(\text{kg}_{\text{体重}} \cdot \text{d})$ ；

RSC_{HP} ——自产作物摄入途径致癌风险土壤环境基准值， mg/kg ；

HSC_{HP} ——自产作物摄入途径非致癌风险土壤环境基准值， mg/kg ；

CF ——土壤-植物浓度因子；

HF ——自产作物摄入比例，无量纲；

CR 的参数含义见公式 2， EF_c/EF_a 、 ED_c/ED_a 、 BW_c/BW_a 、 AT_{ca} 的参数含义见公式 3， ABS_o 、 AT_{nc} 的参数含义见公式 4。

由于有机物与无机物的环境行为不同，因此植物对有机物与无机物的累积存在差异，式中无机物和有机物的 CF 分别按下式计算：

无机物：

$$CF = \frac{\delta \times f_{int}}{(\theta_w + \rho_s K_d)} \quad (31)$$

式中：

δ ——土壤-植物可获得性矫正因子，与植物总密度、盆中土壤深度以及实验持续时间等有关，无量纲；

θ_w ——孔隙水体积比，无量纲；

ρ_s ——土壤颗粒密度， kg/dm^3 ；

K_d ——土壤-水分配系数， cm^3/g ；

f_{int} ——根系中污染物迁移至植物可食用部分的比例，取值为 0-1（表 2）。

表 2 δ 建议值

分类	δ
植物吸收潜力较低的元素（如镧系元素及铜系元素）	0.5
植物代谢过程中必不可少的或化学上类似于这些元素（如常见的重金属）	5
植物吸收潜力较高的元素（如硒）	50

有机物：

①叶类蔬菜

$$CF_{leaf} = (10^{0.95 \log K_{ow} - 2.05} + 0.82) \times [0.784 \times 10^{-0.434 \times (\log K_{ow} - 1.78)^2 / 2.44}] \times \frac{\rho_s}{\theta_w + \rho_s K_{oc} f_{oc}} \quad (32)$$

式中：

CF_{leaf} ——有机物在土壤-叶类蔬菜中的浓度因子；

K_{ow} ——污染物的辛醇-水分配系数，无量纲；

K_{oc} ——有机碳-水分配系数， cm^3/g ；

f_{oc} ——土壤有机碳比例，无量纲。

P_s 、 θ_w 的参数含义见公式 31。

②根类蔬菜

$$CF_{root} = \frac{(Q/K_d)}{\frac{Q}{K_{rw}} + (k_g + k_m) \times \rho_p \times V} \quad (33)$$

$$K_{rw} = \frac{W}{\rho_p} + \frac{L}{\rho_p} \times a K_{ow}^b \quad (34)$$

式中：

CF_{root} ——有机物在土壤-根类蔬菜中的浓度因子；

Q ——蒸气流速， cm^3/d ；

K_{rw} ——植物根系-水平衡分配系数， cm^3/g ；

k_g ——一阶生长速率常数， d^{-1} ；

k_m ——一阶代谢速率常数， d^{-1} ；

W ——植物根部含水量，默认值为 0.89；

ρ_p ——植物根密度， g/cm^3 ，默认值为 1；

L ——植物根部油脂含量，默认值为 0.025；

a ——水和辛醇之间的密度校正因子，1.2；

b ——根部校正系数，0.77；

K_d 的参数含义见公式 31， K_{ow} 的参数含义见公式 32。

③茎类蔬菜

$$CF_{tuber} = \frac{k_1}{k_2 + k_g} \quad (35)$$

$$k_1 = k_2 \times \frac{K_{pw}}{K_{sw}} \quad (36)$$

$$k_2 = \frac{23}{R^2} \times \frac{3600 D_{water} \times W^{7/3}}{K_{pw} \times \rho_p} \quad (37)$$

$$K_{pw} = \frac{W}{\rho_p} + f_{ch} \times K_{ch} + \frac{L}{\rho_p} \times a \times K_{ow}^b \quad (38)$$

式中：

CF_{tuber} ——有机物在土壤-茎类蔬菜中的浓度因子；

k_1 ——污染物进入茎类蔬菜的速率, h^{-1} ;

k_2 ——污染物流出茎类蔬菜的速率, h^{-1} ;

K_{pw} ——茎类蔬菜-水平衡分配系数, cm^3/g ;

K_{sw} ——总的土壤-水分配系数, cm^3/g ;

D_{water} ——污染物在水中的扩散系数, m^2/s ;

R ——茎类蔬菜的半径, m ;

f_{ch} ——土豆中碳水化合物的比例;

K_{ch} ——碳水化合物-水分配系数, cm^3/g 鲜重;

K_{ow} 的参数含义见公式 32, ρ_p 的参数含义见公式 33, W 、 a 、 b 的参数含义见公式 34。

8.3.2 吸入室外空气中来自表层及下层土壤的气态污染物

1) 土壤暴露量计算

住宅用地和公园用地

致癌污染物: 考虑人群在儿童期和成人期的终生危害

$$IOVER_{ca1} = VF_{suroa} \times \left(\frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{DAIR_a \times EFO_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \right) \quad (39)$$

$$IOVER_{ca2} = VF_{suboa} \times \left(\frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{DAIR_a \times EFO_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \right) \quad (40)$$

非致癌污染物: 考虑人群在儿童期暴露的危害

$$IOVER_{nc1} = VF_{suroa} \times \frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{nc}} \quad (41)$$

$$IOVER_{nc2} = VF_{suboa} \times \frac{DAIR_c \times EFO_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{nc}} \quad (42)$$

商服用地和工业用地

致癌污染物: 考虑人群在成人期的终生危害

$$IOVER_{ca1} = VF_{suroa} \times \frac{DAIR_a \times EFO_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \quad (43)$$

$$IOVER_{ca2} = VF_{suboa} \times \frac{DAIR_a \times EFO_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \quad (44)$$

非致癌污染物: 考虑人群在成人期暴露的危害

$$IOVER_{nc1} = VF_{suroa} \times \frac{DAIR_a \times EFO_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{nc}} \quad (45)$$

$$IOVER_{nc2} = VF_{suboa} \times \frac{DAIR_a \times EFO_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{nc}} \quad (46)$$

式中的 VF_{suroa} 、 VF_{suboa} 由下式计算得到:

$$VF_{suroa1} = \frac{2W \times \rho_b}{U_{air} \times \delta_{air}} \times \sqrt{\frac{D_s^{eff} \times H'}{3.141 \times (\theta_{avs} \times H' + \theta_{wvs} + K_s \times \rho_b) \times \tau}} \times 10^3 \quad (47)$$

$$VF_{suroa2} = \frac{W \times \rho_b \times d}{U_{air} \times \delta_{air} \times \tau} \times 10^3 \quad (48)$$

$$VF_{suroa} = MIN(VF_{suroa1}, VF_{suroa2}) \quad (49)$$

$$VF_{suboa1} = \frac{H' \times \rho_b}{(\theta_{avs} \times H' + \theta_{wvs} + K_{oc} \times f_{oc} \times \rho_b) \times (1 + \frac{U_{air} \times \delta_{air} \times L_s}{D_s^{eff} \times W})} \quad (50)$$

$$VF_{suboa2} = \frac{W \times \rho_b \times d_s}{U_{air} \times \delta_{air} \times \tau} \times 10^3 \quad (51)$$

$$VF_{suboa} = MIN(VF_{suboa1}, VF_{suboa2}) \quad (52)$$

$$K_s = K_{oc} \times f_{oc} + \frac{K_{oc}^{2nd} f_{oc} C_{s,max}^{2nd}}{C_{s,max}^{2nd} + k_{oc}^{2nd} f_{oc} C_L} \quad (53)$$

$$C_{s,max}^{2nd} = f_{oc} \times (k_{ow} \times C_{sol})^{0.534} \quad (54)$$

$$K_{oc}^{2nd} = 10^{5.92} \quad (55)$$

$$f_{oc} = \frac{f_{om}}{100} \quad (56)$$

$$\theta = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} \quad (57)$$

$$\theta_{wvs} = \frac{\rho_b \times P_{ws}}{\rho_w} \quad (58)$$

$$\theta_{avs} = \theta - \theta_{wvs} \quad (59)$$

$$D_s^{eff} = D_a \times \frac{\theta_{avs}^{3.33}}{\theta^2} + D_w \times \frac{\theta_{wvs}^{3.33}}{H' \times \theta^2} \quad (60)$$

2) 土壤环境基准值计算

致癌污染物:

$$RSC_{IOV} = \frac{ACR}{(IOVER_{ca1} + IOVER_{ca2}) \times SF_i} \quad (61)$$

非致癌污染物:

$$HSC_{IOV} = \frac{RfD_i \times SAF \times AHQ}{IOVER_{nc1} + IOVER_{nc2}} \quad (62)$$

式中：

$IOVER_{ca1}/IOVER_{ca2}$ ——吸入室外空气中来自表层/下层土壤的气态污染物途径土壤暴露量（致癌效应）， $\text{kg}_{\text{土壤}}/(\text{kg}_{\text{土壤}} \cdot \text{d})$ ；

$IOVER_{nc1}/IOVER_{nc2}$ ——吸入室外空气中来自表层/下层土壤的气态污染物途径土壤暴露量（非致癌效应）， $\text{kg}_{\text{土壤}}/(\text{kg}_{\text{土壤}} \cdot \text{d})$ ；

D_s^{eff} ——土壤中气态污染物的有效扩散系数， cm^2/s ；

D_a/D_w ——空气中/水中扩散系数， cm^2/s ； θ 为非饱和土层土壤中总空隙体积比，无量纲；

θ_{avs} ——非饱和土层土壤中孔隙空气体积比，无量纲；

θ_{wvs} ——非饱和土层土壤中孔隙水体积比，无量纲；

H' ——亨利常数，无量纲；

f_{om} ——土壤有机质含量， g/kg ；

$VF_{\text{suroa1}}/VF_{\text{suroa2}}$ ——表层土壤中污染物扩散进入室外空气的挥发因子（算法一/算法二）， kg/m^3 ；

VF_{suroa} ——表层土壤中污染物扩散进入室外空气的挥发因子（算法一和算法二中的较小值）， kg/m^3 ；

$VF_{\text{suboa1}}/VF_{\text{suboa2}}$ ——下层土壤中污染物扩散进入室外空气的挥发因子（算法一和算法二）， kg/m^3 ；

VF_{suboa} ——下层土壤中污染物扩散进入室外空气的挥发因子（算法一和算法二中的较小值）， kg/m^3 ；

W ——土壤污染区宽度， cm ；

U_{air} ——土混合区大气流速风速， cm/s ；

δ_{air} ——混合层高度， cm ；

τ ——气态污染物入侵持续时间， a ；

d/d_s ——表层/下层污染土壤层厚度， cm ；

ρ_b ——土壤容重， kg/dm^3 ；

P_{ws} ——土壤含水率， $\text{kg}_{\text{水}}/\text{kg}_{\text{土壤}}$ ；

ρ_w ——水的密度， $1\text{kg}/\text{dm}^3$ ；

1.7——土壤有机质/有机碳含量转换系数；

L_s ——下层污染土壤上表面到地表距离， cm ；

RSC_{IOV} ——吸入室外空气中来自表层及下层土壤的气态污染物致癌风险土壤环境基准值， mg/kg ；

HSC_{IOV} ——吸入室外空气中来自表层及下层土壤的气态污染物非致癌风险土壤环境基准值， mg/kg 。

ρ_s 的参数含义的见公式 31， K_{oc} 、 f_{oc} 的参数含义见公式 32， f_{om} 的参数含义见公式 56。

8.3.3 吸入室内空气来自下层土壤的气态污染物

1) 土壤暴露量计算

i.住宅用地

致癌污染物：考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害

$$IIVER_{ca1} = VF_{subia} \times \left(\frac{DAIR_c \times EFI_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} + \frac{DAIR_a \times EFI_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \right) \quad (63)$$

非致癌污染物：考虑人群在儿童期暴露的危害

$$IIVER_{nc1} = VF_{subia} \times \frac{DAIR_c \times EFI_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{nc}} \quad (64)$$

ii.商服用地和工业用地

致癌污染物：考虑人群在成人期暴露的危害

$$IIVER_{ca1} = VF_{subia} \times \frac{DAIR_a \times EFI_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{ca}} \quad (65)$$

非致癌污染物：考虑人群在成人期暴露的危害

$$IIVER_{nc1} = VF_{subia} \times \frac{DAIR_a \times EFI_a \times ED_a}{BW_a \times AT_{nc}} \quad (66)$$

$$Q_s = \frac{2\pi \times dP \times K_v \times X_{crack}}{\mu_{air} \times \ln\left(\frac{2 \times Z_{crack}}{R_{crack}}\right)} \quad (67)$$

$$R_{crack} = \frac{A_b \times \eta}{X_{crack}} \quad (68)$$

当 $Q_s=0$ 时，

$$VF_{subia} = \frac{1}{\frac{K_{sw}}{H'} \times \left(1 + \frac{D_s^{eff}}{DF_{ia} \times L_s} + \frac{D_s^{eff} \times L_{crack}}{D_{crack}^{eff} \times L_s \times \eta}\right) \times \frac{DF_{ia}}{D_s^{eff}} \times L_s} \times 10^3 \quad (69)$$

$$D_{crack}^{eff} = D_a \times \frac{\theta_{acrack}^{3.33}}{(\theta_{acrack} + \theta_{wcrack})^2} + D_w \times \frac{\theta_{wcrack}^{3.33}}{H' \times (\theta_{acrack} + \theta_{wcrack})^2} \quad (70)$$

$$DF_{ia} = L_B \times ER \times \frac{1}{86400} \quad (71)$$

$$K_{sw} = \frac{\theta_{ws} + K_d \times \rho_b + H' \times \theta_{as}}{\rho_b} \quad (72)$$

$$K_d = K_{oc} \times f_{oc} \quad (73)$$

$$f_{oc} = \frac{f_{om}}{1.7 \times 1000} \quad (74)$$

当 $Q_s > 0$ 时,

$$VF_{subia1} = \frac{1}{\frac{K_{sw}}{H'} \times \left[e^{\xi} + \frac{D_s^{eff}}{DF_{ia} \times L_s} + \frac{D_s^{eff} \times A_b}{Q_s \times L_s} \times (e^{\xi} - 1) \right] \times \frac{DF_{ia} \times L_s}{D_s^{eff} \times e^{\xi}}} \times 10^3 \quad (75)$$

$$\xi = \frac{Q_s \times L_{crack}}{A_b \times D_{crack}^{eff} \times \eta} \quad (76)$$

如果下层污染土壤厚度已知, 污染物进入室内空气的挥发因子采用下式计算:

$$VF_{subia2} = \frac{d_{sub} \times \rho_b}{DF_{ia} \times \tau \times 31536000} \times 10^3 \quad (77)$$

$$VF_{subia} = \min(VF_{subia1}, VF_{subia2}) \quad (78)$$

2) 土壤环境基准计算

致癌污染物:

$$RSC_{IIV} = \frac{ACR}{IIVER_{ca1} \times SF_i} \quad (79)$$

非致癌污染物:

$$HSC_{IIV} = \frac{RfD_i \times SAF \times AHQ}{IIVER_{nc1}} \quad (80)$$

式中:

$IIVER_{ca1}$ ——吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物途径土壤暴露量 (致癌效应), $\text{kg}_{\text{土壤}}/(\text{kg}_{\text{体重}} \cdot \text{d})$;

$IIVER_{nc1}$ ——吸入室内空气中来自下层土壤的气态污染物途径土壤暴露量 (非致癌效应), $\text{kg}_{\text{土壤}}/(\text{kg}_{\text{体重}} \cdot \text{d})$;

RSC_{IIV} ——室内空气吸入途径基于致癌效应的土壤环境基准, mg/kg ;

HSC_{IIV} ——室内空气吸入途径基于非致癌效应的土壤环境基准, mg/kg ;

VF_{subia} ——下层土壤中污染物扩散进入室内空气的挥发因子, kg/m^3 ;

Q_s ——流经地下室地板裂隙的对流空气流速, cm^3/s ;

π ——圆周率常数, 3.14159;

dP ——室内室外大气压力差, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$;

K_v ——土壤渗透性系数, cm^2 ;

X_{crack} ——地下室内地板 (裂隙) 周长, cm ;

μ_{air} ——空气粘滞系数, $1.81 \times 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$;

Z_{crack} ——地下室地面到地板底部厚度, cm ;

R_{crack} ——室内裂隙宽度, cm ;

A_b ——与土壤接触的地基面积, 此处指地下室内地板面积, cm^2 ;

η ——地基和墙体裂隙表面积占室内地表面积比例, 无量纲;

DF_{ia} ——室内空气中气态污染物扩散因子, $(g \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1})/(g \cdot cm^{-3})$;

ER ——室内空气交换速率, 次/d;

L_B ——室内空间体积与气态污染物入渗面积比, cm ;

D_{crack}^{eff} ——气态污染物在地基与墙体裂隙中的有效扩散系数, cm^2/s ;

θ_{acrack} ——地基裂隙中空气体积比, 无量纲;

θ_{wcrack} ——地基裂隙中水体积比, 无量纲;

L_{crack} ——室内地基或墙体厚度, cm ;

ξ ——土壤污染物进入室内挥发因子计算过程参数;

d_{sub} ——下层污染土壤厚度, cm 。

K_d 的参数含义见公式 31, K_{oc} 、 f_{oc} 的参数含义见公式 32, K_{sw} 的参数含义见公式 36, L_s 的参数含义见公式 50, f_{om} 的参数含义见公式 56。

8.4 基于血铅浓度的铅土壤环境基准计算

1) 铅的背景暴露计算

与其他污染物背景暴露的方法一致。

2) 铅毒理学基准确定

采用 $5 \mu g/dL$ 作为目标血铅浓度。对于儿童, 通过 IEUBK 模型将确定的目标血铅浓度转换为摄入量估算值, 则估算值为 $2.1 \mu g/kg dw/day$ 。对于成人, 通过 ALM 模型确定目标血铅浓度下成人的可接受摄入量, 估算值为 $0.89 \mu g/kg dw/day$ 。

3) 暴露量估算

铅是一种不具有挥发性的无机元素, 人群主要通过以下途径接触土壤中的铅: 经口摄入、皮肤接触、呼吸吸入和自产作物摄入。各途径的铅暴露量估算按下式计算:

①经口摄入途径:

住宅用地/公共公园:

$$OSIER_{Pb} = \frac{OSIR_c \times ED_c \times EF_c \times ABS_o}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (81)$$

商服/工业用地:

$$OSIER_{Pb} = \frac{OSIR_a \times ED_a \times EF_a \times ABS_o}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (82)$$

②皮肤接触土壤:

住宅用地/公共公园:

$$DCSER_{Pb} = \frac{SAE_c \times SSAR_c \times EF_c \times ED_c \times E_v \times ABS_d}{BW_c \times AT_{ca}} \quad (83)$$

商服/工业用地:

$$DCSER_{Pb} = \frac{SAE_a \times SSAR_a \times EF_a \times ED_a \times E_v \times ABS_d}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (84)$$

③吸入土壤颗粒物

住宅用地/公共公园：

$$PISER_{Pb} = \frac{PM_{10} \times DAIR_c \times ED_c \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO_c + f_{spi} \times EFI_c)}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (85)$$

商服/工业用地：

$$PISER_{Pb} = \frac{PM_{10} \times DAIR_a \times ED_a \times PIAF \times (f_{spo} \times EFO_a + f_{spi} \times EFI_a)}{BW_a \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (86)$$

④自产作物摄入

住宅用地：

$$HP_{Pb} = \frac{CF \times CR \times HF \times EF_c \times ED_c}{BW_c \times AT_{ca}} \times 10^{-6} \quad (87)$$

⑤铅暴露总量

住宅用地：

$$ADE_{Pb} = OISER_{Pb} + DCSER_{Pb} + PISER_{Pb} + HP_{Pb} \quad (88)$$

公园/商服/工业用地：

$$ADE_{Pb} = OISER_{Pb} + DCSER_{Pb} + PISER_{Pb} \quad (89)$$

式中：

OISER_{Pb}——铅经口摄入途径的暴露量，kg_{土壤}/(kg_{体重}·d)；DCSER_{Pb}——铅经皮肤接触途径的暴露量，kg_{土壤}/(kg_{体重}·d)；PISER_{Pb}——铅经吸入土壤颗粒物途径的暴露量，kg_{土壤}/(kg_{体重}·d)；ADE_{Pb}——铅的暴露总量，kg_{土壤}/(kg_{体重}·d)；

其余参数见上文所述。

4) 铅土壤环境基准的计算

$$CV_{Pb} = \frac{HCV_{Pb} - EDI_{Pb}}{ADE_{Pb}} \quad (90)$$

式中：

CV_{Pb}——铅的土壤环境基准，mg/kg；HCV_{Pb}——铅的毒理学基准，mg/kg dw/day；EDI_{Pb}——铅的背景暴露量，mg/(kg·day)。

8.5 参数确定

建设用地土壤人体健康环境基准推导所需参数见附录 A。

8.6 基准值的确定

1) 污染物单一暴露途径土壤环境基准值取该暴露途径下污染物致癌风险土壤环境基准值和非致癌风险土壤环境基准值中的最小值。

2) 某类用地方式下单一关注污染物的土壤人体健康环境基准值通过分析集成法确定,即采用下式计算:

基于致癌效应土壤环境基准的确定:

$$RSC = \frac{1}{\frac{1}{RSC_{OIS}} + \frac{1}{RSC_{DCS}} + \frac{1}{RSC_{PIS}} + \frac{1}{RSC_{HP}} + \frac{1}{RSC_{IOV}} + \frac{1}{RSC_{IIV}}} \quad (91)$$

基于非致癌效应土壤环境基准的确定:

$$HSC = \frac{1}{\frac{1}{HSC_{OIS}} + \frac{1}{HSC_{DCS}} + \frac{1}{HSC_{PIS}} + \frac{1}{HSC_{HP}} + \frac{1}{HSC_{IOV}} + \frac{1}{HSC_{IIV}}} \quad (92)$$

式中:

RSC_{OIS} 的参数含义见公式 7, HSC_{OIS} 的参数含义见公式 8, RSC_{DCS} 的参数含义见公式 17, HSC_{DCS} 的参数含义见公式 18, RSC_{PIS} 的参数含义见公式 25, HSC_{PIS} 的参数含义见公式 26, RSC_{HP} 的参数含义见公式 29, HSC_{HP} 的参数含义见公式 30, RSC_{IOV} 的参数含义见公式 61, HSC_{IOV} 的参数含义见公式 62, RSC_{IIV} 的参数含义见公式 79, HSC_{IIV} 的参数含义见公式 80。

最终的土壤人体健康环境基准选择基于致癌效应和非致癌效应土壤环境基准的最小值,一般保留两位小数,单位用 mg/kg 表示。

9 建设用地土壤人体健康环境基准不确定性分析

土壤环境基准的最终确定需要仔细审核基准推导所用数据以及推导步骤,以确保基准合理可靠。

基准的自审项目如下:

- 1) 使用的参数是否可被充分证明有效,参数的来源与选择是否有可靠的依据。
- 2) 所有使用的数据是否符合数据质量要求。
- 3) 是否存在明显异常数据。
- 4) 是否遗漏其他重要数据。
- 5) 通过与其他数值进行比较,分析判断基准数值与国内外现有数值存在的差异是否合理。

附录 A

(资料性)

风险评估模型参数常用数据库及推荐值

A.1 参数数据库

常用的参数数据库有：

1) 国家生态环境部《中国人群暴露参数手册》、《中国居民营养与健康状况调查报告》、我国国家/地方实测数据以及我国陆地生态信息空间气象数据库。

2) 美国环保局《暴露参数手册》、美国环保局综合风险信息系统 (USEPA Integrated Risk Information System)、美国环保局临时性同行审定毒性数据 (The Provisional Reviewed Toxicity Values)、美国环保局区域办公室“区域筛选值 (Regional Screening levels)”总表。

A.2 文献数据库

常用的文献数据库有：

1) Web of Science, <http://www.isiknowledge.com>;

2) 中国知网, <https://www.cnki.net/>;

3) 万方数据库, <https://www.wanfangdata.com.cn/index.html>。

A.3 建设用地土壤人体健康环境基准推导参数推荐值

1) 暴露参数

表 A.1 暴露参数推荐值

序号	参数	简称	单位	住宅用地	公园用地	商服/工业用地
1	儿童体重	BW _c	kg	14.5	14.5	不考虑
2	成人体重	BW _a	kg	65	65	65
3	儿童身高	H _c	cm	94.25	94.25	不考虑
4	成人身高	H _a	cm	164	164	164
5	儿童呼吸速率	DAIR _c	m ³ /d	6.3	6.3	不考虑
6	成人呼吸速率	DAIR _a	m ³ /d	16.25	16.25	16.25
7	儿童暴露期	ED _c	a	6	6	不考虑
8	成人暴露期	ED _a	a	24	24	25
9	非致癌效应平均时间	AT _{nc}	d	2190	2190	9125
10	致癌效应平均时间	AT _{ca}	d	28105	28105	28105

11	暴露频率	EF	d/a	350	253 (93) ¹	240
12	室内暴露频率	EFI	d/a	298 (280) ²	不考虑	210 (0) ³
13	室外暴露频率	EFO	d/a	52 (70) ²	253 (93) ¹	30 (240) ³
14	儿童皮肤粘附因子	SSAR _c	mg/cm ²	0.2 (0.3) ²	0.2	不考虑
15	成人皮肤粘附因子	SSAR _a	mg/cm ²	0.04 (0.07) ²	0.04	0.1 (0.2) ³
16	儿童皮肤暴露比例	SER _c	无量纲	0.32	0.25	
17	成人皮肤暴露比例	SER _a	无量纲	0.33	0.26	0.13 (0.26) ³
18	自产作物比例	HF	无量纲	0.1 (0.5) ²	不考虑	不考虑
19	儿童作物消费量	CR _c	g/d	根茎类: 4.74 (5.84) ² 叶类: 185 (158.9) ²		
20	成人作物消费量	CR _a	g/d	根茎类: 9.5(11.68) ² 叶类: 370 (317.8) ²		
21	儿童土壤摄入率	OSIR _c	mg/day	100 (200) ²	50	
22	成人土壤摄入率	OSIR _a	mg/day	50 (200) ²	25	25 (50) ³
23	可接受危害商	AHQ	无量纲	1	1	1
24	可接受致癌风险	ACR	无量纲	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	10 ⁻⁶
25	每日皮肤接触事件频率	Ev	次/d	1	1	1
26	室内空气中来自土壤颗粒物的比例	f _{spi}	无量纲	0.8	0.8	0.8
27	室外空气中来自土壤颗粒物的比例	f _{spo}	无量纲	0.5	0.5	0.5
28	PM10 含量	PM ₁₀	mg/m ³	0.119	0.119	0.119
29	经口摄入吸收效率因子	ABS _o	无量纲	1	1	1
30	吸收土壤颗粒物在体内滞留比例	PIAF	无量纲	0.75	0.75	0.75

31	暴露于土壤的参考剂量分配系数	SAF	无量纲	0.2	0.2	0.2
----	----------------	-----	-----	-----	-----	-----

注：1：括号外代表适用于儿童/社区公园，括号内代表适用于其他公园；

2：括号外代表适用于城市住宅，括号内代表适用于农村住宅；

3：括号外代表适用于室内工人，括号内代表适用于室外工人；

表 A.2 土壤性质参数推荐值

序号	参数	简称	单位	住宅用地	公园用地	商服/工业用地
1	土壤有机质	f_{om}	g/kg	32	32	32
2	土壤容重	ρ_b	g/cm ³	1.35	1.35	1.35
3	土壤颗粒密度	ρ_s	g/cm ³	2.65	2.65	2.65
4	土壤污染区宽度	W	cm	4000	4000	4000
5	表层土壤污染厚度	d	cm	100	100	100
6	下层土壤污染厚度	d_s	cm	100	100	100
7	下层污染土壤上表面到地表距离	L_s	cm	100	100	100

表 A.3 气象和建筑物参数推荐值

序号	参数	简称	单位	住宅用地	公园用地	商服/工业用地
1	混合区大气流速风速	U_{air}	cm/s	200	200	200
2	混合层高度	δ_{air}	cm	200	200	200
3	室内气体交换速率	ER	次/d	12	—	20
4	室内地基或墙体厚度	L_{crack}	cm	35	—	35
5	室内空间体积与气态污染物入渗面积之比	L_B	cm	200	—	300
6	地基和墙体裂隙表面积所占比例	η	无量纲	0.0005	—	0.0005
7	地基裂隙中空气体积比	θ_{acrack}	无量纲	0.26	—	0.26
8	地基裂隙中水体积比	θ_{wcrack}	无量纲	0.12	—	0.12
9	气态污染物持续入侵时间	τ	无量纲	30	—	25

附录 B
(资料性)
石油烃土壤环境基准制定

石油烃土壤环境基准的计算方法同样也采用基于风险的方法。然而石油烃是一系列碳氢化合物和其他化合物的复杂混合物，因此石油烃土壤环境基准的计算与其他污染物略有不同，主要体现在石油烃指示物的选择以及石油烃蒸气入侵方面，下文对此进行详细介绍。

B.1 石油烃馏分选择

指示物的方法是指采用可能对人类健康风险构成最大风险的一组化学物质来代替石油烃。这些物质通常包括：苯、甲苯、二甲苯、萘、多环芳烃。虽然这些物质也属于石油烃，但由于其高危害性，它们通常被作为单独的化学品进行处理并单独制定了土壤环境基准。对于石油烃中的其他物质，通常采用石油烃馏分代替，并为不同馏分的石油烃单独制定土壤环境基准。采用“碳当量”(Equivalent Carbons, ECs)方法，即依据 EC 与化合物的环境迁移能力的关系确定石油烃馏分是目前普遍采用的方法。

由于相同碳原子数目下，芳香族化合物比脂肪族化合物更易溶于水，不易挥发，因此将石油烃馏分首先分为脂肪族石油馏分和芳香族石油馏分。然后将脂肪族和芳香族化合物中沥滤系数和挥发系数在一个数量级内的物质合并为一个馏分。最后，本研究将除苯、甲苯、二甲苯、萘、多环芳烃外的石油烃划分为 4 组分，分别为：C₆-C₁₀、C₁₀-C₁₆、C₁₆-C₃₄ 以及 C₃₄-C₅₀。石油烃各子馏分的毒性参数如附表 B.1 所示。

表 B.1 石油烃馏分划分及其相应毒性参数

碳当量数目		参考剂量/[mg/(kg · d)]	参考浓度/(mg/m ³)
脂肪族	C ₆ -C ₈	5.0	18.4
	>C ₈ -C ₁₀	0.1	1
	>C ₁₀ -C ₁₂	0.1	1
	>C ₁₂ -C ₁₆	0.1	1
	>C ₁₆ -C ₂₁	2	NA
	>C ₂₁ -C ₃₄	2	NA
	>C ₃₄	20	
芳香族	>C ₇ -C ₈	0.2	0.4
	>C ₈ -C ₁₀	0.04	0.2
	>C ₁₀ -C ₁₂	0.04	0.2
	>C ₁₂ -C ₁₆	0.04	0.2
	>C ₁₆ -C ₂₁	0.03	NA
	>C ₂₁ -C ₃₄	0.03	NA

	>C ₃₄	0.03	NA
--	------------------	------	----

计算各馏分的土壤环境基准，首先需要计算各子馏分的土壤环境基准，然后在假设石油烃中芳香烃和脂肪族化合物的比例为 2:8 的条件下，根据石油烃各子馏分的组成比例（表 B.2）进行加权得到 4 个馏分的土壤环境基准。例如 C₆-C₁₀ 石油烃基于致癌健康风险的土壤环境基准计算如下：

$$RSC_{C6-C10} = \frac{1}{\frac{0.55}{RSC_{C6-C8aliphatic}} + \frac{0.36}{RSC_{>C8-C10aliphatic}} + \frac{0.09}{RSC_{>C8-C10aromatic}}} \quad (B1)$$

不同石油烃馏分的组成如表 B.2 所示：

表 B.2 指定石油烃馏分的推荐组成成分

石油烃各子馏分 (TPHCWG 划分)	C ₆ -C ₁₀	C ₁₀ -C ₁₆	C ₁₆ -C ₃₄	C ₃₄ -C ₅₀
脂肪族				
C ₆ -C ₈	0.55			
>C ₈ -C ₁₀	0.36			
C ₁₀ -C ₁₂		0.36		
C ₁₂ -C ₁₆		0.44		
C ₁₆ -C ₂₁			0.56	
C ₂₁ -C ₃₄			0.24	
>C ₃₄				0.8
芳香族				
C ₇ -C ₈				
C ₈ -C ₁₀	0.09			
C ₁₀ -C ₁₂		0.09		
C ₁₂ -C ₁₆		0.11		
C ₁₆ -C ₂₁			0.14	
C ₂₁ -C ₃₄			0.06	
>C ₃₄				0.2

B.2 石油烃蒸气入侵途径

蒸气入侵通常是污染地块土壤中氯化挥发性有机化合物以及石油碳氢化合物的主要暴露途径。然而，现场经验表明，由于土壤和地下水中普遍存在能够降解碳氢化合物的微生物，因此石油烃经蒸气入侵途径的风险显著降低，在石油烃蒸气入侵途径的评估中需要考虑微生物

物的好氧生物降解。在推导吸入室内蒸气途径的土壤环境基准时，石油烃与其他挥发性有机化合物的区别主要是蒸气入侵过程中衰减因子的计算，吸入室内空气来源于下层土壤石油烃蒸气的土壤环境基准计算公式没有变化，因此下文只讨论了石油烃蒸气入侵评估衰减因子的计算方法。

BioVapor 是 DeVaul 于 2007 年提出的具有氧气限制生物降解模型的石油烃室内蒸气入侵评估模型。该模型是一种一维分析模型，结合了稳态蒸气源、均匀地下土层中以扩散为主的土壤蒸气传输以及建筑物维护结构内的混合。在没有生物降解的情况下，该模型基本上等同于 J&E 模型。尽管也有其他分析模型解释了一级衰变的生物降解，但 BioVapor 通过解释有限的氧气可用性改进了该方法。对于已开发的污染地块，本指南推荐可采用 BioVapor 模型计算石油烃蒸气入侵途径的土壤环境基准。

采用 BioVapor 模型时需要满足以下假设：1) 限氧生物降解；2) 稳定的蒸气污染源；3) 土壤气运移以扩散作用为主导；4) 均质包气带土壤；5) 蒸气在密闭室内充分混合；6) 忽略参数的时空变化。BioVapor 模型中使用的概念模型与 J&E 模型的概念模型类似，主要包括：建筑物、土壤层以及深处的石油蒸气源。石油烃蒸气主要通过墙壁和地基上的裂缝、开口进入建筑物。土壤层分为一级生物降解的浅层好氧层和忽略生物降解的深层厌氧层。衰减因子的具体计算公式如下所示：

$$AF = \frac{C_e}{C_s} = \frac{\frac{1}{L_{mix} \bullet ER}}{[A + \frac{L_b}{L_a} \frac{(A^2 - 1)}{B}] (\frac{1}{L_{mix} \bullet ER} + \frac{1}{h}) + \frac{B \bullet L_a + A \bullet L_b}{D_{eff}}} \quad (B2)$$

$$A = \frac{\exp(-\alpha_a) + \exp(\alpha_a)}{2} = \cosh(\alpha_a) \quad (B3)$$

$$B = \frac{\exp(\alpha_a) - \exp(-\alpha_a)}{2\alpha_a} = \frac{1}{\alpha_a} \sinh(\alpha_a) \quad (B4)$$

$$\alpha_a = \frac{L_a}{L_R} \quad (B5)$$

$$L_R = \sqrt{\frac{D_{eff} \bullet H}{K_w \bullet \theta_w}} \quad (B6)$$

$$D_{eff} \bullet \frac{\partial^2 c_v}{\partial^2 z} = \frac{\theta_w}{H} \bullet k_w \bullet c_v \quad (B7)$$

当 $Q_s=0$ 时：

$$h = \frac{\eta \bullet D_{crack}}{L_{crack}} \quad (B8)$$

当 $Q_s>0$ 时：

$$h = \frac{L_{mix} \times ER}{\frac{1}{\exp(\xi)} + \frac{L_{mix} \bullet ER \bullet A_b}{Q_s} \times \frac{\exp(\xi) - 1}{\exp(\xi)} - 1} \quad (B9)$$

$$\xi = \frac{Q_s \bullet L_{crack}}{A_b \bullet D_{crack} \bullet \eta} \quad (B10)$$

在 BioVapor 模型中, 有两种方法来设定氧在土壤中迁移的上限边界条件, 一种方法是设定通量, 另一种方法是设定最大浓度, 分别如下式所示。L_a 和 L_b 根据下列公式计算:

$$-\left(\frac{\rho_s \bullet \Lambda_{base, O_2} \bullet L_{T1}}{J_{f, O_2}}\right) \bullet \left(\frac{L_{a1}}{L_{T1}}\right)^2 + \left(\frac{\rho_s \bullet \Lambda_{base, O_2} \bullet L_T}{J_{f, O_2}} - 1\right) \left(\frac{L_{a1}}{L_{T1}}\right) + 1 + \sum_{i=1}^N \left[\frac{D_{eff, i} \bullet (c_{i, s} - c_{i, t})}{J_{f, O_2} \bullet \varphi_i \bullet L_T}\right] = 0 \quad (B11)$$

$$\left[1 + \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_{eff, i} \bullet c_{i, s}}{D_{eff, O_2} \bullet c_{O_2, f} \bullet \varphi_i}\right)\right] \left(\frac{L_{a2}}{L_{T2}}\right) + \left[\frac{\rho_s \bullet \Lambda_{O_2} \bullet L_{T2}^2}{2 \bullet D_{eff, O_2} \bullet c_{O_2, f}}\right] \bullet \left(\frac{L_{a2}}{L_{T2}}\right)^2 + \left[-\frac{\rho_s \bullet \Lambda_{O_2} \bullet L_{T2}^2}{2 \bullet D_{eff, O_2} \bullet c_{O_2, f}}\right] \bullet \left(\frac{L_{a2}}{L_{T2}}\right)^3 = 1 \quad (B12)$$

$$\Lambda_{O_2} = \sum_{i=1}^N \frac{\Lambda_i}{\varphi_i} + \Lambda_{base, O_2} \quad (B13)$$

$$L_a = \min(L_{a1}, L_{a2}) \quad (B14)$$

$$L_T = L_a + L_b \quad (B15)$$

式中:

AF——石油烃从污染源处到室内的衰减因子;

C_c——室内蒸气浓度;

C_s——源蒸气浓度;

L_{mix}——气体室内混合的高度;

L_a——好氧区深度;

L_b——厌氧区深度;

h——通过地基的质量传输系数;

D_{eff}——化学物质在土壤中的有效扩散系数;

c_v——土壤气浓度;

LR——生物降解速率影响扩散反应的深度;

K_w——一阶降解速率;

H——亨利常数;

ρ_s——土壤密度;

Λ_{O₂}——N 种化学品生物降解过程中的需氧量总和;

Λ_{base, O₂}——基线耗氧量;

ψ_i——特定化学物质化学组分与其耗氧量的质量比;

θ_w 的参数含义见公式 31, A_b 的参数含义见公式 68, ER 的参数含义见公式 71。

全国团体标准信息平台

附录 C (资料性)

建设用地土壤人体健康环境基准技术报告编制大纲

根据《国家环境基准管理办法（试行）》，为阐述建设用地土壤人体健康环境基准制定的具体方法和过程，需要为每种关注污染物建设用地土壤人体健康环境基准的推导编制技术报告，以阐述环境基准制定的具体方法和过程。技术报告的主要内容包括污染物性质分析、暴露分析、基准推导及表述以及基准自审核等，不同污染物参照相似的编制大纲。

C.1 前言

描述关注污染物建设用地土壤人体健康环境基准推导的必要性，阐述目标污染物建设用地土壤人体健康环境基准研究的国内外进展，包括国内外相关基准的发布机构、制/修订时间以及基准的推导方法等。

C.2 污染物环境问题

描述关注污染物的理化性质、在我国的生产与使用情况、近年来我国环境中污染物的来源与浓度分布，以及污染物在环境中的迁移与归趋等情况。

C.3 污染物的毒性效应分析

详细描述污染物的毒性机理，分析污染物对动物与人体的毒性以及可能产生的毒性效应，具体分析污染物可能造成的生殖毒性、致畸性、致癌性与遗传毒性，并根据毒性效应的分析结果，确定污染物的毒理学限值。

C.4 参数来源

详细阐述所使用的主要参数以及各个参数的确定原则与具体来源。

C.5 建设用地土壤人体健康环境基准的推导

详细描述基准推导的方法和结果，具体包括：

- 1) 关注污染物基于非致癌效应土壤环境基准的推导过程与结果；
- 2) 关注污染物基于致癌效应土壤环境基准的推导过程与结果；
- 3) 土壤环境基准取值的有效数字保留情况以及最终确定的依据等。

C.6 建设用地土壤人体健康环境基准的比较分析

详细比较土壤环境基准与其他国家的差异，并具体分析其原因，以判断基准值的合理性；其次描述基准推导过程中不确定性的来源，并针对主要来源分析不确定性产生的原因。

C.7 基准审核

详细描述并分析基准推导过程中使用的参数、数据、计算公式等是否合理可靠。

参考文献

描述为反映基准推导工作背景和依据、撰写《技术报告》而引用的有关文献资料信息的出处。

附录

将用于基准推导的相关数据和其他必要信息列于附录。