

团 体 标 准

T/CSES 40—2021

多环芳烃环境健康风险评估技术规范

Technical specification for environmental health risk assessment of
polycyclic aromatic hydrocarbons

2021 - 12 - 22 发布

2022 - 01 - 01 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 评估程序与内容	2
5 评估方案制定	4
6 数据收集与评估	4
7 暴露评估	4
8 危害评估	5
9 风险表征	6
10 报告编制	10
附录 A (资料性) 多环芳烃基本信息和理化性质	11
附录 B (规范性) 暴露评估推荐模型	14
附录 C (规范性) 风险评估模型参数推荐值及外推模型	18
参考文献	21

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华南环境科学研究所提出。

本文件由中国环境科学学会归口。

本文件起草单位：生态环境部华南环境科学研究所、中科鼎实环境工程有限公司、湖北省生态环境科学研究院、广州珠江实业环境保护有限公司、中山大学。

本文件主要起草人：于云江、于紫玲、张文、刘哲、董淑容、陈柳青、吴易喆、张若雯、王海东、郑盛之、刘振升、朱成杰、罗伟铿、董光辉、向明灯、朱晓辉、郑彤。

多环芳烃环境健康风险评估技术规范

1 范围

本文件规定了开展多环芳烃环境健康风险评估的程序、内容、方法和技术要求。

本文件适用于环境介质（空气、水、土壤/尘等）中萘、蒽、芘、苊、菲、葱、荧蒹、芘、苯并[a]葱、蒽、苯并[b]荧蒹、苯并[k]荧蒹、苯并[a]芘、二苯并[a, h]葱、苯并[g, h, i]芘和茚并[1, 2, 3-c, d]芘等16种多环芳烃（详见附录A）污染的健康风险评估。其他多环芳烃类污染的环境健康风险评估可以参照本文件执行。

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。

- GB 5009.256 食品安全国家标准 食品中多环芳烃的测定
- GB/T 27921 风险管理 风险评估技术
- HJ 2.2 环境影响评价技术导则 大气环境
- HJ 2.3 环境影响评价技术导则 地表水环境
- HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则
- HJ 478 水质 多环芳烃的测定 液液萃取和固相萃取高效液相色谱法
- HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境
- HJ 646 环境空气和废气 气相和颗粒物中多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法
- HJ 805 土壤和沉积物 多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法
- HJ 839 环境与健康现场调查技术规范 横断面调查
- HJ 875 环境污染物人群暴露评估技术指南
- 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 1111 生态环境健康风险评估技术指南 总纲
- SC/T 3042 水产品中16种多环芳烃的测定 气相色谱-质谱法
- T/CSES 36 区域环境污染健康风险评估技术导则
《环境与健康横断面调查数据统计分析技术指南》（环境保护部公告 2017年 第63号）

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

毒性当量因子 toxic equivalency factor; TEF

某个化合物同类物与指定化合物的相对毒性效力。对于多环芳烃，以毒性最强的苯并[a]芘的TEF为1，其他多环芳烃单体折算成苯并[a]芘的相对毒性效力。

3.2

毒性当量浓度 toxicity equivalence concentration; TEC

某个化合物同类物浓度与其对应的TEF乘积。对于多环芳烃，为各多环芳烃单体浓度折算为相当苯并[a]芘毒性的等价浓度。

4 评估程序与内容

多环芳烃环境健康风险评估程序包括评估方案制定、数据收集与评估、暴露评估、危害评估和风险表征，评估程序见图 1。

- a) 评估方案制定。明确评估目的、评估范围、数据获取方法和评估内容及要求，并制定评估方案；
- b) 数据收集与评估。通过收集模型预测、实验研究或现场调查等方法获取所需的相关文献资料和数据，掌握评估区域基本资料、多环芳烃污染范围及程度，明确评估区域人群生活方式和活动特点，分析可能的敏感人群；
- c) 暴露评估。定性或定量估计特定情景下人群经不同途径暴露于多环芳烃的暴露量；
- d) 危害评估。收集污染物相关的毒性效应、效应终点及其文献证据，阐明污染物的作用模式或机制，判断污染物与其健康危害的因果关系。定性描述多环芳烃引起个体或群体发生有害效应的危害等级；建立多环芳烃暴露与有害效应之间的剂量-反应（效应）关系，确定多环芳烃毒性参数，包括参考剂量、参考浓度、致癌斜率因子和呼吸吸入单位致癌斜率因子等；
- e) 风险表征。在暴露评估和危害评估的基础上，采用风险评估模型计算环境介质中多环芳烃多污染物多途径的总风险。

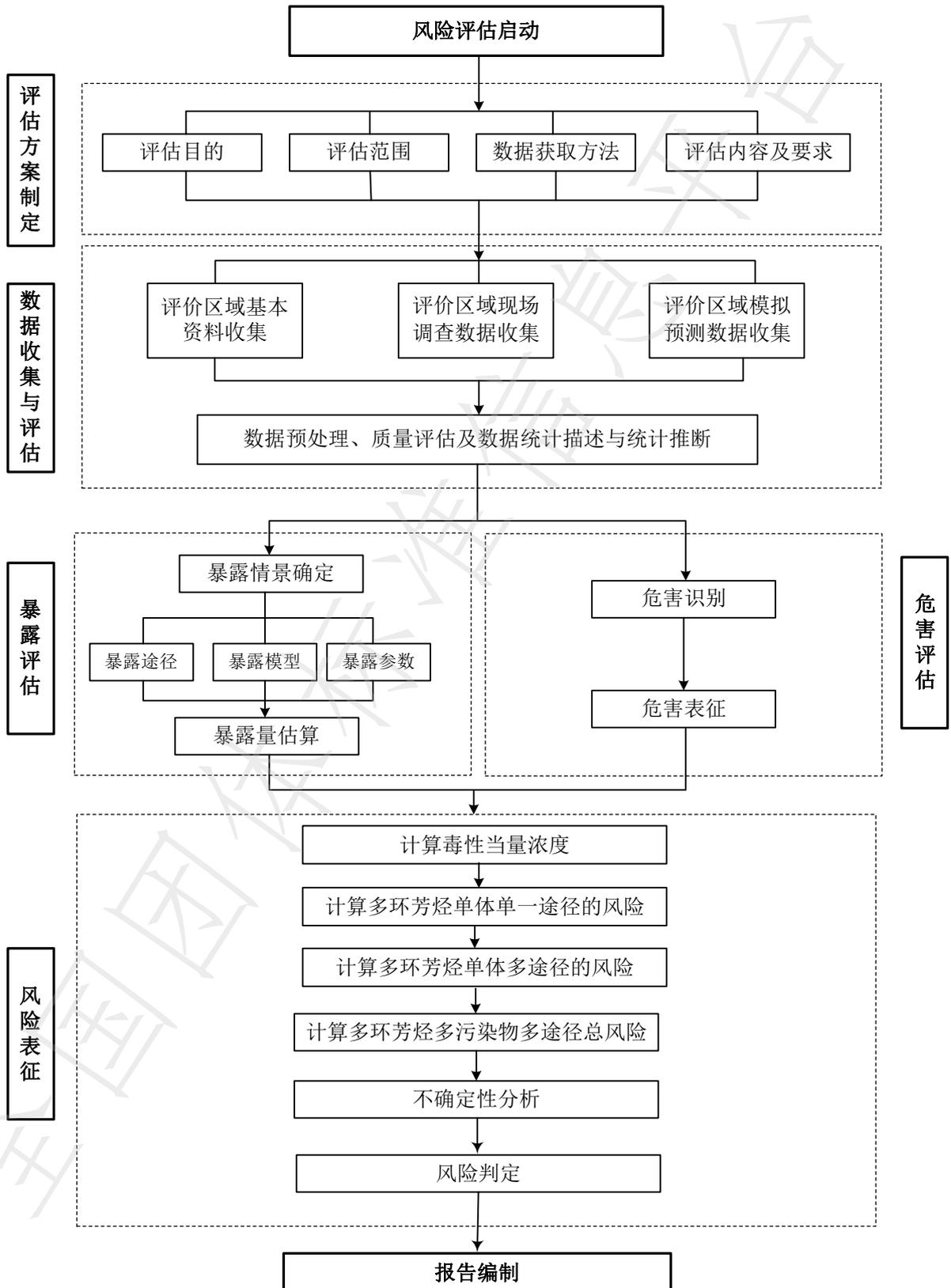


图1 多环芳烃环境健康风险评估程序

5 评估方案制定

评估区域多环芳烃风险评估的目的、评估范围、数据获取方法以及评估内容与要求按照T/CSES 36 相关规定执行。

6 数据收集与评估

6.1 数据收集

6.1.1 评估区域基本资料

按照 HJ 839 的规定对评估区域进行多环芳烃污染状况及污染识别，获得以下信息：

- a) 评估区域地理位置、地形、地貌、地质、土壤、水文和气象等自然条件；
- b) 评估区域人口构成与分布、经济状况、土地利用等社会发展情况；
- c) 多环芳烃污染源排放特征、影响范围及其污染程度、影响迁移转化的环境因素等环境资料；
- d) 评估区域居民健康档案、疾病监测、卫生统计年鉴及环境污染健康影响调查报告等健康资料。

6.1.2 现场调查数据

收集采用国家相关标准检测方法获得的环境空气、室内空气、土壤、农畜水产品、地表水、地下水等环境介质中多环芳烃的数据。若无法收集到现场调查数据，可按照 HJ 839 的相关规定开展环境与健康调查工作，多环芳烃的分析按照 GB 5009.256、HJ 646、HJ 478、HJ 805、SC/T 3042 相关规定执行。

6.1.3 模拟预测数据

无法收集现场调查数据时，收集 HJ 2.2、HJ 2.3、HJ 610、HJ 25.3 推荐的相关模型模拟的大气、地表水、地下水、土壤中多环芳烃数据。

6.2 数据评估

数据缺失值、未检出值、离群值等预处理，数据真实性、准确性、精确性等质量评价，以及数据统计描述与统计推断等按照《环境与健康横断面调查数据统计分析技术指南》等的相关要求执行。

7 暴露评估

7.1 暴露人群确定

儿童和成人均可能因长时间暴露多环芳烃污染而产生健康危害。对于致癌效应，考虑人群的终生暴露危害，一般根据儿童期和成人期的暴露来评估多环芳烃的终生致癌风险；对于非致癌效应，儿童较为敏感，一般根据儿童期暴露来评估。

7.2 暴露途径确定

7.2.1 本文件主要规定了以下暴露途径：

- a) 吸入环境空气/室内空气；
- b) 经口摄入农畜水产品；
- c) 经口饮用地表水/地下水；
- d) 经口摄入土壤/室内积尘；
- e) 皮肤接触土壤/室内积尘；
- f) 皮肤接触地表水。

7.2.2 特定暴露情景下的主要暴露途径可根据实际情况分析确定。

7.3 暴露参数确定

7.3.1 受多环芳烃影响评估区域中敏感人群的暴露参数宜尽可能根据现场调查获得，可按照 HJ 876 和 HJ 877 的相关规定开展现场调查获得。

7.3.2 若无法开展暴露参数现场调查，可参考 HJ 1111 和 HJ 875 中规定的暴露参数取值优先顺序确定。

7.4 暴露模型选择

7.4.1 呼吸吸入途径

人群可因呼吸吸入途径而暴露于污染环境空气/室内空气。对于多环芳烃的致癌和非致癌效应，吸入室内（外）空气途径的暴露推荐模型见附录 B 中公式（B.1）和公式（B.2）。

7.4.2 经口摄入途径

包括以下途径：

a) 经口摄入农畜水产品途径

人群可因经口摄入暴露于污染农畜水产品。对于多环芳烃的致癌和非致癌效应，经口摄入农畜水产品途径的暴露推荐模型见附录 B 中公式（B.3）和公式（B.4）。

b) 饮用地表（下）水途径

人群可因经口摄入暴露于污染地表（下）水。对于多环芳烃的致癌和非致癌效应，经饮用地表（下）水途径的暴露推荐模型见附录 B 中公式（B.5）和公式（B.6）。

c) 经口摄入土壤（尘）途径

人群可因经口摄入暴露于污染土壤（尘）。对于多环芳烃的致癌和非致癌效应，经口摄入土壤途径的暴露推荐模型见附录 B 中公式（B.7）和公式（B.8）。

7.4.3 皮肤接触途径

包括以下途径：

a) 皮肤接触土壤（尘）途径

人群可因皮肤接触途径暴露于污染土壤（尘）。对于多环芳烃的致癌和非致癌效应，皮肤接触土壤（尘）途径的暴露推荐模型见附录 B 中公式（B.9）和公式（B.10）。

b) 皮肤接触地表水途径

人群可因皮肤接触途径暴露于污染地表水。对于多环芳烃的致癌和非致癌效应，皮肤接触地表水途径的暴露推荐模型见附录 B 中公式（B.11）和公式（B.12）。

7.5 暴露量估算

暴露量估算采用附录 B 推荐暴露模型进行估算。

8 危害评估

8.1 危害识别

8.1.1 危害识别是从危害因素的理化特性、吸收、分布、代谢、排泄、毒理学特性等方面进行描述。

8.1.2 综合分析国际权威机构最新的多环芳烃技术报告或述评，确定多环芳烃同系物的基本信息（化学名称、分子式、结构式、分子量等）和理化性质（密度、熔点、沸点、饱和蒸汽压溶解度等）；收集多环芳烃相关的毒性效应、效应终点及关键证据，阐明多环芳烃的作用模式或机制，判断多环芳烃与其健康危害的因果关系。常见多环芳烃的基本信息和理化性质以及健康效应特征见附录 A 中表 A.1 和表 A.2。

8.2 危害表征

8.2.1 危害表征是从危害因素与不同健康效应（毒性终点）的关系、作用机制等方面进行定量描述。

8.2.2 在危害识别的基础上，分析多环芳烃对人体健康的危害效应，包括致癌效应和非致癌效应，确

定推导毒性参数所依据的关键证据、效应终点、起算点、不确定性系数等信息，确定多环芳烃毒性参数。

8.2.3 致癌效应毒性参数包括呼吸吸入单位致癌斜率因子（IUR）、经口摄入致癌斜率因子（SF_{oral}）和皮肤接触致癌斜率因子（SF_{dermal}）。用于外推皮肤接触致癌斜率因子的推荐模型见附录 C 中公式（C.1）。

8.2.4 非致癌效应毒性参数包括呼吸吸入参考浓度（RfC）、经口摄入参考剂量（RfD_{oral}）和皮肤接触参考剂量（RfD_{dermal}）。用于外推皮肤接触参考剂量的推荐模型见附录 C 中公式（C.2）。

9 风险表征

9.1 一般技术要求

根据确定的暴露情景中多环芳烃的浓度数据，对致癌和非致癌风险进行风险表征。如关注暴露情景中多环芳烃的浓度数据呈正态分布，可根据数据的平均值、平均值置信区间上限值或最大值组合表征致癌和非致癌风险。

9.2 毒性当量浓度计算

本文件采用苯并[a]芘毒性当量因子计算多环芳烃各单体的等效致癌毒性浓度。按照公式（1）计算：

$$TEC_i = C_i \times TEF_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- TEC_i ——多环芳烃单体 *i* 的苯并[a]芘等效浓度；
- C_i ——多环芳烃单体 *i* 在环境介质中的浓度；
- TEF_i ——多环芳烃单体 *i* 的毒性当量因子，无量纲，推荐值见附录 C 中表 C.3。

9.3 单一污染物单一途径暴露的风险计算

9.3.1 单一污染物致癌风险

9.3.1.1 呼吸吸入途径

吸入环境空气/室内空气途径的终生超额致癌风险按照公式（2）计算：

$$R_{inh-i} = EC_{inh-caai} \times IUR_{inh-BaP} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- R_{inh-i} ——吸入环境空气/室内空气途径多环芳烃单体 *i* 的终生超额致癌风险，无量纲；
- EC_{inh-caai} ——吸入环境空气/室内空气中多环芳烃单体 *i* 对应的暴露浓度，μg/m³；
- IUR_{inh-BaP} ——苯并[a]芘呼吸吸入单位致癌斜率因子，(μg/m³)⁻¹。

9.3.1.2 经口摄入途径

经口摄入途径的致癌风险包括：

a) 经口摄入农畜水产品途径的终生超额致癌风险按照公式（3）计算：

$$R_{oral-fi} = ADD_{oral-cafi} \times SF_{oral-BaP} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- R_{oral-fi} ——经口摄入农畜水产品途径多环芳烃单体 *i* 的终生超额致癌风险，无量纲；
- ADD_{oral-cafi} ——经口摄入农畜水产品中多环芳烃单体 *i* 对应的暴露剂量（致癌效应），mg/(kg·d)；
- SF_{oral-BaP} ——苯并[a]芘经口摄入致癌斜率因子，[mg/(kg·d)]⁻¹。

b) 经口饮用地表（下）水途径的致癌风险按照公式（4）计算：

$$R_{oral-wi} = ADD_{oral-cawi} \times SF_{oral-BaP} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$R_{oral-wi}$ ——经口饮用地表（下）水途径多环芳烃单体 i 的终生超额致癌风险，无量纲；
 $ADD_{oral-cawi}$ ——经口饮用地表（下）水中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（致癌效应）， $mg/(kg \cdot d)$ 。
 公式（4）中 $SF_{oral-BaP}$ 的参数含义见公式（3）。

c) 经口摄入土壤（尘）途径的致癌风险按照公式（5）计算：

$$R_{oral-si} = ADD_{oral-casi} \times SF_{oral-BaP} \dots\dots\dots (5)$$

式中：

$R_{oral-si}$ ——经口摄入土壤（尘）途径多环芳烃单体 i 的终生超额致癌风险，无量纲；
 $ADD_{oral-casi}$ ——经口摄入土壤（尘）中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（致癌效应）， $mg/(kg \cdot d)$ 。
 公式（5）中 $SF_{oral-BaP}$ 的参数含义见公式（3）。

9.3.1.3 皮肤接触途径

皮肤接触途径的致癌风险包括：

a) 皮肤接触土壤（尘）途径的致癌风险按照公式（6）计算：

$$R_{dermal-si} = ADD_{dermal-casi} \times SF_{dermal-BaP} \dots\dots\dots (6)$$

式中：

$R_{dermal-si}$ ——皮肤接触土壤（尘）途径多环芳烃单体 i 的终生超额致癌风险，无量纲；
 $ADD_{dermal-casi}$ ——皮肤接触土壤（尘）中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（致癌效应）， $mg/(kg \cdot d)$ ；
 $SF_{dermal-BaP}$ ——苯并[a]芘皮肤接触致癌斜率因子， $[mg/(kg \cdot d)]^{-1}$ ，参数外推公式采用附录 C 中公式（C.1）。

b) 皮肤接触地表（下）水途径的致癌风险按照公式（7）计算：

$$R_{dermal-wi} = ADD_{dermal-cawi} \times SF_{dermal-BaP} \dots\dots\dots (7)$$

式中：

$R_{dermal-wi}$ ——皮肤接触地表（下）水途径多环芳烃单体 i 的终生超额致癌风险，无量纲；
 $ADD_{dermal-cawi}$ ——皮肤接触土壤（尘）中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（致癌效应）， $mg/(kg \cdot d)$ 。
 公式（7）中 $SF_{dermal-BaP}$ 的参数含义见公式（6）。

9.3.2 单一污染物非致癌风险

9.3.2.1 呼吸吸入途径

吸入环境空气/室内空气途径的非致癌风险按照公式（8）计算：

$$HQ_{inh-ai} = \frac{EC_{inh-ncai}}{RfC_{inh-i} \times 1000} \dots\dots\dots (8)$$

式中：

HQ_{inh-ai} ——吸入环境空气/室内空气途径多环芳烃单体 i 的危害商，无量纲；
 $EC_{inh-ncai}$ ——吸入环境空气/室内空气中多环芳烃单体 i 对应的暴露浓度（非致癌效应）， $\mu g/m^3$ ；
 RfC_{inh-i} ——多环芳烃单体 i 呼吸吸入参考浓度， mg/m^3 。

9.3.2.2 经口摄入途径

经口摄入途径的非致癌风险包括：

a) 经口摄入农畜水产品的非致癌风险按照公式（9）计算：

$$HQ_{oral-fi} = \frac{ADD_{oral-ncfi}}{RfD_{oral-i}} \dots\dots\dots (9)$$

式中：

$HQ_{oral-fi}$ ——经口摄入农畜水产品途径多环芳烃单体 i 的危害商，无量纲；

$ADD_{oral-ncfi}$ ——经口摄入农畜水产品中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（非致癌效应）， $mg/(kg \cdot d)$ ；

RfD_{oral-i} ——多环芳烃单体 i 经口摄入参考剂量， $mg/(kg \cdot d)$ 。

b) 经口饮用地表（下）水途径的致癌风险按照公式（10）计算：

$$HQ_{oral-wi} = \frac{ADD_{oral-ncwi}}{RfD_{oral-i}} \dots\dots\dots (10)$$

式中：

$HQ_{oral-wi}$ ——经口饮用地表（下）水途径多环芳烃单体 i 的危害商，无量纲；

$ADD_{oral-ncwi}$ ——经口饮用地表（下）水途径多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（非致癌效应）， $mg/(kg \cdot d)$ 。

公式（10）中 RfD_{oral-i} 的参数含义见公式（9）。

c) 经口摄入土壤（尘）途径的非致癌风险按照公式（11）计算：

$$HQ_{oral-si} = \frac{ADD_{oral-ncsi}}{RfD_{oral-i}} \dots\dots\dots (11)$$

式中：

$HQ_{oral-si}$ ——经口摄入土壤（尘）途径多环芳烃单体 i 的危害商，无量纲；

$ADD_{oral-ncsi}$ ——经口摄入土壤（尘）途径多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（非致癌效应）， $mg/(kg \cdot d)$ 。

公式（11）中 RfD_{oral-i} 的参数含义见公式（9）。

9.3.2.3 皮肤接触途径

皮肤接触途径的非致癌风险包括：

a) 皮肤接触土壤（尘）途径的非致癌风险按照公式（12）计算：

$$HQ_{dermal-si} = \frac{ADD_{dermal-ncsi}}{RfD_{dermal-i}} \dots\dots\dots (12)$$

式中：

$HQ_{dermal-si}$ ——皮肤接触土壤（尘）途径多环芳烃单体 i 的危害商，无量纲；

$ADD_{dermal-ncsi}$ ——皮肤接触土壤（尘）途径多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（非致癌效应）， $mg/(kg \cdot d)$ ；

$RfD_{dermal-i}$ ——多环芳烃单体 i 皮肤接触参考剂量， $mg/(kg \cdot d)$ ，计算公式按照附录 C 中公式（C.2）。

b) 皮肤接触地表（下）水途径的非致癌风险按照公式（13）计算：

$$HQ_{dermal-wi} = \frac{ADD_{dermal-ncwi}}{RfD_{dermal-i}} \dots\dots\dots (13)$$

式中：

$HQ_{dermal-wi}$ ——皮肤接触地表（下）水途径多环芳烃单体 i 的危害商，无量纲；

$ADD_{dermal-ncwi}$ ——皮肤接触途径多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（非致癌效应）， $mg/(kg \cdot d)$ 。
公式（13）中 $RfD_{dermal-i}$ 的参数含义见公式（12）。

9.4 单一污染物多途径暴露的风险计算

9.4.1 单一污染物多途径暴露的致癌风险

经多途径暴露的致癌风险按照公式（14）计算：

$$R_{total-i} = R_{inh-ai} + R_{oral-fi} + R_{oral-wi} + R_{oral-si} + R_{dermal-si} + R_{dermal-wi} \dots\dots\dots (14)$$

式中：

$R_{total-i}$ ——多途径暴露多环芳烃单体 i 的终生超额致癌风险，无量纲。

公式（14）中 R_{inh-ai} 、 $R_{oral-fi}$ 、 $R_{oral-wi}$ 、 $R_{oral-si}$ 、 $R_{dermal-si}$ 、 $R_{dermal-wi}$ 的参数含义分别见公式（2）、公式（3）、公式（4）、公式（5）、公式（6）、公式（7）。

9.4.2 单一污染物多途径暴露的非致癌风险

经多途径暴露的非致癌风险按照公式（15）计算：

$$HQ_{total-i} = HQ_{inh-ai} + HQ_{oral-fi} + HQ_{oral-wi} + HQ_{oral-si} + HQ_{dermal-si} + HQ_{dermal-wi} \dots\dots\dots (15)$$

式中：

$HQ_{total-i}$ ——多途径暴露多环芳烃单体 i 的危害商，无量纲。

公式（15）中 HQ_{inh-ai} 、 $HQ_{oral-fi}$ 、 $HQ_{oral-wi}$ 、 $HQ_{oral-si}$ 、 $HQ_{dermal-si}$ 、 $HQ_{dermal-wi}$ 的参数含义分别见公式（8）、公式（9）、公式（10）、公式（11）、公式（12）、公式（13）。

9.5 多污染物多暴露途径的风险计算

9.5.1 多污染物多途径暴露的致癌风险

多污染物多途径暴露的致癌风险按照公式（16）计算：

$$R_{sum} = \sum_i^{n=16} R_{total-i} \dots\dots\dots (16)$$

式中：

R_{sum} ——16种多环芳烃多途径暴露的终生超额致癌风险，无量纲。

公式（16）中 $R_{total-i}$ 的参数含义见公式（14）。

9.5.2 多污染物多途径暴露的非致癌风险

多污染物多途径暴露的非致癌风险按照公式（17）计算：

$$HI_{sum} = \sum_i^{n=16} HQ_{total-i} \dots\dots\dots (17)$$

式中：

HI_{sum} ——16种多环芳烃多途径暴露的危害指数，无量纲。

公式（17）中 $HQ_{total-i}$ 的参数含义见公式（15）。

9.6 不确定性分析

不确定性分析参照 HJ 1111 中规定的方法，采用定性描述和定量分析危害识别、危害表征、暴露评估和风险表征过程中的不确定性。其中，定量不确定性分析参照 GB/T 27921 中规定的蒙特卡洛模拟

方法。

9.7 风险判定

9.7.1 结合风险评估的环境管理需求，根据风险可接受水平判定标准，给出风险可接受或不可接受的结论。本文件规定多环芳烃单体可接受致癌和非致癌风险水平分别为小于或等于 10^{-6} 和 1。对于 16 种多环芳烃的可接受风险水平，可结合具体生态环境管理需求确定。

9.7.2 当环境健康风险不可接受或不能满足环境管理需求的，应说明存在的重大环境健康风险及其关键环节。

10 报告编制

报告主要包括评估目的、评估范围、数据来源、评估方法、评估结果、质量控制和不确定性分析、评估结论等部分。当环境健康风险不可接受时，应说明存在健康风险的关键环节。

附录 A

(资料性)

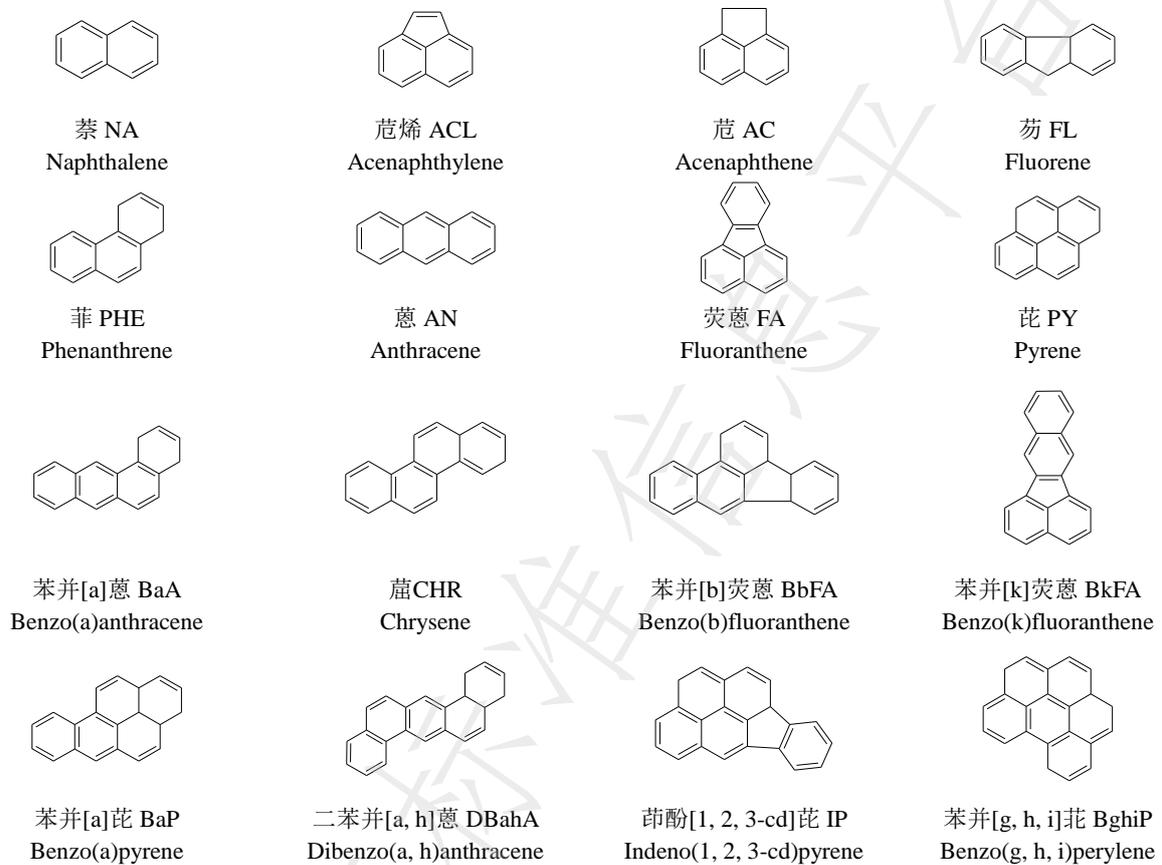
多环芳烃基本信息和理化性质

A.1 常见多环芳烃基本信息和理化性质见表 A.1。

表A.1 常见多环芳烃基本信息和理化性质

序号	中文名称	英文名称	分子式	分子量	熔点 ℃	沸点 ℃	溶解度 (mg/L, 25℃)	LogK _{ow}	CAS
1	萘	Naphthalene	C ₁₀ H ₈	128.2	80.5	218	31	3.30	91-20-3
2	茚烯	Acenaphthylene	C ₁₂ H ₈	152.2	92.5	280	9.0	3.94	208-96-8
3	茚	Acenaphthene	C ₁₂ H ₁₀	154.2	93.4	279	3.9	3.92	83-32-9
4	芴	Fluorene	C ₁₃ H ₁₀	166.2	114.8	295	1.69	4.18	86-73-7
5	菲	Phenanthrene	C ₁₄ H ₁₀	178.2	99.2	340	1.10	4.46	85-01-8
6	蒽	Anthracene	C ₁₄ H ₁₀	178.2	215.0	339.9	1.25	4.45	120-12-7
7	荧蒽	Fluoranthene	C ₁₆ H ₁₀	202.3	107.8	384.0	0.20	5.16	206-44-0
8	芘	Pyrene	C ₁₆ H ₁₀	202.3	151.2	404.0	0.135	4.88	129-00-0
9	苯并[a]蒽	Benzo[a]anthracene	C ₁₈ H ₁₂	228.3	162.0	437.6	0.0094	5.76	56-55-3
10	蒽	Chrysene	C ₁₈ H ₁₂	228.3	258.2	448.0	0.0020	5.73	218-01-9
11	苯并[b]荧蒽	Benzo[b]fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	252.3	168.0	481.0	0.0015	5.78	205-99-2
12	苯并[k]荧蒽	Benzo[k]fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	252.3	217.0	480.0	0.0008	6.11	207-08-9
13	苯并[a]芘	Benzo[a]pyrene	C ₂₀ H ₁₂	252.3	176.5	495.0	0.00162	6.13	50-32-8
14	二苯并[a, h]蒽	Dibenzo[a, h]anthracene	C ₂₂ H ₁₄	278.3	269.5	524.0	0.00249	6.50	53-70-3
15	茚并[1, 2, 3-cd]芘	Indeno[1, 2, 3-cd]pyrene	C ₂₂ H ₁₂	276.3	163.6	536.0	0.0019	6.70	193-39-5
16	苯并[g, h, i]芘	Benzo[g, h, i]perylene	C ₂₂ H ₁₂	276.3	278.0	550.0	0.0026	6.63	191-24-2

A.2 常见多环芳烃的结构式见图 A.1。



图A.1 常见多环芳烃的结构式

A.3 常见多环芳烃的健康效应特征见表 A.2。

表A.2 常见多环芳烃的健康效应特征

中文名称	癌症等级			效应器官	关键效应
	IARC	IRIS	评价结果		
萘	2B	C	阳性	神经、呼吸系统	喉癌、直肠癌、雄性终端平均体重降低； 呼吸道和嗅上皮增生、组织变形
芘烯	-	D	阴性	-	-
芘	3	D	阴性	肝脏	肝脏毒性
芴	3	D	阴性	血液系统	红细胞、细胞体积、血红蛋白减少
菲	3	D	阴性	-	-
蒽	3	D	阴性	无	没有观察到作用
荧蒽	3	D	阴性	肝脏、泌尿系统	血液学改变、肝脏质量减轻、肾组织病变
芘	3	D	阴性	-	-
苯并[a]蒽	2B	B2	阳性	腹腔、皮肤	乳腺细胞突变、皮肤癌
蒽	2B	B2	阳性	腹腔、皮肤	乳腺细胞突变、皮肤癌

表 A.2 常见多环芳烃的健康效应特征（续）

中文名称	癌症等级			效应器官	关键效应
	IARC	IRIS	评价结果		
苯并[b]荧蒽	2B	B2	阳性	肺、腹腔、皮肤	肺癌、皮肤癌
苯并[k]荧蒽	2B	B2	阳性	肺	肺腺瘤
苯并[a]芘	1	A	阳性	胃肠、呼吸系统、生长发育	肺癌、胃癌、食道癌、基因毒性(包括染色体交换、DNA 损伤等)、神经行为改变、胚胎/胎儿存活率降低
二苯并[a,h]蒽	2A	B2	阳性	皮肤	DNA 损伤、基因突变等
苊并[1,2,3-cd]芘	2B	B2	阳性	肺、皮肤	基因突变
苯并[g,h,i]芘	3	D	阴性	-	-

注：IARC致癌分类说明：1类指对人具有致癌性(Carcinogenic to humans)；2A类指对人很可能致癌(Probably carcinogenic to humans)；2B类指对人可能致癌(Possibly carcinogenic to humans)；3类指对人的致癌性尚无法分类(Not classifiable as to its carcinogenicity to humans)。IRIS致癌分类说明：A类指对人致癌(Carcinogenic to humans)；B1类指可能对人致癌(Likely to Be Carcinogenic to humans)；B2类指存在可能致癌的证据(Suggestive evidence of carcinogenic Potential)；C类指无充分的证据致癌(Inadequate information to assess carcinogenic potential)；D类指不太可能对人致癌(Not likely to be carcinogenic to humans)。

附 录 B
(规范性)
暴露评估推荐模型

B.1 呼吸吸入途径

B.1.1 对于多环芳烃单体的致癌效应，考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害。吸入环境空气/室内空气中多环芳烃单体对应的暴露浓度按照公式 (B.1) 计算：

$$EC_{inh-caai} = \frac{TEC_{ia-i} \times EF_c \times ED_c}{AT_{ca}} + \frac{TEC_{ia-i} \times EF_a \times ED_a}{AT_{ca}} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

- $EC_{inh-caai}$ ——吸入环境空气/室内空气中多环芳烃单体 i 对应的暴露浓度（致癌效应）， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；
- TEC_{ia-i} ——环境空气/室内空气中多环芳烃单体 i 的苯并[a]芘等效浓度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；
- EF ——暴露频率，d/a，参考值见附录 C 中表 C.1；
- ED ——暴露周期，a，参考值见附录 C 中表 C.1；
- AT_{ca} ——致癌效应平均时间，d，参考值见附录 C 中表 C.1；
- 下标 a, c ——分别代表成人和儿童。

B.1.2 对于多环芳烃单体的非致癌效应，考虑人群在儿童期暴露的危害。吸入环境空气/室内空气中多环芳烃单体对应的暴露浓度按照公式 (B.2) 计算：

$$EC_{inh-ncai} = \frac{C_{ia-i} \times EF_c \times ED_c}{AT_{nc}} \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

- $EC_{inh-ncai}$ ——吸入环境空气/室内空气中多环芳烃单体 i 对应的暴露浓度（非致癌效应）， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；
- C_{ia-i} ——环境空气/室内空气中多环芳烃单体 i 的浓度， $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；
- AT_{nc} ——非致癌效应平均时间，d，推荐值见附录 C 中表 C.1；
- 公式 (B.2) 中 c, ED, EF 的参数含义见公式 (B.1)。

B.2 经口摄入途径

B.2.1 经口摄入农畜水产品的暴露剂量

B.2.1.1 对于单一污染物的致癌效应，考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害。经口摄入农畜水产品中污染物对应的暴露剂量按照公式 (B.3) 计算：

$$ADD_{oral-cafi} = \frac{TEC_{f-i} \times \left(\frac{IR_{f-c} \times FI \times EF_c \times ED_c}{BW_c} + \frac{IR_{f-a} \times FI \times EF_a \times ED_a}{BW_a} \right) \times ABS_o}{AT_{ca}} \times 10^{-3} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中：

- $ADD_{oral-cafi}$ ——经口摄入农畜水产品中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（致癌效应）， $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ ；
- TEC_{f-i} ——农畜水产品中多环芳烃单体 i 的苯并[a]芘等效浓度， mg/kg ；
- IR_f ——农畜水产品摄入量， g/d ；
- FI ——摄入的农畜水产品来自污染源的比例，无量纲，推荐值见附录 C 中表 C.1；
- ABS_o ——经口摄入吸收效率因子，无量纲，推荐值见附录 C 中表 C.1；
- BW ——体重， kg ，推荐值见附录 C 中表 C.1。

公式 (B.3) 中 a, c, EF, ED, AT_{ca} 的参数含义见公式 (B.1)。

B.2.1.2 对于单一污染物的非致癌效应，考虑人群在儿童期暴露的危害。经口摄入农畜水产品中污染物对应的暴露剂量按照公式（B.4）计算：

$$ADD_{oral-ncfi} = \frac{C_{f-i} \times IR_{f-c} \times FI \times EF_c \times ED_c \times ABS_o}{BW_c \times AT_{nc}} \times 10^{-3} \dots\dots\dots (B.4)$$

式中：

$ADD_{oral-ncfi}$ ——经口摄入农畜水产品中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（非致癌效应），mg/(kg·d)；

C_{f-i} ——农畜水产品中多环芳烃单体 i 的浓度，mg/kg。

公式（B.4）中 a 、 c 、 EF 、 ED 的参数含义见公式（B.1）， AT_{nc} 的参数含义见公式（B.2）， IR_f 、 FI 、 ABS_o 、 BW 的参数含义见公式（B.3）。

B.2.2 经口饮用地表（下）水的暴露剂量

B.2.2.1 对于单一污染物的致癌效应，考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害。经口饮用地表（下）水中污染物对应的暴露剂量按照公式（B.5）计算：

$$ADD_{oral-cawi} = \frac{TEC_{w-i} \times \left(\frac{IR_{w-c} \times FI \times EF_c \times ED_c}{BW_c} + \frac{IR_{w-a} \times FI \times EF_a \times ED_a}{BW_a} \right) \times ABS_o}{AT_{ca}} \dots\dots\dots (B.5)$$

式中：

$ADD_{oral-cawi}$ ——经口摄入地表（下）水中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（致癌效应），mg/(kg·d)；

TEC_{w-i} ——饮用地表（下）水中多环芳烃单体 i 的苯并[a]芘等效浓度，mg/L；

IR_w ——饮水摄入率，L/d，推荐值见附录 C 中表 C.1。

公式（B.5）中 a 、 c 、 EF 、 ED 、 AT_{ca} 的参数含义见公式（B.1）， BW 、 FI 、 ABS_o 的参数含义见公式（B.3）。

B.2.2.2 对于单一污染物的非致癌效应，考虑人群在儿童期暴露的危害。经口摄入地表（下）水中污染物对应的暴露剂量按照公式（B.6）计算：

$$ADD_{oral-ncwi} = \frac{C_{w-i} \times IR_{w-c} \times FI \times EF_c \times ED_c \times ABS_o}{AT_{nc} \times BW_c} \dots\dots\dots (B.6)$$

式中：

$ADD_{oral-ncwi}$ ——经口摄入地表（下）水中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（非致癌效应），mg/(kg·d)；

C_{w-i} ——饮用地表（下）水中多环芳烃单体 i 的浓度，mg/L。

公式（B.6）中， c 、 EF 、 ED 的参数含义见公式（B.1）， AT_{nc} 的参数含义见公式（B.2）， FI 、 BW 、 ABS_o 的参数含义见公式（B.3）， IR_w 的参数含义见公式（B.5）。

B.2.3 经口摄入土壤（尘）的暴露剂量

B.2.3.1 对于单一污染物的致癌效应，考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害。经口摄入土壤（尘）中污染物对应的暴露剂量按照公式（B.7）计算：

$$ADD_{oral-casi} = \frac{TEC_{s-i} \times \left(\frac{IR_{s-c} \times FI \times EF_c \times ED_c}{BW_c} + \frac{IR_{s-a} \times FI \times EF_a \times ED_a}{BW_a} \right) \times CF \times ABS_o}{AT_{ca}} \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：

$ADD_{oral-casi}$ ——经口摄入土壤（尘）中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（致癌效应），mg/(kg·d)；

TEC_{s-i} ——土壤（尘）中多环芳烃单体 i 的苯并[a]芘等效浓度，mg/kg；

- IR_s ——土壤摄入率, mg/d, 推荐值见附录 C 中表 C.1;
- FI ——摄入的土壤(尘)来自污染源的比例, 无量纲, 推荐值见附录 C 中表 C.1;
- CF ——转换因子, 10^{-6} kg/mg。

公式(B.7)中 a、c、 EF 、 ED 、 AT_{ca} 的参数含义见公式(B.1), BW 、 FI 、 ABS_o 的参数含义见公式(B.3)。

B.2.3.2 对于单一污染物的非致癌效应, 考虑人群在儿童期暴露的危害。经口摄入土壤(尘)中污染物对应的暴露剂量按照公式(B.8)计算:

$$ADD_{oral-ncsi} = \frac{C_{s-i} \times IR_s \times FI \times EF_c \times ED_c \times CF \times ABS_o}{BW_c \times AT_{nc}} \dots\dots\dots (B.8)$$

式中:

- $ADD_{oral-ncsi}$ ——经口摄入土壤(尘)中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量(非致癌效应), mg/(kg·d);
- C_{s-i} ——土壤(尘)中多环芳烃单体 i 的浓度, mg/kg。

公式(B.8)中 c、 EF 、 ED 的参数含义见公式(B.1), AT_{nc} 的参数含义见公式(B.2), BW 、 FI 、 ABS_o 的参数含义见公式(B.3), IR_s 、 CF 、 TEC_{s-i} 的参数含义见公式(B.7)。

B.3 皮肤接触途径

B.3.1 皮肤接触土壤(尘)的暴露剂量

B.3.1.1 对于单一污染物的致癌效应, 考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害。皮肤接触土壤(尘)中污染物对应的暴露剂量按照公式(B.9)计算:

$$ADD_{dermal-casi} = \frac{TEC_{s-i} \times SAE_c \times SSAR_c \times EF_c \times ED_c \times E_v \times ABS_d \times CF}{AT_{ca} \times BW_c} \dots\dots\dots (B.9)$$

$$+ \frac{TEC_{s-i} \times SAE_a \times SSAR_a \times EF_a \times ED_a \times E_v \times ABS_d \times CF}{AT_{ca} \times BW_a}$$

式中:

- $ADD_{dermal-casi}$ ——皮肤接触土壤(尘)中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量(致癌效应), mg/(kg·d);
- SAE ——暴露的皮肤表面积, cm^2 , 推荐值见附录 C 中表 C.1;
- $SSAR$ ——皮肤表面土壤粘附系数, mg/ cm^2 , 推荐值见附录 C 中表 C.1;
- ABS_d ——皮肤接触吸收效率因子, 无量纲, 推荐值见附录 C 中表 C.1;
- E_v ——每日皮肤接触事件频率, 次/d, 推荐值见附录 C 中表 C.1。

公式(B.9)中 a、c、 EF 、 ED 、 AT_{ca} 的参数含义见公式(B.1), BW 的参数含义见公式(B.3), CF 、 TEC_{s-i} 的参数含义见公式(B.7)。

B.3.1.2 对于单一污染物的非致癌效应, 考虑人群在儿童期暴露的危害。皮肤接触土壤(尘)中污染物对应的暴露剂量按照公式(B.10)计算:

$$ADD_{dermal-ncsi} = \frac{C_{s-i} \times SAE_c \times SSAR_c \times EF_c \times ED_c \times E_v \times ABS_d \times CF}{AT_{nc} \times BW_c} \dots\dots\dots (B.10)$$

式中:

- $ADD_{dermal-ncsi}$ ——皮肤接触土壤(尘)中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量(非致癌效应), mg/(kg·d)。

公式(B.10)中 c、 EF 、 ED 的参数含义见公式(B.1), AT_{nc} 的参数含义见公式(B.2), BW 的参数含义见公式(B.3), CF 的参数含义见公式(B.7), C_{s-i} 的参数含义见公式(B.8), SAE 、 $SSAR$ 、 ABS_d 、 E_v 的参数含义见公式(B.9)。

B.3.2 经皮肤接触地表水的暴露剂量

B.3.2.1 对于单一污染物的致癌效应，考虑人群在儿童期和成人期暴露的终生危害。皮肤接触地表水中污染物对应的暴露剂量按照公式 (B.11) 计算：

$$ADD_{\text{dermal-cawi}} = \frac{TEC_{w-i} \times \left(\frac{SA_w \times K_p \times CF \times ET \times EF_c \times ED_c}{BW_c} + \frac{SA_w \times K_p \times CF \times ET \times EF_a \times ED_a}{BW_a} \right)}{AT_{ca}} \quad (\text{B.11})$$

式中：

$ADD_{\text{dermal-cawi}}$ ——皮肤接触地表水中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（致癌效应）， $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ ；

SA_w ——皮肤接触地表水面积， cm^2 ；

K_p ——污染物皮肤渗透系数， cm/h ，参数外推模型采用附录 C 中公式 (C.3)；

CF ——转换因子， $1 \times 10^{-3} \text{ L}/\text{cm}^3$ ；

ET ——每日暴露小时数， h/d 。

公式 (B.11) 中 a 、 c 、 EF 、 ED 、 AT_{ca} 的参数含义见公式 (B.1)， BW 的参数含义见公式 (B.3)， TEC_{w-i} 的参数含义见公式 (B.5)。

B.3.2.2 对于单一污染物的非致癌效应，考虑人群在儿童期暴露的危害。皮肤接触地表水中污染物对应的暴露剂量按照公式 (B.12) 计算：

$$ADD_{\text{dermal-ncwi}} = \frac{C_{w-i} \times SA_w \times K_p \times CF \times ET \times EF_c \times ED_c}{AT_{nc} \times BW_c} \dots\dots\dots (\text{B.12})$$

式中：

$ADD_{\text{dermal-ncwi}}$ ——皮肤接触地表水中多环芳烃单体 i 对应的暴露剂量（非致癌效应）， $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{d})$ 。

公式 (B.12) 中 c 、 EF 、 ED 的参数含义见公式 (B.1)， AT_{nc} 的参数含义见公式 (B.2)， BW 的参数含义见公式 (B.3)， C_{w-i} 的参数含义见公式 (B.6)， SA_w 、 K_p 、 CF 、 ET 的参数含义见公式 (B.11)。

附 录 C
(规范性)

风险评估模型参数推荐值及外推模型

C.1 风险评估模型参数参考值

暴露评估模型参数及参考值见表C.1, 常见多环芳烃的毒性参数见表C.2, 常见多环芳烃的毒性当量因子见表C.3。

表C.1 暴露评估模型参数及参考值

参数符号	参数名称	单位	参考值 ^a
BW_a	成人体重	kg	61.8
BW_c	儿童体重	kg	19.2
IR_{w-a}	成人饮水摄入率	L/d	1.85
IR_{w-c}	儿童饮水摄入率	L/d	1.19
IR_{s-a}	成人土壤摄入率	mg/d	200
IR_{s-c}	儿童土壤摄入率	mg/d	100
SAE_a	成人暴露皮肤表面积	cm ²	5145
SAE_c	儿童暴露皮肤表面积	cm ²	2670
$SSAR_a$	成人皮肤表面土壤粘附系数	mg/cm ²	0.07
$SSAR_c$	儿童皮肤表面土壤粘附系数	mg/cm ²	0.2
ED_a	成人暴露周期	a	24
ED_c	儿童暴露周期	a	6
AT_{ca}	致癌效应平均时间	d	27740
AT_{nc}	非致癌效应平均时间	d	2190
FI	摄入的农畜水产品来自污染源的比例	无量纲	1
ABS_o	经口摄入吸收效率因子	无量纲	1
ABS_d	皮肤接触吸收效率因子	无量纲	苯并[a]芘和其他多环芳烃单体默认值为0.13
ABS_{gi}	消化道吸收效率因子	无量纲	1
Ev	每日皮肤接触事件频率	次/d	1
^a 参考值数据来源为HJ 25.3中第一类用地风险评估模型参数推荐值, 暴露模型中相关参数的取值可参考《中国人群暴露参数手册》。			

表C.2 常见多环芳烃的毒性参数*

污染物	经口摄入参考剂量 RfD (mg/kg·d)	呼吸吸入参考浓度 RfC(mg/m ³)	经口摄入致癌斜率 因子SF(mg/kg·d) ⁻¹	呼吸吸入单位致癌因子 IUR(μg/m ³) ⁻¹
萘	2×10 ⁻²	3×10 ⁻³	1.2×10 ⁻¹	3.4×10 ⁻⁵
萘烯	—	—	—	—
萘	6×10 ⁻²	—	—	—
芴	4×10 ⁻²	—	—	—
菲	—	—	—	—
蒽	3×10 ⁻¹	—	—	—
荧蒽	4×10 ⁻²	—	—	—
芘	3×10 ⁻²	—	—	—
苯并[a]蒽	—	—	1.0×10 ⁻¹	6.0×10 ⁻⁵
蒽	—	—	1.0×10 ⁻³	6.0×10 ⁻⁷
苯并[b]荧蒽	—	—	1.0×10 ⁻¹	6.0×10 ⁻⁵
苯并[k]荧蒽	—	—	1.0×10 ⁻²	6.0×10 ⁻⁶
苯并[a]芘	3.0×10 ⁻⁴	2.0×10 ⁻⁶	1	6.0×10 ⁻⁴
二苯并[a,h]蒽	—	—	1	6.0×10 ⁻⁴
茚并[1,2,3-cd]芘	—	—	1.0×10 ⁻¹	6.0×10 ⁻⁵
苯并[g,h,i]芘	—	—	—	—

注：上标*代表数据来源为美国环保署的综合风险信息系统（Integrated Risk Information System, IRIS, <https://www.epa.gov/iris>）

表C.3 常见多环芳烃的毒性当量因子

污染物	毒性当量因子TEF	污染物	毒性当量因子TEF
萘*	0.001	苯并[a]蒽**	0.1
萘烯*	0.001	蒽**	0.001
萘*	0.001	苯并[b]荧蒽**	0.1
芴*	0.001	苯并[k]荧蒽**	0.01
菲*	0.001	苯并[a]芘**	1
蒽*	0.01	二苯并[a,h]蒽**	1
荧蒽*	0.001	茚并[1,2,3-cd]芘**	0.1
芘*	0.001	苯并[g,h,i]芘*	0.01

注：上标*表示数据来源为EPA/600/Z-92/001. 1992. EPA Guidelines exposure assessment；上标**表示数据来源为Nisbet I C, LaGoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Regulatory toxicology and pharmacology, 1992, 16(3): 290-300.

C.2 皮肤接触致癌斜率因子和参考剂量外推模型公式

皮肤接触致癌斜率因子和参考剂量分别按照公式 (C.1) 和公式 (C.2) 计算:

$$SF_{dermal} = \frac{SF_{oral}}{ABS_{gi}} \dots\dots\dots (C.1)$$

$$RfD_{dermal} = RfD_{oral} \times ABS_{gi} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中:

SF_{dermal} ——皮肤接触致癌斜率因子, $[mg/(kg \cdot d)]^{-1}$;

RfD_{dermal} ——皮肤接触参考剂量, $mg/(kg \cdot d)$;

SF_{oral} ——经口摄入致癌斜率因子, $[mg/(kg \cdot d)]^{-1}$;

RfD_{oral} ——经口摄入参考剂量, $mg/(kg \cdot d)$;

ABS_{gi} ——消化道吸收效率因子, 无量纲。

C.3 皮肤渗透系数外推模型公式

皮肤渗透系数按照公式 (C.3) 计算:

$$\log K_p = 0.71 \times \log K_{ow} - 0.0061 \times MW - 2.72 \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

K_{ow} ——辛醇/水分配系数;

MW ——分子量, g/mol 。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国环境保护部. 中国人群暴露参数手册（成人卷）[M]. 北京：中国环境出版社，2013.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 中国人群暴露参数手册（儿童卷 0~5岁）[M]. 北京：中国环境出版社，2016.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 中国人群暴露参数手册（儿童卷 6~17岁）[M]. 北京：中国环境出版社，2016.
-