

# 土壤环境质量指导值与标准研究

## IV 保护人体健康的土壤苯并[a]芘的临界浓度\*

王国庆<sup>1,2,4</sup> 骆永明<sup>1,2,4†</sup> 宋 静<sup>1,2,4</sup> 赵其国<sup>1,2</sup> 夏家淇<sup>3</sup>

(1 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008)

(2 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(3 国家环境保护总局南京环境科学研究所, 南京 210042)

(4 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要** 基于人体健康风险评估制定土壤环境质量指导值或标准是当前国际上广泛采用的方法。本文全面调研了国际上保护人体健康的土壤苯并[a]芘(B[a]P)的各类临界浓度,初步确定了量化土壤中B[a]P暴露剂量的暴露场景和暴露参数,率先提出了制定我国土壤中保护人体健康的B[a]P临界浓度的方法体系,这种方法可用来制定持久性有机污染物的土壤临界浓度。考虑了口腔摄入、皮肤接触、呼吸摄入和取食污染蔬菜摄入四个主要暴露途径,探讨了B[a]P的致癌风险水平为 $10^{-5}$ 或 $10^{-6}$ 时,农业用地、居住用地和工业用地方式下土壤中B[a]P的临界浓度,同时制定了保护地下水的土壤B[a]P的临界浓度。

**关键词** 污染场地/土壤;苯并[a]芘;土壤质量;指导值/标准;风险评估

中图分类号 X651

文献标识码 A

苯并[a]芘(B[a]P)是环境中强致癌的多环芳烃类有机污染物。随着我国土壤中多环芳烃类化合物污染和修复研究的不断推进,土壤B[a]P的污染及修复受到了特别的关注<sup>[1]</sup>。为更好地实现B[a]P污染土壤的风险表征和修复决策,研究和制定土壤中B[a]P的环境质量指导值/标准值是当前尤为重要的课题。基于国内对土壤环境质量指导值与标准的迫切需求,作者对欧美等发达国家土壤环境质量指导值的制定方法论展开了详细的调研<sup>[2]</sup>,旨在探讨我国土壤环境中B[a]P适宜临界浓度的制定方法。调研结果表明,保护人体健康、生态环境以及地下水水质等是制定土壤环境质量指导值/标准的主导原则,而风险评估则是制定土壤质量指导值/标准普遍采用的方法。

本文引入了制定土壤质量指导值/标准通用的人体健康风险评估方法,针对我国常见的几种典型土地利用方式,考虑了污染土壤中B[a]P经三个主要途径(口腔摄入、皮肤接触和呼吸摄入)和一个间接暴露途径(取食污染蔬菜产品)的暴露风险,探索

性地制定了保护人体健康的土壤中B[a]P的临界浓度。在制定土壤中B[a]P临界浓度时,结合了国内的部分研究数据,如成人和儿童的平均体重、暴露皮肤面积等,对于无法获取或无法根据国内研究资料确定的参数,则通过比较分析,采用了欧、美等国家的默认值,如每日土壤摄入量、每日空气吸入量等。因此,本文重在探索并建立基于风险评估方法制定不同土地利用方式下土壤质量指导值的方法体系,为我国现行《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)和《工业企业土壤环境质量风险评估基准》(HJ/T25—1999)的修订提供参考,同时为我国土壤调查中土壤质量评价标准的确定、污染场地修复和管理中土壤临界值的确定提供技术和方法支撑。

### 1 国际上B[a]P的土壤环境质量指导值/标准

1996年,美国环保总署(USEPA)发布了污染场地筛选导则,详细阐述了制定特定场地土壤污染筛

\* 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB410810)、国家自然科学基金重点项目(40432005)、中国科学院创新团队国际合作伙伴计划(XTB Z2005-4)和中荷科技战略联盟重大国际合作项目(2006DFA91940)资助

† 通讯作者, E-mail: ymluo@mail.issas.ac.cn

作者简介: 王国庆(1978~),男,江苏姜堰人,博士研究生,主要从事土壤环境质量与修复研究

收稿日期: 2006-03-12; 收到修改稿日期: 2007-03-22

选值(Soil Screening Levels, SSLs)的方法<sup>[3,4]</sup>。美国各州环保部门也根据 USEPA 导则,制定了土壤筛选值<sup>[5]</sup>、清洁值<sup>[6~8]</sup>、土壤清洁目标值及保护地下水的土壤浓度<sup>[9~13]</sup>、居住区(敏感用地或非限制性用地)和非居住区(非敏感用地或限制性用地)土壤中 B[a]P 的修复标准值<sup>[14]</sup>。

鉴于公众对污染场地和人体健康问题的日益关注,加拿大环境部部长委员会(Canadian Council of Ministers of the Environment, CCME)于 1991 年 9 月发布了加拿大污染场地土壤中 B[a]P 的暂定环境质

量基准<sup>[15]</sup>;1997 年,CCME 根据 1996 年《制定土壤质量指导值草案》方法,制定了 B[a]P 的推荐土壤质量指导值<sup>[16,17]</sup>。其他国家也制定了土壤中 B[a]P 的各类数字限定值,如澳大利亚制定了不同用地方式下污染场地土壤 B[a]P 的调研值<sup>[18]</sup>,法国制定了对污染场地进行简单风险评估的 B[a]P 的固定效应值<sup>[19]</sup>,丹麦制定了敏感用地方式下 B[a]P 的土壤质量标准及基于生态毒性的土壤质量标准<sup>[20]</sup>。表 1 列出了部分欧美国家土壤 B[a]P 的各类指导值/标准值及其功能用途。

表 1 国际上 B[a]P 的土壤质量指导值/标准值一览表

Table 1 List of international guidelines/standards available for soil B[a]P quality

国家或地区 Country/State	名称或土地利用方式 Name/Land uses	浓度值 Concentration values (mg kg <sup>-1</sup> )	功能或用途 Function/Uses
联邦加拿大 <sup>[15,21,22]</sup> Federal Canada	农业用地	0.1	污染土壤的修复目标值(1991 年暂定值)
	居住/公园用地	0.7	污染土壤的修复目标值
	商业/工业用地	0.7	污染土壤的修复目标值
加拿大 不列颠哥伦比亚省 <sup>[22]</sup> British Columbia, Canada	农业、居住/公园用地	0.1	低于该值认为未污染,高于该值需进行调研
	农业用地	1	需要进行修复的土壤浓度
	居住/公园用地	1	需要进行修复的土壤浓度
加拿大魁北克省 <sup>[22]</sup> Québec Province, Canada	商业/工业用地	10	需要进行修复的土壤浓度
	特定场地评估值	1	高于该值需要进行特定场地的风险评估
加拿大安大略省 <sup>[22]</sup> Ontario Province, Canada	修复值	10	高于该值需要立即进行修复
	农业用地	1.2	饮用水源表层土壤清洁标准
加拿大安大略省 <sup>[22]</sup> Ontario Province, Canada	居住/公园用地	1.2	饮用水源表层土壤清洁标准
	商业/工业用地	1.9	饮用水源表层土壤清洁标准
	标准居住用地	1	污染场地的调研值
澳大利亚 <sup>[18]</sup> Australia	永久覆盖性居住用地	4	污染场地的调研值
	公园和娱乐开发地	2	污染场地的调研值
	商业和工业用地	5	污染场地的调研值
丹麦 <sup>[20]</sup> Denmark	土壤质量标准	0.1	敏感性用地方式下土壤质量标准值
	生态毒性土壤质量标准	0.1	超过该值可能产生生态风险
	土壤污染的切断标准	1	需要切断所有的土壤接触暴露的土壤浓度
法国 <sup>[19]</sup> France	敏感用地的固定效应值	7	污染场地的初始调研和简单风险评估
	非敏感用地固定效应值	25	污染场地的初始调研和简单风险评估
	土壤为污染源的识别值	3.5	固定影响值的 1/2, 判别土壤是否为污染源
美国康涅狄格州 <sup>[14]</sup> Connecticut State, USA	居住用地	1	修复标准—土壤直接接触标准值
	工业/商业用地	1	修复标准—土壤直接接触标准值
美国佛罗里达州 <sup>[9]</sup> Florida State, USA	居住用地	0.1	无直接暴露风险的土壤清洁目标值
	商业和工业用地	0.5	无直接暴露风险的土壤清洁目标值
	基于淋溶的目标值	8	保护地下水质量不受淋溶影响
	基于淋溶的目标值	1.2	保护地表水体水质不受淋溶影响
	基于淋溶的目标值	1.2	保护海洋水体水质不受淋溶影响
美国堪萨斯州 <sup>[7]</sup> Kansas State, USA	基于淋溶的目标值	80	淋溶影响少量地下水或地下水质量变差
	居住用地	1.2	暴露风险可接受的土壤浓度
	居住用地	16	保护地下水水质的土壤浓度
	非居住用地	2.6	暴露风险可接受的土壤浓度
美国马里兰州 <sup>[10]</sup> Maryland State, USA	非居住用地	16	保护地下水水质的土壤浓度
	居住区土壤标准值	0.33	土壤清洁浓度
	非居住区土壤标准值	0.78	土壤清洁浓度
	保护地下水土壤标准值	0.37	保护地下水不受污染

续表

国家或地区 Country/ State	名称或土地利用方式 Name/ Land uses	浓度值 Concentration values (mg kg <sup>-1</sup> )	功能或用途 Function/ Uses
美国密西西比州 <sup>[11]</sup> Mississippi State, USA	限制性用地 非限制性用地	0.78 0.088	无土壤摄入风险的修复目标值 无土壤摄入风险的修复目标值
美国密苏里州 <sup>[12]</sup> Missouri State, USA	非限制性用地 商业用地 工业用地	0.2 0.2 0.6	无直接暴露风险的土壤清洁目标浓度 无直接暴露风险的土壤清洁目标浓度 无直接暴露风险的土壤清洁目标浓度
	基于淋溶性目标值	24	无地下水淋溶风险的土壤清洁目标浓度
美国新墨西哥州 <sup>[5]</sup> New Mexico State, USA	居住区土壤筛选值 工业/职业用地土壤筛选值 建筑用地土壤筛选值	0.62 2.34 21.4	污染场地/土壤识别和筛选的一般性基准值 污染场地/土壤识别和筛选的一般性基准值 污染场地/土壤识别和筛选的一般性基准值
美国新泽西州 <sup>[8]</sup> New Jersey State, USA	居住区清洁目标值 非居住区清洁目标值 地下水清洁目标值	0.66 0.66 100	无直接接触暴露风险的土壤浓度 无直接接触暴露风险的土壤浓度 无地下水污染效应的土壤浓度值
美国纽约州 <sup>[13]</sup> New York State, USA	允许土壤浓度 土壤目标值 土壤筛选值	0.11 11 0.061	基于地下水水质标准的土壤浓度值 保护地下水不受污染的修复目标值 基于土壤筛选导则保护人体健康的土壤浓度
美国威斯康星州 <sup>[6]</sup> Wisconsin State, USA	基于地下水暴露途径 非工业用地土壤 工业用地土壤	48 0.0088 0.39	保护地下水不受污染 无接触暴露风险的土壤浓度 无接触暴露风险的土壤浓度

从表 1 调研结果可以看出, 不同国家和地区各用地方式下土壤 B[a]P 的临界值存在明显的差异。农业用地土壤: 只有加拿大制定了指导值/标准, 其中联邦加拿大定为 0.1 mg kg<sup>-1</sup>, 不列颠哥伦比亚 (British Columbia) 省也定为 0.1 mg kg<sup>-1</sup>, 并规定 1 mg kg<sup>-1</sup> 为需要进行修复的浓度。居住用地土壤: 各国各地区的差异较大, 美国 10 个州的范围值为 0.0088~1.2 mg kg<sup>-1</sup>, 平均值为 0.43 mg kg<sup>-1</sup>, 标准差为 0.42 mg kg<sup>-1</sup>; 联邦加拿大为 0.7 mg kg<sup>-1</sup>; 澳大利亚为 1~4 mg kg<sup>-1</sup>。商业/工业用地土壤: 美国 9 个州的范围值为 0.2~2.6 mg kg<sup>-1</sup>, 平均值 1.05 mg kg<sup>-1</sup>, 标准差 0.83 mg kg<sup>-1</sup>; 联邦加拿大为 1.4 mg kg<sup>-1</sup>; 澳大利亚为 5 mg kg<sup>-1</sup>。以保护各类水体为目的: 美国 8 个州根据用地方式和目标水体 (如地下水、地表水和海洋水体等) 制定了不同的土壤 B[a]P 临界浓度, 其范围在 0.11~100 mg kg<sup>-1</sup> 之间, 平均值 18.0 mg kg<sup>-1</sup>, 标准差 29.3 mg kg<sup>-1</sup>; 加拿大安大略 (Ontario) 省保护饮用水源规定的土壤清洁标准为 1.2 mg kg<sup>-1</sup>; 丹麦制定的 B[a]P 的土壤质量标准在 0.1~1 mg kg<sup>-1</sup> 之间。

## 2 中国适宜用地方式的划分与暴露途径考虑

### 2.1 农业用地

考虑到我国是一个农业大国, 相当大比例的业务

农人口终生生活在农村, 农业用地土壤的健康质量直接影响着我国广大农村居民的人体健康。在制定保护人体健康的土壤 B[a]P 临界值时, 本文主要参考了加拿大农业用地和英国果蔬副业用地, 以及荷兰制定保护人体健康土壤浓度值的方法, 考虑了口腔摄入土壤、皮肤接触、呼吸摄入和摄入污染蔬菜暴露途径<sup>[16, 23, 24]</sup>。

### 2.2 居住用地

居住用地方式下人类的活动频率较高, 暴露于污染土壤的周期相对较长, 是对人体健康较为敏感的土地利用方式。在制定居住用地土壤中 B[a]P 的健康质量指导值时, 主要参照了美国环保总署及各州的暴露设置, 考虑了土壤口腔摄入、土壤皮肤接触以及呼吸摄入含 B[a]P 的土壤飘尘三个主要暴露途径<sup>[3]</sup>。

### 2.3 工业用地

我国国家环保总局于 1999 年 6 月颁布了《工业企业土壤环境质量风险评估基准》(HJ/T25—1999), 该基准以保护人体直接接触和地下水水质为制定原则, 制定的工业用地土壤 B[a]P 的风险评估基准值为 9.1 mg kg<sup>-1</sup><sup>[25]</sup>。本文对我国工业用地场景下的暴露参数进行了部分更新, 在制定保护人体健康的土壤 B[a]P 临界值时, 综合了美国环保总署、美国新墨西哥州和加拿大采用的方法, 考虑的主要暴露途径包括口腔摄入土壤、皮肤接触土壤和呼吸摄入

土壤颗粒三个主要暴露途径<sup>[3-5,16]</sup>。

### 3 保护人体健康的土壤 B[ a]P 临界浓度模拟计算

#### 3.1 直接暴露途径

本文考虑了污染土壤中的 B[ a]P 通过 3 种主要

的暴露途径进入人体的暴露风险,其中口腔摄入土壤的暴露量(TCR<sub>o</sub>, mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)、皮肤接触土壤的暴露量(TCR<sub>d</sub>, mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)、呼吸摄入土壤颗粒的暴露量(TCR<sub>i</sub>, mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)分别可用式(1)、式(2)和式(3)进行模拟计算<sup>[3]</sup>,式(1)、式(2)和式(3)中的各项参数代号、含义及其取值列于表 2。

$$TCR_o = \frac{\frac{EF_c \times ED_c \times SIR_c \times C_s}{BW_c \times 10^6} + \frac{EF_a \times ED_a \times SIR_a \times C_s}{BW_a \times 10^6}}{AT_c} \quad (1)$$

$$TCR_d = \frac{\frac{EF_c \times ED_c \times AF_c \times SA_c \times C_s \times ABS}{BW_c \times 10^6} + \frac{EF_a \times ED_a \times AF_a \times SA_a \times C_s \times ABS}{BWA \times 10^6}}{AT_c} \quad (2)$$

$$TCR_i = \frac{\frac{EF_c \times ED_c \times AIR_c \times C_s}{BW_c \times PEF} + \frac{EF_a \times ED_a \times AIR_a \times C_s}{BW_a \times PEF}}{AT_c} \quad (3)$$

表 2 B[ a]P 土壤临界浓度计算模型的参数取值

Table 2 Modeling parameters used in the calculation of soil B[ a]P threshold concentrations

代号 Code	参数含义 Parameter descriptions	单位 Units	农业用地 Agricultural land	居住用地 Residential land	工业用地 Industrial land
C <sub>s</sub>	土壤 B[ a]P 临界浓度 Threshold concentrations for B[ a]P in soils	mg kg <sup>-1</sup>	-	-	-
TCR <sub>o</sub>	口腔摄入土壤暴露量 Total exposure rate of contaminant via soil ingestion	mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	-	-	-
TCR <sub>i</sub>	吸入土壤颗粒暴露量 Total exposure rate of contaminant via air inhalation	mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	-	-	-
TCR <sub>d</sub>	皮肤接触土壤暴露量 Total exposure rate of contaminant via dermal contact	mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	-	-	-
ED <sub>a</sub>	成人暴露周期 Exposure duration for adults	a	64	64	36
EF <sub>a</sub>	成人暴露频率 Exposure Frequency for adults	d a <sup>-1</sup>	365	365	250
ED <sub>c</sub>	儿童暴露周期 Exposure duration for children	a	6	6	-
SIR <sub>c</sub>	儿童土壤摄入率 Oral soil ingestion rate for children	mg d <sup>-1</sup>	200	200	-
BW <sub>c</sub>	儿童平均体重 Average body weight for children	kg	13.6	13.6	-
SIR <sub>a</sub>	成人土壤摄入率 Oral soil ingestion rate for adults	mg d <sup>-1</sup>	150	100	100
BW <sub>a</sub>	成人平均体重 Average body weight for adults	kg	60	60	60
SA <sub>c</sub>	儿童皮肤总表面积 Total surface area of the skin for a child	cm <sup>2</sup>	1 593	980	-
AF <sub>c</sub>	儿童皮肤粘附密度 Skin soil adsorption density for children	mg cm <sup>-2</sup>	0.2	0.2	-
SA <sub>a</sub>	成人皮肤总表面积 Total surface area of the skin for an adult	cm <sup>2</sup>	4 317	2 657	2 657
AF <sub>a</sub>	成人皮肤粘附密度 Skin soil adsorption density for adults	mg cm <sup>-2</sup>	0.2	0.07	0.2
ABS	皮肤吸收因子 Skin absorption factor	无量纲	0.13	0.13	0.13
AIR <sub>c</sub>	儿童空气吸入率 Air inhalation rate for children	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	10	10	-
AIR <sub>a</sub>	成人空气吸入率 Air inhalation rate for adults	m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup>	20	20	20
PEF	颗粒扩散因子 Soil particle emission factor	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup>	1.61E+ 09	1.61E+ 09	1.61E+ 09
AT <sub>c</sub>	生命周期总暴露时间 Life time exposure	d	25 550	25 550	25 550

暴露周期指特定土地利用方式下人体可能暴露于土壤 B[ a]P 的时间。参考美国和加拿大,定义农业和居住用地方式下的暴露周期为 70 a<sup>[3,21]</sup>,定义工业用地方式下为 36 a(25~ 60 岁),即成人工作周期。暴露频率指一年内人体暴露于土壤 B[ a]P 的天数,定义农业和居住用地方式下的暴露频率为 365 d a<sup>-1</sup>,工业用地方式下的成年工人为敏感人群,除去正常双休日(104 d a<sup>-1</sup>)和其他假日(国际劳动节、国庆节、春节各 3 d、元旦 1 d),其暴露频率约为

250 d a<sup>-1</sup>。对于农业和居住用地方式,应保证终生(70 a)暴露于土壤 B[ a]P 无显著健康风险。考虑到儿童和成人行为模式的不同,可能导致对污染土壤的不同暴露情况,故分别计算儿童暴露周期(1~ 6 a)和成人暴露周期(7~ 64 a)内的暴露量。儿童和成人的每日土壤口腔摄入量参照了美国环保总署及有关州的默认数值(USEPA, 1996; NMED, 2004)。由于人体暴露于土壤 B[ a]P 的致癌效应为终生累加效应,故将一定暴露周期内的暴露剂量在寿命期内

进行平均, 定义平均寿命时间为 70 a (25 550 d) [3, 5]。

根据国内已有的研究和数据资料, 我国 0~ 6 岁儿童的平均体重为 13. 6 kg, 平均身高为 93 cm [26]; 成人的平均体重为 60 kg, 平均身高为 163 cm。根据体重和身高计算儿童和成人的皮肤总表面积为 6 127 cm<sup>2</sup>和 16 603 cm<sup>2</sup>(皮肤总表面积/ m<sup>2</sup>= 0. 023 9 × 身高/ cm<sup>0. 417</sup> × 体重/ kg<sup>0. 517</sup>) [27]。对于农业用地, 设定皮肤总表面积的 26% (头部占 6%, 上半肢臂膀 6%, 手部 4%, 腿部和脚部 10%) 可能暴露于土壤 B[a]P, 对儿童和成人的皮肤面积分别为 1 593 cm<sup>2</sup>和 4 317 cm<sup>2</sup>。对于居住/ 公园和商业/ 工业用地, 设定体表总面积的 16% (头部占 6%, 上半肢臂膀 6%, 手部 4%) 可能暴露于土壤 B[a]P, 对应的儿童和成人的皮肤暴露面积分别为 980 cm<sup>2</sup>和 2 657 cm<sup>2</sup>。

呼吸摄入暴露途径中的每日空气呼吸量参考美国和加拿大数值, 儿童和成人的空气呼入量分别定义为 10 和 20 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> [3, 21]。其他暴露参数如成人和儿童的皮肤粘附因子 (AF<sub>a</sub> 和 AF<sub>c</sub>)、B[a]P 的皮肤吸收因子 (ABS)、土壤颗粒物扩散因子 (PEF) 等, 参考了美国环保总署和部分州的默认值 [3, 5]。

### 3. 2 取食污染蔬菜产品暴露

对于农业用地, 除上述三种直接暴露途径, 取食污染蔬菜是摄入土壤 B[a]P 的重要暴露途径。根

据荷兰公众健康和环境研究所建立的取食污染蔬菜摄入土壤污染物的模型方法 [24], 可根据式 (4) 计算取食污染蔬菜而摄入的土壤 B[a]P 的暴露剂量, 模型中各参数含义及取值见表 3。

$$TCR_p = \frac{TCP_{pc} \times ED_c + TCP_{pa} \times ED_a}{AT_c} \quad (4)$$

$$TCR_{pc} = \frac{(C_{pr} \times Q_{rc} + C_{ps} \times Q_{sc}) \times f_v \times f_a}{BW_c}$$

$$TCR_{pa} = \frac{(C_{pr} \times Q_{ra} + C_{ps} \times Q_{sa}) \times f_v \times f_a}{BW_a}$$

$$C_{pr} = BCF_r \times C_{pw}$$

$$BCF_r = 10^{(0. 77 \times \log K_{ow} - 1. 52)} + 0. 82$$

$$C_{pw} = C_s \times SD \times P_w / V_w$$

$$P_w = (Z_w \times V_w) / (Z_a \times V_a + Z_w \times V_w + Z_s \times V_s)$$

$$Z_w = S / V_p$$

$$Z_a = 1 / (R \times T)$$

$$Z_s = K_d \times SD \times Z_w / V_s$$

$$K_d = K_{oc} \times f_{oc};$$

$$C_{ps} = BCF_s \times C_{pw} + C_{dp} \times fd_{ws}$$

$$BCF_s = [ 10^{(0. 95 \times \log K_{ow} - 2. 05)} + 0. 82 ] \times [ 0. 784 \times 10^{(- 0. 434 \times (\log K_{ow} - 1. 78) \wedge 2 / 2. 44)} ]$$

$$C_{dp} = TSP_o \times D_{ro} \times f_{rs} \times C_s \times [ fin / (Y_v \times fEi) ] \times [ 1 - (1 - \exp[- fEi \times te]) / (fEi \times te) ]$$

表 3 取食污染蔬菜摄入土壤 B[a]P 的暴露模型参数及取值<sup>1)</sup>

Table 3 Model parameters for calculating B[a]P exposure via consumption of contaminated vegetables

代号 Code	参数含义 Parameter definitions	单位 Unit	取值 Values
TCR <sub>p</sub>	取食蔬菜摄入 B[a]P 的暴露量 Total B[a]P exposure rate via vegetable consumption	mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	-
TCR <sub>pa</sub>	成人取食蔬菜的 B[a]P 暴露量 Total B[a]P exposure rate via vegetable consumption for adults	mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	-
TCR <sub>pc</sub>	儿童取食蔬菜的 B[a]P 暴露量 Total B[a]P exposure rate via vegetable consumption for children	mg kg <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	-
C <sub>pr</sub>	根菜中 B[a]P 浓度 B[a]P concentration in root vegetables	mg kg <sup>-1</sup>	-
C <sub>ps</sub>	茎叶菜中 B[a]P 浓度 B[a]P concentration in stem/ leafy vegetables	mg kg <sup>-1</sup>	-
Q <sub>ra</sub>	成人每日摄入根菜量 Quantity of root vegetables consumed for adults	kg d <sup>-1</sup>	0 136 7
Q <sub>sa</sub>	成人每日摄入茎叶蔬菜量 Quantity of stem vegetables consumed for adults	kg d <sup>-1</sup>	0 157 8
Q <sub>rc</sub>	儿童每日摄入根菜量 Quantity of root vegetables consumed for children	kg d <sup>-1</sup>	0 074 8
Q <sub>sc</sub>	儿童每日摄入茎叶蔬菜量 Quantity of stem vegetables consumed for children	kg d <sup>-1</sup>	0 076 1
f <sub>v</sub>	摄入 B[a]P 污染蔬菜所占比例 Proportion of contaminated vegetables in vegetable consumption	无量纲	1
f <sub>a</sub>	人体对 B[a]P 的吸收系数 B[a]P absorption coefficient of human bodies	无量纲	1
BCF <sub>r</sub>	根类蔬菜的生物富积系数 Bioaccumulation coefficient of the roots of vegetables	无量纲	-
C <sub>pw</sub>	土壤孔隙水中 B[a]P 浓度 B[a]P concentration in soil pore water	mg L <sup>-1</sup>	-
SD	土壤容重 Soil bulk density	kg dm <sup>-3</sup>	1. 5
P <sub>w</sub>	土壤孔隙水中 B[a]P 的质量比例 Mass proportion of B[a]P in soil pore water	无量纲	-
V <sub>w</sub>	土壤孔隙水体积比 Volume fraction of soil pore water	无量纲	0. 2

续表

代号 Code	参数含义 Parameter definitions	单位 Unit	取值 Values
Z <sub>w</sub>	水中 B[a]P 的逸度常数 Fugacity constant of B[a]P in water	mol m <sup>-3</sup> Pa <sup>-1</sup>	
S	水溶解性 Solubility in water	mol m <sup>-3</sup>	6.48E-06
V <sub>p</sub>	纯物质的蒸汽压力 Vapor pressure of pure substance	Pa	1.31E-08
Z <sub>a</sub>	空气中的逸度常数 Fugacity constant of B[a]P in air	mol m <sup>-3</sup> Pa <sup>-1</sup>	
R	气体常数 Air constant	Pa m <sup>3</sup> mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	8.3144
T	温度 Temperature	K	298
V <sub>a</sub>	土壤空气体积比 Volume fraction of soil air	无量纲	0.2
V <sub>s</sub>	土壤固相体积比 Volume fraction of soil solid phase	无量纲	0.6
Z <sub>s</sub>	土壤中逸度常数 Fugacity constant of B[a]P in soil	mol m <sup>-3</sup> Pa <sup>-1</sup>	
K <sub>oc</sub>	有机碳校正土壤-水分配系数 Adjusted soil-water distribution factor	(mol kg <sup>-1</sup> ) (mol dm <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup>	1.02E+06
f <sub>oc</sub>	有机碳质量分数 Fraction organic carbon in soil	kg kg <sup>-1</sup>	0.02
K <sub>ow</sub>	辛醇-水分配系数 Octanol-water partitioning coefficient	(mol dm <sup>-3</sup> ) (mol dm <sup>-3</sup> ) <sup>-1</sup>	2.24E+06
BCFs	茎叶蔬菜 B[a]P 的生物富积系数 Bioaccumulation coefficient of stem/leafy vegetables	无量纲	
C <sub>dp</sub>	源于颗粒沉降的茎叶 B[a]P 浓度 B[a]P concentration in stem/leaf via dust deposition	mg kg <sup>-1</sup>	
fdws	茎叶类作物的干重-鲜重比例 Ratio of dry weight: fresh weight for stem/leafy vegetables	kg kg <sup>-1</sup>	0.117
TSP <sub>o</sub>	室外空气中的颗粒物浓度 Particle concentration in outdoor air	mg m <sup>-3</sup>	0.07
D <sub>ro</sub>	空气中颗粒物沉降速率 Deposition rate of particles in air	m d <sup>-1</sup>	864
f <sub>is</sub>	室外空气尘埃中土壤源颗粒物比例 Proportion of soil born particles in outdoor air dust	无量纲	0.5
f <sub>in</sub>	作物截获颗粒物比例 Proportion of particles intercepted by crops	无量纲	0.4
Y <sub>v</sub>	作物产量 Crop yield	kg m <sup>-2</sup>	0.28
fEi	开花系数 Flowering coefficient	d <sup>-1</sup>	0.033
te	开花周期 Flowering duration	d	180

1) 表3中参数取值来自参考文献[24] Parameter values listed in the Table 3 were cited from the literature [24]

生命期(70 a)内因取食蔬菜而摄入 B[a]P 的量,可根据儿童和成人每日摄入蔬菜的量以及蔬菜中 B[a]P 的浓度进行计算。根据蔬菜中 B[a]P 浓度与土壤 B[a]P 浓度的关系,将蔬菜分为根菜和茎叶菜两类分别进行计算:对于根菜类植物,假设进入根部的 B[a]P 浓度与土壤孔隙水中 B[a]P 的浓度和植物的生物富积系数相关;对于茎叶部的 B[a]P 浓度,除了考虑与土壤孔隙水中 B[a]P 的浓度和植物对 B[a]P 的富积系数外,同时考虑进入大气的土壤颗粒物中的 B[a]P 经大气沉降对茎叶中 B[a]P 浓度的贡献。此外,摄入受土壤 B[a]P 污染的蔬菜占取食蔬菜总量的比例、人体对 B[a]P 的吸收系数也影响着 B[a]P 的摄入量。

### 3.3 基于致癌风险的土壤中 B[a]P 的临界浓度

由于 B[a]P 为一种强致癌性污染物,通常将 B[a]P 对人体的可接受致癌风险水平作为制定土壤中 B[a]P 临界浓度的出发点。美国环保总署和加

拿大 CCME 将 B[a]P 的可接受致癌风险水平定为 10<sup>-6</sup> (即认为每 1 000 000 人中有 1 例癌症病人的致癌概率是可接受的)<sup>[3, 4]</sup>, 美国部分州将 10<sup>-5</sup> 设定为可接受的致癌风险水平<sup>[5, 12]</sup>。本文考虑了特定土地利用方式下的主要暴露途径,将 B[a]P 的致癌风险水平(TR)设定为 10<sup>-5</sup>和 10<sup>-6</sup>,并根据式(5)和式(6)分别计算土壤中 B[a]P 的临界浓度:

$$\text{农业用地: } TCR_o \times CSF_o + TCR_d \times CSF_d + TCR_i \times CSF_i + CSF_o \times TCR_p = TR \quad (5)$$

$$\text{居住用地和工业用地: } TCR_o \times CSF_o + TCR_d \times CSF_d + TCR_i \times CSF_i = TR \quad (6)$$

式中,TCR<sub>o</sub>: 口腔摄入 B[a]P 暴露量(mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>); CSF<sub>o</sub>: 口腔摄入 B[a]P 的致癌斜率因子, 7.3 (mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>; TCR<sub>d</sub>: 皮肤接触摄入 B[a]P 暴露量(mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>); CSF<sub>d</sub>: 皮肤接触摄入 B[a]P 的致癌斜率因子, 8.6 (mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>; TCR<sub>i</sub>: 呼吸摄入土壤飘尘中 B[a]P 的暴露量(mg kg<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>); CSF<sub>i</sub>: 呼吸

摄入 B[a]P 的致癌斜率因子,  $6.1 (\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1})^{-1}$ ; TCR<sub>p</sub>: 摄入污染蔬菜产品的 B[a]P 暴露量 ( $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$ ); TR: 摄入土壤 B[a]P 的可接受致癌风险水平。

以上模型中口腔摄入 B[a]P 的致癌斜率因子 (CSF<sub>o</sub>)、呼吸摄入 B[a]P 的致癌斜率因子 (CSF<sub>i</sub>)、皮

肤接触 B[a]P 的致癌斜率因子 (CSF<sub>d</sub>) 取自美国环保总署和各州制定 B[a]P 土壤指导值/标准时的默认值<sup>[3, 5, 6, 12]</sup>。根据以上 3 种用地方式下暴露参数值, 结合 3 种主要暴露途径中 B[a]P 暴露量的模型方程, 可以计算得到致癌风险水平为  $10^{-6}$  和  $10^{-5}$  时土壤 B[a]P 的临界浓度(表 4)。

表 4 不同致癌风险水平下土壤中 B[a]P 的临界浓度值  
Table 4 Soil B[a]P threshold concentrations at different cancer risk levels

B[a]P 的可接收 致癌风险水平 Acceptable risk levels	土壤 B[a]P 临界浓度 Threshold concentration for B[a]P in soils ( $\text{mg kg}^{-1}$ )		
	农业用地 Agricultural land	居住用地 Residential land	工业用地 Industrial land
$10^{-5}$	0.282	0.632	1.479
$10^{-6}$	0.028	0.063	0.148

## 4 保护地下水的 B[a]P 的土壤临界浓度

由于土壤污染与地下水水质紧密相关, 因此, 除了根据主要暴露途径制定土壤中 B[a]P 的临界浓度之外, 还需考虑 B[a]P 发生迁移扩散对地下水水质的影响。需把握的关键性原则是土壤 B[a]P 的临界浓度不应导致地下水中 B[a]P 的浓度超过地下水/饮用水水质标准(部分地区地下水直接作为饮用水源)。

土壤 B[a]P 主要通过土壤溶液向地下水迁移, 故在确定保护地下水水质的土壤临界浓度时, 以地下水水质指导值/标准为出发点。由于土壤溶液进入地下水是一个稀释过程, 可根据地下水水质指导值(WQG)和稀释因子(DAF)确定土壤溶液中 B[a]P 的临界浓度( $C_w$ ), 即:

$$C_w = \text{WQG} \times \text{DAF} \quad (7)$$

式中,  $C_w$ : 土壤溶液中 B[a]P 的临界浓度 ( $\text{mg L}^{-1}$ ); WQG: B[a]P 的地下水/饮用水水质指导值/标准,  $0.000\ 01 (\text{mg L}^{-1})$ ; DAF: 稀释因子, 20 (USEPA, 1996)。

假设土壤三相中 B[a]P 浓度处于扩散平衡状态, 土壤溶液中的 B[a]P 浓度与土壤空气及土壤固相中 B[a]P 的浓度存在化学平衡关系。由此, 可根据土壤溶液中 B[a]P 的浓度, 计算保护地下水的土壤 B[a]P 的临界浓度( $C_{\text{gwp}}$ )<sup>[5]</sup>:

$$C_{\text{gwp}} = C_w \times \left[ K_{\text{oc}} \times f_{\text{oc}} + \frac{V_w + V_a \times H'}{\text{SD}} \right] \quad (8)$$

式中,  $C_{\text{gwp}}$ : 保护地下水水质的土壤 B[a]P 浓度 ( $\text{mg kg}^{-1}$ );  $C_w$ : 土壤溶液中 B[a]P 的临界浓度 ( $\text{mg}$

$\text{L}^{-1}$ );  $H'$ : 无量纲亨利常数,  $4.63\text{E-}05$ , 其他参数定义见表 3。

我国 1986 年起实施的 GB5749—85 生活饮用水卫生标准规定 B[a]P 的限值为  $0.000\ 01 \text{ mg L}^{-1}$ , 与加拿大 CCME 的水质标准相同<sup>[29]</sup>。为确定地下水对土壤溶液的适宜稀释因子, 美国环保总署进行了针对性研究, 结果表明稀释因子 (DAF) 取 20 时可较好地保护地下水水质, 美国新墨西哥州也将稀释因子定义为  $20^{[3-5]}$ 。加拿大 CCME 在制定保护地下水的土壤 B[a]P 临界浓度时, 采用的稀释因子为  $50^{[21]}$ 。由于我国国土面积广阔, 且目前缺乏相关的研究数据, 故建议采用保守性稀释因子 20, 结合其他土壤性质和 B[a]P 的性质参数, 计算得保护地下水水质的土壤 B[a]P 的临界浓度为  $0.204 \text{ mg kg}^{-1}$ 。

## 5 结 语

本文划分了我国典型的 3 类土地利用方式, 分别制定了相应的土壤 B[a]P 的临界浓度, 对于农业用地方式, 特别地考虑了取食污染蔬菜摄入土壤 B[a]P 的暴露贡献。在两种致癌概率水平下 ( $10^{-5}$  和  $10^{-6}$ ), 农业用地土壤中 B[a]P 的临界浓度分别为  $0.282$  和  $0.028 \text{ mg kg}^{-1}$ , 前者介于加拿大农业用地土壤  $0.1 \sim 1 \text{ mg kg}^{-1}$  之间; 对于居住用地, 模型计算所得的土壤 B[a]P 临界浓度分别为  $0.632$  和  $0.063 \text{ mg kg}^{-1}$ , 介于各调研国家临界浓度范围  $0.008 \sim 4 \text{ mg kg}^{-1}$  之间; 对于工业用地, 制定的土壤 B[a]P 临界浓度分别为  $1.479$  和  $0.148 \text{ mg kg}^{-1}$ , 介于或稍低于美国各州、加拿大和澳大利亚等国临界值  $0.2 \sim 5 \text{ mg kg}^{-1}$ 。根据水质标准制定的保护地下水的土壤

B[a]P的临界浓度为0.204 mg。本文制定B[a]P临界浓度时参考了国外的模型方法和参数,当前急需开展相应的国内研究,根据系统性研究成果来优化临界值制定的模型和参数设置,最大限度地降低模型和参数的不确定性。

## 参考文献

- [ 1 ] 丁克强, 骆永明, 刘世亮, 等. 黑麦草对土壤中苯并[a]芘动态变化的影响. 土壤学报, 2004, 41(3): 348~ 353. Ding K Q, Luo Y M, Liu S L, *et al.* Dynamics in benzo[a]pyrene concentrations in soil as influenced by ryegrass plants (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(3): 348~ 353
- [ 2 ] 王国庆, 骆永明, 宋静, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 I. 国际动态及中国的修订考虑. 土壤学报, 2005, 42(4): 666~ 673. Wang G Q, Luo Y M, Song J, *et al.* Study on soil environmental quality guidelines and standards I. International trend and suggestions for amendment in China (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 666~ 673
- [ 3 ] USEPA. Soil Screening Guidance: User's Guide. Office of Solid Waste and Emergency Response United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1996
- [ 4 ] USEPA. Soil Screening Guidance: Technical Background Document. Office of Solid Waste and Emergency Response United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1996
- [ 5 ] NMED. Technical Background Document for Development of Soil Screening Levels Revision 2.0. New Mexico Environment Department, 2004
- [ 6 ] WDNR. Soil Cleanup Levels for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) Interim Guidance. Technical Resources Section. Wisconsin Department of Natural Resources, Bureau for Remediation and Redevelopment, 1997
- [ 7 ] KDHE. Risk-based Standards for Kansas (RSK). Kansas Department of Health and Environment, 2003
- [ 8 ] NJDEPE. Cleanup Standards for Contaminated Sites. New Jersey Department of Environment and Energy, 1992
- [ 9 ] Saranko Christopher J, Halmes N Christine, Tolson J Keith, *et al.* Technical Report: Soil Cleanup Target Levels (SCTLs) for Chapter 62- 777, F. A. C. Prepared for the Division of Waste Management Florida Department of Environmental Protection. Final Report. 1999
- [ 10 ] SMDE. Cleanup Standards for Soil and Groundwater. State of Maryland Department of the Environment, 2001
- [ 11 ] MDEQ. Risk Evaluation Procedures for Voluntary Cleanup and Redevelopment of Brownfield Sites. Mississippi Department of Environmental Quality, 2002
- [ 12 ] MDNR. Cleanup Levels for Missouri (CALM)- Appendix B. Missouri Department of Natural Resources, 2001
- [ 13 ] NYSDEC. Determination of Soil Cleanup Objectives and Cleanup Levels. New York State Department of Environmental Conservation, 1994
- [ 14 ] SCDEP. Regulation Concerning Remediation Standard. State of Connecticut Department of Environmental Protection, 1996
- [ 15 ] CCME. Interim Canadian Environmental Quality Criteria for Contaminated Sites. Report CCME EPC- CS34. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, 1991
- [ 16 ] CCME. A Protocol for the Derivation of Environmental and Human Health Soil Quality Guidelines. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, 1996
- [ 17 ] CCME. Guidance Document on the Management of Contaminated Sites in Canada. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, 1997
- [ 18 ] NEPC. Schedule B(1) Guideline on the Investigation Levels for Soil and Groundwater. National Environmental Protection (Assessment of Site Contamination). National Environmental Protection Council, Canberra, 1999
- [ 19 ] BRGM. French Approach to Contaminated Land Management: Revision 1. French Geological Survey, 2003
- [ 20 ] DEPA. Environmental Guidelines No. 7: Guidelines on Remediation of Contaminated Sites. Danish Environmental Protection Agency, 2002
- [ 21 ] CCME. Canadian Soil Quality Guidelines for Contaminated Sites Human Health Effects: Benzo[a]pyrene. Final Report. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, 1996
- [ 22 ] SAIC. Compilation and Review of Canadian Remediation Guidelines, Standards and Regulations. Science Applications International Corporation (SAIC), Environmental Technologies Program, Ottawa, Ontario, Canada, 2002
- [ 23 ] EA and DEFRA. The Contaminated Land Exposure Assessment (CLEA) Model: Technical Basis and Algorithms. The Environment Agency and Department of Environment, Food and Rural Affairs, London, 2002
- [ 24 ] Van den Berg R. Human Exposure to Soil Contamination: A Qualitative and Quantitative Analysis Towards Proposals for Human Toxicological Intervention Values (partly revised edition) 1994
- [ 25 ] 国家环保总局. 工业企业土壤环境质量风险评价基准(HJ/T25—1999). 1998. SEPA (State Environmental Protection Administration of China). Industrial Soil Environmental Quality Criteria Based on Risk Assessment (In Chinese). 1998
- [ 26 ] 中华人民共和国卫生部. 2005年中国卫生统计提要. <http://www.moh.gov.cn/>. 2005. Ministry of Health, People's Republic of China. Summary of Chinese Health Statistical Data in 2005 (In Chinese). <http://www.moh.gov.cn/>. 2005
- [ 27 ] 国家环保总局. 工业企业土壤环境质量风险评价基准编制说明. 1998. SEPA (State Environmental Protection Administration of China). Introduction of Deriving Industrial Soil Environmental Quality Criteria Based on Risk Assessment (In Chinese). 1998
- [ 28 ] 中国肥胖问题工作组数据汇总分析协作组. 我国成人体重指数和腰围对相关疾病危险因素异常的预测价值: 适宜体重指数和腰围切点的研究. 中国流行病学杂志, 2002, 23(1): 5~ 10. Cooperative Meta-analysis Group of China Obesity Task Force. Predictive values of body mass index and waist circumference to risk factors of related disease in Chinese adult population (In Chinese). *Chinese Journal of Epidemiology*, 2002, 23(1): 5~ 10
- [ 29 ] CCME. Canadian Environmental Quality Guidelines, Summary Table. Canadian Council of Ministers of the Environment, Winnipeg, 2002



## STUDY ON SOIL ENVIRONMENTAL QUALITY GUIDELINES AND STANDARDS IV. SOIL BENZO[ A] PYRENE THRESHOLD CONCENTRATIONS BASED ON HUMAN HEALTH RISK ASSESSMENT

Wang Guoqing<sup>1,2,4</sup> Luo Yongming<sup>1,2,4†</sup> Song Jing<sup>1,2,4</sup> Zhao Qiguo<sup>1,2</sup> Xia Jiaqi<sup>3</sup>

(1 Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 State Key Laboratory of Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China)

(3 Nanjing Institute of Environmental Sciences, State Environmental Protection Administration of PR China, Nanjing 210042, China)

(4 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** Human health risk assessment has been extensively employed to derive guidelines/ standards for soil environmental quality around the world. Various threshold values for Benzo[ a] pyrene ( B[ a]P) concentration in soil for protection of human health were introduced. Exposure scenarios and parameters of three different patterns of land use were defined to quantify health risk of human exposure to soil B[ a]P. A human health-based methodology for deriving threshold values for B[ a]P concentration in soils was proposed for the first time in China, which should be further used to derive threshold concentrations for other persistent organic pollutants. Four exposure pathways, i. e. soil ingestion, dermal contact, soil inhalation, and consumption of contaminated vegetables, were considered in modeling for calculation. Threshold concentrations of B[ a]P at cancer risk levels of  $10^{-5}$  and  $10^{-6}$ , were calculated for agricultural, residential and industrial soils, respectively. Threshold values for B[ a]P concentration in soil for protection of groundwater quality were also derived based on the guidelines/ standards for protection of groundwater quality.

**Key words** Contaminated sites/ soil; B[ a]P; Soil quality; Guidelines/ standards; Risk assessment