《基于地下水安全的场地土壤铬和砷安全阈值》

（征求意见稿）编制说明

南京大学

中国科学院南京土壤研究所

目录

1 任务来源 1
2 制定标准的必要性和意义 1
3 主要起草过程 2
4 制定标准的原则和依据 2
4.1 制定原则 2
4.2 编制依据 3
5 主要条款说明 4
5.1 标准适用范围 4
5.2 标准术语和定义 4
5.2.1 地下水安全 groundwater safety 4
5.2.2 基于地下水安全的场地土壤阈值 soil threshold based on groundwater safety 4
5.2.3 包气带衰减 attenuation along vadose zone 4
5.2.4 吸附 adsorption 4
5.3 土壤污染物项目 5
5.4 地下水安全的场地土壤阈值制定程序 5
6 地下水安全的场地土壤阈值计算方法 5
6.1 铬、砷迁移过程的评估 5
6.1.1 铬、砷在土壤中的释放 5
6.1.2 铬、砷在包气带中的迁移衰减 6
6.1.3 铬、砷在地下水中的稀释 8
6.1.4 由 SSL 模型反推出场地土壤阈值 9
7 地下水安全的场地土壤阈值的确定 9
8 定值说明 9
8.1 铬 9
8.1.1 土壤性质及含水层相关参数取值 9
8.1.2 Hydrus-1D 模型参数取值及模拟结果 11
8.1.3 稀释系数及土壤阈值计算 12
8.2 砷 14
8.2.1 土壤性质及含水层相关参数取值 14
8.2.2 Hydrus-1D 模型参数取值及模拟结果 16

8.2.3 稀释系数及土壤阈值计算 19
参考文献 22

1 任务来源

我国在2014年首次发布了《污染场地风险评估技术导则》（HJ 25.3-2014），并根据该导则在2018年发布了《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》（36600-2018），《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（15618-2018），规定了国家级的建设用地和农用地土壤污染风险筛选值和管制值。然而，目前我国现行的土壤环境标准主要基于食物链累积和人体健康风险进行推导，缺乏基于地下水安全的场地土壤阈值研究，并且没有充分考虑我国的国情和区域土壤特征，导致土壤环境保护存在着“欠保护”和“过保护”的问题。因此，结合我国场地土壤环境特征及管理需求，开展基于地下水安全的场地土壤环境阈值的研究与制定工作。项目承担单位为中国科学院南京土壤研究所、中华人民共和国生态环境部南京环境科学研究所、中国环境科学研究院。

2 制定标准的必要性和意义

《全国地下水污染防治规划（2011-2020年）》和《水污染防治行动计划》（“水十条”）明确了控制地下水污染的重要任务，要求加强工业污染源控制、农业面源污染防治、地下水污染防治区划等措施，保护地下水资源。但是，我国基于地下水安全的场地土壤重金属环境基准研究尚属于起步阶段，当前发布的国家土壤环境基准一般从生态安全和人体健康风险的角度开展制定，缺乏以地下水安全为目标的土壤环境基准研究。因此，基于地下水安全的土壤环境阈值的研究成为我国保护地下水资源、加强我国生态文明建设和生态环境保护的重要任务之一。推导基于地下水安全的场地土壤重金属环境阈值，是深入推进地下水污染防治攻坚战的关键之一。

与发达国家相比，尽管目前我国已经提出“土-水”治理一体化的思路，但是由于缺乏基于地下水安全的土壤环境基准研究，现行的污染场地评估文件和土壤环境质量标准也鲜有考虑地下水安全这一重要因素，但是地下水对于城市发展和人类日常生活至关重要，是需要重点保护的对象之一。此外，当下的土壤环境基准值的研究大多针对常见重金属，如铜、铅、锌等，缺乏针对铬和砷的环境基准研究，但是铬和砷的强迁移性和毒性使得其应当成为污染场地监管和治理的重

点之一。因此亟需开展基于地下水安全的场地土壤铬和砷环境基准研究。这项工作对于加强我国的土壤环境管理、生态环境保护和可持续发展具有重要意义。

3 主要起草过程

2021 年 3 月，科技部发布了国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”重点专项 2021 年度项目申报指南，围绕国家场地土壤污染防治的重大科技需求，设立了“场地土壤环境容量与承载力量化方法（基础研究类）”项目。

2021 年 12 月，中国 21 世纪议程管理中心对“场地土壤环境容量与承载力量化方法（2021YFC1809100）”正式立项，该项目由牵头单位中国科学院南京土壤研究所，联合南京大学、中国科学院生态环境研究中心、中国环境科学研究院、生态环境部南京环境科学研究所和南京农业大学共同实施。项目围绕差异化的土地开发利用和土壤质量改善需求，基于区域、土壤类型和自然环境条件，解析场地土壤污染物交互作用和动态转化的关键参数，构建场地土壤污染物环境容量和承载力的量化评价框架；研究区域尺度土壤污染物环境容量的精细化核算方法，开发兼顾区域性及动态性的土壤承载力评价指标体系和定量评价模型；研究构建支撑区域土壤环境容量与承载力估算的基础数据平台；基于区域地下水安全，制定土壤环境容量和承载力，提出区域土地开发利用和保护的优化策略。

2022 年 3 月，成立标准编制组，正式开展基于地下水安全的场地土壤铬、砷安全阈值的研究与制定工作。

2024 年 6 月，编制组初步确定了基于地下水安全的场地土壤铬、砷安全阈值，并形成《基于地下水安全的场地土壤铬、砷安全阈值（专家咨询稿）》。

4 制定标准的原则和依据

4.1 制定原则

依法依规：以《中华人民共和国环境保护法》、《中华人民共和国土壤污染防治法》、《土壤污染防治行动计划》、《水污染防治行动计划》等我国现行的环境保护法律法规、政策、条例、标准的相关规定和要求为主要依据，确保土壤环境阈值的制定与修订符合国家法律法规的要求。

国内外经验借鉴：通过系统查阅世界主要发达国家如荷兰、美国、英国、加拿大、澳大利亚和新西兰等的土壤环境阈值和标准相关原文件，从理论方法、模型构建、推导流程及应用等方面进行梳理和比较，充分借鉴国内外相关标准和技术指南的经验，为我国的土壤环境阈值制定提供参考。

因地制宜：制定基于地下水安全的场地土壤环境阈值时，应考虑国家经济社会的发展需求，确保阈值的可行性与实用性。土壤环境阈值是构建国家生态环境风险防范体系的重要基石，也是制修订环境标准的理论基础和科学依据。因此，制定的阈值应因地制宜，适应不同场地土壤质地的特点，确保土壤环境阈值的科学性和实用性。

科学性与可行性：充分吸收国内外土壤环境阈值相关的最新研究成果，以科学为准则，兼顾合理性和可行性。相关基准研究需要具备长期的实验经验和足够的数据支持，确保我国土壤环境阈值的科学性、准确性和实用性。同时，考虑我国的经济、技术发展水平和相关方的承受能力，建立健全我国场地土壤环境阈值研究体系。

4.2 编制依据

GB/T 1.1 标准化工作导则第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则

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

GB/T 7714-2015 信息与文献参考文献著录规则

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

GB/T 22105.2-2008 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分：土壤中总砷的测定

HJ 1082-2019 土壤和沉积物 六价铬的测定

GB/T7467-2007 水质六价铬的测定

NY/T 1121.3-2006 土壤检测 第 3 部分：土壤机械组成的测定

NY/T 1121.6-2006 土壤检测 第 6 部分：土壤有机质的测定

NY/T 1377-2007 土壤中 pH 值的测定

GB/T 21010-2017 土地利用现状分类

GB/T 15618—1995 土壤环境质量标准

GB/T 17296-2000 中国土壤分类

5 主要条款说明

5.1 标准适用范围

本标准规定了基于地下水安全的场地土壤中铬、砷含量限值。

本标准规定了基于地下水安全的场地土壤阈值的术语、定义、监测与分析。

本标准适用于基于地下水安全的土壤环境质量评价与管理。

本标准不适用于放射性物质的场地。

5.2 标准术语和定义

标准中对土壤环境阈值、地下水安全的土壤环境阈值等关键术语进行了定义，术语的定义与我国标准性文件中的术语定义基本一致。

5.2.1 地下水安全 groundwater safety

满足《地下水质量标准》中三类水及以上的水质。

5.2.2 基于地下水安全的场地土壤阈值 soil threshold based on groundwater safety

基于《地下水质量标准》中三类水及以上的场地土壤中铬和砷最大允许含量。

5.2.3 包气带衰减 attenuation along vadose zone

污染物在包气带运移过程中，其浓度随着时间的推移或空间范围的扩大而逐渐减弱的过程。

5.2.4 吸附 adsorption

污染物在包气带运移过程中，污染物中的分子或离子被包气带土壤表面固定的过程。

5.3 土壤污染物项目

场地土壤类型多样，人类活动强度大，尤其工业企业用地，涉及各种化学品和生产加工过程中产生的污染物，污染源类型复杂，污染物种类繁多，且因污染场地而异。本标准选定的铬和砷两种重金属为 2014 年 4 月由中华人民共和国生态环境部和自然资源部公布的《全国土壤污染状况调查公报》中重点关注的无机污染物，其中包含阳离子型重金属铬和阴离子型重金属砷。

5.4 地下水安全的场地土壤阈值制定程序

地下水安全的场地土壤阈值制定主要包括 4 个步骤，具体如下：

（1）研究场地土壤性质及包气带、含水层相关参数的获取；

（2）铬和砷从土壤迁移至地下水过程的模拟和评估；

（3）地下水铬、砷浓度限值的选取；

（4）场地土壤铬、砷阈值的确定。

6 地下水安全的场地土壤阈值计算方法

6.1 铬、砷迁移过程的评估

6.1.1 铬、砷在土壤中的释放

使用土壤-水分配方程来模拟污染物在土壤中的释放，在线性吸附条件下，土壤中砷渗滤液的质量浓度为 ：

$$C_w = \frac{\rho_b C_s}{\theta_w + K_d \rho_b + H\theta_a} \tag{6-1}$$

式中:

C_w表示土壤渗滤液中砷的质量浓度，单位为 mg • L^{-1}；

C_s表示土壤中砷的质量分数，单位为 mg • kg^{-1}；

ρ_b表示土壤容重，单位为 kg • L^{-1}；

θ_w表示含水孔隙度，无量纲；

θ_a表示含空气孔隙度，无量纲；

H表示亨利系数，无量纲。

对于重金属砷而言，H = 0，此时重金属在土壤中的质量分数为：

$$C_s = C_w\left(k_d + \frac{\theta w}{\rho_b}\right) \tag{6-2}$$

6.1.2 铬、砷在包气带中的迁移衰减

采用土壤物理模拟软件 Hydrus-1D 对铬、砷在包气带中的迁移衰减进行模拟，定义衰减系数来反映包气带对铬、砷衰减作用的大小，计算公式为：

$$AF = \frac{C_w}{C_{1w}} \tag{6-3}$$

式中：C_{1w}表示污染物即将进入含水层时的浓度（即包气带底部砷出流浓度的峰值），单位为 mg • L^{-1}。

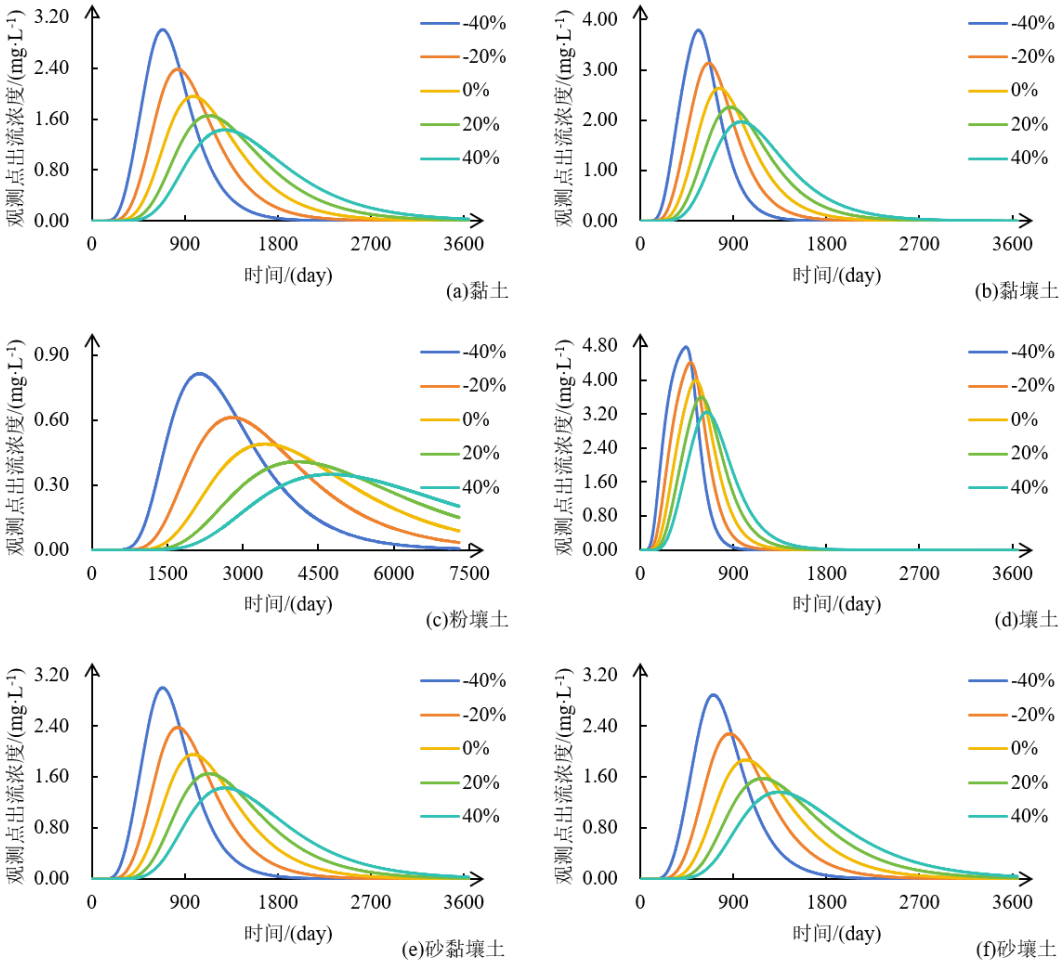


图 1 不同包气带厚度扰动幅度下砷在观测点的出流浓度随时间的变化曲线

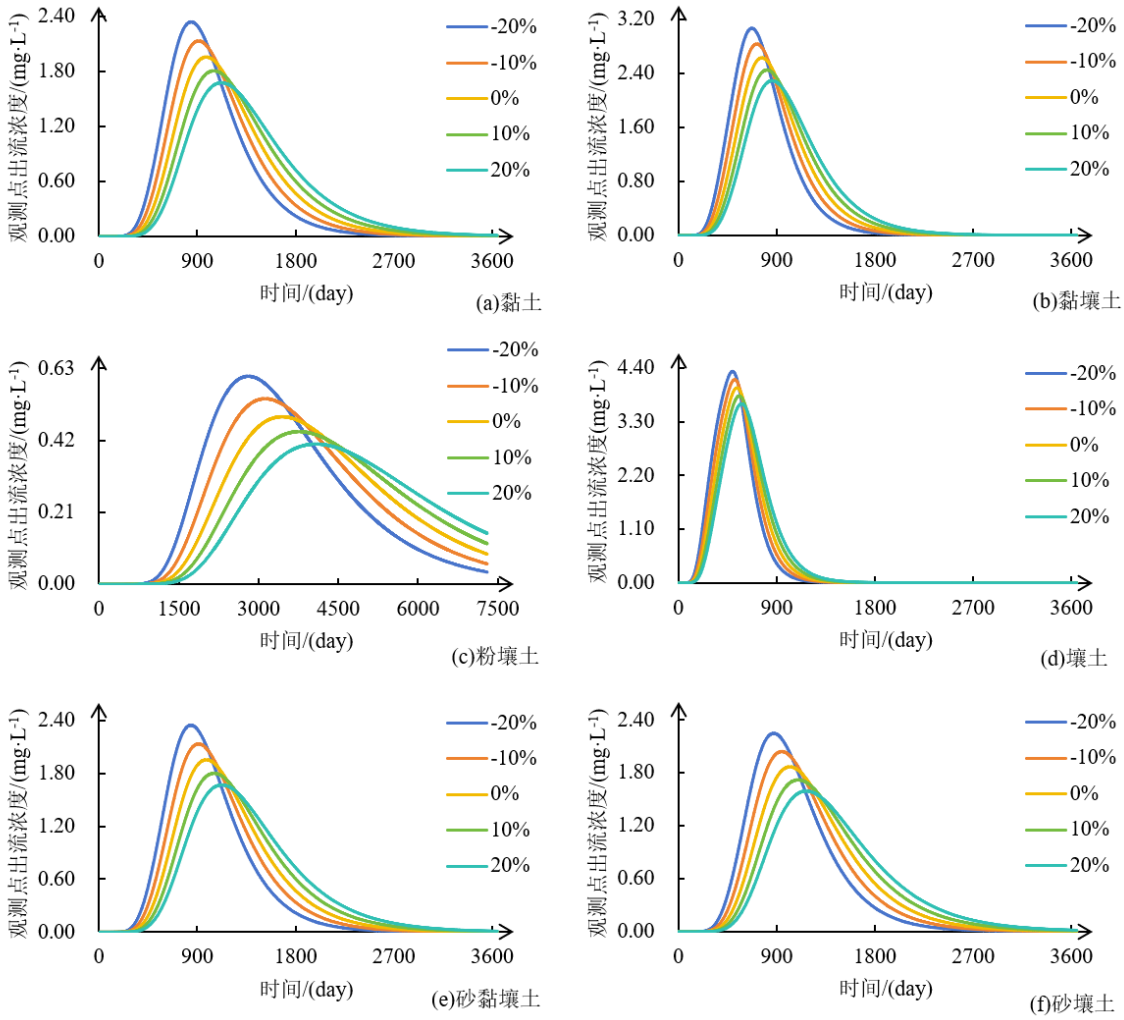


图 2 不同土壤容重扰动幅度下砷在观测点的出流浓度随时间的变化曲线

6.1.3 铬、砷在地下水中的稀释

保守起见，该过程不考虑砷在含水层中的衰减，仅采用稀释系数 DF 来描述其在含水层中的稀释，根据土壤筛选值模型(Soil Screening Levels, SSL)，稀释系数 DF 的计算公式为：

$$DF = 1 + \frac{kid}{IL} \tag{6-4}$$

地下水混合区深度 d 可由下式计算：

$$d = (0.0112L^2)^{0.5} + d_a\left[1 - e^{-\frac{IL}{kid_a}}\right] \tag{6-5}$$

式中，k表示水力传导系数，单位为 m • d^{-1}；

i表示水力梯度，无量纲；

L表示与地下水流向平行的污染场地长度，单位为 m；

I表示下渗速率，单位为 m・d^{-1}

d表示混合区的深度，单位为 m；

d_a表示含水层的厚度，单位为 m（当d大于d_a时，混合区深度即为d_a）。

6.1.4 由 SSL 模型反推出场地土壤阈值

将《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）中第Ⅲ类地下水质量分类的指标赋值于地下水砷、铬浓度限值C_m，结合上述三个过程得到的参数，根据 SSL 模型反推得到基于地下水安全的土壤铬、砷安全阈值：

$$C_s = C_m \cdot DAF\left(k_d + \frac{\theta_w}{\rho}\right) \tag{6-6}$$

其中 DAF 为稀释衰减系数，反映污染物渗滤液从进入包气带、再被地下水稀释过程中的损耗，计算公式为：

$$DAF = AF \cdot DF \tag{6-7}$$

7 地下水安全的场地土壤阈值的确定

（1）使用 SSL 模型由地下水铬、砷浓度限值反推得出不同情景下基于地下水安全的土壤环境阈值；

（2）不同污染场地的水文地质条件差异较大，在实际使用中需结合场地的土壤性质、包气带厚度等选取对应条件的土壤环境阈值，以满足不同情景下的场地评估需求。

8 定值说明

8.1 铬

8.1.1 土壤性质及含水层相关参数取值

地下水安全的土壤铬阈值推导所涉及的土壤性质及含水层相关参数如表 1、表 2 所示。此外，含水层厚度、污染场地长度和水力梯度根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（生态环境部，2009）分别设置为 2m，40m 和 1。

表 1 土壤理化性质

地区	土壤质地	pH	颗粒组成（%）			土壤干容重
			2-0.05 mm	0.05-0.002 mm	<0.002 mm	/（g・cm^{-3}）

吉林	黏壤土	7.62	41.40	26.30	32.30	1.331
	黏土	7.24	20.2	29.4	50.4	1.46
浙江	粉壤土	5.4	21.7	59	19.3	1.927
	黏壤土	4.46	43.10	26.30	30.60	1.5
江苏	砂壤土	7.2	53.8	34.5	11.7	2.666
	壤土	7.31	46.80	38.30	14.90	1.41
北京	砂壤土	7.22	59.00	22.90	18.10	1.79
	砂黏壤土	8.52	65.5	19.3	15.2	1.5
河南	砂壤土	8.34	65.00	16.80	18.20	1.54
	砂壤土	8.47	69.3	14.7	16	1.5
江西	黏壤土	4.74	35.60	27.30	37.10	1.66
	黏土	4.55	25.20	25.20	49.60	1.5
河北	砂壤土	8.45	62.10	20.20	17.70	1.45
	壤土	8.02	46.5	33.1	20.4	1.5
陕西	壤土	8.09	43.20	32.40	24.40	1.5
	黏壤土	8.2	27.5	47.3	25.2	1.39
黑龙江	壤土	5.80	40.90	25.80	33.30	1.21
	黏壤土	6.54	25.7	34.9	39.4	1.5
重庆	砂黏壤土	5.09	49.50	25.50	25.00	1.88

表 2 土壤性质及含水层相关参数

地区	土壤质地	分配系数 /（L • kg^{-1}）	含水孔隙度 /%	渗透速率 /（m • d^{-1}）	水力传导系数 /（m • d^{-1}）
吉林	黏壤土	4.24	43.9	0.648	0.523
	黏土	1.133	44.2	0.108	0.201
浙江	粉壤土	7.48	35.8	0.432	0.64
	黏壤土	1.124	43.3	0.027	0.75
江苏	砂壤土	5.87	29.4	0.57	0.562
	壤土	1.058	35.2	0.019	0.523

北京	砂壤土	5.887	47.8	0.108	0.567
	砂黏壤土	0.088	54.5	0.091	0.249
河南	砂壤土	2.22	33.3	0.024	0.116
	砂壤土	0.025	41.9	0.122	0.154
江西	黏壤土	2.89	48.7	0.546	0.988
	黏土	5.536	34.5	0.274	0.028
河北	砂壤土	0.813	46.5	0.029	0.245
	壤土	0.144	42.2	0.084	0.171
陕西	壤土	0.991	54.2	0.015	0.105
	黏壤土	0.081	41.1	0.105	0.656
黑龙江	壤土	2.59	44.9	0.648	0.082
	黏壤土	3.178	41.2	0.086	0.111
重庆	砂黏壤土	5.88	49.3	0.456	0.284

8.1.2 Hydrus-1D 模型参数取值及模拟结果

采用 Hydrus-1D 软件中集成的 Rosetta 模块计算得出了 19 种典型土壤 VG 模型的土壤水力参数，其值如表 3 所示。

表 3 Hydrus-1D 模型参数取值

地区	土壤类型	残余含水率	饱和含水率	进气值	空隙分布指数	渗透系数 /(cm・d^{-1})
吉林	黏壤土	0.0826	0.4575	0.0146	1.4130	16.85
	黏土	0.0943	0.4516	0.0162	1.2978	8.37
浙江	粉壤土	0.0437	0.2902	0.0152	1.2919	1.72
	黏壤土	0.0743	0.4102	0.0157	1.3669	7.90
江苏	砂壤土	0.0451	0.3895	0.0175	1.4321	26.34
	壤土	0.0511	0.3881	0.0117	1.5033	21.42
北京	砂壤土	0.0436	0.3172	0.0364	1.2280	6.26
	砂黏壤土	0.0518	0.3924	0.0266	1.4352	33.59
河南	砂壤土 A	0.0559	0.3876	0.0259	1.3966	24.87
	砂壤土 B	0.0550	0.3975	0.0275	1.4551	39.01

江西	黏壤土	0.0741	0.3762	0.0179	1.2581	2.92
	黏土	0.0920	0.4369	0.0173	1.2760	7.82
河北	砂壤土	0.0570	0.4074	0.0226	1.4305	32.23
	壤土	0.0592	0.3869	0.0140	1.4422	11.43
陕西	壤土	0.0660	0.3958	0.0133	1.4297	8.51
	黏壤土	0.0734	0.4208	0.0075	1.5607	11.61
黑龙江	壤土	0.0872	0.4923	0.0148	1.4185	30.20
	黏壤土	0.0857	0.4254	0.0132	1.3649	5.84
重庆	砂黏壤土	0.0480	0.3038	0.0330	1.1725	2.11

运用 Hydrus-1D 对不同包气带厚度及不同吸附情况下铬在包气带中的迁移衰减进行模拟，将模拟结果处理后得到铬在包气带底部的出流浓度变化过程，如图 3 所示。

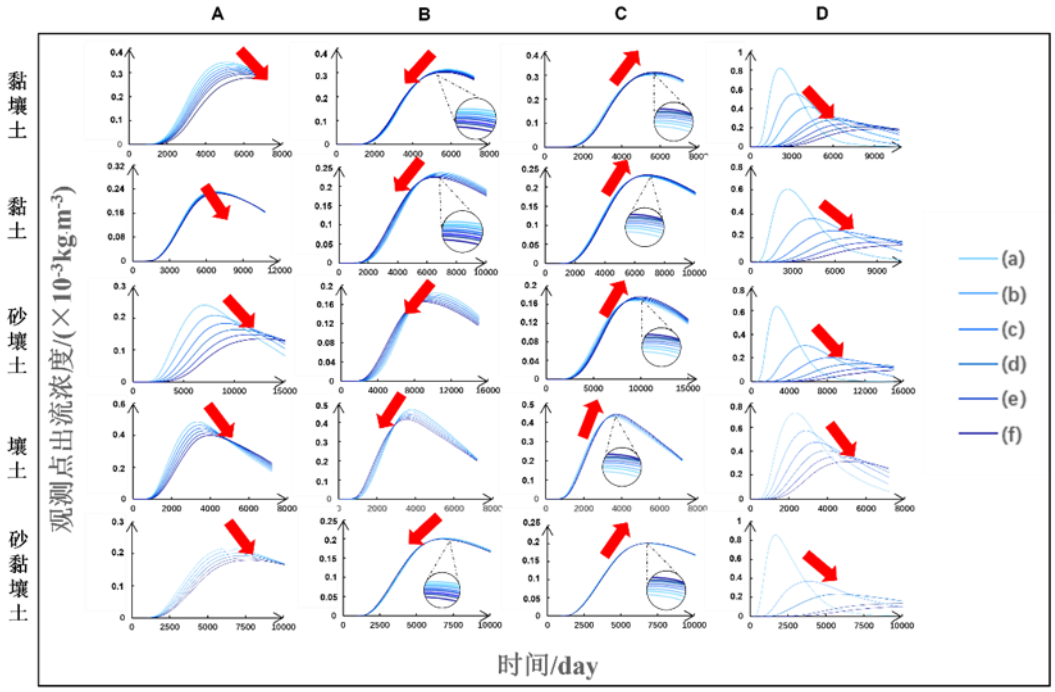


图 3 不同情景下 Cr（VI）出流浓度变化曲线

8.1.3 稀释系数及土壤阈值计算

采用公式（6-4）来计算稀释系数 DF，其值如表 4 所示。

表 4 典型土壤的稀释系数

地区	土壤类型	水力传导系数 /（$m \cdot d^{-1}$）	渗透速率 /（$m \cdot d^{-1}$）	DF
吉林	黏壤土	0.523	0.648	1.040
	黏土	0.201	0.108	1.093
浙江	粉壤土	0.640	0.432	1.074
	黏壤土	0.750	0.027	2.389
江苏	砂壤土	0.562	0.570	1.049
	壤土	0.523	0.019	2.376
北京	砂壤土	0.567	0.108	1.263
	砂黏壤土	0.249	0.091	1.137
河南	砂壤土 A	0.116	0.024	1.242
	砂壤土 B	0.154	0.122	1.063
江西	黏壤土	0.988	0.546	1.090
	黏土	0.028	0.274	1.005
河北	砂壤土	0.245	0.029	1.422
	壤土	0.171	0.084	1.102
陕西	壤土	0.105	0.015	1.350
	黏壤土	0.656	0.105	1.312
黑龙江	壤土	0.082	0.648	1.006
	黏壤土	0.111	0.086	1.065
重庆	砂黏壤土	0.284	0.456	1.031

考虑到各地区水文地质条件的差异较大，故计算了考虑包气带衰减吸附、考虑包气带衰减但不吸附以及不考虑包气带衰减三种情景下基于地下水安全的土壤铬阈值，以满足不同情景下的场地评估需求。三种条件下的计算结果平均值见表 5。

表 5 不同条件下基于地下水安全的土壤铬安全阈值/($mg \cdot kg^{-1}$)

地区	土壤质地	不考虑衰减	考虑衰减	
		无衰减	无吸附	有吸附
陕西咸阳	壤土	0.09	0.42	0. 74
河南新乡	砂壤土	0.04	0.22	0.43
湖北咸宁	黏壤土	0.44	0.61	1.32
重庆北碚	砂黏壤土	0.24	0.5	1.34

四川射洪	黏壤土	0.14	0.19	0.41
云南大理	黏土	0.39	1.38	2.04
广东江门	砂壤土	0.6	3.25	6.23
海南澄迈	黏土	0.24	0.83	1.25
黑龙江绥化	黏壤土	0.31	0.43	0.92
吉林长春	黏壤土	0.51	0.71	1.54
北京门头沟	砂壤土	0.36	1.94	3.72
河北保定	砂壤土	0.09	0.49	0.93
山西太原	砂壤土	0.08	0.42	0.81
浙江宁波（水田）	壤土	0.94	4.52	8.06
浙江宁波（旱地）	黏壤土	0.88	1.22	2.65
江苏泰兴	砂壤土	0.69	3.76	7.21
江苏无锡	壤土	0.48	1.76	4.11
安徽宣城	黏土	0.13	0.47	0.7
江西鹰潭（水田）	黏壤土	0.44	0.61	1.32
江西鹰潭（旱地）	黏土	0.43	1.5	2.24

8.2 砷

8.2.1 土壤性质及含水层相关参数取值

地下水安全的土壤砷阈值推导所涉及的土壤性质及含水层相关参数如表 6、表 7 所示。此外，含水层厚度、污染场地长度和水力梯度根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（生态环境部，2009）分别设置为 2m，40m 和 1。

表 6 土壤理化性质

地区	土壤质地	pH	颗粒组成（%）			土壤干容重
			2-0.05 mm	0.05-0.002 mm	<0.002 mm	/（g • cm^{-3}）
吉林	黏壤土	7.62	41.40	26.30	32.30	1.331
	黏土	7.24	20.2	29.4	50.4	1.46
浙江	粉壤土	5.4	21.7	59	19.3	1.927
	黏壤土	4.46	43.10	26.30	30.60	1.5
江苏	砂壤土	7.2	53.8	34.5	11.7	2.666
	壤土	7.31	46.80	38.30	14.90	1.41
北京	砂壤土	7.22	59.00	22.90	18.10	1.79

	砂黏壤土	8.52	65.5	19.3	15.2	1.5
河南	砂壤土	8.34	65.00	16.80	18.20	1.54
	砂壤土	8.47	69.3	14.7	16	1.5
江西	黏壤土	4.74	35.60	27.30	37.10	1.66
	黏土	4.55	25.20	25.20	49.60	1.5
河北	砂壤土	8.45	62.10	20.20	17.70	1.45
	壤土	8.02	46.5	33.1	20.4	1.5
陕西	壤土	8.09	43.20	32.40	24.40	1.5
	黏壤土	8.2	27.5	47.3	25.2	1.39
黑龙江	壤土	5.80	40.90	25.80	33.30	1.21
	黏壤土	6.54	25.7	34.9	39.4	1.5
重庆	砂黏壤土	5.09	49.50	25.50	25.00	1.88

表 7 土壤性质及含水层相关参数

地区	土壤质地	分配系数 /（L • kg^{-1}）	含水孔隙度 /%	渗透速率 /（m • d^{-1}）	水力传导系数 /（m • d^{-1}）
吉林	黏壤土	4.24	43.9	0.648	0.523
	黏土	1.133	44.2	0.108	0.201
浙江	粉壤土	7.48	35.8	0.432	0.64
	黏壤土	1.124	43.3	0.027	0.75
江苏	砂壤土	5.87	29.4	0.57	0.562
	壤土	1.058	35.2	0.019	0.523
北京	砂壤土	5.887	47.8	0.108	0.567
	砂黏壤土	0.088	54.5	0.091	0.249
河南	砂壤土	2.22	33.3	0.024	0.116
	砂壤土	0.025	41.9	0.122	0.154
江西	黏壤土	2.89	48.7	0.546	0.988
	黏土	5.536	34.5	0.274	0.028
河北	砂壤土	0.813	46.5	0.029	0.245
	壤土	0.144	42.2	0.084	0.171
陕西	壤土	0.991	54.2	0.015	0.105
	黏壤土	0.081	41.1	0.105	0.656
黑龙江	壤土	2.59	44.9	0.648	0.082
	黏壤土	3.178	41.2	0.086	0.111
重庆	砂黏壤土	5.88	49.3	0.456	0.284

8.2.2 Hydrus-1D 模型参数取值及模拟结果

采用 Hydrus-1D 软件中集成的 Rosetta 模块计算得出了典型土壤 VG 模型的土壤水力参数，其值如表 8 所示。

表 8 Hydrus-1D 模型参数取值

地区	土壤类型	残余含水率	饱和含水率	进气值	空隙分布指数	渗透系数 /(cm·d^{-1})
吉林	黏壤土	0.0826	0.4575	0.0146	1.4130	16.85
	黏土	0.0943	0.4516	0.0162	1.2978	8.37
浙江	粉壤土	0.0437	0.2902	0.0152	1.2919	1.72
	黏壤土	0.0743	0.4102	0.0157	1.3669	7.90
江苏	砂壤土	0.0451	0.3895	0.0175	1.4321	26.34
	壤土	0.0511	0.3881	0.0117	1.5033	21.42
北京	砂壤土	0.0436	0.3172	0.0364	1.2280	6.26
	砂黏壤土	0.0518	0.3924	0.0266	1.4352	33.59
河南	砂壤土 A	0.0559	0.3876	0.0259	1.3966	24.87
	砂壤土 B	0.0550	0.3975	0.0275	1.4551	39.01
江西	黏壤土	0.0741	0.3762	0.0179	1.2581	2.92
	黏土	0.0920	0.4369	0.0173	1.2760	7.82
河北	砂壤土	0.0570	0.4074	0.0226	1.4305	32.23
	壤土	0.0592	0.3869	0.0140	1.4422	11.43
陕西	壤土	0.0660	0.3958	0.0133	1.4297	8.51
	黏壤土	0.0734	0.4208	0.0075	1.5607	11.61
黑龙江	壤土	0.0872	0.4923	0.0148	1.4185	30.20
	黏壤土	0.0857	0.4254	0.0132	1.3649	5.84
重庆	砂黏壤土	0.0480	0.3038	0.0330	1.1725	2.11

运用 Hydrus-1D 对不同包气带厚度及不同吸附情况下砷在包气带中的迁移衰减进行模拟，将模拟结果处理后得到砷在包气带底部的出流浓度峰值，如表 9 所示。

表 9 各地区土壤在不同情景下的包气带底部出流浓度峰值/(mg·L^{-1})

地区	土壤类型	考虑吸附			不考虑吸附		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
吉林	黏壤土	3.531	1.271	2.282	5.000	5.000	5.000
	黏土	4.958	3.206	4.154	5.000	5.000	5.000
浙江	粉壤土	2.304	0.437	1.191	5.000	5.000	5.000
	黏壤土	5.000	4.663	4.913	5.000	5.000	5.000
江苏	砂壤土	3.378	1.318	2.348	5.000	5.000	5.000
	壤土	5.000	4.937	4.969	5.000	5.000	5.000
北京	砂壤土	0.361	0.361	0.361	4.959	4.959	4.959
	砂黏壤土	4.718	2.414	3.566	4.940	3.225	4.083
河南	砂壤土 A	2.010	0.703	1.357	5.000	4.616	4.808
	砂壤土 B	5.000	4.520	4.760	5.000	4.660	4.830
江西	黏壤土	4.517	4.517	4.517	5.000	5.000	5.000
	黏土	4.193	4.193	4.193	5.000	5.000	5.000
河北	砂壤土	3.948	0.671	2.310	5.000	2.775	3.888
	壤土	4.978	1.732	3.355	5.000	2.703	3.852
陕西	壤土	3.162	0.368	1.380	4.998	1.864	3.223
	黏壤土	4.977	1.386	2.851	4.997	2.774	3.515
黑龙江	壤土	1.757	0.906	1.332	4.987	4.592	4.790
	黏壤土	1.236	0.627	0.932	4.991	4.642	4.817
重庆	砂黏壤土	3.824	2.411	3.118	5.000	5.000	5.000

将表 9 的数据代入公式（6-3），得到了典型土壤在不同包气带厚度下，考虑不同吸附情况时的衰减系数 AF，如表 10 所示，表中最大值和最小值分别对应包气带厚度最大和最小时的情况。

表 10　典型土壤在不同情景下的衰减系数 AF

地区	土壤类型	考虑吸附			不考虑吸附		
		最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
吉林	黏壤土	1.416	3.934	2.191	1.000	1.000	1.000
	黏土	1.008	1.560	1.204	1.000	1.000	1.000
浙江	粉壤土	2.170	11.442	4.197	1.000	1.000	1.000
	黏壤土	1.000	1.072	1.018	1.000	1.000	1.000
江苏	砂壤土	1.480	3.794	2.129	1.000	1.000	1.000
	壤土	1.000	1.013	1.006	1.000	1.000	1.000
北京	砂壤土	13.850	13.850	13.850	1.008	1.008	1.008
	砂黏壤土	1.060	2.071	1.402	1.012	1.550	1.225
河南	砂壤土 A	2.488	7.112	3.686	1.000	1.083	1.040
	砂壤土 B	1.000	1.106	1.050	1.000	1.073	1.035
江西	黏壤土	1.107	1.107	1.107	1.000	1.000	1.000
	黏土	1.192	1.192	1.192	1.000	1.000	1.000
河北	砂壤土	1.266	7.452	2.165	1.000	1.802	1.286
	壤土	1.004	2.887	1.490	1.000	1.850	1.298
陕西	壤土	1.581	13.587	3.622	1.000	2.682	1.551
	黏壤土	1.005	3.608	1.754	1.001	1.802	1.422
黑龙江	壤土	2.846	5.519	3.755	1.003	1.089	1.044
	黏壤土	4.045	7.974	5.368	1.002	1.077	1.038
重庆	砂黏壤土	1.308	2.074	1.604	1.000	1.000	1.000

8.2.3 稀释系数及土壤阈值计算

采用公式（6-4）来计算稀释系数 DF，其值如表 11 所示。

表 11 典型土壤的稀释系数

地区	土壤类型	水力传导系数 /（$m \cdot d^{-1}$）	渗透速率 /（$m \cdot d^{-1}$）	DF
吉林	黏壤土	0.523	0.648	1.040
	黏土	0.201	0.108	1.093
浙江	粉壤土	0.640	0.432	1.074
	黏壤土	0.750	0.027	2.389
江苏	砂壤土	0.562	0.570	1.049
	壤土	0.523	0.019	2.376
北京	砂壤土	0.567	0.108	1.263
	砂黏壤土	0.249	0.091	1.137
河南	砂壤土 A	0.116	0.024	1.242
	砂壤土 B	0.154	0.122	1.063
江西	黏壤土	0.988	0.546	1.090
	黏土	0.028	0.274	1.005
河北	砂壤土	0.245	0.029	1.422
	壤土	0.171	0.084	1.102
陕西	壤土	0.105	0.015	1.350
	黏壤土	0.656	0.105	1.312
黑龙江	壤土	0.082	0.648	1.006
	黏壤土	0.111	0.086	1.065
重庆	砂黏壤土	0.284	0.456	1.031

考虑到各地区水文地质条件的差异较大，故计算了考虑包气带衰减吸附、考虑包气带衰减但不吸附以及不考虑包气带衰减三种情景下地下水安全的土壤砷阈值，以满足不同情景下的场地评估需求。 三种条件下的计算结果平均值见表 12。

表 12 不同条件下基于地下水安全的土壤砷安全阈值/(mg • kg^{-1})

地区	土壤类型	不考虑包气带衰减	考虑包气带衰减	
			无吸附	有吸附
吉林	黏壤土	3.9	3.9	8.5
	黏土	3.4	3.4	4.1
浙江	粉壤土	2.8	2.8	11.7
	黏壤土	7.2	7.2	7.3
江苏	砂壤土	1.8	1.8	3.8
	壤土	6.2	6.2	6.2
北京	砂壤土	4.1	4.1	57.0
	砂黏壤土	4.1	5.1	5.8
河南	砂壤土 A	3.0	3.1	10.9
	砂壤土 B	3.0	3.1	3.1
江西	黏壤土	3.5	3.5	3.9
	黏土	2.9	2.9	3.4
河北	砂壤土	4.7	6.0	10.1
	壤土	3.1	4.0	4.6
陕西	壤土	5.0	7.8	18.2
	黏壤土	3.9	5.5	6.8
黑龙江	壤土	4.0	4.2	15.0
	黏壤土	3.3	3.4	17.5
重庆	砂黏壤土	3.3	3.3	5.3

参考文献

生态环境部. 关于征求《生态安全土壤环境基准制定技术指南（征求意见稿）》等三项国家环境保护标准意见的函[EB/OL], 2018.

生态环境部, 国家市场监督管理总局. GB 15618-2018 《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准（试行）》[EB/OL], 2018.

生态环境部, 自然资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL][R/OL], 2014.

生态环境部南京环境科学研究所, 生态环境部环境标准研究所等. GB 36600-2018《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准（试行）》[EB/OL], 2018.

白利平, 孟凡生, 王业耀, 2015. 地下水污染预警方法与示范.中国环境出版社.

顾熙, 陈扣平, 吴吉春. 基于地下水安全的六价铬土壤环境基准值推导案例[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(01): 179-189.

蒋世杰, 翟远征, 王金生, 等. 国内外基于地下水安全的土壤环境基准的推导与比较[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(04): 52-59.

李勖之, 姜琼, 孙丽, 等. 不同国家土壤生态筛选值比较与启示[J]. 环境化学, 2022, 41(03): 1001-1010.

中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990, 1(9): 9.

蒋世杰, 翟远征, 王金生, 等. 国内外基于地下水安全的土壤环境基准的推导与比较[J]. 水文地质工程地质, 2016, 43(04): 52-59.

Huang Y, Zhang N, Ge Z, et al. Determining soil conservation strategies: Ecological risk thresholds of arsenic and the influence of soil properties[J]. Eco-Environment & Health, 2024, 3(2): 238-246.

Jiri J S, Saito H, Sakai M, et al. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media[R]. Deprtment of Environmental Sciences University of California Riverside, 2005.

Qin L, Sun X, Yu L, et al. Ecological risk threshold for Pb in Chinese soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 444: 130418.

New Jersey Department of Environmental Protection, 2008. Guidance for using the soil transport model to assess the impact to ground water pathway.

Simunek, J., 2008. Development and applications of the hydrus and stanmod software packages and related codes. Vadose Zone Journal, 72(2): 587-600.

US EPA, 2009. Regional screening level(RSL) soil to groundwater supporting table.