

ICS 13.080.01
CCS Z50

团体标准

T/CSER-003-2023

基于生态风险的土壤锌环境基准制定技术指南 Guidelines for establishing soil environmental criteria of zinc for ecological risk

(发布稿)

2023-05-30 发布

2023-06-05 实施

中关村众信土壤修复产业技术创新联盟发布

目 次

目次.....	I
前言.....	II
1 适用范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 基于生态风险的土壤锌环境基准制定程序.....	3
5 确定需要保护的生态受体和生态过程.....	4
6 收集数据建立土壤锌的毒性数据库.....	4
7 锌毒性数据归一化.....	5
8 利用物种敏感性分布法推导危害浓度.....	6
9 基于生态风险的土壤锌环境基准推导.....	7
10 基于生态风险的土壤锌环境基准表述.....	7
11 基于生态风险的土壤锌环境基准的审核.....	7
附录 A.....	9
附录 B.....	10

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。

本文件充分考虑我国国情和区域环境特征，借鉴吸收国内外最新研究成果及制定基准指南的成功经验。本文件规定了基于生态风险的土壤镉基准制定的程序、内容、方法和技术要求。

本文件由中关村众信土壤修复产业技术创新联盟（土盟）归口管理。

本文件主要起草单位：中国农业科学院农业资源与农业区划研究所、生态环境部土壤与农业农村生态环境监管技术中心、山东土地集团土壤科技有限公司、中国科学院生态环境研究中心、北京奥达清环境检测有限公司、武汉市秀谷科技有限公司。

本文件主要起草人：陈世宝、朱永官、王萌、段桂兰、杜平、于多、解梦娣、马骏、林涛、佘慧娜、刘飞龙、顾祝禹、周志远、张质。

基于生态风险的土壤锌环境基准制定技术指南

1 适用范围

本文件规定了保障生态风险的土壤锌环境基准制定的技术方法。
本文件适用于指导保护陆生生态环境的土壤锌环境基准值的制定。

2 规范性引用文件

本文件内容引用了下列文件或其中的条款。凡是不注明日期的引用文件，其最新版本适用于本文件。

GB 15618	土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准
HJ/T 166	土壤环境监测技术规范
GB/T 17138	土壤质量铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法
GB 2762	食品安全国家标准 食品中污染物限量
NY/T 395	农田土壤环境质量监测技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

暴露评估 Exposure assessment

对风险受体暴露环境中化学污染物的暴露量、频率及持续时间的估计或测定过程。

3.2

效应评估 Effect assessment

对污染物所造成的环境污染和环境破坏，引起生态系统结构和功能的变化程度所进行的评估。

3.3

受体 Receptor

暴露于胁迫因子的生态实体，包括个体、种群、群落以及生态系统。

3.4

评价终点 Assessment endpoint

是对那些需要保护的生态环境价值的明确表述，它通过生态受体及受体的某些指标来体现。目前常用的评价终点有生物个体的死亡率、繁殖力损伤、组织病理学异常、种群水平的

物种数量、群落水平的物种丰度等指标，评价终点常用毒性阈值表征。

3.5

土壤环境背景值 Background value of soil environment

不受或很少受到人类活动影响情况下土壤的基本化学元素含量。

3.6

环境基准值 Environmental criterion

环境污染物对特定对象（人或其他生物）不产生不良或有害影响的最大剂量或浓度。

3.7

毒性阈值 (EC_x) Ecotoxicity threshold

引起超出机体平衡限度 $x\%$ 生物变化的暴露水平或剂量。

3.8

老化因子 Aging factor

目标老化时间 (t_k) 条件下和短期 (t_0) 实验条件下污染物毒性阈值的比值。

3.9

淋洗因子 Leaching factor

土壤淋洗处理与非淋洗处理下的污染物毒性阈值的比值。

3.10

物种敏感性分布法 Species sensitivity distribution (SSD)

假设生态系统中不同物种对某一污染物的敏感性能被一个分布所描述，通过生物测试获得的有限物种的毒性阈值是来自于这个分布的样本，可用于估算该分布的参数。

3.11

危害浓度 Hazardous concentration (HC_p)

当污染物对生物的效应浓度小于等于 HC_p 的概率为 $p\%$ ，生境中 $(100-p)\%$ 的生物是相对安全的，通常以 HC₅ ($p=5$) 为危害浓度。

3.12

预测无效应浓度 Predicted no effect concentration (PNEC)

化学污染物对生物不会产生不良效应的最大允许浓度。

4 基于生态风险的土壤锌环境基准制定程序

在制定不同土地利用方式保护生态的土壤基准时，对于不同土地利用方式的保护水平（允许受到土壤污染影响的生态物种或生态过程百分比，Proportion of Affected Populations, PAPs），给出以下建议：

- (1) 对于自然保护地，PAPs 应小于 5%；
- (2) 对于农业用地，PAPs 应小于 10%；
- (3) 对于公园绿地，PAPs 应小于 20%；
- (4) 对于居住用地，PAPs 应小于 40%；
- (5) 对于工商用地，PAPs 应小于 50%。

基于土壤锌的生物有效性、生态风险和物种敏感性分布，参考现行土壤环境质量标准，并考虑现有的土壤环境质量监测能力和实际情况，规定土壤环境基准制定的主要步骤，确保基准的科学性、先进性、可行性和可操作性。

基于生态风险的土壤锌环境基准值制定主要有以下步骤：

- (1) 确定需要保护的生态受体和生态过程；
- (2) 收集数据建立土壤锌毒性数据库；
- (3) 对基于外源锌的毒性数据进行归一化；
- (4) 利用物种敏感性分布法推导危害浓度；
- (5) 推导生态风险的土壤锌环境基准值；
- (6) 审核保护生态的土壤锌环境基准。

基于保护生态的土壤锌环境基准值制定的技术路线如图 1 所示。

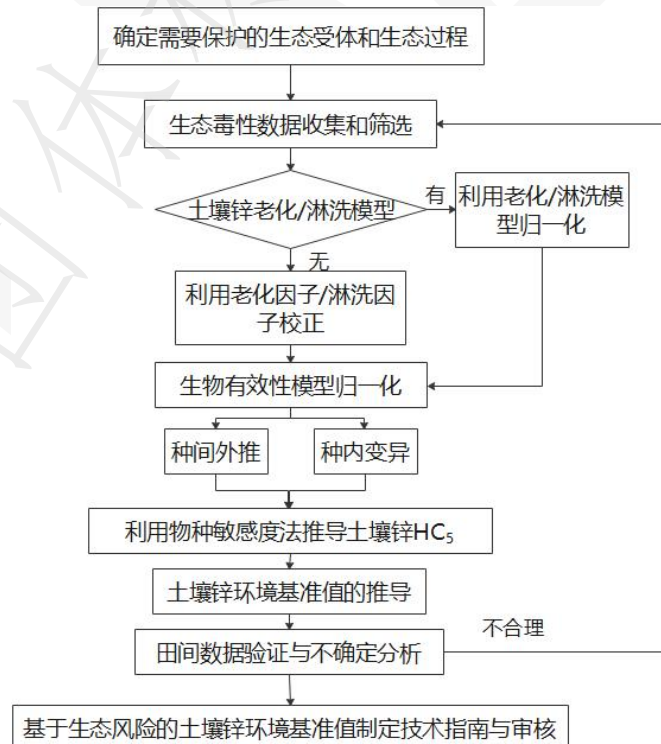


图 1 基于保护生态的土壤锌环境基准值制定的技术路线

5 确定需要保护的生态受体和生态过程

制定生态风险土壤环境基准需包含但不限于如下类型的重要土壤生态受体和生态功能：

(1) 陆生植物，如农作物和需要保护的野生植物等，需保证每种陆生植物的毒性数据量大于等于 4 个；

(2) 土壤无脊椎动物，如蚯蚓、跳虫、螨虫、线虫等，需保证每种土壤无脊椎动物的毒性数据量大于等于 4 个；

(3) 土壤微生物和微生物主导的土壤生态过程，如微生物生物量、土壤呼吸作用、土壤硝化作用等毒性指标，需保证每种土壤微生物和微生物主导的土壤生态过程的相关毒性指标数据量大于等于 4 个。

6 收集数据建立土壤锌的毒性数据库

6.1 数据的来源

数据来源主要有：(1) 实验实测数据；(2) 公开发表的文献或报告。

6.2 数据的可靠性判断

(1) 优先选用国内外权威机构发布的数据；

(2) 优先采用模式生物，本文件建议代表性物种主要包括土栖生物（包括陆生植物、土壤无脊椎动物以及土壤微生物）以及土壤生态过程（如硝化作用、有机质矿化等）。一般情况下，使用本土模式生物的毒性数据。特殊情况下，考虑陆生动物和鸟类的间接暴露和污染物的二次毒性。

(3) 优先选用国家标准测试方法及行业技术标准，实验操作过程遵循实验规范的实验数据（参照 GB 15618、GB 2762、HJ/T 166 和 NY/T 395）。

(4) 对于非标准测试方法的实验数据，在评估其实验方法、结果科学合理后方可采用。

6.3 数据的筛选

调研并汇总实验实测数据，收集锌的生态毒性数据，同时对获得的数据进行筛选，数据筛选原则如下：

(1) 生态毒性实验方法应遵循当前公认的生态毒性试验标准方法；

(2) 应能根据文献资料确定土壤锌的暴露时间和毒性终点（如生长、繁殖），并可根据剂量-效应关系估算关注的毒性效应数据 EC_x ；

(3) 文献应记录毒性试验开展条件，如土壤 pH、有机质和黏粒含量、温度等；

(4) 毒性实验数据应采用适宜的统计分析方法；

(5) 用于研究环境条件（如土壤温度变化）对土壤污染物生态毒性影响的试验，其报道数据可被采用；

(6) 实验观察到的锌的毒性效应归因于关注的锌，避免存在污染物混合体系；

(7) 筛选用于基准外推的土壤生态毒性数据，其实验研究中心必须采用便于比较的分析测试方法，应提供实际接触暴露浓度，而不仅仅是田间浓度；

(8) 田间实验数据可用于基准的制定，前提条件是首先满足以上条件，同时满足以下

条件：1) 效应数据必须来自同一地区同一研究试验周期，并有供试土壤理化性质数据；2) 样品采集、处理和存储应遵照标准方法或可接受操作程序；3) 其他田间实验相关条件的可接受性（如采样设计），应根据具体实验情况进行评估；

(9) 陆生植物、无脊椎动物和土壤生态过程相关生态毒性数据应分别筛选归类，单独评估。

7 锌毒性数据归一化

7.1 利用土壤锌的老化模型归一化毒性数据

获得的毒性数据推导土壤锌环境基准值时，必须考虑老化效应。利用已有的基于生物有效性或同位素可交换态建立的土壤锌老化模型，将不同时间点、短期的锌毒性数据归一化到某一长期的时间点，以消除实验数据和田间实际污染情况的差异。如果没有老化模型，可以根据锌在土壤中老化的程度（低、中、高）分别乘以不同的老化因子进行数据校正。

7.2 利用土壤锌的淋洗因子校正毒性数据

获得的毒性数据推导锌的土壤环境基准值时，必须考虑伴随阴离子（ NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等）对锌毒性效应影响。为消除伴随阴离子对锌毒性效应影响，利用淋洗因子对未淋洗土壤的毒性数据进行校正。

7.3 确立土壤锌的生物有效性模型并归一化数据

(1) 生物有效性模型

采用土壤和生态指标测试终点调查数据（点对点样品数据），依据土壤锌浓度与不同测试终点的剂量-效应关系建立预测模型，推导对不同测试终点产生毒性效应的锌土壤阈值（ EC_x ）。

(2) 种间外推

对于某种测试终点，如果文献资料中没有其生物有效性模型并且已有的数据不足以建立，采用有效性模型在种间外推的方法获得其生物有效性模型。种间外推时假设土壤性质的影响程度对共用模型的所有物种是相同的，即影响参数及斜率是相同的，各物种对土壤锌毒性敏感性的差异来自于物种本身的固有敏感性（ k ）。以预测模型获得的预测值与测定值之间的误差和最小为条件进行规划求解获得各个物种对应不同模型的截距（ k ）。根据优化求解获得的截距及模型中土壤性质参数的斜率计算各物种基于不同模型的预测毒性阈值 EC_x 。

$$\text{Log}_{10}[\text{EC}_x] = a \times \text{pH} + b \times \text{log}_{10}[\text{CEC}/\text{OM}/\text{clay}] + k$$

CEC—阳离子交换量（ mmol/kg 土）；

OM—有机质含量（ g/kg ）；

Clay—黏土矿物含量（ g/kg ）；

a、b—土壤性质参数斜率；

k—该测试终点对锌毒害的固有敏感性指标。

(3) 种内变异

利用有效性模型将某种土壤的各物种毒性阈值 EC_x 归一化到一定的土壤条件下（不同

pH、CEC 或 OM)。归一化前后种内变异以同一物种 $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (EC_{si} - \overline{EC_s})^2}{(n-1) \times (\overline{EC_s})^2}}$ 表示，其中 EC_{si} 为第 i 个 EC 归一化到特定条件下的值， $\overline{EC_s}$ 为 n 个 EC_s 的平均值， n 为该物种 EC 值的个数。种内变异程度降低表明归一化处理在一定程度上消除了土壤性质的影响。

8 利用物种敏感性分布法推导危害浓度

(1) 物种敏感性分布曲线拟合函数

优先选择 Burr-III 函数拟合物种敏感性分布曲线，也可选用 Log-normal、Log-logistic、Weibull 及 Gamma 等常用的累积概率分布函数，分别对富集数据进行拟合，建立物种敏感性分布曲线并比较其拟合精度，选择最佳的物种敏感性分布曲线拟合函数。

Burr-III 型函数的参数方程为：

$$y = \frac{1}{[1 + (\frac{b}{x})^2]^k}$$

y —累积概率，%；

x —毒性值，mg/kg；

b 、 c 、 k 为函数的三个参数。

(2) 危害浓度 HC_5 推导

通过生物有效性模型把毒性数据归一化到一定的土壤条件下，然后用 Burr-III 拟合不同土壤条件下的物种敏感性分布曲线，获得基于外源锌的保护 95% 生态物种安全的 HC_5 值。将土壤性质参数与 HC_5 值做多元回归，获得 HC_5 值的预测模型：

$$[HC_5] = f(\text{pH}, \text{CEC}, \text{OM} \dots) + k$$

基于外源锌的土壤 HC_5 可由上述公式计算得出。其中，连续性标准以基于土壤性质的计算公式表示。将不同土壤 pH、CEC 和 OM 取值代入连续标准的计算方程求解得分段标准。

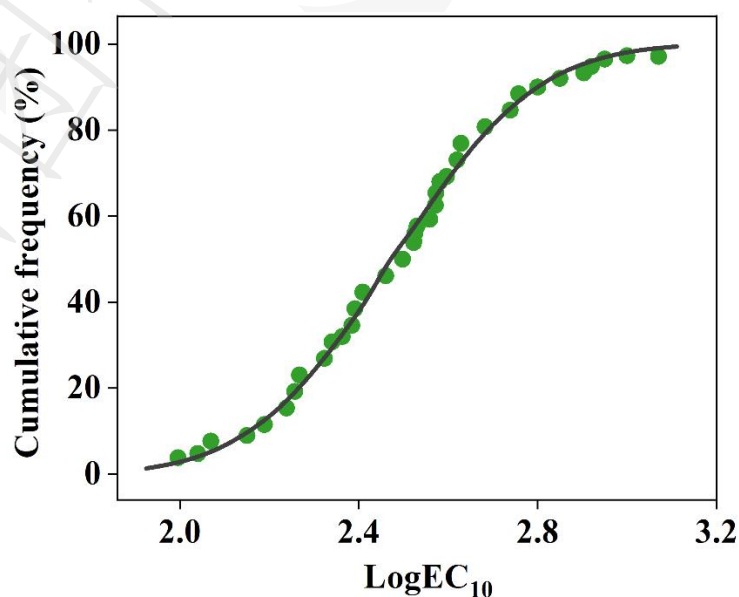


图2 应用物种敏感度分布法推导 HC₅ 的示意图

9 基于生态风险的土壤锌环境基准推导

该技术指南中基准的推导是基于土壤锌外源添加的方法,该方法假定土壤环境背景值部分(C_b)的锌活性可忽略而仅考虑外源添加部分锌的活性,故土壤中锌的环境基准值(PNEC值)为背景值与阈值之和。为了安全起见,通常在PNEC与HC₅值之间设定一个评估因子(AF,一般设为1~2),如下公式所示:

$$PNEC_{总} = HC_5 / AF + C_b$$

当可用的锌毒性数据基于非常有限的物种、没有老化模型或生物有效性模型归一化数据、毒性数据不理想或没有科学的方法将基于实验室获取的数据外推到实际田间污染等情况时,AF通常取值大于1。如果毒性数据来源于较多物种,且利用老化模型、淋洗因子和生物有效性模型对数据进行了校正,推导出的阈值也通过了田间数据进行验证,AF取值为1。

在基准制定时土壤背景值的确定尤为重要,如何确定土壤中锌的背景值仍需进一步研究,目前已有的确定土壤背景值的方法有:土壤地理化学调查法、与原始土壤中的结构元素回归分析法或频率分布法等。

10 基于生态风险的土壤锌环境基准表述

按照本文件推导出的基于生态风险的土壤锌环境基准属于数值型基准,一般保留2位有效数字,单位mg/kg。

11 基于生态风险的土壤锌环境基准的审核

基于生态风险的土壤锌环境基准的审核包括自审和专家审核两个步骤。

11.1 自审要点

基于生态风险的土壤锌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,以确保基准是否合理可靠。自审要点如下:

- (1) 使用的数据是否可被充分证明有效?
- (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) 是否遗漏其它重要数据?

11.2 专家审核要点

- (1) 基准推导所用数据是否可靠?
- (2) 基准推导过程是否符合技术指南?
- (3) 得出的基准值是否合理?
- (4) 是否有任何背离技术指南的内容并评估是否可接受?

11.3 田间数据验证

利用文献资料搜集筛选的数据或田间试验数据,通过比较预测值和实测值来判断推导的

土壤锌生态风险阈值的合理性。如果验证 PNEC 科学合理，则作为土壤环境基准值，如果不合理，重新检查筛选数据重新推导。

11.4 不确定性分析

对推导出的土壤环境基准值进行不确定性分析。

注：在相关生态物种毒理学数据库构建过程中，部分物种的毒理学数据来源于归一化方程的预测数据，因此，归一化过程所选物种的数量决定了模型预测的准确性。

附录 A

(资料性附录)

锌污染土壤的生态毒理学和生物测试标准化方法

- OECD 208 化学物质对土壤中高等植物出苗率和苗生长情况的影响
- OECD 227 化学物质的沉降过程对土壤植物叶片和地上部分生长状况的影响
- ISO 11269-1 除挥发性物质以外的所有可能进入到土壤中的物质对植物根系生长情况的影响
- ISO 11269-2 土壤中化学物质对多种植物的出苗率和早期生长的潜在毒性效应
- ISO 17126 污染土壤对莴苣 (*Lactuca sativa* L) 的出苗率影响
- ISO 22030 化学物质对陆地植物油菜 (*Brassica rapa* CrGC, syn. Rbr) 和燕麦 (*Avena sativa*) 的繁殖力的影响
- GB/T 21809 化学品 蚯蚓急性毒性试验
- GB/T 31270.15 化学农药环境安全评价试验准则 第 15 部分: 蚯蚓急性毒性试验
- ISO 11268-1 污染物对蚯蚓 (*E. fetida*) 的急性致毒效应
- OECD 207 污染物对蚯蚓 (*E. fetida* 和 *E. andrei*) 的急性致毒效应
- OECD 213 污染物通过口腔对蜜蜂 (*Apis mellifera* L) 的急性致毒效应
- OECD 214 污染物通过接触对蜜蜂 (*Apis mellifera* L) 的急性致毒效应
- ISO 20963 污染物对昆虫幼虫 (*Oxythyrea funesta*) 的急性致毒效应
- OECD 220 化学物质对线蚓 (*Enchytraeus albidus*) 的繁殖力影响
- OECD 222 化学物质对蚯蚓 (*E. fetida* 和 *E. andrei*) 的繁殖力影响
- ISO 16387 土壤质量 污染物对线蚓类 (线蚓物种) 的影响. 繁殖影响的测定
- ISO 11267 土壤质量 土壤污染物对弹尾目 (白符跳 *Folsomia candida*) 繁殖的抑制
- ISO 15952 污染物对陆地幼蛇 (*Helicidae*) 生长的影响
- GB/T 31270.16 化学农药环境安全评价试验准则 第 16 部分: 土壤微生物毒性试验
- OECD 217 污染物对土壤微生物碳转化能力的影响
- OECD 216 污染物对土壤微生物氮转化能力的影响
- ISO 14238 污染物对土壤氮矿化的潜在影响
- ISO 14240 土壤污染对微生物生物量的影响
- ISO 15685 土壤污染对硝化微生物的抑制效应
- ISO 16072 土壤污染对微生物代谢的影响
- ISO 17155 运用土壤呼吸曲线法确定微生物群落的丰度和活性, 适用于确定土壤污染物的潜在生态毒性
- ISO 23753 污染物对非淹水土壤中脱氢酶活性的影响

附录 B
（资料性附录）
土壤和污染物锌的分析

B.1 样品采集

土壤环境质量监测点位布设和样品采集等要求,执行 HJ/T 166 和 NY/T395 等相关规定。

B.2 分析方法

土壤中污染物含量及理化性质的分析方法选择的原则:

- (1) 选择保守的测定方法（同一筛选的数据中测定出的量最多的方法）;
- (2) 选择普遍认可的方法。