

ICS 13.080.01

CCS Z50

# 团 体 标 准

T/CSER-013-2023

## 基于农产品安全的农用地镉污染土壤修复基准 制订技术指南

Guidelines for establishing soil remediation criteria of cadmium for the safety of agricultural products

(发布稿)

2023-11-20 发布

2023-12-01 实施

中关村众信土壤修复产业技术创新联盟发布

---

CSER

---

# 目 次

目次.....	I
前言.....	II
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 保护农产品安全的土壤镉修复基准制订程序.....	2
5 土壤中有效态镉通用浸提方法的筛选.....	3
6 基于通用浸提方法土壤有效态镉含量与农产品镉积累量的剂量-效应关系构建.....	3
7 土壤中镉形态与作物富集数据库构建.....	3
8 数据归一化.....	3
9 利用物种敏感性分布法推导危害浓度.....	4
10 基于保护农产品安全的土壤镉修复基准表述.....	4
11 基于保护农产品安全的土壤镉修复基准审核.....	4
附录 A.....	6
附录 B.....	7



---

## 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订基准指南的成功经验。本文件规定了保护农产品安全的农用地土壤镉修复基准制订的程序、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）提出并归口。

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、湖北省地质局第四地质大队、安徽梅初环境技术有限公司、中国科学院南京土壤研究所、武汉市秀谷科技有限公司、深圳市华美绿生态环境集团有限公司、至农科技发展（浙江）有限公司、湖南省衡东县洣水镇农业综合服务中心、中山大学。

本文件主要起草人：陈世宝、王萌、秦璐瑶、俞磊、杜平、李泉、刘飞、胡斌、顾祝禹、孙慧群、王兴祥、宋静、冯旭、韩启斌、宋文恩、吴酬飞、涂圣梅、王哲、黄博阳、李建国、仇荣亮。



---

# 基于农产品安全的农用地镉污染土壤修复基准制订技术指南

## 1 范围

本文件规定了保护农产品安全的农用地土壤镉修复基准制订的技术方法。

本文件适用于农用地土壤中重金属镉修复基准的制订。

## 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
GB 2762	食品安全国家标准 食品中污染物限量
GB/T 23739	土壤质量 有效态铅和镉的测定 原子吸收法
HJ/T 166	土壤环境监测技术规范
NY/T 395	农田土壤环境质量监测技术规范
NY-T 398	农、畜、水产品污染监测技术规范
NY/T 3343	耕地污染治理效果评价准则

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**农产品安全土壤修复基准** Soil remediation criteria for the safety of agricultural products

以保护农产品安全为目的制订的土壤修复基准。

### 3.2

**环境基准值** Environmental criterion

环境污染物对人或其它生物等特定对象不产生不良或有害影响的最大剂量或浓度。

### 3.3

**归一化** Normalization

利用模型将不同浸提方法提取有效态镉富集数据校正到通用浸提方法提取有效态镉吸收数据的过程。

### 3.4

**种间外推** Cross-species extrapolation

假定土壤性质对某些物种影响相同时，利用某种物种已有生物有效性模型外推获得另一

种物种生物有效性模型的方法。

### 3.5

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

假设农田系统中不同物种对某一污染物的敏感性被一个分布描述,通过生物测试获得的有限物种的毒性阈值来自于此分布样本,可用于估算该分布的参数。

### 3.6

#### 危害浓度 Hazardous concentration ( $HC_p$ )

当污染物对生物的效应浓度不大于  $HC_p$  的概率为  $p\%$ , 生境中  $(100-p)\%$  的生物是相对安全的, 通常以  $HC_5$  ( $p=5$ ) 为危害浓度。

## 4 保护农产品安全的土壤镉修复基准制订程序

基于保护农产品安全的土壤镉修复基准制订应按以下步骤执行:

- (1) 土壤中有效态镉通用浸提方法的筛选;
- (2) 基于通用浸提方法土壤有效态镉含量与农产品镉积累量的剂量-效应关系构建;
- (3) 收集数据建立土壤中镉形态与作物富集数据库;
- (4) 利用物种敏感性分布法推导危害浓度;
- (5) 推导基于农产品安全的土壤镉修复基准值;
- (6) 审核保护农产品安全的土壤镉修复基准值。

基于保护农产品安全的土壤镉修复基准制订的技术路线如图 1 所示。

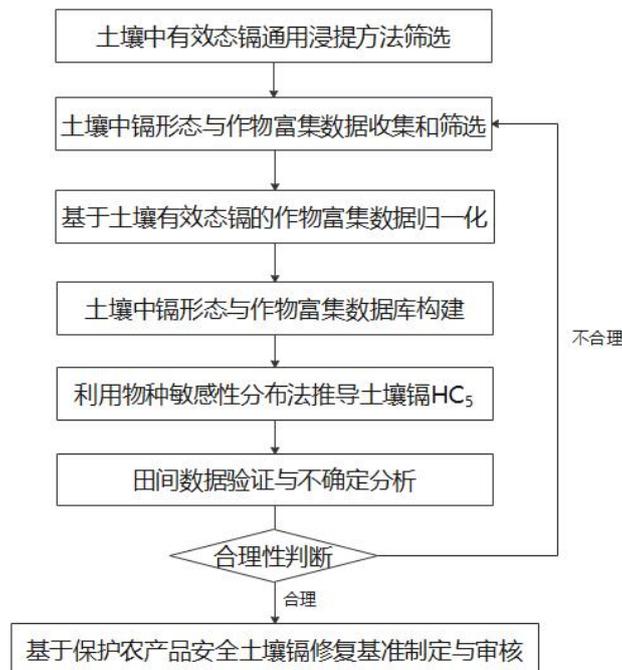


图 1 基于保护农产品安全的土壤镉修复基准制订的技术路线

## 5 土壤中有效态镉通用浸提方法的筛选

基于不同农产品的土壤镉毒性测试,采用不同浸提剂对不同性质土壤中的有效态镉进行提取,以不同浸提方法土壤有效态镉含量和植株可食部位镉含量间的相关系数作为“浸提指数”,选择最大综合相关系数对应的浸提方法作为通用浸提方法,计算方法如下:

$$I = \sqrt{(P^2 + P_{i,\max}^2)/2}$$

式中: I 为求得各浸提方法综合相关系数; P 为各浸提方法在不同性质土壤上获得的浸提指数均值;  $P_{i,\max}$  为各浸提方法在不同性质土壤上获得的最大浸提指数。

## 6 基于通用浸提方法土壤有效态镉含量与农产品镉积累量的剂量-效应关系构建

选择《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB2762)涵盖的农产品类型 12 种以上进行剂量-效应关系测定分析,并采用通用浸提方法提取土壤中有有效态镉,建立土壤有效态镉与农产品镉积累量之间的关系模型。利用 GB2762 规定的农产品中镉的限值计算出土壤中有有效态镉的阈值浓度。

## 7 土壤中镉形态与作物富集数据库构建

### 7.1 数据来源

数据来源宜包括实验实测数据和公开发表的文献或报告。

### 7.2 数据可靠性判断

- (1) 优先选取国内外权威机构发布的数据;
- (2) 优先选取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、NY/T 395 和 NY/T 398 等);
- (3) 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。

### 7.3 数据筛选

数据筛选应调研并汇总实验实测数据,收集镉的富集数据,同时对获得的数据进行筛选,筛选标准应符合下列规定:

- (1) 实验有合理对照;
- (2) 不存在缺少土壤性质、非可食部位的评价终点等明显的不合理因素;
- (3) 有 3 个及以上重复和 5 个及以上镉浓度梯度,便于统计分析;
- (4) 实验中条件控制一致;
- (5) 其它污染和影响可忽略;
- (6) 镉的作物暴露途径均一。

## 8 数据归一化

数据归一化时,应利用基于不同浸提方法提取的土壤有效态镉建立的关系模型,将从文

---

献收集的采用不同浸提方法提取的有效态镉数据归一化到通用浸提方法。

## 9 利用物种敏感性分布法推导危害浓度

### 9.1 物种敏感性分布曲线拟合函数

物种敏感性分布曲线拟合函数宜选择 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，分别对富集数据拟合，建立物种敏感性分布曲线并比较拟合精度，选择最佳的物种敏感性分布曲线拟合函数。

### 9.2 危害浓度 HC<sub>5</sub> 推导

危害浓度 HC<sub>5</sub> 宜通过食品安全标准反推出土壤镉的临界浓度，然后用 Burr-III 拟合不同土壤条件下的物种敏感性分布曲线，获得基于外源镉的保护 95%农产品安全的 HC<sub>5</sub> 值。

## 10 基于保护农产品安全的土壤镉修复基准表述

按照本文件推导出的保护农产品安全的土壤镉修复基准属于数值型基准，宜保留 2 位有效数字，单位 mg/kg。

## 11 基于保护农产品安全的土壤镉修复基准审核

基于保护农产品安全的土壤镉修复基准的审核包括自审和专家审核。

### 11.1 自审要点

- (a) 使用的数据应被证明有效；
- (b) 使用的数据应符合数据质量要求；
- (c) 不应存在明显异常数据；
- (d) 不应遗漏其它重要数据。

### 11.2 专家审核要点

- (a) 基准推导数据应可靠；
- (b) 基准推导过程应符合技术指南的要求；
- (c) 得出的基准值应合理；
- (d) 应无背离技术指南的内容且评估可接受。

### 11.3 田间数据验证

利用文献资料搜集或实际田间试验数据，通过比较预测值和实测值判断推导的土壤镉农产品安全阈值的合理性。如果验证科学合理，应作为土壤修复基准值，如果不合理，应重新检查筛选的数据并推导阈值。

### 11.4 不确定性分析

对推导出的土壤修复基准值应进行不确定性分析。

注：在农产品物种富集数据库构建过程中，部分物种富集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数量决定模型预测准确性。

CSER

---

## 附录 A

### (资料性附录)

## 土壤和污染物镉的分析

### A.1 样品采集

土壤环境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。

### A.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) 选择相关标准认可的方法;
- (2) 选择相关性最高的测定方法(同一筛选的有效态镉数据中与农产品镉积累量相关性最高的)。

## 附录 B

### (资料性附录)

#### 物种敏感性分布曲线拟合函数与拟合优度评价准则

##### B.1 物种敏感性分布曲线拟合函数

本文件推荐使用以下拟合函数：

(1) Burr III 型函数

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

式中：y—累积概率，%；  
x—毒性值，mg/kg；  
b、c、k 为函数的三个参数。

(2) Log-normal 型函数

$$y = \Phi\left(\frac{\ln x - \mu'}{\sigma}\right)$$

式中：y—累积概率，%；  
x—毒性值，mg/kg；  
 $\mu'$  和  $\sigma$  为函数参数。

(3) Log-logistic 型函数

$$y = \frac{1}{1 + (\frac{\beta}{x - \gamma})^\alpha}$$

式中：y—累积概率，%；  
x—毒性值，mg/kg；  
 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为函数参数。

(4) Weibull 型函数

$$y = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}$$

式中：y—累积概率，%；  
x—毒性值，mg/kg；  
 $\alpha$  和  $\beta$  为函数参数。

(5) Gamma 型函数

$$y = \frac{\Gamma_{x/\beta}(\alpha)}{\Gamma(\alpha)}$$

式中：y—累积概率，%；  
x—毒性值，mg/kg；  
 $\alpha$  和  $\beta$  为函数参数。

## B.2 拟合优度评价

模型拟合优度评价是用于检验总体中的一类数据其分布是否与某种理论分布相一致的统计方法。对于参数模型来说，检验模型拟合优度的参数如下：

### (1) 均方根误差 (Root mean square errors, RMSE)

RMSE 是观测值与真值偏差的平方与观测次数比值的平方根，该统计参数也叫回归系统的拟合标准差，RMSE 在统计学意义上可反映出模型的精确度，RMSE 越接近于 0，说明模型拟合的精确度越高。计算公式如下：

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

式中：RMSE—均方根误差；

$\hat{y}_i$ —第  $i$  种物种的实测毒性值， $\mu\text{g/L}$ ；

$y_i$ —第  $i$  种物种的预测毒性值， $\mu\text{g/L}$ ；

$n$ —毒性数据数量。

### (2) 残差平方和 (Sum of squares for error, SSE)

SSE 是实测值和预测值之差的平方和，反映每个样本各预测值的离散状况，又称误差项平方和。SSE 越接近于 0，说明模型拟合的随机误差效应越低。计算公式如下：

$$\text{SSE} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

式中：SSE—残差平方和；

$\hat{y}_i$ —第  $i$  种物种的实测毒性值， $\mu\text{g/L}$ ；

$y_i$ —第  $i$  种物种的预测毒性值， $\mu\text{g/L}$ ；

$n$ —毒性数据数量。

### (3) K-S 检验 (Kolmogorov-Smirnov test)

基于累积分布函数，用于检验一个经验分布是否符合某种理论分布，它是一种拟合优度检验。通过 K-S 检验来验证分布与理论分布的差异时，若  $p$  值（即概率，反映两组差异有无统计学意义， $p > 0.05$  即差异无显著性意义， $p < 0.05$  即差异有显著性意义）大于 0.05，证明实际分布曲线与理论分布曲线不具有显著性差异，通过 K-S 检验，可反映模型符合理论分布。