

ICS 13.020.01

CCS Z00

T/SSSC

中国土壤学会团体标准

T/SSSC 009-2024

## 区域土壤环境承载力核算技术导则

Technical guidelines for calculating regional soil environmental carrying capacity

2024-12-24 发布

2024-12-25实施

中国土壤学会 发布

## 目 次

|   |                     |     |
|---|---------------------|-----|
| 前 | 言.....              | III |
| 1 | 范围.....             | 1   |
| 2 | 规范性引用文件.....        | 1   |
| 3 | 术语和定义.....          | 1   |
| 4 | 方法概要.....           | 2   |
| 5 | 核算区域土壤环境承载量.....    | 2   |
| 6 | 明确区域土壤污染物净输入通量..... | 4   |
| 7 | 核算区域土壤环境承载力.....    | 6   |

## 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。

本文件规定了区域土壤环境承载力核算的术语和定义、区域土壤环境承载量核算、区域土壤污染物净输入通量核算和区域土壤环境承载力核算。

本文件由中国土壤学会提出并归口。

本文件起草单位：中国科学院南京土壤研究所、中国科学院生态环境研究中心、南京大学、中国环境科学研究院。

本文件主要起草人：王玉军，瞿明凯，吴同亮，王美娥，仓龙，刘存，周东美，赵慈，王红梅，陈怀满。

# 区域土壤环境承载力核算技术导则

## 1 范围

本标准规定了区域土壤环境承载力核算的术语和定义、土壤环境承载力核算的术语和定义、区域土壤环境承载量核算、区域土壤污染物净输入通量核算和区域土壤环境承载力核算。

本标准适用于指导区域土壤环境承载力核算，为确定产业规划指标中生态环境管理提供参考依据。

本标准不适用于土壤放射性污染和致病性微生物污染的区域土壤环境承载力核算。

## 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 2762 食品安全国家标准食品中污染物限量

GB/T 14848 地下水质量标准

GB/T 21010 土地利用现状分类

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

HJ 610 环境影响评价技术导则 地下水环境

T/ACEF 087 建设用地土壤生态安全环境基准制定技术指南

T/CSER 013 基于农产品安全的农用地镉污染土壤修复标准制定技术指南

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 土壤环境承载量 soil environmental capacity (SEC)

一定环境单元和时限内，遵循环境质量标准，保证土壤质量安全且不发生次生污染时，土壤还能容纳的最大污染负载量。也称为土壤环境容量。

### 3.2 土壤污染物净输入通量 net input flux of soil pollutant

单位时间和面积内，土壤目标污染物的输入质量与输出质量之差。

### 3.3 人类活动排放系数 emission coefficient of human activity

单位规模的某人类活动在单位时间内向研究区排放的污染物质量。

### 3.4 土壤环境承载力 soil environmental carrying capacity (SECC)

一定环境单元和时限内，遵循环境质量标准，保证土壤质量安全且不发生次生污染时，土壤还能承受人类活动规模的年均限值。

#### 4 方法概要

区域土壤环境承载力核算工作程序如图 1 所示，工作内容包括核算区域土壤环境承载量、明确区域土壤污染物净输入通量和核算区域土壤环境承载力。

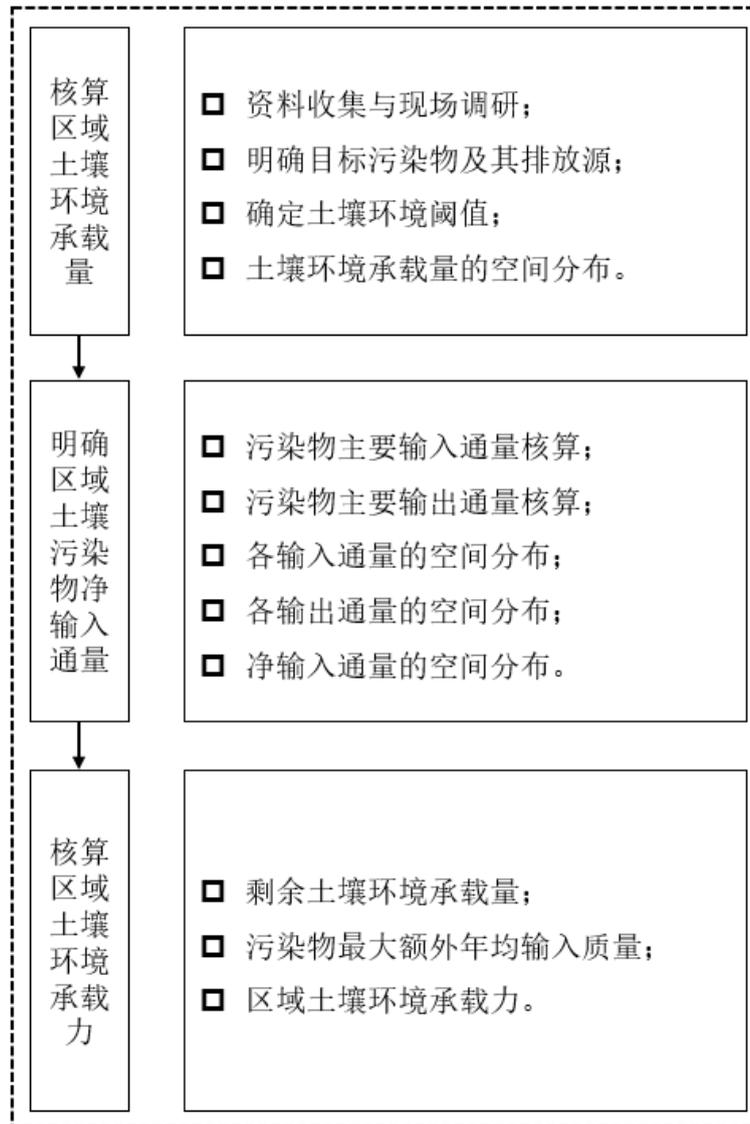


图 1 区域土壤环境承载力核算工作程序

#### 5 核算区域土壤环境承载量

##### 5.1 资料收集与现场调研

###### 5.1.1 收集污染物排放相关资料

参照《场地环境调查技术导则》HJ 25.1、《场地环境监测技术导则》HJ 25.2、《污染场地风险评估技术导则》HJ 25.3 和《环境影响评价技术导则地下水环境》HJ 610 等对目标区域进行的环境调查，收集

较为详尽的当地相关资料及历史信息，包括当地工农业生产类型、生产规模、污染物排放清单等信息，核实相关资料的完整性和有效性；重点核实工农业污染物排放相关信息能否反映目前土壤污染的实际情况。

### 5.1.2 核实目标区域特征信息

目标区域特征信息包括工农业产业位置、占地面积、空间分布、气候、水文、地形、地质特征、地表覆被情况、评价范围、周边交通状况、工农业产业生产历史、土地利用类型格局等，以及与潜在排放源有关的环境影响评价信息和数据等资料。

### 5.1.3 现场考察目标区域状况

考察目标区域当前状况，核实区域内前期工农业类型及土地利用方式的重大变化，以及不同土地利用类型及周边环境保护敏感目标的变化情况，为不同土地利用类型的精准评价提供基础信息。

## 5.2 明确目标污染物及其排放源

### 5.2.1 识别目标污染物

根据前期区域土壤环境调查和风险评估提出的土壤目标污染物，参照污染物排放清单等相关资料，分析土壤目标污染物与工农业产业类型的关联性。

### 5.2.2 确定目标污染物的主要输入和输出途径

根据目标污染物的污染排放清单与区域环境特征，确定目标污染物的主要输入和输出途径。

## 5.3 确定土壤环境阈值

### 5.3.1 确定目标受体

根据研究区域当前土地利用类型分布情况，确定对该土地利用类型中污染物的风险受体，选择人体健康、农产品、地下水、生态物种和过程等四类保护对象中的一类或多类，作为土壤环境承载力核算的目标受体。

### 5.3.2 计算土壤环境阈值

#### 1) 基于人体健康的土壤环境阈值

参照 HJ 25.3 规定的技术方法，分别计算基于人体致癌效应和非致癌效应的土壤环境阈值，选择较小值作为基于人体健康的土壤环境阈值。

#### 2) 基于农产品质量安全的土壤环境阈值

参照 T/CSER 013 规定的技术方法，建立土壤污染物含量与农产品污染物积累量之间的关系模型，利用 GB 2762 规定的农产品中污染物的限值计算出土壤中污染物的阈值浓度。

#### 3) 基于地下水安全的土壤环境阈值

参照 HJ 25.3（附录 E.3 和 F.4）规定的技术方法，依据土壤中污染物进入地下水的淋溶因子和 GB/T 14848 规定的地下水 III 类及以上水质等级中污染物的最大浓度限值，倒推计算出基于地下水安全的土壤环境阈值。

#### 4) 基于生态安全的土壤环境阈值

参照 T/ACEF 087 规定的技术方法，基于不同土地利用方式下的生态物种及生态过程的保护水平，确定物种危害浓度并以此建立基于生态安全的土壤环境阈值。

#### 5.4 土壤环境承载量的空间分布

##### 5.4.1 计算土壤某点位环境承载量

$$SEC(\mathbf{u}) = 0.1 \times d \times \rho(\mathbf{u}) \times [c(\mathbf{u}) - z(\mathbf{u})] \quad (1)$$

式中：

$SEC(\mathbf{u})$ 为 $\mathbf{u}$ 处目标污染物的土壤环境承载量， $\text{kg}/\text{hm}^2$ ；

0.1为转化系数，无量纲；

$d$ 为土壤环境容纳深度， $\text{cm}$ ；

$\rho(\mathbf{u})$ 为位置 $\mathbf{u}$ 处的土壤容重， $\text{g}/\text{cm}^3$ ；

$z(\mathbf{u})$ 为位置 $\mathbf{u}$ 处土壤中目标污染物的浓度， $\text{mg}/\text{kg}$ ；

$c(\mathbf{u})$ 为位置 $\mathbf{u}$ 处土壤中目标污染物的土壤环境阈值， $\text{mg}/\text{kg}$ 。

##### 5.4.2 计算区域土壤环境承载量

1) 结合资料、遥感信息和现场踏勘等，获取核算区土地利用类型图。

2) 结合资料收集，核算区土壤污染现状调查和特征参数调查，利用普通克里格模型预测目标土壤污染物浓度、土壤特征参数的空间分布。

3) 依据土壤特征参数空间分布图和土地利用类型图，在所设置规则栅格网下分别计算各保护目标受体所对应土壤环境阈值的空间分布。

4) 在所设置规则栅格网下，分别计算各保护目标受体所对应的土壤环境承载量，并在每个栅格上选取其最小值作为多保护目标所对应的土壤环境承载量。

5) 针对核算区 $S$ 的区域土壤环境承载量 $I$  ( $\text{kg}$ )：

$$I = \iint_S SEC(\mathbf{u}) dS = \iint_S \{0.1 \times d \times \rho(\mathbf{u}) \times [c(\mathbf{u}) - z(\mathbf{u})]\} dS \quad (2)$$

式中： $SEC(\mathbf{u})$ 、 $d$ 、 $\rho(\mathbf{u})$ 、 $z(\mathbf{u})$ 和 $c(\mathbf{u})$ 的参数含义见公式(1)。

## 6 明确区域土壤污染物净输入通量

### 6.1 污染物主要输入通量核算

土壤污染物的输入受多个因素的影响，例如污染物的源排放特征、气象因子、地形因子、目标污染物特性、土壤特性等。不同的土壤环境承载力核算案例中，主要的污染物输入途径往往不尽相同，如下仅列举常见的几种输入通量核算方法。

#### 6.1.1 大气沉降

大气沉降通常是土壤污染物的最主要输入途径之一。AERMOD模型可以用于对大气沉降产生的土壤污染物年均输入通量进行空间模拟。该模型以传统的大气扩散统计理论为基础，目前已被广泛应用于大气污染物扩散方面的研究。同时，该模型具有小规模污染扩散模拟的特点，适用于农村、城市以及其他复杂

地形,包含气象数据预处理模块(AERMET)、地形数据预处理模块(AERMAP)和大气扩散模块(AERMOD)。污染物在大气中的扩散沉降模拟主要包括数据采集、处理和输入, AERSCREEN筛选气象参数设置, AERMOD预测气象参数输入, 以及AERMOD预报点浓度设置和结果输出图。EIAPro2018软件可被用于AERMOD模型的实现。

### 6.1.2 化肥和农药施用

化肥和农药施用是农业生产过程中至关重要的一个环节,但化肥和农药中通常含有一定量的污染物(如重金属等)。通过化肥(或农药)施用途径产生的污染物年均输入通量的计算公式如下:

$$F_i(\mathbf{u}) = \sum_j [N_j(\mathbf{u}) \times C_{ij}] \quad (3)$$

式中:

$F_i(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处化肥(或农药)施用产生的土壤污染物  $i$  的年均输入通量,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;

$N_j(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处化肥(或农药)  $j$  的年均施用通量,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;

$C_{ij}$ 为所施用化肥(或农药)  $j$  中污染物  $i$  的浓度,  $\text{kg}/\text{kg}$ 。

### 6.1.3 灌溉水

灌溉水中可能含有一定量的污染物,其产生的污染物年均输入通量的计算公式如下:

$$R_i(\mathbf{u}) = W(\mathbf{u}) \times C_i \quad (4)$$

式中:

$R_i(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处灌溉水产生的土壤污染物  $i$  的年均输入通量,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;

$W(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处灌溉水的年均输入通量,  $\text{L}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;

$C_i$ 为灌溉水中污染物  $i$  的浓度,  $\text{kg}/\text{L}$ 。

## 6.2 污染物主要输出通量核算

如下仅列举常见的几种输出通量核算方法。

### 6.2.1 农作物移除

农作物的移除可能会带走一部分土壤污染物,其产生的污染物输出通量计算公式如下:

$$A_i(\mathbf{u}) = \sum_j [W_j(\mathbf{u}) \times C_{ij}(\mathbf{u})] + \sum_j [W_j(\mathbf{u}) \times K_j(\mathbf{u}) \times f_j(\mathbf{u}) \times C_{ji}(\mathbf{u}) \times \delta_{ij}(\mathbf{u})] \quad (5)$$

式中:

$A_i(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处农作物移除产生的土壤污染物  $i$  的年均输出通量,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;

$W_j(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处作物  $j$  的籽粒年均产出通量,  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ;

$C_{ij}(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处作物  $j$  的籽粒中污染物  $i$  的浓度,  $\text{kg}/\text{kg}$ ;

$K_j(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处农作物  $j$  的草谷比,即农作物秸秆量与农作物产量之比;

$f_j(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处农作物  $j$  的秸秆移除率;

$\delta_{ij}(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处污染物  $i$  在农作物  $j$  中的转移系数。

### 6.2.2 地表径流

地表径流可能会带走一部分土壤污染物，其产生的污染物输出通量计算公式如下：

$$Z_i(\mathbf{u}) = \sum_j [C_i \times M_j(\mathbf{u}) \times (1 - \alpha)] \quad (6)$$

式中：

$Z_i(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处地表径流产生的土壤污染物  $i$  的年均输出通量， $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ；

$C_i$ 是径流中污染物  $i$  的浓度， $\text{kg}/\text{L}$ ；

$M_j(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处作物  $j$  的灌溉水年均输入通量， $\text{L}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ；

$\alpha$  为研究区的农业耗水率。

### 6.3 各输入和输出通量的空间分布

(1) 确定区域内目标污染物的主要输入和输出途径，土壤污染物的主要输入途径与核算区域的地理位置和污染物特性密切相关。例如工农业交错区农用地重金属的潜在输入途径有大气沉降、农药化肥施用和污水灌溉等，潜在输出途径有植物吸收、降解、淋溶和挥发等；

(2) 利用 GIS 结合相关辅助信息（例如：土地利用类型、地形和风向），分别预测目标污染物在核算调查期时各输入和输出途径产生的输入和输出通量的空间分布；

(3) 将各输入途径产生的输入通量和输出通量分别进行空间加和，得到目标污染物在核算调查期时的总输入和总输出通量的空间分布。

### 6.4 净输入通量的空间分布

土壤污染物净输入通量的计算公式如下：

$$\varphi_{net}(\mathbf{u}) = \sum_i \varphi_{input}^i(\mathbf{u}) - \sum_j \varphi_{output}^j(\mathbf{u}) \quad (7)$$

式中：

$\varphi_{net}(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处目标污染物在核算调查期时的净输入通量， $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ；

$\varphi_{input}^i(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处第  $i$  个输入途径产生的目标污染物在核算调查期时的净输入通量， $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ；

$\varphi_{output}^j(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处第  $j$  个输出途径产生的目标污染物在核算调查期时的净输出通量， $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。

## 7 核算区域土壤环境承载力

### 7.1 剩余土壤环境承载量

$$SEC_m(\mathbf{u}) = SEC(\mathbf{u}) - m\varphi_{net}(\mathbf{u}) \quad (8)$$

式中：

$SEC_m(\mathbf{u})$ 为目标污染物的输入/输出状况维持不变的情景下，未来  $m$  年后位置  $\mathbf{u}$  处目标污染物的剩余环境承载量， $\text{kg}/\text{hm}^2$ ；

$SEC(\mathbf{u})$ 为位置  $\mathbf{u}$  处目标污染物的初始土壤环境承载量， $\text{kg}/\text{hm}^2$ ；

$\varphi_{net}(\mathbf{u})$ 的参数含义见公式 (7)。

## 7.2 污染物最大额外年均输入质量

$$I = \frac{\iint_S SEC_m(\mathbf{u}) dS}{m} = \frac{\iint_S \{0.1 \times d \times \rho(\mathbf{u}) \times [c(\mathbf{u}) - z(\mathbf{u})] - m [\sum_i \varphi_{input}^i(\mathbf{u}) - \sum_j \varphi_{output}^j(\mathbf{u})]\} dS}{m} \quad (9)$$

式中：

$I$ 为研究区域 $S$  ( $\text{hm}^2$ ) 内目标污染物最高额外年均输入质量， $\text{kg}$ ；

$SEC_m(\mathbf{u})$ 的参数含义见公式(9)， $d$ 、 $\rho(\mathbf{u})$ 、 $z(\mathbf{u})$ 和 $c(\mathbf{u})$ 的参数含义见公式(1)， $\varphi_{input}^i(\mathbf{u})$ 和 $\varphi_{output}^j(\mathbf{u})$ 的参数含义见公式(7)。

## 7.3 区域土壤环境承载力

$$SECC_m = \frac{I}{f} = \frac{\iint_S \{0.1 \times d \times \rho(\mathbf{u}) \times [c(\mathbf{u}) - z(\mathbf{u})] - m [\sum_i \varphi_{input}^i(\mathbf{u}) - \sum_j \varphi_{output}^j(\mathbf{u})]\} dS}{m \times f} \quad (10)$$

式中：

$SECC_m$ 为确保未来 $m$ 年研究区域 $S$ 内的土壤遵循环境质量标准，保证土壤质量安全且不发生次生污染时，土壤单元还能承受人类活动规模的年均限值（即区域土壤环境承载力）；

$f$ 为人类活动排放系数，即单位规模的某人类活动每年内向研究区排放的污染物质量， $\text{kg}$ ；

$I$ 的参数含义见公式(9)， $d$ 、 $\rho(\mathbf{u})$ 、 $z(\mathbf{u})$ 和 $c(\mathbf{u})$ 的参数含义见公式(1)， $\varphi_{input}^i(\mathbf{u})$ 和 $\varphi_{output}^j(\mathbf{u})$ 的参数含义见公式(7)。