

大冶市土壤污染防治先行区  
农用地污染土壤钝化修复技术指南  
(试行)

大冶市人民政府

二〇一九年六月

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 前言.....                      | 1  |
| 1 适用范围.....                  | 1  |
| 2 规范性引用文件 .....              | 1  |
| 3 术语和定义.....                 | 4  |
| 4 一般要求.....                  | 5  |
| 5 钝化剂的施用 .....               | 8  |
| 6 监测要求.....                  | 10 |
| 附录 A（资料性附录）常见的钝化剂和适用范围 ..... | 17 |

## 前 言

为贯彻落实《中华人民共和国土壤污染防治法》《土壤污染防治行动计划》和《农用地土壤环境管理办法（试行）》，指导和规范大冶市土壤污染综合防治先行区农用地污染土壤钝化修复工作，制定本指南。

本指南按照 GB/T 1.1-2009 给出的规则起草。

本指南由大冶市土壤污染综合防治工作领导小组办公室提出。

本指南由大冶市环境保护局归口。

本指南由大冶市人民政府组织实施。

本指南主要起草单位：中国环境科学研究院。

本指南主要起草人：杜平、秦晓鹏、陈娟、任杰、杨兵、罗会龙、谷庆宝、李发生。

## 1 适用范围

本指南规定了大冶市土壤污染综合防治先行区农用地污染土壤钝化修复的技术要求，适用于镉、铅、砷、铜和汞等重金属污染农用地土壤的修复。

钝化修复技术一般适用于安全利用类农用地土壤，也可与其他技术联合使用。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是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 15618 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准

GB/T 17136 土壤质量 总汞的测定 冷原子吸收分光光度法

GB/T 17138 土壤质量 铜、锌的测定 火焰原子吸收分光光度法

GB/T 17139 土壤质量 镍的测定 火焰原子吸收分光光度法

GB/T 17141 土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法

GB 18877 有机-无机复混肥料

GB 19641 食品安全国家标准 食用植物油料

GT/T 21010 土地利用现状分类

GB/T 22105.1 土壤质量 总汞、总铅、总砷的测定 原子荧光法  
第 1 部分：土壤中总汞的测定

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

GB/T 22105.3 土壤质量 总汞、总铅、总砷的测定 原子荧光法  
第 3 部分：土壤中总铅的测定

GB 2715 食品安全国家标准 粮食

GB 2762 食品安全国家标准 食品中污染物限量

GB 4284 农用污泥污染物控制标准

GB 5009.11 食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定

GB 5009.12 食品安全国家标准 食品中铅的测定

GB 5009.15 食品安全国家标准 食品中镉的测定

GB 5009.17 食品安全国家标准 食品中总汞及有机汞的测定

GB 5009.123 食品安全国家标准 食品中铬的测定

GB 5009.268 食品安全国家标准 食品中多元素的测定

GB 5084 农田灌溉水质标准

GB/T 6679 固体化工产品采样通则

GB/T 6680 液体化工产品采样通则

GB 8173 农用粉煤灰中污染物控制标准

HJ/T 166 土壤环境监测技术规范

HJ 664 环境空气质量监测点位布设技术规范（试行）

HJ 491 土壤 总铬的测定 火焰原子吸收分光光度法

HJ 680 土壤和沉积物 汞、砷、硒、铋和锑的测定 微波消解/  
原子荧光

HJ 780 土壤和沉积物 无机元素的测定 波长色散 X 射线荧光  
光谱法

HJ 803 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定 王水提取-电感耦  
合等离子体质谱法

HJ 804 土壤 8 种有效态元素的测定 二乙烯三胺五乙酸浸提-  
电感耦合等离子体发射光谱法

HJ 923 土壤和沉积物 总汞的测定 催化热解-冷原子吸收分光  
光度法

NY/T 1104 土壤中全硒的测定

NY/T 1377 土壤 pH 的测定

NY/T 395 农田土壤环境监测技术规范

NY/T 396 农用水源环境监测技术规范

NY/T 398 农、畜、水产品污染监测技术规范

NY 525 有机肥料

NY 884 生物有机肥

NY 1110 水溶肥料 汞、砷、镉、铅、铬的限量要求

NY/T 395 农田土壤环境监测技术规范

DB31/T 661 绿化用表土保护和再利用技术规范

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1 土壤 soil

指位于陆地表层能够生长植物的疏松多孔物质层及其相关自然地理要素的综合体。

#### 3.2 农用地 agricultural land

指 GT/T 21010 中的 01 耕地（011 水田、012 水浇地、013 旱地）、02 园地（021 果园、022 茶园）和 04 草地（041 天然牧草地、042 人工牧草地）。

#### 3.3 农产品 agricultural products

指农业生产过程中的产品，主要包括小麦、水稻、玉米、花生、高粱和蔬菜等。

### 3.4 土壤钝化剂 soil amendment

指能够降低土壤中污染物生物有效性的天然的或人工合成的材料。

### 3.5 目标污染物 target contaminant

指由农用地土壤调查和评价确定的需要修复的污染物。

### 3.6 修复单元 area of remediation

指拟修复的具有相同目标污染物的无物理隔离的农用地单元。

### 3.7 修复目标值 remediation target value

农用地经修复后，土壤和农产品中目标污染物应当达到的规定限值。

### 3.8 最大累计施加量 Maximum accumulation amount

指修复单元内农用地土壤中所允许施加某种钝化剂的最大累积量。

## 4 一般要求

### 4.1 污染源风险管控

开展农用地周边污染源的调查工作，主要包括污染源名称、污染源位置、污染源类型、排放的污染物种类和排放量等参数。结合上述资料，进行农用地污染源解析，评估周边各污染源对农用地土壤和农产品的影响。其中对农用地质量影响较大的企业，增加调查频率，同

时将调查结果反馈给业主单位，采用相应风险管控措施，确保不对农用地继续造成污染。

## 4.2 化肥、有机肥、灌溉水和大气沉降物调查

化肥和有机肥样品的采集、检测和评价执行 GB/T 6679、GB/T 6680、GB 18877、NY 525、NY 884、NY 1110 等相关技术规定要求。如果化肥和有机肥中上述污染物的含量满足上述要求，可进行施用；否则不得施用。

灌溉水样品的采集、检测和评价执行 NY/T 396、GB 5084 等相关技术规定要求。如果灌溉水中重金属污染物的含量满足上述要求，可进行使用；否则必须更换灌溉水或者对其进行处理确保达标后方可使用。

大气沉降物样品的采集执行 HJ 664 等相关技术规定要求。每年采集四次。检测指标包括镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍、锌和沉降量等。评估大气沉降对该区域农产品中重金属累积的贡献。如果大气沉降贡献较大，向当地主管部门反馈调查结果，采用相应安全利用措施，确保不对农产品造成污染。

## 4.3 钝化剂中污染物含量限值

钝化剂的施用不得对农用地土壤造成二次污染。粉煤灰中镉、砷、钼、硒、镍、铬、铜、铅含量、全盐量和 pH 必须满足 GB 8173 中规定的限值；污泥中镉、汞、砷、铅、铬、铜、镍和锌等污染物含量必须满足 GB 4284 中规定的含量限值。

其他钝化剂中重金属污染物的含量限值如表 1 所示。

表 1 钝化剂中污染物含量限值 (mg/kg)

| 项目 | 镉(Cd) | 汞(Hg) | 砷(As) | 铅(Pb) | 铬(Cr) | 铜(Cu) | 镍(Ni) | 锌(Zn) |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 限值 | 1.0   | 2.0   | 10    | 30    | 50    | 100   | 100   | 200   |

#### 4.4 最大累计施加量

钝化剂的累计施加量不得超过该修复单元内的最大累计施加量 ( $\eta$ ), 计算公式如下:

$$\eta_i = \frac{C_{\max,i} - C_{0,i}}{C_{sa,i} - C_{\max,i}} \quad (1)$$

$$\eta = \min(\eta_i) \quad (2)$$

式中,  $\eta_i$  为根据污染物  $i$  推算的钝化剂的最大累计施加量 (质量比);  $C_{\max,i}$  为土壤中污染物  $i$  的管制值 (mg/kg), 其中, 镉: 1.5 mg/kg, 汞: 2.0 mg/kg, 砷: 100 mg/kg, 铅: 400 mg/kg, 铬: 800 mg/kg;  $C_{0,i}$  为施加前修复单元内土壤中污染物  $i$  含量顺序统计量 ( $n > 7$ ) 的 90% 值 (mg/kg);  $C_{sa,i}$  为钝化剂中污染物  $i$  的含量 (mg/kg);  $\eta$  为该钝化剂的最大累计施加量 (质量比)。

注: 当  $C_{sa,i} > C_{\max}$  时进行计算; 否则不予统计污染物  $i$ 。

选择的钝化剂能够高效降低土壤中目标污染物的有效态含量, 减少农作物对污染物的吸收, 从而降低农产品中目标污染物的超标风险。

钝化剂施用后在较长时间 (例如三年) 内修复效率不出现明显降低或农产品超标的现象。

#### 4.5 钝化剂施加记录表

在施加钝化剂前，必须填写《土壤钝化剂施加记录表》（附录 A），记录该农用地的经纬度、地址、土地面积、施加时间、施加量、污泥中污染物含量等信息，并由土地使用权人、施工单位和监理单位签字确认。该记录表由当地农业部门和生态环境部门进行保管。

#### 4.6 钝化剂施用区域

不得在地表水附近或地下水埋深较浅的农用地土壤中施加钝化剂。

### 5 钝化剂的施用

#### 5.1 钝化剂筛选

根据前期对土壤和农产品的调查结果，主要针对污染物的种类和含量，结合项目区土壤性质（例如 pH、阳离子交换量、有机质含量），有针对性地选择多种或复配钝化剂。常见的农用地土壤钝化剂的种类和适用范围见附录 B。

#### 5.2 运输和储存

在钝化剂的运输过程中，需进行苫盖，避免出现钝化剂的撒漏和雨水对钝化剂质量的影响。

在农用地土壤修复前，需提前购买或制备不低于总施加量的钝化剂，并在项目区附近租赁或建造仓库，用于钝化剂的暂时存放，做好防水措施，并在仓库内备灭火器等消防器材。

钝化剂在运输、保存和施用过程中不得对周边环境和人体健康产

生危害。

### 5.3 田间小试

为确定项目区土壤中钝化剂的准确施用量，需进行田间小试。建议对于每种钝化剂，在项目区选择污染物分布水平、土壤性质相近的区域，设置 18 个小区，每个小区的面积约为  $50 \text{ m}^2$ （即  $0.005 \text{ hm}^2$ ），每 3 个小区为一组，一共 6 组，其中一组（CK-1、CK-2、CK-3）为控制组，其他 5 组均为实验组。每组钝化剂的施用量如表 2 所示。

表 2 田间小试设计

| 处理                                                    | 钝化剂建议<br>施用量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) | 备注               |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------------|
| CK-1、CK-2、CK-3                                        | 0                                        | 控制组，用于评价钝化效果     |
| 1 <sup>#</sup> -1、1 <sup>#</sup> -2、1 <sup>#</sup> -3 | 5625                                     | 钝化剂与土壤质量比为 0.25% |
| 2 <sup>#</sup> -1、2 <sup>#</sup> -2、2 <sup>#</sup> -3 | 11250                                    | 钝化剂与土壤质量比为 0.5%  |
| 3 <sup>#</sup> -1、3 <sup>#</sup> -2、3 <sup>#</sup> -3 | 22500                                    | 钝化剂与土壤质量比为 1.0%  |
| 4 <sup>#</sup> -1、4 <sup>#</sup> -2、4 <sup>#</sup> -3 | 33750                                    | 钝化剂与土壤质量比为 1.5%  |
| 5 <sup>#</sup> -1、5 <sup>#</sup> -2、5 <sup>#</sup> -3 | 45000                                    | 钝化剂与土壤质量比为 2.0%  |

注：本规范中钝化剂的施用量范围为经验数据，具体工程中根据实际选择的钝化剂种类，可进行适当调整，为了避免钝化剂对土壤环境质量造成不良影响，建议钝化剂的施用量不超过 5.0%。

在各个小区按照上述投加量施加钝化剂和养护后，种植当地常见种类和品种的农作物，在农作物成熟季节，协同采集土壤样品和农产品样品，其中每个小区各采集 3 个，测定样品中目标污染物的含量，综合考虑每组 3 个小区的检测数据。以修复目标值为标准，在农产品中污染物含量满足 GB 2762、GB 2715 和 GB 19641 中规定的含量限

值的前提下，根据钝化剂施加量与钝化效果之间的定量关系，计算出能够满足修复目标值的钝化剂理论施加量，乘以安全系数 1.2，最终得到项目区钝化剂的实际施加量。

## 5.4 现场施加

在农作物种植前，开展钝化修复工程，具体流程如下所示。

(1) 对项目区表层土壤（0-20 cm）进行旋耕，并弃掉大石块、树枝等杂物；

(2) 用施肥机向土壤中加入钝化剂，避免在雨雪天操作，施加过程中操作人员需配备防护措施；

(3) 对项目区表层土壤（0-20 cm）进行旋耕，并养护至少 2 个月。

钝化剂施加和养护完成后，可开展农作物的种植工作，具体操作与当地原种植习惯保持一致。

## 6 监测要求

### 6.1 样品采集

钝化剂样品的采集执行 GB/T 6679 和 GB/T 6680 等相关技术规定要求。

每年在农作物成熟季节，采集一次土壤样品，测定样品中目标污染物的含量，其中土壤样品的采样数量如表 3 所示。采样点的布设参考 HJ/T 166 和 NY/T 395 等关于农用地土壤调查方面的管理文件，同时也综合考虑了监测过程中产生的费用和修复效果的准确评估。

表 3 土壤样品布点数量

| 修复单元面积 $x$ ( $\text{hm}^2$ )                | 布点数量 (个)                                 |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|
| 小于或等于 1.0 (即 $x \leq 15$ 亩)                 | 5                                        |
| 大于 1.0 且小于或等于 2.8 (即 $15 < x \leq 42$ 亩)    | 6                                        |
| 大于 2.8 且小于或等于 4.6 (即 $42 < x \leq 69$ 亩)    | 7                                        |
| 大于 4.6 且小于或等于 6.4 (即 $69 < x \leq 96$ 亩)    | 8                                        |
| 大于 6.4 且小于或等于 8.2 (即 $96 < x \leq 123$ 亩)   | 9                                        |
| 大于 8.2 且小于或等于 10.0 (即 $123 < x \leq 150$ 亩) | 10                                       |
| 大于 10.0 (即 $x > 150$ 亩)                     | 布点密度: 1 个/ $\text{hm}^2$<br>(即 1 个/15 亩) |

注：对于零星分布的农用地，每块地的采样数量不得低于 1 个。

农产品样品的采集执行 NY/T 398 等相关技术规定要求。同时统计农产品产量。

## 6.2 污染物分析

钝化剂中污染物总量分析方法按表 4 执行。

表 4 钝化剂中污染物总量分析方法

| 序号 | 污染物项目 | 分析方法                                | 标准编号         |
|----|-------|-------------------------------------|--------------|
| 1  | 镉     | 土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法              | GB/T 17141   |
| 2  | 汞     | 土壤质量总汞的测定冷原子吸收分光光度法                 | GB/T 17136   |
|    |       | 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法第 1 部分：土壤中总汞的测定 | GB/T 22105.1 |
|    |       | 土壤和沉积物汞、砷、硒、铋和锑的测定微波消解/原子荧光法        | HJ 680       |
|    |       | 土壤和沉积物总汞的测定催化热解-冷原子吸收分光光度法          | HJ 923       |
| 3  | 砷     | 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 | GB/T 22105.2 |
|    |       | 土壤和沉积物汞、砷、硒、铋和锑的测定微波消解/原子荧光法        | HJ 680       |
|    |       | 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定王水提取-电感耦合等离子体质谱法  | HJ 803       |
| 4  | 铅     | 土壤质量铅、镉的测定石墨炉原子吸收分光光度法              | GB/T 17141   |
|    |       | 土壤质量总汞、总砷、总铅的测定原子荧光法第 3 部分：土壤中总铅的测定 | GB/T 22105.3 |
|    |       | 土壤和沉积物无机元素的测定波长色散 X 射线荧光光谱法         | HJ 780       |
| 5  | 铬     | 土壤总铬的测定火焰原子吸收分光光度法                  | HJ 491       |
|    |       | 土壤和沉积物无机元素的测定波长色散 X 射线荧光光谱法         | HJ 780       |
| 6  | 铜     | 土壤质量铜、锌的测定火焰原子吸收分光                  | GB/T 17138   |

| 序号 | 污染物项目 | 分析方法                               | 标准编号       |
|----|-------|------------------------------------|------------|
|    |       | 光度法                                |            |
|    |       | 土壤和沉积物无机元素的测定波长色散 X 射线荧光光谱法        | HJ 780     |
| 7  | 镍     | 土壤质量镍的测定火焰原子吸收分光光度法                | GB/T 17139 |
|    |       | 土壤和沉积物无机元素的测定波长色散 X 射线荧光光谱法        | HJ 780     |
| 8  | 锌     | 土壤质量铜、锌的测定火焰原子吸收分光光度法              | GB/T 17138 |
|    |       | 土壤和沉积物无机元素的测定波长色散 X 射线荧光光谱法        | HJ 780     |
| 9  | 钼     | 土壤和沉积物 12 种金属元素的测定王水提取-电感耦合等离子体质谱法 | HJ 803     |
| 10 | 硒     | 土壤中全硒的测定                           | NY/T 1104  |
| 11 | pH    | 土壤 pH 的测定                          | NY/T 1377  |

土壤中污染物有效态含量分析方法按表 5 执行。

表 5 土壤中污染物有效态含量分析方法

| 序号 | 污染物项目 | 分析方法                                   | 标准编号       |
|----|-------|----------------------------------------|------------|
| 1  | 镉     | 土壤 8 种有效态元素的测定二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法 | HJ 804     |
| 2  | 汞     | 绿化用表土保护和再利用技术规范                        | DB31/T 661 |
| 3  | 砷     | 绿化用表土保护和再利用技术规范                        | DB31/T 661 |
| 4  | 铅     | 土壤 8 种有效态元素的测定二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法 | HJ 804     |
| 5  | 铬     | 绿化用表土保护和再利用技术规范                        | DB31/T 661 |
| 6  | 铜     | 土壤 8 种有效态元素的测定二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法 | HJ 804     |
| 7  | 镍     | 土壤 8 种有效态元素的测定二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法 | HJ 804     |
| 8  | 锌     | 土壤 8 种有效态元素的测定二乙烯三胺五乙酸浸提-电感耦合等离子体发射光谱法 | HJ 804     |

农产品中污染物总量分析方法按表 6 执行。

表 6 农产品中污染物总量分析方法

| 序号 | 污染物项目 | 分析方法                 | 标准编号        |
|----|-------|----------------------|-------------|
| 1  | 镉     | 食品安全国家标准食品中镉的测定      | GB 5009.15  |
|    |       | 食品安全国家标准食品中多元素的测定    | GB5009.268  |
| 2  | 汞     | 食品安全国家标准食品中总汞及有机汞的测定 | GB 5009.17  |
|    |       | 食品安全国家标准食品中多元素的测定    | GB5009.268  |
| 3  | 砷     | 食品安全国家标准食品中总砷及无机砷的测定 | GB 5009.11  |
|    |       | 食品安全国家标准食品中多元素的测定    | GB5009.268  |
| 4  | 铅     | 食品安全国家标准食品中铅的测定      | GB 5009.12  |
|    |       | 食品安全国家标准食品中多元素的测定    | GB5009.268  |
| 5  | 铬     | 食品安全国家标准食品中铬的测定      | GB 5009.123 |
|    |       | 食品安全国家标准食品中多元素的测定    | GB5009.268  |

## 附录 A（资料性附录）钝化剂施加记录表

表 A1 土壤钝化剂施加记录表

|                  |                                                         |           |      |
|------------------|---------------------------------------------------------|-----------|------|
| 一、农用地基本情况        |                                                         |           |      |
| 土地使用权人           |                                                         | 联系方式      |      |
| 土地类型             | <input type="checkbox"/> 水田 <input type="checkbox"/> 旱地 | 面积（亩）     |      |
| 经度               |                                                         | 纬度        |      |
| 地址               | 省                                                       | 县（市）      | 乡（镇） |
|                  | 村                                                       |           |      |
| 二、钝化剂基本情况        |                                                         |           |      |
| 名称               |                                                         | 施加量（kg/亩） |      |
| 施加时间             |                                                         | 生产厂家      |      |
| 钝化剂中污染物含量（mg/kg） |                                                         |           |      |
| 镉（Cd）            |                                                         | 汞（Hg）     |      |
| 砷（As）            |                                                         | 铅（Pb）     |      |
| 铬（Cr）            |                                                         | 铜（Cu）     |      |
| 镍（Ni）            |                                                         | 锌（Zn）     |      |
| 三、确认信息           |                                                         |           |      |
|                  | 姓名或名称                                                   |           | 签字   |
| 土地使用权人           |                                                         |           |      |
| 施工单位             |                                                         |           |      |
| 监理单位             |                                                         |           |      |
| 记录时间             | 年月日                                                     |           |      |

## 附录 B（资料性附录）常见的钝化剂和适用范围

表 B1 农用地土壤钝化剂名录

| 钝化剂    | 有效成分                                                                                 | 目标污染物                 | 钝化机理               | 备注                          |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------|
| 1 含钙材料 |                                                                                      |                       |                    |                             |
| 石灰     | CaO                                                                                  | Cd、Cu、Pb、As、Zn、P 等    | 沉淀作用；离子交换作用；表面络合作用 | 过量使用会导致土壤 pH 过高；长期施用会导致土壤板结 |
| 熟石灰    | Ca(OH) <sub>2</sub>                                                                  |                       |                    |                             |
| 石灰石    | CaCO <sub>3</sub>                                                                    |                       |                    |                             |
| 石膏     | CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O                                                 |                       |                    | 可能含有污染物                     |
| 磷酸钙    | Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>                                      |                       |                    | 过量使用会造成面源污染                 |
| 磷石膏    | CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O、SiO <sub>2</sub> 、P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |                       |                    | 可能含有放射性元素                   |
| 2 含铁材料 |                                                                                      |                       |                    |                             |
| 铁氧化物   | FeO、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                                   | Cd、Pb、As、Cu、Cr、Zn、P 等 | 离子交换作用；表面络合作用；沉淀作用 |                             |
| 硫酸铁盐   | FeSO <sub>4</sub> 、Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                   |                       |                    | 降低土壤 pH；导致盐度升高              |
| 含氯铁盐   | FeCl <sub>2</sub> 、FeCl <sub>3</sub>                                                 |                       |                    | 降低土壤 pH；导致盐度升高              |
| 水铁矿    | 5Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·9H <sub>2</sub> O                                   |                       |                    |                             |

| 钝化剂     | 有效成分                                                                                   | 目标污染物           | 钝化机理               | 备注            |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------|---------------|
| 针铁矿     | $\alpha\text{-FeOOH}$                                                                  |                 |                    |               |
| 褐铁矿     | $\text{FeO(OH)} \cdot n\text{H}_2\text{O}$                                             |                 |                    |               |
| 3 含铝材料  |                                                                                        |                 |                    |               |
| 硫酸铝     | $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$                                | Pb、As、Cu、Zn、P 等 | 离子交换作用；表面络合作用；沉淀作用 | 铝含量过高会对植物产生毒害 |
| 铝酸钠     | $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$                                                     |                 |                    |               |
| 氯化铝     | $\text{AlCl}_3$                                                                        |                 |                    |               |
| 硝酸铝     | $\text{Al(NO}_3)_3$                                                                    |                 |                    |               |
| 含铝水处理废渣 | 复杂混合物                                                                                  |                 |                    |               |
| 4 含磷材料  |                                                                                        |                 |                    |               |
| 磷矿石     | $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$                                                           | Pb、Cu、Zn 等      | 离子交换作用；沉淀作用        |               |
| 磷酸氢铵    | $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$                                                          |                 |                    | 过量使用会造成面源污染   |
| 羟基磷灰石   | $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$                                           |                 |                    |               |
| 氟磷灰石    | $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$                                                   |                 |                    |               |
| 磷酸盐     | $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{Na}_3\text{PO}_4$ |                 |                    | 过量使用会造成面源污染   |
| 骨炭      | $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$                                                           |                 |                    |               |
| 5 粘土矿物等 |                                                                                        |                 |                    |               |

| 钝化剂    | 有效成分                                                                                  | 目标污染物            | 钝化机理                    | 备注               |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------|------------------|
| 坡缕石    | 无确定的化学式                                                                               | Pb、As、Cu、Zn 等    | 表面络合作用                  |                  |
| 海泡石    | 无确定的化学式                                                                               |                  |                         |                  |
| 蒙脱石    | 无确定的化学式                                                                               |                  |                         |                  |
| 膨润土    | 无确定的化学式                                                                               |                  |                         |                  |
| 沸石     | 无确定的化学式                                                                               |                  |                         |                  |
| 凹凸棒石   | 无确定的化学式                                                                               |                  |                         |                  |
| 硅藻土    | 无确定的化学式                                                                               |                  |                         |                  |
| 6 其他材料 |                                                                                       |                  |                         |                  |
| 赤泥     | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、SiO <sub>2</sub> 、CaO | Cd、Pb、Cu、Zn 等    |                         | 导致土壤盐度升高         |
| 生物炭    | 高比表面积炭颗粒                                                                              | Cd、Pb、Cu、Cr 等    | 吸附作用                    |                  |
| 生物固体   | 腐殖质                                                                                   | Cd、Pb、Cu、Zn 等    | 腐殖质与土壤中的重金属等污染物形成难溶的络合物 | 有异味；养分含量过高；含水率过高 |
| 飞灰     | 莫来石、石英、方解石、钙长石、赤铁矿等                                                                   | Cd、Pb、Cu、Cr、Zn 等 | 吸附作用                    |                  |
| 粉煤灰    | SiO <sub>2</sub> 、Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 、Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>      | Cd、Pb、Cu、Cr、Zn   | 吸附作用                    | 可能含有污染物          |

| 钝化剂 | 有效成分                             | 目标污染物         | 钝化机理                    | 备注 |
|-----|----------------------------------|---------------|-------------------------|----|
|     |                                  | 等             |                         |    |
| 硅肥  | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> | Cd、Pb、Zn 等    | 缓解重金属等污染物对植物生理代谢的毒害     |    |
| 有机肥 | 腐殖质                              | Cd、Pb、Cu、Zn 等 | 腐殖质与土壤中的重金属等污染物形成难溶的络合物 |    |