重金属污染农田土壤修复效果评价指标体系分析

王 涛，李惠民，史晓燕 [[1]](#footnote-2) [[2]](#footnote-3)

（江西省环境保护科学研究院，江西 南昌 **330077）**

摘 要：重金属污染农田土壤经修复后，是否达到了预期的目标，是否可以复垦为农田，生产的农作物是否达到了安全水 平，这些问题均需要通过对修复后的效果进行评价来给出明确的答复。然而，目前，有关重金属污染农田土壤修复效果评价 指标体系方面的研究还很少。从污染农田土壤修复效果评价的实际需求出发，本着全面性、客观性、易测性、可评性的原则， 提出了一套推荐评价指标体系，并给出了各指标的分析方法及评价标准，以期为重金属污染农田土壤修复效果评价体系的 建立及土壤修复标准的制定等提供参考依据。

关 键 词：重金属；土壤修复；土壤质量

中图分类号：53 文献标识码：A 文章编号：0564-39452016）03-0725-05

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2016.03.33

王 涛,李惠民，史晓燕.重金属污染农田土壤修复效果评价指标体系分析J]. 土壤通报,2016,473):725-729

WANG Tao, LI Hui-min, SHI Xiao-yan.Analysis on Evaluation System of Remediation Effectiveness in Farmland Soil Contaminated by Heavy Metals [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(3): 725-729

土壤重金属污染已成为阻碍中国农业可持续发展 的问题之一，据 **2014** 年全国土壤污染状况调查公报报 道，全国土壤总超标率为 **16.1%，**其中轻微、轻度、中度 和重度污染点位分别占 **11.2%**、**2.3%**、**1.5%**和 **1.1%，**耕 地土壤点位超标率为**19.4%，**其中轻微、轻度、中度和 重度污染点位比例分别为**13.7%**、**2.8%**、**1.8%**和 **1.1%，**主 要污染物为镉、镍、铜、砷、汞、铅、滴滴涕和多环芳烃［1］。 针对重金属污染土壤的修复问题，国内外学者开展了 大量的研究工作，提出的治理技术主要有物理、化学、 生物、农业生态和联合修复技术等［2］。然而，农田土壤 经修复后，采用何种指标体系评价修复的效果成为公 众关注的热点问题。笔者根据近年来的工作经历，并 结合农田土壤的生态功能，分析探讨重金属污染农田 土壤修复效果的评价指标，以期为重金属污染农田土 壤修复效果的评价及土壤修复标准的制定等提供参考 依据。

1. 几个概念
   1. 土壤修复效果评价

污染土壤修复效果的评定就是结合有效的化学分 析手段，通过对土壤生态系统中不同物种生物组分损 伤的观察，定性或定量预测修复后土壤中污染物对土 壤生态系统和人类健康产生有害影响的可能性［3］。

* 1. 土壤质量

土壤质量**（soil quality**是维持地球生物圈最重要 的因子之一，可以从生产力、可持续性、环境质量、对人 类营养健康的影响等多方面来定义土壤质量［4］。一般认 为，土壤质量是指土壤肥力质量、土壤环境质量及土壤 健康质量 **3** 方面的综合量度，即土壤在生态系统的范 围内，维持生物的生产能力、保护环境质量及促进动植 物健康的能力［5］。土壤肥力质量是土壤提供植物养分和 生产生物物质的能力，是保障粮食生产的根本；土壤环 境质量是土壤容纳、吸收和降解各种环境污染物的能 力；土壤健康质量是土壤影响或促进人类和动植物健 康的能力［6］。

* 1. 土壤修复标准

污染土壤修复标准是指被技术和法规所确立、确认 的土壤清洁水平，通过土壤修复或利用各种清洁技术手 段，使土壤环境中污染物的浓度降低到对人体健康和生 态系统不构成威胁的技术和法规可接受的水平［7］。

* 1. 土壤修复基准

污染土壤修复基准是表示土壤环境受到一定程度 的污染后其生态系统结构和功能是否可以自行恢复的 临界水平，它反映了急性污染或较为严重污染暴露条 件下土壤生态系统中在种群或群落水平上**50%**〜**70%** 的生物种或个数能够得到保护或者免受污染危害的土

壤环境中污染物的最高水平，是制定污染土壤修复标 准的基础数据和科学依据［8］。

1. 污染土壤修复效果评价研究概况

污染土壤在修复过程中，其物理、化学和生物特性 都会改变，目标污染物的减少并不意味着土壤在生态 学意义上就是清洁的或是安全的［9~11］。因此，农田污染 土壤经修复后，修复的效果如何，是否达到了预期的修 复目标，土壤的生态功能是否得到了恢复，是否可以实 现复垦，生产的农产品是否达到了安全水平，这就需要 建立一套系统的评价标准或评价体系进行评价。 2.1 污染土壤修复标准研究

污染土壤修复标准的制定受到土壤修复技术发展 水平、仪器检出水平、环境背景水平、法规可调控清洁 水平等因素的影响，同时还应以污染物的生态毒理学 临界水平系统研究为基础，不是一个简单的概念和行 动［7］。在世界范围内，污染土壤修复标准是一个较新的 领域，一些发达国家从国家或区域水平上逐步确立或 建立污染土壤修复标准。美国是拥有污染土壤修复标 准的国家中，最早颁布并实施污染土壤修复标准的国 家，甚至各州已建立较为完善的污染土壤修复标准，如 纽约州早在**1998**年就制定并颁布了烃污染土壤清洁 标准；在欧洲一些国家，出于对土壤环境保护和污染土 壤治理与修复的目的，制定了一系列污染土壤的修复 标准，其中丹麦是欧洲制定污染土壤修复标准比较早 的国家，分别对土壤中砷、镉、铬和汞等重金属以及 **PAH** 提出了必要的污染消减标准［12］。

当前，国内污染土壤修复标准尚未出台，对于污染 土壤修复效果的评定，一般是通过对土壤中目标污染 物的检测值与《土壤环境质量标准》**（GB15618-1995** 进行比较来评定污染土壤的修复效果［11］。然而，我国现 行的土壤环境质量标准是国家为“防止土壤污染、保护 生态环境、保障农林生产、维护人体健康”所制订的土 壤中污染物在一定的时间和空间范围内的容许含量 值，可以认为是个阈值，土壤中化学物质含量低于此 值，一般不会有污染问题，高于此值，则应做进一步调 研，若确有危害，方可认为土壤已被污染［13,14］，并且，我 国土壤环境质量标准中对土壤中重金属含量的规定是 以总量表示的，而对重金属形态并未作出规定。显然， 从概念上来看，土壤环境质量标准与评价污染土壤修 复效果的要求存在着一定的差异［13］，在用其评价污染 土壤的修复效果时，也遇到诸多问题。

1. 污染土壤修复效果评价指标体系研究

在污染土壤修复标准出台之前，污染土壤修复效 果评价指标体系研究就显得尤为重要。一些发达国家， 对于污染土壤修复效果的评价，一般是通过对土壤中 目标污染物的检测与由土地再用目的和风险评价得出 的污染物在土壤中的允许浓度进行比较来确定修复效 果，然而，这样做却不能真实地反映污染土壤修复后的 生态安全性［7,15］。

国内有学者提出污染土壤修复效果的评价可以从 污染土壤修复后效观察及风险评价两方面开展［16］。根 据修复目标功能恢复指标，污染土壤修复后效观察可 分为生化毒理观察和生态指示观察，生化毒理观察是 依据土壤中残存的污染物对环境中的生物生理生化方 面可能产生的危害，通过分子或细胞水平上的测定，判 别风险的大小，进而进行修复效果的评测，该法具有测 定灵敏度高、测定周期较短的优点［16］；生态指示观察则 是借助土壤污染诊断的方法，将一些敏感生物（植物、 土壤动物、微生物）引入修复后的土壤，通过观察它们生 理生态方面的变化来对土壤修复的效果进行评判 ［11,16］。 常用的污染土壤修复后效观察指标主要有植物吸收毒 理指标、生化水平毒理效应指标、土壤动物吸收毒理指 标、污染物迁移指标、土壤酶水平指标、土壤微生物指 标、生物标记物法等［11~13］，然而，这些指标的分析测定 方法尚未形成统一的标准和规范，加之我国地域广阔， 土壤类型多样，在实际应用中受到很大限制。风险评价 是预测环境中的污染物对整个生态系统或部分形成不 利生态效应可能性的过程，而土壤生态风险评价则重 点关注进入土壤中环境污染物可能造成的影响，包括 至少两方面内容：即以人体健康为核心目标而进行的 人类健康评价和针对土壤生态系统或其组分的稳定而 进行的生态健康评价［16］。目前，我国颁布实施的《污染 场地风险评估技术导则》**（H J 25.3-2014，**适用于污染 场地的人体健康风险评估，并不适用于农用地土壤污 染的风险评估；而有关土壤生态系统的生态健康风险 评价尚无相关标准和规范出台。

综上分析可见，重金属污染农田土壤修复效果的 评价尚没有一定的标准和规范可循，这也为重金属污 染农田土壤修复工作的开展带来了较大的困扰。国内 有学者对农地土壤重金属安全性评价指标体系进行了 初步研究，结果表明：从农产品安全生产的角度，仅用 现有的环境质量评价体系难于正确评价农地土壤重金 属污染特征和水平［17］。因此，探索建立重金属污染农田 土壤修复效果评价指标体系已迫在眉睫。

1. 重金属污染农田土壤修复效果评价 指标体系构建

3.1 指标选取的原则

重金属污染农田土壤修复与一般工业污染场地土壤修复有很大的不同，前者重点关注的是经修复后的 土壤是否可以实现复垦，生产出的农产品是否符合食 品安全标准；而后者重点关注的是修复后的场地是否 可以进一步的开发利用，通常是用作建设用地或工业 用地。因此，在选取重金属污染农田土壤修复效果评价 指标时应紧紧围绕农田土壤的生态功能，具体来讲，应 遵循以下几点原则：

一是全面性：农田土壤最主要的功能是要有“保 水、保肥、通气、透水”能力，从而促进农作物的生长，因 此，单纯地用重金属总量的降低，或是生物有效态的降 低并不能全面反映农田土壤的主要生态功能，需要从 土壤的环境质量、肥力质量、健康质量三方面综合考 虑，设置修复效果评价指标。

二是客观性：用于重金属污染农田土壤修复效果 评价的指标应是客观的，可以最大限度地反映修复的 效果，在指标选取上应以定量指标为主，必要时可选取 定性指标，作为辅助性评价指标。

三是易测性：重金属污染农田土壤修复效果评价 选取的指标可用现行的标准方法进行测定，或是可用 国内外公认的测定方法进行分析测定；在分析周期上， 应满足具体的修复项目的实施进度及验收要求，不能 待修复工程竣工数年之后才可以采样分析，以致影响 项目的验收及土地的复垦。

四是可评性：重金属污染农田土壤修复效果评价指 标经测定后，要有相应的标准值或参考值可以作为评价 的依据，从而据此判定是否达到了预期的修复目标。 3.2 推荐指标体系

根据以上原则，结合我国现行的标准体系及规范， 重金属污染农田土壤修复效果推荐评价指标体系参 考表**1**。该指标体系紧紧围绕农田土壤的生态功能， 从农田土壤的环境质量、肥力质量、健康质量三方面 提出，并以其他指标作为补充，这与传统的农田土壤 质量评价是有区别的。一般认为，土壤质量评价就是 综合不同的土壤功能，包括保持生产力、维持环境质 量和保证动物健康的属性，对这些属性进行时间尺 度或空间尺度上的衡量［18］，通过选取一系列的指标， 采用相关的评价方法，可以对土壤质量进行定性和 定量的评价；而污染农田土壤修复效果评价是选取 修复前后土壤质量变化较大的指标，参照一定的标 准值或参考值，定性或定量地评价修复后土壤质量 的改善程度，重点关注的是修复后土壤中关注污染 物环境风险的降低程度、农田土壤生态功能的恢复 程度、生产农产品的安全性等，是一种不完全意义上 的土壤质量评价。

| 指标类型 | 指标名称 | 指标意义 | 分析方法 | 评价标准 | 指标性质 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Index type** | **Index** | **Index meaning** | **Analytical method** | **Evaluation criteria** | **Index property** |
| 土壤环境质量 | 重金属总量 | 评价土壤修复过程中外源物质的 | **GB/T 17135**、**GB/T 17140**、**GB/T** | **GB 15618**、**HJ 350**、**HJ** | 约束性 |
|  |  | 引入是否会明显增加土壤中重金 | **17138**、**GB/T 17134**、**GB/T 17139**、 | **332**、**NY/T 5295**、**HJ** |  |
|  |  | 属的总量。 | **GB/T 17136**、**GB/T 17141** | **333** |  |
|  | 重金属生物有效态 | 评价土壤修复后其中重金属生物 | **GB/T 23739**、**GB 7879**、**GB7880**、 |  | 参考性 |
|  |  | 有效性是否明显降低。 | **NY/T 890** |  |  |
|  | 浸出毒性 | 评价土壤经修复后是否会对周边 | **HJ/T 299**、**HJ/T 300** | **GB 3838**、 | 约束性 |
|  |  | 地表水体及地下水产生二次污染。 |  | **GB/T 14848**、  **NY/T 5295**、**HJ 333** |  |
| 土壤肥力质量 | 有效磷 | 评价土壤修复后是否会对土壤中 | **LY/T 1233**、**NY/T1121.7** |  | 约束性 |
|  | 水解性氮 | 作物所需的大量元素及微量元素 | **LY/T 1229** |  | 参考性 |
|  | 速效钾 | 的生物有效性产生明显影响。 | **GB 7856**、**LY/T 1236**、**NY/T 889** |  |  |
|  | 微量元素 |  | **GB 7877**、**GB 7878**、**NY/T 149** |  |  |
| 土壤健康质量 | 农作物可食部分重金属总量 | 评价污染农田土壤经修复后是否 | **GB 5009.12**、**GB 5009.15**、 | **GB 2762** | 约束性 |
|  | 农作物饲料部分重金属总量 | 达到安全生产农产品的要求。 | **GB 5009.17**、**GB 5009.11**、  **GB 5009.16**、**GB 5009.138**、  **GB 5009.123**  **GB 13079**、**GB 13080**、**GB 13081**、  **GB 13082**、**GB 13088**、 | **GB 13078** |  |
| 其他指标 | 作物的单产增加量 | 评价污染农田土壤修复后复垦的 | 重量法 |  | 参考性 |
|  | 单位面积产值 | 效果。 | 可比价格计算法 |  | 参考性 |

表 1 重金属污染农田土壤修复效果评价推荐指标体系

Table 1 Suggested index system for remediation effectiveness evaluation in farmland soil contaminated by heavy metals

注：分析方法及评价标准，应使用其最新版本

1. 指标体系应用建议

重金属污染农田土壤修复效果的评价是一项非常 复杂的工作，评价指标体系也不可一概而论，以上只是 个推荐的指标体系，在评价具体工程项目的修复效果 时，应结合项目的预期目标、项目特点、利益相关方要 求等具体分析，适当增减确定适合该项目的指标体系， 但应注意以下几点：

一是评价指标的选取要结合具体的修复项目而 定，并且要最大可能的反映修复后土地的使用功能，同 时要有效防止修复过程二次污染的影响。

二是以上提出的推荐指标体系有些是约束性指 标，有些是参考性指标，约束性指标是指修复后应该要 达到的目标，参考性指标可作为污染土壤修复效果评 价的辅助目标；此外，在实际应用时，可根据具体的工 程项目，确定评价指标，并确定其性质（约束性或参考 性）。

三是评价修复效果时要坚持从严的原则，如经过 修复，虽然土壤质量达到了预期的目标，但生产的农产 品不能达到预定的标准，则仍然不能认为该土壤已经 修复好，可供复垦。

四是制定的土壤修复效果评价指标有些是有评价 标准的，可根据标准进行评价，而有些没有标准可循， 此时可考虑从两个角度进行评价 （单独评价或是结合 评价）：其一是参考文献中报道的数据或是经验数据， 如有效磷指标，鲁如坤等综合各研究者的结果，提出了 土壤中有效磷的分级参考值[19]，污染土壤经修复后，其 中有效磷的含量可借助该参考值进行评价；二是借助 统计学的方法，如重金属生物有效态指标，修复目标可 设置为污染土壤经修复后，土壤中生物有效态重金属 的含量显著降低了，具体评价方法可参考北京市地方 标准《污染场地修复验收技术规范》**（DB 11/T 783-2011），**此外，亦可设置相对量指标，如经修复后， 土壤中重金属生物有效态含量降低 **50%**以上。

五是各指标的分析方法应优先选用国家或行业标 准方法，无标准方法可供使用时，可以考虑选用 **ISO** 或 **EPA**的推荐方法，如仍然没有，则可以选用学术界公 认的方法进行分析，但要分析说明方法的适用性。

六是应结合修复工程项目特点，分析开展修复效 果长期跟踪监测和评价的必要性（包括地表水、地下 水、农产品的跟踪监测），并提出具体的长期跟踪监测 评估方案。

1. 展望

重金属污染农田土壤修复效果评价涉及法律法 规、标准体系、导则规范以及土壤学、生态学、毒理学等 多学科领域，在今后的研究工作中，应重点开展以下几 方面的研究：

**（1）** 土壤－作物系统中重金属的响应关系研究

关于土壤－植物系统中重金属的迁移转化，生物 可利用性是一个经常提及的术语，有关生物可利用性 的概念、研究方法等，有学者已经进行了系统的阐述[20]。 然而，重金属的生物可利用性只是一个操作层面的定 义，土壤中重金属的生物可利用性与农产品安全之间 的响应关系也不是固定的，因土壤理化性质、作物品 种、提取剂等的差异会有显著的不同[21~23]。因此，在今 后的研究工作中，应结合我国土壤类型分布、作物品种 等进行系统研究，探索建立土壤中重金属总量、生物可 利用性、食用农作物安全之间的响应关系。

**（2）** 土壤修复基准与标准研究 重金属污染土壤修复效果的评价依赖于土壤修复

标准的制定，而土壤修复标准的制定需要以土壤修复 基准作为依据。因此，应加强从污染生态毒理学、人体 健康学等角度研究土壤中污染物的阈值，从而为制定 土壤修复标准提供基础数据和科学依据。

**（3）** 人体健康风险评价体系研究 农田土壤中的重金属会通过食物链转移至人体

中，而有关植物 - 人体系统中重金属的迁移转化研究 还非常少，因此，目前尚不能科学预测土壤重金属污染 造成的人体健康风险[24]。因此，应加强土壤 - 作物 - 人 体系统中重金属的迁移转化研究，特别是植物性食物 中重金属 - 人体系统中重金属的迁移转化，科学制定 人体健康风险评价体系，从而为制定基于人体健康的 土壤修复标准及基于食物链风险的土壤环境管理制度 等提供科学依据。

参考文献：

1. 环境保护部，国土资源部.全国土壤污染状况调查公报**EB/OL].**

<http://www.gtzyb.com/yaowen/20140417_62262.shtml>.

1. 樊 霆, 叶文玲, 陈海燕, 等. 农田土壤重金属污染状况及修复

技术研究J].生态环境学报，2013, 2210）： 1727 一 1736.

1. 晁 雷，周启星，陈 苏.污染土壤修复效果评定方法的研究**J].** 环境污染治理技术与设备, **2006,7（4）: 7** - **11.**

[4 ] SMITH J L, HALVORSON J J, PAPENDICK R I. Using multiple-variable indicators kriging for evaluating soil quality [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1993, 57: 743 - 749.

[ 5 ] DORAN J W, PARKIN T B．Defining and assessing soil quality [C]//DORAN J W, TIMOTHY B P. Defining soil Quality for a Sustainable Environment. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America Publication, No 35. Inc, 1994: 3 - 21.

1. 吕晓男，孟赐福，麻万诸，等.土壤质量及其演变**J].**浙江农业学

报, 2004, 16(2): 105 - 109.

1. 周启星.污染土壤修复标准建立的方法体系研究J].应用生态学 报, 2004, 15(2): 316 - 320.
2. 周启星.污染土壤修复基准与标准进展及中国农业环保问题**J].** 农业环境科学学报, **2010, 29(1): 1** - **8.**
3. 周启星, 宋玉芳, 孙铁珩. 生物修复研究与应用进展 **[J].** 自然科 学进展, **2004, 14(7): 721 - 728.**
4. HAIMI J. Decompose animals and bioremediation of soils [J]. Environ. Pollut., 2000, 107: 233 - 238.
5. 晁 雷，周启星，陈苏.污染土壤修复效果评定方法的研究**J].** 环境污染治理技术与设备, **2006, 7(4): 7** - **11.**
6. 崔芳，袁博.污染土壤修复标准及修复效果评定方法的探讨**J].** 中国农学通报, **2010, 26(21): 341** - **345.**
7. 王 松, 刘家女, 余海晨, 等. 污染土壤修复效果评价指标体系 及其构建方法研究 **J].** 安徽农业科学, **2011, 39 (35): 21929** - **21931, 21934.**
8. 骆永明. 污染土壤修复技术研究现状与趋势 J]. 化学进展, 2009, 21(Z1): 558 - 565.
9. 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法 **M].** 北京: 科学出版

社, 2004.

1. 徐 磊, 周 静, 崔红标, 等. 重金属污染土壤的修复与修复效 果评价研究进展 **J].** 中国农学通报, **2014, 30(20): 161** - **167.**
2. 张远蓉, 王 帅, 郭宏平, 等. 农地土壤重金属安全性评价指标 体系研究 **J].** 土壤通报, **2009, 40(6): 1432 - 1435.**
3. 黄 勇, 杨忠芳. 土壤质量评价国外研究进展 J]. 地质通报, 2009, 28(1): 130 - 136.
4. 鲁如坤. 土壤－植物营养学原理和施肥 **M].** 北京：化学工业出版 社, **1998.**
5. 李国臣, 李泽琴, 高岚. 土壤重金属生物可利用性的研究进展 **J].** 土壤通报, **2012, 43(6): 1527 - 1531.**
6. 甘国娟, 刘 妍, 朱晓龙, 等. **3** 种提取剂对不同类型土壤重金属 的提取效果 **J].** 中国农学通报, **2013, 29(2): 148** - **153.**
7. 肖振林, 王 果, 黄瑞卿, 等. 酸性土壤中有效态镉提取方法 研究 **J].** 农业环境科学学报, **2008, 27(2): 795** - **800.**
8. 李亮亮, 张大庚, 李天来, 等. 土壤有效态重金属提取剂选择的 研究 **J].** 土壤, **2008, 40(5): 819 - 823.**
9. 蔡美芳, 吴仁人, 李开明, 等. 植物性食物中重金属生物可利用 性研究进展 **J].** 环境科学与技术, **2014, 37(11): 99** - **104.**

Analysis on Evaluation System of Remediation Effectiveness in  
Farmland Soil Contaminated by Heavy Metals

WANG Tao, LI Hui-min, SHI Xiao-yan\*

(Jiangxi Academy of Environmental Sciences, Nanchang 330077, China)

Abstract: After the contaminated farmland soil was remediated, these questions should be answered about whether the expected goals were achieved, whether the remediated farmland could be reclaimed, whether the produced crops from the remediated farmland soil were safe. However, researches on evaluation system of remediation effectiveness were seldom reported in contaminated farmland soil. Based on the principle of comprehensiveness, objectivity, testability and evaluation, this paper put forward a set of evaluation system, and presented the analytical methods for every index and the evaluation criteria, which were expected to provide reference for the establishment of evaluation system and remediation standards for soil remediation of heavy metal contaminated farmland.

Key words: Heavy metals; Soil remediation; Soil quality

[责任编辑：张玉玲]

1. 收稿日期： 2015-11-27；修订日期： 2016-02-23

   基金项目：江西省环保科技计划项目（JXHBKJ2013-8资助

   作者简介：王 涛（1981-），男，山东济阳人，博士，副研究员，主要从事土壤污染防治研究。E-mail：maywoody123@ 163.com [↑](#footnote-ref-2)
2. 通讯作者： E-mail:[sxyandyou@163.com](mailto:sxyandyou@163.com) [↑](#footnote-ref-3)