

# 《污染农用地低累积作物与修复植物轮作技术指南》

(征求意见稿)

## 编制说明

《污染农用地低累积作物与修复植物轮作技术指南》编制组

2022年11月

## 目 录

1 项目背景.....	1
1.1 任务来源.....	1
1.2 工作分工及过程.....	1
2 指南编制的必要性与可行性分析.....	2
2.1 农用地土壤环境管理的现实需求.....	2
2.2 污染农用地安全利用与治理修复的重要性.....	2
2.3 轮作技术模式可行性分析.....	3
3 国内外相关标准概况.....	5
3.1 国外相关标准情况.....	5
3.2 国内相关标准情况.....	7
4 编制原则和主要内容.....	7
4.1 编制原则.....	8
4.2 主要内容.....	8

ACEF

## 1 项目背景

### 1.1 任务来源

土壤是人类赖以生存和发展的基础，直接影响到农业生产、生态环境健康以及人类可持续发展。但随着我国工业化、农业高度集约化的快速发展，土壤污染持续出现且呈扩大趋势。2014年7月生态环境部（原环境保护部）和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示，我国土壤环境状况总体不容乐观，部分地区土壤污染较重，耕地土壤环境质量堪忧。农用地中的耕地、林地、草地土壤点位超标率分别为19.4%、10.0%、10.4%；重金属污染物镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍的点位超标率分别为7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%、4.8%，有机污染物六六六、滴滴涕、多环芳烃的点位超标率分别为0.5%、1.9%、1.4%。农用地污染引起的农产品质量安全问题不仅威胁国民身体健康，也影响社会经济可持续发展。2016年5月国务院印发的《土壤污染防治行动计划》通知和2019年实施的《土壤污染防治法》，明确将污染农用地安全利用与治理修复列为生态环境保护领域的重点任务，要求修复活动应当优先采取不影响农业生产、不降低土壤生产功能的生物修复措施，阻断或者减少污染物进入农作物食用部分，确保农产品质量安全，并为此部署了一批土壤修复治理的重点项目。2019年中国科学院南京土壤研究所滕应研究员团队获得科技部重点研发计划项目支持，开展《华东废旧电器拆解场地污染区修复技术集成与工程示范》（项目编号：2019YFC1803700）研究工作。该项目着眼我国废旧电器拆解场地及周边污染区的污染防治管理需求，通过对华东废旧电器拆解场地及周边污染区（农田）修复技术筛选组合与集成，并形成华东废旧电器拆解场地周边污染区修复集成技术方案和应用推广模式，为我国废旧电器拆解场地土壤污染治理提供理论基础和科技支撑，为污染土壤修复治理提供参考与借鉴。

为了进一步凝练总结项目的研究成果，结合项目任务和当前污染农用地安全利用与治理修复的现实需求，提出编制本指南，可为环保和农业等相关管理部门和单位在应用低累积作物与修复植物轮作时，提供技术选择、过程管理、效果评估等方面的规范性指导。

### 1.2 工作分工及过程

#### 1.2.1 工作分工

中国科学院南京土壤研究所负责前期调研，收集规范编制所需基础资料，进行相关技术研究和文本编写；生态环境部南京环境科学研究所、农业农村部农业生态与资源保护总站、农业农村部环境保护科研监测所、浙江大学、浙江省生态环境科学设计研究院、中国地质调查局国家地质实验测试中心、浙江省耕地质量与肥料管理总站、江苏省耕地质量与农业环境保护站参与技术指南的编写讨论及修改，并负责向同领域专家征求意见。

#### 1.2.2 工作过程

2020年7月，中国科学院南京土壤研究所滕应研究员团队启动科技部重点研发计划项目《华东废旧电器拆解场地污染区修复技术集成与工程示范》（项目编号：2019YFC1803700），并提出我国拆解场地及污染区修复技术规范编制计划。

2021年12月,中国科学院南京土壤研究所、生态环境部南京环境科学研究所、农业农村部农业生态与资源保护总站、农业农村部环境保护科研监测所、浙江大学、浙江省生态环境科学设计研究院、中国地质调查局国家地质实验测试中心、浙江省耕地质量与肥料管理总站、江苏省耕地质量与农业环境保护站的相关人员成立了编制组。初步探讨了技术指南内容,确定标准制定原则、制定计划、基本框架和基本内容,选定复合污染耕地安全利用与治理修复技术这一标准选题,并对国内外相关标准研究展开调研。

2022年6月,基于国内外相关标准研究调研结果,编制组内部多次讨论和修改,梳理并明确了标准框架和主要内容,完成了标准文本草案,并参加了2022年7月29日由中华环保联合会在北京组织的标准立项会,经会上专家质询和讨论,同意立项,并将标准名称修改为“低累积作物与修复植物轮作技术指南”。

2022年7~9月,编制组根据审查专家的意见及多位同领域专家意见,对草案进行修改并于10月形成征求意见稿,向社会发布并征求意见。

## 2 指南编制的必要性与可行性分析

### 2.1 农用地土壤环境管理的现实需求

当前,我国农用地污染较为突出,污染物类型包括重金属和有机污染物。由土壤污染引起的镉稻米、镉小麦、汞大米、铅小麦等污染事故常有发生,不仅威胁国民身体健康,也影响社会经济可持续发展。习近平总书记在全国生态环境保护大会上指出,强化土壤污染管控和修复,有效防范风险,让老百姓吃得放心、住得安心。《土壤污染防治行动计划》提出到2030年受污染耕地安全利用率达到95%以上。《‘十四五’土壤、地下水和农村生态环境保护规划》中指出,到2025年受污染耕地和重点建设用地安全利用得到巩固提升,其中安全利用率提升至93%。因此,利用低累积作物与修复植物轮作技术模式,开展污染农用地安全利用与治理修复工作,是我国农用地土壤环境管理的重要现实需求。

### 2.2 污染农用地安全利用与治理修复的重要性

据农业部调查显示,我国24个省(市)的320个重点污染区中,污染超标的大田农作物种植面积为60.6万 $\text{hm}^2$ ,约占调查总面积的20%。其中,重金属含量超标的农作物种植面积约占污染物超标农作物种植面积的80%以上,尤其以镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)、铜(Cu)污染最为突出。而农田在受到重金属污染的同时,往往也伴随着非常严重的有机物污染。例如,因多环芳烃(PAHs)、农药(滴滴涕DDT、六六六HCH等)等主要有机污染物而造成的污染耕地近3600万 $\text{hm}^2$ 。可见,农用地土壤环境中的污染物正趋于多元化和复杂化,以各种污染物构成的复合污染为主,包括多种重金属形成的重金属复合污染、多种有机污染物形成的有机复合污染,以及重金属与有机污染物形成重金属-有机物复合污染。农用地土壤污染不仅影响农作物生长及产量,镉(Cd)、铅(Pb)、汞(Hg)等毒害金属还能通过食物链对人体健康造成危害。因此,开展农用地污染土壤修复治理,确保农产品安全生产已成为我国环境保护领域和农业生产领域亟需解决的重要现实问题。《‘十四五’土壤、地下水和农村生态环境保护规划》中提出,当前我国耕地土壤面临着安全利用类和严格管控类面积总体较大,受污染耕地精准实施安全利用技术水平不高,修复过程中的二次污染防治有待加强等问题。因此,面对污染农用地逐步扩大、安全利用率不足和二次污染防治有待加强等问题,我国亟

需科学有效的污染农用地安全利用与治理修复的指导性文件，本文件提出的低累积作物与修复植物轮作技术模式可同时实现农用地安全利用与治理修复双目标。

### 2.3 轮作技术模式可行性分析

轮作是我国传统农业的重要发现，也是农业生产中常用的农艺措施之一。轮作主要指在同一地块上有顺序地在季节间和年度间轮换种植不同作物或复种组合的种植方式，而轮作模式的可持续发展需要考虑生态环境、土壤健康、经济效益等因素。农业上通常会将吸收养分多、消耗地力大的“麦类、谷类、玉米”等粮食作物、“棉、麻、烟”等经济作物与既能固定空气中的氮素，又能吸收土壤中难溶性磷素和钾素的“各种豆类和绿肥”作物进行轮作，以提高用地与养地的效率。而将低累积作物与修复植物进行轮作，既保证了农产品的安全生产，也实现了污染土壤的修复。其中低累积品种替换作为农用地安全利用的重要技术措施之一，指种植吸收或转移到作物可食用部位中的污染物含量明显低于食品卫生标准或饲料卫生标准，并经过权威部门认定的作物品种。低累积作物品种的选育是重金属污染土壤安全利用的最简单、最为经济可行的方法。镉低累积粮食作物以及蔬菜、水果等经济作物的研究已取得大量品种。其中，常规选育技术选育出的有水稻、小麦、玉米、高粱等粮食作物品种。现代育种技术也是获得低镉新品种的有效途径，如通过离子束辐射的诱变育种技术已获得3个镉低累积的水稻OsNRAMP5突变体，通过甲基磺酸乙酯（EMS）诱变育种技术也已获得*lcd 1*突变体植株。此外，基于基因敲除技术获得*lcd* 镉低累积的水稻突变体，连续2年大田收获的突变体籽粒镉降低55%和43%。目前，低累积品种筛选工作已积累了大量的研究成果，并正在全国各地开展推广示范应用工作，如水稻品种沪优9803等已通过国家审定并推广应用，镉低累积的硬质小麦也于2004年在加拿大被授权商品化使用。已有的研究表明，筛选并推广种植低累积作物品种可以实现轻中度重金属污染农田土壤的安全利用，但对于中重度重金属污染农田仅仅依赖于种植低累积作物还是难以保证农产品的安全生产，需要结合植物修复、农艺调控等技术，以保障其农田土壤的安全利用。

植物修复因其修复成本低、环境兼容性强等优势，已作为一种主要的生物修复手段，开展了大量的田间示范修复试验，并取得良好的田间应用修复效果。如基于黑麦草、苏丹草、紫花苜蓿和三叶草四种修复植物，建立了多环芳烃污染农田土壤植物-微生物联合修复技术，在南京某钢铁厂周边多环芳烃污染土壤上进行了20亩集成修复技术工程示范，经过15个月三季的植物-微生物联合修复，土壤中多环芳烃去除率达到55.2%~82.3%。在铜仁汞污染防治先行示范区农田，通过种植巨菌草、芦竹、苕麻、三叶草比较发现：巨菌草、芦竹、苕麻和三叶草中汞的平均含量分别为6.65、4.16、1.45和5.27 mg/kg，同时对4种修复植物的年产量进行了测定，巨菌草、芦竹、苕麻和三叶草的年产量约4000、3000、800和750 kg（干重），4种植物每年对土壤汞的提取效果对应为26.60、12.48、1.16和3.95 g/亩。

轮作技术在实际应用过程中还应根据实际需要施加土壤调理剂，通过调节土壤pH值、土壤阳离子交换量和有机质含量等，进而影响重金属的生物有效性。土壤pH是土壤环境质量的重要指标，不仅影响土壤重金属化学形态和植物生物有效性，而且还是土壤环境质量标准值的参数，土壤pH范围不同，土壤重金属的限值标准也不同。通常，农田土壤重金属随pH增加呈现降低趋势，土壤重金

属含量在pH>7.5时最低，而土壤Cr、Pb和Cd含量在 pH<4.5时最高，土壤 As 含量在pH为5.5~6.5时最高，土壤Hg含量在pH为4.5~5.5时最高。一般情况下土壤pH高，土壤中氧化物、黏粒矿物和负电荷增加，对土壤中重金属离子的吸附能力增强从而导致土壤重金属含量降低。因此，在种植作物之前施加重金属钝化剂，通过调节土壤pH，降低重金属活性，确保农作物安全生产；在种植修复植物之前，为了增加生物可利用的土壤有效态重金属的含量，通过施加重金属活化剂，提高植物对重金属的修复效率。

土壤重金属含量除了受pH影响，还受氧化还原电位、有机质、颗粒组成、土壤母质等环境以及人为因素的影响，可以通过辅以相关的农艺措施，主要包括水分管理、养分管理和深翻耕等，调节土壤重金属的生物可利用性。通常，调节土壤水分，可以改变土壤氧化还原电位，以降低作物对重金属的积累。研究表明，水分管理措施降低作物对镉的吸收主要是通过改变土壤pH以及氧化还原电位、阳离子交换量等土壤理化性质，进而改变土壤中有效态镉的形成，减少重金属从土壤向作物。水田落干可引起糙米Cd含量增加，研究显示抽穗后落干增加12倍，开花后落干则增加8倍；全生育期淹水栽培下糙米镉的降幅高于孕穗后淹水及常规栽培。养分管理主要包括优化氮、磷、钾、微量元素肥料以及有机肥类型及其施用比例，不同肥料形态会影响植物根际环境，也会影响到植物的生长状态，进而影响植物对重金属的吸收、积累等过程。研究显示，水稻移栽14~21d施氮肥可通过根系铁锰氧化物膜量的提高来降低糙米Cd含量，始穗期、齐穗期及灌浆期施用氮肥，齐穗期和灌浆期分别是降低早、晚稻籽粒镉的最佳施肥时间。另有研究表明，增施硅（Si）肥、硒（Se）肥及有机肥也可减少作物Cd含量。此外，我国常规的翻耕、深松和旋耕耕作方式主要是将重金属含量高的表层土与重金属含量低下层土充分混合，从而稀释耕作层土壤重金属浓度，达到降低作物对重金属的吸收的目的，这种农艺调控技术适用于旱地表层土污染修复。

目前，利用低累积作物与修复植物进行轮作，在我国已有一些研究，并在一些地区开展了田间示范推广。本申请团队在科技部重点研发项目《华东废旧电器拆解场地污染区修复技术集成与工程示范》（项目编号：2019YFC1803700）的资助下，在浙江省台州市路桥区废旧电器历史拆解遗留场地周边污染区100多亩农田，开展了重金属（Cd、Cu为主）-有机物（PAHs、PCBs）复合污染土壤低累积作物与修复植物周年轮作技术田间试验，结果显示旱地采用冬春季蚕豆与伴矿景天间套作与夏秋季大豆-根瘤菌的轮作模式，修复一年后，蚕豆米中Cd含量为0.076 mg/kg，符合食品安全限值要求；同时土壤Cd含量降低了43.6%，Cu含量降低了23.9%，PAHs含量降低了29.4%，PCBs含量则降低了65.43%。水田采用夏秋季低累积水稻与冬春季伴矿景天、紫花苜蓿、紫云英轮作模式，经过一年的修复后，水稻籽粒中Cd含量均低于0.02 mg/kg，符合食品安全限值要求，对土壤Cd的修复效率为12.2%~48.3%，Cu的修复效率为2.6%~45.9%，对PCBs的修复效率为10.3%~86.5%。

轮作技术模式中常见的修复植物紫花苜蓿，作为优良的豆科牧草，具有固氮、培肥、提高土壤有机质含量的功效，且其根瘤菌能够有效降解PAHs、PCBs等难降解有机污染物。紫花苜蓿在我国北方大面积规模化种植，甚至成为一些地区的农业支柱产业，而其与作物小麦、棉花、玉米轮作能增加作物产量、改良土壤的研究已有报道，在生产中也得到了验证。紫花苜蓿在我国南方可以全年生长，秋季播种，生长7~8个月至第二年5月底可以收获三茬，然后轮种水稻、玉米等作

物，可以形成我国南方低累积作物与修复植物轮作的新模式。这些研究和试验结果为本标准的建立提供了理论支持，使本标准的制定更加具有技术可行性。

### 3 国内外相关标准概况

#### 3.1 国外相关标准情况

在各国的工业化、农业高度集约化快速发展过程中，污染物通过多种途径进入土壤环境，造成土壤污染，特别是农用地污染成为人们关注的敏感问题。为了保障农用地的土壤环境质量，进而实现保障农作物产量、农作物质量和人体健康等目标，国际标准化组织(ISO)在2017年颁布了《土壤质量-可持续性修复》(ISO 1504-2017 Soil Quality-Sustainable Remediation)的国际标准，主要提出了如何在当地法律法规、环境政策、社会经济和环生态环境背景下考虑可持续性修复土壤环境问题，但未涉及具体的土壤修复的技术标准方面的内容。此外，部分国家和地区基于自身的经济和科技条件，建立了一系列的法律法规，其中德国、加拿大、荷兰和英国等建立了较为成熟完善的农用地土壤保护制度体系。

##### (1) 德国

1998年德国联邦议会通过了《联邦土壤保护法》，1999年颁布了《联邦土壤保护与污染场地条例》，建立了土壤污染风险评估和治理修复的统一方式和标准。基于上述2项法律法规，德国建立了土壤环境质量标准体系，而德国的农用地环境质量标准体系就是其中的一部分。

德国土壤污染标准值包括：行动值(action levels)、触发值(trigger levels)和预防值(precaution value)三类，其中行动值和触发值针对不同的用地方式进行了规定，包括农用地、园艺用地的土壤污染的行动值，游乐场地、住宅用地、公园娱乐场地、工业用地。

三类标准值来源和作用不同，行动值旨在保护植物产品质量，分别针对种植面包小麦及对镉富集能力较强的作物的土壤和其他土壤，制定了不同的行动值，低于行动值无需开展进一步的调查；触发值是基于暴露风险评估方法制定，超过触发值需要开展进一步调查以确定污染是否有危害；预防值是联邦政府依据已有的毒理学研究结果，结合土壤背景值情况和地块调查结果制定，超过预防值表明出现土壤污染问题，应采取措施预防土壤污染可能造成的危害。

《联邦土壤保护与污染场地条例》中也给出了土壤修复措施的选择依据，不过仅限于针对场地污染土壤进行了规定。

##### (2) 加拿大

1991年加拿大联邦环境部长委员会颁布了土壤质量指导值(soil quality guidelines, SQGs)，1996年颁布了《基于生态环境保护 and 人体健康风险的土壤质量指导值制订规程》(A protocol for the Derivation of Environmental and Human Health Soil Quality Guidelines)，针对农用地、住宅用地、商业用地和工业用地等不同的用地类型制定了不同的土壤质量指导值，建立了加拿大的土壤环境质量标准体系，其中农用地的部分由针对农用地的土壤质量指导值确立。在制定土壤质量指导值的过程中，同时考虑了人体健康与生态受体，取值原则是保护二者之中更为敏感的受体。

除联邦土壤质量指导值外，加拿大各省在联邦土壤质量指导值基础上，根据《规程》中制定方法，结合各省实际情况对联邦污染场地土壤质量指导值制定方法进行修订，形成一级土壤和地下水修复指导值。指导值最终值的制定步骤与联邦土壤质量指导值计算流程一致。在数值上，不同污染物的省级土壤修复指导值不一定要严于加拿大联邦土壤质量指导值，只要是符合省内实际情况，科学选定暴露途径、受体，按照国家《规程》中模型和计算方法得到的数值，经省级环保部门认证和司法程序认定，即可作为省级土壤修复指导值。

一般意义上而言，当土壤污染物浓度低于土壤质量指导值时，认为没有污染风险；当土壤污染物浓度高于土壤质量指导值时，土壤可能存在有危险的变化，需要进一步的调查以确定是否需要采取修复措施。但是加拿大联邦环境部长委员会颁布的土壤质量指导值不具有全国范围内的法律约束力，在具体管控过程中以各省制定的污染场地管理条例中的数值为准。

### (3) 荷兰

1987年荷兰政府颁布了《土壤保护法》(Soil Protection Act)以防止土壤污染，该法令经过了多次更新,和2006年发布的《土壤修复通令》(Soil Remediation Circular)共同构成了荷兰土壤质量保护的法律基础。荷兰的土壤环境质量标准体系是基于对生态的风险和对人体的风险所制定的目标值和干预值进行规定，并不针对特定的用地方式进行分类，对于农业用地和其他用地方式的环境质量标准是相同的。

当土壤中污染物浓度低于目标值，对于生态系统的风险可以忽略，当土壤中污染物浓度高于干预值，则认为土地可能会对生态系统和人造成不可接受的风险。而在具体执行的过程中，荷兰提出了中间值的概念。中间值是目标值和干预值的算术平均数。如果场地的土壤污染物浓度低于目标值，则土地适用于各种利用方式；如果土壤污染物浓度高于目标值但是低于中间值，则认为土壤轻微污染，可以采取一定的限制措施；如果土壤污染物浓度高于中间值但是低于干预值，则认为土壤轻微污染，需要展开进一步的调查，如果调查结果显示土壤污染物浓度仍然低于干预值，则限制土地利用，例如不种植特定种类的蔬菜等；如果至少有一种污染物浓度高于干预值，表示土壤受到了严重的污染，需要具体的风险评估以确定土壤的修复紧迫性。

荷兰土壤环境管理体系不仅包含土壤保护污染预防还包含土壤修复和可持续利用的政策。

### (4) 英国

1990年英国颁布了《环境保护法》，为响应其中对污染土壤的相关要求，针对可能产生生态风险的污染场地（主要为自然保护区和鸟类保护区），进行生态风险评估，确立了英国的土壤环境质量标准体系，包括基于人体健康风险评估的土壤指导值(soil guideline values, SGVS)和基于生态风险的土壤筛选值(soil screening values, SSVS)。农用地的土壤筛选值体系作为其中的一部分，只与土壤指导值相关，由针对租赁农地制定的土壤指导值确立。英国在制定租赁农地相关的土壤指导值的过程中，首先预设敏感受体，并针对敏感受体预设一系列的标准暴露参数，包括年龄、身高、体重、呼吸速率、单位人体质量的体表面积以及暴露于土壤的皮肤面积分数等。

## (5) 日本

1970年,日本颁布了《农用地土壤污染防治法》,并于2002年制定了《土壤污染对策法》,把对农用地的土壤污染防治纳入其中,规定了农用地土壤污染的管理链条为:常识监测、划定污染区域、指定修复计划、解除“指定区域”。日本土壤环境质量标准起始于农田土壤环境质量标准,并逐步完善截止至2004年增加到27个项目。除了需要满足土壤质量标准规定的浸出值要求外,还对三种特定有害物质(镉、铜、砷)制定了特别标准,这三项标准限值是农用地土壤污染防治法所规定在污染监测和修复阶段的主要标准依据。

### 3.2 国内相关标准情况

在农用地安全利用和土壤污染防治方面,我国继2016年《土壤污染防治行动计划》出台后,逐步建立了以《中华人民共和国土壤污染防治法》为基础的土壤污染管理法律法规体系,确立了预防为主、保护优先、风险管控的基本原则;颁布了《农用地土壤环境管理办法》的部门规章;发布了《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准》的国家标准文件,通过风险筛选值和风险管制值建立了农用地土壤质量标准体系,从而实现对农用地土壤的分类管理;提出了《轻中度污染耕地安全利用与治理修复推荐技术名录》以及《农用地土壤环境质量类别划分技术指南》;农业农村部发布了《受污染耕地治理与修复导则》(NY/T 3499-2019)、《耕地重金属污染治理效果评价准则》(NY/T 3343-2018)、《农用地土壤重金属污染风险管控与修复 名词术语》(NY/T 3957-2021)。

为了落实国家土壤修复政策以及完成国家下达的受污染耕地的安全利用面积、治理与修复面积等任务。自2016年以来,全国各省(市)纷纷积极推进土壤污染防治工作,均已出台土壤污染防治相关政策及技术、资金支持方案,为我国全面实施土壤污染防治与修复提供有力支撑。其中与农用地安全利用与治理修复相关标准的有12项。包括广东省发布了《耕地土壤重金属污染风险管控与修复 总则》、《耕地土壤重金属污染风险管控与修复 风险评价》、《耕地土壤重金属污染风险管控与修复 安全利用技术》、《耕地土壤重金属污染风险管控与修复 严格管控技术》、《稻田土壤水稻镉、砷污染生理阻隔技术规范》、《耕地土壤重金属污染钝化调理技术指南》、《重金属污染菜地土壤安全利用技术指南》、《重金属污染稻田土壤安全利用技术指南》、《稻田土壤镉、铅、汞、砷、铬钝化调理技术规范》共9项;江苏省发布了《受污染耕地安全利用与治理修复技术指南》1项;河北省发布了《河北省农田土壤重金属污染修复技术规范》1项;云南省发布《受污染耕地安全利用技术规范》、《受污染耕地协同监测技术规范》、《受污染耕地严格管控技术规范》3项。

以上技术规范主要是针对重金属污染耕地的安全利用技术、严格管控技术、治理修复技术,以及针对相关的风险评价、协同监测技术进行了规范性说明。在污染物种类上目前发布的标准均未涉及有机污染物。另外,上述标准有的侧重安全利用,有的侧重污染修复,缺乏同时兼顾两者的技术规范。鉴于我国农用地土壤存在大量有机污染这一现状,以及缺乏同时兼顾安全利用与治理修复的技术规范,如低累积作物与修复植物这一轮作技术模式,因此有必要建立一套针对污染农用地的低累积作物与修复植物轮作的技术规范。

## 4 编制原则和主要内容

## 4.1 编制原则

### (1) 利用为主兼顾修复原则

针对污染农用地,在保证农业正常生产且农产品达标的同时,进行土壤修复,实现生产和修复的双目标。

### (2) 生态适宜与适用性原则

轮作技术选择时,须考虑土壤类型、灌溉条件、气候条件以及专业技术水平、种植习惯、种植成本等因素;选择适合目标地块种植的低累积作物和修复植物品种;同时须保证修复植物不影响低累积作物正常生长,不造成生物入侵。

### (3) 时序与空间优化原则

在轮作技术组合时,要考虑时间上(植物生育期、季节性)和空间上(地块分区与分类、垂直配置)都达到了最大化利用,提高土地利用与土壤修复效率。

### (4) 安全与可持续性原则

轮作技术实施过程中,系统考虑各环节不产生二次污染;根据NY/T 2149标准,综合评估农产品的安全性,对不达标农产品和修复植物进行安全处置;轮作实施过程还须防止土壤质量退化,保持土壤生产功能,维护土壤健康,确保土壤资源可持续利用。

## 4.2 主要内容

### (1) 资料收集与目标确定

- a) 收集目标地块的自然环境状况、土壤类型图、土地利用现状、农作物种植分布图等资料,明确目标地块适合种植的作物和修复植物类型;
- b) 收集目标地块的土壤污染物活性和形态分布特征,以及农产品污染状况调查数据等,明确目标地块的污染程度;
- c) 若收集的数据不足以判断目标地块土壤污染程度和农产品超标程度时,需按照NY/T 395进行调查采样分析。
- d) 总体目标是轮作技术实施与过程管理不引入二次污染,在保证农业正常生产且农产品达标的同时,进行土壤修复,实现生产和修复的双目标。
- e) 轮作技术实施最终目标为农产品达到国家食品安全标准(GB 2762);
- f) 同时土壤修复后达到农用地优先保护类要求(GB 15618)。

### (2) 技术选择与组合

按照NY/T 3499 要求,基于污染物周年减量移除的修复理念,保留一种或几种主栽作物,另外种植一季修复植物,通过低累积作物和修复植物的轮作,实现边生产边修复。若为最大化保证土地生产,可将修复植物与相同种植期的低累积作物采用间套作方式进行种植,但间套作时须考虑种间竞争、植物类型、空间配置和合理种植密度等。在选择低累积作物与修复植物时,须充分考虑农产品安全性、经济性和农民可接受性以及修复植物的后续安全处置。

## (2) 技术实施与过程管理

包含旱旱轮作和水旱轮作两种模式，作物种植过程中保证其生长所需条件，修复植物种植时是否进行土地整理，包括翻耕、喷施除草剂、开沟、设置合理的畦面宽度、行间距、是否覆膜等，并选用适合的繁殖栽培技术。种植过程中，注意田间管理，田间灌溉和化肥施用不能引入二次污染。

## (3) 安全利用与修复效果评估

每季作物收获后，农产品进行抽样调查，抽样方法参照NY/T 2103和NY/T 5344.2；对比GB 2762进行农产品质量安全评估，未超标即表示安全利用达标；未达到安全利用标准的，在次年须重新选择低累积作物品种。

修复植物收割后，进行采样评估土壤修复效果，采样监测方法按照NY/T 395进行；评估标准参照GB 15618优先保护类农用地，也可根据NY/T 2149 和NY/T 3343规定的评估方法进行系统评估；未达到土壤修复目标的，若植物修复效率达到预期修复目标值，则次年按照原方案重复周年修复；若植物修复效率未达到预期修复目标值，则次年须重新选择修复植物进行轮作。

## (4) 修复植物后处置

经评估，超过食品安全标准的作物、作物秸秆和修复植物应优先综合利用；若作为饲料使用的须符合GB 13078标准；若作为绿肥还田，翻耕进入土壤须符合NY/T 1868标准；作物秸秆和修复植物若超过上述标准，须进行回收处理，刈割晒干后，作为制作生物质炭、生态板材等原料或直接作为固废进行处置。