

团 体 标 准

T/ACEF 061—2023

污染农用地低累积作物与修复植物轮作 技术指南

Technical guidelines for rotation of low-accumulation crops and remediation plants
in polluted agricultural land

2023-2-22 发布

2023-3-1 实施



目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语与定义	1
4 总体要求与工作程序	2
5 资料收集	3
6 技术选择	4
7 轮作实施与过程管理	5
8 安全利用与修复效果评估	5
9 资源化利用与安全处置	5
附录 A（资料性）低累积作物品种清单	7
附录 B（资料性）修复植物清单	9
附录 C（资料性）典型低累积作物与修复植物轮作模式	12
附录 D（资料性）典型土壤调理剂清单	14

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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国科学院南京土壤研究所提出。

本文件由中华环保联合会归口。

本文件起草单位：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、江苏农林职业技术学院。

本文件主要起草人：滕应、赵玲、骆永明、沈仁芳、马文亭、任文杰、徐勇峰、李秀华、王国庆、郑顺安、杜兆林、汪海珍、徐建明、唐先进、钟重、赵浙卿、刘永兵、朱有为、王绪奎、杨光梅。



污染农用地低累积作物与修复植物轮作技术指南

1 范围

本文件规定了污染农用地低累积作物与修复植物轮作技术的总体要求与工作程序、资料收集、技术选择、轮作实施与过程管理、安全利用与修复效果评估以及资源化利用与安全处置等内容。

本文件适用于安全利用类污染农用地低累积作物与修复植物轮作。

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 5084	农田灌溉水质标准
GB 13078	饲料卫生标准
GB 15618	土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准
GB 18584	室内装饰装修材料木家具中有害物质限量
GB/T 21010	土地利用现状分类
GB 38400	肥料中 toxic 有害物质的限量要求
NY/T 395	农田土壤环境质量监测技术规范
NY/T 1868	肥料合理使用准则 有机肥料
NY/T 2103	蔬菜抽样技术规范
NY/T 2149	农产品产地安全质量适宜性评价技术规范
NY/T 3034	土壤调理剂 通用要求
NY/T 3343	耕地污染治理效果评价准则
NY/T 4159	生物炭
NY/T 5344.2	无公害食品 产品抽样规范 第2部分：粮油

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

污染农用地 polluted agricultural land

土壤中污染物含量高于 GB 15618 规定的风险筛选值且等于或低于风险管制值的农用地，主要指 GB/T 21010 中的 01 耕地（0101 水田、0102 水浇地、0103 旱地）。

3.2

低累积作物 low-accumulation crops

在受污染农用地上种植的可食部位吸收累积污染物含量明显低于食品安全标准或饲料卫生标准的作物品种。

3.3

修复植物 remediation plants

能够通过吸收、转移、转化、降解等方式显著去除土壤重金属或（和）有机污染物的植物。

3.4

轮作 crop rotation

在同一田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，本文件主要利用低累积作物和修复植物在一年三熟、一年两熟、两年三熟和一年一熟耕作制度下进行的水旱或旱旱轮作。

3.5

植物修复 phytoremediation

利用修复植物吸收、转移、转化或降解土壤中重金属或有机污染物的过程，包含超富集植物或富集植物吸取重金属和植物降解有机污染物等。

3.6

安全利用 safe utilization

针对污染农用地，通过源头防控、农艺调控、土壤改良、替代种植、植物修复等措施，确保农产品污染物含量不高于 GB 2762 或饲料作物中污染物含量不高于 GB 13078 所规定的限值。

4 总体要求与工作程序

4.1 总体要求

4.1.1 遵循安全利用为主兼顾修复原则。应优先保证农业正常生产且农产品污染物含量不高于 GB 2762 所规定限值的同时，进行土壤修复，最终实现安全利用目标。

4.1.2 遵循生态适宜与适用性原则。低累积作物和修复植物品种选择时，应充分考虑田块污染特征、气候条件、土壤类型、灌溉条件以及专业技术水平、种植习惯、种植成本等因素，避免生物入侵。

4.1.3 遵循生长时序与空间最优化原则。低累积作物和修复植物配置种植时，应从种植时间上（植物生育期、季节性）和空间上（田块分区与分类、垂直配置）达到最优化利用，且修复植物不影响低累积作物正常生长。特殊情况下需进行间套作时，应考虑种间竞争、作物/植物类型、空间配置和合理种植密

度和当地气候因素等。

4.1.4 遵循安全生产与可持续性原则。各轮作环节不产生二次环境污染，各种投入物应达到相应的环境标准；轮作实施过程还应防止土壤质量退化，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；对收获的农产品、作物秸秆和修复植物进行安全利用达标评估，如不达标的农产品、作物秸秆和修复植物优先进行资源化利用；无法进行资源化利用的应进行安全处置。

4.2 工作程序

4.2.1 污染农用地低累积作物与修复植物轮作技术工作程序见图 1。

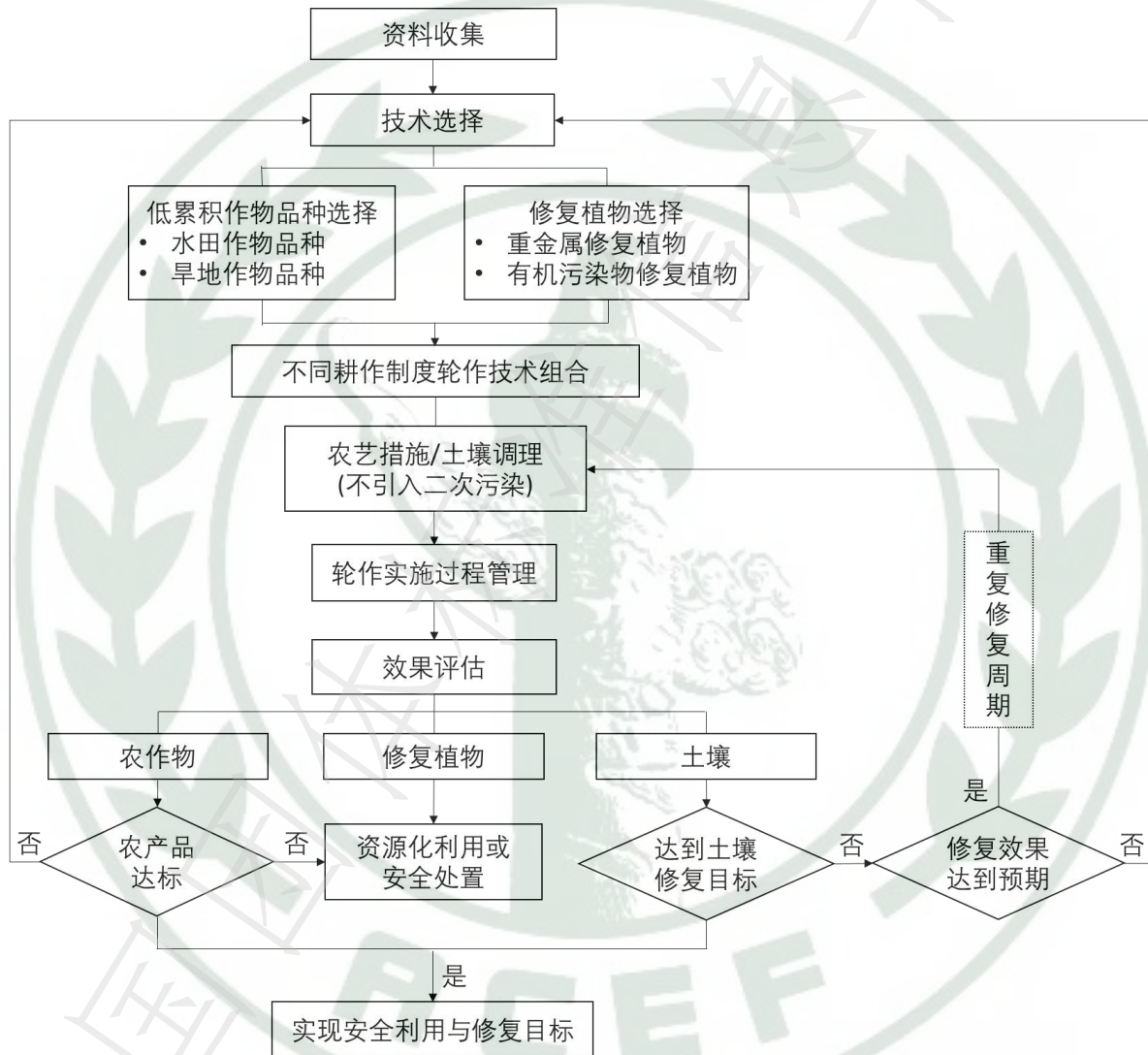


图 1 污染农用地低累积作物与修复植物轮作技术工作程序

4.2.2 实现安全利用与修复目标，应同时满足农产品达标和土壤达到修复目标；

4.2.3 当农产品未达标时，应重新进行技术选择；

4.2.4 当土壤修复目标未达标且修复效果低于预期时，应重新技术选择；

4.2.5 当土壤修复目标未达标但修复效果达到预期时，应按照本年轮作模式，进行周期修复。

5 资料收集

5.1 收集目标田块的土壤污染物种类、含量和形态分布、农产品污染状况以及自然环境、土壤类型、土地利用现状、农作物种植分布等资料数据；

5.2 收集当地农业农村、自然资源、生态环境等部门的农用地土壤、农产品污染状况调查监测数据结果或通过文献调研的方式进行资料收集；

5.3 当收集的数据不满足要求时，应进行现场调查采样工作，调查采样方法应符合 NY/T 395 的规定。

6 技术选择

6.1 一般规定

6.1.1 根据区域的气候条件、种植时长等特点，可形成一年三熟制、一年两熟制、两年三熟制和一年一熟制等不同耕作制度下的低积累作物和植物修复轮作模式。

6.1.2 在同一种耕作制度下，根据土地利用方式可分为旱旱轮作和水旱轮作。

6.1.3 低累积作物品种选择时，应结合当地的耕作制度、种植习惯、产量、品质与经济效益，选择当地优质高产且遗传特性稳定的品种，低累积作物品种可参考附录 A。

6.1.4 充分考虑当地气候条件和修复植物生长条件，选用适用于目标田块的修复植物，修复植物选择可参考附录 B。

6.1.5 若同时存在两种及以上污染物，植物修复时应优先选用一种对多种污染物同时具有修复效果的修复植物，或选用两种及以上的修复植物。

6.1.6 典型低累积作物与修复植物轮作模式可参考附录 C。

6.2 不同耕作制度下的轮作模式

6.2.1 一年三熟制

6.2.1.1 一年三熟制下的旱旱轮作模式，应在一年中保留其中两茬低累积作物，另一茬则种植适合的修复植物。

6.2.1.2 一年三熟制下的水旱轮作模式，应在一年中先种植两茬低累积水稻，在第二茬低累积水稻收获后种植适合的修复植物。

6.2.2 一年两熟制

6.2.2.1 一年两熟制下的旱旱轮作模式，应优先保留低积累主栽品种，在低积累主栽品种收获后，种植修复植物；若低积累主栽品种收获后影响修复植物正常生长，可在作物收获前，将修复植物与作物套种进行轮作。

6.2.2.2 一年两熟制下的水旱轮作模式，应优先开展低累积水稻种植，在水稻收割后，选择修复植物进行轮作。

6.2.3 两年三熟制

两年三熟制下的旱旱轮作模式，应保留三茬作物中的两茬低累积作物，另一茬则种植适合的修复植物。

6.2.4 一年一熟制

一年一熟制下的旱旱轮作模式，应在不影响低积累作物种植的前提下，开展修复植物与低累积作物

的轮作。

7 轮作实施与过程管理

7.1 旱旱轮作

7.1.1 低累积作物种植前,对土壤 pH 小于 6.5 的农用地施加调理剂,调理剂应符合 NY/T 3034 要求(下同),调理剂选择可参考附录 D,将土壤 pH 调至 6.5-7.0 之间。

7.1.2 修复植物种植前,对土壤 pH 大于 7.0 的农用地,翻耕土壤时应配合施加土壤调理剂,将土壤 pH 调至 6.5-7.0 之间。

7.1.3 根据作物和修复植物生长需求施加底肥,肥料应符合 GB 38400 要求。

7.1.4 种植前宜进行土地整理,设置合理的种植行间距和种植密度;根据种植作物和修复植物选用合适的栽培技术。

7.1.5 若选用两种以上同一生长期的修复植物种植,则应采用套种方式与低累积作物进行轮作。

7.1.6 生长过程中应开展田间管理,包括水分管理、养分管理、除草及病虫害防控等。

7.2 水旱轮作

7.2.1 对土壤 pH 小于 6.5 的污染农用地,水稻种植前应施加土壤调理剂,将土壤 pH 调至 6.5-7.0 之间,同时施加底肥、翻耕土壤。

7.2.2 对仅种植低累积作物不能实现安全利用的农用地,水稻种植前还应施加土壤钝化调理剂。

7.2.3 水稻种植过程中开展水分管理,加强灌溉水质监测,确保灌溉水中污染物含量达到农田灌溉水质标准 GB 5084 要求。

7.2.4 水稻和修复植物生长过程中的田间管理,应参照 7.1 所述进行。

8 安全利用与修复效果评估

8.1 农产品质量安全评估

8.1.1 作物收获后,农产品应进行抽样调查,具体方法参照 NY/T 2103 和 NY/T 5344.2 相关内容执行。

8.1.2 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,在保留前一年的农艺措施基础上,次年应重新选择低累积作物品种。

8.2 土壤修复效果评估

8.2.1 修复植物收割后,土壤修复效果评估采样监测方法按照 NY/T 395 进行。

8.2.2 评估标准参照 GB 15618 的风险筛选值,也可根据 NY/T 2149 和 NY/T 3343 有关规定开展。

8.2.3 若一个修复周期内土壤未达到修复目标,但植物修复效果达到预期,则次年按照原方案重复周年修复;若植物修复效果也未达到预期,则次年应重新选择修复植物进行轮作;

8.2.4 若土壤达到修复目标,则停止植物修复。

9 资源化利用与安全处置

- 9.1 不满足食品安全标准的农产品以及作物秸秆和修复植物应优先资源化利用。
- 9.2 作为饲料使用时应满足 GB 13078 标准。
- 9.3 作为绿肥还田，翻耕进入土壤应符合 NY/T 1868 标准。
- 9.4 作为生产原料，制成生物炭和生态板材应符合 NY/T 4159 和 GB 18584 标准；
- 9.5 无法进行资源化利用的应进行安全处置。



附录 A
(资料性)
低累积作物品种清单

低累积作物品种清单见表 A.1

表 A.1 低累积作物品种清单

元素	作物类别	品种
Cd	水稻	早稻：粤杂 889、甬优 1540（桂南）、成优 1479
		中稻：泸优 9803、F 优 498、扬育粳 3 号、镇稻 99、粤粘丝苗、隆两优 534、Y 两优 1 号、袁两优 908、渝香 203
		晚稻：秀水 14、武运粳 23 号、武运粳 30 号、武运粳 31 号、南粳 46、南粳 47、南粳 5055、常农粳 8 号、澄糯 218、苏香粳 100、苏粳 9 号、甬优 538、浙两优 274、甬优 1540（浙江）
	小麦	宁麦 11、周麦 26、周麦 30、皖麦 50、烟农 19、西农 979、郑麦 129、保麦 2 号、百农 207、保麦 5 号、荔高 6 号、新麦 288、衡 4399、衡观 35、良星 99、运早 21-30、苜麦 17、烟农 0428、烟农 999、泰山 22 号、中育 10 号、鄂麦 596、临麦 6 号、小堰 15、长 134、北 1、北 4
	玉米	新单 58、美加 303、京农科 828、苏玉 29、德单 123、MC121、奥玉 503、泛玉 298、农大 372、金秋 119、先达 601、巡天 1102、京农科 728、禾茂 808、金玉 1233、怀玉 23、裕丰 303、德力 666、德单 5 号、嘉禧 100、棒博士 76、中科玉 505、邵单 8 号、隆平 206、鑫玉 35、鑫玉 37、丰度 191、豫单 9953、皖玉 708、华玉 8 号、广紫糯 6 号、天玉糯 22、珠玉糯 1 号、路单 12 号、足玉 7 号、华兴单 88 号、扎单 202、正大 999、仲糯 1 号、云瑞 8 号、新石玉 8 号、西单 7 号、灵丹 20、郑单 958
	油菜	浙大 630、沔油 737、油研 57
	油葵	S777、S606、矮大头 1280、JSL606
	甘薯	苏薯 16、QS816、湘 20、湘 108、广薯 87、金山 57、普薯 32、福薯 18、台农 71、绵 12-22-3、绵 12-18-1、徐渝 34、商薯 19、徐薯 22
Hg	蔬菜	芹菜：四季小香芹、荷兰红芹、津南实芹王 土豆：D47、D157、根 1 苦瓜：长绿二号、碧丰二号、长绿、金绿、丰绿、翠绿三号、碧绿三号、夏玉油绿 荷兰豆：饶平红花大荚、604 甜脆、韩育美味 番茄：千禧、金宝 蚕豆：湘蚕鲜 1 号
		早稻：福优 012、奇优 915
		中稻：宁粳 8 号、晶两优华占、隆两优黄莉占、奇优 801、汕优联合 2 号、瑞优 399、川谷优 204、I 优 4761、黔优联合 9 号、中优 838
		晚稻：武运粳 23 号、武运粳 31 号、南粳 46、南粳 5055、常优 4 号、苏香粳 100、宁粳 1 号、宁粳 8 号

元素	作物类别	品种
	小麦	农大 3163、藁城 8901、保麦 2 号、百农 207、保麦 5 号、荔高 6 号、新麦 288
	油菜	西南油霸、宁杂 11 号、福油 508
	蔬菜	番茄：红宝石二号、齐达利、美国红宝石、罗拉、中杂 9 号、金圆宝 106、金圆宝 1106、奥特 208 土豆：荷兰 15 号、黄心洋芋 88 号 丝瓜：一品香玉、早翠香、早佳 花菜：苔松 65 天、白美人花菜 100 天、银峰 100 天 白萝卜：白如玉、雪冠、新特白玉
As	水稻	早稻：优优 128
		中稻：Y 两优 1998、湘两优 900、连粳 11 号、隆两优 534、Y 两优 1 号、袁两优 908、渝香 203
		晚稻：丰优 9 号、T 优 272、优优 128、T 优 118、甬优 17、甬优 538
	小麦	保麦 2 号、百农 207、保麦 5 号、荔高 6 号、新麦 288
	玉米	路单 12 号、足玉 7 号、华兴单 88 号、扎单 202、珠玉糯 1 号、正大 999、仲糯 1 号
蔬菜	土豆：荷兰 15 号 苦瓜：长绿二号、碧丰二号、长绿、金绿、丰绿、翠绿三号、碧绿三号、夏玉油绿 荷兰豆：饶平红花大荚、604 甜脆、韩育美味 番茄：千禧、金宝	
Pb	水稻	早稻：两优 1 号
		中稻：全优 3301、宜香 2292、隆两优 534、Y 两优 1 号、袁两优 908、渝香 203、中浙优 1 号
		晚稻：天优 673、宁粳 1 号
	小麦	小偃 22、保麦 2 号、百农 207、保麦 5 号、荔高 6 号、新麦 288
	玉米	路单 12 号、足玉 7 号、华兴单 88 号、扎单 202、珠玉糯 1 号、正大 999、仲糯 1 号、云瑞 8 号、新石玉 8 号、西单 7 号、灵丹 20、郑单 958
蔬菜	土豆：D47、D157、根 1 苦瓜：长绿二号、碧丰二号、长绿、金绿、丰绿、翠绿三号、碧绿三号、夏玉油绿 荷兰豆：饶平红花大荚、604 甜脆、韩育美味 番茄：千禧、金宝	
Cr	水稻	早稻：甬优 1540（桂南）
		中稻：隆晶优 534、恒丰优粤合丝苗、荃优 822
		晚稻：南粳 46、广 8 优粤禾丝苗、甬优 12、甬优 1540（浙江）、甬优 2640
	小麦	山农 17、镇麦 9 号
	玉米	强盛 101、强盛 51、平安 18、先玉 335、福盛园 52
甘薯	广薯 87、普薯 32、金山 57、苏薯 16	
注：表中数据来源于已公开发表论文、农业部门推广建议以及国内相关标准。		

附录 B
(资料性)
修复植物清单

修复植物清单见表 B.1

表 B.1 修复植物清单

污染物种类	修复植物名称	科	类型	生长条件	种植时间	种植方式	适宜种植地区
Cd	伴矿景天 <i>Sedum plumbizincicola</i>	景天科 Crassulaceae	草本 Herb	性较耐寒、耐旱，喜日光充足、干燥通风环境，对土壤要求不严格	秋季	扦插	中国华南、西南、长江中下游地区
	东南景天 <i>Sedum alfredii Hance</i>	景天科 Crassulaceae	草本 Herb	喜干燥、通风良好的环境，喜地势高、排水良好的壤土	秋季	扦插	中国华南、西南、长江中下游地区
	藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	喜温暖，阳光充足的环境，对土壤要求不严，不耐寒，在酷热下生长不良	春、夏、秋均可	撒播、扦插	广东、广西、云南、贵州、四川、江西、福建、浙江、河北
	鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	喜长于温暖湿润气候区，以疏松肥沃、富含腐殖质的砂质壤土及粘壤土为宜	春播 3-4 月	穴播	中国华东、华中、华南、西南各省区
	龙葵 <i>Solanum nigrum L.</i>	茄科 Solanaceae	草本 Herb	喜光，也耐阴，但不能长期在缺少光照的地方，对土壤要求不严，但最好以沙壤土为主	一年四季都能行，播种法最好春播	插根、播种	中国大部分地区

污染物种类	修复植物名称	科	类型	生长条件	种植时间	种植方式	适宜种植地区
Hg	白车轴草 <i>Trifolium repens</i>	豆科 Legume	草本 Herb	喜光，对土壤要求不高，喜弱酸性土壤不耐盐碱，pH 值 6.0—6.5 时，对根瘤形成有利，不耐干旱和长期积水	春秋播均可	条播	中国大部分地区
	蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	草本 Herb	喜温暖湿润和半阴环境，生长适温 3-9 月为 16-24℃，高温时要避免过于干燥	一年四季都能行，5-6 月最好	移栽	秦岭南坡以南地区
	芒草 <i>Miscanthus sinensis</i>	禾本科 Poaceae	草本 Herb	喜欢阳光，和水分充足的环境，但不能淹水，最佳生长温度为 20℃	春、秋播均可	播种	中国大部分地区
As	蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	喜温暖湿润和半阴环境，生长适温 3-9 月为 16-24℃，高温时要避免过于干燥	一年四季都能行，5-6 月最好	移栽	秦岭南坡以南地区
Pb	金丝草 <i>Pogonatherum crinitum</i>	禾本科 Poaceae	草本 Herb	喜温暖湿润气候，对土壤要求不严，不喜欢阳光直射	10 月至翌年 3 月	移栽	华东、华中、华南、西南地区
PAHs	黄羽扇豆 <i>Lupinus luteus</i>	豆科 Legume	草本 Herb	喜温耐寒作物，在温带和寒温带，通光良好的开旷地上，对水分条件有良好的适应性，适于贫瘠土地作绿肥用	春、秋播均可，中国南方春播在 3 月上中旬，北方在 4 月中下旬，秋播在 9 月中下旬	播种	东北和华北地区

污染物种类	修复植物名称	科	类型	生长条件	种植时间	种植方式	适宜种植地区
	红车轴草 <i>Trifolium pratense</i>	豆科 Legume	草本 Herb	喜凉爽湿润气候,耐湿性良好,耐旱能力差,在 pH 值 6.0-7.0、排水良好、土质肥沃的黏壤土中生长最佳	春、秋播均可,在高寒日暖山区以春播为好,其余地区秋播最好	播种	中国大部分地区
	白车轴草 <i>Trifolium repens</i>	豆科 Legume	草本 Herb	喜光,对土壤要求不高,喜弱酸性土壤不耐盐碱,pH 值 6.0—6.5 时,对根瘤形成有利,不耐干旱和长期积水	春、秋播均可	条播	中国大部分地区
	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	豆科 Legume	草本 Herb	耐寒、耐旱,耐盐碱,对土壤要求不严,但土层深厚疏松,排灌方便,pH 值 6.5-7.5 的中性或微碱性土壤环境下生长最好	春、夏、秋均可,寒带以春播最好,其余地区秋播最好	条播	中国大部分地区
PCBs	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	豆科 Legume	草本 Herb	耐寒、耐旱,耐盐碱,对土壤要求不严,但土层深厚疏松,排灌方便,pH 值 6.5-7.5 的中性或微碱性土壤环境下生长最好	春、夏、秋均可播种,寒带以春播最好,其余地区秋播最好	条播	中国大部分地区
	紫云英 <i>Astragalus sinicus</i>	豆科 Legume	草本 Herb	喜温暖、湿润的气候,对土壤要求不严,在疏松、肥沃湿润的壤质土上生长较好,适宜生长的土壤 pH 值是 5.5-7.5	春、秋两季最好,夏季气温不超过 30℃	撒播或条播	中国大部分地区
有机氯农药	紫花苜蓿 <i>Medicago sativa</i>	豆科 Legume	草本 Herb	耐寒、耐旱,耐盐碱,对土壤要求不严,但土层深厚疏松,排灌方便,pH 值 6.5-7.5 的中性或微碱性土壤环境下生长最好	春、夏、秋均可播种,寒带以春播最好,其余地区秋播最好	条播	中国大部分地区

附录 C
(资料性)
典型低累积作物与修复植物轮作模式

典型低累积作物与修复植物轮作模式见表 C.1

表 C.1 典型低累积作物与修复植物轮作模式

耕作制度	适用地区	种植方式	主栽作物品种	修复植物	轮作模式
一年三熟	长江以南地区	旱作	小麦、玉米、红薯	蜈蚣草、伴矿景天、藿香蓟、鬼针草、白车轴草、紫花苜蓿、紫云英	低累积小麦—低累积玉米—修复植物
		水田	水稻、水稻、小麦/油菜	蜈蚣草、伴矿景天、藿香蓟、白车轴草、芒草、金丝草、黄羽扇豆、红车轴草、紫花苜蓿、紫云英	低累积水稻—低累积水稻—修复植物
	华南地区	水田	水稻、水稻、油菜/甘薯/蔬菜	蜈蚣草、伴矿景天、藿香蓟、白车轴草、芒草、金丝草、黄羽扇豆、红车轴草、紫花苜蓿、紫云英	低累积水稻—低累积水稻—修复植物
一年两熟	长江中下游地区	旱作	小麦/油菜、玉米	蜈蚣草、藿香蓟、鬼针草、白车轴草、芒草、紫花苜蓿、紫云英	低累积小麦/油菜—修复植物
				蜈蚣草、伴矿景天、藿香蓟、白车轴草、芒草、金丝草、黄羽扇豆、红车轴草、紫花苜蓿、紫云英	修复植物—低累积玉米
		水田	水稻、油菜/小麦	蜈蚣草、伴矿景天、藿香蓟、白车轴草、芒草、金丝草、黄羽扇豆、红车轴草、紫花苜蓿、紫云英	低累积水稻—修复植物

耕作制度	适用地区	种植方式	主栽作物品种	修复植物	轮作模式
两年三熟	华北平原地区	旱作	小麦、玉米、棉花	藿香蓟、鬼针草、白车轴草、芒草、黄羽扇豆、红车轴草、紫花苜蓿、紫云英	低累积小麦—低累积玉米—修复植物
一年一熟	华北、西北的北部地区	旱作	春小麦	蜈蚣草、伴矿景天、藿香蓟、白车轴草、芒草、金丝草、黄羽扇豆、红车轴草、紫花苜蓿、紫云英	低累积小麦—修复植物

附录 D
(资料性)
典型土壤调理剂清单

典型土壤调理剂清单见表 D.1

表 D.1 典型土壤调理剂清单

调理剂类型	组成类别	主要组成	作用原理
钝化剂	石灰类物质	石灰、石灰石、碳酸钙镁等	酸化改良, pH 提高后重金属活性降低
	粘土矿物	海泡石、蒙脱石、膨润土、硅藻土、高岭土等	通过吸附、配位和共沉淀反应等, 减少土壤中重金属离子的浓度和活性
	含磷材料	钙镁磷肥、羟基磷灰石、磷矿粉、磷酸盐等	增大土壤表面积, 形成沉淀实现对金属离子的固定
	含硅材料	硅酸钠、硅酸钙等	硅可以缓解重金属元素对植物的伤害, 提高土壤 pH, 降低重金属活性, 减少植物对重金属的吸附和转移
	金属及金属氧化物	氧化铁、硫酸亚铁、硫酸铁等	通过专性吸附、非专性吸附、共沉淀以及在内部形成配合物等途径实现对土壤重金属的钝化固定
	有机物料	畜禽粪便、腐殖质、泥炭、有机堆肥等	通过增加土壤阳离子交换量和对离子的吸附能力, 以及形成难溶性金属有机络合物等方式来降低土壤重金属的生物可利用性
	生物炭材料	秸秆碳、果壳碳、食用菌渣等	通过表面吸附、表面含氧官能团的络合作用, 以及形成碳酸盐、磷酸盐沉淀等形式实现对重金属离子的固定
活化剂	人工螯合剂	Na ₂ EDTA、EDTA、EDDS 等	活化效果较强, 而且能够在 pH 较低或者 pH 较高的情况下都能很好的发挥对重金属的螯合作用
	天然螯合剂/小分子量有机酸	柠檬酸、草酸、酒石酸、乙酸等	通过与重金属离子络合形成络合物或者是吸附于土壤表面后通过官能团与重金属进行络合
	腐殖酸	富里酸、胡敏酸等	腐殖酸能降低土壤 pH, 同时腐殖酸分解生成的羟基自由基在水中也能降解有机污染物