

DOI: 10.11766/trxb202205120170

汪洁, 朱有为, 杨肖娥, 郭彬, 汪玉磊. 农用地土壤可持续安全利用的研究与实践——以浙江省镉污染农田为例[J]. 土壤学报, 2023, 60 (6): 1662–1674.

WANG Jie, ZHU Youwei, YANG Xiaoe, GUO Bin, WANG Yulei. Research and Practice on Sustainable and Safe Utilization of Soil in Agricultural Land—A Case Study of Cadmium Contaminated Farmland in Zhejiang Province [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (6): 1662–1674.

农用地土壤可持续安全利用的研究与实践——以浙江省镉污染农田为例*

汪 洁¹, 朱有为^{1†}, 杨肖娥², 郭 彬³, 汪玉磊¹

(1. 浙江省耕地质量与肥料管理总站, 杭州 310020; 2. 浙江大学环境与资源学院, 杭州 310058; 3. 浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

摘 要: 农用地土壤可持续安全利用对有效改善农用地土壤环境质量、保障农产品质量安全及人体健康具有重要意义。以长江三角洲经济最发达地区之一的浙江省为例, 分析探讨了农用地土壤环境存在的主要问题和的发展趋势, 研究思考了农用地土壤可持续安全利用的理论和方法。在“十三五”期间, 基于浙江省历年 1:5 万大比例尺农用地土壤污染调查成果, 在温岭市、桐庐县等地开展了以农用地土壤重金属镉 (Cd) 污染治理为重点的省级试点示范工作, 综合采取以污染源头解析与防控、多维度农业安全利用技术筛选和应用以及超标农作物秸秆安全处置等方法, 形成一批具有显著地域特点、高效防治效果、自主知识产权、适用于 Cd 轻中度和中重度污染的农用地土壤污染综合治理技术模式。主要结果: (1) 大气沉降源是农用地生态系统 Cd 的主要外来输入源之一, 约占总输入量的 24%~59%。(2) 筛选出以甬优 538 为主的低积累品种 53 个, 比选出以石灰性物质类为主的钝化材料 20 种以及以硅基和硒基为主的叶面阻控材料 10 种。(3) 以稻/麦轮作等适用于 Cd 轻中度污染农用地安全利用技术模式可有效降低土壤有效态 Cd 20%~50%以上, 以超积累植物为主的适用于 Cd 中重度污染农用地的“边生产边修复”技术模式可有效降低土壤全量 Cd 30%以上、土壤有效态 Cd 50%以上, 均可实现农产品安全生产。本文创新提出农用地土壤重金属污染可持续安全利用总体思路和技术路径, 总结了农用地土壤重金属污染可持续安全利用的经验策略, 以期为我国大范围开展受污染农用地土壤安全利用提供示范样板与技术参考。

关键词: 农用地土壤; 安全利用; 镉污染; 分类管控; 浙江省

中图分类号: S19 文献标志码: A

Research and Practice on Sustainable and Safe Utilization of Soil in Agricultural Land—A Case Study of Cadmium Contaminated Farmland in Zhejiang Province

* 浙江省重大科技专项(2015C02011, 2015C03020, 2021C04020)和浙江省“三农六方”科技协作计划项目(2020SNLF009)资助 Supported by the Major Science and Technology Project of Zhejiang Province, China (Nos. 2015C02011, 2015C03020 and 2021C04020), and “Three Rural Six Party” Science and Technology Cooperation Plan Project of Zhejiang Province, China (No. 2020SNLF009)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: 13018941333@163.com

作者简介: 汪 洁 (1990—), 女, 浙江宁波人, 硕士, 农艺师, 从事耕地质量建设与肥料管理工作。E-mail: 365597290@qq.com

收稿日期: 2022-05-12; 收到修改稿日期: 2022-09-09; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-10-27

WANG Jie¹, ZHU Youwei^{1†}, YANG Xiaoe², GUO Bin³, WANG Yulei¹

(1. Zhejiang Cultivated Land Quality and Fertilizer Management Station, Hangzhou 310020, China; 2. College of Environmental and Resources Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. Institute of Environment, Resources, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract: 【Objective】 The sustainable and safe utilization of agricultural soil is of great significance to effectively improve the quality of the agricultural soil environment, and to ensure the quality and safety of agricultural products and human health. 【Method】 Taking Zhejiang Province, one of the most developed areas in the Yangtze River Delta, as an example, the main problems and development trends of agricultural land soil environment were analyzed, and the theory and method of sustainable and safe utilization of agricultural land soil were studied. During the 13th Five-year Plan period, based on the survey results of agricultural land soil pollution in Zhejiang Province at a scale of 1 : 50 000 over the years, provincial pilot demonstrations focusing on the control of heavy metal cadmium pollution in agricultural land were carried out in Wenling City and Tonglu County. The methods of pollution source analysis and prevention, multi-dimensional agricultural safety utilization technology screening and application, and safe disposal of over-standard crop straws were comprehensively adopted to form a batch of agricultural land soil pollution comprehensive treatment technology models with significant regional characteristics, high-efficiency control effects, and independent intellectual property rights, which are suitable for mild to moderate and moderate to severe cadmium pollution. 【Result】 The main results were as follows: (1) Atmospheric deposition source is one of the main external input sources of Cd in the agricultural land ecosystem, accounting for about 24%–59% of the total input. (2) 58 varieties with low accumulation (mainly Yongyou 538) were screened out, 20 passivation materials with calcareous substances as the main, and 10 leaf resistance control materials with silicon and selenium as the main were selected. (3) The safe utilization technology mode of rice/wheat rotation, which is suitable for light and moderate Cd polluted agricultural land can effectively reduce the available state of Cd in soil by more than 20%–50%. The production and remediation technology mode which is suitable for moderate and severe Cd polluted agricultural land, mainly with hyperaccumulators, can effectively reduce the total amount of Cd in soil by more than 30% and the available state of Cd in soil by more than 50%. 【Conclusion】 This paper innovatively puts forward the general idea and technical route of sustainable and safe utilization of heavy metal polluted agricultural land soil. It also summarizes the experience and strategy of sustainable and safe utilization of heavy metal polluted agricultural land soil, to provide a demonstration model and technical reference for the safe utilization of contaminated agricultural land soil in China.

Key words: Agricultural soil; Safe utilization; Cadmium pollution; Classification control; Zhejiang Province

土壤是人类赖以生存和发展的物质基础,农用地土壤环境质量与农产品质量安全及人体健康密切相关^[1]。据 2014 年《全国土壤污染状况调查公报》^[2]显示农用地土壤污染点位超标率为 19.4%,其中镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铜(Cu)、铅(Pb)、铬(Cr)、锌(Zn)和镍(Ni)点位超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%和 4.8%,Cd 污染的形势较为严峻。全国范围内以西南、中南、长江三角洲(长三角)及珠江三角洲等地区污染最为突出^[3]。不同研究尺度下农用地土壤重金属污染程度评估存在明显差异^[4]。例如,22 个省份水稻土中 Cd 平均值为 0.45 mg·kg⁻¹,其中湖南水稻土平均含 Cd 量最高(1.12 mg·kg⁻¹),其次为广东(0.92 mg·kg⁻¹)、四川(0.86 mg·kg⁻¹)等地^[5],但研究区域通常集中于

受重金属污染区域,不能代表整体的农用地土壤 Cd 分布范围。浙江省作为长三角经济最发达的地区之一,部分区域农用地土壤污染问题也十分突出^[6],已成为限制农业可持续发展的重大障碍。

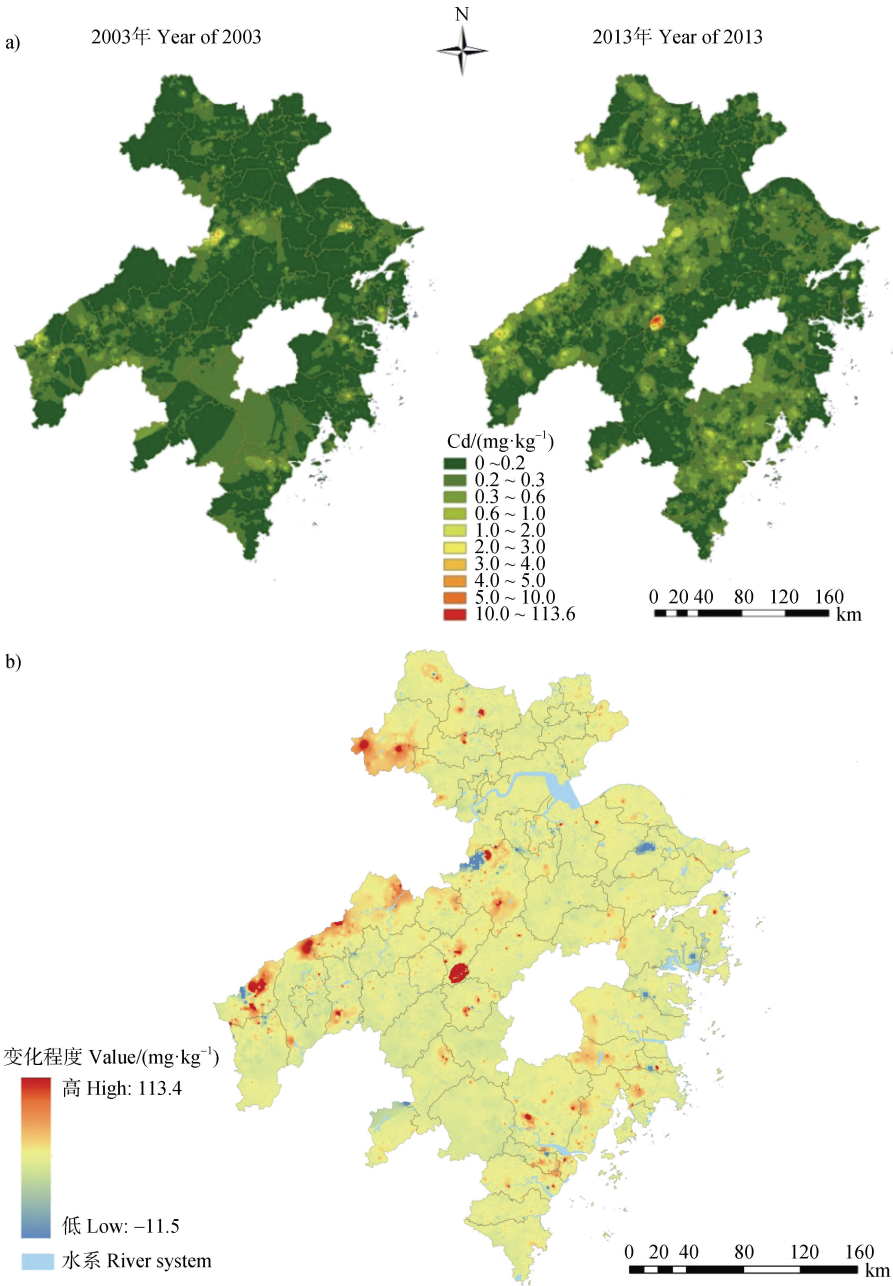
1 材料与方法

1.1 研究区土壤污染概况

浙江省曾分别于 2003 年和 2013 年开展较大规模的农用地土壤重金属污染调查和普查,涉及农用地面积近 2.60 万 km²。结果表明,浙江省调查点位重金属总的超标率略高于全国平均水平,但以轻微污染为主,除主要污染物 Cd 和 Hg 外,其余元素超标率均低于全国平均水平^[7-8]。时间跨度上,全省 10

年间土壤重金属污染程度明显加剧,以 Cd 为例,平均含量增加了 36.84% (图 1);空间特征上,衢州和杭州西部地区土壤重金属点位超标率较高,其地层以高硅富铝富铁钾岩类和高钙低镁岩类为主,属地质高背景值区,与其他区域母质发育的土壤存在

显著差异。杭州、温州、宁波、绍兴、台州等部分沿海平原城市工业污染源集中且废弃物排放量大,区域土壤中污染物含量呈增加趋势,具有明显地域特点。如台州电力热力生产供应业、医药制造业、废旧垃圾拆解与加工业等“三废”排放是造成该区



注: a) 2003 年和 2013 年浙江省农用地土壤 Cd 含量分布图; b) 2003—2013 年浙江省农用地土壤 Cd 含量变化分布图; 图中白色填充部分为年度间无相对应数据进行插值的区域。Note: a) Distribution map of Cd content in agricultural land soil in Zhejiang Province in 2003 and 2013; b) Distribution map of Cd content in agricultural land soils of Zhejiang Province from 2003 to 2013; The white-filled portion of the figure is an area where no corresponding data is interpolated between years.

图 1 浙江省农用地土壤 Cd 含量十年变化情况

Fig. 1 Decade variation of Cd content in agricultural soils in Zhejiang Province

域农用地土壤重金属超标的主要原因之一^[9]。而丽水、嘉兴、舟山土壤重金属污染情况相对较轻微。2017—2019 年基于上述调查工作,进一步开展农用地土壤污染状况详查,涉及全省约 0.75 万 km² 农用地,揭示目前浙江省农用地的土壤环境质量总体良好,污染水平趋于平稳,全省表层土壤污染物以重金属 Cd 元素为主。

1.2 研究方法

浙江省在充分利用上述土壤污染调查大数据基础上,特别是 2013 年度农产品产地土壤重金属污染防治普查成果,结合农业“两区”(粮食生产功能区和现代农业园区)土壤污染防治三年行动计划(2015—2017 年)^[10],于 2015 年起在全省 10 个设区市(除舟山市外)各落实 0.067~0.67 km² 的重金属污染典型区域(土壤污染综合评价指数在 1~3 之

间)(图 2),开展以农用地土壤重金属污染治理为重点的省级试点研究和技术推广。

农用地土壤重金属污染源解析采取定性源识别和定量源解析相结合的方法,在对试点区采集的土壤进行土壤剖面初步识别基础上,长期监测其灌溉水、大气降尘、肥料、农药、秸秆还田等潜在污染因子对 Cd 的影响,以年度为周期用投入品输入通量计算分析 Cd 的不同外来污染源贡献率。样品来源:(1)大气沉降:用集尘缸收集沉降样,每 3 个月采集一次;(2)灌溉水:每 2 个月采集主要取水口水样,按 300 kg·m⁻² 计算;(3)秸秆还田:取还田用的秸秆样,按 100% 秸秆还田计算;(4)肥料和农药:搜集主售和常用肥料及农药样品,肥料按 45 g·m⁻² (一年两种植季)计算,农药按 75 mg·m⁻² 计算。

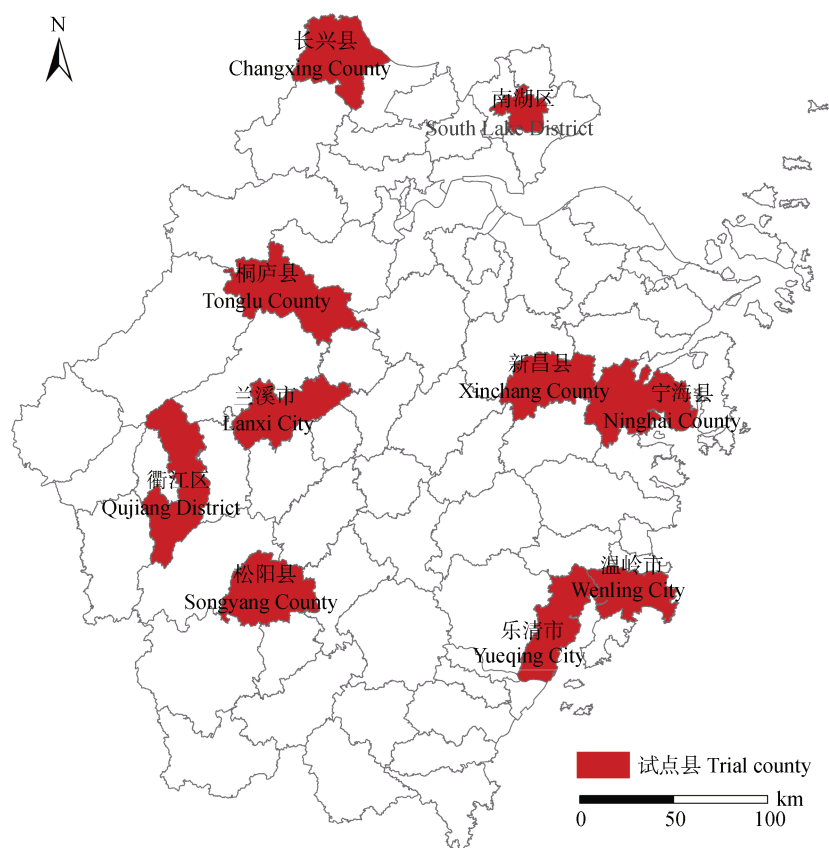


图 2 浙江省农用地土壤重金属污染治理试点区域分布示意图

Fig. 2 Regional distribution of soil heavy metal pollution control pilot in the agricultural soils of Zhejiang Province

农业安全利用技术选用是将“土壤-植物”看作一个重金属迁移的连续体,通过综合采用深翻改土、筛选和应用低积累作物品种、土壤钝化剂和叶面阻

隔剂等适用技术的试验和示范,达到降低土壤中重金属生物有效性和农产品可食用部分重金属含量符合食品限量标准的应用效果,并对产出作物秸秆进

行安全处置的过程和方法(图3)。

土壤、作物等样品采集与分析方法分别按照《农田土壤环境质量监测技术规范》^[11]、《农、畜、水产品污染监测技术规范》^[12]执行。土壤评价方法采用

综合污染指数(P_0)法或单项污染指数(P_1)法, $1 < P_0 \leq 2$ 或 $2 < P_1 \leq 3$ 为轻度污染, $P_0 \geq 3$ 或 $P_1 \geq 5$ 为重度污染, 中度污染介于两者之间。作物限量标准参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》^[13]。

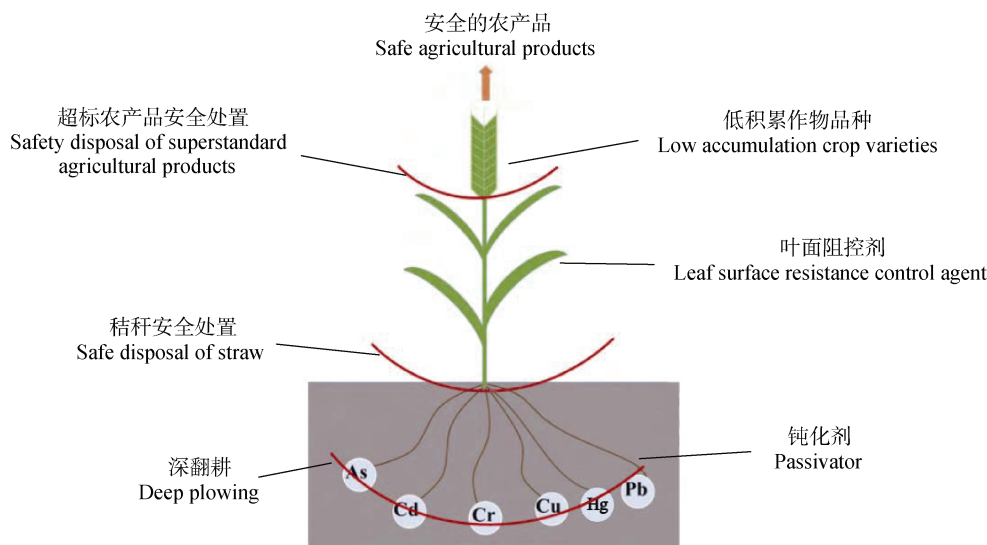


图3 以农产品安全为目标的农业安全利用技术环节

Fig. 3 Technical links of agricultural safety utilization aiming at agricultural product safety

2 结 果

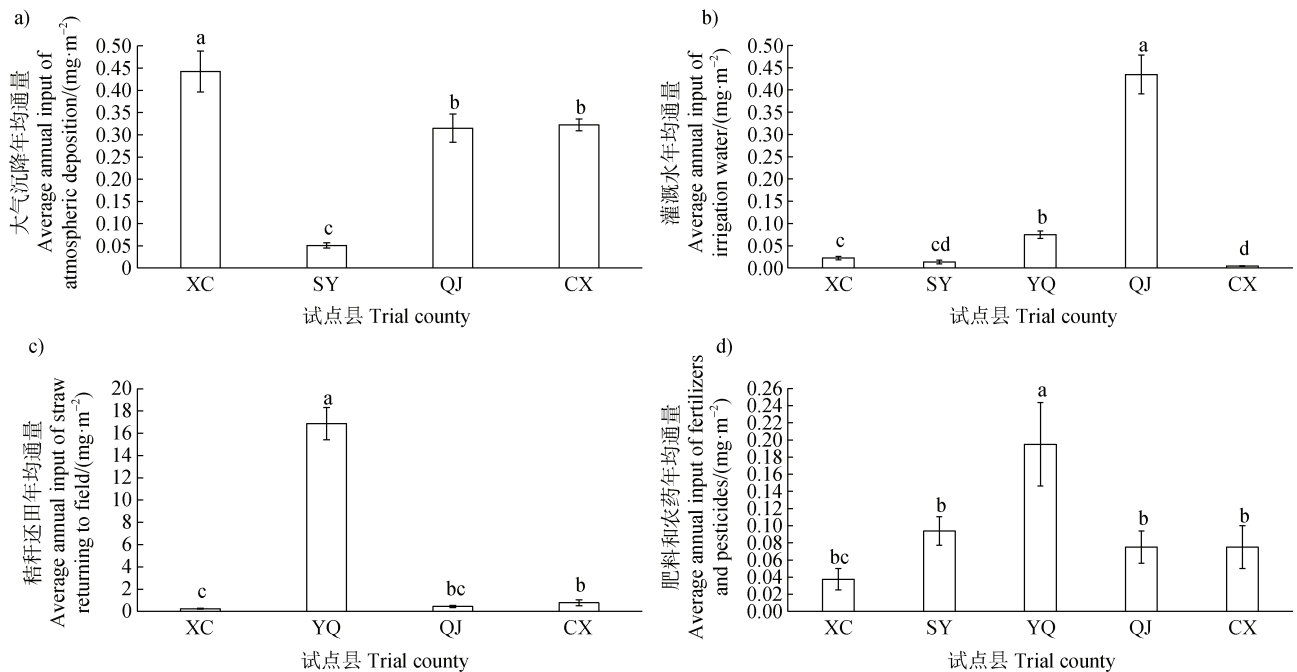
2.1 Cd 不同外来污染源输入通量解析

系统研究农用地土壤重金属输入途径并量化分析, 有助于及时掌握农用地土壤重金属元素积累趋势^[14-15]。因浙江省农用地土壤以Cd污染为主, 选择其中5个试点区的Cd污染源输入进行分析(图4), 结果表明大气沉降和秸秆还田是Cd主要的外源输入途径, 与全国的调查情况^[16-17]基本一致。

试点区大气沉降源年均通量变幅为 $0.05 \sim 0.44 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图4a), 约占总输入量的24%~59%, 是农用地生态系统Cd的主要外来输入源。该结果与湖南省和华北地区农用地土壤中大气沉降重金属输入量占输入总量分别为51.21%~94.74%^[18]和56.5%^[19]的结果相近。区域分布上, 作为全国重要的轴承成品、纺织与制药生产基地的新昌县、采矿业较为发达的衢江区和作为全国规模最大的铅蓄电池生产县的长兴县, 其大气沉降年均通量分别为0.44、0.31和 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 接近或超过全国大气沉降输入年均通量 ($0.40 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[20]。而隶属省级生态工业试点市

(丽水市)的松阳县因整市绿色生态发展, 其大气沉降年均通量仅为 $0.064 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 在上述4个试点中也最低, 说明大气沉降输入途径与区域工业分布相符。除衢江试点区以外, 其他4个试点灌溉水Cd年均通量变幅为 $0.002 \sim 0.075 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图4b), 占输入总量的0.19%~8.53%。但衢江区灌溉水年均通量为 $0.435 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 远高于全国灌溉输入通量的平均值 ($0.02 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[5], 同时也高于珠江三角洲 ($0.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[20]和湖南省 ($0.255 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$)^[18]平均值, 这可能与衢江区矿区开采导致下游的灌溉水污染有关。

秸秆全量还田是普遍应用的保护性耕作技术, 但受污染秸秆还田也是局部区域土壤重金属主要外源输入之一。4个试点区秸秆还田Cd年均通量变幅为 $0.25 \sim 16.9 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图4c), 各试点区秸秆Cd的年均输入通量均超过30%, 尤其是乐清市最高达98%。从现有数据分析, 污染区秸秆收获后应进行回收再无害化利用处理。5个试点中肥料、农药Cd年均通量变幅为 $0.037 \sim 0.195 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ (图4d), 整体上, 由肥料、农药带入的Cd占比不高。



注：XC：新昌县；SY：松阳县；YQ：乐清市；QJ：衢江区；CX：长兴县。下同。Note: XC: Xinchang County; SY: Songyang County; YQ: Yueqing City; QJ: Qujiang District; CX: Changxing County. The same as below.

图4 试点县 Cd 污染源 (a.大气沉降, b.灌溉水, c.秸秆还田, d.肥料和农药) 年均通量

Fig. 4 Average annual input of Cd pollution sources (a. atmospheric deposition, b. irrigation water, c. straw returning to field, d. fertilizers and pesticides) of trial county

2.2 农业安全利用技术的筛选和应用

2.2.1 深翻耕技术应用效果与特征

深翻耕技术通过将底土与表土更新或混匀来稀释耕地表层土壤污染物含量, 结合压埋有机肥, 不仅能提高土壤有机质含量和土壤空隙度, 还能增加土壤水分和养分的含量。对于一般农用地 (耕地), 尤其是对浅表型重金属污染耕地而言是一种简便易行、经济有效的方法。深翻耕一般选择冬闲或春耕翻地时深翻土壤 25~30 cm, 并进行配套施肥, 满足农作物生长需要。试点结果表明, 蔬菜 Cd 平均浓度从 $66.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 $36.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅为 46.0%, 萝卜 Cd 平均浓度从 $30.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低至 $17.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅为 41.4%, 均有显著效果。该技术普遍适用于浙江台州、嘉兴等平原地区, 但不适用于连续两年深翻的稻田、沙漏田、潜育性田以及下层土壤重金属含量高的区域。

2.2.2 系统筛选一批 Cd 低积累作物品种

通过对试点区主推农作物品种的系统筛选, 获得了一批 Cd 低积累品种 (表 1)。其中, 水稻品种 30 个。甬优 538 在兰溪、松阳、乐清、桐庐、温岭、长兴等

6 个试点区均表现为 Cd 低积累的特性, 表明该品种适合在浙江省广泛推广种植。但其他低积累水稻品种的推荐各地区并不相同。这一方面是由于各县区水稻的主栽品种不一致, 另一方面也表明基因型并不是唯一影响因素, 可能与气候、土壤类型等差异有关。旱作作物中, 在新昌、桐庐和长兴筛选获得了 7 个 Cd 低积累小麦品种, 在松阳、乐清、桐庐、宁海和温岭筛选获得了 13 个 Cd 低积累油菜品种。在乐清、桐庐和温岭筛选获得了 8 个 Cd 低积累玉米品种。此外, 在不同地区筛选到覆盆子 (宁海)、龙井茶叶 (松阳)、高粱 (兰溪)、甘蔗 (温岭) 等 Cd 低吸收能力经济作物且可在当地安全种植。基于此, 浙江省以县域为基本单元, 初步建立了适合当地种植的 Cd 低积累品种资源库。

2.2.3 系统比选一批原位钝化材料

原位钝化技术通过施加钝化材料来降低重金属移动性和生物有效性, 减少农作物的吸收, 以达到污染土壤农作物安全利用的目的^[21], 具有投入低、见效快、操作简单等优点, 在我国已广泛推广。浙江省以调节农用地土壤酸度为核心, 重点围绕主要污染元素 Cd、As、

表 1 Cd 低积累水稻和旱作品种筛选

Table 1 Screening of rice varieties and drought-resistant species with a low accumulation of heavy metals

地区 Region	水稻品种 Rice varieties	小麦 Wheat	油菜 Rape	玉米 Corn
新昌县 Xinchang County	Y 两优 5867、甬优 15	华麦 8 号、 华麦 6 号	—	—
兰溪市 Lanxi City	甬优 538、秀水 519	—	浙油 51	—
松阳县 Songyang County	甬优 538、中浙优 8 号	—	浙大 630	—
乐清市 Yueqing City	甬优 1540、甬优 5550、甬优 538、 绍糯 9714、中浙优 8 号	—	浙油 51、赣油杂 6 号、 纯油王 1	银糯 1 号、彩糯 10 号、 科甜 981、 苏科糯 3 号
宁海县 Ninghai County	嘉 58、秀水 134、绍糯 9714、浙两优 274	—	浙油 50、浙双 72	—
衢江区 Qujiang District	早稻：甬粳 15、陵两优 722、株两优 22、 株两优 211、甬粳 69 晚稻：深两优 5814、五山丝苗、 H 优 518、H 优 138 、五优 308	—	—	—
桐庐县 Tonglu County	甬优 538、秀水 519、秀水 03、 秀水 14、秀水 121、秀水 134、 浙梗 86、中嘉 8 号、嘉 58、 甬优 4953	苏麦 188、扬麦 20、 亿麦 9 号、扬麦 25	Fr 裂 6615、浙油杂 108、 浙油 50、SH706、 越优 1402、SH705、 浙大 630、1165、浙大 619	嵊科甜 88、 金糯 628、美玉 16
温岭市 Wenling City	单季稻/晚稻：甬优 538、甬优 1540 、 秀水 519 早稻：中早 39	—	浙油 50	福美 1 号
长兴县 Changxing County	甬优 538、浙梗 88	扬麦 22、华麦 6 号、 华麦 8 号	—	—

Cu，在水稻、小麦、茶叶种植制度下筛选了 20 种钝化剂材料（表 2），主要以石灰性物质类的无基钝化剂以及生物质炭、海藻肥和腐殖酸矿粉类的有机类钝化剂为主。一般在作物播种或移栽前 10 天左右结合翻耕（15~20 cm）一次性施入。目前我国南方很多省份推广施用生石灰（CaO），但其具有腐蚀性，大量施用在短期内会造成土壤的剧烈反应，不利于作物生长，一般推荐量相对较小（75~150 mg·m⁻²），在提高土壤 pH 或降低作物籽粒 Cd 含量方面并不是很有效^[22]。为此，松阳、桐庐等地探索施用石灰石（CaCO₃）粉，结果表明，CaCO₃粉在土壤中的反应

持效性在两年以上，且对作物生长是安全的，推荐量为 300~750 mg·m⁻²，可提高土壤 pH 近 1 个单位，显著抑制作物对 Cd 的吸收。其生产及田间施用成本每平方米仅为 0.45~0.75 元，适合在我国南方酸化地区推广。

2.2.4 硅基和硒基叶面阻控材料应用 重金属叶面阻控剂一般富含硅（Si）、钾（K）、硒（Se）、硼（P）等多种营养元素和天然高活性 Si，常在作物快速生长或生长盛期喷施，增强农作物的抗倒伏和抗病性，降低农产品重金属含量 50%以上^[23]，亦可提高产量。研究^[24]表明无机 Si 经叶面吸收后能减少

表 2 土壤 Cd 钝化材料和叶面阻控材料

Table 2 Soil heavy metal passivation materials and blade surface inhibitor material

地区 Region	钝化材料 Passivation materials	叶面阻控营养强化肥 Blade surface inhibitor nutrient fortified fertilizer
新昌县 Xinchang County	绿沃 4 号、绿沃 2 号	绿生 1 号、绿生 3 号
兰溪市 Lanxi City	小麦：钙基钝化剂 水稻：硅基钝化剂和钙基钝化剂	硅基和硒基叶面肥
松阳县 Songyang County	稻/油：有机-无机型钝化剂、石灰石粉 茶叶：石灰石粉	—
乐清市 Yueqing City	水稻：钙镁磷肥、硅钙镁钾肥、石灰、稻秆生物炭	—
宁海县 Ninghai County	广东“健地丰”、浙江农科调理剂	—
衢江区 Qujiang District	绿沃 4 号、绿沃 2 号	绿生 1 号、绿生 2 号
桐庐县 Tonglu County	石灰石粉、生物质炭、钙镁磷肥	—
温岭市 Wenling City	土壤调理剂（农肥（2015）临字 9844 号）、石灰、生物质炭、 海藻有机肥	钼硒利安
长兴县 Changxing County	水稻田：凹凸棒土、纳米腐殖酸 小麦：绿沃 4 号、有机肥、石灰、海泡石	硒肥、硅锌叶面肥

叶片中重金属的富集，也能不同程度地影响其他部位的吸收性。通过试点，系统比选出叶面阻控营养强化肥 10 种（表 2），基本属于 Si 基和 Se 基叶面肥，结果表明，在适宜时期每间隔 7~10 d 根据实际需求喷施 2~3 次能对作物 Cd 吸收产生有效阻截作用。

2.3 受污染秸秆离田资源化安全处理

秸秆还田是增加土壤有机质的重要措施^[25]，但受污染秸秆会增加土壤重金属的积累风险，因此要根据受污染程度进行分类安全处置。通常作物秸秆对重金属的富集系数和生物量均远大于作物籽实^[26]。通过试点，研发出超积累植物东南景天热解炭化产合成气与生物质炭新技术，形成了秸秆热解气化-农产品烘干-灰渣无害处理一体化技术，构建了“农田重金属污染‘边生产边修复’与秸秆资源化一体工程”体系。综合技术试点应用结果表明，该处理后耕作层土壤全 Cd 含量从 $0.489 \pm 0.042 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $0.341 \pm 0.032 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均下降 30.27%，收获的稻米 Cd 含量从 $0.23 \pm 0.020 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 降低至 $0.09 \pm 0.008 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，平均降低 62.7%，每平方米成本低于 0.75 元，且秸秆得到安全利用，粮食

增产增效显著，实现了低成本高效益，全省适用。松阳县融合当地农业发展，在轻度污染土壤上通过修剪茶枝集中收集并开发为有机栽培基质，生产的基质材料 Cd 含量低于国家标准值，适用于茶产业区域。

2.4 安全利用技术模式实证

通过安全利用技术集成研究可形成多种综合模式。目前应用较为广泛的是以种植低积累作物为基础配合钝化阻控与复种方式等措施来有效降低农产品中可食部位重金属的含量，从而实现轻中度受污染耕地的农业安全利用。如：麦季间作伴矿景天既能有效减少污染土壤中重金属浓度，又能降低小麦及后茬茄子的重金属污染风险，还能保证作物可食部分和伴矿景天生物量不受影响^[27]；石海剂钝化处理+玉米与伴矿景天间作也是一种“边生产、边修复”技术模式^[28]；采用低积累水稻品种配合施用土壤调理剂的组合模式既能保障水稻安全生产又能通过移除水稻秸秆降低土壤中 Cd 浓度^[29]。实际上，不同的安全利用技术使用效果受土壤环境、作物、时长等因素影响，试点结果表明，浙江省探索出的多种安全利用技术模式适用于全省。

2.4.1 适用于 Cd 轻中度污染农用地安全利用技术模式 单作模式: (1) 在水稻种植前施用石灰 ($75\sim 150\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$) 或石灰石粉 ($300\sim 750\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)。 (2) 深耕配施有机肥 (适用于稻田耕作层加犁底层厚度在 25 cm 以上, 且稻田耕作层厚度小于等于 15 cm 、犁底层厚度大于等于 10 cm 的农田)。 (3) 低积累水稻品种 (甬优 538、甬优 1540 等) + 叶面阻控剂 (含 Si、Se 等) + 生育期长期深灌。

轮作模式: (1) 低积累水稻/小麦轮作安全利用模式; (2) 早稻-晚稻轮作安全利用模式。以上两种模式主要为选取低积累早、晚稻以及小麦品种, 结合钝化调理剂与叶面强化阻控剂联合施用技术, 试点区内土壤 Cd 有效性降低 $23.6\%\sim 50.2\%$, 全量降低 8% , 稻米在保证产量稳定的基础上合格率从原先的不足 50% 提高至 95% 以上。 (3) 富集油菜/低积累水稻轮作安全利用模式。在油菜季选取 Cd 高积累油菜品种结合土壤/叶面 Cd 强化提取剂安全利用技术, 在水稻季采取土壤钝化剂优化施用、低积累中稻品种种植与叶面阻控剂优选施用技术集成的方式。该模式下试点区 2017 年和 2018 年稻谷 Cd 平均浓度分别为 $0.112\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.061\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 土壤 Cd 全量和有效态平均分别下降 11% 和 36% 以上, 保证了土壤生态安全和稻谷食用安全。

2.4.2 适用于 Cd 中重度污染农用地安全利用技术模式 (1) 低积累玉米/低积累油菜轮作模式。在 Cd、Cu 重度复合污染的试点区, 配合实施重金属作物富集秸秆移除和旱作替换种植, 达到油菜和玉米籽粒 Cd 浓度分别小于 $0.17\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.07\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 实现了农产品安全生产且试点区安全利用率为 100% 。 (2) 东南景天/油葵轮作“边生产边修复 (PCA-phytoremediation coupled with agronomic safe production)”模式^[30]。该模式选用茎秆高积累油葵品种和多倍体东南景天种苗, 加施专用强化基肥和叶面强化促生剂, 并在收获后将秸秆和景天进行无害化处理。 (3) 柑橘+东南景天套作 PCA 模式。该模式使用提质菌肥下的柑橘园土壤重金属修复技术, 结合增产化肥和柑橘专用肥技术。两种模式下作物可食部位均达标。景天/油葵轮作 PCA 和柑橘-景天套作 PCA 模式通过超积累东南景天每年分别移除土壤 Cd $40.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 $22.5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$, 两年土壤 Cd 全量分别降低 50% 和 36% 以上, 有效态可分别下

降 60% 和 50% 以上。

3 讨 论

3.1 关于可持续安全利用技术框架

从浙江省各试点县的实践结果可见现有的农用地安全利用技术和模式成效较为明显, 但很多适用性技术尚处于边实践、边摸索阶段, 远未形成专业化和实用化的农用地土壤污染治理技术体系。浙江省从土壤健康及农产品质量安全需求出发, 基于“预防为主、保护优先、风险管控”理念和历年试点示范研究成果, 构建以污染源解析、源头削减、安全利用、评价与预警等四方面为主的农用地土壤可持续安全利用技术框架 (图 5), 为农用地土壤污染精准防治提供技术支撑, 有效推进受污染农用地土壤安全利用工作, 全面遏制农用地土壤重金属污染趋势。

3.2 关于农用地土壤污染分类管控体系

浙江省对照国家农用地土壤环境质量类别划分规范要求, 将农用地 (耕地) 划分为优先保护类、安全利用类和严格管控类。针对不同土壤污染程度、农产品质量安全潜在安全风险等, 制定安全利用和风险管控计划, 对污染土壤防治实施分类施策, 可有效提高土壤污染防治成效, 并提出在探明土壤污染成因的基础上进行推广性更强、适用性更广的符合国家战略和发展需求的分级、分类、分区治理模式 (表 3)。下一步持续推进农用地土壤质量类别调查与动态调整, 对超标农产品进行分类处置、分级利用, 严格闭环管理, 严防被污染农产品流入口粮市场, 对产出重金属超标粮食的农用地加强监管, 开展细化分类管理试点, 对污染农用地分级评定、分色标记、分类指导, 制定农用地分级、分类、分区“种植标准”。

3.3 关于受污染耕地安全利用示范建设与评估

尽管历年来安全利用试点示范建设均取得了明显成效, 但各地进展不均、效率偏低, 仍缺乏系统性的可复制可推广的规范标准来引领。因此, 浙江省提出建立受污染农用地 (耕地) 安全利用试验示范和推广应用规范标准及其技术路线 (图 6), 重点在酸性土水稻种植区、高集约化蔬菜基地、地质元素高背景区等土壤污染潜在高风险地区建设一批集中推进示范区, 并对动态衡量安全利用示范推广效果进行赋分评估 (表 4)。

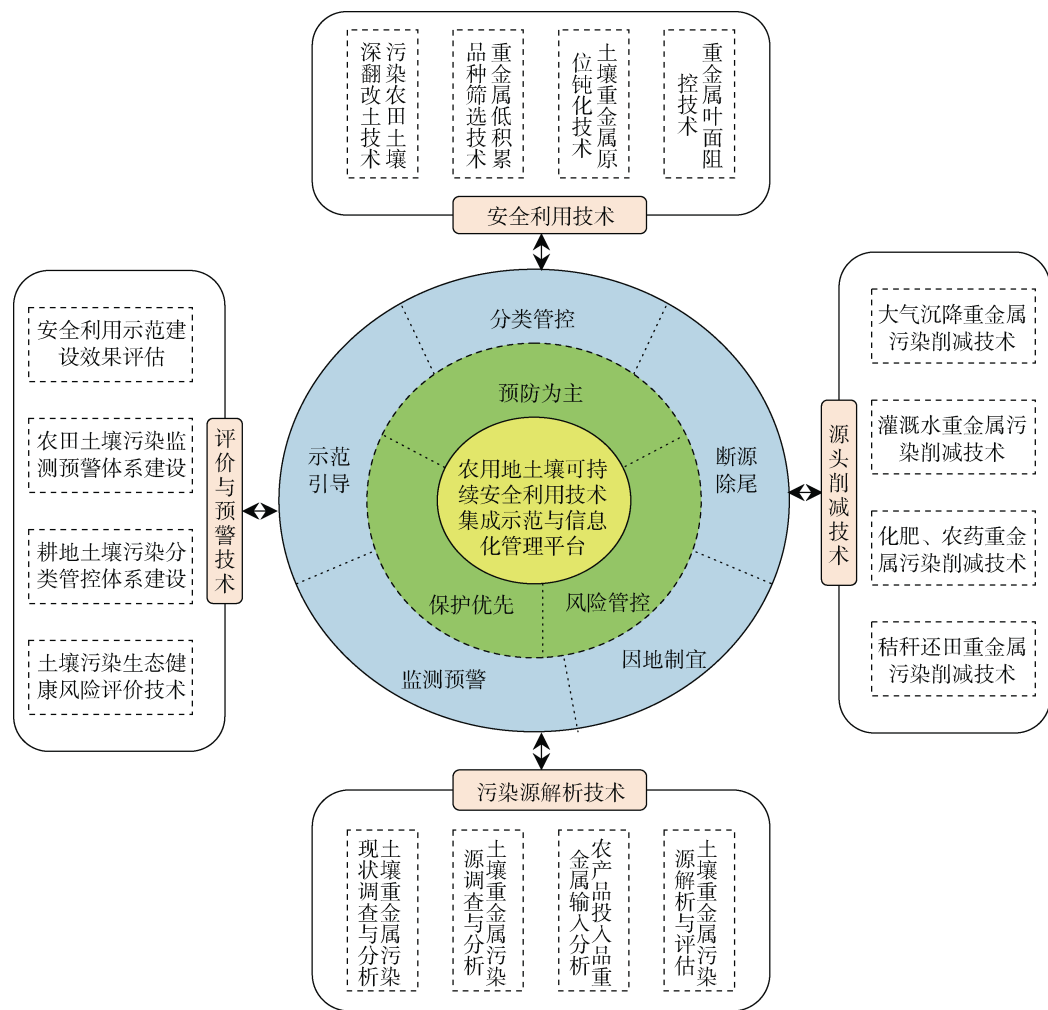


图5 农用地土壤可持续安全利用技术框架
Fig. 5 Technical framework for sustainable and safe utilization of agricultural soil

表3 浙江省农用地（耕地）土壤污染分类管控体系

Table 3 Classification control system of agricultural land (cultivated land) soil pollution in Zhejiang Province		
污染程度	类别	主要管控措施
Pollution degree	Classification	Main control measures
无污染	优先保护类	纳入永久基本农田实施严格保护，制止耕地“非农化”、防止“非粮化”，综合采取占补数量和质量平衡，推进持续高标准农田建设、优化提升粮食生产功能区、周边污染企业搬迁整治等综合性措施，确保其面积不减少、土壤环境质量不下降
No pollution		
轻中度污染	安全利用类	在保证农产品质量安全的前提下，优化总结经验做法，以县或设市区为单位制定“一地一方案”，采用“水肥优化调控、原位阻隔治理、低积累品种替代”为主要模式的农产品安全生产措施，建立农产品种植负面清单，开展安全利用率核算，消除或降低食用农产品污染物超标风险
Light to moderate pollution		
重度污染	严格管控类	建立重点监管地块清单，进行种植结构调整，全面退出食用农产品种植，改种非食用农作物或者退耕还林还草。鼓励通过客土置换、生物修复等措施，逐步降低土壤中污染物浓度，确保严格管控类耕地面积不增加
Heavy pollution		

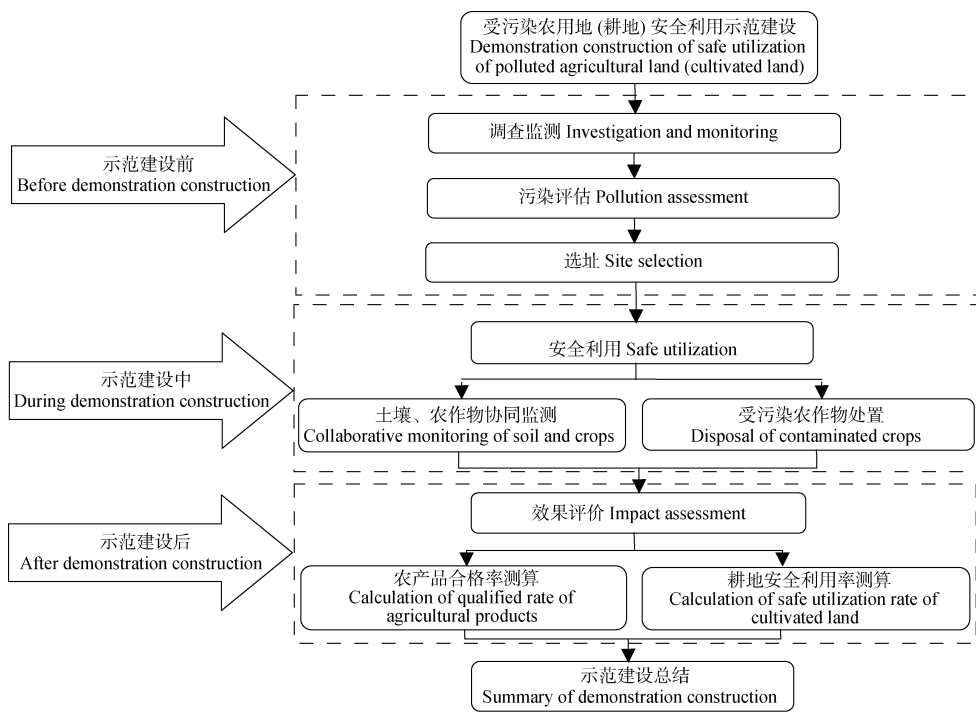


图 6 受污染农用地（耕地）安全利用示范建设技术路线图

Fig. 6 Technical roadmap for demonstration construction of safe utilization of polluted agricultural (cultivated) land

表 4 安全利用示范建设技术效果评分表

Table 4 Scoring table for the technical effect of safe utilization demonstration construction

评估指标	分值	指标内容	评分标准
Evaluation index	Score	Index content	Scoring criteria
技术针对性	15	①技术实施方案可行性	①通过专家论证（4分）
Technical pertinence		②项目实施区域合理性	②选址符合要求，示范面积达标（4分）
		③污染源解析及防控措施情况	③有污染源解析及污染防控措施（7分）
技术有效性	60	①农产品可食部分的安全性	①连续2年及以上目标污染物达标（GB 2762）（15分），1年达标（5分），连续3年不达标（0分）
Technical effectiveness		②土壤重金属的生物有效性	②降低50%及以上（15分），按比例减少得分
		③污染治理适用的品种和产品筛选情况	③筛选出一批品种和产品且获得专利（15分），品种和产品稳定性、经济性较差（5分），未筛选出（0分）
		④污染治理的单项技术或技术模式研究情况	④研究出经济合理的污染治理单项技术或技术模式3种及以上且得到有效推广和应用（15分），研究出1~2种（10分），未研究出（0分）
技术安全性	25	①土壤理化性状改善情况	①土壤pH、有机质含量、阳离子交换量等土壤理化性状有明显改善（9分），无明显变化（4分），明显下降（0分）
Technical security		②治理措施对土壤二次污染情况	②治理措施未造成土壤二次污染（9分），造成土壤二次污染（未通过示范评估）
		③受污染农作物秸秆及农产品的安全处置情况	③受污染农作物秸秆无害化安全处置（3分），超标农产品安全处置（4分）
总分	100	评分说明：评分90分及以上为优秀，70（含）~89分为良好，60（含）~69分为合格，60分以下为不合格（未通过示范评估）	
Total score			

4 结 论

通过浙江省农用地土壤可持续安全利用的研究和实践,在受污染耕地集中区域优先组织开展治理与修复试点示范工程,重点实施以“原位阻隔治理、低累积品种替代、水肥优化调控”为主要技术的水稻等农产品安全生产技术措施,梳理了农用地土壤重金属污染安全利用和修复治理采用的主要技术模式和应用实例,构建“防、控、治”为核心的受污染耕地分级分类分区管控技术体系,取得了明显成效,积累了重要经验。但农用地土壤污染具有隐蔽性,治理难度大、周期长,加之土地资源紧张,粮食供给和粮食安全压力巨大,农用地土壤重金属污染形势总体形势依然严峻,未来应在土壤污染源头综合防治、土壤环境质量类别动态调整、土壤污染分类精准施策等方面进一步规范和加强受污染农用地(耕地)安全利用和分类管控,建立健全农用地土壤-农产品质量监测预警体系和统一的大数据监管“云平台”,全面提升农用地可持续安全利用水平。

参考文献 (References)

- [1] Zhang J Z, Li Y Z, Li Y, et al. Advances in the indicator system and evaluation approaches of soil health[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (3): 603—616. [张江周, 李奕赞, 李颖, 等. 土壤健康指标体系与评价方法研究进展[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (3): 603—616.]
- [2] Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Report on the national general survey of soil contamination[EB/OL]. [2014-04-17]. http://www.gov.cn/govweb/foot/2014-04/17/content_2661768.htm. [环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. [2014-04-17]. http://www.gov.cn/govweb/foot/2014-04/17/content_2661768.htm.]
- [3] Hu W Y, Tao T T, Tian K, et al. Status and prospect of farmland soil environmental quality management in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (5): 1094—1109. [胡文友, 陶婷婷, 田康, 等. 中国农田土壤环境质量管理现状与展望[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (5): 1094—1109.]
- [4] Liao Q L, Ren J H, Xu W W, et al. Distribution inhomogeneity of Cd pollution of farmland soil on a plot-scale[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (6): 1390—1400. [廖启林, 任静华, 许伟伟, 等. 田块尺度上的农田土壤 Cd 污染分布不均匀性[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (6): 1390—1400.]
- [5] Luo L, Ma Y B, Zhang S Z, et al. An inventory of trace element inputs to agricultural soils in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90 (8): 2524—2530.
- [6] Wang X K, Zhang Y X, Huang B, et al. Accumulation and sources of heavy metals in agricultural soil in a city typical of the Yangtze River Delta, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (1): 82—91. [王信凯, 张艳霞, 黄标, 等. 长江三角洲典型城市农田土壤重金属累积特征与来源[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (1): 82—91.]
- [7] Zhu Y W, Duan L L, Zhou Y, et al. Spatial pattern and interrelation of total Cd in soils and crops across the agricultural regions of Zhejiang Province, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31 (1): 79—84. [朱有为, 段丽丽, 周银, 等. 浙江省主要优势农产品产地土壤-农作物镉含量空间分布及相关性研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31 (1): 79—84.]
- [8] Luo Y M, Teng Y. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1137—1142. [骆永明, 滕应. 中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1137—1142.]
- [9] Zhang Y N, Liu P, Liu J H, et al. Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils around the e-waste dismantling sites in Taizhou City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41 (7): 1442—1451. [郑宇娜, 刘鹏, 刘金河, 等. 台州市典型电子垃圾拆解场地周边农田土壤重金属污染特征和来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41 (7): 1442—1451.]
- [10] Notice of the general office of Zhejiang Provincial People's Government on printing and distributing the three-year action plan for soil pollution prevention and control in agricultural "two areas" (2015-2017) [EB/OL]. [2015-09-02] https://www.zj.gov.cn/art/2015/9/2/art_1229621584_57177.html. [浙江省人民政府办公厅关于印发农业“两区”土壤污染防治三年行动计划(2015-2017年)的通知[EB/OL]. [2015-09-02] https://www.zj.gov.cn/art/2015/9/2/art_1229621584_57177.html.]
- [11] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Technical rules for monitoring of environmental quality of farmland soil: NY/T 395-2012 [S]. Beijing: China Standard Press, 2012. [中华人民共和国农业农村部. 农田土壤环境质量监测技术规范: NY/T 395-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.]
- [12] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Procedural regulations regarding monitoring of pollutants in the produces of agriculture, animal husbandry and fishery: NY/T 398-2000[S]. Beijing: China Standard Press, 2000. [中华人民共和国农业农村部. 农、畜、水产品污染监测技术规范: NY/T 398-2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.]
- [13] State Health Commission of the People's Republic of China, State Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, National food safety standard-Limit of pollutants in food: GB 2762-2022[S]. [中华人民共和国国家卫生健康委员会, 中华人民共和国国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中

- 污染物限量: GB 2762-2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.]
- [14] Huang Y. The exploring of heavy metal pollution source apportionment in various scale of agricultural soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. [黄颖. 不同尺度农田土壤重金属污染源解析研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.]
- [15] Tong W B, Guo B, Lin Y C, et al. Assessment of input-output patterns of Cd and Pb of typical heavy metal polluted agricultural land in Quzhou[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(5): 1061—1069. [童文彬, 郭彬, 林义成, 等. 衢州典型重金属污染农田镉、铅输入输出平衡分析[J]. 核农学报, 2020, 34(5): 1061—1069.]
- [16] Peng H, Chen Y, Weng L, et al. Comparisons of heavy metal input inventory in agricultural soils in North and South China: A review[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 776—786.
- [17] Zhu Z, Yang X D, Xu Z Q, et al. Foliar uptake, translocation and accumulation of heavy metals from atmospheric deposition in crops[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(2): 332—345. [朱臻, 杨相东, 徐章倩, 等. 农作物叶片对大气沉降重金属的吸收转运和积累机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 332—345.]
- [18] Yi K X, Fan W, Chen J Y, et al. Annual input and output fluxes of heavy metals to paddy fields in four types of contaminated areas in Hunan Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634(7): 67—76.
- [19] Liu J, Pan Y P, Shi H D. Atmospheric deposition as a dominant source of cadmium in agricultural soils of North China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(8): 1698—1708. [刘进, 潘月鹏, 师华定. 华北地区农田土壤镉来源及大气沉降的贡献[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1698—1708.]
- [20] Zhou Y Z, Shen W J, Li Y, et al. A study of prediction and early-warning forecast on geochemical accumulation of soil heavy metals based on flux model in Pearl River Delta economic zone (China) [J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(10): 1115—1125. [周永章, 沈文杰, 李勇, 等. 基于通量模型的珠江三角洲经济区土壤重金属地球化学累积预测预警研究[J]. 地球科学进展, 2012, 27(10): 1115—1125.]
- [21] Liu X M, Zhao J, Xu J M. Research on immobilization of heavy metals in contaminated agricultural soils—Bibliometric analysis based on Web of Science database[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(2): 445—455. [刘杏梅, 赵健, 徐建明. 污染农田土壤的重金属钝化技术研究——基于Web of Science数据库的计量分析[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 445—455.]
- [22] Wang M E, Yang Y, Chen W P. Manganese, zinc, and pH affect cadmium accumulation in rice grain under field conditions in southern China[J]. Journal of Environmental Quality, 2018, 47(2): 306—311.
- [23] Gao M, Zhou J, Liu H L, et al. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631/632: 1100—1108.
- [24] Zhang Y P, Tan X X, Chen X Y, et al. Effects of inorganic silicon foliar fertilizer and soil conditioner on plumbum and cadmium absorption in rice[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(2): 388—393. [张宇鹏, 谭笑潇, 陈晓远, 等. 无机硅叶面肥及土壤调理剂对水稻铅、镉吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 388—393.]
- [25] Zhang Y Y, Mo F, Han J, et al. Research progress on the native soil carbon priming after straw addition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(6): 1381—1392. [张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1381—1392.]
- [26] Jiang B, Dong H Z, Gao Z J, et al. Enrichment and migration characteristics of heavy metal in soil-maize system and discussion on straw returning[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7797—7805. [姜冰, 董红志, 高宗军, 等. 土壤-玉米重金属富集迁移特征及秸秆还田[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7797—7805.]
- [27] Ju S Y, Wang J, Mi Y Y, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by intercropping with *Sedum plumbizincicola* and *Triticum aestivum* and rotation with *Solanum melongena*[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(8): 2181—2186. [居述云, 汪洁, 宓彦彦, 等. 重金属污染土壤的伴矿景天/小麦-茄子间作和轮作修复[J]. 生态学杂志, 2015, 34(8): 2181—2186.]
- [28] Chen G H, Zu Y Q, Zhan F D, et al. Effects of passivators on the growth and cadmium accumulation of intercropped maize and *Sedum plumbizincicola*[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(9): 2103—2110. [陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 等. 钝化剂处理对玉米与伴矿景天间作下植株生长及镉累积特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2103—2110.]
- [29] Meng L. Safe utilization of slightly-moderately cadmium-polluted farmland soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. [孟龙. 轻中度镉污染农田土壤安全利用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.]
- [30] Tong W B, Cao X R, Jiang J F, et al. Study on the remediation patterns of rotation or intercropping between hyperaccumulator *Sedum alfredii* and oil crops in cadmium and lead co-contaminated agricultural soils[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2021, 47(2): 212—222. [童文彬, 曹雪蕊, 江建锋, 等. 超积累东南景天与油料作物轮间作修复农田镉铅污染的技术模式研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2021, 47(2): 212—222.]

(责任编辑: 陈荣府)