

# 土地整治中底泥质耕作层土壤的构建方法及应用效果

刘永兵<sup>1</sup>, 李翔<sup>1\*</sup>, 刘永杰<sup>2</sup>, 程言君<sup>1</sup>, 张建中<sup>1</sup>, 臧振远<sup>1</sup>,  
许杰峰<sup>3</sup>, 杨文杰<sup>4</sup>, 沈来新<sup>5</sup>, 赵从举<sup>6</sup>, 郭逸飞<sup>1</sup>

(1. 轻工业环境保护研究所, 工业场地污染与修复北京市重点实验室, 北京 100089; 2. 山西农业大学林学院, 太谷 030801;  
3. 海口市土地整治重大工程领导小组办公室, 海口 570312; 4. 海南省农垦设计院, 海口 570226;  
5. 北京市水利规划设计研究院, 北京 100048; 6. 海南师范大学地理与旅游学院, 海口 571158)

**摘要:** 开展底泥质耕作层土壤的构建方法研究, 是确保土地整治工程质量和效益的重要举措。该研究以河流疏浚底泥土地利用为主线, 从底泥质耕作层土壤构建方法的基础理论、底泥环境肥力调查评价、底泥重金属稳定化修复、底泥改造土壤工程及底泥应用案例等方面系统地探讨了土地整治工程中底泥质耕作层土壤构建方法的基础、内容、设计方法、施工工艺、工程参数。污染底泥修复后大田种植空心菜试验表明: 重金属含量可达到无公害蔬菜安全标准、Cd降低率在38.61%~85.69%, 稳定化修复明显降低蔬菜重金属含量; 底泥质耕层土壤适宜开展种植, 可提蔬菜高产量8.7%~13%, 增加土壤有机质含量0.95~2.18倍。

**关键词:** 土地利用; 土壤; 构建; 河道; 底泥; 重金属; 修复; 耕作层

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.037

中图分类号: S281; F301.24

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0242-07

刘永兵, 李翔, 刘永杰, 等. 土地整治中底泥质耕作层土壤的构建方法及应用效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 242-248.

Liu Yongbing, Li Xiang, Liu Yongjie, et al. Construction method and application effect on tillage layer soil by sediment in land consolidation engineering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 242-248. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

土地整治是对低效利用、不合理利用和未利用土地进行综合治理, 对农田耕作层土壤质量具有显著的改善效果<sup>[1-2]</sup>; 耕作层土壤是耕地的精华, 是土地整治的核心内容。耕作层土壤的构建是依据相关标准规范, 结合项目区土壤资源的特征、可得性、运距及工程投资等因素制定出执行方案<sup>[3-6]</sup>; 也直接影响土地整治工程的质量与效果, 具有重要意义。

研究表明, 部分区域农田土壤侵蚀严重, 存在耕作层土壤数量和质量逐年降低或耕作层缺失的现象<sup>[5-7]</sup>; 土地整治与复垦工程中耕作层土壤构建通常采用表土剥离技术或客土法, 以实现保护耕地优质资源、增加土层厚度、改善土体构型、提高养分水平、提升耕地数量和质量<sup>[6-13]</sup>。目前, 耕作层土壤构建中存在客土土源单一、利用成本差异较大、技术方法不完善、施工工艺不规范、

应用效果差等问题<sup>[7-14]</sup>。笔者研究发现在区域性耕作层土壤缺失区域(如: 南方喀斯特岩溶地区、海南岛火山岩地区、沿海土地沙化地区等), 表土剥离和客土法不能很好地解决土地整治中耕作层土壤不足的现状。因此, 为了充分利用土地整治区域内丰富的类土壤资源(如河道疏浚底泥等), 通过实施土壤构建、土壤修复、土壤改造等措施综合集成底泥质耕作层土壤技术模式, 可补充耕作层土壤资源量。目前, 中国河流底泥资源丰富, 底泥中既含有害成分, 也含有丰富的氮、磷及有机质<sup>[15-16]</sup>; 疏浚底泥利用模式多样, 土地资源化利用是一种最具发展潜力的处置方式, 兼具经济效益与环境效益<sup>[17-19]</sup>。底泥中污染及生态风险性评价、底泥污染修复技术、土地利用工程工艺参数、底泥利用食品安全评价等方面研究缺乏均是制约底泥大规模土地利用的重要因素<sup>[20-24]</sup>。

本文以底泥土地利用为主线, 从底泥质耕作层土壤构建方法的基础理论、底泥环境肥力调查评价、底泥重金属稳定化修复、底泥改造土壤工程及应用效果等方面系统地探讨了土整工程中底泥质耕层土壤构建的基础、内容、设计方法、施工工艺及应用效果, 这对于如何利用河流疏浚底泥在土地整治过程中建造一个更加适宜于植物生长的土壤介质并迅速提高土壤肥力、改善耕作层土壤质量、提高土地整治工程效益和保障农地可持续利用都具有十分重要的理论和现实意义。

收稿日期: 2014-08-18 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 海南省海口市南渡江流域土地整治重大工程科研项目: 河道底泥在土地整治工程中的资源化应用技术开发研究; 北京市科委项目(D09040903700802); 北京市科学技术研究院改革与发展研究课题(2015A-5)

作者简介: 刘永兵, 男, 山西保德人, 副研究员, 主要从事土地整治、土壤修复、生态修复研究。北京 轻工业环境保护研究所, 100089。

Email: liuyongbing21@163.com。

\*通信作者: 李翔, 男, 山东招远人, 副研究员, 主要从事污染场地修复方面的研究。北京 轻工业环境保护研究所, 100089。Email: liepi\_lixiang@163.com。

## 1 底泥质耕作层土壤构建的基础及主要内容

### 1.1 基本理论

1) 环境学理论：重金属污染底泥经稳定化修复处理后，容易被植物吸收的可交换态含量大幅降低，残渣态含量大幅增加，重金属迁移性大幅降低，减少了对环境的影响。2) 土壤学理论：底泥改造成耕作层土壤后，需适宜农作物种植；可持续地为植物生长提供养分和合理的土壤结构，确保作物增产高产，这是底泥改造土壤的指导原则。3) 食品安全理论：底泥质耕作层土壤上所种植物食品重金属含量必须符合《食品中污染物限量 GB 2762—2012》或《农产品安全质量无公害蔬菜安全要求 GB 18406.1—2001》中的相关限量指标，确保农作物食品安全。

### 1.2 技术流程

底泥质耕作层土壤构建方法是一个多环节、有机结合的综合分析过程。基于底泥重金属和养分含量数据全面评价出底泥环境状况、肥力特征，提出底泥分类利用的适宜性；针对可利用底泥因地制宜地提出底泥稳定化修复模式；结合整治区土方平衡，制定出底泥改造土壤措施；最后在大田构建底泥质耕作层土壤，开展大田原位试验应用效果监测，具体流程见下图 1。

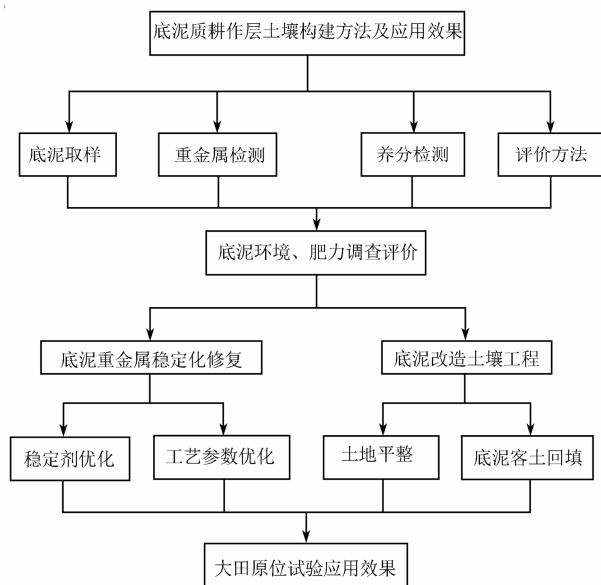


图 1 底泥质耕作层土壤的构建方法流程图

Fig.1 Flow chart of reconstruction of tillage layer soil by sediment

### 1.3 主要内容

底泥质耕作层土壤构建是在缺少客土源的土地整治工程用地范围之内，利用疏浚底泥，采用适当的农地整理施工工艺，并应用物理、化学或生态措施，人为构建或培育一个完善的耕作层土壤系统，达到能提升耕地质量的目的。该方法包括底泥环境及肥力状况调查评价、底泥重金属稳定化修复、底泥改造土壤工程设计及应用效果监测等方面，主要内容概况如下：

1) 底泥环境及肥力调查评价：依据相关标准进行河

流底泥现场系统布点取样；对样品进行室内检测分析；依据有关评价指标及限值进行底泥样品环境及肥力评价，探明所调查河流底泥污染类型、污染强度、污染等级、污染空间分布、分类疏浚底泥量、养分状况、质地分类、综合规划利用方向等内容。该环节提出底泥分类利用方向，并指导底泥分类疏浚及应用。

2) 底泥重金属稳定化修复：原位稳定化修复是向污染土壤中施加稳定剂，调节和改变土壤物理化学性质，达到修复目的，属比较成熟的修复技术<sup>[25]</sup>。依据底泥分类利用方向，底泥重金属不超标的则不需要稳定化修复设计；底泥轻微污染的需开展稳定化修复设计<sup>[25-26]</sup>。以轻微污染底泥为修复对象，在室内进行稳定剂配方的正交试验<sup>[26]</sup>，提出修复底泥效果好、成本低的稳定化修复工程工艺、参数及稳定剂配方等。

3) 底泥改造土壤工程：基于待整治区土地适宜性评价、将修复后底泥改造成肥力良好、结构适宜的种植土壤；结合项目区土方平衡计算，确定底泥客土回填方案。

4) 应用效果监测与评价：对修复改造后土地进行种植土壤肥力、土壤质地、作物重金属含量、作物产量、种植收益等指标的跟踪监测，开展应用效果评价及环境风险控制。

## 2 底泥环境及肥力调查评价

### 2.1 河流参数调查

河流调查内容分为两类，1) 河流地理特征类指标：水域面积、河流长度、河流宽度、流向、水流速度、河道比降、河道断面形状、水文水资源等，作为底泥布点取样基础依据；2) 河流环境类指标：河流水质、河泥储量、污染源等，便于后期开展底泥评价分析应用。

### 2.2 底泥采样及样品检测

底泥布点采样遵循系统性、代表性、全面性、科学性、可操作性等原则，依据《沉积物质量调查评估手册》<sup>[27]</sup>与河流参数，采用网格布点法和断面布点法，进行河流底泥系统布点取样。采样工具为抓取式采样器（grab sampler）或钻取式采样器（core sampler），根据疏浚底泥的深度确定底泥采样深度。采用《HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范》<sup>[28]</sup>对底泥样品重金属和肥力指标进行检测，分析质控数据要合理，应达到相应精度要求。

### 2.3 底泥评价方法

结合底泥土地利用目标和底泥调查检测数据，参照《土壤环境质量标准 GB15618—1995》、《全国第二次土壤普查有关标准：肥力指标及评价限值》<sup>[17]</sup>等标准值对底泥进行评价。底泥环境评价常规采取以下几种方式：1) 底泥重金属单项污染指数法，用以识别单项指标的重金属污染类型及污染状况；2) 内梅罗综合污染指数法，用以评价底泥各污染物对土壤环境质量的影响，根据表 1 中的内梅罗综合污染指数来划定底泥综合污染等级<sup>[29]</sup>，底泥属中度污染时不适合修复用作耕作层土壤；3) 潜在生态危害指数法，是综合考虑底泥重金属含量、重金属生态效应、环境效应及毒理学，采用具有可比的、等价属性指数分级法进行评价，潜在生态危害指数分级标准

如表 2；当底泥综合生态风险等级为Ⅳ、Ⅴ时不宜用作构建耕作层土壤。

表 1 土壤污染水平分级标准  
Table 1 Standard of soil pollution classification

等级 Grade	$P_i$	$P_{\text{综}}=I$	污染等级 Degree of pollution	污染水平 Standard of pollution
1	$P_i < 1$	$P_{\text{综}} < 0.7$	安全	清洁
2	$P_i < 1$	$0.7 \leq P_{\text{综}} < 1$	警戒级	尚清洁
3	$1 \leq P_i < 2$	$1 \leq P_{\text{综}} < 2$	轻微污染	土壤轻污染，作物开始受到污染
4	$2 \leq P_i < 3$	$2 \leq P_{\text{综}} < 3$	中度污染	土壤作物受到中度污染
5	$3 \leq P_i$	$3 \leq P_{\text{综}}$	重污染	土壤作物均受污染已相当严重

注： $P_i$  为底泥单一污染物环境质量指数； $P_{\text{综}}$  为底泥各污染物综合环境质量指数； $I$  为内梅罗综合污染指数。  
Note:  $P_i$  is environmental quality index of individual contaminant in the sediment;  $P_{\text{综}}$  is comprehensive environmental quality index of all contaminants in the sediment;  $I$  is the Nemerow pollution index.

表 2 单项及综合潜在生态风险评价指数及分级标准  
Table 2 Individual and general indices and grade for ecological risk assessment

$E_r^i$	单项生态风险等级 Individual ecological risk grade	RI	综合生态风险等级 General ecological risk grade
$E_r^i < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微Ⅰ
$40 \leq E_r^i < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等Ⅱ
$80 \leq E_r^i < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强Ⅲ
$160 \leq E_r^i < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强Ⅳ
$E_r^i \geq 320$	极强	—	极强Ⅴ

注： $E_r^i$  为单项生态风险指数；RI 为综合生态风险指数。  
Note:  $E_r^i$  is individual ecological risk indices; RI is general ecological risk indices.

底泥肥力评价方法：1) 对比法，将底泥肥力指标逐一与《全国第二次土壤普查的土壤养分分级标准》进行比较，得到该样品肥力指标的丰缺程度；2) 模糊综合评价法，采用模糊数学法，得到不同样品的肥力等级<sup>[30]</sup>。

综合底泥样品环境评价、肥力评价结果提出低度污染（Ⅱ）等级以下、肥力为二级水平以上的底泥即可土地利用。基于河流地理参数和 GIS 软件对底泥环境与肥力评价结果进行空间分析，计算出河流底泥分类利用空间布局及资源量，为底泥分类疏浚提供空间依据。

3 底泥重金属稳定化修复

3.1 稳定剂及工艺参数优化

稳定化修复所选用稳定剂种类、用量与土壤中重金属元素种类及污染程度有直接关系<sup>[25-26]</sup>；底泥中 Cu、Zn、Cd、Pb 等元素适合稳定化修复，稳定剂采用磷酸盐、镁系氧化物、某黏土矿物等复合物<sup>[22-26]</sup>。借助 BCR (European Comunities Bureau of Reference) 连续提取法分析底泥中 Cu、Zn、Cd、Pb 的弱酸提取态、可氧化态、可还原态及残渣态含量<sup>[20]</sup>，其中弱酸提取态和残渣态所占的比例及其转化特征是直接影响底泥重金属修复目标和效果的关键指标<sup>[25]</sup>。

选择典型污染底泥样品为稳定化供试材料，设置磷酸盐、镁系氧化物、某类黏土矿物的不同组分配方，进

行室内正交试验研究，以稳定化后底泥重金属形态及浸出毒性试验数据均达标的试验处理组份确定为最优稳定剂配方。土壤质地、水分因素及稳定化时间等工艺工况条件对稳定化修复速度和效果也有影响较大<sup>[25-26]</sup>，故选用稳定剂配方用量、土壤水分条件、土壤稳定化时间进行三因素三水平的正交试验，确定修复底泥效果好、成本低、可操作的稳定剂用量水平和稳定化修复工程工艺参数。稳定化底泥修复后应用到土地整治工程中，并进行大田种植验证试验，试验选择叶菜类作物，室内测试蔬菜中重金属含量能否达到《食品中污染物限量 GB 2762—2012》标准，以检验稳定化修复效果。

3.2 底泥修复施工设计

底泥稳定化修复施工设计是将修复工程技术方案应用到大田工程中，据已有应用经验，修复流程如下：人工将设计用量稳定剂施撒于平整好的底泥田块；采用机械旋耕进行多次旋耕、混合、破碎；旋耕前期对底泥进行水分控制（底泥水分的湿-干交替变化），确保稳定剂与底泥重金属充分发生反应，加速修复速度和修复效果<sup>[26]</sup>。修复后的底泥休耕 2 个月（也称土壤老化），即完成底泥稳定化修复过程。

4 底泥改造土壤工程

4.1 待整治土地地质环境调查

对待整治土地地质环境进行调查，不仅可摸清修复后底泥应用区域耕作层土壤本底现状，又为底泥构建耕作层土壤应用提供基础数据，其调查内容除了满足《土地整理项目测绘、勘察相关技术要求》外，还应包括如下内容：1) 查明项目区内土层厚度分区、土壤种类、质地及肥力等级；2) 查明现有土壤环境质量状况；3) 提出待整治区现有耕作层土壤质量等级及土地整治规划设计的种植制度。

4.2 待整治土地平整原则及工艺

土地平整工程工艺是土地整理实施中的重要环节，要遵循因地制宜地尽量减少土地平整中开挖和运输土石方的工程量、农田灌排等水利实施布局、田块适宜种植作物特征等原则，最终通过土地平整设计达到地块规整、土层增厚、方便耕作、有效耕地面积增加、土地利用效率提高的目的。

在土地平整工程设计时要充分结合待整治土地区域的具体地形、地貌等自然条件，灌溉排水系统、田间道路、农田防护等工程布局因素，依据《土地开发整理规划编制规程 TD/T1011—2000》、《土地开发整理项目规划设计规范 TD/T1012—2000》进行土地平整分区、土方平衡计算、土方平衡方案设计，确定底泥客土田块及回填量。考虑到底泥客土利用的特殊性和可操作性，设计中要依据土方回填设计高程和现存耕层土壤厚度计算每个底泥利用田块的底泥用量、回填厚度、稳定剂用量、底泥回填面积等工程参数。

4.3 底泥客土回填施工工艺

该阶段是集底泥铺设、土地平整及底泥稳定化修复于一体的施工工艺与参数设计；依据《土地开发整理规划编制规程 TD/T1011—2000》制定出项目底泥质耕作层

土壤构建应用的可行性方案，具体底泥构建土壤工艺流程介绍如图 2 所示。



图 2 底泥构建土壤工艺流程  
Fig.2 Technological process chart of reconstruction of soil by sediment

- 1) 原料进场环节：待回填底泥田块进行准确的工程放线。将可利用的疏浚底泥直接运输到放线田块内，分散堆放；既能让底泥自然脱水，又节约底泥铺设成本。依据现场运输路线及底泥回填量，制定出底泥运距、装卸量、运输总量等工程参数。
- 2) 底泥铺设平整环节操作流程如下：①采用推土机或大型长臂钩机对所分散堆放底泥平整，平整后田块底泥要达到设计厚度和回填高程；②平整破碎后底泥直径控制在 $\leq 5\text{ cm}$ ；③平整后田块底泥铺设厚度均匀、田面不留死角，厚度误差在 $\pm(3\sim 5)\text{ cm}$ 内；结合铺泥厚度和面积计算底泥铺设工程量。
- 3) 稳定剂施加环节：①采用人工施撒稳定剂（与常规农田人工施基肥方式一致），按照设计用量施用；②稳定剂均匀施撒于平整好的底泥表面，底泥田面均匀；③施撒稳定剂避开雨天，结合稳定剂用量和施用面积计算稳定剂施加工程量。
- 4) 旋耕混合环节：①采用卧式旋耕机（旋耕厚度 $\geq 35\text{ cm}$ ），在田块单元内铺设底泥；②底泥、稳定剂旋耕混合时间要依据底泥的实际含水率来定，第 1、2 次旋耕混合底泥含水率控制在 25%左右进行，第 3 次旋耕水分在 20%以下进行，旋耕间隔期间进行浇水干湿反应，共计 2 次；③底泥和稳定剂要混合均匀，依据旋耕次数、面积等计算旋耕工程量。
- 5) 土壤老化环节：待底泥旋耕混合 3 次后，对修复后底泥休耕 2 个月，即完成土壤修复的老化过程。

4.4 应用效果监测与评价

在种植应用后，对底泥质耕作层土壤进行定点抽样、定期采样，监测土壤和作物食品指标。监测指标分为：食品重金属类指标、土壤肥力类指标、土壤重金属类指标、作物产量类指标等，依据相关行业技术标准进行分析与评价及时掌握土壤修复运行效果。

5 底泥应用案例分析

5.1 试验底泥背景值分析

大田试验供试底泥取自南渡江流域新坡河塘（海南省海口市龙华区新城镇境内），经系统取样调查分析，本试验用底泥的养分、Cd、Pb 含量均值见表下 3。按照 HJ/T 332-2006《食用农产品产地环境质量评价标准》，该试验用底泥中 Cd 含量超标，Pb 含量不超标。

从表 3 可知，底泥中全氮、全磷、有机质等养分指标达到 1 级（丰）水平；底泥中 Cd 属轻微污染水平，该底泥可以进行土地利用<sup>[15]</sup>。

表 3 研究区底泥养分、Cd 和 Pb 含量  
Table 3 Contents of nutrients, Cd and Pb for sediment in study area

指标 Index	均值 Average
pH 值	6.182
全氮 Total N/(g·kg <sup>-1</sup> )	2.8717
全磷 Total P/(g·kg <sup>-1</sup> )	1.1824
全钾 Total K/(g·kg <sup>-1</sup> )	9.3000
有机质 Organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> )	92.9408
镉 Cd/(g·kg <sup>-1</sup> )	0.4245
铅 Pb(g·kg <sup>-1</sup> )	42

5.2 大田试验设计

2013 年课题组在海南省海口市龙华区新城镇下寺村内的砂质废弃土地上开展了底泥质耕作层土壤构建应用试验研究，本次试验按照底泥质耕层土壤构建方法布置大田试验。底泥大田原位稳定化修复试验过程是：土地平整→小区划分→底泥铺设→稳定剂铺撒→旋耕混合→干湿交替养护。

供试底泥为 Cd 污染，设置 3 个底泥体积用量梯度：20%、40%、60%（底泥铺设厚度分别是 5、10 和 15 cm），经旋耕混合形成土壤 Cd 污染梯度分别为：低浓度（0.33 g/kg）、中浓度（0.47 g/kg）、高浓度（0.67 g/kg）；比对 HJ/T 332—2006 标准，土壤 Cd 超标倍数分别为 1.10 倍、1.57 倍和 2.23 倍。每个梯度中 SD 为应用底泥未修复处理对照组，LP、SP、MP 分别为不同稳定剂修复处理组，1、2、3 分别代表土壤中 Cd 超标的低、中、高浓度处理。具体试验处理中所投加稳定剂投种类和用量见下表 4。每个处理设置 3 个重复小区，每个小区宽 4 m，长 5 m，面积为 20 m<sup>2</sup>。试验大田种植空心菜，同期监测空心菜茎叶（地上可食用部分）重金属含量、产量及种植土壤肥力指标，以验证底泥质耕层土壤的应用效果<sup>[25]</sup>。

表 4 稳定剂种类、用量及空心菜茎叶的 Cd 含量  
Table 4 Type and dosage of stabilizers, Cd content in water spinach stems and leaves

浓度 Content	处理 Treatment	石灰 Lime/(kg·m <sup>-2</sup> )	钙镁磷肥 FCP/(kg·m <sup>-2</sup> )	海泡石 Sepiolite/(kg·m <sup>-2</sup> )	磷酸二氢钙 CDP/(kg·m <sup>-2</sup> )	空心菜茎叶 Cd 含量 Cd content in water spinach stems and leaves/(mg·kg <sup>-1</sup> )
低浓度 (0.33 g·kg <sup>-1</sup> )	SD1	-	-	-	-	0.0505aA
	LP1	0.3	0.3	-	-	0.0085cB
	SP1	-	-	0.3	0.3	0.0310bcB
	MP1	-	0.6	-	-	0.0175bAB
中浓度 (0.47 g·kg <sup>-1</sup> )	SD2	-	-	-	-	0.0526aA
	LP2	0.45	0.45	-	-	0.0251bB
	SP2	-	-	0.45	0.45	0.0322bB
	MP2	-	0.9	-	-	0.0292bB
高浓度 (0.67 g·kg <sup>-1</sup> )	SD3	-	-	-	-	0.0573aA
	LP3	0.6	0.6	-	-	0.0082bB
	SP3	-	-	0.6	0.6	0.0202bB
	MP3	-	1.2	-	-	0.0173bB
限值 1						0.2
限值 2						0.05

注：同一列中小写字母相同表示在  $P=0.05$  水平上差异不显著；同一列中大写字母相同表示在  $P=0.01$  水平上差异不显著；限值 1 为 GB 2762-2012 相关标准限值；限值 2 为 GB 18406.1—2001 相关标准限值。  
Note: The uniform small letters at the same column mean “unobvious difference at the level that  $P=0.05$ ”; the uniform capital letters at the same column mean “unobvious difference at the level that  $P=0.01$ ”; Limit value 1 is the relative limit value of each contaminant in the GB 2762-2012; Limit value 2 is the relative limit value of each contaminant in the GB 18406.1-2001.

### 5.3 应用效果分析

表4可以看出所有稳定化处理组空心菜茎叶Cd含量均低于“无公害蔬菜安全要求”的限值,而未处理对照组空心菜Cd含量均超过0.05 mg/kg的标准,说明稳定剂对Cd具有较好的稳定效果;在对应的污染水平下,稳定化对空心菜茎叶Cd含量的降低率分别为83.17%(1LP)、38.61%(1SP)、65.35%(1MP)、52.28%(2LP)、38.78%(2SP)、44.49%(2MP)、85.69%(3LP)、64.75%(3SP)和69.81%(3MP),空心菜茎叶中Cd含量降低率在38.61%~85.69%,表明稳定剂对蔬菜重金属具有良好的降低效果。

以图3a中未处理组为对照,随着底泥用量增加,各底泥质耕层土壤处理对空心菜产量也呈增加趋势,增产率为8.7%~13%;稳定剂对空心菜产量呈现增加的效果,以相同污染梯度处理做对照,稳定剂对空心菜产量的增产率分别为2.77%(LP1)、10.67%(SP1)、4.35%(MP1)、4.35%(LP2)、17.03%(SP2)、8.33%(MP2)、20.21%(LP3)、24.04%(SP3)和27.53%(MP3),说明底泥质耕层土壤具有提高蔬菜产量的应用效果。

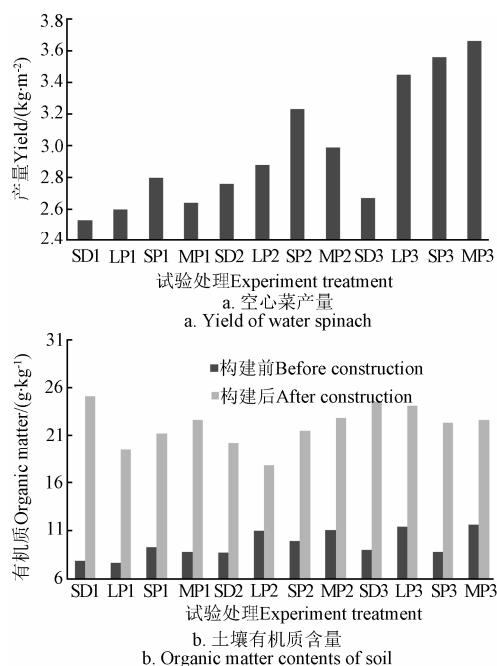


图3 不同稳定剂处理下空心菜产量和土壤有机质含量  
Fig.3 Organic matter contents of soil and yield of water spinach under different stabilization treatments

图3b中以构建前土壤有机质含量为对照,底泥质耕作层土壤的有机质含量在构建后呈现非常显著的增加效果,土壤有机质含量增加倍数在0.95~2.18倍之间,说明底泥质耕作层土壤构建能显著提高土壤肥力水平。

### 6 结论与讨论

1) 土地整治工程中底泥质耕作层土壤的构建方法是实现以“底泥”替代“客土”的新方法,该方法以环境学、土壤学及食品安全等理论为基础,从底泥环境及肥力状况调查评价、底泥重金属稳定化修复、底泥改造土

壤工程及应用效果监测与评价等方面探讨了土地整治工程中底泥质耕作层土壤构建的基础、内容、设计方法、施工工艺及应用效果。

2) 围绕河流底泥土地利用目标,详细阐述了所调查河流基础参数的选择与获取内容、底泥采样点布设、底泥样品检测分析、底泥环境评价、底泥肥力评价、底泥分类利用,提出了基于底泥土地利用的河流疏浚底泥环境及肥力调查评价方法。

3) 对轻微污染底泥采用稳定化修复,参照相关标准开展室内正交模拟试验,提出修复底泥效果好、成本低、易操作的稳定剂最优用量水平、工程工艺、参数,确定修复工程技术方案。

4) 依据相关标准,结合项目区实际情况,制定出项目中底泥土地利用技术实施的可行性方案,解决了底泥质耕作层土壤的构建方法途径。

5) 大田种植试验表明,稳定剂对底泥重金属具有良好的稳定效果,修复后底泥应用所种植蔬菜重金属含量显著降低,能够达到无公害标准;底泥质耕层土壤适宜开展种植,可提高蔬菜产量,增加土壤有机质含量水平。

### 参考文献

- [1] 杨绪红, 金晓斌, 郭贝贝, 等. 2006-2012 年中国土地整治项目投资时空分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 227-235. Yang Xuhong, Jin Xiaobin, Guo Beibei, et al. Spatio-temporal differentiation of land consolidation investment in China from 2006 to 2012[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 227-235. (in Chinese with English abstract)
- [2] 薛杰, 刘国彬, 张超, 等. 黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 310-316. Xue Jie, Liu Guobin, Zhang Chao, et al. Effects of terracing slope cropland on soil quality in Hilly Region of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(4): 310-316. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王利香, 李玉娥, 刘丽丽. 土地整治项目设计中存在的问题及改进建议——以天津市为例[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(25): 10536-10537. Wang Lixiang, Li Yu'e, Liu Lili. Problems and suggestions for land consolidation project design in Tianjin[J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2013, 41(25): 10536-10537. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王杰. 土地复垦法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. Wang Jie. Land Reclamation Method Research[D]. Qing Dao: Ocean University of China, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [5] 徐炳玉, 王涛, 窦森. 关于表土剥离技术的初步研究[J]. 吉林农业, 2012(1): 18. Xu Bingyu, Wang Tao, Dou Sen. A preliminary study on topsoil stripping technology[J]. Jilin Agriculture, 2012(1): 18. (in Chinese with English abstract)
- [6] 胡振琪, 龚碧凯, 赵艳玲, 等. 丘陵区土地整理表土剥离与回填施工方法: 中国, 102301847.1[P]. 2011-06-22.
- [7] 孙宏斌, 马云龙. 公路建设表土利用的几点措施[J]. 黑龙江科技, 2007(12): 162. Sun Hongbin, Ma Yunlong. Several measures of surface soil utilization of highway construction[J]. Heilongjiang Science and Technology, 2007(12): 162. (in Chinese with English abstract)

- [8] 付梅臣, 谢宏全. 煤矿区生态复垦中表土管理模式研究[J]. 中国矿业, 2004(4): 36—38.  
Fu Meichen, Xie Hongquan. Topsoil management model in the coal mine area ecological reclamation study[J]. China Mining, 2004(4): 36—38. (in Chinese with English abstract)
- [9] 付梅臣, 陈秋计, 谢宏全. 煤矿区生态复垦和预复垦中表土剥离及其工艺[J]. 西安科技学院学报, 2004(2): 155—156.  
Fu Meichen, Chen Qiuji, Xie Hongquan. Coal mining area ecological reclamation and topsoil stripping in the reclamation and craft[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2004(2): 155—156. (in Chinese with English abstract)
- [10] 孙泰森, 师学义, 杨玉敏. 五阳矿区采煤塌陷地复垦土壤的质量变化研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 35—37.  
Sun Taisen, Shi Xueyi, Yang Yumin. Changes of reclaimed soil quality on subsided land resulting from coal mine at Wuyang area[J]. Soil and Water Conservation, 2003, 17(4): 35—37. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李清芳, 马成仓, 周秀杰. 煤矿塌陷区不同复垦方法及年限的土壤修复效果研究[J]. 淮北煤炭师范学院学报, 2005, 26(1): 49—52.  
Li Qingfang, Ma Chengcang, Zhou Xiujie. Study on soil remediation effect of different mine subsidence reclamation methods and years[J]. Journal of Huaibei Coal Industry Teachers' College, 2005, 26(1): 49—52. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张蕾娜, 冯永军. 采煤塌陷区复垦土地的肥力状况研究[J]. 福建水土保持, 2001, 13(1): 57—60.  
Zhang Leina, Feng Yongjun. Study on the fertility of land in sunk areas of coal mining subsidence area[J]. Fujian Soil and Water Conservation, 2001, 13(1): 57—60. (in Chinese with English abstract)
- [13] 朱德举, 卢艳霞, 刘丽. 土地开发整理与耕地质量管理[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 167—170.  
Zhu Deju, Lu Yanxia, Liu Li. Land development and consolidation and quality management of cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2002, 18(4): 167—170. (in Chinese with English abstract)
- [14] 国土资源部土地整理中心. 耕作层土壤剥离利用成本调查分析[J]. 土地整治动态, 2014(21): 1—14.
- [15] 刘永兵, 贾斌, 李翔, 等. 海南省南渡江新坡河塘底泥养分状况及重金属污染评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 213—224, 299.  
Liu Yongbing, Jia Bin, Li Xiang, et al. Characteristic of nutrients and evaluation of heavy metal contamination on sediments among Xinpo pond, Nandu river in Hainan province[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(3): 213—224, 299. (in Chinese with English abstract)
- [16] 方盛荣, 徐颖, 路景玲, 等. 螯合剂处理重金属污染底泥的实验研究[J]. 化工学报, 2011, 62(1): 231—236.  
Feng Shengrong, Xu Ying, Lu Jiangling, et al. Experimental research on chelator for treatment of sediment contaminated by heavy metals[J]. CIESC Journal, 2011, 62(1): 231—236. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 22—26.  
Wang Yonghua, Qian Shaomeng, Xu Nanni, et al. Characteristics of distribution of pollutants and evaluation in sediment in the east area of Chaohu lake[J]. Research of Environmental Sciences, 2004, 17(6): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [18] 苗爽, 陈婷婷. 底泥碳氮磷的研究现状[J]. 吉林农业科学, 2011, 36(1): 17—18, 25.  
Miao Shuang, Chen Tingting. A review of researches on carbon, nitrogen and phosphorus from sediments[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2011, 36(1): 17—18, 25. (in Chinese with English abstract)
- [19] 黄华梅, 高杨, 王银霞, 等. 疏浚泥用于滨海湿地生态工程现状及在我国应用潜力[J]. 生态学报, 2012, 32(8): 2571—2580.  
Huang Huamei, Gao Yang, Wang Yinxia, et al. Review of the current situation of coastal ecological engineering using dredged marine sediments and prospects for potential application in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2571—2580. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张鸿龄, 孙丽娜, 孙铁衍. 底泥生长基质中重金属的迁移特征及生物有效性[J]. 环境工程学报, 2013, 7(11): 2525—2532.  
Zhang Hongling, Sun Li'na, Sun Tieheng. Transport and bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn in sediment substrate[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(11): 2525—2532. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李婷, 刘湘南, 刘美玲. 水稻重金属污染胁迫光谱分析模型的区域应用与验证[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 176—181.  
Li Ting, Liu Xiangnan, Liu Meiling. Regional application and verification of spectral analysis model for assessing heavy-metal stress of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 176—181. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王立群, 罗磊, 马义兵, 等. 重金属污染土壤原位钝化修复研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(5): 1214—1222.  
Wang Liqun, Luo Lei, Ma Yibing, et al. In situ immobilization remediation of heavy metals-contaminated soils: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(5): 1214—1222. (in Chinese with English abstract)
- [23] 苏德纯, 胡育峰, 宋崇渭, 等. 官厅水库坝前疏浚底泥的理化性质和土地利用研究[J]. 环境科学, 2007, 28(6): 1319—1323.  
Su Dechun, Hu Yufeng, Song Chongwei, et al. Physicochemical properties of quanting reservoir sediment and its land application[J]. Environmental Science, 2007, 28(6): 1319—1323. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘贵云, 姜佩华. 河道底泥资源化的意义及其途径研究[J]. 东华大学学报: 自然科学版, 2002, 28(1): 33—37.  
Liu Guiyun, Jiang Peihua. Study on importance and approaches to the reutilization of river sediment[J]. Journal of Huadong University: National Science, 2002, 28(1): 33—37. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李翔, 刘永兵, 程言君, 等. 稳定化处理对底泥利用后土壤 Cd 形态及空心菜 Cd 含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 282—287.  
Li Xiang, Liu Yongbing, Cheng Yanjun, et al. Effects of chemical stabilization on soil Cd fractions and water spinach Cd contents after amendment with dredged river sediments[J]. Journal of Agro Environment Science, 2015, 34(2): 282—287. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李翔, 刘永兵, 宋云, 等. 石灰干化污泥对土壤重金属稳定化处理的效果[J]. 环境工程学报, 2014, 35(5): 1946—1954.  
Li Xiang, Liu Yongbing, Song Yun, et al. Leaching behavior of Pb, Cd and Zn from soil stabilized by lime stabilized sludge[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 35(5): 1946—1954. (in Chinese with English abstract)
- [27] 姜霞, 王书航. 沉积物质量调查评估手册[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [28] HJ/T 166-2004, 土壤环境监测技术规范[S].
- [29] 李朝奎, 王利东, 李吟, 等. 土壤重金属污染评价方法研究进展[J]. 矿产与地质, 2011, 25(2): 172—176.  
Li Chaokui, Wang Lidong, Li Yin, et al. Progress on

- evaluation method of soil heavy metal contamination[J]. Mineral Resources and Geology, 2011, 25(2): 172—176. (in Chinese with English abstract)
- [30] 林英华, 张夫道, 杨削云. 陕西农田土壤动物群落与长期施肥环境的灰色关联度分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 609—614.
- Lin Yinghua, Zhang Fudao, Yang Xueyun, et al. Grey relationship between corpland soil fauna community and the environment factors in Shaanxi[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(5): 609—614. (in Chinese with English abstract)

## Construction method and application effect on tillage layer soil by sediment in land consolidation engineering

Liu Yongbing<sup>1</sup>, Li Xiang<sup>1\*</sup>, Liu Yongjie<sup>2</sup>, Cheng Yanjun<sup>1</sup>, Zhang Jianzhong<sup>1</sup>, Zang Zhenyuan<sup>1</sup>, Xu Jiefeng<sup>3</sup>, Yang Wenjie<sup>4</sup>, Shen Laixin<sup>5</sup>, Zhao Congju<sup>6</sup>, Guo Yifei<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Lab of Industrial Contamination and Remediation, Environmental Protection Research Institute of Light Industry, Beijing 100089, China; 2. Forestry College of Shanxi Agriculture University, Taigu 030801, China; 3. Haikou City Major Land Arrangement Project Leading Group Office, Haikou 570312, China; 4. Farm Design Institute in Hainan, Haikou 570226, China; 5. Beijing Institute of Water, Beijing 100048, China; 6. College of Geography and Tourism, Hainan Normal University, Haikou 571158, China)

**Abstract:** Land treatment is to comprehensively treat the lands that are ineffectively and improperly used, or undeveloped. Soil at the tillage layer is an essential part for agriculture so its treatment is a key component for land treatment. Currently, surface soil peeling technology and soil replacement method are adopted on land treatment and reclamation engineering. However, there are problems such as limited amount of soil replacement sources, large deviation on application costs, incomplete technical methodology, irregular engineering process, and poor application efforts. Utilization of dredging sediment from rivers is one of the most emerging disposal methods. Sediment pollution and ecological risk assessment, sediment metals remediation technologies, land utilization parameters, sediment food safety assessment, are important factors affecting sediment utilization. For the scarcity issue on regional soil at the tillage layer, this study focused on dredging sediment utilization, and analyzed the related theories, scopes, design method, engineering process and application efforts on construction of tillage layer soil using the sediment. The outcome of the research was significant for both improving land treatment and maintaining the sustainability of farmland. Our results showed that tillage layer soil construction was under the scope of land treatment, using dredging sediment with proper farmland treatment process and with the aid of certain physical and chemical methods. This method must consider the principles for environment, agrology, and food safety. For sediment heavy metal stabilization remediation design, we proposed optimal stabilizers and engineering process. All of those facilitated the formulation of post-remediation soil modification engineering approach; and its related monitoring and assessment on implementation efforts. Also, to take samples according to “Sediment quality survey and Assessment Handbook”, based on the targets of sediment utilization and monitoring data and documents like “Soil environmental quality standard”(GB15618-1995); “Farmland environmental quality evaluation standards for edible agricultural products”(HJT332-2006), “National secondary soil survey related standard—fertility indicators and evaluation limits”, the sediment environmental impact and fertility were evaluated. Sediment quality less than slight pollution and fertility at the Level II can be considered for utilization. The spatial analysis on sediment environment and fertility evaluation by GIS, the strategies on integrated river sediment utilization direction, spatial distribution and stock could be identified. This provided references on stratified sediment dredging. In addition, for sediment heavy metal stabilization, typical contaminated sediment samples were selected for stabilization experiments. The test in laboratory was done by adding phosphates, magnesium oxides, or clay minerals using an orthogonal design. The results showed that both stabilized BCR(European Communities Bureau of Reference) form of metals and leaching toxicity reached the standards. Therefore, the constituents for treatments can be considered as the optimal stabilizing agents. Considering water content and stabilization period, the effective, low-cost and operable stabilizer dosage, remediation process, and parameters were proposed to finalize the sediment heavy metal stabilization approach. Moreover, sediment modification on soil remediation process needed to consider the regional topography and landscape, irrigation system, transportation, farmland protection, and other engineering conditions. By combining sediment pavement, land peeling, sediment heavy metal stabilization remediation into the project design, the feasible measure on building the sediment phase tillage layer soil was formulated. Last, through the experiment on spinach planted, the results showed that the heavy metal content in the spinach can achieve the nuisance-free level, reducing Cd content by 38.61%-85.69%, so it can obviously reduce heavy metal in vegetables. Sediment phase tillage layer soil is suitable for cultivation, raising productivity by 8.7%-13%, improving soil organic content by 0.95-2.18 times.

**Key words:** land use; soils; construction; rivers; sediments; heavy metals; remediation; tillage layer soil