

现代农业双优工程试验原理与方法 ——以毛乌素沙地为例

王永生^{1,2}, 李玉恒^{1,2}, 刘彦随^{1,2,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 土地是人类赖以生存与发展的重要资源和物质基础, 现代农业的发展依赖于健康、生态、高效的土地。消除退化土地的利用障碍, 改良作物生长环境, 为不同作物生长需求提供最适宜的“土地配方”, 是当前面临的主要问题。针对毛乌素沙地区(榆林)沙化土地整治与可持续利用问题, 利用红黏土、黄土与沙土的物理互补性, 对沙化土地进行结构性整治, 构建沙化土地整治土体选配和现代农业良种优选的复合技术体系, 实现“沙化土地的订单式整治”, 为毛乌素沙地区(榆林)退化土地整治与现代农业的耦合发展提供科技支撑。未来应重点加强土地工程链研究, 创建全链式土地工程管理机制, 实现微观土地复配、中观土体营造和宏观土质改良工程的技术化和标准化。

关键词: 土地整治工程; 现代农业; 土体重构; 作物优选; 毛乌素沙地

中图分类号: F301.24 **文献标识码:** A

Principle and Method of Modern Agricultural Two-Dimension Optimization Engineering Experiment: A Case Study of Mu Us Sandy Land

Wang Yongsheng^{1,2}, Li Yuheng^{1,2}, Liu Yansui^{1,2,3}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Land is the all-important resource and material for human survival and development. Healthy, ecological, and highly efficient farmland is the basis of modern agriculture. Eliminating land use obstacles and improving crop living conditions are important for providing healthy and fertile soils for improved crop varieties. This study intends to address the issues of sandy land consolidation and sustainable use in Mu Us Sandy Land area. Soil reconstruction with natural red clay or loess is an economical and ecological method for sandy land improvement. Complex technology systems and patterns are constructed through land consolidation engineering experiments, including sandy land structuralization consolidation, crop varieties optimized selection, and water and fertilizer precision

收稿日期: 2019-01-10; 修回日期: 2019-03-22

通讯作者: 刘彦随, 中国科学院, 研究员, 发展中国家科学院, 院士, 主要从事土地利用与乡村发展研究; E-mail: liuys@igsrr.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“村镇规划建设与管理”(2014-ZD-11); 国家重点研发计划项目“黄土丘陵沟壑区沟道及坡面治理工程的生态安全保障技术与示范”(2017YFC0504700); 国家自然科学基金项目“毛乌素沙地退化土地整治与可持续利用研究”(41801174)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

management. Sandy soil oriented consolidation will provide scientific supporting for degraded land consolidation and modern agricultural development. In the future, a related land engineering technology system and a whole-chain land project management mechanism should be intensified through soil reconstruction, farmland building, and soil improvement from micro, meso, and macro level, respectively.

Keywords: land consolidation; modern agriculture; soil reconstruction; crop optimized selection; Mu Us Sandy Land

一、研究背景与进展

我国农业生产存在生产资源与需求、农业人口与劳动力、基础设施与自然灾害、产品总量与结构、经营成本与效益等突出矛盾和挑战,需要加快构建与资源环境承载力相匹配的新型农业生产方式。土地是人类赖以生存与发展的重要资源和物质基础,现代农业的发展依赖于健康、生态、高效的土地。然而,快速工业化、城镇化进程使土地资源可持续利用面临一系列问题,城市大幅扩张造成农地非农化、乡村无序建设导致土地废弃化、污染乱排引起土地污损化,优质耕地数量不断减少 [1]。其次,土地沙化、盐碱化及水土流失化趋势尚未得到根本性扭转,亟需推进土地开发、利用和整治的集约化、工程化和技术化,为实现土地资源数量管理、质量管控和生态管护提供科技支撑 [2,3]。

“三深一土”科技创新战略强调土地工程技术在耕地质量提升、退化土地治理、荒废土地利用与土地生态修复中的重要作用,提出要强化土地整治的工程化、生态化技术应用。从区域层面看,土地整治包括基本农田建设整治区、农用地综合整治区、农村居民点整治区、未利用及退化用地整治区 [4]。近年来,土地整治的工程实践不断创新与发展,包括田块整形、农田水利和田间道路等高标准农田建设、农村空废识别拆除与农田本底营造 [5,6]、沙地与红胶土(砒砂岩)复配成土 [7]、黄土丘陵区治沟造地 [8]、喀斯特区域石漠化综合治理 [9]、盐碱地“改排为蓄”模式利用 [10]。土地整治工程也从增加耕地面积转变为提升耕地质量,从优化土地功能转变为改善土地结构。但消除土地利用的结构性障碍,改良作物生长的“水土气生”环境,为不同作物生长需求提供最适宜的“土地配方”,实现问题土地的“订单式整治”仍是当前面临的主要问题。

当前,现代农业发展趋势包括依托海洋资源开发的蓝色农业、依托工厂微生物资源的白色农业、

依托动植物遗传和转基因技术的分子农业、依托航天技术改变动植物遗传技术的太空农业。作物品种的改良是现代农业发展的关键,也是满足人类粮食需求的重要手段 [11]。破解水土资源约束和退化,优化农业生产环境是实现农业现代化的根本。超级稻在安徽省大面积减产甚至绝产的根本原因在于作物适应性问题,缺少良种良田和农艺农技等相关研究。因此,将作物的生理适应性与土壤的生态适宜性相结合,提升良种与良田的耦合度,是现代农业发展的关键。

干旱及半干旱区域拥有全球 41% 的陆地面积和 38% 的人口,受到气候变化和土地退化的双重威胁 [12]。中国是土地退化和沙化最严重的国家之一,截至 2014 年,我国沙化土地面积为 $1.721 \times 10^6 \text{ km}^2$, 主要分布在北方的农牧交错区和西北干旱区 [13], 严重损害生态环境、自然资源、社会经济及人类生活。我国农牧交错区主要为风沙土覆盖区和黄土覆盖区,风沙区土壤贫瘠,松散易流动,黄土区结构疏松,沟壑纵横。水土资源供需矛盾的不断加剧,成为限制农牧交错区农业可持续发展的重要障碍 [14]。受自然环境和人为因素影响,土地沙化严重、耕地面积减少、生产力下降、农村贫困化加剧 [15]。农牧交错区退化土地整治,对于补充耕地资源、缓解人地关系、农业提质增效和农民增收具有重要意义。因此,本研究通过对农牧交错区沙化土地整治工程的综述,提出土体优配和作物优选的沙化土地订单整治思路,基于“中国科学院地理科学与资源研究所现代农业双优工程试验站”的研究内容及初步结果,从宏观的人地关系到微观的作土关系,探讨农牧交错区沙化土地整治与现代农业的耦合发展模式。

土壤颗粒组成是土壤质地和结构的重要表征,土地沙化的核心问题是砂粒含量过高,缺少粉粒和黏粒。沙化土地质地松散,土粒间隙大,保水保肥能力差,最有效的整治策略是进行质地改良,改善沙化土地的土粒结构和土层结构 [16]。增加沙化土

地的保水性，是沙化土地持续利用的关键，但大多数措施均未从沙化土地的结构性问题入手，应用推广难度大。秸秆、碎石和塑料薄膜等覆盖措施费时费力；化学保水剂成本高，而且其中的高分子聚合物存在环境污染风险；城市污泥、湖泊底泥等物质养分含量较高，但来源有限、重金属含量超标；木屑、秸秆、火山灰等物质不存在环境污染风险，但持续保水能力有限，无法大面积推广 [17]。客土法是较为常见的沙化土地整治措施之一，利用黄土改良沙地，能显著增加土壤持水性、有机质和有效氮含量 [18,19]。Han 等 [20] 提出将毛乌素沙地境内丰富的砒砂岩和沙混合，利用其物理互补性，复配成为新型“土壤”，砒砂岩与风成沙的复配比例在 1:2~1:5 范围内，复配土壤的结构和质地显著改善，生产力得到显著提升。易志坚团队 [21] 研究发现，向沙中添加植物性纤维黏合剂，使沙粒之间重新获得万向结合约束力，使“沙漠土壤化”，成为植物生长的理想载体，但因缺少观测数据支撑、成本高、环境污染风险等问题，争议不断。土壤剖面中砂土层、壤土层或黏土层的厚度及其在剖面中所处的部位对水分运动和肥力发挥具有重要的作用 [16]，对于农牧交错区沙化土地土层结构的改良研究亟待开展。

沙化土地整治利用是一项系统工程，土粒及土体结构的改善与农艺措施的结合，土壤性质与种植结构的合理匹配是农业可持续发展和水土资源保护的关键 [9,22]。目前，大多数研究还局限于理论构思和试验模拟，缺少田间试验数据的支撑和内在机制的探讨。毛乌素沙地区域的研究表明，砒砂岩与沙复配成土后，通过耕作、增施有机肥、种植绿肥、添加营养物质、生物肥料等物理、化学和生物途径，加速新造土壤熟化和培肥过程 [7]。不同作物在复配土壤中的种植适宜性结果表明，小麦、玉米和大豆在砒砂岩与沙混合比例为 1:2 时产量最高，马铃薯在砒砂岩和沙混合比例为 1:5 时产量最高 [20]。通过砒砂岩与沙复配土壤的水肥利用效率评价，Wang 等 [23] 分别提出了干旱年份、中水年份和湿润年份的灌溉和施肥策略，在复配土壤上种植马铃薯，并进行节水灌溉，可节约用水 61% [7]。2016 年，在陕西榆林召开的首届现代农业土地工程技术专家研讨会上，提出了土地整治良田优配与现代农业良种优选的耦合关系，提出了推进创新符合

我国国情特点、农牧交错区地域特色的现代农业双优工程技术体系的思考和对策。

二、现代农业双优工程试验

(一) 工程试验设计

试验站位于陕西省榆林市榆阳区牛家梁镇榆卜界村 (38°22'43" N, 109°26'05" E)，坐落在榆林现代农业科技示范区 (国家农业科技园区)。试验区东西长 125 m，南北宽 65 m，总面积约为 0.8 hm²。榆林市北部为风沙草滩区，南部为黄土丘陵沟壑区，分别占榆林市总面积的 42% 和 58%。其中，沙地面积为 5.3×10⁶ hm²，约占榆林市未利用土地面积的 91.65%。研究区为温带大陆性季风气候，年平均气温和降水分别为 8.1℃ 和 413.9 mm。研究区有丰富的地下水资源，河床底下 20 m 左右拥有丰富的地下水流，光照资源丰富、热量充足，因此，2013 年，榆林被认定为陕西省第二粮仓的重要建设基地。

试验区原始土质为天然沙地，风蚀严重，主要由石英等矿物组成，土壤粒径组成以砂粒为主。在我国北方第四季黄土-古土壤序列下，普遍发育了一套晚第三纪的北方红黏土，分布范围遍及整个黄土高原 (见图 1)，厚度稳定在 50~70 m 之间，榆林

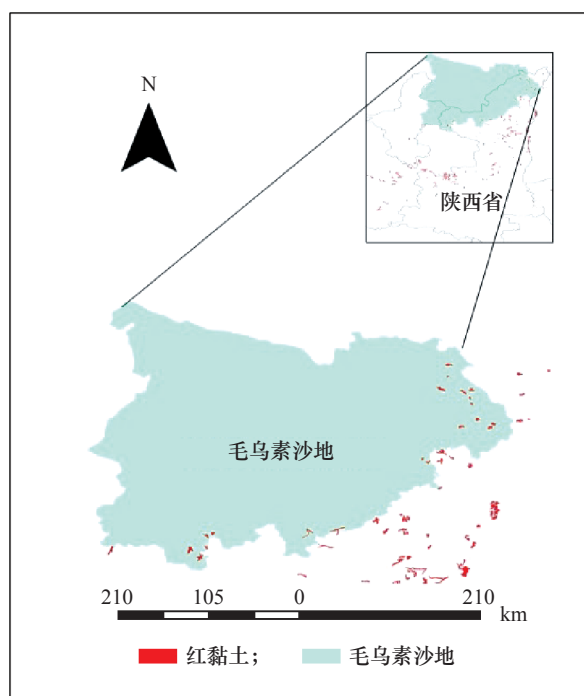


图 1 毛乌素沙地周边红黏土资源分布

佳县的红黏土厚度为 65 m [24]。红黏土的成土母质是第三纪红色黏土，覆盖于黏土上的黄土层因水土流失侵蚀殆尽后，黏土层露出地表。红黏土质地黏重、通气性差，暴露在地面时表面容易龟裂，红黏土粒径与黄土相当，与黄土相比没有湿陷性，主要用于砖瓦烧制。黄土是在干燥气候条件下形成的多孔性具有柱状节理的黄色粉性土，在遇水 1~2 min 内发生塌陷 [25]。在榆林市长城沿线附近，红黏土、黄土和砂土呈不连续分布状，红黏土在毛乌素沙地边缘及内部广泛分布（见图 1），为沙地结构改良提供了材料，而且运输距离短、成本低。

（二）土体优配原理

土壤颗粒是构成土壤固相骨架的基本颗粒，土粒的大小和排列方式对土壤水、肥、气、热状况及土壤微生物有着重要影响和制约，土壤颗粒分级标准主要包括石砾、砂粒、粉粒和黏粒 [16]。沙化土地因缺少黏粒和有机质，不能黏结为微团聚体和大团聚体，保水保肥性弱，不利于作物生长。沙化土地结构的改良主要包括土壤颗粒重组、土体结构改良和土壤肥力提升。现代农业双优工程试验利用砂粒与粉粒、砂粒与黏粒的物理互补性，在毛乌素沙地周围选取粉粒和黏粒作为沙地颗粒重组的原材料。将大小适当的粉粒或黏粒覆盖在平整的沙地上，并在粉粒或黏粒上覆盖砂粒，通过翻耕，使砂粒和粉粒或黏粒充分混合，使表层土壤质地由砂土转变为砂粉土或中砂土，土壤颗粒大小适宜（见图 2）。本研究选取毛乌素沙地周围 30 km 范围内广泛存在的红黏土和黄土作为黏粒和粉粒，按照体积比为 1:1、1:2、1:3 和 1:5，将沙地与红黏土、沙地与黄土分别混合，同时设置纯沙地、纯红黏土和纯黄土处理，作为对照（见图 3）。

以 1:1 砂土和红黏土复配为例，为确保复配后的新造土体结构合理，应将大块的红黏土拍压粉碎为 0~5 cm 的块状，使微小的颗粒填充砂粒之间的空隙，较大的土块可与砂粒结合成为团聚体。为确保混合后的土壤层次合理，在平整后的沙地上部覆盖 30 cm 的红黏土，然后在红黏土上方继续覆盖 15 cm 的原始沙土，利用深耕机械（翻耕深度约为 30 cm）多次翻耕，使沙土与底部 15 cm 的红黏土充分混合，形成耕作层土壤，土体中部剩余的 15 cm 的红黏土作为保水保肥层（见图 2）。新复配

的耕作层土壤养分含量较低，应通过施用有机肥和化肥提升土壤养分的库容，使贫瘠的复配土壤变为养分库容适当、结构合理的土壤。在种植作物前增施腐熟的鸡粪 15~20 m³/hm²，并及时翻耕，促进土壤快速熟化。根据作物种植种类，按照当地常规施肥量的 1.5 倍施用氮、磷、钾肥料，提高土壤养分。按照该施肥量种植 2~3 年后，可遵照当地的施肥量与施肥方法进行作物种植。

沙化土地整治的投入主要来源于复配材料，沙地平整、覆盖，有机肥，深耕等环节。从沙化土地整治投入的结构来看，复配材料方面的投入最高。其中，红黏土和黄土的价格分别为 30 元 /m³ 和 20 元 /m³，红黏土对沙化土地进行改良整治的总投入高于黄土。在不同复配比例下，利用红黏土和黄土分别与沙复配成土的费用为 67 200~97 200 元 /hm² 和 47 200~67 200 元 /hm²（见表 1）。

（三）作物优选方法

各种作物的生物学特性和耕作栽培要求不同，所需的土壤条件也不同。因此，匹配作物的生理适应性与土壤的生态适宜性，充分发挥良种的优越性，是实现问题土地整治利用的关键。本研究选取当地传统作物玉米、马铃薯和大豆作为研究对象，试验小区分布图，如图 3 所示。通过试验观测、监测和对比不同复配方案中玉米、马铃薯和大豆的长势及产量情况，优选适宜不同作物生长的最佳复配比例。

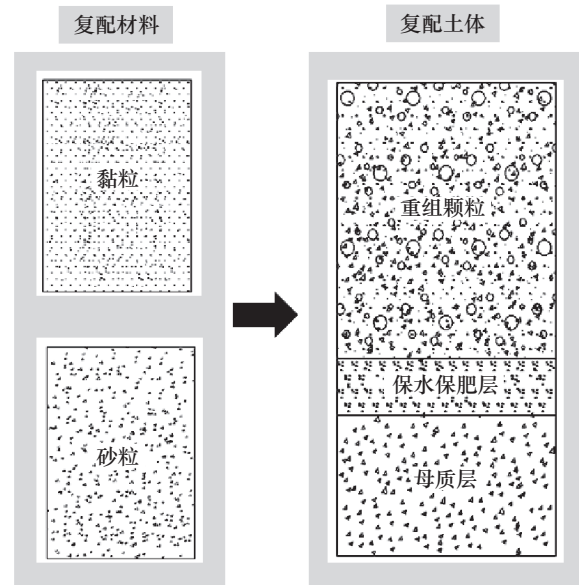


图 2 毛乌素沙地土体优配结构

(四) 精准管理试验

通过现代农业双优工程实践，在毛乌素沙地区域建设高标准农田，发展现代特色高效农业，需要研究土地工程后规模化种植的灌溉和施肥方法、灌水量和施肥量。水资源是毛乌素沙地土地整治工程的关键因素，复配成土工程后，根据不同作物的用水需求，进行精准灌溉，避免大水漫灌，造成水资源过度开采利用。其次，随着灌溉方式的改变，传统的撒施、穴施追肥等施肥方式不再适用。现代农业双优工程试验根据田间作物的种植，利用自主设

计的水肥一体化设备，实现了多作物水肥同步定量管理（见图4）。利用混肥水泵将肥料罐中的不同肥料泵入文丘里混合器，实现水肥混合；通过智能控制箱，启动电动球阀和水流传感器，实现水肥定量；根据田间作物种植种类，利用滴灌带实现水肥管理。

通过土体优配和作物优选，本研究的主要内容包括：① 物质差异：红黏土和黄土对毛乌素沙地颗粒重组和土体结构改良的差异；② 配比差异：不同复配比例对土壤养分库和释放速率的影响差异；③ 作物差异：玉米、大豆和土豆在复配土体

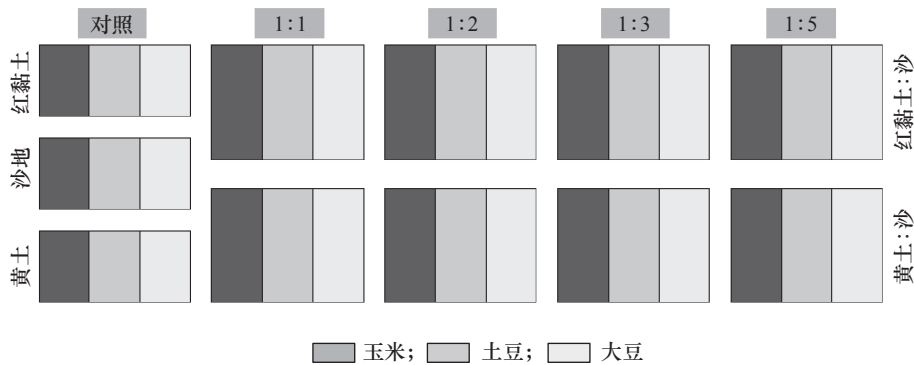
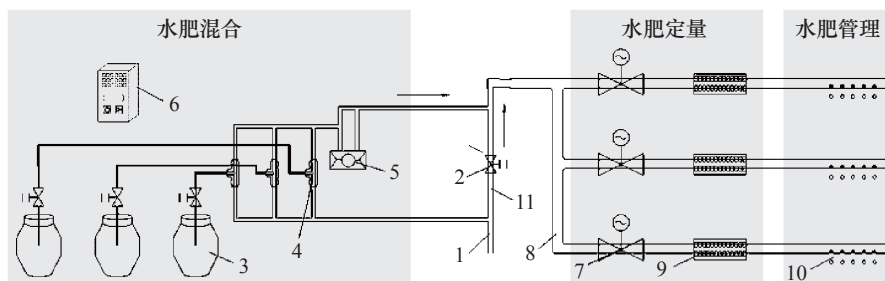


图3 现代农业双优工程试验区设置

表1 沙化土地整治投入分析

元/hm²

复配方案	复配材料	平整覆盖	有机肥	翻耕	总计	
红黏土	1:1	90 000	3000	3000	1200	97 200
	1:2	75 000	3000	3000	1200	82 200
	1:3	67 500	3000	3000	1200	74 700
	1:5	60 000	3000	3000	1200	67 200
黄土	1:1	60 000	3000	3000	1200	67 200
	1:2	50 000	3000	3000	1200	57 200
	1:3	45 000	3000	3000	1200	52 200
	1:5	40 000	3000	3000	1200	47 200



1. 主供水管道；2. 供水阀；3. 肥料罐；4. 混肥水泵；5. 文丘里混合器；6. 智能控制箱；7. 电动球阀；8. 灌溉管道；9. 水流传感器；10. 滴灌带；11. 直通管理

图4 水肥一体化设备示意图

中的生长差异；④ 效益差异：复配成土的投入与作物产量等经济效益的差异。因此，现代农业双优工程试验站的主要监测内容包括：土壤颗粒组成、团聚体、容重、有机质等物理性状，土壤全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷和速效钾等土壤化学性状，土壤微生物群落结构、氮循环微生物功能基因丰度及多样性等生物性状；不同土层中根系生物量、形态、产量及品质等作物性状。

三、成果应用展望

针对毛乌素沙漠地区（榆林）退化土地的生产性、农业经营的高效性、生产方式的生态型与科学性等问题，通过红黏土与沙、黄土与沙复配成土，构建沙化土地整治土体优配和现代农业良种优选的复合技术体系，促进沙化土地整治精细化、良种推广精准化，实现“沙化土地的订单式整治”和“把良种播在沃土上”，为毛乌素沙漠地区（榆林）退化土地整治与现代农业的耦合发展提供科技支撑。

红黏土与沙、黄土与沙复配成土后，为加快新造土地的熟化，应充分利用农牧交错区畜牧业发达的优势，依托当地的鸡粪、羊粪、牛粪等农家肥，结合部分商品有机肥及微生物肥料，改善土体营养结构。从水资源利用效率来看，复配成土过程显著增加了土壤的持水和保水能力 [7]，与当地传统的沙地耕种过程相比，是一种节水措施。毛乌素沙地

区域降雨存在增加趋势 [14]，地下水资源丰富，埋深较浅，河床底部 20 m 内具有丰富的地下水，为沙化土地整治利用提供了水资源保障。其次，现代农业双优工程中利用水肥一体化设备，利用滴灌的方式对水肥进行了精准管理，规避了该区域水土资源开发的生态风险。从模式推广及应用上来看，可在当地开展小规模生产型农户和规模化种植企业的行动研究，探索适合农户家庭化种植和企业规模化种植的沙化土地整治与利用模式。通过田间工程试验，模式筛选、应用及优化，为现代农业发展提供专业化技术、全链式生产体系，可有效提高模式应用的匹配性，在一定程度上降低了生产成本。

当前，全球变化、快速城镇化和不合理的土地利用，导致沙漠化、盐碱化、水土流失等退化型的问题土地，通过理化试验、小区试验和田间观测，遵照土地利用适宜性与作物生理适应性相匹配的原理，实行测地配方施土，探究结构化土地整治技术，科学营造健康土体和生态农田系统。通过土地综合整治，建设高标准农田，创新土地经营机制，营造田园综合体，发展以多功能现代农业为支撑，以人—地—业融合为特色的乡村振兴战略（见图 5）。未来应重点加强土地工程链研究，应用系统论原理和理学、工学、农学、管理学和经济学等多学科理论，以破解土地利用问题为目标，将定位观测和工程示范相结合，推进土地工程化、工程问题技术化、技术问题精准化；利用工程管理、资源管理和信息管

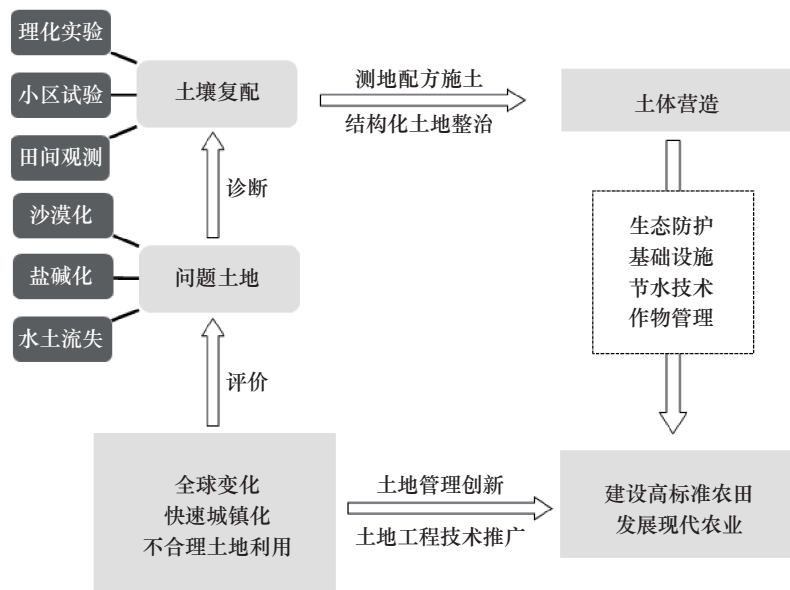


图 5 问题土地整治与现代农业发展框架图

理等相关理论, 创建全链式土地工程管理机制, 实现微观土地复配、中观土体营造、宏观土质改良工程的系统化、标准化, 将宏观的人地关系问题, 通过微观的水土关系和作土关系加以解决。

参考文献

- [1] 刘彦随. 土地综合研究与土地资源工程 [J]. 资源科学, 2015, 37(1): 1-8.
Liu Y S. Integrated land research and land resources engineering [J]. Resources Science, 2015, 37(1): 1-8.
- [2] 刘彦随. 中国土地资源研究进展与发展趋势 [J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 127-133.
Liu Y S. New progress of land resources studies and related development tendencies in China [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2013, 21(1): 127-133.
- [3] Liu Y S, Long H L, Chen Y F, et al. Progress of research on urban-rural transformation and rural development in China in the past decade and future prospects [J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(8): 1117-1132.
- [4] 乔陆印, 刘彦随. 新时期中国农村土地综合整治逻辑体系框架 [J]. 人文地理, 2016 (3): 67-73.
Qiao L Y, Liu Y S. The ecological framework of rural land comprehensive consolidation during period [J]. Human Geography, 2016 (3): 67-73.
- [5] Li Y H, Liu Y S, Long H L, et al. Community-based rural residential land consolidation and allocation can help to revitalize hollowed villages in traditional agricultural areas of China: Evidence from Dancheng County, Henan Province [J]. Land Use Policy, 2014, 39(39): 188-198.
- [6] 陈玉福, 孙虎, 刘彦随. 中国典型农区空心村综合整治模式 [J]. 地理学报, 2010, 65(6): 727-735.
Chen Y F, Su H, Liu Y S. Reconstruction models of hollowed villages in key agricultural regions of China [J]. Acta Geographical Sinica, 2010, 65(6): 727-735.
- [7] Wang N, Xie J C, Han J C, et al. Comprehensive framework on land-water resources development in Mu Us Sandy Land [J]. Land Use Policy, 2014, 40(1): 69-73.
- [8] 刘彦随, 李裕瑞. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 1-9.
Liu Y S, Li Y R. Engineering philosophy and design scheme of gully land consolidation in Loess Plateau [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(10): 1-9.
- [9] Xie L W, Zhong J, Cao F X, et al. Evaluation of soil fertility in the succession of karst rocky desertification using principal component analysis [J]. Solid Earth, 2015, 6(2): 3333-3359.
- [10] 韩霖昌, 解建仓, 朱记伟, 等. 陕西卤泊滩盐碱地综合治理模式的研究 [J]. 水利学报, 2009, 40(3): 372-377.
Han J C, Xie J C, Zhu J W, et al. Comprehensive method for treatment of saline lands [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 372-377.
- [11] Foley J A, Defries R, Asner G P, et al. Global consequences of land use [J]. Science, 2005, 309(5734): 570-574.
- [12] Reynolds J F, Smith D M, Lambin E F, et al. Global desertification: Building a science for dryland development [J]. Science, 2007, 316(5826): 847.
- [13] Wu B, Ci L J. Landscape change and desertification development in the Mu Us Sandland, Northern China [J]. Journal of Arid Environments, 2002, 50(3): 429-444.
- [14] Li Y R, Cao Z, Long H L, et al. Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban-rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 142: 697-715.
- [15] Liu Y S, Zhang X P, Li X W, et al. Mechanism and regulation of land degradation in Yulin district [J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 13(2): 217-224.
- [16] 黄昌勇, 徐建明. 土壤学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
Huang C R, Xu J M. Pedology [M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2010.
- [17] Han J C, Xie J C, Zhang Y. Potential role of feldspathic sandstone as a natural water retaining agent in Mu Us Sandy Land, Northwest China [J]. Chinese Geographical Sciences, 2012, 22(5): 550-555.
- [18] 董雯, 赵景波. 毛乌素沙地的形成与治理 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2006, 24(4): 42-46.
Dong W, Zhao J B. The formation and harness of Maowusu desert [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Science), 2006, 24(4): 42-46.
- [19] 王志, 彭茹燕, 王蕾, 等. 毛乌素沙地南缘改良与利用风沙土性质研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 14-16.
Wang Z, Peng R Y, Wang L, et al. Studies of aeolian sandy land improvement and utilization in south edge of Musu Desert [J]. Journal of Soil and Water Conversation, 2006, 20(2): 14-16.
- [20] Han J C, Liu Y S, Zhang Y. Sand stabilization effect of feldspathic sandstone during the fallow period in Mu Us Sandy Land [J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(4): 428-436.
- [21] Yi Z J, Zhao C H, Gu J Y, et al. Why can soil maintain its endless eco-cycle? The relationship between the mechanical properties and ecological attributes of soil [J]. Science China, 2016, 59(10): 104621.
- [22] Silvestri N, Pistocchi C, Antichi D. Soil and nutrient losses in a flat land—Reclamation District of Central Italy [J]. Land Degradation & Development, 2016, 28(2) : 638-647.
- [23] Wang H Y, Han J C, Tong W, et al. Analysis of water and nitrogen use efficiency for maize (*Zea mays* L.) grown on soft rock and sand compound soil [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 97(8): 2553-2560.
- [24] 孙有斌, 强小科, 孙东怀, 等. 新近纪以来中国黄土高原的风尘记录 [J]. 地层学杂志, 2001, 25(2): 94-101.
Sun Y B, Qiang X K, Sun D H, et al. Eolian record of the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Stratigraphy, 2001, 25(2): 94-101.
- [25] Shi H, Shao M G. Soil and water loss from the Loess Plateau in China [J]. Journal of Arid Environments, 2000, 45(1): 9-20.