

# 现代农业地理工程与农业高质量发展 ——以黄土丘陵沟壑区为例

刘彦随<sup>1,2</sup>, 冯巍仑<sup>1</sup>, 李裕瑞<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 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; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 农业地理学是农业科学与地理科学的交叉学科, 农业地理工程是地理学与工程学交叉研究在现代农业与乡村领域的进一步深化和系统应用。随着现代农业科学技术和人地系统科学的创新发展, 区域农业基础建设的科技需求日益旺盛, 农业地理工程试验成为农业工程技术研发和农田系统管理的重要任务。本文阐述了农业地理工程的科学内涵、试验原理与技术方法, 并以黄土丘陵沟壑区为例开展了地理工程试验研究和农业高质量发展对策探讨。结果表明: ① 农业地理工程试验主要包括针对特定区域地理环境和农业发展问题的水土配置、土层复配、大田试验、生态防护、地理空间分析与监测, 旨在探明区域高标准农田建设、健康农业生态系统营造的水土气生资源要素耦合规律, 建立可持续土地利用系统与多功能农业经营模式。② 农业生态系统试验主要包括沟道边坡防护方式、健康农田系统结构、作物与土壤匹配关系、耕地投入产出经济分析, 通过开展土地改良、作物优选交互试验和田间试种, 揭示新造地“作土关系”耦合机理与优化调控途径。③ 作土关系优化调控是工程试验设计的主要内容, 包括气候—作物优选、土体结构改良、地形—作物优选、土壤质量改良、土壤—作物优选、效益—作物优选6个阶段。④ 农业地理工程技术的核心任务是深化贯通综合研究、揭示微观耦合机理、建立工程试验范式, 其应用路径主要体现在时间维、空间维与逻辑维三个维度。新时期农业地理工程试验与示范应用, 有利于丰富农业地理学前沿理论与方法论, 对于推进地理工程化研究和服务农业农村高质量发展决策具有重要意义。

**关键词:** 农业地理学; 现代地理工程; 土地整治工程; 农田系统管理; 高质量发展; 黄土丘陵沟壑区  
DOI: 10.11821/dlxb202010001

## 1 引言

农业是国民经济的重要基础, 是人类生存与发展的必要条件。推动农业农村高质量发展, 是中国经济转向高质量发展阶段的重要任务。农业农村现代化长期滞后于国家经济发展和工业化、城镇化进程, 成为新时期中国乡村振兴和全面建成小康社会的主要短板<sup>[1-3]</sup>。农业地理学是服务支撑农业区域规划布局和农业资源可持续利用的基础学科, 主要研究区域农业自然与人文地理要素相互作用机理及其变化规律, 分析不同尺度农业地域系统时空演变格局、过程和动力机制, 旨在研究解决区域农业发展问题, 促进农业农村可持续发展<sup>[4]</sup>。20世纪60年代以来, 中国老一辈地理学家胡焕庸<sup>[5]</sup>、周立三<sup>[6]</sup>、黄秉维<sup>[7]</sup>、

收稿日期: 2020-02-12; 修订日期: 2020-06-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41931293); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504701) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41931293; National Key Research and Development Program, No.2017YFC0504701]

作者简介: 刘彦随(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110005331M), 主要从事农业地理学与乡村地理学、土地利用与区域可持续发展研究。E-mail: liuys@igsrr.ac.cn

吴传钧<sup>[8]</sup>、邓静中<sup>[9]</sup>等主持完成了全国及各地区农业资源调查、农业综合区划、土地利用制图等一系列国家重大任务,通过“以任务带学科”的方式深化了地理学理论与方法研究,促进了农业地理学学科快速发展<sup>[10-11]</sup>。进入21世纪,中国工业化、城镇化进程,以及2001年中国加入世界贸易组织(WTO),促使中国农业生产与乡村转型发展,而转变传统的农业生产方式面临着耕地退化严重、基础设施薄弱、农业效益与竞争力低下、科技支撑能力不足、抗灾减灾能力较弱等复杂的“农业病”问题,严重制约了农业转型与高质量发展<sup>[12-13]</sup>。2004年以来,中央一号文件已连续17年锁定“三农”问题,为加快推进农业农村现代化与高质量发展提供了政策保障和战略指引。

随着现代农业科技进步及其在农业与乡村领域的广泛应用,全国各地围绕土地整治、水土配置、生态保育、高标准农田建设等农业基础建设取得了显著成效<sup>[14]</sup>。代表性的整治与治理工程包括黄土丘陵沟壑区治沟造地工程<sup>[15-16]</sup>、太行山区荒山坡整治工程<sup>[17]</sup>、毛乌素沙地综合整治工程<sup>[18]</sup>、喀斯特地区石漠化治理<sup>[19]</sup>、干热河谷泥石流治理与生态修复工程<sup>[20]</sup>等。地理学综合研究要做到“把论文写在祖国的大地上”,切实解决人地系统耦合、城乡发展融合问题,亟需创新发展学科前沿理论,推进问题导向的现代地理工程建设<sup>[21]</sup>。地理工程实践在国内由来已久,早在20世纪40年代任美镔倡导建设地理学研究。80年代黄秉维开拓黄淮海盐碱地治理工程,构建了地理学与工程实践相结合的跨学科综合研究范式。钱学森提出地理科学的工程技术层次,指出“地理学是带有工程技术性质、干实活的学问”<sup>[22]</sup>,强调发展地理观测、地理实验和地理系统工程。90年代肖克、唐登银分别结合中科院南方低山丘陵区小流域治理<sup>[23]</sup>、山东禹城旱涝碱综合治理<sup>[24]</sup>实践,深入探讨了地理工程发展构想。纵观学科发展史,一门学科从知识、科学到工程的发展演进具有一定的规律性,如相邻学科生物学有生物工程、地质学有地质工程、环境科学有环境工程等,地理科学的工程技术性质应是地理工程。譬如,土地资源工程是指对可供农林牧业或其他各业利用的土地资源进行调查评价、规划设计、开发整治、保护利用的综合性技术及其集成应用<sup>[25]</sup>,是地理工程的组成部分。创新发展现代地理学,亟需立足现代人地系统、补齐工程技术短板,推进地理工程化理论探索与应用<sup>[26]</sup>,不断强化地理学博大而精深的特色、软实力与硬技术兼具的优势。

黄土高原地区是中国典型的生态脆弱区,也是水土保持与生态农业发展重点区。生态环境保护、人地系统协调与可持续发展,始终是黄土高原及黄河流域高质量发展的基本命题。朱显谟曾提出黄土高原综合整治的“28字方略”,即全部降水就地入渗拦蓄,米粮下川上源,林果下沟上盆,草灌上坡下坳<sup>[27]</sup>。山仑提出黄土高原水土保持综合治理的核心是防沙治水,合理利用宝贵水资源,使黄土高原的生产得以持续<sup>[28]</sup>。傅伯杰提出陕北黄土高原应按照土地适宜性,分区建立土地利用结构模式,推进小流域综合治理<sup>[29]</sup>。邵明安提出黄土高原应通过控制蒸散来调控土壤干层,提升人工林的涵养水源和水土保持功能<sup>[30]</sup>。刘彦随等提出黄土丘陵沟壑区土地利用与农业系统优化的“三带六段”立体农业工程模式<sup>[31]</sup>。2013年中央支持陕西延安治沟造地土地整治重大工程项目启动实施。工程实践表明,黄土高原治沟造地是一项利国利民的生态工程、民生工程。农业水土气生多要素耦合机理及其生态环境效应是农业地理工程领域的重要科学问题。目前针对治沟造地工程的相关研究主要集中在规划设计技术<sup>[32]</sup>、潜力测算和植被护坡<sup>[33]</sup>等方面,对农业地理工程化、工程技术系统化和沟道农业产业化等方面的综合研究亟待深化。本文围绕黄土高原综合治理与土地可持续利用宏观战略,以地理学、工程学和农学等跨学科相关理论为支撑,系统开展农业地理工程试验与应用研究,并以黄土丘陵沟壑区为例,深入探究农业地理工程试验与应用范式,提出创新沟道土地整治技术与管理方式的对策

建议，为构建黄土高原“三生”（生产、生活、生态）结合的沟道农业系统和高质量发展决策提供科学依据。

## 2 理论解析与技术试验

### 2.1 理论解析

（1）现代地理工程。现代地理工程是现代地理学与工程学的新型交叉学科，强化地理学综合性、区域性与工程学系统性、技术性的有机结合和交叉融合。它是以一定地域的人地系统为对象、以现代人地耦合与可持续发展为目标，研究如何利用系统工程技术措施，有效破解各类区域不良地理问题的自然—经济—技术过程。现代地理工程学是关于运用地理学理论与方法探究区域性工程技术难题和解决特定人地系统问题的学问。它集成了区域发展地理综合体规划思想、区域治理工程化技术措施和现代管理系统性调控机制，旨在探明自然与人文过程综合作用下各类地理系统问题的成因规律、演化机理和生态环境风险，研究制定工程建设规划、工程技术体系与综合治理方案。从区域发展看，地理工程实际上是对地理系统的优化工程<sup>[34]</sup>，突出地理科学的工程技术性质<sup>[22]</sup>。从乡村系统看，现代地理工程是现代化目标指向和现实性问题导向相结合的乡村空间重构与系统重建过程，主要包括土地整治工程、环境治理工程、生态建设工程、精准扶贫工程、乡村振兴工程等，具有多类型、多尺度性<sup>①</sup>。农业地理工程是地理工程学的组成部分，是地理学与工程学交叉研究在现代农业与乡村领域的进一步深化和系统应用。

（2）农业地理工程试验。针对特定区域地理环境和农业发展问题的土地综合整治、基本农田建设、农业结构调整等重大工程需求，亟需开展以水土配置、土层复配、大田试验、生态防护、地理空间分析与监测等为主要内容的农业地理工程试验和技术应用，探明区域高标准农田建设、健康农业生态系统营造的水土气生业多要素耦合规律，为建立可持续土地利用系统与多功能农业模式提供科学依据。农业地理工程试验是一项从理论、技术到服务决策的贯通式研究，注重以人地系统理论为指导、以农业工程技术为依托、以破解影响区域可持续发展的现实问题和服务国家战略需求为重点，探索建立地理工程试验理论认知与目标体系（图1）。围绕建设高标准农田和农业高质量发展的地理工程试验，就是要聚焦土地系统诊断、参数试验与技术组配，探索构建土体改良和作物优

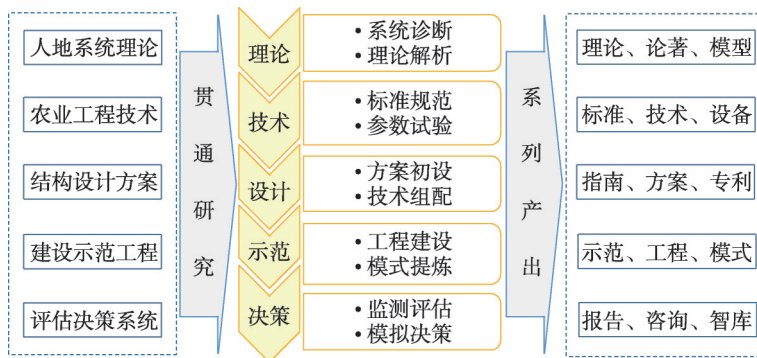


图1 农业地理工程试验的理论认知与目标

Fig. 1 Theoretical cognition and objective of agricultural geographical engineering experiment

① 刘彦随. 现代乡村地理工程与乡村振兴. 2018年中国地理学大会特邀报告. 西安, 2018.8.29.

选的综合农业技术模式,为优化“土地订单整治”工程,实现作物生理适应性与土地适宜性的最佳匹配提供可行的模拟决策方案,确保现代地理工程综合效能和效应<sup>[35]</sup>。其创新点:①以解决农业发展面临的突出问题为导向,优化设计工程试验方案,为农业工程实践提供理论指导与技术支持;②针对农业地域差异特点,强调农业发展的地域性及其功能主导性,因地制宜、分区实施;③应用定性与定量结合的综合集成法、地理分析法,突出试验设计与系统调控的条理性、规范性。

(3) 区域农业生态系统。农业是自然再生产与经济再生产相统一的物质生产部门。自然再生产为农作物的生长过程,经济再生产为农产品交易过程。农业地理工程试验对象是不同空间尺度下的农业自然、经济生产过程,以及农业与气候、土壤和水分等环境要素的相互作用关系。农业生态系统是农业生物群落与其周围自然、经济因素交互作用而形成的人工生态系统,作物—土壤系统(作土系统)是农业生态系统的核心,作土系统的优化调控是农业地理工程试验研究的关键。这是因为作物生长与土壤环境之间存在着多层次、多因素的相互作用,系统之间的物质循环、能量转换和信息传递成为农业系统变化的动力源泉。深入探究作物生长与土壤理化性质之间的关系,旨在揭示农业生态系统的时空演化特征与规律,探明系统功能调控优化的原理与途径。区域农业生态系统试验主要包括沟道边坡防护方式、健康农田系统结构、作物与土壤匹配关系、耕地投入产出经济分析,通过开展土地改良、作物优选交互试验和田间试种,揭示新造地“作土关系”耦合机理与优化调控途径。

(4) 农业地域类型与机理。农业地理工程试验研究在学理上包含地域类型及特性辨识、农业地理工程机理、技术要点和建设目标。根据笔者团队近10多年开展的毛乌素沙地区(沙化地)、黄土高原丘陵沟壑区(水毁地)、山东黄淮海平原农区(空废地)、河北太行山区(荒山地)等典型台站观测试验和工程示范,梳理提出了不同类型的农业地理工程试验机理与技术要点(表1)。地理工程机理是工程试验的基础理论和设计依据;技术要点是工程建设的主要抓手,包括实验、试验、检验三个方面;工程建设立足于区域地理环境、水土资源禀赋,以解决土地利用和农业发展面临的短板性问题为根本任务,有针对性地提出地理工程建设目标,为全域土地整治工程实施和高质量农业发展规划提供理论依据。

表1 农业地理工程试验机理与技术要点

**Tab. 1 The principle and technical points of agricultural geographical engineering experiment**

地域类型及特性	工程机理	技术要点	建设目标
沙地(沙化地)土地整治结构互补性	沙地缺什么: 粘性	组分实验	沙土匹配
	沙地需什么: 粘土	结构试验	粘土特性
	方案是什么: 土层	效能检验	复配构型
沟道(水毁地)土地整治系统稳定性	沟道怕什么: 洪灾	模拟实验	三流形态
	沟道要什么: 安全	平衡试验	三优方案
	方案是什么: 土体	效能检验	水土配置
村庄(空废地)土地整治空间组织性	村庄有什么: 空宅	行为实验	农户选择
	村庄要什么: 安居	结构试验	土地挂钩
	方案是什么: 社区	效能检验	三产融合
山区(荒山地)土地整治人地协调性	农户缺什么: 收入	家庭实验	增收潜力
	农户要什么: 资产	政策试验	土地资产
	方案是什么: 三变	效能检验	股份合作

## 2.2 试验原理

工程技术试验通常需要建立地区性试验研究基地及其若干试验样地或小区，大型地带性试验，需要组建一定区域的样带—样区—样点试验研究体系（网）。笔者团队在陕西建立了从毛乌素沙地（榆林榆阳区）、黄土丘陵沟壑区（延安宝塔区），到渭北塬区（渭南富平县）、秦巴山区（汉中洋县）的“南北样带”，样带中建样区、样区中选样点、样点中设样地。其试验原理是围绕功能导向、技术集成总目标，开展土体结构优配与作物品种优选的“双优试验”，科学制定作物生理适应性与土地适宜性“最佳匹配”的技术方案和工程应用规范。

(1) 试验设计。试验设计是农业地理工程试验的关键环节。试验设计方案是否科学合理和切合实际，将关系到整个工程试验工作能否顺利实施和取得显著成效。作土关系是作物与其生长的土地环境相互作用最直接的关系，如何调整和优化调控作土关系是工程试验设计的主要内容。其核心是持续开展土体复配或土地改良、作物种植田间观测试验，通过实施土体结构优配、作物品种优选的“双优”工程，揭示农田生态系统微循环的动力机制及其水土气生多要素耦合的调控路径，营造适宜于作物生长的土地环境，促使作土系统综合效益趋于最大化。作土关系优化主要包含土地改良、作物优选两个中心环节（图2）。土地改良是指通过采取工程手段与生物措施，营造健康稳定的土壤结构，主要包括土体结构改良和土壤质量改良两个方面；作物优选是指对适合区域气候、土壤等生态环境条件的作物品种及其种植模式进行优化。在试验程序上主要包括6个阶段，即按照逻辑顺序分别为气候—作物优选、土体结构改良、地形—作物优选、土壤质量改良、土壤—作物优选、效益—作物优选。

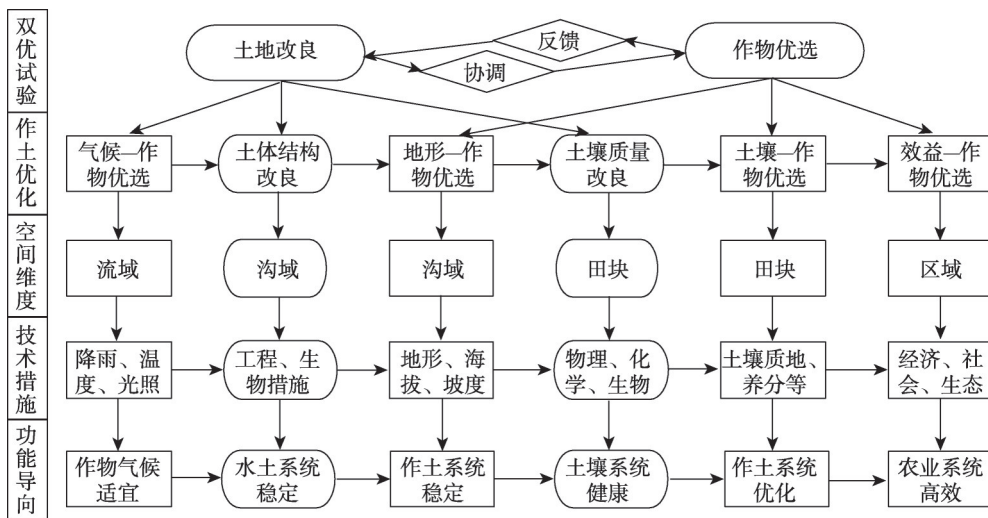


图2 农业地理工程试验原理与方法

Fig. 2 Principles and methods of agricultural geographical engineering experiment

(2) 土地改良。在健康土体营造的基础上，依据作土系统匹配原理（作物对土地适宜性），集成多种技术措施，深入开展水土结构优配和土壤结构改良试验研究（图3）。健康土体结构，是土壤结构和营养结构的动力基础。稳定的土体结构和高效的水土结构是土地改良的重要目标，通过采取工程措施、生物措施，营造农业耕作必备的土体表层，提升水土要素优配和水土系统综合稳定性。土壤剖面的不同土层具有各异的物理、化学性质，对作物生长的功能效用也存在明显差异，营造健康的土壤剖面结构有利于防

止水土流失和土壤肥力退化，是水土结构改良的工作重点和技术要点。土壤结构改良的目标是通过采取物理、化学和生物等技术消除土壤环境障碍因素，改善土壤性状和提升土壤质量。土壤物理改良主要包括客土改良、土壤复配、翻砂压淤、翻淤压砂和引洪淤积等，有助于快速改善耕层结构，改变土壤水、肥、气、热等性状；土壤化学改良是通过向土壤混合添加化学改良剂来提升土地肥力与土壤质量。主要土壤改良剂包括有机肥、粉煤灰、腐殖酸、石灰、石膏、硫酸亚铁、聚丙烯酰胺和各种保水剂等，科学使用改良剂能够增强土壤颗粒的胶结和团聚作用，改善土壤营养元素平衡和土壤颗粒结构，为作物生长提供健康的土壤环境；土壤生物改良是通过增加土壤微生物、土壤动物等措施，达到优化土壤结构、提高土壤质量的目的。

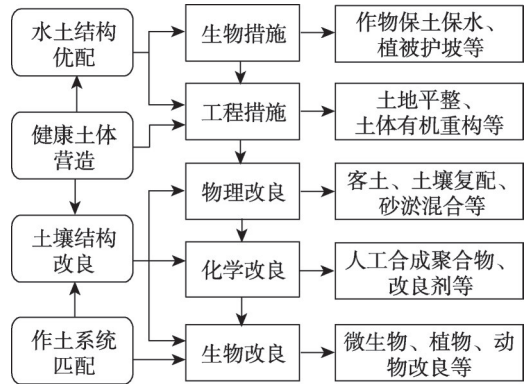


图3 健康土体营造与土地改良路径  
Fig. 3 The healthy soil-body construction and land improvement path

(3) 作物优选。通过对种植作物生理适应性与种植模式经济合理性分析，选取区域适宜性强、综合效益优的作物品种及其种植结构，制定工程试验实施方案。由于不同作物具有自身的生物学和营养学特性，其栽培管理技术、对水土气生等环境适应性需求有所差异。作物优选的目的就是要探寻作物优选及其种植结构优配的耦合模式，营造合理的多种类间作、混作、套种、轮作等结构配置，搭配粮—经—饲作物高效模式，建立丰富多样的农业作土系统，实现农业资源的持续高效利用和农业综合效益的最大化。影响作物优选的外界环境主要包括气候类型、地质地貌、土壤环境等自然条件，以及国家政策、发展战略、地域文化等社会经济条件（图4）。气候影响因子包括降雨、温度、光照等指标，要求优选适合区域气候条件的作物品种及其种植模式；地质地貌影响因子包括地形、海拔、坡度等指标，是决定土地适宜性的关键因素；土壤环境影响因子包括土壤

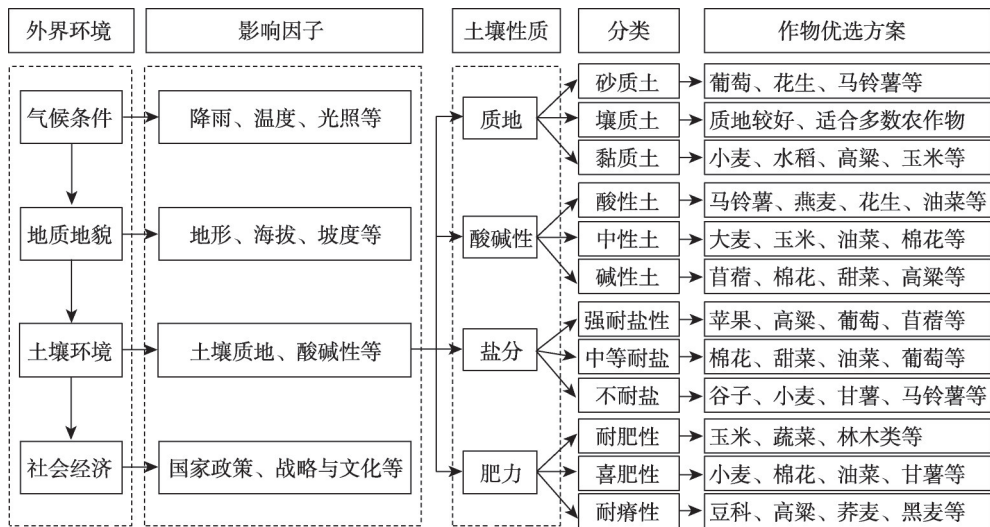


图4 作物优选的影响因素与方案

Fig. 4 The influencing factors and schemes of crop optimization

质地、容重、团聚体、含水量等物理指标和土壤酸性、有机质、养分等化学指标。土壤是农业生产的重要基础，作物生长所需要的水、肥、气等营养元素主要来自土壤环境及其物质循环过程。

### 2.3 应用路径

农业地理工程试验应用，是一项涉及多主体协作、多学科交叉、多技术集成的复杂系统工程，需要多维度设计、多路径推进、多尺度应用。其核心任务是深化贯通综合研究、揭示微观耦合机理、建立工程试验范式。依据农业地理工程试验的理论内涵和应用原则，工程试验的应用路径主要体现在时间维、空间维与逻辑维三个层面。

(1) 时间维。农业地理工程试验的整个过程应遵循规范的流程和时序，主要包括区域问题诊断、试验设计、组织实施、结果分析和应用推广等5个阶段(图5)。问题诊断，主要包括国家战略、区域概况、系统分析、区域评价与实际问题研判等5项内容，其任务是综合评价区域农业系统时空格局演变特征，系统诊断区域农业发展、工程治理所面临的突出问题，并提出破解难题和促进农业资源高效利用的初步方案；试验设计，主要包括明确主题对象、选择目标、综合分析、方案设计与推测结果等5项内容，其任务是分析评价农业生态系统要素组成、结构类型及其功能特性，据此设计农业地理工程试验实施方案；组织实施，主要包括材料准备、人员组织、方案实施、定期监测与搜集数据等5项内容，其任务是建立合理分工与协作机制，落实人员组织、样区选定、物资准备等各项工作，保障试验方案合理落地；结果分析，主要包括核查数据、统计评价、结论分析、结果讨论与试验总结等5项内容，其任务是对工程试验搜集测定的全套数据进行分类和统计分析，得出试验结果与结论；应用推广，主要包括结果讨论、应用设计、样地选择、应用宣传与实践检验等5项内容，其任务是将农业地理工程试验的科研成果及时转化、应用到农业地理工程实践，为工程设计与示范提供系列技术参数，提出促进区域农业高质量发展的建议对策。

(2) 空间维。农业地理工程试验需要充分考虑空间尺度及其对应的研究对象，包括从团聚体、田块、坡面，到沟域、流域、区域等6种尺度(图6)。团聚体微观层面的研究对象是土壤系统，旨在通过物理、化学和生物等改良方式，提升土壤肥力和土壤质

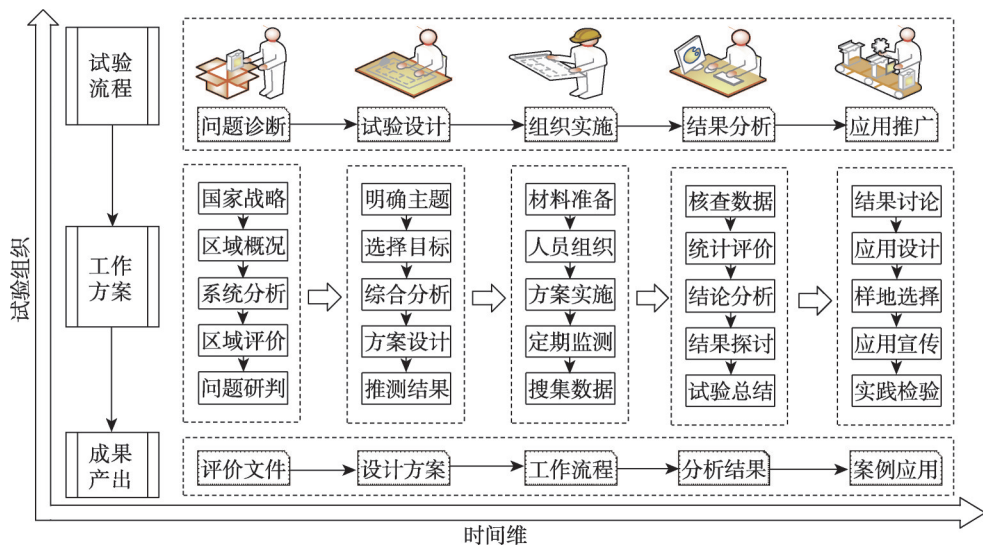


图5 农业地理工程试验组织及其时间维

Fig. 5 Organization and time dimension of agricultural geographical engineering experiment

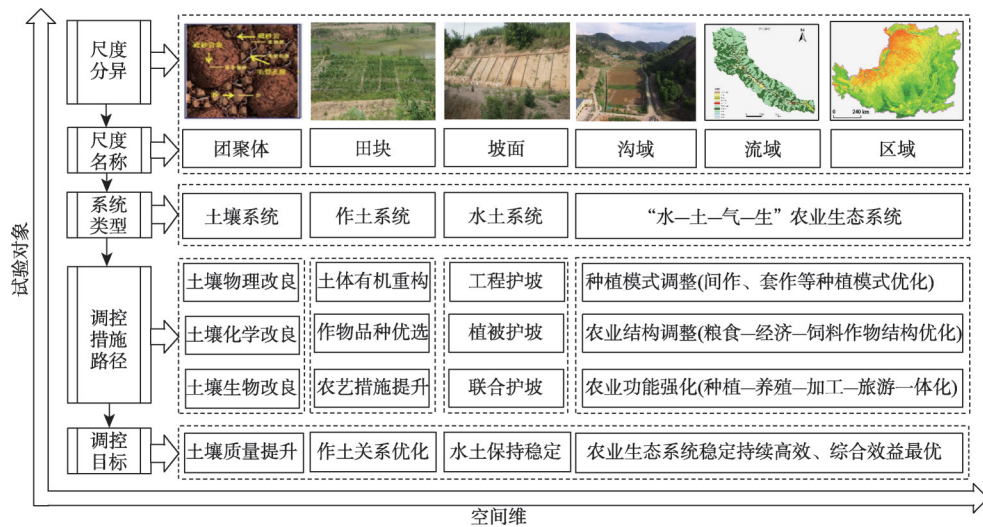


图6 农业地理工程试验对象及其空间维

Fig. 6 The objects and spatial dimension for agricultural geographical engineering experiment

量；田块尺度的研究对象是作土系统，主要通过作物品质改良、品种优选和农艺措施改良等试验措施，不断优化作土关系和提高作物产量；坡面尺度的研究对象是水土系统，通过实施系列工程和植被护坡措施，达到水土保持和提升水土系统稳定性的目的；沟域、流域和区域尺度构成了多层次农业土地工程实施体系，其主要对象是特定区域“水—土—气—生”多要素耦合的农业生态系统，通过调整种植模式、优化农业结构，提高农业功能效率和农业生态系统效益。不同空间尺度的工程试验研究重点、工作内容与研究目标有所差异。坡面和田块尺度是进行农业大田试验的主尺度，着重开展不同方式的土地改良和不同类型的作物种植田间观测、耦合试验，探索提升田块质量和增强坡体稳定性的工程技术措施。团聚体尺度主要以土壤有机重构原理为指导，结合土壤理化性质和作物生长、品质指标的比较分析，深入探究系统内部水土气生多要素组成及其交互作用的微结构、微形态、微机理，为工程技术措施的改进、完善提供合理的解释和验证。沟域、流域和区域尺度的工程试验，侧重于借助实地调研、物理模拟、地理空间分析监测等方法，对区域农业生态系统优化、持续发展和工程技术集成应用作出综合评价和提出科学管控的可行建议。

(3) 逻辑维。农业地理工程试验应根据不同时间与空间尺度，统筹兼顾、系统思维、辩证思考，尤其要借助概念、判断、推理等思维形式，从联系与变化的角度探究农业地理要素调控过程及其工程运行机理。农业地理工程试验的思维逻辑，具体包括因果互换、量变—质变、协调—权衡、分析—综合、影响—反馈、现象—本质等对立统一的辩证思维形式，主要体现在明确问题、选择目标、系统分析、系统优化、做出决策、付诸实践等关键环节。在问题明确与目标选择阶段，重点针对农业地理工程试验的区域性、复杂性特征，坚持量变与质变、问题导向性、矛盾主导性的思维方式，选取关键性的工程技术优先试验，重点解决限制区域土地利用和农业发展的主要瓶颈问题；在系统分析与优化阶段，需要采用系统工程的思维方式，坚持还原论与整体论、分析与综合的思维方式，综合考虑农业生态系统内部要素的基本构型、作用机理和时空演变特征，试验提出农田利用结构、农业产业结构优化方案；在决策和付诸实践阶段，应妥善处理各主体配合与博弈、协调与权衡的关系，鼓励科研工作者、政府部门和工程施工单位人员



紧密合作，发挥各自技术特长和专业优势，协力推进工程试验成果与工程建设、生产实践的有机衔接，确保把宝贵的农业地理工程试验参数、实用技术和模式推广精准落地。在此过程中，亟需通过多主体协同、多部门合作，形成利益共同体。行业部门和地方政府管理部门具有组织协调、经营管理、成效宣传推广方面的独特优势，因而要积极组织协调涉农单位与业务部门联合开展工程试验、技术研发和应用推广工作。相关高校和科研单位担起推进农业地理工程试验相关学科基础理论研究与技术试验、开展新型农业人才教育与职业培训职责，公司和企业应注重工程试验成果的集成应用和相关技术的研发示范，农业专业合作社与普通农户更需要提高科学认识、积极参与工程试验组织实和推广应用实践，成为农业地理工程试验的参与者、技术应用的践行者。

### 3 农业地理工程试验与应用

#### 3.1 区域问题诊断

黄土丘陵沟壑区，是黄土高原地区最典型的地貌类型和空间单元<sup>[36]</sup>。该地区地形破碎、沟壑纵横、生态环境脆弱、水土流失严重，自然地理条件制约着农业可持续发展和土地资源的可持续利用<sup>[37]</sup>。1999年实施退耕还林工程以来，黄土高原地区生态环境质量发生了显著变化。基于SPOT VEGETATION NDVI卫星遥感数据制作的1998年、2018年黄土高原植被指数图，清晰地反映了1998—2018年间黄土高原植被覆被格局变化和黄土丘陵沟壑区“由黄变绿”的显著特征。研究区域延安市地处黄土丘陵沟壑区的核心地带，20年累计退耕还林面积1077.5万亩，植被覆盖度由46%提高到81.3%，呈现出独具特色的“延安绿”（图7）。但是，大规模退耕还林及其补贴政策到期后该地区面临人多地少、缺地少粮等新问题。在此转型背景下，2013—2018年中央支持陕西延安治沟造地土地整治重大工程项目全面实施，近5年完成投资48.3亿元、整治造地55万亩。初步实现了治沟造地“造一退五”的良性循环，即从农业种植产能而论，每新造1亩沟道坝地可为坡地退耕还林置换出近5亩的生态空间。结合当地淤地坝除险加固工程、质量兴农工程，可以有效破解土地利用政策转型和农业生产方式转变进程中出现的新问题，也充分展现了区域性工程建设及其协同推进的特殊重要性。

针对该区域生态建设与农业发展的研究集中在区域景观格局<sup>[38-39]</sup>、生态环境过程<sup>[40-44]</sup>、水土保持<sup>[45-51]</sup>、农业与乡村可持续发展<sup>[52-54]</sup>等方面。通过实地调研发现，该地区治沟造地

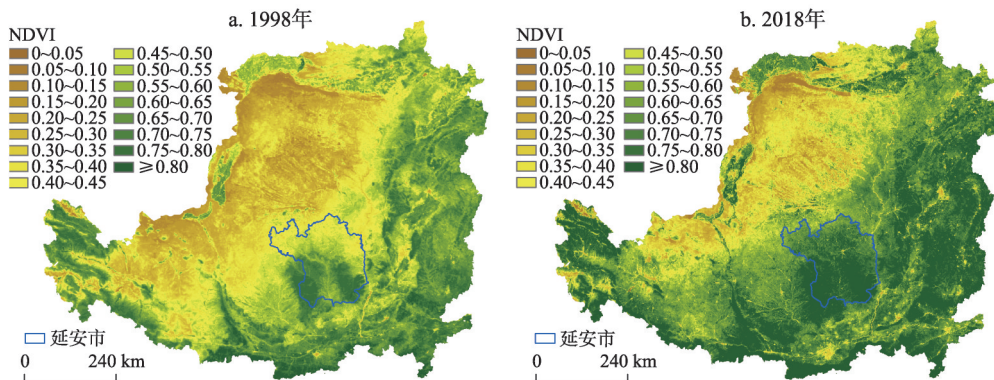


图7 1998年与2018年黄土高原植被指数(NDVI)

Fig. 7 Vegetation index (NDVI) of the Loess Plateau in 1998 and 2018

工程实施和沟道农业发展仍面临许多实际问题有待解决,如治沟造地中沟道开挖边坡失稳、新增耕地初期质量较低、单季种植及传统作物模式效益不高等<sup>[55-57]</sup>(图8)。边坡安全防护与还绿工程是治沟造地工程的重要组成部分。沟道土地平整、取土、切坡和谷坊填筑等工程均产生一定的边坡开挖面,在坡面裸露及坡体重力作用下极易发生滑塌,威胁到新增耕地稳定性和生态安全。治沟造地工程通过从周边取土场运送客土直接填入沟道,形成大面积的生土层,导致新造耕地质量较低,种植单季作物的经济效益也不高。因此,在农业地理工程试验和技术推广实践中,如何充分发挥科技优势,既保障沟道一边坡治理工程的生态安全,又提高新造地土壤质量与利用效益,成为黄土丘陵沟壑区沟道整治与现代农业发展面临的重大挑战。在此战略背景下,深入开展典型区域农业地理工程试验,研制区域土地优配与作物优选技术方案,破解沟道农业转型发展的技术瓶颈具有重要的理论意义和实践价值。

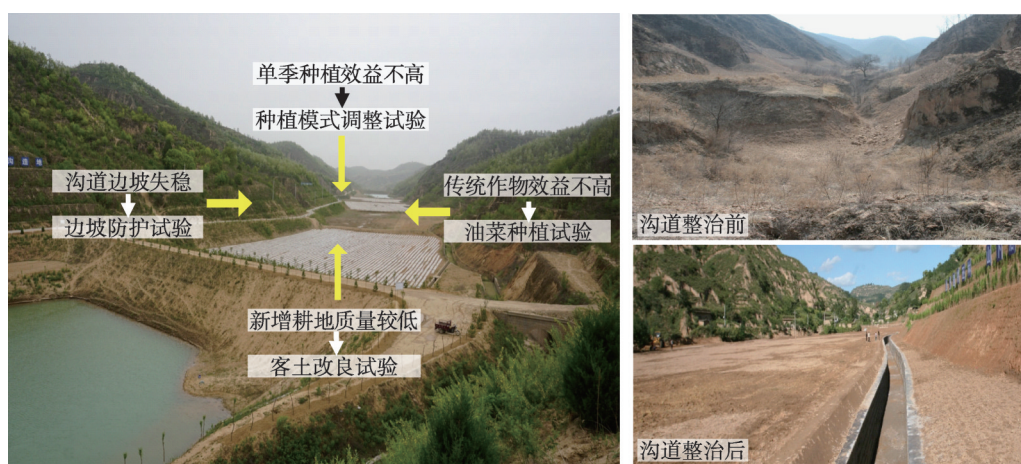


图8 黄土丘陵沟壑区沟道整治工程与试验设计

Fig. 8 Land consolidation engineering and test designing in loess hilly and gully region

### 3.2 工程试验设计

本文基于中央支持陕西延安治沟造地土地整治重大工程规划设计,按照“明确问题—选择目标—系统综合—系统分析—做出决策—付诸实践”的思维顺序,重点针对边坡安全与防护、土体营造与熟化、作物试种与推广、种植模式调整等实践问题,研究提出包括边坡防护试验、客土改良试验、油菜种植试验和种植模式调整试验的工程试验设计总体方案(表2)。

(1) 边坡防护试验。在延安治沟造地工程试验区构建了12个标准径流小区,包括4个植被群落类型和3个坡度(45°、53°、63°,坡比分别为1:1, 1:0.75, 1:0.5)。选择坡比作为差分相等的变量有助于工程技术应用。按照“乔—灌—草”组配原理,护坡植被选取了柠条、紫穗槐、苜蓿,均是改良土壤和植被护坡的常用灌木和草本植物。边坡综合效益评价指标体系包括植被生长度(植被高度、物种丰度、群落盖度)、坡面侵蚀度(坡面细沟密度、坡面产流量、坡面产沙量)、工程效益度(新增耕地面积、开挖土方量)。采用层次分析法确定各指标权重,建立工程边坡综合效益评价模型。

(2) 客土改良试验。设计了对照组(CK),覆盖厚度为5 cm、10 cm、15 cm的红粘土组 and 马兰黄土组等3组、7种不同的处理方式。考虑到20~40 cm的表土是影响玉米根系发育的主要土层,将复合土的厚度设计为30 cm。依据试验设计方案,按照“机械物

表2 农业地理工程试验方案设计的逻辑分析

Tab. 2 Logical analysis of the scheme design of agricultural geographical engineering experiment

逻辑维	边坡防护试验	客土改良试验	油菜种植试验	种植模式调整试验
明确问题	工程边坡安全性与稳定性不高	新增耕地质量不高、土体沉降与湿陷	传统作物种植单一、经济效益低	单季种植模式的效益不高、资源浪费
选择目标	植被护坡技术与坡度适宜控制技术	客土改良技术,土壤快速熟化	作物优选技术,提升土地利用效率	一季改两季的作物优配与种植技术
系统综合	植被—土壤系统	水土耦合系统	作土匹配系统	农田利用系统
系统分析	控制坡度、植被护坡,保持水土资源	土体营造、土壤改良,提升土壤质量	引进高收益、多功能的作物品种	探索两季作物种植的沟道农业新模式
做出决策	不同坡度及植被措施的坡面综合效益	不同覆土类型和厚度的土壤改良效果	不同播期和播种密度的油菜种植	不同种植模式的作物产量与经济效益
付诸实施	延安羊圈沟流域,人工建设不同坡度边坡模拟工程削坡	延安羊圈沟流域,选取红粘土和马兰黄土取土场,机械施工	延安顾屯流域,购买华油杂62饲料油菜,种植测产	延安顾屯流域,购买试验作物良种,早春物候观测,种植测产

资准备—表土层剥离—取土场取土—试验田覆土—土壤搅拌混合—翻耕机翻耕”的实施流程,将红粘土、马兰黄土与黄绵土按照设定的体积比充分混合,形成深度为30 cm的工程试验混合土。随后在试验田进行玉米、饲料油菜和马铃薯作物的种植试验,并定期采集和测定不同样区的土壤理化性质、作物长势及其产量数据。

(3) 油菜种植试验。利用黄土丘陵沟壑区治沟造地新增的耕地资源条件和气候变暖带来的光温资源优势,优选华中农业大学傅廷栋院士科研团队选育的华油杂62饲料油菜新品种,设定油菜播种日期和种植密度两个变量,播种日期分别为4月19日、5月9日、6月10日,而种植密度分别为15万株/hm<sup>2</sup>、22.5万株/hm<sup>2</sup>、30万株/hm<sup>2</sup>。重点试验和观测引进油菜种植适宜性、生物特性及其经济性,为调整沟道产业结构和促进“三产”发展积累系列关键技术参数。

(4) 种植模式调整试验。围绕优化农业结构、探索创建“一季改两季”作物种植模式,开展多种粮食作物、经济作物和饲料作物的复合种植试验。其中,油菜品种主要是华油杂62和当地油菜品种延油2号。重点试验不同播种日期、不同作物组合下的主要作物品种长势及产量状况,测算不同作物组合种植模式的投资收益比,持续观测“玉米+油菜”“马铃薯+油菜”等多种“油菜+”种植模式的关键技术参数。

### 3.3 技术模式应用

基于农业地理工程试验,深入分析不同坡度和植被类型对坡面综合效益的影响效应,评估不同覆土类型及其厚度对土壤理化性质、作物产量的影响,探明沟道土地整治后种植饲料油菜的技术要点,验证沟道农业“一季改两季”种植模式调整的可行性,提出农田质量提升、效益增加、稳定性增强的沟道土地整治措施,为实施黄土丘陵沟壑区治沟造地工程与土地持续利用规划提供理论指导和技术支撑(图9)。

(1) 边坡防护试验应用结果。将边坡防护试验设计方案应用于边坡防护工程,初步获取了不同开挖坡度和植被护坡措施下治沟造地边坡防护的综合效益、植被生长水平、坡面侵蚀状况和工程效益等指标值,揭示了不同试验设计方案存在的显著差异性。发现53°开挖边坡的综合效益明显优于45°和63°的边坡,是治沟造地开挖坡度综合性能最优的边坡类型;一种或多种植被类型边坡的综合效益显著优于无植被覆盖的边坡<sup>[58]</sup>。

(2) 客土改良试验应用结果。在沟道治沟造地过程中,不同覆土类型及其厚度对土壤理化性质、作物产量的影响存在显著差异。随着土层中红粘土覆土厚度的增加,土壤的黏性特征逐渐增强,土壤容重、粘粒比例、土壤紧实度、土壤含水量、土壤有机质等



图9 农业地理工程试验的实施案例

Fig. 9 Case study of agricultural geographical engineering experiment

含量有所增加，而土壤总孔隙度和砂粒的比例逐渐减小。表明成土物质结构的互补性及其合理组配，是实施健康土体营造与土地改良的重要基础。

(3) 油菜种植试验应用结果。比较试验表明，黄土丘陵沟壑区具备种植春季饲料油菜的自然生态适宜性。春播饲料油菜的播种量以  $3.9\sim 5.1\text{ kg/hm}^2$  为宜，苗期密度宜控制在  $22.5\text{ 万株/hm}^2$  左右。在试验研究区进行饲料油菜推广种植，能够有效利用当地水土资源，提高传统农业种植收益和生态效益，推进形成了当地“种植+养殖+观光”一体的新型农业发展模式<sup>[54]</sup>。

(4) 种植模式调整试验结果。组配试验表明，治沟造地整体优化了农业结构，为合理利用区域水土资源、农业资源和气候资源奠定了坚实基础。在新增农田实行“一季改两季”种植模式具有科学性、可行性，主要复合种植模式包括“甜糯玉米+华油杂62”“饲料玉米+华油杂62”和“延油二号+华油杂62”，其净收益均较传统的单季作物种植有显著提高，对于提升土地利用效率和农业经济效益具有重要的现实意义。

### 3.4 高质量发展对策

黄土高原是黄河流域的重要组成部分，人地系统协调与农业农村高质量发展是黄河流域高质量发展的重要内容。高质量发展的核心要义是保持有质量效益、发展效能的适度增长。农业农村高质量发展是转变农业发展方式与经营模式的根本要求，也是实施城乡融合与乡村振兴战略的内涵所在。农业地理工程将地理综合体思想、人地系统理论融入农业系统工程建设，促进了地理宏观战略和工程微观战术的有机衔接。当前以科技创新为支撑、以绿色特色农业为抓手，大力发展黄土高原沟道绿色产业，推进黄河流域科学研究和加快农业农村高质量发展势在必行。通过现代农业地理工程试验与技术推广，探明现代农业生产规模、质量效益与生态环境效应相协调的地域规律，以及农业转型、乡村振兴与贫困治理、绿色发展的科学途径，着力打造集农业生产、农耕体验、科教研学、旅游观光、康乐养生于一体的田园综合体和山水林田湖草生命共同体，成为构建现

代农业产业体系、生产体系和经营体系，实现农业农村高质量发展的新机遇、新目标。

1999年以来推进的退耕还林工程，加快了黄土高坡由黄变绿的转变进程。近10年来实施的治沟造地土地整治重大工程，既巩固了退耕还林成果，又促进了农业地域结构、产业结构与经营结构的系统转型。农业地理工程试验与技术推广取得了明显成效，在延安实现了“山上退耕还林，山下治沟造地”的协调发展，沟道新造耕地每亩产能是山坡地的3~5倍<sup>[59]</sup>，通过治沟造地优化农业结构，提高农业综合生产能力，大大促进了“三生”结合、“三产”融合和农业集约化发展。通过工程试验与技术示范推进了当地水土资源、农业资源和气候资源的有效整合与合理利用，科学验证和示范推广了玉米、饲料油菜等“一年两季”种植新模式。在延安市延长县、宝塔区等治沟造地项目区示范推广“一年两季”种植+畜牧养殖模式，实现了种植（玉米+饲料油菜）亩均增收1800元和农民就地就业，为推进县域农业增效、农民增收与可持续脱贫发挥了积极作用。

黄土高原农业农村高质量发展的核心目标在于推进“四转”：一是优化调整“三生”结构，促使农业地域空间由山地农业向沟道农业转移；二是优化调整人地关系，促使农业生产由广种薄收向少种多收转变；三是优化调整城乡关系，促使农村经济由单一农业向三产融合发展转型；四是优化调整组织方式，促使农业分散经营向专业合作经营机制转换。大力发展以治沟造地为基础的沟道现代农业，促进生态保护、产业融合、人地协调，是实现黄土高原绿水青山、兴业富民的重要途径。全面构建“三循环”模式：一是农业产业自身的种养内循环；二是农业生产与加工、电商外循环；三是农业与旅游、康养、乡城一体的多功能大循环，推进形成黄土高原产业内循环及其与黄河流域双循环互促共进的发展新格局。随着现代信息技术发展与服务水平的不断提高，日益兴盛的智慧农业、精品农业、有机农业、共享农业等新理念、新业态，以其资源集约、生态友好、品质优良等特点，为农业农村高质量发展提供了新思路、新途径。新时期黄土高原应立足生态建设与工程技术基础，充分发挥地理工程技术的支撑作用和利用大数据、区块链等技术平台，深入探究优化农业生产方式和创新经营管理模式的新动能、新途径，成为促进现代农业提质增效和高质量发展的不竭动力。

## 4 结论与讨论

现代地理工程是现代地理学与工程学的新型交叉学科，强化地理学综合性、区域性与工程学系统性、技术性的有机结合，集成了区域发展地理综合体规划思想、区域治理工程化技术措施和现代管理系统性调控机制。农业地理工程是地理工程科学的重要组成部分，是地理学与工程学交叉研究在现代农业与乡村领域的进一步深化和系统应用。本文基于延安治沟造地土地整治工程重大项目，开展了边坡防护试验、客土改良试验、油菜种植试验、种植模式调整试验及其相关技术模式应用。在理论与机制层面，探明了农业地理工程试验的概念内涵、试验原理、应用模式，提出作土关系优化调控是工程试验设计的主要内容；在技术应用层面，提出农业地理工程试验的任务在于深化贯通综合研究，揭示微观耦合机理，建立工程试验范式。工程试验的应用路径主要体现在时间维、空间维与逻辑维三个层面；在区域实践层面，揭示了黄土丘陵沟壑区不同坡度和植被类型对边坡综合效益的影响机制，以及治沟造地工程不同覆土类型及其厚度对土壤理化性质、作物产量的影响，探明了沟道种植饲料油菜和农田管理技术要点，验证了沟道农业“一季改两季”种植模式的科学性与可行性，为合理利用区域水土资源、农业资源、气候资源，促进农业高质量发展和建设美丽黄土高原奠定了科学认知与实践基础。

现代乡村地理学是研究乡村地域系统机理、格局、过程及其乡城融合发展规律的科学。乡城融合发展本质是乡村地域系统的城市内在化和城乡等值化,是新型城镇化、农业农村现代化及其有机衔接的更高级形式。随着人地系统理论的创新发展和现代科技成果在农业领域的广泛应用,现代农业地域类型重构、作土系统优化调控的基础理论和技术方法得到快速发展。新时期农业地理工程和乡村地理研究,要确立全球乡村地域系统观和乡城有机融合新认知,构建全球—国家—区域多层次现代农业与乡村地理科学体系。在区域层面应侧重于全域土地整治、农业资源利用、农田系统保育等前沿领域,注重探究地理工程多尺度性及其转换效应,系统推进地理试验、地理评估、地理工程和人地系统科学贯通综合研究。重点开展不同类型区域土地优配和不同作物优选的“双优”工程观测与耦合试验,探明区域土地配置适宜性与作物生理适应性的最佳匹配机理和作土关系耦合调控机制。在地域上推进沟域型、山地型、城郊型等不同类型农业综合体模式试验与工程技术应用,深入研究健康农业生态系统营造与水土气生资源要素耦合的地域规律,揭示农田土体结构—土壤结构—作物营养结构的传导机理及其级联效应,探究特定问题导向的“测地配方施土”对于“测土配方施肥”的支撑作用及其耦合路径。

现代地理工程是关于运用地理学理论与方法探究区域性工程技术难题和解决特定人地系统问题的学问。创新发展地理工程学将成为现代地理学有别于传统地理学的重要标志之一。现代地理学应强化基础理论与应用技术的有机衔接,既讲大道理,揭示人地交互作用机理和探究规律,又出细方案,破解区域发展现实难题和精准施策。深入开展不同区域农业地理工程试验与技术应用,不仅发挥了现代地理学在区域农业与乡村发展等领域宏观决策的支撑作用,而且弥补了传统地理学缺少落地工程与技术支撑的不足。现代地理工程研究对象是不同类型的人地系统,其本身是一个不断适应、改进与创新发展的过程。面向国家战略需求和学科发展需要,加快创建现代地理工程理论与技术体系,推动创设新型交叉学科门类地理工程一级学科,探索创立现代地理“三师”(工程师、规划师、评估师)专业培养与执业认证机制,推进创新智慧地球时代地理工程研究和发 展人地系统科学<sup>[60]</sup>,成为现代地理学应对全球环境变化、人类可持续发展和构建人类命运共同体面临巨大挑战的时代重任与科学使命。

## 参考文献(References)

- [1] Cai Jianming, Yang Zhenshan. Developing China's urban agriculture by learning from international experiences. *Geographical Research*, 2008, 27(2): 362-374. [蔡建明, 杨振山. 国际都市农业发展的经验及其借鉴. *地理研究*, 2008, 27(2): 362-374.]
- [2] Liu Yansui. Research on the urban-rural integration and rural revitalization in the new era in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(4): 637-650. [刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴. *地理学报*, 2018, 73(4): 637-650.]
- [3] Feng Weilun, Liu Yansui, Qu Lulu. Effect of land-centered urbanization on rural development: A regional analysis in China. *Land Use Policy*, 2019, 87: 104072. Doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104072.
- [4] Liu Yansui, Zhang Ziwen, Wang Jieyong. Regional differentiation and comprehensive regionalization scheme of modern agriculture in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(2): 203-218. [刘彦随, 张紫雯, 王介勇. 中国农业地域分异与现代农业区划方案. *地理学报*, 2018, 73(2): 203-218.]
- [5] Hu Huanyong. Agricultural regions of China. *Acta Geographica Sinica*, 1936, 3(1): 1-17. [胡焕庸. 中国之农业区域. *地理学报*, 1936, 3(1): 1-17.]
- [6] Zhou Lisan. Discussion on the formation, evolution, internal structure and regionalization system of agricultural region. *Acta Geographica Sinica*, 1964, 30(1): 14-22. [周立三. 试论农业区域的形成演变、内部结构及其区划体系. *地理学报*, 1964, 30(1): 14-22.]
- [7] Huang Bingwei. Ecological balance and agricultural geography: Concept of ecological balance. *Geographical Research*, 1982, 1(1): 3-8. [黄秉维. 生态平衡与农业地理研究: 生态平衡概念. *地理研究*, 1982, 1(1): 3-8.]

- [8] Liu Yansui. Modern agricultural geography and land use innovation research: The 90th birthday of Mr. Wu Chuanjun. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(4): 353-358. [刘彦随. 现代农业地理与土地利用创新研究: 贺吴传钧先生90华诞. *地理学报*, 2008, 63(4): 353-358.]
- [9] Deng Jingzhong. Some problems on the comprehensive agricultural regionalization of China. *Geographical Research*, 1982, 1(1): 9-18. [邓静中. 全国综合农业区划的若干问题. *地理研究*, 1982, 1(1): 9-18.]
- [10] Long Hualou, Liu Yansui, Zhang Xiaolin, et al. Recent progress in agricultural geography and rural development research. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(8): 1145-1158. [龙花楼, 刘彦随, 张小林, 等. 农业地理与乡村发展研究新近进展. *地理学报*, 2014, 69(8): 1145-1158.]
- [11] Wu Chuanjun. Promoting areal specialization of agriculture through developing areal predominance. *Acta Geographica Sinica*, 1981, 48(4): 349-357. [吴传钧. 因地制宜发挥优势逐步发展我国农业生产的地域专业化. *地理学报*, 1981, 48(4): 349-357.]
- [12] Li Yurui, Liu Yansui, Long Hualou, et al. Village transformation development, resources and environment effects and their optimal regulation in the suburb of metropolitan: The case of Beicun in Shunyi District, Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(6): 825-838. [李裕瑞, 刘彦随, 龙花楼, 等. 大城市郊区村域转型发展的资源环境效应与优化调控研究: 以北京市顺义区北村为例. *地理学报*, 2013, 68(6): 825-838.]
- [13] Liu Yansui. *Geography of New Countryside Construction in China*. Beijing: Science Press, 2011. [刘彦随. *中国新农村建设地理理论*. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [14] Wang Yongsheng, Li Yuheng, Liu Yansui. Principle and method of modern agricultural two-dimension optimization engineering experiment: A case study of Mu Us Sandy. *Engineering Sciences*, 2019, 21(2): 48-54. [王永生, 李玉恒, 刘彦随. 现代农业双优工程试验原理与方法: 以毛乌素沙地为例. *中国工程科学*, 2019, 21(2): 48-54.]
- [15] Chen Zongfeng, Liu Yansui, Feng Weilun, et al. Study on spatial tropism distribution of rural settlements in the loess hilly and gully region based on natural factors and traffic accessibility. *Journal of Rural Studies*, 2019. Doi: 10.1016/j.jrurstud.2019.02.014.
- [16] Jiang Kaisi, Liu Zhengjia, Li Yurui, et al. Land use change of typical villages in the loess hilly and gully region and implications for regional rural transformation and development. *Progress in Geography*, 2019, 38(9): 1305-1315. [姜凯斯, 刘正佳, 李裕瑞, 等. 黄土丘陵沟壑区典型村域土地利用变化及对区域乡村转型发展的启示. *地理科学进展*, 2019, 38(9): 1305-1315.]
- [17] Wu Yifan, Feng Weilun, Zhou Yang. Practice of barren hilly land consolidation and its impact: A typical case study from Fuping County, Hebei Province of China. *Journal of Geographical Science*, 2019, 29(5): 762-778.
- [18] Wu Wenhao, Chen Zongfeng, Li Yuheng, et al. Land engineering and its role for sustainable agriculture in the agropastoral ecotone: A case study of Yulin, Shaanxi Province, China. *Journal of Geographical Science*, 2019, 29(5): 818-830.
- [19] Chen Qunli, Yao Jianlu, Meng Tianyou. Benefit analysis of slope farmland regulation project in karst mountainous area. *Soil and Water Conservation in China*, 2007(7): 27-28. [陈群利, 姚建陆, 孟天友. 喀斯特山区坡耕地整治工程效益分析. *中国水土保持*, 2007(7): 27-28.]
- [20] Cui Peng, Wang Daojie, Wei Fangqiang. Model and effect of ecological restoration of dry-hot valley: A case study of the CAS Dongchuan Debris Flow Observation Station. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(3): 60-64. [崔鹏, 王道杰, 韦方强. 干热河谷生态修复模式及其效应: 以中国科学院东川泥石流观测研究站为例. *中国水土保持科学*, 2005, 3(3): 60-64.]
- [21] Long Hualou, Liu Yansui. Rural restructuring in China. *Journal of Rural Studies*, 2016, 47: 387-391
- [22] Qian Xuesen. To distinguish "Earth Science" from "Earth Surface Science": Speech at the academic symposium on Earth Surface Science. *Journal of Catastrophology*, 1987, 2(3): 1-5. [钱学森. 要区别“地球科学”和地球表层学: 在地球表层学学术讨论会上的发言. *灾害学*, 1987, 2(3): 1-5.]
- [23] Xiao Ping. On geographical engineering: A case study of a new model for developing and exploiting small catchments in mountainous regions with red soils. *Geographical Research*, 1995, 14(4): 97-103. [肖平. 试论地理工程: 以红壤山区小流域开发治理的新模式设计为例. *地理研究*, 1995, 14(4): 97-103.]
- [24] Tang Dengyin. Experimental geography and geographical engineering. *Geographical Research*, 1997, 16(1): 1-10. [唐登银. 实验地理学与地理工程学. *地理研究*, 1997, 16(1): 1-10.]
- [25] Liu Yansui. Integrated land research and land resources engineering. *Resources Science*, 2015, 37(1): 1-8. [刘彦随. 土地综合研究与土地资源工程. *资源科学*, 2015, 37(1): 1-8.]
- [26] Liu Yansui, Wang Yongsheng. Rural land engineering and poverty alleviation: Lessons from typical regions in China. *Journal of Geographical Science*, 2019, 29(5): 643-657.

- [27] Zhu Xianmo. Theory and implication of "28 words strategy" on land consolidation in Loess Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 1998, 13(3): 232-236. [朱显谟. 黄土高原国土整治“28字方略”的理论与实践. 中国科学院院刊, 1998, 13(3): 232-236.]
- [28] Shan Lun. Towards the integrated control of the Loess Plateau and drying up of the Yellow River. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1999, 19(2): 3-5. [山仑. 我国著名水土保持专家工程院山仑院士论黄土高原治理与黄河断流问题. 水土保持通报, 1999, 19(2): 3-5.]
- [29] Fu Bojie. The measures of rational land use in the Loess Plateau of Northern Shaanxi Province. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, 3(3): 33-39. [傅伯杰. 陕北黄土地区土地合理利用的途径与措施. 水土保持学报, 1989, 3(3): 33-39.]
- [30] Shao Mingan, Jia Xiaoxu, Wang Yunqiang, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(1): 14-22. [邵明安, 贾小旭, 王云强, 等. 黄土高原土壤干层研究进展与展望. 地球科学进展, 2016, 31(1): 14-22.]
- [31] Liu Yansui, Jin Xiaoyan, Hu Yecui. Study on the pattern of rural distinctive eco-economy based on land resources: A case study of Suide county in loess hilly areas. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 7438-7450. [刘彦随, 靳晓燕, 胡业翠. 黄土丘陵沟壑区农村特色生态经济模式探讨. 自然资源学报, 2006, 21(5): 7438-7450.]
- [32] Liu Yansui, Li Yurui. Engineering philosophy and design scheme of gully land consolidation in Loess Plateau. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(10): 1-9. [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. 农业工程学报, 2017, 33(10): 1-9.]
- [33] Xie Bingxiang. Design of vegetation restoration and slope water and soil conservation project of ditch reclamation project of Yan'an City. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2014, 20(5): 38-39. [谢冰祥. 延安市治沟造地工程植被恢复及坡面水土保持工程设计. 水利科技与经济, 2014, 20(5): 38-39.]
- [34] Wang Zheng, Wu Bihu. PRED problem and geographical project. *China Population, Resource and Environment*, 1992, 2(2): 45-47. [王铮, 吴必虎. PRED问题与地理工程. 中国人口·资源与环境, 1992, 2(2): 45-47.]
- [35] Liu Yansui. Research on the geography of rural revitalization in the new era. *Geographical Research*, 2019, 38(3): 461-466. [刘彦随. 新时代乡村振兴地理学研究. 地理研究, 2019, 38(3): 461-466.]
- [36] Cai Yanrong, Li Yonghong, Gao Zhaoliang. Research on division of land resources in Loess Plateau Region. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2015, 5(5): 38-47. [蔡艳蓉, 李永红, 高照良. 黄土高原地区土地资源分区研究. 农业灾害研究, 2015, 5(5): 38-47.]
- [37] Liu Yansui, Feng Dexian. Evaluation of sustainable agriculture and rural development of Suide county in Northern Shaanxi province. *Journal of Shaanxi Normal University*, 2001, 29(1): 85-89. [刘彦随, 冯德显. 陕北绥德县可持续农业与农村经济发展评价. 陕西师范大学学报, 2001, 29(1): 85-89.]
- [38] Liu Xuye. Research progress and future research trend of sustainable land use. *Economic Research Guide*, 2015, (9): 172-176. [刘旭晔. 土地可持续利用研究进展及未来研究趋势. 经济研究导刊, 2015, (9): 172-176.]
- [39] Fu Bojie. *Change of Landscape Pattern and Soil Erosion in Loess Plateau*. Beijing: Science Press, 2014. [傅伯杰. 黄土高原景观格局变化与土壤侵蚀. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [40] Wang Li, Shao Mingan, Wang Qianjiu, et al. Historical changes in the environment of the Chinese Loess Plateau. *Environmental Science and Policy*, 2006, 9(7-8): 675-684.
- [41] Zhang Zhiqiang, Cheng Guodong. On some issues and stratiges of ecological construction in northwest China. *Arid Land Geography*, 2001, 6(3): 243-250. [张志强, 程国栋. 论西北地区生态环境建设问题与战略. 干旱区地理, 2001, 6(3): 243-250.]
- [42] Huang Zhilin, Chen Liding, Fu Bojie. Study on dynamic change of water conservation effect of different land use types in hilly and gully loess region. *Symposium on Land Change Science and Ecological Construction*, 2002: 249-257. [黄志霖, 陈利顶, 傅伯杰. 黄土丘陵沟壑区不同土地利用类型水保效应动态变化研究. 土地变化科学与生态建设学术研讨会论文集, 2002: 249-257.]
- [43] Zhong Lina, Zhao Wenwu, Lv Yihe, et al. Analysis of landscape pattern evolution characteristic in the hilly and gully area of Loess Plateau: A case study in Yan'an City, Shaanxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(12): 3368-3377. [钟莉娜, 赵文武, 吕一河, 等. 黄土丘陵沟壑区景观格局演变特征: 以陕西省延安市为例. 生态学报, 2014, 34(12): 3368-3377.]
- [44] Wang Shuai, Fu Bojie, Gao Guangyao, et al. Soil moisture and evapotranspiration of different land cover types in the Loess Plateau, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2883-2892.
- [45] Wang Yunqiang, Hu Wei, Zhu Yuanjun, et al. Vertical distribution and temporal stability of soil water in 21-m profiles under different land uses on the Loess Plateau in China. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 543-554.



- [46] Liu Yansui, Guo Yanjun, Li Yurui, et al. GIS-based effect assessment of soil erosion before and after gully land consolidation: A case study of Wangjiagou project region, Loess Plateau. *Chinese Geographical Science*, 2015, 25(2): 137-146.
- [47] Huang Yilong, Chen Liding, Fu Bojie, et al. Effect of land use and topography on spatial variability of soil moisture in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Ecohydrology*, 2012, 5(6): 826-833.
- [48] Fu Bojie, Zeng Yuan, He Chansheng, et al. Assessing the soil erosion control service of ecosystems change in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2011, 8(4): 284-293.
- [49] Fu Bojie, Ma Keming, Zhou Huafeng. The effect of land use structure on the distribution of soil nutrients in the hilly area of the Loess Plateau, China. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(8): 732-736.
- [50] Jia Xiaoxu, Shao Mingan, Zhang Chencheng, et al. Regional temporal persistence of dried soil layer along south-north transect of the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 2015, 528: 152-160.
- [51] Yan Weiming, Deng Lei, Zhong Yangquanwei, et al. The characters of dry soil layer on the Loess Plateau in China and their influencing factors. *Plos One*, 2015, 10(8): 1-14.
- [52] Liu Yansui, Chen Zongfeng, Li Yurui. The planting technology and industrial development prospects of forage rape in the loess hilly area: A case study of newly-increased cultivated land through gully land consolidation in Yan'an, Shaanxi Province. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(12): 2065-2074. [刘彦随, 陈宗峰, 李裕瑞. 黄土丘陵沟壑区饲料油菜种植试验及其产业化前景: 以延安治沟造地典型项目区为例. *自然资源学报*, 2017, 32(12): 2065-2074.]
- [53] Zhang Zilong, Lu Chenyu, Chen Xingpeng, et al. Spatio-temporal evolution of agricultural eco-efficiency in Loess Plateau of east Gansu Province: A case study of Qingyang City. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(4): 472-478. [张子龙, 鹿晨昱, 陈兴鹏, 等. 陇东黄土高原农业生态效率的时空演变分析: 以庆阳市为例. *地理科学*, 2014, 34(4): 472-478.]
- [54] Liu Guobin. Soil conservation and sustainable agriculture on the loess plateau: Challenges and prospects. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 1999, 28(8): 663-668.
- [55] He Chunxiong. The present situation, characteristics and functions of the project of treating ditches and constructing land in Yan'an. *Journal of Earth Environment*, 2015, 6(4): 255-260. [贺春雄. 延安治沟造地工程的现状、特点及作用. *地球环境学报*, 2015, 6(4): 255-260.]
- [56] Liu Zhenming. Problems and safeguard measures existing in the process of land construction. *Technology Innovation and Application*, 2019(24): 150-151. [刘振明. 治沟造地过程中存在的问题与保障措施. *科技创新与应用*, 2019(24): 150-151.]
- [57] Wang Peng, Duan Xingxing, Zhao Yu, et al. Soil quality evaluation of new cultivated land for ditching and building: Taking Yan'an Baota District as an example. *Land Development and Engineering Research*, 2019, 4(1): 41-45. [王鹏, 段星星, 赵禹, 等. 治沟造地新增耕地的土壤质量评价: 延安宝塔区为例. *土地开发工程研究*, 2019, 4(1): 41-45.]
- [58] Feng Weilun, Liu Yansui, Chen Zongfeng, et al. Theoretical and practical research into excavation slope protection for agricultural geographical engineering in the Loess Plateau: A case study of China's Yangjuangou catchment. *Journal of Rural Studies*, 2019. Doi: 10.1016/j.jrurstud.2019.01.020.
- [59] Liu Yansui, Li Yuheng. Revitalize the world's countryside. *Nature*, 2017, 548(7667): 275-277.
- [60] Liu Yansui. Modern human-earth relationship and human-earth system science. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(8): 1221-1234. [刘彦随. 现代入地关系与入地系统科学. *地理科学*, 2020, 40(8): 1221-1234.]

## Modern agricultural geographical engineering and agricultural high-quality development: Case study of loess hilly and gully region

LIU Yansui<sup>1,2</sup>, FENG Weilun<sup>1</sup>, LI Yurui<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** Agricultural geography is the interdisciplinary subject of agricultural science and geographical science, and agricultural geographical engineering is the further deepening and

systematic application of the interdisciplinary research of geography and engineering in the field of modern agriculture and rural revitalization, and it is an important material basis to ensure the agricultural high-quality development. With the innovative development of modern agricultural science and technology and human-earth system science, the scientific and technological needs of regional agricultural infrastructure are increasingly strong, and agricultural geographical engineering experiments have become an important task of agricultural engineering technology research and farmland system management. This article expounds the scientific connotation, experimental principles and technical methods of agricultural geographical engineering, and takes the loess hilly and gully region as an example to carry out the experimental research on geographical engineering and discussed the countermeasures for high-quality agricultural development. Results show that: (1) Agricultural geographical engineering experiments mainly include soil and water allocation, soil layer composition, field experiment, ecological protection, geospatial analysis and monitoring for specific regional geographical environment and agricultural development issues, aiming to explore coupling law of resource elements for regional high-standard farmland construction and healthy agricultural ecosystem construction, and establish a sustainable land use system and multifunctional agricultural management model. (2) Agro-ecosystem experiments mainly includes trench slope protection methods, healthy farmland system structure, crop-soil matching relationship, economic analysis of farmland input and output, which aimed to reveals the coupling mechanism and optimal control approach of "crop-soil relationship" by carrying out interactive experiments and field trials for land improvement and crop optimization. (3) Optimization and regulation of crop-soil relationship is the main content of engineering experiment design, which includes six stages: climate-crop optimization, soil-body structure improvement, terrain-crop optimization, soil quality improvement, soil-crop optimization and benefit-crop optimization. (4) The core tasks of the application of agricultural geoengineering technology are to deepen the comprehensive research, reveal the micro-coupling mechanism and establish the engineering test paradigm, and its application path is mainly reflected in three dimensions of time, space, and logic. The geographical engineering experiment of modern agriculture and its application in the new era are conducive to enriching the frontier theories and methodology of agricultural geography, and are of great significance to the advancement of geographical engineering research and the decision-making of agricultural and rural high-quality development.

**Keywords:** agricultural geography; modern geographical engineering; land consolidation engineering; farmland system management; high-quality development; loess hilly and gully region of China