第 43 卷第 1 期
2023 年 01 月

地 理 科 学
Scientia Geographica Sinica

Vol. 43 No. 1
Jan., 2023

黄云鑫, 刘彦随, 刘正佳. 黄土丘陵沟壑区现代沟道农业及其可持续发展 [J]. 地理科学,2023,43(1):130-141.[Huang Yunxin, Liu Yansui, Liu Zhengjia. Modern gully agriculture and its sustainable development in the loess hilly and gully region. Scientia Geographica Sinica,2023,43(1):130-141.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.01.014

黄土丘陵沟壑区现代沟道农业及其可持续发展

黄云鑫[1,2,3], 刘彦随[1,2,3], 刘正佳[1,2]

（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: 现代沟道农业是黄土丘陵沟壑区人地耦合发展形成的一种新兴农业地域类型，其可持续发展对于区域农业高质量发展、“三生”空间优化和乡村振兴具有重大现实意义。从人地系统科学认知出发，对现代沟道农业的内涵、可持续发展方向、典型发展模式和保障体系进行了探讨，并进行了相关研究展望，为系统认识黄土丘陵沟壑区沟道农业模式，推进农业可持续发展提供了理论参考。主要结论：① 沟道农业是乡村地域系统的重要功能类型，具有多尺度、多层次的特点，其可持续发展应从微观、中观和宏观 3 个层面，协同解决土壤生态系统、农田生态系统和农业地域系统的可持续发展问题。② 保障粮食安全和生态安全，积极推进农业结构调整，发展多功能农业，通过“3C”模式，即农业自身内循环、农业外循环、基于农业多功能的农业大循环，实现生产结构优化、产业链条延伸和城乡功能互补。③ 创新推广土地综合整治带动模式、农业结构调整带动模式、特色资源综合开发模式和土地流转规模生产模式，有助于农业提质增效和农业高质量发展。④ 拓展地理学与其他学科的交叉研究，深化“理论-实践”贯通式研究，探索建立涵盖技术研发与应用、人才培养、政策制度支撑等内容于一体的农业生产保障体系，全面提升沟道农业资源利用效率和综合生产效益，推动沟道农业现代化。

关键词: 沟道农业; 人地系统科学; 农业地域类型; 农业发展模式; 农业地理工程; 黄土丘陵沟壑区

中图分类号: K901　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-0690(2023)01-0130-12

农业是国民经济和社会发展的重要基础，事关国计民生大计。黄土丘陵沟壑区是最为典型的黄土高原地貌类型，区域内梁峁交错，地形破碎，沟壑众多。长期以来，由于区域农业生产“广种薄收”，几乎所有坡面都被开垦为耕地[1]，导致区域植被破坏，加之特殊的地貌特点和气候条件，区域内水土流失严重、生态环境恶劣，农业发展也陷入越垦越穷的困境[2]。自 1999 年实施退耕还林（草）工程以来，黄土高原地区的生态建设持续推进，生态环境质量得到明显改善，实现了由黄到绿的历史性转变[3]。但由于大量的坡耕地退耕还林草，造成耕地数量减少，带来人地矛盾、人粮矛盾等新问题[4-5]。在此背景下，沟道类型在农业发展布局优化中的优势和地位日益显现，成为农业发展、生态建设政策调整和学术研究关注的热点。

沟道农业发展与区域生态整治密不可分。早在 400 多年前，人们就开始在黄土高原开展筑坝淤地[4]。20 世纪 50—60 年代，打坝淤地在区域得到推广，但受限于当时有限的技术和经济水平，工程设计不够合理、坝体规模较小，坝体遇暴雨易毁坏，效果有限[4]。60—70 年代末，开展了沟坡联治，主要手段包括修建梯田和淤地坝。80 年代前后，开展了以修建梯田和淤地坝为主，兼以一定规模植树造林的小流域综合治理，取得了明显成效[1,6]。一定程度上，长期以来的打坝淤地活动为沟道农业的形成奠定了基础[7]。但在退耕还林（草）政策实施以后，区域泥沙流失量急剧减少，传统的打坝淤地模式已不再适宜新时期增加耕地的需求。在此背景下，

收稿日期: 2021-06-28; **修订日期:** 2021-10-12
基金项目: 国家自然科学基金重点项目（41931293）资助。[Foundation: National Natural Science Foundation of China (41931293).]
作者简介: 黄云鑫（1993—），男，四川眉山人，博士研究生，主要研究方向为乡村发展与农业地理。E-mail: huangyx.20b@igsnrr.ac.cn
通讯作者: 刘彦随。E-mail: liuys@igsnrr.ac.cn

2013 年延安启动实施了治沟造地土地整治重大工程，通过人工削坡填沟快速增加沟道耕地数量。同时，工程充分考虑了坡面防护、沟道安全及生产需要，极大地改善了项目区沟道的生产条件。当前，通过治沟造地已建设沟道坝地 50 万亩①，未来造地规模可能将进一步扩大，为区域沟道农业的发展提供了新的机遇[4,8]。

对于沟道农业的研究，此前多集中关注沟道坝地土壤质量、作物产量、灾害防控及农业生产的生态效应等方面[9-12]，较少从人地系统科学认知出发探讨沟道农业及其可持续发展。新时期，随着黄河流域高质量发展、生态文明建设、乡村振兴等重大战略的提出，农业的可持续发展不再仅仅是追求产量或土地生产力的最大化，而是在保障粮食安全的前提下，进一步追求发展与生态的平衡，实现乡村“三生”空间的优化和人地业的协调发展[12]。本文拟从人地系统科学认知的角度出发，阐释沟道农业及其可持续发展的内涵，并提出可供区域沟道农业可持续发展实践的典型模式和保障体系。

1　沟道农业及其可持续发展的科学认知

1.1　沟道农业的科学认知和战略作用

沟道农业，顾名思义即存在于沟道中的农业，在空间上与坡地农业、梁峁农业、塬地农业相对应，是山区农业的一种空间分异类型。当前，随着区域一系列工程的实施，沟道的生产条件大为改善，具备了进行稳定农业生产的条件，并逐渐成为黄土丘陵沟壑区农业发展最具潜力的区域。作为一种新型的农业地域类型，正确认识沟道农业对于其可持续发展具有重要现实意义。

从人地系统科学认知来看，沟道农业实质是人地关系地域系统的一种表现形式和组成部分[13]。人地关系理论认为，人-地系统是一个复杂的、动态的巨系统，“人”可在遵循人地关系规律的前提下主动去利用和改变“地”，以使“地”更好地为人类服务[14]。农业系统作为一种半自然半人工的人地系统，人地相互作用尤为明显。在黄土丘陵沟壑区，人们的一系列活动不断地改变着区域的微观地貌、植被状态等自然条件，由此导致区域水、土、气、生、人等要素的重组，进而导致水土构型、土地利用结构、农业生产格局等不同层次结构的重构，最终使得区域人地系统功能得以重塑(图 1)。沟道农业即是区域人地关系变化过程中人居关系、居业关系、作土关系等综合作用的结果和体现。按农业发展过程中人地关系特征的差异，可将区域农业的转型过程大致划分为以下几个阶段：① 梁峁、坡面农业阶段。这个时期，沟道灾害频发、设施落后，难以形成稳定的沟道农业系统，人们选择垦荒发展坡面和梁峁农业，受限于落后的技术和生产条件，农业生产以“广种薄收”为主要特征，劳动强度较大。② 矛盾突显阶段。这个时期，过度毁林开荒导致生态环境严重破坏，土地肥力降低，农业生产陷入越垦越穷的困境；人们被迫推进生态环境治理，但又导致坡耕地数量的减少，人地矛盾突显。③ 农业空间转型阶段。随着一系列生态工程的实施，区域生态逐渐好转，沟道具备了进行稳定农业生产的条件，农业生产空间逐步由梁、峁、坡向沟道转移，沟道农业形成。这一时期，作物单产的增加推动农业生产由“广种薄收”向“少种多收”转变；农业机械化程度大幅提高，劳动强度下降，适应了农村劳动力不足的现状；沟道“三生”空间得到优化，形成了“山上退耕保生态，山下造地惠民生”的新格局，“三生”功能进入良性协同发展阶段。④ 农业全面转型阶段。在经济社会、技术条件快速变化的背景下，为适应新的发展需求，传统农业必须全面转型。在该阶段，沟道农业生产方式和功能转型是重点，新要素、新技术的投入是主要特征，强调生产综合效益，进一步重视农业生产和区域发展的关系。

对于乡村地域系统，农业系统是一种重要的功能分异类型，承担着保障粮食安全、保育生态环境、支撑经济发展、维持社会稳定、传承农耕文明的重要功能[15]。乡村振兴战略明确指出要坚持农业农村优先发展，按照产业兴旺、生态宜居、乡风文明、治理有效、生活富裕的总要求，加快推进农业农村现代化。农业作为乡村地区的主要产业，是协调人地关系的重要抓手，既是乡村振兴的重要内容也是乡村振兴的实现途径。对于黄土丘陵沟壑区而言，沟道农业的转型发展不仅是保障区域粮食安全的重要举措，更是推动农业高质量发展、优化区域内“三生”空间布局、助力乡村全面振兴的重要战略路径。

① 1 亩=0.067 hm^2.

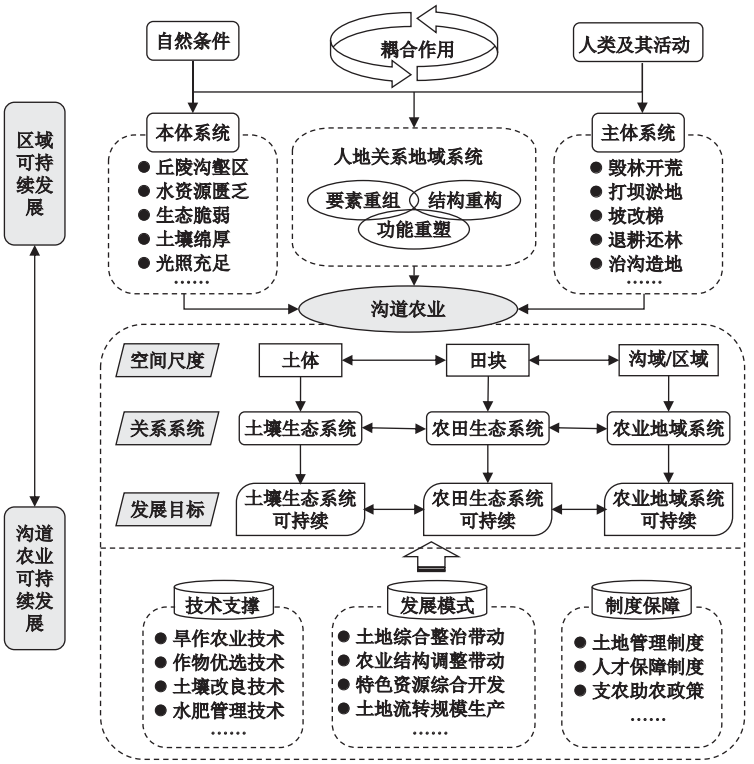

图 1 沟道农业及其可持续发展的内涵

Fig.1 Connotation of gully agriculture and its sustainable development

1.2 沟道农业可持续发展

对于可持续农业的认知因地区和发展阶段的不同而存在差异。发达国家更重视食物安全与营养，强调资源环境的保护；而发展中国家则更强调满足人口的食物需求[16]。对于农业的可持续性，有的学者强调环境的良性循环，而更多的学者认为除此以外，还需考虑社会、经济的可持续性[17-18]。FAO 对持续农业的定义认为，持续农业不仅要考虑资源、环境的可持续性，还要考虑技术和经济的可行性[19]。1991 年荷兰丹波国际农业与环境会议进一步明确了持续农业的目标，包括：① 增加粮食生产，稳定粮食供应，保障粮食安全；② 促进农村综合发展，开展多种经营，扩大农村劳动力的就业机会，增加农民收入；③ 合理利用、保护与改善自然资源，创造良好的生态环境[20]。国内关于可持续农业模式的观点主要有“高投入、高产出、高效益”“高效益、高循环、低投入”“高技术、高效率、产业化”等[19]。

就黄土丘陵沟壑区的情况来看，社会经济发展水平较低，生态环境脆弱，农业发展面临基础设施薄弱、水资源匮乏以及农业技术落后等诸多问题。“高投入”的发展道路需要雄厚的资金，高强度的要素投入也不可避免会加大对生态环境的损害，这显然不符合区域生态保育重地的定位，而“高技术”的道路在短时间内也难以实现。鉴于区域的现实情况，沟道农业持续发展必须从实际出发，因地制宜，以提高效率和增加效益为中心，以基础设施与科技投入为重点，以增强农业持续发展能力和发展农村经济为目标，最终实现人口、资源、生态与经济社会发展的协调共进和良性循环[12,21]。基于此，本文从农业地域系统多层次性和可调控性的特性出发，认为沟道农业的可持续发展应立足于 3 个层面：① 微观层面。应保证沟道农田自然生产力的可持续性和农田土壤生态系统的健康运行，通过构建合理的水、土、气、肥耦合关系，提高生产要素的利用效率，实现农业生产提质增效。② 中观层面。沟道农业价值的实现关键在于生产者的生产活动。在该过程中，田间管理是核心，生产者通过合理的田间管理，协调作－土关系，实现经济效益和生态效益的最大化，从而实现农田生态系统的可持续。③ 宏观层面。应着重关注农业生产结构和布局，优化“三生”空间，协调一二三产融合发展，重视农业发展与乡村转型之间的关系，促进农业地域系统的可持续发展。

2　沟道农业可持续发展的条件与方向

2.1　沟道农业发展的有利条件

黄土丘陵沟壑区的沟道农业是在长期实践中发展起来的新型农业地域类型，与以往占主导地位的坡面农业、梁峁农业相比，其具有以下几方面的独特优势。

1)水土条件相对优越，土地产能相对较高。沟道在空间上处于较低的位置，属于流失水土的汇集区域，沟道地块也较平坦，不易发生严重的水土流失，因此沟道地与坡面地、梁峁地相比往往具有更优的水肥条件。黄土丘陵沟壑区沟道耕地的土壤氮、磷、钾及有机质含量均显著高于坡耕地[8]，生产力一般能达到坡地产量的 4~10 倍，梯田产量的 2~3 倍[4,10,22]。对陕西省米脂、绥德、子洲、横山等县典型流域的调查统计显示，沟道坝地面积仅占粮田面积的 8.3%，而坝地生产的粮食却占总产量的 23.5%[23]。

2)沟道土地资源后续发展开发潜力巨大。黄土丘陵沟壑区不缺土地，缺的是土质肥沃、设施齐备、耕作便捷的高标准基本农田，在当地特指沟道里的坝地[4]。黄土丘陵沟壑区沟道密集、土层深厚，沟道土地资源十分丰富，开发利用潜力巨大，条件较好的沟道通过一定的技术手段进行整治即可建成成片的高标准基本农田[24]。实践经验表明，在筑坝淤地效果较好的沟道，1 km^2 的流域面积建设 6.56 hm^2 的坝地，既能保证沟道坝地的安全生产，还能实现旱涝保收[23]。刘彦随等对延安市 1.1 万余条沟道进行了土地资源调查与适宜性评价，优选出适宜整治的沟道 2 026 条，确定延安沟道土地整治潜力达 23.87 万 hm^2，近期最适宜整治的面积为 9.80 万 hm^2[4]。可见，该区域沟道土地整治潜力巨大，沟道农业发展的前景广阔。

3)沟道坝地地势平坦，利于基础设施建设。打坝淤地和治沟造地等工程的实施，极大改善了沟道的生产条件，平坦的地势为农业基础设施的建设提供了便利[23]。以治沟造地工程为例，一方面沿沟一侧修建了从沟头到沟尾的主干道，另一方面还出于生产便捷的需求合理布设了生产路，方便农业设备进入田间。同时，还修建了较为完善的排、灌、蓄水利系统，雨季拦水、排洪，并将多余的雨水蓄集以备旱季灌溉所用[4]。

4)沟道土地平整连片，为农业转型发展提供了客观条件。耕地碎块化、劳动力不足、机械程度不高已成为阻碍区域农业发展的重要原因。而经过整治的沟道通常会形成大规模的连片坝地，有利于进行机械化生产，为土地流转和规模化经营提供了有利的客观条件[11,25]。同时，由于坝地的高产稳产，农民手中有粮，有利于推动区域农业结构调整和转型，提升沟道农业的综合效益。

2.2　沟道农业发展的限制条件

虽然沟道农业有以上诸多优势，但也面临一些现实问题和挑战，主要表现在以下一些方面。

1)生态环境虽有好转，但生态灾害仍时有发生。多年的生态治理使得黄土丘陵沟壑区生态环境有了明显好转，大规模自然灾害的发生频率下降，但小规模的灾害仍时有发生。该地区主要灾害类型为滑坡、崩塌、地面塌陷、泥石流、地裂缝、地面沉降、黄土湿陷等，最易发生的是滑坡、崩塌和泥石流[26]。在时间分布上，灾害多集中发生在降雨较为集中的 6~9 月，而其间也正是农业田间生产的关键时期，作物生长和田间作业受到严重威胁。

2)沟道农业基础设施仍旧薄弱，耕地质量有待进一步提高。在早期的打坝淤地工程中，一方面，坝体规模较小，加之后期维护不善，坝体和坝地损毁严重，导致部分沟道坝地难以利用；另一方面，打坝淤地工程的重点在于增加耕地数量和水土保持，对于农业生产基础设施配置的关注不够，导致建造的坝地难以适应农业现代化的需求。近期实施的治沟造地工程，虽较全面的考虑了生态保护、农业生产的需求，但因施工标准偏低，部分田块出现积水、次生盐渍化现象[27]；同时，通过治沟造地建造的耕地表土多为生土，土壤肥力较低，影响作物正常生长[28-29]，这些都是导致耕地弃耕撂荒的主要原因[30]。

3)水资源短缺且利用效率较低。黄土丘陵沟壑区属于干旱半干旱区，降雨总量相对较少，水资源比较短缺。同时，降雨具有明显的时空分异特征，具体表现为南部降雨多、北部降雨较少，夏秋降雨多、春冬降雨少。在总量较少的同时，还存在水资源利用效率低的问题。一方面，在部分有灌溉条件的区域存在超额灌水的现象；另一方面，雨水资源化利用率较低，尤其在近期实施了土地整治的沟道，修筑的水库虽发挥了拦蓄雨水的作用，但农民仍坚持以往“靠天吃饭”的生产方式。

4)农业结构和经营模式单一，农业生产经济效益低。沟道坝地良好的生产条件给农业生产提供了更多选择的可能性，适宜种植的农作物选择面也更

广。但长期以来，囿于信息的闭塞和技术的落后，区域农户大多仍坚持单季玉米的种植方式。随着玉米价格下调，种植玉米的经济效益明显下降。此外，在退耕还林还草政策实施后，畜牧业的发展也受到较大影响，在经营模式上多以单一的种植业为主，农业生产的经济效益缺乏进一步增长的空间。

5）农业经营主体弱化，组织体系效率低下。受城镇化的影响，农村劳动力大量流出，农村老弱化现象严重。加之农户发展资金、设备的缺乏，及农户知识文化水平普遍较低，大多数农户承受农业生产风险的能力较弱，导致其对于新事物的接受度较低，影响了新模式、新技术的推广，阻碍了农业结构调整和转型发展。合作社、专业公司等虽具有较先进的生产观念和技术，但由于和普通农户间利益连接不紧密，对农户的带动作用有限。同时，合作社、经营大户、专业公司等扩大经营规模往往需要大量土地，而普通农户受限于小农思想大多不愿进行土地流转，甚至任由土地撂荒，造成了土地资源的浪费。

2.3 沟道农业发展方向和战略模式

关于黄土高原农业发展的方向，历来存在争议。一类观点认为黄土高原的现状决定必须大规模实行退耕工程，这样粮食生产的规模就应缩小，粮食缺口可以调进[31]；另一类观点则认为通过增加物质投入和技术改善可以同步实现生态环境的改善和粮食的自给[32]。20 世纪 80 年代以前，黄土高原的农业一直以粮食增产为主要任务。80 年代后，随着市场经济的发展，农村经济逐渐得到重视，逐步废除了“以粮为纲”的生产方针，鼓励在保障粮食安全前提下，积极发展多种经营[33]。90 年代，进一步明确指出，要将黄土高原的水土保持与经济开发相结合，在大力增产粮食的同时发展林牧副业产品，促进农村经济发展[34]。近年来，国家积极推动农业结构调整，以求突破粮经二元结构，向粮、经、饲三元结构转变。可以预见，对于黄土丘陵沟壑区，随着乡村振兴、黄河流域高质量发展战略的提出，未来区域沟道农业的发展方向将向集约化、生态化、多功能农业转变，在保障区域粮食安全的基础上，将在促进农村经济发展、推动生态文明建设等方面发挥更重要的作用。基于此，区域沟道农业未来的发展应着力于以下几方面：① 充分利用沟道良好基础条件，优化沟道农业配套设施，减小不利因素的限制作用，因地制宜发展设施农业；② 发挥黄土丘陵沟壑区独特的自然资源优势，积极推动农业结构调整，发展特色林果业、畜牧业[35]，促进乡村经济发展；③ 基于黄土高原生态屏障区的重要功能定位，大力发展生态型现代农业，促进生态产业化和产业生态化；④ 推进耕地流转，适度推进规模化、机械化生产，提高耕地资源利用效率。

战略模式方面，应着力破解城乡发展不平衡和资源环境对区域农业生产的双重制约，推动传统农业转型发展，发展现代沟道农业。现代沟道农业应以高效农业、生态型农业为发展导向，在生产和组织方式上遵循“三循环”模式（图 2）。① 农业自身的种养内循环。在内循环中，通过先进的农业生产技

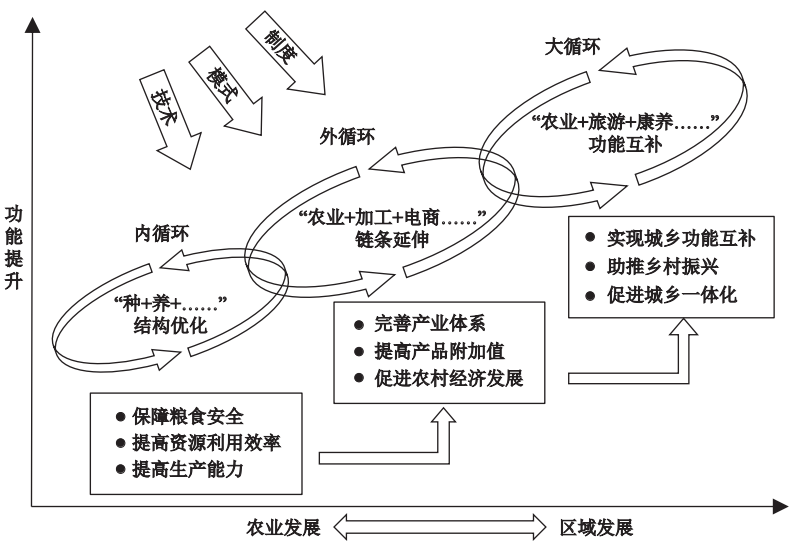

图 2 现代沟道农业的“三循环”战略模式

Fig.2 The "Triple Circulation" (3C) strategy pattern of modern gully agriculture

术和生产模式，实现农业生产物质多重循环利用，提高要素利用效率；② 农业生产与加工、电商等建立的外循环。在外循环中，将传统的农业生产环节与加工、包装、品牌化等环节结合，借助电商、冷链等互联网、物联网平台和技术，构建连接农产品和需求市场的外循环系统，提高农产品的竞争力和附加值；③ 农业与旅游、康养、科普等结合的多功能大循环。在多功能大循环中，充分发挥农业的多功能属性，通过城乡功能互补，助推城乡一体化发展[36]。

3　沟道农业可持续发展典型模式

3.1　土地整治提升模式

土地质量的提升和生产条件的完善是沟道农业可持续发展的重要基础条件。一方面，对已有的沟道农田实施提质增效工程，配套和完善现代农业设施，优化农业生产管理方式；另一方面，对有整治潜力的沟道，通过科学的规划设计和施工建设，建造新的高标准农田，扩大沟道农业的生产规模，逐步优化区域农业生产的空间结构，进一步释放沟道发展潜力。

从区域沟道土地的情况来看，土地盐碱化、新增耕地熟化慢、部分耕地土质差、土壤肥力低等问题是制约沟道土地有效利用的重要因素。从现代农业地理工程的理念来看，土地整治工程应针对地域特定的问题进行针对性的整治，以优化农业生产系统的结构和功能，促进农业可持续发展[36]。从近年来开展的相关土地整治项目的效果来看，都取得了良好的效益。如安塞区依托治沟造地工程对招安镇周屯沟的泉渍田进行了整治，通过完善截水、排水沟等设施，将以往渍害严重的农田建成了“涝能排、渍能降、盐能控”的高产稳产农田[37]。在治沟造地项目区，利用土壤改良剂对新增耕地进行快速熟化，也取得了良好效果。结果显示，改良后土壤养分增加 20% 以上，有机质提高 25% 以上，粮食作物平均亩产增加 25% 以上，新增耕地等级和产能明显提高[38-39]。可见，通过土地整治提升农田生产力对区域农业可持续发展具有重要的意义。

3.2　农业结构调整带动模式

农业结构调整是深化农业现代化的重要举措。2015 年农业部发布的《农业部关于“镰刀弯”地区玉米结构调整的指导意见》就指出，各地区应根据区域条件和特色进行农业结构的调整，并特别提出陕甘地区应以发展杂粮杂豆为主，因地制宜发展饲草种植。近年来，该区域也积极开展了基于“粮改饲”发展多功能农业的尝试，其中比较典型的有基于油菜的多功能农业发展模式(图 3)。试验表明，区域沟道适宜油菜生长，即便是治沟造地工程新增农田的产量也可达 2.5 t/亩左右，青贮后可供 100 d 内 6~8 头羊的饲料[40]。同时，油菜还具有以下多种利用价值。油菜菜薹营养价值高，可作为高档蔬菜出售，在不影响油菜产量的前提下，通过菜薹亩均可增收 200~300 元。油菜花具有较高的观赏价值，连片油菜花更是一道亮丽的风景线，可发展观光旅游业。同时，可利用花期进行蜜蜂养殖，生产蜂蜜。而且，油菜还是一种优质饲草，进入花期不久也可以将其收割青贮，为畜牧业提供优质草料，有效解决饲草匮乏的现实问题。此外，油菜还是优质绿肥，在收割时可适当留茬，翻耕肥地。若油菜作饲草有剩余，且光热资源满足后续籽实生长需求，可让油菜继续生长，获取油料，同时将秸秆粉碎堆肥。菜籽榨油的油渣还可作为优质的有机肥或者饲料[41]。

各区域可抓住农业结构调整的契机，适度推进“粮改饲”，以“种养结合”模式为主，同时积极发展“种植+养殖+加工”“种植+养殖+观光/休闲”等经营模式，发展多功能农业，构建高效的农业“三循环”体系，提升农业系统的综合效益。

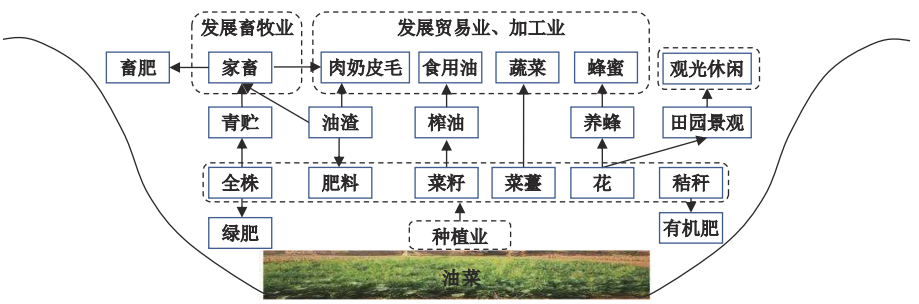

图 3　基于油菜种植的农业结构调整带动发展模式

Fig.3　Development model through adjustment of agricultural structure based on rape cultivation

3.3 特色资源综合开发模式

黄土丘陵沟壑区土壤绵厚、光热丰富、昼夜温差大，有利于作物干物质的积累，发展特色农业潜力巨大[42]。可立足于区域特有的水、土、气、生条件和林、畜、果、粮、草等资源，通过发展壮大已有的特色农业生物资源、优化作物品种、引进经济价值高的新品种或新物种等措施，培育具有较高经济价值的特色农业资源库。在此基础上，结合市场需求，对农业资源进行开发，形成具备市场竞争力的特色农产品。同时，不断延长相关产业链，依托特色农产品，大力发展特色农产品采摘体验、深加工、销售等相关产业，打造特色农产品生产加工基地，形成以特色农产品为核心的产业体系。

延安市宝塔区姚店镇近年来面向精准扶贫和乡村振兴开展了“一村一品”建设工程。比如，贺家沟村依托其水土条件较好的沟道坝地，建成水果基地，目前有苹果 1 100 亩、葡萄 200 亩、桃园 400 亩。同时，该村还依托果园大力发展水果采摘体验、水果加工等产业，带动村民就近就业，对村民增收产生了显著的作用。2022 年，该村人均纯收入预计可达 7 000 元。而该镇尹屯村则积极发展以小米、高粱为主的特色杂粮种植业。目前，全村发展小米种植 600 多亩，并带动周边村子发展 400 多亩小米。通过与品牌公司签订合作协议，尹屯村已成为知名品牌“黄土情”杂粮的重要生产基地。目前 1 亩小米产量在 400 kg 左右，亩均收入达到 6 000 元左右，较大田玉米收入提高 5 倍，极大促进了全村脱贫致富。可见，特色资源的综合开发对促进农村经济发展具有重要积极作用。

3.4 土地流转规模生产模式

沟道土地是区域最宝贵的农业资源之一，其利用情况对区域农业发展至关重要。当前，受城镇化及农户个人发展能力的影响，区域土地撂荒现象较严重[12]。同时，囿于落后的思想观念和制度的不完善，土地流转也面临诸多困难。村委会在乡村的地位类似传统宗族文化中的家长，具有较高威信，在处理乡村内部事务中具有较高效率。可充分发挥村委会的作用，建立起以村委会为中心，以农户和租地者为供需双方的耕地流转制度体系。在保证土地所有权归集体的前提下，村委会可将农户土地经营权以出租、入股等方式流转给合作社、专业公司等使用。村集体得到租金或分红，按农户土地流转情况向农户进行分发。政府部门在此过程中，主要负责协调合作社、专业公司和村集体之间的事务，同时提供制度保障。而在农业生产过程中，普通农户也可为合作社、专业公司提供劳动力，获取工资收益(图 4)。

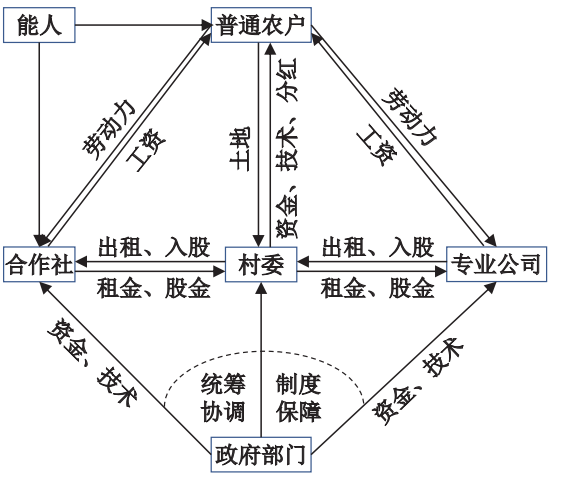

图 4 现代农业生产组织和土地流转体系

Fig.4 The system of production organization and land transfer of modern agriculture

延安市延长县段家河村在沟道整治后，在新增耕地所有权归村集体的前提下，分包到户、确权颁证，同时鼓励农户以入股的形式将土地经营权流转给村集体。政府出资帮助建立了股份制合作社，村集体以地入股，村民获得社员权利，合作社的社长由社员推选能人担任。合作社在得到集体土地经营权后，雇用农户参与经营，进行规模化经营，大力发展“巨菌草种植+养殖/堆肥+菌类种植+林果”循环农业，快速壮大了集体经济，带动农户年收入户均增加 6 950 元[43]。由此可见，高效的生产组织流转体系有助于推动沟道土地的有效利用，对区域农业结构调整、规模化经营和新型经营模式的推广有重要的现实意义。

4 沟道农业发展的保障体系

4.1 制度和政策保障

4.1.1 土地制度

当前，黄土丘陵沟壑区的沟道内存在耕地撂荒现象，已成为沟道农业可持续发展面临的难点问题。对于该问题，一方面，应采取自下而上和自上而下相结合的方式，构建高效的土地流转体系，推进土地资源资产化、资本化，盘活土地资源的同时促进农户增收。“自下而上”指充分尊重农户意愿，在流

转方式、流转标准等方面广泛征求农户意见;“自上而下”指政府相关部门在征集农户意愿后，结合相关的政策法规，制定相关流转细则，并以政策文件的形式下发执行，为土地流转提供法律保障。另一方面，对于土地撂荒的行为应给予一定的惩治，停止相关补贴的发放，对于撂荒年限较长、情节严重的，村集体应依法收回撂荒土地，由村集体重新发包。

4.1.2　人才保障体系

生产技术和观念的落后是制约区域农业可持续发展的关键因素，加强专业农技人员队伍和能人群体的建设和培育已成为区域农业发展的当务之急。专业技术人员队伍的建设应采用“两条腿”走路的方式进行:① 政府层面，应扩大部门专业技术人员的队伍规模，根据生产实际需求组建农技服务驻村队，对农业生产进行直接指导，同时建立相应考核奖补机制，调动技术人员下乡扶农的积极性;② 农户层面，农业部门可与掌握有先进技术的农户签订雇用合同，由该农户负责一定区域的农业技术指导工作，政府付给其劳务作为报酬。另外，可定期组织文化水平较高或对新事物接受能力较强的农户进行专业技术培训，培育扩大乡村能人群体。此外，面向现代农业产业链循环的需求，还应加强新型农业服务人才的培育。

4.1.3　支农助农政策

黄土丘陵沟壑区农村发展落后、农村经济底子薄，加之多年以来的重工轻农的政策导向，农业发展面临诸多困难。当前，急需加大政策上对区域农业的扶持力度，以推进区域沟道农业的现代化进程，促进沟道农业可持续发展。首先，贯彻执行“两免三补”政策，建立粮食最低收购价格制度，确保相关补贴发放精准，通过政策补贴支持种粮户，助推农业生产机械化、良种化。其次，加大沟道农业基础设施资金的投放力度，补齐长期以来欠下的“设施债”;同时，面向农业现代化的需求，构建集物联网、互联网等于一体的现代化农业服务体系。再次，建立和完善涉农金融体系和保险体系，通过低息、贴息、免息贷款等方式，提高农户的抗风险能力和发展能力。

4.2　关键技术

4.2.1　旱作农业和水肥管理技术

沟道坝地虽然水土条件较好，但季节性水资源短缺仍然存在。因此，仍需重视水资源的高效利用问题，发展旱作农业。旱作农业技术是一种提高水资源利用效率和作物产量的重要技术手段，要求在耕作时，应以浅耕为主，同时结合覆膜种植技术，以减少土壤水分的损失。区域研究表明，覆膜种植玉米，玉米产量较不覆膜可提高 58.3%[44]。此外，应依托沟道已有的水库，完善相应的灌溉体系，充分利用沟道水库的拦蓄灌溉功能，减小旱季缺水对农业生产的限制。灌溉时，应根据作物的种类、生长阶段进行科学灌溉，如玉米在拔节期和抽穗期对水分需求较大，可根据土壤墒情进行适时灌溉保墒。在有条件的地方，可配套滴灌、喷灌设施，发展精准农业。同时，要重视沟道农田培肥，对于新增耕地，应多施用有机肥，以改善土壤性状。对于化肥的施用，应坚持适时、适量的原则，根据作物种类、长势及生长阶段科学施肥。施肥时可适量灌溉，促进养分溶解吸收，但不可过多灌溉，以防止养分随水淋失，造成养分的低效利用和潜在的环境风险。

4.2.2　土壤改良技术

土壤改良是提高沟道农田土壤质量的有效技术手段。从实现途径来看，常用土壤改良技术手段有物理技术、化学技术、生物技术、水利技术和工程技术;而按解决的问题不同又可分为土体结构改良技术、盐碱地改良技术、酸化土壤改良技术等。具体做法包括土壤复配、客土、添加土壤改良剂、种植改良作物、使用微生物肥等。针对治沟造地新增沟道农田，应示范推广土壤复配改良、土壤改良剂改良技术，增加土壤团粒体，改善农田土体结构，同时注重有机肥的使用，提高土壤肥力。针对盐碱地，应以工程技术手段为主，通过垫土、修建排碱沟，配合施用化学改良剂，降低土壤盐碱度。同时，可种植耐盐碱的作物，达到治理与利用同步进行的目的。

4.2.3　作物优选技术

作物优选的核心是协调作–土系统，对农业种植结构调整和布局具有重要意义。不同的作物具有不同的生长特性，对生长环境的要求也有差别，加之农业生产强调生产效益，因此还需考虑经济因素。大体上看，作物优选需考虑其气候适宜性、经济可行性、小环境适宜性、作土适配性[36]。具体考量时，首先应筛选出适宜本区域气候条件的、且具有较高经济价值或特色培育价值的作物;然后，根据沟道的光、热、水等条件选择适宜的作物。如在地形开阔、深度较浅、光照充足、水资源条件较优越的沟道，可发展特色瓜果种植业，可选择葡萄、香瓜、西瓜等特色经济作物;在沟道较深、光照条件一般、水资源匮乏的沟道，则可种植比较耐旱的作物，如玉米、小

米、糜子、荞麦等。此外，还需根据土壤的理化性质合理选择作物，如沙壤质土适宜种植葡萄、马铃薯、红薯等，而粘性土则较适宜种植高粱、玉米，盐碱度较高的土壤则适合种植苜蓿、油菜、红枣、高粱等耐盐碱作物。作物优选要综合考虑多方面的因素，但也不必追求完全契合，实在无法满足的外界条件可通过相关技术进行改善弥补。

5 结论与展望

5.1 结论

黄土丘陵沟壑区沟道农业是在区域人地关系不断耦合过程中产生的农业地域类型。沟道农业可持续发展对于区域农业高质量发展、“三生”空间优化和乡村振兴具有重大的现实意义，应着力推进沟道农业现代化。① 沟道农业是乡村地域系统的重要功能分异类型，具有多尺度、多层次的特点，其可持续发展应从微观、中观和宏观 3 个层面，协同解决沟道农业土壤生态系统、农田生态系统和农业地域系统的可持续发展问题。② 在保障粮食安全和生态安全的前提下，积极推进农业结构调整，大力发展多功能农业，以促进农村经济发展、推动区域生态文明建设和助力城乡一体化。战略上，遵循现代农业“3C”模式，通过农业自身内循环，基于物联网、互联网等的农业外循环及基于多功能的农业大循环，实现农业地域系统和区域可持续发展。③ 因地制宜推广土地综合整治带动模式、农业结构调整带动模式、特色资源综合开发模式和土地流转规模生产模式等沟道农业提质增效模式，全面提升农业资源利用效率和农业生产效率。通过土地整治提升土地质量，完善生产基础设施；依托农业结构调整探索建立新型的农业生产模式；通过特色资源的培育和开发，打造形成以高附加值特色农产品为核心的产业体系；通过土地流转规模化经营盘活土地资源，壮大集体经济，增加农户收入。④ 破解沟道农业发展面临的问题，亟需构建适应现代化农业生产的技术和制度保障体系。技术层面，需重视推广旱作农业技术、水肥管理技术和土壤改良技术，提升土地生产力，提高要素利用效率；通过作物优选，优化作土系统，调整农业生产布局，培育特色农产品。制度层面，建立高效的土地流转制度，加强土地管理；重视专业技术人员队伍建设和相关保障体系的建设；同时，在基础设施建设、金融和保险等方面加大支农助农的力度。

5.2 展望

本文从人地系统科学认知出发，阐释了沟道农业的内涵，提出了沟道农业可持续发展的方向和战略模式，提炼了可行的实践模式和保障体系，为正确认识黄土丘陵沟壑区沟道农业、推进其可持续发展提供了理论和实践参考。作为一种新兴农业地域类型，与传统农业地域类型相比，沟道农业有其特有的空间结构和发展规律；同时，其本身还具有复杂性和动态性，并受到系统内外诸多因素的影响。未来，在城镇化、工业化和全球化持续推进的情景下，沟道农业系统与外部系统之间的要素流动、信息交流等过程必将进一步深化，社会经济发展对沟道农业的发展也会提出新的需求；加之气候变化带来的深刻而复杂的影响，使得沟道农业发展面临的挑战愈加复杂。基于沟道本身的特点和面临的挑战，在未来的研究和实践中，需进一步探索解决以下关键科学和技术问题：① 在人类活动与气候变化等的强烈作用下，沟道农业系统的要素、结构、功能将如何变化，演变过程和机理是怎样；② 沟道农业发展与区域生态、资源、经济等子系统之间的耦合关系与机制是什么，将来会呈现怎样的发展态势；③ 面对诸多变化和挑战，应该采取怎样的调控措施和保障机制。

地理学是一门经世致用的学科，现代地理学既能从学理上揭示人地交互作用机理和规律，又能为破解区域发展难题和精准施策提供可行的方案。面向沟道农业的现代化和可持续发展，应充分发挥地理学理论和实践相结合的优势，推进地理学与工程学、农学、管理学等多学科的交叉研究，发展农业地理工程学，并加强以下方面研究：① 深化“实践–理论”的贯通式研究，基于长期站点观测，深入探析沟道农业要素、结构、功能的演化过程和机理，构建沟道农业定量模拟和评估模型，从不同尺度探究沟道农业的资源环境效应，揭示沟道农业发展与区域生态、资源、社会、经济间的耦合关系，为沟道农业系统的优化提供理论参考。② 面向沟道农业发展面临的问题及需求，加强现代农业地理工程技术的研制，重点聚焦沟道生产安全保障、次生灾害防治、空间优化布局、生产要素高效利用、农产品提质增效等重大问题，制定针对性的专项技术研发计划，通过理论研判、试验探索、规律总结、技术组装，形成完备的农业地理工程技术体系，并进行示范应用和推广，支撑沟道农业现代化和可持续发展。③ 通过

典型案例分析，总结提炼适宜区域沟道农业可持续发展的路径和模式，并建立相应的保障体系，为沟道农业转型发展提供实践参考，支撑乡村振兴战略的实施，促进区域可持续发展。

参考文献(References)：

[1] 李相儒, 金钊, 张信宝, 等. 黄土高原近60年生态治理分析及未来发展建议[J]. 地球环境学报, 2015, 6(4): 248-254. [Li Xiangru, Jin Zhao, Zhang Xinbao et al. Analysis of ecological management of the Loess Plateau during the past 60 years and suggestions for the future development. Journal of Earth Environment, 2015, 6(4): 248-254.]

[2] Jin Z, Cui B L, Song Y et al. How many check dams do we need to build on the Loess Plateau?[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46: 8527-8528.

[3] Qu L L, Haung Y X, Yang L F et al. Vegetation restoration in response to climatic and anthropogenic changes in the Loess Plateau, China[J]. Chinese Geographical Science, 2020, 30(1): 89-100.

[4] 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 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.]

[5] Chen Y P, Wang K B, Lin Y S et al. Balancing green and grain trade[J]. Nature Geoscience, 2015, 8(8): 739-741.

[6] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409. [Li Zongshan, Yang Lei, Wang Guoliang et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7398-7409.]

[7] 金钊. 黄土高原沟道治理: 几百年来与洪水和泥沙的斗争[J]. 地球环境学报, 2020, 11(5): 574-582. [Jin Zhao. Gully management on the Loess Plateau: The struggle against floods and silt over the centuries. Journal of Earth Environment, 2020, 11(5): 574-582.]

[8] Li Y R, Li Y, Fan P C et al. Land use and landscape change driven by gully land consolidation project: A case study of a typical watershed in the Loess Plateau[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(5): 719-729.

[9] 常欣, 程序, 何英彬, 等. 黄土高原水土保持与农业可持续发展工程技术措施及应用[J]. 世界科技研究与发展, 2004, 26(6): 69-76. [Chang Xin, Cheng Xu, He Yingbin et al. Soil and water conservation and engineering technology of sustainable agriculture on Loess Plateau. World Sci-Tech R & D, 2004, 26(6): 69-76.]

[10] 张养安, 王宏兴, 王晓, 等. 建设韭园沟沟道坝系生态农业系统配套水利保障体系[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 213-214. [Zhang Yang'an, Wang Hongxing, Wang Xiao et al. Study on building Jiuyuangou gully dam system ecological agriculture system and water conservancy system. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(6): 213-214.]

[11] 董亚维, 李晶晶, 任婧宇, 等. 关于黄土高原地区淤地坝水土保持监测的几点思考[J]. 中国水土保持, 2021, 22(4): 62-65. [Dong Yawei, Li Jingjing, Ren Jingyu et al. Some thoughts on monitoring soil and water conservation of check dam in Loess Plateau area. Soil and Water Conservation in China, 2021, 22(4): 62-65.]

[12] 陈怡平, 张义. 黄土高原丘陵沟壑区乡村可持续振兴模式[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(6): 708-716. [Chen Yiping, Zhang Yi. Sustainable model of rural vitalization in Hilly and Gully Region on Loess Plateau. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(6): 708-716.]

[13] 刘彦随. 现代人地关系与人地系统科学[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1221-1234. [Liu Yansui. Modern human-earth relationship and human-earth system science. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(8): 1221-1234.]

[14] 樊杰. 人地系统可持续过程、格局的前沿探索[J]. 地理学报, 2014, 69(8): 1060-1068. [Fan Jie. Frontier approach of the sustainable process and pattern of human-environment system. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(8): 1060-1068.]

[15] 刘彦随. 中国新时代城乡融合与乡村振兴[J]. 地理学报, 2018, 73(4): 637-650. [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.]

[16] 刘彦随, 吴传钧. 农业持续发展研究进展及其理论[J]. 经济地理, 2000, 20(1): 64-69. [Liu Yansui, Wu Chuanjun. Theories and progress of study on sustainable agriculture development. Economic Geography, 2000, 20(1): 64-69.]

[17] Altieri M A. Agroecology —A new research and development paradigm for world agriculture[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1989, 27(1-4): 37-46.

[18] Brown B J, Hanson M E, Liverman D M et al. Global sustainability-toward definition[J]. Environmental Management, 1987, 11(6): 713-719.

[19] 朱丕荣. “持续农业”研究的新趋势[J]. 世界农业, 1992, 14(1): 18-20. [Zhu Pirong. New trends in research on sustainable agriculture. World Agriculture, 1992, 14(1): 18-20.]

[20] 刘巽浩. 持续农业种种谈[J]. 世界农业, 1992, 14(1): 21-22. [Liu Xunhao. Some views on sustainable agriculture. World Agriculture, 1992, 14(1): 21-22.]

[21] 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——以陕西绥德县为例[J]. 自然资源学报, 2006, 20(5): 738-745. [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, 20(5): 738-745.]

[22] 郑宝明. 黄土丘陵沟壑区淤地坝建设效益与存在问题[J]. 水土保持通报, 2003, 23(6): 32-35. [Zheng Baoming. Benefits and problems of sediment-storage dams construction at Jiuyuangou catchment. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(6): 32-35.]

[23] 蒋定生, 高可兴. 黄土丘陵第Ⅱ副区坝地资源潜力与坝系建造

模式[J]. 水土保持通报, 2000, 20(5): 35-38. [Jiang Dingsheng, Gao Kexing. Resources potentiality of dam land and pattern of constructing dam system in Loess Hill Region of second section. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 20(5): 35-38.]

[24] 魏宏安, 王介勇. 延安市黄土丘陵沟壑区沟道土地整治适宜性评价研究[J]. 地域研究与开发, 2013, 32(3): 129-132. [Wei Hongan, Wang Jieyong. Assessment of land consolidation suitability in Loess Hilly-Gully Region in Yan'an City. Areal Research and Development, 2013, 32(3): 129-132.]

[25] 李裕瑞, 李怡, 范朋灿, 等. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治对乡村人地系统的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 249-258. [Li Yurui, Li Yi, Fan Pengcan et al. Impacts of land consolidation on rural human-environment system in typical watershed of loess hilly and gully region. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5): 249-258.]

[26] 董起广. 黄土高原丘陵沟壑区沟道农业限制因素浅析[J]. 农家参谋, 2019, 609(3): 22. [Dong Qiguang. Analysis on limiting factors of gully agriculture in hilly and gully region of loess plateau. The Farmers Consultant, 2019, 609(3): 22.]

[27] 陈怡平, 骆世明, 李凤民, 等. 对延安黄土沟壑区农业可持续发展的建议[J]. 地球环境学报, 2015, 6(5): 265-269. [Chen Yiping, Luo Shiming, Li Fengmin et al. Proposals on the sustainable development of agriculture in Yan'an gully regions. Journal of Earth Environment, 2015, 6(5): 265-269.]

[28] Ma J F, Chen Y P, Wang H J et al. Newly created farmland should be artificially ameliorated to sustain agricultural production on the Loess Plateau[J]. Land Degradation & Development, 2020, 31(17): 2565-2576.].

[29] 黄云鑫, 李裕瑞, 刘彦随, 等. 不同土层复配方案对土壤水稳性团聚体及有机质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 894-903. [Huang Yunxin, Li Yurui, Liu Yansui et al. Effects of different soil-layer compounding schemes on soil water-stable aggregates and organic matter. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(6): 894-903.]

[30] 陈淑敏, 金钊, 张晶, 等. 陕北不同沟道土地盐碱化现状及影响因素[J]. 地球环境学报, 2020, 11(1): 81-89. [Chen Shumin, Jin Zhao, Zhang Jing et al. Situation and impact factors of soil salinization in different dammed farmlands in the valley area of the Northern Shaanxi Province. Journal of Earth Environment, 2020, 11(1): 81-89.]

[31] 王闰平, 高志强. 黄土高原农业发展的综合思考[J]. 生态经济, 2001, 17(1): 22-24. [Wang Runping, Gao Zhiqiang. Comprehensive thoughts of Loess Plateau's agriculture development. Ecological Economy, 2001, 17(1): 22-24.]

[32] 李玉山. 黄土高原粮食可以自给[J]. 中国水土保持, 1997, 18(2): 9-11. [Li Yushan. Self-surpport of grains could be realized on the Loess Plateau. Soil and Water Conservation in China, 1997, 18(2): 9-11.]

[33] 申涤尘. 我国农业产业结构调整的历史现状与发展对策[J]. 沈阳农业大学学报(社会科学版), 2002(4): 290-292. [Shen Dichen. History, actuality and development countermeasure of adjustment of agricultural industrial structure in China. Journal of Shenyang Agricultural University (Social Sciences Edition), 2002(4): 290-292.]

[34] 李玉山. 黄土高原治理开发之基本经验[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 13(2): 52-58. [Li Yushan. Fundamental experiences for harness and development in the Loess Plateau of China. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 13(2): 52-58.]

[35] 杨华, 芮旸, 李炬霖, 等. 陕西省农业现代化水平时空特征及障碍因素[J]. 资源科学, 2020, 42(1): 172-183. [Yang Hua, Rui Yang, Li Julin et al. Spatiotemporal characteristics of agricultural modernization level and obstacles in Shaanxi Province. Resources Science, 2020, 42(1): 172-183.]

[36] 刘彦随, 冯巍仑, 李裕瑞. 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[J]. 地理学报, 2020, 75(10): 2029-2046. [Liu Yanusi, Feng Weilun, Li Yurui. Modern agricultural geographical engineering and agricultural high-quality development: Case study of loess hilly and gully region. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(10): 2029-2046.]

[37] 张腾飞, 刘琦, 韩霁昌. 基于沟道土地整治工程的泉渍田导排水设计技术——以延安市安塞区招安镇周屯沟治沟造地工程项目为例[J]. 农业科学研究, 2019, 40(3): 23-26. [Zhang Tengfei, Liu Qi, Han Jichang. Design technology of waterlogging diversion and drainage based on channel land regulation project—— Taking the ditch and land reclamation project in Zhoutun ditch, Zhao'an town, Ansai district, Yan'an city as an example. Journal of Agricultural Sciences, 2019, 40(3): 23-26.]

[38] 刘霄飞, 刘永鹏, 崔征良, 等. 土地整治新增耕地生土快速熟化技术试验研究——以延安市治沟造地项目为例[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2018, 3(4): 35-38. [Liu Xiaofei, Liu Yongpeng, Cui Zhengliang et al. Study on accelerating imnature soil into arable land after land consolidation—Taking gully land consolidation prospect in Yan'an as an example. Land Development and Engineering Research, 2018, 3(4): 35-38.]

[39] 付威, 雍晨旭, 马东豪, 等. 黄土丘陵沟壑区治沟造地土壤快速培肥效应[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 252-261. [Fu Wei, Yong Chenxu, Ma Donghao et al. Rapid fertilization effect in soils after gully control and land reclamation in loess hilly and gully region of China. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(21): 252-261.]

[40] 傅廷栋. 复种饲料油菜可一举多得[N]. 农民日报, 2015-08-18. [Fu Tingdong. Multiple cropping rape can serve multiple purposes. Farmers' Daily, 2015-08-18.]

[41] 刘彦随, 陈宗峰, 李裕瑞, 等. 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[J]. 自然资源学报, 2017, 32(12): 2065-2074. [Liu Yansui, Chen Zongfeng, Li Yurui et al. 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.]

[42] 刘彦随, 龙花楼, 王介勇. 中国农业现代化与农民[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 145. [Liu Yansui, Long Hualou, Wang Jieyong. The agricultural modernization and peasants in China.

Beijing: Science Press, 2014: 145.]

[43] 张轩畅, 刘彦随, 李裕瑞, 等. 黄土丘陵沟壑区乡村生态产业化机理及其典型模式[J]. 资源科学, 2020, 42(7): 1275-1284. [Zhang Xuanchang, Liu Yansui, Li Yurui et al. Mechanism and typical patterns of rural ecological industrialization in the loess hilly-gully region of China. Resources Science, 2020, 42(7): 1275-1284.]

[44] 高维恒, 邓西平. 延安市旱作梯田水分有效保持与高效利用技术[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 225-229. [Gao Weiheng, Deng Xiping. Techniques of effective conservation and efficient use water on terraced land in Yan'an city. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007, 27(6): 225-229.]

Modern gully agriculture and its sustainable development in the loess hilly and gully region

Huang Yunxin[1,2,3], Liu Yansui[1,2,3], Liu Zhengjia[1,2]

(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 Sciences*, *Beijing* 100101, *China*;
3. *College of Resources and Environment*, *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: Modern gully agriculture is a new regional type of agriculture developed in the process of man-land coupling in the loess hilly and gully legion. Its sustainable development has great practical significance for the high-quality development of regional agriculture, optimization of "production-living-ecological" space and rural revitalization. Based on the cognition of human-earth system science, the connotation, sustainable development direction, typical development patterns and guarantee system of modern gully agriculture were discussed, and relevant research prospects were proposed. This paper also provides a theoretical reference for systematically understanding the patterns of gully agriculture and promoting its sustainable development in loess hilly and gully region. The conclusions are as follows: 1) Gully agriculture is an important functional type of rural regional system, which has the characteristics of multi-scale and multi-level. Thus, the sustainable development of gully agriculture should focus on micro, meso and macro scales to realize the sustainable development of soil ecosystem, farmland ecosystem and agricultural regional system synergistically. 2) On the premise of ensuring food security and ecological security, adjustment of agricultural structure should be actively promoted to develop multifunctional agriculture. Through the "3C" model, namely, the internal circulation of agriculture itself, external circulation of agriculture and the big circulation of agriculture based on agricultural multifunction, it helps to realize the optimization of the production structure, the extension of the industrial chain and the complementarity of urban and rural functions, which can promote the development of rural economy and urban-rural integration. 3) Innovation and promotion of the driving patterns such as comprehensive land consolidation pattern, agricultural structure adjustment pattern, comprehensive development of characteristic resources pattern and land transfer scale production pattern can help to improve the efficiency and quality of agricultural production. 4) The furture is expand interdisciplinary research of geography and other disciplines, and deepen the research in "theory-practice" paradigm. To explore and establish the agricultural production guarantee system that integrates technology research and application, talent training, policy and institutional support, are the important measure to comprehensively improve the efficiency of agricultural resources utilization and overall production efficiency of gully agriculture and promote the modernization of gully agriculture.

Key words: gully agriculture; human-earth system science; regional type of agriculture; agricultural development pattern; agro-geographic engineering; loess hilly and gully region