

西北旱区现代农业提质增效发展模式探究

邓铭江^{1,2,3*}, 王全九^{1,2}, 陶汪海¹, 王子天¹, 曹晶晶¹

(1. 西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2. 西安理工大学, 西安 710048;
3. 寒旱区水资源与生态水利工程研究中心, 乌鲁木齐 830099)

摘要: 西北旱区是我国重要的土地资源储备基地, 受水资源短缺、土地质量偏低等问题制约, 实现农业高质量发展的难度较大, 亟需探索集约高效的现代农业发展路径。本文系统分析了西北旱区农业发展的现状及面临的问题, 构建了西北旱区现代农业提质增效理论框架。针对草原牧业区、农牧交错区、雨养农业区、灌溉农业区等区域的农业发展特征与功能定位, 在优化配置农业自然资源、科技资源、经济资源、社会资源等基础上, 本文重点分析了水土资源高效利用、农业种植结构调整与种植模式优化、农业生产精准管控技术创新、产业化与可持续发展等核心技术或方法, 形成了具有区域鲜明特色的 4 类模式, 即饲草-绿肥作物生产为主的牧区现代生态农业发展模式、饲草-粮食-经济作物生产并重的农牧交错区生态农业发展模式、粮食-林果生产为主的雨养区生态农业发展模式和粮食-经济作物-林果生产为主的灌溉区现代生态农业发展模式, 以此实现农业生产功能、生态功能、教研功能、休闲功能的拓展延伸。为推动西北旱区现代农业高质量发展, 需优化农业功能分区, 科学规划农业发展格局; 健全生态农业补偿机制, 创建绿色核算制度; 促进产业融合, 树立现代生态农业发展理念; 构建现代生态农业发展的绿色科技创新与推广服务体系; 培育农业农村人才, 完善人才政策体系。

关键词: 西北旱区; 现代生态农业; 水土资源; 提质增效; 理论框架; 发展模式

中图分类号: S-09 **文献标识码:** A

Development Model for Improving the Quality and Efficiency of Modern Agriculture in the Arid Region of Northwest China

Deng Mingjiang^{1,2,3*}, Wang Quanjiu^{1,2}, Tao Wanghai¹, Wang Zitian¹, Cao Jingjing¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Research Center on Water Resources and Eco-Hydraulic Engineering in Cold and Arid Regions, Urumqi 830099, China)

Abstract: The arid region of Northwest China is a vital land resource reserve for China. However, restricted by water shortage and low land quality, high-quality agricultural development in this region is difficult to achieve. Therefore, it is urgent to explore a development path of modern ecological agriculture that is intensive and efficient. This study analyzed the current status and major problems of agricultural development in the arid region of Northwest China and constructed a theoretical framework for improving the quality and efficiency of modern agriculture in the region. The characteristics and functions of agricultural development in the grassland pastoral, agro-pastoral, rain-fed agricultural, and irrigated agricultural areas in this region were clarified. Based on the

收稿日期: 2022-10-22; 修回日期: 2023-01-20

通讯作者: *邓铭江, 寒旱区水资源与生态水利工程研究中心教授, 中国工程院院士, 研究方向为旱区水土资源; E-mail: xjdmj@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“西北灌区农业高效用水与生态服务功能提升策略研究”(2022-XZ-26)

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

optimal allocation of natural, scientific, economic, and social resources of agriculture, the study proposed core technologies or methods for achieving breakthroughs in efficient use of water and soil resources, planting structure adjustment and mode optimization, technological innovation in precise control of agricultural production, industrialization, and sustainable development. Four development models with distinctive regional characteristics were formed: (1) modern ecological agriculture in pastoral areas emphasizing forage and green manure crop production; (2) modern ecological agriculture in agro-pastoral areas with equal emphasis on forage, grain, and cash crop production; (3) modern ecological agriculture in rain-fed areas emphasizing grain, forestry, and fruit production; and (4) modern ecological agriculture in irrigated areas emphasizing grain, cash crop, forestry, and fruit production. Thus, the production, ecological, teaching, research, and leisure functions of agriculture can be realized. To promote the high-quality development of the modern ecological agriculture in the arid region of Northwest China, the following countermeasures are proposed: (1) scientifically planning the agricultural development pattern by optimizing agricultural function zoning, (2) improving the compensation mechanism for ecological agriculture and creating a green accounting system, (3) promoting industrial integration and establishing a development concept of modern ecological agriculture, (4) constructing a green technology innovation and promotion service system for the development of modern ecological agriculture, and (5) cultivating agricultural and rural talents to improve the talent policy system.

Keywords: arid region of Northwest China; modern ecological agriculture; water and soil resources; improving quality and efficiency; theoretical framework; development model

一、前言

我国西北旱区包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西、内蒙古以及该区域范围内的黄河流域、内陆干旱区和半干旱草原区,面积约为 $3.45 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占国土总面积的35.9%, 具有丰富的光、热、土地资源, 是我国重要的粮食生产和耕地资源后备基地^[1-3]。西北旱区地处我国内陆和优势季风作用的边缘区域, 年降水量不足200 mm (约为全国平均降水量的47%), 而年蒸发量超过1000 mm, 单位面积的水资源量仅为全国平均值的1/6。此外, 西北旱区地形地貌复杂, 拥有山地、高原、盆地、平原等多种地形以及草原、农田、荒漠、森林等多种生态系统^[4,5]。受自然环境条件恶劣、经济发展缓慢等因素的共同影响, 西北旱区的水土资源匹配处于严重错位状态, 农业发展面临较大障碍^[6]。因此, 构建西北旱区现代农业提质增效的发展模式, 对提高区域内农业生产效率、促进旱区水土资源高效利用具有重要价值。

近年来, 在国家乡村振兴战略的推动下, 学术界把握农业发展方向, 从土地流转^[7]、经营模式^[8]、物联网技术^[9]、智能装备^[10]、土壤健康及资源利用^[11]、产业链绿色发展^[12]等角度开展了深入研究。随着信息时代、大数据时代、智能时代的到来, 发展现代农业将是农业发展的主要趋势^[13-15]并已成为共识。在此背景下, 西北旱区农业亟需突破资源要素制约, 全面提高现有资源的利用效率, 走资源集约型的现代农业道路, 积极发展低碳、绿色、高端的现代生态农业。

本文在分析西北旱区的自然资源、气候、经济发展等基础上, 剖析区域内农业发展面临的主要问题, 重点围绕农业提质增效的关键途径与发展模式构建开展深入探讨, 以期为西北旱区农业高质量发展提供参考。

二、西北旱区农业发展现状与提质增效面临的主要问题

西北旱区耕地面积约为 3.67×10^8 亩 (1 亩 $\approx 666.7 \text{ m}^2$), 占全国耕地总面积的18.1%, 是我国粮食、特色林果和牧业的重要生产基地, 在我国农业生产中具有举足轻重的地位。

(一) 西北旱区农业发展的现状

1. 西北旱区土地资源特点

西北旱区地形条件复杂, 存在明显的光、热、水、土等自然因素差异, 土地利用方式多样, 形成了复杂多样的土地资源类型。西北旱区的土壤类型分布呈现南北(或东北至西南)走向, 中温带区域由东向西为暗棕土-黑钙土-栗钙土-棕钙土, 温暖带区域由东向西为棕壤土-褐土-黑垆土-灰钙土型^[6]。受灌溉、耕作及水盐条件等因素的影响, 非地带性的土壤由草甸土、沼泽土、盐土、风沙土及灌耕土等类型组成, 其中盐土与风沙土多分布于流域下游地区^[16]。西北旱区耕地地力等级整体较低, 大部分为6~8等地, 土壤有机质含量低、养分缺乏^[17]。此外, 干旱少雨的气候特征导致西北旱区土壤盐渍化现象严重, 盐碱化土地达 1.5×10^8 亩, 占

全国盐碱土地总面积的82%。其中,新疆盐渍化耕地面积占比接近51%^[18](见表1)。土壤盐渍化严重威胁西北旱区的耕地资源,2004—2012年因土壤盐渍化减少的耕地面积近 1.5×10^7 亩^[19]。

2. 西北旱区水资源利用状况

降水是干旱区水资源形成的根本来源,西北旱区降水少、空间分布不均,具体表现为山区降水多,平原区降水少,由东向西降水量由400 mm以下减少至50 mm以下^[5,20]。2021年,西北旱区的水资源总量约为 1.352×10^{11} m³(占全国水资源总量的7.9%),每平方千米的水资源量仅为 3.9×10^4 m³(约为全国平均水平的12.7%),其中地表水资源量为 1.248×10^{11} m³,地下水资源量为 7.444×10^{10} m³。西北旱区的总供水量为 6.693×10^{10} m³,其中来自地表水的水量为 4.84×10^{10} m³,来自地下水的水量为 1.787×10^{10} m³。在西北旱区的用水结构方面,农业用水为 6.039×10^{10} m³(约占90.2%),工业用水为 1.65×10^9 m³(约占2.5%),生活用水为 2.29×10^9 m³(约占3.4%),生态用水为 2.60×10^9 m³(约占3.9%)^[21]。西北旱区主要省份的用水结构及西北旱区与全国用水结构的对比情况如图1所示。

表1 2000—2020年新疆耕地盐渍化面积占比情况
(单位: %)

耕地盐渍化类型	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
非盐渍化耕地	23.44	30.53	31.20	35.74	49.39
轻度盐渍化耕地	19.38	23.83	18.56	17.82	16.31
中度盐渍化耕地	33.66	31.64	32.07	30.72	22.74
重度盐渍化耕地	21.90	12.88	17.44	14.92	11.43
极重度盐渍化耕地	1.62	1.12	0.73	0.80	0.13

3. 西北旱区农产品生产概况

西北旱区是我国农产品和畜牧业的主要产区。图2显示了2020年西北旱区粮食作物、蔬菜、林果的生产情况,其中粮食作物总产量为 8.212×10^7 t(占全国的12.3%),经济作物产量为 6.733×10^7 t(占全国的9.7%),水果产量为 5.238×10^7 t(占全国的20.8%)^[22]。西北旱区依托独特的自然资源,形成了一批具有特色优势的主导产业,如内蒙古的羊肉和牛奶、新疆的棉花和林果、陕西的苹果、甘肃的马铃薯、青海的牦牛和藏羊、山西的小杂粮、宁夏的枸杞和滩羊等特色农产品。其中,新疆的棉花产量占全国的80%以上,宁夏的枸杞产量约占全国的50%、陕西的苹果约占全国的25%,内蒙古的羊肉和牛奶均占全国的22%^[12]。总之,西北旱区在农产品生产和畜牧业发展方面具有不可替代的重要地位。

4. 西北旱区节水灌溉发展现状

在水资源严重短缺的形势下,应用高效节水灌溉技术对保障西北旱区粮食生产安全、促进当地经济可持续发展意义重大。西北旱区平均渠系水利用系数为0.65,平均田间水利用系数为0.86,平均灌溉水利用系数为0.54,平均灌溉定额为476.59 m³/亩高于全国平均水平(380 m³/亩)^[23-29]。西北旱区农业节水技术发展经历了4个阶段:20世纪50—80年代初期的渠道防渗时期,20世纪80—90年代中期的喷微灌探索时期,从20世纪90年代中期开始的膜下滴灌时期、21世纪以来的提质增效时期。当前,农业节水发展由规模化逐渐转变为标准化,更加追求水资源的高效利用,将提质增效作为综合发展目标,在节水的同时强调实现农业增产、增效、增

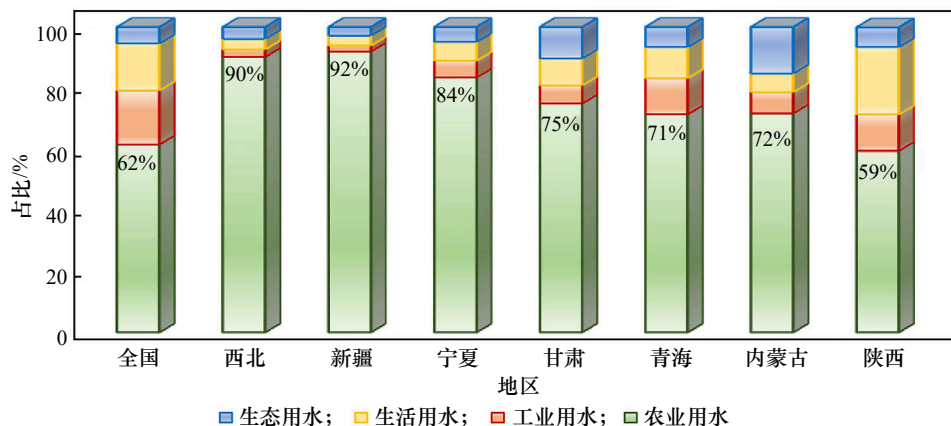


图1 全国及西北旱区主要省份的用水结构

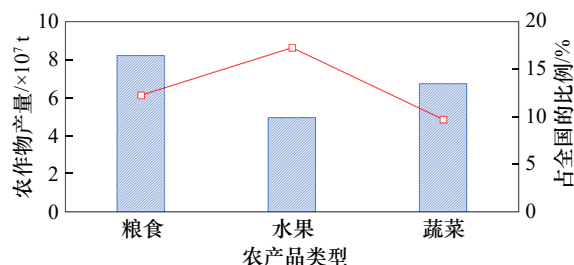


图2 2020年西北旱区的粮食、水果、蔬菜产量与占比情况

收，促使节水灌溉朝着自压化、智能化发展。未来的主要任务是进行节水计划集成，实现低成本空间扩散，关键是应用高新科技和信息技术，结合管理和工程节水技术，提高作物自身的水分利用效率。

5. 西北旱区生态环境概况

新疆、甘肃、青海等省份的干旱荒漠区和绿洲边缘是人口增长较快的区域，草地承载压力不断增加，草地资源退化问题严重^[19]。西北旱区地表植被覆盖率低，生态环境脆弱，其中区域内沙漠面积为 $9.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，荒漠化土地面积为 $2.183 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，占全国荒漠化土地面积的81.6%，占区域总面积的63.3%；森林面积为 $1.157 \times 10^5 \text{ km}^2$ ，覆盖度仅为3.25%^[2]。同时，风蚀、水蚀严重，水土流失面积为 $2.047 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，占全国水土流失面积的69.41%^[19]。陕西、甘肃、宁夏是黄土高原水土流失的主要区域，控制水土养分流失一直是黄河流域生态环境综合治理的重要任务。此外，一些灌区地下水超采严重带来的地下水环境质量及其功能降低问题也不容忽视。

6. 西北旱区人口和社会经济情况

西北旱区的人口约为1.55亿人，占全国总人口的11.2%，其中城镇人口为8442万人，城镇化水平达54.4%；西北旱区的第二、第三产业比重达到90.7%，国内生产总值（GDP）为72 139亿元（占全国GDP的8.6%），人均GDP为4.65万元^[22]，其中农村人均可支配收入为8810元，是全国平均水平的77%^[2]。近10年来，农村种养大户、合作社、家庭农（牧）场等新型经营主体加快形成，农民合作社达 2.63×10^5 家，增长了287%。农业产业化龙头企业不断发展壮大，相关国家重点企业达218家。农业机械化水平不断提高，其中新疆主要农作物“耕种收”综合机械化水平达到84%，位居全国前列^[19]。

（二）西北旱区现代农业提质增效面临的问题

西北旱区地域广阔、资源丰富，但农业生产科技支撑不足，水土资源生产效率相对较低，尚未形成适合西北旱区农业高质量发展的可推广模式，与现代农业提质增效的要求仍存在较大差距，且面临诸多问题。

1. 农业功能设置单一、综合效能低

农业是一个集自然、社会、经济于一体的复合系统，具有多重功能特征^[30]。2007年发布的中央一号文件明确提出，要开发农业的多种功能；2018年发布的中央一号文件和《乡村振兴战略规划（2018—2022年）》均指出，要拓展农业多种功能，深入发掘农业农村的生态涵养、休闲观光、文化体验、健康养老等多种功能和多重价值^[31]。从现阶段西北旱区农业发展情况来看，农业功能主要是农产品生产及其衍生的粮食安全方面的社会功能，没有充分考虑农业在生态服务、景观价值、文化传承等方面的功能。随着国家和社会对农业多功能发展需求的增加，需要系统分析西北旱区农业如何在保障粮食安全和维护农民生计等传统功能基础上，进一步增强改善生态、减缓气候变化、保护文旅景观等方面的作用^[32]。

2. 土地质量退化、水土资源生产效率低

重用轻养、高强度利用引起了耕地质量退化，致使西北旱区部分区域水土流失、次生盐碱化严重，单位水产出低于全国平均水平。从用水效率来看，受客观（处于干旱和半干旱区）和主观因素的综合影响，西北旱区农田综合灌溉定额为 $476.59 \text{ m}^3/\text{亩}$ ，是全国平均值的1.3倍；每万元GDP的用水量为 183 m^3 ，是全国平均用水量的2.05倍。从西北旱区内部分析来看，不同地区的用水效率差异性极为显著，单位水GDP的产出量为 $55 \text{ 元}/\text{m}^3$ ，仅为全国平均产出量的49%，其中宁夏为 $45 \text{ 元}/\text{m}^3$ ，新疆仅 $16 \text{ 元}/\text{m}^3$ ^[2]。

3. 科技支撑程度低、提质增效模式缺乏

西北旱区经济发展滞后，在农业新品种、农业水土资源高效利用、农业机械化和自动化、灌区智能管理等方面相对于国内其他地区存在不足，导致农业生产效率低和农业收入不高，因而，提升农业科技支撑力度是西北旱区农业高质量发展的重要任务。西北旱区农业农村信息化处于起步阶段，基础薄弱、发展滞后、体系不全，信息化对现代农业发展的支撑作用未充分体现，亟需探索

区域发展创新，构建西北旱区农业提质增效的推广模式。

三、西北旱区现代农业提质增效的理论框架

为实现西北旱区农业水土资源的高效持续利用、农民增产增收、生态环境持续改善、人居环境与幸福指数稳步提升，需以农业生产、经济、社会和生态环境综合效益最佳为目标，以旱区农业绿色发展为前提，以提高土地生产能力与水资源利用效率为核心，以生产粮食作物、经济作物、饲草作物和绿肥作物等活动为重点，构建现代农业提质增效绿色发展模式，实现旱区农业高质量发展。为此，本文构建了包含4类区域、4种资源、4个功能、4条途径、4类模式的西北旱区农业提质增效理论框架（见图3）。

（一）西北旱区农业的区域分类

合理划分西北旱区农业区域是构建提质增效发展模式的基础。根据气候、土壤、地形、水资源、农业生产方式等特征，将西北旱区农业发展分为4类区域：以饲草和绿肥作物生产为主的草原放牧区，以饲草与粮食生产并重的农牧交错区，以粮食和林果生产为主的雨养农业区，以粮食、经济作物

和林果生产为主的灌溉农业区。

一是草原放牧区，主要分布在年降水量低于400 mm、气温较低的高原区域。该区域不仅承担发展牧业的任务，同时也承担涵养水源的重任，因此牧草生产和自然植被生长需满足生态环境安全控制阈值的要求。该区域主要分布在内蒙古、新疆、青海和甘肃，其中内蒙古牧区是我国最大的牧区，东起大兴安岭，西至额济纳戈壁，草原面积约为 1.32×10^9 亩，约占全国草场面积的1/4；新疆牧区是我国第二大牧区，草原面积为 8.6×10^8 亩，其中可利用的草原面积为 7.2×10^8 亩，占全国可利用草场面积的26.8%^[33]。

二是农牧交错区，位于我国400 mm年降水量等值线以东的农耕区与以西的牧区相连接的半干旱生态过渡带，是一个特殊的地理区域。西北农牧交错带主要包括陕西、甘肃、宁夏与内蒙古交界的长城沿线，宁南、陇东、陇中、陇西黄土高原区，河湟流域与河西走廊部分地区，新疆“绿洲-草原”过渡地带^[34]。该区域生态环境脆弱，也是我国西北旱区控制土壤荒漠化、沙化的生态屏障，对我国农业生产、生态环境改善、社会高质量发展具有重要意义。

三是雨养农业区，主要分布在年降水量为300~400 mm的黄土高原。该区域光热资源丰富，但水

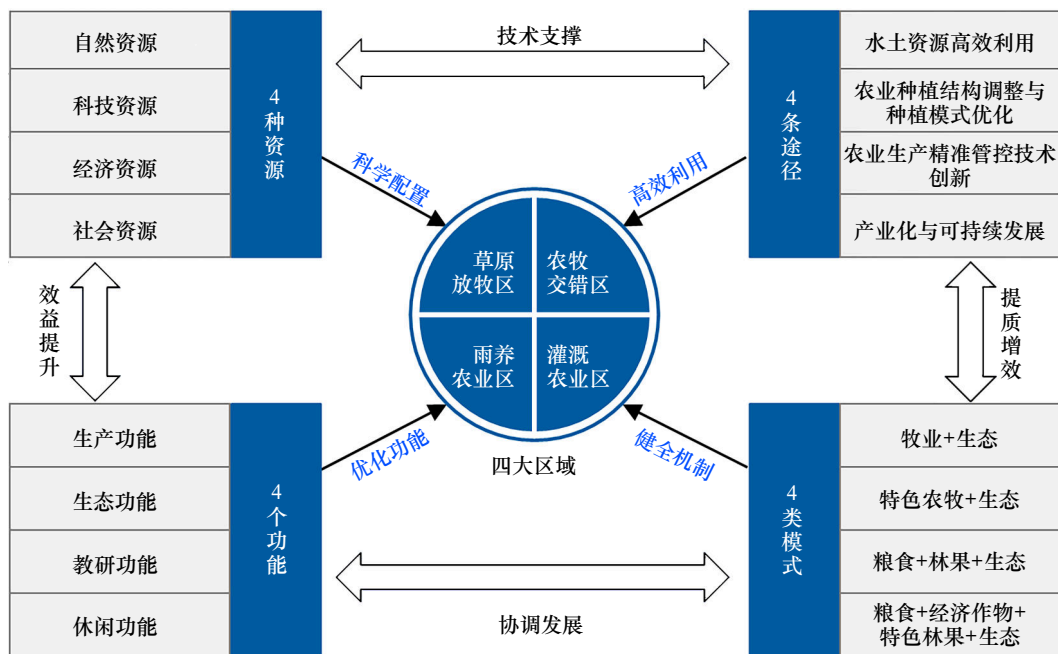


图3 西北旱区现代农业提质增效理论框架

土养分流失严重，是黄河流域高质量发展的重要治理区域。合理调整种植结构，改善基础设施，有效提高天然降水和灌溉水的利用率，提高生态用水的比例，为生态恢复和流域水生态改善提供条件。

四是灌溉农业区，主要分布在年降水量在50~300 mm的平原或盆地，也是西北旱区社会经济较发达的地区，覆盖河套平原、宁夏平原、河西走廊、天山山麓。西北旱区现有灌溉面积约为 1.7×10^8 亩，是我国重要的粮食生产基地。

（二）西北旱区农业发展的重要资源

农业资源主要指从事农业生产活动所利用或可利用的资源，包括自然资源、科技资源、经济资源和社会资源。①自然资源包括农业生产可以利用的自然环境要素，如气候资源、土地资源、水资源和生物资源等，是农业生产的基础资源。②科技资源指提升和促进农业生产力及生产效率的科技成果，包括农业优质品种、农业生产机械、灌排技术、先进农业管理方法等。③经济资源指直接或间接对农业生产发挥作用的经济因素，包括相关先进设施和品种研发、农业生产全过程等方面经济投入。④社会资源指为农业生产投入的劳力、科技人员，包括农业劳动力的数量和质量、农业科技教育与推广人员等。只有科学配置各方面农业资源，才能有效实现现代生态农业的功能。

在上述4种资源中，水土资源是西北旱区社会经济健康发展的基础性、决定性资源，因此，创新水土资源高效利用技术模式是西北旱区农业提质增效的当务之急。

（三）西北旱区现代农业发展的重要功能

为适应现代社会发展需要，需不断扩展现代农业功能，以满足国家发展与人民生活需求，推进乡村振兴战略的实施。西北旱区现代农业发展的4个功能主要包括生产功能、生态功能、教研功能和休闲功能。①生产功能。农业是西北地区的基础产业，为地区经济增长提供了物质基础和市场需求，不仅提供粮食、棉花、油料等主要农产品，还可以发展特色农产品，如果蔬、中药材、畜牧产品等，增加农民收入和地区财政收入。②生态功能。农业对西北地区生态保护起重要作用，也是维持生物多样性、防止土地沙化、改善水土流失和气候变化的

关键因素。西北地区生态环境问题严峻，如干旱、风沙、盐碱等，需要通过发展生态农业、节水灌溉、植树造林等措施，提高农业生态效益。③教研功能。西北地区的农业发展需要各方的共同参与和协作，将农业教育及科研成果转化为实际生产力和社会效益。因此，农业高等院校应该积极构建与政府部门、行业协会、龙头企业、基层组织等各方的合作关系，开展多形式、多层次的交流活动，如科技咨询、技术培训、成果转移、示范推广等。④休闲功能。西北地区历史文化底蕴深厚，是多民族交汇地带，形成了独特的风俗习惯、民俗文化、建筑艺术等。通过发展乡村旅游、民俗旅游、文化旅游，展示和传承西北地区的优秀传统文化，为游客提供多样的文化体验，满足人们对精神的追求。

上述4个方面功能是相互依赖、相互促进和相互制约的，只有协调各方面功能，才能实现现代生态农业健康、高效、可持续发展。

（四）西北旱区农业提质增效的发展途径

农业提质增效的关键途径主要体现在4个方面。①水土资源高效利用。水资源短缺和土地质量低仍是限制西北旱区农业发展的两个重要因素，只有提高水土资源利用的效率与效益，才能从根本上破解西北旱区农业高质量发展的难题。②农业种植结构调整与种植模式优化。只有不断优化种植结构才能充分发挥西北旱区不同区域的比较优势，同时优化种植模式可进一步挖掘自然资源优势，提高农业综合效益。③农业生产精准管控技术创新。将现代智能装备技术、信息技术等与农业生产全过程深度结合，发展现代农业是世界农业发展的趋势，是大幅提升农业生产效率的必由之路。④产业化与可持续发展。因地制宜发展区域特色产业，从资源消耗型产业向节约集约型产业转变，是显著提高农业综合效益的重要举措。

水土资源高效利用和农业种植结构调整的目的是提高自然资源利用效率，精准管控技术创新旨在充分发挥科技资源效能，产业化与可持续发展则是综合利用经济资源与社会资源。因此，4条途径的关键均在于高效利用农业资源。

（五）西北旱区现代农业发展的典型模式

依据西北旱区的区域特征与资源禀赋，充分体

现4个功能,发挥4条途径的重要作用,本文提出了西北旱区农业提质增效的4类典型模式,分别为饲草-绿肥作物生产为主的牧区现代生态农业发展模式、饲草-粮食-经济作物生产并重的农牧交错区生态农业发展模式、粮食-林果生产为主的雨养区生态农业发展模式和粮食-经济作物-林果生产为主的灌溉区现代生态农业发展模式。这些典型模式将从关键技术应用、体制机制构建等方面为西北旱区农业提质增效提供科学依据。

四、西北旱区现代农业提质增效发展途径

(一) 农业资源高效利用

1. 水资源高效利用

西北旱区属于资源型缺水地区,水是控制和决定社会经济发展和生态环境改善的关键自然因素。基于西北旱区水资源开发利用现状,需要从以下4个方面开展水资源的高效利用^[35]。①建设节水高效的现代灌溉农业,积极推广节水灌溉技术,提高灌溉水利用效率;适水种植,抑制灌溉需水量增加;调亏灌溉,挖掘作物高效用水潜力;加强农艺节水,减少农田无效耗水;强化管理,保护地下水资源。②发展集雨增效的现代旱地农业,保持水土,蓄水保墒;草田轮作,增加有机肥使用,改善土壤结构,建设土壤水库,增加土壤储水量;优化种植结构,选育抗旱高产优良品种;优化雨水积蓄技术,抗旱补灌。③非常规水资源利用,建立基于土地处理、湿地处理、调蓄净化等方式的再生水灌溉应用模式;因地制宜发展微咸水灌溉技术,主要包括咸淡水轮灌、咸淡水混灌和微咸水直接灌溉3种方式。④水利工程建设,重点推进大中型灌区续建配套、节水改造以及高标准农田建设;发展灌区信息化与现代灌区建设示范工程,形成智能化、信息化、科学化以及云平台化的灌区管理信息体系。

2. 土地资源改质提力

提升西北旱区土地质量是促进农牧业可持续发展、保障国家粮食安全和生态安全的重要举措。因此,需要强化耕地质量监测网络体系建设,完善耕地质量调查监测与评价制度,划分耕地质量等级,定期发布耕地质量长期定位监测报告。重点研发合理耕层构建及地力保育技术、作物生产系统少/免

耕地力提升技术、作物秸秆还田土壤增碳技术、有机物还田及土壤改良培肥技术、秸秆综合利用、水肥高效技术、盐渍化土壤治理技术、土壤连作障碍综合治理及修复技术。研发打破土壤次生障碍对化肥养分利用制约的原理与技术,明确土壤结构与微生物群落促进养分循环和化肥增效的机制,阐明土壤-根系-微生物系统促进氮磷养分协同利用的机制,构建提高化肥养分利用率的地力提升综合管理模式^[36]。

(二) 农业种植结构调整与种植模式优化

1. 农业种植结构调整

在充分发挥自然资源禀赋优势的基础上,提高西北旱区农业综合生产能力,利用各区域的主要农产品比较优势,进一步提高农产品生产优势区域集中度,突出农产品生产的区域特色^[37]。①小麦种植应向新疆、青海地区倾斜。目前,新疆的小麦种植区位优势在西北旱区处于首位,其次是青海;小麦种植面积较大的陕西、甘肃比较优势不明显,可以考虑将部分小麦生产适当向新疆和青海转移。②玉米种植向宁夏和甘肃转移。目前,西北旱区的玉米种植集中在陕西、甘肃和新疆,但陕西和新疆在在玉米种植方面不具有比较优势,而具有比较优势的宁夏并未广泛种植玉米。可考虑将新疆和陕西的部分玉米种植向宁夏转移。③建议减少陕西和甘肃的棉花种植,并将之转移到新疆地区。新疆在棉花种植方面具有非常强的比较优势,在将棉花作为最主要农作物基础上,可适当扩大棉花种植面积。④青海的农业种植应向油料作物倾斜。虽然青海的主要农作物种植为油料作物,但其播种面积小于陕西、甘肃和新疆,应合理利用青海省的土地优势,用有限的耕地种植最具有比较优势的农作物。

2. 作物种植模式优化

西北旱区的作物种植模式以高效利用自然资源、提高能量循环效率与物质转化率为目标,建立多物种共栖、多层次配置、多时序交错、多级物能转化的立体农业种植模式。就单一田块而言,根据不同作物的生长特性,如合理配置高与矮、喜光与耐阴、早熟与晚熟、深根与浅根、豆科与禾本科等作物,利用作物生长过程中对主要营养要素需求的时空差异,开展间种、套种、混种、复种、轮种和保护性耕作等种植模式,形成多作物、多层次、多

时序、多功能的立体交叉种植结构，在时空上形成农作物复合群体。在区域尺度上，形成高度复合、多样性循环经济，实现农业资源的多方位综合利用、经济社会与生态环境效益协调的高效农业种植模式。

（三）水土生产精准管控技术创新

利用大数据、云计算、物联网和专家决策系统等技术，构建农业生产全过程智能体系，包括农业生产要素信息获取系统、农业生产信息实时处理系统、农业生产设备智能化控制系统、农业生产过程智能决策系统等。实时监测气象、土壤、作物、病虫害、地下水、农业灌排水、地表水体等农业生产环境要素及其与生态环境相互作用的主控因子，结合土壤-作物-生态-环境系统模型，因地制宜模拟分析，实时预报作物生长状况及其与环境作用程度、生态功能和预期效益。通过智能决策系统，优化农业生产要素调控方法，量化主要指标，指导农业生产各环节控制设备的运作；通过智能监测手段对调控措施效果进行综合评估，实现农业生产过程的规范化、标准化和智能化管理。将农业生产规划、农业生产、产品储存、产品销售融为一体，协调农民、地方政府和国家利益，科学利用自然资源、科技资源、经济社会资源，将农田合理灌溉施肥、农业面污染控制、秸秆资源化、地力提升进行统一管理，形成责任明确、投资稳定、信息精准、服务到位、利益协调、生态环境友好的智能化、精细化农业管理方式。

（四）产业化与可持续发展

以西北旱区主导产业和农业资源开发利用的潜力及优势为主要依据，充分发挥农业科技对现代农业的支撑作用，引进新品种，推广新技术，示范新模式，推进农业科技成果转化。根据不同地区的资源禀赋，因地制宜，选准、培育、壮大适宜发展的特色现代农业产业，大力发展产业化经营，明确重点区域，推进农业发展的规模化、外向化、品牌化。改变传统农业发展模式和产业空间分散布局的现状，提高生产的集约化和规模化程度，形成特色优势产业，实现土地资源配置的最优化。西北旱区农业产业布局可以从3个方面着手。

一是正确处理经济发展与耕地资源保护的关

系，尽快使农业发展从追求产量和依赖资源消耗的粗放经营向注重科技创新、提高竞争力、可持续集约发展的方向转变。

二是依据本地资源禀赋、紧随市场需求，确立具有特色的主导产业，从产量和质量两方面特色优势来综合定位，如新疆的棉花、羊肉、核桃和瓜果，陕西的瓜果和荞麦，甘肃的玉米、土豆和油菜，青海的土豆、油菜和青稞，宁夏的枸杞等具有区域特色的优势产业。

三是重视流通环节的便捷性与成本问题，确保农产品流通网络与农业产业空间布局相协调，形成农产品流通的物流组织服务系统，为创新农产品流通方式、实现农产品流通现代化奠定坚实基础^[37]。

五、西北旱区现代农业提质增效发展模式典型模式构建

以国内外市场需求和区域农业资源为基础，结合西北旱区农业发展特征，将社会效益与生态环境效益融为一体，构建符合现代农业发展趋势的旱区现代农业发展模式。

在典型模式构建方法方面，首先，以作物、林果、牧草和蔬菜等植物成熟所需的有效积温为基础气象条件进行选择，确定可以人工种植的植物类型；其次，以当地降雨量和可用于灌溉的水资源为基础，依据拟种植植物的耗水特征及其生产与生态功能，进行可种植植物选择与种植结构的规划；再次，根据当地土壤肥力状况、地形条件、生态环境效应，拟定植物种植模式与机械化种植方式，构建现代生态农业智能化管理框架；最后，以经济社会和生态环境效益最大化为目标，发挥当地旅游资源、文化产业资源和当地农业特色产业优势，优化农业功能、产业结构、种植模式、机械化方式、智能管理模式，构建符合市场需求，高效、健康、可持续发展的现代生态农业发展模式。

（一）饲草-绿肥作物生产为主的牧区现代生态农业发展模式

根据牧业发展规划和生态环境任务，西北旱区可以构建“牧业+生态”的现代农业发展模式，逐步应用现代生产技术与方法，实现牧业高质量发展。

(1) 良田种草与草田轮作。鼓励部分农区种草, 实施草田轮作, 在保证生态不恶化、环境向好的基础上, 放弃高水、高肥、高农药条件下的连作和单作, 通过划区轮作、农牧耦合提升生态生产力。

(2) 合理布设气象、土壤、植被、地表径流和地下水位等自动监测系统, 利用牧区气象-土壤-植被-地下水-河流综合模拟系统和综合效益评估模型, 预测和评估牧区植被生长状况、经济社会和生态环境效益, 实时指导牧场的科学运行, 实现牧区大面积集成化智能管理。

(3) 建立牧区草产品储备与交易平台、物流体系。建立牧草战略储备库与草产品供求服务平台, 进行草产品的储备、调度、销售等, 有效增强牧区抵御灾害的能力, 持续快捷地向牧民供给草产品。

(4) 将草业生产纳入国民经济评价指标体系。作为家畜饲料的玉米、大豆等粮食作物在国民经济系统中是有所体现的, 但作为与种植业、林业可媲美的草业在国民经济统计指标中没有体现^[38]。草原牧区在我国农业生产效率提高方面潜力很大, 应尽早纳入国民经济评价指标^[39]。

(5) 形成合理的水土资源管理机制。水土资源的合理分配是天然草地传统牧业向人工草地现代集约牧业转变的核心。应统筹各部门利益, 科学合理分配, 既要保证经济发展, 也要保证生态保育的基本要求。按照统一规划、分类管理的原则, 结合区域特点划分功能区, 根据经济功能、生态功能的不同要求进行资源的管理和配置^[40]。

(二) 饲草-粮食-经济作物生产并重的农牧交错区现代生态农业发展模式

西北农牧交错带光照强烈, 但作物有效温度低且生育期短, 大部分地区缺乏灌溉水源, 土壤质地偏沙, 是我国北方地区的生态屏障。因此, 该地区的农业发展与生态建设具有同等重要地位, 可以建立“特色农牧+生态”现代农业发展模式, 有效控制水蚀和风蚀。

(1) 强化农牧结合, 调整农业生产结构。推动种植业与牧业相互适应与协调, 促进养殖业规模、种类与种植业提供的饲料相适应, 从时间和空间上综合利用农业资源与社会经济资源。农业种植结构从“以粮为主、牧业为副”的结构向饲草-粮食-

经济作物三元生产结构模式转变, 在保障粮食自给的前提下, 适当增加饲草与经济作物的种植比例。

(2) 通过施加有机肥、增加地面覆盖以及牧草与作物混种、间作、轮作等方式改善土地质量, 提高牧草生产效率, 有效控制水蚀和风蚀, 保护和改善生态环境。在有水源条件的区域, 可以利用膜下滴灌技术, 在作物关键生育期进行适量灌溉; 在盐碱化严重地区, 可采取化学与生物改良及井排井灌、咸淡轮灌有机结合, 控制地下水水位在2.5~3.5 m之间, 实现盐碱胁迫农田的绿色改良。

(3) 以县域为单位, 布设一定规模的农牧文化产业园、特色杂粮生产体验园和科技创新园等, 与丰富的旅游资源有机融合, 实现生产功能、生态功能、教育功能、科研功能和休闲功能多效合一, 提高该地区的经济社会效益, 促进该地区科技创新与现代科技应用能力的提升。

(4) 根据当地气象、地形、土壤、植被状况, 合理布设相关水文自动监测系统, 利用气象-土壤-植被-生态环境综合模型预测评估植被生长状况、经济社会和生态环境效益, 实时指导农业生产活动, 实现农牧交错区规模化智能管理。

(三) 粮食-林果生产为主的雨养区生态农业发展模式

西北旱区的雨养农业区主要分布在黄土高原, 光热资源丰富, 适宜种植冬小麦、夏玉米和经济特色林果(如苹果和红枣等)。该地区地形复杂, 坡地较多, 水土养分流失严重, 土地质量低, 缺乏灌溉条件, 但该地区黄土覆盖层深厚, 具有巨大的土壤水库。因此, 该地区适宜构建“粮食+林果+生态型”高效控制水蚀的现代农业发展模式。根据当地地形和降雨特征, 强化坡、沟、谷综合治理, 适度开展坡地改梯田工程, 修建条田、坝地, 实现农业生产与生态环境改善相协调。

(1) 在陡坡地开发利用方面, 严格实施退耕还林还草工程, 采用生态草和经济林果混作、地面固体物与地表枯枝落叶覆盖相结合的方式, 提升“土壤水库-地表水库”的涵养水源功能和控制水土养分流失功能, 提高陡坡地的经济和生态效益。

(2) 在坡地改梯田利用方面, 采取施加有机肥、地面覆盖、轮作、免耕、林粮混作等方式, 提高土地生产能力, 控制农田水土养分流失。

(3) 在雨水资源化方面, 将“降雨-土壤水库-雨水集流”进行综合调控, 在作物生长关键期(如粮食作物的拔节抽穗期、林果果实膨大期)开展补充灌溉。同时, 结合物理和生物技术, 进行秸秆粉碎与熟化还田, 提高土壤有机质含量, 增强土壤保水供肥能力。

(4) 在河滩地和坝地利用方面, 将降雨、灌溉水、地下水和土壤水进行联合调控, 科学防治坝地形成临时地下水引发的土壤盐碱化问题。在径流泥沙与养分含量高的低洼河滩, 建设植被过滤带, 进行泥沙和养分净化处理, 控制入河泥沙和养分含量。

(5) 研发与应用坡地农机具和农业机器人, 实现农业生产机械化。建设气候特征、土壤环境质量、植被生长、河流水量和水质智能监测系统, 并利用气候-土壤-植被-河流系统模拟模型, 实现土壤-植被-生态环境系统物质和能量传输过程实时评估与调控。

(6) 以县域为单位, 布设一定规模的雨养农业文化产业园、特色林果体验园和坡地农业科技与生态保护创新园等, 并与丰富旅游资源有机融合, 实现生产、生态、教育、科研和休闲功能的有机融合, 提高当地农民收入, 促进该地区生态文明、社会进步、科技创新以及绿色、健康和可持续发展。

(四) 粮食-经济作物-林果生产为主的灌溉区现代农业发展模式

西北旱区的典型灌溉农业区分布在新疆、甘肃、内蒙和宁夏等地区的主要灌区, 光热资源丰富, 降雨量虽难以满足作物生长需求, 但具有相对丰富的地表水和地下水水源, 是西北旱区主要粮食、经济作物和特色林果生产基地。该地区气候变化大, 风灾、冻灾、旱灾等自然灾害频发, 水环境污染严重, 土壤盐碱化农田面积大、范围广, 直接影响土地可持续利用。因此, 该地区适宜发展“粮食+经济作物+特色林果+生态环境型”现代农业发展模式。该地区农业发展在很大程度上依赖于灌溉, 高效利用农业水资源成为农业绿色可持续发展中重要任务。

(1) 在农业水资源开发利用方面, 以水资源农业、生态环境承载力为基础, 科学规划农业生产规模与效益, 进行降水、地表水、地下水资源的联合调配及水量、水质、水能的综合利用, 大力推广应

用灌溉水活化技术和高效节水技术。在水资源与土地资源矛盾突出的地区可以采用区域或灌区调亏灌溉模式, 实现经济效益和生态环境效益最大化。在微咸水和咸水资源丰富的地区, 将咸水降盐技术、咸水活化技术与微咸水混灌、轮灌及井排井灌技术合理结合, 提高农业水资源利用程度, 更新地下水水体, 控制农田排水所引发下游水体污染。

(2) 在土地质量提升方面, 强化土地平整与土壤质量提升。以灌溉农渠或喷滴灌首部控制面积为基本单元, 进行土地平整, 以提高灌水均匀度。依据水平畦、沟灌、滴灌和渗灌节水技术要求, 规划土地平整模式和灌溉渠管布设方式。应用秸秆熟化还田技术和施加有机肥, 以提高土地质量。在盐碱胁迫较严重地区, 强化地下水水位和水质合理管控, 将地下水水位控制在2.5~4 m, 淡化地下水, 以保障土地安全和生态安全, 加强物理、化学和生物等绿色改良盐碱化土壤技术的综合应用。

(3) 在田间管理方面, 建立地表水-土壤-地下水环境容量允许的农田施肥强度与施肥方式, 强化水肥精准一体化技术的应用, 构建符合农产品安全要求的农药使用量和方式。研发与应用农业生产一体化农机具和农业喷洒农药、农田系统监测机器人, 实现农业生产机械化。建设有关气候特征、土壤环境质量、作物生长、灌溉水量和水质等的智能监测系统, 并利用气候-土壤-作物-地下水-地下水系统模拟模型, 开展土壤-植被-生态环境系统物质和能量传输实时评估。

(4) 在景观格局方面, 在沿骨干公路两旁的农田中设置一定宽度的生态环境保护与观赏带, 种植具有净化污染物功效的林草、花卉, 保障农业安全生产和增加农田观赏价值。以县域或灌区为单位, 布设一定规模的农业产业园、农业生产体验园、现代农业创新园、生态环境保护教育园和湿地公园等, 并与旅游资源有机融合, 实现生产功能、生态功能、教育功能、科研功能和休闲功能有机融合, 促进现代灌溉农业绿色、健康和可持续发展。

(5) 在优化农业资源保护与创新机制方面, 紧紧围绕农业资源保护和节约目标, 加大对相关科技开发和推广的投入, 实施节能减排、节地增效和农业资源循环利用等示范工程, 利用现代科技改造盐碱地、增强作物促生提质等, 加强水资源管理和保护, 对农业水资源消耗总量和消耗强度进行严格控

制,对农业资源进行监测和管控,保证水土资源的高效利用。

六、对策建议

(一) 优化农业功能分区,科学规划绿色种养结合发展格局

加快落实主体功能区规划,健全西北旱区农业空间规划体系,形成合理的农、林、牧用地结构。优先在已建成的高标准农业范围内划定,落实到基本农田或高标准农田中的具体目标地块,明确目标作物产能任务,确保国家粮食安全及重要农产品安全的核心防线,固化功能区耕地空间,严格实施耕地保护制度,控制耕地资源开发强度和利用方式,防范优质耕地非农化和非良化流失,推进形成合理的生产、生态和生活“三生”用地空间格局,确保粮食及重要农产品供给安全。

推进生态循环种养和废弃物综合利用,重点支持农牧业一体化发展的配套基础设施建设。建立适应农牧业转型发展的稳定投入机制,聚焦共性问题,增加力度,重点支持农牧业一体化发展的配套基础设施建设项目;整合资源要素,优化投资环境,加大农牧业招商引资力度,形成多元化投资主体,为农牧业发展方式转变提供驱动力。

(二) 健全生态农业补偿机制,创建绿色核算制度

在政府主导下,综合运用资金补偿、实物补偿、技术补偿等手段,对从事生态农业的生产者给予一定的补贴。加强对绿色生产技术、模式和制度的补贴,加强对农地生态环境保护、用地养地结合、耕作制度适宜、生产能力提升等环节的支持,构建生态农业补偿政策体系。加强统筹协调,推动增量资金重点向资源节约型、环境友好型农业倾斜,促进农业结构调整,加快转变农业发展方式。深化产权制度改革,明确界定林权、草原承包经营权、水权,完善产权登记制度,建立和完善生态环境保护 and 生态农业补偿机制相关的法律法规体系,持续推进农业生态补偿的制度和法制化。

生态农业系统建设需要树立绿色 GDP 的概念,加强农业环境监测体系构建,逐步改进和完善核算框架和技术方法,即在 GDP 中扣除自然资源的损失

额和治理环境污染相应的资金额。建立科学、完整的资源环境统计指标体系,依据绿色核算结果来制定相关的污染治理、环境税收、生态补偿、政绩考核等环境经济管理政策。

(三) 促进产业融合,树立现代生态农业发展理念

通过要素聚集、产业联动、技术渗透以及制度创新等方式调整改造产业结构。将农作物种植、农产品加工和销售、旅游、餐饮、休闲以及其他服务业有机整合,延长产业链、提升价值链、拓宽增收链,进而促进“三产”协同发展以及农业现代化。充分挖掘与发挥第三产业融合主体(尤其是新型农业经营主体)的规模优势、技术优势、管理优势等,加快现代生产要素对传统要素的更新替代,降低农业生产对传统要素资源的过度依赖,提高土地产出率、资源利用率和劳动生产率。通过农业与第二、第三产业的协同发展,深化农业供给侧结构性改革。

加大以现代生态农业为导向的农业发展理念宣传力度,引导农民树立生态农业发展理念,推动农业生产方式由过度消耗资源向绿色发展转变,改变过去片面追求产量、追求经济效益的目标导向,由保证“量”的供应向“质”的提高转变。同时,将绿色生态理念贯穿到法律法规、政策制定、农业生产、农产品加工及销售的各个层面,建立以绿色生态为导向的农业政策体系,形成与资源环境承载力相匹配的农业产业布局,真正实现农业高质量发展。

(四) 构建现代生态农业发展的绿色科技创新与推广服务体系

以农业增效、农民增收为核心,合理配置资源,培育创新主体,提高创新效益,积极推进农业科研服务体系改革。集成现有农业科技资源,包括对现有技术、资本、人力和市场等要素进行系统整合、优化,鼓励高新技术企业与科研单位、高等院校建立多种形式的科技经济联合组织,加快创新农业绿色发展技术体系和技术路线。完善科技创新利益激励机制,激发农业科技工作者的创新热情,设置合理的科研考评奖励机制,建立科研单位、高校、企业等各类创新主体协同攻关机制,开展以绿色农业生产为重点的科技联合攻关。

坚持政府引导与市场主导相结合,全面提升

农业企业的技术开放、产品熟化和产业化能力,促进农业企业逐步成为技术创新决策、研发投入、科研组织和成果转化的主体,使科技创新转化为产业,培育新的增长点,促进农业转型升级、提质增效,促进优势产品、优势产业向适宜区域集中,形成专业化、规模化企业集团和产业生产链。建立专门的农业技术推广部门,将已有科学技术创新不断改进,推广到农户的生产作业中,提升科技创新成果转化率。

(五) 培育农业农村人才,完善人才政策体系

培育与吸引相结合,推进人才队伍建设。一是培养农业农村现代化人才队伍,重点培养扎根乡土的农业农村现代化人才,集中力量培养适应农业农村现代化发展需要的农业产业发展人才、农村治理人才、农村环境监管人才、农业农村文化人才。二是吸引人才投身农业农村现代化建设,重点是吸引具有“三农”情怀、拥有特殊技能的农业科技人才,解决当前乡村人才流失和特殊人才短缺问题。

实现农业农村现代化,需要开放的人才政策,支持人才引进并发挥应有作用。完善农业农村现代化人才政策体系,要确立以用为本的原则,不为所有,但求所用,切实让人才在农业农村现代化中发挥重要作用;建立科学的人才识别机制、效果显著的人才激励机制、合理的人才分类评价政策体系,构建农业农村现代化人才顾问政策体系。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 22, 2022; **Revised date:** January 20, 2023

Corresponding author: Ding Mingjiang is a professor from Research Center on Water Resources and Eco-Hydraulic Engineering in Cold and Arid Regions, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is water and soil resources in arid areas. E-mail: xjdmj@163.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Strategies for Improving Agricultural Efficient Water Use and Ecological Service Functions in Northwest Irrigation District” (2022-XZ-26)

参考文献

- [1] 中国工程院“西北水资源”项目组. 西北地区水资源配置生态环境建设和可持续发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2003, 5(4): 1-26.
Water-resources-in-Northwest-region Task Group of Chinese

- Academy of Engineering. Strategic study on allocation of water resources, conservation and upgrading of eco-environment and sustainable development in North-west China [J]. Engineering Science, 2003, 5(4): 1-26.
- [2] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1189-1203.
Deng M J. “Three Water Lines” strategy: Its spatial patterns and effects on water resources allocation in Northwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1189-1203.
- [3] 邓铭江, 陶汪海, 王全九, 等. 西北现代生态灌区建设理论与技术保障体系构建[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 1-13.
Deng M J, Tao W H, Wang Q J, et al. Theory and technical guarantee system construction of modern ecological irrigation district in Northwest China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 1-13.
- [4] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1-9.
Chen Y N, Yang Q, Luo Y, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of Northwest China [J]. Arid land geography, 2012, 35(1): 1-9.
- [5] 黄强, 孟二浩. 西北旱区水文水资源科技进展与发展趋势[J]. 水利与建筑工程学报, 2019, 17(3): 1-9.
Huang Q, Meng E H. Research progress and development trends of hydrology and water resources in northwest arid regions [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2019, 17(3): 1-9.
- [6] 孙兆军. 全球典型旱区水土资源可持续利用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Sun Z J. Sustainable utilization of water and land resources in the world's typical arid regions [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [7] 黄祖辉, 王朋. 农村土地流转: 现状、问题及对策——兼论土地流转对现代农业发展的影响[J]. 浙江大学学报(人文社会科学版), 2008, 38(2): 38-47.
Huang Z H, Wang P. Farmland transfer and its impacts development of modern agriculture: Status, problems, and solutions [J]. Journal of Zhejiang University (Humanities and Social Sciences), 2008, 38(2): 36-47.
- [8] 张照新, 赵海. 新型农业经营主体的困境摆脱及其体制机制创新[J]. 改革, 2013 (2): 78-87.
Zhang Z X, Zhao H. The way-out of the new agricultural management entities and its system and mechanism innovation [J]. Reform, 2013 (2): 78-87.
- [9] 李瑾, 郭美荣, 高亮亮. 农业物联网技术应用及创新发展策略[J]. 农业工程学报, 2015, 31(S2): 200-209.
Li J, Guo M R, Gao L L. Application and innovation strategy of agricultural internet of things [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(S2): 200-209.
- [10] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究与现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1-18.
Liu C L, Lin H Z, Li Y M, et al. Analysis on status and development trend of intelligent control technology for agricultural equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1-18.
- [11] 郑海霞, 尤飞, 唐华俊, 等. 面向2050年我国农业资源平衡与国

- 际进口潜力研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 20–28.
- Zheng H X, You F, Tang H J, et al. Agricultural resource balance and international import potential of China by 2050 [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(1): 20–28.
- [12] 朱齐超, 李亚娟, 申建波, 等. 我国农业全产业链绿色发展路径与对策研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(1): 73–82.
- Zhu Q C, Li Y J, Shen J B, et al. Green development of agricultural whole industry chain: Pathway and countermeasures [J]. *Strategic Study of CAE*, 2022, 24(1): 73–82.
- [13] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 1–7.
- Zhao C J. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture [J]. *Smart Agriculture*, 2019, 1(1): 1–7.
- [14] 陈桂芬, 李静, 陈航, 等. 大数据时代人工智能技术在农业领域的研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(4): 502–510.
- Chen G F, Li J, Chen H, et al. A survey of researches on artificial intelligence in the field of agriculture in big data era [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2018, 40(4): 502–510.
- [15] 刘海启. 以精准农业驱动农业现代化加速现代农业数字化转型[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(1): 1–6, 73.
- Liu H Q. Accelerating the digital transformation of modern agriculture by driving agricultural modernization with precision agriculture [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(1): 1–6, 73.
- [16] 王根绪, 程国栋. 西北干旱区土壤资源特征与可持续发展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(5): 492–497.
- Wang G X, Chen G D. The characteristics of soil resources and sustainable development in the arid northwest China [J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(5): 492–497.
- [17] 董艳, 章慧, 张慧荟, 等. 西北旱区农业水土资源空间变异特征研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 205–209.
- Dong Y, Zhang H, Zhang H H, et al. Spatial variability of agricultural water and soil resources of northwest arid area [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(2): 205–209.
- [18] 张清凌, 方晖, 李均力, 等. 新疆国土资源与生态环境安全遥感监测与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- Zhang Q L, Fang H, Li J L, et al. Remote sensing monitoring and evaluation of Xinjiang's land resources and ecological environment safety [M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [19] 中华人民共和国农业部. 西北旱区农牧业可持续发展规划(2016—2020年)[R]. 北京: 中华人民共和国农业部, 2016.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Sustainable development plan of agriculture and animal husbandry northwest arid area (2016—2020) [R]. Beijing: Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, 2016.
- [20] 陈亚宁. 中国西北干旱区水资源研究[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- Chen Y N. Research on water resources in arid areas of Northwest China [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [21] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报(2019)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin (2019) [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2020.
- [22] 国家统计局. 中国统计年鉴 2018 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- National Bureau of Statistics. China statistical yearbook 2018 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [23] 阿依努尔·米吉提. 新疆灌区灌溉水利用系数变化分析[J]. 陕西水利, 2019 (1): 70–73.
- Ainur M. Analysis on change of irrigation water utilization coefficient in Xinjiang irrigation area [J]. *Shaanxi Water Resources*, 2019 (1): 70–73.
- [24] 冯小燕. 甘肃省灌区水利普查成果及农业用水分析研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2012, 48(4): 39–41.
- Feng X Y. Research on water conservancy census results and agricultural water use analysis in Gansu irrigation districts [J]. *Gansu Water Resources and Hydropower Technology*, 2012, 48(4): 39–41.
- [25] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- Statistics Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region. Inner Mongolia statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [26] 国家统计局甘肃调查总队. 甘肃调查年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- Gansu Survey Corps of the National Bureau of Statistics. Gansu survey yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020.
- [27] 宁夏回族自治区统计局, 国家统计局宁夏调查总队. 宁夏统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Statistics Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, Ningxia Survey Corps of the National Bureau of Statistics. Ningxia statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [28] 陕西统计局. 陕西统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Shaanxi Provincial Bureau of Statistics. Shaanxi statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [29] 青海统计局. 青海统计年鉴 2019 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Qinghai Provincial Bureau of Statistics. Qinghai statistical yearbook 2019 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019.
- [30] 钟源, 刘黎明, 刘星, 等. 农业多功能评价与功能分区研究——以湖南省为例[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 38(3): 93–100.
- Zhong Y, Liu L M, Liu X, et al. Multi function evaluation and functional zoning of agriculture: A case study of Hunan province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2020, 38(3): 93–100.
- [31] 房艳刚, 刘本城, 刘建志. 农业多功能的地域类型与优化策略——以吉林省为例[J]. 地理科学进展, 2019, 38(9): 1349–1360.
- Fang Y G, Liu B H, Liu J Z. Territorial types and optimization strategies of agriculture multifunctions: A case study of Jilin Province [J]. *Progress in Geography*, 2019, 38(9): 1349–1360.
- [32] 张晨, 施标, 俞美莲, 等. 基于多功能农业的科技创新研究[J]. 上海农业学报, 2014, 30(4): 115–118.
- Zhang C, Shi B, Yu M L, et al. On technical innovation of multifunctional agriculture [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2014, 30(4): 115–118.

- [33] 张仁平, 张云玲, 郭靖. 新疆草地净初级生产力(NPP)空间分布格局及其对气候变化的响应 [J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5318–5326.
Zhang R P, Guo J, Zhang Y L. Spatial distribution pattern of NPP of Xinjiang grassland and its response to climatic changes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5318–5326.
- [34] 冯玉新. 历史地理视域下的西北农牧交错带刍议 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(12): 83–89.
Feng Y X. Northwestern farming–pastoral zones in the perspective of historical geography [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(12): 83–89.
- [35] 石玉林. 中国农业资源环境若干战略问题研究 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
Shi Y L. Research on key strategic issues of agricultural resource and environment in China [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019.
- [36] 孙波, 张旭东, 陆雅海, 等. 耕地地力提升与化肥养分高效利用 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Sun B, Zhang X D, Lu Y H, et al. Improvement of cultivated land fertility and efficient use of fertilizers and nutrients [M]. Beijing: Science Press, 2022.
- [37] 中国工程院“西北地区食品安全可持续发展战略研究”课题组. 西北地区食品安全可持续发展战略研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Sustainable Development of Food Security in Northwest China Task Group of Chinese Academy of Engineering. Sustainable development of food security in Northwest China [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [38] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 国民经济行业分类(GB/T 4754—2017) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration. Industrial classification for national economic activities (GB/T 4754—2017) [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [39] “中国草原生产力与食物研究”课题组. 中国草原生产力与食物安全研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2017.
Research on Grassland Productivity and Food Security in China Task Group of Chinese Academy of Engineering. Research on grassland productivity and food security in China [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [40] 布尔金, 赵澍, 何峰, 等. 新疆草地畜牧业可持续发展战略研究 [J]. 中国农业资源与区划, 2014, 35(3): 120–127.
Buerjin, Zhao S, He F, et al. Sustainable development strategy study on Xinjiang’s grassland animal husbandry [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(3): 120–127.