doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.08.001

西北现代生态灌区建设理论与技术保障体系构建

邓铭江[1,2]　陶汪海[1]　王全九[1]　苏李君[1]　马昌坤[1]　宁松瑞[1]

(1. 西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048;
2. 寒旱区水资源与生态水利工程研究中心, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 灌区是我国粮食安全和现代农业发展的基础保障,同时也是区域经济发展和生态环境保护的重要基石。然而西北地区独特的气候、地貌及社会经济状况导致了灌区生产能力和生态服务功能难以满足现代生态农业发展的需求。通过系统分析西北灌溉农业发展中面临的水资源过度开发、土壤盐碱化严重、生态环境功能低下等方面的问题,阐述了西北现代生态灌区的内涵与特征,并基于农业生产"功能水分"来源,将西北灌区划分成了灌溉依赖型灌区、灌溉主导型灌区、灌溉补充型灌区和灌溉提质型灌区 4 类。以灌区农业生产系统、物能输配系统、生态环境系统为建设对象,提出了灌区生态服务功能优化配置、灌区农田物能调控和灌区生态系统安全评估三大核心理论,构建了灌区系统控污与景观价值提升技术、灌排系统管控技术、作物生境要素综合调控技术三大关键技术,从而形成了西北现代生态灌区理论与技术保障体系,为我国西北灌溉农业高质量可持续发展提供理论与技术指导。

关键词: 现代生态灌区; 生态景观; 生态功能; 灌排系统; 物能调控; 生境要素

中图分类号: S277.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2022)08-0001-13　　**OSID**:

Theory and Technical Guarantee System Construction of Modern Ecological Irrigation District in Northwest China

DENG Mingjiang[1,2]　TAO Wanghai[1]　WANG Quanjiu[1]　SU Lijun[1]　MA Changkun[1]　NING Songrui[1]

(1. *State Key Laboratory of Eco-Hydraulics in Northwest Arid Region*, *Xi'an University of Technology*, *Xi'an* 710048, *China*
2. *Engineering Research Center of Water Resources and Eco-Hydraulics in Arid and Cold Region*, *Urumqi* 830000, *China*)

Abstract: Irrigation district is the basic guarantee of food security and modern agricultural development in China, as well as the important cornerstone of regional economic development and ecological environment protection. However, the unique climate, landform, and economic conditions in Northwest China make it difficult for the production capacity and ecological service function of irrigation districts to meet the needs of modern agricultural development. Based on the systematic analysis of the challenges (e.g., over-exploitation of water resources, soil salinization, agricultural water-saving, ecological environment construction, drought resistance and disaster reduction capacity, management, and maintenance) in the development of irrigation agriculture in Northwest China, the connotation and features of modern ecological irrigation district in Northwest China were put forward. According to the water source and agricultural production function, the irrigation districts in Northwest China can be divided into four types: irrigation-dependent district, irrigation-dominated district, irrigation-supplementary district, and irrigation-optimization district. Agricultural production system, material energy transmission system, and ecological environment system in irrigation district were proposed as research objects. Three core theories, namely optimal allocation theory of ecological service function, regulation theory of farmland material and energy, and ecosystem security assessment in irrigation district were proposed. Three key technologies, namely pollution control and landscape value enhancement technology, irrigation and drainage system control technology, and crop habitat integrated control technology were constructed. A theoretical and technical support system for modern ecological irrigation areas in the Northwest China was constructed, which can provide theoretical and technical guidance for

收稿日期: 2022-01-04　修回日期: 2022-03-10

基金项目: 兵团重大科技项目(2021AA003-2)、中国工程院战略研究与咨询项目(2022-XZ-26)、新疆维吾尔自治区重大科技专项(2020A01003-3)和新疆水专项(2020.D-001)

作者简介: 邓铭江(1960—),男,教授级高级工程师, 中国工程院院士,主要从事旱区水土资源研究,E-mail: xjdmj@163.com

the high-quality and sustainable development of irrigated agriculture in Northwest China.

Key words: modern ecological irrigation district; ecological landscape; ecological function; irrigation and drainage system; matter and energy regulation; habitat factors

0 引言

我国国土辽阔,气候差异大,降水分布不均,导致农业发展水平差异显著。面对日益增长的人口、资源和生态环境压力,灌区尤其是大型灌区对现代农业发展作用更加显著。我国灌溉农田生产的粮食产量占全国总产量的 75%,占经济作物的 90%,其中大中型灌区占全国 11% 的耕地面积,生产了全国 22% 的粮食,创造了全国农业总产值的 1/3,保障了 2.1 亿农民的生产发展,是我国商品粮的重要生产基地,在农业生产和农村经济发展中占有举足轻重的地位[1-2]。

西北旱区包括新疆、青海、甘肃、宁夏、陕西和内蒙古等 6 省(自治区)范围内的黄河流域、内陆干旱区和半干旱草原区,该地区北边和西边以国境线为界,东边以大兴安岭为界,南边以昆仑山、巴颜喀拉山、秦岭为界,东西长 3 800 km,南北宽 2 100 km,面积 3.45×10^6 km^2,占国土总面积 35.9%[3]。西北旱区耕地面积有 2.27×10^7 hm^2(占全国的 19%),灌溉农业面积约有 1.13×10^7 hm^2,是我国重要的粮食生产和耕地资源后备基地,灌区农业高质量发展对于实现我国粮食安全具有重要意义。但西北旱区农业发展受到气候干旱、水资源短缺、土壤盐碱化和土地质量低等多重自然条件的影响,同时灌区供水保证率低、灌排设施不配套、水肥利用效率低,导致生态用水与农业用水矛盾加剧、农业生产与生态环境建设不协调、农民增产不增收等问题仍较为突出[4]。同时,现代节水灌溉技术和先进生产管理模式难以大面积推广应用,直接影响灌区生态环境和美丽乡村建设战略的实施。

在农业资源环境约束增强和社会对农产品安全要求提高的形势下,须大力推进灌区现代化改造,促进传统农业向现代农业转变,落实“藏粮于地、藏粮于技”的战略方针,科学协调农业发展和生态建设间的关系,合理配置和高效利用农业资源,建设环境优美、人居适宜的生态灌区是当前西北灌溉农业发展的重要任务。为此,本文对现代生态灌区建设理论与技术保障体系进行深入研究,为西北灌区的总体功能提升提供理论指导。

1 灌区建设现状与发展趋势

1.1 我国灌区发展历程与成就

我国灌区发展历程可分为 3 个典型阶段:第 1 阶段是 1949—1979 年,属于灌溉工程大规模建设时期,建设新灌区和改建扩大旧灌区,健全渠系建筑物,灌溉农田面积大幅提升;第 2 阶段是 1980—1990 年,属于农村土地经营及灌区管理体制改革时期,灌区农业生产效率大幅提升;第 3 阶段为 1990 年至今,属于节水灌溉改造时期,升级和完善已建的灌溉工程设施,大力发展了节水灌溉技术[5]。我国灌区经过 70 余年的发展建设,取得了显著成效,农业灌溉面积占世界总灌溉面积的 21%,基本形成了世界上灌溉面积最大的农田灌溉保障体系[6],在我国经济发展和粮食安全方面发挥了不可替代的作用。我国农田灌溉水有效利用系数从 1949 年的 0.3 左右提升到 2019 年的 0.56 左右(西北旱区 0.52 左右)[7],高效节水灌溉面积达到 1.61×10^7 hm^2,在基础设施、农业用水效率、管理体制、基层服务、抗旱减灾及农业综合生产能力等方面都明显提高[8]。目前,全国拥有大型灌区 456 处,中型灌区 7 316 处,小型灌区 2 058 200 处。虽然人均耕地面积只有世界平均水平的 30%,但耕地灌溉率是世界平均水平的 3 倍,人均灌溉面积与世界平均水平相近。

然而,随着国民经济发展,农业水土资源高效利用,生态环境建设,以及农业生产的集约化、机械化、精细化、智能化程度不断提高,对灌区基础设施、功能、效益及管理模式等提出了新的要求,需要进一步改进灌排技术、改善生态环境、增加效率与效益、健全灌区现代管理和服务体系、综合提升灌区生产和服务能力。

1.2 国外先进灌区建设经验

人多地少是我国的基本国情,在人口多和耕地少的双重压力下,灌区的合理规划与建设是保障我国农业生产安全的重要途径。以色列、日本、美国、欧盟等主要国家和地区在灌区建设和发展方面积累了丰富经验。

以色列的自然条件与我国西北旱区有很多相似之处,其领土面积(2.5×10^4 km^2)的 60% 以上为沙漠和山地,耕地面积仅占 23.8%。由于水资源的匮乏,以色列一直致力于农业节水技术的研究,不断提高水资源利用效率。在 20 世纪 80 年代已基本实现现代化灌溉,现如今是灌溉科学最发达的国家之一,60% 以上的农田和 100% 的果园、绿化区及蔬菜种植均采用滴灌技术,灌溉水利用效率达到 95%,有

75% 的灌溉水实现循环利用[9-10]。

日本国土面积约为 3.8×10^5 km^2，其中 2/3 为山地，耕地面积约为 4.7×10^4 km^2，人均耕地面积仅为中国的 1/3。然而，日本自 20 世纪 50 年代从美国引进喷灌技术，并形成了日本特色的喷灌灌溉农业；到 20 世纪 70 年代末基本实现灌区现代化，有 1/3 的农田采用自动化程度较高的管道输水灌溉[11-12]。如今，日本重点提升灌区生态功能，重视农田水利与生态环境间的和谐发展，强调农业基础设施及农村环境的治理，大量的灌溉用水通过河道、池塘等在区域内循环利用，在区域内形成了动态水环境，对涵养地下水、保持生物多样性、建设生态农村发挥了重要作用[13]。

美国的国土面积有 9.83×10^6 km^2，约有一半以上的国土面积为平原地区，为农业机械的规模化生产提供了便利。在 20 世纪中期，美国开始推广大型喷灌技术；20 世纪 70 年代基本实现灌区现代化，此后农田水利建设的重点转向推广精准灌溉和生态环境保护[14-15]。美国西部属于干旱半干旱地区，但却是农业灌溉最集中的地区（80% 的灌溉面积位于西部），也是粮食主产区。占美国耕地 16% 的灌溉农田提供了 48% 的农作物产值。据美国农业部测算，灌溉作物平均产值（2 400 美元/hm^2）是非灌溉作物（500 美元/hm^2）的 4.8 倍。大规模的灌区建设促进了农业规模化和现代化，并推动了贸易和工业发展[16]。

欧盟近年来主要致力于保护农业水资源质量，保障农业安全，并制定《欧盟水框架指令》，旨在构建综合的流域监测与管理系统。荷兰是灌溉农业非常发达的欧盟国家，代表着当今世界现代农业的发展方向，荷兰注重信息化管控、田间监测和大数据分析，在玻璃温室环境控制方面，实现了全部自动化控制，包括光照系统、加温系统、水肥一体灌施系统、二氧化碳补充装置以及机械采摘、监测系统等，智能化的配肥喷灌系统、领先的生物防控技术形成了荷兰高投入、高产出的高效经营模式[17-18]。

1.3　西北灌溉农业生产存在的问题

虽然我国西北地区灌区建设取得了巨大成绩，但灌区运行过程中仍然出现了多项急需解决的问题，相比国际先进灌区的建设水平仍存在诸多不足，主要体现在如下方面：

（1）水资源过度开发利用，农业用水需求有增无减。西北旱区水资源量约为 1 303 亿 m^3（仅占全国 5.7%），单位面积水资源约为 7.4×10^4 m^3/km^2（仅为全国平均水平的 1/5）[19]。农业用水占该区域水资源消耗量 90% 以上，水分生产率为 1.30 kg/m^3[20-21]，与美国和以色列等灌溉发达国家相比（2.0 kg/m^3 以上）仍存在较大差距。此外，乡村振兴战略、美丽乡村建设、扶贫搬迁等社会工程仍需要大量的水土资源增量作为支撑。因此，西北灌区需要进一步优化水土资源配置，大力提升水土资源生产效率。

（2）土壤次生盐碱化严重，盐碱地改良和水盐调控技术有待突破。我国盐碱地主要集中在西北地区（占全国盐碱地面积的 2/3），新疆盐碱化程度最高，盐碱化耕地面积为 1.26×10^6 hm^2，约占耕地面积的 1/3[22-23]。新疆地区高效节水灌溉面积达到 3.34×10^6 hm^2，大规模的节水灌溉彻底改变了农田水盐运移特征，以明排为主的盐碱地改良模式已不可持续[24]。因此，急需发展规模化节水下的灌区水盐协同调控理论与技术，同时创新以“作物生长与盐分和谐共处”为理念的盐碱地改良技术，为灌区作物生长创造适宜的环境。

（3）偏重田间节水灌溉技术，忽视输配水系统节水改造。由于渠道防渗率低，配套设施简陋，水质含沙量大，导致高效节水灌溉系统供水保证率低，使灌溉系统的整体效果和效益欠佳。西北旱区绝大部分高效节水灌溉采用加压灌溉，按 3.34×10^6 hm^2 滴灌面积推算，年耗电约 50 亿 kW·h，排放 CO_2 约 5.10×10^6 t。西北旱区灌溉水源多来自山区河流或水库，这些高位水源理论上不需加压即可自流或自压灌溉，放弃地势落差而重新加压灌溉，浪费了巨大能源。因此，西北灌区的建设需进一步发展高效节能降耗的输配水系统。

（4）农业生产与生态环境建设用水矛盾突出，农业面源污染问题加剧。由于盲目扩大生产规模，灌区农业和生态需水超出水资源承载能力，引发诸多生态环境问题，导致粮食减产和农业生产效率降低[25-26]。如新疆维吾尔自治区 2017 年用水总量为 552 亿 m^3（超红线 26 亿 m^3），同时地下水开采量超红线 35 亿 m^3，用水矛盾突出[27]。此外，为了提高生产能力，农药和化肥过量使用、不合理的地膜覆盖利用及农村废水缺乏有效处理，造成灌区水土环境污染严重。因此，需要明晰灌区水土资源利用理论与方法，协调农业生产与生态环境保护间关系。

（5）节水灌溉面积迅速扩大，但其良性运行却难以为继。新疆维吾尔自治区是全国节水灌区面积最大的省区，占全国微灌面积 75% 以上。由于社会环境和经济能力的差异，南北疆节水灌溉发展水平差异较大，其中南疆地区已建成的高效节水工程运行良好的仅有 50% 左右，造成大量浪费[28]。目前高效节水每亩投资约 700 元（财政补助 400 元，农民

自筹 300 元),而贫困地区财政和农民自筹能力有限,导致高效节水工程建设和运维先天不足。此外,部分工程技术模式、设备选型及设计方案不够合理,影响了工程质量和效益。因此,西北灌区的建设需进一步完善灌区管理体制,保障灌区的良性运行和农业健康发展。

1.4 解决现代生态灌区问题的关键理论与技术

根据对西北灌溉农业所面临问题的分析,西北灌区建设亟待解决的关键理论和技术包括:

(1)水资源匮乏和生态环境脆弱是长期制约西北农业生产的主导因素,不能以牺牲生态环境、浪费资源为代价进行扩大再生产。现代生态灌区的建设需充分考虑农业与草原、森林、荒漠及湿地等多种生态功能的协调关系,发展集"山水林田湖草沙"功能为一体的灌区生态结构优化布局理论。

(2)西北地区特殊的自然环境条件和相对落后的农业生产水平,导致水肥利用效率低、土壤盐碱化、土地质量退化严重,急需发展农业物能转运高效调控理论,创新灌排系统优化设计技术和农田作物生境营造技术,为作物生长创造适宜的生长环境,实现农业资源高效利用。

(3)西北灌区缺乏有效的系统安全评估理论,直接影响灌区物能有效管理与调配,以及灌区的可持续发展,因此急需发展西北内陆河流域水土资源安全、西北灌区生态环境安全、西北灌区农业生产安全和西北地区文化服务安全等方面的评价理论,创新灌区生态功能提升技术,实现灌区健康和可持续发展。

2 现代生态灌区建设目标与系统构成

2.1 西北现代生态灌区的内涵与特征

2.1.1 定义和内涵

现代生态灌区是指按照生态学原理规划建设,具有高标准的农田、完备的灌排系统、科学的水土资源配置、健康的生态环境、智能化的农业生产、精准的关键过程监测、高效的农业资源利用、专业化的服务体系、优美的人居环境,能规模化生产高附加值优质农产品的灌区。现代生态灌区是传统灌区的继承和发展,通过利用先进的科技成果,合理配置水土资源与生态景观结构,提升灌区的综合效能,保障灌区服务功能可持续发挥,实现工程、经济、社会与自然间关系相协调,为现代农业发展提供健康的生态系统、优配的生产资料、先进的生产技术、协调的社会经济环境等保障条件。

2.1.2 西北现代生态灌区的基本特征

为了充分发挥西北地区光热和土地资源丰富的优势,有效解决农业高质量发展所面临的特殊问题,西北现代生态灌区的建设应通过科学合理规划农业生产结构,科学配置水土资源,提高资源生产能力,提升农业生产效率,降低农业生产成本,增加农(牧)民收入,促进农业生产与生态环境持续协同发展。西北现代生态灌区不仅承担生产优质农产品任务,而且担负着营造优良生态环境、传承优秀文化、建设富裕美丽乡村的重任。因此西北现代生态灌区应具有以下特征:优质的土地资源、先进的节水灌溉、高效的控盐排水、协调的生态环境、集约的物能利用、规模的生产经营、智能的过程监控、专业的科技服务、优秀的文化传承、持续的效能发挥。

2.2 西北现代生态灌区建设基本理论与技术框架

2.2.1 基本框架

西北现代生态灌区建设的理论与技术体系构建是以建设功能协同、系统健康和服务持续的现代生态灌区为目标,以灌区的农业生产系统、物能输配系统、生态环境系统为建设对象,拓展西北现代生态灌区农田物能调控、服务功能配置、系统安全评估等方面的三大理论,研发作物生境营造、灌排优化设计、生态功能提升等方面三大技术,构建以"三大目标、三大系统、三大理论和三大技术"为要素的综合现代生态灌区建设理论与技术保障体系(图 1)。

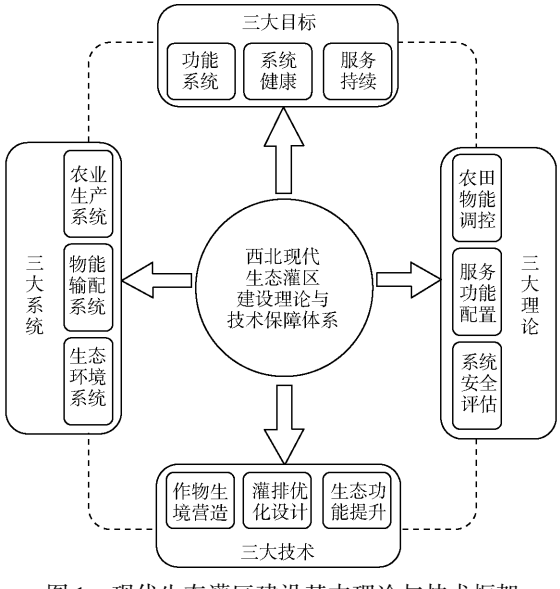

图 1 现代生态灌区建设基本理论与技术框架

Fig. 1 Fundamental theoretical and technological basis for creation of modern ecological irrigation districts

2.2.2 基于农业生产功能及水分来源的灌区类型划分

由于西北地区地域辽阔,降雨与水系分布和自然地理景观地域差异显著,形成了各具特色的农业生产模式、种植结构、人居习性和文化传承,灌区功能与定位及发展潜力也存在显著差异,因此现代生

态灌区应根据区域差异分类建设。由于西北地区降水分布差异大，作物生长所需水分来源主要为降水和灌溉水。为了便于构建适水发展灌区发展模式，依据西北灌区主要农作物和林果需水特征（300 ~ 900 mm），总体平均值约为 500 mm。西北旱区主要作物种植区的有效降雨量为 10 ~ 290 mm[29]。作物生育期内降雨量或灌水量占作物需水量的比率，可视为其对农业生产的贡献度。当降雨贡献度不足时，则必须依靠灌溉来保障作物的生育期需水。因此本文主要根据西北旱区主要作物的需水量和有效降雨量特征，将西北旱区灌区划分为 4 类：

（1）灌溉依赖型灌区：指地区多年生育期降雨小于 50 mm 的灌区，生育期降雨对农业生产贡献度小于 10%，农作物和生态用水主要依赖于人工灌溉实现，没有灌溉就没有农业的灌区（如新疆准噶尔盆地、塔里木盆地）。

（2）灌溉主导型灌区：指地处多年平均生育期降雨在 50 ~ 150 mm 的灌区，生育期降雨对农业生产贡献度在 10% ~30%，农作物用水主要依赖于人工灌溉，而生态林草生长仅需少量灌溉的灌区（如甘肃河西走廊）。

（3）灌溉补充型灌区：指地处多年平均生育期降雨在 150 ~250 mm 的灌区，生育期降雨对农业生产贡献度在 30% ~50%，农作物用水依赖于人工灌溉和天然降雨共同供水，而生态林草生长不需灌溉可维持正常生长的灌区（如宁蒙河套灌区）。

（4）灌溉提质型灌区：指地处多年平均生育期降雨大于 250 mm 的灌区，生育期降雨对农业生产贡献度大于 50%，降雨可以满足作物生命需水，但无法满足目标产量所需水分，而生态林草生长不需灌溉可发挥有效功能的灌区（如黄土高原西北部地区）。

3　西北现代生态灌区建设核心理论

为了建设功能协调、环境优美的西北现代生态灌区，需要灌区服务功能优化配置、农田物能调控、生态系统安全评估方面的理论支撑。

3.1　西北现代生态灌区服务功能优化配置理论

灌区服务功能优化配置理论的核心是协调农业生产和生态环境建设间关系，需要明确灌区生态结构和功能定位，并提出水土资源优化配置的科学方法。

3.1.1　灌区生态结构和功能定位

3.1.1.1　景观生态系统

根据国家水土资源、生态环境和粮食安全等战略需要，结合灌区中长期发展规划、自然环境条件、资源优势、美丽乡村建设规划和灌区类型，借助广义景观生态学和社会经济学原理，明确灌区农业生产、工业发展、人口增长趋势，以及灌区风灾、冻灾、土地退化、环境污染、生物多样性降低等生态风险类型和等级。以整体论和系统论为指导，解析山（防风、涵养水源）、水（蓄、输、配水）、林（防风固土、涵养水源）、田（农业生产）、湖（水生产品生产、水生态景观）、草（牧业生产、环境保护）、沙（沙漠植物、沙漠经济）等生态单元的效能[30]，以及景观要素和组分间互作关系，确立灌区尺度“山水林田湖草沙”生态系统结构和功能定位（图 2）。如新疆、河西走廊及柴达木盆地平原区，以天然草甸与林灌植被、人工耕地和水域等构成的绿洲景观占 6.86% ~25.3%，以戈壁、荒漠、裸土、砾石和沙漠化土地构成的荒漠景观占 33.1% ~72.2%，构成了以荒漠为景观基质、绿洲为景观镶嵌的荒漠–绿洲–河渠廊道景观模式。

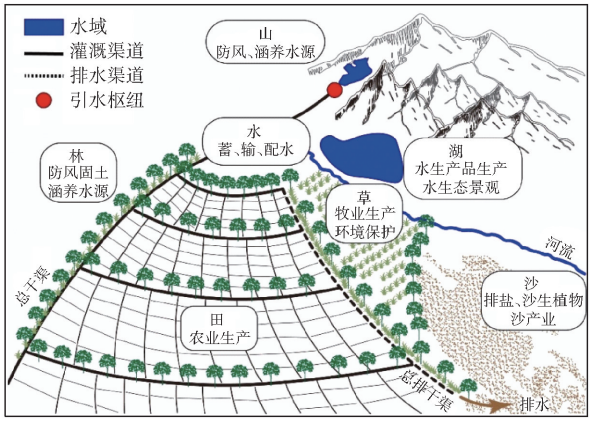

图 2　灌区景观生态结构和功能定位

Fig. 2　Structure and function of ecological landscape in irrigation districts

3.1.1.2　农业生态系统

农业生态系统不仅提供了生物和非生物之间物质、能量、信息和价值转化的载体，也为人类生活提供了承载空间，满足人类生活的多种需求。生态空间、生产空间和生活空间构成了农业生态系统“三位一体”的结构定位，生态功能、生产功能和生活功能的正常发挥是维系农业生态系统持续运转的基础（图 3）。生产功能是以土地资源为载体产出各种产品和服务的功能，包括食物供给、原材料供给、生物质能源供给等，生产功能的集约高效是农业发展的根本动力；生活功能是为人类生产和发展提供的各种空间（如存储空间、居住空间、移动空间等）和保障功能（科研、教育、休闲等），生活功能的宜居适度是推动城乡、区域、民族关系融合发展的纽带；生态功能是维持人类生存的自然条件，包括气候调节、涵养水源、水分和养分循环等，为生产和生活提供生态

基础,是社会生产活动顺利开展的先决条件,并规定了生产空间、生活空间的发展方向。

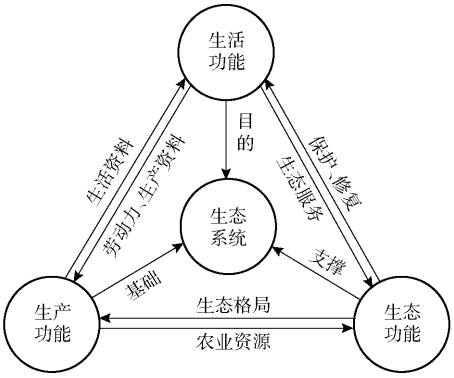

图 3 农业生态系统结构与功能定位

Fig. 3 Structure and function of agroecosystems

3.1.2 现代生态灌区水土资源优化配置

3.1.2.1 土地资源优化配置

按照灌区景观生态格局和生态服务功能定位,科学规划耕地、林地、草地、建设用地等土地资源,强化各功能区之间的协调性和互补性,使各土地资源类型的综合生态效益最大。按照 2% ~10% 农田防护林用地规模,科学布局和建设防护林体系,构建适用于西北旱区的农田防护林的林带规模和造林密度,有效提高控制风灾和净化空气的效能;在河、湖、大型渠道岸边设置 100 ~500 m 宽的环境保护区(如植被过滤带),用于控制进入水体的污染物。对于受盐碱威胁的灌区,在系统分析灌区盐碱运移转化宏观特征基础上,基于灌区入流或引水带入的总盐量与灌区排水排出的总盐量差值,建立不同灌区类型的农业生态系统盐分运移与转化定量分析方法,明确灌区盐碱合理处置空间,保障土地资源可持续利用。系统研究不同类型灌区土地质量下降的主导因子与改良途径,建立基于土壤质地、化学组成、孔隙结构、微生物群落、土壤供养能力为一体的土地质量评价方法。以规模化生产、机械化作业、集约化经营为导向,发展适宜的灌区高标准农田建设方法,建立土地资源养用结合机制,提升土地资源生产和生态效能。

3.1.2.2 水资源优化配置

水资源是西北旱区农业发展和生态建设的主控因子,灌溉农业发展、生态环境建设均以水资源承载能力为前提,以高效输配、节能降耗、节水增效和适度规模为基本原则,合理配置水资源,科学协调农业生产与生态环境建设间关系,是灌区生态环境保护和农业高质量发展的基础保障。在明确不同气候条件下降水、冰雪融化及其河流来水特征基础上,综合分析流域骨干工程调蓄能力、灌排系统保障能力、节水模式的成本与效益、水土资源承载能力,科学确定水资源系统、经济社会系统及环境系统用水适宜度。在灌溉依赖型灌区、灌溉主导型灌区,构建河道内与河道外引水“三七调控”、经济与生态耗水“五五分账”的临界阈值调控模式[31],促进生态环境与经济社会协调发展。在灌溉补充型和灌溉提质型灌区,充分发挥降水对生态生命需水的补充功能,提升农业用水比例。在工程、技术和管理 3 方面加强节水,助力水资源有效保护与高效利用。在淡水资源短缺地区,发展微咸水安全利用、苦咸水和污废水处理与回用方法,建立适应不同类型灌区的农业生产-生态环境建设-水质与水量优化配置-水盐污调控综合管理方法;建立集灌区生态功能为一体的水资源优化配置模型,形成西北现代生态灌区水-土-生-环综合管理理论。

3.2 西北现代生态灌区农田物能调控理论

西北现代生态灌区农田物能调控主要包括节水节能型灌排系统优化设计理论和农田作物生境精细调控理论两部分。为提升灌区水资源输配效率,构建水盐平衡的灌排模式,形成农田多要素作物生境调控方法提供理论支撑。

3.2.1 西北现代生态灌区节水节能型灌排系统优化设计理论

以最大限度实现灌区水源的水量、水质和水能功能为出发点,以提升水资源利用效率和灌溉水实时供给与调配能力为目标,借助农田水利学、流体力学、水环境化学、农业生态学、运筹学等相关理论,系统分析西北灌区自然条件、农业种植结构、水源状况,形成高效输配、节能降耗、节水增效、水盐相容、生态安全、绿色发展的西北旱区农业高效节能型灌排系统优化理论(图 4)。

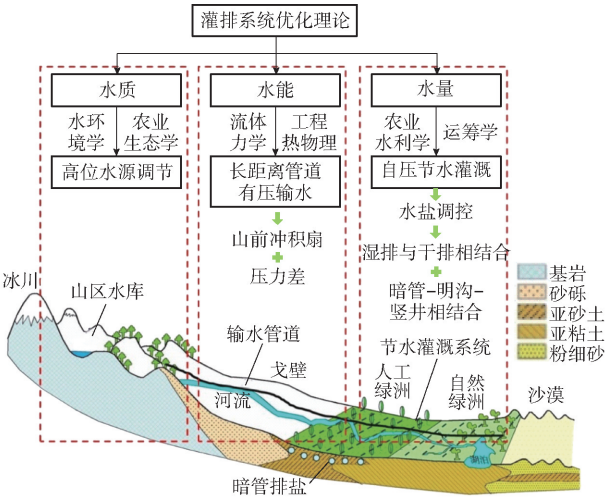

图 4 灌排系统优化理论

Fig. 4 Theory of irrigation and drainage system optimization

(1)山区水库-管道输水-自压滴灌模式

平原水库渗漏蒸发损失严重,水库利用效率不

足 50%，同时造成周边地下水位抬升，易导致土地次生盐碱化。应采用山区水库逐步代替平原水库，打破现有灌溉系统格局，应对错乱低效的灌溉输水系统实施彻底改造。由于片面强调农业节水，忽略了输配水系统改造和土壤盐碱化防治，导致运行成本加大、土壤盐分积累加重，进而影响了高效节水技术功效的发挥。山区性河流水库具有高水位、自压灌溉的天然优势，放弃天然水头而重新加压灌溉，耗能巨大。以新疆为代表的西北旱区具有发展自压灌溉得天独厚的优势，建设山区水库-管道输水-自压滴灌的现代灌溉系统，既可大幅提升水资源输配效率，又可降低工程运行成本。

(2)灌排分区调控模式

西北内陆河流进入平原区，通常形成 4 个显著的水文地质单元，即冲洪积扇、扇缘溢出带、绿洲平原、荒漠平原。针对 4 个单元的水文地质特点，建立水量调蓄区、调蓄开采区、调控开采区、禁止开采区。并基于水盐平衡调控，建立分区灌排模式，即：垂直入渗排水、井灌井排、井灌井排与水平排水结合、水平排水与干排盐结合、明排与暗排结合。地下水的排泄方式和水位调控是土壤水盐调控的关键，须分区建立地下水开发和水盐平衡灌排模式，合理调控管理地下水位，延缓土壤积盐过程。

3.2.2　农田作物生境精细调控理论

水土资源高效而可持续利用已经提升水肥生产效率、作物产量、果实品质，是农田作物生境调控的目标，需结合现代栽培学、作物生理学和农田水肥高效利用相关理论，从调控土壤供养能力、根系吸收能力、茎秆传导能力和作物生产能力 4 方面创新作物生境调控理论与技术。明晰水、肥、气、热、光、盐、(微)生物、农药、电子等在保障作物健康生长中贡献度和胁迫效应，阐明各生境要素之间的相互作用机制，构建水、肥、气、热、盐、农药迁移转化数学模型，以及考虑生境要素作用的作物生长和产量品质评估模型。确定基于生态环境安全的肥料、农药、地面覆盖物、化学改良剂合理使用量阈值，提出土壤根际微生物与作物品种的互生关系和农药、杀虫剂、除草剂、保水保肥剂的科学施用方法，明确作物根区微环境变化特征与作物生理生长间的定量关系。挖掘灌溉水生理和生产功能，开发基于土壤生产力、水肥利用效率及盐碱地改良效果提升的(微)生物方法，并与水利改良、化学改良、生物改良和农艺措施有机融合，明确作物根区关键生境要素与外控因子耦合作用效能，确定农田地力提升和作物增产增效的主要指标体系，形成适应不同气候条件、土壤特性、地下水状况、作物类型、种植结构和生态环境建设的灌溉农田作物生境要素耦合精细调控理论。

3.3　灌区生态系统安全评估理论

现代生态灌区建设是一个综合社会、经济、生态环境等多领域的复杂工程，进行现代生态灌区的综合评价，对灌区建设进行科学指导和评估，对协调灌区农业、经济、生态环境之间相互关系具有重要意义。

3.3.1　灌区生态系统安全评价内容

灌区作为一个生态系统，其服务功能表征了系统安全性，同时生态系统服务能力和保障水平决定着灌区生态系统安全水平。灌区生态系统服务功能主要包括农产品生产功能、防灾控污功能、人居与文化传承功能等。农产品生产功能主要指通过绿色植物为人类提供的粮食、蔬菜、水果、牧草等产品，这也是灌区主要功能；防灾控污能力是调节气候，减轻洪涝、旱灾、风害、控制农业面源污染，降低温室气体(如生物固氮)，增加碳汇等功能；人居与文化传承功能是指为居民提供舒适生活环境，以及开展科学活动、农事体验、传统教育、观光娱乐等方面的自然景观和场所。灌区生态系统服务功能比重和关注点与灌区所处地区自然条件、生活水平和社会经济发展程度有关。

3.3.2　灌区系统安全评价方法

灌区生态系统安全评价主要是对其结构合理性、完整性、服务功能实现程度等进行定量评价。根据灌区生态系统的特征及其服务功能，可选取社会经济、景观格局、水土资源利用、湿地环境、大气环境、生物活力、作物生长及产量品质等建立定量评价指标体系，进行评价与管控，实现灌区内资源-环境-经济-社会协调发展。通过系统分析灌区生态系统水、盐、碳、氮、生间动力联系，并阐明其足迹变化特征，确立灌区水土资源的承载力。建立灌区“压力-状态-响应-效能”评价模型，发展灌区“山水林田湖草沙”为一体生态系统安全的综合评价方法，以及综合考虑水文动力过程和生态动力过程的生态水文模型。提出灌区生态安全的预警指标体系和生态安全管理方法，构建适合西北不同类型灌区生态系统安全评估理论。

4　西北生态灌区建设关键技术

针对西北生产与运行管理中存在的主要问题，现代生态灌区建设急需突破的关键技术可概括为：灌区生态系统控污能力与景观价值提升技术、现代生态灌排系统管控关键技术、作物生境要素调控技术。

4.1　灌区生态系统控污能力与景观价值提升技术

4.1.1　灌区生态系统控污能力提升技术

农村生活污水、农田化肥农药、养殖业废料等在

地表径流和排水系统作用下进入水体和土壤中,将引发农业面源污染。农业面源污染防治是实现灌区健康发展的重要任务,需要从控源、治污和再利用入手,实现控污与资源化双重效能,总体防控技术体系如图 5 所示。

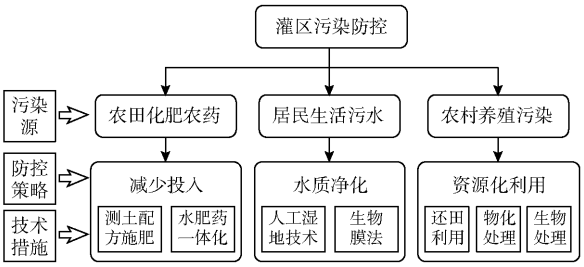

图 5 灌区污染防控技术体系

Fig. 5 Pollution prevention and control technology system for irrigation districts

4.1.1.1 农田面源污染控制技术

对水蚀、风蚀携带的农田污染物所引发的面源污染,需从两方面采取措施进行控制:控制污染物传输的动力和控制污染源。在灌溉依赖型和灌溉主导型灌区,侵蚀常以风蚀形式发生。在风蚀动力控制方面,可以通过构建科学的农田防风林带系统和优化作物种植结构来降低风蚀危害。在灌溉补充型和灌溉提质型灌区,农田面源污染常以水蚀为主。在水蚀动力控制方面,可采取平整土地、提高农田蓄水能力、增加田面糙率等方式降低径流携带能力。在控制污染源方面,一方面通过确定合理施肥数量、深度及方式,采取控制性施肥和施药,降低土壤养分和农药向地表传递的可能性。另一方面,通过采取地面覆盖、提高土壤抗蚀能力和固定养分能力等措施,发展免耕种植等保护性耕作措施,控制土壤污染物向地表传输数量和速率。

4.1.1.2 农村生活污水处理与再利用技术

农村生活污水的大量排放是灌区水环境污染的重要来源,需要因地制宜地发展适合农村污水处理的技术。可根据灌区自然条件,研发太阳能和风能驱动的生物膜技术,以及人工湿地技术。由于微生物对污水的水质和水量变化有较强的适应性,生物膜内可形成较长的生物链,从而构成稳定的污水处理系统,并通过太阳能和风能驱动,集污水预处理、生物处理、沉淀、消毒等为一体,实现光、风资源利用和污水处理有机结合。充分利用灌区水池、水塘、滩地等洼陷结构,构建适合当地地形条件的表面流、潜流和垂直流人工湿地,实现人工湿地污水处理、污水再利用、改善景观的功能。

4.1.1.3 农村养殖污水处理技术

随着社会对肉食品需求量增加,农村畜禽养殖业快速发展对水环境保护带来巨大冲击,需要研发适宜不同类型灌区的农村畜禽养殖业污水处理技术。由于农村畜禽养殖业污水具有作物生长需要的养分元素,同时也包含潜在能源。因此可以还田利用,或通过相关物理、化学及生物技术进行有效处理后再利用。畜禽养殖废水的资源化利用,主要包括沼气、沼液、沼渣的综合利用,处理水种植业回用和生物协同方式的资源化利用。根据当地实际情况,发展种养结合、处理回用和多级循环经济模式,充分发挥农村养殖污水所具有的生产和生态功能,实现“养、治、用”相结合。

4.1.2 灌区生态景观价值提升技术

灌区生态景观主要包括灌排渠系、农田、林草地、交通道路和居民点 5 方面的景观单元,通过提升生态景观价值,以增强灌区生态服务功能。西北旱区的景观设计需要充分考虑西北地区特殊的气候环境、产业发展、地形地貌、历史人文等方面的特色,对西北旱区农业资源、景观资源、人文资源等进行合理配置,提升灌区的综合效益。

4.1.2.1 灌排渠系

灌排渠系是灌区农业灌溉系统的重要组成部分,在保证灌排系统完整性和输配水功能的基础上,将渠系与灌区内其它水系连接成水生态网络,共同维系灌区水体的良性循环,提升输水、配水、蓄水和净水能力。在营造渠系水体景观时,需针对西北地区易发生的季节性渠道冻胀问题,从材料耐久性、地形条件、管理养护方面考虑,研发抗冻、防渗、易检测的渠道衬砌材料。通过河流内的水生植物与渠系边缘空间的植被造景来保证灌区生态廊道的连续性,使渠道与河道水体景观相协调。渠道两岸设置缓冲带,改善水质保护河水生态安全,为生物提供适宜栖息空间,增加空间异质性。

4.1.2.2 灌区农田

根据景观生态学原理,配置适宜西北旱区生长的植物组合,提高生态系统的稳定性。在农作物选择上,应根据当地自然条件与农作物习性种植相应物种,采用单种、复种、间种、套种等合理的农作制度,创造生态安全的农耕环境,提供优质高产、无污染的农产品;景观造景方面,以农业美学理论为指导,运用“点线面”结构中的比例、均衡、协调性特征,根据农作物的生长规律和季节性变化,合理规划农业景观元素。

4.1.2.3 林草地

林草地既可涵养水源又美化环境。因地制宜的规划灌区林地景观,并采取防护林模式、混合林带模式,或农、草、林立体模式等,建设灌区林带系统和景

观生态廊道，以道路林带、水系林带、农田林网为网格，将农田板块、林带廊道、水体系统融合起来，打通灌区各个物质要素之间的交换、流通渠道，构建生态安全、景观优质的灌区农林草体系。特别根据西北地区林果优势，选择本土易养护的林果品种和易机械化作业的林果立体栽培模式，以及集经济价值和景观效果兼具的物种，配置形成经济型风景林带。

4.1.2.4　交通道路

道路作为灌区典型的人工廊道，也是区域物质、能量、信息流动交换的生态廊道。合理规划灌区内连接外部公路的路线，方便交通的同时加快区域经济发展。机耕路与田间路属于灌区必需的生产路，关系到灌区农业经济发展的命脉。在道路建设中注重农田生态的稳定性，采用本土物料铺设，保护原始的土壤结构，在路缘景观带的植物种植上，要保证农作物有良好的光照条件及充足的土壤养分。景观道路布局需增强视觉观赏与空间体验，遵循自然生态原则，将灌区农田景观、水利景观、聚落景观有机融合，实现灌区景观空间的整体连续性。

4.1.2.5　居民点

农村居民点景观结构和格局是长期的农业生产活动对自然景观不断改造和影响的结果，尤其是道路、房屋等人工构筑建设，使区域中的非自然廊道和斑块增加，不同程度影响区域生态服务功能，需要补充林草地、水体、湿地等景观，保持整体结构的稳定和平衡。此外，要合理布局人工景观和工业景观，村镇居住区与工矿业之间要留有一定的植被缓冲区，工业景观内部要进行绿地系统建设。人口聚居区要配套建设给排水系统和垃圾污水收集处置设施，提高村落生态系统的物质循环和污染调控能力。

4.2　现代生态灌排系统管控关键技术

4.2.1　现代化生态灌区渠系优化配水技术

渠系配水是根据农业气象条件和灌溉可利用水量变化合理确定灌区各级渠道引水量大小、持续时间和引水频次，输配水直接关系到灌溉服务质量。我国大型灌区骨干渠系水利用系数 2015 年才达到 0.597，大量的水资源在渠系输配水过程中因渗漏大量损失。因此，通过渠系优化配水减少渠系渗漏损失，对现代生态灌区的水资源管理意义重大。渠系优化配水是根据渠道控制区域内的种植结构、作物需水量和土壤质地的时空差异性，来合理调配各级渠道适宜引水量以实现渗漏损失最小。渠系优化配水过程可概括为：①上级渠道的管理者发布整个灌溉区域的用水计划。②灌溉子区用户以上级计划为基础，制定各子区用水计划。③最后再由上级管理者统一协调，确定满足各区域需水要求的多目标计划。优化配水过程可概化为一个多级多水源的多目标决策问题。多级指灌溉渠系是从水源取水、输送、分配到田间的各级渠道网络，如总干渠、干渠、分干渠、支渠等骨干渠道和斗渠、农渠、毛渠等田间渠道，多水源包括河流、水库等多种水源，目标包括渗漏损失最小、产量最大等。

4.2.2　现代生态灌区智能灌溉技术

智能灌溉是对土壤墒情、作物生长、气候条件等相关数据进行实时感知，作出灌溉决策，并进行针对性灌溉，达到充分利用灌溉水资源的目的。

4.2.2.1　农田墒情感知

农田墒情信息是制定作物生长季灌溉计划和开展防旱抗旱的重要基础信息，墒情感知结果可为实现适时、适量的精准灌溉提供决策依据。随着计算机和互联网技术的蓬勃发展，云计算面向服务的新型计算模式为解决农田土壤墒情监测面临的问题提供了新途径。构建农田土壤墒情监测云服务平台，把土壤墒情监测的采集、处理、分析等功能和数据集成到云服务平台上，使农业从业者通过网络云平台便捷的访问、调用、获取所需要的信息和服务，从而降低土壤墒情监测的建设和维护成本，提高土壤墒情应用系统的服务效率。

4.2.2.2　灌溉决策

基于感知信息与灌溉模型进行灌溉决策，制定智能化的作物智能灌溉指导方案。农田灌溉决策主要建立在土壤水分运移规律的研究理论基础上，包括土壤墒情预测、作物需水预测、灌水量预测等。决策指标一般都基于土壤-植物-大气连续体，大致分为 3 种：根据农田土壤水分状况确定灌溉时间和水量，包括作物适宜水分上下限、土壤条件、土壤水量平衡等；根据作物对水分亏缺的生理反应信息确定是否需要灌溉，包括作物冠层温度、茎/叶水势、茎流等；根据作物生长的小环境气象因素确定灌溉的时间和作物的需水量，即通过作物的蒸腾蒸发量来进行灌溉决策。

4.2.3　智能控制技术

灌溉智能控制是基于运筹学、人工智能、控制理论等基本理论，结合模糊控制、专家系统、神经网络等方法，根据不同作物生长期需水情况，自动形成最优灌溉控制方案。模糊控制理论具有较强的知识表达能力和推理能力，可解决灌溉过程中复杂的非线性问题，但实际应用中依赖于农业种植经验的输入，需进一步结合智能算法对模糊规则进行动态寻优。神经网络技术可以很好的与模糊控制理论结合，促进灌溉系统中模糊规则的形成、隶属函数的选型和调整等工作，解决复杂农田环境下多目标控制问题。

专家系统是农业技术与信息技术的深度融合,在综合分析农业领域相关知识、经验、数据和模型的基础上,得到灌溉最优解决方案。因此,灌溉智能控制技术应是多种智能控制方法的融合,通过定性和定量相结合的方法,针对被控制对象和灌溉任务的复杂性、不确定性、多变性,实现复杂信息的处理、优化和判断,最终达到智能精准灌溉的目的[24,32]。

4.3 作物生境要素调控技术

提高西北旱区农业灌溉水利用效率及生产效率是缓减旱区水资源供需矛盾和实现生态安全的重要途径,而西北旱区田间作物生长过程和灌区盐分迁移与累积过程是直接影响农业水资源综合效益的两个关键过程。因此,改善田间作物生境和实现灌区土壤盐分相对均衡是实现西北旱区农业水土资源可持续利用的重要任务。结合现代栽培学、作物生理学和农田水肥高效利用相关理论,将农田作物生境分为 3 个分环境,即农田小气候环境、土壤环境和地下水环境,3 个分环境间物能传输与转化涉及气-冠界面、土-气界面、土-根界面、包气带与饱和带界面。调控作物生长过程的技术发展主要围绕提高水、肥、气、热、盐、生、光、药、电的功能和控制盐分对作物生长威胁这一主题(图 6)。

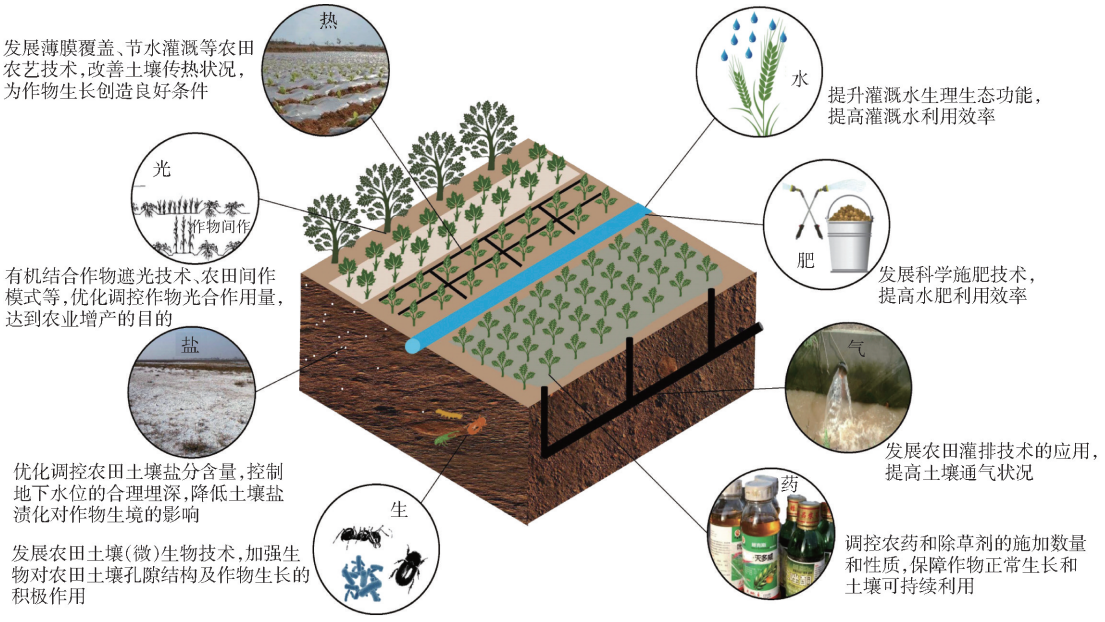

图 6 作物生境要素与综合调控原理图

Fig. 6 Crop growth elements and comprehensive regulation

4.3.1 农田小气候环境调控技术

农田光能分布、空气温湿度、风速、二氧化碳浓度和土壤温湿度特征构成了农田小气候的环境要素。农田小气候既具有固有的自然特征,又是一种人工小气候,可通过现代农业技术措施在一定程度上调控农田小气候,改变作物冠层温度和光照利用程度,提高作物光合效率和控制水分无效蒸发。主要技术包括:①冠层遮光技术,如棉花在正常光照的 1/5 ~ 1/2 时生长最好,弱光条件下棉花的蕾铃脱落、光合产物代谢都有所改善[33]。②作物间套作技术,可提高光能利用效率,增加作物的养分吸收能力,如豆科/禾本科间作体系中豆科作物生物固氮和禾本科作物对土壤氮素利用上的互补和促进作用,又如双子叶和单子叶作物的搭配中单子叶作物可为双子叶作物提供 Fe、Zn 等微量元素[34]。③生长调节剂,如红枣果实表皮直接吸收的水分是引起裂果的主要原因,可通过喷洒人工合成生长素改变果实表面的气孔开度、气孔密度等特征,提高果实品质[35]。

4.3.2 土壤环境调控技术

土壤温度、湿度、微生物、养分、盐分含量都对作物的生长有着显著影响,提高土壤供养能力和作物吸养能力是土壤环境调节的目标。其关键技术有:①活化水灌溉技术,即通过磁化、去电子和增氧技术,改变水分子缔合结构,降低水表面张力和接触角,提高水溶解氧数量,增强水分生理生产功能,提高水肥利用效率,活化水灌溉增产效果达 5% ~ 15%,同时磁化水和去电子水可有效降低根区土壤盐分含量和盐分对作物的威胁[36]。②生物膜覆盖技术,既可降解作为作物养分,又可改善土壤水、盐、热、养分分布,提升作物根系吸水吸肥能力[37]。③排水控盐技术,水是盐渍化形成的动力,要将土壤中盐分"洗出"并保持脱盐状态,灌排比例应达到 4∶1,"洗盐用水"是干旱区农业用水的重要组成部分[38]。

4.3.3 地下水环境调控技术

田间作物生长过程和灌区盐分迁移与累积过程是直接影响农业水资源综合效益的两个关键过程。

综合考虑灌区盐分迁移与累积特征，确定植被健康生长的合理生态地下水埋深、盐渍临界地下水埋深、生态警戒地下水埋深及最佳地下水埋深等阈值[39-40]。根据生态与经济效益最优准则，确定区域内高效节水灌溉规模，发展生态安全的地下水开发利用技术。将节水灌溉、冬春灌技术与工程措施（明排、暗排、竖排等）及非工程措施（生物排水）相结合，将盐分排放区域与排水再利用有机融合，构建多种措施结合的灌区垂直和横向排水系统，有效控制灌区农田土壤盐分累积，实现土地可持续利用[41-42]。同时，将灌区农业生产区与盐分排放区相对分离，实施控制性排水和排污权管理，实现定点排放或达标排放，维持和控制农业生产区盐分相对平衡，并利用农田排水改善旱区生态环境（图 7）。

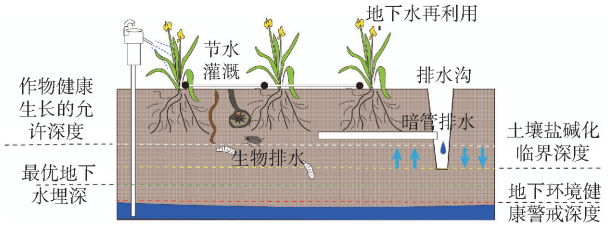

图 7　地下水环境调控技术

Fig. 7　Groundwater environmental control technology

5　展望

现代生态灌区是对传统灌区工程设施、管理水平和建设理念的升级改造，通过提高灌区水土资源优化配置、提高灌溉水利用效率、改良盐碱土、改善生态环境、提升灌区生态服务功能，为西北地区农业高质量发展提供硬件基础。本文主要从西北灌区生态服务功能提升、灌排系统优化和灌区作物生境营造 3 方面阐明了西北现代生态灌区建设的关键理论与技术。在西北灌区生态服务功能提升方面，需明确灌区生态系统的生态结构和功能定位，统筹规划西北灌区“山水林田湖草沙”系统，提出西北灌区水土资源优化配置方法，构建灌区控污与景观价值提升综合技术模式，建立灌区生态系统安全评估指标体系与评价方法。在灌排系统优化方面，需构建山区水库-管道输水-自压滴灌的节能高效模式，建立地下水开发和水盐平衡相协调的灌排调分区控模式，创新渠系优化配水与智能灌溉技术。在灌区作物生境营造方面，需明确作物生境要素的功能与互作机制，发展基于农田小气候、土壤环境和地下水环境精准调控的作物生境营造技术。

参　考　文　献

[1] 王沛芳，钱进，侯俊，等. 生态节水型灌区建设理论技术及应用[M]. 北京：科学出版社，2020.

[2] 李仰斌. 大中型灌区现代化改造技术路线与关键技术[J]. 中国水利，2021(17)：12-14.
LI Yangbin. Technical route and key technologies of rehabilitation for modernization of large and medium irrigation districts [J]. China Water Resources，2021(17)：12-14. (in Chinese)

[3] 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 Regiontask 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. (in Chinese)

[4] 吕军，孙嗣肠，陈丁江. 气候变化对我国农业旱涝灾害的影响[J]. 农业环境科学学报，2011，30(9)：1713-1719.
LÜ Jun，SUN Siyang，CHEN Dingjiang. Impacts of climate change on agricultural flood and draught damages in China[J]. Journal of Agro-Enviroment Science，2011，30(9)：1713-1719. (in Chinese)

[5] 高占义. 我国灌区建设及管理技术发展成就与展望[J]. 水力学报，2019，50(1)：88-96.
GAO Zhanyi. Technical achievement of prospection in irrigation scheme development and management in China[J]. Journal of Hydraulic Enginerring，2019，50(1)：88-96. (in Chinese)

[6] 王修贵，张绍强，刘丽艳，等. 现代灌区的特征与建设重点[J]. 中国农村水利水电，2016(8)：6-9.
WANG Xiugui，ZHANG Shaoqiang，LIU Liyan，et al. Characteristics and key points of mordern irrigation district construnction [J]. China Rural Water and Hydropower，2016(8)：6-9. (in Chinese)

[7] 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.

[8] 罗琳. 适应现代农业发展的现代化灌区发展对策研究[J]. 中国农村水利水电，2016(8)：10-12.
LUO Lin. The development countermeasure research of modernization irrigation distric that adapt to the development of mordern agriculture[J]. China Rural Water and Hydropower，2016(8)：10-12. (in Chinese)

[9] 易小燕，吴勇，尹昌斌，等. 以色列水土资源高效利用经验对我国农业绿色发展的启示[J]. 中国农业资源与区划，2018，39(10)：37-42.
YI Xiaoyan，WU Yong，YIN Changbin，et al. The enlightenment of Isreal's efficient utilization of land and water resources to the green development of agriculture in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning，2018，39(10)：37-42. (in Chinese)

[10] GIRMA M, JEMAL A. Irrigation system in Israel: a review[J]. International Journal of Water Resources and Environmental Engineering, 2015, 7(3): 29 - 37.
[11] 袁前胜. 美国和日本两国水利工程建设投入政策及其借鉴[J]. 世界农业, 2016(441): 97 - 101.
[12] ZHENMIAN Q, BIXIA C, NAGATA A. Review of sustainable agriculture: promotion, its challenges and opportunities in Japan[J]. Journal of Resources and Ecology, 2013, 4(3): 231 - 241.
[13] REYES S R C, MIYAZAKI A, YIU E, et al. Enhancing sustainability in traditional agriculture: indicators for monitoring the conservation of globally important agricultural heritage systems (GIAHS) in Japan[J]. Sustainability (Switzerland), 2020, 12(14):5656.
[14] MARDANDOOST B, BROOKFIELD A E, FEDDEMA J, et al. Estimating irrigation demand with geospatial and in-situ data: application to the high plains aquifer, Kansas, USA[J]. Agricultural Water Management, 2019, 223: 105675.
[15] CIVIDANES F J. Carabid beetles (Coleoptera: Carabidae) and biological control of agricultural pests in Latin America[J]. Annals of the Entomological Society of America, 2021, 114(2): 175 - 191.
[16] STANTON R L, MORRISSEY C A, CLARK R G. Analysis of trends and agricultural drivers of farmland bird declines in North America: a review[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2018, 254(3 - 4): 244 - 254.
[17] 赖红兵, 鲁杏. 国外农业现代化和农村水利建设经验对我国的启示[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 266 - 273.
LAI Hongbing, LU Xing. The enlightenment of foreign agricultural modernization and rural water conservancy construction experience in foreign countries to China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(11): 266 - 273. (in Chinese)
[18] WEI W. Urban agriculture development experiences in the world and its enlightenments to China[J/OL]. DEStech Transactions on Social Science, Education and Human Science. DOI: 10.12783/dtssehs/icesd2019/29878.
[19] 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 Qiang, MENG Erhao. 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. (in Chinese)
[20] 操信春, 杨陈玉, 何鑫,等. 中国灌溉水资源利用效率的空间差异分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(8): 128 - 132.
CAO Xinchun, YANG Chenyu, HE Xin, et al. Assessing the spatial variation of irrigation water use efficiency in grain production of China[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(8): 128 - 132. (in Chinese)
[21] 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]. 干旱区农业研究, 2018, 36(2): 205 - 209.
DONG Yan, ZHANG Hui, ZHANG Huihui, 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. (in Chinese)
[22] 王旭, 田长彦, 赵振勇,等. 滴灌条件下盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)种植年限对盐碱地土壤盐分离子分布的影响[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 211 - 217.
WANG Xu, TIAN Changyan, ZHAO Zhenyong, et al. Effects of different planting years of *Suaeda salsa* on the soil ions distribution in saline-sodic soil under drip irrigation[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 211 - 217. (in Chinese)
[23] 杨真, 王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学, 2015, 47(4): 125 - 130.
YANG Zhen, WANG Baoshan. Present status of saline soil resources and countermeansures for improvement and utilization in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(4): 125 - 130. (in Chinese)
[24] 李德旺, 许春雨, 宋建成. 现代农业智能灌溉技术的研究现状与展望[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(17): 27 - 31.
LI Dewang, XU Chunyu, SONG Jiancheng. Research status and prospect of modern agricultural intelligent irrigation technology[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(17): 27 - 31. (in Chinese)
[25] 柴立, 张晴, 解建仓,等. 基于主题分类和组件技术的灌区生态环境动态评价[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 174 - 181.
CHAI Li, ZHANG Qing, XIE Jiancang, et al. Dynamic evaluation mode for ecological enviroment in irrigation based on theme classify and component technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 174 - 181. (in Chinese)
[26] 杨龙, 高占义. 灌区建设对生态环境的影响[J]. 水利发展研究, 2005, 5(9): 18 - 23.
YANG Long, GAO Zhanyi. Influence of irrigation district construction on ecological environment[J]. Water Resources Development Research, 2005, 5(9):18 - 23. (in Chinese)
[27] 朱瑶, 陈凯牒, 胡亚琼. 大型灌区目前存在的环境问题及解决措施初探[J]. 节水灌溉, 2003(3): 19 - 21.
ZHU Yao, CHEN Kaidie, HU Yaqiong. Preliminary research on existing environmental problems and solution in large-scale irrigate district[J]. Water Saving Irrigation, 2003(3): 19 - 21. (in Chinese)
[28] 新疆维吾尔自治区统计局. 新疆统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
[29] 王小静. 西北旱区作物需水量对气候变化的响应[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
WANG Xiaojing. The response of cropwater requirement to climate change in the arid-region of northwest China[D]. Yangling:Northwest A&F University, 2014. (in Chinese)
[30] 于强, 张启斌, 杨林哲,等. 绿色生态空间网络研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 1 - 15.
YU Qiang, ZHANG Qibin, YANG Linzhe, et al. Research progress and prospect of green ecological space network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 1 - 15. (in Chinese)
[31] 邓铭江. 三层级多目标水循环调控理论与工程技术体系[J]. 干旱区地理, 2019, 42(5): 961 - 975.

DENG Mingjiang. System of three-scale multi-object water cycle regulation theory and enginerring technology[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(5): 961 – 975. (in Chinese)

[32] 岳学军, 刘永鑫, 洪添胜,等. 基于土壤墒情的自动灌溉控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 241 – 246.
YUE Xuejun, LIU Yongxin, HONG Tiansheng, et al. Desing and experiment of automatic irrigation control system based on soil moisture meter[J]. Transactinos of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 241 – 246. (in Chinese)

[33] 万燕, 吴九林, 周宇. 光照对棉花生长发育作用的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(2): 725 – 727.
WAN Yan, WU Jiulin, ZHOU Yu. Research progress on the effect of sunlight on the growth and development of cotton[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2010, 38(2): 725 – 727. (in Chinese)

[34] 王新宇, 高英志. 禾本科/豆科间作促进豆科共生固氮机理研究进展[J]. 科学通报, 2020, 65(2 – 3): 142 – 149.
WANG Xinyu, GAO Yingzhi. Advances in the mechanism of cereal/legume intercropping promotion of symbiotic nitrogen fixation[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(2 – 3): 142 – 149. (in Chinese)

[35] 刘守阳, 汪有科, 赵霞,等. 植物生长调节剂对梨枣节水增产效益的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(12): 184 – 190.
LIU Shouyang, WANG Youke, ZHAO Xia, et al. Effects of plant growth regulators on yield and water use efficiency of jujube in northern Shaanxi[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2012, 40(12): 184 – 190. (in Chinese)

[36] 王全九, 李宗昱, 张继红,等. 磁化强度对磁电一体活化水土壤水盐运移特征的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 278 – 284.
WANG Quanjiu, LI Zongyu, ZHANG Jihong, et al. Effect of magnetization intensity on characteristics of soil water and salt transport in magnetization-de-electronic activation water[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 278 – 284. (in Chinese)

[37] 王青青, 于瑞德, 沙东,等. 生物降解膜覆膜节水对沙砾土壤含水量及葡萄幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 102 – 106.
WANG Qingqing, YU Ruide, SHA Dong, et al. Effects of biodegradable film mulch on water content sandy growth of grape seedlings[J]. Agricultural Rsearch in the Arid Areas, 2014, 32(4): 102 – 106. (in Chinese)

[38] 张展羽, 郭相平, 汤建熙,等. 节水控盐灌溉制度的优化设计[J]. 水利学报, 2001,32(4): 89 – 94.
ZHANG Zhanyu, GUO Xiangping, TANG Jianxi, et al. Optimal design of irrigation schedule for water saving and salinity control[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001,32(4): 89 – 94. (in Chinese)

[39] 孟建, 沈彦俊, 姚旭擎,等. 地下水超采区农业种植结构与作物耗水时空演变研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 302 – 312.
MENG Jian, SHEN Yanjun, YAO Xuqing, et al. Spatial and temporal evolution of agricultural planting structure and crop water consumption in groundwater overdraft area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 302 – 312. (in Chinese)

[40] 牛腾, 岳德鹏, 于佳鑫,等. 基于最小响应单元的地下水埋深时空分异特征研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 238 – 246.
NIU Teng, YUE Depeng, YU Jiaxin, et al. Spatial and temporal variation characteristics of groundwater depth based on minimum response unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 238 – 246. (in Chinese)

[41] 王天宇, 王振华, 李文昊,等. 灌排一体化工程对地下水埋深及作物生长影响的研究综述[J]. 水资源与水工程学报, 2020, 31(4): 4 – 10.
WANG Tianyu, WANG Zhenhua, LI Wenhao, et al. Literature review on the influence of integrated irrigation and drainage project on groundwater depth and crop growth[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2020,32(4): 4 – 10. (in Chinese)

[42] 张义强, 王瑞萍, 白巧燕. 内蒙古河套灌区土壤盐碱化发展变化及治理效果研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(增刊1): 118 – 122.
ZHANG Yiqiang, WANG Ruiping, BAI Qiaoyan. Development and change of soil salinization in Hetao irrigation area of Inner Mongolia[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018,37(Supp. 1): 118 – 122. (in Chinese)