



白伟,张诗雨,张哲,冯晨,蔡倩,向午燕,赵凤艳,娄义晟,李娜,孙占祥. 东北地区耕作制度现状与创新路径[J]. 中国农业大学学报,2025,30(12):63-74.
BAI Wei,ZHANG Shiyu,ZHANG Zhe,FENG Chen,CAI Qian,XIANG Wuyan,ZHAO Fengyan,LOU Yisheng,LI Na,SUN Zhanxiang. Current situation and innovation pathway of the farming system in Northeast China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025,30(12):63-74.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.12.06

东北地区耕作制度现状与创新路径

白伟 张诗雨 张哲 冯晨 蔡倩 向午燕 赵凤艳 娄义晟
李娜 孙占祥*

(辽宁省农业科学院 耕作栽培研究所/农业农村部东北节水农业重点实验室,沈阳 110161)

摘要 东北地区是我国粮食安全的核心保障区,其耕作制度正处于传统模式向现代集约化、生态化转型的关键阶段。为全面了解东北地区耕作制度创新所面临的主要问题,并提出合理的路径,以“耕作制度”“东北黑土区”“应对气候变化”“高标准农田”等关键词在农业农村部、中国气象局、中国知网等检索2001—2025年国内外关于东北地区耕作制度的相关文献,并查询国家统计局关于主要作物的种植面积及产量等相关数据,基于东北地区农业发展基础条件、东北地区耕作制度历史演变过程及东北地区主要耕作制度,综合分析东北地区耕作制度创新所面临的难题和挑战,包括种植制度和模式单一,轮作制度推广受阻;黑土退化问题严峻,生态环境呈现恶化趋势;水资源过度消耗,短缺问题日益突出;气候变化敏感,灾害频发等问题。在此背景下,提出了东北地区耕作制度创新路径:1)制定科学耕作制度新区划,优化种植制度和养地制度;2)发展高效节水灌溉技术,提升雨水资源化利用能力;3)构建资源保护与育种协同体系,强化灾害监测预警与风险管理;4)智慧赋能传统粮仓新动力,加强高质量农田建设和适度规模经营。

关键词 东北地区;耕作制度;创新路径;粮食安全

中图分类号 S344.9

文章编号 1007-4333(2025)12-0063-12

文献标志码 A

Current situation and innovation pathway of the farming system in Northeast China

BAI Wei, ZHANG Shiyu, ZHANG Zhe, FENG Chen, CAI Qian, XIANG Wuyan,
ZHAO Fengyan, LOU Yisheng, LI Na, SUN Zhanxiang*

(Institute of Crop Cultivation and Farming System/Key Laboratory of Water-saving Agriculture in Northeast Region of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 100161, China)

Abstract Northeast China serves as a pivotal region to ensure China's food security, and its farming system is currently undergoing a critical transition from traditional practices to modern, intensive, and ecologically sustainable models. To comprehensively assess the primary challenges in the innovation of farming systems in Northeast China and propose viable innovation pathways, this study conducted a systematic literature review by taking “farming system” “black soil region of Northeast China” “climate change adaptation” “high-standard farmland” as keywords across databases including the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Meteorological Administration, and CNKI. Domestic and international publications from 2001 to 2025 related to the current state and challenges of farming systems in the region were retrieved. The data on crop acreage

收稿日期: 2025-04-25

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFD1500600);兴辽英才计划(XLYC2401002);辽宁省农业科学院基本科研业务费项目(2025XKJS8519,2025JCX1007);沈阳市科技计划(24-216-2-03)

第一作者: 白伟(ORCID:0009-0000-8823-7392),研究员,主要从事旱地耕作制度理论与技术研究,E-mail:libai200008@126.com

通讯作者: 孙占祥(ORCID:0000-0002-7135-8531),研究员,主要从事旱地耕作制度理论与技术研究,E-mail:sunzx67@163.com

and yield were also retrieved from the National Bureau of Statistics. Based on the comprehensive analysis of the agricultural development foundation, historical evolution, and dominant farming systems in Northeast China, this study identifies key difficulties and challenges such as monotonous cropping systems and models, limited adoption of crop rotation practices; severe degradation of black soil and deteriorating ecological conditions; excessive water resource consumption coupled with growing scarcity; and high vulnerability to climate change with frequent extreme weather events in reforming the regional farming system. In response, this study proposes four innovation pathways: 1) establishing scientific zoning for farming systems to optimize cropping patterns and soil fertility management; 2) developing high-efficiency water-saving irrigation technologies and enhancing rainwater resource utilization capacity; 3) developing resource-conserving and breeding and strengthening disaster monitoring, early warning, and risk management; 4) leveraging smart technologies to modernize traditional grain production and bolstering high-quality farmland construction and appropriately scaled operations.

Keywords Northeast China; farming system; innovational path; food security

耕作制度是指该地区在特定自然环境和社会经济条件下,为实现土地持续高产高效而采取的农作物种植制度以及与之相适应的养地制度等综合技术体系^[1]。东北地区是我国最大的商品粮生产基地,年均粮食产量占全国1/4,粮食商品化率达60%以上,调出量约占全国的1/3^[2],拥有我国著名的黄金玉米带^[3],也是我国最大的大豆产区^[4],为我国粮食安全做出了巨大贡献。东北地区不仅是“中国饭碗”,也是“国之重器”。但由于长期的高强度利用以及不合理的耕作方式,导致东北地区种植模式单一,黑土有机质含量下降、土层变薄、肥力减退^[5-6]。同时东北地区水资源过度消耗,部分地区水资源相对匮乏,且分布不均,短缺问题日益突出^[7]。随着全球气候变化进一步加剧,东北地区极端气候事件的频率和强度有所增加,易受低温冷害、干旱、洪涝、风灾等自然灾害影响^[8-9]。以上这些因素都给农业生产带来了不确定性,增加了农业生产的风险和损失。因此,全面了解东北地区耕作制度现状及创新所面临的问题,并提出合理的路径,对保障我国粮食安全和生态安全具有重要的意义。

东北地区耕作制度正面临生态退化、气候变化与资源约束的多重挑战^[7,9]。为了促进东北地区农业可持续发展,保障我国粮食安全和生态安全,自2002年起,在国家公益性行业专项及科技支撑计划等项目的支持下,辽宁省农业科学院联合国内顶尖科研机构,在东北四省区建立了7个长期定位试验站和14个试验示范点,开展了长达14年的系统性联合攻关。目前,有关中国耕作制度发展的研究较多,但聚焦在东北地区的报道相对较少。本研究以“耕作制度”“东北黑土区”“应对气候变化”“高标准农田”等关键词在农业农村部、中国气象局、中国

知网等网站检索2001—2025年国内外关于东北地区耕作制度相关文献,并查询国家统计局等网站整合关于主要作物的种植面积及产量等相关数据,系统总结东北地区耕作制度的现状,并提出东北地区耕作制度创新的路径,旨在全面了解东北地区耕作制度创新所面临的挑战与难题,以期为保障我国粮食安全和生态安全提供重要参考。

1 东北地区现代耕作制度现状

1.1 农业发展基础条件

东北地区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古东四盟(呼伦贝尔市、兴安盟市、通辽市、赤峰市),地形以平原、丘陵和山地为主^[10]。东西北三面环山,主要山脉分别为长白山、小兴安岭和大兴安岭,森林资源丰富,是我国重要的林业产区^[11]。主要河流包括北部的黑龙江及其支流松花江水系、东南部的鸭绿江、图们江水系以及西南部的辽河水系等,水资源充足^[12]。内部拥有三江平原、松嫩平原和辽河平原三大平原,地势平坦开阔,有利于大规模农业机械化作业,是我国重要的农业耕作区^[11]。主要土壤类型包括黑土、黑钙土、草甸土、白浆土、沼泽土等,其中黑土是最典型且肥沃的土壤。东北地区属温带大陆性季风气候,夏季短、冬季长,冬夏之间季风交替。1月均温为 $-24\sim-9\text{ }^{\circ}\text{C}$,7月均温为 $21\sim26\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。冬季长达5~7个月,北部冰冻期超200 d。区域年降水量350~1 000 mm,东南多、西北少,85%~90%降水集中在5—10月,7—9月为暴雨洪涝高发期^[13]。作物多为一年一熟。

1.2 东北地区耕作制度历史演变过程

东北地区的农业起源可以追溯到距今8 000年前,位于内蒙古自治区的兴隆沟遗址揭示了旱作农

业起源,主要种植旱作谷物,如粟、黍等,亩产仅 1~2 石^[14]。这一时期,农作制度较为简单,主要依赖自然恢复力,对生态环境破坏较大。秦汉时期,东北地区开始出现连种制和轮作复种制的初步发展;明清时期,东北地区的农业进一步发展,出现了以大豆、高粱、谷子为主的三年轮作制,结合翻耕与免耕的土壤耕作方式^[15]。清朝初期,东北地区引入了“休耕”和“轮作”方式,改变了传统的粗放耕作方法,农作物种植逐渐多样化,一年一熟制成为主要模式。

新中国成立后,东北地区农作制度历经多次变革。20 世纪 50 年代,政府通过改良农具和推广深松耕等技术,提高了农业生产效率^[15]。20 世纪 80 年代以后,随着国家政策的大力支持和技术的进步,东北地区逐步形成了以玉米为主导的“玉米型”种植结构^[16]。近年来,为应对土壤退化和环境问题,东北地区开始探索保护性耕作和轮作休耕制度^[17]。

1.3 主要耕作制度

东北地区种植制度以一年一熟制为核心,结合轮作、间作等模式,这种制度适应了东北地区年积温较低、无霜期短、冬季寒冷的气候特点^[17]。作物结构中以粮食作物为主,经济作物比重较低,主要粮食作物包括玉米、大豆、稻谷、春小麦、谷子、高粱等,历史上是高粱、谷子、大豆的传统产区;新中国成立以来,玉米、水稻面积迅速扩大,而谷子、高粱、春小麦则逐渐缩小^[15]。近年来,玉米成为东北地区的主导作物,随着国家大豆振兴计划的实施^[18],大豆播种面积不断增加。据统计,2023 年玉米播种面积达 1 682.1 万 hm^2 (2.52 亿亩),占全国玉米播种面积的 38%,产量达 1.18 亿 t,占全国玉米总产的 40.9%,单产达 7 275.7 kg/hm^2 ,比全国玉米单产高 11.4%。大豆播种面积达 649.9 万 hm^2 (9 748.6 万亩),占全国大豆面积的 62.0%,产量为 1 264.5 万 t,占全国大豆总产的 60.7%,单产为 2 092.2 kg/hm^2 ,比全国大豆单产高 5.1%。水稻播种面积达 461.1 万 hm^2 (6 916.5 万亩),占全国水稻播种面积的 15.9%,产量为 3 545.6 万 t,占全国水稻总产的 17.2%,单产为 8 085.0 kg/hm^2 ,比全国水稻单产高 13.3% (表 1)。

间作模式是较为传统的种植模式,主要为玉米大豆间作,20 世纪 50 年代是玉米大豆混作,20 世纪 70 年代以间作代替混作,西部地区的林粮经条带间

作,套作较少^[15]。为缓解连作障碍、提升土壤肥力,东北推行多种轮作模式,过去主要有高粱-谷子-大豆或玉米-大豆-高粱轮作,随着高粱面积的减少,现在的轮作方式主要是玉米-大豆轮作,农业农村部编制的《“十四五”全国种植业发展规划》^[19]指出,东北地区要建立稳定的玉米-大豆轮作制度。玉米是东北地区第一大作物,一般大面积常年连作,导致土壤退化最为严重的是旱地农业区,尤其是玉米种植带^[20]。传统耕作制度下的玉米连作模式是导致土壤退化的根本原因,由于经营者缺乏土地保护意识,长期不合理的掠夺式耕作导致土壤“变瘦、变薄”^[21]。在东北地区,常规的耕作方式是秸秆离田或焚烧后进行旋耕或犁耕,这种耕作方式容易引起风蚀和水蚀,从而使黑土层“变薄”;同时,土壤旋耕或犁耕加速了土壤有机质的矿化,秸秆离田或焚烧等措施造成有机物质归还少,导致土壤有机质形成不足,加速土壤有机质损失,造成土壤“变瘦”^[22]。为此,我国农业生产水平及作物种植结构也在不断调整变化。近年来,随着农业技术的发展,国家将保护性耕作纳入《东北黑土地保护性耕作行动计划 (2020—2025 年)》^[23],并将其作为东北地区适宜区域的主流耕作技术推广。

2 东北地区耕作制度创新面临的主要问题

2.1 种植制度和模式单一,轮作制度推广受阻

农业生产具有明显的地域性差异,不同地区的资源禀赋、产业基础和科技条件差异显著,因地制宜是首要原则^[24-26]。当前东北种植区划仍以传统积温带划分和品种适应性为基础,缺乏对气候变化、土壤退化、水资源约束等动态因素的整合。受国家政策导向性的影响和经营主体逐利的驱动,作物越区、跨区种植现象普遍,导致作物生产灾害频发、产品品质不稳定等问题突出^[27]。例如,气候变暖导致玉米种植边界北移,但部分地区仍沿用旧区划推广晚熟品种,导致籽粒脱水不足、品质下降。20 世纪 90 年代前期和中期,玉米越区种植在东北地区特别是黑龙江、吉林两省非常普遍。据统计,1997 年黑龙江和吉林省玉米越区种植面积分别占到玉米种植总面积的 52.4% 和 14.9%^[28]。东北地区是我国典型的一年一熟区,为了保证粮食有效供给,种植制度设置和作物生产一直是按照“以粮为纲”的指导思想执行的,造成了玉米、水稻、大豆等作物多年

表1 2023年东北地区主要作物的种植面积及产量
Table 1 Planting area and yield of major crops in Northeast China in 2023

作物 Crop	种植面积/(万 hm ²) Planting area		全国占比/% The proportion of the total population	单产/(kg/hm ²) Yield per unit area		较全国增产/% Higher than the national increase in production	总产量/(万 t) Yield		全国占比/% The proportion of the total population
	东北地区 Northeast China	全国 Nationwide		东北地区 Northeast China	全国 Nationwide		东北地区 Northeast China	全国 Nationwide	
玉米 Crop	1 682.1	4 421.9	38.0	7 275.7	6 532.1	11.4	11 800.7	28 884.2	40.9
大豆 Soybean	649.9	1 047.4	62.0	2 092.2	1 989.9	5.1	1 264.5	2 084.2	60.7
水稻 Rice	461.1	2 894.9	15.9	8 085.0	7 136.8	13.3	3 545.6	20 660.3	17.2
花生 Peanut	58.1	479.8	12.1	4 160.4	4 008.1	3.8	230.4	1 923.1	12.0

注:数据来自国家统计局(<https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>),辽宁省统计局(<https://tjj.ln.gov.cn/tjj/tjsj/tjnj/index.shtml>),吉林省统计局(<https://tjj.jl.gov.cn/tjsj/tjnj/>),黑龙江省统计局(<https://tjj.hl.gov.cn/>),赤峰市统计局(<http://tjj.chifeng.gov.cn/tjyw/tjnj/>),兴安盟统计局(<http://tjj.xam.gov.cn/xamtj/sjfbjd/tjnj/index.html>),通辽市统计局(<https://tjj.tongliao.gov.cn/>),呼伦贝尔市统计局(<https://tjj.hlbe.gov.cn/News/show/1358224.html>)。

Note: Data are adapted from the National Bureau of Statistics of China (<https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/>), Liaoning Provincial Bureau of Statistics (<https://tjj.ln.gov.cn/tjj/tjsj/tjnj/index.shtml>), Jilin Provincial Bureau of Statistics (<https://tjj.jl.gov.cn/tjsj/tjnj/>), Heilongjiang Provincial Bureau of Statistics (<https://tjj.hl.gov.cn/>), Chifeng Municipal Bureau of Statistics (<http://tjj.chifeng.gov.cn/tjyw/tjnj/>), Hinggan League Bureau of Statistics (<http://tjj.xam.gov.cn/xamtj/sjfbjd/tjnj/index.html>), Tongliao Municipal Bureau of Statistics (<https://tjj.tongliao.gov.cn/>), and Hulunbuir Municipal Bureau of Statistics (<https://tjj.hlbe.gov.cn/News/show/1358224.html>).

连作,据统计,在东北黑土区,部分地区的玉米连作时间已长达 30 年以上^[6]。由于过分强调比较效益,农户放弃了合理轮作体系,造成玉米种植面积越来越大,使作物的轮作体系遭破坏。目前,东北地区种植结构类型单一化明显,大部分区域种植结构不稳定,以玉米种植为主的类型区聚集趋势愈加明显^[7]。

2.2 黑土退化问题严峻,生态环境呈现恶化趋势

进入 21 世纪,为追求作物高产,多数种植业体系统一的养分来源是化肥,辅以农药施用,使粮食产量获得了大幅提升,但同时面源污染严重,地力持续衰退^[29],探索农业绿色发展是可持续农业发展的关键所在。土壤水蚀和风蚀是造成农田水土流失、黑土退化和风沙天气的主要因素^[30-32]。近年来随着小四轮拖拉机牵引旋耕机作业为主的整地方式不断普及,导致犁底层不断上升、表层有效土壤量减少,土壤蓄水保土保肥能力下降;农民形成了传统的种植习惯和生产方式,传统耕作观念根深蒂固,严重束缚保护性耕作技术的推行^[33],导致风蚀、水蚀严重,土壤不能得到有效保护。东北黑土区侵蚀面积达 21.9 万 km²(占黑土总面积 20.11%),黑土层厚度从开垦初期的 60~80 cm 降至 23~30 cm,有机质含量由 5 g/100 g 降至 2~3 g/100 g^[34]。长期玉米连作使土壤活性有机碳(易氧化碳)减少了 13%~27%,惰性碳比例上升,碳库周转效率下降。DNDC 模型预测,若持续传统耕作,50 年后土壤有机碳含量将下降 34%,玉米产量减少 29%^[35]。

2.3 水资源过度消耗,短缺问题日益突出

东北地区水资源总量呈现“北丰南欠、东多西少、山区多、平原少”的空间特征^[7]。灌溉农田面积<25%,主要以水稻、蔬菜、水果等为主,旱地作物 90% 以上依靠自然降雨进行生产,即所谓“雨养农业”。旱地作物种植区域主要分布在半湿润区、半湿润偏旱区、半干旱区和半干旱偏旱区,由于东北地区属大陆性季风气候,自然降雨年际变化大、季节分布不均导致旱地粮食作物产量年际变异大,单产稳定性不好。为追求高产和高效益,生产者往往盲目种植,导致作物生产布局不合理,农业的过度开发导致农业用水量大,加速了水资源过度消耗,加之用水效率低,进一步加重了区域水资源短缺,生态危机凸显^[36]。部分粮食主产地水资源开发利用处于严重过度开发状态,水资源开发利用量

已经接近或超过区域水资源总量的上限^[7],制约了区域农业可持续发展。科学合理利用好自然降雨,是稳定提高旱地粮食产能的核心。

2.4 气候变化,灾害频发

据 IPCC 报告显示,2011—2020 年全球平均气温比工业革命以来上升约 1.1℃^[37]。气候变化的主要表现为全球气温升高,降水时空差异增大,以及极端降水和干旱事件频繁发生^[9]。东北地区地处中高纬度区,对气候变化十分敏感,是遭受全球气候变化影响最严重的地区之一^[38]。随着全球气候变化进一步加剧,东北地区极端气候事件的频率和强度均有所增加^[39]。1961—2021 年,东北地区年平均温度总体呈现上升趋势(0.32℃/10 年),是世界上增温速率最快的区域之一^[9];≥10℃积温增加,无霜期延长,降水量和日照时数减少且波动性增加,导致区域极端天气增加,温度持续升高,使得低温冷害减少,但高温干旱灾害逐渐增多,特别是干旱灾害已经取代低温冷害成为影响东北地区作物的主要灾害,对旱地粮食生产造成重大影响。据统计,自 2003 年以来,黑龙江省是东北三省受灾最严重的地区,干旱是主要的气象灾害,其次是暴雨洪涝,低温冷冻害及雪灾对作物影响较小^[9]。气候模型预测,至 2050 年,东北地区年均气温将继续升高,降水总量波动增大,极端干旱与洪涝事件频率也将随之增加提升^[40]。

3 东北地区耕作制度创新路径

3.1 制定科学耕作制度新区划,优化种植制度及养地制度

一是制定东北地区科学的耕作制度新区划。亟需建立以粮食适度丰产、产品品质优良、水资源高效利用、黑土地持续利用、气候灾害抵御、固碳节能减排的多目标评价方法,重新制定东北地区科学的耕作制度新区划,并提出不同生态类型区的战略发展优先序、主要作物发展优先序和技术优先序,实现不同生态类型区的科学种植^[27]。自 2002 年起,在国家公益性行业专项及科技支撑计划等项目的支持下,辽宁省农业科学院联合国内顶尖科研机构,在东北四省区建立了 7 个长期定位试验站和 14 个试验示范点,开展了长达 14 年的系统性联合攻关。研究以旱地耕作制度创新为核心,深入解析气候变化对作物布局的影响规律,系统梳理了 1978 年

以来东北耕作制度的演变特征,采用多因素联合评价方法(整合作物气候生产潜力、气象灾害及地理信息等要素),将东北地区精准划分为6个耕作制度一级区。这一创新性区划不仅明确了玉米、大豆等作物的优势产区,更提出了基于水土承载力的区域增粮策略和产业优先发展序列,为旱地耕作制度关键技术研发确立了方向,同时为农业结构优化与区域布局提供了科学决策依据^[13]。

二是科学调整作物布局并创建多元化种植制度^[41]。东北地区作物布局调整突出“稳、调、扩”,即稳定水稻面积^[42],调整玉米面积^[43],扩种大豆和薯类作物。充分利用生态学与生物多样性原理,优化主要作物单作田间优化配置,增加种植密度,提高作物产量;创建豆科、禾本科、绿肥等间套作、轮作、混作等绿色种植制度和模式^[43],增强作物韧性,应对气候变化。辽宁省农业科学院牵头组织东北地区科研机构,通过多年定位研究研发了禾本科与豆科作物间作轮作、玉米田间配置优化等种植技术,建立了适合东北旱区不同类型区的资源高效型种植制度。例如,在北部高寒地区采用玉米-大豆轮作技术,使大豆产量平均增加9.01%,玉米产量增加7.19%;中部平原地区针对玉米中密和耐密品种,优化田间配置,中密品种以“三比空变株距”和“大垄双行等株距”为最佳,密度为57 000株/hm²,耐密品种以大垄双行等株距为最佳,密度为72 000株/hm²;在西部生态脆弱区建立仁用杏||花生、仁用杏||谷子、仁用杏||甘薯3种间作模式,农田生产力提高30%以上,耕地土壤风蚀降低31%以上^[44-45]。

三是构建绿色养地制度。因地制宜、因时制宜,统筹规划,合理有序推进保护性耕作制度、土壤轮耕制度和休闲轮作制度,建立更加科学、更加完善的养地制度^[46-48]。同时依托东北地区的畜牧业优势,建立“畜禽粪污-堆肥还田-土壤改良”循环生态链,设定有机肥替代化肥比例,配套补贴政策降低施用成本,持续提高东北地区的耕地质量^[49-51]。例如,黑龙江省哈尔滨市双城区通过引入北京丹青诺和牧业科技有限公司,试点粪肥施用第三方商业化服务。该公司在双城区建有100个公共粪肥存储池,粪肥播洒机及配套机械设备50套,收集处理当地奶牛场、猪场的粪污2万t/年。粪污经无害化处理后,于春播前和秋收后,借助高效机械并依据测土测粪配方,实施精准均质还田^[52]。

3.2 发展高效节水灌溉技术,提升雨水资源化利用能力

东北地区作为我国重要的粮食生产基地,其水资源短缺问题已成为制约农业可持续发展的关键因素,需要采取综合性的解决方案和创新路径,以提高水资源利用效率,保障粮食安全与生态安全。一是种植结构与生态协同优化。基于东北地区水资源“北丰南欠、东多西少”的空间分布特征,需要建立水资源承载力约束下的作物布局优化体系。例如,在辽西半干旱区等水资源紧缺区域,重点发展抗旱节水作物如谷子、高粱等,这些作物在雨养条件下具有较高的产能和水分利用效率;在松嫩平原等水资源相对丰富区域,推行水稻节水灌溉制度,采用控制灌溉技术减少灌溉用水量^[53-54]。二是推广高效集水技术,加强雨水资源化高效利用。在干旱区实行田间修筑垄沟,垄上覆膜等,通过改变田间微地形有效收集降雨^[55-57]。针对干旱缺水区域的农田土壤特点,通过利用相应技术手段改变土壤结构参数、土壤剖面结构层次和田间土壤微地形条件,增加土壤有效库容,建立相应的田间应用技术参数^[58]。辽宁省农业科学院通过多年定位研究,创新突破了地表覆盖等水肥高效利用关键技术,在秋季作物收获后进行整地和覆膜,通过减少秋、冬、春三季作物休闲期农田土壤水分的无效蒸发,实现旱作农田水资源的跨季节调控。已有研究显示,干旱年份秋覆膜较不覆膜的玉米籽粒产量水分利用效率和生物产量水分利用效率分别提高了60%和65%,且秋覆膜还减少了肥料氮的损失,提高了当季和翌年肥料氮的利用效率,增加了氮肥收获指数^[59-60]。三是推进智慧水利基础设施建设,发展智慧灌溉技术体系。拟定旱地高标准农田建设中雨水资源高效利用的措施。在东北地区,改造建设机井、塘坝等抗旱应急水源工程,实施黑土地保护,治理坡耕地,开展耕地平整,合理调整田块地表坡降,增加耕作层厚度,推广低洼地改良技术^[61]。可以借鉴北大荒农业股份二九〇分公司的成功经验,建设自动化提水站、数控系统和传感器网络,实现对分水闸和节制闸的智能控制,精准满足农田用水需求,该系统可使农田灌溉水有效利用系数提升至0.68,高于全国平均的0.58^[62]。

3.3 构建资源保护及育种协同体系,强化灾害监测预警及风险管理

东北地区是对气候变化最为敏感的区域之一,

近年来极端天气事件频发给农业生产造成严重损失^[9]。在此背景下,主动调整种植结构以适应新的水热条件,并利用尖端科技选育出能抵御逆境的作物品种,已成为保障国家粮食安全的“两翼”,缺一不可。

一是在作物类型上实行战略性置换,优化水资源配置。最直接的调整体现在减少高耗水作物的种植面积,增加耐旱、节水型作物或品种的比重。同时利用气候变暖延长生长季的特点,推广中晚熟高产品种,扩大水稻、玉米种植北界^[63]。在北方农牧交错带,马铃薯因其较高的水分利用效率和对干旱的耐受性,曾替代春小麦,成为该区域适应气候变化的主导作物之一^[64]。内蒙古兴和县在过去数十年中,通过增加薯类等作物的种植面积,显著提高了区域水资源利用效率^[65]。同样,在辽宁阜新等传统玉米产区,部分农户已将玉米改种为耐旱性更好的花生。

二是培育耐逆新品种,从基因层面增强作物抵御逆境的能力,同时建立寒地种质资源库,完善种质资源鉴定评价体系。基因组选择能够更精确地筛选出携带优良基因的个体,尤其对于受多基因控制的复杂性状(如耐热、耐旱性)效果更为显著。选育耐高温、抗旱、抗盐碱和抗病害的新品种,结合基因技术发掘适应气候变化的基因型,同时开展引种试验和育种协作,确保品种适应区域气候波动^[66]。东北寒地种质资源库与评价体系需以“保存多样性、鉴定精准化、共享高效化”为核心,通过技术创新与政策护航,将气候挑战转化为育种优势,筑牢国家粮食安全基底。应当针对寒地作物建立抗逆性状评价标准,包括:抗寒性(耐受 -30°C 低温能力)、抗旱指数(≥ 0.8 为高抗)、生育期适应性(响应热量资源增加的熟期调整)^[67]。开展气候模拟试验,筛选能够适应未来气候变化的种质^[66]。

三是强化灾害监测预警与风险管理,制定精细化应急预案。构建一套“天-空-地”一体化的灾害防控体系对保障区域农业可持续发展意义重大。利用卫星遥感技术实现全天候地面监测,结合地面站点数据(如,风速、雨量、温湿度等),构建动态化、精准化的灾害监测系统,提升对于旱、洪涝、低温冷害等灾害的实时追踪能力^[68]。例如,沈阳农业大学针对大豆等主粮作物,开发基于日尺度的动态监测预

警技术(如,低温冷害指标SCDI),通过逐日滚动计算实现灾前预警、灾中监测和灾后评估,解决传统月/旬尺度监测的滞后性问题^[69]。

3.4 智慧赋能传统粮仓新动力,加强高质量农田建设及适度规模经营

东北地区作为我国传统大粮仓之一,如何打造现代化大农业发展先行地,智慧农业是重要的措施^[70]。一是加快智慧农业发展。构建农业资源大数据平台,统一耕地、气象、品种、农机等数据标准,建立地块级“数字画像”,支撑精准种植决策^[71]。如黑龙江红卫、双河农场已实现土壤养分、作物长势可视化分析,优化土地流转与施肥方案。部署“空-天-地-人”一体化监测网^[72],融合卫星遥感、无人机航测、田间传感器(虫情测报仪、墒情站等)与人工巡查,动态监测生产进度、灾害风险,替代传统经验判断,将先进技术广泛应用到作物生产全过程。系统研究基于特定地域气候模式的机器学习模型,在农户决策层面比大模型更加具有优势^[50]。二是推广智能装备与新技术应用。发展无人化智慧农场^[73],规模化应用北斗导航无人播种机(轨迹误差 $\leq 2\text{ cm}$)、植保无人机(日作业千亩)、自动驾驶农机等装备。集成智慧栽培技术推广水肥一体化滴灌、变量施肥、病原微生物孢子捕捉等系统,结合实时数据分析实现精准灌溉与病虫害防控^[74]。

加强高标准农田建设,是保障国家粮食安全、推动农业高质量发展的重大举措^[75]。建成后的高标准农田,粮食单产产能增加 $10\%\sim 20\%$,为我国粮食连续多年丰收提供了重要支撑^[76]。但高标准农田不等于高质量农田,存在着农田田间设施配套率低、工程建设标准低、设计施工使用年限不统一、农田土壤培肥未得到足够重视、基础设施建设与农业发展结合不紧密、农田基础建设的农业产出目标不明确等6个方面的突出问题^[77-79]。因此,要加强高质量的高标准农田建设和适度规模经营,一是整合粮食产能提升的各项工程,统筹推进高标准农田建设等国家系列工程实施,基本形成“田成方、树成行、路相通、渠相连、旱能灌、涝能排”的高质量农田生产新格局^[80];二是探索项目建设与土地经营权流转、农业生产社会化服务相结合推进模式,鼓励新型经营主体和农业社会化服务组织适度发展的规模化经营和专业化、标准化生产,解决粮田生产“碎片化”的现实问题,持续提高作物单产和农业生产效率^[79-80]。

4 展望

在全球气候变化与粮食安全双重压力下,东北地区耕作制度创新已成为保障国家粮食安全的核心使命。当前,传统耕作模式对资源高依赖、低效率的弊端日益显现,黑土退化、水资源短缺与气候变化的挑战亟需系统性突破。为实现粮食高产高效与生态可持续的双重目标,东北地区的耕作制度未来需以生态优先与科技驱动为双核,推动耕作制度向绿色、智能、适应性的方向创新。制定多目标协同的耕作新区划、推广保护性耕作与轮作制度、发展节水技术与智慧农业、加强抗逆品种选育与灾害防控体系构建,并通过高标准农田建设和适度规模经营提升系统韧性,构建“藏粮于地、藏粮于技”的可持续生产体系。唯有将自然恢复、技术赋能与制度创新深度融合,方能在气候变化加剧的背景下筑牢东北粮仓根基,为保障我国粮食安全作出贡献。

参考文献 References

- [1] 刘翼浩,陈阜. 中国农作制[M]. 北京:中国农业出版社,2005
Liu X H, Chen F. *Farming systems in China*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005 (in Chinese)
- [2] 中国科学院. 东北黑土地白皮书发布会:东北地区黑土地白皮书(2020)[M]. 北京:中国科学院,2021
Chinese Academy of Sciences. *Northeast Black Soil White Paper Release Conference: Northeast Black Soil White Paper* (2020)[M]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2021 (in Chinese)
- [3] Liu Z J, Yang X G, Hubbard K G, Lin X M. Maize potential yields and yield gaps in the changing climate of northeast China[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(11):3441-3454
- [4] Guo S B, Guo E J, Zhang Z T, Dong M Q, Wang X, Fu Z Z, Guan K X, Zhang W M, Zhang W J, Zhao J, Liu Z J, Zhao C, Yang X G. Impacts of mean climate and extreme climate indices on soybean yield and yield components in Northeast China[J/OL]. *Science of the Total Environment*, (2022-05-28), DOI:doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156284
- [5] 李保国,任图生,王贵满,周虎,苗全,李杜潮,王力,王影,卢奕丽,朱宇博. 黑土地保护梨树模式的时代意义与展望[J]. 中国农业大学学报,2025,30(10):1-9
Li B G, Ren T S, Wang G M, Zhou H, Miao Q, Li S C, Wang L, Wang Y, Lu Y L, Zhu Y B. Black soil conservation in Northeast China: Significance and outlook of the Lishu Model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(10):1-9 (in Chinese)
- [6] 韩晓增,李娜. 中国东北黑土地研究进展与展望[J]. 地理科学,2018,38(7):1032-1041
Han X Z, Li N. Research progress of black soil in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(7):1032-1041 (in Chinese)
- [7] 向雁. 东北地区水-耕地-粮食关联研究[D]. 北京:中国农业科学院,2020
Xiang Y. Study on water-land-food (WLF) nexus in Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020 (in Chinese)
- [8] 高晓容. 东北地区玉米主要气象灾害风险评估研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012
Gao X R. Study on the risk assessment of the main meteorological disasters for maize in Northeast China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012 (in Chinese)
- [9] 于水,张晓龙,王妍,沈彦军. 气候变化对中国东北三省主要粮食作物影响研究综述[J]. 中国生态农业学报(中英文),2024,32(6):970-985
Yu S, Zhang X L, Wang Y, Shen Y J. Review of research on the impacts of climate change on staple grain crops in the three provinces of Northeast China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2024, 32(6):970-985(in Chinese)
- [10] 秦雯. 东北地区种植业结构演化与空间区划研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023
Qin W. Research on structural evolution and spatial division of planting industry in Northeast China[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [11] 李吉程. 东北地区耕地生态系统服务权衡协同关系及影响因素研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2025
Li J C. Study on the synergistic relationship and influencing factors of cultivated land ecosystem service balance in Northeast China[D] Harbin: Northeast Agricultural University, 2025 (in Chinese)
- [12] 廖娅雯. 东北地区降水的年际转折及水热平衡特征研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2025
Liao Y W. Study on interannual turning point of precipitation and characteristics of water and heat balance in Northeast China[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2025 (in Chinese)
- [13] 孙占祥. 东北地区旱地农业研究进展与发展对策[J]. 寒旱农业科学,2022,1(10):4-11
Sun Z X. Research progress and development countermeasures on dryland agriculture in northeast China[J]. *Journal of Cold-Arid Zone Agricultural Sciences*, 2022, 1(10):4-11 (in Chinese)
- [14] 于凌. 东北农耕文化[M]. 北京:社会科学文献出版社,2018
Yu L. *Northeastern Farming Culture* [M]. Beijing: Social Sciences Literature Publishing House, 2018(in Chinese)
- [15] 孙占祥. 我国耕作制度现状、问题及东北地区耕作制度革新[C]//中国农作制度研究进展2012. 沈阳:辽宁省农业科学院,2012
Sun Z X. The current situation, problems of farming system in China and the reform of farming system in Northeast China [C] // Research Progress on China's Agricultural System 2012. Shenyang: Liaoning Academy of Agricultural Sciences, 2012 (in Chinese)
- [16] 刘珍环,杨鹏,吴文斌,李正国,游良志. 近30年中国农作物种植结构时空变化分析[J]. 地理学报,2016,71(5):840-851
Liu Z H, Yang P, Wu W B, Li Z G, You L Z. Spatio-temporal changes in Chinese crop patterns over the past three decades[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(5):840-851(in Chinese)
- [17] 杜国明,姚鑫,臧雷振. 东北黑土区耕作制度演变及其影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文),2025,33(4):646-655
Du G M, Yao X, Zang L Z. Evolution of farming system and its influencing factors in the black soil region of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2025, 33(4):646-655 (in Chinese)
- [18] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部办公厅关于印发《大豆振兴计划实施方案》的通知[EB/OL]. [2025-10-25]. https://www.moa.gov.cn/nybgb/2019/0201903/201905/t20190525_6315395.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China.

- Notice from the General Office of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on Issuing the "Implementation plan for the soybean revitalization program"[EB/OL]. [2025-10-25]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2019/0201903/201905/t20190525_6315395.htm (in Chinese)
- [19] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于印发《“十四五”全国种植业发展规划》的通知[EB/OL]. [2025-10-25]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2022/202202/202204/t20220401_6395092.htm
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Notice from the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on Issuing the "National planting industry development plan for the 14th Five-Year Plan period"[EB/OL]. [2025-10-25]. https://www.moa.gov.cn/nybg/2022/202202/202204/t20220401_6395092.htm (in Chinese)
- [20] 成敏. 西北旱作农区农作制优先序研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010
- Cheng M. Study on farming system priority of dry-land farming area in northwest of China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010 (in Chinese)
- [21] 山仑. 旱地农业技术发展趋向[J]. 中国农业科学, 2002, 35(7):848-855
- Shan L. Development trend of dryland farming technologies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(7):848-855 (in Chinese)
- [22] 敖曼, 张旭东, 关义新. 东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10):1203-1215
- Ao M, Zhang X D, Guan Y X. Research and practice of conservation tillage in black soil region of Northeast China [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10):1203-1215 (in Chinese)
- [23] 中华人民共和国中央人民政府. 农业农村部 财政部关于印发《东北黑土地保护性耕作行动计划(2020—2025年)》的通知[EB/OL]. [2025-10-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/18/content_5492795.htm
- The Central People's Government of the People's Republic of China, the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, and the Ministry of Finance have issued the Notice on Printing and Distributing the "Action plan for protective tillage of black soil in Northeast China (2020-2025)"[EB/OL]. [2025-10-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/18/content_5492795.htm (in Chinese)
- [24] 刘翼浩. 农作制与中国农作制区划[J]. 中国农业资源与区划, 2002, 23(5): 11-15
- Liu X H. Farming system and farming system regional planning in China[J]. *Journal of China Agricultural Resources and Regional Planning*, 2002, 23 (5):11-15(in Chinese)
- [25] 邓静中. 农业区划方法[M]. 北京:科学出版社, 1961
- Deng J Z. *Agricultural Regionalization Methods* [M]. Beijing: Science Press, 1961 (in Chinese)
- [26] 柴强, 胡发龙. 我国耕作制度研究进展与展望[J]. 寒旱农业科学, 2022 (10): 19-25
- Chai Q, Hu F L. Research progress and prospect of farming system in China [J]. *Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences*, 2022 (10): 19-25 (in Chinese)
- [27] 陈阜, 姜雨林, 尹小刚. 中国耕作制度发展及区划方案调整[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(3):1-6
- Chen F, Jiang Y L, Yin X G. Adjustment of China's farming system regionalization scheme[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(3):1-6 (in Chinese)
- [28] 蒋相梅. 东北地区控制玉米越区种植取得明显成效[J]. 中国农业信息快讯, 2001, 13 (8):8-9
- Jiang X M. Significant results have been achieved in controlling corn cross-border planting in Northeast China [J]. *China Agricultural Information Bulletin*, 2001, 13 (8):8-9 (in Chinese)
- [29] Zhou P, Wen A B, Zhang X B, He X B. Soil conservation and sustainable eco-environment in the Loess Plateau of China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 68(3):633-639
- [30] 王世豪, 徐新良, 曹巍. 2000—2020年东北黑土地土壤侵蚀时空演化特征[J]. 资源科学, 2023, 45(5):951-965
- Wang S H, Xu X L, Cao W. Spatial and temporal changes of erosion in the black soil region of Northeast China from 2000 to 2020 [J]. *Resources Science*, 2023, 45(5):951-965 (in Chinese)
- [31] 张光辉, 杨扬, 刘瑛娜, 王志强. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2):1-12
- Zhang G H, Yang Y, Liu Y N, Wang Z Q. Advances and prospects of soil erosion research in the black soil region of Northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(2):1-12 (in Chinese)
- [32] 林艺, 李和平, 肖波. 东北黑土区农田土壤风蚀的影响因素及其数量关系[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4):44-50
- Lin Y, Li H P, Xiao B. Influencing factors of wind erosion and their quantitative relationships with erosion rate in black soil area of Northeast China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4):44-50 (in Chinese)
- [33] 梁爱珍, 张延, 陈学文, 张士秀, 黄丹丹, 杨学明, 张晓平, 李秀军, 田春杰, McLaughlin Neil B, 相洋. 东北黑土区保护性耕作的发发展现状与成效研究[J]. 地理科学, 2022, 42(8):1325-1335
- Liang A Z, Zhang Y, Chen X W, Zhang S X, Huang D D, Yang X M, Zhang X P, Li X J, Tian C J, McLaughlin N B, Xiang Y. Development and effects of conservation tillage in the black soil region of Northeast China [J] *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(8):1325-1335 (in Chinese)
- [34] Dai Y J, Liu Y F, Wang Y L, Fang W Y, Chen Y M, Sui Y Y. A practice of conservation tillage in the Mollisol region in Heilongjiang Province of China: A mini review[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2023, 32(2):1479-1489
- [35] Tong Y X, Liu J G, Li X L, Sun J, Herzberger A, Wei D, Zhang W F, Dou Z X, Zhang F S. Cropping system conversion led to organic carbon change in China's mollisols regions[J/OL]. *Scientific Reports*, (2017-11-22). DOI: 10.1038/s41598-017-18270-5
- [36] 康绍忠. 藏粮于水藏水于技:发展高水效农业保障国家粮食安全[J]. 中国水利, 2022 (13):1-5
- Kang S Z. Store grain in water and technology: Development of highly-efficient agricultural water use for ensuring national food security[J]. *China Water Resources*, 2022 (13):1-5 (in Chinese)
- [37] 周波涛, 钱进. IPCC AR6报告解读:极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6):713-718
- Zhou B T, Qian J. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6 [J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(6):713-718 (in Chinese)
- [38] Zhao J J, Wang Y Y, Zhang Z X, Zhang H Y, Guo X Y, Yu S, Du W L, Huang F. The variations of land surface phenology in northeast china and its responses to climate change from 1982 to 2013[J/OL]. *Remote Sensing*, (2016-05-12). DOI: doi.org/10.3390/rs8050400
- [39] Yu X Y, Ma Y Y. Spatial and temporal analysis of extreme climate events over Northeast China[J/OL]. *Atmosphere*, (2022-07-29). DOI: doi.org/10.3390/atmos13081197
- [40] 陈源源. 气候变化对中国粮食生产的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(12): 51-57
- Chen Y Y. The impact of climate change on China's grain production[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(12):51-57 (in Chinese)

- [41] 李阔, 许吟隆. 适应气候变化的中国农业种植结构调整研究[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 8-17
- Li K, Xu Y L. Study on adjustment of agricultural planting structures in China for adapting to climate change[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2017, 19(1): 8-17 (in Chinese)
- [42] 苏询, 梁钰茹, 华而实, 陈敏鹏. 东北水稻种植分布随气候变化迁移的增产效果评估[J]. 生态学报, 2025, 45(13): 6576-6585
- Su X, Liang Y R, Hua E S, Chen M P. Evaluating the yield-increasing effect of the migration of rice cultivation distribution in the northeast in adapting to climate change[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(13): 6576-6585 (in Chinese)
- [43] 赵锦, 杨晓光, 刘志娟, 吕硕, 王静, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响X. 气候变化对东北三省春玉米气候适宜性的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(16): 3145-3158
- Zhao J, Yang X G, Liu Z J, Lv S, Wang J, Chen F. The possible effects of global warming on cropping systems in China X: The possible impacts of climate change on climatic suitability of spring maize in the three provinces of Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(16): 3145-3158 (in Chinese)
- [44] Feng C, Sun Z X, Zhang L Z, Feng L S, Zheng J M, Bai W, Gu C F, Wang Q, Xu Z, van der Werf W. Maize/peanut intercropping increases land productivity: A meta-analysis[J/OL]. *Field Crops Research*, (2021-06-29). DOI: doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108208
- [45] Zhang Y, Sun Z X, Su Z C, Du G J, Bai W, Wang Q, Wang R N, Nie J Y, Sun T R, Feng C, Zhang Z, Yang N, Zhang X, Evers J B, van der Werf W, Zhang L Z. Root plasticity and interspecific complementarity improve yields and water use efficiency of maize/soybean intercropping in a water-limited condition[J/OL]. *Field Crops Research*, (2022-03-24). DOI: doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108523
- [46] 张海林, 高旺盛, 陈阜, 朱文珊. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(1): 16-20
- Zhang H L, Gao W S, Chen F, Zhu W S. Prospects and present situation of conservation tillage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10(1): 16-20 (in Chinese)
- [47] 齐华, 李从锋, 赵明, 姜英. 我国北方旱作农田保护性耕作发展与展望[J]. 作物杂志 2020 (2): 16-19
- Qi H, Li C F, Zhao M, Jiang Y. Developments and prospects of conservation tillage in the dryland of northern China[J]. *Crops*, 2020 (2): 16-19 (in Chinese)
- [48] 孙炜琳, 王瑞波, 姜茜, 黄圣男. 农业绿色发展的内涵与评价研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(4): 14-21
- Sun W L, Wang R B, Jiang Q, Huang S N. Study on the connotation and evaluation of the agricultural green development[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(4): 14-21 (in Chinese)
- [49] 赵馨馨, 杨春, 韩振. 我国畜禽粪污资源化利用模式研究进展[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2019 (4): 4-7, 13
- Zhao X X, Yang C, Han Z. Research progress on the resource utilization mode of livestock and poultry feces waste in China[J]. *Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine*, 2019 (4): 4-7, 13 (in Chinese)
- [50] 路杨, 隋丽, 周佳玲, 常帅, 赵宇, 杜茜, 张正坤, 李启云. 生猪养殖粪污与秸秆混合还田对吉林省土壤肥力与玉米产量的影响[J]. 东北农业科学, 2022, 47(4): 48-51
- Lu Y, Sui L, Zhou J L, Chang S, Zhao Y, Du Q, Zhang Z K, Li Q Y. Effects of swine manure and straw mixed return on soil fertility and maize yield in Jilin Province[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2022, 47(4): 48-51 (in Chinese)
- [51] 徐永洞, 刘志丹. 以粪污水热资源化为核心的高效种养结合系统分析与展望[J]. 农业工程学报, 2024, 40(12): 1-12
- Xu Y D, Liu Z D. Analysis and perspective of a highly-efficient planting-breeding integration system based on hydrothermal resource utilization of animal wastes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(12): 1-12 (in Chinese)
- [52] 董红敏, 左玲玲, 魏莎, 朱志平, 尹福斌. 建立畜禽废弃物养分管理制度促进种养结合绿色发展[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(2): 180-189
- Dong H M, Zuo L L, Wei S, Zhu Z P, Yin F B. Establish manure nutrient management plan to promote green development of integrated crop-livestock production system[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(2): 180-189 (in Chinese)
- [53] 王完全, 付强, 季飞, 徐淑琴. 黑龙江省西部半干旱区水稻水分生产函数及优化灌溉制度研究[J]. 节水灌溉, 2007 (8): 48-51
- Wang K Q, Fu Q, Ji F, Xu S Q. Study on rice water production function and optimization of irrigation schedule of semiarid area of western Heilongjiang Province[J]. *Water Saving Irrigation*, 2007 (8): 48-51 (in Chinese)
- [54] 王喜华. 吉林省水稻节水灌溉与水分管理的技术与模式研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012
- Wang X H. *Study on the technology and pattern of water-saving irrigation and water management of rice in Jilin Province* [D]. Changchun: Jilin University, 2012 (in Chinese)
- [55] 任小龙, 贾志宽, 丁瑞霞, 韩清芳. 我国旱区作物根域微集水种植技术研究进展及展望[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 83-89
- Ren X L, Jia Z K, Ding R X, Han Q F. Progress and prospect of research on root-zone water micro-collecting farming for crop in arid region of China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(3): 83-89 (in Chinese)
- [56] 孙占祥, 冯良山, 肖继兵. 辽西地区不同微集水模式对土壤水分及水分利用效率的影响[C]//中国农学会耕作制度分会学会成立30周年纪念暨2010年学术年会论文集. 泰安: 山东科学技术出版社, 2010
- Sun Z X, Feng L S, Xiao J B. The effects of different micro-rainwater harvesting patterns on soil moisture and water use efficiency in Liaoxi region [C]. The Cultivation System Branch of the Chinese Society of Agricultural Sciences. *Advances in Agricultural Cultivation System Research*. Taian: Shandong Science and Technology Press, 2010 (in Chinese)
- [57] 冯良山, 孙占祥, 肖继兵, 刘洋, 侯志研, 田建全, 尹晓丽. 不同微集水方式对玉米田耗水规律的影响[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 213-216
- Feng L S, Sun Z X, Xiao J B, Liu Y, Hou Z Y, Tian J Q, Yin X L. Effects on soil water consumption of maize field in different soil micro-catchment pattern[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(3): 213-216 (in Chinese)
- [58] 吴普特. 雨水资源化与现代节水农业[J]. 中国农业科技导报, 2007, 9(1): 15-20
- Wu P T. Rainwater harvesting and modern water saving agriculture[J]. *Review of China Agricultural Science and Technology*, 2007, 9(1): 15-20 (in Chinese)
- [59] 张哲, 张旭, 冯良山, 张燕卿, 刘恩科, 孙占祥. 秋覆膜对辽西春玉米水肥利用效率和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 150-158
- Zhang Z, Zhang X, Feng L S, Zhang Y Q, Liu E K, Sun Z X. Effects of autumn mulching on water and fertilizer use efficiency and yield of spring maize in Western Liaoning Province[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15): 150-158 (in Chinese)

- [60] 冯晨, 孙占祥, 郑家明, 冯良山, 白伟, 张哲, 张广才. 辽西半干旱区秋覆膜对土壤水分及玉米水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 9-14
Feng C, Sun Z X, Zheng J M, Feng L S, Bai W, Zhang Z, Zhang G C. Effects of plastic film mulching during autumn on soil water and water utilization of spring maize in dry land of northwest Liaoning[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(2):9-14 (in Chinese)
- [61] 王欢. 旱地高标准农田建设中雨水资源高效利用的措施研究[J]. 中国农村水利水电, 2023, (4):235-237, 243
Wang H. Research on the measures of efficient utilization of rainwater resources in the construction of high standard farmland in dry land[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023, (4):235-237, 243 (in Chinese)
- [62] 黑龙江省农业农村厅. “智”提龙江水 “慧”溉万顷田[EB/OL]. [2025-09-16]. https://nynct.hlj.gov.cn/nynct/c115380/202503/c00_31822091.shtml
Heilongjiang Provincial Department of Agriculture and Rural Affairs. Enhancing water efficiency in Liaoning Province and irrigating millions of acres of farmland with intelligence and wisdom[EB/OL]. [2025-09-16]. https://nynct.hlj.gov.cn/nynct/c115380/202503/c00_31822091.shtml (in Chinese)
- [63] 李保国, 刘忠, 黄峰, 杨晓光, 刘志娟, 万炜, 汪景宽, 徐英德, 李子忠, 任国生. 巩固黑土地粮仓保障国家粮食安全[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1184-1193
Li B G, Liu Z, Huang F, Yang X G, Liu Z J, Wan W, Wang J K, Xu Y D, Li Z Z, Ren T S. Ensuring national food security by strengthening high-productivity black soil granary in Northeast China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2021, 36(10):1184-1193 (in Chinese)
- [64] Zhang J T, An P L, Pan Z H, Hao B Z, Wang L W, Dong Z Q, Pan X B, Xue Q W. Adaptation to a warming-drying trend through cropping system adjustment over three decades: A case study in the northern agro-pastoral ecotone of China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29(3): 496-514
- [65] 张建松, 王静爱, 李睿, 陈思. 农牧交错带农业旱灾适应模式与区域可持续发展: 以内蒙古兴和县为例[J]. 灾害学, 2011, 26(2):91-95, 113
Zhang J S, Wang J A, Li R, Chen S. Agricultural drought adaptation model of farming-pastoral zone and regional sustainable development: A case study of Xinghe County in Inner Mongolia[J]. *Journal of Catastrophology*, 2011, 26(2):91-95, 113 (in Chinese)
- [66] 谢立勇, 李艳, 林森. 东北地区农业及环境对气候变化的响应与应对措施[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1):197-201
Xie L Y, Li Y, Lin M. Response and adaptation to climate change of agriculture and environment in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(1):197-201 (in Chinese)
- [67] 崔宁波, 殷琪荔. 气候变化对东北地区粮食生产的影响及对策响应[J]. 灾害学, 2022, 37(1):52-57
Cui N B, Yin Q L. Impacts of climate change on grain production in Northeast China and countermeasures[J]. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(1):52-57 (in Chinese)
- [68] Seppelt R, Klotz S, Peiter E, Volk M. Agriculture and food security under a changing climate: An underestimated challenge[J]. *iScience*, 2022, 25(12): 105551
- [69] 中国气象局. 沈阳农业大学:形成东北地区大豆主要农业气象灾害监测预警技术 实现灾害灾变过程动态监测预警[EB/OL]. [2025-09-16]. https://www.cma.gov.cn/ztbd/2024zt/20241009/2024100910/202410/t20241012_6635159.html
China Meteorological Administration. Shenyang Agricultural University: Forming the main agricultural meteorological disaster monitoring and early warning technology for soybeans in Northeast China, achieving dynamic monitoring and early warning of disaster evolution process[EB/OL]. [2025-09-16]. https://www.cma.gov.cn/ztbd/2024zt/20241009/2024100910/202410/t20241012_6635159.html (in Chinese)
- [70] Qazi S, Khawaja B A, Farooq Q U. IoT-equipped and AI-enabled next generation smart agriculture: A critical review, current challenges and future trends[J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 21219-21235
- [71] 刘鹏. 基于空天地一体化智慧农业大数据平台[J]. 山西电子技术, 2023 (4): 48-50
Liu P. Application of smart agricultural big data platform based on air-space-ground integration[J]. *Shanxi Electronic Technology*, 2023 (4):48-50 (in Chinese)
- [72] 刘彦随, 赵雨, 李裕瑞. 气候变化对农业地域系统的影响及其应对[J/OL]. 科学通报, (2025-05-29) [2025-09-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1784.N.20250529.1125.013.html>
Liu Y S, Zhao Y, Li Y R. Impacts of climate change on agricultural areal systems and the mitigation strategies[J/OL]. *Chinese Science Bulletin*, (2025-05-29) [2025-09-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1784.N.20250529.1125.013.html> (in Chinese)
- [73] 于丰华, 许童羽, 郭忠辉, 白驹驰, 相爽, 国斯恩, 金忠煜, 李世隆, 王世宽, 刘美含, 惠尹宣. 水稻智慧无人农场关键技术研究现状与展望[J]. 智慧农业 (中英文), 2024, 6(6):1-22
Yu F H, Xu T Y, Guo Z H, Bai J C, Xiang S, Guo S E, Jin Z Y, Li S L, Wang S K, Liu M H, Hui Y X. Research status and prospects of key technologies for rice smart unmanned farms[J]. *Smart Agriculture*, 2024, 6(6):1-22 (in Chinese)
- [74] 廖娟, 陶婉琰, 臧英, 曾弘毅, 汪沛, 罗锡文. 农作物病虫害遥感监测关键技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11):1-19
Liao J, Tao W Y, Zang Y, Zeng H Y, Wang P, Luo X W. Research progress and prospect of key technologies in crop disease and insect pest monitoring [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(11): 1-19 (in Chinese)
- [75] 王珂, 李玲, 黎鹏. 基于生态安全和粮食安全的高标准农田建设研究[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(6):706-713
Wang K, Li L, Li P. Study on High-standard farmland construction based on ecological security and food security[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021, 37(6):706-713 (in Chinese)
- [76] 中华人民共和国农业农村部. 农业农村部关于印发《全国高标准农田建设规划(2021—2030年)》的通知[EB/OL]. [2025-09-16]. https://ntjss.moa.gov.cn/zcfb/202109/t20210915_6376511.htm
Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Notice of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs on Issuing the “National plan for high-standard farmland construction (2021-2030)”[EB/OL]. [2025-09-16]. https://ntjss.moa.gov.cn/zcfb/202109/t20210915_6376511.htm (in Chinese)
- [77] 陈正, 刘赢强, 贺德俊, 孙妍, 周同, 张超, 沐青. 中国高标准农田建设现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18):234-241
Chen Z, Liu Y T, He D J, Sun Y, Zhou T, Zhang C, Mu Q. Current situation and development trend of well-facilitated farmland construction in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(18):234-241 (in Chinese)
- [78] 郑文明. 浅谈高标准农田建设现状及发展趋势[J]. 农业与技术, 2024, 44(12): 58-61
Zheng W M. A brief discussion on the present situation and development

- trend of well-facilitated farmland construction [J]. *Agriculture and Technology*, 2024, 44(12):58-61 (in Chinese)
- [79] 孙春蕾, 杨红, 韩栋, 郝聪明, 李虎. 全国高标准农田建设情况与发展策略[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(7):15-22
- Sun C L, Yang H, Han D, Hao C M, Li H. The Situation and countermeasures of well-facilitated farmland in China [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology Herald*, 2022, 24(7): 15-22 (in Chinese)
- [80] 韩杨, 陈雨生, 陈志敏. 中国高标准农田建设进展与政策完善建议:对照中国农业现代化目标与对比美国、德国、日本经验教训[J]. 农村经济, 2022(5): 20-29
- Han Y, Chen Y S, Chen Z M. The process of China's high-standard farmland construction and policy suggestions for improvement[J]. *Rural Economy*, 2022(5):20-29 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 白伟,农学博士,辽宁省农业科学院耕作栽培研究所所长,研究员,硕士生导师。现为“十四五”国家重点研发计划“黑土地保护与利用科技创新”重点专项首席科学家和总体专家组秘书,国家人才推进计划重点领域、农业农村部“北方旱地耕作制度”创新团队和辽宁省“旱作农田耕作栽培技术”首批创新团队岗位专家,农业农村部“神农英才计划”青年英才,中国农学会青年科技奖,辽宁“兴辽英才计划”青年拔尖人才、辽宁省“百千万人才工程”百人层次、辽宁省优秀科技工作者、辽宁省青年科技奖十大英才等。兼任中国农学会耕作制度分会常务理事、ANSO-世界黑土联合会理事、辽宁省土壤学会理事、辽宁省作物学会理事、辽宁省保护性耕作专家组成员等。长期从事旱地耕作制度理论与技术研究,多次参与国家和辽宁省农业领域战略研究工作。先后主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金面上项目等20余项。作为主要参加人取得获奖科技成果17项。获国家专利14件项,参与制定辽宁省地方标准14项。发表主笔论文60余篇,其中SCI/EI 16篇;出版著作5部。



通讯作者简介: 孙占祥,农学博士,辽宁省农业科学院副院长,二级研究员,博士生导师。国家神农英才计划领军英才,国家高层次人才计划科技创新领军人才,国家创新人才推进计划重点领域创新团队首席专家,全国农业科研杰出人才,辽宁省“兴辽英才计划”科技创新杰出人才,辽宁省最美科技工作者,入选国家百千万人才工程,授予“国家级有突出贡献中青年专家”荣誉称号,获得全国优秀科技工作者荣誉称号,获得政府特殊津贴。兼任中国农学会耕作制度分会副理事长、中国作物学会理事、辽宁省作物学会理事长、ANSO-世界黑土联合会中国黑土研究会常务理事、FAO国际黑土保育专家组成员、辽宁省保护性耕作专家组组长、农业农村部东北黑土地保护性耕作行动计划专家组成员、科技部黑土保护与利用重大科技专项专家组成员、农业农村部东北地区节水农业重点实验室主任。多年来一直从事旱地耕作制度创新研究,建立的耕作制度区划新方法、玉米土壤高产耕层构建理论和农田水分周年调控理论均为原创,且处于国际领先水平;先后主持国家各类科研项目30项,取得省部级以上科研成果奖励11项,累计发表学术论文171篇,其中SCI 26篇,为我国旱地农业发展作出了巨大贡献。