

东北地区旱地农业研究进展与发展对策

孙占祥

(辽宁省农业科学院, 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 系统总结了40多年来东北地区旱地农业研究取得的进展,分析了当前东北地区旱地农业面临的问题,揭示了影响东北地区旱地农业生产的气候变化、水分供需、农田侵蚀和面源污染规律,重新制定了东北地区耕作制度区划,突破了一系列旱地农业生产关键技术,形成了多套适合东北不同区域的旱地农业综合技术模式,明确提出了现阶段东北旱地农业所面临的挑战,并指出了未来东北旱地农业的发展对策。

关键词: 旱地农业; 耕作制度; 种植制度; 养地制度; 水肥利用; 粮食安全

中图分类号: S-01 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2022)01-0004-08

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2022.01.002

Research Progress and Development Countermeasures on Dryland Agriculture in Northeastern China

SUN Zhanxiang

(Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang Liaoning 110000, China)

Abstract: This paper comprehensively reviewed the research progress on dryland agriculture in northeastern China, analyzed the issues faced by the dryland agriculture in northeastern China and revealed the pattern of climate change, water supply and demand, farmland erosion and non-point source pollution affecting the dryland agriculture in northeastern China, therefore cropping system regionalization was redesigned, numbers of breakthroughs were made on key technical problems in dryland agriculture production, and several integrated technology modes for dryland agriculture in different part of northeastern China were formed. Challenges for the current development of dryland agriculture in northeastern China were put forward and countermeasures were provided.

Key words: Dryland agriculture; Cropping system; Planting system; Soil-nourishing system; Water and fertilizer utilization; Food security

我国是世界上严重干旱缺水的国家之一,干旱、半干旱面积和没有灌溉条件的旱地耕地面积均超过国土面积和全国耕地面积的1/2^[1]。旱地农业是指在降水入不敷出地区主要依靠和充分利用自然降水及有限灌溉水源进行的农业生产,是雨养农业和补充灌溉农业两种基本生产活动类型的总称,包括了种植业、畜牧业、林果业,以及其他农业生产和经营行业^[2]。旱地农业是全球主要的农业生产方式,占耕地面积的81%。其本质是提高降水利用率和农业水资源利用效率,同时也是我国最主要的农业生产方式之一^[3-4]。

40多年来,辽宁省农业科学院组织全国优势科技力量,连续承担了国家“八五”“十四五”科学技术部、农业农村部等部门下达的旱地农业研究项目(或课题),系统开展了东北地区旱地农业

理论与技术研究,制定了东北地区旱地种植制度区划,突破了多项制约东北旱地农业生产的重大关键技术,形成了多套适宜不同区域的综合技术体系,取得了显著的经济效益、社会效益和生态效益,为我国东北粮仓建设和农业供给侧结构性改革提供了有力科技支撑^[5-6]。

1 东北地区农业基本情况

1.1 东北地区农业自然资源条件

东北地区包括辽宁省、吉林省、黑龙江省和内蒙古自治区东四盟市(呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市),属温带大陆性气候,夏季高温,冬季寒冷,春秋两季短促。全年积温1 500~3 800℃,且由南向北递减。作物多为一年一熟,太阳年总辐射量为410~540 kJ/cm²,年日照时数为2 200~3 000 h。区域年降水量350~1 000 mm,由东向西

收稿日期: 2022-09-30

作者简介: 孙占祥(1967—),男,辽宁新宾人,研究员,博士生导师,主要从事旱地农业和农作制度研究工作。
Email: sunzx67@163.com。

逐渐递减，降水主要集中在农作物生长季节，一般在 6—8 月份，占全年的 60%~65%。区域水资源总量为 1 929.9 亿 m^3 ，在全国属于中等水平，但人均占有量偏低，相当于全国人均占有量的 72.5%。区域年均粮食总产近 1 500 亿 kg ，约占全国粮食总产的 1/4，是我国最大的商品粮生产基地^[7]。全区旱地面积约 1 933 万 hm^2 ，占耕地总面积 70%以上，粮食产量年均 1 100 亿 kg ，占总产的 73%，全国粮食生产大县前 10 名中的 9 个县分布在该区^[8-9]。区域耕地土壤有机质和全氮含量丰富，特别是松嫩平原的黑土，面积达 593.3 万 hm^2 ，黑土层厚达 40~60 cm ，耕层有机质含量为 25~75 g/kg ，全氮含量为 1.5~3.5 g/kg 。东北地区优越的自然资源条件促进了北方旱区农作物光合作用的进行，光合产物积累快，也有利于光合产物向蛋白质、脂类等物质的转化，对于提高农产品品质奠定了较好的基础。同时东北地区辽阔富饶的土地资源，农牧林用地比例比较均衡，不仅蕴藏着丰富的森林资源，而且还有大面积的平原草场，也为农林牧业的协调发展提供了有利的自然条件^[10]。

1.2 东北地区旱地农业生产发展现状

东北地区得天独厚的自然资源条件为旱地农业生产提供了优越条件，但受全球气候变化影响，东北地区气温增暖明显、降水减少、干旱频发的趋势，热量条件对农业生产的限制作用减弱，而水分条件的限制作用增大；另一方面，水热的变化对于农业气象灾害的发生频率及程度也有一定的影响。从农业气象灾害影响程度来看，旱灾在总灾害中所占的比重越来越大。根据 1984 年中国农业科学院组织实施的《北方旱地农业类型分区及评价》已对我国北方旱区类型进行了比较系统的划分，确定东北地区旱地农田多分布于半干旱偏旱区、半干旱区和半湿润偏旱区。同时，受改革开放以来联产承包责任制体制的制约，东北地区旱地农业生产也出现了许多问题：一是主要作物种植区划不明确，作物田间配置不合理，作物产量低而不稳，资源利用效率偏低^[11]；二是土壤耕作方法混乱，旱地保水保肥固土能力下降；三是化肥投入过量，有机肥投入过少，地力持续衰退。解决上述问题，尚有一系列科学难题亟须解决，其中如何制定科学的种植区划、主要作物高产耕

层标准及构建路径、地力提升机理与技术等最为迫切。有效解决上述问题，将对保障国家粮食安全和生态安全具有重要意义^[12]。

2 东北地区旱地农业研究取得的进展

2.1 系统揭示了东北旱地农业若干重大基础规律

为探明影响东北旱地农业生产的关键因素，合理构建适宜区域旱地农业生产的技术模式，辽宁省农业科学院组织了东北地区从事旱地农业研究的多家单位，围绕气候变化、水分供需、农田侵蚀、面源污染规律等方面，通过定位试验观测、大数据分析、模型预测等手段系统揭示了若干重大基础规律，完善了旱地农业研究理论，为关键技术的突破提供了理论支撑。

2.1.1 气候变化规律 调查发现，东北地区年太阳总辐射总体呈现下降趋势(48 $\text{MJ/m}^2 \cdot 10 \text{ a}$)，年平均温度总体呈现上升趋势(0.3 $^\circ\text{C}/10 \text{ a}$)，年降水量总体呈现下降趋势(4 $\text{mm}/10 \text{ a}$)。极端天气持续增加，尤其是旱灾频发，无霜期延长，降水量和日照时数减少且波动性增加。为了探究全球气候给东北地区的春玉米种植带来的影响程度，揭示不同时期玉米品种种植界限的变化特征，并预测 2030 年和 2050 年种植界限的演变趋势，研究团队定量分析了气候变暖对作物种植界限变化的影响程度，并发现不同熟期玉米种植界限表现“北移东扩”趋势，其中早熟品种北移 1.4~2.7 个纬度，中熟品种北移 0.8 个纬度、东扩 1.0 个经度，晚熟品种北移 0.5 个纬度，中熟品种替代早熟品种，玉米单产增加 9.8%，晚熟品种替代中熟品种，玉米单产增加 7.1%；与此同时，采用农业生产系统模型(APSIM)，结合作物亏缺指数(CWDI)干旱指标，解析了区域内不同等级干旱对春玉米产量影响程度，明确了东北地区作物“发生干旱”频率呈现西高东低分布。

2.1.2 水分供需规律 通过与中国农业科学院等单位联合调查发现，1990—2019 年，北方旱农区降水量总体呈减少趋势，其中东北地区减少 44.4 mm ，干旱影响范围、严重干旱和极端干旱发生频率呈上升趋势。30 年间北方旱地主要作物种植生育期变化与降水减少、干旱频发重发多因素互作，作物降水满足率降低超过 5 百分点，旱地作物水分供需矛盾加剧。通过创建综合多目标的随机水文年型适水种植诊断模型，发现多种作物配置能

显著增强旱地农田系统稳定性和水分生产力, 据此明确了玉米、小麦、谷子、花生、大豆、马铃薯等作物在不同旱地类型区的适水配置优先序; 同时, 利用 916 个点、1 345 个试验、5 571 组田间试验数据的系统分析, 发现主要旱地栽培技术措施的水分利用效率提升效应受降水影响显著。秸秆覆盖和秸秆粉碎还田技术在年降水量 450 ~ 600 mm 的旱农区最适; 深松(耕)和有机培肥对作物水分利用效率的提升效应随降水量增加而降低, 年降水量 350 ~ 550 mm 的旱农区技术效果最好, 水分利用效率提升 15% 以上; 免耕技术效应受年降水量和年平均温度双重影响, 在年均温度 > 7 °C 以及年降水量 450 ~ 550 mm 旱农区效果最优; 地膜覆盖适宜于整个北方旱农区, 但随着降水量减少, 水分利用效率提升效应更优^[13-14]。

2.1.3 农田侵蚀规律 通过分析东北风沙半干旱区气候侵蚀力特征, 明确休闲期的冬季和春季农田风蚀量最大, 是防控关键期。种植模式与残茬留存和微地形构造是降低农田风蚀的主要途径, 区域冬季和春季的气候侵蚀力分别占全年的 24.67% 和 51.08%。通过开展秸秆不同留存方式防风蚀效应研究, 明确秸秆留存数量、留茬高度与风蚀量减少呈显著正相关, 且二者交互作用效果更好; 增加残茬高度会增加投影面积指数, 提高风速摩擦力并降低地表风速, 而残茬覆盖还可增加地表覆盖度和土壤湿度以降低农田风蚀^[15]。在玉米/花生间作模式中, 农田 5 cm 表层土壤 > 0.05 沙粒含量相对降低 4.36 个百分点以上, < 0.002 黏粒含量增加 0.56 个百分点以上, 玉米/花生 4 : 4 间作模式下玉米立秆越冬、留高茬、留矮茬较花生单作农田风蚀量分别减少 69.7%、47.4% 和 23.1%; 微地形构造研究发现, 地表起垄构筑微地形构造能够增强土壤对近地面层气流的阻碍作用, 降低近地表风速, 减少地表风蚀, 与平作相比土壤风蚀量降低 52.2%^[16-17]。通过径流小区连续 15 a 土壤侵蚀定位监测研究, 发现影响土壤侵蚀的主要因素为地表径流 > 降雨侵蚀力 > 植被覆盖度, 改造地表微地形控制径流、雨季前深中耕和增加地表覆盖度是减少土壤侵蚀的有效途径^[18-19]; 利用 Fluent 软件建立的微地形构造水分运移模型和利用 Matlab 软件拟合出降水入渗流速方程, 验证表明传统整地

条件下降水渗透到土层 1 m 处所需时间为 1 870 s, 水分渗透平均速度为 0.053 cm/s, 而垄膜沟植(微地形改造)时间为 1 102 s, 速度为 0.091 cm/s, 可有效控制地表径流生成^[20]。同时, 通过在作物生育期中耕可扩大土壤水库库容, 降水入渗率提高 22.70%, 地表径流量减少 31.42%。基于上述研究明确的防控关键期、技术途径和机制, 提出了农田立体防蚀理念, 构建了立体防蚀系统, 丰富了农田防蚀理论。

2.1.4 面源污染规律 通过对辽宁省主要旱地农田氮肥投入量调研, 结合 3 068 个监测点的农田土壤耕层无机氮和剖面土壤硝态氮、周边地下水硝态氮监测结果, 明确了氮素面源污染时空演变规律。研究发现, 土壤硝态氮含量与施氮量密切相关, 并具有表聚现象; 淋溶量与降水存在极显著的正相关关系($y=20.482x-38.008$, $R^2=0.9889^{**}$, $n=32$)。通过对玉米田周边地下水 1 508 样次调查结果分析发现, 地下水硝态氮含量为 7.76 ~ 21.55 mg/L, 其中 28.92% 的地下水硝态氮含量不符合国家饮用水标准。地下水硝态氮含量逐年上升, 其中, 2010 年和 2011 年地下水硝态氮含量超标率分别达到 27.16% 和 30.18%; 小于 30 m 井深硝态氮超标率达 23.47%, 30 ~ 100 m 井深硝态氮超标率为 17.98%。通过对 108 个采样点的设施农田土壤剖面和硝态氮进行监测, 发现设施农田土壤不同剖面硝态氮含量有明显的表聚现象, 且与施氮量密切相关; 对设施农田周边地下水 728 样次调查结果表明, 地下水硝态氮含量范围在 7.14 ~ 44.64 mg/L, 其中 36.54% 的样品地下水硝态氮含量不符合国家饮用水标准; 设施农田周边地下水中硝态氮含量呈逐年上升趋势, 其中, 2010 年和 2011 年超标率达到 36.61% 和 41.07%。地下水井深小于 30 m、30 ~ 100 m 和大于 100 m 硝态氮超标率分别为 45.96%、21.72% 和 2.70%。

2.2 制定了适宜不同地区的耕作制度区划

在东北地区, 土壤退化最为严重的是旱地农业区, 尤其是玉米种植带^[21]。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, 几十年来玉米的生产种植一直采取掠夺式种植方式^[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。

但前人在耕作制度区划上主要依据是作物种植结构及熟制的一致性，难以适应当前种植的需要^[2,23]。从发展趋势来看，现行的耕作制度需要适应农业生产机械化、规模化、精准化生产发展趋势，积极开发多功能、绿色生态新型耕作制度模式与技术，努力构建用养结合、生态高效、生产力持续提升的种植制度与养地制度^[23]。考虑到气候变化、立地条件和社会经济发展的影响，2002年起辽宁省农业科学院组织国内优势力量，在国家相关项目资助下，在东北4个省市的7个长期定位试验站和14个试验示范点开展了为期14a的联合攻关，围绕提高旱地生产力这一主线，以旱地耕作制度创新为核心，并依托气候变化对玉米种植区划影响的结果，系统分析了东北地区1978年以来耕作制度演变规律^[23]，采用FAO推荐的作物生产潜力法和FSD研究方法，重新制定了东北地区耕作制度区划^[24-26]。一级区为6个，分别是松辽平原农林牧主产区、东部山地纯林区、北部山地丘陵纯林区、呼伦贝尔农林牧结合区、蒙东辽西北半干旱农林牧结合区和辽东沿海城乡一体化渔业主产区；并采用因子分析方法，提出了东北地区产业和优势作物发展战略优先序和技术优先序，明确了玉米、水稻、大豆、油料作物、烟草、蔬菜、水果等作物优势产区，确定了农业主产区与次产区、林业主产区与次产区、牧业主产区与次产区、渔业主产区与次产区等优势产业区域划分。研究结果更好地突出了我国东北旱地耕作制度区域特征，优化了农业种植结构，为区域耕作制度关键技术创新指明了方向，同时为农业结构调整与布局优化提供较为准确的科学依据。

2.3 突破了一系列重大关键技术

在揭示的若干重大基础规律和制定东北地区新的耕作制度区划基础上，辽宁省农业科学院牵头组织东北地区从事旱地农业科学研究的多家科研院所和高等院校，围绕国家重大需求和旱地农业科技前沿，创新了资源高效型种植技术、地力保育型种植技术、水肥高效利用技术和农田防蚀技术等一系列重大关键技术，有效提升了我国旱地农业技术自主创新水平。

2.3.1 资源高效型种植技术 通过多年定位研究，在东北地区研发了以禾本科作物与豆科作物间作

轮作、玉米田间配置优化等为主的种植技术，建立了适合东北旱区不同类型区资源高效型的种植制度，既实现了耕地用养结合，又为绿色生产提供了科技支撑。其中，在北部高寒地区，确定了玉米—大豆合理轮作种植技术，并突破了以原垄卡种为核心的配套技术体系，玉米轮作大豆，可以使大豆平均产量增加9.01%，大豆轮作玉米可以使玉米产量增加7.19%；在中部平原地区，针对玉米中密品种和耐密品种的植株特性，通过调整作物田间配置，明确了不同类型玉米品种田间最佳配置模式和适宜种植密度，中密型品种种植模式以三比空变株距和大垄双行等株距为最佳，适宜种植密度为57 000株/hm²，耐密型品种种植模式以大垄双行等株距为最佳，适宜种植密度为72 000株/hm²；在西部生态脆弱区，建立了仁用杏/花生、仁用杏/谷子、仁用杏/甘薯3种间作种植模式。明确了最佳带宽为4.5m，即仁用杏行距为4.5m，行间种植6行作物，作物行距为0.5m，各模式的土地当量比(LER)分别为1.34、1.44、1.33，农田生产力提高30%以上，风蚀降低31%以上；同时，针对农田风蚀严重的问题，创制了玉米(谷子)/花生间作不同田间配置种植技术^[27-28]。其中最具有代表性的模式为玉米丛播间作花生1垄:3垄的种植模式，该模式农田风蚀降低26.38%~45.40%，土地当量比和水分当量比平均达到1.24和1.30^[29]。

2.3.2 地力保育型耕作技术 选取位于黑龙江八五三农场、吉林公主岭、辽宁昌图和辽宁阜新4个长期定位试验，围绕白浆土、黑土、棕壤和褐土等四种东北地区主要土壤类型，经过多个轮耕周期的田间验证和优化，首次系统提出了基于土壤理化性状的高产耕层标准参数阈值，并确定了构建高产耕层的配套耕法，填补了合理耕层构建参数量化研究的空白。其中白浆土为3a三段式犁耕作(深度为35~40cm)+旋耕；黑土为连年行间条带深松，即在大垄双行种植模式(宽行90cm，窄行40cm)中的宽行结合追肥进行深松(深松深度25~30cm，幅宽40~45cm)，秋收时苗带窄行留高茬(40cm左右)自然腐烂还田；棕壤为隔年全方位深松(深度为25~30cm)+旋耕；褐土为交替互换行间局部深松，即以行间(50cm)为一个深松耕作区，隔年轮换，深松深度为25~30cm。在此基

基础上,明确了黑土、棕壤和褐土 3 种土壤类型的秸秆还田方式、周期、还田量和施氮量。其中黑土为秸秆粉碎条带深松连年还田方式,秸秆量为 $9\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ +氮肥量 $300\ \text{kg}/\text{hm}^2$,产量平均增加 13.59%以上,粉碎还田能够降低土壤硬度(降低 10%~13%),降低土壤呼吸(降低 21.35%~42.92%),调节土壤三相比,有机质提高 22.63%~31.39%,速效养分增加 6%~23%;棕壤为留高茬深旋耕连年还田方式,还田量为 $6\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ +氮肥量 $420\ \text{kg}/\text{hm}^2$,产量增产 23.15%;褐土为粉碎深翻隔年还田方式,还田量 $9\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ +氮肥量 $420\ \text{kg}/\text{hm}^2$,产量增加 26.42%。并开展了有机无机配施技术研究,建立了黑土、棕壤和褐土玉米高产施肥模型。其中黑土: $\text{N}\ 210\ \text{kg}/\text{hm}^2 + \text{P}_2\text{O}_5\ 75\ \text{kg}/\text{hm}^2 + \text{K}_2\text{O}\ 90\ \text{kg}/\text{hm}^2 + \text{有机肥}\ 24\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$,棕壤: $\text{N}\ 240\ \text{kg}/\text{hm}^2 + \text{P}_2\text{O}_5\ 90\ \text{kg}/\text{hm}^2 + \text{K}_2\text{O}\ 105\ \text{kg}/\text{hm}^2 + \text{有机肥}\ 30\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$,褐土: $\text{N}\ 240\ \text{kg}/\text{hm}^2 + \text{P}_2\text{O}_5\ 120\ \text{kg}/\text{hm}^2 + \text{K}_2\text{O}\ 120\ \text{kg}/\text{hm}^2 + \text{有机肥}\ 37\ 500\ \text{kg}/\text{hm}^2$,与单施化肥处理相比,3 种土壤类型玉米均表现为增产,增产范围达到 5.42%~11.19%。

2.3.3 水肥高效利用技术 由于我国北方旱作农田分布较广,农业生产条件在地区间差异较大,加之农业发展不均衡,导致水肥研究本身充满复杂性^[30]。为进一步提高东北地区旱地作物水肥利用效率,通过多年定位研究,创新突破了作物间作和地表覆盖等水肥高效利用关键技术。

其中玉米/花生窄幅间作最佳比例为 4:4 垄、玉米/花生宽幅间作适宜比例为 8:8 垄、谷子/花生间作最佳间作模式为 2:4 垄^[31]。对间作物种间地下部互作机制研究发现,间作可协调根系在土壤中的纵向分布,提高土壤水分养分有效系数,同时还可加大横向根系与土壤水分养分“重心”的偏离度,在土壤中形成水分、养分梯度,促进作物种间水分和养分横向流动,并改善作物根系性状,提高土壤中水、肥生物有效性。同时玉米/花生间作还能降低花生“氮阻遏”现象,提高生物固氮效率,减少化肥氮投入量,并提高玉米收获指数^[32]。

旱地秋覆膜技术在秋季作物收获后进行整地和覆膜处理,以“秋雨春用、春墒秋保”为目标,通过减少秋、冬、春 3 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。经研究表明,在干旱年份秋覆膜处理显著高于不覆膜处理,较不覆膜处理的籽粒产量水分利用效率提高了 60%,生物产量水分利用效率提高了 65%,同时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,2 a 氮肥累积利用效率达到了 50.5%^[33-34]。

垄膜沟播覆秸秆技术是集垄沟种植、垄面覆膜抑蒸集雨、宽窄行种植技术于一体,将有限的降水尽量保留和集中到沟内种植区,尤其使小于 10 mm 的无效或微效降水能很快形成径流贮存到膜下作物根部,使降水在农田内就地实现空间再分配,集水功能明显提高,增加土壤含水率,促进养分有效化,具有增温、保墒、集雨作用。同时有利于作物通风透光,充分发挥边行优势,达到提高降水资源利用率和作物产量目的。

2.3.4 农田防蚀技术 依据提出的农田立体防蚀理念,针对农田风蚀问题,利用生物多样性原理,建立了经济林/花生、经济林/谷子、玉米/花生、谷子/花生等间作防风蚀种植模式。明确了林果种植最佳带宽为 5 m,中间种植 8 行花生,行距为 0.5 m,风蚀降低 46%,总截光率比纯林提高 54%,比作物单作提高 23%;玉米/花生窄幅间作 4:4 垄、宽幅间作 8:8 垄,谷子/花生间作 2:4 垄,结合残茬覆盖农田风蚀量减少 43%。同时,基于多年定位监测数据,建立了风蚀量与垄底宽度、起垄高度的回归模型,确定垄底宽度 24 cm、起垄高度 11 cm、沟垄宽幅比为 2.13 时,风蚀量最小,具有防蚀、增产和便于机械作业的效果。采用二次回归通用旋转组合设计明确了留茬高度和秸秆覆盖量对风蚀量有显著影响,当留茬高于 18.0 cm、秸秆覆盖量大于 $1\ 000\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时,土壤风蚀量降幅达 54%以上(常规耕作的风蚀量为 $15.75\ \text{t}/\text{hm}^2$)。利用建立的风蚀量与留茬高度和秸秆覆盖量的回归模型,明确当留茬高度为 3.9 cm、秸秆覆盖量为 $4\ 255.5\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时,农田土壤风蚀量最小,仅 $0.45\ \text{t}/\text{hm}^2$ 。基于上述研究,构建了地上、地表、地下(耕层)协同综合防蚀系统,即采用作物间作种植方式,建立地上防风蚀屏障;通过构筑高垄台改变微地形,结合地膜、秸秆覆盖等措施,建立地表风蚀水蚀防控结构;利用土壤耕作技术,结合秸秆还田等培肥措施,扩大土壤水库

库容，建立地下防水蚀耕层。最终实现农田地上、地表、地下联合协同防控风蚀、水蚀，突破了旱地农田防蚀增效关键技术。

2.4 研究集成了多套旱地农业综合技术体系

经过多年的研究，集成了多套适合东北不同区域的旱地农业综合技术体系，实现了核心技术与配套技术的有机结合，取得了显著的经济、生态和社会效益。

2.4.1 东北北部粮豆轮作综合技术体系 以原垄卡种技术为核心，以玉米大豆合理轮作、秸秆还田为重点，集成了品种选择、少免耕、留茬还田等技术，实现了节本增效和粮食增产。玉米轮作大豆，可以使大豆平均产量增加 9.01%，降低成本 831.30 元 /hm²；大豆轮作玉米可以使玉米产量增加 7.19%，降低成本 976.8 元 /hm²。土壤有机质增加 3.81%，速效氮增加 42.31%，速效磷增加 23.33%，速效钾增加 29.27%。

2.4.2 东北中部局部深松综合技术体系 以条带宽幅深松耕作技术为核心，以大垄双行、中耕深松追肥、高留茬还田等为重点，集成了品种选择、缩距增密、苗带重镇压等技术，实现了粮食增产和地力保育。提高了玉米的边行优势，优化了群体结构，使功能叶片(棒三叶)光截获量提高 9.30%，叶绿素含量提高 12.49%，净同化率提高 25.89%，产量增加 6.51%。

2.4.3 东北中南部有机无机配施综合技术体系 以有机无机配施技术为核心，以大垄双行等行距、三比空缩距增密、秸秆还田等为重点，集成了品种选择、高产耕层构建等技术，实现了粮食增产和资源循环利用。增产范围达到 5.42%~11.19%；有机质含量提高 7.26%~9.51%；增加 0.05~0.25 mm 粒级的微团聚体数量，改善土壤微团聚体组成；速效磷和速效钾可分别提高 56.47%~58.05% 和 26.85%~29.79%。

2.4.4 东北西部间套作综合技术体系 以果粮间作和豆科与禾本科间作技术为核心，以田间优化配置、生物固氮、年际间轮作等为重点，集成了品种选择、缩距增密、氮肥减施等技术，实现了粮食稳产和资源高效利用。土地当量比(LER)分别为 1.34、1.44、1.33，农田生产力提高 30%以上，风蚀降低 31%以上。

2.4.5 东北蒙东南田间优化配置综合技术体系 以田间优化配置技术为核心，以大豆垄三种植、玉米大垄双行种植、补充灌溉等为重点，集成了品种选择、合理密植、培肥地力、地膜覆盖等技术，实现了粮食增产和生态改善。作物产量提高 6%以上，土壤有机质提高 7%以上，水分利用效率提高 1.80 kg/(mm·hm²)以上。

2.4.6 东北风沙半干旱区立体调控种植技术体系 在年降水 350~450 mm 的辽西褐土和棕壤旱地，针对干旱发生频率增加、土壤风蚀严重、单一种植稳定性差等问题，以玉米(谷子)花生间作、高留茬覆盖、年际换位交替间隔深松为核心，配套集成适水密植、沟垄种植、秸秆条带还田等技术，研发了垄膜沟植播种机、秸秆间隔条带还田机和深松联合整地机等专利技术装备，制定了玉米花生间作防风蚀种植、玉米贴茬少耕种植等技术标准，玉米(谷子)花生间作结合残茬覆盖的农田水分利用效率提高 14%~19%，农田风蚀和水蚀量降低 36%~43%，水分利用效率从 28.35 kg/(mm·hm²)提高到了 33.75 kg/(mm·hm²)。

2.4.7 东北半干旱区稳产增效复合种植轻简化技术体系 针对东北半干旱区“十年九旱”及粮食稳产性差、资源利用效率不高等农业生产突出问题，集成了以玉米/花生、玉米/大豆等禾本科豆科间作和仁用杏/谷子、仁用杏/花生等农林间作为主导的资源高效型复合种植制度与模式，集成了以田间配置、带状分区水肥管理、秸秆留存防风蚀、农机农艺融合等关键技术，以品种选择、土壤耕作、年际间轮作等为配套技术的稳产增效轻简化综合技术体系。光能利用效率提高 18.4%，水分利用效率提高 19.2%，氮肥利用率提高 6.4 百分点，土壤水稳性大团聚体增加 27.9%，生产能力提高 20%，作物稳产率提高 8.7 百分点。

2.4.8 辽西半干旱区秸秆覆盖少免耕保护性耕作技术体系 针对辽西干旱区存在的水量少、旱灾频发、风蚀沙化严重、土壤瘠薄等问题，集成了以玉米秸秆全覆盖还田免耕二比空种植、保护性耕作浅旋少耕、苗带年际互换耕作栽培等关键技术为核心，以种子包衣、缓释肥减量施用、病虫害迁移防控、全程机械化等为配套技术的综合技术体系，并制定了技术标准。通过大面积应用显示，该技术体

系可减少农机进地作业 2 次, 节本增效 600 元 / hm^2 , 减少 CO_2 排放 16.9%, 土壤风蚀降低 92%。

3 东北地区旱地农业面临的挑战

东北地区是我国唯一的“黄金玉米带、黄金大豆带、优质粳稻产区、优质花生产区”^[35]。但现阶段, 我国东北地区传统生产的高投入、高产出的集约化模式加剧了生态环境质量压力, 已成为农业可持续发展的关键制约因素。具体表现在以下几个方面: 一是缺乏科学耕作制度区划。受国家政策导向影响和经营主体逐利驱动, 主要作物越区、跨区种植现象普遍, 导致作物生产灾害频发、产量不稳、品质不高等问题突出。二是黑土地退化严重。对耕地长期高强度利用导致耕地变“瘦”(土壤有机质含量下降)、变“薄”(风蚀沙化、水土流失严重)、变“硬”(土壤机械压实、渗透性降低)。据相关部门监测, 东北地区耕层土壤有机质平均含量 26.7 g/kg, 与 30 年前相比降幅达 31%; 黑土层由 50 ~ 100 mm, 减少到 15 ~ 50 mm, 平均每年减少 2 mm; 土壤总孔隙度由 67.9% 下降到 52.2%, 容重由 1.12 g/cm^3 增加到 1.38 g/cm^3 , 作物产量不稳、耕地难以为继。三是水资源短缺问题日益突出。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, 加速了水资源过度消耗, 生态危机凸显。四是气候变化敏感, 旱灾频发。据统计, 近 10 年来, 全国平均每年旱灾发生面积 0.27 亿 hm^2 左右, 是 20 世纪 50 年代的两倍以上, 平均每年成灾面积 0.13 亿 hm^2 以上, 因旱损失粮食平均每年 300 亿 kg 以上, 约占同期粮食总产量的 6%, 如何应对大范围、长时间的旱情已成为保证粮食和农业生产的突出问题。因此, 如何协调农业增产、农民增收和资源持续高效利用、环境保护等突出矛盾, 对现代东北旱地农业发展提出了挑战。东北旱区的持续发展永远在路上, 不同地区的资源禀赋决定了其耕作制度模式, 不同耕作制度对其所处区域的影响是决定性的。新时期已经到了必须创新、调整、优化、重新构建的关键阶段, 关系到我国能否实现粮食增产、节能减排、资源高效利用、碳达峰碳中和、耕地可持续利用等等, 应考虑建立以粮食高产出、产品质量安全、资源利用合理、生产生活环境良好等多目标协同的新型耕作制度, 从源头破解难题。

4 东北地区旱地农业发展对策

发展东北旱地农业一定要提认识到东北旱地农业在国家粮食安全和农业发展大局中的重要性和战略地位。我国东北地区旱地农业面积大, 范围宽, 类型多样, 关键技术应有层次和区域性。在一定意义上讲, 粮食生产的差距在旱区, 增产的潜力在旱区, 粮食上新台阶旱区肩负重要职责。同时要加快旱地农业现有科技成果和适用技术转化与扩散, 科研、教学单位和技术推广部门要密切联合, 通力协作, 切实组织科技力量, 因地制宜地选择一些投资少、见效快、效益高的科技成果及与其相适应的技术推广。把科技成果和适用技术尽快转化为生产力, 促进北方旱地农业持续稳定发展。

与此同时, 要探索一条适宜东北旱区发展的新途径, 要立足耕作制度改革, 深入开展“作物-资源-管理”协调机制研究, 量作物与环境互作关系, 从微观上阐明耕作制度构建的机理; 利用大数据和现代农业信息技术, 探明产量、品质、资源、减排等目标间的关联机制, 建立多目标协同的精准评价体系, 实现多目标融合发展; 创建集多目标评价于一体的耕作制度区划新方法, 重塑适应新时代的耕作制度区划。通过重新制定东北旱区区划, 构建绿色种植制度、绿色养地制度和种养循环农作模式等, 促进农牧结合, 实现农林牧综合发展。东北旱区产业作物优化应包括种植业结构、畜牧业结构、林业生态结构及非农产业结构, 以便形成“两高一优”农业综合发展指标。探索东北旱区农业发展的新路径, 推动区域农业发展新格局, 实现东北旱区农业绿色发展。

在未来, 旱地农业的科学研究将继续成为支撑我国农业发展的重要技术领域^[36]。要开创现代旱作农业发展的新局面, 为保障国家粮食安全、加快发展现代农业作出新的更大的贡献。

参考文献:

- [1] 龚道枝, 郝卫平, 王庆锁, 等. 中国旱作节水农业科技进展与未来研发重点[J]. 农业展望, 2015, 11(5): 52-56.
- [2] 陈俊华, 杨兴礼, 岳云华. 以色列种植业结构的演变及原因探析[J]. 干旱地区农业研究, 2000(1): 129-134.
- [3] 张金鹤. 旱作节水农业制约因素及对策研究[J]. 河北农机, 2021(6): 12-13.
- [4] 王向丽, 魏 巍. 保护性耕作与有机旱作农业[J]. 当代

- 农机, 2020(9): 77-79.
- [5] 梅旭荣, 张燕卿, 王庆锁, 等. 旱地农业研究支撑我国农业发展[J]. 中国农业科学, 2007, 40(增刊1): 307-310.
- [6] 孙占祥, 白伟. 农作制度创新破解农业供给侧结构性改革[C]//中国农学会耕作制度分会. 中国农学会耕作制度分会 2018 年度学术年会论文摘要集. [出版者不详], 2018: 8.
- [7] 李祎君, 吕厚荃. 气候变化背景下农业气象灾害对东北地区春玉米产量影响[J]. 作物学报, 2022, 48(6): 1537-1545.
- [8] 孙占祥, 郑家明, 白伟, 等. 东北地区现代农业发展现状及策略[C]//中国农学会耕作制度分会. 中国农作制度研究进展 2010. 济南: 山东科学技术出版社, 2010: 45-50.
- [9] 梁爱珍, 张延, 陈学文, 等. 东北黑土区保护性耕作的发展现状与成效研究[J]. 地理科学, 2022, 42(8): 1325-1335.
- [10] 孙占祥, 米铁红. 我国北方旱农地区耕作制度的现状与发展[J]. 辽宁农业科学, 1998(4): 26-29.
- [11] 孙占祥. 改革耕作制度, 推动东北地区农业绿色发展[J]. 民主与科学, 2021(6): 26-28.
- [12] 孙占祥. 供给侧结构调整与农作制度创新[J]. 新农业, 2016(22): 20-23.
- [13] 孙占祥, 郑家明, 冯良山, 等. 辽西半干旱地区主要作物耗水规律及水分利用评价[C]//2009 年中国作物学会学术年会论文摘要集. [出版者不详], 2009: 45.
- [14] 杨宁, 孙占祥, 郑家明, 等. 东北半干旱区主要气象因子变异特征及其对作物需水耦合度的影响[C]//中国农学会耕作制度分会. 中国农作制度研究进展. 济南: 山东科学技术出版社, 2010: 794-799.
- [15] 颜景波, 王慧新, 韩志松, 等. 风沙半干旱区风沙土防风蚀技术研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(5): 2831-2833.
- [16] 高砚亮, 孙占祥, 白伟, 等. 玉米花生间作效应研究进展[J]. 辽宁农业科学, 2016(1): 41-46; 2.
- [17] 向午燕, 孙占祥, 冯良山, 等. 玉米花生间作作物光合生理响应机制[J]. 辽宁农业科学, 2017(5): 44-47.
- [18] 冯良山, 孙占祥, 肖继兵, 等. 辽西地区微集水不同覆盖方式对玉米生长发育的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 118-121; 143.
- [19] 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. 中国农作制度研究进展. 济南: 山东科学技术出版社, 2010: 729-733.
- [20] 冯良山, 孙占祥, 肖继兵, 等. 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.
- [21] 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.
- [22] 山仑. 旱地农业技术发展趋向[J]. 中国农业科学, 2002(7): 848-855.
- [23] 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.
- [24] 刘巽浩. 农作制度与中国农作制区划[J]. 中国农业资源与区划, 2002(5): 14-18.
- [25] 陆洲, 秦向阳, 李奇峰, 等. 量化分析支持下全国耕作制度区划方法预研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(5): 86-91.
- [26] 周立三. 试论农业区域的形成演变、内部结构及其区划体系[J]. 地理学报, 1964(1): 14-24.
- [27] FENG CHEN, SUN ZHANXIANG, ZHANG LIZHEN, et al. Maize/peanut intercropping increases land productivity: A meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2021, 270: 108208.
- [28] ZHANG YUE, SUN ZHANXIANG, SU ZHICHENG, et al. Root plasticity and interspecific complementarity improve yields and water use efficiency of maize/soybean intercropping in a water-limited condition[J]. Field Crops Research, 2022, 282: 108523.
- [29] ZOU XIAOJIN, LI HAOGUO, SUN ZHANXIANG, et al. Interspecific facilitation between intercropped millets and peanuts insights from root proteomics analysis[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2019, 70: 234-243.
- [30] 山立, 邹宇锋. 我国旱区农业的地位和发展潜力及政策建议[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(4): 425-430.
- [31] 冯良山, 孙占祥, 郑家明, 等. 不同水肥条件对间作花生和谷子水分养分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 24-29.
- [32] 蔡倩, 孙占祥, 王文斌, 等. 辽西半干旱区玉米大豆间作对作物产量及水分利用的影响[J]. 中国农业气象, 2022, 43(7): 551-562.
- [33] 张哲, 张旭, 冯良山, 等. 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.
- [34] 冯晨, 孙占祥, 郑家明, 等. 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.
- [35] 王淑华, 洪岩, 杨柳河. 东北农业发展的自然区位优势[J]. 黑龙江农业科学, 2008(5): 136-138.
- [36] 孙炜琳, 王瑞波, 姜茜, 等. 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.