唐建昭,柏会子,张新军,等.覆膜穴播在麦类作物生产中应用的研究进展[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(3):1-9.

Tang J Z, Bai H Z, Zhang X J, et al. Research progress and development prospect of application of film mulching combined with hole sowing for wheat crops production[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(3):1-9.

doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202409039

覆膜穴播在麦类作物生产中应用的研究进展

唐建昭[1],柏会子[1],张新军[2],曹丽霞[2],黄鑫亮[3],王振宇[4],温进玉[4],牛秀芬[4],郭风华[1],周海涛[2*]

(1.河北省科学院 地理科学研究所/河北省地理信息开发应用技术创新中心,河北 石家庄 050011;
2.张家口市农业科学院,河北 张家口 075000;3.河北师范大学 地理科学学院,河北 石家庄 050024;
4.中国人民政治协商会议尚义县委员会,河北 张家口 075000)

摘　要:覆膜穴播技术具有适应范围广、增产幅度大、经济效益高等特点,对保障粮食安全具有重要意义。本文系统综述了覆膜穴播技术在麦类作物生产中应用的发展历程、增产机理及发展前景。近几十年来覆膜穴播技术经历试验—改良—成熟3个阶段,研究内容从增产效果量化转变为增产机理揭示,研究层次从农田宏观结构逐渐深入至作物微观层面。覆膜穴播技术起源于20世纪60年代,于20世纪70年代末引入中国;20世纪80年代是覆膜穴播技术快速发展阶段,该时期覆膜穴播技术的研究主要集中在技术层面的改良;20世纪90年代覆膜穴播技术逐渐完善,同时该阶段在麦类作物生产中得到应用,该时期开始探索覆膜穴播技术增产机理,如应用该技术显著增加麦类作物有效分蘖、成穗数和穗粒数;进入21世纪后,覆膜穴播技术广泛应用,同时其增产机理进一步明确,覆膜穴播技术主要通过改善植株生长状况、提高土壤水分含量、优化群体结构和提升群体光合效率等方面提升作物产量。尽管覆膜穴播技术在麦类作物生产中得到广泛应用,但其在极端环境中的应用效果有待进一步评价;其次,该技术使用过程复杂繁琐,对人工素质要求高,缺乏统一标准;此外,覆膜穴播技术缺乏种植模型,无法动态高效评价单一参数变化对整体的影响。未来,应基于区域差异和生产目标,重点开展以下三方面研究:第一,评价覆膜穴播技术在极端环境中的应用效果;第二,利用区域试验大数据,开展与品种、施肥和灌溉的耦合研究;第三,改善地膜材料,降低环境污染和资源浪费。该研究为覆膜穴播在麦类作物生产应用中提供科学参考,在提高麦类作物产量和保障粮食安全方面具有重要意义。

关键词:麦类作物; 覆膜; 穴播; 播种密度; 播期; 品种

中图分类号:S512.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)03-0001-09

Research progress on the application of plastic film mulching with hole-sowing in wheat crops production

Tang Jianzhao[1], Bai Huizi[1], Zhang Xinjun[2], Cao Lixia[2], Huang Xinliang[3], Wang Zhenyu[4], Wen Jinyu[4], Niu Xiufen[4], Guo Fenghua[1], Zhou Haitao[2*]

(*1.Engineering Technology Research Center, Geographic Information Development and Application of Hebei, Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050011, China; 2.Zhangjiakou Academy of Agricultural Sciences, Zhangjiakou 075000, China; 3.College of Geography Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 4.Shangyi County Committee of The Chinese People's Political Consultative Conference, Zhangjiakou 075000, China*)

Abstract: The plastic film mulching with hole-sowing technique is characterized by its wide adaptability, significant yield increase, and high economic benefits, playing a crucial role in ensuring food security. This paper systematically reviewed the de-

收稿日期:2024-09-20　　**修回日期**:2025-03-05
基金项目:河北省科学院科技计划项目(24101)
作者简介:唐建昭(ORCID:0009-0003-6387-5058),研究员,博士,研究方向:作物系统模拟
*通信作者:周海涛,研究员,E-mail: zht0206@163.com

velopment history, yield-increasing mechanisms, and future prospects of this technology in wheat crop production. Over the past few decades, the technique has evolved through three stages: experimentation, improvement, and maturity, with research shifting from quantifying yield effects to uncovering underlying mechanisms and progressing from macro-field structures to micro-crop level. The technology originated in the 1960s and was introduced to China in the late 1970s. The 1980s marked a rapid development stage, with research primarily focused on technical refinements. By the 1990s, the technique became more refined and was applied in wheat production, with studies beginning to explore its yield-increasing mechanisms, such as significantly increasing effective tillers, spike numbers, and grain per spike. Since the 21st century, the technology has been widely used, and its yield-increasing mechanisms have been further clarified, including improved plant growth, increased soil moisture retention, optimized population structure, and improved photosynthetic efficiency. Despite its widely used, the effectiveness of plastic film mulching with hole-sowing in extreme environments requires further evaluation. Additionally, the technique involves complex and labor-intensive processes with high skill requirements and lacks standardized protocols. Furthermore, the absence of a planting model limits dynamic and efficient assessment of how individual parameter changes affect overall performance. Future research should focus on the three key areas based on regional differences and production goals: 1) Evaluating the technology's performance in extreme environments; 2) leveraging large-scale regional trial data to study its interactions with crop varieties, fertilization, and irrigation; 3) improving film materials to reduce environmental pollution and resources waste. This study provides a scientific reference for the application of film mulching with hole sowing technology in wheat crops production, offering significant implications for improving wheat crops yields and ensuring food security.

Keywords: Wheat crops, Film mulching, Hole sowing, Sowing density, Sowing date, Varieties

麦类作物主要包括小麦、燕麦、大麦和黑麦等[1]。麦类作物生产对保障我国粮食安全具有重要意义,以小麦为例,小麦是世界范围内种植最为广泛的粮食作物之一,消费量占全球谷物总消费量的三分之一左右[2]。中国小麦生产、消费和进口量均居全球首位,总播种面积和总产量分别占全国粮食总播种面积和总产量的25%和22%左右[3]。中国水资源和耕地资源短缺,在有限的水土资源条件下提高麦类作物产量是促进我国农业可持续发展的重要途径。

旱作农业是干旱半干旱地区农业的主要形式,前人研究表明旱地面积占我国耕地总面积的50%左右,提升旱地粮食总产对保障我国粮食安全具有重要意义[4]。旱作农业发展的本质目的是提高水资源利用效率及协调水热资源同步性,使土壤环境产能得到补偿和良性循环[5]。覆膜穴播是中国旱地农业的一项重要创新技术,其集成降低土壤蒸发、集雨、保护性耕作和调节土壤温度等多种技术于一体,可有效解决旱作麦类作物产量低且不稳的问题[6],前人研究表明覆膜穴播条件可使旱地小麦增产40%以上[7]。因此,推广麦类作物覆膜穴播技术对保证其高产稳产具有重要意义。

当前,麦类作物覆膜穴播技术已在甘肃、宁夏、内蒙古、山西和陕西等地区广泛应用,然而由于区域环境、作物品种和管理措施等的差异,覆膜穴播技术的增产效果、增产机理及改进方向等不尽相同。因此,本文系统综述了覆膜穴播技术在麦类作物生产应用中的发展历程、构建方法、增产机理和未来发展方向,以期为通过覆膜穴播技术提高麦类作物生产的资源利用效率提供科学参考,并为新一代覆膜穴播技术的构建提供借鉴。

1 覆膜穴播发展历程和构建方法

覆膜穴播技术由地膜覆盖技术演变而来,地膜覆盖技术起源于20世纪50年代[8],随着地膜覆盖栽培技术研究的逐步深入,20世纪60年代开展了覆膜穴播的研究,该阶段国外主要应用于蔬菜栽培,如1961年Hunt[9]开发了一种精密播种蔬菜的穴播播种机。20世纪70年代以后国外开始应用到玉米、棉花等其它作物生产[8],但在麦类作物生产方面应用较少。中国于20世纪70年代首次引进此技术,该阶段主要试验内容为覆膜对土壤水分、土壤温度和作物生长的影响,随后经历十余年的发展至20世纪80年代末,在麦类作物生产中开始应用,该阶段开展的研究主要为验证覆膜穴播技术增产效果,如总结覆膜穴播条件下作物产量提升程度[10](图1)。20世纪90年代,大量学者围绕覆膜穴播技术的改良和增产机理开展研究,如提出覆膜穴播改良的关键在于"精量稀播"和探究覆膜穴播技术对小麦的增产机理[11-12],并指出应用该技术显著增加麦类作物有效分蘖、成穗数和穗

粒数[13],该阶段是覆膜穴播技术逐渐完善和成熟阶段(图1)。进入21世纪后,覆膜穴播技术研究进一步深入,同时其增产机理进一步明确,覆膜穴播技术主要通过提高有效分蘖数、改善土壤物理性质、调节土壤水热条件和提升光合效率等方面提升作物产量[14-16]。该阶段另一主要研究方向为结合数学方法构建覆膜穴播模型[17],构建模型为系统全面研究覆膜穴播技术提供有效工具(图1)。近十几年,覆膜穴播技术在麦类作物生产应用中更加广泛,并通过分析覆膜穴播麦类作物的干物质积累特征、生育期耗水特征和资源利用效率等进一步揭示麦类作物增产机理[18-20](图1)。总之,近几十年覆膜穴播技术经历试验-改良-成熟3个阶段,研究内容从量化产量提升程度转变为揭示增产机理,研究层次从农田宏观结构逐渐深入至作物微观层面。目前覆膜穴播技术相关研究主要集中在我国干旱半干旱地区,随着研究的深入和细化,覆膜穴播技术将会有更广阔的发展前景。

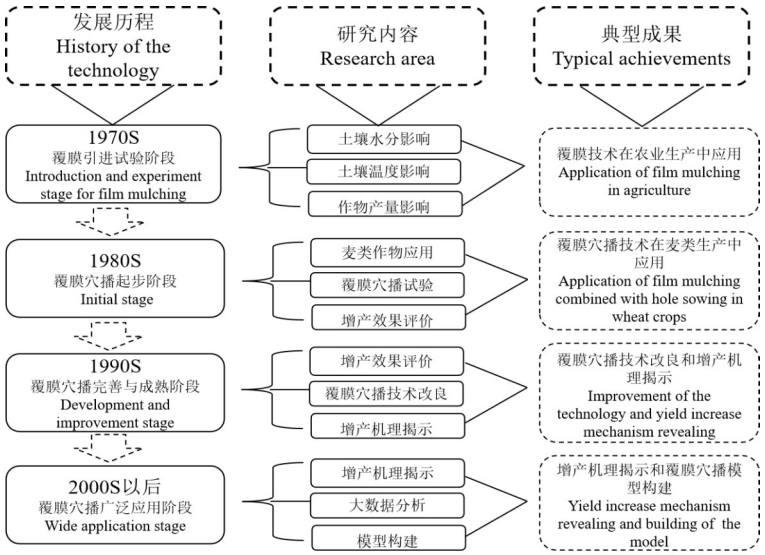

图1　覆膜穴播技术发展历程图

Fig.1　The development process of film mulching with hole-sowing

覆膜穴播构建包括播前准备、选定种子、确定播期、确定播种密度、选择覆膜时间和制定田间管理措施等(图2)。选择适宜地块是成功应用覆膜穴播技术的关键,理想地块应富含有机质、肥力中等偏上、地势平坦且无杂草。地块播前灌水后及时整地,确保土地平整细碎,以提高播种和覆膜的质量[12]。种子选择应注重质量[21],麦类作物选种过程应细致认真,宜选择抗旱、抗病、生育期较长的大穗型高产品种的种子,从而降低环境干扰,充分发挥地膜覆盖的增产效果。覆膜条件下农田土壤普遍增温0.5~3 ℃,导致麦类作物生育期提前[22],因此相比于当地常规播期,覆膜穴播条件下播期应适当延迟,不同品种的播期一般应推迟10 d左右。确定适宜种植密度是应用覆膜穴播技术另一关键因素,研究表明覆膜穴播有效促进分蘖[14-16],因此为优化群体结构需在播种期控制好每公顷播量和穴播粒数。通常,覆膜穴播条件下每公顷播量应低于常规播量,以小麦为例,每公顷播量应控制在225 kg左右,穴播粒数在6~15粒,具体粒数应视小麦品种而定,每公顷保苗300~450万株[23]。行距和穴距应基于地膜宽度进行适当调整,例如地膜宽度为80 cm,应种植5行左右,行距15~20 cm,穴距10~15 cm,每公顷37.5万穴,每穴平均8~10粒;当地膜宽度达到1.4 m,每幅地膜可播种7行,行距为20 cm,穴距为15 cm,每公顷约37.5万穴,每穴平均6~8粒。通常,冬小麦行距、穴距低于春小麦,窄覆膜行距、穴距低于宽覆膜[24]。采用机械播种时,应注意播种方向为机器标识前进方向,行进速度匀速适中,保证落籽数量均匀适量。在播种完成后应检查播量和每穴籽粒数是否符合标准。覆膜时间应基于地区特性和应用品种的最适播期确定,膜与膜间隙应控制在20 cm,

采用直压式压膜,每幅膜两边各压膜10 cm,覆膜时保证底墒充足,0~20 cm土层土壤含水量应达到16%[23]。覆膜后及时盖土,保留穴孔位置不覆土,其余部分土层厚度控制在1 cm左右,从而防止风揭膜。为保证休闲期有效蓄水保墒,应严防牲畜践踏或其它原因破坏地膜。此外还需注意防治病虫害和植物疾病[25],根据当地防治情况和经验确定喷洒药剂或其它防治措施。

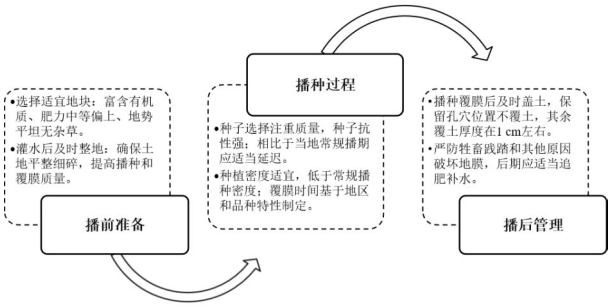

图2 麦类覆膜穴播技术构建方法

Fig.2 The establishment methods of film mulching with hole-sowing

2 覆膜穴播栽培技术的应用

随着覆膜穴播技术的发展和完善,其应用的深度和广度逐渐增加。覆膜穴播技术主要应用于3种气候类型区:水分限制区、低温胁迫区和沙尘源区(图3)。

覆膜穴播技术具有显著的保墒作用,该技术经过不断改良和完善,在干旱半干旱地区广泛应用[26]。20世纪90年代末,王勇等[27]首次在我国陇东旱塬地运用覆膜穴播栽培技术并取得显著成效,研究结果表明冬小麦产量增加103.65%,水分效率提高137.96%。此后,王虎全等[28]在渭北旱原应用此项技术更是使小麦产量突破9000 kg/hm^{2}大关。崔欢虎等[29]在山西地区应用覆膜穴播技术使小麦产量提升23.1%,并指出该技术是半干旱地区冬小麦实现高产稳产的战略性措施。随着科学技术进步,覆膜穴播技术在水资源匮乏区的应用不断扩展,大量学者通过调整播种密度、作物品种和覆膜材料等方式,进一步提高覆膜穴播栽培下的麦类作物产量和水分利用效率[27]。当前,覆膜穴播技术已在甘肃、宁夏、陕西和内蒙古等地区展现出强大的适应性和应用潜力。

前人研究表明覆膜穴播技术具有良好的增温作用,近几十年来该技术在高寒山区的应用逐步增多[30],在甘肃高寒地区覆膜穴播技术能够有效促进麦类作物生长发育,提高经济效益[31];在河北寒旱地区覆膜穴播技术显著提升冬小麦产量,比常规种植增产52.7%,并指出在该区应用覆膜穴播栽培技术具有保墒、增温、抗旱和加速生育进程等优点[10];在内蒙古地区,前人研究表明覆膜穴播可有效提高土壤温度和小麦产量,另有研究指出地膜覆盖对于冻融期的土壤温度具有良好增温效果,且对表层土壤影响最大[32]。在青藏高原等极端高寒地区,覆膜穴播技术同样具有可行性,前人研究表明通过改进覆膜材料和播种技术,能够进一步提高地温和作物产量,为这些地区的农业安全生产提供保障[33]。此外,覆膜穴播技术在这些低温胁迫地区还具有减缓冻害、增加土壤有机质和改善土壤结构等作用。

覆膜穴播不仅在增产增效方面表现出色,前人研究表明该技术在防风防尘、减少土壤风蚀方面也展现出显著的应用价值[34]。张淑霞等[32]研究表明覆膜穴播栽培技术可有效降低风速、减少麦田干土层厚度,对增加麦苗存活率有积极作用,因此在常年多风、扬尘频繁的地区如甘肃和陕西等地,覆膜穴播技术具有尤其重要的应用前景。前人进一步研究表明覆膜穴播有效降低土壤水分蒸发、抑制土壤细颗粒流失,进而减轻风蚀对作物生长的不利影响[35]。覆膜穴播有效改善农田群体结构,植被盖度增加对降低土壤风蚀具有积极作用[36]。另有研究表明,覆膜穴播有效增加土壤有机质含量、提高土壤微生物活性,对改善农田生态环境和保持土壤肥力具有重要意义[37]。

3 覆膜穴播对麦类作物的增产机理

综合梳理已发表文献,发现覆膜穴播对麦类作物的增产机理主要包括以下四个方面:第一,调节土壤水热效应,有效降低土壤水分土面蒸发,提高土壤水分含量和温度,改善物理和化学性状;第二,活化土壤养分,优化土壤生境,促进肥料吸收利用;第三,优化作物耗水进程,提高干物质积累水平及转运效率;第四,改善群体结构和植株性状,包括提高有效分蘖和增加有效穗数及穗粒数等,进而提高作物水分和养分有效性和利用效率(图4)。

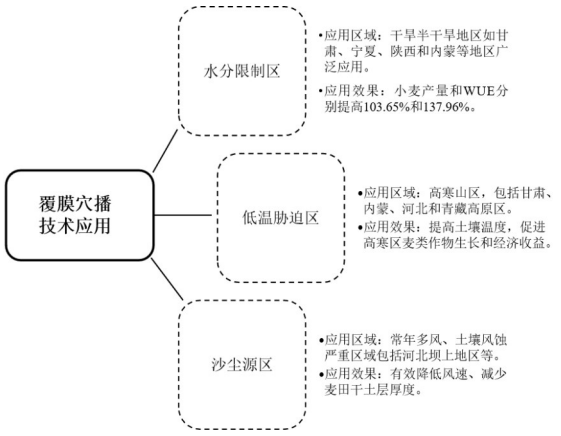

图3　覆膜穴播技术的应用

Fig.3　The application of film mulching with hole-sowing technology

覆膜穴播对农田土壤水热效应具有显著调节作用[38]。由于地膜不易导热和阻隔特性,经阳光照射和作物自身生长放热,地膜可在膜下形成保温层从而稳定小麦生长环境温度[39]。日尺度上,覆膜增温的效果在早晨达到最大(约为1 ℃),在正午达到最小甚至有所降低[40]。年尺度上,覆膜穴播显著增加小麦生育期积温,加宽小麦播种窗口[39]。研究表明,在小麦全生育期中,覆膜穴播在播种到拔节期的增温效果最明显[41],促进小麦干物质积累。相较于其增温作用,覆膜穴播具有更明显的增墒作用。由于地膜不透气和不透水,使得土壤表层原本要蒸发的水分在膜下凝结继续流回土壤,促进自然降水聚集,同时深层土壤水分转移到土壤表层,如此往复使深层土壤水分得到有效利用从而达到贮水保墒效果[42]。研究表明覆膜穴播提高土壤含水量,其中0～20 cm土层土壤含水量提高2%～4%,20～40 cm土层提高1%～3%[43]。因此,覆膜穴播通过改善土壤水热环境促进麦类作物生长发育,最终提高其产量和农田水分利用效率[40]。

覆膜穴播显著促进麦类作物肥料吸收。研究表明覆膜穴播降低肥料挥发浪费,相较于其它种植方式,土壤养分含量显著升高[44]。并且,结合覆膜穴播增温保墒和抑制杂草等作用,进一步提高肥料利用效率[45]。土壤微生物活性、种类和数量与土壤水热条件密切相关[46],覆膜穴播显著提升土壤微生物数量和活性,促进有机物分解、改良土壤结构和养分特征,为作物生长提供更适宜的条件,最终促进作物增产[47]。

覆膜穴播显著增强麦类作物光合作用,促进水分利用,对干物质积累和转运具有积极作用[48]。前人研究表明覆膜穴播使小麦灌浆期维持较高的光合速率且供应期较长,在生育后期维持较高的抗氧化代谢水平,从而提高产量和品质[49]。干物质积累和转运是麦类作物产量的决定因子,覆膜穴播有效提升干物质积累量,促进干物质转运效率,加快籽粒灌浆速率从而提高籽粒产量,研究表明覆膜穴播使小麦干物质积累量提升27%,并且茎杆、穗部颖壳和穗轴的营养物质向籽粒的转移率均优于其它栽培方式,最终提升小麦产量[50]。

麦类作物群体结构和植株性状在很大程度上决定其产量。前人研究表明,覆膜穴播通过有效减少冠层透光率、提高叶面积指数和增加大分蘖等改善其群体结构,增强群体光合效率最终提升麦类作物产量[51-52]。植株性状层面,覆膜穴播有效抑制单株次生根生长、促进根系生长发育和改善根系分布,提高根系吸收水分和养分能力从而提高麦类作物产量[53]。覆膜穴播提高基本苗存活率和促进茎杆发育,从而增强麦田抗风抗倒伏能力进而提高产量。大量研究进一步指出覆膜穴播通过提升麦类作物有效分蘖、成穗数、穗长、穗粒数和千粒重等主要农业性状从而提高其产量[54-55]。

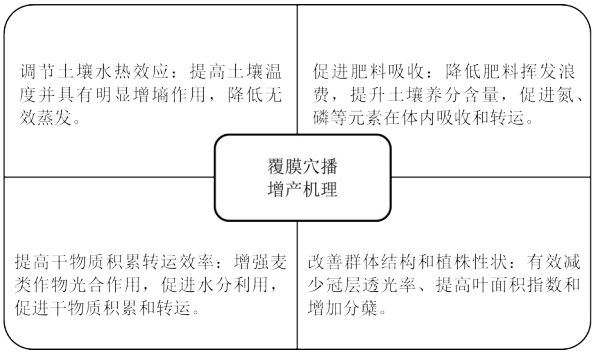

图4　覆膜穴播增产机理

Fig.4　Mechanism of wheat crops yield enhancement under the film mulching with hole-sowing

4　覆膜穴播技术存在的问题和未来发展前景

覆膜穴播栽培技术经过几十年的研究和改进,在麦类作物产量提升、水肥资源高效利用和防风固沙等方面得到广泛应用,在不同区域均表现优异,然而仍存在以下不足:

第一,常规年型下覆膜穴播技术对麦类作物产量提升、水肥资源高效利用等方面具有积极作用,然而极端气候如极端低温、极端干旱条件下应用该技术的效果有待进一步研究;

第二,土壤理化性质、作物品种和管理措施等在不同地区和气候条件下存在差异,当前研究无法快速精准地确定不同类型区域和气候情景下覆膜穴播的最佳作物品种、播期、施肥和灌溉方案;

第三,群体结构改变直接影响农田光能利用率和作物光合作用强度,覆膜穴播技术的不同地膜材料、颜色和尺寸等对群体结构产生哪些影响未系统揭示;

第四,当前覆膜穴播对麦类作物的研究侧重点不同,不同类型区研究只针对其中若干个方面开展,缺乏整体系统的种植模式。

因此,未来关于覆膜穴播的研究应基于多源大数据、控制试验、多技术手段,多维度完善覆膜穴播技术,并从系统角度出发,开发新一代麦类覆膜穴播技术,重点开展以下几个方面研究工作:

第一,充分揭示极端气候条件下覆膜穴播对麦类作物产量、水肥利用效率、群体结构和植株性状的影响,提出极端气候条件下覆膜穴播的改善措施;

第二,基于不同类型区土壤性质、气候类型和管理措施等的差异,制定不同区域最佳的覆膜时间、穴播粒数、播期和品种等耦合措施;

第三,地膜材料、颜色和厚度对土壤保墒增温和作物群体结构等产生重要影响,下一步研究应针对不同类型区域、不同生产目标开发易分解、特定功能突出的新型地膜;

第四,开发麦类作物覆膜穴播种植模型,或在已有作物生长机理模型基础上添加覆膜穴播模块,基于模型快速确定不同气候类型区覆膜穴播条件下最适品种、播期和水肥方案等。

5 结语

覆膜穴播技术通过调节土壤水热效应、促进肥料吸收利用、提高干物质积累水平及转运效率、改善群体结构与植株性状等提高麦类作物产量和水肥资源利用效率,已在水分限制区、低温胁迫区和尘源沙区具有深入与广泛的应用;未来研究应注重极端气候条件下覆膜穴播技术的表现、制定不同区域最佳使用方案、开发易分解与功能突出的新型地膜、开发覆膜穴播种植模型和快速确定不同类型区最佳种植方案。

参 考 文 献

[1]胡凯军, 赵桂琴, 吴昌顺, 等. 麦类作物水肥耦合研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(12): 7-12.
Hu K J, Zhao G Q, Wu C S, et al. Research progress of water and fertilizer coupling of cereal crops[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(12): 7-12.

[2]陈印军, 肖碧林, 卢布, 等. 我国谷物发展态势与未来展望[J]. 中国农业资源与区划, 2008, 29(5): 1-6.
Chen Y J, Xiao B L, Lu B, et al. Cereal development posture and future expectation in China [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2008, 29(5): 1-6.

[3]刘淑军, 李冬初, 黄晶, 等. 近30年来我国小麦和玉米秸秆资源时空变化特征及还田减肥潜力[J]. 中国农业科学, 2023, 56(16): 3140-3155.
Liu S J, Li D C, Huang J, et al. Spatial-temporal variation characteristics of wheat and maize stalk resources and chemical fertilizer reduction potential of returning to farmland in recent 30 years in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(16): 3140-3155.

[4]山仑, 邓西平, 康绍忠. 我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J]. 水利学报, 2002, 33(9): 27-31.
Shan L, Deng X P, Kang S Z. Current situation and perspective of agricultural water used in semiarid area of China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(9): 27-31.

[5]张强, 邓振镛, 赵映东, 等. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1210-1218.
Zhang Q, Deng Z Y, Zhao Y D, et al. The impacts of global climatic change on the agriculture in northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1210-1218.

[6]董孔军, 刘天鹏, 何继红, 等. 黄土高原半干旱区不同覆膜方式对土壤水热环境及糜子耗水特性的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(12): 2274-2287.
Dong K J, Liu T P, He J H, et al. Effects of different film mulching-patterns on soil thermal-moisture and broomcorn millet water consumption characteristics in semiarid region on northwest Loess Plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(12): 2274-2287.

[7]杨长刚, 柴守玺, 常磊, 等. 不同覆膜方式对旱作冬小麦耗水特性及籽粒产量的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(4): 661-671.
Yang C G, Chai S X, Chang L, et al. Effects of plastic mulching on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat in arid region of northwest China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(4): 661-671.

[8]张德奇, 廖允成, 贾志宽. 旱区地膜覆盖技术的研究进展及发展前景[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 208-213.
Zhang D Q, Liao Y C, Jia Z K. Research advances and

prospects of film mulching in arid and semi-arid areas [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2005, 23(1): 208-213.

[9]廖庆喜, 王迪, 姚露, 等. 油菜覆膜打孔穴播机打孔装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 62-72.
Liao Q X, Wang D, Yao L, et al. Design and experiment of membrane punch device for rapeseed film perforating and precision dibbling-planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 62-72.

[10]贺献林, 江志军, 贾河田, 等. 寒旱地区旱地小麦覆膜穴播栽培技术[J]. 河北农业, 1997(6): 27.
He X L, Jiang Z J, Jia H T, et al. Cultivation techniques of plastic film mulching and hole sowing of dry land wheat in cold and arid areas[J]. Hebei Agriculture, 1997(6): 27.

[11]张睿, 刘党校. 小麦覆膜增产机理研究(Ⅱ)——不同品种穗粒重变化规律[J]. 麦类作物学报, 1999, 19(5): 61-63.
Zhang R, Liu D X. Study on yield-increasing mechanism of wheat covered with plastic film (Ⅱ)—Variation law of spike grain weight of different varieties[J]. Tritical Crops, 1999, 19(5): 61-63.

[12]晋凡生, 黄明镜, 池宝亮, 等. 地膜穴播冬小麦生物学特性及其增产机理[J]. 干旱地区农业研究, 1998, 16(3): 50-55.
Jin F S, Huang M J, Chi B L, et al. Yield increasing mechanism and biological character of dibbling wheat in film mulched field [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998,16(3): 50-55.

[13]樊廷录, 王勇, 王立明, 等. 旱地冬小麦周年地膜覆盖栽培的增产机理及关键技术研究[J]. 干旱地区农业研究, 1999, 17(2): 1-7.
Fan T L, Wang Y, Wang L M, et al. Yield-increasing mechanism and key cultivation techniques of winter wheat with perennial film mulching in dryland of East Gansu [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1999, 17(2): 1-7.

[14]张旭, 吕丽华, 董志强, 等. 全膜覆土穴播对冬小麦冬前土壤水分及生长的影响[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(5): 103-108, 113.
Zhang X, Lü L H, Dong Z Q, et al. Effects of whole field soil-plastic mulching on wheat soil moisture and growth before winter[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, 42(5): 103-108, 113.

[15]白岗栓, 邹超煜, 杜社妮, 等. 河套灌区地膜春小麦适宜播种量研究[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(7): 18-27.
Bai G S, Zou C Y, Du S N, et al. Research on suitable seeding rate of spring wheat with film mulching in Hetao irrigated area [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(7): 18-27.

[16]程宏波, 柴守玺, 陈玉章, 等. 西北旱地春小麦不同覆盖措施的温度和产量效应[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6316-6325.
Cheng H B, Chai S X, Chen Y Z, et al. Effect of mulching method on soil temperature and grain yield of spring wheat in rainfed agricultural areas of northwestern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6316-6325.

[17]李梅, 贾志宽, 蒋骏. 不同土壤水分条件下宁南旱地春小麦覆膜穴播栽培效应研究初报[J]. 干旱地区农业研究, 2000, 18(1): 54-59.
Li M, Jia Z K, Jiang J. Cultivation effect with plastic film mulching and hole sowing of dryland spring wheat under different soil moisture conditions in semiarid area of South Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2000, 18(1): 54-59.

[18]谢钧宇, 白宇嫣, 曹寒冰, 等. 减氮覆膜下旱地麦田土壤团聚体中各物理组分的变化[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 6028-6037.
Xie J Y, Bai Y Y, Cao H B, et al. Changes in physical fractions within soil aggregates under nitrogen reduction and film mulching measures in dryland wheat filed [J]. Environmental Science, 2024, 45(10): 6028-6037.

[19]王楚涵, 刘菲, 高健永, 等. 减氮覆膜下土壤有机碳组分含量的变化特征[J]. 中国农业科学, 2022, 55(19): 3779-3790.
Wang C H, Liu F, Gao J Y, et al. The variation characteristics of soil organic carbon component content under nitrogen reduction and film mulching[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(19): 3779-3790.

[20]赵志伟, 吴强, 李琦, 等. 不同播种方式对有机小麦产量及田间杂草的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(10): 1291-1297.
Zhao Z W, Wu Q, Li Q, et al. Effect of different sowing modes on the weed community and yield of organic wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2021, 41(10): 1291-1297.

[21]李时清, 张耀川. 春小麦地膜穴播高产栽培技术要点[J]. 新疆农业科技, 1996(6): 4-5.
Li S Q, Zhang Y C. Key points of high-yield cultivation techniques of spring wheat by plastic film hole sowing [J]. Xinjiang Agricultural Science and Technology, 1996(6): 4-5.

[22]潘连公. 浅山干旱地区冬小麦不同种植方式研究[J]. 耕作与栽培, 2002, 22(5): 17-18, 30.
Pan L G. Study on different planting methods of winter wheat in shallow mountain arid area [J]. Tillage and Cultivation, 2002, 22(5): 17-18, 30.

[23]齐晓臣. 小麦覆膜穴播技术要点[J]. 农村百事通, 2001(18): 27.
Qi X C. Key points of hole sowing technology of wheat covered with plastic film[J]. Nong Cun Bai Shi Tong, 2001(18): 27.

[24]兰晓泉, 张绪成. 旱地春小麦地膜覆盖栽培技术研究[J]. 作物研究, 1998, 12(3): 28-30.
Lan X Q, Zhang X C. Study on cultivation techniques of spring wheat covered with plastic film in dry land[J]. Crop Research, 1998, 12(3): 28-30.

[25]丁玉成. 宁夏灌区春小麦覆膜穴播栽培技术初探[J]. 宁夏农林科技, 1997, 38(1): 51-54.
Ding Y C. Preliminary study on cultivation techniques of spring wheat covered with plastic film and hole sowing in Ningxia irrigation area[J]. Journal of Ningxia Agriculture and Forestry Science and Technology, 1997, 38(1):51-54.

[26]Chakraborty D, Nagarajan S, Aggarwal P, et al. Effect of mulching on soil and plant water status, and the growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) in a semi-arid environment [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95

(12):1323-1334.

[27]王勇,樊庭禄,宋尚有.干旱年份陇东旱塬地膜覆盖穴播冬小麦增产效果试验研究初报[J].甘肃农业科技,1996,27(5):5-7.
Wang Y, Fan T L, Song S Y. Experimental study on yield-increasing effect of hole-sowing winter wheat covered with plastic film in dry plateau of Longdong in dry year[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 1996, 27(5): 5-7.

[28]王虎全,韩思明,唐拴虎,等.渭北旱原冬小麦全程地膜覆盖超高产栽培技术研究[J].干旱地区农业研究,1998,16(1):24-30.
Wang H Q, Han S M, Tang S H, et al. Superhigh yield cultivation technique of winter wheat film mulched for whole growing process in Weibei dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(1):24-30.

[29]崔欢虎,张松令,张鸿杰,等.半干旱地区冬小麦地膜覆盖穴播技术研究[J].山西农业科学,1997,25(1):10-14.
Cui H H, Zhang S L, Zhang H J, et al. Study on the technique of bunch planting with film mulching of winter wheat in semi-arid region[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 1997, 25(1): 10-14.

[30]鱼小军,柴锦隆,徐长林,等.覆膜种植对甘南高寒区苜蓿生长和杂草数量的影响[J].中国农业科学,2016,49(4):791-801.
Yu X J, Chai J L, Xu C L, et al. Effects of different planting methods on growth of alfalfa and weeds in Gannan alpine region [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(4): 791-801.

[31]陆立银,杨树恭,王林安.甘肃省高寒阴湿区穴播春小麦覆膜技术研究[J].甘肃科技,1996,12(S1):29-30.
Lu L Y, Yang S G, Wang L A. Study on plastic film mulching technology of spring wheat seeded in hole in cold and humid areas of Gansu Province[J]. Gansu Science and Technology, 1996, 12(S1): 29-30.

[32]张淑霞,钟阳和,魏淑秋.我国北方半干旱地区两种防寒抗冻措施的麦田小气候效应[J].中国农业气象,2003,24(3):9-12.
Zhang S X, Zhong Y H, Wei S Q. Microclimatic effects of different management practices in winter wheat in the semi-arid areas of northern China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2003, 24(3): 9-12.

[33]白巴特尔,郑和祥,任杰,等.寒旱灌区冻融期冬小麦不同覆盖条件土壤温度变化[J].水土保持研究,2015,22(6):134-137.
Bai B, Zheng H X, Ren J, et al. Soil temperature changes in winter wheat fields under different mulch conditions during freezing and thawing periods in cold and dry irrigation district [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(6): 134-137.

[34]陈渭南,董光荣,董治宝.中国北方土壤风蚀问题研究的进展与趋势[J].地球科学进展,1994,9(5):6-12.
Chen W N, Dong G R, Dong Z B. Achievements and needs of studies on wind erosion in northern China[J]. Advance in Earth Sciences, 1994, 9(5):6-12.

[35]孔剑捷,陈萍,黄顺心,等.微生物矿化与植物共同作用下荒漠风积沙固化试验研究[J].浙江理工大学学报(自然科学版),2019,41(5):688-696.
Kong J J, Chen P, Huang S X, et al. Experimental investigation on solidifying the desert aeolian sand undercombined action of MICP and vegetation[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2019, 41(5): 688-696.

[36]董治宝,陈渭南,董光荣,等.植被对风沙土风蚀作用的影响[J].环境科学学报,1996,16(4):437-443.
Dong Z B, Chen W N, Dong G R, et al. Influences of vegetation cover on the wind erosion of sandy soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1996(4): 437-443.

[37]谢永春,张平良,郭天文,等.覆膜穴播方式对旱地小麦田土壤硝态氮和铵态氮积累的影响[J].麦类作物学报,2015,35(6):836-843.
Xie Y C, Zhang P L, Guo T W, et al. Effect of film-mulching on nitrate and ammonium nitrogen in dryland wheat fields[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(6): 836-843.

[38]张睿,刘党校,刘新伦,等.不同年份小麦覆膜播种后群体与产量比较研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2003,31(5):17-20.
Zhang R, Liu D X, Liu X L, et al. The comparison on yield and population of winter wheat between bunching with film and drilling without film in different years[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2003, 31(5): 17-20.

[39]Li F M, Guo A H, Wei H. Effects of clear plastic film mulch on yield of spring wheat[J]. Field Crops Research, 1999, 63(1): 79-86.

[40]陈恒洪,柴守玺,黄彩霞,等.地膜覆盖对旱地春小麦土壤温度的影响[J].甘肃农业大学学报,2013,48(1):63-67.
Chen H H, Chou S X, Huang C X, et al. Effect of plastic film mulching on soil temperature of spring wheat in dry land[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2013, 48(1): 63-67.

[41]马爱萍,崔欢虎,梁维治,等.地膜穴播冬小麦增产机理研究[J].山西农业科学,1999,27(3):8-12.
Ma A P, Cui H H, Liang W Z, et al. A study on the mechanism of film mulching with bunch planting for wheat yield increasing[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 1999, 27(3): 8-12.

[42]郭志东,刁培松.旱地冬小麦全生育期地膜覆盖穴播高产栽培技术的研究[J].农业工程学报,1999,15(2):222-224.
Guo Z D, Diao P S. Study on high-yield cultivation techniques of winter wheat covered with plastic film and hole sowing in dry land during the whole growth period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(2): 222-224.

[43]宋婷,王红丽,陈年来,等.旱地全膜覆土穴播和全沙覆盖平作对小麦田土壤水分和产量的调节机理[J].中国生态农业学报,2014,22(10):1174-1181.
Song T, Wang H L, Chen N L, et al. Regulation of whole field soil-plastic mulching with bunch planting and whole field sand mulching with flat planting on soil moisture and yield of

spring wheat in semiarid dryland areas[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(10): 1174-1181.

[44]Ding F, Ji D C, Yan K, et al. Increased soil organic matter after 28 years of nitrogen fertilization only with plastic film mulching is controlled by maize root biomass[J]. Science of the Total Environment, 2022, 810: 152244.

[45]Gu Y J, Han C L, Kong M, et al. Plastic film mulch promotes high alfalfa production with phosphorus-saving and low risk of soil nitrogen loss[J]. Field Crops Research, 2018, 229: 44-54.

[46]Ren C J, Chen J, Lu X J, et al. Responses of soil total microbial biomass and community compositions to rainfall reductions [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 116: 4-10.

[47]温晓霞, 韩思明, 赵风霞, 等. 旱作小麦地膜覆盖生态效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2003, 11(2): 99-101.
Wen X X, Han S M, Zhao F X, et al. Research on ecological effect of wheat with plastic film in dry land[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2003, 11(2): 99-101.

[48]张平良, 郭天文, 侯慧芝, 等. 不同穴播种植方式与平衡施肥对旱地春小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 201, 30(1): 132-137.
Zhang P L, Guo T W, Hou H Z, et al. Effects of different cultivation and balanced fertilization on spring wheat yield and water use efficiency in semiarid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 201, 30(1): 132-137.

[49]温健, 郭振斌, 郭天玲, 等. 全膜覆土穴播对冬小麦旗叶光合和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(8): 31-36.
Wen J, Guo Z B, Guo T L, et al. Effects of whole plastic-film mulching combined with soil overlying on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of flag leaves in winter wheat [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2015, 24(8): 31-36.

[50]侯慧芝, 吕军峰, 郭天文, 等. 全膜覆土栽培对作物的水温效应. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1111-1117.
Hou H Z, Lü J F, Guo T W, et al. Effects of technique of cultivation with overall film mulched soil on soil water and soil temperature of crops[J]. Journal of Triticeae Crops, 2012, 32(6): 1111-1117.

[51]Ding D Y, Wang N J, Zhang X, et al. Quantifying the interaction of water and radiation use efficiency under plastic film mulch in winter wheat [J]. Science of the Total Environment, 2021, 794: 148704.

[52]任书杰, 李世清, 王全九, 等. 栽培模式、施氮和品种对冬小麦冠层结构和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1449-1454.
Ren S J, Li S Q, Wang Q J, et al. Effects of cultivation mode, nitrogen fertilization, and cultivar on winter wheat canopy parameters and grain yields in sub-humid area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(12): 1449-1454.

[53]Thidar M, Gong D Z, Mei X R, et al. Mulching improved soil water, root distribution and yield of maize in the Loess Plateau of Northwest China [J]. Agricultural Water Management, 2020, 241: 106340.

[54]Wu L H, Quan H, Wu L N, et al. Responses of winter wheat yield and water productivity to sowing time and plastic mulching in the Loess Plateau [J]. Agricultural Water Management, 2023, 289: 108572.

[55]徐玉凤, 王辉, 苗瑞东, 等. 地膜穴播春小麦增产的生理生化机理初探[J]. 西北植物学报, 2001, 21(1): 67-74.
Xu Y F, Wang H, Miao R D, et al. Study on physiological and biochemical mechanism of increasing yield of spring wheat by using plastic mulching [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2001, 21(1): 67-74.

(编辑:韩志强)