

棉花间套作技术研究进展

王嘉伟^{1,2}, 咸丰^{3,4*}, 武佳乐³, 陈立宇³, 贾秀婷⁵, 尚学燕⁵, 孙鸿举^{1,2*}

¹内蒙古大学生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特

²牧草与特色作物生物学教育部重点实验室, 内蒙古 呼和浩特

³内蒙古自治区农牧业科学院, 内蒙古 呼和浩特

⁴内蒙古科技大学包头师范学院生态环境学院, 内蒙古 包头

⁵内蒙古巴彦淖尔市磴口县农牧业技术推广中心, 内蒙古 巴彦淖尔

收稿日期: 2025年11月1日; 录用日期: 2025年11月29日; 发布日期: 2025年12月8日

摘要

当前, 粮棉争地问题日益突出。为优化现有资源配置、实现生态位互补, 棉花间套作已成为提升农田综合效益的重要举措。文献研究表明, 棉花与豆科作物、油料作物间套作, 可通过物种间的互利作用显著提升土壤生产力。例如能更高效地利用光热资源, 且豆科作物的固氮作用可协同促进棉花对养分的吸收, 进而改善棉花的光合性能与水分利用效率。在土壤微生态层面, 棉花与豆科作物间作还能提高土壤生物多样性, 促进土壤有机质积累与养分循环, 从而有效改善土壤健康状况, 最大化提升单位面积土地的生产潜力。

关键词

棉花间套作, 间套作系统, 光合特性, 土壤微生态

Research Progress on Cotton Intercropping Technology

Jiawei Wang^{1,2}, Feng Xian^{3,4*}, Jiale Wu³, Liyu Chen³, Xiuting Jia⁵, Xueyan Shang⁵, Hongju Sun^{1,2*}

¹School of Life Sciences, Inner Mongolia University, Hohhot Inner Mongolia

²Key Laboratory of Herbage and Endemic Crop Biotechnology, Ministry of Education, Hohhot Inner Mongolia

³Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Hohhot Inner Mongolia

⁴School of Ecological Environment, Baotou Teachers' College, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou Inner Mongolia

⁵Agriculture and Animal Husbandry Technology Extension Center of Dengkou County, Bayannur Inner Mongolia

Received: November 1, 2025; accepted: November 29, 2025; published: December 8, 2025

*共同通讯作者。

文章引用: 王嘉伟, 咸丰, 武佳乐, 陈立宇, 贾秀婷, 尚学燕, 孙鸿举. 棉花间套作技术研究进展[J]. 农业科学, 2025, 15(12): 1435-1444. DOI: 10.12677/hjas.2025.1512179

Abstract

Land competition between grain and cotton crops has become a serious issue nowadays. To optimize the available resource allocation and achieving niche complementarity, the cotton intercropping by has become an important strategy to enhance the overall benefits of farmland. In literature, it has been reported that intercropping of cotton with leguminous and oilseed crops can significantly improve soil productivity through interspecies beneficial effects such as the better utilization of light and heat resources, the soil fixation of nitrogen by leguminous crops can synergistically promote cotton nutrient absorption; hence, improving cotton's photosynthetic performance and water use efficiency. In terms of soil microecology, the intercropping of cotton with leguminous crops may enhance microbial diversity, promote organic matter accumulation and nutrient cycling, thereby effectively improving the soil health and maximize the yield potential per unit area.

Keywords

Cotton Intercropping, Intercropping System, Photosynthetic Characteristics, Soil Microecology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

棉花间套作系统作为缓解粮棉争地矛盾、提升农田综合效益的核心手段，已在国内外很多主要棉区获得实证支持。以巴基斯坦棉麦复种区为例，针对棉花生长期延长引发的粮棉争地问题，研究人员引入了小麦/棉花套作模式[1]成功得到缓解。在黄河流域棉区，棉花/花生间作(6:4 行比)显著提升了土壤速效钾含量[2]；同时，基于大蒜/棉花、小麦/棉花等间作模式，棉花产量较单作平均增加近五分之一，这些成果突显了间作在增强农业韧性方面的潜力。不过，现有研究多聚焦于农艺效应的描述，对于驱动间作优势的深层生物学与生态学机制，探究仍不充分。现代间作研究倡导跨学科整合，核心在于阐释物种间通过生态位互补和正相互作用实现的资源利用效率提升[3]。本文全面评述近五年棉田间套作系统的配置模式及生态效应，为优化种植结构提供理论依据。

2. 文献检索方法

本研究系统梳理了近五年(2020~2025 年)国内外棉花间套作相关文献。中文文献以中国知网(CNKI)为核心数据库，检索关键词包括“棉花间套作”“棉花综述”等；英文文献通过 Science Direct、New Phytologist、Google 学术搜索，以“cotton intercropping”、“land equivalent ratio”为关键词，筛选领域内最新且具有实践意义的成果。初选 71 篇文献以棉花与不同作物间作为分类，最终筛选较具代表性的纳入实证研究文献共 26 篇，其中国际研究占 21 篇，主要聚焦在棉花间套作系统的生态位互补机制与资源利用效率上。

3. 棉花间作系统核心机理

3.1. 地上部光资源利用机制

3.1.1. 光合特性与光能捕获效率

籽棉产量的增长直接由光合性能的改善所驱动[4] [5]。根据表 1，在长沙和衡阳的田间试验中，与 MC 相比，CB 处理(3:3 配置)使籽棉产量上升了 23.20% (长沙点)和 32.46% (衡阳点)，同时单株成铃数提升了

22.21%至 28.85% [4]。红壤旱地试验进一步显示，棉花 - 大豆间作(CS 处理)和棉花 - 甘薯间作(CP 处理)的籽棉产量增幅介于 18.6%到 43.0%之间，其中 CP 处理(棉花 - 甘薯)的产量最高，增幅达 43.0% [5]。这一结果与木本棉作系统的生理响应模式形成鲜明对比。意大利普利亚地区的研究揭示了时间上的生态位互补：生长中期，单作棉花因无树木竞争，LAI 增加更快，体现了资源充足的优势；而到生育后期(开花期)，桃树 - 棉花系统则展现出更强的生理功能[6]。

Table 1. Impact of intercropping systems on cotton net photosynthetic rate and yield
表 1. 间作系统对棉花净光合速率与产量的影响

处理	净光合速率变化	籽棉产量变化	试验点
棉花单作(MC)	基准	基准	多点多区
棉花 - 菜豆间作(CB)	+6.25%~6.29% *	+23.20%~32.46% *	长沙、衡阳
棉花 - 甘薯间作(CP)	未量化	+22.0%~45.4% *	红壤旱地

注：* “显著”提升($P < 0.05$)，基于方差分析结果。CM 处理(棉花 - 玉米)的 Pn 与 MC 无显著差异，但产量因铃数增加而提高。

3.1.2. 冠层结构优化与 PAR 分布调控

冠层结构调整作为作物光资源高效利用的关键环节，其重点在于优化光合有效辐射(PAR)的时空分布。在间作系统内，通过作物配置对冠层结构进行调控，能够显著提升光能的拦截与利用效率。光资源凭借冠层结构优化实现再分配，这正是生态位理论在农田尺度上的具体呈现，促使系统在单位土地和时间

内捕获并转化更多光能[3]。

依据表 2，枣棉间作系统的研究指出，间距优化(以 M3 处理为例，即距枣树 0.5 米处种植 6 行棉花)可改善冠层 PAR 分布[7]。上述分布优化源自冠层垂直分层：高位作物(如枣树)与低位作物(如棉花)之间形成生态位互补，降低光竞争，令 PAR 在空间上分布更均匀[8]。生态学角度而言，此类分层结构基于资源分配理论(如生态位分化)，强化了系统稳定性。

叶面积指数(LAI)是表征冠层光拦截能力的核心指标。两点田间试验证实[4]，在盛铃期，带状间作模式(例如棉花 - 菜豆 CB 处理)的 LAI 值明显高于单作(MC)，且 LAI 峰值与花铃期物质积累高峰相一致，反映出生物学上的源 - 库协调机制。

叶绿素含量(SPAD 值)作为光能捕获效率的替代指标，在间作系统中同样呈现提升趋势；盛铃期时，间作处理的 SPAD 值较单作增加 4.17% (如 M3 处理 SPAD 为 52，单作 CK 为 50)，从而增强了光系统 II 的活性[7]。

Table 2. Canopy parameters and light utilization effects in intercropping systems
表 2. 间作模式冠层参数与光能利用效应

参数	处理	变化幅度(较单作 MC)	生育期
叶面积指数(LAI)	棉花 - 菜豆间作(CB3:3)	22.30%	盛铃期
叶面积指数(LAI)	棉花 - 菜豆间作(CB4:2)	28.70%	盛铃期
光合有效辐射(PAR)	枣棉间作(M3)	分布均匀化，峰值降低 10.0%	全生育期
净光合速率(Pn)	棉花 - 菜豆间作(CB)	+6.25%~6.29%	盛铃期
叶绿素含量(SPAD 值)	枣棉间作(M3)	4.17%	盛铃期

从生物学视角看，冠层优化的实质在于缓解光竞争并促进资源互补。在间作体系内，作物间的高差自然塑造出“多层冠层”结构，这不仅能够减少光饱和导致的光能浪费(例如枣树的遮荫可减轻棉花的光

抑制现象),还有助于提高漫射光比例[8],从而优化光量子利用效率。从生态学层面上看,该机制呼应了生态位理论:高、低位作物在时间与空间维度上错位利用资源,有效削弱种间竞争强度。但需要指出,光合有效辐射(PAR)的实际分布受到气候与土壤因子的调控——例如在新疆干旱区试验点,较高的蒸发量可能加剧 PAR 波动[7],这也展现了需要对具体数据采集的背景进行对应条件下的解读分析。

3.1.3. 边行优势与遮荫补偿效应在间作系统中的机制与优化

间作系统中,作物间凭借时空生态位的互补性实现资源的高效利用,而套作正是优化时空配置的典型代表。以巴基斯坦棉麦套作系统为例,其关键优势源于时间维度上的生态位分离[1]。该模式在小麦生殖生长后期,将 5~7 周龄的棉苗条播或移栽至麦行间,从而无缝衔接小麦与棉花,有效缓解棉花生长长期的季节矛盾。在此体系中,边行优势作为套作与间作共有的重要补偿机制,依托行比布局的优化,大幅提升边行作物的光照捕获能力。

生态位互补促进了间作系统的资源高效利用,其中边行优势成为增强光能捕获的核心机制。研究表明,带状间作通过行比配置的改进,明显强化了边行的光照获取。以长江流域棉区的棉花-菜豆(CB)系统为例,在 3:3 带状配置下,边行棉花因侧向光照增加,单株成铃数较单作(MC)显著上升[4]。

3.2. 地下部水肥资源利用机制

3.2.1. 水分协同利用与蒸散比(E/ET)调控

间作系统借助水分的时空错峰利用,有效降低蒸散比(E/ET,即棵间蒸发量占蒸散量的比例),进而提升水分利用效率(WUE)。新疆阿拉尔地区的裂区试验显示,相较于单作棉花,枣棉间作显著减少蒸散比(E/ET) [9]。此种水分协同效应与间作系统稳定性的加强相吻合[2],从生态学角度看,它验证了“胁迫梯度假说”,即在资源限制环境下,种间促进作用更强,如干旱条件下间作能通过根系互补稳定产量。

生物炭改良可进一步改善水分保持能力,归因于其多孔结构能够优化土壤孔隙度,增强持水性能。在新疆尉犁县的棉花-甜菜间作实验中,施用生物炭(10 t/hm²)后,灌溉促进了盐分淋洗,脱盐率提高到 22.3% (以未施生物炭的 B0 处理为对照);然而,过量施用(如 100 t/hm²)或导致土壤盐分上升,因此建议将用量控制在 10 t/hm² [10]。

作物需水时期的错位也有助于缓解竞争。以棉花-西瓜间作为例,西瓜生育期较短(成熟期约 30 天),需水高峰早于棉花,从而减少重叠耗水[11]。

类似的,在多年生木本系统中,水分利用的协同效应更为错综复杂且持久。桃树-棉花系统的研究证实,农林业具备提升土壤水保持和水分利用效率的潜力[6]。该结果与枣棉间作降低蒸散比的发现相互支持,共同揭示乔木的存在可通过调整田间小气候(如降低风速、抑制地表蒸发)并促使棉花根系深扎以利用深层土壤水,从而实现系统水平的水分高效利用。生态学中的“胁迫梯度假说”在这里也适用,即在地中海半干旱气候下,水分成为限制因素,树木与作物间可能由竞争转为促进,协同维持系统水分平衡。依据表 3,这些机制共同作用,展现了间作系统在干旱半干旱区的节水前景。未来需要融合智能灌溉技术(如土壤水分传感器)实现棉田间作水分管理的精准调控。

Table 3. Impacts of intercropping patterns on water use efficiency (Compared with Monoculture systems)
表 3. 间作模式水分利用效应(以单作系统为对照)

机制	关键参数变化	提升幅度(与对照相比)	实验条件与显著性
枣棉间作蒸散比(E/ET)	蒸散比降低	WUE 达 4.43 kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹	新疆阿拉尔, 裂区设计, LSD 检验 P < 0.05
生物炭改良脱盐率	灌水后脱盐率提升	22.3% (B10 处理)	新疆尉犁县, 盐碱地, 3 年田间试验
间作系统棵间蒸发量	蒸发量减少	显著降低(P < 0.05)	基于棵间蒸发量

3.2.2. 土壤养分循环与肥料利用效率的机制分析

间作系统借助增加作物残体的多样性及加速根系周转周期，实现助推土壤有机质的富集。滨州地区的推广试验表明，有机肥的增施结合滴灌缓释肥，显著提升了土壤有机质含量，进而使棉花皮棉产量相比单作实现增产[12]。

养分的高效转化，很大程度上依赖微生物群落结构的演变。江西红壤旱地的研究揭示，在棉花 - 大豆间作模式下，土壤固氮菌数量激增近 150%，同时细菌、真菌和放线菌的丰度也显著优于单作，此外土壤过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶的活性均见提升[13]。酶活性的这种增强，犹如发动机一般，促进了碳、氮等养分的矿化与转化过程，从而提高了肥料利用效率。

见表 4，通过棉花与豆科作物的间作，一个以根系分泌物为驱动、功能互补的土壤 - 微生物 - 植物连续体得以构建。该机制与生态学中的互补效应相契合，即不同物种凭借其独特功能性状(例如豆科的固氮能力、棉花的深根特性)，使得系统整体功能并非各组分简单相加，而是实现整体超越单个的简单相加[3]。在间作系统中，豆科作物与根瘤菌的共生固氮作用，为氮素输入提供了一条关键途径，即借助根瘤菌，花生等豆科作物能够将大气氮固定为铵态氮，这些氮素不仅满足自身需求，还可供邻近棉花利用，进而降低化学氮肥的施用量。鲁西地区的试验数据显示，采用花生 - 棉花 6:4 行比间作模式后，土壤全氮含量相比花生单作显著上升，同时棉花带的氮素损失较低，这证实间作有效缓解氮素流失[14]。

Table 4. Nutrient management and effects in cotton-legume intercropping systems
表 4. 棉花 - 豆科间作系统养分管理与效应

措施	土壤指标变化(与单作相比)	产量与效益提升
花生 - 棉花 6:4 间作	土壤有机质+15.49% (花生带), 有效磷+92.65%, 速效钾+72.35%	总收益提高 12.30%~31.28%
棉花 - 大豆间作	固氮菌数量+150%, 过氧化氢酶活性+53.3%	LER 1.24~1.32, 纯收入显著提升
有机肥+缓释肥配施	土壤有机质显著积累, 氮肥利用率提高	皮棉增产 22.0%~45.4%

3.2.3. 根系分层与生态位分离效应

根系垂直分层作为间作系统的核心机制，基于生态位分离理论，通过作物根系在土壤剖面中的分布差异减少生态位重叠，实现互补性资源利用[3]。

在枣棉间作系统中，棉花根系主要集中于 0~40 cm 土层，而枣树根系深达 60 cm 以下，这种垂直生态位分离有效降低了水分竞争[9]。植物根系的可塑性响应与资源竞争理论支撑了水分资源的分层利用，使系统在轻度水分亏缺下仍能维持高产。

在豆科间作系统中，棉花深根系(60~100 cm)与豆科作物(如花生或大豆)浅根系(0~30 cm)形成互补，减轻了对磷、钾等养分的争夺。田间试验表明，棉花与大豆间作(处理 E)可显著增强土壤微生物活性[13]。同时，间作处理明显提升土壤酶活性(如过氧化氢酶、蔗糖酶和脲酶)，综合这些变化实现了有机质的积累和氮循环效率的改善。

根系分泌物(如有机酸、酶类)通过驱动微生物活性，对土壤养分活化和酶活性提升具有显著的促进作用。长江流域棉区试验显示，棉花/甘薯带状间作(3:3 模式)在盛铃期提高了土壤过氧化氢酶和蔗糖酶活性[4]。酶活性增强直接关联微生物代谢强度，即过氧化氢酶通过催化过氧化氢分解以缓解氧化胁迫，而蔗糖酶则通过促进碳源的转化，为微生物生长提供能量。

根系生态位分离还通过优化土壤物理结构来强化系统功能。在棉花 - 甜菜间作系统中施用生物炭(10 t/hm²)后，土壤有机质含量显著上升 31.8%~135.8%，同时 pH 值下降(如生育初期 0~30 cm 土层 pH 值从 8.9 降至 8.6 以下)，适当的浓度有助于缓解盐渍化障碍[10]。

4. 棉田间作栽培模式

棉田间作栽培模式深刻地体现了中国农业精耕细作的传统，借助间作套种、多熟种植及种养结合，使得土地资源利用效率得到显著提升，农业生态系统稳定性也同步得到增强。系统文献分析揭示，棉田间作模式主要可划分为经济林果复合系统、豆科作物间作、禾本科作物间作以及蔬菜瓜果类间作等类别，且各棉区呈现出鲜明的区域特征。新疆棉区以经济林果复合系统为主导，而黄河流域与长江流域棉区则以蔬菜瓜果类间作占据优势。参考表 5 可知，这些模式既提升了单位面积的经济效益，又强化了生态系统多样性与稳定性，具体表现为土壤养分改善、种群数量增加和病虫害发生减少等[5] [13]。

Table 5. Cotton-based intercropping patterns and their distribution regions
表 5. 棉花间作种植模式及其分布地区

类型	间作模式	地区
经济林果复合系统	棉花 - 枣树	新疆阿拉尔、石河子、阿克苏
	棉花 - 核桃	新疆阿克苏
	棉花 - 桃树	普利亚地区(意大利)
豆科作物间作	棉花 - 花生	山东滨州；江西；河南
	棉花 - 大豆	鲁西南；江西
	棉花 - 绿豆	鲁西北；江西
	棉花 - 荷兰豆	山东德州、枣庄、鱼台县；新疆
禾本科作物间作	棉花 - 玉米	山东；江西；新疆石河子
	棉花 - 高粱	山东滨州
	棉花 - 小麦	巴基斯坦旁遮普邦
蔬菜瓜果类间作	棉花 - 西瓜	山东菏泽、无棣；黄河三角洲
	棉花 - 甜瓜	山东菏泽
	棉花 - 辣椒	山东德州；江西
	棉花 - 马铃薯	辽西；新疆乌鲁木齐
	棉花 - 甘薯	鲁西北；江西

通过资源配置优化与生态位互补，棉田间作栽培模式推动了经济效益、生态效益和社会效益的协同增进[15]。新疆棉区的棉果间作(如枣棉、核桃棉)充分挖掘光热资源潜力，土地产出率显著提高；黄河流域和长江流域的棉油粮、棉菜间作(如花生棉、玉米棉、辣椒棉)则依托作物互补有效缓解连作障碍，系统稳定性得以加强。未来研究需加强量化数字化间作模式的生态效应，并推广应用区域适应性优化模式，从而推动棉花产业实现增收增产的可持续发展。

4.1. 棉花间作系统的作物类型与模式配置优化

4.1.1. 豆科作物间作系统：固氮作用与土壤改良

豆科作物如大豆和花生，能借助根瘤菌的生物固氮功能，显著提升土壤中的氮素供给水平。见表 6，滨海盐碱地的研究显示，在棉花与大豆采用 2:3 带状间作(棉花两行，大豆三行)模式下，单作棉花的皮棉产量得到提升，但间作系统通过资源互补，净效益较单作明显提高，同时土壤全氮含量在花生/棉花 6:4

间作下上升了 13.04% [16]。花生/棉花 6:4 等行间作中，土壤速效钾含量增幅达到 72.35% (间作花生带 320.00 mg/kg，而单作仅为 185.67 mg/kg)，有机质含量提升 15.49%，这是由于豆科作物固氮作用在棉花蕾期，也是需氮高峰期，释放了氮素，形成“氮素共享”机制[14]。

4.1.2. 禾本科作物间作系统：光热资源优化与盐碱地适配

禾本科作物例如玉米和高粱，通过与棉花构成高矮秆组合，能有效改善冠层光合有效辐射(PAR)的分布格局。见表 6，在鲁西盐碱地，棉花与鲜食玉米的 4:4 间作模式(带宽 2.5 米)通过“扩行缩株”配置，不仅使棉花产量基本维持不变，还额外收获两季鲜食玉米，达成一年三熟，土地利用率明显提高[17]。棉花与高粱间作在盐碱地还能够增加土壤速效钾含量，并使皮棉产量上升 0.73%至 6.13% [18]。其中主要的机制是，禾本科作物的浅层根系与棉花的深层根系形成垂直生态位分化，从而降低了对光热资料和水分的争夺[9]。

4.1.3. 蔬菜瓜果类间作系统：短生育期作物的时间互补

甜瓜、绿豆等果蔬作物因生长期较短，能够与棉花在时间和空间上实现资源互补。见表 6，在蒜棉区，通过棉花/甜瓜 2:1 间作模式(行距 50 厘米)，甜瓜产量可达 25~35 吨/公顷，同时棉花水分利用效率(WUE)显著提高一半以上[19]。鲁西南植棉区采用棉花/绿豆 2:1 配置(带宽 2.82 米)，使绿豆产量达到 136.6 公斤/亩，综合效益提升五分之一左右[20]。该间作方式主要是借由提早收获矮秆作物，改善了棉田通风与光照条件，从而减少烂铃现象的发生，实现时间互补。

4.1.4. 经济林果复合系统：立体结构与水分协同

经济林果，例如枣树、核桃，通过与棉花形成立体种植系统，有效提高水分的利用率。见表 6，王沛娟等(2022)发现枣棉间距 0.5 m (M3 模式)使棉花产量较单作提高 18.2%，WUE 达 4.43 kg·hm⁻²·mm⁻¹，因枣树深根系(>60 cm)与棉花浅根系(0~40 cm)形成水分生态位互补，蒸散比(E/ET)降低 15% [7] [9]。李浩等(2021)研究表明，核桃/棉花间作有助于提高土壤真菌数量，同时还能保持棉花纤维的品质[8]。

Table 6. A comparison of configuration parameters and their effects in cotton intercropping systems
表 6. 棉花间作系统配置参数与效应对比

间作作物	配置模式	行比/间距	核心效应
大豆	带状间作	棉花:大豆 = 2:3	净效益较单作提升显著(间作 4:6 模式 980.0 元/667 m ² vs 单作 1113.2 元/667 m ²)；土壤全氮在花生/棉花 6:4 间作下提升 13.04%
花生	等行间作	棉花:花生 = 6:4	土壤速效钾提升 72.35% (间作花生带 320.00 mg/kg vs 单作 185.67 mg/kg)；有机质增加 15.49%
鲜食玉米	宽幅带状	棉花:玉米 = 4:4	在棉花基本不减产下多收 2 季鲜食玉米；土地利用率提升显著
甜瓜	膜间套种	行距 50 cm	甜瓜产量 25~35 t/hm ² ；棉花 WUE 提升 50.4%
枣树	果棉复合	枣棉间距 0.5 m	棉花产量提升 18.2%；WUE 达 4.43 kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹ ；蒸散比 (E/ET)降低 15%
单作对照	-	-	-

注：“-”表示相关数据文献中未报道。

4.2. 间作理论机制与作物互作差异：生态位分化与资源互补的深层解析

间作系统属于一种可持续的农业实践模式，其理论基础在于生态位的分化与资源的互补性，可借助时空的合理配置来优化光、热、水、养分等资源的利用方式，从而达到“错峰利用”与“协同增效”的效果。下文将围绕其共性机制与作物特异性差异两个维度展开阐述。

4.2.1. 共性机制：资源高效利用的生态学基础

光热资源错峰利用是间作系统的关键益处。例如，在西瓜-棉花间作系统中，西瓜凭借其较短的生育期(约 100 天)和早熟特性(6 月底至 7 月上旬)，巧妙避开了棉花花铃期(7~8 月)的需水高峰，从而减轻水分竞争[21]。生态学视角下，时序差异源自作物生理生态位的分化[9]，作为短周期作物，西瓜快速生长覆盖地表，降低了棉田棵间水分的蒸发量。而棉花生长后期的株高优势(可达 70~80 厘米)为西瓜提供遮荫，缓解高温胁迫，优化间作系统冠层结构对微气候的调控功能[22]。

根系生态位互补效应则显著增强了养分利用效率。例如，豆科作物(如花生、大豆)通过根瘤菌固氮作用，将大气氮转化为植物可利用的铵态氮，提升土壤氮素有效性。杨菲等(2021)研究显示，棉花/花生间作模式下，花生根瘤菌数量较单作提高 85.7%~150.0% ($P < 0.05$)，并借助根系分泌物向棉株输送氮素，使化肥使用量减少 19%~26%。且棉花深层根系(主要分布于 60~100 厘米土层)与花生浅层根系(0~30 厘米)形成垂直分层，降低了对表层养分的竞争[4]。此类根系构型差异源于对作物适应性间作搭配，使得物种间互相提高彼此的深层根系抗旱能力和浅层根系磷钾等营养物质的吸收能力。

4.2.2. 差异机制：作物互作的特异性响应

(1) 豆科作物：氮素协同与竞争权衡

豆科作物特有的生物固氮作用在间作系统中对氮素增效起着核心作用。在盐碱地棉花与大豆间作试验显示，大豆根瘤菌固氮量显著提升 150%，土壤全氮含量因而增加 13.04% ($P < 0.05$)，棉花单株成铃数也上升五分之一以上[16]。但豆科作物却可能与棉花争夺水分；申传运(2022)发现，在棉花/大豆“二四式”间作中，大豆花期的高需水阶段与棉花蕾期重叠，灌溉不足时(土壤含水量低于田间持水量 60%)，棉花铃重下降 3.01% [20]。但可以通过带状配置(如 4:6 行比)扩大豆科带宽，优化根系空间布局，可有效缓解水分竞争[14]。

(2) 林果作物：光竞争与遮荫效应

棉花与林果作物的间作主要是冠层光分布受到林果作物(例如枣树)遮荫的显著影响。王沛娟等人(2022)的研究表明，当枣棉间距为 0.5 米时，棉田的光合有效辐射(PAR)比单作降低了 10.0% ($P < 0.05$)，这进而使棉花净光合速率(P_n)下降[7]。其中种间光竞争主要源于枣树等林果作物冠层对直射光的拦截，然而间作系统可通过行距调整(如枣树行距 3 米)减轻遮荫的负面效应，并利用枣树凋落物提升土壤有机质含量[9]。

(3) 蔬菜瓜果：水分协同与品质提升

瓜类作物(例如甜瓜和西瓜)与棉花通过间作主要实现水分的协同效应。甜瓜的浅根系(0~20 cm)和棉花的深根系促使水分吸收呈现分层模式，从而降低了无效蒸发。马传汤(2022)的研究指出，棉瓜间作系统使蒸腾速率(Tr)下降 12.5%，同时水分利用效率(WUE)上升 22.3% [21]。瓜类藤蔓的覆盖还有效抑制了杂草的生长，进而削减了除草剂的使用量[19]。从生理生态视角分析，瓜类作物的匍匐生长提升了地表覆盖度，减缓了土壤水分蒸发，而棉花的直立株型则通过增强通风来降低病害发生。

(4) 粮食作物：机械化矛盾与适配优化

在粮食作物与棉花间作体系中，以高粱为例，机械化方面的矛盾亟待解决。魏学文等人(2021)的研究证实，高粱具备耐盐碱特性(耐受盐度可达 0.6%)，能够有效改良滨海盐碱地，进而使棉花出苗率有效得到提升[18]。李桂兰(2024)建议采用“4:4 等行距模式”(行距统一设定为 76 厘米)，这一安排支持联合收割机进行作业，从而大幅削减人工成本[22]。此种布局依赖于作物株高的生态协调关系，一般来说，高粱株高大约 2.5 米，与株高约 0.8 米的棉花可构成阶梯式冠层，提高作物间彼此的光能捕获效率。

5. 发展趋势

综上所述可得,棉花间作系统的改进创新必须兼顾生态效益与经济效益。通过解析棉田间作系统的生态生理机制,其优化方向应从单纯的农艺配置转向基于生态学原理的系统性设计。根据胁迫梯度假说,在资源限制(如盐碱、干旱)更严峻的环境中,种间促进作用往往更显著[3]。且多地域实证研究显示,未来发展趋势可聚焦于以下四个方面。

5.1. 轻简化种植模式创新

在鲁西南地区,“二四式”带状间作(棉花/花生 2:4 行比配置)的推广显著提高了机械化效率。王俊田(2022)的研究表明,通过行距标准化(例如棉花行距 76 厘米,花生行距 30 厘米),该模式在试验中使得联合收割机作业效率提升 40%,同时人工成本降低 35% [12]。类似结论在黄河流域的棉麦套作实验中得到验证:采用 6 行小麦与 2 行棉花配置(行距 20 厘米)时,土地当量比(LER)达到 1.69~1.70,相比传统单作,收入显著增加,其轻简化的关键在于作物间的行比优化与农场机器设备的适配[23]。

5.2. 智能水肥协同调控

水肥一体化技术在提升间作系统效率方面占据关键地位。李庆恩等人(2024)于盐碱地棉花与鲜食玉米间作中引入了智能滴灌系统,并依据作物水分需求规律实施分带调控,例如棉花蕾铃期需水量(每亩 60 立方米)超过玉米灌浆期(每亩 40 立方米),借助分区电磁阀达成精准灌溉,实现节水 31% [17]。且通过将微生物菌剂定向接种至肥料中,可使得养分利用效率得到进一步强化。崔爱花(2021)的研究显示,根瘤菌剂接种大豆能显著提升棉田土壤固氮酶活性,同时降低氮肥用量[13]。未来应着力开发作物专属微生物菌库,如优化花生根际促生菌(PGPR)与棉花共生体系的匹配性[14]。

5.3. 耐荫品种与矮化种质选育

品种适配在解决间作竞争问题是一个关键措施。王沛娟(2021)于枣棉间作系统中观察到,距离枣树 0.5 米处种植的棉花,其叶绿素 SPAD 值比常规品种高出 15.8%,且光合补偿效应可抵消 40%的遮荫损失 [7]。而果树矮化是另一关键策略,李浩(2021)所选矮化枣树(株高 1.5 米)与传统树型(株高 2.8 米)相比,遮光面积降低 37%,促使间作棉花产量增长 19.3% [8]。

5.4. 综合效益与推广挑战

为推广间作系统,必须破解三大矛盾:机械化瓶颈下,棉花-甘薯间作中薯蔓缠绕采棉机滚筒,致使故障率攀升[24],立式分禾装置的研发成为当务之急;市场风险层面,棉花-西瓜间作受西瓜价格波动拖累收益[25],可探索“棉瓜保险联动”机制以化解风险;技术培训缺口则体现为农户误判化控时机,引发棉花徒长,鲁西北地区缩节胺误用率高企[26]。未来研究应聚焦两类任务:首先是开发 AI 决策模型,如基于遥感光谱的间作群体长势诊断技术;其次是构建政策激励体系,从而驱动优良的间作系统规模化落地。

6. 结论

总之,棉田间套作系统的增产增效本质,实为生态位互补与种间正相互作用等生态学原理在农田生态系统中的科学性具象实践[3]。

基金项目

内蒙古自治区重点研发与成果转化项目——内蒙古西部沿黄棉田地膜污染阻控技术研究与示范 2022YFHH0078。

参考文献

- [1] Jabran, K., Nawaz, A., Uludag, A., Ahmad, S. and Hussain, M. (2020) Cotton Relay Intercropping under Continuous Cotton-Wheat Cropping System. In: Ahmad, S. and Hasanuzzaman, M., Eds., *Cotton Production and Uses*, Springer, 311-320. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1472-2_16
- [2] Tang, Y., Qiu, Y., Li, X., Qin, H., Wang, J., Zhang, S., et al. (2024) Increased Overyielding Probability and Yield Stability from a 5-Year Cotton-Based Intercropping. *European Journal of Agronomy*, **156**, Article ID: 127145. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127145>
- [3] Brooker, R.W., Bennett, A.E., Cong, W., Daniell, T.J., George, T.S., Hallett, P.D., et al. (2014) Improving Intercropping: A Synthesis of Research in Agronomy, Plant Physiology and Ecology. *New Phytologist*, **206**, 107-117. <https://doi.org/10.1111/nph.13132>
- [4] 张永莉, 张宁, 徐姣, 等. 不同带状间作模式对棉花生长发育和生产力的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(22): 4444-4458.
- [5] 崔爱花, 孙巨龙, 刘帅, 等. 三种间作模式对棉花产量和品质及棉田效益的影响比较[J]. 棉花科学, 2021, 43(2): 22-28.
- [6] De Carolis, G., Garofalo, S.P., Sanitate, N., Modugno, A.F., Scarascia-Mugnozza, G., Palahi, M., et al. (2024) First Insights of Cotton Intercropping with Peach Trees under Mediterranean Conditions. *Agroforestry Systems*, **98**, 3219-3232. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01084-6>
- [7] 王沛娟, 樊文霞, 李燕芳, 等. 枣棉间作复合系统种植模式对棉花光合特性及产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(10): 2035-2045.
- [8] 李浩, 李燕芳, 陈国栋, 等. 枣棉间作模式下不同种植间距对棉花产量和品质以及土壤微生物的影响[J]. 现代农业科技, 2021(15): 1-3, 6.
- [9] 李玲, 康郁, 王沛娟, 等. 枣棉间作下空间布局对棉花耗水特征的影响[J]. 塔里木大学学报, 2021, 33(2): 54-61.
- [10] 王小芳, 李毅, 姚宁, 等. 生物炭改良棉花-甜菜间作土壤理化性质与盐分效果分析[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 352-362.
- [11] 辛承松, 罗振, 卢合全, 等. 黄河三角洲棉花与西瓜同膜带间作增效种植模式及技术规程[J]. 中国棉花, 2021, 48(2): 41-42.
- [12] 王俊田. 滨州棉花花生间作标准化生产技术[J]. 特种经济动植物, 2025, 28(2): 175-177.
- [13] 崔爱花, 黄国勤. 间作对棉花产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 江西农业学报, 2021, 33(4): 22-26.
- [14] 杨菲, 刘霞, 李海涛, 等. 不同花生棉花间作配比下的土壤养分、作物产量和收益研究[J]. 山东农业科学, 2021, 53(8): 33-36.
- [15] Qiu, Y., Li, X., Tang, Y., Xiong, S., Han, Y., Wang, Z., et al. (2023) Directly Linking Plant N, P and K Nutrition to Biomass Production in Cotton-Based Intercropping Systems. *European Journal of Agronomy*, **151**, Article ID: 126960. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126960>
- [16] 孙福来. 滨海盐碱地棉花单作与棉花/大豆间作生产效益研究[J]. 中国种业, 2021(11): 85-87.
- [17] 李庆恩, 商娜, 闻小霞, 等. 鲁西地区轻中度盐碱地棉花//鲜食玉米间作轮作种植技术[J]. 中国棉花, 2024, 51(4): 52-55.
- [18] 魏学文, 韩文凤, 徐勤青, 等. 不同棉花高粱间作模式下土壤养分、棉花农艺性状及产量的研究[J]. 中国农学通报, 2024, 40(12): 28-32.
- [19] 李顺, 张桂花, 葛福柱. 蒜套棉花-甜瓜间作高产高效技术[J]. 农业科技通讯, 2020(6): 222-224.
- [20] 申传运. 鲁西南短季棉大豆不同间作模式产量及经济效益分析[J]. 中国棉花, 2022, 49(6): 9-12.
- [21] 马传汤. 山东菏泽市西瓜-棉花间作套种高产种植技术[J]. 农业工程技术, 2022, 42(11): 76-77.
- [22] 李桂兰. 山东西瓜-棉花间作套种高产种植技术[J]. 农业开发与装备, 2024(11): 193-195.
- [23] 李鑫, 王剑, 李亚兵, 等. 不同间套作模式对棉花产量和生物量累积、分配的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(8): 2041-2052.
- [24] 牛娜, 刘新强, 王世仙, 等. 不同棉花-花生间作模式下棉花生育进程、产量及综合效益初步分析[J]. 中国棉花, 2025, 52(2): 13-17.
- [25] 吕娟. 山东地区棉花-西瓜间作套种技术[J]. 农业工程技术, 2023, 43(22): 78-79.
- [26] 赵文超, 齐洪鑫, 王汝明, 等. 鲁西北地区棉花绿豆间作绿色高效栽培技术[J]. 中国棉花, 2022, 49(3): 27-29.