

NO. m9bs9fbgudhaf33y | 2026-05-14 15:25:21

- 题目：免耕密植对于河套灌区玉米抗倒伏特性的研究
- 作者：樊翔宇
- 检测所属单位： -

论文字符数：17298 论文页数： - 表格数量： - 图片数量： -

检测结果



6.7%

全文总相似比(复写率+他引率+自引率+专业术语)

相似结果详情

6.7%

复写率

0.0%

自引率

0.0%

他引率

0.0%

专业术语

其他指标

去除本人引用相似率：6.7% 去除专业术语相似率：6.7% 自写率：93.3%

典型相似文章：无

检测范围 | 1989-01-01 ~ 2026-05-14

- 中文科技期刊论文全文数据库
- 博士/硕士学位论文全文数据库
- 外文特色文献数据全库
- 中文主要报纸全文数据库
- 中国专利特色数据库
- 中国主要会议论文特色数据库
- 古籍文献/图书资源
- IPUB原创作品
- 互联网数据资源/互联网文档资源
- 港澳台文献资源
- 年鉴资源
- 维普优先出版论文全文数据库

相似片段

相似片段：

66

总相似片段

66

相似片段

0

引用片段

检测来源：

期刊：3

硕博：34

综合：25

互联网：4

外文：0

序号	引用文献	引用字符数	引用率	来源
----	------	-------	-----	----



暂无数据

相似文献汇总(当前只展示10条数据,全部详情请查看片段对照报告)

相似文献来源：17

序号	相似文献	相似字符数	相似率	来源
1	论青少年犯罪特点及对策 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	544	3.1%	综合
2	数字化艺术与传统海洋馆的融合创新 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	544	3.1%	综合
3	(论文)刘小东2022级环境设计专升本4班 202212224B972 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	455	2.6%	综合
4	(论文)刘小东2022级环境设计专升本4班 202212224B972 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	404	2.3%	综合
5	数字化艺术与传统海洋馆的融合创新 佚名 - 大学生论文联合比对库 - 2024	404	2.3%	综合
6	河套灌区适宜地下水控制深度与秋浇覆膜节水灌溉技术研究 张义强 - 内蒙古农业大学博士学位论文 - 2013	70	0.4%	硕博
7	高密种植下黑龙江春玉米对氮素和化控的生理生态响应及温室气体排放的影响 刘笑鸣 - 东北农业大学博士学位论文 - 2023	54	0.3%	硕博
8	乙烯利和氮肥运筹对玉米氮素吸收利用和基部节间生长的调控研究 叶德练 - 中国农业大学博士学位论文 - 2015	41	0.2%	硕博
9	露地和覆膜种植间玉米抗倒伏能力的差异 张嬉云 - 新疆农业大学硕士学位论文 - 2022	39	0.2%	硕博
10	春玉米抗茎倒能力评价及其化学调控技术研究 曹庆军 - 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所)博士学位论文 - 2016	35	0.2%	硕博

文字标注

■ 自写片段

■ 复写片段

■ 引用片段

■ 专业术语

■ 自引片段

河套灌区免耕密植条件下玉米抗倒特性研究

内蒙古农业大学本科生毕业论文

本科生毕业论文

免耕密植对河套灌区玉米抗倒特性影响研究

A Study on the Effects of No-Till and High-Density Planting on the Lodging Resistance of Maize in the Hetao Irrigation District

姓 名：樊翔宇

学 号：2022112021517

学 院：农学院

专 业：农学

指导教师：杨彦明 副教授

二〇二六年六月

内蒙古农业大学毕业论文（设计）诚信承诺书

毕业论文（设计） 题目 免耕密植对河套灌区玉米抗倒特性影响研究

学生姓名 樊翔宇 学号 2022112021517 班级 22级农学三班

所学专业 农学 指导教师 杨彦明

学生承诺 本人慎重承诺和声明： 1. 认真学习了教育部《学位论文作假行为处理办法》（中华人民共和国教育部令第34号）和《内蒙古农业大学学位论文作假行为处理实施细则（试行）》。 2. 在毕业论文（设计）撰写过程中遵守学校有关规定，恪守学术规范和道德，毕业论文（设计）在指导教师的指导下独立完成。 3. 在毕业论文（设计）中未剽窃、抄袭他人的学术成果，未篡改研究数据，引用他人的观点和参考资料均做了注释和说明。 4. 如有违规行为发生，我愿承担一切责任及相关的后果。 学生（签名）：年月日

指导教师承诺 本人慎重承诺和声明： 认真学习了教育部《学位论文作假行为处理办法》（中华人民共和国教育部令第34号）和《内蒙古农业大学学位论文作假行为处理实施细则（试行）》，在指导学生毕业论文（设计）活动中遵守学校有关规定，恪守学术规范，经过本人认真的核查，该同学的毕业论文（设计）中未发现有剽窃、抄袭他人的学术观点、思想和成果的现象，未发现篡改研究数据。 指导教师（签名）：年月日

内蒙古农业大学本科生毕业论文

摘 要

玉米作为我国第一大粮食作物，其产量的稳步增长对于保障国家粮食安全、优化种植结构及支撑畜牧业发展具有不可替代的作用。目前，增加种植密度是进一步挖掘玉米产量潜力的最直接手段。河套灌区作为中国重要的商品粮基地，其独特的自然环境和耕作制度对玉米生产提出了特殊要求。该地区地处干旱、半干旱气候区，光照充足，昼夜温差大，非常有利于玉米干物质的积累。然而，降水匮乏使得农业生产高度依赖于引黄灌溉。为了应对长期耕

作带来的土壤结构退化及水分蒸发过快等问题，以免耕（No-tillage）为核心的保护性耕作模式在河套灌区得到了推广。针对河套灌区玉米生产中存在的种植密度增加导致倒伏风险加大、传统耕作模式水肥利用效率低等问题，本研究旨在探析免耕与密植交互作用对玉米抗倒伏特性的影响机制，为该地区玉米高产稳产及规模化机械收割提供理论依据。本研究聚焦于河套灌区特定的自然条件，综合运用形态学观测、力学测试及生物化学分析手段，重点考察了在免耕模式下，不同种植密度对玉米茎秆物理强度、物质积累分配和生理特性的影响。

关键词:免耕；密植；玉米抗倒伏；盐碱地；理化特性

Abstract

As China's leading grain crop, steady increases in corn yield play an irreplaceable role in ensuring national food security, optimizing crop structures, and supporting the development of the livestock industry. Currently, increasing planting density is the most direct means of further unlocking corn's yield potential. As a major commercial grain production base in China, the Hetao Irrigation District's unique natural environment and farming practices impose specific requirements on corn production. Located in an arid and semi-arid climate zone, the region features abundant sunlight and significant diurnal temperature fluctuations, which are highly conducive to maize dry matter accumulation. However, scarce precipitation makes agricultural production highly dependent on irrigation from the Yellow River. To address issues such as soil structure degradation and excessive water evaporation resulting from long-term tillage, conservation tillage practices centered on no-tillage have been promoted in the Hetao Irrigation District. Addressing challenges in maize production within the Hetao Irrigation District—such as increased lodging risk due to higher planting densities and low water and fertilizer use efficiency under traditional tillage practices—this study aims to elucidate the mechanisms by which the interaction between no-tillage and high-density planting affects maize lodging resistance. The findings will provide a theoretical basis for achieving high and stable maize yields and facilitating large-scale mechanical harvesting in the region. Focusing on the specific natural conditions of the Hetao Irrigation District, this study comprehensively employed morphological observations, mechanical testing, and biochemical analysis to examine the effects of different planting densities on the physical strength of maize stems, the accumulation and distribution of plant materials, and physiological characteristics under no-tillage conditions.

Keywords: No-tillage; High-density planting; Maize lodging resistance; Saline-alkali land; Physicochemical properties

目录

1 引言 1

1.1 研究目的及意义 1

1.2 国内外研究进展 1

1.2.1 免耕密植对玉米植株特性的影响 1

1.2.2 高密对玉米群体结构及倒伏风险的影响 2

1. 2. 3免耕密植对玉米产量及品质的影响.....	3
2材料与方法	4
2. 1试验地概况	4
2. 2供试材料	4
2. 3实验设计与方法	4
2. 4取样时间与方法	5
2. 5测试指标与方法	5
2. 5. 1植物生理学及光合指标	5
2. 5. 2植株农艺性状指标	5
2. 4. 3玉米茎秆力学指标.....	5
2. 4. 1植物光合指标.....	5
2. 4. 2植株农艺性状指标.....	5
2. 4. 3玉米茎秆力学指标.....	5
2. 4. 4玉米产量及构成因子	6
2. 5数据处理	7
3结果分析	7
3. 1免耕密植对于玉米植株形态的影响.....	7
3. 2免耕密植对玉米茎秆化学组成的影响	12
3. 3免耕密植对玉米茎秆力学特性的影响	13
3. 4免耕密植对玉米光合指标的影响.....	16
3. 5免耕密植对玉米产量构成因子和产品品质的影响.....	19
4讨论	26
4. 1免耕密植对玉米抗倒伏特性的影响.....	26
4. 2免耕密植对玉米产量的影响.....	26
5结论	27
致谢	27
参考文献	28
1引言	
1. 1研究目的及意义	

粮食安全是关乎国计民生且永恒不变的话题，它直接关系到人类社会的稳定和国家经济的可持续发展，是国家稳定发展的基石[1][2]。**玉米作为全球产量第一大的粮食作物[3]**，不仅是重要的粮食来源，也是能源领域的关键原料，它生产的稳定性对于保障全球和我国粮食安全具有举足轻重的战略意义[4]–[7]。在追求高产和可持续发展的过程中，高密度种植是提高产量和资源利用效率的重要方式。

全国范围内的荟萃分析表明，当前我国玉米单产的提高已不再主要依赖单株生产力的突破，而是通过增加种植密度来构建强大的群体优势[8–10]。郭瑶[11]等在2022年指出，高密度种植已成为我国农业得以实现“藏粮于技”这一目标的核心手段。增密会提高群体产量的潜力，但也会造成植株偏高且茎秆纤细。杨德光[12]认为随着密度增

加，田间郁闭、底层光照不足和个体竞争加剧等问题正日益严重。现状表现为：密度的升高与品种和技术并不契合，容易引发倒伏或空杆等生理障碍。河套灌区多为盐碱地，具有土壤板结、表层积盐和通气性差等特性，会影响种子幼根萌发，导致总根数量减少和根系固定不足，从而增加了倒伏风险。研究表明，水肥一体化设备可以显著优化密植春玉米的资源利用效率。结合免耕技术，能够增强土壤蓄水保墒能力并且改善物理性状，有效缓解该地区强蒸发所引起的盐分表聚问题。在水、肥和耕作措施的协同作用下构建出高效的水肥供应机制，是实现河套灌区玉米节水增产可持续发展的核心路径[13][14]。

大量研究聚焦于增密的产量效应，但对抗倒伏力学机制关注不足。国内外已有的抗倒伏研究多在黑土地、黄淮海平原开展，盐碱灌区背景的研究鲜见。研究表明，在西北干旱半干旱灌区，通过优化水分调控与群体结构可显著提升玉米的生产效益与资源利用效率[15][16]：内蒙古河套地区实施节水灌溉技术能有效协调青贮玉米的生物产量与营养品质，实现稳产提质；而甘肃黄灌区通过合理增加种植密度，可进一步优化玉米农艺性状并挖掘单位面积产量潜力，共同揭示了精准灌溉与科学密植在西北绿洲农业中提升玉米综合生产力的核心支撑作用。密植是目前公认的、成本最低且见效最快的增产方式。研究其应用途径，能够为国家玉米亩产跨越式增长提供直接的技术方案。向上探索生理极限，向下夯实资源底线。因此，阐明盐碱地条件下，倒伏发生的特殊机理。明确增密栽培条件下，影响玉米抗倒伏的关键生物力学指标可以为河套灌区玉米高产稳产提供理论依据和数据支撑。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 免耕密植对玉米群体植株特性的影响

运用免耕栽培技术能够极大程度上优化土壤当中的水热环境，提高玉米生长中后期阶段的叶片光合速率和水分利用效率。当前针对北方旱作区、东北地区及绿洲灌区的研究表明，以免耕及覆盖为核心的保护性耕作体系，通过系统性改良土壤物理生境、优化玉米根系发育特征及强化灌浆期光合生理生理机制，有效实现了玉米产量的持续增长与抗逆性的协同提升，构成了我国北方典型生态区农业提质增效与可持续发展的关键技术路径[17]-[20]。在形态结构这个方面，这种模式有助于去开展株高的优化工作，合理地把重心降低来实现群体稳健生长。

种植密度一旦超过了阈值，就会因为群体内部加剧的郁闭情况而诱发个体之间的资源竞争，导致光合产物的合成工作受阻，进而产生减产的负反馈效应。郭瑶[11]等人的研究凭借系统分析指出，增加种植密度虽然能够提高群体的叶面积指数，但是会导致群体内部的光环境恶化，诱发“避荫反应”，致使中下部叶片的净光合速率极大程度上下降并且加速衰老。这表明在密植条件下，选育耐密和叶片上竖的品种，再辅助以合理的栽培调控工作，是平衡单株光合抑制和群体光合总产量的核心生理途径。王永亮[21]的研究结果表明，保护性耕作措施通过去优化土壤水热的动态平衡，极大程度上增强了春玉米在关键生长发育时期叶片光合速率和瞬时水分利用效率。在密植体系当中，这种环境优化效应能够减轻个体之间的水分亏缺风险，让群体在较高密度下也可以维持稳健的光合生理功能。兰天娇[22]的研究表明凭借少耕有效优化了植株的空间分布情况，并且改善群体的通风透光条件。这种调控手段缓解了密植所带来的光合抑制效应，让群体在关键生长发育时期可以维持较高的光合势和物质生产能力，从而在保障光合效率的基础上得以实现增产。吴贻波[23]的研究指出，随着种植密度的增加，玉米单株的光合生产力会大幅度减弱，但是单位面积内的群体光合速率因为群体叶面积大幅增加在花期的时候仍然表现出上升趋势。密植增强了冠层对于光能的整体拦截和吸收效率，为花期粒库的建成和早期的籽粒发育工作提供了物质保障，凸显了密植在提高群体光能利用率方面的优势。

1.2.2 高密对玉米群体及抗倒伏风险的影响

根据目前国内外研究进展来看，增加密度是提高玉米产量和光温资源利用效率的有效方法，优化耕作方式和种植密度，能发挥个体与群体的最大效能，提高玉米产量和光温利用率，但是过高的种植密度却造成了植株大面积倒伏，出现了产量减少的现象。

增加种植密度在增加玉米产量时，因加剧群体竞争而显著改变了茎秆的解剖结构与力学特性，导致茎秆针刺强度与弹性下降，从而大幅提升了田间倒伏风险。现有研究揭示，玉米的耐密性与抗倒伏能力受茎秆微观结构及群体环境的共同驱动；在高密植条件下，通过协同改良茎秆的生物物理性状以强化机体力学支撑性能，是平衡高产潜能与抗逆稳产、降低倒伏风险的核心技术路径[24]–[27]。凌莉等研究发现[28]种植密度对玉米茎秆形态特性和干物质分配影响较明显，**茎秆机械强度下降导致高密下玉米抗倒伏能力下降**，玉米的耐密抗倒伏特性是由株高、穗位高、基部节间长度（第3节、第4节、第5节）、基部节间长粗比、节间横截面长直径、节间横截面短直径、茎穿刺强度、干物质积累量等多种因素综合作用的结果。鲁晓民[29]等研究认为产量随着密度的增加先增后减。在高密度条件下，地上第4节茎秆的品质对产量的影响更明显。王静[30]等经过研究后发现，气生根条数、气生根抓地半径都与茎秆抗推力存在极显著正相关，说明气生根条数和抓地半径是影响玉米抗倒伏的重要因素，**可以作为抗倒伏品种选择的重要参考指标**。一些研究表明，深松耕作通过改善土壤结构，促进玉米根系生长，增强茎秆力学特性，**有助于提高玉米的抗倒伏能力**；深松耕作处理对玉米茎秆抗倒伏性状有显著的改善效果，尤其是在密植条件下，深松耕作能够显著提高玉米茎秆强度[31]。伍舒悦[32]等研究表明第3~5节间的干物质积累量对玉米茎秆抗倒伏性状影响显著。在田间管理过程中也需关注棒三叶生理状态和冠层结构。

在密植环境下，玉米茎秆常因群体遮荫和竞争压力导致木质素合成受阻，进而削弱机械强度。颜培启[33]和高春华[34]等研究证实，通过栽培或生理干预提升基部节间的木质素沉积水平，能显著增强茎秆的结构刚性与力学支撑力，从而有效补偿了密植导致的单株茎秆物质充实度不足，是提升植株物理抗性的关键也是提升密植群体抗倒伏特性的本质生理途径。李晶晶[35]研究指出，随着种植密度的增加，带状间作系统中玉米茎秆纤维素和木质素含量均呈现明显的下降趋势。密植导致茎秆节间变细、细胞壁变薄，结构性碳水化合物的合成与积累量减少，是造成密植群体倒伏风险增加的主要原因之一。

调节种植密度与施肥量也可以有效改善玉米茎秆的抗倒伏性能。通过对玉米茎秆抗弯折性和穿刺强度的研究，表明茎秆的物理强度与倒伏的关系密切，且不同的环境条件显著影响这些力学特性[36]。特别是在高密度栽培下，玉米的茎秆会经历更多的力学压力，因此，**种植密度成为了影响玉米抗倒伏能力的重要因素**。佟桐[37]等研究发现，适度增施氮肥和调整种植密度可以显著提高玉米茎秆的抗倒伏力学强度。黄璐[38]等研究了密植群体对夏玉米抗倒伏性能的影响，发现90000株/公顷的密度对玉米产量和抗倒伏性具有最佳效果。在黑龙江省的研究中，调整种植密度与施肥量的配合，**也显著提高了玉米的茎秆抗倒伏能力**。

1.2.3 免耕密植对玉米产量及品质的影响

玉米免耕密植体系增产的核心在于环境条件和生理特性两者之间的协同作用。免耕密植模式凭借协同开展土壤水热生境和群体光合特性的优化工作，不仅缓解了密植所带来的个体竞争压力，还依靠维持高效的光合速率来保障干物质积累和籽粒灌浆的过程，从而在改善植株物理抗性的基础上，让产量和水分利用效率实现同步提升。

鲁悦[39]等人的研究表明在免耕密植体系当中，秸秆覆盖凭借保墒增肥的作用，促进了植株对于养分的吸收和干物质向籽粒进行的分配，从而在保护土壤资源的同时让产量的显著增长得以实现。杨彩红[40]的研究表明，免耕轮作模式依靠对土壤水分循环的优化工作，能够显著提高西北荒漠绿洲区玉米的群体光合性能。相比于常规耕作，免耕模式在维持密植群体水分供应方面拥有明显优势，保障了生育中后期阶段的产量形成，是实现该地区高产稳产

和农业可持续发展的有效技术手段。甘淼[41]等人的研究发现免耕通过降低土壤容重和提高养分库容量，为玉米高产构建出了优良的土壤基质；实验数据表明，这个模式能显著增强玉米群体的抗逆能力，在干旱频发的辽西地区，免耕覆盖相较于常规耕作具有更高的稳定性。高密度种植在显著挖掘玉米群体增产潜力的同时，因植株竞争加剧及群体郁闭引发的稳态失衡，提升了田间倒伏风险；现有研究揭示，通过集成品种混播优化光合性能、应用滴灌水肥一体化改良土壤微生态及实施精准水氮管理，可有效协调高密群体结构与资源分配，从而在防范倒伏风险的基础上，实现玉米生产的稳产提质[42]–[45]。

密植作为提高玉米群体产量的关键途径，它的效能受到了栽培环境和生理机制两方面的双重驱动。研究证实，凭借免耕覆盖和优化耕作等保护性耕作模式，可以显著改善土壤的水热和物理结构，保障植株在关键发育时期的光合生理活性和资源利用效率；这种环境优化效应不仅缓解了因为增密导致的个体竞争风险，更依靠提高籽粒灌浆强度和群体产出的稳定性，让玉米产量潜力充分释放[46][47]。

2材料与方法

2.1试验地概况

本试验于2025年5月在内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区临河农场五分厂（107° 25′ 03.11″E，40° 49′ 52.59″N）进行，该区域为典型中温带半干燥大陆性气候，冬冷夏热。全年平均气温为6.8℃，无霜期127d，年总辐射量约154.34kcal/cm²，日照时数3254h，年均降水138.8mm，年均蒸发量2236.7mm，年平均相对湿度5.2%。试验地土壤类型为壤土，盐分以氯化钠和碳酸钠为主，土壤盐分含量为1.8%。

2.2供试材料

供试作物：玉米（先玉1619）

供试肥料：复合肥（4-7-1-0.22）

有机无机复混肥料（总养分≥16%、N-P2O5-K2O：8-5-0）

供试滴灌带：内镶贴片式滴灌带（管径：16mm±0.5、滴头流量：3.0L/T、滴头间距：25cm、工作压力：≤0.10Mpa）

2.3试验设计与方法

试验采用单因素随机区组设计，共设置4个处理，每个处理设3次重复，共12个小区。对照组：常规翻耕覆膜（CK），密度为94500株/hm²；试验组：免耕不覆膜（MSD），密度为94500株/hm²；免耕不覆膜（MSZ）密度为102000株/hm²；免耕不覆膜（MSG），密度为109500株/hm²。所有处理采用大小垄双行种植，行距为40cm（小垄）+90cm（大垄）。浇水施肥、中耕除草、病虫害等其他田间管理措施参照当地栽培模式要求进行。

2.4测试指标与方法

2.4.1植物光合指标

时期：选择无云或少云的典型天气，在灌浆中期进行测定。

部位：穗上第一叶、穗位叶、穗下第一叶。所有处理在同一日内完成，以消除日间环境波动影响。

光合生产能力指标（气体交换参数）使用LCPR0+ 光合作用测定仪进行活体原位测定。

①光合速率，符号与单位：A（μmolCO₂·m⁻²·s⁻¹）

②气孔导度，符号与单位：Gs（molH₂O·m⁻²·s⁻¹）

③蒸腾速率，符号与单位：E（molH₂O·m⁻²·s⁻¹）

2.4.2植株农艺性状指标

1. 株高与穗位高(灌浆中期)：在取样后，用卷尺测量从植株茎基部至雄穗顶端(株高)和至最上部果穗着生节(穗位高)的绝对高度。并计算穗位高系数(穗位高/株高)

2. 植株鲜重与干重测定方法：在灌浆中期（如授粉后20-25天），每小区选取代表性植株10株，齐地面完整收割。立即称取全株鲜重。然后将其分解为叶片、茎秆（含叶鞘）、雌穗（含苞叶）等器官，分别称取各器官鲜重。所有样品经105℃杀青30分钟后，80℃烘干至恒重，称取各器官干重及全株干重。

3. 穗位上、中、下叶片叶面积测定方法：选取果穗上方第1叶（上）、果穗叶（中）、果穗下方第1叶（下），使用叶面积仪测量实际叶面积。

4. 叶片数：计数单株总叶片数。

5. 节间数与长度测定方法：计数植株总节间数及伸长节间数。用直尺精确测量第三、四、五节间的长度。

6. 节间横截面长直径、短直径测定方法：用游标卡尺精确测量第三、四、五节间的横截面长直径和短直径。

7. 节间干物质积累测定方法：将上述测量后的第三、四、五节间小段，烘干后称取节间干重。

2.4.3玉米茎秆力学指标

1. 节间压断力、穿刺力、弯折力测定方法：田间取回具有代表性植株的地上第三、四、五节间，保留完整节段（两端带节或至少5cm以上节间柱），立即放入-20℃防止失水，尽快测定。使用便携式茎秆强度仪。将节间样本两端水平放置在两个支撑点（跨度L建议为节间直径的10倍，如10cm）。在样本中点位置，以恒定速度垂直向下施加压力，直至节间断裂。记录最大压力值（F_c，单位：N）。

2. 茎秆拉力（30° 倾斜角）测定方法：将绳索一端系于被测植株穗位部，另一端连接拉力计，拉力计的另一端与地面成30° 夹角的方向（模拟茎秆倾斜30° 时的受力方向）匀速拉拽，记录此过程中的最大拉力值（F_{pull}，单位：N）。使用数显式拉力计、坚固的绳索和固定于地面的铰接点。

2.4.4玉米产量及构成因子

1. 植株鲜重与干重：在灌浆中期，每小区选取代表性植株10株，齐地面完整收割。立即称取全株鲜重。然后将其分解为叶片、茎秆(含叶鞘)、雌穗(含苞叶)等器官，分别称取各器官鲜重。所有样品经105℃杀青30分钟后，80℃烘干至恒重，称取各器官干重及全株干重。

2. 茎秆组成成分含量测定：灌浆中期取样。植株自地面往上第三、四、五节间。

取样后迅速分离，液氮速冻，于-20℃超低温冰箱保存，或立即杀青烘干后粉碎过筛，干燥器内保存。方法选择范式洗涤纤维分析法。该方法可系统性地、在一次连续分析中获得细胞壁主要组分的含量，效率高且数据关联性好。

3. 产量及构成因素：生理成熟期，在全区实际收获前进行取样测产。每小区选取连续有代表性的10-20株进行破坏性考种，并单独标记实收测产区域。对选取的样本植株逐穗进行精细考种。

穗行数：计数果穗中部的籽粒行数。

行粒数：选取有代表性的籽粒行，从头至尾计数该行的总粒数，重复3行取平均值。

穗长：用直尺测量从穗基部至穗顶端的长度，不包括秃尖部分。

穗鲜重：单位面积实际产量在每个小区中，避开边行，实收一定面积内（如20-30平方米）的所有果穗，收获后立即称取果穗鲜重。

4. 穗位上、中、下叶片叶面积测定方法：选取果穗上方第1叶（上）、果穗叶（中）、果穗下方第1叶（下），使用叶面积仪测量实际叶面积。

5. 叶片数：计数单株总叶片数。

6. 节间数与长度测定方法：计数植株总节间数及伸长节间数。用直尺精确测量第三、四、五节间的长度。

2.5 数据处理

使用Microsoft Excel 2016进行数据整理计算进行相关性分析和绘图，利用SPSS 25软件进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 免耕密植对于玉米植株形态的影响

分析图1发现。由图可知，**不同处理对玉米株高的影响存在显著差异**，且表现为 $MSZ > MSD > MSG > CK$ 。MSZ的平均株高是377.1cm，MSD是358.9cm，MSG是356.4cm，CK是333.1cm。各组间的标注字母各不相同，**说明组间差异均达到显著水平**。分析每组内部差别发现，MSZ组的个体间的生长差异较明显。MSZ与CK相比株高增加了13.2%，MSD与CK相比增加了7.7%。株高最大值出现在MSZ组，为377.1cm，最小值在CK组，为333.1cm。结果表明，免耕密植模式通过促进纵向生长来适应高密度环境下的竞争。这种形态调整为群体效利用光能奠定了基础。

图1 不同种植密度对植株株高的影响

Figure 1: Effect of Different Planting Densities on Plant Height

由图可知，不同处理下玉米穗位高的变化存在差异。MSZ处理的穗位高最高，为155.1cm。对照组CK的平均穗位高是145.3cm。MSD与MSG的平均值分别为143.9cm和143.2cm。显著性分析显示，MSZ与MSD、MSG两组之间差异显著，**而CK与各处理间差异不显著**。MSZ与CK相比穗位高增加了6.7%，MSD与CK相比降低了0.96%。观察组内差别发现，MSZ组的误差稍大，说明个体生长不够整齐，MSD组的数据分布则相对集中。结果表明免耕密植影响了植株的结穗部位。MSZ处理通过让穗位上移来适应群体竞争。这种形态上的调整改变了植株重心，是评价高密度模式下抗倒伏能力的重要依据。

图2 不同种植密度对植株穗位高的影响

Figure 2. Effect of different planting densities on the height of the ear on the plant

由图可知，不同处理下玉米穗位系数 $CK > MSZ > MSD$ ，MSD与MSG数值接近。CK组同另外三组处理差异显著($p < 0.05$)。MSZ、MSD与MSG三组之间差异不显著。MSZ同CK相比降低了6.8%，MSD同CK相比降低了9.1%，MSG同CK相比也降低了9.1%。其中穗位系数最大值出现在CK组，最小值出现在MSD和MSG组。结果证实免耕密植措施显著降低了玉米的穗位系数。植株整体重心随之发生明显下移。植株形态上的这种改变改善了高密度群体的田间受力状况，这对提升作物后期的抗倒伏性能极为关键。

图3 不同密度对植株穗位系数的影响

Figure 3. Effect of different plant densities on the ear position coefficient

由图可知，不同处理对于玉米茎秆鲜重产生的影响存在着显著差异。各个处理之间茎秆鲜重表现呈现为 $MSZ > CK > MSG > MSD$ ，其中MSZ和对照组CK之间的差异并不显著，但均显著高于MSD处理；**MSG处理与各个组别之间的差异均未达到显著水平**。结论表明，在免耕密植环境之下，MSZ处理能较好地维持植株单株生物量的积累工作，而MSD处理主要是因为种植密度的增加导致了个体之间竞争加剧，从而让单株茎秆鲜重显著下降。鲜重水平的变化体现出了不同耕作密植组合对于植株营养储备和物质代谢的调控作用，为进一步去探究河套灌区玉米茎秆化学组分的演变和它对抗倒特性的贡献奠定了坚实基础。

图4 不同种植密度对植株茎秆鲜重的影响

Figure 4: Effect of Different Planting Densities on Fresh Stem Weight

由图可知，不同处理对玉米植株总干物质积累的影响未达显著水平。实验数据表明，各处理间总干重表现为CK>MSZ>MSD>MSG，各处理组间差异不显著。结论表明，免耕密植模式下玉米单株干物质积累具有稳定性，并未因群体密度的增加而产生明显的单株生物量衰减。说明高密度环境下植株仍能通过高效的物质生产维持其基本的机械支撑力。

图5 不同种植密度对植株总干重的影响

Figure 5. Effect of different planting densities on total plant dry weight

由图可知，各处理下玉米基部第3至第5节间的长度均呈现随节位上升而递增的趋势。在第4及第5节间，MSZ处理的长度明显高于其他组别，而MSG处理在各节位上的长度均为全组最低，表现出对基部节间伸长的明显抑制作用。结果表明，免耕密植对玉米节间发育具有显著的调节效应，其中MSZ处理促进了基部节间的纵向生长，而MSG处理通过显著缩短基部节间长度，有利于降低植株重心，从而在形态结构上为增强玉米的抗倒伏性能提供了有利条件。

图6 不同种植密度对植株节间长度的影响

Figure 6. Effect of different planting densities on internode length

由图可知，不同处理对玉米基部节间横截面长直径产生了显著影响。实验结果显示，对照组CK在第3、第4及第5节间的长直径均处于全组最高水平，显著优于各免耕密植处理组；在密植条件下，MSD、MSZ与MSG处理的节间长直径均小于对照组，且各处理间长直径差异较对照组有所减小。结论表明，免耕密植模式下由于群体密度的增加，单株间对资源竞争的加剧导致基部节间的径向生长受到抑制，表现为茎秆横截面长直径的普遍减小。

图7 不同种植密度对植株横截面长直径的影响

Figure 7. Effect of different planting densities on the major diameter of plant cross-sections

由图可知，不同处理对玉米基部节间横截面短直径的影响较为有限。实验结果显示，对照组CK与各免耕密植处理组在第3、第4及第5节间的短直径数据上未表现出显著的规律性差异，各处理数值均稳定在21mm至25mm区间内，且随节间层级升高呈现出微小的自然递减趋势。结论表明，在河套灌区免耕密植栽培条件下，植株基部节间的短轴向发育具有较强的生物学稳定性，并未因群体密度增加而产生明显的形态缩减。这种形态特征暗示了玉米茎秆在应对密植压力时，其横截面几何构型可能存在非等比例的力学响应特征，而非简单的径向整体萎缩。

图8 不同种植密度对植株横截面短直径的影响

Figure 8. Effect of different planting densities on the short diameter of plant cross-sections

3.2免耕密植对玉米茎秆化学组成的影响

由图可知，各处理对玉米茎秆木质素含量的影响存在差异。实验数据显示，MSZ处理的木质素含量在各组中表现最高，约为5.6%，显示出显著的积累优势；MSG处理的木质素含量约为4.8%，略高于对照组CK；而MSD处理的木质素含量最低，约为4.2%。结果表明，免耕密植对玉米茎秆的理化特性具有显著调节作用，其中MSZ处理通过促进茎秆中木质素的合成与积累，强化了茎秆的机械结构强度，从而在生化水平上为增强玉米的抗倒伏性能提供了物质支撑。

图9 不同种植密度对植株茎秆木质素含量的影响

Figure 9. Effect of different planting densities on lignin content in plant stems

由图可知，各处理对玉米茎秆纤维素含量的影响存在差异。对照组CK的纤维素含量最高，约为34.8%；在各试验处理中，MSZ处理的纤维素含量高于MSD处理和MSG处理。结果表明，免耕密植在一定程度上影响了茎秆内部纤维素的积累水平，虽然增加种植密度导致纤维素含量较对照组有所下降，但MSZ处理在维持纤维素含量方面表现相对较好，这有利于保障茎秆的组织结构强度与物理韧性，从而在理化特性层面为提升玉米抗倒伏性能提供了物质基础。

图10 不同种植密度对植株茎秆纤维素含量的影响

Figure 10. Effect of different planting densities on stem cellulose content

由图可知，不同处理对玉米茎秆半纤维素含量的影响存在差异。实验结果显示，MSD处理的半纤维素含量最高，约为19.0%；对照组CK次之，约为18.3%；MSZ与MSG处理的数值较为接近，均在17.6%左右。结果表明，免耕密植对玉米茎秆半纤维素的积累具有一定的调节作用。虽然MSZ与MSG处理下半纤维素含量较对照组略有降低，但整体变幅较小，说明在该种植模式下茎秆半纤维素能够维持较为稳定的水平。这有利于保障茎秆细胞壁的结构稳定性，从理化特性层面为维持玉米植株的基本机械支撑能力提供了保障。

图11 不同种植密度对植株茎秆半纤维素含量的影响

Figure 11. Effect of different planting densities on stem hemicellulose content

3.3免耕密植对玉米茎秆力学特性的影响

由图可知，不同处理对玉米茎秆拉力的影响如图所示。实验数据表明，各处理间的茎秆拉力大小顺序是CK>MSZ>MSD>MSG。对照组CK的拉力值最高，在19.5N左右，MSG处理的数值最低，约为14.8N。显著性分析结果显示，MSD和MSZ处理与CK、MSG之间差异显著。这说明在免耕密植条件下，不同的栽培组合会造成茎秆基部固持能力的差异。研究发现，通过调整耕作方式与种植密度，可以改变密植环境下的茎秆力学强度。MSZ处理在维持较高拉力的同时，固持潜力较强，能降低高密度种植的倒伏风险。

图12 不同种植密度对植株茎秆拉力的影响

Figure 12. Effect of different planting densities on stem tensile strength

由图可知，不同处理下玉米茎秆穿刺力表现出相似的变化趋势，均随节位升高而逐渐降低。MSD与MSG处理的穿刺力整体水平显著高于CK，且在基部第三节间表现最为突出。CK处理的三个节间差异不显著；而MSD、MSZ及MSG处理表现为第三节间显著高于第五节间，且MSZ与MSG的第四节间呈现过渡状态。这表明实验处理明显改变了茎秆强度的分布格局。茎秆穿刺力是衡量玉米力学特性的核心指标，而MSD和MSG处理通过显著提升基部节间的力学强度，增强了茎秆的抗折断能力。

图13 不同种植密度对植株茎秆穿刺力的影响

Figure 13. Effect of different planting densities on stem puncture resistance

由图可知，不同处理对玉米基部节间的弯折力影响明显。实验数据发现，各处理节间的弯折力随节位上升逐级递减。和对照组CK相比，试验处理组在各节位上的抗折断能力均有提升。其中MSZ处理在第三节间的弯折力最大，约为250N。MSG处理在免耕密植能正向调节玉米茎秆的力学特性。MSZ与MSG处理提升了基部关键节间的抗弯折性能，增强了植株个体的机械支撑强度。

图14 不同种植密度对植株茎秆压断力的影响

Figure 14. Effect of different planting densities on stem breaking strength

由图可知，不同处理对玉米茎秆节间的压断力分布有调控作用。实验结果显示，各处理茎秆压断力随节间层位升高而递减，从基部向顶部逐渐降低。基部第三节间是核心支撑部位，压断强度在各节间中处于最高水平。显著性分析发现，免耕密植在增加群体压力的同时，会抑制单株的力学性能。其中MSG处理在第四和第五节间的压断力下降最明显，说明高密度环境减弱了植株的机械支撑能力。相比之下，MSD处理的力学稳定性较好，基部节间强度接近对照组CK，缓解了密植造成的倒伏隐患。总之，免耕密植下茎秆力学特性的变化受栽培措施与密度的共同影响。通过优化耕作组合能平衡群体结构与单株抗性，这为河套灌区玉米稳产抗倒提供了理论依据。

图15 不同种植密度对植株茎秆压断力的影响

Figure 15. Effect of different planting densities on stem breaking strength

3.4免耕密植对玉米光合指标的影响

分析不同处理间的各项光合指标能更好的了解植物制造有机物的速度，如光合速率越高，植物生长越旺盛，积累干物质的能力就越强。分析显示，不同处理改变了玉米各层叶片的光合速率。实验中，MSD处理在上层和穗位叶的光合速率最高，数值分别为20.85和20.63，明显高于CK组，这增加了物质积累的来源。MSG处理在下层叶片表现最好，数值为16.27，说明该方式提升了底层透光率并维持了叶片活性。MSZ处理的各层光合速率较平均。数据证明，免耕密植能调节植株不同位置的生理功能。MSD与MSG处理提高了关键叶层的生产效率，改善了群体光合性能，这是高密度种植下玉米增产的生理原因。

图16 不同种植密度对植株光合速率的影响

Figure 16 Effects of Different Planting Densities on Plant Photosynthetic Rates

由图可知，不同处理对玉米各层叶片气孔导度的调节作用不同。MSG处理在各叶层均保持较高气孔导度，生理活性优势明显，有利于提升群体光合潜力。MSD处理显著提高了穗位叶的气孔导度，体现了关键叶片对物质形成的贡献。研究表明，免耕密植模式通过优化不同层位叶片的气体交换能力，提高了群体整体代谢效率。这为高密度种植下玉米产量的形成提供了生理基础。该结论证实了通过改变种植方式调节植物生理活性的可行性。

图17 不同种植密度对植株气孔导度的影响

Figure 17 Effects of different planting densities on stomatal conductance

由图可知，不同处理对玉米各层叶片的蒸腾速率影响显著。结果表明，相比对照组CK，免耕密植处理的蒸腾速率均有下降。其中MSZ处理在各叶层间的数值最均衡，且整体水平较低。研究认为，免耕密植模式通过适度降低单株蒸腾，优化了高密度群体的水分平衡和代谢环境。这种生理适应缓解了高密度种植导致的水分竞争，提高了水分利用效率。在维持植株活性的基础上，该模式为玉米产量的形成提供了水分代谢保障。这一发现对于干旱地区的节水栽培具有参考价值。

图18 不同种植密度对植株蒸腾速率的影响

Figure 18 Effects of Different Planting Densities on Plant Transpiration Rates

由图可知，不同处理对玉米棒三叶面积影响显著。结果显示，对照组CK各层位的叶面积均为最高值。受种植密度增加的影响，试验处理组的单株叶面积均有所减少。在各处理组中，MSZ处理保持了较高的叶面积水平，而MSD与MSG处理的数值较低。研究表明，免耕密植改变了玉米群体结构。MSZ处理能减轻高密度竞争对单株功能叶面积的负面作用，优化了光合器官的供给能力。这为高产模式下积累光合物质、提升最终产量奠定了形态学基础。

图19 不同种植密度对植株棒三叶叶面积的影响

Figure 19. Effect of different planting densities on the leaf area of *Trifolium pratense* plants

3.5免耕密植对玉米产量构成因子和产品品质的影响

由图可知，不同处理明显影响了玉米基部节间的干物质积累。实验发现，随着节位升高，各处理的干物质含量整体增加。对照组CK在第三和第四节间积累较多。在试验组中，MSZ处理表现最显著，其第五节间干物质含量达11.48g，为全组最高，说明该处理促进了生物量向茎秆关键部位分配。MSD与MSG处理的积累量相对较低。研究证实，免耕密植能有效调节茎秆干物质分配。MSZ处理保障了基部节间的充实度，在增强植株强度的同时优化了源库关系，为高密度种植下的产量形成提供了物质基础。

图20 不同种植密度对植株干物质含量影响

Figure 20 Effect of Different Planting Densities on Plant Dry Matter Content

图示结果显示，各处理对玉米单穗重的影响不同。对照组CK的单穗重最大，为293.10g。试验组的单穗重均低于对照组，MSD处理为255.40g，MSZ与MSG处理分别为228.30g和233.50g。这说明免耕密植模式加剧了单株竞争，使单穗重量下降。单株生物量积累减弱，是群体通过增加穗数换取高产的权衡结果。研究认为协调个体发育与群体产量为优化当地玉米产量结构提供了支持。

图21 不同种植密度对植株穗重的影响

Figure 21: Effect of Different Planting Densities on Ear Weight

由图可知，不同处理对玉米穗行数产生了一定影响。实验结果显示，对照组CK的穗行数最高，约为18.0行；各试验处理组由于种植密度的增加，穗行数均呈现出小幅度的下降趋势，其中MSD处理约为17.5行，MSZ与MSG处理则分别约为17.1行和17.4行。结果表明，免耕密植模式下由于个体间资源竞争的加剧，**导致穗部发育受到一定程度的抑制**。这种单株产量构成指标的适度缩减是群体通过增加单位面积有效穗数以实现整体产量最大化的生理权衡，说明在高密度栽培模式下，科学协调个体发育与群体结构的矛盾是实现玉米增产的关键，为河套灌区推广密植高产技术提供了重要的理论支撑。

图22 不同种植密度对植株穗行数的影响

Figure 22: Effect of Different Planting Densities on the Number of Ears per Plant

由图可知，不同处理对玉米行粒数产生显著影响。实验结果显示，对照组CK的行粒数最高，约为33.8粒；随着种植密度的增加，各试验处理组的行粒数均呈现出递减趋势，其中MSD处理约为31.7粒，MSZ与MSG处理分别降低至28.9粒和28.4粒。结果表明，免耕密植模式下由于单株间受光及养分竞争加剧，**导致穗部发育受到一定程度抑制**，表现为行粒数的规律性减少。这种单株产量构成因子的适度缩减是高密度群体通过增加单位面积有效穗数实现整体产量目标的重要生理权衡，为优化河套灌区玉米高产栽培模式下的产量结构提供了实证依据。

图23 不同种植密度对植株行粒数的影响

Figure 23 Effect of Different Planting Densities on the Number of Grains per Row

由图可知，不同处理对玉米穗长产生了一定影响。实验结果显示，对照组CK在穗长性状上表现为全组最高值；相较于对照组，各试验处理组在免耕密植条件下均呈现出不同程度的缩减趋势，其中MSZ与MSG处理的穗长降幅较为明显，MSD处理则表现出相对较好的单穗发育潜力。**结论表明，随着种植密度的增加**，单株间对光温及养分资源的竞争压力增大，导致穗部性状发育受到一定抑制，表现为穗长的规律性缩减。这种单株产量构成因子的适度权衡是群体通过增加单位面积有效穗数实现高产目标的重要生理机制，为优化河套灌区密植高产栽培模式下的产量结构提供了实证依据。

图24 不同种植密度对植株穗长的影响

Figure 24. Effect of different planting densities on ear length

由图可以看出，不同处理对玉米百粒重的影响有明显区别。百粒重以对照组最高，数值约为28.7g。各试验处理组均表现出下降趋势，具体表现CK>MSZ>MSG>MSD。MSZ组约为27.3g，MSG约为26.5g，MSD则降至26.2g左右。分析组内差异发现，CK组的离散程度最小，数据最为稳定。MSG组的误差棒最长，说明该处理下百粒重的个体差异较大。结果表明，免耕密植由于增加了单株间的养分竞争，会对籽粒充实产生抑制作用。MSZ处理在一定程度上缓解了这种竞争压力，维持了相对较高的百粒重。这些数据为评价高密度栽培模式下的产量构成提供了生理学依据。

图25 不同种植密度对植株百粒重的影响

Figure 25. Effect of different planting densities on 100-seed weight

由图可知，不同处理对玉米籽粒油分含量的调控效应存在显著差异，各处理间油分含量呈现为MSG>MSD>MSZ的变化趋势。实验结果显示，MSG处理的籽粒油分含量最高，约为3.73%，表现出优于MSD与MSZ处理的品质积累特性。结论表明，免耕密植模式下，MSG处理通过优化群体生理代谢环境，在保障产量构成因子的同时有效促进了籽粒营养物质的合成。研究证实，合理选择耕作与密植组合是提升河套灌区玉米品质及协调产量构成因子的重要途径，**为该地区构建高产优质栽培体系提供了科学依据。**

图26 不同种植密度对植株籽粒油分的影响

Figure 26. Effect of different planting densities on seed oil content

由图可知，不同处理对玉米籽粒淀粉含量的积累效应存在显著差异，各处理间淀粉含量呈现为MSZ>MSD>MSG的变化特征。实验结果显示，MSZ处理的籽粒淀粉含量达到全组最高水平，约为71.67%，表现出优于其他处理的碳水化合物合成与转化优势。结论表明，在免耕密植栽培模式下，MSZ处理能够通过优化群体微环境协调养分向籽粒的分配，在维持产量潜力的基础上显著提升了籽粒的淀粉品质积累。研究证实，针对河套灌区玉米高产栽培，通过合理的耕作与密度配置是实现产量构成因子与籽粒营养品质同步优化的关键途径，为该地区构建高产优质栽培体系提供了重要的数据参考。

图27 不同种植密度对植株籽粒淀粉含量的影响

Figure 27. Effect of different planting densities on starch content in plant seeds

由图可知，不同处理对玉米籽粒水分含量的调节效应存在显著差异，各处理间水分含量呈现为MSG>MSD>MSZ的变化特征。实验结果显示，MSG处理的籽粒水分含量最高，约为15.47%，而MSZ处理的水分含量最低，约为14.54%，表现出较好的后期脱水特性。结论表明，在免耕密植栽培模式下，MSZ处理能够通过优化群体微环境促进籽粒成熟过程中的水分散失，在维持产量潜力的基础上显著降低了收获期籽粒含水率。研究证实，针对河套灌区玉米机械化收获的需求，通过合理的耕作与密度配置是实现籽粒快速脱水与品质优化的关键途径，为该地区构建高效栽培体系提供了重要的数据参考。

图28 不同种植密度对植株籽粒水分含量的影响

Figure 28: Effect of Different Planting Densities on Seed Moisture Content

分析不同处理下玉米植株蛋白质含量数据可知，对照组的蛋白质含量最高，显著高于各免耕密植处理。各处理间的显著性差异分析显示，三个处理组的蛋白质含量虽在数值上略有差异，但彼此间差异未达显著水平，且均较CK出现了明显的下降。其中，产量表现最优的MSZ处理在蛋白质含量上相对最低。各试验组产品品质指标表现出MSG大于MSD大于MSZ的趋势，其中MSG处理组的蛋白质含量相对最高。该结果表明在本研究所采用的免耕密植条件下，不同具体农艺措施虽引起了植株蛋白质含量的微小数值波动，但未能实质性干预或显著改变玉米籽粒的营养物质积累进程，总体群体的基础产品品质保持了较高的稳定性。

图29 不同种植密度对植株籽粒油分的影响

Figure 29 Effect of Different Planting Densities on Seed Oil Content

产量数据为CK1121.74kg、MSD1309.84kg、MSZ1324.81kg、MSG1191.01kg。免耕密植处理对作物增产具有明显的促进作用。与对照组相比，MSD、MSZ及MSG三个处理的产量均实现了不同程度的增长。其中，MSZ表现最为突出，产量达到1324.81，较CK显著增产18.10%；MSD次之，产量为1309.84，增幅达16.77%；MSG的产量为1191.01，虽在各

处理组中增幅最小，但仍较CK提高了6.18%。综合分析表明，不同免耕密植模式对产量的提升效应存在差异，呈现出 $MSZ > MSD > MSG > CK$ 的趋势。这表明免耕密植技术能够有效提高作物的产量，其中MSZ在提高单产方面具有显著优势。

4讨论

4.1免耕密植对玉米抗倒伏特性的影响

免耕密植在形态、理化和力学特性这几个方面调节并增强了玉米的抗倒伏能力。形态学分析显示，这种种植模式虽然在一定程度上增加了植株高度，但同时降低了穗位系数，实现了重心的相对下移，优化了群体的物理结构。理化分析证实了，MSZ等处理促进了茎秆木质素的积累和生物量的有效分配，强化了茎秆的机械硬度。力学性能测试进一步表明，处理组基部节间的弯折力、穿刺强度和根系固持拉力均展现出显著的力学优势，有效降低了因为密度增加所带来的倒伏风险。总结来看，免耕密植模式构建了低重心、高强度这等个体特征，在生理和物理层面当中实现了个体抗性和群体结构的平衡，为河套灌区玉米的高产稳产和机械化收获提供出了重要的理论支撑。

本试验的研究重点在于免耕密植条件下玉米抗倒伏性的协同优化机制。首先在力学层面，突出了茎秆拉力、弯折力和穿刺强度的增强，从物理支撑角度确立了植株的抗倒伏优势；其次在形态层面方面，强调了在株高增加的背景之下，通过降低穗位系数来实现重心下移，实现了群体的物理稳定性结构；最后在生理生化层面当中，阐明了木质素积累和基部节间干物质对于强化茎秆机械性能重要性。本研究凭借多维度指标的关联分析，证实了MSZ等处理在维持群体整齐度的基础上，实现个体抗性和群体产量的权衡，为河套灌区玉米的高产稳产和机械化收获提供出了直接的理论依据。

4.2免耕密植对玉米产量的影响

免耕密植对于玉米产量形成所产生的影响，集中体现于群体增益和个体发育这两者之间的平衡。核心研究内容发现，伴随着种植密度的提高，单株穗部性状如穗长、行粒数和单穗重相较于对照组CK均呈现出规律性的下降趋势，这表明高密度环境加剧了植株之间对于光、温、水、肥等这些资源的竞争压力。凭借单位面积内有效穗数的显著增加，群体层面的产量潜力得以释放，有效弥补了单株生产力下降所造成的产量缺口，实现了由单株个体向群体产量的结构性转型。

生理功能的协同优化是保障密植条件下稳产高产的关键因素。实验数据指出，在免耕模式当中，MSZ和MSD等处理维持相对较高的功能叶面积，并且在上叶层和穗位叶层保持了较高的光合速率，显著增强了群体光合生产能力。同时，干物质向茎秆和穗部进行合理的分配，特别是基部节间充实度，不仅强化了植株的物理支撑性，更优化了库源代谢关系。

5结论

免耕密植通过降低穗位系数实现了玉米植株重心的相对下移，显著促进了基部节间木质素的定向积累，从力学层面协同提升了茎秆弯折力、穿刺强度及固持拉力，有效对冲了密度增加带来的倒伏风险。该模式在维持关键层位光合生理活性的基础上，优化了干物质向基部节间的分配，实现了个体机械抗性与群体稳产性能的同步增强，为河套灌区玉米机械化收获提供了核心理论依据。

致谢

本论文是在导师杨彦明教授的悉心指导下完成的。多年来，恩师在我的课程学习，试验研究、教学活动、学术交流、论文撰写和工作生活等方面都给予了极大的关怀和支持，并为我提供了良好的学习研究环境。导师的严谨治学、孜孜不倦、持之以恒的师表风范是我终身学习的楷模，在此向恩师表示诚挚的感谢和崇高的敬意！

感谢所有关心、帮助和支持我的人们!

参考文献

- Nassar S F ,Abbas O A ,Elshekh E M .Analyzing the Impact of Climate Change on Maize Production to Develop Innovative Strategies for Ensuring Global Food Security[J].Journal of Environmental & Earth Sciences, 2025, 7 (2) :DOI:10. 30564/JEES. V7I2. 8207.
- Liu J ,Yang W .Soybean maize strip intercropping: A solution for maintaining food security in China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2024, 23 (7) :2503-2506. DOI:10. 1016/J. JIA. 2024. 02. 001.
- 华树春, 钟钰. 我国粮食区域供需平衡和引发的政策启示[J]. 经济问题, 2021 (3) :100-107. HUA S C, ZHONG Y. Regional balance of grain supply and demand in China and the policy implications0. Econ. Problems, 2021 (3) :100-107.
- 曹炎, 杨艳涛, 王国刚. 我国玉米生产与消费时空格局演变及匹配性分析[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26 (05) :1-10. DOI:10. 13304/j. nykjdb. 2023. 0305.
- 武拉平, 江雅茹, 张昆扬, 等. 粮食安全视角下我国粮价波动特征与决定机制研究——基于小麦、水稻、玉米数据的分析[J/OL]. 价格理论与实践, 1-8[2026-05-10]. <https://doi.org/10.19851/j.cnki.CN11-1010/F.2026.02.075>.
- 白芳芳, 肖亚涛, 周淑梅, 等. 西北地区粮食安全评价及其障碍因子分析[J/OL]. 水土保持学报, 1-13[2026-05-10]. <https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbcxb.2026.03.032>.
- 田静莉. 种业全产业链升级对粮食安全保障能力的影响研究[J]. 分子植物育种, 2025, 23 (24) :8435-8440. DOI:10. 13271/j. mpb. 023. 008435.
- 尹昊, 张彦群, 王晨熹, 等. 品种和种植密度对玉米生理特性和产量的影响[J/OL]. 节水灌溉, 1-23[2026-05-10]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1420.TV.20260417.1004.040>.
- 芦宝森, 苏德悦, 赵本超, 等. 参后地玉米产量及光合特性对种植密度的响应[J/OL]. 吉林农业大学学报, 1-9[2026-05-10]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2026.0034>.
- 冯庆辉, 何志民, 周桁杰. 不同种植密度与施氮水平对土壤养分、玉米根系生长和产量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2026, 61 (01) :55-66. DOI:10. 13432/j. cnki. jgsau. 2026. 01. 007.
- 郭瑶, 柴强, 殷文, 等. 玉米密植光合生理机制及应用途径研究进展[J]. 作物学报, 2022, 48 (08) :1871-1883.
- 杨德光, 马德志, 于乔乔, 等. 玉米倒伏的影响因素及抗倒伏性研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25 (07) :28-38.
- 顾敏, 张猛, 刘永刚, 等. 河套灌区玉米免耕技术的实践探索与发展路径研究[J]. 园艺与种苗, 2025, 45 (11) :90-92. DOI:10. 16530/j. cnki. cn21-1574/s. 2025. 11. 034.
- 麻旭霞, 戎郁萍, 路战远, 等. 水氮耦合对河套灌区密植春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30 (12) :163-174.
- 王艺煊. 河套地区节水灌溉对青贮玉米产量及品质的影响研究[D]. 内蒙古农业大学, 2020. DOI:10. 27229/d. cnki. gnmnu. 2020. 000646.
- 卢军帅, 李云祥, 王兴富, 等. 高密度对甘肃黄灌区玉米品种农艺性状和产量的影响[J]. 作物杂志, 2018, (02) :97-102. DOI:10. 16035/j. issn. 1001-7283. 2018. 02. 017.

- [1]位国建, 荐世春, 方会敏, 等. 北方旱作区保护性耕作技术研究现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(03):195-200+211. DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553. 2019. 03. 35.
- 王佳诺, 陈桂平, 李盼, 等. 免耕地膜两年覆盖提高绿洲灌区玉米产量的灌浆期光合生理机制[J]. 中国农业科学, 2026, 59(06):1189-1202.
- 莫晓凡, 卢佳禹, 林俊杰, 等. 秸秆覆盖和免耕对玉米根系性状、产量和土壤物理属性的影响[J/OL]. 生态学杂志, 1-10[2026-05-10]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20250626.1150.002>.
- 郝展宏, 沙野, 米国华. 东北地区玉米秸秆覆盖技术应用现状与对策[J]. 玉米科学, 2021, 29(03):100-110. DOI:10.13597/j.cnki.maize.science.20210316.
- 王永亮, 胥子航, 李申, 等. 不同覆盖措施对土壤水热状况及春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2024, 50(05):1312-1324.
- 兰天娇, 张晓龙, 贺明, 等. 增密、少耕与化控耦合对玉米产量及光合特性的影响[J]. 玉米科学, 2023, 31(05):64-73. DOI:10.13597/j.cnki.maize.science.20230509.
- 吴贻波, 龚政, 常喜玲, 等. 增密对玉米花期冠层光合特性与粒库建成的影响特征[J]. 华北农学报, 2022, 37(S1):96-102.
- 王夏青, 宋伟, 张如养, 等. 玉米茎秆抗倒伏遗传的研究进展[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11):2261-2272.
- 张喜成, 曹晓良, 杨会勇, 等. 61份玉米自交系茎秆针刺强度与解剖结构的关系[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2025, 45(03):33-42. DOI:10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202411058.
- 张桂萍, Mukti Marasini, 李薇薇, 等. 不同玉米品种的茎秆性状对茎秆弹性和耐密性的响应[J]. 华北农学报, 2024, 39(02):79-89.
- 邓妍, 王创云, 赵丽, 等. 群体密度对玉米茎秆性状、土壤水分的影响及其与产量、倒伏率的关系[J]. 华北农学报, 2017, 32(05):216-223.
- 凌莉, 裴文东. 种植密度对不同熟期玉米茎秆抗倒伏特性及产量的影响[J]. 玉米科学, 2024, 32(02):106-113. DOI:10.13597/j.cnki.maize.science.20240214.
- 鲁晓民, 郭书磊, 张新, 等. 不同密度下玉米茎秆抗倒伏相关性状的产量构成分析[J]. 河南农业科学, 2023, 52(09):44-55. DOI:10.15933/j.cnki.1004-3268.2023.09.005.
- 王静, 王志红, 程建梅, 等. 玉米气生根性状与抗倒伏相关研究进展[J]. 农业科技通讯, 2022, (04):220-221+225.
- 马达灵, 高慧霞, 于晓芳, 等. 深松耕作对不同年代玉米品种生理成熟后的抗倒伏力学特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(01):140-149+184.
- 伍舒悦, 李秋祝, 李文莹, 等. 播种密度与氮肥施用量对玉米茎秆抗倒能力的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(02):117-123+130. DOI:10.13597/j.cnki.maize.science.20210218.
- 颜培启, 孔令捷, 池昇隆, 等. 植物生长调节剂复配腐植酸对玉米茎秆强度、籽粒灌浆及产量的影响[J/OL]. 作物杂志, 1-11[2026-04-16]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1808.S.20260211.1053.006>.
- 高春华, 赵海军, 赵逢涛, 等. 生长调节剂对玉米大豆带状间作下夏玉米茎秆特性与产量的影响[J]. 中国农业科学, 2025, 58(23):4920-4935.
- 李晶晶, 范文峰, 梁冰, 等. 种植密度与化控时期对北疆带状间作大豆和玉米茎秆抗倒伏特性的影响[J]. 应用生态学报, 2026, 37(01):93-102. DOI:10.13287/j.1001-9332.202601.015.

周弈,崔文倩,赵锦,等.保护性耕作介导的水热变化对东北玉米高产稳产性的可能影响[J].中国农业信息,2024,36(04):47-63.

佟桐,李彩凤,顾万荣,等.氮肥和密度对黑龙江春玉米物质积累、抗倒伏及产量的影响[J].西北农业学报,2019,28(03):377-387.

黄璐,乔江方,刘京宝,等.夏玉米不同密植群体抗倒性及机收指标探讨[J].华北农学报,2015,30(02):198-201.

鲁悦,鲍雪莲,霍海南,等.免耕条件下不同量秸秆覆盖还田提高东北黑土区玉米光合性能和产量的效应[J].植物营养与肥料学报,2023,29(05):840-847.

杨彩红,耿艳香,伏星舟,等.免耕轮作对西北荒漠绿洲小麦、玉米产量和光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(01):11-19.

甘淼,张振子,董智,等.免耕卧秆覆盖还田对辽西农田土壤理化特性及玉米产量的影响[J/OL].生态学杂志,1-11[2026-03-25].<https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20260205.1631.006>.

仇海龙,陈桂平,郭瑶,等.西北绿洲灌区玉米密植生产的可持续性研究[J].干旱地区农业研究,2025,43(06):88-98.

胡旦旦,张吉旺,刘鹏,等.密植条件下玉米品种混播对夏玉米光合性能及产量的影响[J].作物学报,2018,44(06):920-930.

宋利,刘广周,张华,等.密植滴灌水肥一体化对西南夏玉米产量及土壤细菌群落的影响[J].作物学报,2025,51(04):992-1004.

韦金贵,郭瑶,柴强,等.水氮减量密植玉米的产量及产量构成[J].作物学报,2023,49(07):1919-1929.

王佳诺,陈桂平,李盼,等.免耕地膜两年覆盖提高绿洲灌区玉米产量的灌浆期光合生理机制[J].中国农业科学,2026,59(06):1189-1202.

顾嘉诚,王家平,张增成,等.耕作方式对土壤团聚体稳定性、土壤质量和玉米产量的影响[J].中国农学通报,2025,41(17):78-87.

报告指标说明:

- 1.复写率:指相似或疑似重复内容在全文中的比重。
 - 2.自引率:指引用本人发表内容占全文的比重,需正确标注引用。
 - 3.他引率:指引用他人内容占全文的比重,需正确标注引用。
 - 4.专业术语率:指公式定理、法律条文、行业用语等在全文中的比重。
 - 5.去除本人引用相似率:指去除本人发表部分后,相似或引用内容占全文的比重,需正确标注引用。
 - 6.去除专业术语相似率:指去除专业术语后,相似或引用内容占全文的比重。
 - 7.自写率:指原创内容在全文中的比重。
 - 8.典型相似文章:指相似或引用内容占全文总相似比超过30%的文章。
-

相似片段中“综合”包括：《中文主要报纸全文数据库》《中国专利特色数据库》《中国主要会议论文特色数据库》《港澳台文献资源》《图书资源》《维普优先出版论文全文数据库》《年鉴资源》《古籍文献资源》《IPUB原创作品》

须知：

- 报告编号系送检论文检测报告在本系统中的唯一编号
- 本报告为维普论文检测系统算法自动生成，仅对您所选择比对资源范围内检验结果负责，仅供参考。

唯一官网：<https://vpcs.fanyu.com> 客服邮箱：vpcs@fanyu.com 客服热线：400-607-5550 客服QQ：4006075550