文章编号:1000-7601(2025)06-0088-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.06.09

西北绿洲灌区玉米密植生产的可持续性研究

仇海龙[1],陈桂平[1],郭 瑶[2],李 盼[1],
韦金贵[1],赵连豪[1],万平兴[1],殷 文[1]

(1.干旱生境作物学国家重点实验室/甘肃农业大学农学院,甘肃 兰州 730070;
2.西北师范大学生命科学学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:针对河西绿洲灌区施氮条件下玉米增密阈值不明、可持续性生产存在严峻挑战等问题,于 2019—2022 年开展田间试验,设置不施氮(N0)和施氮 450 kg·hm^{-2}(N1)两个施氮梯度及低密度 73 600 株·hm^{-2}(D1)、中密度 85 900 株·hm^{-2}(D2)和高密度 98 200 株·hm^{-2}(D3)三个种植密度,探究各处理的玉米产量表现、资源利用、经济效益,同时进行可持续性评价。结果表明:高密度结合施氮(N1D3)可有效提高玉米籽粒产量和生物产量,较低密度结合施氮(N1D1)和中密度结合施氮(N1D2)处理籽粒产量分别提高 18.9%和 23.0%,生物产量分别提高 14.6%和 6.5%;同时,N1D3 处理有利于提高玉米水分利用效率、氮素利用率和光能利用率,较 N1D1 处理分别提高 34.2%、10.5%和 23.1%,较 N1D2 处理分别提高 16.9%、5.1%和 7.3%。在保持总投入基本不变的情况下,N1D3 处理玉米总产值、单方水效益、纯收益和产投比也具有更优表现,较 N1D2 处理分别提高 21.6%、15.6%、37.1%和 20.9%。得益于对光能、水分、氮素利用等多维度资源利用效率的协同提升,N1D3 处理表现出较高的可持续性评价指数,较 N1D1 和 N1D2 处理分别提高 28.9%和 14.2%。综上,450 kg·hm^{-2}施氮条件配合 98 200 株·hm^{-2}的种植密度显著提高了玉米产量、光能、水分和氮素利用效率,可作为河西绿洲灌区玉米增产提效的可持续生产模式。

关键词:玉米;密植;资源利用效率;产量;经济效益;可持续性评价

中图分类号:S513 **文献标志码**:A

Study on the sustainability of maize production technology by increasing density in northwest oasis irrigation area

QIU Hailong[1], CHEN Guiping[1], GUO Yao[2], LI Pan[1],
WEI Jingui[1], ZHAO Lianhao[1], WAN Pingxing[1], YIN Wen[1]

(1. *State Key Laboratory of Arid Land Crop Science/College of Agronomy*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070 *China*; 2. *College of Life Sciences*, *Northwest Normal University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: In response to challenges such as the unclear threshold for increasing maize planting density under nitrogen application and the sustainability of production in the Hexi Oasis irrigation area, a four-year field experiment (2019-2022) was conducted. The experiment included two nitrogen application levels: no nitrogen (N0) and 450 kg·hm^{-2}(N1), along with three planting densities: low density (73 600 plants·hm^{-2}, D1), medium density (85 900 plants·hm^{-2}, D2), and high density (98 200 plants·hm^{-2}, D3). The study aimed to evaluate the effects of these treatments on maize yield performance, resource utilization, economic benefits, and overall sus-

收稿日期:2025-02-17 **修回日期**:2025-03-24

基金项目:甘肃省科技计划项目(25JRRA347,23JRRA704,23JRRA1407);国家自然科学基金项目(32372238,32460547);甘肃省高校产业支撑计划项目(2025CYZC-037);兰州市青年科技人才项目(2023-QN-182,2024-QN-128);西北师范大学青年教师科研能力提升项目(NWNU-LKQN2023-09);甘肃省高校研究生"创新之星"项目(2025CXZX-760)

作者简介:仇海龙(1997-),男,甘肃灵台人,硕士研究生,研究方向为作物栽培技术。E-mail: 17393164380@163.com
陈桂平(1971-),女,甘肃武威人,高级实验师,主要从事节水农业栽培研究。E-mail: chengp@gsau.edu.cn

通信作者:殷文(1988-),男,甘肃庆阳人,教授,主要从事作物多样化种植资源高效利用研究。E-mail: yinwen@gsau.edu.cn
赵连豪(1994-),男,甘肃白银人,助理研究员,主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: zhaolh@gsau.edu.cn

tainability. The results showed that the high planting density combined with nitrogen application (N1D3) effectively enhanced both grain yield and biomass yield of maize. Compared to the low density with nitrogen (N1D1) and medium density with nitrogen (N1D2) treatments, the grain yield increased by 18.9% and 23.0%, respectively, and biomass yield increased by 14.6% and 6.5%, respectively. Meanwhile, the N1D3 treatment also improved water use efficiency, nitrogen use efficiency, and light use efficiency, which were enhanced by 34.2%, 10.5%, and 23.1% compared to N1D1, and by 16.9%, 5.1%, and 7.3% compared to N1D2, respectively. In addition, N1D3 treatment also had better performance in total output, per cubic meter water benefit, net income, and output/input ratio under the condition of keeping the total input basically unchanged, which were 21.6%, 37.1%, 20.9%, and 15.6% higher than N1D2 treatment. Owing to the synergistic improvement in the efficiency of multiple resource dimensions, including light, water, and nitrogen use, the N1D3 treatment achieved a higher sustainability index, which increased by 28.9% and 14.2% compared to N1D1 and N1D2, respectively. In conclusion, under the nitrogen application rate of 450 kg · hm^{-2}, a planting density of 98 200 plants · hm^{-2} significantly enhanced maize yield as well as light, water, and nitrogen use efficiencies. This combination can be recommended as a sustainable production strategy to increase yield and resource efficiency for maize in the Hexi Oasis irrigation area.

Keywords: maize; dense planting; efficient utilization of resources; yield; economic benefits; sustainability evaluation

玉米作为全球三大粮食作物之一,其产量占谷物总产量的 35%以上,在保障粮食安全、饲料供应及工业原料供给中占据核心地位[1-2]。然而传统玉米生产模式长期依赖高水肥投入,导致资源利用效率低下、环境代价攀升,在气候变化与资源约束双重压力下,发展可持续生产技术已成为全球玉米产业转型的迫切需求[3]。研究发现,增加种植密度可作为提高群体光能截获和产量的关键途径,但密度的增加可能加剧植株竞争,诱发倒伏率上升、病虫害风险提高,并导致边际效益递减[4-5]。因此,如何确定适宜种植密度,优化资源利用效率,成为破解高产高效与可持续矛盾的关键。

国内外研究者已探索了多种农艺措施,其中优化水肥管理、调整种植模式、改善耕作措施和培育耐密植品种等措施可通过减少农田水分蒸发、增加土壤有机质、提高资源利用效率和促进作物生长等多种途径提升玉米密度适应性和密度耐受性,从而提高产量和经济效益[6-9]。然而,这些技术单独应用时可持续性表现各异。增密种植对农业可持续发展具有双重效应,一方面可通过提升叶面积指数来提高光能截获率,同时增加群体蒸腾占比,优化水分利用效率,也可促进根系互作形成“养分捕获网络”,提高氮素吸收效率[7, 10-11];但另一方面,密度超过生态阈值会导致冠层下部光强低于光补偿点而引发叶片早衰,也会导致茎秆抗折力下降使倒伏率升高,同时降低边际效益[12-14]。特别是在干旱绿洲灌区,水资源约束与高强度辐射的交互作用使密度调控面临更复杂的光-水-热耦合挑战[15]。因此在特定生态区,如何通过密度优化,在确保产量和经济效益最大化的同时,实现资源利用效率的协同提升,是亟需解决的关键问题。

绿洲灌区是玉米核心优势生产区,光照资源丰富,在水资源保障前提下适度增加种植密度是玉米增产的主要途径[16]。然而,在当地农业生产中,存在着因盲目增密导致的竞争效益增加和产量降低等问题,并且在农业可持续发展方面仍存在不容忽视的负面影响。本研究拟在两个施氮水平基础上设置不同种植密度,探究施氮与种植密度相配合对玉米产量、资源利用和经济效益的影响,以期为构建绿洲灌区高产、高效且可持续的玉米生产模式提供理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2019—2022 年在甘肃省武威市凉州区(37°45′N,102°38′E)进行。试验基地位于河西走廊东端,多年平均降水量约 124 mm,主要集中在 7—9 月,年蒸发量约 2 200 mm,属于典型的绿洲农业区。2019—2022 各年份总降水量分别为 192、150、174、215 mm,四年中 3—10 月试区气温和降水情况如图 1 所示。试区土壤为典型灌漠土,0~30 cm 土层有机质含量 17.9 g · kg^{-1}、全氮含量0.78 g · kg^{-1}、碱解氮含量 103.5 mg · kg^{-1}、速效钾含量 172.2 mg · kg^{-1}、速效磷含量 26.2 mg · kg^{-1},pH(1∶2.5 H_2O_2)8.35。

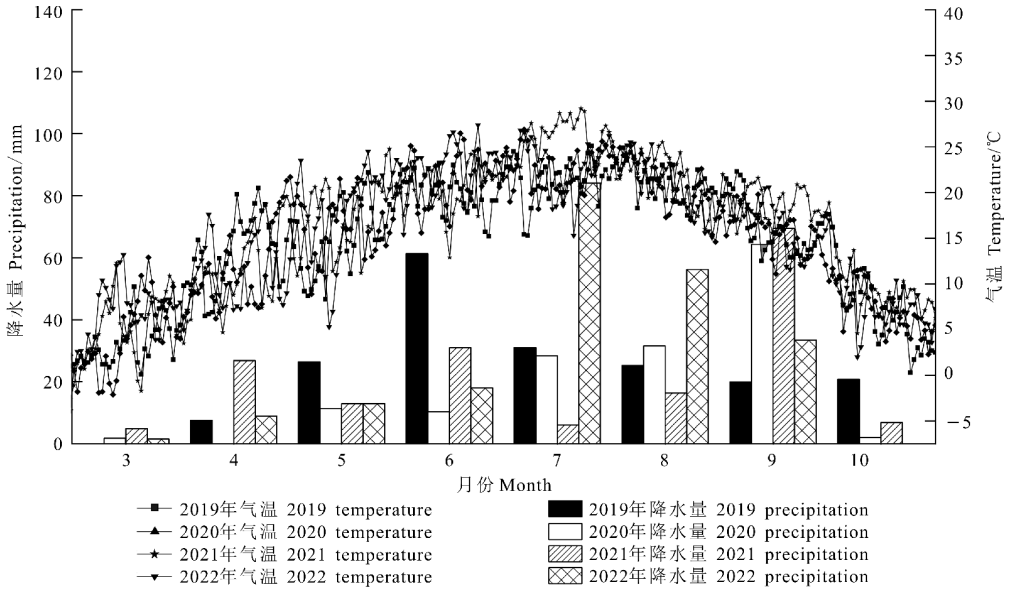


图1 2019—2022年作物全生育期降水量和气温变化

Fig.1 Temperature and precipitation during crop growing period during 2019-2022

1.2 试验设计

试验为裂区设计,种植模式为单作玉米。主区为两个施氮水平:0 kg·hm^{-2}(N0)和450 kg·hm^{-2}(N1);裂区为三个种植密度:低密度水平73 600株·hm^{-2}(D1)、中密度水平85 900株·hm^{-2}(D2)、高密度水平98 200株·hm^{-2}(D3),其中N1和D2为当地传统施氮量和种植密度。共6个处理,每个处理重复3次,小区面积为45.6 m^2(8.0 m×5.7 m),试验处理代码及施肥情况如表1所示。

供试玉米(*Zea mayz* L.)品种为'先玉335',于每年4月上旬播种,9月底或10月初收获。采用等行种植,每个小区种5带,每带3行,行距40 cm,用不同株距调控玉米种植密度,其中低密度处理(D1)玉米株距为34.0 cm、中密度处理(D2)玉米株距为29.1 cm、高密度处理(D3)玉米株距为24.5 cm。使用无色地膜覆盖,地膜宽度为140 cm,厚度为0.01 mm。供试氮肥为尿素(N≥46%),按基肥∶大喇叭口期追肥∶灌浆期追肥=3∶5∶2分施;供试磷肥为过磷酸钙(P_2O_5 46%),在播前整地时作为基肥一次性施入,施用量为337.5 kg·hm^{-2}。灌溉采用地方传统灌溉制度,在前一年入冬前统一灌冬水120 mm,玉米全生育期共灌水5次,在玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、开花期、灌浆期分别灌水90、120、120、120、90 mm。玉米生育期统一进行3次人工除杂草,其余田间措施均同当地大田。

表1 试验处理代码及施肥制度

Table 1 Test treatment code and fertilization system

处理 Treatment	施氮量 N application rate/(kg·hm^{-2})				种植密度/(株·hm^{-2}) Planting density/(plant·hm^{-2})
	全生育期 Whole growth period	基肥 Ground fertilizer	大喇叭口期 Trumpet period	花后15 d 15 days after anthesis	
N0D1	0	0	0	0	73600
N0D2	0	0	0	0	85900
N0D3	0	0	0	0	98200
N1D1	450	135	225	90	73600
N1D2	450	135	225	90	85900
N1D3	450	135	225	90	98200

1.3 测定指标与计算方法

1.3.1 产量表现 籽粒产量:玉米成熟后收获长5 m、一幅膜宽度(1.2 m)样方的植株,脱粒后采用PM-8188型谷物水分测定仪测定籽粒含水率,重复5次,取其平均值,籽粒产量均按含水量13%折合计算。生物产量:于玉米成熟期在各小区随机选取具有代表性的10株玉米,置于105℃烘箱中杀青1 h后80℃烘干至恒重,并称重计算生物产量。

1.3.2 水分利用率 采用水分平衡公式计算玉米生育期内耗水量,公式如下[17]:

$$ET = P + I + \Delta S \quad (1)$$

式中,ET为作物耗水量(mm);P为降水量(mm);I为灌水量(mm);ΔS为播前和收后土壤贮水量之差(mm)。由于试验地区地下水在30 m以下,灌水量较少,渗漏量和地下水上升的影响忽略不计[18]。

水分利用效率(WUE,kg·hm^{-2}·mm^{-1}):

$$WUE = GY/ET \quad (2)$$

式中,GY为玉米籽粒产量(kg·hm^{-2})。

1.3.3 氮素与氮肥利用率 玉米成熟期每小区随机取样5株具有代表性的地上部植株,按照叶片、茎

部(包括茎秆、叶鞘、苞叶和穗轴)和籽粒分开,在105℃烘箱中杀青 30 min,然后调至 80℃烘干至恒重,称重后用粉碎机粉碎过 0.2 mm 筛,混合均匀后装入自封袋中带回实验室,采用全自动碳氮分析仪测定各植株氮素含量[19],并计算氮素利用率和氮肥利用率。

植株吸氮量(kg · hm^{-2})= 植株干质量×含氮量　(3)

氮素利用率(kg · kg^{-1})= 籽粒产量/植株吸氮量　(4)

氮肥利用率(%)=(施氮区作物吸氮量-不施氮区作物吸氮量)/施氮量×100%　(5)

1.3.4　光能利用率　基于玉米产量,借助附近气象站获取玉米生长期内的太阳辐射值,计算玉米光能利用率[18]:

$$EY = GY \times 16.3 + SW \times 14.6 \quad (6)$$

$$LUE = EY/R \times 100\% \quad (7)$$

式中,EY 为玉米能量产量(MJ · hm^{-2});LUE 为玉米全生育期光能利用率(%);GY 为玉米籽粒产量(kg · hm^{-2});SW 为玉米秸秆产量(kg · hm^{-2});R 为玉米生长期间的太阳总辐射值(MJ · m^{-2});16.3 MJ · kg^{-1}和 14.6 MJ · kg^{-1}分别为玉米籽粒与秸秆对应的能量折算值[18]。

1.3.5　经济效益　试验总投入包括播种、堆肥、化肥、灌水、种子、地膜、农药、收获与耕地等农业生产资料的投入。结合各处理籽粒和秸秆产量,计算总产值、总投入、纯收益、产投比和单方水效益。籽粒、秸秆、农用材料和人工成本的价格按照当年的市场价格计算。

总产值=单位产品价格×产量　(8)

纯收益=农业总产出-农业生产总投入　(9)

产投比=农业总产出/农业生产总投入　(10)

单方水效益=总产值/耗水量　(11)

1.3.6　可持续评价　可持续评价指数(SEI)基于不同施氮和种植密度的籽粒产量、水分利用率、氮素利用率、光能利用率、总产值、总投入、纯收益、产投比和单方水效益,用于判别是否具有更高的产量和效益,其计算公式如下[20]。

$$ax_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{max}} \begin{pmatrix} i = 1,2,3,\cdots,6 \\ j = 1,2,3,\cdots,8 \end{pmatrix} \text{ 或 } \frac{x_{min}}{x_{ij}} \begin{pmatrix} i = 1,2,3,\cdots,6 \\ j = 9 \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中,ax_{ij}为 $i \times j$ 处的标准化值($0 < ax_{ij} \leqslant 1$);x_{ij}是处理 i 和变量 j 的相应精算值;x_{max}和 x_{min}分别为每个变量的最大值和最小值。

$$bx_{ij} = \frac{1}{ax_{ij}} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} (ax_{ij} - \overline{ax_{ij}})^2} \begin{pmatrix} i = 1,2,3,4 \\ j = 1,2,3,\cdots,8 \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中,bx_{ij}为每个变量的变异系数,即 ax_{ij}次重复的平均值,m 为 j 的最大次数。

$$SEI = \sum_{j=1}^{m} \left(ax_{ij} \times \frac{bx_{ij}}{\sum_{j=1}^{m} bx_{ij}} \right) \begin{pmatrix} i = 1,2,3,4 \\ j = 1,2,3,\cdots,8 \end{pmatrix} \quad (14)$$

式中,SEI 为各处理的可持续性评价指数,该值越高表明方法的可持续性越好。

1.4　数据统计与分析

采用 Excel 2016 整理并处理数据,SPSS 26.0 进行方差分析,显著性水平设定为 $P < 0.05$。采用 Origin 2021 Pro 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　不同施氮量和种植密度对玉米产量的影响

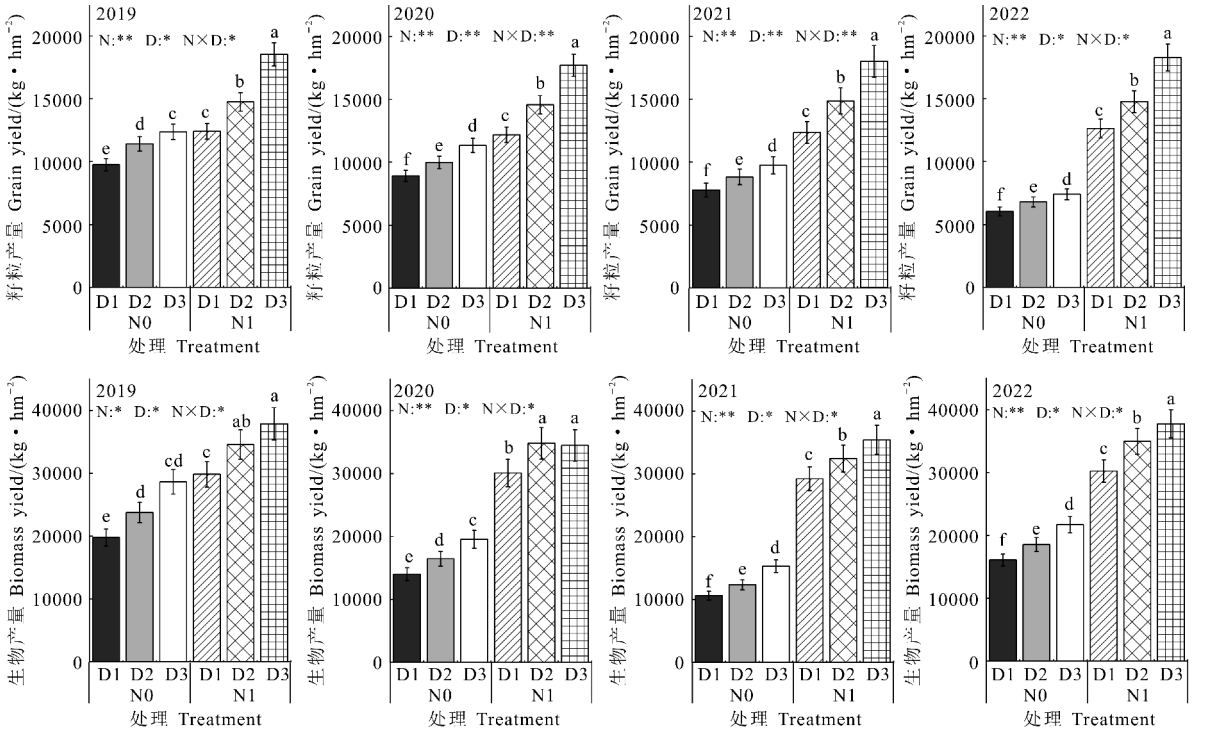
施氮和增加密度以及两者交互作用对玉米籽粒产量和生物产量具有显著影响(图 2)。随着试验年限的增加,各密度下不施氮处理玉米籽粒产量和生物产量呈下降趋势。施氮(N1)较不施氮(N0)处理玉米籽粒产量四年分别增加 36.2%、47.1%、71.8%和 125.7%,生物产量分别增加 41.7%、82.7%、98.8%和 153.3%。两种施氮水平下,四年中玉米籽粒产量均随种植密度的增大而增大,其中 D2 较 D1 处理平均增产 16.3%,D3 较 D2 处理平均增产 16.7%;玉米种植密度对生物产量的影响与籽粒产量相同,其中 D2 较 D1 处理生物产量平均增加 15.9%,D3 较 D2 处理平均增加 13.3%。在施氮条件下,高密度施氮处理(N1D3)较低密度施氮处理(N1D1)籽粒产量和生物产量分别平均显著增加 46.3%和 21.9%;N1D3 较 N1D2(中密度施氮处理)分别平均增加 23.0%和 6.5%,说明施氮和适当增加种植密度可有效提高玉米籽粒产量和生物产量。

2.2　不同施氮量和种植密度对玉米资源利用效率的影响

2.2.1　耗水量与水分利用效率　由图 3 可知,施氮和播种密度以及两者交互作用对玉米耗水量具有显著影响。施氮和增加种植密度均显著提高了耗水量,其中 N1 较 N0 处理四年中的耗水量分别提高 7.2%、8.6%、8.5%和 7.5%;D2 较 D1 处理平均提高 4.7%,D3 较 D1 处理平均提高 9.2%。在施氮和增密条件下,N1D2 较 N1D1 处理四年中的耗水量分别提高 5.2%、4.9%、5.9%和 5.1%,N1D3 较 N1D2 处理

分别提高 8.8%、9.1%、9.7%和 8.4%，说明施氮和增加种植密度可提高玉米对土壤水分的吸收利用，有利于产量的形成。

施氮和增加种植密度以及两者交互作用对玉米水分利用效率具有显著影响(图 4)。随着试验年限的增大，N0 水平下的水分利用效率呈逐年下降趋势。与 N0 相比，N1 水平四年中的水分利用效率平均显著提高 57.4%；相同氮水平下，D3 较 D2 处理四年中的水分利用效率分别提高 13.4%、13.0%、11.6%和13.7%，D3 较 D1 处理分别提高 27.6%、10.4%、12.9%和 11.1%。在施氮条件下增加种植密度可有效提高玉米水分利用效率，其中 N1D3 较 N1D1 处理四年分别提高 37.3%、33.2%、32.9%和 33.5%，N1D3 较 N1D2 处理四年分别提高 19.4%、15.8%、14.4%和 17.8%，说明施氮配合高密度(98 200株·hm^{-2})条件下，玉米的水分利用效率可达到最大值，有利于实现农田水分的高效利用。



注：不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。N 表示施氮，D 表示种植密度，N×D 表示施氮×种植密度；* 表示在 P<0.05 水平下差异显著，* * 表示在 P<0.01 水平下差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments (P<0.05). N indicates nitrogen level, D indicates planting density, N×D indicates nitrogen level×planting density. * means the significance at P<0.05. * * means the significance at P<0.01. The same below.

图 2 不同施氮量和种植密度下玉米籽粒产量和生物产量

Fig.2 Grain and biomass yields of maize under different nitrogen application rates and planting densities

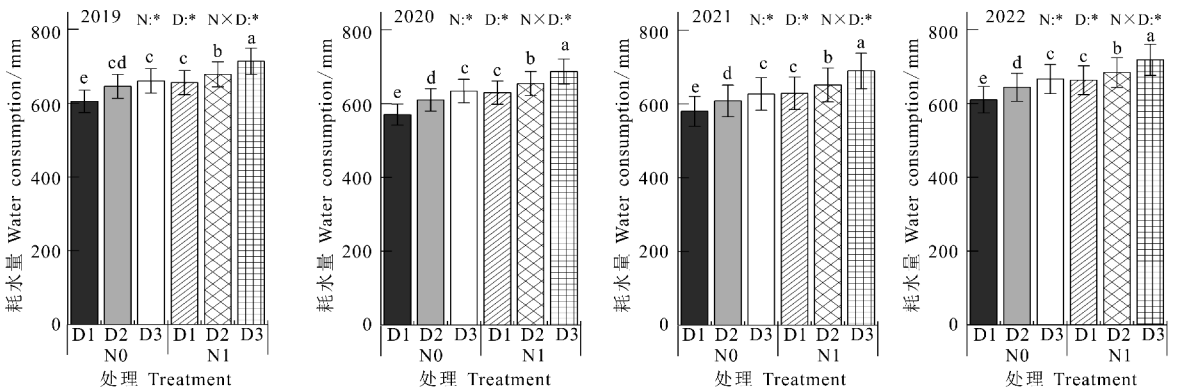


图 3 不同施氮量和种植密度下的耗水量

Fig.3 Water consumption under different nitrogen application rates and planting densities

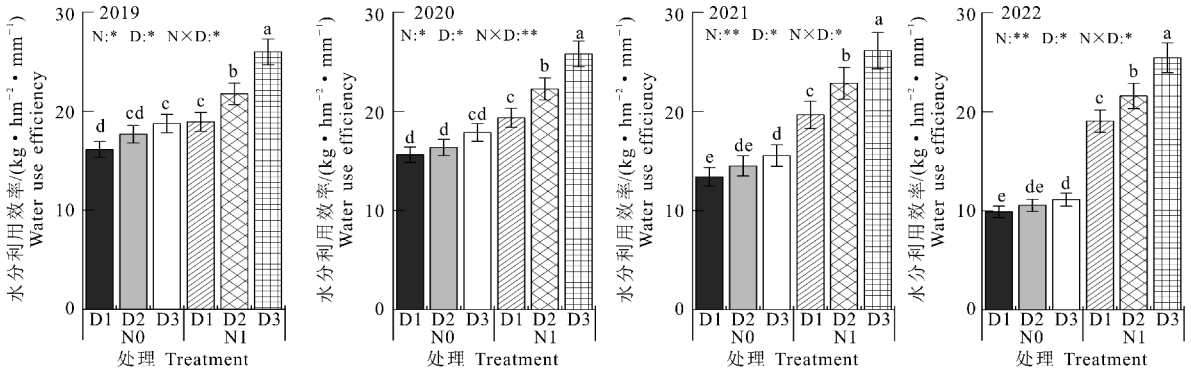


图 4　不同施氮量和种植密度下玉米的水分利用效率

Fig.4　Water use efficiency of maize under different nitrogen application rates and planting densities

2.2.2　*氮素利用率和氮肥利用率*　施氮与增加种植密度以及两者交互作用对玉米植株吸氮量和氮素利用率具有显著影响,种植密度对氮肥利用率具有显著影响(表 2)。随着试验年限的推进,N0 水平下的植株吸氮量、氮素利用率呈逐年下降趋势。施氮显著提高了植株吸氮量和氮素利用率,N1 较 N0 处理分别平均提高 38.9%和 21.4%。与 D1 相比,D3 密度下植株吸氮量和氮肥利用率分别显著提高 32.7%和 30.3%;与 D2 相比,D3 密度下两指标分别提高17.7%和 13.4%。N1D3 处理植株吸氮量、氮素利用率和氮肥利用率较 N1D1 处理分别提高 32.4%、10.5%和 30.3%,N1D3 较 N1D2 处理分别提高 17.1%、5.1%和 13.4%,说明在施氮条件下,适量增加种植密度可有效增加玉米吸氮量,从而提高氮素利用率和氮肥利用率。

2.2.3　*能量产量与光能利用率*　施氮和增加种植密度以及两者交互作用对玉米能量产量和光能利用率具有显著影响(图 5)。随着试验年限的推进,N0 水平下的能量产量和光能利用率呈逐年下降趋势。施氮显著提高了四年中的平均光能利用率,N1 较 N0 处理平均提高 92.8%。增加种植密度也具有提高光能利用率的作用,D3 较 D1 处理平均提高 28.6%,D3 较 D2 处理平均提高 11.3%。在施氮条件下增加种植密度,有效提高了四年平均光能利用率,其中 N1D3 较 N1D1 处理提高 23.1%、较 N1D2 处理提高 7.3%,说明在施氮条件下提高种植密度至 98 200 株·hm^{-2}可有效促进玉米生长季节对光资源的高效利用。

2.3　不同施氮量和种植密度对玉米经济效益的影响

2.3.1　*成本投入与经济效益*　施氮和增加种植密度以及两者交互作用对玉米总产值、纯收益和产投比具有显著影响,对于总投入仅有施氮对其影响显

表 2　不同施氮量与种植密度对玉米植株吸氮量、氮素利用率和氮肥利用率的影响

Table 2　Effects of different nitrogen application rates and planting densities on N uptake, N use efficiency and N fertilizer use efficiency of maize

年份 Year	施氮量 N level	种植密度 Planting density	植株吸氮量 N uptake /(kg·hm^{-2})	氮素利用率 N use efficiency /(kg·kg^{-1})	氮肥利用率 N fertilizer use efficiency /%
2019	N0	D1	215±7e	45.4±1.4b	
		D2	235±8d	48.6±1.0a	
		D3	294±8c	42.1±2.6c	
	N1	D1	295±10c	42.0±1.3c	17.9±0.9c
		D2	334±12b	44.2±2.7bc	22.0±1.4b
		D3	408±9a	45.5±1.7b	25.3±1.1a
2020	N0	D1	244±8d	36.6±2.3c	
		D2	274±9c	36.5±1.3c	
		D3	324±12bc	35.0±1.5b	
	N1	D1	330±12b	36.9±1.0b	19.3±0.8b
		D2	364±10b	40.1±1.5a	19.9±1.0b
		D3	424±7a	41.8±0.9a	22.2±0.9a
2021	N0	D1	223±9f	34.8±1.2c	
		D2	256±9e	34.5±1.5c	
		D3	287±10d	34.0±1.2c	
	N1	D1	317±5c	39.1±2.4b	20.8±0.9c
		D2	366±13b	40.6±1.5b	24.6±1.0b
		D3	412±6a	43.7±1.6a	27.9±1.2a
2022	N0	D1	215±7f	28.1±0.9d	
		D2	242±8e	28.0±2.8d	
		D3	289±10d	25.7±0.7e	
	N1	D1	302±8c	41.9±1.5c	19.3±1.3c
		D2	342±12b	43.2±1.1b	22.2±1.0b
		D3	402±12a	45.5±0.9a	25.1±1.1a
显著性 Significance (P value)					
施氮量 N level			**	**	ns
种植密度 Planting density			**	*	*
施氮量×种植密度 N level ×Planting density			*	*	ns

注:**与*分别表示在 0.01 和 0.05 水平下显著;ns 表示差异不显著。同列不同小写字母表示同一年份处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: ** and * indicate significant at 0.01 and 0.05 level, respectively, ns indicates non-significant differences. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments in the same year (P<0.05). The same below.

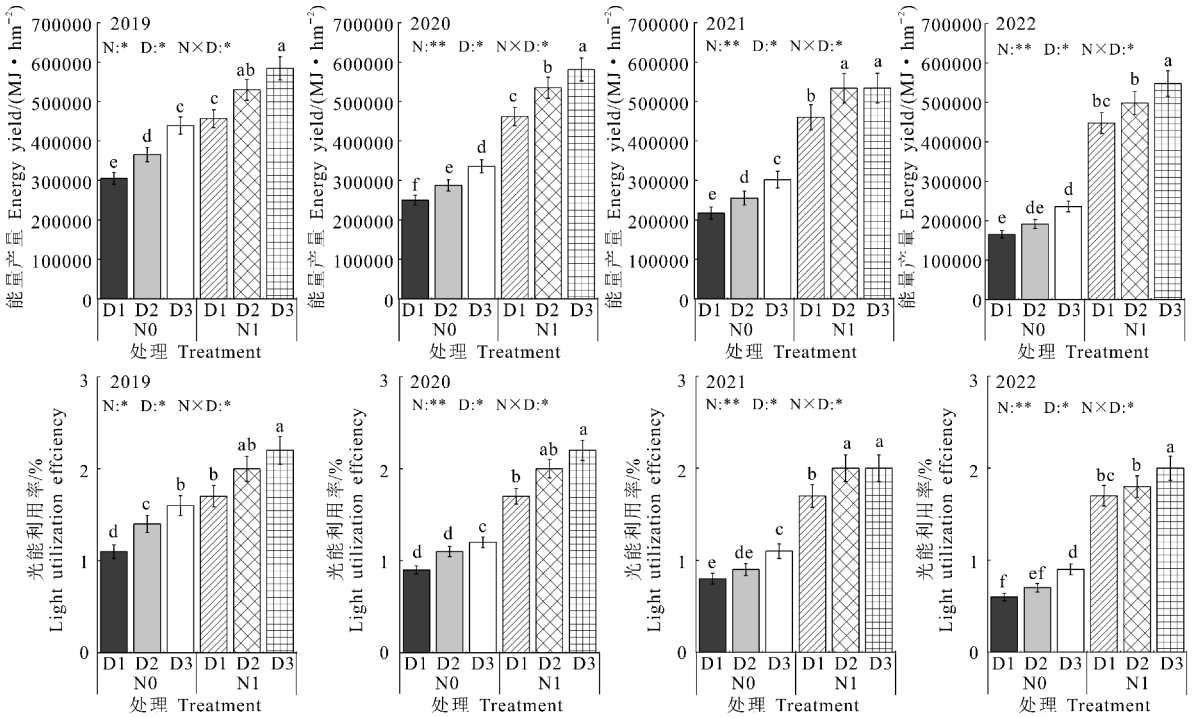


图 5 不同施氮量与种植密度下玉米能量产量和光能利用率

Fig.5 Energy yield and light utilization efficiency of maize under different nitrogen application rates and planting densities

著(表 3)。施氮显著提高了玉米总产值、总投入、纯收益和产投比,与 N0 相比,N1 处理总产值、总投入、纯收益和产投比分别平均提高 71.9%、16.6%、246.6%和 47.5%。增密仅对玉米总产值、纯收益和产投比影响显著,其中 D3 较 D1 处理分别平均提高 37.4%、85.7%和 35.0%,D3 较 D2 处理分别平均提高17.6%、34.2%和 16.5%。施氮和增密互作对总产值、纯收益和产投比具有显著影响,其中 N1D3 较 N1D1 处理玉米总产值、纯收益、产投比分别提高 44.2%、87.0%和 42.5%,N1D3 较 N1D2 处理分别提高 21.6%、37.1%和 20.9%。综上可知,在施氮条件下适当提升玉米种植密度(98 200 株·hm^{-2})可在维持总投入基本不变的情况下提高总产值、纯收益和产投比,有利于提高经济效益。

2.3.2 *单方水效益* 施氮和增加种植密度以及两者交互作用对玉米单方水效益具有显著影响(图 6)。在 N0 水平下,单方水效益呈逐年下降趋势。施氮对玉米单方水效益具有显著提升作用,与 N0 相比,N1 水平下四年中单方水效益分别提高27.3%、37.5%、59.7%和 111.3%。密度的增加同样提高了单方水效益,D3 较 D1 处理四年分别提高 27.3%、24.2%、25.0%和 25.7%,D3 较 D2 处理分别提高 13.1%、12.5%、10.8%和 13.3%。在施氮并增加密度条件下,N1D3 较 N1D1 处理四年中单方水效益分别提高 35.5%、31.5%、30.4%和 31.7%,N1D3 较 N1D2 处理四年分别提高 18.1%、14.7%、12.7%和 16.7%,说明施氮配合高密度(98 200 株·hm^{-2})种植最有利于单方水效益的增加,提高单方水所带来的经济效益。

2.4 不同施氮量和种植密度下玉米生产的可持续性评价

基于四年试验结果,通过可持续评价模型识别种植密度对施氮玉米生产的影响,由表 4 可知,N1D3 处理具有最高的可持续评价指数,较 N1D1、N1D2 处理分别提高 28.9%、14.2%;且 N1D3 处理具有较高的籽粒产量、水分利用效率、氮素利用率、光能利用率、总产值、单方水效益、纯收益、产投比评价得分,较 N1D1 处理分别提高 46.3%、34.2%、10.5%、23.1%、44.2%、32.3%、87.0%、42.5%,较 N1D2 处理分别提高 23.0%、16.9%、5.1%、7.3%、21.6%、15.6%、37.1%、20.9%,而 N1D3 处理总投入评价得分与其他处理无显著差异。综上可知,施氮条件下适当增加密度(98 200 株·hm^{-2})可获得较好的生产持续性,具有较高的资源利用效率和经济效益,可作为绿洲灌区增产增效的玉米生产技术。

表 3　不同施氮量与种植密度对玉米总产值、总投入、纯收益、产投比的影响

Table 3　Effects of different nitrogen application rates and planting densities on total output, total input, net income, and input-output ratio of maize

年份 Year	施氮量 N level	种植密度 Planting density	总产值 Total output /(CNY · hm^{-2})	总投入 Total input /(CNY · hm^{-2})	纯收益 Net income /(CNY · hm^{-2})	产投比 Input-output ratio
2019	N0	D1	26373±1085e	14310±679b	12063±611e	1.84±0.08e
		D2	30911±1320d	14410±484b	16501±444d	2.15±0.10d
		D3	33799±1469c	14510±689b	19289±991c	2.33±0.11b
	N1	D1	34001±1480c	16681±595a	17320±887d	2.04±0.09c
		D2	40342±1808b	16781±500a	23561±815b	2.40±0.11b
		D3	50133±1415a	16881±705a	33252±1123a	2.97±0.14a
2020	N0	D1	23903±1657f	14154±671b	9749±390e	1.69±0.07e
		D2	26823±1108e	14254±776b	12569±438d	1.88±0.08d
		D3	30515±1299d	14354±681b	16161±726c	2.13±0.10c
	N1	D1	33511±1455c	16619±592a	16892±865c	2.02±0.09c
		D2	39935±1787b	16719±557a	23216±1197b	2.39±0.11b
		D3	48074±1809a	16819±802a	31255±1418a	2.86±0.13a
2021	N0	D1	20840±1498f	14725±699b	6115±249f	1.42±0.06f
		D2	23706±1570e	14825±504b	8881±545e	1.60±0.07e
		D3	26332±1083d	14925±709b	11407±577d	1.76±0.08d
	N1	D1	33932±1776c	17141±817a	16791±560c	1.98±0.09c
		D2	40678±1826b	17241±422a	23437±1108b	2.36±0.11b
		D3	48518±2232a	17341±827a	31177±1414a	2.80±0.13a
2022	N0	D1	16149±1555f	14979±742b	1169±40f	1.08±0.04e
		D2	18228±1063e	15079±717b	3149±184e	1.21±0.05e
		D3	20058±1458d	15179±721b	4879±235d	1.32±0.06d
	N1	D1	34509±1506c	17433±832a	17076±674c	1.98±0.09c
		D2	40173±1300b	17533±736a	22640±966b	2.29±0.10b
		D3	49252±1470a	17633±341a	31619±1038a	2.79±0.13a
显著性 Significance (P value)						
施氮量 N level			**	**	**	*
种植密度 Planting density			**	ns	**	**
施氮量×种植密度 N level ×Planting density			*	ns	**	*

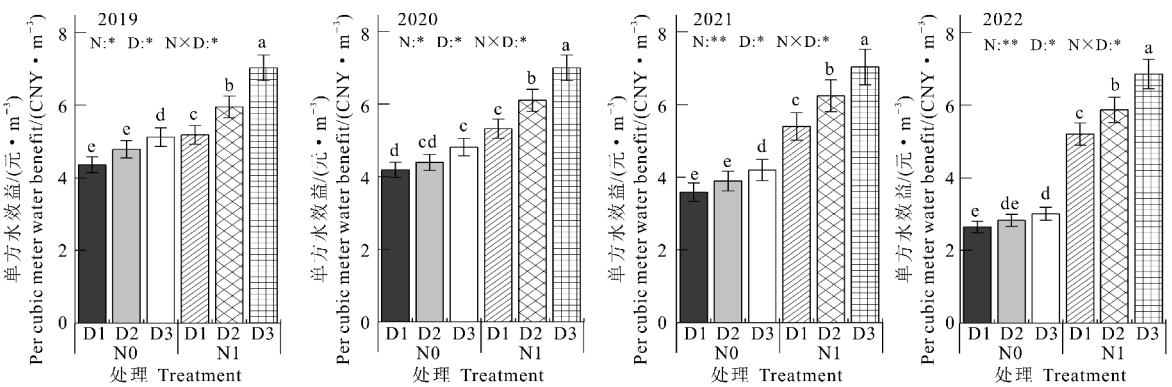


图 6　不同种植密度和施氮量下单方水效益

Fig.6　Per cubic meter water benefit under different nitrogen application rates and planting densities

3　讨　论

3.1　不同施氮水平和种植密度对玉米产量的影响

在玉米生产中,施氮水平与种植密度是调控群体结构和资源利用效率的关键农艺措施[21-22]。本研究表明,在施氮条件下,中密度(D2:8.59 万株 · hm^{-2})较低密度(D1:7.36 万株 · hm^{-2})处理籽粒产量和生物产量分别提高 18.9%和 14.6%,这与氮素对冠层光合系统的正向调控密切相关,可能是高氮供应促进了叶片氮素分配,提高了光合速率和叶面积指数,进而增加了光截获率[23]。研究表明,每增加 1 万株 · hm^{-2}密度需配合 20~30 kg · hm^{-2}氮素以维持叶片功能[24]。本研究中,高密度在施氮条件下较中密度使籽粒产量提升 23%,但生物产量增幅

表4 不同施氮及种植密度下玉米生产可持续性评价功能构成要素及评价指数

Table 4 Components of sustainability evaluation function and evaluation index of maize production under different nitrogen application rates and plant densities

处理 Treatment	评价指标得分 Evaluation indicator score									可持续评价指数 Sustainability evaluation index
	籽粒产量 Grain yield	水分利用效率 Water use efficiency	氮素利用率 N use efficiency	光能利用率 light utilization efficiency	总产值 Total output	单方水效益 Per cubic meter water benefit	总投入 Total input	纯收益 Net return	产投比 Input-output ratio	
N0D1	0.048	0.075	0.082	0.044	0.048	0.076	0.113	0.024	0.056	0.564
N0D2	0.055	0.084	0.083	0.052	0.054	0.084	0.113	0.034	0.063	0.622
N0D3	0.060	0.089	0.077	0.062	0.060	0.090	0.114	0.043	0.070	0.666
N1D1	0.073	0.066	0.090	0.086	0.074	0.067	0.131	0.056	0.074	0.717
N1D2	0.087	0.073	0.095	0.098	0.088	0.073	0.132	0.076	0.087	0.810
N1D3	0.107	0.081	0.100	0.105	0.107	0.082	0.133	0.105	0.105	0.925

仅为6.5%,表明高密度群体通过氮素再分配将更多同化物向籽粒转移。这一现象可能与绿洲灌区及时的水分供应缓解了高密度下的植株间的水分竞争压力有关,而干旱区常见的光合产物“源-库”失衡问题在此得以弱化[25]。因此,在绿洲灌区通过充足氮肥供应与高密度(9.8万株·hm^{-2})的协同配置可突破传统种植模式的生产瓶颈,进一步扩大氮密耦合效应,实现产量的稳步提升。

3.2 不同施氮水平和种植密度对玉米资源利用的影响

土壤耗水量可以反映作物需水规律,影响作物对养分的吸收利用,进一步影响作物生长发育。水分利用效率决定作物对土壤水分的利用能力。本研究表明,施氮处理显著使玉米生育期耗水量提升8.0%,这可能与氮素供应对玉米根系发育和蒸腾需求的协同调控有关[7]。氮素作为植物生长必需元素,施用后可促进根系向深层土壤延伸,增强植株对土壤水分的吸收能力,从而加速土壤水分消耗[26]。杜红等[27]研究同样发现,施氮处理使玉米根长密度增加28%,根系下扎深度增加15~20 cm,显著提高了水分利用效率。此外,氮素通过调控气孔导度和光合速率可能加剧了植株蒸腾作用,导致耗水总量上升[13]。本研究还发现,在施氮条件下,高密度较中密度和低密度处理水分利用效率分别提高16.9%和34.6%,这可能与群体结构优化对光温水资源的再分配密切相关[6]。吸氮量影响作物产量和氮素利用率。本研究中,在施氮高密度条件下,植株吸氮量、氮素利用率和氮肥利用率较中密度分别提高17.1%、5.1%和13.4%,较低密度分别提高32.4%、10.5%和30.3%。表明种植密度增加可强化氮素吸收转化过程,这一结果与前人提出的“密度—氮素互作假说”相吻合,即适度密植通过增强根系分泌物(如有机酸、酶类)的分泌促进土壤氮素矿化和根系吸收[28-29];同时,高密度群体形成的微环境可降低硝态氮淋失风险[30]。本研究中氮肥利用率的提升幅度显著高于氮素利用率,说明密度增加更有利于提高肥料氮的转化效率。

光能利用率的响应模式揭示了群体结构优化与资源竞争的动态平衡[10]。本研究发现,在施氮条件下,高密度较低密度处理光能利用率平均提升23.1%,而高密度较中密度处理光能利用率平均增幅为7.3%,表明光能转化效率的提升存在密度梯度依赖性,高密度群体可增加垂直叶层分布均匀度,减少漏光损失,这与前人提出的“光截获理论”相吻合[31]。然而,当密度超过9万株·hm^{-2}时,下部叶片光强可能低于光补偿点,导致呼吸消耗增加[12]。本研究中高密度条件下,玉米仍能保持光能利用率增长,可能与绿洲灌区太阳辐射强度高及昼夜温差大有关,有助于延长光合活性时间并抑制暗呼吸[32]。

3.3 不同施氮水平和种植密度对玉米经济效益和可持续性的影响

农田经济效益是农业发展的核心目标之一,直接关系到农民的收入和农村经济的繁荣。农业可持续性是指在满足当前需求的同时,不损害后代满足其需求的能力,实现经济、社会和环境的协调发展。本研究中,施氮与高密度种植协同增效模式在干旱绿洲灌区表现出显著的经济优势,其中施氮情况下高密度较低密度和中密度处理的总产值分别提高44.2%和21.6%、纯收益分别提升87.0%和37.1%,这可能源于绿洲灌区独特的光热资源组合为高密度群体维持较高的光合生产力提供了基础[10]。本研究还发现,与低密度和中密度处理相比,施氮结合高密度种植处理产投比增幅分别为42.5%和20.9%,可能是因为施氮可通过优化冠层光合效率提高产量,而密植则强化了群体光能截获能力[10, 33],两者交互作用增加了农业总产出,进而提高了产投比。相关研究显示,在施氮量超过400 kg·hm^{-2}时,夏玉米普遍出现边际效益递减规律[34]。但本研究在施氮450 kg·hm^{-2}的情况下仍表现出较

高的经济效益,可能因为在高密度条件下,群体通过优化冠层结构,维持了灌浆中后期较高的群体光合速率,提高了氮素的充分吸收和转运[12]。

单方水效益是衡量农业水资源利用合理性的重要指标[10]。本研究发现,施氮配合高密度种植条件下玉米单方水效益显著提升 12.7%~35.5%,一方面可能因为高密度群体通过增大叶面积指数进而减少了土壤无效蒸发[35],另一方面植株间竞争可促使植株个体水分利用效率提升。但当种植密度超过临界阈值时,边际效益可能下降。本研究设置的高种植密度均未超过该区域种植密度阈值(10.35~12.9 万株·hm^{-2})[15, 17, 19],验证了干旱区适度密植的可行性。本研究通过对不同指标进行可持续性评价发现,在施氮条件下,高密度种植处理可持续指数较低密度和中密度处理分别提高 28.9% 和 14.2%,这主要得益于光能、水分、氮素利用率等多维度资源利用效率的协同提升(表 2,图 4、5)。综上可知,在河西绿洲灌区,450 kg·hm^{-2}施氮量配合 98 200 株·hm^{-2}密度可实现经济收益与资源效率的协同提升,对保障西北旱区粮食安全具有重要实践价值。需要注意的是,长期高施氮水平和高密度种植易引发土壤物理结构破坏、资源竞争加剧、温室气体排放激增及病虫害加剧等问题,导致产量下降。精准氮素管理技术、耐密抗倒品种选育、土壤健康修复技术以及无人机智慧调控技术等可在一定程度解决以上问题。未来需通过长期定位试验界定生态阈值,构建多目标协同模型,推动政策激励与绿色认证,实现高产与可持续的平衡,助力干旱灌区农业绿色转型。

4　结　论

在西北绿洲灌区,450 kg·hm^{-2}施氮量配合 98 200株·hm^{-2}种植密度可显著提高玉米籽粒产量(23.0%~46.3%),促进水分利用效率(14.4%~37.3%)、氮素利用率(14.4%~37.3%)和光能利用率(7.3%~23.1%)的同步提升,实现资源高效利用。在氮肥和密度的协同效应下,该模式在农资投入基本不变的同时,有效提高了玉米农田的总产值(21.6%~44.2%)、纯收益(37.1%~87.0%)和产投比(20.9%~42.5%)。此外,该模式基于对玉米产量、资源利用及经济效益的综合评价而获得较高的可持续性评价指数(0.925)。因此,450 kg·hm^{-2}施氮条件配合 98 200 株·hm^{-2}的种植密度可作为河西绿洲灌区玉米增产提效的可持续生产模式。

参 考 文 献

[1] 孟春红, 路振广. 粮食安全与玉米增产潜力的研究[J]. 中国农村水利水电, 2012, (9): 19-23, 26.
MENG C H, LU Z G. Research on food security and potential of maize yield increase[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, (9): 19-23, 26.

[2] 仇焕广, 李新海, 余嘉玲. 中国玉米产业:发展趋势与政策建议[J]. 农业经济问题, 2021, (7): 4-16.
QIU H G, LI X H, YU J L. China maize industry: development trends and policy suggestions[J]. Issues in Agricultural Economy, 2021, (7): 4-16.

[3] 苟志文, 殷文, 柴强, 等. 干旱灌区小麦间作玉米麦后复种绿肥的可持续性分析[J]. 中国农业科学, 2022, 55(7): 1319-1331.
GOU Z W, YIN W, CHAI Q, et al. Analysis of sustainability of multiple cropping green manure in wheat-maize intercropping after wheat harvested in arid irrigation areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(7): 1319-1331.

[4] 刘佳敏, 汪洋, 牛金璨, 等. 不同施氮水平下增密对玉米产量及抗倒伏性状的影响[J]. 农学学报, 2021, 11(2): 23-29.
LIU J M, WANG Y, NIU J C, et al. Effects of densification on corn yield and lodging resistance under different nitrogen levels[J]. Journal of Agriculture, 2021, 11(2): 23-29.

[5] 薛军, 王克如, 谢瑞芝, 等. 玉米生长后期倒伏研究进展[J]. 中国农业科学, 2018, 51(10): 1845-1854.
XUE J, WANG K R, XIE R Z, et al. Research progress of maize lodging during late stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(10): 1845-1854.

[6] MA Y N, REN J W, YANG S J, et al. Enhancing maize yield and water productivity through coordinated root-shoot growth under mild water stress in dense planting[J]. Field Crops Research, 2025, 323: 109786.

[7] GAO Z H, LIANG L, WANG X B, et al. Soil compaction reduces the yield potential of densely planted maize (*Zea mays* L.) by disrupting root and shoot growth coordination[J]. Plant and soil, 2025. https://doi.org/10.1007/s11104-025-07272-2.

[8] ZHANG S, PENG Y X, ZHANG F X, et al. Impact of no-tillage and reduced nitrogen input on corn yield and nitrogen efficiency in the corn belt of Northeast China[J]. Field Crops Research, 2025, 322: 109742.

[9] 邵冠贵, 李盼, 胡发龙, 等. 干旱灌区地膜秸秆带状覆盖对玉米农田土壤温度的调控效应[J]. 西北农业学报, 2024, 33(12): 2261-2275.
SHAO G G, LI P, HU F L, et al. Regulation effect of strip mulching with plastic and straw on soil temperature for maize farmland in arid irrigated areas[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2024, 33(12): 2261-2275.

[10] 郭志鹏, 李盼, 胡发龙, 等. 绿洲灌区玉米光能利用与水分生产效益对地膜秸秆带状覆盖的响应[J]. 玉米科学, 2024, 32(9): 59-69.
GUO Z P, LI P, HU F L, et al. Response of light use efficiency and water production efficiency of maize in oasis irrigation areas to strip mulching with plastic film and straw[J]. Journal of Maize Sciences, 2024, 32(9): 59-69.

[11] WU H Y, RAN L L, WANG J Q, et al. Tillage effects on maize yield, N use efficiency and GHG emissions under parallel N application in Northwest China[J]. Field Crops Research, 2025, 322: 109735.

[12] 耿广涛, 宋桂成, 董文庆, 等. 种植密度对不同叶位玉米叶片光合特性的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(8): 1589-1595.
GENG G T, SONG G C, DONG W Q, et al. Effect of different plant density on leaves photosynthesis of maize (*Zea mays* L.) at different leaves position[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(8): 1589-1595.

[13] WEI J, CHAI Q, YIN W, et al. Grain yield and N uptake of maize in response to increased plant density under reduced water and nitrogen supply conditions[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2024, 23(1): 122-140.

[14] KONG F L, LIU F, LI X L, et al. Ecological factors regulate stalk lodging within dense planting maize [J]. Field Crops Research, 2024, 317: 109529.

[15] 范虹, 殷文, 胡发龙, 等. 绿洲灌区密植对氮肥减量玉米产量的补偿潜力[J]. 中国农业科学, 2024, 57(9): 1709-1721.
FAN H, YIN W, HU F L, et al. Compensation potential of dense planting on nitrogen reduction in maize yield in oasis irrigation area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(9): 1709-1721.

[16] WANG Y L, LYU H, YU A Z, et al. No-tillage mulch with green manure retention improves maize yield by increasing the net photosynthetic rate[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 159: 127275.

[17] 张展军, 杨宏伟, 樊志龙, 等. 绿洲灌区免耕一膜两年用玉米密植的水分承载潜力[J]. 中国农业科学, 2021, 54(16): 3406-3416.
ZHANG Z J, YANG H W, FAN Z L, et al. Water-carrying potential of no-tillage with plastic film mulching for 2-year coupled with maize high-density planting in oasis irrigation area[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(16): 3406-3416.

[18] 李盼, 陈桂平, 苟志文, 等. 绿洲灌区春小麦光能利用与水分生产效益对秸秆还田方式的响应[J]. 作物学报, 2023, 49(5): 1316-1326.
LI P, CHEN G P, GOU Z W, et al. Response on light energy utilization and water production benefit of spring wheat to straw retention in an oasis irrigated area[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(5): 1316-1326.

[19] 闫尚龙, 王琦明, 柴强, 等. 绿洲灌区玉米籽粒产量及品质对密植及间作豌豆的响应[J]. 作物学报, 2025, 51(6): 1665-1675.
YAN S L, WANG Q M, CHAI Q, et al. Grain yield and quality of maize in response to dense density and intercropped peas in oasis irrigated areas[J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(6): 1665-1675.

[20] GOU Z W, YIN W, ASIBI A E, et al. Improving the sustainability of cropping systems via diversified planting in arid irrigation areas[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2022, 42(5): 88.

[21] WU X R, LI Z M, LI W J, et al. Reducing fertilization with high planting density increases maize yield stability and nitrogen use efficiency in semi-arid areas[J]. European Journal of Agronomy, 2024, 159: 127223.

[22] 田龙兵, 沈兆鉴, 赵孝天, 等. 种植密度与施氮量互作对不同玉米品种产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(21): 4221-4237.
TIAN L B, SHEN Z Y, ZHAO X T, et al. Interactive effects of planting density and nitrogen application rate on plant grain yield and water use efficiency of two maize cultivars[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(21): 4221-4237.

[23] 刘秉鑫, 孟浩峰, 李玲玲, 等. 有机肥替代基施化肥氮对旱作玉米叶片光合性能、产量及氮肥利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2024, 32(9): 96-107.
LIU B X, MENG H F, LI L L, et al. Effects of organic fertilizer substitution for basal chemical nitrogen on photosynthetic performance, yield, and nitrogen use efficiency in rainfed maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2024, 32(9): 96-107.

[24] 任佰朝, 范霞, 董树亭, 等. 种植密度和施氮量对不同株高夏玉米产量和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 269-277.
REN B Z, FAN X, DONG S T, et al. Effect of plant density and nitrogen rate on yield, nitrogen uptake and use efficiency of summer maize hybrids with different plant height[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2017, 23(2): 269-277.

[25] 魏廷邦, 柴强, 王伟民, 等. 水氮耦合及种植密度对绿洲灌区玉米光合作用和干物质积累特征的调控效应[J]. 中国农业科学, 2019, 52(3): 428-444.
WEI T B, CHAI Q, WANG W M, et al. Effects of coupling of irrigation and nitrogen application as well as planting density on photosynthesis and dry matter accumulation characteristics of maize in oasis irrigated areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(3): 428-444.

[26] ZHENG D S, CUN Y J, DU B X, et al. Nitrogen enhances drought tolerance of maize during the jointing stage by increasing the proportion of deep nodal roots and reducing the biosynthesis of lignin in root system [J]. Plant and Soil, 2025, 510(1): 49-70.

[27] 杜红, 张亚菲. 氮肥施用深度对夏玉米氮素利用、产量及根系生理的影响[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(13): 112-119.
DU H, ZHANG Y F. The effect of nitrogen fertilizer application depth on nitrogen utilization, yield, and root physiology of summer maize[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(13): 112-119.

[28] 肖万欣, 刘晶, 史磊, 等. 氮密互作对不同株型玉米形态、光合性能及产量的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(19): 3690-3701.
XIAO W X, LIU J, SHI L, et al. Effect of nitrogen and density interaction on morphological traits, photosynthetic property and yield of maize hybrid of different plant types[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(19): 3690-3701.

[29] HOU W F, KHAN M R, ZHANG J L, et al. Nitrogen rate and plant density interaction enhances radiation interception, yield and nitrogen use efficiency of mechanically transplanted rice[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 269: 183-192.

[30] 肖小平, 李超, 唐海明, 等. 秸秆还田下减氮增密对双季稻田土壤氮素库容及氮素利用率的影响[J]. 中国生态农业学报:中英文, 2019, 27(3): 422-430.
XIAO X P, LI C, TANG H M, et al. Soil nitrogen storage and recovery efficiency in double paddy fields under reduced nitrogen dose and increased crop density[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(3): 422-430.

[31] YANG X, LI R, JABLONSKI A, et al. Leaf angle as a leaf and canopy trait: Rejuvenating its role in ecology with new technology[J]. Ecology Letters, 2023, 26(6): 1005-1020.

[32] 王丽萍, 李盼, 赵连豪, 等. 西北绿洲灌区玉米叶片衰老特征对不同地膜覆盖利用方式的响应[J]. 作物学报, 2025, 51(1): 233-246.
WANG L P, LI P, ZHAO L H, et al. Response of senescence characteristics for maize leaves under different plastic mulching and using patterns in oasis irrigation areas of northwestern China [J]. Acta Agronomica Sinica, 2025, 51(1): 233-246.

[33] 朱启林, 向蕊, 汤利, 等. 间作对氮调控玉米光合速率和光合氮利用效率的影响[J]. 植物生态学报, 2018, 42(6): 672-680.
ZHU Q L, XIANG R, TANG L, et al. Effects of intercropping on photosynthetic rate and net photosynthetic nitrogen use efficiency of maize under nitrogen addition[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(6): 672-680.

[34] 夏文豪, 刘涛, 唐诚, 等. 北疆滴灌玉米施氮量估算及减氮增铵效应[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 79-84, 102.
XIA W H, LIU T, TANG C, et al. N recommendation and decreasing usage of nitrogen and enhanced ammonium for maize under drip irrigation condition[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(1): 79-84, 102.

[35] KALOGEROPOULOS G, ELLI E F, TRIFUNOVIC S, et al. Historical increases of maize leaf area index in the US corn belt due primarily to plant density increases[J]. Field Crops Research, 2024, 318: 109615.