

河套地区无膜浅埋滴灌对玉米产量及经济效益的影响

张梦楠^{1,2} 张国强² 薛军² 朱西雅² 谢瑞芝²
许高平³ 李少昆² 王克如² 明博² 葛均筑¹

(¹天津农学院农学与资源环境学院/天津市主要农作物智能育种重点实验室, 300392, 天津; ²中国农业科学院作物科学研究所/农业农村部作物生理生态重点实验室, 100081, 北京; ³天津农学院现代农业科学技术研究院, 300392, 天津)

摘要 全球农业正面临着保障粮食安全与实现绿色可持续发展的双重挑战。设置膜下滴灌(FM)、无膜浅埋滴灌(NM)和覆膜漫灌(T)3种栽培模式,以及7.5万(低密)、9.0万(中密)和10.5万株/hm²(高密)3个种植密度,探讨其对玉米干物质积累量、产量形成及经济和生态效益协同机制的影响。结果表明,FM模式显著缩短玉米生育期,出苗期和成熟期较NM模式分别提前2.5~3.0和4.0~6.5 d;但NM模式的干物质积累量与FM模式无显著差异,且收获指数(HI)持平。高密度种植下,NM模式的籽粒产量与FM模式相当,但其单位产量温室气体(GHG)排放强度降低30.0%。NM模式消除地膜生产排放,减排贡献18.7%。经济方面,NM模式净收益较T模式提高87.3%,得益于地膜成本节省及水肥利用效率提升;环境方面,其单位产量GHG排放强度低于全球玉米生产均值。综上,NM模式在实现“吨粮田”目标的同时兼顾“低碳田”建设,为河套灌区探索粮食生产与低碳发展协同路径提供了理论依据。

关键词 绿色农业; 玉米; 无膜浅埋滴灌; 经济效益; 温室气体排放

玉米是我国第一大粮食作物,兼具粮用、饲用和工业加工原料等多种用途,对保障我国粮食安全具有重要的意义^[1-2]。全球气候变化和耕地资源约束背景下,发展环境友好型高产栽培技术是现代农业可持续发展的必然选择。研究^[3-4]指出,优化群体结构和提高种植密度是玉米增产的关键途径。当密度从6.0万株/hm²增至13.5万株/hm²时,光能截获率可提升22%~35%^[5]。2020年我国新疆奇台县在13.5万株/hm²的种植密度下获得了最高产量(24 948.75 kg/hm²)^[6]。这一增产效应源于密度调控对单位面积穗数、穗粒数和千粒重的协同优化机制^[7]。然而,高密度种植对水热资源的高效利用提出了更高要求,传统覆膜栽培模式的技术局限性日益凸显。

地膜覆盖技术通过改善耕层微环境、延长生育周期和抑制杂草生长^[8-10],在我国干旱半干旱地区玉米生产中发挥了关键作用,可使产量提升20%~50%^[11]。但长期覆膜导致土壤中残膜量达2.0×10⁶ t,回收率不足60%^[12],土壤中残留的大量薄膜不仅降低了土壤通透性,增加了土壤容重^[13-14],造成土壤结构退化,还损害作物生长,降低耕地质量和作物

产量^[13,15-16]。研究^[17]表明,地膜对农业生产的积极影响可能会被残膜负面作用消除或者抵消,严重威胁农业生产以及生态环境的保护^[18-19],发展替代性绿色栽培技术迫在眉睫。

河套地区处于温带大陆性干旱-半干旱气候带,光照资源充足,昼夜温差大,有利于作物有机质的积累,属于农作物黄金种植带^[20]。该区夏季高温干旱缺水,在传统生产模式中,品种繁杂、种植密度偏低、病虫害严重、水肥管理粗放和残膜难降解等是限制玉米产量的主要因素^[21]。农民经济收益低,生态环境压力逐渐增大^[22]。滴灌水肥一体化技术解决了传统灌溉下施肥总量控制和分期调控的难题,可精确地调控水分和肥料的施入数量及时间,大幅度提高水分和氮素利用效率。杜君等^[23]研究表明,与传统灌溉相比,滴灌技术可增产5.30%~6.10%,水分利用效率可提高36.10%~39.42%,氮肥利用率可提高35.29%~37.56%。浅埋滴灌是一种新型滴灌技术,地表无膜覆盖,滴灌管浅埋于地表(3~5 cm),在发挥滴灌技术精准调控水分优势的同时避免残膜污染等问题,在半干旱风沙地区具有更大的应用价值^[24]。杨恒山等^[25]在内蒙古

作者简介: 张梦楠, 主要从事玉米栽培研究, E-mail: 1685508208@qq.com

葛均筑为通信作者, 研究方向为作物栽培生理学, E-mail: gjz0121@126.com

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFD2301802); 国家自然科学基金(32101831); 北方农牧技术创新中心(BFGJ2022001)

收稿日期: 2025-03-01; 修回日期: 2025-04-29; 网络出版日期: 2026-02-03

古东部区研究发现,玉米籽粒产量表现为浅埋滴灌>传统漫灌>膜下滴灌。随着现代化智能农业的进步、栽培技术的改进以及田间管理模式的更新,无膜机械作业更利于实现除草和喷药等作业^[26]。相较于传统大水漫灌,采用智能滴灌水肥一体化设备可高效利用灌溉水和肥料。因此,机械自动化技术可取代地膜效应并提高农田管理的精细化程度,为减少甚至取消塑料薄膜的使用提供了有利条件^[27]。近年来,前人^[28-29]通过研究品种、灌溉方式以及积温条件等措施,对无膜浅埋滴灌条件下玉米产量和水肥利用效率的响应提供了可行性依据。但现有研究多聚焦于单一技术要素的效应解析,关于密度-灌溉协同调控对群体质量形成及产量构成的影响机制尚不明确,特别是对无膜条件下高密度种植的生态适应性缺乏系统评估。

河套灌区玉米种植长期惯用覆膜大水漫灌的生产模式,农户普遍存在“地膜覆盖必然高产”的传统认知。在积温偏低或水资源短缺的区域,可通过覆膜缓解低温与干旱的限制,促进作物生长。然而,该区域 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温超过 $3200^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,热量资源可满足玉米正常生育需求,同时,近年来引用的滴灌水肥一体化设备可精准调控水分。因此,地膜覆盖的应用并非出于对热量资源不足和灌溉时效性受限的弥补考虑,而更多是出于延续传统经验及追

求早期增温保墒、控草保肥的目的。随着水资源紧张与地膜污染问题日益突出,亟需探索更为绿色高效的替代技术。本研究以河套灌区主栽玉米品种科河 699 为材料,采用漫灌和滴灌 2 种灌溉方式,探讨覆膜与无膜条件下种植密度对玉米干物质积累量及产量形成影响的规律,以及不同栽培模式的经济效益与生态效益的协同机制,旨在构建基于密度优化的无膜浅埋滴灌技术体系,为干旱灌区玉米绿色高产高效生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

于 2023–2024 年玉米生育期(5–10 月),在内蒙古巴彦淖尔市乌拉特中旗宏丰村($41^{\circ}26' \text{N}$, $107^{\circ}56' \text{E}$, 海拔 984.41 m)开展试验。该区属温带大陆性季风气候, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 有效积温 $3200\sim 3400^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$,年太阳总辐射量 $1637\sim 1685 \text{ kW/m}^2$,年日照时数 $3100\sim 3300 \text{ h}$,无霜期 130 d。供试土壤为粉砂质壤土,0–40 cm 耕层基础肥力为全氮 0.55 g/kg 、有效磷 6.34 mg/kg 、速效钾 151 mg/kg 、有机质 12.92 g/kg 和 pH 8.7。生育期内气温与降水动态见图 1。2023 年玉米生长期的平均温度为 21.87°C ,降水量为 78.1 mm ;2024 年玉米生长期平均温度为 20.71°C ,降水量为 162.3 mm ,生育后

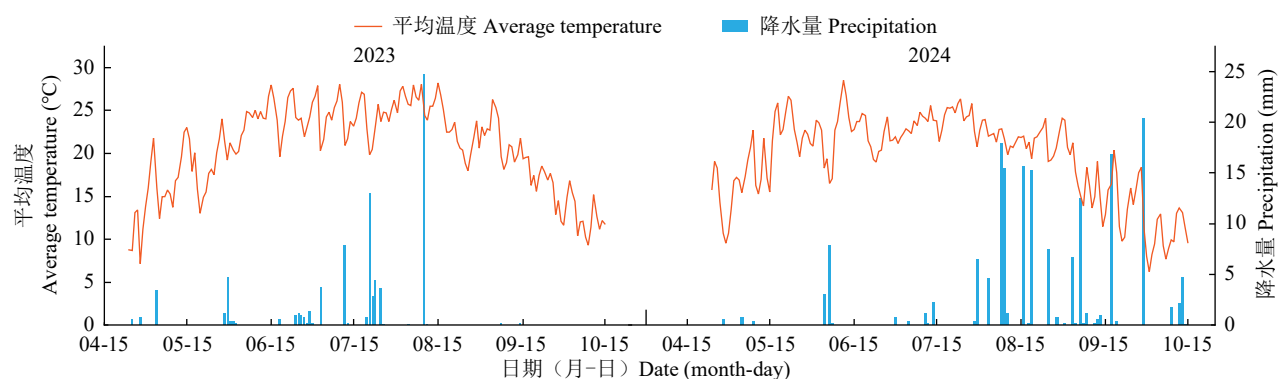


图 1 2023–2024 年玉米生育期气温与降水动态

Fig.1 Dynamics of temperature and precipitation during maize growth period from 2023 to 2024

期降水量高于 2023 年。

1.2 试验设计

供试品种为科河 699,采用裂区设计。主区为膜下滴灌(FM)、无膜浅埋滴灌(NM)和覆膜漫灌(农户传统模式,T)3种栽培模式;副区设置 7.5 万(低密,LD)、9.0 万(中密,MD)和 10.5 万株/ hm^2 (高密,HD)3个种植密度。每个小区种

植 20 行,行长 5 m,面积 55 m^2 ,重复 3 次。T 模式通过起垄与其他模式分隔水分,各栽培模式取样行间隔 8.8 m。

FM、NM 和 T 模式主区播种时统一将 $65.0 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$ 、 $105.0 \text{ kg/hm}^2 \text{ P}_2\text{O}_5$ 和 $34.5 \text{ kg/hm}^2 \text{ K}_2\text{O}$ 作为种肥施入。T 模式采用撒施的方式,在拔节期一次性施入 $390.0 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$ 、 165.0 kg/hm^2

P_2O_5 和 $120.0 \text{ kg/hm}^2 \text{ K}_2O$ ，生育期内灌水 3 次，灌溉量按当地生产用量 (450 m^3)。滴灌模式 (FM 和 NM) 所有处理在播种后 24 h 内浇出苗水，滴水齐苗，提高玉米的出苗率和整齐度。采用滴灌水肥一体化的施肥方式，全生育期分 9 次共追施 $390.0 \text{ kg/hm}^2 \text{ N}$ 、 $165.0 \text{ kg/hm}^2 \text{ P}_2O_5$ 和 $120.0 \text{ kg/hm}^2 \text{ K}_2O$ ，生育期内灌水 9 次，灌溉定额降至 300 m^3 。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生育期 记录播种至生理成熟期 (R6) 的关键生育阶段日期，包括出苗期 (VE)、6 展叶期 (V6)、吐丝期 (R1)、乳熟期 (R3) 和 R6 期。

1.3.2 干物质积累量 于 VE 期、拔节期、小喇叭口期、大喇叭口期、R1 期、灌浆中期和 R6 期，每小区选 5 株代表性植株，按器官分离后， 105°C 杀青 60 min， 80°C 烘干至恒重，测定干物质积累量。

花后干物质积累量 (t/hm^2) = 收获时干物质积累量 - 花前干物质积累量 (1)

花后干物质积累率 (%) = (花后干物质积累量 / 收获时干物质积累量) $\times 100$ (2)

收获指数 (HI) = 籽粒重 / 地上部干物质重 (3)

1.3.3 产量及其构成因素 玉米生理成熟后，去除边行及两端 2 m 以消除边行效应。在每个小区中间取 6 行、5 m 测产，收获全部果穗，称鲜重并统计数量。按平均穗重法选 20 个果穗作样穗，脱粒后称重计算出籽率，并用校准的谷物水分测定仪 (PM-8188，日本 KETT) 测籽粒含水率，按 14.0% 含水率折算实际产量，同时测量单位面积穗数、穗粒数和千粒重。

1.3.4 经济效益 经济效益各指标的计算公式为：

总收益 (GP, 元/ hm^2) = $P \times Y + SOV + DIT$ (4)

粮食效益 (GEB, 元/ hm^2) = $P \times Y$ (5)

总投入 (TI, 元/ hm^2) = $II + FI + SI + MFI + OI$ (6)

经济效益 (EB, 元/ hm^2) = $GP - TI$ (7)

产投比 (ROI) = GP / TI (8)

式中， P 为玉米单价 (元/ hm^2)， Y 为玉米产量 (t/hm^2)， SOV 为秸秆产值 (元/ hm^2)， DIT 为滴灌带回收收益 (元/ hm^2)， II 为灌溉投入费用 (元/ hm^2)， FI 为肥料投入费用 (元/ hm^2)， SI 为种子投入费用 (元/ hm^2)， MFI 为地膜投入费用 (元/ hm^2)， OI 为其他投入费用 (元/ hm^2)。

1.3.5 温室气体 (GHG) 排放量 采用生命周期评估法估算不同生产模式系统的 GHG 排放量，以 CO_2 排放当量 ($\text{CO}_2\text{-eq}$) 表示。本研究使用 0.01 mm 地

膜 60 kg/hm^2 ，GHG 排放量计算公式如下^[30]：

$$\text{GHG 排放量} = \sum_{i=1}^n TI_i \times EF_i \quad (9)$$

式中， TI_i 为玉米生产的总投入； EF_i 为各投入项的生命周期排放系数，玉米生产系统 GHG 排放系数引自文献[28]； n 为农业投入项目数。

1.3.6 经济敏感性 为评估不同栽培模式在价格波动下的经济抗风险能力，采用单因素敏感性分析法 (one-way sensitivity analysis) 模拟玉米籽粒售价波动对净收益的影响。以试验测定的籽粒市场均价 p 为基准值，设定售价在 $\pm 10\%$ 范围内变动，计算 $0.9p$ 、 p 和 $1.1p$ 3 种情境下 NM 与 FM 模式的净收益变化，并计算变幅，变幅 (%) = (敏感情境收益 - 基准收益) / 基准收益 $\times 100$ ，对比分析并判断各模式在不同市场环境下的稳定性和抗风险能力。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件进行数据整理与分析，采用最小差异法进行多重比较，使用 Origin 2023 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 露地和覆膜间玉米生育进程的差异

2 年试验表明，覆膜栽培显著缩短玉米生育周期 (图 2)。与 NM 模式相比，FM 和 T 模式的全生育期分别缩短 2.5~4.0 和 7.5~8.5 d。NM 模式的 VE、R1 和 R6 期分别较 FM 和 T 模式延迟 2.5~3.0、4.5~6.0 和 4.0~6.5 d。分析 2 年不同栽培模式下玉米各生长阶段均值变化 (图 3) 可知，差异主要集中在 VE~V6 和 R1~R6 阶段，可能与 VE~V6 期受早期环境调控 (温度、水分和出苗) 影响大，R1~R6 期受后期营养供应和籽粒灌浆影响显著有关。此外，NM 与 FM 模式间生育期相差 2.0~4.0 d，但比 T 模式延长 7 d 以上，滴灌管理改善中后期水肥环境，利于延长生育期。

2.2 露地和覆膜间玉米干物质积累与分配的差异

覆膜与无膜处理显著影响玉米干物质积累与分配 (表 1)。与 T 模式相比，FM 和 NM 模式花前干物质积累量提高 10.3%~12.8%，R6 期干物质积累量显著增加 5.2%~10.8%，但花后干物质贡献率差异不显著。HD 密度下，FM 与 NM 模式的 HI 较 T 模式提高 5.9%~6.7%。密植滴灌模式通过优化水肥管理促进同化物向籽粒分配。栽培模式 $\times$ 种植密度交互作用显著影响 HI，密度提升会使 HI 下降，

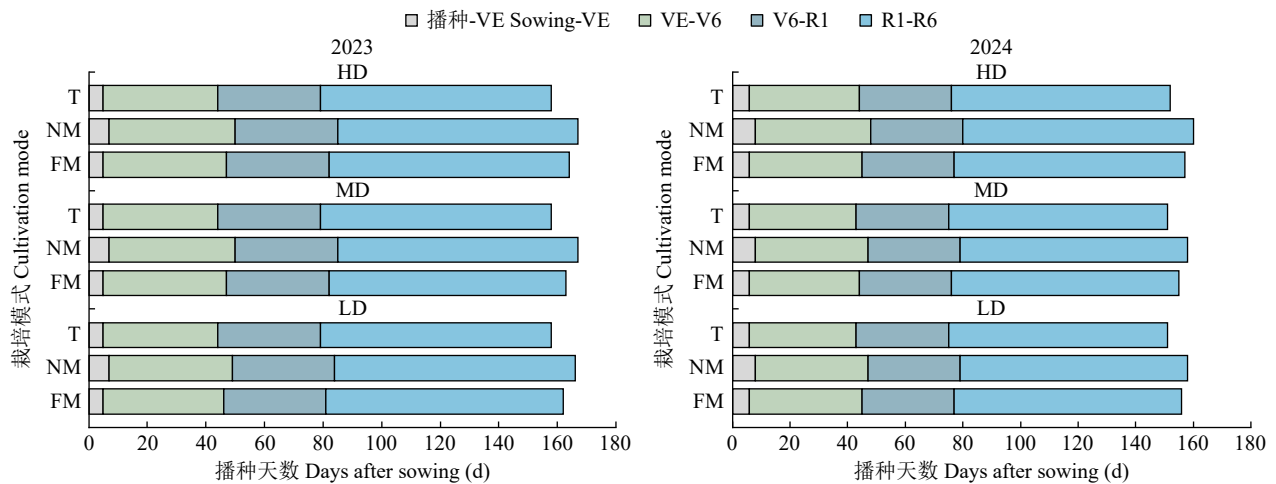


图 2 不同栽培模式下玉米的生育进程
Fig.2 Growth process of maize under different cultivation modes

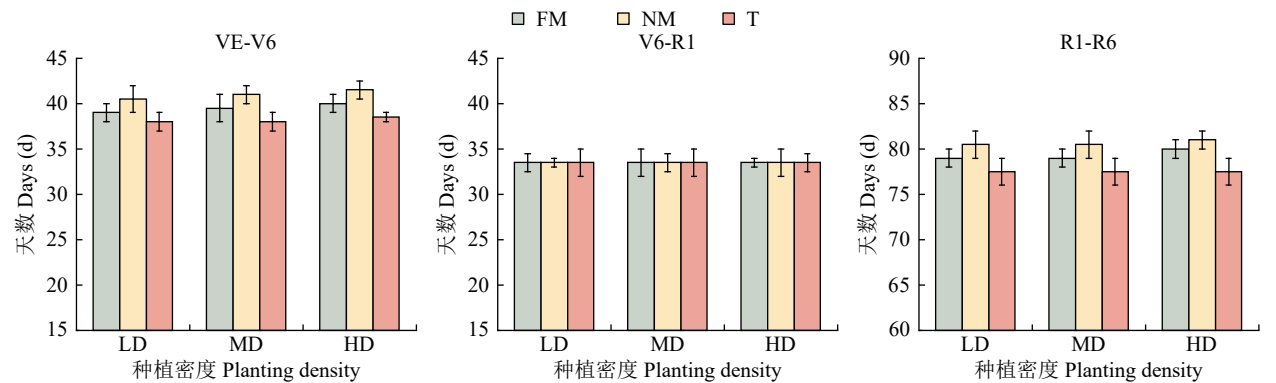


图 3 2023–2024 年不同栽培模式下玉米阶段生育期的均值变化
Fig.3 The mean change of growth period of maize under different cultivation modes from 2023 to 2024

表 1 不同栽培模式下干物质转运与积累特征							
Table 1 Characteristics of dry matter translocation and accumulation under different cultivation modes							
年份 Year	种植密度 Planting density	栽培模式 Cultivation mode	花前干物质积累量 Dry matter accumulation before anthesis (t/hm ²)	R6 期干物质积累量 Dry matter accumulation in R6 stage (t/hm ²)	花后干物质积累量 Dry matter accumulation after anthesis (t/hm ²)	花后干物质积累率 Dry matter accumulation rate after anthesis (%)	HI
2023	LD	FM	11.53a	30.83a	19.31a	62.61a	0.56a
		NM	11.41a	30.56a	19.15a	62.67a	0.56a
		T	10.71b	28.82b	18.12b	62.85a	0.53b
	MD	FM	12.19a	33.53a	21.34a	63.63a	0.55a
		NM	12.68a	33.26a	20.59a	61.87a	0.55a
		T	12.18a	31.51b	19.34b	61.30a	0.52b
	HD	FM	13.81a	36.22a	22.42a	61.89a	0.54a
		NM	13.89a	35.43a	21.54a	60.79a	0.54a
		T	13.02b	32.94b	19.93b	60.48a	0.51b
2024	LD	FM	12.06a	28.56a	16.50a	57.77a	0.59a
		NM	12.15a	28.89a	16.75a	57.95a	0.58a
		T	11.45b	27.30b	15.85b	58.05a	0.55b
	MD	FM	13.18a	32.61a	19.43a	59.55a	0.55a
		NM	12.77a	32.38a	19.61a	60.58a	0.56a
		T	11.59b	29.76b	18.17b	61.04a	0.53b
	HD	FM	13.77a	35.85a	22.08a	61.59a	0.54a
		NM	13.21a	34.65a	21.43a	61.86a	0.55a
		T	12.41b	32.88b	20.48b	62.27a	0.52b

续表 1 Table 1 (continued)

年份 Year	种植密度 Planting density	栽培模式 Cultivation mode	花前干物质积累量 Dry matter accumulation before anthesis (t/hm ²)	R6 期干物质积累量 Dry matter accumulation in R6 stage (t/hm ²)	花后干物质积累量 Dry matter accumulation after anthesis (t/hm ²)	花后干物质积累率 Dry matter accumulation rate after anthesis (%)	HI
年份 Year			**	**	**	**	ns
种植密度 Planting density			**	**	**	ns	**
栽培模式 Cultivation mode			**	**	**	ns	**
年份×种植密度 Year×Planting density			ns	ns	**	**	ns
年份×栽培模式 Year×Cultivation mode			ns	ns	ns	ns	ns
种植密度×栽培模式 Planting density×Cultivation mode			ns	**	**	ns	ns
年份×种植密度×栽培模式 Year×Planting density×Cultivation mode			ns	ns	ns	ns	ns

同列不同小写字母表示同一年份处理间在 $P < 0.05$ 水平差异显著。“*”和“**”分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平影响显著，“ns”表示无显著影响。下同。
Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at $P < 0.05$ level in the same year. “*” and “**” indicate significant effects at $P < 0.05$ and $P < 0.01$ levels, respectively, “ns” indicates no significant effects. The same below.

高密度种植需精细水肥调控以稳定 HI，实现高产高效。方差分析显示，年份×种植密度、栽培模式×种植密度互作对花后干物质积累量和积累率影响显著。

2.3 露地和覆膜间玉米产量及其构成因素的差异

种植密度与栽培模式协同影响玉米产量及其构成因素（图 4）。种植密度从 LD 增至 HD 时，

FM 与 NM 模式的产量分别提高 13.6%和 15.3%，显著高于 T 模式的 8.9%。FM 和 NM 处理的穗粒数和千粒重较 T 模式分别显著提高 6.5%~11.5%和 7.1%~9.6%，而穗数无显著差异（表 2）。与干物质积累量结果一致，FM 和 NM 模式的花后干物质贡献率（62.6%~63.6%）高于 T 模式（60.5%~62.8%）（表 1），表明密植滴灌模式通过延长灌浆期光合产物供应，同步提升了穗粒数与千粒重。

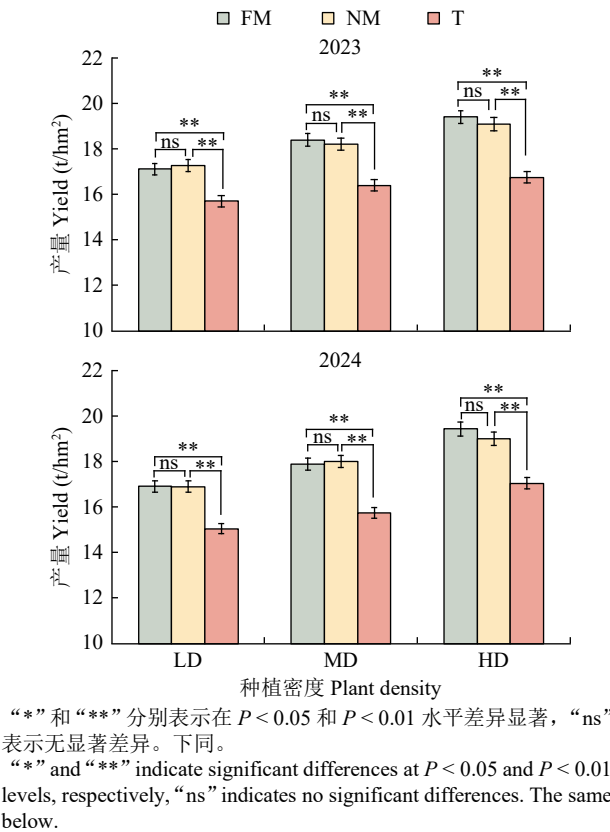


图 4 不同栽培模式间玉米产量的变化
Fig.4 Changes of maize yield among different cultivation modes

表 2 不同栽培模式间玉米产量构成因素的变化
Table 2 Changes of maize yield components among different cultivation modes

年份 Year	种植密度 Planting density	栽培模式 Cultivation mode	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000-grain weight (g)	穗数 Ear number (×10 ⁴ /hm ²)
2023	LD	FM	611.10a	401.79a	7.10a
		NM	598.80a	400.35a	7.01a
		T	561.33b	375.11b	7.01a
	MD	FM	530.90a	374.30a	8.61a
		NM	519.51a	370.92a	8.65a
		T	478.47b	344.50b	8.61a
	HD	FM	477.72a	340.49a	10.12a
		NM	471.93a	347.31a	10.16a
		T	428.27b	316.90b	10.12a
2024	LD	FM	555.78a	427.18a	7.29a
		NM	569.11a	418.91a	7.18a
		T	521.67b	390.40b	7.28a
	MD	FM	518.44a	390.55a	8.64a
		NM	514.89a	389.57a	8.79a
		T	472.40b	354.50b	8.49a
	HD	FM	473.11a	364.65a	10.21a
		NM	475.44a	365.08a	10.27a
		T	446.67b	338.00b	9.80a

不同栽培模式对玉米产量构成因素具有显著影响，但其影响程度因种植密度而异。在相同种植

密度条件下, FM 与 NM 模式的穗粒数及千粒重均显著高于 T 模式, 而穗数无显著差异, 表明栽培模式主要通过优化穗粒形成与籽粒灌浆实现增产。

种植密度从 LD 增至 HD 时, 3 种栽培模式的穗粒数下降 22.3%~29.8%, 千粒重降低 14.3%~15.6%。LD 密度下, FM 和 NM 模式的穗粒数较 T 模式分别显著提高 8.9%和 8.4%, 千粒重分别提升 9.3%和 7.0%。密度提高后, FM 和 NM 模式的穗粒数分别较 T 模式增加 10.5%和 9.8%, 千粒重分别极显著上升 7.9%和 9.2%。高密度下, NM 模式的穗粒数与 FM 差异不显著, 但比 T 模式提高 11.5%, 表明滴灌是密植条件下维持穗粒形成能力和高产的关键, 与覆膜种植无显著相关性。方差分析显示 (表 3), 栽培模式与种植密度交互对穗粒数、千粒重及产量影响显著。

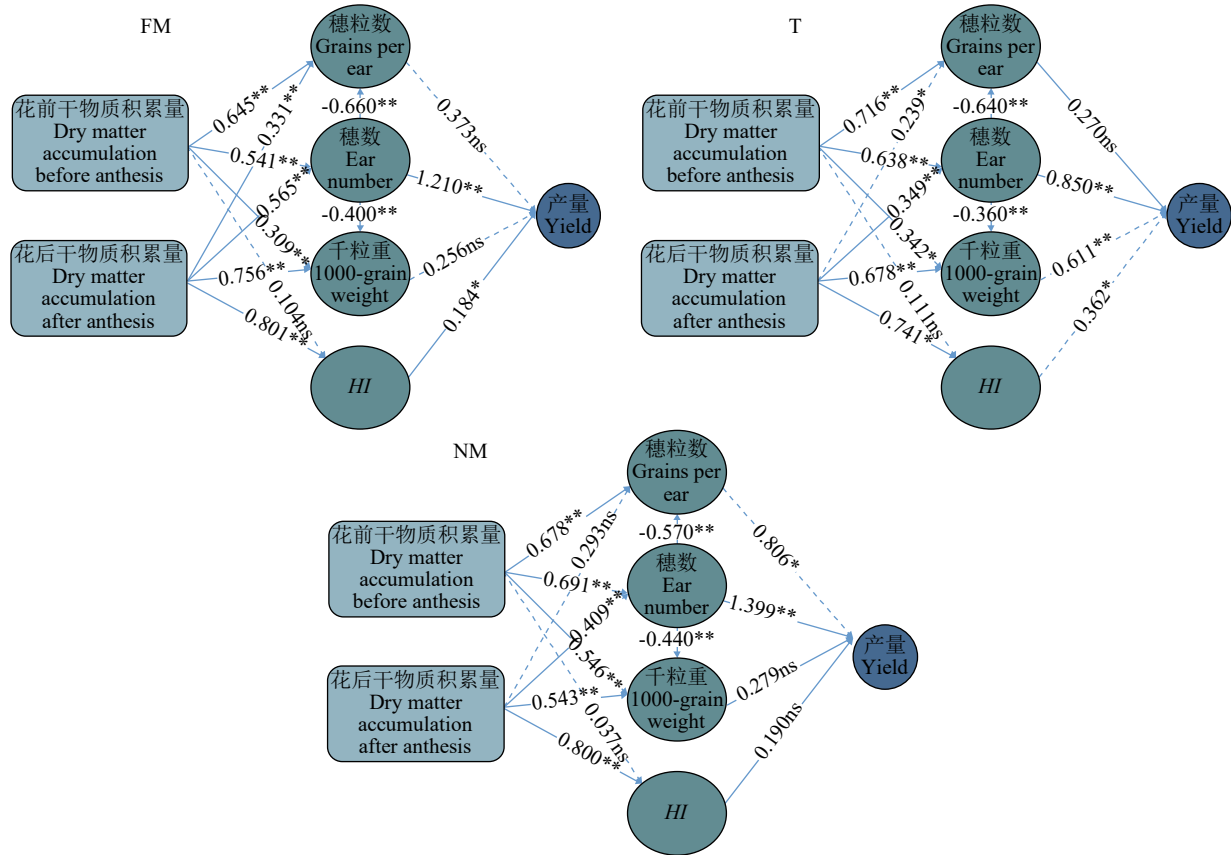
2.4 玉米产量及其构成因素、干物质积累量及 HI 间的关系

通径分析结果 (图 5) 揭示了不同栽培模式下花前、花后干物质积累量对产量及其构成因素和

表 3 年份、种植密度和栽培模式对玉米产量及其构成影响的方差分析
Table3 Variance analysis of the effects of year, planting density and cultivation mode on maize yield and its components

指标 Index	穗粒数 Grains per ear	千粒重 1000- grain weight	穗数 Ear number	产量 Yield
年份 Year	**	**	ns	**
种植密度 Planting density	**	**	**	**
栽培模式 Cultivation mode	**	**	**	**
年份×种植密度 Year×Planting density	**	ns	**	ns
年份×栽培模式 Year×Cultivation mode	ns	ns	**	ns
种植密度×栽培模式 Planting density×Cultivation mode	**	**	ns	**
年份×种植密度×栽培模式 Year×Planting density×Cultivation mode	ns	ns	ns	ns

HI 的直接与间接影响。3 种模式下, 花前干物质积累量显著正向影响穗数、穗粒数和千粒重, 而花后干物质积累量是千粒重和 HI 提升的关键基础。穗数是各模式下提高产量的核心因素, 而穗粒数和千粒重均受穗数提升的负向影响。FM 和 NM 模式通



实线和虚线分别表示关系显著和不显著, 数字表示通径系数。
The solid line and dotted line indicate significant and insignificant relationships, respectively, and the number indicates the path coefficient.

图 5 玉米产量及其构成因素、干物质积累量及 HI 的通径分析
Fig.5 Path analysis of maize yield and its components, dry matter accumulation and HI

过精准栽培管理优化, 显著提升 HI 是滴灌精准调控模式提高产量的关键。

2.5 不同栽培模式对经济效益的影响

在 HD 密度下, NM 模式的经济效益 ($28\,450 \pm 320$ 元/ hm^2) 较 FM 和 T 模式分别极显著提高 15.2% 和 87.3%, 产投比达 2.8。与 T 模式相比, NM 模式通过节省地膜投入 (600 元/ hm^2) 和降低灌溉投入 (33.0%) 降低成本; FM 模式因地膜回收成本增加 (200 元/ hm^2), 部分抵消增产收益。经 $\pm 10\%$ 玉米籽粒售价波动的敏感性分析, NM 经济效益变幅 ($\pm 12.5\%$) 小于 FM ($\pm 15.8\%$), NM 模式经济效益最优 (图 6)。

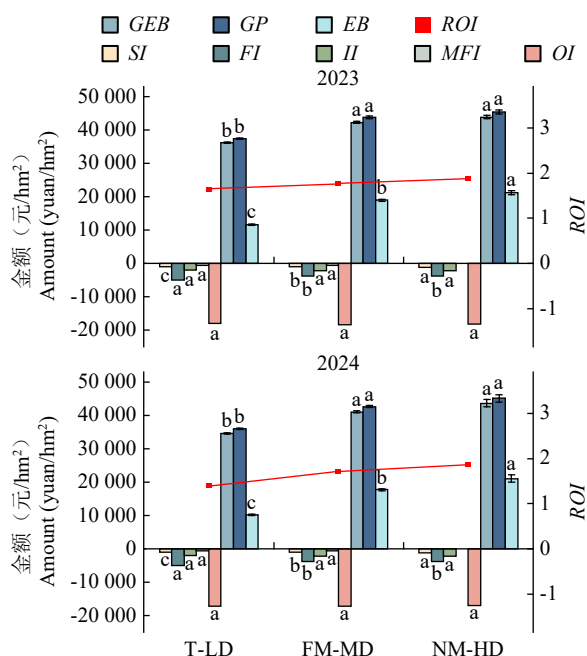


图 6 不同栽培模式间玉米经济效益的变化
Fig.6 Changes in economic benefits of maize under different cultivation modes

2.6 不同栽培模式 GHG 排放估算

NM 模式显著降低碳足迹 (图 7), 其单位产量排放强度 ($0.21 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/100 \text{ kg}$ 籽粒) 较 T 模式降低 75.2%, 主要归因于地膜生产排放的消除 (减排贡献率 18.7%) 和氮肥利用率的提升 (N_2O 排放降低 12.5%)。与全球均值 ($0.35 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/100 \text{ kg}$ 籽粒) 相比, NM 模式具有显著的低碳优势。

3 讨论

3.1 覆膜与无膜栽培模式对玉米生育进程及干物质积累的调控机制

本研究结果表明, 覆膜处理 (FM 和 T) 通过

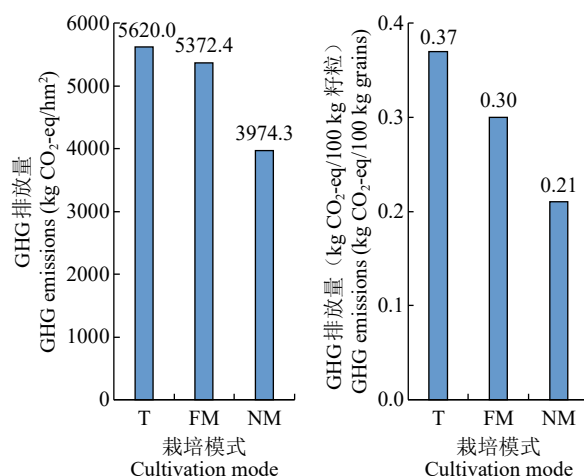


图 7 不同栽培模式下 GHG 排放

Fig.7 GHG emissions under different cultivation modes

提高耕层温度与保水能力显著缩短玉米生育期, 其 VE 和 R6 期较 NM 模式分别提前 2.5~3.0 d 和 4.0~6.5 d。这一现象与 Wang 等^[31]的发现一致, 即覆膜在生育前期 (VE 至拔节期) 可使 0~20 cm 土层温度提高 2.1~4.6 °C, 加速植株早期发育。然而, NM 模式虽因无地膜覆盖导致生育期延迟, 但其干物质积累量 (R6 期 $35.04 \text{ t}/\text{hm}^2$) 与 FM 模式 ($36.04 \text{ t}/\text{hm}^2$) 无显著差异, 滴灌通过精准水肥供应延长了玉米生育期, 有利于提高干物质积累量和中后期热量资源利用效率。特别是 NM 模式的收获指数 ($HI=0.54$) 与 FM 模式持平, 在热量资源充足条件下, 无膜种植技术的推广具有广阔前景。

3.2 密度与灌溉方式协同优化对产量及资源利用效率的影响

密度与灌溉模式的交互效应显著。在 HD 密度下, NM 模式的产量 ($19.40 \sim 19.43 \text{ t}/\text{hm}^2$) 与 FM ($19.00 \sim 19.09 \text{ t}/\text{hm}^2$) 相当, 但单位产量 GHG 排放强度 ($0.21 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/100 \text{ kg}$ 籽粒) 较 FM 模式 ($0.30 \text{ kg CO}_2\text{-eq}/100 \text{ kg}$ 籽粒) 降低 30%, 凸显了 NM 模式在高密度种植中的优势。在我国东北及西辽河流域等地区, 覆膜滴灌与无膜滴灌的玉米产量无显著差异^[24,32]。我国北部地区采用无膜滴灌高效节水模式, 玉米籽粒产量及综合效益表现更优^[24]。滴灌通过精准水肥调控, 缓解了密植群体间竞争压力, 提升了产量潜力和稳定性。本研究中, NM 模式的 GHG 减排效应主要源于地膜生产与使用过程 GHG 排放的规避 (减排贡献率 18.7%), 与 Zhang 等^[28]在新疆春玉米产区的研究结论一致。

3.3 无膜浅埋滴灌技术的生态经济协同效应与推广潜力

NM 模式在河套灌区实现了“增产—降本—减排”三重协同。经济上，NM 模式的净收益（28 450 元/hm²）较 T 模式提高 87.3%，主要得益于节省地膜成本（600 元/hm²）和滴灌提高用水效率（灌溉水分利用效率提升 39.4%），而 FM 模式因地膜回收成本增加（200 元/hm²），部分抵消了增产收益。此外 NM 模式的单位产量 GHG 排放强度（0.21 kg CO₂-eq/100 kg 籽粒）低于华北平原平均水平（0.28 kg CO₂-eq/100 kg 籽粒）和全球玉米生产均值（0.35 kg CO₂-eq/kg，IPCC 2019）^[33]，体现了其“低碳高产”的特性。NM 模式契合河套灌区绿色、高效和可持续农业发展的需求，实现了“减膜、节水、降碳、提效”的多重目标，降低了农户生产成本，提升了净收益，具有良好的推广前景和实践指导意义。

4 结论

分析科河 699 在 FM、NM 和 T 模式下，不同种植密度对玉米生育进程、干物质积累量、产量形成及资源利用效率的影响，在高密度栽培条件下，FM 和 NM 模式通过精准水肥调控延长生育期，缓解了密植条件下植株间的资源竞争，提高了产量稳定性和资源利用效率。与 FM 模式相比，NM 模式既保证了籽粒产量和干物质积累水平，又显著降低了单位产量 GHG 排放强度，提高了水肥利用效率和经济效益，在河套灌区展现出良好的生态经济协同效应。

参考文献

- [1] 李少昆, 赵久然, 董树亭, 等. 中国玉米栽培研究进展与展望. 中国农业科学, 2017, 50(11): 1941-1959.
- [2] 苏天增, 丁光省, 任伟, 等. 豫东平原夏直播青贮玉米高产形态生理指标及栽培技术分析. 山西农业科学, 2020, 48(3): 387-391, 400.
- [3] 李少昆, 王克如, 谢瑞芝, 等. 实施密植高产机械化生产实现玉米高产高效协同. 作物杂志, 2016(4): 1-6.
- [4] Assefa Y, Cater P, Hinds M, et al. Analysis of long term study indicates both agronomic optimal plant density and increase maize yield per plant contributed to yield gain. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4937.
- [5] Liu T N, Gu L M, Dong S T, et al. Optimum leaf removal increases canopy apparent photosynthesis, ¹³C-photosynthate distribution and grain yield of maize crops grown at high density. Field Crops Research, 2015, 170: 32-39.
- [6] 程雅婷, 李荣发, 王克如, 等. 中国春玉米高产纪录的创造与思考. 玉米科学, 2021, 29(2): 56-59.
- [7] Luo N, Wang X Y, Hou J M, et al. Agronomic optimal plant density for yield improvement in the major maize regions of China. Crop Science, 2020, 60(3): 1580-1590.
- [8] Zhou L M, Li F M, Jin S L, et al. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41-47.
- [9] Wang X L, Li F M, Yu J, et al. Increasing potato yields with additional water and increased soil temperature. Agricultural Water Management, 2005, 78(3): 181-194.
- [10] Sun D B, Li H G, Wang E L, et al. An overview of the use of plastic-film mulching in China to increase crop yield and water-use efficiency. National Science Review, 2020, 7(10): 1523-1526.
- [11] Liu E K, He W Q, Yan C R. 'White revolution' to 'white pollution'—agricultural plastic film mulch in China. Environmental Research Letters, 2014, 9(9): 091001.
- [12] Yu Y X, Zhang Z H, Zhang Y X, et al. Abundances of agricultural microplastics and their contribution to the soil organic carbon pool in plastic film mulching fields of Xinjiang, China. Chemosphere, 2023, 316: 137837.
- [13] 严昌荣, 梅旭荣, 何文清, 等. 农用地膜残留污染的现状与防治. 农业工程学报, 2006, 22(11): 269-272.
- [14] 严昌荣, 何文清, 薛颖昊, 等. 生物降解地膜应用与地膜残留污染防治. 生物工程学报, 2016, 32(6): 748-760.
- [15] 解红娥, 李永山, 杨淑巧, 等. 农田残膜对土壤环境及作物生长发育的影响研究. 农业环境科学学报, 2007, 26(增): 153-156.
- [16] 严昌荣, 刘恩科, 舒帆, 等. 我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术. 农业资源与环境学报, 2014, 31(2): 95-102.
- [17] 毕继业, 王秀芬, 朱道林. 地膜覆盖对农作物产量的影响. 农业工程学报, 2008, 24(11): 172-175.
- [18] 董合干, 王栋, 王迎涛, 等. 新疆石河子地区棉田地膜残留的时空分布特征. 干旱区资源与环境, 2013, 27(9): 182-186.
- [19] He D F, Luo Y M, Lu S B, et al. Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. Trends in Analytical Chemistry, 2018, 109: 163-172.
- [20] 张婧. 河套地区枸杞栽培与管理技术. 果农之友, 2023(11): 44-47.
- [21] 陈新海, 沈文琳, 杨文化, 等. 河套地区玉米生产现状及发展趋势. 现代农业, 2022(3): 46-49.
- [22] 邹宇锋. 河套灌区不同覆膜灌溉方式对农田土壤水盐调控及春玉米产量的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [23] 杜君, 杨占平, 魏义长, 等. 北方夏玉米滴灌施肥一体化技术应用效果. 核农学报, 2020, 34(3): 621-628.
- [24] 梅园雪, 冯玉涛, 冯天骄, 等. 玉米浅埋滴灌节水种植模式产量与效益分析. 玉米科学, 2018, 26(1): 98-102.
- [25] 杨恒山, 薛新伟, 张瑞富, 等. 灌溉方式对西辽河平原玉米产量及水分利用效率的影响. 农业工程学报, 2019, 35(21): 69-77.
- [26] 刘旭艳. 机械自动化技术对农业机械的影响. 农家参谋, 2024(23): 40-42.
- [27] 喻树迅. 无膜棉对中国棉花产业转型升级的意义. 农学报, 2019, 9(3): 1-5.
- [28] Zhang G Q, Ming B, Xie R Z, et al. Reducing plastic film mulching and optimizing agronomic management can ensure food security and reduce carbon emissions in irrigated maize areas. Science of the Total Environment, 2023, 883: 163507.
- [29] 周鑫, 杨恒山, 邵继承, 等. 浅埋滴灌不同灌溉定额对玉米田

- 土壤盐分运移的影响. 玉米科学, 2024, 32(5): 60-66.
- [30] He G, Wang Z H, Li S X, et al. Plastic mulch: tradeoffs between productivity and greenhouse gas emissions. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172: 1311-1318.
- [31] Wang Y P, Li X G, Hai L, et al. Film fully-mulched ridge-furrow cropping affects soil biochemical properties and maize nutrient uptake in a rainfed semi-arid environment. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2014, 60(4): 486-498.
- [32] 马树庆, 王琪, 郭建平, 等. 东北地区玉米地膜覆盖增温增产效应的地域变化规律. *农业工程学报*, 2007, 23(8): 66-71.
- [33] 王占彪, 王猛, 陈卓. 华北平原作物生产碳足迹分析. *中国农业科学*, 2015, 48(1): 83-92.

Effects of No-Film Shallow Buried Drip Irrigation on Maize Yield and Economic Benefits in the Hetao Region

Zhang Mengnan^{1,2}, Zhang Guoqiang², Xue Jun², Zhu Xiya², Xie Ruizhi²,
Xu Gaoping³, Li Shaokun², Wang Keru², Ming Bo², Ge Junzhu¹

(¹College of Agronomy and Resources and Environment, Tianjin Agricultural University/Tianjin Key Laboratory of Intelligent Breeding of Main Crops, Tianjin 300392, China; ²Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China; ³Institute of Modern Agricultural Science and Technology, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300392, China)

Abstract Global agriculture is facing the dual challenges of ensuring food security and achieving green and sustainable development. Three cultivation modes, including film-mulched drip irrigation (FM), no-film shallow buried drip irrigation (NM), and film-mulched flood irrigation (T), and three planting densities of 7.5×10^4 (low), 9.0×10^4 (medium), and 10.5×10^4 plants/ha (high), were established to explore their effects on maize dry matter accumulation, yield formation, and the synergistic mechanisms of economic and ecological benefits. The results showed that the FM mode significantly shortened the maize growth period, with the emergence stage and maturity occurring 2.5-3.0 and 4.0-6.5 days earlier than those of the NM mode, respectively; however, there was no significant difference in dry matter accumulation between the NM and FM modes, and the harvest index (*HI*) remained comparable. Under high planting density, the yield of the NM mode was comparable to that of the FM mode, but its greenhouse gas (GHG) emission intensity per unit yield was reduced by 30.0%. The NM mode eliminated emissions from plastic film production, contributing 18.7% to emission reduction. Economically, the net income of the NM mode increased by 87.3% compared with the T mode, benefiting from plastic film cost savings and improved water and fertilizer use efficiency; environmentally, its GHG emission intensity per unit yield was lower than the global average for maize production. In conclusion, the NM mode achieves the goal of “ton-grain field” while simultaneously addressing the construction of “low-carbon field”, providing a theoretical basis for exploring the synergistic path of grain production and low-carbon development in the Hetao Irrigation District.

Key words Green agriculture; Maize; No-film shallow buried drip irrigation; Economic benefits; Greenhouse gas emissions