

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.41094

研究简报

山东北部沿海平原区小麦-玉米周年两吨粮超高产技术创建

林子晴^{1,**} 钟醒宇^{1,**} 刘 樊¹ 任子澳¹ 马 瑞¹ 邓秀峰² 王东伟²
刘少鹏² 陈 康³ 张明才¹ 李召虎¹ 周于毅^{1,*} 段留生^{1,*}

¹ 中国农业大学农学院, 北京 100193; ² 莱州金海种业有限公司, 山东莱州 261400; ³ 烟台市农业技术推广中心, 山东烟台 264001

摘 要: 山东北部沿海平原区小麦-玉米周年两吨粮超高产技术创建是中国农业大学作物化控团队和莱州市金海种业在山东省莱州市开展的一项重要农业生产示范项目。通过精选良种、合理密植及水肥一体化等措施, 以期实现小麦和玉米的高产高效种植。在 2023 年该地块小麦和玉米两季的种植中, 现场实测每公顷的总产量达到了 31,323.90 kg (折合 2088.26 kg mu⁻¹)。其中冬小麦由农业农村部组织专家测产打破了黄淮海地区小麦的单产纪录, 实际产量高达 13,213.35 kg hm⁻² (折合 880.89 kg mu⁻¹)。种植品种烟农 1212 每平方米穗数为 692.0, 穗粒数为 40.1, 千粒重为 52.55 g, 单株产量为 4.74 g, 收获指数为 0.56, 水分利用效率为 3.24 kg m⁻³。夏玉米中金玉 2513 的每平方米穗数为 9.1, 穗粒数为 584.7, 千粒重为 379.31 g, 单株产量为 206.25 g, 收获指数为 0.58, 水分利用效率为 2.86 kg m⁻³, 实际产量为 18,110.55 kg hm⁻² (折合 1207.37 kg mu⁻¹)。在 2024 年的重复试验中, 小麦-玉米的实际产量继续达到 30,997.00 kg hm⁻² (折合 2065.13 kg mu⁻¹)。本文旨在总结高产纪录小麦-玉米复种高产田生产过程的主要管理环节和高产群体的主要指标, 为山东北部沿海平原区小麦-玉米复种高产提供参考。

关键词: 小麦-玉米周年复种; 超高产技术创建; 山东北部沿海平原区; 良种选择; 水肥一体化

Development of ultra-high-yield technology for a wheat-maize double cropping system achieving a 2-ton annual grain yield per mu in the coastal plain of Northern Shandong peninsula, China

Lin Zi-Qing^{1,**}, Zhong Xing-Yu^{1,**}, Liu Fan¹, Ren Zi-Ao¹, Ma Rui¹, Deng Xiu-Feng², Wang Dong-Wei², Liu Shao-Peng², Chen Kang³, Zhang Ming-Cai¹, Li Zhao-Hu¹, Zhou Yu-Yi^{1,*}, and Duan Liu-Sheng^{1,*}

¹ College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; ² Laizhou Jinhai Seed Industry Co., Ltd., Laizhou 261400, Shandong, China; ³ Yantai Agricultural Technology Extension Center, Yantai 264001, Shandong, China

Abstract: The development of ultra-high-yield technology for a wheat-maize double cropping system targeting an annual grain yield of 2 tons per mu in the coastal plain of northern Shandong Peninsula represents a significant agricultural initiative led by the Crop Chemical Control Center of China Agricultural University and Laizhou Jinhai Seed Industry in Laizhou, Shandong province. Through the careful selection of superior varieties, optimized planting densities, and integrated water and fertilizer management, high grain yields and efficient cultivation of both wheat and maize have been achieved. In the 2023 growing season, the combined yield of wheat and maize reached 31,323.90 kg hm⁻² (2,088.26 kg mu⁻¹). Notably, the winter wheat crop—evaluated by experts organized by the Ministry of Agriculture and Rural Affairs—set a new regional yield record for the Huang-Huai-Hai Plain, with an actual yield of 13,213.35 kg hm⁻² (880.89 kg mu⁻¹). The variety Yannong 1212 exhibited a spike density of 692.0 spikes m⁻², an average of 40.1 grains per spike, a thousand-grain weight of 52.55 g, single-plant yield of 4.74 g, harvest index of 0.56, and water use efficiency (WUE) of 3.24 kg m⁻³. For summer maize, the variety Zhongjinyu 2513 achieved a spike density of 9.1 spikes m⁻², an average of 584.7 grains per spike, a thousand-grain weight of 379.31 g, single-plant yield of 206.25 g, harvest

本研究由农业科技重大项目资助。

This study was supported by the Agricultural Science and Technology Major Project.

* 通信作者(Corresponding authors): 段留生, E-mail: duanlsh@cau.edu.cn; 周于毅, E-mail: zhoyuyi@cau.edu.cn

** 同等贡献(Contributed equally to this work)

第一作者联系方式: 林子晴, E-mail: BS20233010048@cau.edu.cn; 钟醒宇, E-mail: xz2971@nyu.edu

Received (收稿日期): 2024-12-19; Accepted (接受日期): 2025-11-18; Published online (网络出版日期): 2025-11-24.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.s.20251124.1112.004>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

index of 0.58, and WUE of 2.86 kg m^{-3} , with an actual yield of $18,110.55 \text{ kg hm}^{-2}$ ($1,207.37 \text{ kg mu}^{-1}$). In a 2024 repeated trial, the total yield remained high at $30,997.00 \text{ kg hm}^{-2}$ ($2065.13 \text{ kg mu}^{-1}$). This study summarizes the key management practices and main agronomic indicators contributing to high-yield wheat-maize double cropping in northern Shandong, offering a valuable reference for similar production systems in the region.

Keywords: wheat-maize annual double cropping; development of ultra-high-yield technology; Northern Shandong peninsula; selective superior varieties; water and fertilizer integration

全球粮食安全仍面临重大挑战,尤其是随着人口持续增长,确保主粮的持续、稳定供应成为当务之急^[1]。小麦与玉米作为人类饮食的基石,提供了我们所需的热量、蛋白质及多种重要营养素。然而,耕地的日益稀缺与气候变化的威胁,使得最大化这 2 种作物的产量变得至关重要。小麦-玉米周年复种目前是黄淮海地区普遍采用的一种农业种植模式^[2],即在同一年份同一地块上,轮换种植小麦和玉米。这种模式旨在合理利用土壤养分、减少病虫害、提高土壤肥力,并实现农作物的高产高效和经济效益的最大化^[3]。在产量提升方面,前人已在单季作物上取得了显著成就。例如,2023 年全国小麦单产纪录在安徽涡阳县被刷新至 $13,375.50 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[4],而程雅婷等^[5]在新疆奇台创下的春玉米产量纪录更是高达 $24,948.75 \text{ kg hm}^{-2}$ 。这些成就极大地拓展了人们对作物产量潜力的认知。然而,对于黄淮海这一中国主粮核心产区而言,单一作物产量的突破固然重要,同时,如何立足于最普遍的“麦-玉周年复种”体系,实现“全年两季”总产量的协同提升,是对土地和光热资源利用效率的终极考验,也更具区域实践指导意义。

中国农业大学作物化控团队和莱州市金海种业自 2020 年起开始在位于黄淮海生产区系统的山东省莱州市开展小麦-玉米周年高产攻关示范,挖掘小麦-玉米周年生产的潜力^[6]。2023 年 10 月 11 日,山东省农业农村厅组织了由专家组成的评估团队,对烟台莱州市申报参与粮油作物高产竞赛的玉米高产攻关田进行了现场实打评估。本试验高产攻关田总面积 $13,334.0 \text{ m}^2$ (折合 20.00 mu),实打验收面积 2053.3 m^2 (折合 3.08 mu),经过实际测量和计算,该田块的平均产量达到了 $18,110.55 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[7]。更值得一提的是,该地块前茬作物小麦的高产竞赛实打面积为 2280.0 m^2 (折合 3.42 mu),产量为 $13,213.35 \text{ kg hm}^{-2}$,这意味着该地块在小麦和玉米两季的种植中,平均总产量达到了 $31,323.90 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $2088.26 \text{ kg mu}^{-1}$)。这一产量不仅刷新了莱州市的玉米产量纪

录,同时也创造了全市同一地块周年两季粮食总产量的新纪录,为全市的农业发展树立了新的标杆^[8]。在 2023—2024 年高产攻关田的重复试验中,小麦-玉米周年粮食继续达到了 2 吨以上,成功连续两季小麦-玉米周年产量突破两吨粮。本文系统梳理 2022—2023 及 2023—2024 年小麦-玉米周年高产纪录的创造过程和高产纪录田块群体的生长发育指标,旨在为小麦-玉米周年高产创建提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点

田间试验于 2022—2023 年和 2023—2024 年在金海种业中国农业大学山东莱州试验站进行 ($37^{\circ}11'N$, $119^{\circ}39'E$),试验地点如图 1 所示。莱州市的气候类型为暖温带大陆性季风气候,雨热同期,气候湿润,是黄淮海小麦-玉米周年复种系统区域。按照国土资源部《农用地质量分等规程》(GB/T 28407-2012)分类标准,莱州试验站的土壤类型为壤土。试验地块 0~20 cm 土层有机质、全氮、速效磷和速效钾的含量分别为 16.20 g kg^{-1} 、 1.43 g kg^{-1} 、 40.80 mg kg^{-1} 和 $186.86 \text{ mg kg}^{-1}$, 20~40 cm 土层分别为 5.36 g kg^{-1} 、 0.83 g kg^{-1} 、 21.92 mg kg^{-1} 和 38.46 mg kg^{-1} 。莱州市 2022—2024 年小麦-玉米生长季内的气候条件如图 2 所示,小麦和玉米每个生育阶段的降水量如表 1 所示。莱州市的日照情况显示,年均日照时长为 2629.2 h ,日照率约为 59%。其中,5 月份的日照时长最长,平均达到 274.4 h ,而 12 月份的日照时长最短,平均为 181.9 h 。每天的平均日照时长为 7.2 h ,最长可达 13.8 h ^[9]。昼夜温差的范围一般在 $6\sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间。多数月份的昼夜温差保持在 $8\sim 9^{\circ}\text{C}$ 之间,表现出较为稳定的昼夜温度波动。最高温度和最低温度之间的差距在夏季(6 至 8 月)略有增加,尤其是在 2023 年 6 月(10°C)和 2024 年 6 月(10°C)时,昼夜温差达到最高值。相较之下,冬季的温差通常较小,尤其是 2022 年 12 月和 2023 年 1 月的温差分别为 6°C 和 7°C ,表明低温期间昼夜温差较为平缓。

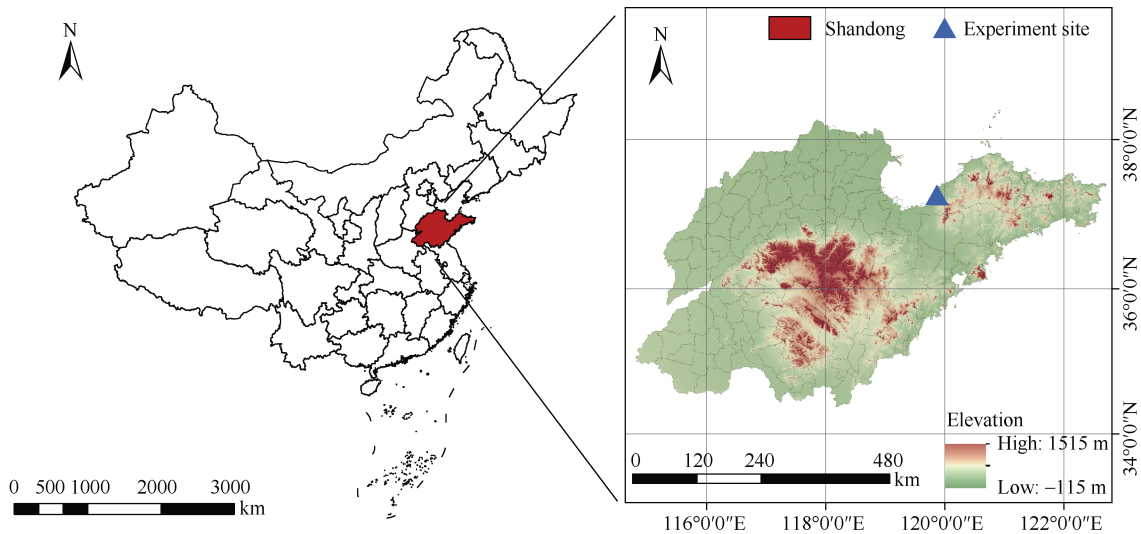


图 1 中国农业大学莱州试验站位置

Fig. 1 Location of the Laizhou experiment site of China Agricultural University

该图基于国家地理信息公共服务平台下载的审图号为 GS (2024) 0650 号标准地图制作，底图边界无修改。

This map is based on the standard map downloaded from the National Platform for Common Geospatial Information Services with the approval number GS (2024) 0650, and the boundary of the base map is not modified.

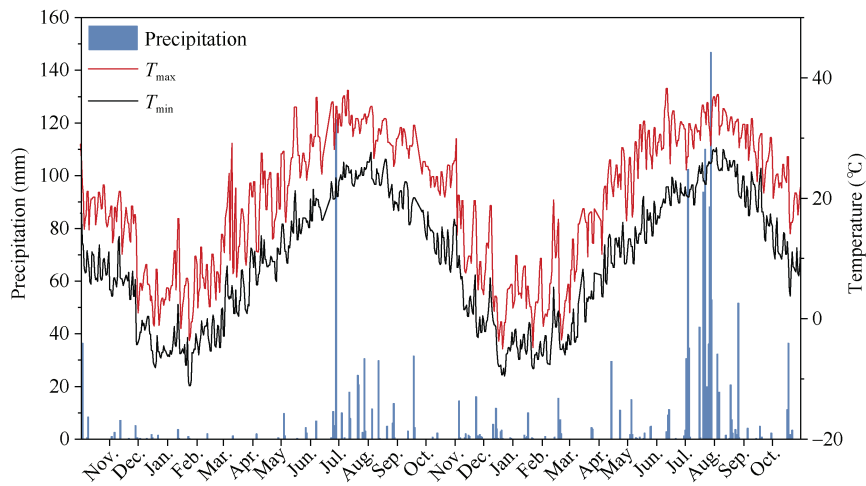


图 2 2022–2024 年小麦-玉米生长季内的平均温度和降水量

Fig. 2 Mean temperature and precipitation during the wheat–maize growing seasons from 2022 to 2024

表 1 2022–2024 年小麦和玉米生长季内不同生育阶段的降水量

Table 1 Precipitation during different growth stages of wheat and maize in the 2022–2024 growing seasons (mm)

作物 Crop	品种 Variety	年份 Year	越冬期/拔节期 Overwintering/jointing stage	拔节期/抽雄期 Jointing/tasseling stage	开花期/灌浆期 Flowering/grain filling stage	完熟期 Maturation stage
小麦 Wheat	烟农 1212	2022–2023	153.15	39.55	32.67	49.45
	Yannong 1212	2023–2024	157.61	42.43	80.41	62.68
玉米 Maize	中金玉 2513	2023	161.58	92.22	25.20	2.82
	Zhongjinyu 2513	2024	765.30	145.03	26.34	37.54

1.2 试验材料

供试作物及品种：小麦采用山东省烟台市农业科学研究院以烟 5072 与石 94-5300 杂交后选育成的

小麦品种烟农 1212^[10]。玉米选用金海种业与中国农业科学院共同选育的玉米品种中金玉 2513，该品种具有穗位整齐、棒大棒匀、结实性好的特点，茎秆

粗壮、气生根发达, 扎地牢且扎地深, 它不仅具有稳产、高产、优质、抗病抗逆的优点, 而且适合密植栽培。当地农户常规管理所选用的小麦品种为济麦 22, 玉米品种则为郑单 958。

1.3 试验设计

1.3.1 冬小麦 为增强种子的抗病性并促进其生长发育, 采用了甲拌磷-多菌灵复合包衣剂(甲拌磷自 2024 年 9 月 1 日起已被禁止销售和使用, 后续可用二噻磷、吡虫啉等进行替代)进行种子包衣处理。在播种方法上, 采用小麦旋耕施肥播种一体机宽垄精量条播, 播种量为 187.5 kg hm^{-2} , 行距设置为 3.4 m, 16 行。播前施用有机肥 7500 kg hm^{-2} (有机质 $\geq 50\%$, 总养分 $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O} \geq 5\%$), 同时在播种时加入 600 kg hm^{-2} 复合肥($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O} = 20:10:12$)种肥同播, 返青期、拔节期和灌浆期使用氮素可溶性肥追肥 3 次(每次用量 8 kg mu^{-1}), 在扬花期后, 每隔 7 d 叶面喷施含腐植酸水溶肥($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O} = 10:5:5$), 共喷施 4 次。整个小麦生育期共使用纯氮 232.5 kg hm^{-2} , 纯磷 60 kg hm^{-2} 和纯钾 72 kg hm^{-2} 。在灌溉管理上, 运用水肥定量灌溉技术, 特别是在返青期、拔节期和开花期, 通过 65 喷管进行定量灌溉 40 mm, 共浇水 4 次, 总灌水量为 $1600 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$ 。在病虫害防治方面, 采用了高效无人机飞防技术, 利用无人机在返青期进行防治根茎腐病, 使用的药剂组合为丙环·嘧菌酯(总有效成分含量: 18.79%; 丙环唑含量: 11.70%; 嘧菌酯含量: 7.00%)+芸苔素+含腐植酸水溶肥($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O} = 10:5:5$)。同时在返青期和拔节期实施了“一喷三防”技术, 即采用肟菌酯·戊唑醇复配剂+甲维盐+高氯+芸苔素内酯+含腐植酸水溶肥($\text{N}-\text{P}_2\text{O}_5-\text{K}_2\text{O} = 10:5:5$)的药剂配方, 一次性完成防虫、杀菌和预防倒春寒等多项任务。在植物生长调节剂方面, 于小麦开花期后每隔 14 d 喷施芸苔素, 直至旗叶的颜色从绿色过渡到黄色。于小麦拔节前一周叶面喷施 0.1%浓度的 20.8%烯效·甲哌鎓微乳剂^[11], 缩短节间长度, 提高小麦的抗倒性; 并于灌浆期前喷施胺鲜酯^[12] (diethyl aminoethyl hexanoate, DA-6) 1000 倍液, 促进小麦营养物向籽粒运输, 提高灌浆均匀性和充实度, 达到增产的效果。2022—2023 年, 冬小麦于 2022 年 10 月 17 日播种, 2023 年 6 月 17 日收获, 生育进程如图 3, 全生育期 248 d。2023—2024 年, 冬小麦于 2023 年 10 月 11 日播种, 2024 年 6 月 14 日收获, 全生育期 242 d。依照曹统一^[13]的方法在相应时期测量群体形

态结构(茎蘖数、分蘖发生率、分蘖成穗率等)、生理指标(株高、叶面积指数、干物质积累等)及产量构成因素等指标。分别在播种前、拔节期、抽雄期、吐丝期、灌浆中期、完熟期用标准重量法测定 0~100 cm 土层土壤含水量。蒸散发量(evapotranspiration, ET)依据水分平衡公式计算^[14]:

$$ET = P + I + \Delta SWC - D - R \quad (1)$$

式中, P (mm)表示小麦生长季的降水量, 依照美国农业部水土保持司分类标准^[15]计算小麦季有效降水量, I (mm)表示灌水量。 ΔSWC (soil water content, mm)表示完熟期相较播种前土壤含水量的变化。 D (mm)表示测量根区以下的渗水量, 但由于测量的土壤深度(100 cm)较深, 默认为 0。 R (mm)为地表径流量, 由于各小区表面平整, 灌水过程中没有径流量, 由降雨造成的径流已经在有效降水量计算中去除。因此, 方程中的 D 和 R 均默认为 0。2022—2023 年小麦季蒸散发量为 408.38 mm, 2023—2024 年小麦季蒸散发量为 472.75 mm。

水分利用效率(water use efficiency, WUE)依据下列公式计算:

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

式中, Y 为小麦产量(kg hm^{-2})。

对照采用当地农户常规管理措施, 具体如下: 在播种环节, 采用 150 kg hm^{-2} 的播种量, 实行 25 cm 等行距种植模式。灌溉管理采用大田漫灌方式, 全生育期共灌溉 2 次, 分别于返青期和拔节期进行, 总灌溉量为 $2600 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$, 其中返青期灌溉量占比 40% (即 $1040 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$), 拔节期灌溉量占比 60% (即 $1560 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$)。化肥施用管理方面, 实行底肥与追肥相结合的施肥策略。整个小麦生育期总施肥量为纯氮 256 kg hm^{-2} 、纯磷 104 kg hm^{-2} 、纯钾 106 kg hm^{-2} 。肥料分配采用底肥与返青期追肥各占约 50% 的比例进行施用。病虫害防治方面, 仅通过种子包衣剂进行初期预防, 生育期后期不进行额外药剂喷施防治。

1.3.2 夏玉米 在种植密度方面, 采用 90,000 株 hm^{-2} 的密度, 相较于常规密度提高约 33%^[16]。在增加种植密度的同时, 结合运用药剂拌种技术、保墒保苗技术、宽窄行栽培技术、作物化控技术和水肥一体化技术。采用气吸式宽窄行玉米精量播种机, 通过 GPS 定位辅助, 实施单粒精量点播, 保证株距和行距的均匀播种。宽窄行的宽行控制在 80 cm 左右, 窄行控制在 40 cm 左右。使用噻虫嗪 7.6%、

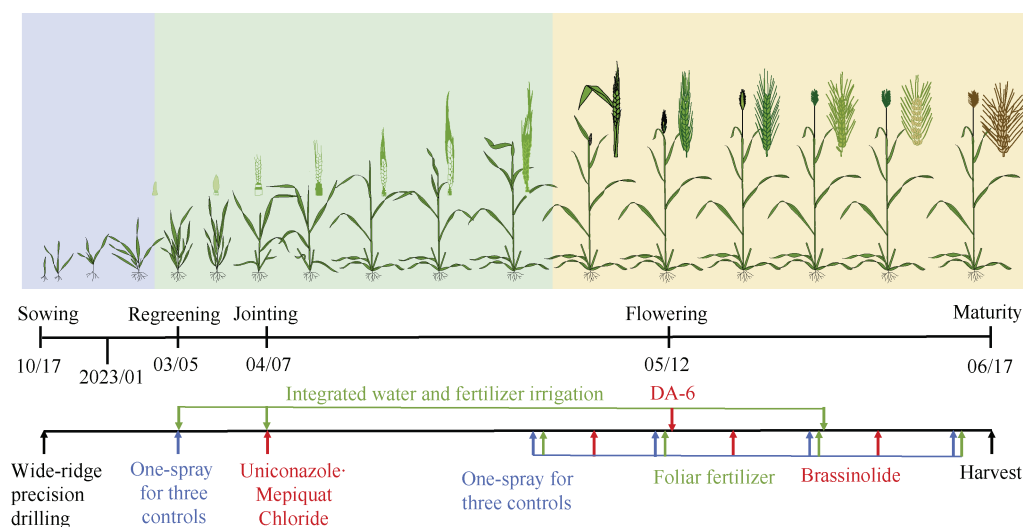


图3 高产田冬小麦生育进程及田间管理措施

Fig. 3 Growth stages and field management practices of winter wheat in high-yielding fields

黑色箭头代表机械播种和收获, 蓝色箭头代表病虫害防治措施, 绿色箭头代表水肥管理措施, 红色箭头代表化控措施。

Black arrows represent mechanical sowing and harvesting, blue arrows represent pest and disease control measures, green arrows represent water and fertilizer management measures, and red arrows represent chemical regulation measures.

咯菌腈 0.7%和苯醚甲环唑 0.7%进行拌种, 达到防虫、防病和杀菌的目的。保墒的核心是保持土壤的适宜湿度, 播种以及后期配合水溶肥采用滴灌的方式进行定量灌溉。在玉米生育期内通过 65 喷管进行定量灌溉 50 mm, 共浇水 8 次, 灌水量为 $4000 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$ 。采用种肥同播的方式施用复合肥($\text{N-P}_2\text{O}_5\text{-K}_2\text{O} = 13:6:36$) 600 kg hm^{-2} , 此外, 根据玉米的生长情况, 在小喇叭口和大喇叭口期追施生物菌肥(解粪害微生物菌剂, 有效活菌数 $\geq 2 \times 10^8 \text{ mL}^{-1}$) 30 kg hm^{-2} , 花后追施尿素硝酸铵液态肥(总氮量 $\geq 32\%$) 112.5 kg hm^{-2} , 共 7 次, 并间隔叶面喷施磷酸二氢钾(0-51-34) 4 次。玉米全生育期内使用纯氮 330 kg hm^{-2} 、纯磷 36 kg hm^{-2} 、纯钾 216 kg hm^{-2} 。在化控措施方面, 在玉米的不同生长阶段采取相应的措施。拔节期, 每公顷喷施 30%胺鲜酯·乙稀利水剂^[17] 1000~1500 倍液, 以降低株高、防止倒伏并改善群体冠层, 提高光能利用率; 大喇叭口期, 喷施芸苔素 1000 倍液, 增加叶绿素含量, 提高光合作用效率, 促根壮苗并提高作物的抗逆性; 灌浆期, 喷施胺鲜酯 1000 倍液, 提高籽粒库容量, 促进灌浆。在保苗方面, 播种时随底肥施辛硫磷 12 kg hm^{-2} , 以防治地老虎等地下害虫, 保护幼苗生长。苗期 3~4 叶阶段, 使用莠去津 1000~1500 倍液进行杂草防治。此外, 采用无人机飞防技术, 在苗后至灌浆期根据田间虫害情况和当年的气象条件共进行飞防 6 次并配合使用卵磷脂+虫螨腈·虱螨脲+噻虫嗪等杀虫剂。2023 年, 夏玉米于 6

月 20 日播种, 10 月 11 日收获, 生育进程如图 4, 生育期 113 d; 2024 年, 夏玉米于 6 月 24 日播种, 10 月 16 日收获, 生育期 114 d。依照马瑞^[18]的方法在相应时期测量土壤含水量、叶面积、地上部干物质及产量构成因素等指标。依照公式(1)和公式(2)计算玉米水分利用效率, 2023 年玉米季蒸散发量为 630.64 mm , 2024 年玉米季蒸散发量为 802.94 mm 。

对照采用当地农户的常规管理措施, 具体如下: 玉米种植密度为 $67,500 \text{ 株 hm}^{-2}$, 行距 60 cm, 等行距种植。灌溉采用大田漫灌方式, 全生育期共灌水 2 次, 分别在播种后和拔节期进行, 总灌水量为 3000 kg hm^{-2} , 其中播种后与拔节期各占 50%。施肥采用“一炮轰”模式, 即全生育期仅施 1 次底肥, 施用量为纯氮 240 kg hm^{-2} 、纯磷 75 kg hm^{-2} 、纯钾 100 kg hm^{-2} 。病虫害防控仅依靠种子包衣剂, 生育期内不再进行其他药剂防治。

2 结果与分析

2.1 冬小麦

烟农 1212 的田间生长发育指标如表 2 所示。在 2022—2024 年 2 个生长季中, 烟农 1212 从越冬期至完熟期的株高变化范围分别为 $10.59 \sim 83.86 \text{ cm}$ (2022—2023 年)和 $11.21 \sim 78.67 \text{ cm}$ (2023—2024 年)。叶面积指数在越冬期较低, 分别为 0.77 和 0.71, 至开花期达到峰值 7.64 和 7.62。生物量方面, 烟农 1212 在越冬期的生物量均为 0.04 kg m^{-2} , 至完熟期

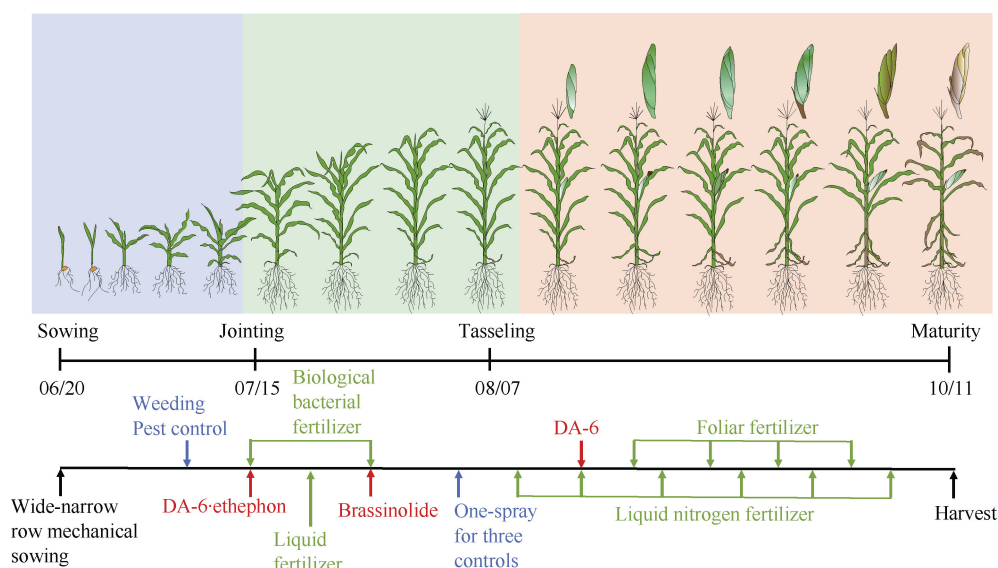


图 4 高产田夏玉米生育进程及田间管理措施

Fig. 4 Growth stages and field management practices of summer maize in high-yielding fields

黑色箭头代表机械播种和收获, 蓝色箭头代表病虫害防治措施, 绿色箭头代表水肥管理措施, 红色箭头代表化控措施。

Black arrows represent mechanical sowing and harvesting, blue arrows represent pest and disease control measures, green arrows represent water and fertilizer management measures, and red arrows represent chemical regulation measures.

分别增至 2.06 kg m^{-2} 和 2.17 kg m^{-2} 。在开花期至完熟期间, 群体生物量的积累量分别为 1.02 kg m^{-2} 和 0.70 kg m^{-2} , 占完熟期生物量的 49.5% 和 32.3%, 表明 2022—2023 年生长季的后期生物量积累较为显著。

相比之下, 当地农户种植的济麦 22 表现出不同的生长发育特征(表 2)。济麦 22 在 2022—2024 年 2 个生长季的株高范围为 8.79~72.40 cm (2022—2023 年)和 8.94~74.13 cm (2023—2024 年), 整体株高低于烟农 1212, 尤其在开花期和完熟期的株高较低, 分别相差 3.46 cm 和 11.46 cm (2022—2023 年)、4.54 cm 和 5.29 cm (2023—2024 年)。叶面积指数方面, 济麦 22 在开花期的峰值为 6.85 和 7.21, 略低于烟农 1212 (7.64 和 7.62), 表明其群体冠层光合能力可能稍逊于烟农 1212。在生物量积累方面, 济麦 22 在越冬期的生物量仅为 0.03 kg m^{-2} , 低于烟农 1212 的 0.04 kg m^{-2} , 表明早期群体生长较弱。至完熟期, 济麦 22 的生物量增至 1.87 kg m^{-2} 和 1.93 kg m^{-2} , 均低于烟农 1212 的 2.06 kg m^{-2} 和 2.17 kg m^{-2} , 表明其整体物质积累能力较弱。2022—2023 年、2023—2024 年开花期至完熟期的生物量增长量分别为 0.92 kg m^{-2} 和 0.80 kg m^{-2} , 分别占完熟期总生物量的 49.2% 和 41.5%, 积累比例与烟农 1212 相当, 但绝对积累量仍稍低。

综上所述, 烟农 1212 在整个生育过程中表现出较高的株高、较大的叶面积指数以及更高的生物量积累, 尤其在后期生长阶段, 生物量积累较为显著。而济麦 22 虽然在开花期至完熟期的生物量积累比例与烟农 1212 接近, 但总体生物量水平和植株生长势较弱, 表明当地农户种植条件下, 济麦 22 的生长潜力仍有提升空间。

莱州地区当地农户在冬小麦的灌溉管理方面, 灌溉次数平均为 1.92 次, 全生育期的平均灌溉量为 $1831 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$ 。根据统计数据, 近 2 年的灌溉水利用效率分别为 5.62 kg m^{-3} 和 5.59 kg m^{-3} , 表现出一定的水资源利用效率。然而, 尽管灌溉水利用效率相对较高, 灌溉频次和水量仍偏低, 未能充分满足小麦生长各阶段对水分的需求, 尤其是在生育中后期, 影响了作物的生长发育和最终产量。氮肥的投入量为 168.8 kg hm^{-2} , 磷肥和钾肥的投入量分别为 $100.05 \text{ kg hm}^{-2}$ 和 $102.01 \text{ kg hm}^{-2}$ 。尽管氮、磷、钾肥的投入量较为稳定, 但缺乏后期的追肥管理, 尤其是氮肥可能在小麦生育后期出现不足, 影响了小麦的生长潜力和产量提升。此外, 当地农户在作物生长调控方面的投入较为有限, 植物生长调节剂的使用较为稀少, 这使得小麦易受到病虫害、倒伏等问题的影响, 进一步限制了产量和品质的提高。

表 2 烟农 1212 与济麦 22 的田间生长发育指标
Table 2 Field growth and development indicators of Yannong 1212 and Jimai 22

年份 Year	时期 Stage	品种 Variety	株高 Plant height (cm)	叶面积指数 Leaf area index	生物量 Biomass (kg m ⁻²)
2022–2023	越冬期 Overwintering stage	烟农 1212 Yannong 1212	10.59±0.83 a	0.77±0.28 a	0.04±0.01 a
		济麦 22 Jimai 22	8.79±0.64 b	0.69±0.31 a	0.03±0.01 b
	拔节期 Jointing stage	烟农 1212 Yannong 1212	29.36±0.81 a	3.29±0.29 a	0.26±0.05 a
		济麦 22 Jimai 22	26.45±0.98 b	3.01±0.23 b	0.22±0.03 a
	开花期 Flowering stage	烟农 1212 Yannong 1212	71.11±2.86 a	7.64±0.69 a	1.04±0.82 a
		济麦 22 Jimai 22	67.65±2.33 b	6.85±0.41 b	0.95±0.53 a
	完熟期 Maturation stage	烟农 1212 Yannong 1212	83.86±2.18 a	3.50±0.15 a	2.06±0.31 a
		济麦 22 Jimai 22	72.40±2.08 b	3.22±0.57 a	1.87±0.27 a
2023–2024	越冬期 Overwintering stage	烟农 1212 Yannong 1212	11.21±0.91 a	0.71±0.32 a	0.04±0.02 a
		济麦 22 Jimai 22	8.94±0.59 b	0.68±0.29 a	0.03±0.01 a
	拔节期 Jointing stage	烟农 1212 Yannong 1212	30.29±1.84 a	2.96±0.21 a	0.36±0.07 a
		济麦 22 Jimai 22	27.23±0.75 b	2.83±0.26 a	0.29±0.06 b
	开花期 Flowering stage	烟农 1212 Yannong 1212	74.45±3.85 a	7.62±1.69 a	1.47±0.31 a
		济麦 22 Jimai 22	69.16±3.12 b	7.21±0.33 a	1.13±0.23 b
	完熟期 Maturation stage	烟农 1212 Yannong 1212	78.67±4.33 a	3.61±0.74 a	2.17±0.97 a
		济麦 22 Jimai 22	74.13±3.41 b	3.34±0.51 a	1.93±0.51 a

不同字母表示在同一年份相同时期下不同品种在 0.05 水平上差异显著。
Different letters indicate significant differences at the 0.05 level among different varieties at the same stage within the same year.

2.2 夏玉米

中金玉 2513 在 2023—2024 年 2 个生长季的生长发育指标如表 3 所示。从拔节期至完熟期, 株高在 2023 年由 80.30 cm 增长至 268.33 cm, 2024 年则由 96.10 cm 增长至 282.90 cm, 表明 2024 年生长势更强, 拔节期和后期植株高度均高于 2023 年。叶面积指数在抽雄期达到峰值, 分别为 6.78 和 6.77, 之后在灌浆期略有下降(6.34 和 6.65), 至完熟期下降至 4.08 和 4.12, 表明抽雄期至灌浆期为主要光合活跃阶段。生物量方面, 拔节期的积累较少, 2023 年为 0.61 kg m⁻², 2024 年略低, 为 0.51 kg m⁻²。至灌浆期, 生物量增长显著, 2023 年达到 1.61 kg m⁻², 2024 年则更高, 为 2.31 kg m⁻²。最终, 完熟期的生物量分别达到 2.91 kg m⁻² 和 2.65 kg m⁻², 表明 2023 年最终物质积累略优于 2024 年, 但 2024 年中期积累更快。抽雄期至完熟期的生物量增长量分别为 1.84 kg m⁻² 和 1.81 kg m⁻², 占最终生物量的 63.2% 和 68.3%, 显示出中金玉 2513 在后期物质积累能力较强, 且 2024 年后期积累比重更高。

当地农户种植的郑单 958 生长发育情况如表 3 所示。在 2023—2024 年 2 个生长季中, 株高在拔节期至完熟期的变化范围分别为 60.24~264.14 cm

(2023 年)和 65.18~270.04 cm (2024 年), 整体低于中金玉 2513, 尤其是在拔节期(差距 20.06~30.92 cm), 表明前期生长势较弱。叶面积指数在抽雄期达到峰值(4.91 和 5.26), 远低于中金玉 2513 的 6.78 和 6.77, 表明冠层光合能力相对较弱, 尤其在抽雄期和灌浆期的叶面积指数较低, 可能影响籽粒灌浆期的物质积累。

生物量方面, 郑单 958 在拔节期的生物量仅为 0.36 kg m⁻² 和 0.40 kg m⁻², 明显低于中金玉 2513 的 0.61 kg m⁻² 和 0.51 kg m⁻²。至灌浆期, 生物量分别达到 1.39 kg m⁻² 和 1.63 kg m⁻², 仍低于中金玉 2513 (1.61 kg m⁻² 和 2.31 kg m⁻²)。最终完熟期的生物量分别为 2.19 kg m⁻² 和 2.12 kg m⁻², 低于中金玉 2513 的 2.91 kg m⁻² 和 2.65 kg m⁻², 表明整体物质积累能力较弱。在抽雄期至完熟期的生物量增长量分别为 1.35 kg m⁻² 和 1.21 kg m⁻², 占最终生物量的 61.6% 和 57.1%, 后期积累能力明显弱于中金玉 2513 (63.2% 和 68.3%)。

综合来看, 中金玉 2513 在株高、叶面积指数和生物量积累等方面均优于当地农户种植的郑单 958, 尤其是在拔节期的生长势、抽雄期的叶面积指数以及灌浆期至完熟期的生物量积累上具有明显优势。

莱州地区当地农户在灌溉管理方面存在较为粗放的情况,灌溉次数和水量普遍偏低,通常仅在夏玉米的苗期和中期进行灌溉。而在作物生长的中后期,灌溉水量投入不足,造成水管理缺乏精细化,进而影响了作物的生长发育和产量水平。根据统计,农户在全生育期的平均灌溉量为 $1031\text{ m}^3\text{ hm}^{-2}$,灌溉水利用效率分别为 4.12 kg m^{-3} 和 4.09 kg m^{-3} 。氮肥施用量较低,仅为 200 kg hm^{-2} ,且施肥通常局限于苗期或初期生长阶段,缺乏后期施肥的补充,导致玉米在生长

后期氮肥供应不足,从而限制了其生长和发育。磷钾肥的施用主要集中在苗期,磷肥全生育期施用量为 45 kg hm^{-2} ,超过超高产试验的磷肥施用标准。钾肥施用量较为有限(全生育期为 75 kg hm^{-2}),且缺少后期追加施肥,致使玉米在生育后期的营养供应不足,影响了开花和灌浆过程。在作物生长调控方面,当地农户投入较为有限,植物生长调节剂的使用较为稀缺,致使作物易受倒伏、病虫害和生长不稳定等问题的影响,进一步制约了夏玉米的产量和品质。

表 3 中金玉 2513 与郑单 958 的田间生长发育指标
Table 3 Field growth and development indicators of Zhongjinyu 2513 and Zhengdan 958

年份 Year	时期 Stage	品种 Variety	株高 Plant height (cm)	叶面积指数 Leaf area index	生物量 Biomass (kg m ⁻²)
2023	拔节期 Jointing stage	中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	80.30 ± 2.61 a	5.05 ± 0.37 a	0.61 ± 0.07 a
		郑单 958 Zhengdan 958	60.24 ± 11.28 b	3.63 ± 0.14 b	0.36 ± 0.02 b
	抽雄期 Tasseling stage	中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	259.89 ± 3.42 a	6.78 ± 0.29 a	1.07 ± 0.11 a
		郑单 958 Zhengdan 958	255.04 ± 15.76 a	4.91 ± 0.21 b	0.84 ± 0.06 b
	灌浆期 Grain filling stage	中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	268.89 ± 8.10 a	6.34 ± 0.23 a	1.61 ± 0.15 a
		郑单 958 Zhengdan 958	263.45 ± 9.54 a	4.12 ± 0.36 b	1.39 ± 0.35 a
	完熟期 Maturation stage	中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	268.33 ± 6.52 a	4.08 ± 0.39 a	2.91 ± 0.29 a
		郑单 958 Zhengdan 958	264.14 ± 13.74 a	3.17 ± 0.37 b	2.19 ± 0.08 b
	拔节期 Jointing stage	中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	96.10 ± 0.80 a	4.73 ± 0.96 a	0.51 ± 0.09 a
		郑单 958 Zhengdan 958	65.18 ± 14.87 b	4.12 ± 0.51 a	0.40 ± 0.06 b
2024	抽雄期 Tasseling stage	中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	272.20 ± 0.09 a	6.77 ± 0.31 a	0.84 ± 0.11 a
		郑单 958 Zhengdan 958	263.82 ± 11.46 b	5.26 ± 0.16 b	0.91 ± 0.05 b
	灌浆期 Grain filling stage	中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	283.10 ± 10.62 a	6.65 ± 0.44 a	2.31 ± 0.19 a
		郑单 958 Zhengdan 958	271.12 ± 10.72 b	4.54 ± 0.44 b	1.63 ± 0.16 a
	完熟期 Maturation stage	中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	282.90 ± 5.74 a	4.12 ± 0.32 a	2.65 ± 0.30 a
		郑单 958 Zhengdan 958	270.04 ± 10.02 b	3.14 ± 0.68 b	2.12 ± 0.14 b

不同字母表示在同一年份相同时期下不同品种在 0.05 水平上差异显著。
Different letters indicate significant differences at the 0.05 level among different varieties at the same stage within the same year.

2.3 小麦-玉米周年产量及其构成因素

在 2022—2024 年 2 个生长季中,高产田种植的烟农 1212 与当地农户种植的济麦 22 在产量构成因素上表现出显著差异(表 4)。烟农 1212 在单位面积穗数上始终高于济麦 22, 2022—2023 年二者分别为 692 穗 m^{-2} 和 507 穗 m^{-2} , 2023—2024 年分别为 753 穗 m^{-2} 和 511 穗 m^{-2} , 显示出高产栽培模式下更强的成穗能力和更高的穗数积累。穗粒数方面, 烟农 1212 在 2 个生长季分别为 40.1 粒和 40.0 粒, 均高于济麦 22 的 36.1 粒和 37.4 粒, 表明高产栽培条件在促进籽粒形成方面具有优势。千粒重方面, 烟农 1212 在 2022—2023 年和 2023—2024 年分别达到 47.55 g 和 45.00 g, 而济麦 22 则较低, 分别为 34.55 g

和 35.12 g, 说明高产田栽培管理措施有利于提高籽粒充实度和物质积累能力。单株产量是衡量小麦生产能力的重要指标, 高产田种植的烟农 1212 在 2022—2023 年和 2023—2024 年的单株产量分别为 4.44 g 和 4.56 g, 而当地农户种植的济麦 22 仅为 3.98 g 和 4.01 g, 进一步表明高产田管理在籽粒产量形成过程中的促进作用。收获指数方面, 烟农 1212 在 2022—2023 年和 2023—2024 年分别为 0.56 和 0.53, 略高于济麦 22 的 0.51 和 0.50, 表明高产栽培条件下的生物量更大比例地转化为籽粒, 提升了产量形成效率。最终, 烟农 1212 在 2022—2023 年和 2023—2024 年的理论产量分别达到 $15,342.73\text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $1022.85\text{ kg mu}^{-1}$) 和 $15,760.47\text{ kg hm}^{-2}$ (折

合 $1050.70 \text{ kg mu}^{-1}$), 均远高于济麦 22 的 $7353.00 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $490.20 \text{ kg mu}^{-1}$) 和 $7804.56 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $520.30 \text{ kg mu}^{-1}$)。同时, 实际测产也表现出相似的差异: 烟农 1212 在 2 个生长季的实际产量分别为 $13,213.35 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $880.89 \text{ kg mu}^{-1}$) 和 $13,554.00 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $903.60 \text{ kg mu}^{-1}$), 远高于济麦 22 的 $6843.12 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $456.21 \text{ kg mu}^{-1}$) 和 $7534.22 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $502.28 \text{ kg mu}^{-1}$)。在资源利用效率方面(表 5), 烟农 1212 氮肥偏生产力为 56.75 kg kg^{-1} 和 58.30 kg kg^{-1} , 水分利用效率为 3.24 kg m^{-3} 和 2.87 kg m^{-3} 。这一结果表明, 高产栽培管理模式在提高小麦产量方面具有显著作用, 主要体现在更高的穗数、较大的穗粒数和更高的千粒重, 从而有效提升了单位面积产量水平。

在玉米生长过程中, 高产田种植的中金玉 2513 与当地农户种植的郑单 958 在产量构成因素上的差异亦较为显著。拔节期至完熟期的生长过程中, 中金玉 2513 的单位面积穗数始终高于郑单 958, 2022—2023 年二者分别为 9.1 穗 m^{-2} 和 7.0 穗 m^{-2} , 2023—2024 年二者分别为 9.1 穗 m^{-2} 和 6.1 穗 m^{-2} , 表明高产田管理模式在增加单位面积成穗数方面具有优势。穗粒数方面, 中金玉 2513 在 2 个生长季分别达到 584.7 粒和 586.4 粒, 而郑单 958 则较低, 2 个生长季分别为 581.0 粒和 552.0 粒, 显示出高产栽培模式在保证籽粒形成数量上的促进作用。千粒重方面, 中金玉 2513 在 2022—2023 年和 2023—2024 年分别为 379.31 g 和 329.40 g , 而郑单 958 仅为 331.20 g 和 317.10 g , 表明高产栽培管理有助于提高籽粒充实度。高产栽培模式同样促进了玉米的单株产量形成, 中金玉 2513 在 2022—2023 年和 2023—2024 年的单株产量分别为 206.25 g 和 193.20 g , 而郑单 958 则为 192.40 g 和 175.01 g , 说明高产栽培措施对单株产量形成具有积极作用。收获指数方面, 中金玉 2513 在 2022—2023 年为 0.58, 2023—2024 年则略有下降, 为 0.53, 而郑单 958 在 2 个生长季收获指数分别为 0.53 和 0.51, 说明高产栽培模式在促进籽粒物质积累方面仍具一定优势。在理论产量方面, 中金玉 2513 在 2022—2023 年和 2023—2024 年分别达到 $23,209.80 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $1547.33 \text{ kg mu}^{-1}$) 和 $20,214.44 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $1347.63 \text{ kg mu}^{-1}$), 而郑单 958 的产量分别为 $15,662.68 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $1044.18 \text{ kg mu}^{-1}$) 和 $12,212.04 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $814.14 \text{ kg mu}^{-1}$)。实际测产结果与理论产量趋势相符, 中金玉 2513 在

2 个生长季的实际产量分别为 $18,110.55 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $1207.37 \text{ kg mu}^{-1}$) 和 $17,423.00 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $1161.53 \text{ kg mu}^{-1}$), 显著高于郑单 958 的 $12,043.17 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $802.88 \text{ kg mu}^{-1}$) 和 $8932.41 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $595.49 \text{ kg mu}^{-1}$), 两者间的产量差距同样明显, 且 2023—2024 年度当地农户的产量下降幅度较大, 表明其管理模式在籽粒产量稳定性方面存在一定局限性。在资源利用效率方面(表 5), 中金玉 2513 的氮肥偏生产力为 54.90 kg kg^{-1} 和 52.80 kg kg^{-1} , 水分利用效率则分别达到 2.86 kg m^{-3} 和 2.17 kg m^{-3} 。总体而言, 高产栽培管理模式在玉米增产方面具有显著优势, 主要体现在更高的成穗数、穗粒数及千粒重, 并通过较高的收获指数使更多生物量向籽粒转化, 进一步夯实了产量提升的基础。

小麦-玉米周年复种模式上, 小麦季烟农 1212 在高产田栽培模式下的穗数、穗粒数、千粒重和产量均显著高于当地农户种植的济麦 22, 表明高产田管理对小麦产量形成具有明显促进作用。玉米季, 中金玉 2513 的穗数、穗粒数和千粒重均高于当地农户种植的郑单 958, 尤其是在穗粒数和千粒重上的优势明显, 使得最终产量远高于当地农户的栽培结果。相比之下, 当地农户种植的小麦和玉米品种在产量构成因素上均表现出一定劣势, 特别是在穗数、穗粒数以及千粒重方面, 限制了最终产量的提升。由此可见, 优化栽培管理措施, 如合理密植、优化水肥管理和增强籽粒灌浆调控等, 对于进一步提升小麦和玉米的单位面积产量至关重要。

3 讨论

在 2023 年的首次高产创建中, 本研究小麦-玉米周年产量首次成功突破 2 吨粮, 并且在 2024 年的重复试验中产量水平仍然达到 2 吨以上, 初步证明了本次高产创建的可重复性及产量的稳定性。

从小麦生长特性来看, 高产田种植的烟农 1212 在各生育期表现出更优的群体结构与生长势, 尤其在开花期和完熟期能够维持较高的叶面积指数和生物量。这种优势主要源于前期扎实的群体建成与中后期稳健的生长: 在拔节期之前, 适度密植与合理肥水管理能够提升分蘖成活率与植株抗逆能力; 拔节期至开花期则通过精准供肥与灌溉推动叶片发育和光合作用, 为后期籽粒形成奠定基础。由于开花至灌浆期的叶面积指数始终处于高水准, 高产田可在灌浆后期持续累积更多干物质, 并将其有效转化

表 4 小麦与玉米的产量构成因素
Table 4 Yield components of wheat and maize

年份 Year	作物 Crop	管理模式 Management mode	品种 Variety	每平方米穗数 Number of spikes/ears per square meter	穗粒数 Grain number per spike/ear	千粒重 Thousand-grain weight (g)	单株产量 Single plant yield (g)	收获指数 Harvest index	理论产量 Theoretical grain yield (kg hm ⁻²) / (kg mu ⁻¹)	实际产量 Actual grain yield (kg hm ⁻²) / (kg mu ⁻¹)
2022–2023	小麦 Wheat	高产栽培 High-yield cultivation	烟农 1212 Yannong 1212	692±25.00 a	40.1±4.1 a	47.55±6.6 a	4.44±0.85 a	0.56±0.03 a	15,342.73±2268.87 a (/1022.85)	13,213.35 (/880.89)
			济麦 22 Jimai 22	507±62.00 b	36.1±3.3 b	34.55±2.6 b	3.98±0.29 a	0.51±0.04 b	7353.00±1366.48 b (/490.20)	6843.12 (/456.21)
	玉米 Maize	当地常规 Local conventional practices	中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	9.1±0.26 a	584.7±17.4 a	379.31±40.0 a	206.25±23.30 a	0.58±0.05 a	23,209.80±2812.19 a (/1547.33)	18,110.55 (/1207.37)
			郑单 958 Zhengdan 958	7.0±0.57 b	581.0±62.7 a	331.20±29.0 b	192.40±27.80 a	0.53±0.08 b	15,662.68±2862.46 b (/1044.18)	12,043.17 (/802.88)
2023–2024	小麦 Wheat	高产栽培 High-yield cultivation	烟农 1212 Yannong 1212	753±68.00 a	40.0±3.4 a	45.00±4.7 a	4.56±0.55 a	0.53±0.06 a	15,760.47±1812.44 a (/1050.70)	13,554.00 (/903.60)
			济麦 22 Jimai 22	511±35.00 b	37.4±3.8 a	35.12±3.0 b	4.01±0.03 b	0.50±0.06 a	7804.56±1522.24 b (/520.30)	7534.22 (/502.28)
	玉米 Maize	当地常规 Local conventional practices	中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	9.1±0.35 a	586.4±53.8 a	329.40±19.0 a	193.20±11.70 a	0.53±0.03 a	20,214.44±1119.93 a (/1347.63)	17,423.00 (/1161.53)
			郑单 958 Zhengdan 958	6.1±0.55 b	552.0±79.1 a	317.10±31.0 b	175.01±34.40 a	0.51±0.09 a	12,212.04±2257.08 b (/814.14)	8932.41 (/595.49)

不同字母表示在同一年份相同时期下不同品种在 0.05 水平上差异显著。
Different letters indicate significant differences at the 0.05 level among different varieties at the same stage within the same year.

表 5 小麦与玉米的水分利用效率和氮肥偏生产力
Table 5 Water use efficiency and partial factor productivity of nitrogen fertilizer in wheat and maize

年份 Year	管理方式 Management mode	品种 Variety	水分利用效率 Water use efficiency (kg m ⁻³)	灌溉水分利用效率 Irrigation water use efficiency (kg m ⁻³)	氮肥偏生产力 Partial factor productivity of nitrogen fertilizer (kg kg ⁻¹)
2022–2023	高产栽培 High-yield cultivation	烟农 1212 Yannong 1212	3.24	8.26	56.75
		中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	2.86	4.53	54.90
2023–2024	高产栽培 High-yield cultivation	烟农 1212 Yannong 1212	2.87	8.47	58.30
		中金玉 2513 Zhongjinyu 2513	2.17	4.36	52.80
2022–2023	当地常规 Local conventional practices	济麦 22 Jimai 22	1.59	3.74	26.73
		郑单 958 Zhengdan 958	2.82	6.11	50.18
2023–2024	当地常规 Local conventional practices	济麦 22 Jimai 22	1.52	4.12	29.43
		郑单 958 Zhengdan 958	1.49	4.53	37.22

为籽粒产量^[19-21]。相较之下,当地农户种植的济麦 22 在前期管理相对粗放,后期追肥投入不足,导致后期光合作用能力减弱和生物量增长乏力,产量提升潜力尚未得到充分发挥。

玉米生产对群体管理与水肥供给的要求更高。中金玉 2513 在高产栽培管理下,从拔节期开始就表现出更强的株高增长势,抽雄期和灌浆期的叶面积指数也明显领先,实现了更高的光合生产效率与后期干物质积累。进一步来看,精准安排灌溉时机并适量后移氮肥,不仅能避免营养元素在早期的浪费,还能确保灌浆期籽粒获得持续的营养供给。由此,玉米在关键生育阶段保持了良好的“源库”协调,获得更高的单株产量与收获指数^[22-23]。相比之下,当地农户管理下的郑单 958 前期施肥与灌溉不够精细,后期追加投入同样不足,导致群体扩张速度以及灌浆期营养供给均无法与高产田相比,籽粒形成与千粒重难以得到充分保障。此外,较为简单的田间操作与病虫害防治手段也增加了植株倒伏和病害风险,进而加大了年际产量波动^[24]。

在资源利用效率方面,高产栽培通过精准化施肥、灌溉与管理手段,显著提高了氮肥偏生产力和灌溉水利用效率,既展示了高产管理在投入产出方面的优势,也验证了分阶段灌溉与精细化施肥策略在提升资源利用率方面的效果。对于当地农户而言,肥料和水管理在时间和数量上仍不够平衡:过早或过于集中的施肥会导致植株在早期旺长但后期营养不足;偏低的灌溉次数与水量也限制了作物后期产量潜力的发挥。此外,对植物生长调节剂和中微量元素的使用尚缺乏足够重视,导致作物在不良气候与

病虫害面前的抵抗力有所不足。若能在实践层面进一步引入水肥一体化技术、加强机械化精量播种与田间管理的升级改造,常规田在维持相对稳定投入的同时也可取得更高的产量与更佳的资源利用效率^[25]。

本研究提出的“小麦-玉米周年两吨粮”技术模式在实现超高产的同时,通过优化灌溉策略显著提升了 WUE。与普通农户相比,高产田小麦季的 WUE 和灌溉水分利用效率(irrigation water use efficiency, IWUE)在 2022—2024 年分别提高 121% 和 106%。尽管周年灌水量达 560 mm,但通过水肥耦合精准调控和生理节水栽培技术,高产田 2 个麦玉周期 IWUE 较传统农户提升 29.80%~48.36%。以小麦季为例,每立方米灌溉水可产出 8.26~8.47 kg 籽粒,相当于传统农户的 1.9 倍(表 5)。这种效率革命使得在相同耕地面积下,本研究模式较传统生产可减少 45%~50% 的灌溉水量即可达到同等产量目标。对于玉米季而言, IWUE 虽无显著优势但切实提升了产量潜力,山东北部沿海平原区降水季节分布不均,玉米季(6 至 9 月)常遭遇阶段性干旱,需通过灌溉保障高产稳产。与普通农户相比,本研究虽总灌水量较高,但通过优化灌溉时间(如关键生育期精准补水)和配套田间管理(如秸秆还田、深松蓄墒),单位产量耗水量反而降低,从长远看有利于缓解水资源压力。但必须指出的是,本试验位于山东北部滨海平原地下水富集区(埋深 < 5 m),且年均降水量 600 mm,具备通过适量灌溉补偿降水波动的资源基础。若将该模式直接应用于浅层地下水贫乏或盐渍化高风险区,则可能加剧生态风险。因此在保障粮食安全与缓解水生态压力的双重目标下,未来高产技术研发需更注重“水-粮”协同

优化,而非单一追求产量极限。

总体而言,小麦与玉米的周年表现表明,高产栽培模式能够显著提升单位面积产量,其关键在于平衡了群体建成、后期灌浆及生物量分配中的数量(如穗数、成穗数与株高)与质量(如籽粒灌浆、收获指数与干物质积累)。对于当地农户而言,若能适度借鉴高产栽培技术(如加强苗期与拔节期的水肥管理、注重后期追肥与灌溉,并选用抗逆性更强的品种与合理的密植方式),则可在现有基础上逐步缩小与高产田之间的差距。

2023年全国小麦单产纪录由安徽涡阳县创造,纪录为 $13,375.50 \text{ kg hm}^{-2}$ ^[4],比本研究的小麦单产高1.2%;2020年程雅婷等^[5]在新疆奇台创下了玉米 $24,948.75 \text{ kg hm}^{-2}$ (折合 $1663.25 \text{ kg mu}^{-1}$)的产量纪录,比本研究的玉米单产高37.8%,玉米生育期为160 d,比本研究的玉米生育期多41.6%。无论是小麦和玉米,本研究相较于全国的高产纪录仍有一定的差距,从差距上看玉米的单产差距最大,证明单季玉米较长的生育期对产量的提升还是非常重要的。但是放眼全年单一地块上,小麦-玉米周年产量达到 $31,323.90 \text{ kg hm}^{-2}$ 仍具有非常重要的意义。这不仅仅是因为小麦-玉米周年复种是华北地区最主要的种植模式,更重要的是周年高产是对当地辐射资源及土地资源利用的极致。该项目的成功实施,将通过集成创新现代农业科技,实现小麦和玉米的高产高效,确保在有限的耕地上产出更多的粮食,从而满足人民群众的基本需求。同时,超高产创建项目还能推动农业产业升级和转型,促进农业与现代科技的深度融合,提高农业生产效率,降低生产成本,为农民带来实实在在的经济收益。因此,小麦玉米周年超高产创建项目不仅关乎粮食安全^[26],更是推动农业现代化、促进农村经济发展、实现乡村振兴的重要举措。

尽管本研究成功构建并验证了“小麦-玉米周年两吨粮”超高产技术模式的可行性与稳定性,但在推广应用时,必须清醒地认识其存在的局限性及适用的前提条件。首先,该模式是一个典型的“高投入-高产出”体系。研究中,小麦和玉米的全生育期总灌溉量达到 $5600 \text{ m}^3 \text{ hm}^{-2}$,氮肥投入量分别高达 232.5 kg hm^{-2} 和 330.0 kg hm^{-2} 。这对资金、水资源、肥料等生产资料的投入要求较高,对于资本有限或生产规模较小的农户可能构成经济压力。其次,该模式对水资源具有高度依赖性。本试验点位于山东北部滨海平原,地下水资源相对丰富,这为实现高频次的定量灌溉

创造了条件。然而,在中国北方许多水资源短缺的地区,如此高的灌溉定额难以保障,盲目推广可能加剧区域水资源供需矛盾,甚至引发土壤盐渍化等生态风险。因此,该技术的普适性首先受限于当地的水资源承载能力。再者,该技术体系的成功运行依赖于高度的精细化管理和现代农业技术。例如,水肥一体化、GPS辅助的精准播种、无人机飞防以及植物生长调节剂的精准使用等,均需要操作者具备较高的农业技术知识和管理水平。综上所述,该超高产技术模式的成功推广需满足以下条件:(1) 水资源保障:适用于年降水量较高或灌溉设施完善、水资源供给可靠的地区;(2) 适度规模经营:更适合于有能力进行较大资本投入的家庭农场、农业合作社等新型经营主体;(3) 完善的技术服务:需要强大的农业技术推广体系提供配套培训和现场指导,确保各项关键技术能够精准落地。因此,在推广时应因地制宜,科学评估当地的资源禀赋、经济水平和技术条件,而非简单复制。

References

- [1] 徐佳利,周太东. 全球粮食危机与中国应对策略. 国际经济合作, 2024, 40(2), 32–43.
Xu J L, Zhou T D. Global food crisis and China's countermeasures. J Int Econ Coop, 2024, 40(2), 32–43 (in Chinese with English abstract).
- [2] 于台泽,贾伟,安晓慧,等. 轮作种植制度的生态经济效益分析及发展建议. 中国农学通报, 2022, 38(26): 150–157.
Yu T Z, Jia W, An X H, et al. Ecological and economic benefit analysis of crop rotation and development suggestions. Chin Agric Sci Bull, 2022, 38(26): 150–157 (in Chinese with English abstract).
- [3] 王玉英,胡春胜,董文旭,等. 华北平原小麦-玉米轮作系统碳中和潜力及固碳措施. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30: 651–657.
Wang Y Y, Hu C S, Dong W X, et al. Carbon neutralization potential and carbon sequestration efforts in a wheat-maize rotation system in the North China Plain. Chin J Eco Agric, 2022, 30: 651–657 (in Chinese with English abstract).
- [4] 亳州市农业农村局. 全国小麦单产新纪录在涡阳诞生. (2023-06-14) [2025-01-01]. <https://nyncj.bozhou.gov.cn/News/show/612814.html>.
Bozhou Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs. A new national record for wheat yield per unit area was set in Guoyang. (2023-06-14) [2025-01-01]. <https://nyncj.bozhou.gov.cn/News/show/612814.html> (in Chinese).
- [5] 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.
Cheng Y T, Li R F, Wang K R, et al. Creation and thinking of China's spring maize high-yield record. J Maize Sci, 2021, 29(2): 56–59 (in Chinese with English abstract).
- [6] 杨慧敏,杨云马,黄少辉,等. 优化施肥对小麦-玉米轮作体系

- 产量、养分平衡与生态环境效益的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31: 699–709.
- Yang H M, Yang Y M, Huang S H, et al. Effects of optimized fertilization on yield, nutrient balance, and eco-environmental benefits in wheat-maize rotation system. *Chin J Eco Agric*, 2023, 31: 699–709 (in Chinese with English abstract).
- [7] 莱州市人民政府. 我市玉米高产攻关田喜获丰收再创佳绩. (2023-11-09) [2025-01-01]. http://www.laizhou.gov.cn/art/2023/11/9/art_23204_2966492.html.
- Laizhou Municipal People's Government. The high-yield maize research fields in our city have achieved a bumper harvest and made new achievements again. (2023-11-09) [2025-01-01]. http://www.laizhou.gov.cn/art/2023/11/9/art_23204_2966492.html (in Chinese).
- [8] 莱州市人民政府. 农业生产再传喜报 我市粮食总产实现“二十连丰”. (2023-12-27) [2025-01-01]. http://www.laizhou.gov.cn/art/2023/12/27/art_44605_2967861.html.
- Laizhou Municipal People's Government. Another good news comes from agricultural production: the total grain output of our city has achieved “20 consecutive years of bumper harvests”. (2023-12-27) [2025-01-01]. http://www.laizhou.gov.cn/art/2023/12/27/art_44605_2967861.html (in Chinese).
- [9] 李涛, 李振兰, 王军海, 等. 1971–2015年莱州市日照变化特征分析. 现代农业科技, 2016(5): 270–271.
- Li T, Li Z L, Wang J H, et al. Analysis of the variation characteristics of sunshine duration in Laizhou city from 1971 to 2015. *Mod Agric Sci Technol*, 2016(5): 270–271 (in Chinese with English abstract).
- [10] 王倩茜, 孙晓辉, 殷岩, 等. 小麦新品种烟农 1212 的选育及其配套栽培技术. 安徽农学通报, 2019, 25(8): 38.
- Wang Q Q, Sun X H, Yin Y, et al. Breeding of new wheat variety Yannong 1212 and systematic cultivation techniques. *Anhui Agric Sci Bull*, 2019, 25(8): 38 (in Chinese with English abstract).
- [11] 苏玉环, 刘保华, 王雪香, 等. 植物生长调节剂麦巨金对冬小麦产量及抗倒性的影响. 河北农业科学, 2014, 18(2): 36–38.
- Su Y H, Liu B H, Wang X X, et al. Effects of plant growth regulator Maijulin on yield and lodging resistance of winter wheat. *J Hebei Agric Sci*, 2014, 18(2): 36–38 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张飞雪, 陈峰, 张书红, 等. 不同植物生长调节剂对冬小麦生长及产量的影响. 肥料与健康, 2023, 50(6): 58–61.
- Zhang F X, Chen F, Zhang S H, et al. Effects of different plant growth regulators on growth and yield of winter wheat. *Fert Health*, 2023, 50(6): 58–61 (in Chinese with English abstract).
- [13] 曹统一. 独脚金内酯及其类似物对冬小麦分蘖的调控效应. 中国农业大学硕士学位论文, 北京, 2022.
- Cao T Y. Effect of Strigolactone and Strigolactone Analogue on Tillering of Winter Wheat. MS Thesis of China Agricultural University, Beijing, China, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [14] Zou H Y, Fan J L, Zhang F C, et al. Optimization of drip irrigation and fertilization regimes for high grain yield, crop water productivity and economic benefits of spring maize in Northwest China. *Agric Water Manag*, 2020, 230: 105986.
- [15] 黄志刚, 王小立, 肖烨, 等. 气候变化对松嫩平原水稻灌溉需水量的影响. 应用生态学报, 2015, 26: 260–268.
- Huang Z G, Wang X L, Xiao Y, et al. Effect of climate change on rice irrigation water requirement in Songnen Plain, Northeast China. *Chin J Appl Ecol*, 2015, 26: 260–268 (in Chinese with English abstract).
- [16] 明博, 谢瑞芝, 侯鹏, 等. 2005–2016年中国玉米种植密度变化分析. 中国农业科学, 2017, 50: 1960–1972.
- Ming B, Xie R Z, Hou P, et al. Analysis of maize planting density changes in China from 2005 to 2016. *Sci Agric Sin*, 2017, 50: 1960–1972 (in Chinese with English abstract).
- [17] 王明杰, 张佳琪, 武敏桦, 等. 30%胺鲜酯·乙烯利水剂(玉黄金)对密植春玉米茎折强度及生理特性的影响. 江苏农业科学, 2022, 50(20): 101–107.
- Wang M J, Zhang J Q, Wu M H, et al. Effects of 30% aminoacyl ester and ethylene water agent (Yu Huangjin) on stem fold strength and physiological characteristics of densely planted spring maize. *Jiangsu Agric Sci*, 2022, 50(20): 101–107 (in Chinese).
- [18] 马瑞. 减叶去冗对玉米发育与产量形成的影响. 中国农业大学硕士学位论文, 北京, 2022.
- Ma R. The Impact of Leaf Removal on Maize Development and Yield Formation. MS Thesis of China Agricultural University, Beijing, China, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [19] 徐芳, 何建强, 朱晓华, 等. 利用 APSIM 模型评估播期和种植密度对关中玉米气候生产力的影响. 陕西气象, 2022(1): 59–65.
- Xu F, He J Q, Zhu X H, et al. Evaluation of the impact of sowing date and planting density on climate productivity of maize in Guanzhong region by the APSIM model. *J Shaanxi Meteor*, 2022(1): 59–65 (in Chinese with English abstract).
- [20] 褚旭, 李帅, 赵亚南, 等. 施氮量和种植密度对玉米产量及磷钾吸收利用的影响. 中国农业科技导报, 2020, 22(12): 115–126.
- Chu X, Li S, Zhao Y N, et al. Effects of nitrogen application amount and planting density on maize yield, phosphorus and potassium uptake and utilization. *J Agric Sci Technol*, 2020, 22(12): 115–126 (in Chinese with English abstract).
- [21] Yao H S, Zhang Y L, Yi X P, et al. Cotton responds to different plant population densities by adjusting specific leaf area to optimize canopy photosynthetic use efficiency of light and nitrogen. *Field Crops Res*, 2016, 188: 10–16.
- [22] 郑霞, 马娟娟, 孙西欢, 等. 不同灌溉施肥方式下土壤氮素运移研究综述. 山西水利, 2011, 27(9): 27–28.
- Zheng X, Ma J J, Sun X H, et al. Review on soil nitrogen transport under different irrigation and fertilization methods. *Shanxi Water Resour*, 2011, 27(9): 27–28 (in Chinese).
- [23] Fageria N K, Barbosa Filho M P, Moreira A, et al. Foliar fertilization of crop plants. *J Plant Nutr*, 2009, 32: 1044–1064.
- [24] 孙亮, 陈存广, 刘艳慧. 植保无人机在玉米病虫害防治中的应用. 农业工程技术, 2023, 43(23): 89–90.
- Sun L, Chen C G, Liu Y H. Application of unmanned aerial vehicles in corn pest and disease control. *Agric Eng Technol*, 2023, 43(23): 89–90 (in Chinese with English abstract).
- [25] Sacks W J, Kucharik C J. Crop management and phenology trends in the U.S. Corn Belt: impacts on yields, evapotranspiration and energy balance. *Agric For Meteorol*, 2011, 151: 882–894.
- [26] 王家庭, 盛楠. 粮食安全保障研究: 回顾、评价与展望. 创新, 2023, 17(4): 97–105.
- Wang J T, Sheng N. Research on food security assurance: Review, evaluation, and prospects. *Innovation*, 2023, 17(4): 97–105 (in Chinese with English abstract).