

# 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

魏廷邦<sup>1</sup>, 柴强<sup>2</sup>, 王伟民<sup>1</sup>, 王军强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>甘肃省农业工程技术研究院, 甘肃武威 733006; <sup>2</sup>甘肃省干旱生境作物学重点实验室, 兰州 730070)

**摘要:**【目的】针对土壤水分、氮肥供应不足以及玉米早衰、种植密度不合理等严重制约绿洲灌区玉米的生产问题, 通过研究不同水氮配比及种植密度对玉米光合作用、干物质积累特征和产量的影响, 以期为该区玉米高产、稳产提供技术支撑。【方法】2016—2017 年, 于河西绿洲灌区进行大田试验, 以先玉 335 为参试品种, 采用裂区设计, 灌水水平 ( $W_1$ : 4 050  $m^3 \cdot hm^{-2}$ ,  $W_2$ : 3 720  $m^3 \cdot hm^{-2}$ ) 做主区, 施氮水平 (不施氮  $N_0$ : 0, 低施氮  $N_1$ : 300  $kg \cdot hm^{-2}$ , 高施氮  $N_2$ : 450  $kg \cdot hm^{-2}$ ) 为裂区, 种植密度 (低密度  $D_1$ : 75 000 株/ $hm^2$ , 中密度  $D_2$ : 97 500 株/ $hm^2$ , 高密度  $D_3$ : 120 000 株/ $hm^2$ ) 为裂区, 测定光合速率、干物质积累量和产量等指标。【结果】施氮量、种植密度对玉米全生育期净光合速率、干物质最大增长速率及其出现天数、干物质积累量、产量、WUE 和氮肥利用率有显著影响。水肥耦合可增强玉米密植条件下的光合作用, 提高干物质最大增长速率, 提前干物质最大增长速率出现的天数, 增大干物质积累量和产量。在减量 20%灌水和高施氮水平下, 中密度处理的全生育期净光合速率较较低密度和高密度分别提高 17.31%和 11.43%; 高密度和中密度处理的干物质最大增长速率及最大增长速率出现天数较较低密度处理分别提高 21.07%、7.52%和提前 6.7 d、4.1 d; 高密度处理的干物质积累量较中密度、低密度分别提高 4.27%和 10.59%, 中密度处理的产量、水分利用效率和氮肥利用率较较低密度、高密度处理分别提高 24.2%、11.4%、29.9%和 29.2%、18.4%、13.8%。在减量 20%灌水条件下, 中密度高施氮处理的全生育期净光合速率、干物质积累量和产量分别较中施氮、不施氮分别提高 7.34%、11.63%、14.63%和 49.54%、44.53%、69.03%; 高密度高施氮处理的干物质最大增长速率及最大增长速率出现天数较中施氮、不施氮分别提高 19.07%、54.35%和提前 3.9 d、6.8 d; 同等密度高施氮处理的氮肥利用率较较低施氮处理提高 24.5%。综上, 减量 20%灌水与高施氮耦合主要通过提高密植玉米的光合作用和干物质积累速率, 延长干物质积累的持续时间, 提高 WUE 和氮肥利用率, 从而对干物质积累量和产量产生调控作用。【结论】在绿洲灌区, 采用水肥耦合 (生育期减量 20%灌水 (3 720  $m^3 \cdot hm^{-2}$ )、施氮量 450  $kg \cdot hm^{-2}$ 、中密度 97 500 株/ $hm^2$ ) 的最优栽培模式, 可为进一步发掘密植条件下玉米高产、高效栽培提供技术指导。

**关键词:** 水氮耦合; 种植密度; 绿洲灌区; 光合作用; 干物质积累特征

## 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

WEI TingBang<sup>1</sup>, CHAI Qiang<sup>2</sup>, WANG WeiMin<sup>1</sup>, WANG JunQiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Gansu Academy of Agri-engineering and Technology, Wuwei 733006, Gansu; <sup>2</sup>Gansu Provincial Key Laboratory of Arid Land Crop Science, Lanzhou 730070)

**Abstract:** 【Objective】 In oasis irrigation agricultural region, some problems has caused serious influenced of maize

收稿日期: 2018-07-05; 接受日期: 2018-12-28

基金项目: 国家公益性行业 (农业) 科研专项 (201503125-3)、国家科技支撑计划子课题 (2015BAD22B04-03)、国家自然科学基金 (3156020171, 41867013)

联系方式: 魏廷邦, E-mail: weitingbang@163.com. 通信作者柴强, E-mail: chaiq@gsau.edu.cn

production, such as soil available water and nitrogen hunger, premature senescence and unreasonable planting density. To provide technical support for high and stable maize yield, the effects of different ratio of application irrigation and nitrogen and planting density on photosynthesis, dry matter accumulation characteristics and maize yield were studied. 【Method】 Photosynthetic ability, dry matter accumulation characteristics and yield were determined under two-years field experiment, which was carried out in Hexi Oasis irrigation region of Gansu province from 2016 to 2017. In this research, the cultivar “Xianyu335” was applied as research material. A split-split plot design was used as this experiment, with two irrigation application amount treatments (namely 4 050  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $W_1$ ) and 3 720  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $W_2$ )) as the main plot, three nitrogen application amount treatments (namely 0 ( $N_0$ ), 300  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $N_1$ ) and 450  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $N_2$ )) as the split plot, and three plant densities (namely  $7.5 \times 10^4$  plant/ $\text{hm}^2$  ( $D_1$ ),  $9.75 \times 10^4$  plant/ $\text{hm}^2$  ( $D_2$ ) and  $1.2 \times 10^5$  plant/ $\text{hm}^2$  ( $D_3$ )) as the split-split plot. 【Result】 Nitrogen fertilizer application and planting density had significant influence on photosynthetic rate, maximum dry matter accumulation rate, emergence days of maximum dry matter accumulation rate, dry matter accumulation amount, grain yield, water use efficiency and nitrogen fertilizer use rate in growth stages of maize. The coupling of irrigation and nitrogen fertilizer management increased photosynthesis, the highest dry matter accumulation rate and advanced the days of emergence of the highest dry matter accumulation rate, and enhanced dry matter accumulation amount and grain yield in growth stages of maize. Under the reduced 20% irrigation and the level of higher nitrogen application in growth stages of maize, compared with the low planting density and high planting density treatments, the photosynthetic rate under the medium planting density treatment was increased by 17.31% and 11.43%, respectively. While, compared with the low planting density treatment, the maximum dry matter accumulation rate and days of emergence of the highest dry matter accumulation rate under the treatment with the high planting density and medium planting density was increased by 21.07% and 7.52%, respectively, and advanced by 6.7, 4.1 days, respectively, meanwhile, the dry matter accumulation of the high planting density treatment was increased by 4.27% and 10.59%, respectively; Compared with the low planting density treatment and the high planting density treatment, the grain yield, water use efficiency and nitrogen fertilizer use rate of maize with the medium planting density treatment was increased by 24.2%, 11.4%, 29.9% and 29.2%, 18.4%, 13.8%, respectively. Under the reduced 20% irrigation and same planting density treatment in growth stages of maize, compared with medium nitrogen application treatment and no nitrogen application treatment, the photosynthetic rate, the dry matter accumulation and grain yield of maize under the treatment with high nitrogen application treatment was increased by 7.34%, 11.63%, 14.63% and 49.54%, 44.53%, 69.03%, under the medium planting density treatment, respectively; Compared with medium nitrogen application treatment and no nitrogen application treatment, the maximum dry matter accumulation rate and days of emergence of the highest dry matter accumulation rate of maize with the high nitrogen application treatment was increased by 19.07% and 54.35% and advanced by 3.9 and 6.8 days under the high planting density treatment, respectively. Compared with no nitrogen application treatment, nitrogen fertilizer use rate of maize with the high nitrogen application treatment was increased by 24.50%. The facts showed that the coupling of reduced 20% irrigation and high nitrogen application had regulated dry matter accumulation, grain yield with the improvement of photosynthesis, dry matter accumulation rate, water use efficiency, nitrogen fertilizer use rate and extending the duration of dry matter accumulation. 【Conclusion】 The treatment with application coupling of irrigation and nitrogen (i.e. reduced 20% irrigation amount during growth 3 720  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  ( $W_2$ ) and N application with 450  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  at growth stage and medium density of  $9.75 \times 10^4$  plant/ $\text{hm}^2$  at growth stage of maize) could be considered as the best feasible cultivation pattern management, which could provide technical guidance for further exploring high yield and efficient cultivation of close planting maize in Oasis irrigation region.

**Key words:** coupling of irrigation and nitrogen application; planting density; oasis irrigation region; photosynthesis; dry matter accumulation characteristics

## 0 引言

【研究意义】水和肥已成为影响粮食生产的两大关键元素, 水、肥协调供应对提高作物产量及综合利用价值意义重大<sup>[1]</sup>。大量研究表明, 作物干物质积累量的 95%左右是来自于光合作用生产的有机物, 光合速率的高低是作物产量形成的基础<sup>[2-3]</sup>, 作物的光合作用、干物质积累特征还与土壤水分、养分的供应能力

密切相关<sup>[4-5]</sup>。种植密度的改变可有效改善作物对水、肥资源的利用状况, 是作物增产的重要途径之一<sup>[6-7]</sup>。由于不同种植区内适用的水肥配比、栽培密度、种植模式及环境条件差异较大, 在资源性缺水地域, 针对性研发密植条件下相应的水肥耦合制度, 对解决区域性水资源危机和挖掘玉米增产潜力具有十分重要的意义。【前人研究进展】目前, 国内外学者关于水、肥及互作效应对密植作物群体光合特性、干物质积累特

征及产量形成过程均有报道。张旺锋等<sup>[8]</sup>和李广浩等<sup>[9]</sup>研究表明,作物的产量与叶片的光合速率紧密相关,提高并保持生育后期较高的叶片净光合速率、叶绿素含量,对获得高产十分重要。张秋英等<sup>[10]</sup>和 JIM<sup>[11]</sup>发现,光合速率的变化趋势与土壤水分和氮素营养的供应多少密切相关,在轻度水分胁迫条件下会降低叶片的光合作用,直接影响生育后期光合产物向籽粒中的转移。但王帅等<sup>[12]</sup>研究发现,及时追施氮肥可增大玉米生育期叶片的净光合速率、蒸腾速率和叶绿素 (SPAD) 值,提高叶肉细胞同化  $\text{CO}_2$  的能力,充分发挥干物质生产潜力,增大生育后期干物质积累速率和籽粒灌浆速率,促进生育后期有机物积累,利于增加粒重<sup>[13-14]</sup>。增施氮肥、磷肥、钾肥可显著增强玉米生育期的光合作用,提高单位面积的干物质积累量和积累速率<sup>[15]</sup>。李玉英等<sup>[16]</sup>和王宜伦等<sup>[17]</sup>发现,生育中后期追施氮肥可显著增大玉米的净光合速率,开花期及时追施氮肥能够显著缩短最大干物质增长速率出现的时间,显著提高干物质最大增长速率和干物质积累量。郭丽等<sup>[18]</sup>研究发现,在水肥一体化滴管条件下,增施氮肥增产效果显著,但随着施氮量的增加,氮肥农学效率、氮肥生产效率和氮肥利用效率显著降低。马国胜等<sup>[19]</sup>和张吉旺等<sup>[20]</sup>研究表明,玉米的净光合速率和干物质积累速率随着种植密度的增加,呈现先增加后减少或持续增加的变化趋势,群体干物质积累量和产量随着密度的增加显著增加,但超过一定密度范围时,叶片衰老加速,进而造成玉米产量降低。肖继兵等<sup>[21]</sup>研究表明,适当提高种植密度是提升高粱产量的关键,是实现作物群体结构和植株个体功能协同增益和产量提高的重要途径。因此,合理的种植密度是作物充分利用光热资源构建良好群体结构,改善群体内部通风和光照条件,优化群体光合生理指标的基础,而恰当的土壤水分和氮肥施用量则是作物利用适宜种植密度充分发挥群体优势进行光合生产的营养物质保障<sup>[22]</sup>。在作物生产中,水、肥、密度三者之间需要高度协调配合,才有利于优化作物群体结构,提高生育期的光合作用,进一步促进干物质积累和产量增加<sup>[23-24]</sup>。

【本研究切入点】近年来,资源性缺水及传统水肥管理方式,使得单位耕地产出率降低、生态环境恶化等问题日益显现,开展密植条件下高效节水、节肥理论与技术研究已成为栽培领域的新型方向。随着现代滴灌技术广泛的应用,将滴灌、施氮集成应用在同一种植模式中<sup>[25]</sup>,使得玉米生长发育水氮需求与土壤水氮供给之间的时空吻合度得以大幅度提高,可促

进作物显著增产<sup>[26]</sup>。目前,在资源匮乏的条件下,关于不同水肥组合模式对密植玉米光合作用、干物质积累及产量形成特征的协同调控增产机理还鲜见报道。【拟解决的关键问题】本研究通过适度调控玉米种植密度,量化灌水量、施氮量及种植密度三者间的互作效应对密植玉米光合作用、干物质积累特征的响应机理,阐明密植玉米光合生理、干物质积累特征的互利增产机理,以期提升绿洲灌区密植玉米高产、高效水肥管理提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

本试验于 2016 年 4 月至 2017 年 10 月,在甘肃省武威市凉州区黄羊镇绿洲农业试验站进行。试验站位于河西走廊东端 ( $37^{\circ}95'N$ ,  $102^{\circ}63'E$ ), 平均海拔 1 506 m, 年平均气温约  $7.2^{\circ}\text{C}$ , 年平均降水量约 156 mm, 年平均蒸发量约 2 400 mm, 年降水分布不均,主要集中在 5—9 月份。试验区以厚层灌漠土为主,容重  $1.61\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 0—30 cm 土层全氮  $0.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全磷  $1.48\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有机质  $14.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。玉米为该区分区主栽作物,种植密度为  $7.5\times 10^4$  株/ $\text{hm}^2$ ,显著低于高产农田水平。2016—2017 年度试验区 3—9 月降水量及日平均温度变化如图 1 所示。

### 1.2 试验材料

选用密植性品种先玉 335 为供试材料。2016 年 4 月 20 日播种,9 月 22 日收获,2017 年 4 月 23 日播种,9 月 26 日收获。氮肥施用 (N 46.6%) 尿素,磷肥施用 ( $\text{P}_2\text{O}_5$  14%) 过磷酸钙,覆膜采用武威市泽瑞嘉农资有限责任公司生产的农用透明地膜 (宽 140 cm、厚 0.08 mm)。

### 1.3 试验设计

本研究采用裂区设计,以灌水水平做主区,施氮水平为裂区,种植密度为裂裂区。设置常规灌水 ( $W_1$ ,  $4\ 050\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ), 生育期灌水减量 20% ( $W_2$ ,  $3\ 720\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 2 种灌水水平; 设置 0 ( $N_0$ , 对照)、 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $N_1$ ) 和  $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  ( $N_2$ ) 3 种施氮水平; 设置低密度 ( $D_1$ ,  $75\ 000$  株/ $\text{hm}^2$ ), 中密度 ( $D_2$ ,  $97\ 500$  株/ $\text{hm}^2$ ), 高密度 ( $D_3$ ,  $120\ 000$  株/ $\text{hm}^2$ ) 3 种植植密度。试验共设置 18 个处理,每个处理 3 次重复,各小区随机排列,小区面积为  $40\text{ m}^2$  ( $5\text{ m}\times 8\text{ m}$ )。

玉米覆膜平作,等行距种植,行距 40 cm,通过株距来调控种植密度,  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $D_3$  株距分别为 33、26、21 cm。氮肥施用尿素 (N 46.6%), 按基肥: 大

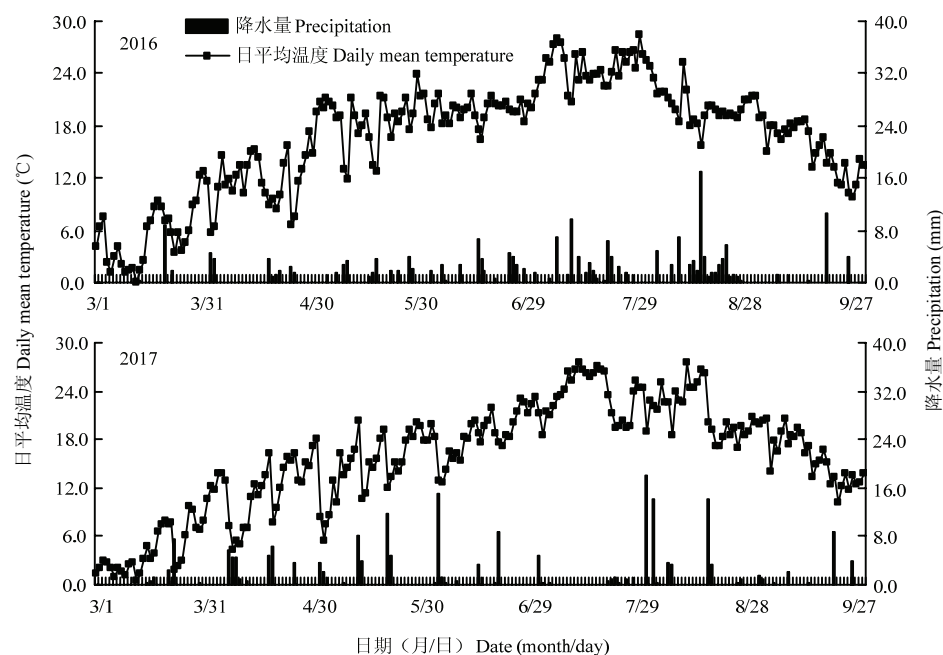


图1 2016—2017年试验区3—9月降水量及日平均温度变化

Fig. 1 Dynamics of precipitation and daily mean temperature in the experimental station from March to September in 2016-2017

喇叭口期追肥: 灌浆期追肥= 3 : 6 : 1 分施, 磷肥基施过磷酸钙 ( $P_2O_5$  14%)  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 小区间筑埂, 以防串水漏肥。  $W_1$ 、 $W_2$  冬储灌量均为  $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 其中常规灌水 ( $W_1$ ) 生育期灌水量总计  $4050 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 按拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期、开花期、灌浆期分别灌水 900、750、900、750、750  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 生育期灌水减量 20% ( $W_2$ ) 灌水量总计  $3720 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 按拔节期、大喇叭口期、抽雄吐丝期、开花期、灌浆期分别灌水 720、750、900、750、600  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。所有处理均为膜下滴灌, 采用精确度为  $0.001 \text{ m}^3$  的水表 (宁波市佳佳美水表有限公司生产) 控制灌水量。

#### 1.4 测定项目与方法

**1.4.1 净光合速率 ( $P_n$ )** 使用 Li-6400 型光合测定仪 (美国 Li-COR 公司生产), 玉米拔节以后, 在各小区中间位置随机选取 3 株玉米, 每隔 15 d, 选择晴朗天气, 于上午 9:00—11:30 进行测定, 结果取平均值<sup>[21]</sup>。

**1.4.2 干物质积累量** 玉米出苗以后, 在每小区中间部位每隔 15 d 随机选取玉米 5 株 (苗期选取 10 株), 分器官称鲜重后, 于  $105^\circ\text{C}$  下杀青 15—30 min,  $80^\circ\text{C}$  下烘干至恒重, 计算干物质积累量<sup>[25]</sup>。

植株总干物质积累量=成熟期单株总干重×成熟期实收株数

采用 Logistic 方程  $y = k/(1+e^{-t})$  拟合玉米生育期

干物质积累过程, 并对 Logistic 方程求一阶、二阶导数, 可得生育期干物质积累速率、各生育阶段干物质积累速率以及积累速率持续天数<sup>[25]</sup>。

#### 1.4.3 水分利用效率 (water use efficiency, WUE)

$WUE = Y/ET$ 。式中,  $Y$  为作物籽粒产量,  $ET$  为作物全生育期内总耗水量<sup>[23]</sup>。

#### 1.4.4 氮肥利用率 (nitrogen fertilizer use rate, NUR)

$NUR (\%) = (\text{施氮区地上部吸氮量} - \text{空白区地上部吸氮量}) / \text{施氮量} \times 100\%$ 。

**1.4.5 产量** 玉米完全成熟后, 收获每小区玉米计产量。另在小区中间部位连续取 20 株玉米, 风干后考种, 测定穗行数、行粒数、千粒重等产量性状。

#### 1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 17.0 软件进行数据整理、方差分析、相关分析、回归分析以及拟合回归方程。

## 2 结果

### 2.1 不同处理对玉米光合作用的影响

灌水量、施氮量和种植密度对玉米净光合速率影响显著 ( $P < 0.05$ ), 种植密度与施氮量对玉米净光合速率的互作效应影响显著 ( $P < 0.05$ ), 但灌水量与种植密度间的互作效应影响不显著 ( $P > 0.05$ )。

通过 2 年平均净光合速率结果比较（图 2），在相同灌水 and 施氮水平下，中密度处理的净光合速率优于低密度和高密度处理，W1N2D2 处理的全生育期净光合速率分别较 W1N2D1、W1N2D3 提高 13.46%和 22.06%，

W1N1D2 处理分别较 W1N1D1、W1N1D3 处理提高 14.47%和 15.33%；W2N2D2 处理分别较 W2N2D1、W2N2D3 处理提高 17.31%和 11.43%，W2N1D2 处理分别较 W2N1D1、W2N1D3 处理提高 18.59%和 9.91%。

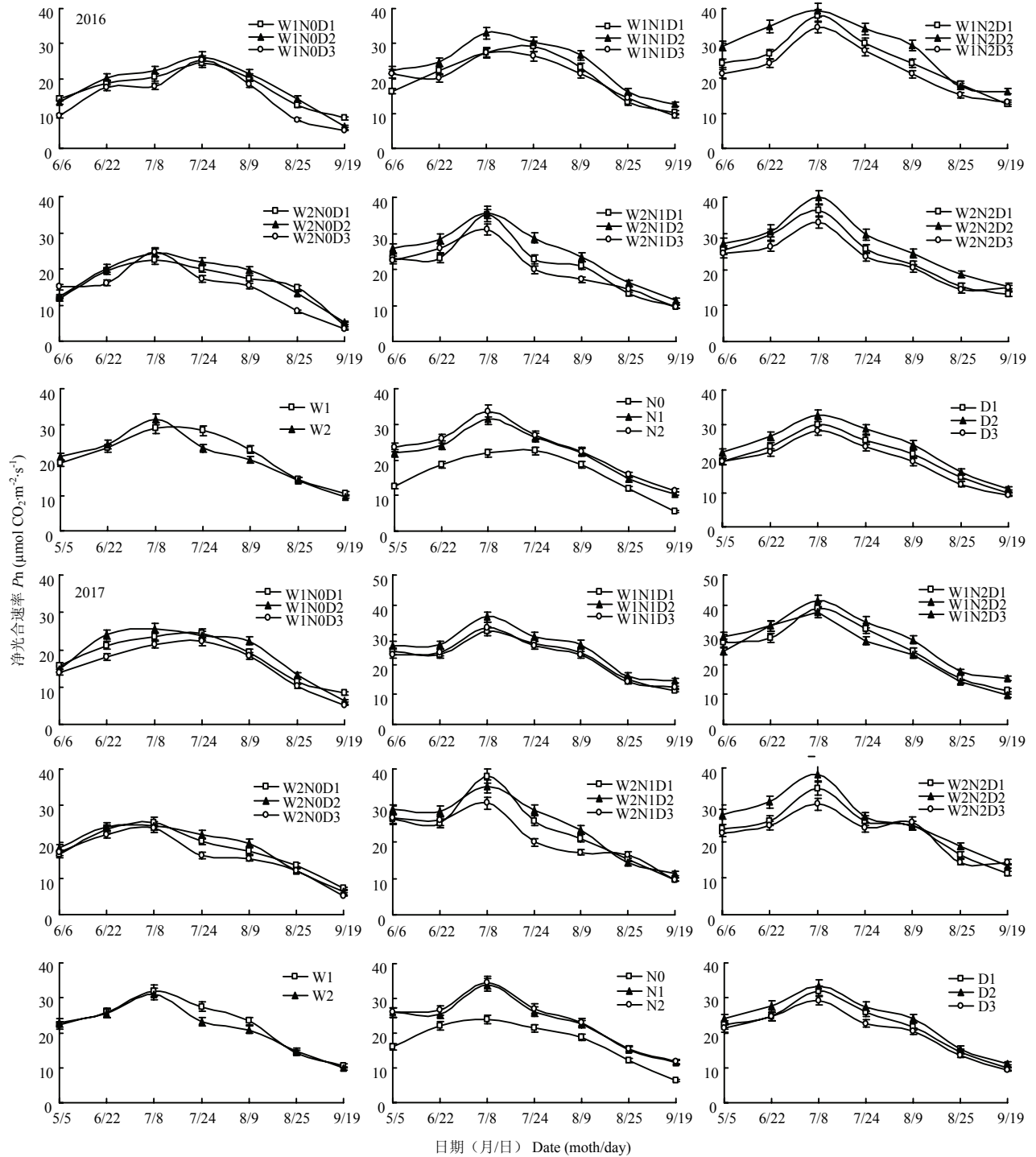


图 2 不同处理玉米净光合速率动态

Fig. 2 The net photosynthetic rate dynamic of maize under different treatments

在相同灌水和种植密度下, W1N2D3 处理全生育期净光合速率分别较 W1N1D3、W1N0D3 提高 10.75% 和 55.68%, W1N2D2 处理分别较 W1N1D2、W1N0D2 处理提高 17.21% 和 57.59%, W1N2D1 处理分别较 W1N1D1、W1N0D1 处理提高 18.24% 和 45.76%; W2N2D3 处理分别较 W2N1D3、W2N0D3 处理提高 8.52% 和 47.29%, W2N2D2 处理分别较 W2N1D2、W2N0D2 处理提高 7.34% 和 49.54%。说明在玉米生育期减量 20% 灌水条件下, 增大氮肥用量可显著提高密植玉米生育期叶片的净光合速率, 为有机物的积累和转运奠定基础。

## 2.2 不同处理对玉米群体干物质积累特征的影响

### 2.2.1 不同处理玉米群体干物质积累动态

施氮量和种植密度对玉米收获期干物质积累量影响显著 ( $P < 0.05$ ), 种植密度和灌水量间、种植密度和施氮量间、灌水量和施氮量间对玉米收获期干物质积累量互作效应显著 ( $P < 0.05$ ), 但灌水量、施氮量和种植密度三因素间互作效应不显著 ( $P > 0.05$ )。

收获期 2 年平均干物质积累量比较 (图 3), 在相同灌水和施氮水平下, 高密度处理干物质积累量优于中密度和低密度处理, 其中 W1N2D3 处理干物质积累量较 W1N2D2、W1N2D1 处理分别提高 5.78% 和 14.11%, W1N1D3 处理较 W1N1D2、W1N1D1 处理分别提高 9.34% 和 14.21%; W2N2D3 处理较 W2N2D2、W2N2D1 处理分别提高 4.27% 和 10.59%, W2N1D3 处理较 W2N1D2、W2N1D1 处理分别提高 12.57% 和 26.81%。

在相同灌水和种植密度下, 高施氮处理的干物质积累量优于低施氮和不施氮处理, W1N2D3 处理干物质积累量较 W1N1D3、W1N0D3 处理分别提高 2.06% 和 21.33%, W1N2D2 处理较 W1N1D2、W1N0D2 处理分别提高 4.84% 和 31.55%, W2N2D3 处理较 W2N0D3 处理提高 31.23%, W2N2D2 处理较 W2N1D2、W2N0D2 处理分别提高 11.63% 和 44.53%。各处理中, 以减量灌水、高氮和中密度处理的玉米干物质积累量最高, 说明减量灌水模式下, 增大氮肥用量有助于提高密植玉米生育期的干物质积累量, 为收获期玉米增产奠定基础。

### 2.2.2 不同处理玉米群体干物质积累速率变化

2 年平均干物质积累速率 (图 4) 表明, 不同灌水处理的干物质积累速率在拔节期至开花期差异不显著, 在开花期至成熟期, 平均干物质积累速率随着施氮量的增加而显著增加, 高密度和中密度处理的干物质积累

速率与低密度相比较差异显著。

根据玉米干物质积累规律, 可将干物质积累过程分为渐增期、快增期和缓增期 3 个时期。如表 1 所示, 不同灌水处理比较, 干物质积累速率在渐增期和快增期持续时间均无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 不同施氮水平间比较, 高施氮和中施氮处理的快增期和缓增期平均干物质积累速率差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同种植密度间比较, 高密度和中密度处理的快增期和缓增期干物质积累速率差异显著 ( $P < 0.05$ )。

快增期, 在相同灌水和施氮水平下, W1N2D3、W1N2D2 处理的 2 年干物质积累速率分别较 W1N2D1 处理提高 14.95% 和 5.25%, W2N2D3、W2N2D2 处理分别较 W2N2D1 处理提高 21.06% 和 7.52%。在相同灌水和种植密度下, W2N2D3 处理较 W2N1D3、W2N0D3 处理分别提高 19.07% 和 54.35%。缓增期, 在相同灌水和施氮水平下, W1N2D3 处理的干物质积累速率较 W1N2D1 处理提高 10.69%, 但 W1N2D3 处理与 W1N2D2 差异不显著, W2N2D3、W2N2D2 处理分别较 W2N2D1 处理提高 30.83% 和 20.53%。在相同灌水和种植密度下, W2N2D3 处理较 W2N0D3 处理提高 20.77%。纵观整个玉米干物质积累时期, 减量 20% 灌水与高施氮耦合能够显著增大密植玉米快增期和缓增期的干物质积累速率, 可提高并保持生育后期较高的干物质积累速率, 为产量的形成奠定基础。

### 2.2.3 Logistic 方程拟合不同处理玉米干物质最大增长速率及其出现的天数

不同处理干物质积累速率 Logistic 方程及干物质最大增长速率出现的天数计算参考魏廷邦等<sup>[25]</sup>方法。如表 2 所示, 灌水量、施氮量和种植密度对玉米干物质最大增长速率出现的天数影响显著 ( $P < 0.05$ ), 灌水量与施氮量、施氮量与种植密度间对玉米干物质最大增长速率的互作效应显著 ( $P < 0.05$ ), 但灌水量、施氮量和种植密度三因素间的互作效应不显著 ( $P > 0.05$ )。

从 2 年平均结果看, 在相同灌水和施氮水平下, W1N2D3、W1N2D2 处理的干物质最大增长速率分别较 W1N2D1 提高 20.42% 和 5.25%, W1N2D3 处理的干物质最大增长速率出现天数较 W1N2D1 提前 3.3 d, W2N2D3、W2N2D2 处理的干物质最大增长速率分别较 W2N2D1 提高 21.07% 和 7.52%, W2N2D3、W2N2D2 处理的干物质最大增长速率出现天数分别较 W2N2D1 提前 6.7 d 和 4.1 d。在相同灌水和种植密度下, W2N2D3 处理干物质最大增长速率分别较 W2N1D3、



W2N0D3 提高 19.07%和 54.35%, W2N2D3 处理的干物质最大增长速率出现天数分别较 W2N1D3、W2N0D3 提前 3.9 d 和 6.8 d。说明减量 20%灌水与高

施氮耦合能够显著增大中密度处理的干物质积累速率, 维持生育后期干物质积累高峰期, 增大干物质积累量。

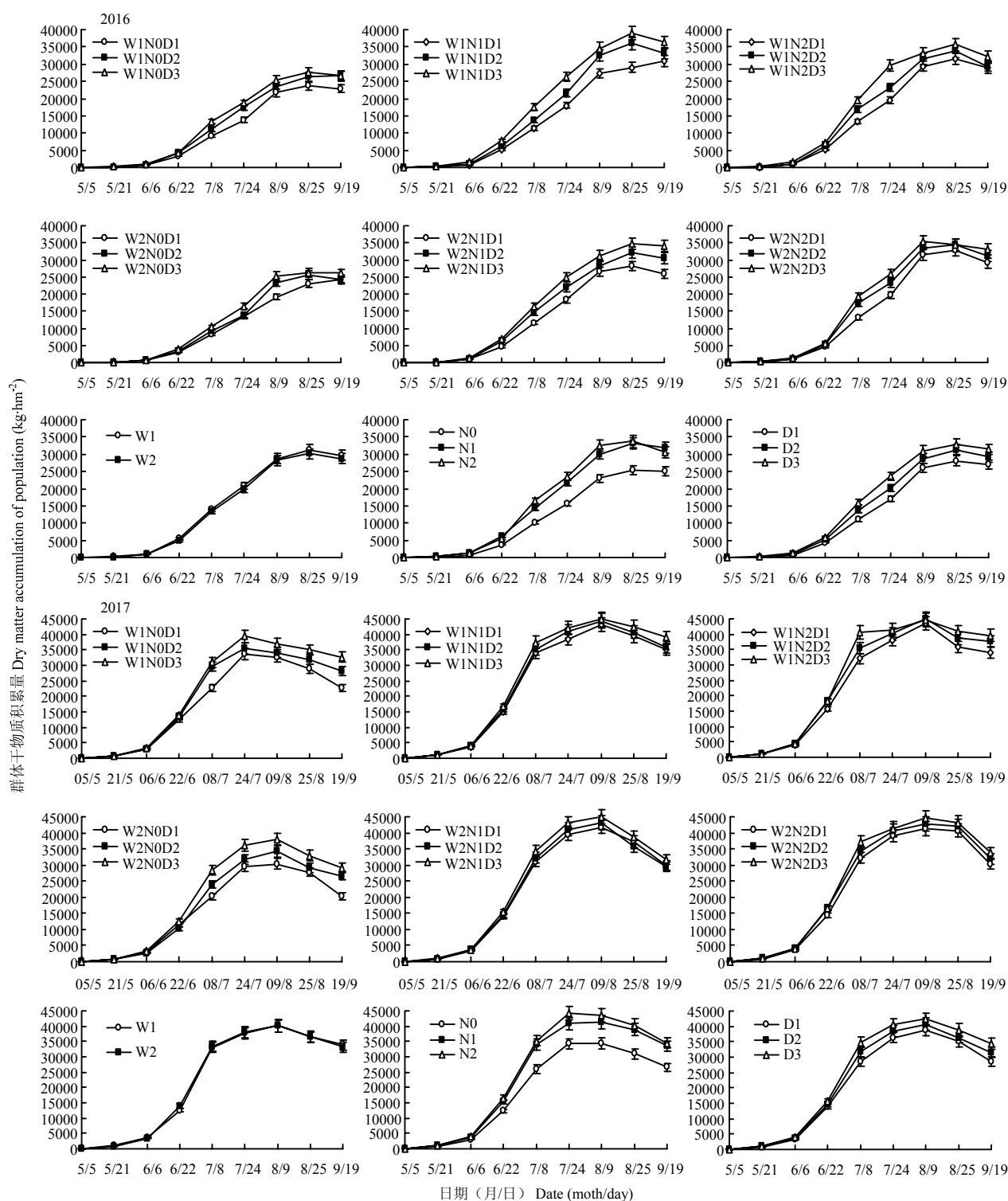


图 3 不同处理玉米干物质积累量动态

Fig. 3 The dry matter accumulation dynamic of maize under different treatments

表 1 不同处理玉米干物质积累阶段特征

Table 1 Dry matter accumulation stage characteristics of maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	渐增期 Early stage		快增期 Fast stage		缓增期 Late stage	
		持续时间	平均积累速率	持续时间	平均积累速率	持续时间	平均积累速率
2016	W1N0D1	66.50b	76.13c	32.12b	430.64q	46.37o	85.34o
	W1N0D2	64.77c	88.41bc	33.76b	463.38p	46.45n	116.33c
	W1N0D3	62.79d	92.21b	30.62b	516.46l	51.58f	95.32j
	W1N1D1	65.81bc	100.75ab	35.12b	515.82m	44.06q	100.53g
	W1N1D2	65.45bc	104.36a	32.12b	636.67f	47.43m	108.41e
	W1N1D3	61.26de	111.59a	32.52b	677.32d	51.22g	121.62b
	W1N2D1	64.07cd	102.04ab	30.98b	576.42i	49.94k	70.29r
	W1N2D2	61.33de	109.84a	28.32b	649.74e	55.35c	86.39m
	W1N2D3	60.35e	112.02a	24.16b	742.14b	60.48a	88.13l
	W2N0D1	68.69a	76.62c	37.63b	382.14r	38.68r	70.88q
	W2N0D2	68.79a	78.78c	30.98b	477.79o	45.22p	86.16n
	W2N0D3	66.24bc	86.11bc	30.98b	502.83n	47.77l	100.07h
	W2N1D1	64.33cd	91.13b	29.93b	535.09k	50.74i	81.52p
	W2N1D2	62.26de	107.24a	32.52b	560.97j	50.22j	110.54d
	W2N1D3	61.19d	110.04a	32.12b	624.83h	51.68e	130.56a
	W2N2D1	65.97bc	102.18ab	28.94b	636.24g	50.08h	88.83k
	W2N2D2	62.71d	112.37a	28.32b	679.77c	53.96d	99.16i
	W2N2D3	61.44de	118.15ab	25.82a	768.09a	57.74b	105.34f
2017	W1N0D1	66.85a	97.26n	30.27b	586.77m	27.87o	29.41h
	W1N0D2	82.73a	87.73o	37.09ab	534.56p	25.17q	42.23c
	W1N0D3	73.48a	114.04h	41.15a	556.33n	30.36k	45.06b
	W1N1D1	76.95a	107.41i	33.46ab	674.74i	34.58i	34.72f
	W1N1D2	81.21a	106.13k	35.12ab	670.54j	28.66n	58.69a
	W1N1D3	78.71a	115.14g	35.59ab	695.58h	30.71j	40.03d
	W1N2D1	73.42a	121.35e	34.52ab	705.13e	37.05g	21.12l
	W1N2D2	77.34a	133.04c	40.21a	699.08g	27.44p	5.75o
	W1N2D3	75.55a	139.23a	39.31ab	731.05d	40.13d	13.03n
	W2N0D1	74.97a	75.99q	35.59ab	437.31r	34.43i	27.87i
	W2N0D2	76.51a	85.37p	33.64ab	530.42q	34.86h	33.83g
	W2N0D3	71.01a	102.82l	36.58ab	545.18o	37.42f	23.93k
	W2N1D1	80.54a	97.67m	35.21b	610.42l	29.24l	19.41m
	W2N1D2	79.74a	106.59j	36.08ab	643.61k	29.18m	28.27i
	W2N1D3	71.57a	123.82d	33.01ab	733.65c	40.42c	41.92c
	W2N2D1	71.51a	120.96f	33.77ab	699.91f	39.72e	25.64j
	W2N2D2	67.97a	139.22a	34.16ab	756.88b	42.86b	38.81e
	W2N2D3	71.68b	134.41b	30.98b	849.51a	45.33a	44.42b

同一列数字后的不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。下同

Values followed by different letters within a column are significantly different at  $P<0.05$ . The same as below



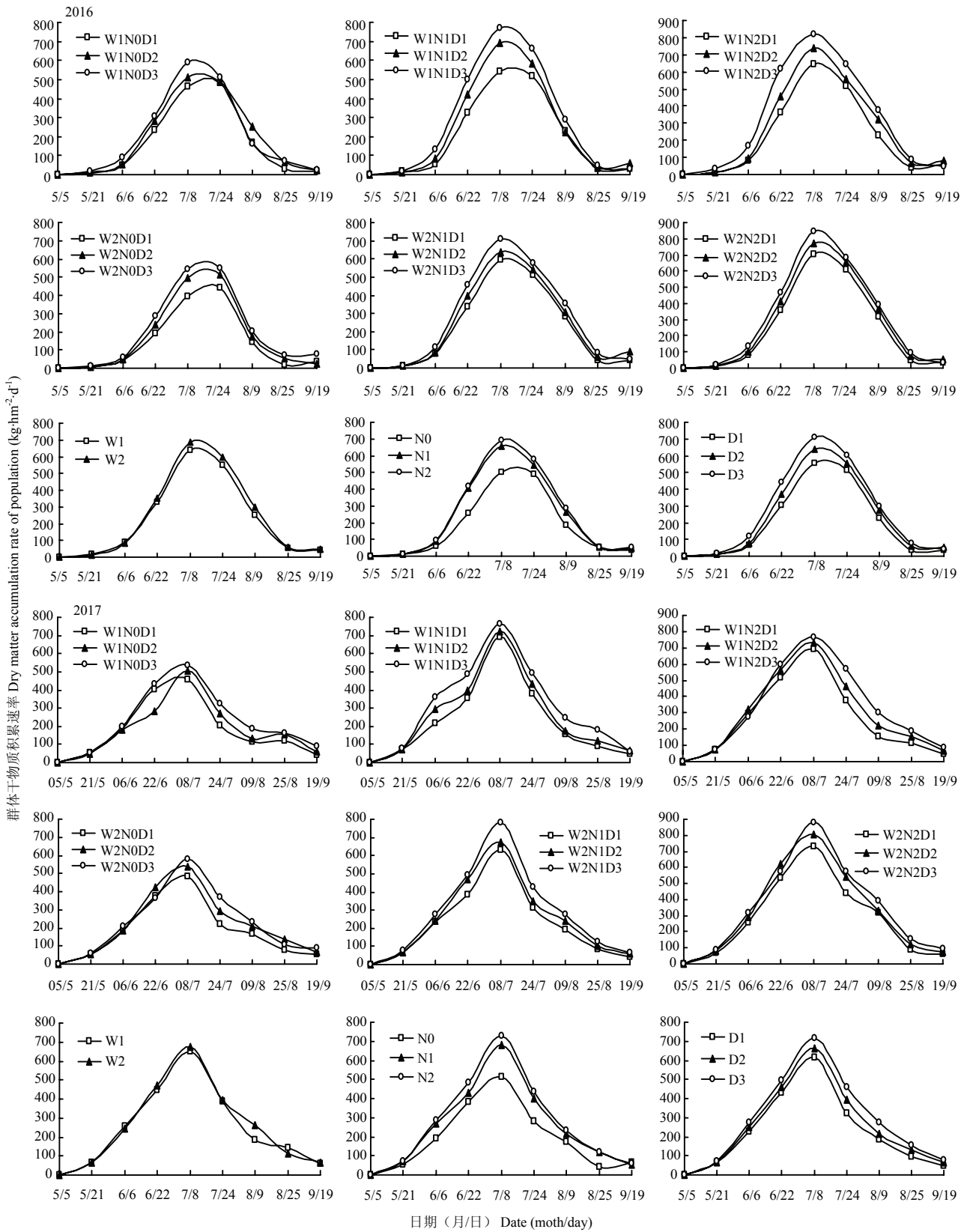


图 4 不同处理玉米干物质积累速率动态

Fig. 4 The dry matter accumulation rate dynamics of maize under different treatments

表 2 不同处理玉米干物质积累速率的 Logistic 方程回归分析

Table 2 Logistic equation analysis on dry matter accumulation of maize under different nitrogen treatments

年份 Year	处理 Treatment	回归方程 Regression equation	$R^2$	最大增长速率 出现天数 The days of MIR (d)	最大增长速率 Maximum increase rate (kg·d <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup> )
2016	W1N0D1	$Y = 23959.28 / (1 + e^{6.77 - 0.082 t})$	0.993	82.56c	491.16b
	W1N0D2	$Y = 27102.43 / (1 + e^{6.370 - 0.078 t})$	0.998	81.66c	528.49b
	W1N0D3	$Y = 27397.08 / (1 + e^{6.717 - 0.086 t})$	0.994	78.10gh	589.03ab
	W1N1D1	$Y = 31376.54 / (1 + e^{6.253 - 0.075 t})$	0.996	83.37c	588.31ab
	W1N1D2	$Y = 35421.91 / (1 + e^{6.684 - 0.082 t})$	0.991	81.51d	726.14ab
	W1N1D3	$Y = 38148.18 / (1 + e^{6.279 - 0.081 t})$	0.995	77.51h	772.50ab
	W1N2D1	$Y = 30937.64 / (1 + e^{6.763 - 0.085 t})$	0.989	79.56f	657.42ab
	W1N2D2	$Y = 31873.15 / (1 + e^{7.020 - 0.093 t})$	0.987	75.48i	741.05a
	W1N2D3	$Y = 33991.32 / (1 + e^{7.895 - 0.109 t})$	0.996	78.43g	926.26ab
	W2N0D1	$Y = 24905.35 / (1 + e^{6.125 - 0.07 t})$	0.998	87.50a	435.84b
	W2N0D2	$Y = 25644.27 / (1 + e^{7.164 - 0.085 t})$	0.989	84.28b	544.94ab
	W2N0D3	$Y = 26987.54 / (1 + e^{6.947 - 0.085 t})$	0.994	81.72d	573.48ab
	W2N1D1	$Y = 27740.45 / (1 + e^{6.978 - 0.088 t})$	0.992	79.29f	610.29ab
	W2N1D2	$Y = 31595.12 / (1 + e^{6.360 - 0.081 t})$	0.996	78.52g	639.80ab
	W2N1D3	$Y = 34762.66 / (1 + e^{6.335 - 0.082 t})$	0.998	77.25h	712.63ab
	W2N2D1	$Y = 31896.55 / (1 + e^{7.320 - 0.091 t})$	0.983	80.44e	725.64ab
	W2N2D2	$Y = 33346.21 / (1 + e^{7.149 - 0.093 t})$	0.987	76.87h	775.29a
	W2N2D3	$Y = 34354.051 / (1 + e^{7.584 - 0.102 t})$	0.991	74.35j	876.02ab
2017	W1N0D1	$Y = 30769.12 / (1 + e^{7.133 - 0.087 t})$	0.906	81.98r	669.22m
	W1N0D2	$Y = 34348.66 / (1 + e^{7.191 - 0.071 t})$	0.949	101.28a	609.68p
	W1N0D3	$Y = 39656.88 / (1 + e^{6.020 - 0.064 t})$	0.967	94.06h	634.51n
	W1N1D1	$Y = 39113.70 / (1 + e^{7.373 - 0.079 t})$	0.970	93.68i	769.56i
	W1N1D2	$Y = 40787.85 / (1 + e^{7.408 - 0.075 t})$	0.968	98.77b	764.77j
	W1N1D3	$Y = 42882.84 / (1 + e^{7.141 - 0.074 t})$	0.976	96.50f	793.33h
	W1N2D1	$Y = 42160.80 / (1 + e^{6.919 - 0.076 t})$	0.959	90.68l	804.22e
	W1N2D2	$Y = 45691.69 / (1 + e^{6.383 - 0.066 t})$	0.948	97.45e	797.32g
	W1N2D3	$Y = 47778.52 / (1 + e^{6.379 - 0.067 t})$	0.954	95.21g	833.79d
	W2N0D1	$Y = 26960.35 / (1 + e^{6.865 - 0.074 t})$	0.940	92.77k	498.76r
	W2N0D2	$Y = 30904.47 / (1 + e^{7.307 - 0.078 t})$	0.971	93.32j	604.95q
	W2N0D3	$Y = 34544.28 / (1 + e^{6.429 - 0.072 t})$	0.969	89.29m	621.79o
	W2N1D1	$Y = 37229.95 / (1 + e^{7.342 - 0.075 t})$	0.964	98.15c	696.20l
	W2N1D2	$Y = 40222.45 / (1 + e^{7.138 - 0.073 t})$	0.943	97.78d	734.06k
	W2N1D3	$Y = 41942.52 / (1 + e^{7.029 - 0.080 t})$	0.948	88.08o	836.75c
	W2N2D1	$Y = 40936.35 / (1 + e^{6.895 - 0.078 t})$	0.973	88.39n	798.25f
	W2N2D2	$Y = 44785.55 / (1 + e^{6.558 - 0.077 t})$	0.950	85.05p	863.24b
	W2N2D3	$Y = 45594.61 / (1 + e^{7.410 - 0.085 t})$	0.941	83.17q	968.88a
显著性 ( $P$ 值) Significance ( $P$ value)					
灌水水平 W	—	—	*	NS	
施氮水平 N	—	—	*	*	
种植密度 D	—	—	*	*	
灌水水平×施氮水平 W×N	—	—	*	*	
灌水水平×种植密度 W×D	—	—	*	*	
施氮水平×种植密度 N×D	—	—	*	NS	
灌水水平×施氮水平×种植密度 W×N×D	—	—	*	NS	

NS 和\*分别表示无显著差异及在 0.05 水平上差异显著 NS, \* indicate non-significant or significant at  $P < 0.05$

## 2.3 水氮耦合条件下不同种植密度玉米的产量、水分利用效率及氮肥利用率的综合表现

如表 3 所示, 施氮量和种植密度对玉米产量、水分利用效率和氮肥利用率影响显著 ( $P<0.05$ ), 但灌水水平对产量影响不显著 ( $P>0.05$ )。灌水水平与施氮水平、施氮水平与种植密度对产量、水分利用效率和氮肥利用率互作效应显著 ( $P<0.05$ ), 灌水水平、施氮水平和种植密度对产量、水分利用效率和氮肥利用率互作效应显著 ( $P<0.05$ )。

2 年平均产量表明, 在相同灌水和施氮水平下, 玉米产量随着种植密度的增加表现出先增加后下降的变化趋势。在各处理中, 中密度处理的产量显著优于其他处理, W1N2D2 处理较 W1N2D1 处理提高 4.52%, 但与 W1N2D3 处理差异不显著; W2N2D2 处理较 W2N2D1、W2N2D3 处理分别提高 24.2%和 29.2%, W2N1D2 处理较 W2N1D1、W2N1D3 分别提高 19.6%和 3.2%。W2N2D2 处理的水分利用效率较 W2N2D1、W2N2D3 处理分别提高 11.4%、18.4%, W2N2D2 处理的氮肥利用率较 W2N2D1、W2N2D3 处理分别提高 29.9%、13.8%。

在常规灌水和相同密度下, 高施氮处理的产量优于低施氮和不施氮处理, W1N2D3 处理较 W1N1D3、W1N0D3 处理分别提高 2.34%和 45.1%, W1N2D2 处理较 W1N1D2、W1N0D2 分别提高 6.88%和 45.45%; 在减量 20%灌水和相同密度下, W2N2D2 处理产量显著高于其他处理, 分别较 W2N1D2、W2N0D2 提高 14.63%和 69.03%, W2N2D1 处理较 W2N1D1、W2N0D1 处理分别提高 10.39%和 40.27%。W2N2D2 处理的水分利用效率较分别较 W2N1D2、W2N0D2 处理提高 4.3%、43.9%, W2N2D2 处理的氮肥利用率较 W2N1D2 处理提高 24.5%。由此说明, 合理的氮肥用量与生育期减量灌水耦合有助于玉米根系对水、肥等营养物质的吸收和利用, 促进中密度下玉米的生长和发育, 显著提高密植玉米的水分利用效率和氮肥利用率, 最终实现增产。

## 2.4 水氮耦合条件下不同密度玉米主要指标间的相关性分析

在玉米密植条件下, 水肥耦合通过直接调控玉米生育期内的光合速率和干物质积累速率, 从而优化玉米的干物质积累量、水分利用效率, 最终通过各指标的综合效应来影响产量。光合速率、干物质积累量、干物质积累最大增长速率和水分利用效率 (WUE) 与籽粒产量之间的相关关系如表 4 所示。

籽粒产量与光合速率 (0.855\*\*)、干物质积累最大增长速率 (0.669\*\*) 和水分利用效率 (0.898\*\*) 呈极显著正相关, 与干物质积累量 (0.178\*) 呈显著正相关。说明水氮耦合通过调控密植玉米生育期的光合作用和干物质积累最大增长速率, 直接影响密植玉米的干物质积累量和水分利用效率, 促进光合产物的积累, 为生育后期光合产物向籽粒中转移及粒重的增加奠定基础。

光合速率与干物质积累最大增长速率 (0.647\*\*)、水分利用效率 (0.919\*\*) 均呈现极显著正相关, 说明水氮耦合通过影响密植玉米生育期的光合作用, 直接调控玉米生育期的干物质积累速率, 从而提高密植玉米的水分利用效率和产量。

## 3 讨论

### 3.1 水氮耦合及种植密度与玉米光合特性、干物质积累特征的关系

研究表明, 光合作用是农作物生物产量形成的物质基础, 其功能效率的高低直接影响籽粒产量的高低<sup>[27]</sup>。在作物的各生育时期, 通过膜下滴灌、水肥一体化、交替灌溉、增施氮肥以及增加种植密度等一系列农艺措施优化作物的光合特性和干物质积累过程是获得高产的重要方式之一<sup>[28-29]</sup>。灌水量、施氮量和种植密度对作物光合产物的影响是多方面的。曹倩等<sup>[30]</sup>、张银锁等<sup>[31]</sup>研究发现, 水分胁迫下作物的光合速率及干物质积累量显著降低, 但及时增加灌溉量能够显著提高夏玉米的光合速率、产量及 WUE。魏廷邦等<sup>[25]</sup>研究发现, 在灌水量和施氮总量不变的情况下, 玉米拔节期氮肥后移 20%(拔节肥 10%+花粒肥 30%) 可延长拔节期至灌浆期玉米干物质积累持续期, 利于提高产量和收获指数。马国胜等<sup>[19]</sup>研究发现, 种植密度能够显著影响玉米生育期内叶片的光合速率和干物质积累速率, 在低密度条件下, 干物质积累速率随种植密度的增加而显著增大, 但当种植密度增大到一定峰值后, 干物质积累增长速度呈下降趋势。本研究结果表明, 通过玉米关键生育时期减量 20%灌水与高施氮耦合能够显著增大密植玉米光合作用、干物质最大增长速率和干物质积累量。在生育期减量 20%灌水和高施氮条件下, 中密度处理的全生育期净光合速率较低密度和高密度处理分别提高 17.31%和 11.43%, 高密度和中密度处理的干物质最大增长速率较低密度处理分别提高 21.07%和 7.52%, 高密度处理的干物质积累量较中密度、低密度处理分别

表 3 不同处理玉米的产量、水分利用效率及氮肥利用率

Table 3 The grain yield and WUE and nitrogen utilization efficiency of maize under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	产量 Grain yield	水分利用效率 WUE	氮肥利用率 Nitrogen utilization efficiency
2016	W1N0D1	8015.63c	12.18d	—
	W1N0D2	8599.57c	12.70d	—
	W1N0D3	8406.93c	12.38d	—
	W1N1D1	12211.91b	17.83b	13.10d
	W1N1D2	10725.40b	19.81a	15.33c
	W1N1D3	11008.27b	15.81bc	19.30a
	W1N2D1	12037.13b	17.19bc	17.52f
	W1N2D2	11273.53b	18.68ab	20.64e
	W1N2D3	11403.40c	16.99bc	24.36bc
	W2N0D1	8093.53c	12.66d	—
	W2N0D2	8247.37c	12.69d	—
	W2N0D3	7948.39b	12.19d	—
	W2N1D1	10471.90b	15.55c	12.62c
	W2N1D2	12170.47b	17.80b	13.92bc
	W2N1D3	11161.16b	16.10bc	17.84b
	W2N2D1	11238.43b	16.40bc	20.85f
	W2N2D2	13871.22a	18.99ab	22.28ef
	W2N2D3	11078.11b	15.69c	23.18d
2017	W1N0D1	7159.1c	11.42ef	—
	W1N0D2	7605.8c	10.74f	—
	W1N0D3	7674.9c	12.46ef	—
	W1N1D1	9971.6cb	20.40b	19.29c
	W1N1D2	11329.5ab	20.65a	27.55a
	W1N1D3	11792.6ab	16.02d	23.47b
	W1N2D1	10514.2b	17.26d	18.86c
	W1N2D2	12297.8ab	19.63c	24.18a
	W1N2D3	11930.0ab	16.10d	21.59bc
	W2N0D1	7729.6c	12.14ef	—
	W2N0D2	8063.5c	13.21e	—
	W2N0D3	7708.6c	12.07ef	—
	W2N1D1	9633.7cb	15.31d	16.62c
	W2N1D2	11880.5ab	17.95cd	27.33a
	W2N1D3	12154.3ab	16.09d	20.83bc
	W2N2D1	10956.1b	17.08d	17.42c
	W2N2D2	13699.3a	18.29cd	27.42a
	W2N2D3	10271.2cb	15.80d	20.48bc
显著性 ( <i>P</i> 值) Significance ( <i>P</i> value)				
灌水水平 W		NS	*	*
施氮水平 N		*	*	*
种植密度 D		*	*	*
灌水水平×施氮水平 W×N		*	*	*
灌水水平×种植密度 W×D		*	NS	*
施氮水平×种植密度 N×D		*	*	*
灌水水平×施氮水平×种植密度 W×N×D		*	*	*

表 4 水氮耦合条件下不同密度玉米主要指标间的相关分析  
Table 4 The correlation analysis of maize with different density under coupling of irrigation and nitrogen application

指标 Item	光合速率 Pn	干物质积累量 Dry matter accumulation	干物质积累最大增长速率 Maximum increase rate	水分利用效率 WUE	籽粒产量 Grain yield
光合速率 Pn	1	-0.5	0.647**	0.919**	0.855**
干物质积累量 Dry matter accumulation		1	-0.2208	-0.259	0.178*
干物质积累最大增长速率 Maximum increase rate			1	0.641**	0.669**
水分利用效率 WUE				1	0.898**
籽粒产量 Grain yield					1

\*\*表示在 0.01 水平上差异显著 \*\* indicates significant at  $P<0.01$

提高 4.27%和 10.59%，且光合速率（0.855\*\*）与籽粒产量呈显著正相关关系。在正常生长条件下，生育期限量供水对玉米光合特性和干物质积累特征的影响大于施用氮肥的作用，但通过种植密度的改变能够调控玉米各生育时期的光合作用和干物质积累特征，恰当比例的水肥互作能够显著促进密植玉米生育期地上部分的生长，利于光合产物的积累，为生育后期增加粒重奠定基础。

本研究还发现，在减量 20%灌水条件下，中密度高施氮处理的玉米全生育期净光合速率较中施氮、不施氮处理分别提高 7.34%和 49.54%，高密度高施氮处理的干物质最大增长速率及其出现天数分别较中施氮、不施氮处理提高 19.07%、54.35%和提前 3.9 d 和 6.8 d，中密度高施氮处理的干物质积累量较中施氮、不施氮处理分别提高 11.63%和 44.53%。说明生育期减量 20%灌水与高施氮水平的组合为最优水肥耦合模式，生育期适量减少灌水量的条件下，增施氮肥可显著提高密植玉米生育后期叶片的光合能力，保持生育后期较高的干物质积累速率，增大干物质积累量和玉米产量，对提高密植作物的抗旱性及产量具有积极意义。水氮配施可显著提高密植玉米的光合生理活性，其主要原因是水分对生育期叶片的生理活性具有重要影响，适量增加灌水使得玉米生育前期穗位叶的光合速率、蒸腾速率显著增大，可有效延缓穗位叶叶绿素值降低的幅度，水分供应不足时，及时追施氮肥可显著增大叶片的 SPAD 值和气孔导度，增强生育期的净光合速率，显著促进光合产物积累和转移<sup>[32-33]</sup>。另有学者研究认为，适量增施氮肥可显著改善定量灌水条件下叶片中叶肉细胞的生理活性，有利于增加叶片中 RuBP 羧化酶活性，提高水分亏缺条件下叶片抗氧化酶和保护酶系的活性与含量<sup>[34]</sup>，减缓叶片中 SPAD 值的降低幅度，延长生育后期叶片光合生理功

能的持续期<sup>[35]</sup>，协调根系与水、肥间的关系，提高其对于旱环境的适应能力，增大生育期干物质积累速率，使得籽粒“库”对有机物质的竞争能力增强，提高成熟期干物质积累量和粒重<sup>[36-37]</sup>。

3.2 水氮耦合及种植密度对玉米产量、水分利用效率及氮肥利用率的影响

作物的产量除了主要受到遗传因子的影响外，还受到生态环境、栽培措施、气候条件和种植密度等方面的影响。长期以来，相关领域的研究大多侧重对密度、灌水量或施肥量单个因子对玉米产量的影响，而对关于水氮耦合效应对玉米生长特性及产量性能的调控作用研究较少。在众多农艺措施中，灌水、施肥和种植密度对农作物产量和品质的影响最为突出，在恰当的水肥耦合模式下，通过增加种植密度是提高农作物光合生理特性、干物质积累特征、产量及水肥利用效率的关键措施之一<sup>[38]</sup>。研究表明，在常规灌水和定量施肥条件下，增大玉米种植密度可显著增加单位面积的有效穗数，但随着密度的增加，穗粒数和千粒重呈先增加后减小的趋势<sup>[39-40]</sup>，当种植密度为 8.25 万株/hm<sup>2</sup> 时获得最高产量<sup>[41]</sup>。不同的水氮配施比例对玉米籽粒产量的调控存在互补效应，玉米关键生育时期供水量的不足一定程度上会导致产量和 WUE 的降低，及时追施氮肥可补偿因水分亏缺导致的产量降低。在一定施氮范围内，施氮量与产量呈显著正相关，合理施氮可促进玉米生育后期营养器官中有机物的合成及防止叶片早衰，保证碳氮代谢的顺利进行，提高作物的 WUE 和氮肥利用率，有利于作物增产<sup>[42-43]</sup>。有学者研究发现，氮肥施用过量时会导致有机物水解，叶片光合能力降低，植株倒伏严重，产量及氮肥利用率显著降低；当氮肥施用量较少时，仅补充灌水，增产潜力无法充分发挥；当灌水量严重不足时，增施氮肥小麦收获期产量和 WUE 急剧下降；当

水分轻度亏缺时, 及时施肥有利于增大群体叶面积指数, 提高水分利用效率和氮肥利用率; 当水氮合理配施时, 小麦干物质积累量显著增加, 增产效果显著<sup>[44-45]</sup>。另有研究表明, 施肥时期对玉米生育期植株干物质生产影响较大, 在定量灌水条件下, 追施拔节肥可促进生育前期干物质积累, 追施穗肥可提高玉米生育后期干物质积累速率和籽粒灌浆速率, 利于光合产物向籽粒中转移, 提高粒重<sup>[46]</sup>。

本研究发现, 在生育期减量 20%灌水和高施氮条件下, 中密度处理的 2 年平均产量较低密度、高密度处理分别提高 24.2%和 29.2%, 中密度处理的水分利用效率较低密度、高密度分别提高 11.4%、18.4%, 中密度处理的氮肥利用率较低密度、高密度分别提高 29.9%、13.8%; 在中密度条件下, 高施氮处理的产量较低施氮、不施氮处理分别提高 14.63%和 69.03%, 高施氮处理的水分利用效率分别较低施氮、不施氮分别提高 4.3%、43.9%, 高施氮处理的氮肥利用率较低施氮提高 24.5%。结果说明, 水氮协调供应可同步提高密植玉米水氮需求与供给之间的时空吻合度, 在中密度水平下, 采用生育期减量 20%灌水与高施氮的最优耦合模式能够显著提高玉米的 WUE 和氮肥利用率, 获得高产。但种植密度较大时, 水氮耦合对密植玉米产量的作用机理不显著, 其主要原因是种植密度过大, 导致个体植株对光、水、肥的竞争加剧, 严重影响群体冠层的透光率和群体结构, 使得玉米生育后期穗位叶净光合速率、叶绿素含量大幅度下降, 同时过量的水肥供给, 使得玉米营养生长过快, 导致茎秆细长而软弱, 生育后期遇到风雨天气容易发生根倒、茎倒、茎折断等倒伏情况, 易造成严重减产。因此, 在生育期减量 20%灌水条件下, 通过高施氮与中密度处理的最优组合模式, 能够改善玉米群体植株内的生理和生态特性, 同步协调提高玉米密植条件下的光合速率和干物质积累速率, 改善密植玉米生长对土壤有效水分和养分的需求, 解决传统灌溉模式下玉米生长后期遇到雨水易倒伏的难题, 为提高玉米稳产性奠定基础。

## 4 结论

生育期减量 20%灌水与高施氮耦合可显著增大密植玉米生育期的净光合速率, 提高干物质最大增长速率, 提前干物质最大增长速率出现的天数, 提高水分利用效率和氮肥利用率, 优化干物质积累特征, 最终实现玉米高产。因此, 在河西绿洲灌区, 采用生育期

减量 20%灌水 ( $3\ 720\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ )、施氮量  $450\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、中密度  $97\ 500\ \text{株}/\text{hm}^2$  组合的最优栽培模式, 可为发掘该区密植条件下玉米高产、高效栽培提供技术指导。

## References

- [1] GODFRAY H C J, BEDDINGTON J R, CRUTE I R, HADDAD L, LAWRENCE D, MUIR J F, PRETTY J, ROBINSON S, THOMAS S M, TOULMIN C. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science*, 2010, 327(5967): 812-818.
- [2] SHUKRI F, SALI A, IMER R N, FETAH E, KEMAJL B L, AVNI B L, QENDRIM S B. Variation of physiological growth indices, biomass and dry matter yield in some maize hybrids. *Albanian Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 2(25): 69-73.
- [3] 孙文涛, 孙占祥, 王聪翔, 宫亮, 张玉龙. 滴灌施肥条件下玉米水肥耦合效应的研究. *中国农业科学*, 2006, 39(3): 563-568.  
SUN W T, SUN Z X, WANG C X, GONG L, ZHANG Y L. Coupling effect of water and fertilizer on corn yield under drip fertigation. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(3): 563-568. (in Chinese)
- [4] CHAI Q, GAN Y T, TURNER N C, ZHANG R Z, YANG C, NIU Y I, KADAMBOT H M S. Chapter two: Water-saving innovations in Chinese agriculture. *Advances in Agronomy*, 2014, 126: 149-201.
- [5] 徐祥玉, 张敏敏, 翟丙年, 李生秀. 施氮对不同基因型夏玉米干物质累积转移的影响. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(4): 786-792.  
XU X Y, ZHANG M M, ZHAI B N, LI S X. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and translocation of different genotypes of summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 786-792. (in Chinese)
- [6] 李青军, 张炎, 胡伟, 孟凤轩, 冯广平, 胡国智, 刘新兰. 氮素运筹对玉米干物质积累、氮素吸收分配及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 755-760.  
LI Q J, ZHANG Y, HU W, MENG F X, FENG G P, HU G Z, LIU X L. Effects of nitrogen management on maize dry matter accumulation, nitrogen uptake and distribution and maize yield. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 755-760. (in Chinese)
- [7] 吕丽华, 陶洪斌, 夏来坤, 张雅杰, 赵明, 赵久然, 王璞. 不同种植密度下的夏玉米冠层结构及光合特性. *作物学报*, 2008, 34(4): 447-455.  
LÜ L H, TAO H B, XIA L K, ZHANG Y J, ZHAO M, ZHAO J R, WANG P. Canopy structure and photosynthesis traits of summer maize under different planting densities. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(4): 447-455. (in Chinese)
- [8] 张旺锋, 勾玲, 王振林, 李少昆, 余松烈, 曹连甫. 氮肥对新疆高产棉花叶片叶绿素荧光动力学参数的影响. *中国农业科学*, 2003,

- 36(8): 893-898.
- ZHANG W F, GOU L, WANG Z L, LI S K, YU S L, CAO L P. Effect of nitrogen on chlorophyll fluorescence of leaves of high-yielding cotton in Xinjiang. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(8): 893-898. (in Chinese)
- [9] 李广浩, 赵斌, 董树亭, 刘鹏, 张吉旺, 何在菊. 控释尿素水氮耦合对夏玉米产量和光合特性的影响. 作物学报, 2015, 41(9): 1406-1415.
- LI G H, ZHAO B, DONG S T, LIU P, ZHANG J W, HE Z J. Effects of coupling controlled release urea with water on yield and photosynthetic characteristics in summer maize. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(9): 1406-1415. (in Chinese)
- [10] 张秋英, 刘晓冰, 金剑, 王光华, 李艳华, STEPHEN J H. 水肥耦合对大豆光合特性及产量品质的影响. 干旱地区农业研究, 2003, 21(1): 47-50.
- ZHANG Q Y, LIU X B, JIN J, WANG G H, LI Y H, STEPHEN J H. Influence of water and fertilizer coupling on photosynthetic characters and yield /quality of soybean. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(1): 47-50. (in Chinese)
- [11] JIM G. Nitrogen study fertilizes fears of pollution. *Nature*, 2005, 433(7028): 791.
- [12] 王帅, 韩晓日, 战秀梅, 杨劲峰, 王月, 刘铁飞, 李娜. 氮肥水平对玉米灌浆期穗位叶光合功能的影响. 植物营养与肥科学报, 2014, 20(2): 280-289.
- WANG S, HAN X R, ZHAN X M, YANG J F, WANG Y, LIU Y F, LI N. Effect of nitrogenous fertilizer levels on photosynthetic functions of maize ear leaves at grain filling stage. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2014, 20(2): 280-289. (in Chinese)
- [13] TANG Y L, WEN X G, LU C M. Differential changes in degradation of chlorophyll-protein complexes of photosystem I and photosystem II during flag leaf senescence of rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2005, 43(2): 69-75.
- [14] 张建军, 樊廷录, 党翼, 赵刚, 王磊, 李尚中. 密度与氮肥运筹对陇东旱塬全膜双垄沟播春玉米产量及生理指标的影响. 中国农业科学, 2015, 48(22): 4574-4584.
- ZHANG J J, FAN T L, DANG Y, ZHAO G, WANG L, LI S Z. The Effects of density and nitrogen management on the yield and physiological indices of spring maize under plastic-covered ridge and furrow planting in Loess Plateau east of Gansu. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(22): 4574-4584. (in Chinese)
- [15] RAJA V. Effect of nitrogen and plant population on yield and quality of super sweet corn (*Zea mays*). *Indian Journal of Agronomy*, 2001, 46(2): 246-249.
- [16] 李玉英, 宋玉伟, 程序, 孙建好, 刘吉利, 李隆. 施氮对灌漠土春玉米干物质积累和氮素吸收利用动态的影响. 中国农业大学学报, 2009, 14(1): 61-65.
- LI Y Y, SONG Y W, CHENG X, SUN J H, LIU J L, LI L. Impact of nitrogen application on the dynamics of dry matter accumulation and nitrogen absorption and utilization of spring maize. *Journal of China Agricultural University*, 2009, 14(1): 61-65. (in Chinese)
- [17] 王宜伦, 刘天学, 赵鹏, 张许, 谭金芳, 李潮海. 施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收及土壤硝态氮的影响. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2483-2491.
- WANG Y L, LIU T X, ZHAO P, ZHANG X, TAN J F, LI C H. Effect of nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and soil nitric N in super-high-yield summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(12): 2483-2491. (in Chinese)
- [18] 郭丽, 史建硕, 王丽英, 李若楠, 任燕利, 张彦才. 滴灌水肥一体化条件下施氮量对夏玉米氮素吸收利用及土壤硝态氮含量的影响. 中国生态农业学报, 2018, 26(5): 668-676.
- GUO L, SHI J S, WANG L Y, LI R N, REN Y L, ZHANG Y C. Effects of nitrogen application rate on nitrogen absorption and utilization in summer maize and soil NO<sub>3</sub>-N content under drip fertigation. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(5): 668-676. (in Chinese)
- [19] 马国胜, 薛吉全, 路海东, 张仁和, 邵书静, 任建宏. 密度与氮肥对关中灌区夏玉米 (*Zea mays* L.) 群体光合生理指标的影响. 生态学报, 2008, 28(2): 661-668.
- MA G S, XUE J Q, LU H D, ZHANG R H, TAI S J, REN J H. Effects of planting density and nitrogen fertilization on population physiological indexes of summer maize (*Zea mays* L.) in Guanzhong irrigated zone. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(2): 661-668. (in Chinese)
- [20] 张吉旺, 王空军, 胡昌浩, 董树亭, 刘鹏. 施氮时期对夏玉米饲用营养价值的影响. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1337-1342.
- ZHANG J W, WANG K J, HU C H, DONG S T, LIU P. Effects of different nitrogen application stages on forage nutritive value of summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(11): 1337-1342. (in Chinese)
- [21] 肖继兵, 刘志, 孔凡信, 辛宗绪, 吴宏生. 种植方式和密度对高粱群体结构和产量的影响. 中国农业科学, 2018, 51(22): 4264-4276.
- XIAO J B, LIU Z, KONG F X, XIN Z X, WU H S. Effects of planting pattern and density on population structure and yield of sorghum. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(22): 4264-4276. (in Chinese)
- [22] 高素玲, 刘松涛, 杨青华, 常介田. 氮肥减量后移对玉米冠层生理



- 性状和产量的影响. 中国农学通报, 2013, 29(24): 114-118.
- GAO S L, LIU S T, YANG Q H, CHANG J T. Effect of reducing and postponing nitrogen fertilization on the yield and canopy physiological properties of corn. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(24): 114-118. (in Chinese)
- [23] 何海兵, 杨茹, 廖江, 武立权, 孔令聪, 黄义德. 水分和氮肥管理对灌溉水稻优质高产高效调控机制的研究进展. 中国农业科学, 2016, 49(2): 305-318.
- HE H B, YANG R, LIAO J, WU L Q, KONG L C, HUANG Y D. Research advance of high-yielding and high efficiency in resource use and improving grain quality of rice plants under water and nitrogen managements in an irrigated region. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(2): 305-318. (in Chinese)
- [24] 王云奇, 陶洪斌, 黄收兵, 徐丽娜, 杨利华, 祁利潘, 王璞. 施氮模式对夏玉米氮肥利用和产量效益的影响. 核农学报, 2013, 27(2): 219-224.
- WANG Y Q, TAO H B, HUANG S B, XU L N, YANG L H, QI L P, WANG P. Effects of nitrogen patterns on nitrogen use and yield benefit of summer maize. *Journal of Nuclear Agricultural Science*, 2013, 27(2): 219-224. (in Chinese)
- [25] 魏廷邦, 胡发龙, 赵财, 冯福学, 于爱忠, 刘畅, 柴强. 氮肥后移对绿洲灌区玉米干物质积累和产量构成的调控效应. 中国农业科学, 2017, 50(15): 2916-2927.
- WEI T B, HU F L, ZHAO C, FENG F X, YU A Z, LIU C, CHAI Q. Response of dry matter accumulation and yield components of maize under N-fertilizer postponing application in oasis irrigation areas. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(15): 2916-2927. (in Chinese)
- [26] 黄丽华, 沈根祥, 钱晓雍, 顾海蓉, 仇忠启, MASSIMO P. 滴灌施肥对农田土壤氮素和流失的影响. 农业工程学报, 2008, 24(7): 49-53.
- HUANG L H, SHEN G X, QIAN X Y, GU H R, QIU Z Q, MASSIMO P. Impacts of drip fertilizer irrigation on nitrogen use efficiency and total nitrogen loss load. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(7): 49-53. (in Chinese)
- [27] 周宝元, 孙雪芳, 丁在松, 马玮, 赵明. 土壤耕作和施肥方式对夏玉米干物质积累与产量的影响. 中国农业科学, 2017, 50(11): 2129-2140.
- ZHOU B Y, SUN X F, DING Z S, MA W, ZHAO M. Effect of tillage practice and fertilization on dry matter accumulation and grain yield of summer maize (*Zea Mays* L.). *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2129-2140. (in Chinese)
- [28] 徐国伟, 陆大克, 王贺正, 陈明灿, 李友军. 干湿交替灌溉与施氮量对水稻叶片光合性状的耦合效应. 植物营养与肥科学报, 2017, 23(5): 1225-1237.
- XU G W, LU D K, WANG H Z, CHEN M C, LI Y J. Coupling effect of wetting and drying alternative irrigation and nitrogen application rate on photosynthetic characteristics of rice leaves. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1225-1237. (in Chinese)
- [29] 吕丽华, 董志强, 张经廷, 张丽华, 梁双波, 贾秀领, 姚海坡. 水氮对冬小麦-夏玉米产量及氮利用效应研究. 中国农业科学, 2014, 47(19): 3839-3849.
- LÜ L H, DONG Z Q, ZHANG J T, ZHANG L H, LIANG S B, JIA X L, YAO H P. Effect of water and nitrogen on yield and nitrogen utilization of winter wheat and summer maize. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(19): 3839-3849. (in Chinese)
- [30] 曹倩, 贺明荣, 代兴龙, 门洪文, 王成雨. 密度、氮肥互作对小麦产量及氮素利用效率的影响. 植物营养与肥科学报, 2011, 17(4): 815-822.
- CAO Q, HE M R, DAI X L, MEN H W, WANG C Y. Effects of interaction between density and nitrogen on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4): 815-822. (in Chinese)
- [31] 张银锁, 宇振荣, DRIESSEN P M. 环境条件和栽培管理对夏玉米干物质积累、分配及转移的试验研究. 作物学报, 2002, 28(1): 104-109.
- ZHANG Y S, YU Z R, DRIESSEN P M. Experimental study of assimilate production, partitioning and translocation among plant organs in summer maize (*Zea mays*) under various environmental and management conditions. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(1): 104-109. (in Chinese)
- [32] WANG Y L, LIU T X, TAN J F, ZHANG XU, LI C H. Effect of N fertilization on yield, N absorption and utilization of two species of super high yielding summer maize. *Agricultural Science Technology*, 2012, 13(2): 339-342, 374.
- [33] BARTON L, COLMER T D. Irrigation and fertilizer strategies for minimizing nitrogen leaching from turfgrass. *Agricultural Water Management*, 2006, 80: 160-175.
- [34] LLORENS L, PEUELAS J, ESTIARTE M. Ecophysiological responses of two Mediterranean shrubs, *Erica multiflora* and *globularia*, to experimentally drier and warmer conditions. *Plant Physiology*, 2003, 119(2): 231-243.
- [35] 王仁雷, 李霞, 陈国祥, 华春, 魏锦城. 氮肥水平对杂交稻汕优 63 剑叶光合速率和 RuBP 羧化酶活性的影响. 作物学报, 2001, 27(6): 930-934.
- WANG R L, LI X, CHEN G X, HUA C, WEI J C. Effect of N-fertilizer levels on photosynthetic rate and RuBP carboxylase activity

- in flag leaves of hybrid rice Shanyou 63. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6): 930-934. (in Chinese)
- [36] 王唯逍, 刘小军, 田永超, 姚霞, 曹卫星, 朱艳. 不同土壤水分处理对水稻光合特性及产量的影响. *生态学报*, 2012, 32(22): 7053-7060.
- WANG W X, LIU X J, TIAN Y C, YAO X, CAO W X, ZHU Y. Effects of different soil water treatments on photosynthetic characteristics and grain yield in rice. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(22): 7053-7060. (in Chinese)
- [37] 李潮海, 刘奎, 周苏玫, 栾丽敏. 不同施肥条件下夏玉米光合对生理生态因子的响应. *作物学报*, 2002, 28(2): 265-269.
- LI C H, LIU K, ZHOU S M, LUAN L M. Response of photosynthesis to eco-physiological factors of summer maize on different fertilizer amounts. *Acta Agronomica Sinica*, 2002, 28(2): 265-269. (in Chinese)
- [38] 黄振喜, 王永军, 王空军, 李登海, 赵明, 柳京国, 董树亭, 王洪军, 王军海, 杨今胜. 产量 15000 kg·ha<sup>-1</sup> 以上夏玉米灌浆期间的光合特性. *中国农业科学*, 2007, 40(9): 1898-1906.
- HUANG Z X, WANG Y J, WANG K J, LI D H, ZHAO M, LIU J G, DONG S T, WANG H J, WANG J H, YANG J S. Photosynthetic characteristics during grain filling stage of summer maize hybrids with high yield potential of 15 000 kg·ha<sup>-1</sup>. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1898-1906. (in Chinese)
- [39] 曹胜彪, 张吉旺, 董树亭, 刘鹏, 赵斌, 杨今胜. 施氮量和种植密度对高产夏玉米产量和氮素利用效率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(6): 1343-1353.
- CAO S B, ZHANG J W, DONG S T, LIU P, ZHAO B, YANG J S. Effects of nitrogen rate and planting density on grain yield and nitrogen utilization efficiency of high yield summer maize. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(6): 1343-1353. (in Chinese)
- [40] BAVEC F, BAVEC M. Effect of maize plant double row spacing on nutrient uptake, leaf area index and yield. *Rost Vyroba*, 2001, 47(3): 135-140.
- [41] 王楷, 王克如, 王永宏, 赵健, 赵如浪, 王喜梅, 李健, 梁明晰, 李少昆. 密度对玉米产量(> 15000 kg·hm<sup>-2</sup>)及其产量构成因子的影响. *中国农业科学*, 2012, 45(16): 3437-3445.
- WANG K, WANG K R, WANG Y H, ZHAO J, ZHAO R L, WANG X M, LI J, LIANG M X, LI S K. Effects of density on maize yield and yield components. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(16): 3437-3445. (in Chinese)
- [42] BORRAS L, MADDONNI G A, OTEGUI M E. Leaf senescence in maize hybrids: Plant population, row spacing and kernel set effects. *Field Crops Research*, 2003, 82(1): 13-26.
- [43] 刘战东, 肖俊夫, 于景春, 刘祖贵, 南纪琴. 春玉米品种和种植密度对植株性状和耗水特性的影响. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 125-132.
- LIU Z D, XIAO J F, YU J C, LIU Z G, NAN J Q. Effects of varieties and planting density on plant traits and water consumption characteristics of spring maize. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(11): 125-132. (in Chinese)
- [44] 王海茹, 张永清, 董文晓, 闫江艳, 冯晓敏, 李鹏. 水氮耦合对黍稷幼苗形态和生理指标的影响. *中国生态农业学报*, 2012, 20(11): 1420-1426.
- WANG H R, ZHANG Y Q, DONG W X, YAN J Y, FENG X M, LI P. Effect of irrigation and nitrogen supply on physico-morphological indices of broomcorn millet at seedling stage. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(11): 1420-1426. (in Chinese)
- [45] 任中生, 屈忠义, 李哲, 刘安琪. 水氮互作对河套灌区膜下滴灌玉米产量与水氮利用的影响. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 149-155.
- REN Z S, QU Z Y, LI Z, LIU A Q. Interactive effects of nitrogen fertilization and irrigation on grain yield, water use efficiency and nitrogen use efficiency of mulched drip-irrigated maize in Hetao irrigation district, China. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 149-155. (in Chinese)
- [46] DING K J, WANG G M, JIANG D K, BISWAS H, XU L F, LI Y H. Effects of nitrogen deficiency on photosynthetic traits of maize hybrids released in different years. *Annals of Botany*, 2005, 96(3): 925-930.

(责任编辑 杨鑫浩)