

西北旱区制种玉米灌浆期气孔导度与 叶水势对水氮胁迫的响应

邓 鑫¹, 冉 辉¹, 于庭高¹, 彭雪莲¹, 纪莎莎², 胡笑涛¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘 要:为了探究西北旱区制种玉米水氮胁迫条件下的生理节水机理, 设置充分灌溉(FI)与亏缺灌溉(DI)处理, 以及施氮(N150)与不施氮(N0)处理, 分析了不同水氮模式下叶水势与气孔特征的变化规律。结果表明:充分灌溉条件下, 施氮主要通过增加气孔开度和气孔数量提高气孔导度, 与不施氮处理相比, 气孔开度提高 19.46%, 气孔数量增加 8.46%; 亏缺灌溉条件下则通过增加单位面积开放气孔数量和降低气孔开度来应对水分消耗, 提高抗旱能力, 与充分灌溉相比, 亏缺灌溉气孔开度平均降低 21.38%, 气孔数量平均增加 14.08%; 增加灌水量能极显著增大气孔开度($P<0.05$)和提高玉米叶片黎明和正午叶水势值, 促进作物蒸腾作用; FIN150 处理较 DIN150 处理黎明和正午叶水势均值分别上升了 3.30% 和 2.00%, FIN0 处理较 DIN0 处理黎明和正午叶水势均值分别上升了 13.41% 和 14.29%; 亏缺灌溉条件下, 施氮处理黎明和正午叶水势均值分别上升了 2.87% 和 0.17%。干旱导致气孔导度及正午叶水势的降低可以通过增施氮肥得到部分补偿。

关键词:水氮胁迫; 制种玉米; 叶水势; 气孔导度; 气孔特征

中图分类号:S513 **文献标志码:**A

Response of stomatal conductance and leaf water potential to water and nitrogen stress during grain-filling period of hybrid seed maize in arid region of the northwestern China

DEND Xin¹, RAN Hui¹, YU Tinggao¹, PENG Xuelian¹, JI Shasha², HU Xiaotao¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the physiological water-saving mechanism of hybrid seed maize under the conditions of water and nitrogen stress in arid region of the northwestern China, the treatments including two irrigation rates, full (FI) and deficit irrigation (DI) combining with two nitrogen (N) rates, 150 kg · hm⁻² (N150) and 0 kg · hm⁻² (N0), were studied. The changes of leaf water potential and stomatal characteristics were measured. The results showed that N mainly improved stomatal conductance by increasing stomatal divergence degree and stomatal number under the condition of full irrigation, the stomatal divergence degree was increased by 19.46% and the stomatal number by 8.46% compared with no N treatments. For deficit irrigation, the water consumption was responded by increasing the number of open pores per unit area and decreasing the stomatal opening to improve drought resistance, more stomatal with smaller opening per unit area were found to cope with water loss and improve drought resistance, the stomatal divergence degree of deficit irrigation decreased by 21.38% and the stomatal number increased by 14.08% on average compared with full irrigation. The stomatal divergence degree was significantly increased ($P<0.01$) and leaf water potential dawn and midday leaf water potential of maize leaves was increased with the increase of irrigation amount, which promoted crop transpiration. Compared with DIN150 treatment, the mean water potential of

收稿日期:2020-05-20

修回日期:2020-06-02

基金项目:国家自然科学基金(51809216); 中央高校基础研究经费(2452017203); 陕西省自然科学基金基础研究计划(NO.2019JQ-646)

作者简介:邓鑫(1996-), 男, 湖北武汉人, 研究生, 研究方向为节水灌溉原理与新技术。E-mail: xin.deng@nwsuaf.edu.cn

通信作者:胡笑涛(1972-), 男, 河南南阳人, 博士, 教授, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail: huxiaotao11@nwsuaf.edu.cn

dawn and midday leaves in FIN150 treatment increased by 3.30% and 2.00%, respectively. Compared with DINO treatment, the mean water potential of dawn and midday leaves in FIN0 treatment increased by 13.41% and 14.29%, respectively. Nitrogen-treated dawn and midday leaf water potential means increased by 2.87% and 0.17% under deficit irrigation condition, respectively. The stomatal divergence degree, and leaf water potential before dawn and midday of maize leaves were significantly increased with increasing irrigation amount, which promoted crop transpiration. Nitrogen application helped increasing leaf water potential before dawn and midday under deficit irrigation condition. The decrease in the stomatal conductance and the midday leaf water potential caused by drought was partially compensated by increasing N rate.

Keywords: water and nitrogen stress; hybrid seed maize; leaf water potential; stomatal conductance; stomatal characteristics

西北旱区光热资源丰富,是重要的制种玉米生产基地,但该地区长期面临着水资源短缺问题,农业用水供需矛盾尖锐^[1]。覆膜灌溉是当地制种玉米生产的主要模式^[2],然而在制种玉米生产中普遍存在水分利用效率低与不合理施氮问题^[3]。探究合理的制种玉米水氮管理模式,揭示不同水氮条件下制种玉米植株水分状况变化规律,阐明水氮胁迫对植株水分状况的影响机理,对该地区水分利用效率的提升具有重要意义。

叶水势与气孔导度是反映和调节植株水分状况的重要指标,对植株蒸发蒸腾量具有显著影响。黎明前叶水势反映植株水分亏缺的恢复状况,正午叶水势反映植株水分最大亏缺程度^[4],气孔导度控制植株蒸腾速率强弱^[5]。叶片水势与气孔开闭有着密切联系,研究表明,随着植物叶片水分散失和水势下降,气孔阻力增加,气孔开度相应减小^[6]。水氮状况对植株叶片水势与气孔导度的调控均有影响,充分供水条件下,叶片保卫细胞膨压增大,有利于气孔的开启^[7];水分胁迫条件下,大量施氮会显著降低叶水势,同时增大气孔导度,进而提高植株蒸腾速率^[8],但施氮的缓解效应具有局限性,随着水分亏缺程度加大,增施氮肥不能对植物生理特性起到调节作用^[9]。目前,水分利用效率的提高逐渐趋向于挖掘作物生理节水潜力,叶水势与气孔导度是衡量植株水分状况的重要依据。然而叶水势与气孔导度研究大多集中在水分亏缺,水氮共同作用下叶水势与气孔导度变化规律的研究相对较少。因此,本研究拟在不同水氮处理下,探究制种玉米灌浆期叶水势及气孔导度变化规律,以期对西北旱区水分利用效率提升提供支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2019 年在甘肃省武威市石羊河农业与

生态节水试验站大田试验区进行(东经 102°52',北纬 37°51',海拔高 1 581 m)。该地区属典型的温带大陆性干旱荒漠气候,光热资源非常丰富,常年干旱少雨,多年平均蒸发量为 2 000 mm 左右,而多年平均降水量为 164.4 mm,水资源相对紧张,地下水埋深在 25 m 以下^[10-11]。全年日照时数达 3 000 h 以上,昼夜温差大,无霜期在 150 d 以上,年平均气温为 8℃,大于 0℃的积温为 3 550℃以上,试验区土壤质地大部分为粉质壤土,土壤容重为 1.45 g · cm⁻³。

1.2 试验设计

供试玉米母本品种为“天瑞丰-2018”。设置 2 个灌溉水平,即充分灌溉(FI)和亏缺灌溉(DI),2 个施氮水平,即 150 kg · hm⁻²(N150)和 0 kg · hm⁻²(N0),共 4 个处理。FI 处理小区计划湿润层内土壤含水率保持在田间持水量的 75%以上。FI 灌水量计算采用灌水前 FIN150 处理土壤实际含水率与田间持水量的差值计算。DI 处理灌水量为 FI 处理灌水量的一半。FI 处理全生育期灌水量为 460 mm,DI 处理全生育期灌水量为 230 mm。灌水方式为畦灌。氮肥施用分为基肥与追肥,追基比为 1 : 1,分别在玉米种植前与玉米母本拔节期施入。试验采用分区组随机排列,每个处理 3 个重复,共 12 个小区,每个小区宽 4 m,长 6 m。父母本种植比例为 1 : 5,行距为 40 cm,株距为 25 cm,母本于 4 月 15 日播种,两批父本分别于 4 月 20 日和 4 月 25 日种植,9 月 13 日收获。母本在抽穗期前人工去雄,病虫害防治等田间管理措施均按当地生产管理方式进行。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 气象资料 降水量、太阳辐射、空气温度和相对湿度数据取自试验站内的自动气象站(Hobo, Onset Computer Corp, USA)。VPD、ET₀采用 FAO Penman-monteith 公式计算^[12]。具体气象数据见图 1。

1.3.2 观测指标 叶水势(φ_L):在灌浆期每个小

区中间位置随机选取 1 株母本玉米穗位叶,采用露点水势仪(WP4C, Decagon devices)测定。黎明前叶水势和正午叶水势分别在 5:00 和 13:00 取样观测。叶水势日变化从 8:00—20:00 每隔 2 h 测量 1 次。

气孔导度(G_s):采用稳态气孔计(SC-1, Decagon devices)测定。选择晴朗天气,在 11:00 测量气孔导度最大值,测量部位为叶片距离叶尖 15~20 cm 处区域。气孔导度日变化从 8:00—20:00 每隔 2 h 测量一次。

气孔特征:采用印迹法测定^[13]。各处理随机选取长势一致的母本玉米 2 株,用火棉胶溶液均匀涂抹穗位叶叶尖相同位置下表皮,干透后用镊子撕取

表面薄膜,将其放在载玻片上,盖上盖玻片,置于生物显微镜(Motic BA210)下观测气孔形态特征。每个样本随机选取 2~3 个视野,放大 400 倍进行拍照,用 Motic Images Plus 2.0 软件测定每个视野内的气孔数及每个气孔的长度和宽度。

叶片水势与气孔导度的观测均选在晴天无云,测定部位在大喇叭口期时为倒三、四叶(完全展开),抽雄期和乳熟期均为穗位叶。

1.4 数据处理

本文采用 Microsoft Office Excel 2010 软件进行数据处理与绘图,方差分析采用 SPSS 20.0 软件(IBM SPSS Statistics 20.0)完成。

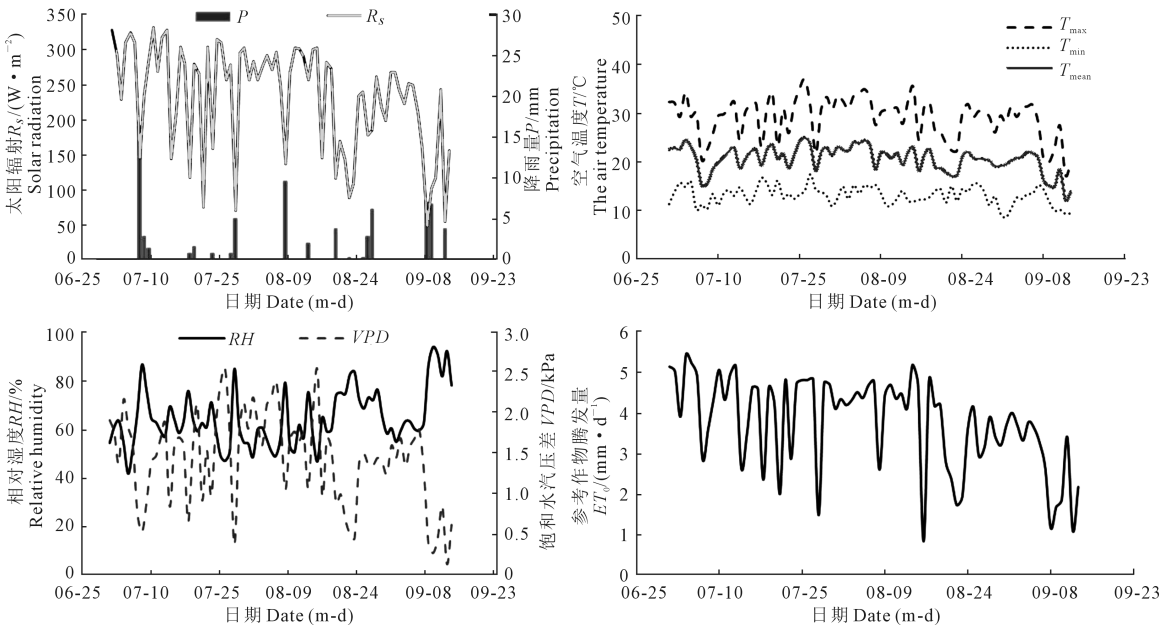
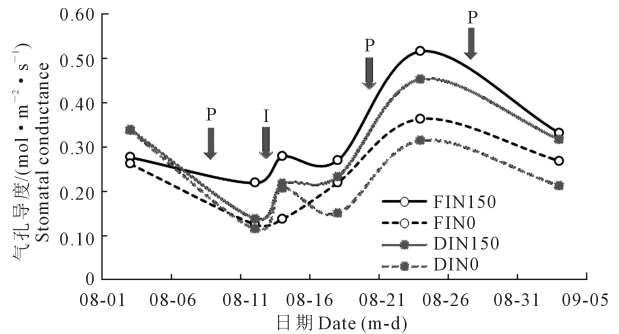


图 1 2019 年制种玉米灌浆期气象数据
Fig.1 The meteorological data during grain-filling period of hybrid seed maize in 2019

2 结果与分析

2.1 不同水氮处理对制种玉米气孔导度的影响

2.1.1 不同水氮处理下制种玉米气孔导度变化
制种玉米灌浆期气孔导度变化情况如图 2 所示。从图中可以看出,气孔导度变化趋势可分为 3 个阶段,灌浆中期呈下降趋势,灌浆中后期呈上升趋势,灌浆后期下降。在灌浆中后期,与不施氮处理相比,施氮在充分灌溉与亏缺灌溉处理条件下均显著提高了制种玉米气孔导度;与充分灌溉相比,亏缺灌溉显著降低叶片气孔导度。充分灌溉条件下施氮使气孔导度平均提高 45.28%,而亏缺灌溉条件下施氮使气孔导度平均提高 29.21%。结果表明,高灌溉定额和施氮均有利于气孔开放,并且施氮对气孔导度提升效应与土壤水分状况有关。



注:箭头表示降雨(P)或灌溉(I),且总量大于 3 mm。下同。
Note: Arrows represents rainfall (P) or irrigation (I) with the amount greater than 3 mm. The same below.

图 2 制种玉米灌浆期不同水氮处理气孔导度变化
Fig.2 The stomatal conductance changes under different water and nitrogen treatments during grain-filling period for hybrid seed maize

2.1.2 不同水氮处理下制种玉米气孔导度日变化 制种玉米灌浆期气孔导度日变化规律如图 3 所示。各处理气孔导度呈先上升后下降的单峰曲线,且气孔峰值均出现在 12:00—14:00,但 DIN0 处理气孔导度峰值显著降低且提前至 10:00 左右,因为此时太阳辐射相对较低,可以以较少的水分损伤获得玉米所需要的光合效益,使得亏缺条件下水分利用达到较高的效率。此外,FIN150、FIN0、DIN150 和 DIN0 处理气孔导度日平均值分别为 0.192、0.133、0.184 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 0.101 $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,表明充分灌溉与亏缺灌溉条件下,施氮均有利于提高气孔导度;施氮与不施氮条件下,亏缺灌溉均显著降低气孔导度。在亏缺灌溉条件下,施氮显著提升了气孔导度峰值且高于 FIN0 处理的气孔导度峰值,说明由于干旱导致气孔导度的降低可以通过增施氮肥得到部分缓解。

2.1.3 不同水氮处理对叶片气孔特征的影响 灌浆前中期不同水氮处理对叶片气孔特征影响如表 1 和图 4 所示。亏水灌溉处理下施氮显著增大气孔长度,并且 DIN150 处理与充分灌溉处理气孔长度大小无明显差异,说明施氮有效地缓解了干旱造成的气孔长度降低。施氮与不施氮处理相比,充分灌溉下气孔宽度增加了 19.46%,亏缺灌溉下降低了 9.42%;与充分灌溉处理相比,亏缺灌溉下气孔宽度极显著降低,DIN150 处理较 FIN150 处理降低了 32.19%,DIN0 处理较 FIN0 处理降低了 10.57%,说明适当施氮植物生理活性较高,在水分充足的情况下,叶片气孔散失的水分就越多。此外,与不施氮处理相比,

施氮有利于气孔数量的增加,充分灌溉下增加了 8.46%,亏缺灌溉下增加了 6.00%;与充分灌溉处理相比,亏缺灌溉下气孔数量显著增多,DIN150 处理较 FIN150 处理增加了 12.77%,DIN0 处理较 FIN0 处理增加了 15.38%。对比 FIN0 和 FIN150,充分灌溉条件下施氮主要通过增加气孔开度和气孔数量提高气孔导度;对比 FIN0 和 DIN0,亏缺灌溉下气孔数量提高,气孔长度和宽度均显著减小,通过增加单位面积气孔数量、减小气孔开度来应对水分损失,提高抗旱能力。

2.2 不同水氮处理对制种玉米叶水势的影响

2.2.1 不同水氮处理下制种玉米叶水势变化 灌浆期不同水氮处理下黎明前与正午叶水势如图 5 所示。从图中可以看出,黎明叶水势值在灌浆中期最高,在 -1.0 ~ -0.5 MPa 之间。随着灌浆进程的推进,黎明叶水势呈下降趋势,水势值低于 -1.00 MPa。

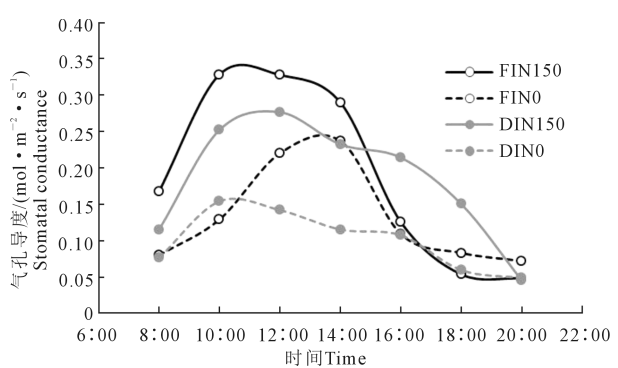


图 3 制种玉米不同水氮处理下气孔导度日变化
Fig.3 Diurnal variation of stomatal conductance for hybrid seed maize under different water and nitrogen treatments

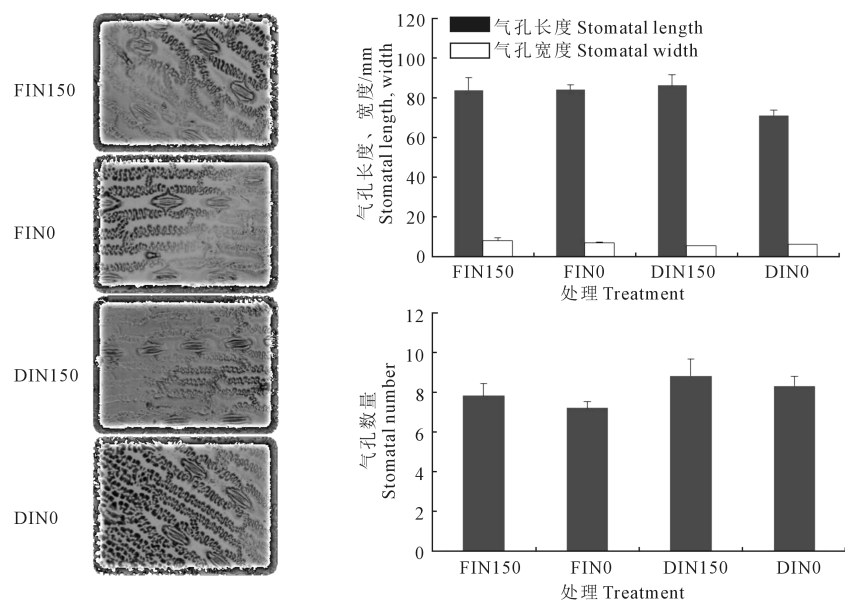


图 4 制种玉米灌浆期不同水氮处理叶片气孔特征(2019-07-20)

Fig.4 The stomatal characteristics of leaves under different water and nitrogen treatments during grain-filling period for hybrid seed maize on July 20, 2019

充分灌溉条件下,施氮显著降低黎明叶水势,但总体上均高于亏缺灌溉处理;亏缺灌溉条件下,施氮提高了黎明叶水势,这意味着施氮有利于植株水分亏缺的夜间恢复,对白天水分胁迫具有一定的补偿作用。对于正午叶水势,充分灌溉条件下,施氮处理正午叶水势低于不施氮处理,而亏缺灌溉条件下,施氮有利于提高正午叶水势,说明施氮有利于抑制叶片水分进一步亏缺,增加植株耐旱能力。

黎明与正午叶水势之差反映植物体内水分亏缺程度,即蒸腾散失水分量。水势差越大,越有利于根系吸收水分以适应干旱环境,提高水分利用效率。灌浆中期各处理吸水能力均较强,随着灌浆进

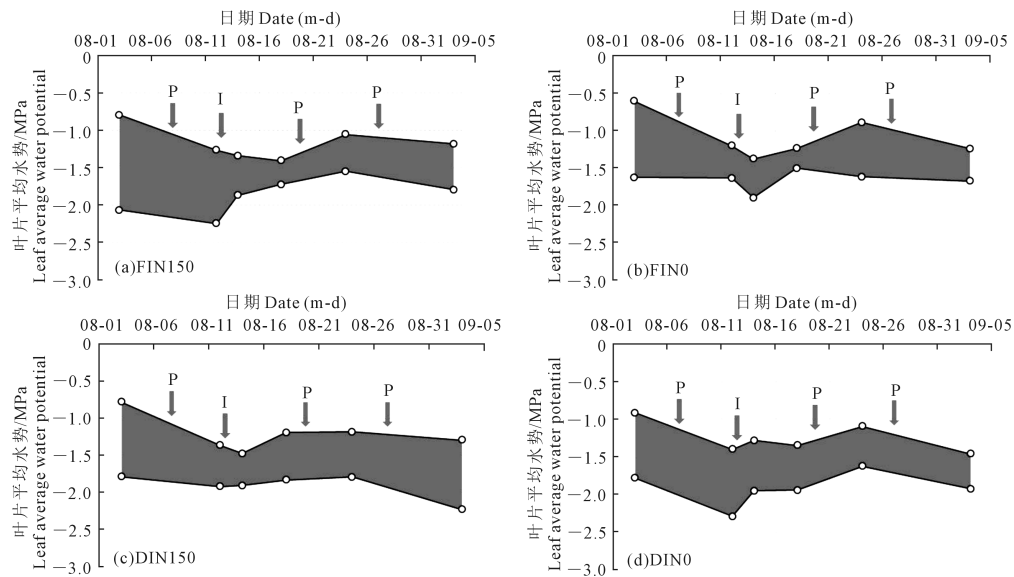
表 1 不同水氮处理下制种玉米气孔特征变化

Table 1 Significance analysis for stomatal characteristics under different water and nitrogen treatments

处理 Treatment	气孔长度 Stomatal length	气孔宽度 Stomata width	气孔数量 Stomatal number
灌水水平 Irrigation level	2.949	11.884 * *	6.224 *
施氮水平 Nitrogen level	5.583 *	0.602	1.724
水氮交互 Irrigation and nitrogen interaction	6.010 *	3.843	0.017

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著, * * 表示在 $P<0.01$ 水平上差异显著。

Note: * means significant difference at $P<0.05$ level, * * means significant difference at $P<0.01$ level.



注:面积图上下边长分别表示黎明和正午叶水势。
Note: The upper and lower side lengths of the area map represent the leaf water potential before dawn and mid-day leaf water potential, respectively.

图 5 制种玉米灌浆期不同水氮处理叶水势变化

程推进,DIN150 处理仍保持较高的吸水能力,而其他处理吸水能力有所减弱。说明制种玉米灌浆中后期,DIN150 处理水分利用效率最高。

2.2.2 不同水氮处理下制种玉米叶水势日变化 制种玉米灌浆期叶水势日变化规律如图 6 所示。各处理叶片水势日变化呈倒 U 型,且叶水势峰值均出现在 14 : 00 前后。相较气孔导度峰值,叶水势峰值有所延后,原因可能 14 : 00 之前根系吸水速率小于叶片蒸腾速率,水分持续亏缺,14 : 00 之后,蒸腾速率随太阳辐射减弱而降低,根系吸水速率开始逐渐大于蒸腾速率。此外,充分灌溉处理叶水势整体高于亏缺灌溉 ($P<0.05$); 亏缺灌溉条件下,施氮比不施氮叶水势值平均上升 5.97%,并且 FIN150、FIN0、DIN150 和 DIN0 处理叶水势日平均值分别为-1.64、-1.66、-1.68 MPa 和-1.78 MPa,说明干旱条件下施

氮能有效抑制叶片水分亏缺。

3 讨论

水氮调控作为减少作物水肥用量的方法之一,对西北旱区作物水肥利用效率的提高有重要意义^[14-15]。叶水势、气孔导度是衡量植物水分胁迫的生理指标,反映并调节着植物体内水分状况^[16-17]。本研究中,气孔导度和叶水势日变化分别呈先升后降单峰抛物线型和倒 U 型,与武志海等^[18]、蔡太义等^[19]的研究结果相似。上午随着太阳辐射增强,气孔开度增大同时有利于叶片水分逸出,叶水势逐渐降低,中午大气蒸发能力强,气孔“午休”减少水分消耗,但玉米根系吸水速率依旧小于叶片蒸腾速率,叶水势持续降低,下午太阳辐射减弱,气孔开度减小,根系吸水满足蒸腾需要,叶水势逐渐恢复。

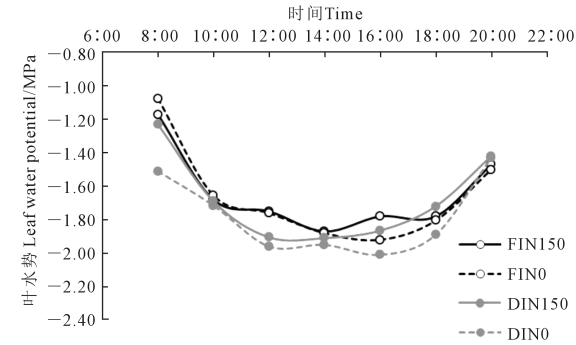


图 6 制种玉米不同水氮处理下叶水势日变化
Fig.6 Diurnal variation of leaf water potential of hybrid seed maize under different water and nitrogen conditions

Greenwood 等^[7]研究得出高灌溉定额处理能显著提高气孔导度,石多琴等^[20]研究得出叶水势随着灌水量增加而提高,均与本文的研究结果接近。

关于亏水灌溉下叶水势的变化规律,Marigo 等^[21]认为,干旱条件下叶片低水势能建立更高的土壤—植物—大气连续体的水势梯度,更有利于植物对水分的吸收从而保持自身水分平衡,本研究也得到了相似的结论。本研究发现,在亏缺灌溉下,施氮对干旱胁迫有补偿作用,可以抑制叶片水势的降低,同时促进气孔开放,随着灌水量增加,施氮对气孔开放的正效应越大,水氮之间存在着互作效应^[22]。在微观气孔特征研究中,亏水灌溉处理下叶片气孔数量多、气孔宽度小,有利于减少水分逸出,同时施氮可以显著增大气孔长度,这与高志英等^[23]研究结果一致。与 FIN150 处理相比,DIN150 处理在灌浆中后期黎明与正午水势差较大,根系保持着较强的吸水能力,在气孔导度及叶水势日变化中,该处理气孔导度和叶水势日均值相比 FIN150 处理分别下降了 4.09% 和 1.89%,但灌水量少了一倍,并且 DIN150 处理气孔长度长及气孔数量多对干旱胁迫有更强的调节能力,因此,在覆膜制种玉米灌浆期可以适度控水,有效控制植株蒸腾,减少水分散失,提高水分利用效率。

4 结 论

灌浆期制种玉米在不同水氮模式下叶水势和气孔导度的响应存在差异,充分灌溉处理黎明、正午叶水势值总体均高于亏缺灌溉处理;在亏缺灌溉处理下,叶片气孔数量多、气孔宽度小,有利于减少水分逸出,气孔导度和叶片水势的降低可以通过施氮得到部分补偿;与不施氮处理相比,施氮有利于增大气孔开度、气孔长度,从而提高气孔导度,并且水氮之间存在着互作效应。

参 考 文 献:

[1] 刘昌明.中国农业水问题:若干研究重点与讨论[J].中国生态农业学报,2014,22(5):1-5.

[2] 孙永凤,武明宇,王绍鑫,等. 我国西北地区玉米制种存在问题探析[J]. 现代农业科技, 2008,(14):187.

[3] 蔡祖聪,颜晓元,朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(1):1-6.

[4] Yan M J, Yamamoto M, Yamanaka N, et al. A comparison of pressure-volume curves with and without rehydration pretreatment in eight woody species of the semiarid Loess Plateau [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2012, 35(4):1051-1060.

[5] 许周伟,闻丹妮,欧阳由男,等. 气孔调节剂对水稻秧苗素质的影响[J]. 中国稻米,2018,24(1):24-27.

[6] Jones H G, Lakso A N, Syvertsen J P. Physiological control of water status in temperate and subtropical fruit trees[J]. Horticultural Reviews, 1985, 7:301-344.

[7] Greenwood M S, Ward M H, Day M E, et al. Age-related trends in red spruce foliar plasticity in relation to declining productivity[J]. Tree Physiology, 2008, 28(2):225-232.

[8] Bharambe P R, Sondge V D, Rodge R P, et al. Effect of nitrogen and soil water regimes on soil-plant-water relationship, yield and water use efficiency of summer sunflower [J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 1992,40:235-239.

[9] 韩晓增,裴宇峰,王守宇,等. 水氮耦合对大豆生长发育的影响Ⅱ.水氮耦合对大豆生理特征的影响[J].大豆科学,2006,25(2):103-108.

[10] Li S, Lu Z, Kang S Z, et al. Comparison of several surface resistance models for estimating crop evapotranspiration over the entire growing season in arid regions[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2015, 208:1-15.

[11] Jiang X L, Kang S Z, Ling T, et al. Modification of evapotranspiration model based on effective resistance to estimate evapotranspiration of maize for seed production in an arid region of northwest China[J]. Journal of Hydrology, 2016, 538:194-207.

[12] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements [C] // FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.

[13] Johansen W L G. Accurate estimation of stomatal aperture from silicone rubber impressions[J]. New Phytologist, 1985, 101(1):109-115.

[14] 蔡大鑫,沈能展,崔振才.调亏灌溉对作物生理生态特征影响的研究进展[J]. 东北农业大学学报,2004,35(2):239-243.

[15] 张喜英,由懋正,王新元. 冬小麦调亏灌溉制度田间试验研究初报[J]. 微生物学通报,1998,6(5):257-260.

[16] 田永超,曹卫星,姜东,等. 不同水氮条件下水稻冠层反射光谱与叶片水势关系的研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):178-180.

[17] 刘婧,王宝山,谢先芝. 植物气孔发育及其调控研究[J]. 遗传, 2011,33(2):131-137.

[18] 武志海,杨美英,吴春胜,等. 玉米群体冠层内蒸腾速率与气孔导度的变化特性[J]. 吉林农业大学学报,2001,23(4):23-25,29.

[19] 蔡太义,贾志宽,杨宝平,等. 不同秸秆覆盖量对春玉米冠气温差和叶水势日变化的影响[J]. 灌溉排水学报,2010,29(6):12-15.

[20] 石多琴,柴强,于爱忠.水氮互作全膜覆盖玉米光合特性和叶水势的日变化[J]. 甘肃农业大学学报,2014,49(1):54-59.

[21] Marigo G, Peltier J P, Girel J, et al. Success in the demographic expansion of Fraxinus ExcelsiorL [J]. Trees, 2000, 15(1):1-13.

[22] 林同保,崔国金,王志强,等. 拔节期水氮运筹对冬小麦籽粒灌浆期叶片光合特性及水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(4):627-631.

[23] 高志英,丁圣彦,谷艳芳,等. 不同光环境与氮肥互作对玉米气孔特征的影响[J]. 河南农业科学,2008,37(9):17-21.