河套灌区玉米光合特征及产量对全膜覆盖下不同滴灌量的响应

姜良超[1,2]，仝 川[1,2]，胡敏杰[1,2]，李守中[1,2]，周立峰[3]，宁秋蕊[1,2]，杨贤宇[1,2]，齐智娟[4]

(1. 福建师范大学地理科学学院，福州 350007；2. 湿润亚热带生态—地理过程教育部重点实验室，福建师范大学，福州 350007；3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100；4. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心，陕西 杨凌 712100)

摘要：通过大田试验，探讨了全膜覆盖下不同滴灌量对河套灌区玉米关键生育期光合特征、产量和水分利用效率的影响。结果表明：(1)除拔节期外，高、中滴灌量处理下玉米叶片净光合速率 P_n、蒸腾速率 T_r 和气孔导度 G_s 均显著高于低滴灌量处理($P<0.05$)，而高滴灌量与中滴灌量处理之间无显著差异；(2)低滴灌量处理下的玉米叶片光合水分利用效率 WUE 在其他生育时期均显著高于高滴灌量处理($P<0.05$)，并且高滴灌量处理下玉米光合水分利用效率在拔节期显著高于其他生育时期；(3)不同滴灌量下，玉米叶片净光合速率 P_n、蒸腾速率 T_r、气孔导度 G_s 及胞间 CO_2 浓度 C_i 在不同生育时期均具有明显的光合日变化特征。高、中滴灌量处理下各光合参数的日变化幅度、峰高、峰值出现时间与低滴灌量相比均存在显著差异；(4)高、中滴灌量处理下玉米存果率、穗粒数、千粒重和产量均显著高于低滴灌量处理($P<0.05$)，但相对中滴灌量而言，高滴灌量处理对玉米果穗性状和产量的影响不显著。因此，合理的膜下滴灌量可以有效提高作物光合能力，有利于干物质的积累，改善作物果穗性状和产量，同时提高光合水分利用效率，对河套灌区节水灌溉、控盐和增产目标具有指导意义。

关键词：全膜覆盖；滴灌量；光合特征；产量；玉米；河套灌区

中图分类号：S275.6　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-2242(2017)04-0289-09

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.04.046

Responses of Maize Photosynthesis and Yield to Different Drip Irrigation Amounts with Full Film Mulching in the Hetao Irrigation District

JIANG Liangchao[1,2], TONG Chuan[1,2], HU Minjie[1,2], LI Shouzhong[1,2], ZHOU Lifeng[3], NING Qiurui[1,2], YANG Xianyu[1,2], QI Zhijuan[4]

(1. *College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007; 2. *Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou* 350007; 3. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100; 4. *Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi* 712100)

Abstract: The responses of maize photosynthesis, yield and water use efficiency to different drip irrigation amount at different growth stages under full film mulching were investigated by a field experiment in the Hetao Irrigation District, China. The experiment consisted of 3 treatments, i. e. low (90 mm), medium (135 mm) and high (180 mm) drip irrigation amount with full film mulching, respectively. Except jointing stage, the maize leaf photosynthetic rate P_n, transpiration rate T_r and stomatal conductance G_s under high and medium drip irrigation treatments were significantly higher than those under low drip irrigation ($P<0.05$), while no significant differences were observed between high and medium drip irrigation treatments. Leaf water use efficiency (LWUE) under low drip irrigation was significantly higher than that under high drip irrigation ($P<0.05$), and under high drip irrigation, LWUE at jointing stage was significantly higher than all other growth stages. The diurnal variations of maize leaf photosynthetic rates, transpiration rates, stomatal conductance and intercellular CO_2 concentrations at different growth stages were found under all drip irrigation amounts. Photosynthesis range, peak height and peak time in the diurnal course with high and middle drip irrigation were significantly different from those with low drip irrigation. The survival rates, kernel number, 1000-grain weight and yield of maize with high and medium drip irrigation were significantly higher

收稿日期：2017-01-19
资助项目：国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2013AA102904-4)
第一作者：姜良超(1990—)，男，硕士研究生，主要从事植物生理生态研究。E-mail：hi_jianglc@163.com
通信作者：胡敏杰(1988—)，男，博士，主要从事生态地理与植物生理生态研究。E-mail：mjhu0014@163.com

than those of low drip irrigation treatment ($P<0.05$). The difference of high and medium drip irrigation treatments with full film mulching on the maize ear and yield was statistically insignificant, indicating that high drip irrigation amount was not necessary under full film mulching for the maize yield increase in the Hetao Irrigation District. This study could provide a theoretical basis for improving crop photosynthesis under drip irrigation in the Hetao Irrigation District, and thus enhance crop yield and water use efficiency.

Keywords: full film mulching; drip irrigation amount; photosynthetic characteristics; yield; maize; Hetao Irrigation District

土壤水分影响作物生长发育,也是影响作物产量提高的主要限制因子[1],提高水分利用效率是旱地农业节水增产研究的焦点[2]。膜下滴灌,即在滴灌带或滴灌毛管上覆盖一层地膜,是地膜覆盖与滴灌技术相结合的一种新型节水灌溉技术,具有增温保墒、调节水肥、增产增收等特点[3]。地膜覆盖按覆盖面积可分为地膜完全覆盖(全膜覆盖)和地膜部分覆盖(半膜覆盖),其中,全膜覆盖能大幅度提高地温,降低土壤水分无效蒸发,有效协调土壤蓄水与作物生长的需水矛盾[4]。当前,关于覆膜的研究主要集中在其减蒸增温效应方面,研究对象多见于农田土壤,如强小嫚等[5]研究表明,液膜覆盖能有效阻挡土壤热量向大气扩散,使土壤热通量增大,能有效抵抗干旱逆境从而达到节水增产效果;刘胜尧等[6]通过田间对比试验发现,玉米生育前期覆膜较裸地增温1～3 ℃,延长生育期约5.9～10.7天,自播种到成苗期覆膜保水效应显著。而在覆膜对作物生理生态的影响方面,相关研究还较少,结果并不一致。一般认为,覆膜可以增加太阳辐射的反射率和空气阻力,减少热量和水汽的散逸,从而增加作物叶面积和叶绿素含量,增强光合速率,提高作物光合能力[7]。孟凡超等[2]基于开顶式生长箱试验证实,适量灌溉促进了玉米全生育期的光合作用,提高了籽粒产量。但也有研究认为,长期覆膜导致膜下地温过高也会加速作物生育后期叶片早衰、降低作物光合叶面积和光合机构活性等,从而降低玉米叶片光合能力[8]。此外,覆膜对作物产量和水分利用效率也有重要影响。张俊鹏等[9]研究发现,相对于无覆盖处理,地膜和秸秆覆盖处理提高了夏玉米的灌浆速率、产量和水分利用效率。光合作用是作物生长发育和干物质形成的重要基础,增加作物产量根本途径还是需要依靠改善其光合作用,提高叶片光能转化效率[10]。但目前关于膜下滴灌,尤其是覆膜和滴灌交互效应对作物光合生理生态的研究还缺乏更深入合理的科学解释。因此,本研究探讨了不同膜下滴灌量对春玉米不同生育期光合特征的影响,旨在为揭示膜下滴灌对作物生长及产量形成的影响提供机理性依据。

河套灌区地处我国干旱半干旱地区,水分条件是限制当地农作物生长发育的主要因素[11]。河套灌区农业发展主要依赖引黄灌溉,但随着黄河来水量的减少,水资源供需矛盾日益尖锐,因此制定合理的节水灌溉措施,提高作物水分利用效率是当地农业高产稳产和可持续发展的重要途径[12]。玉米作为河套灌区第二大粮食作物,是一种高耗水的旱地作物,如何在不同生育期内采取有效的栽培方式和灌溉技术对于提高灌溉效率、实现节水高产具有重要意义[13-14]。近年来,膜下滴灌技术以其增温保墒、降低无效蒸发、改善土壤水热条件、提高净光合能力等优点在河套灌区得到广泛推广[15-16],已成为改善旱区农田土壤水热条件和作物产量的主要节水栽培措施。本文结合河套灌区农业生产特点,采用膜下滴灌技术,通过设置全膜覆盖和不同滴灌量组合,研究玉米不同生育时期光合特征变化规律,明确不同膜下滴灌量处理对玉米产量和水分利用效率的影响,旨在揭示膜下滴灌技术的增产效应及内在机理,以期为旱区农业高产节水栽培技术发展提供理论参考和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验布设在内蒙古巴彦淖尔市水利科学研究所曙光试验站(40°43′23″N,107°13′22″E)。研究区属于典型温带大陆性干旱半干旱气候,年均日照时数3 189 h,年均气温6.9 ℃,年均无霜期130～150 d,年均降水量约130～210 mm,年均蒸发量约2 100～2 300 mm[17]。试验地土壤为黄河灌淤土,0—120 cm土壤持水量23.85%,土壤容重1.49 g/cm^3,耕作层有机质含量7.26 g/kg[16]。

1.2 试验设计

2014年4月按随机区组布设试验,共设计3个试验处理:全覆膜低滴灌量(90 mm,DQ)、全覆膜中滴灌量(135 mm,ZQ)和全覆膜高滴灌量(180 mm,GQ)处理。每个处理设3个重复,共9个小区,各小区面积为48 m^2(12 m×4 m)。采用滴灌管道输送地下水,通过高精密度水表控制滴灌水量(表1)。

供试玉米品种为西蒙8号,地膜为透明高压聚乙烯膜,厚度8 μm。采用“一膜一管两行”及宽窄行的种植方式,窄行和宽行行距分别为20 cm和80 cm,种植株距30 cm。4月24号播种并覆膜,人工点播方式播种,播种深度5 cm,5月20号出苗,9月中旬测

产。种植前施底肥，施肥强度为$(NH_4)_2HPO_4$ 300 kg/hm^2。在拔节期和抽雄期追施氮肥，玉米全生育期进行常规田间管理。

表 1　试验小区不同处理下玉米灌水制度

单位：mm

处理	灌水量				灌水总量
	苗期	拔节期	抽雄期	灌浆期	
DQ	10	36	24	20	90
ZQ	15	54	36	30	135
GQ	20	72	48	40	180

注：灌水量(mm)为灌溉量(m^3)与灌溉面积(m^2)的比值。

1.3　不同生育时期玉米叶片光合参数测定

分别于玉米拔节期(6 月上旬)、吐丝期(7 月下旬)、灌浆期(8 月上旬)和乳熟期(8 月下旬)，选取各生育期连续 3 天晴朗少云天气，利用便携式光合作用测定仪(Li-COR 6400，USA)在每个试验小区选取 3 株健康玉米植株进行挂牌跟踪测定。测定部位在玉米拔节期为最大完全展开叶，其他时期均为穗位叶。每天于 6:00—18:00，每隔 2 h 测定各处理玉米叶片光合指标日变化：净光合速率 P_n、蒸腾速率 T_r、胞间 CO_2 浓度 C_i、气孔导度 G_s，测定时放置缓冲瓶避免空气 CO_2 波动影响，仪器气体流速为 600 mmol/s，并保持叶室与自然光线垂直以避免相近玉米叶片遮挡造成光源差异。每个测定叶片记录数据 3 次，取平均值作为该时刻测定值，取 3 天平均值为该轮玉米光合日变化参数值。

气象参数(3 个重复)同步于光合指标测定时间、光合有效辐射、大气温度和空气相对湿度等。同时，利用 WP4-C 露点水势仪测定不同生育时期玉米叶片水势(3 个重复)。

1.4　水分利用效率的计算

根据测定的玉米净光合速率和蒸腾速率计算叶片水分利用效率 LWUE(Leaf Water Use Efficiency)，计算公式为：

$$\mathrm{LWUE}=\frac{P_n}{T_r}$$

式中：P_n 和 T_r 分别为玉米叶片净光合速率和蒸腾速率的测定值。

1.5　数据处理与分析

利用 EXCEL 2007、SPSS 19.0 软件对数据进行统计分析，利用 Origin 8.6 对数据作图。同一生育时期不同处理以及同一处理不同生育时期间各光合特征指标的差异性检验使用 SPSS 19.0 中的单因素方差分析(ANOVA)进行。数值为平均值±标准误差。

2　结果与分析

2.1　主要气象因子日变化

不同生育时期内，河套灌区光合有效辐射日变化均呈单峰曲线，最高值均出现在 12:00，最低值出现在 6:00 和 18:00(图 1a)。各生育时期光合有效辐射日平均值分别为(915.31±55.50)，(625.74±52.56)，(743.94±47.07)，(999.12±63.86) μmol/(m^2·s)；大气温度在不同生育时期具有相似的日变化特征，最低值出现在 6:00，然后急剧增加，在 12:00—14:00 达到峰值，各生育时期气温日平均值分别为(32.26±0.22)，(35.52±0.30)，(31.08±0.30)，(32.01±0.35) ℃(图 1b)；空气相对湿度在不同生育时期具有与气温和光合有效辐射相反的日变化趋势，高值出现在 6:00 和 8:00，最低值均出现在 12:00—14:00，各生育时期的平均湿度分别为(26.75±0.41)%，(46.29±0.87)%，(39.03±0.68)% 和(31.19±0.58)%(图 1c)。方差分析显示，吐丝期气温和空气相对湿度均显著高于其他 3 个生育时期($P<0.05$)；乳熟期光合有效辐射显著高于吐丝期和灌浆期($P<0.05$)。

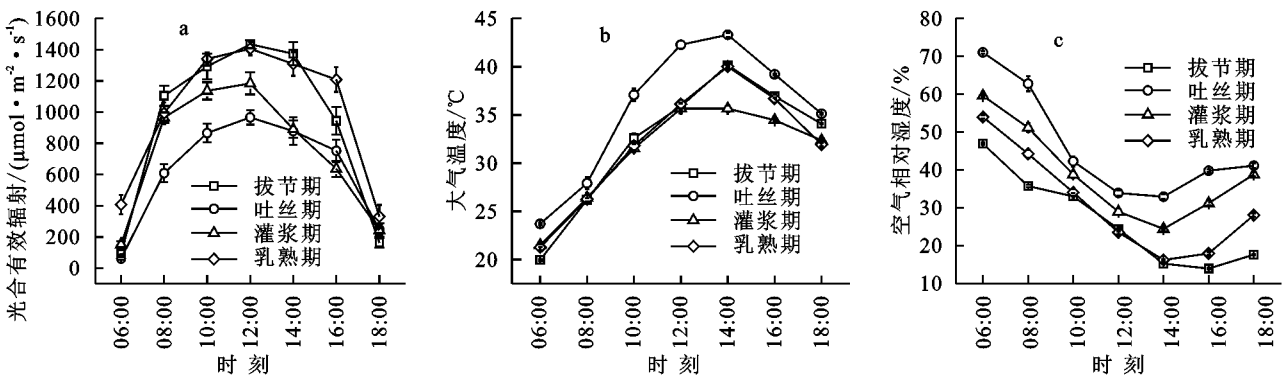


图 1　玉米生育期主要气象因子日变化

2.2　不同生育时期玉米叶片光合特征日变化

2.2.1　拔节期　低滴灌量和高滴灌量下，玉米净光合速率最高值均出现在 8:00，而后波动降低，最低值出现在 18:00；中滴灌量下在 6:00 后逐渐升高，最高值出现在 10:00，较低和高滴灌量有所延迟，而后逐渐下降(图 2a)；蒸腾速率在中滴灌量和高滴灌量下具有相似的日变化特征，呈现倒“U”型曲线，最高值出现在 14:00，最低值在 6:00 和 18:00，在低滴灌量下具有波动变化的特征，

最高值出现在 12:00,日变化峰值较中滴灌量和高滴灌量处理提前,最低值也出现在 6:00 和 18:00,并在 14:00 出现明显的低峰值(图 2b);气孔导度最高值在低滴灌量和高滴灌量下均出现在 8:00,在中滴灌量下出现在 10:00,而后均随时间逐渐下降,在18:00达到最低(图 2c);胞间 CO_2 浓度在不同处理下具有相似的日变化特征,最低值出现在 12:00—14:00,最高值出现在 6:00 和 18:00(图 2d)。

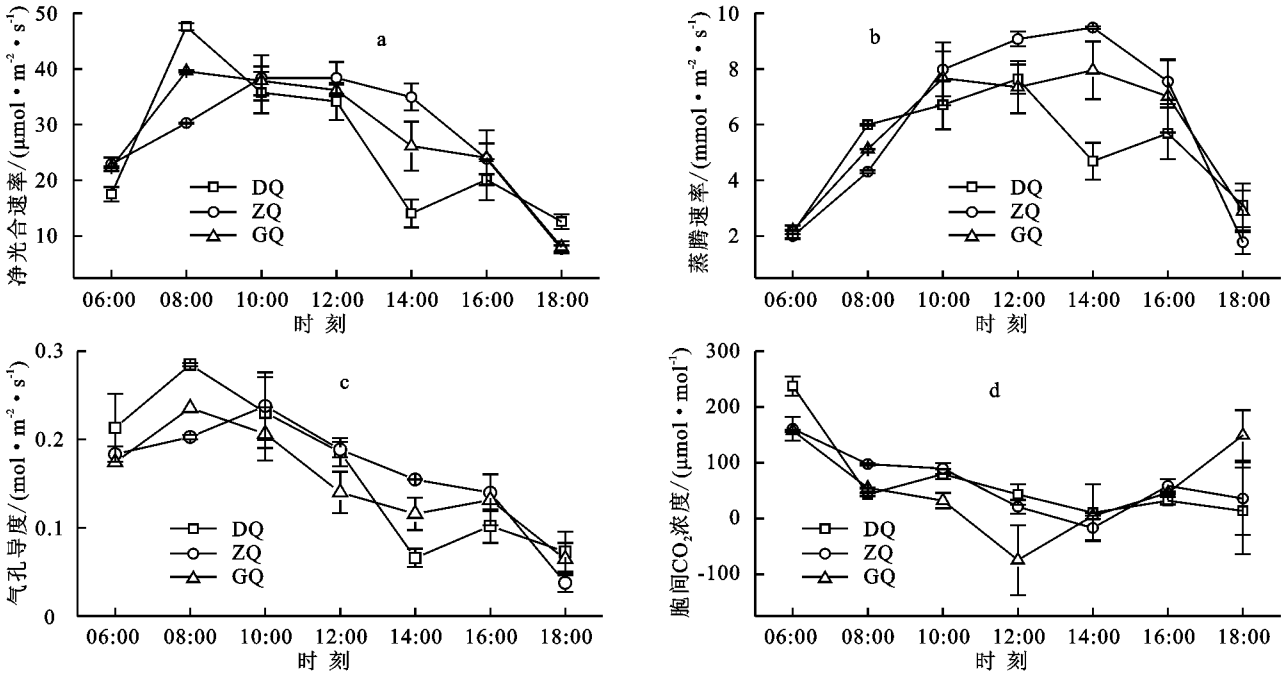


图 2 不同滴灌量下拔节期玉米叶片光合特征日变化

2.2.2 吐丝期 吐丝期玉米叶片净光合速率在不同滴灌量下具有相似的日变化特征,最高值出现在中午(10:00—14:00),最低值出现在早晚(6:00 和 18:00),并且高滴灌量处理下的叶片净光合速率日变化幅度显著高于低滴灌量和中滴灌量处理(图 3c);蒸腾速率日变化呈明显的单峰曲线,自 6:00 后迅速增加,在 12:00—14:00 达到最高值,而后逐渐降低,最低值出现在 6:00 和 18:00;各处理下的蒸腾速率日变化幅度依次表现为高滴灌量>中滴灌量>低滴灌量(图 3b);气孔导度日变化动态在低和中滴灌量处理下较为平稳,无明显变化规律,而在高滴灌量下呈倒"V"型变化趋势,最高值出现在 14:00,最低值出现在6:00 和 18:00(图 3c);胞间 CO_2 浓度具有与净光合速率相反的变化趋势,最高值出现在 6:00,而后随时间波动降低,中滴灌量和高滴灌量下具有多峰值的特征,在 6:00,12:00 和 18:00 分别出现峰值(图 3d)。

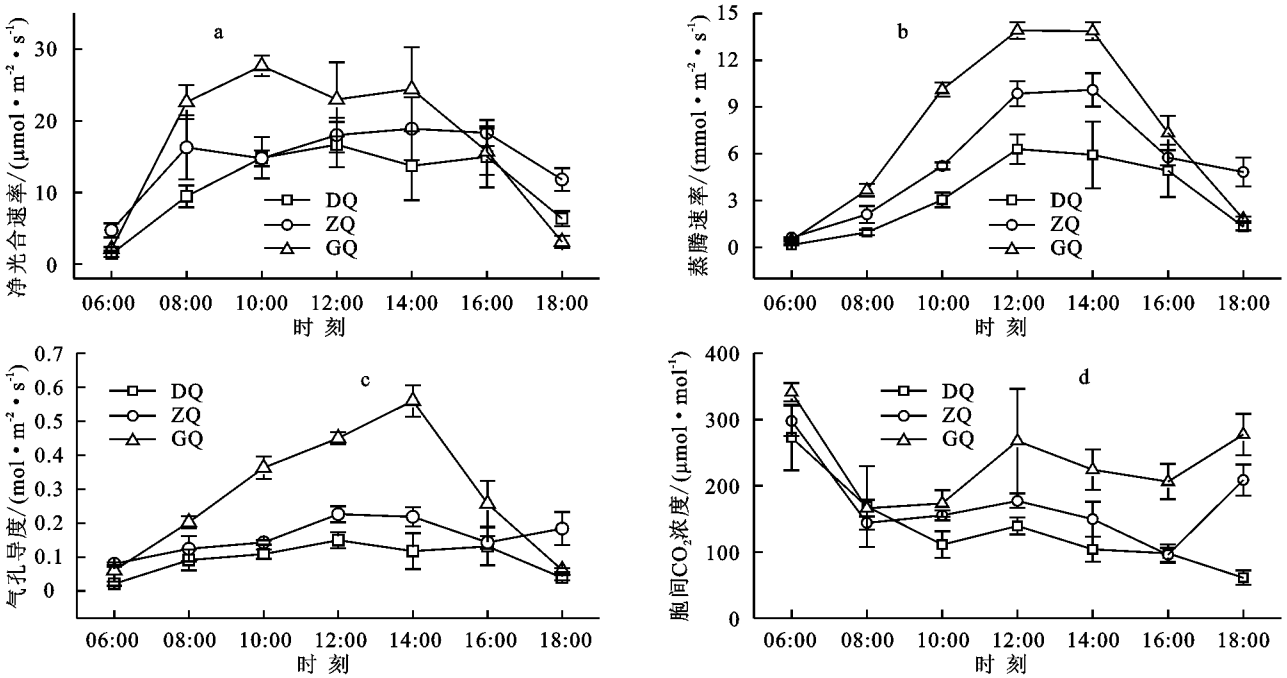


图 3 不同滴灌量下吐丝期玉米叶片光合特征日变化

2.2.3　灌浆期　灌浆期玉米叶片净光合速率在不同滴灌量下日变化特征较为复杂,低滴灌量下日变化较为平缓,具有波动变化的特征,无明显日变化规律;中滴灌量和高滴灌量下也表现为波动变化的特征,但大致表现为中午最高,早晚最低,并且高滴灌量在 14:00 出现明显的低峰值(图 4a)。蒸腾速率和气孔导度在低滴灌量下自 6:00 后缓慢增加,在 14:00 作用达到最高值;中滴灌量和高滴灌量下具有明显的日变化特征,最高值均出现在 12:00,最低值在 6:00 和 18:00;并且高滴灌量下气孔导度呈现多峰值的特点,分别在 12:00 和 16:00 出现两个高峰值,而在 14:00 出现明显的低峰值(图 4b、c)。不同滴灌量下胞间 CO_2 浓度最高值均出现在 6:00,而后迅速降低,自 8:00 后变化平稳,高滴灌量下在 18:00 出现明显的上升(图 4d)。

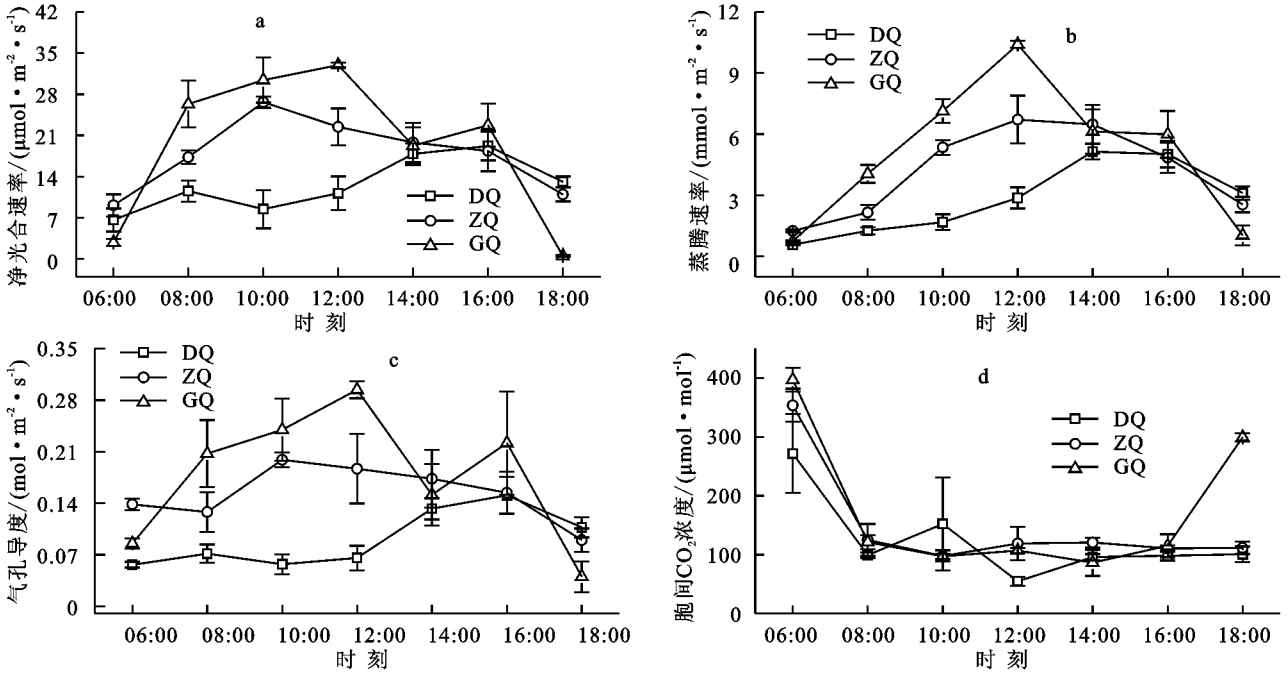


图 4　不同滴灌量下灌浆期玉米叶片光合特征日变化

2.2.4　乳熟期　乳熟期玉米叶片净光合速率日变化趋势在不同滴灌量下具有波动变化,无明显日变化规律,高滴灌量下的日变化幅度高于低滴灌量和中滴灌量处理(图 5a)。蒸腾速率日变化在低滴灌量处理下较为平缓,中滴灌量处理下自 6:00 逐渐升高,在 16:00 达到最高,而后迅速下降;高滴灌量下最高值出现在 10:00—16:00,最低值出现在 6:00;玉米叶片蒸腾速率日变化幅度在中滴灌量和高滴灌量下显著高于低滴灌量(图 5b)。气孔导度日变化趋势在低滴灌量和中滴灌量下较为平稳,而在高滴灌量下呈双峰曲线,在 10:00 和 16:00 分别出现峰值(图 5c)。不同滴灌量下胞间 CO_2 浓度最高值均出现在 6:00,而后迅速下降并趋于平稳,但在 18:00 出现上升趋势(图5d)。

2.3　不同生育时期玉米叶片光合特征

拔节期不同滴灌量下玉米叶片净光合速率无显著差异,吐丝期和灌浆期净光合速率在高滴灌量下显著高于低滴灌量($P<0.05$),乳熟期净光合速率在中滴灌量和高滴灌量处理下均显著高于低滴灌量处理($P<0.05$)(图 6)。不同滴灌量下拔节期玉米净光合速率均显著高于其他生育时期($P<0.05$)。除拔节期外,蒸腾速率和气孔导度在各生育时期均表现为随滴灌量的增加而增大。拔节期玉米叶片蒸腾速率和气孔导度在不同滴灌量下均无显著差异;吐丝期、灌浆期和乳熟期玉米蒸腾速率均显著高于低滴灌量($P<0.05$),灌浆期和乳熟期气孔导度在中滴灌量和高滴灌量处理下均显著高于低滴灌量($P<0.05$)。低滴灌量处理下,拔节期蒸腾速率和气孔导度均显著高于其他生育时期($P<0.05$)。吐丝期胞间 CO_2 浓度在高滴灌量处理下显著高于低滴灌量和中滴灌量处理($P<0.05$),而其他生育时期不同滴灌量对胞间 CO_2 浓度影响均不显著。不同滴灌量下,拔节期胞间 CO_2 浓度均显著低于其他生育时期($P<0.05$)。

2.4　不同滴灌量对玉米叶片水分利用效率和叶水势的影响

拔节期玉米水分利用效率在不同滴灌量下具有相似的日变化规律,均表现为随时间逐渐降低,最高值均出现在 6:00(图 7a)。吐丝期和灌浆期水分利用效率最高值均出现在 6:00—8:00,而后逐渐降低,不同处理间依次表现为低滴灌量>中滴灌量>高滴灌量(图 7b、c)。乳熟期玉米水分利用效率在低滴灌量和中滴灌量处理下均表现为随时间逐渐降低,最高值出现在 6:00,并在 18:00 出现上升趋势;高滴灌量处理下最低值出现在 6:00,在 8:00 达到最高,呈现波

动变化特征(图 7d)。吐丝期和乳熟期玉米叶片水分利用效率日变化幅度高于拔节期和灌浆期。方差分析显示,除拔节期外,低滴灌量处理下的水分利用效率在其他生育期均显著高于高滴灌量($P<0.05$),并且拔节期水分利用效率在高滴灌量下显著高于其他生育期($P<0.05$)。

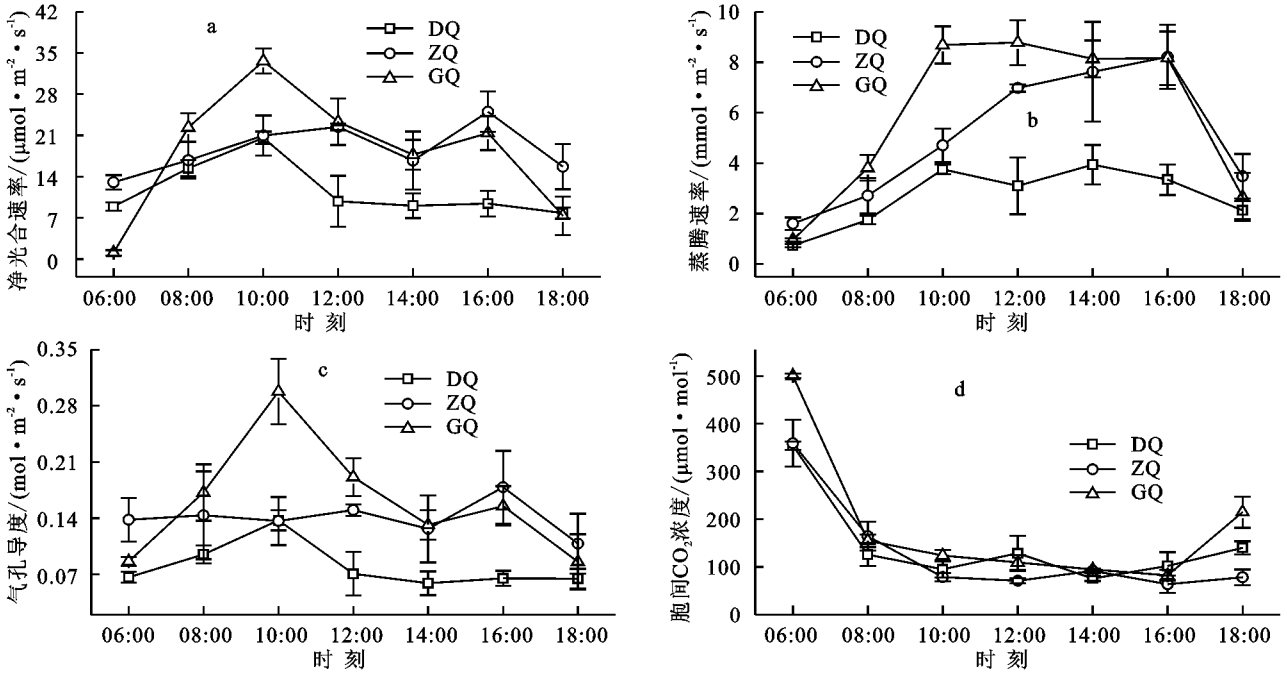
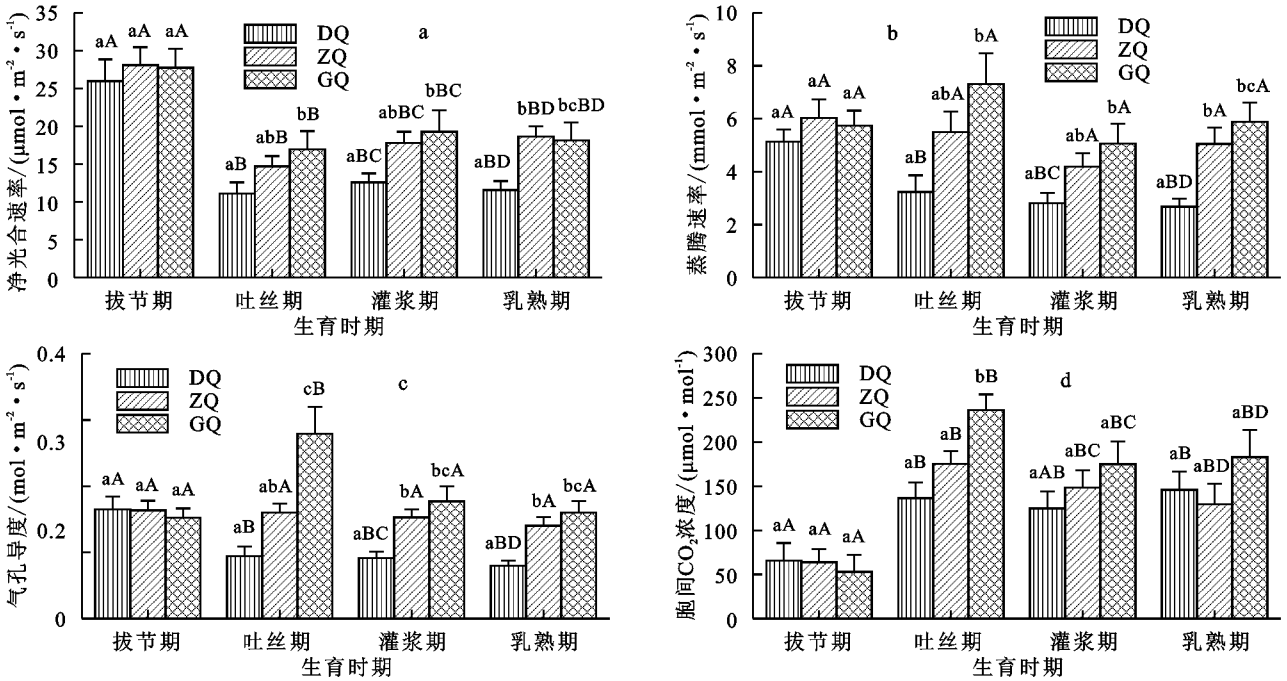


图 5 不同滴灌量下乳熟期玉米叶片光合特征日变化



注:图中不同小写字母表示同一生育时期不同处理间差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一处理不同生育时期差异显著($P<0.05$);$n=21$。

图 6 不同滴灌量下玉米关键生育期叶片光合特征

拔节期和灌浆期玉米叶片水势在高滴灌量处理下均显著高于低滴灌量($P<0.05$),中滴灌量处理与低滴灌量和高滴灌量相比差异均不显著(表 2)。吐丝期和乳熟期玉米叶片水势在不同滴灌量下均无显著差异。低滴灌量处理下,灌浆期和乳熟期玉米叶片水势显著高于拔节期和吐丝期($P<0.05$);中滴灌量处理下,玉米叶片水势除在吐丝期和乳熟期不存在显著差异外,其他各生育时期间均存在显著差异($P<0.05$);高滴灌量处理下,玉米叶片水势除在拔节期和乳熟期不存在显著差异外,其他各生育时期间均存在显著差异($P<0.05$)。

2.5 不同滴灌量对玉米产量的影响

玉米果实数量在高滴灌量处理下较低滴灌量和中滴灌量分别增加了 3.70%和 1.58%,但不同处理

间无显著差异（表 3）。玉米存果率、穗粒数和千粒重在高滴灌量和中滴灌量处理下均显著高于低滴灌量（$P<0.05$），但高滴灌量和中滴灌量处理间并不存在显著差异。高滴灌量和中滴灌量处理下玉米产量显著高于低滴灌量（$P<0.05$），分别增加了 48.77%和59.48%，但中滴灌量和高滴灌量间并不存在显著差异。高滴灌量和中滴灌量处理下玉米存果率、穗粒数和千粒重的提高，是产量增加的主要原因。相对于中滴灌量而言，高滴灌量对玉米果穗性状和产量的影响并不显著，这表明高滴灌量并不是一种节水增产的优选模式。

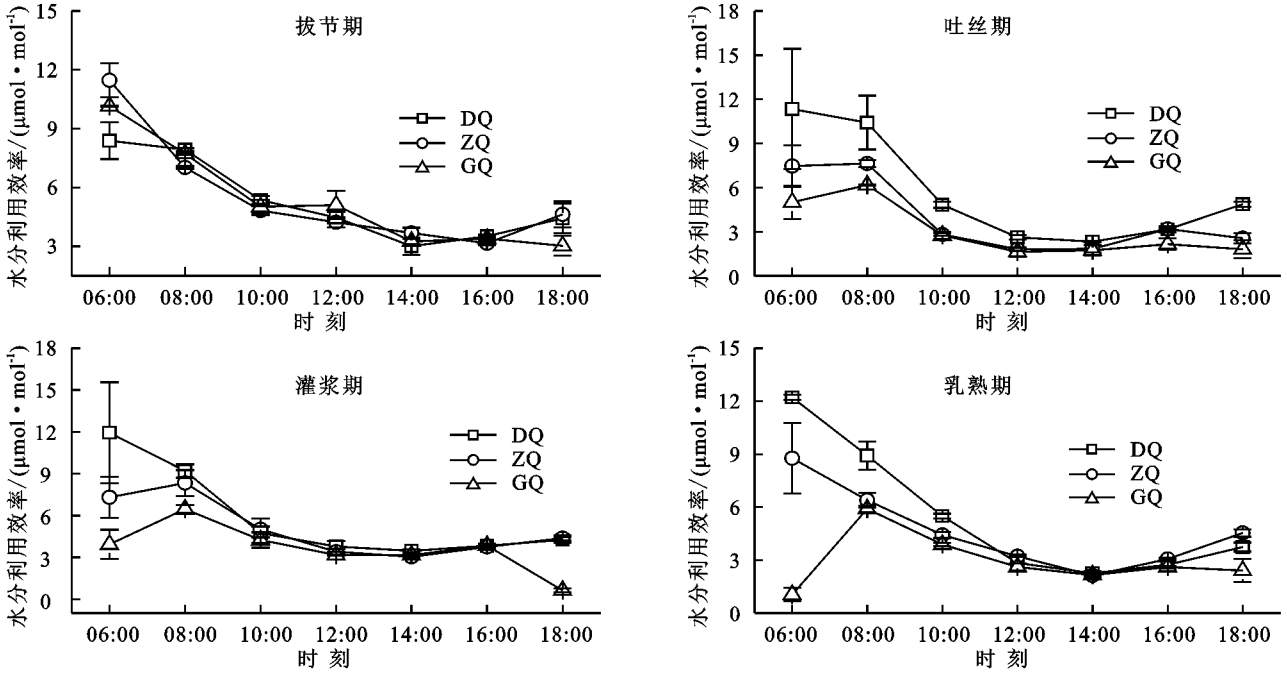


图 7　不同滴灌量下玉米关键生育期叶片水分利用效率日变化

表 2　不同滴灌量对玉米叶片水势的影响

处理	拔节期	吐丝期	灌浆期	乳熟期
DQ	−2.29±0.10aA	−2.02±0.37aA	−1.12±0.04aB	−1.76±0.22aAB
ZQ	−1.93±0.13abA	−1.37±0.15aB	−0.95±0.05abC	−1.50±0.21aBD
GQ	−1.83±0.14bA	−1.93±0.42aB	−0.80±0.11bC	−1.68±0.28aA

注：表中数字后不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著（$P<0.05$）；不同大写字母表示同一处理不同生育时期间差异显著（$P<0.05$）；$n=3$。

表 3　不同滴灌量对玉米果穗性状及产量的影响

处理	果实数量/(株·hm^{-2})	存果率/%	穗粒数(个)	千粒重/g	产量/(kg·hm^{-2})
DQ	62100.15±472.58a	93.10345a	534.67±49.87a	292.13±29.52a	9701.88±918.90a
ZQ	63400.29±862.17a	95.05247b	650.00±28.69b	375.07±7.10b	15471.97±871.28b
GQ	64400.91±750.56a	96.55172b	620.00±38.94b	361.96±14.42b	14432.13±739.26b

注：表中数字后不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P<0.05$）；$n=3$。

3　讨 论

3.1　河套灌区玉米叶片光合特征日变化

作物光合日变化是作物物质积累与生理代谢的基本单元，也是分析作物生长和代谢过程对外部环境响应的重要途径[18]。当土壤受到水分胁迫时，作物光合生理特性会产生一系列调整以适应水分条件的变化。刘祖贵等[19]研究发现，土壤水分状况会影响玉米生理指标的峰值高低和出现早晚，土壤含水量的降低，导致玉米净光合速率、蒸腾速率等光合指标的峰值时间提前；于文颖等[20]也发现水分胁迫影响了玉米叶片正常光合日变化规律，使得净光合速率日变化峰值提前。本研究中，不同滴灌量处理下河套灌区玉米各生育时期叶片净光合速率和蒸腾速率均具有明显的日变化特征（图 2－5），大致呈现出倒“U”型变化曲线，即中午较高，早晚较低。这主要是因为在一定光合有效辐射范围内，净光合速率和蒸腾速率均具有随光照强度和光合有效辐射的增加而增强的趋势[21]，净光合速率、蒸腾速率与光合有效辐射的极显著正相关关系也证实了这一点（表 4）。不同滴灌量对玉米不同生育时期叶片净光合速率和蒸腾速率日变化具有重要影响，大致表现为滴灌量越低光合和蒸腾速率的峰值越低，日变化幅度越小（图 2～图 5），因为玉米受到水分胁迫后，叶片气孔阻力增大，这时作

物会通过关闭部分气孔以减少蒸腾作用，阻碍了大气 CO_2 在叶肉细胞中的扩散，降低了玉米叶片光合作用能力[22]。不同滴灌量对不同生育时期玉米叶片气孔导度的影响大致表现为滴灌量越高，气孔导度的峰值越高，日变化幅度越大，但具有明显的波动变化特征（图2～图5）。气孔调节能力的有效程度表征了作物适应干旱胁迫的程度，当受到水分胁迫时，作物会选择关闭或暂时关闭部分气孔来减少水分散失，提高叶片尺度水分利用效率[21]。不同滴灌量处理下不同生育时期玉米叶片胞间 CO_2 浓度均表现为早晚较高，中午较低，不同滴灌量并没有显著影响叶片胞间 CO_2 浓度的日变化特征。

3.2 不同滴灌量对玉米叶片光合作用的影响

土壤水分是土壤—作物—大气间水热循环的重要组成部分，是作物生长发育的重要限制性因素，尤其在降雨量少且蒸发量高的干旱和半干旱地区[23]。膜下滴灌技术由于其明显的增温、保墒和调水效用，已成为我国北方旱区农业生产的主要节水耕作模式。本研究中，除拔节期外，高滴灌量处理下玉米各生育期的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均显著高于低滴灌量，水分条件是影响玉米叶片光合生理特征的关键因素（图6）。光合作用作为作物产量形成的重要生理生态过程对土壤水分变化反应敏感，水分胁迫主要通过气孔和非气孔因素调控叶片净光合速率[21]。土壤水分不足时，作物根系感受胁迫，合成脱落酸作为信号传递物质传输到叶肉细胞，调节气孔导度，减少大气 CO_2 进入，影响作物光合能力[24-25]。当水分充足时，作物叶面积指数增加，相应遮荫面积增加，表层土壤温度降低，从而影响作物光合能力[26]。相关分析也显示（表4），玉米叶片净光合速率、蒸腾速率在不同生育时期、不同滴灌量处理下均与叶片气孔导度存在极显著正相关关系（$P<0.01$），进一步证实了气孔限制是影响玉米光合作用的主要调控因素。除拔节期外，低滴灌量处理下玉米叶片水分利用效率均显著高于高水处理（$P<0.05$，图7），这与其对净光合速率、蒸腾速率的影响相反。受到水分胁迫时，玉米叶片净光合速率、蒸腾速率等为适应缺水环境而降低，玉米叶片转而利用大量胞间 CO_2 进行光合作用，提高叶片光合水分利用效率[20,22]。由此可知，当受到水分胁迫时，作物会通过降低叶片净光合速率，提高叶片水分利用效率来主动适应环境胁迫。

表4 不同生育时期不同滴灌量玉米光合特征与气象因子间的相关关系

生育时期	处理	指标	P_n	T_r	G_s	C_i	Tair	RH	PAR
拔节期	低水	P_n	1	0.705**	0.830**	−0.066	−0.281	0.423	0.559**
		T_r	0.705**	1	0.508*	−0.271	0.350	−0.137	0.765**
	中水	P_n	1	0.791**	0.835**	−0.121	0.217	0.068	0.738**
		T_r	0.791**	1	0.462*	−0.426	0.719**	−0.503*	0.754**
	高水	T_r	1	0.627**	0.805**	−0.534*	0.022	0.228	0.639**
		P_n	0.627**	1	0.307	−0.542*	0.690**	−0.504*	0.831**
吐丝期	低水	P_n	1	0.888**	0.910**	−0.366	0.603**	−0.575**	0.499*
		T_r	0.888**	1	0.879**	−0.242	0.760**	−0.725**	−0.459*
	中水	P_n	1	0.695**	0.706**	−0.764**	0.622**	−0.587**	0.826**
		T_r	0.695**	1	0.858**	−0.425	0.917**	−0.869**	0.828**
	高水	P_n	1	0.749**	0.726**	−0.754**	0.593**	−0.538*	0.885**
		T_r	0.749**	1	0.958**	−0.285	0.895**	−0.785**	0.873**
灌浆期	低水	P_n	1	0.883**	0.918**	−0.583**	0.553**	−0.572**	0.272
		T_r	0.883**	1	0.911**	−0.459*	0.799**	−0.841**	0.341
	中水	P_n	1	0.822**	0.797**	−0.514*	0.469*	−0.478*	0.868**
		T_r	0.822**	1	0.765**	−0.453*	0.771**	−0.814**	0.671**
	高水	P_n	1	0.896**	0.924**	−0.801**	0.528*	−0.534*	0.900**
		T_r	0.896**	1	0.874**	−0.740**	0.737**	−0.733**	0.843**
乳熟期	低水	P_n	1	0.490*	0.945**	−0.340	−0.222	0.325	0.416
		T_r	0.490*	1	0.478*	−0.727**	0.678**	−0.610**	0.598**
	中水	P_n	1	0.788**	0.791**	−0.345	0.370	−0.399	0.691**
		T_r	0.788**	1	0.583**	−0.508*	0.786**	−0.788**	0.791**
	高水	P_n	1	0.834**	0.912**	−0.741**	0.459*	−0.413	0.853**
		T_r	0.834**	1	0.708**	−0.785**	0.799**	−0.746**	0.913**
全生育时期	低水	P_n	1	0.754**	0.889**	−0.386**	0.051	−0.253*	0.449**
		T_r	0.754**	1	0.716**	−0.454**	0.581**	−0.579**	0.488**
	中水	P_n	1	0.675**	0.663**	−0.510**	0.244*	−0.440**	0.632**
		T_r	0.675**	1	0.656**	−0.432**	0.786**	−0.681**	0.657**
	高水	P_n	1	0.659**	0.563**	−0.740**	0.310**	−0.400**	0.771**
		T_r	0.659**	1	0.821**	−0.394**	0.789**	−0.507**	0.728**

注：* 和 ** 分别表示在0.05和0.01水平上显著相关；P_n 为净光合速率；T_r 为蒸腾速率；G_s 为气孔导度；C_i 为胞间 CO_2 浓度；Tair 为气温；RH 为相对湿度；PAR 为光合有效辐射；$n=21$。

3.3　不同滴灌量对玉米产量及产量构成的影响

光合作用为作物产量的形成提供了主要的物质基础，90%以上的干物质来源于光合生产[27]。刘洋等[28]分析认为，膜下滴灌玉米增产原因主要是覆膜可以及时满足作物对水分和养分的需求，提高水分和肥料利用率，促进氮素等养分的吸收利用和干物质的积累；齐智娟等[16]认为，全膜覆盖促进了土壤热量传递和积聚，避免热量散失，且地表昼夜温差较大，有利于干物质的积累和转移，能够促进作物生长发育和产量形成。本研究中，高、中滴灌量处理下玉米产量均显著高于低滴灌量（$P<0.05$），这主要是高、中滴灌量处理下玉米光合能力、存果率、穗粒数和千粒重的增加所致（图 6，表 3）。膜下滴灌通过提高玉米净光合速率和水分利用效率，加快了玉米生长发育进程，使玉米株高、叶面积、地上生物量等在开花期以前显著增加，最终使覆膜处理下玉米穗长、穗粒数、产量等指标显著提高[29]。此外，相对于中滴灌量而言，高滴灌量处理对玉米果穗性状和产量影响并不显著，这表明从节水增产角度来看，高滴灌量并不是一种优选模式，这与其他作物研究的结论相类似。唐光木等[30]研究认为，在一定灌溉范围（3 000～6 000 m^3/hm^2），玉米产量及产量构成随灌溉量的增加而增大，但超过 6 000 m^3/hm^2 后灌溉量对产量无显著影响；王连君等[31]研究发现，当灌水量达到一定阈值后，如果继续增加供水量，只会导致投入量增大，产量和品质却下降，认为这主要是灌水量过大导致根际土壤养分浓度被稀释，且伴随着营养元素的流失，进而导致作物能够吸收利用的养分有限，最终影响了作物的干物质积累。因此，合理的膜下滴灌量对玉米的增产、节水、提高水分利用率等至关重要。

4　结 论

（1）不同滴灌量处理下，玉米叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及胞间 CO_2 浓度等在不同生育时期均具有明显的日变化特征。高、中滴灌量处理下各光合生理指标的日变化幅度、峰高、峰值出现时间等均高于低滴灌量处理。

（2）除拔节期外，高滴灌量和中滴灌量处理下玉米叶片净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等均显著高于低滴灌量处理（$P<0.05$），而高滴灌量与中滴灌量处理间并无显著差异。低滴灌量处理下，玉米叶片水分利用效率显著高于高滴灌量处理（$P<0.05$）。

（3）高滴灌量和中滴灌量处理下玉米存果率、穗粒数、千粒重和产量等均显著高于低滴灌量处理（$P<0.05$）。相对于中滴灌量而言，高滴灌量处理对玉米果穗性状和产量的影响并不显著，这表明从节水增产角度来看，高滴灌量处理并不是一种优选模式。

参考文献：

[1]　张仁和，郑友军，马国胜，等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响[J]. 生态学报，2011，31(5)：1303-1311.

[2]　孟凡超，张佳华，郝翠，等. CO_2 浓度升高和不同灌溉量对东北玉米光合特性及产量的影响[J]. 生态学报，2015，35(7)：2126-2135.

[3]　张恒嘉，李晶. 绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J]. 农业机械学报，2013，44(10)：143-151.

[4]　柴守玺，杨长刚，张淑芳，等. 不同覆膜方式对旱地冬小麦土壤水分和产量的影响[J]. 作物学报，2015，35(5)：787-796.

[5]　强小嫚，周新国，李彩霞，等. 不同水分处理下液膜覆盖对夏玉米生长及产量的影响[J]. 农业工程学报，2010，26(1)：54-60.

[6]　刘胜尧，张立峰，李志宏，等. 华北旱地覆膜春玉米田水温效应及增产限制因子[J]. 应用生态学报，2014，25(11)：3197-3206.

[7]　高玉红，牛俊义，徐锐，等. 不同覆膜方式对玉米叶片光合、蒸腾及水分利用效率的影响[J]. 草业学报，2012，21(5)：178-184.

[8]　王若男，任伟，李叶蓓，等. 灌浆期低温对夏玉米光合性能及产量的影响[J]. 中国农业大学学报，2016，21(2)：1-8.

[9]　张俊鹏，孙景生，刘祖贵，等. 不同水分条件和覆盖处理对夏玉米籽粒灌浆特性和产量的影响[J]. 中国生态农业学报，2010，18(3)：501-506.

[10]　Murchie E H, Pinto M, Horton P. Agriculture and the new challenges for photosynthesis research[J]. New Phytologist, 2009, 181(3): 532-552.

[11]　武荣盛，吴瑞芬，侯琼，等. 内蒙古河套灌区春玉米苗期光温指标[J]. 应用生态学报，2015，26(1)：241-248.

[12]　樊金萍，张建丽，王婧，等. 节水灌溉对盐渍土盐分调控与土壤微生物区系的影响[J]. 土壤学报，2012，49(4)：835-840.

[13]　任中生，屈忠义，李哲，等. 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[J]. 水土保持学报，2016(5)：149-155.

[14]　Qi Z J, Zhang T B, Zhou L F, et al. Combined effects of mulch and tillage on soil hydrothermal conditions under drip irrigation in Hetao Irrigation District, China [J]. Water, 2016, 8(11): 504.

[15]　姬景红，李玉影，刘双全，等. 覆膜滴灌对玉米光合特性、物质积累及水分利用效率的影响[J]. 玉米科学，2015，23(1)：128-133.

[16]　齐智娟，冯浩，张体彬，等. 覆膜耕作方式对河套灌区土壤水热效应及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报，2016，32(20)：108-113.

[17]　范雅君，吕志远，田德龙，等. 河套灌区玉米膜下滴灌灌溉制度研究[J]. 干旱地区农业研究，2015，33(1)：123-129.

（下转第 319 页）