

秸秆覆盖和滴灌制度对冬小麦光合特性和产量的影响

张彦群¹, 王建东^{1*}, 龚时宏¹, 许迪¹, 孙继文^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048;
2. 山东理工大学资源与环境工程学院, 淄博 255049)

摘要: 确定不同滴灌和秸秆覆盖模式下的光合参数是理解其节水增产内因的基础。该研究通过4 a连续试验测定了覆盖和滴灌结合的6种处理(T1~T6分别表示低水覆盖、低水不覆盖、中水覆盖、中水不覆盖、高水覆盖和高水不覆盖处理)冬小麦旗叶的关键光合参数,并分析了光合参数处理间差异来源及其与作物产量的关系。结果表明:提高滴灌水量和覆盖处理能显著提高光合能力和最大羧化速率($P < 0.05$),而二者交互作用对光合参数影响不显著($P > 0.1$)。多重比较结果显示T5的光合参数最大($P < 0.05$);除2016年第一次测定外,T6和T3的相应值略低但与T5差异不显著($P > 0.1$);而T2的相应值则均显著低于T5($P < 0.05$),即高水处理下,覆盖与否对光合参数的影响不大,中水结合覆盖处理可使光合参数不显著降低,而低水处理下不覆盖则会使光合参数显著降低。处理间光合能力和最大羧化速率的差异能用叶片氮含量来解释,而所有年份的产量又均与光合能力和最大羧化速率分别线性相关($R^2 > 0.80$)。因此,通过测定叶片氮含量,可以推算光合能力和最大羧化速率,研究结果可为产量估算提供参考。

关键词: 作物; 灌水; 光合作用; 冬小麦; 秸秆覆盖; 叶片氮含量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.021

中图分类号: S161.4 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-12-0162-08

张彦群, 王建东, 龚时宏, 许迪, 孙继文. 秸秆覆盖和滴灌制度对冬小麦光合特性和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 162—169. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.021 <http://www.tcsae.org>

Zhang Yanqun, Wang Jiandong, Gong Shihong, Xu Di, Sun Jiwen. Effects of straw mulching and drip irrigation scheduling on photosynthetic characteristic and yield of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 162—169. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.12.021 <http://www.tcsae.org>

0 引言

华北平原是中国粮食主产区,该区小麦和玉米产量占全国粮食总产量的1/4^[1]。近年来,由于该地区水资源短缺和地下水超采严重,粮食作物节水灌溉工程和农艺措施逐步推进^[2]。地表滴灌将水分施于作物根区附近,具有降低土壤蒸发,提高作物水分利用效率的优势^[3]。秸秆覆盖是改善农田水土环境、降低土壤蒸发、提高作物产量采用的常见农艺措施^[4-5]。秸秆覆盖和地表滴灌结合模式下,节水增产优势发挥的生理基础仍需要明确。目前相关研究更多的是从相对表现的生物学指标,如作物产量、株高等方面来分析其优势^[6-7]。然而,作物产量的形成涉及到诸多生理过程,光合作用是产量形成的基础,从光合生理方面来解释产量差异来源,有利于试验结果的稳定性和可重复性,并为机理模型的构建奠定基础^[8]。此外,该地区现状研究中缺少对覆盖免耕滴灌条件下内在光合参数的系统测定,制约了其作物模型精度的提高^[9-10]。

光合生理调控研究在冬小麦光合的研究中还不够系统。目前,对冬小麦旗叶光合作用的研究大多局限于描述作物某一生育期或不同生育期中某一时刻的光合速率或光合速率日变化^[11-12],对光合速率变化的内因解释较少,且每次测定所处的光、温、湿环境各不相同,所得到的光合参数受到天气条件制约,不同种植区域、作物品种和肥料水平之间可比性较差^[13]。因此,有必要开展控制条件测定,量化旗叶的光合特征参数而非瞬时速率,并确定不同处理光合参数的差异来源,从生理水平解释滴灌制度和覆盖处理引起产量及水分利用效率差异的内因^[14-16]。小麦产量形成过程中,叶片从下到上逐渐衰老,冠层顶叶片,即旗叶的光合产物成为灌浆期同化物的主要来源^[17]。覆盖及灌溉模式可能会影响旗叶光合生理,进而导致产量的差别,光合生理参数又与旗叶生化特性有关,叶片氮含量是重要的旗叶生化特性之一^[18]。氮素是叶绿素的重要组成成分,叶绿素是光合作用进行的载体,光合速率与叶片氮含量常存在显著相关性^[19-20]。研究小麦旗叶光合特性及其影响因子对覆盖和滴灌处理的响应,对调控旗叶光合气体交换,稳定提高产量及水分利用效率具有积极的促进作用。

本研究选取华北平原冬小麦为研究对象,设置了不同滴灌和覆盖处理,2013-2016年连续4个生长季在冬小麦抽穗期后分别进行了两次旗叶光合光响应和CO₂响应曲线测定,获得了表观光量子传递效率、光合能力、最

收稿日期: 2016-11-03 修订日期: 2017-03-21

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题(2014BAD12B05); 中国水利科院基本科研业务费项目(ID0145B602017); 国家自然科学基金项目(51309250)

作者简介: 张彦群,女,河北冀州人,博士,高级工程师,主要从事农田水循环与作物高效用水生理调控研究。Email: zhangyq@iwhr.com

*通信作者: 王建东,男,湖南茶陵人,博士,教授级高级工程师,主要从事节水灌溉原理与技术研究。Email: wangjd@iwhr.com

大羧化速率、最大电子传递速率等关键参数, 比较了不同处理条件下光合参数的差异, 并同时测定旗叶氮含量, 以期解释水分和覆盖处理引起光合参数差异性, 进而揭示产量响应的光合生理基础, 并为该地区小麦作物模型参数确定提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在位于北京市大兴区 (39°39'N, 116°15'E) 的中国水利水电科学研究院农业节水灌溉试验站进行。试验站气候属典型的半干旱大陆性季风气候, 多年平均降雨量 540 mm, 小麦生长季 (10 月—来年 3 月) 的降雨量常不足 100 mm。试验田 0~100 cm 土层深度的土壤质地为壤土, 0~100 cm 土层的平均田间持水率、土壤容重和有机质质量分数分别为 30.58%、1.58 g/cm³ 和 3.25 g/kg。田间试验于 2012—2013、2013—2014、2014—2015 和 2015—2016 年连续 4 个生长季开展。开展试验前 (2012 年 10 月) 土壤的硝态氮质量分数为 5.43 mg/kg。

1.2 试验设计

本试验在覆盖和不覆盖 2 种处理下分别设置 3 种滴灌制度, 共 6 个处理, 每个处理设 4 个重复, 共 24 个小区, 小区面积 8×10 m², 随机排列。冬小麦于每年 10 月中旬播种, 行距 25 cm, 播前根据土壤墒情, 灌水 50~75 mm, 并施入复合肥 (有效成分: N-P₂O₅-K₂O, 比例: 15%-15%-15%) 556 kg/hm² 作为底肥, 折合纯 N、P、K 量分别为 83.4、36.4 和 69.2 kg/hm²。播种当年 11 月中旬冬灌, 冬灌采用地面灌, 灌水量为 50 mm。次年 4 月初返青, 开始灌水处理, 灌水方式为地表滴灌, 一带 4 行, 滴头间距为 30 cm, 滴头流量为 1.35 L/h。

灌溉制度参考王建东等^[21]在该地的试验, 为保证作物正常生长, 所有处理返青期第一次灌水均灌至田持 (30.58%), 此后至成熟期前, 根据计划湿润层的土壤含水率上下限控制来确定灌水量和灌水时间, 低、中、高 3 种灌溉制度分别以田持的 55%~75%、65%~85% 和 78~98% 作为灌水上下限控制因素, 成熟期不灌水。覆盖处理采用上季留存粉碎后的玉米秸秆, 覆盖量为 6 000 kg/hm²。除 2012-2013 年试验季于 2013 年 5 月 4 日开始覆盖外, 其余试验季均为播种后即用地表覆盖。每个处理返青期第一次灌水时, 采用文丘里施肥器施肥, 施氮量为 110 kg/hm², 施用肥料为尿素。各处理编号、生育期灌水次数、灌水量及降雨量见表 1, 处理 1-6 (T1~T6) 分别表示低水覆盖、低水不覆盖、中水覆盖、中水不覆盖、高水覆盖和高水不覆盖处理。

1.3 旗叶光合参数及氮含量测定

冬小麦旗叶展开后, 选择典型晴天用 Li-cor 6400 便携式光合仪进行叶片光合—光响应曲线和光合—CO₂ 响应曲线的测定, 进而确定叶片相关光合参数。2013-2016 年每年进行 2 次测定。为方便各年份间不同测定日期间的比较, 所有测定日期均标准化为距返青期首次灌水的天数 (Dafi), 标准化后, 2013 年的测定时间为 Dafi19-20 和 Dafi40-41、2014 年的测定时间为 Dafi29-30 和 Dafi47-

48、2015 年的测定时间为 Dafi35-36 和 Dafi54-55、2016 年的测定时间为 Dafi32-35 和 Dafi57-58。光响应曲线测定时叶室温度设定为 26~28 °C, 叶室 CO₂ 摩尔分数设定为 400 μmol/mol, 光强设定为 2200、2000、1600、1300、1000、750、500、200、100、50、20 和 0 μmol/(m²·s), 从强到弱进行测定。CO₂ 响应曲线测定时叶室温度设定为 26~28 °C, 叶室光强设定为 2000 μmol/(m²·s), CO₂ 浓度设定为 400、300、200、120、80、50、0、400、400、600、800、1200、1600、2000 μmol/mol, 按次序测定。

表 1 各试验季处理编号、返青至收获期灌水次数、灌水量及降雨量统计表

Table 1 Lists of treatment coding, irrigation times, irrigation amounts and precipitation during the reviving and harvest stages for all experiment seasons

生长季 Growing seasons	返青至收获期灌水次数/灌水量/mm Irrigation times/irrigation amounts (mm) during reviving and harvest stages						降雨量 Precipitation/mm
	处理 1 (T1)	处理 2 (T2)	处理 3 (T3)	处理 4 (T4)	处理 5 (T5)	处理 6 (T6)	
	低水 覆盖	低水 不覆盖	中水 覆盖	中水不 覆盖	高水 覆盖	高水不 覆盖	
	LI&SM	LI&NM	MI&SM	MI&NM	MI&SM	MI&NM	
2012-2013	2/64.4	2/58.2	3/84	3/93.1	3/100.6	3/104.3	66.5
2013-2014	3/75.2	3/90.1	4/104.8	4/125.4	4/135.5	4/155.3	85.1
2014-2015	4/99.4	4/117.8	4/109.6	4/134.6	5/150.7	5/177.9	64.5
2015-2016	3/81.3	3/95.2	4/89.8	4/98.2	5/133.3	5/146.2	102.6

光合—光响应曲线测定结果用非直角双曲线方程 (式 1)^[22]拟合获得相关参数, 进行处理间比较分析。其中, 光强 0~150 μmol/(m²·s) 的数据采用直线拟合, 直线的斜率为表观光量子效率 (α , 无量纲), 直线与纵坐标的交点为呼吸速率 (R_d , μmol/(m²·s)), 回归直线与横坐标的交点为光补偿点 (PAR_c , μmol/(m²·s))。确定上述参数后, 采用固定曲率 ($\theta=0.9$) 的非直角双曲线进行拟合, 得到最大光合速率, 即光合能力 (A_{max} , μmol/(m²·s))。非直角双曲线模型的表达式为:

$$A = A_n + R_d = \frac{\alpha \cdot PAR + A_{max} - \sqrt{(\alpha \cdot PAR + A_{max})^2 - 4\theta \cdot \alpha \cdot PAR \cdot A_{max}}}{2\theta} \quad (1)$$

式中 A 为植物的总光合速率 (μmol/(m²·s)), A_n 为植物的净光合速率 (μmol/(m²·s)), PAR 为光合有效辐射 (μmol/(m²·s)), θ 为曲线的曲率 (无量纲), 曲率越大, 曲线的弯曲程度越大。

光合—CO₂ 曲线测定结果采用 Sharkey 等完善的 Farquhar 和 von Caemmerer 提出的光合模型拟合^[23]。该模型指出 A_n 的不同阶段分别受 2 个过程限制: Rubisco 酶的羧化效率 (W_c , μmol/(m²·s)) 和电子传递速率 (W_j , μmol/(m²·s))。各个过程的表达式见式 (2)~式 (6):

$$A_n = V_c - 0.5V_o - R_d = V_c \cdot \left(1 - \frac{\Gamma^*}{C_i}\right) - R_d \quad (2)$$

$$V_c = \min(W_c, W_j) \quad (3)$$

$$W_c = \frac{V_{cmax} C_i}{C_i + K_c(1 + O/K_o)} \quad (4)$$

$$W_J = \frac{J \cdot C_i}{4(C_i + 2\Gamma^*)} \quad (5)$$

$$J = \frac{a \cdot \text{PAR}}{\left(1 + \frac{a^2 \text{PAR}^2}{J_{\max}^2}\right)^{0.5}} \quad (6)$$

式中 V_c 和 V_o 分别为 Rubisco 酶的羧化和加氧速率, 单位均为 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; Γ^* 为无暗呼吸时的 CO_2 补偿点 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$); R_d 为呼吸速率 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); V_{cmax} 和 J_{max} 分别为最大羧化速率和最大电子传递速率, 单位均为 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; C_i 为细胞间 CO_2 摩尔分数 ($\mu\text{mol}/\text{mol}$); K_c (Pa) 和 K_o (kPa) 分别为 CO_2 和 O_2 的米氏常数; O 为氧气分压 (kPa); J 是电子传递速率 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 与 α 、PAR 及 J_{max} 有关; 通过拟合, 可以得到光合参数 V_{cmax} 和 J_{max} 。

光合测定完成后将旗叶取下, 扫描叶面积, 105°C 杀青, 65°C 下烘干至恒量, 研磨, 过 100 目筛, 采用硫酸-水杨酸消煮-凯式定氮仪法确定叶片氮质量分数 (N_{mass} , %)。收获时各小区单收单打计产, 小区小麦产量以实收产来计算, 籽粒晒干至质量无变化时测其产量。

1.4 数据分析

光合—光响应曲线和光合— CO_2 响应曲线的拟合均采用 SPSS18.0 软件的自定义非线性拟合进行, 参数确定后首先采用 SPSS18.0 软件的双因素方差分析确定覆盖和滴灌处理及其交互作用对光合参数的影响, 在确定不存在二者交互作用的前提下, 采用单因素方差分析及 duncan 多重比较方法进行所有处理的差异显著性分析及处理间的均值的两两比较。在分析光合参数与叶片氮含量关系及产量与光合参数的关系时, 首先采用 SPSS18.0 软件的协方差分析确定不同年份之间回归直线斜率和截距是否存在显著差异, 不存在显著差异的情况下, 再采用 Sigma-Plot12.0 软件将所有年份统一回归分析, 确定回归方程和统计参数。文中所有作图均采用 SigmaPlot12.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 光合—光响应曲线参数差异

不同滴灌水量和覆盖处理不同程度影响了表观光量子效率 α 和光合能力 A_{max} (表 2)。表 2 中打乱年份顺序, 按照测定日距返青后首次灌水的天数 (Dafi) 排列, 依次反映旗叶展开至成熟期间不同生育阶段光合参数的处理间差异情况 (表 3 采用同样的排列顺序)。其中, 2013 年每个处理的光曲线只测定了一条, 无法进行均值比较, 2014-2016 年的每次测定均至少测定两条光曲线, 可以进行均值比较及方差分析。

滴灌水量对 α 值的显著影响仅表现在抽穗灌浆后期的两次测定 (Dafi47-48 和 54-55, 表 2) 中, 而并未发现覆盖处理对 α 值的显著影响, 也未发现滴灌水量和覆盖处理的交互作用。6 个处理间的比较结果也显示, 仅抽穗灌浆后期最后一次测定的 α 值处理间差异显著 ($P=0.038$), 倒数第二次测定的 α 值处理间差异接近显著 ($P=0.078$)。

表 2 滴灌水量和覆盖处理及其交互作用对表观光量子效率 α 和光合能力 A_{max} 影响的显著性水平

Table 2 Results of two-way analysis of variance of irrigation amount, mulching and interaction effects of above two treatments on apparent quantum efficiency (α) and photosynthetic capacity (A_{max})

光合—光 曲线参数 Parameters from A_n - PAR curves	测定日 Measure- ment dates	年份 Years	滴灌 水量 Irrigation amounts	覆盖 与否 Mulch or not	水量和 覆盖的交 互作用 Interaction effects	各处理 方差分析 ANOVA among treatments
表观光 量子效率 Apparent quantum efficiency α	Dafi29-30	2014	0.197	0.991	0.769	0.543
	Dafi32-35	2016	0.923	0.186	0.315	0.472
	Dafi35-36	2015	0.146	0.143	0.401	0.200
	Dafi47-48	2014	0.031**	0.642	0.119	0.078*
	Dafi54-55	2015	0.008**	0.524	0.690	0.038**
光合能力 Photosynthetic capacity A_{max} ($\mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Dafi29-30	2014	0.007**	0.218	0.119	0.022**
	Dafi32-35	2016	0.077*	0.001**	0.515	0.008**
	Dafi35-36	2015	0.019**	0.094*	0.606	0.049**
	Dafi47-48	2014	0.001**	0.032**	0.332	0.005**
	Dafi54-55	2015	0.017**	0.002**	0.408	0.009**

注: **表示 P 值小于 0.05, *表示 P 值介于 0.05~0.1 之间, 下同。

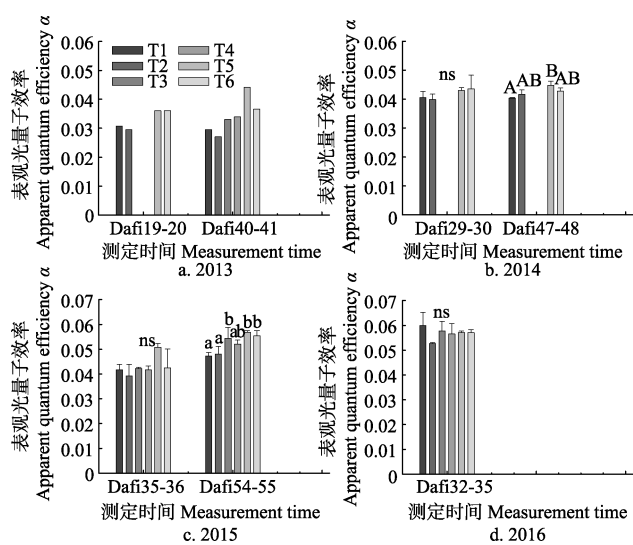
Notes: ** stands for differences among treatments are significant at $P = 0.05$, * stands for differences among treatments are significant at $0.05 < P < 0.1$. The same below.

图 1 显示了 α 值的处理间多重比较结果。2014 年, Dafi47-48 测定中, T1 的 α 值与 T5 差异接近显著, T5 的 α 值较高, 而 T2、T6 的 α 值则处于上述两处理之间, 且与之均无显著差异。2015 年, Dafi54-55 测定中, 滴灌水量之间 α 值差异显著, 低水的 T1、T2 的 α 值显著低于高水处理 T5、T6, 且显著低于中水覆盖处理 T3, T4 的 α 值介于处理 1、2 和 T3、T5、T6 之间, 且与之均无显著差异。T1~T6 的 α 值 4 个生长季平均分别为: 0.043、0.041、0.048、0.048、0.050 和 0.047。陆佩玲和于强研究指出, 大田条件下小麦的 α 值一般在 0.05~0.07 之间^[24], 本研究只有 2015-2016 年度高水和覆盖处理的 α 值在 0.06 左右, 而其余年份, 尤其是低水不覆盖处理的 α 值较低, 表明覆盖和提高滴灌水量有利于提高 α 。

滴灌水量除对 2016 年 Dafi32-35 测定中 A_{max} 的影响接近显著 ($P=0.077$) 外, 其余测定日中, 滴灌水量对 A_{max} 均影响显著 ($P<0.05$, 在 0.001~0.019 之间, 表 2)。覆盖处理除对 2014 年 Dafi29-30 的 A_{max} 值影响不显著和对 2015 年 Dafi35-36 的 A_{max} 值影响接近显著 ($P=0.094$) 外, 其余测定日中, 覆盖对 A_{max} 均影响显著 ($P<0.05$, 在 0.001~0.032 之间)。然而, 研究并未发现不同滴灌水量和覆盖处理的交互作用。6 个处理间的比较结果显示, 所有测定日的 A_{max} 值处理间差异均显著 ($P<0.05$, 在 0.005~0.049 之间)。

图 2 显示了 A_{max} 值的处理间多重比较结果。2014 年, Dafi29-30 测定中, T2 的 A_{max} 值显著低于 T5 和 T6, T1 介于 T2 和 T5、T6 之间, 与之均无显著差别; Dafi47-48 测定中, T1、T2 的 A_{max} 值差异不显著, 二者均显著低于 T5、T6, T5 的 A_{max} 值又显著大于 T6。2015 年, Dafi35-36

测定中, A_{\max} 值差异仅出现在 T5、T6 和 T2、T4 之间; Daf154-55 测定中, T2 的 A_{\max} 值则显著低于其余处理, T1 和 T4 则显著低于 T3、T5, 而 T6 的 A_{\max} 值介于上述两组处理直接, 与之均无显著差别。2016 年, Daf32-35 测定中, T2、T4 的 A_{\max} 值显著低于其余处理, 而 T1、T3、T5 的 A_{\max} 值差异不显著, T6 的 A_{\max} 值介于 T1、T2 和 T5 之间, 仅显著低于 T5 值, 与 T1、T3 差异不显著。T1~T6 的 A_{\max} 值 4 个生长季平均分别为: 29.59、26.45、31.44、28.68、32.42 和 30.90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。从 A_{\max} 值差异来看, 越到生育后期, 高水和覆盖处理 (处理 5) 的优势显著, 而中水覆盖处理 (处理 3) 的 A_{\max} 值与高水覆盖处理差异均不显著。中、高水覆盖处理 A_{\max} 在生育期末仍较高, 有利于籽粒充实, 提高作物产量, 这与前人研究结果一致^[25]。



注: T1~T6 分别表示低水覆盖、低水不覆盖、中水覆盖、中水不覆盖、高水覆盖和高水不覆盖处理。图中不同大写和小写字母分别表示处理间在 0.1 和 0.05 水平上差异显著, 下同。

Notes: T1 to T6 stands for treatments of lower irrigation amount with straw mulch, lower irrigation amount without straw mulch, moderate irrigation amount with straw mulch, moderate irrigation amount without straw mulch, higher irrigation amount with straw mulch, and higher irrigation amount without straw mulch, respectively. The uppercase and lowercase letters indicate the significance testing for $P = 0.05$ and 0.1. The same below.

图 1 2013-2016 年不同处理冬小麦表观光量子效率 α 比较
Fig.1 Comparison of apparent quantum efficiency (α) measured in 2013-2016 for winter wheat with different (irrigation amount and mulching) treatments

2.2 光合—CO₂ 响应曲线参数差异

不同滴灌水量和覆盖处理均不同程度的影响了最大羧化速率 V_{\max} 和最大电子传递效率 J_{\max} (表 3)。其中, 2013-2015 年第二次测定每个处理的 CO₂ 响应曲线只测定了一条, 无法进行均值比较, 其余测定日均至少测定两条曲线, 可以进行均值比较及方差分析。

滴灌水量对 V_{\max} 值的显著影响主要表现在抽穗灌浆前、中期的三次测定 (Daf35 天以前) 中, 覆盖处理对 V_{\max} 值的显著影响则主要表现在抽穗灌浆中、后期 (Daf32 天以后), 研究并未发现滴灌水量和覆盖处理的交互作用 (表 3)。6 个处理间的比较结果显示, 5 次测定中有 4 次处理间差异达到或接近显著 ($P < 0.1$, 在 0.020~0.085 之间), 仅 2015 年 Daf35-36 测定中处理间 V_{\max} 值

差异不显著 ($P = 0.202$)。

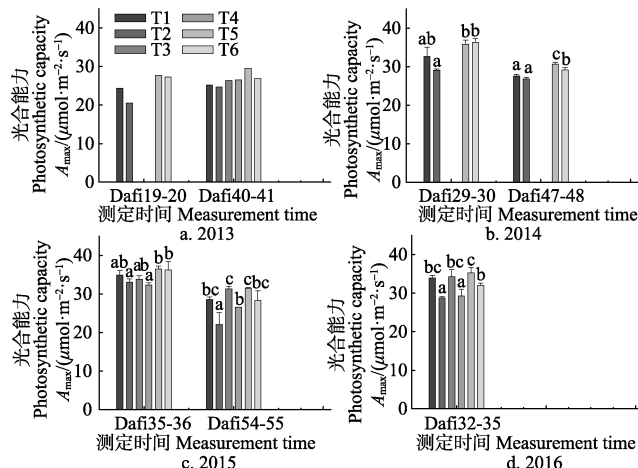


图 2 2013-2016 年不同处理冬小麦旗叶最大光合速率 A_{\max} 比较
Fig.2 Comparison of photosynthetic capacity (A_{\max}) measured in 2013-2016 for winter wheat with different (irrigation amount and mulching) treatments

表 3 滴灌水量和覆盖处理及其交互作用对最大羧化速率 V_{\max} 和最大电子传递效率 J_{\max} 影响的显著性水平

Table 3 Results of two-way analysis of variance of irrigation amount, mulching and interaction effects of above two treatments on maximum carboxylation rate (V_{\max}) and the maximum electron transportation rate (J_{\max})

光合—CO ₂ 响应参数 Parameters from A_n -CO ₂ curves	测定日 Measurement dates	年份 Years	滴灌水量 Irrigation amount	覆盖与否 Mulch or not	水量和覆盖的交互作用 Interaction effects	各处理方差分析 ANOVA among treatments
最大羧化速率 Maximum carboxylation rate V_{\max} ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Daf19-20	2013	0.005**	0.298	0.627	0.020**
	Daf29-30	2014	0.025**	0.321	0.472	0.085*
	Daf32-35	2016	0.013**	0.031**	0.782	0.035**
	Daf35-36	2015	0.342	0.073*	0.485	0.202
	Daf57-58	2016	0.148	0.041**	0.960	0.074*
最大电子传递效率 Maximum electron transportation rate J_{\max} ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Daf19-20	2013	0.046**	0.600	0.747	0.057*
	Daf29-30	2014	0.249	0.398	0.510	0.453
	Daf32-35	2016	0.025**	0.497	0.875	0.093*
	Daf35-36	2015	0.731	0.876	0.229	0.537
	Daf57-58	2016	0.147	0.026**	0.970	0.062*

图 3 显示了 V_{\max} 值的处理间多重比较结果。2013 年, Daf19-20 的测定中, 低水处理 T1、T2 的 V_{\max} 值显著低于高水处理 T5、T6。2014 年, Daf29-30 的测定中, T2 的 V_{\max} 值在 0.1 显著水平上低于 T5、T6, T1 的 V_{\max} 值介于 T2 和 T5、T6 之间, 且与两组处理值差异不显著。2016 年, Daf33-35 的测定中, T2 的 V_{\max} 值显著低于 T3、T4、T5、T6, 而 T1 的 V_{\max} 值介于 T2 和 T3、T4、T5、T6 之间, 且与两组处理值差异不显著, T4 的 V_{\max} 值显著低于 T5; Daf57-58 的测定中, 尽管处理间 V_{\max} 均值差别较大, 但处理内个体差异 (标准差) 也较大, 处理间差异仅在 0.1 水平上显著, 其中, 只有 T2 的 V_{\max} 值显著低于 T5, 其余处理的 V_{\max} 值介于 T2 和 T5 之间, 且与二者差异不显著。T1~T6 的 V_{\max} 值 4 个生长季平均分别为: 121.42、107.68、133.42、113.55、141.83 和 129.95 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。

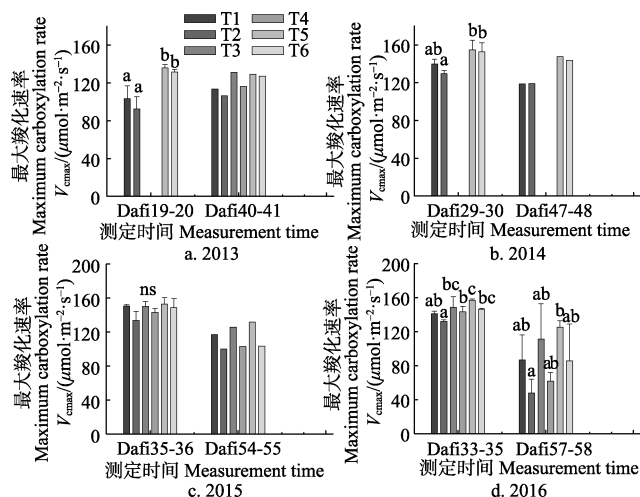


图3 2013-2016年各处理冬小麦旗叶最大羧化速率 V_{cmax} 比较
Fig.3 Comparison of maximum carboxylation rate (V_{cmax}) measured in 2013-2016 for winter wheat with different (irrigation amount and mulching) treatments

滴灌水量对 J_{max} 值的显著影响在抽穗灌浆前、中期两次 (Dafi19-20 和 Dafi32-35) 观测到, 而覆盖处理对 J_{max} 值的显著影响则仅在抽穗灌浆后期末次测定中 (Dafi57-58) 观测到, 同样的, 研究并未发现滴灌水量和覆盖处理对 J_{max} 的交互作用 (表 3)。6 个处理间的比较结果显示, 5 次测定中有 3 次处理间差异仅为接近显著 ($0.05 < P < 0.1$)。

图 4 显示了 J_{max} 值的处理间多重比较结果。2013 年, Dafi19-20 的测定中, 低水处理 T1、T2 的 J_{max} 值在 0.1 显著水平低于高水处理 T5、T6。2016 年, Dafi32-35 的测定中, T1、T2 的 J_{max} 值在 0.1 显著水平低于 T5、T6, T3、T4 的 J_{max} 值介于 T1、T2 和 T5、T6 之间, 且与两组处理值差异不显著; Dafi57-58 的测定中, 与 V_{cmax} 类似, 处理内变异较大, 可能掩盖了处理间差异, 仅有 T2、T4 的 J_{max} 值在 0.1 显著水平低于 T5, 其余处理与上述处理均差异不显著。T1~T6 的 J_{max} 值 4 个生长季平均分别为: 246.21、219.24、265.20、248.20、287.04 和 271.63 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。从降低灌水量的角度来讲, T3 的灌溉制度可以作为秸秆覆盖冬小麦田的滴灌制度, 即 65%~85% 的田间持水量作为土壤水分的上下限控制, 该灌溉制度配合田间秸秆覆盖措施, 可以保持冬小麦旗叶较高的光合能力。

本研究确定的不同处理的 V_{cmax} 值远高于 Wullschlegel 综述中对小麦 V_{cmax} 的统计值 ($83 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$) [26], 但与近期 Müller 等对小麦 V_{cmax} 的实测值接近 [27], 这与近年来小麦品种改良、光合能力提高有关。 V_{cmax} 的处理间差异一般与旗叶氮含量相关, 本研究将在下文详述。在 V_{cmax} 已知的情况下, 光合模型参数确定时通常采用 J_{max} 与 V_{cmax} 的比值来估算 J_{max} 值, 前人研究普遍认为 J_{max} 与 V_{cmax} 的比值较为固定, 取值为 (2 ± 0.6) [28], 本研究各处理的 J_{max}/V_{cmax} 比值在 1.35~2.68 之间变化, 均值为 2.0, 该范围包含了 Evans 和 Farquhar 对小麦光合研究中报道的该比值 1.63~2.06 [29], 且均值与 Leuning 推荐的 C3 植物普适值 (2.0 ± 0.6) 一致 [28]。基于本研究结果, 笔者推荐无基础资料研究中冬小麦光合模拟可采用比值 2 来推算 J_{max} 。

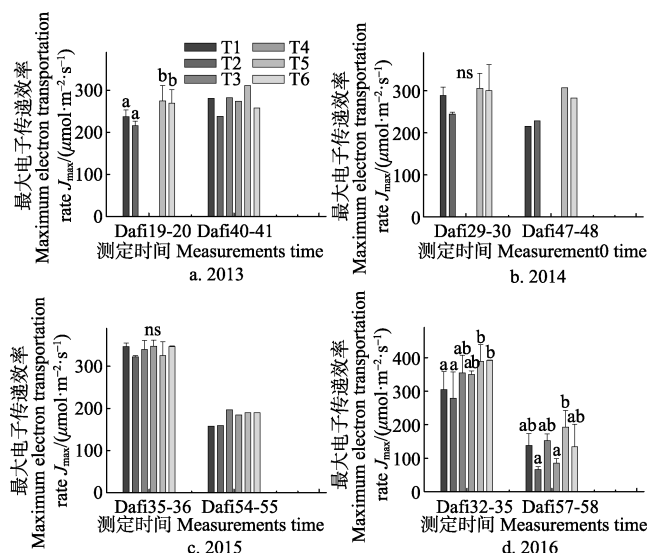


图4 2013-2016年不同处理冬小麦最大电子传递效率 J_{max} 比较
Fig.4 Comparison of maximum electron transportation rate (J_{max}) measured in 2013-2016 for winter wheat with different (irrigation amount and mulching) treatments

2.3 光合参数与叶片 N 含量的关系

氮素是作物叶绿素及光合相关酶的重要组成部分, 光合速率一般与叶片 N 含量显著相关, 本研究分析了光合—光强响应曲线关键光合参数 A_{max} 和光合— CO_2 响应曲线关键光合参数 V_{cmax} 与叶片 N 含量 (N_{mass}) 的关系。所有年份、所有测定日期的 A_{max} 和 V_{cmax} 均与 N_{mass} 线性相关显著, 且不同年份之间相关关系的斜率和截距差异不显著, 因此, 本研究将所有年份数据统一回归, 均达到极显著水平 ($P < 0.0001$), N_{mass} 分别可以解释 A_{max} 和 V_{cmax} 处理间变异的 71.89% 和 88.76% (图 5)。

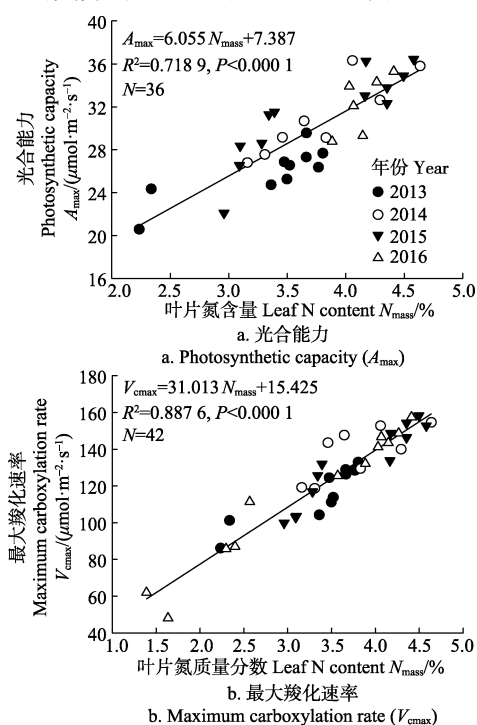


图5 2013-2016年不同处理冬小麦旗叶光合能力 (A_{max}) 及最大羧化速率 (V_{cmax}) 与叶片氮质量分数 (N_{mass}) 之间的关系
Fig.5 Relationship between photosynthetic capacity (A_{max}) and maximum carboxylation rate (V_{cmax}) and leaf N content (N_{mass}) of winter wheat flag leaves under different irrigation amount and mulching treatments in 2013-2016

本研究中、高水及覆盖处理的旗叶在生育末期仍能保持较高的 A_{\max} 和 V_{cmax} , 与之较高的叶片 N 含量及叶片衰老的延缓有关。光合速率一般随叶片 N 含量增加而增加, 二者的定量关系在叶片 N 含量较低时为线性, 而叶片 N 含量较高, 且变化范围较广时则为指数增长到最大值的曲线关系^[30]。本研究叶片 N 含量范围内, 光合参数与之关系仍为线性, 未发现随着叶片 N 含量的增加, 光合参数增长变缓的现象。适宜的水分和覆盖处理增加了冬小麦叶片 N 含量, 高叶片 N 含量不仅与高光合色素-叶绿素含量相关, 而且可提高叶绿体有关光合碳同化酶类活性, 进而提高光合速率^[20,31]。

2.4 产量与光合参数的关系

光合作用是产量形成的基础, 本研究分析了产量与光合参数之间的相关关系, 产量与 A_{\max} 及 V_{cmax} 之间均呈现出显著的线性相关关系(图 6), 所有年份产量均与 A_{\max} 和 V_{cmax} 线性相关显著, 且不同年份之间相关关系的斜率和截距差异不显著, 因此, 本研究将所有年份数据统一回归, 均达到极显著水平 ($P < 0.0001$), A_{\max} 和 V_{cmax} 分别能解释产量变异的 83.15% 和 90.99%。该关系较直观的阐明了光合参数对产量的决定作用, A_{\max} 和 V_{cmax} 较高的处理, 产量也相应的高^[32]。需要指出的是, 本研究 2013 年度由于返青期初次灌水较晚, 冬小麦返青期可能存在干旱胁迫, 尤其是低水及不覆盖处理该年度的产量低于其余年份, 这种年际间的产量差异也在光合参数之间反映出来, 并未使 2013 年度产量与 A_{\max} 及 V_{cmax} 之间关系明显偏离所有年份的回归直线。

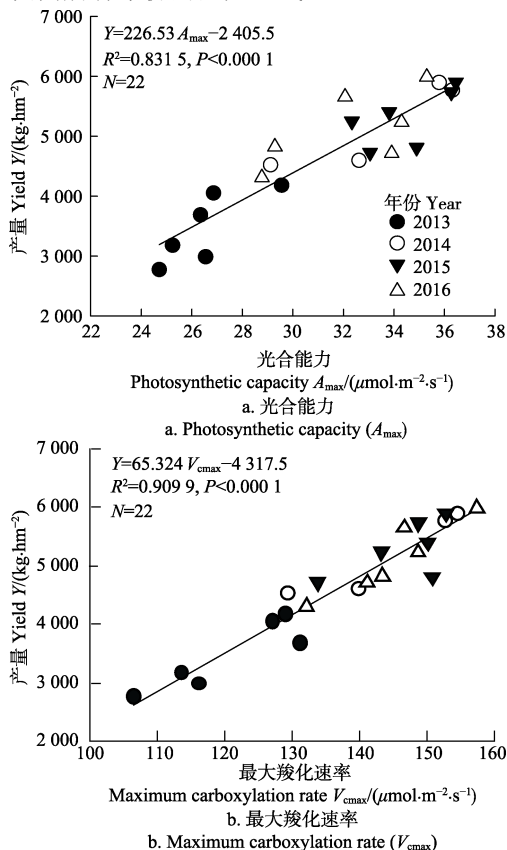


图 6 2013-2016 年不同处理冬小麦产量 (Y) 与旗叶最大光合速率 (A_{\max}) 及最大羧化速率 (V_{cmax}) 之间的关系

Fig.6 Relationship between yield (Y) and photosynthetic capacity (A_{\max}) and maximum carboxylation rate (V_{cmax}) of winter wheat flag leaves under different irrigation amount and mulching treatments in 2013-2016

3 结 论

本研究通过多年连续试验确定了秸秆覆盖处理和不同滴灌制度下的关键光合参数, 并分析了光合参数处理间差异来源及其与作物产量的关系。4 个生长季的试验表明, 秸秆覆盖处理和不同滴灌制度均不同程度的影响了旗叶关键光合参数的值, 而二者的交互作用对光合参数的影响则均未发现。

滴灌水量对表观光量子效率 α 的显著影响主要表现在抽穗灌浆后期, 而覆盖对 α 影响不显著; 覆盖和滴灌水量对光合能力 A_{\max} 的影响显著并未表现出明显季节差异; 滴灌水量对最大羧化速率 V_{cmax} 和最大电子传递效率 J_{\max} 的显著影响主要表现在抽穗灌浆前、中期, 而覆盖对 V_{cmax} 和 J_{\max} 的显著影响则主要表现在抽穗灌浆中、后期。

覆盖处理和提高滴灌水量有利于提高 α 、 A_{\max} 、 V_{cmax} 和 J_{\max} , 几乎所有测定均以覆盖高水处理 (T5) 的光合参数最大, 除 2016 年第一次测定外, 高水不覆盖 (T6) 和中水覆盖 (T3) 的相应值略低但与 T5 差异不显著, 而低水不覆盖 (T2) 的相应值则均显著低于 T5。从降低灌水量的角度来讲, T3 的灌溉制度可以作为秸秆覆盖冬小麦田的滴灌制度, 即 65%~85% 的田间持水量作为土壤水分的上下限控制, 该灌溉制度配合田间秸秆覆盖措施, 可以保持冬小麦旗叶较高的光合能力。

处理间光合参数的差异可以用叶片 N 含量 N_{mass} 来解释, 所有年份、所有测定日期的 A_{\max} 和 V_{cmax} 均与 N_{mass} 线性相关显著。而光合参数又决定了产量的处理间差异, 所有年份的产量均与 A_{\max} 和 V_{cmax} 分别线性相关 ($R^2 > 0.8$)。因此, 通过测定不同处理的 N_{mass} , 可以估算其旗叶关键光合参数, 进而实现其产量的估算。

[参 考 文 献]

- [1] 刘昌明, 周长青, 张士锋, 等. 小麦水分生产函数及其效益的研究[J]. 地理研究, 2005, 24(1): 1-10.
Liu Changming, Zhou Zhangqing, Zhang Shifeng, et al. Study on water production function and efficiency of wheat[J]. Geographical Research, 2005, 24(1): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- [2] 房全孝, 王建林, 于舜章. 华北平原小麦-玉米两熟制节水潜力与灌溉对策[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 37-44.
Fang Quanxiao, Wang Jianlin, Yu Shunzhang. Water-saving potential and irrigation strategies for wheat-maize double cropping system in the North China Plain[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 37-44. (in Chinese with English abstract)
- [3] Camp CR. Subsurface drip irrigation: A review[J]. Transactions of the ASABE, 1998, 41(5): 1353-1367.
- [4] 刘立晶, 高焕文, 李洪文. 玉米-小麦一年两熟保护性耕作体系试验研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 70-73.
Liu Lijing, Gao Huanwen, Li Hongwen. Conservation tillage for corn-wheat two crops a year region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(3): 70-73. (in Chinese with English abstract)

- [5] 杨永辉, 武继承, 张玉亭, 等. 耕作与保墒措施对小麦不同生育阶段水分利用及产量的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(3): 184—190.
Yang Yonghui, Wu Jicheng, Zhang Yuting, et al. Effects of tillage, moisture conservation on water use and yield in wheat at different growth stage[J]. Acta agriculturae boreali-sinica 2016, 31(3): 184—190. (in Chinese with English abstract)
- [6] 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 不同耕作方式对旱作区冬小麦生产和产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(1): 50—54.
Huang Ming, Wu Jinzhi, Li Youjun, et al. Effects of different tillage management on production and yield of winter wheat in dryland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(1): 50—54. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘青林, 张恩和, 王琦, 等. 灌溉与施氮对留茬免耕春小麦耗水规律, 产量和水分利用效率的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 169.
Liu Qinglin, Zhang Enhe, Wang Qi, et al. Effect of irrigation and nitrogen supply levels on water consumption, grain yield and water use efficiency of spring wheat on no-tillage with stubble standing farmland[J]. Acta praeiculturae sinica, 2012, 21(5): 169. (in Chinese with English abstract)
- [8] Braune Henning, Müller Johannes, Diepenbrock Wulf. Integrating effects of leaf nitrogen, age, rank, and growth temperature into the photosynthesis-stomatal conductance model LEAFC3-N parameterised for barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. Ecological Modelling, 2009, 220(13/14): 1599—1612.
- [9] Yin X, Struik PC. C3 and C4 photosynthesis models: An overview from the perspective of crop modelling[J]. NJAS Wageningen Journal of Life Sciences, 2009, 57(1): 27—38.
- [10] Müller Johannes, Wernecke Peter, Diepenbrock Wulf. LEAFC3-N: a nitrogen-sensitive extension of the CO₂ and H₂O gas exchange model LEAFC3 parameterised and tested for winter wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Ecological Modelling, 2005, 183: 183—210.
- [11] 江晓东, 王芸, 侯连涛, 等. 少免耕模式对冬小麦生育后期光合特性的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 66—69.
Jiang Xiaodong, Wang Yun, Hou Liantao, et al. Effects of minimum tillage and no-tillage systems on photosynthetic characteristics at late growth stages of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(5): 66—69. (in Chinese with English abstract)
- [12] Pal M, Rao LS, Jain V, et al. Effects of elevated CO₂ and nitrogen on wheat growth and photosynthesis[J]. Biologia Plantarum, 2005, 49(3): 467—470.
- [13] Foulkes MJ, Hawkesford MJ, Barraclough PB, et al. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects[J]. Field Crops Research, 2009, 114(3): 329—342.
- [14] 张彦群, 王建东, 龚时宏, 等. 滴灌条件下冬小麦施氮增产的光合生理响应[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 170—177.
Zhang Yanqun, Wang Jiandong, Gong Shihong, et al. Photosynthetic response of yield enhancement by nitrogen fertilization in winter wheat fields with drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 170—177. (in Chinese with English abstract)
- [15] Shanguan Zhouping, Shao Mingan, Dyckmans Jens. Effects of nitrogen nutrition and water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat[J]. Journal of Plant Physiology, 2000, 156(1): 46—51.
- [16] 张向前, 张贺飞, 钱益亮. 不同秸秆覆盖模式下小麦植株性状、光合及产量的差异[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(1): 120—127.
Zhang Xiangqian, Zhang Hefei, Qian Yiliang. Differences in plant traits, photosynthesis and yield of wheat under different straw mulching modes[J]. Journal of triticeae crops. 2016, 36(1): 120—127. (in Chinese with English abstract)
- [17] 马冬云, 郭天财, 王晨阳, 等. 施氮量对冬小麦灌浆期光合产物积累, 转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2008, 34(6): 1027—1033.
Ma Dongyun, Guo Tiancai, Wang Chenyang, et al. Effects of nitrogen application rates on accumulation, translocation, and partitioning of photosynthate in winter wheat at grain filling stage[J]. Acta agronomica sinica. 2008, 34(6): 1027—1033. (in Chinese with English abstract)
- [18] Evans John R. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants[J]. Oecologia, 1989, 78(1): 9—19.
- [19] Evans John R. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. Plant physiology, 1983, 72(2): 297—302.
- [20] Li Dandan, Tian Mengyu, Cai Jian, et al. Effects of low nitrogen supply on relationships between photosynthesis and nitrogen status at different leaf position in wheat seedlings[J]. Plant Growth Regulation, 2013, 70(3): 257—263.
- [21] 王建东, 龚时宏, 高占义, 等. 滴灌模式对农田土壤水氮空间分布及冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 68—73.
Wang Jiandong, Gong Shihong, Gao Zhanyi, et al. Effects of drip irrigation mode on spatial distribution of soil water and nitrogen and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 68—73. (in Chinese with English abstract)
- [22] Thornley John HM. Mathematical models in plant physiology[M]. Academic Press (Inc.) London, Ltd., 1976.
- [23] Sharkey Thomas D. Photosynthesis in intact leaves of C3 plants: Physics, Physiology and rate limitations[J]. Botanical Review, 1985, 51(1): 53—105.
- [24] 陆佩玲, 于强. 冬小麦光合作用的光响应曲线的拟合[J]. 中国农业气象, 2001, 22(2): 12—14.
Lu Peiling, Yu Qiang. Fitting light response curves of photosynthesis of winter wheat[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2001, 22(2): 12—14. (in Chinese with English abstract)
- [25] 马东辉, 赵长星, 王月福, 等. 施氮量和花后土壤含水量对小麦旗叶光合特性和产量的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(10): 4896—4901.
Ma Donghui, Zhao Zhangxing, Wang Yuefu, et al. Effects of nitrogen fertilizer rate and post-anthesis soil water content on photosynthetic characteristics in flag leaves and yield of wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(10): 4896—4901. (in Chinese with English abstract)
- [26] Wullschlegel SD. Biochemical limitations to carbon assimilation in C3 plants—a retrospective analysis of the A/Ci

- curves from 109 species[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1992, 44(2): 907—920.
- [27] Müller Johannes, Eschenröder André, Christen Olaf. LEAFC3-N photosynthesis, stomatal conductance, transpiration and energy balance model: Finite mesophyll conductance, drought stress, stomata ratio, optimized solution algorithms, and code[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 290(4): 134—145.
- [28] Leuning R. Temperature dependence of two parameters in a photosynthesis model[J]. *Plant Cell & Environment*, 2002, 25(9): 1205—1210.
- [29] Evans J, Farquhar GD. Modeling canopy photosynthesis from the biochemistry of C3 chloroplast[M]. In: Boote KJ, Loomis RS, eds. *Modelling Crop Photosynthesis—from Biochemistry to Canopy*. CSSA special publication no. 19. Madison, WI: American Society of Agronomy, Inc., 1991, 1-15.
- [30] Bindraban PS. Impact of canopy nitrogen profile in wheat on growth[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63(1): 63—77.
- [31] Serrago Román A, Alzueta Ignacio, Savin Roxana, et al. Understanding grain yield responses to source-sink ratios during grain filling in wheat and barley under contrasting environments[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 42—51.
- [32] Zhang Yanqun, Wang Jiandong, Gong Shihong, et al. Nitrogen fertigation effect on photosynthesis, grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 277—287.

Effects of straw mulching and drip irrigation scheduling on photosynthetic characteristic and yield of winter wheat

Zhang Yanqun¹, Wang Jiandong^{1*}, Gong Shihong¹, Xu Di¹, Sun Jiwen^{1,2}

(1. *Irrigation and Drainage Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;*

2. *College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)*

Abstract: Determining the photosynthetic parameters is the basis for understanding the physiological causes of water saving and yield increasing under drip irrigation modes. In this study, intrinsic photosynthetic parameters were determined during four years experiments in winter wheat field treated with six drip irrigation modes (T1 to T6, stands for treatments of lower irrigation amount with straw mulch, lower irrigation amount without straw mulch, moderate irrigation amount with straw mulch, moderate irrigation amount without straw mulch, higher irrigation amount with straw mulch, and higher irrigation amount without straw mulch, respectively). The differences in photosynthetic parameters among treatments were statistically analyzed, and the correlations between photosynthetic parameters and crop yield were analyzed. The results showed that increasing irrigation amount and straw mulch enhanced the apparent photon quantum efficiency (α), photosynthetic capacity (A_{\max}), maximum carboxylation rate (V_{\max}) and maximum electron transfer rate (J_{\max}), respectively. However, the interaction effects of irrigation amount and mulching on photosynthetic parameters were not significant ($p > 0.1$). The effect of drip irrigation on apparent quantum efficiency (α) was significant ($P < 0.05$) during the late periods of the heading and grain filling stages, while the effect of straw mulch on α was not significant ($P > 0.1$). The effect of straw mulch and drip irrigation on A_{\max} show significant ($P < 0.05$) seasonal differences. The effects of drip irrigation on V_{\max} and J_{\max} were significant ($P < 0.05$) during the mid-season periods of the heading and grain filling stages, while the effects of straw mulch were significant ($P < 0.05$) during the later periods of the heading and grain filling stages. The results of multiple comparisons showed that the photosynthetic parameters of T5 were the highest ($P < 0.05$). Except for the measurements in 2016, the corresponding values of T6 and T3 were slightly lower but with no significant difference from those of T5 ($P > 0.1$). However, the corresponding values of T2 were significantly lower ($P < 0.05$) than those of T5. These results suggested that, under higher irrigation amount, photosynthetic parameters were not affected significantly ($P > 0.05$) by mulching, but under lower irrigation amount, the parameters significantly ($P < 0.05$) decreased if treated with no mulching. The average values of A_{\max} during the four years from T1 to T6 were 29.59, 26.45, 31.44, 28.68, 32.42 and 30.90 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, respectively. The average values of V_{\max} during the four years from T1 to T6 were 121.42, 107.68, 133.42, 113.55, 141.83 and 129.95 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, respectively. From the point of view of reducing the amount of irrigation, T3 irrigation scheduling can be used as an optimal strategy for winter wheat under drip irrigation with straw mulch, indicating that 65% to 85% of the field capacity was used as the lower and upper limits of soil moisture control. The management practices of drip irrigation with straw mulch can keep the higher photosynthetic capacity of flag leaf for winter wheat. The differences in A_{\max} and V_{\max} among treatments could be explained by the leaf nitrogen content (N_{mass}). Grain yield for all years were also linearly related to A_{\max} and V_{\max} , respectively. Therefore, by measuring N_{mass} , one can estimate A_{\max} and V_{\max} , thus achieving the yield estimates of winter wheat field in this area. In addition, the photosynthetic characteristic parameters can also be applied to the crop model to improve the accuracy of model prediction under different water and mulch regimes.

Keywords: crops; irrigation; photosynthesis; winter wheat; straw mulching; leaf nitrogen content