

黄淮海平原冬小麦 (*Triticum aestivum*) 旗叶的生理生态特性

谷艳芳^{1,2}, 高志英², 邢 倩², 丁圣彦^{1,2,*}

(1. 河南大学生态科学与技术研究所, 开封 475001 2. 河南大学生命科学学院, 开封 475001)

摘要 : 分别于 2005 年和 2006 年 4、5 月份, 在中国科学院封丘农业生态试验站用 Li-6400 光合测定仪对田间冬小麦 (*Triticum aestivum*) 进行了净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 日变化的测定, 并同步测定了有效辐射 (PAR)、气温 (T_a)、叶温 (T_l)、空气相对湿度 (R_h)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 等因子, 研究了冬小麦旗叶的 P_n 、 T_r 与环境 and 生理因子之间的关系。结果表明, 冬小麦旗叶的 P_n 随 PAR 的增加而升高, 其光补偿点和光饱和点分别在 $50 \sim 60 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 和 $1050 \sim 1100 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 左右; T_r 随 PAR 呈线性升高。 T_a 与 T_l 的相关系数 $r = 0.886^{**}$, 达显著水平, 冬小麦旗叶 P_n 随 T_a 、 T_l 的增加而升高, 当 T_a 、 T_l 分别超过 $30^\circ C$ 、 $32^\circ C$ 左右时, P_n 随两因子的增加反而下降, T_r 随 T_a 、 T_l 的增加呈直线升高。冬小麦旗叶 P_n 、 T_r 与 G_s 的相关系数分别为 $r = 0.407^{**}$ 和 $r = 0.322^{**}$, 二者均随 G_s 的增加而升高, 当 G_s 超过 $0.2 mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 左右时 P_n 的速度就会减缓。冬小麦旗叶的 P_n 、 T_r 均随 C_i 的增加而下降。通过对生态、生理因子的多元回归分析表明, 影响黄淮海平原冬小麦旗叶的 P_n 、 T_r 的主要因子是 PAR 、 G_s , 除此以外, C_i 也是影响 P_n 的重要因子。

关键词 : 冬小麦旗叶, 净光合速率, 蒸腾速率, 生理生态因子, 黄淮海平原

文章编号 : 1000-0933 (2007) 08-3465-07 中图分类号 : Q145, Q948 文献标识码 : A

Ecophysiological characteristics of flag leaf of winter wheat in HuangHuaiHai Plain

GU Yan-Fang^{1,2}, GAO Zhi-Ying², XING Qian², DING Sheng-Yan^{1,2,*}

1 Institute of Ecological Science and Technology, Henan University, Kaifeng 475001, China

2 College of Life Science, Henan University, Kaifeng 475001, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (8) 3465 ~ 3471.

Abstract : Photosynthesis and transpiration of flag leaf of winter wheat in Feng-qiu Agricultural Experiment station of CAS were measured at different growing stages with model Li-6400 photosynthesis system. In addition, variables such as the leaf temperature, photosynthesis active radiation, relative humidity, stomatal conductance, intercellular CO_2 concentration were also measured. This experiment studied the relations between the net photosynthesis rate & transpiration rate of flag leaf and ecological & physiological factors. The results showed that P_n of flag leaf rose when PAR increased, the light compensation point of photosynthesis (I_c) and light saturation point of photosynthesis (I_{sat}) in flag leaves were respectively about $50 - 60$

基金项目 : 国家重大基础研究计划课题 (973) (2005CB121103) ; 国家自然科学基金资助项目 (30570301, 40671175) ; 河南省科技攻关资助项目 (072102170005)

收稿日期 : 2006-10-17 ; 修订日期 : 2007-03-30

作者简介 : 谷艳芳 (1963 ~), 女, 河南开封人, 博士生, 副教授, 主要从事生态系统生态学研究. E-mail : guyanfang@henu.edu.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : syding@henu.edu.cn

Foundation item : The project was financially supported by State Key Basic Research and Planning Project (No. 2005CB121103), the National Natural Science Foundation of China (No. 30570301, 40671175) and Key Program of Scientific and Technological Innovations of He'nan Province (No. 072102170005)

Received date 2006-10-17 ; **Accepted date** 2007-03-30

Biography : GU Yan-Fang, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in ecosystem ecology. E-mail : guyanfang@henu.edu.cn

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and $1050-1100\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$; T_r of flag leaf showed a positive linear correlation with PAR . The relative coefficient between T_a and T_l was 0.886^{**} , P_n of flag leaf rose as T_a and T_l increased, then began to decrease when T_a and T_l exceeded $30\ ^\circ\text{C}$ and $32\ ^\circ\text{C}$ respectively; T_r of flag leaf showed a positive linear correlation with T_a and T_l . Relative coefficient between P_n and G_s was $r=0.407^{**}$, relative coefficient between T_r and G_s was $r=0.322^{**}$; both first rose while G_s increased, then decreased when G_s exceeded $0.2\ \text{mol}\ \text{m}^{-2}\ \text{s}^{-1}$. P_n and T_r decreased when C_i increased. PAR and G_s were the dominant factors affecting plant photosynthesis and transpiration.

Key Words : flag leaf of winter wheat ; photosynthesis rate ; transpiration rate ; ecohysiological factors ; HuangHuaiHai Plain

小麦 (*Triticum aestivum*) 产量的形成主要来自于抽穗后的光合产物, 因此不同环境条件下小麦旗叶光合、蒸腾特性是探索小麦光合生产力和保证粮食高产稳产的基础^[1,2], 也是栽培学、植物学、植物生理生态学等多学科的研究焦点。小麦的重要生理功能光合作用和蒸腾作用既受小麦遗传特性、叶片气孔的控制, 又受温度、光照和水分等环境因子的影响。由于各地区的自然环境不同, 以及小麦对特定地域自然条件的长期适应, 使不同地区小麦的光合作用特性和对环境的响应都有差异, 前人已对黑河、青藏高原和陕西渭北旱塬等产粮区的环境因子对小麦光合、蒸腾特性的影响进行了研究^[3-6]。黄淮海中部平原为幅员辽阔的黄河冲积平原, 耕地面积约 $8.754\times10^7\ \text{hm}^2$, 是我国主要的旱粮产区之一。该地区属半湿润偏旱地区, 年降雨量不足、且供需错位, 冬小麦快速生长期常出现干旱少雨^[7], 因此生态条件与其他产粮区有所不同。本试验以冬小麦为实验材料, 研究各生态因子对该地区小麦旗叶的影响, 并且通过模型拟合来反映环境因子对净光合速率、蒸腾速率的影响以及各生理因子之间的相关性, 为探讨小麦旗叶生理生态机制, 提高其光合能力和物质生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

在中国科学院封丘农业生态实验站进行。封丘地处黄淮海平原中部, 黄河北岸, 地理位置在东经 $114^\circ14'$, 北纬 $34^\circ53'\sim35^\circ14'$, 平均海拔 $67.5\ \text{m}$, 该区域属黄河冲积平原, 地势平坦, 属于季风影响的半湿润类型地区, 旱季雨季分明。多年平均降雨量 $605\ \text{mm}$, 蒸发量 $1713\ \text{mm}$, 年平均日照时数 $2310\ \text{h}$, 无霜期 $220\ \text{d}$ 。地下水位通常在 $2\sim4\ \text{m}$ 。种植制度为一年二熟, 即小麦-玉米或小麦-棉花等。该地区无论在气候特征还是生产特征在黄淮海平原均具有代表性。

1.2 试验材料

实验材料为冬小麦 (*Triticum aestivum*) 郑麦 9023 和周麦 18, 于 2004、2005 年 10 月中旬播种, 种植密度 $4.5\times10^6\ \text{hm}^{-2}$, 播种前施底肥 (尿素 $195\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 磷酸二氢铵 $195\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 硫酸二钾 $150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)。土壤为砂壤土 (容重为 $1.43\ \text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), 播前该土壤含全氮 $0.56\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 $8.90\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 $232.80\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。水分和肥料管理同大田生产。

1.3 研究方法

测定时间在 2005、2006 年分别于小麦扬花期 (2005 年 4 月 24~26 日, 2006 年 4 月 25~27 日), 灌浆乳熟期 (2005 年 5 月 10~13 日, 2006 年 5 月 12~15 日) 测定, 选择晴朗无云天气进行测定, 从 6:30~18:30, 每隔 2 h 测 1 次, 共测定 6 次, 每个时期测 3 d。测定时, 随机选取 3 株小麦旗叶, 用 LI-6400 光合测定仪 (LI-COR, Inc., US) 进行测定, 待仪器系统稳定后, 每株旗叶取 3 个瞬时净光合速率值 (P_n) 和蒸腾速率值 (T_r), 同时对气温 (T_a)、叶温 (T_l)、有效光辐射 (PAR)、相对湿度 (R_h)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 等进行同步测定。

测定数据进行 t -检验, 并用 SPSS 11.5 软件对净光合速率和蒸腾速率分别与各因子之间的关系拟合、多元逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 分别与各环境因子之间的关系

2.1.1 净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 与光合有效光辐射 (PAR) 的关系

PAR 是作物进行光合作用的能量来源,它直接影响作物叶片的 P_n 。从图 1 可以看出,小麦叶片的 P_n 基本随 PAR 的增加而提高(图 1-a1)。 PAR 在 $50 \sim 60 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右 P_n 为零,即光补偿点,随着 PAR 的增强, P_n 逐渐增大。 PAR 在 $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内 P_n 提高的速度较快;当高于 $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 P_n 提高的速度变的缓慢。当 PAR 达 $1050 \sim 1100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时 P_n 最大,既光饱和点,若 PAR 继续增加 P_n 就会下降。 PAR 不仅直接影响作物叶片的 P_n ,还通过调节与光合作用相关的生理过程影响植物的蒸腾特性,而且 PAR 是蒸腾作用发生的驱动力,因此两者之间显著相关 ($r=0.494^{**}$) (表 1)。当 PAR 增强时, T_a 和 T_l 也随着升高(图 1-a2),导致叶肉细胞间隙的水气压与叶表面大气压差增大, T_r 也随着增高。 T_r 随 PAR 的增加呈直线上升。

表 1 小麦旗叶净光合速率、蒸腾速率与各因子的相关分析

Table 1 Relationships between net photosynthetic rate & transpiration rate of wheat flag leaf and related factors								
项目 Item	P_n	T_r	PAR	T_a	T_l	R_h	G_s	C_i
P_n	1.000	0.494 **	0.513 **	0.202 **	0.212 **	0.195 *	0.407 **	-0.328 **
T_r		1.000	0.494 **	0.409 **	0.404 **	-0.146 *	0.322 **	-0.107 *
PAR			1.000	0.460 **	0.432 **	-0.124 *	0.211 **	-0.106 *
T_a				1.000	0.886 **	-0.118 *	0.137 *	-0.062
T_l					1.000	-0.116 *	0.127 *	-0.086
R_h						1.000	0.163 *	-0.084
G_s							1.000	-0.153 *
C_i								1.000

* $p<0.05$, ** $p<0.01$ * Correlation is significant at the 0.05 level, ** Correlation is significant at the 0.01 level

2.1.2 净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 与气温 (T_a) 的关系

光合作用是由酶系统参与的过程,而酶的活性直接受温度影响,所以温度是影响植物光合生产力的一个主要生态因子。当 T_a 在 $17 \sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间(图 1-b1), P_n 随 T_a 的上升迅速上升,而后随着 T_a 的上升 P_n 缓慢上升,当 T_a 达到 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右 P_n 最大,随着 T_a 继续增加 P_n 下降。通过曲线拟合,二者呈二次曲线关系。当 T_a 超过光合最适温度时, T_a 的增加引起 P_n 降低。从以上分析可知该地区冬小麦光合作用的最适温度是 $25 \sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

从图 1 也可以看出, T_r 与 T_a 的关系和与 PAR 的关系趋势一样(图 1-b2),这是因为 T_a 受 PAR 的直接影响,两者之间的正相关达到极显著水平 ($r=0.460^{**}$) (表 1)。当 T_a 超过 $33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, T_r 随 T_a 的升高呈直线上升,经拟合 T_r 与 T_a 呈线性关系。

2.1.3 净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 与叶温 (T_l) 的关系

图 1-c 表明了 P_n 、 T_r 与 T_l 的关系。从图中可以看出 P_n 对 T_l 的响应与对 T_a 响应方式相似,这是因为 T_l 和 T_a 密切相关 ($r=0.886^{**}$) (表 1)。 P_n 随 T_l 的升高而增加(图 1-c1),当 T_l 达到 $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时 P_n 达到最高,随后 P_n 下降。原因可能是 T_l 过高引起 PS II 失活,一旦高温诱导的 PS II 放氧复合体失活,光合电子传递就势必会受到抑制,导致 P_n 下降^[7,8]。 T_r 对 T_l 的响应趋势和对 PAR 、 T_a 相似(图 1-c2),都是呈上升趋势,可能是 T_l 的变化受 PAR 、 T_a 的直接影响 ($r=0.432^{**}$ 和 $r=0.886^{**}$) (表 1)。

2.1.4 净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 与相对湿度 (R_h) 的关系

由图 1 可见 R_h 与 P_n 呈非线性关系(图 1-d1),二者的拟合方程为二次曲线方程。小麦的 P_n 随 R_h 的增大而升高。Slavik 研究认为随 R_h 的增加植物叶片气孔导电性增加,并可能引起 CO_2 吸收增加,最终光合作用增强^[9]。当大气 R_h 达到 60% 左右 P_n 达到最高,随着大气 R_h 的继续增加 P_n 下降,这可能是由环境因子 PAR 、 T_a

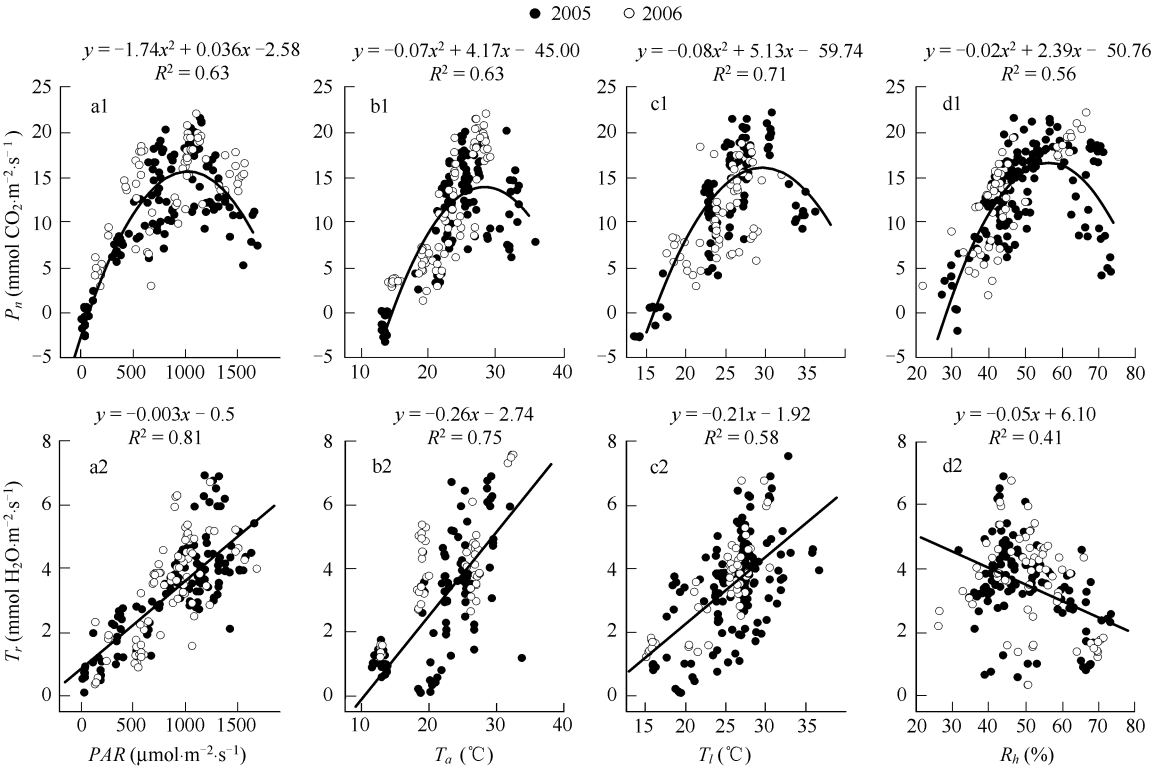


图1 小麦旗叶净光合速率和蒸腾速率与环境因子的关系

Fig. 1 Relationship between P_n & T_r of wheat flag leaf and environmental factors

都比较低引起的。 R_h 直接影响旗叶内外蒸汽压的变化,当 R_h 减小时,旗叶内外蒸汽压差变大,加快 T_r ;当 R_h 增大时,旗叶内外蒸汽压差变小, T_r 也变小。从图 1-d2 也看出, T_r 随着 R_h 的增大而减小,两者呈负相关趋势($r = -0.146^*$)(表 1)。所以 R_h 也是影响 P_n 和 T_r 的主要因子。

2.2 净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)与生理因子之间的关系

2.2.1 净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)与气孔导度(G_s)的关系

叶片的光合作用和蒸腾作用是两个同时进行的气体交换过程,所以气孔的特征直接影响着 P_n 和 T_r 。小麦 P_n 、 T_r 与 G_s 的关系由图 2-a 可见。小麦 G_s 在小于 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内, P_n 随 G_s 呈直线增加;当 G_s 超过 $0.2 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, P_n 增加的速度就会减缓。 G_s 在达 $0.3 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右时, P_n 最大,超过这个阈值, P_n 下降,这可能是由于 PAR 、 T_a 、 T_i 过高,对作物生理造成损伤,或者 C_i 过低引起。小麦 T_r 随 G_s 呈线性关系(图 2-c)。

2.2.2 净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)与胞间 CO_2 浓度(C_i)的关系

从图 2-b 可以看出,叶片 P_n 与 C_i 的关系呈负相关。 P_n 值较大时, C_i 较小;反之, P_n 值变小时, C_i 增大。其原因可能是由于光合作用强,消耗的 CO_2 就多,胞间 CO_2 得不到及时补足, C_i 就会下降;反之, C_i 就会增加。另一方面, C_i 增加引起细胞中 pH 的改变,使一些生化酶活性降低^[10],进而降低光合作用。同样 T_r 与 C_i 也呈负关系(图 2-d), T_r 随 C_i 的增加而下降。气孔对 C_i 敏感, C_i 增加导致 G_s 下降,说明 C_i 主要是通过对 G_s 的影响间接的作用 T_r 。

2.3 生理生态和环境因子对净光合速率、蒸腾速率的综合影响

从上面分析可知,净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)受环境因子 PAR 、 T_a 、 T_i 、 R_h 和生理因子 G_s 、 C_i 等的影响,并且不同因子影响的程度不同,因此可用逐步回归分析的方法找出对 P_n 、 T_r 影响最大的因子。从表 2 看出,经多元逐步回归分析, P_n 得 3 个模型,其中模型 III 的 F 值最大,概率小于 0.001,在 0.001 水平上显著,所

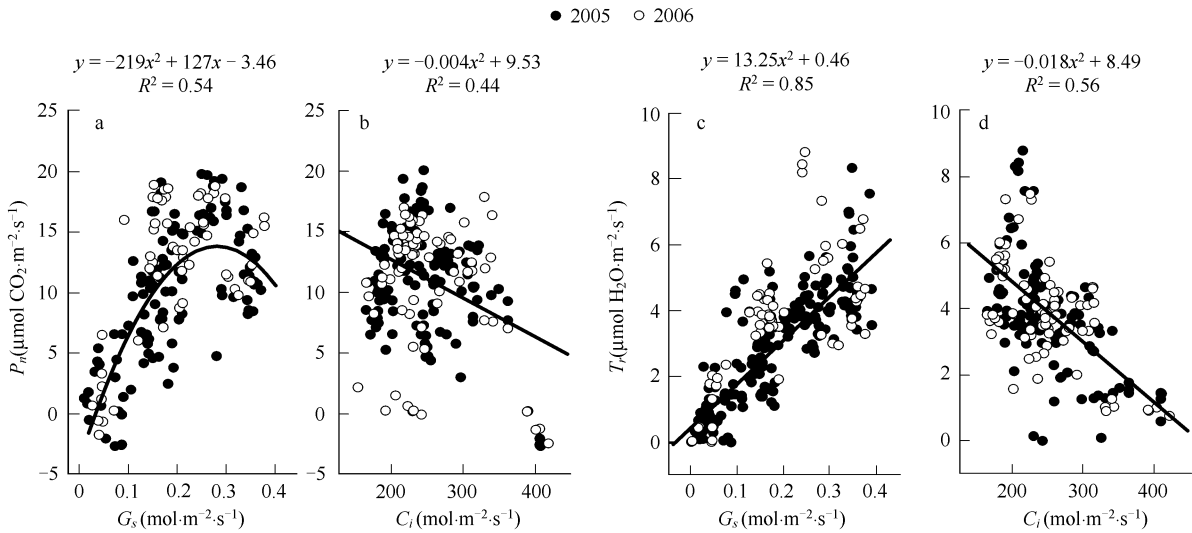


图2 旗叶净光合速率和蒸腾速率与生理因子的关系

Fig.2 Relationship between P_n & T_r of flag leaf and physiological factors

以选择模型Ⅲ作为 P_n 的回归模型。同样,在 T_r 的多元回归模型中,选择模型Ⅱ作为 T_r 的回归模型。

从 P_n 的多元回归模型Ⅲ可知,影响 P_n 的主要因子是 G_s 、 C_i 、 PAR 。而且从回归系数可知 P_n 与 G_s 、 PAR 正相关,与 C_i 负相关,这与相关分析结果一致。同样,从 T_r 的多元回归模型Ⅱ可知,影响 T_r 的主要因子是 PAR 、 G_s ,而且两个因子均与 T_r 正相关。 T_l 、 T_a 与 P_n 的相关系数 r 分别为 0.212**、0.202** ,与 T_r 的相关系数 r 分别为 0.404**、0.409** ,但两个因子在模型Ⅲ中不存在,可能是 T_l 、 T_a 与 PAR 有更强的相关性,从而造成 PAR 对 P_n 、 T_r 的影响作用包含了 T_l 、 T_a 对 P_n 、 T_r 的影响。 C_i 与 G_s 的相关性 ($r = -0.153^*$) 大于 C_i 与 T_r 的相关性 ($r = -0.107^*$) ,所以 G_s 对 T_r 的影响作用包含了 C_i 对 T_r 的影响。所以对于模型中不存在的因子,并不排除这些因子对 P_n 、 T_r 的影响。

表2 小麦旗叶净光合速率、蒸腾速率分别与各因子的多元逐步回归分析

Table 2 Regression analysis between net photosynthetic rate & transpiration rate of wheat flag leaf and factors

Model	回归方程 Regression equation	R^2	校正决定系数 Adj R-sq	复相关指数 R	F	p
P_n	I $P_n = 0.817 + 0.0036G_s$	0.455	0.440	0.675	30.090	0.000
	II $P_n = 26.186 + 0.0041G_s - 0.116C_i$	0.770	0.757	0.878	38.694	0.000
	III $P_n = 20.149 + 0.039G_s - 0.092C_i + 0.002PAR$	0.801	0.783	0.895	45.556	0.000
T_r	I $T_r = 1.438 + 0.0029PAR$	0.749	0.745	0.866	167.446	0.000
	II $T_r = -0.364 + 0.0029PAR + 0.0132G_s$	0.919	0.916	0.959	311.033	0.000

3 结论与讨论

3.1 结论

本文通过对黄淮海平原小麦的 P_n 、 T_r 分别与生态因子 PAR 、 T_a 、 T_l 、 R_h 、和生理因子 G_s 、 C_i 的关系研究,得出以下结论:

- (1) PAR 、 T_a 、 T_l 、 R_h 和 G_s 与 P_n 均呈二次曲线关系。 P_n 随 PAR 、 T_a 、 T_l 、 R_h 、 G_s 的上升而升高,但当各因子超过一定阈值时 P_n 会随着升高而下降。 C_i 与 P_n 呈直线关系。
- (2) T_r 随 PAR 、 T_a 、 T_l 呈线性升高,随 R_h 、 C_i 直线下降。
- (3) 影响 P_n 的主要因子是 PAR 、 G_s 、 C_i ,而影响 T_r 的主要因子是 PAR 、 G_s 。

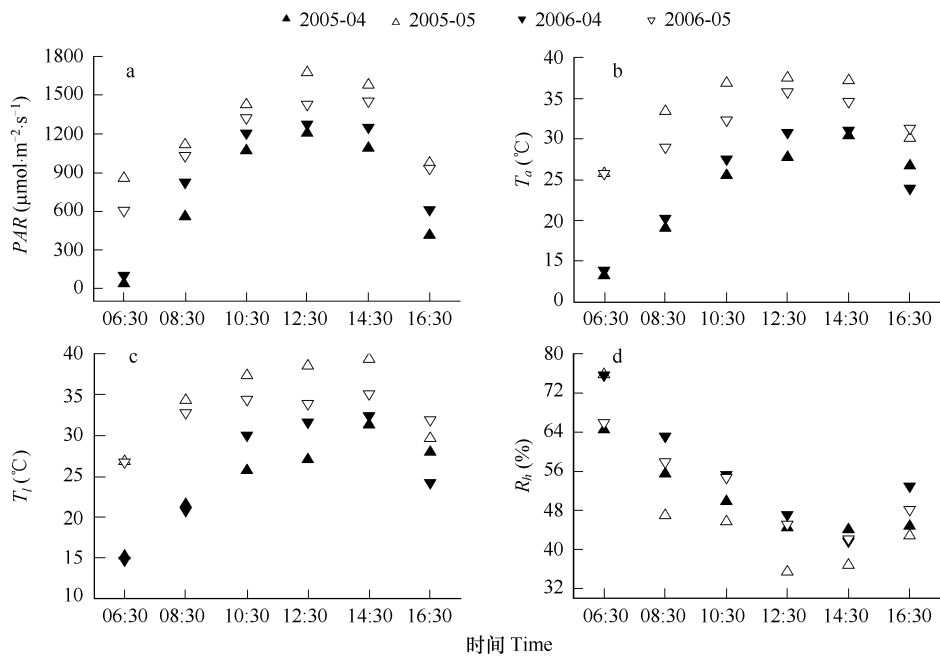


图3 2005年和2006年环境因子日变化
Fig. 3 Diurnal changes of environmental factors in 2005 and 2006

3.2 讨论

净光合速率 (P_n)与蒸腾速率 (T_r)是作物两个重要生理过程,小麦处在一定生态条件下,外界环境因子包括 PAR 、 T_a 、 T_l 、 R_h 是不断变化的,小麦为了适应这些变化,内部生理因子包括 G_s 、 C_i 会作出相应的改变,并且这些因子相互影响。从图3可以看出 PAR 、 T_a 、 T_l 三因素日变化趋势相似。从6:30~14:30随 PAR 不断增强 T_a 、 T_l 不断升高(图3a),而净光合速率 P_n 随其在一定范围内逐渐升高,当 PAR 、 T_a 、 T_l 升高到一定程度以后, P_n 下降,一方面可能是气孔因素, PAR 增强引起环境中温度、湿度变化导致小麦气孔关闭, P_n 降低。另一方面是非气孔因素,光强过强导致表观量子效率和PS II光化学效率明显降低,产生了光抑制^[9];也可能是由 PAR 引起 T_a 、 T_l 过高,抑制了参与光合过程的酶活性,进而导致叶片羧化效率的降低,使 P_n 锐减^[10~12]。本研究黄淮海平原冬小麦旗叶的 P_n 的最适 T_a 、 T_l 分别在25~30℃、27~32℃。两时期的 T_l 在各时间段均比 T_a 高(图3b,c),且 P_n 达到最高时的 T_l 比 T_a 高2℃,其原因可能是由于作物体内代谢活动强导致 T_l 比 T_a 高。而王润元在定西研究小麦净光合速率在20~25℃时最大^[6]。在10:00~12:00 R_h 的值在50%~60%(图3d),是 P_n 的最适 R_h 值,这可能是和 PAR 、 T_a 、 T_l 的影响有关。本文对 P_n 与 G_s 的研究发现,二者呈二次曲线关系,而王会肖等也认为 P_n 与 G_s 呈二次曲线关系,并且当 G_s 在0.12 mol·m⁻²·s⁻¹时, P_n 最大^[4]。 T_r 与各因子的关系研究发现,蒸腾速率 T_r 与 G_s 相关性很强,随有效辐射 PAR 的增加呈直线上升,这与黄占斌等研究结果一致^[5],因此影响气孔启闭的环境因子如 PAR 、 R_h 等是影响 T_r 的重要因子,陕西渭北和定西研究也认为大气相对湿度是影响小麦 T_r 的最主要因子^[5]。黄淮海平原地区5、6月份光照充足、少雨干旱,并常常伴有干热风出现,高温少雨气候使土壤干旱、大气相对湿度降低,导致气孔关闭、气孔导度下降、净同化CO₂量减少,影响光合产物的产生。由于小麦具有对强光的适应性特征,小麦生育后期高温和降雨量少是本地区限制小麦旗叶光合生产的重要环境因子。在高温和干旱条件下,小麦生育后期生理生态特征和环境适应性机制还有待进一步研究。

References :

[1] Zelitch I. The close relationship between net photosynthesis and crop yield. *Bioscience* ,1982 ,32 :796 — 802.

[2] Zwiazek J J , Blake T J. Effects of preconditioning on subsequent water relations ,stomatal sensitivity and photosynthesis in black spruce. *Canadian Journal of Botany-revue Canadienne de Botanique* ,1989 ,67 :2240 — 2244.

[3] Jia L , Wang J M , Liu W. The influence of environmental factors on photosynthesis and transpiration in spring wheat field of Heihe area , Plateau Meteorology ,1994 ,13 (3) 359 — 368.

[4] Liu Y F , Zhang X Z , Zhang Y G. Flag leaf photosynthesis of winter wheat on a farmland of TIBET plateau. *Acta Phytoecologica Sinica* ,1999 ,23 (6) :521 — 528.

[5] Zhao L X , Jing J H , Wang S T. Studies on water transports in the soil-plant-atmosphere continuum on weibei rainfed highland shanxi province IV. effects of ecological and physiological factors on transpiration rate of weibei wheat. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin* ,1996 ,16 (6) :17 — 25.

[6] Wang R Y , Yang X G , Zhao H , *et al.* Eco-physiological characteristics of wheat leaf photosynthesis and their responses to environmental factors in semiarid rain2fed region. *Chinese Journal of Ecology* 2006 ,25 (10) :1161 — 1166.

[7] Zhou L Y , Li W M. Solution for water resource Disequilibrium in the Middle of the Huang-Huai-Hai Plain. *Chinese Journal of Soil Science* ,2002 ,339 (4) 253 — 255.

[8] Baker N R. Possible role of photosystem III. In environmental perturbations photosynthesis. *Plant Physiology* ,1991 ,81 563 — 570.

[9] Nikolai G. Heterogeneity of photosystem II. reaction centers as influence by heat treatment of barley leaves. *Physiologia Plantarum* 2000 ,110 :279 — 285.

[10] Slavik B. Transpiration resistance in leaves of maize grown in humid and dry air. *Plant response to climatic factors. Place de Fontenay* ,1996 22 :120 — 125.

[11] Jiang GM. A review on the response of plant's dark respiration to the elevated CO₂ concentration. *Journal of Plant Resources and Environment* ,1997 ,6 (3) :54 — 60.

[12] Krause G H , Weis E. Chlorophy II. fluorescence and photosynthesis : the basics. *Annual Review of Plant Physiology* ,1991 ,42 313 — 349.

[13] Murchie E H , Chen Y , Hubbat S , Horton P. Interations between senescence and leaf orientation determine *in situ* patterns of photosynthesis and photoinhibition in field-grown rice. *Plant Physiology* ,1999 ,119 553 — 563.

[14] Wang H X , Liu C M. Experimental study on crop photosynthesis , transpiration and high efficient water use. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2003 ,14 (10) :1632 — 1636.

[15] Huang Z B , Shan L. Diurnal change of water use efficiency of spring-wheat and its physioecological basis , *Chinese Journal of Applied Ecology* ,1997 ,8 (3) 263 — 269.

参考文献 :

[3] 贾立 ,王介民 ,刘巍. 黑河试验区春小麦田间的环境因子对蒸腾和光合作用的影响. *高原气象* ,1994 ,13 (3) 359 ~ 368.

[4] 刘允芬 ,张宪洲 ,张谊光 ,周允华. 西藏高原田间冬小麦旗叶光合作用研究. *植物生态学报* ,1999 ,23 (6) :521 ~ 528.

[5] 赵立新 ,荆家海 ,王韶唐. 陕西渭北旱塬土壤-植物-大气连续体中水分运转规律的研究 IV. 生态和生理环境对蒸腾速率的影响. *西北植物学报* ,1996 ,16 (6) :17 ~ 25.

[6] 王润元 ,杨兴国 ,赵鸿 ,等. 半干旱雨养区小麦叶片光合生理生态特征及其对环境的响应. *生态学杂志* ,2006 ,25 (10) :161 ~ 1166.

[7] 周凌云 ,李卫民. 黄淮海中部平原水资源失衡问题与对策. *土壤通报* 2002 ,33 (4) 253 ~ 255.

[1] 蒋高明. 植物暗呼吸作用对大气 CO₂ 浓度升高的响应. *植物资源与环境* ,1997 ,6 (3) 54 ~ 60.

[14] 王会肖 ,刘昌明. 作物光合、蒸腾与水分高效利用的试验研究. *应用生态学报* 2003 ,14 (10) :1632 ~ 1636.

[15] 黄占斌 ,山仑. 春小麦水分利用效率日变化及其生理生态基础的研究. *应用生态学报* ,1997 ,8 (3) 263 ~ 269.