

氮磷肥配施对超高产冬小麦灌浆期光合日变化及产量的影响^{*}

赵海波¹ 林 琪^{1*} 刘义国¹ 姜 雯¹ 刘建军² 翟延举³

(¹ 青岛农业大学旱作技术重点实验室, 山东青岛 266109; ² 山东省农业科学院作物研究所, 济南 250100; ³ 莱州市金海种业
有限公司, 山东莱州 261400)

摘 要 在大田超高产条件下, 研究了氮磷肥配施对超高产冬小麦济麦 22 灌浆期光合日变化及产量的影响. 结果表明: 对照(不施氮磷肥)和低氮低磷处理(N、P 分别为 225 和 75 kg · hm⁻²)的净光合速率(P_n)日变化均呈双峰曲线, 有明显的光合“午休”现象, 而合理的氮磷处理(N₂P₂, N、P 分别为 300 和 150 kg · hm⁻²)可以减弱甚至使光合“午休”现象消失; “午休”现象的产生是气孔因素与非气孔因素共同作用的结果. 随施肥量增加, 小麦的 P_n 、气孔导度(G_s)、气孔限制值(L_s)和蒸腾速率(T_r)均逐渐增强. 磷素对小麦光合作用的影响程度小于氮素, 当施磷量超过 150 kg · hm⁻²时, 小麦 P_n 随施磷量的增加程度有所减缓, 甚至下降, 各处理中以 N₂P₂ 处理 P_n 、 G_s 和水分利用效率与对照差异最显著. 表明氮肥对超高产小麦光合日变化有较大的调节作用, 磷肥次之, 而氮磷肥配施对 P_n 、 G_s 、 T_r 存在极显著的互作效应. 当 N、P 分别为 300 和 150 kg · hm⁻²时有利于提高超高产冬小麦的 P_n 和产量.

关键词 氮磷肥配施 超高产冬小麦 光合日变化 产量

文章编号 1001-9332(2010)10-2545-06 **中图分类号** S147.2 **文献标识码** A

Effects of combined application of nitrogen and phosphorus on diurnal variation of photosynthesis at grain-filling stage and grain yield of super high-yielding wheat. ZHAO Hai-bo¹, LIN Qi¹, LIU Yi-guo¹, JIANG Wen¹, LIU Jian-jun², ZHAI Yan-ju³ (¹Key Laboratory of Dry Land Farming Technology, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China; ²Institute of Crop Science, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China; ³Laizhou Jinhai Seed Limited Company, Laizhou 261400, Shandong, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(10): 2545-2550.

Abstract: Taking super high-yielding wheat cultivar Jimai 22 as test material, a field experiment was conducted to study the effects of combined application of nitrogen (N) and phosphorus (P) on the diurnal variation of photosynthesis at grain-filling stage and the grain yield of the cultivar. In treatments CK (without N and P application) and low N/P application (225 kg N · hm⁻² and 75 kg P · hm⁻²), the diurnal variation of net photosynthetic rate (P_n) was presented as double-peak curve, and there existed obvious midday depression of photosynthesis. Under reasonable application of N/P (300 kg N · hm⁻² and 150 kg P · hm⁻², treatment N₂P₂), the midday depression of photosynthesis weakened or even disappeared. Stomatal and non-stomatal limitations could be the causes of the midday depression. Increasing N and P supply increased the P_n , stomatal conductance (G_s), stomatal limitation value (L_s), and transpiration rate (T_r). Fertilizer P had less effects on the photosynthesis, compared with fertilizer N. When the P supply was over 150 kg · hm⁻², the increment of P_n was alleviated and even decreased. Among the fertilization treatments, treatment N₂P₂ had the highest P_n , G_s , and water use efficiency, being significantly different from CK. It appeared that fertilizer N had greater regulatory effect on the diurnal variation of photosynthesis, compared with fertilizer P, while the combined application of N and P had significant co-effect on the

^{*} 国家自然科学基金项目(30871484)、国家科技支撑计划项目(2006BAD21B04-13)、国家粮食丰产科技工程项目(2006BAD02A09-Js03)和山东省作物栽培与育种“泰山学者”岗位基金项目资助.

^{*} 通讯作者. E-mail: qlin@qau.edu.cn

2010-01-25 收稿, 2010-07-21 接受.

P_n , G_s , and T_r . A combined application of $300\text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $150\text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$ benefited the enhancement of P_n and grain yield.

Key words: combined application of nitrogen and phosphorus; super high-yielding winter wheat; diurnal variation of photosynthesis; yield.

氮、磷是小麦生长发育所必需的重要元素,它们在很大程度上决定了小麦的光合能力和产量.合理施用氮、磷肥可有效提高小麦的净光合速率、产量和肥料吸收利用率,改善作物的水分利用效率^[1-2].此外,光合作用为作物产量形成提供物质基础^[3-4].一天中,随着环境条件的改变,叶片的光合速率往往发生规律性变化^[5-6].通常植物光合速率早晚低而中午高,其日变化进程与太阳辐射强度的变化相似,是一条单峰曲线.然而,在空气温度高、湿度小而阳光充足的夏季晴天,许多植物的光合日变化进程是一条双峰曲线,上、下午各有一个高峰,中午有一个低谷.这种光合速率的中午降低现象,称为光合作用的“午休”现象^[7-8].“午休”现象的发生,有利于干旱条件下植物的生存,但却不利于作物高产.在“午休”现象严重的时候,可以使植物的日光合生产力降低30%~50%,甚至更多.因此,减轻或避免光合“午休”现象是挖掘作物增产潜力的一个重要方面.

前人研究表明,随氮、磷用量增加杂种小麦旗叶净光合速率、叶绿素含量和气孔导度均升高,光合功能期延长,叶源量增加^[9-12].邢倩等^[13]研究表明,氮、磷、钾复合施肥有效提高了小麦的光合生产和水分利用效率,不同肥料处理仅改变了小麦光合日变化的幅度,而未改变其变化规律.本文研究了氮磷配施对超高产冬小麦光合日变化和产量的影响规律,以期找出合理的氮磷配施方案以协调小麦生长和代谢,减轻或避免光合“午休”现象,提高小麦光合能力和水分利用效率,最终提高产量.

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2007—2009年在烟台市莱州金海种业有限公司超高产示范园小麦超高产试验田进行,前茬为玉米,大田土壤有机质 $15.7\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.66\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮 $93.65\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷 $26.22\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾 $146.50\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

试验设225和 $300\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 2个施氮量(以纯氮计),分别记为 N_1 、 N_2 ,设75、150和 $225\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (P_2O_5)3个磷素水平,分别记为 P_1 、 P_2 、 P_3 ,则试验共6个处理,分别为: N_1P_1 、 N_1P_2 、 N_1P_3 、 N_2P_1 、 N_2P_2 、

N_2P_3 ,并设对照处理(CK,不施氮磷肥).所用氮、磷、钾肥种类分别为尿素(含纯氮46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 14%)、硫酸钾(含 K_2O 57%),施钾量均为 $112.5\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,其中氮肥基追比为1:1,磷肥和钾肥均作为基肥一次性施入.试验小区面积为 $1.9\text{ m} \times 20\text{ m}$,行距为19 cm,等行距种植,采用随机区组设计,重复3次.供试冬小麦品种为济麦22,分别于2007和2008年10月15日播种,进行两年的重复试验.田间管理按照超高产攻关田进行.

1.2 测定项目与方法

在小麦灌浆期的前(花后7~9 d)、中(花后17~19 d)、末(花后27~29 d)期分别选择3 d取旗叶测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)的日变化,在6:00—18:00间1 h测定1次,同时记录环境因子[光照强度(PAR)、大气温度(T_a)、相对湿度(RH)、 CO_2 浓度(C_a)]的变化.取平均值作为观测结果.观测仪器为美国LI-COR公司生产的Li-6400便携式光合作用测定仪,在测定过程中使叶片、量子传感器与日光保持垂直,光合测定仪的流速设定为 $500\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.气孔限制值(L_s)= $1 - C_i/C_a$ ^[14-15].水分利用效率(WUE , $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mmol}^{-1}\text{ H}_2\text{O}$)= P_n/T_r ^[16].

成熟时各处理取 4 m^2 小麦,重复3次,收获计产.

1.3 数据处理

按照测定的时间段对数据进行集合平均.用Excel 2007处理数据和制图,并用SPSS 17.0的单因素和多因素方差分析对数据进行显著性检验和互作效应方差分析.

2 结果与分析

2.1 小麦灌浆期环境因子的日变化

日出后,小麦灌浆期大气温度(T_a)和光合有效辐射(PAR)逐渐增大,在12:00时达最大值,分别为 $33.7\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1498\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,随后下降.而大气相对湿度(RH)和 CO_2 浓度(C_a)于12:00达最低值,分别为35.1%和 $310\text{ }\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (图1).

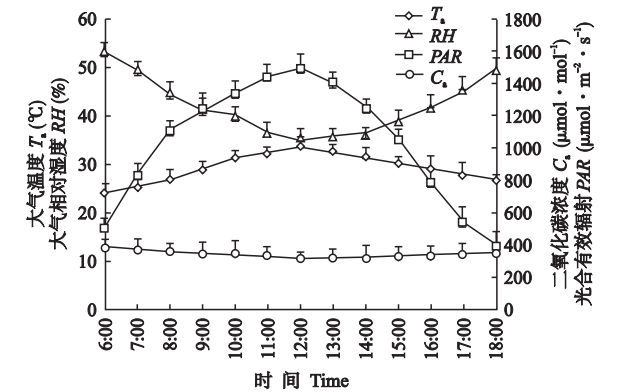


图1 小麦灌浆期环境因子的日变化

Fig.1 Diurnal variation of environmental factors at grain-filling stage of wheat (mean±SE).

2.2 氮、磷配施对超高产小麦净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和气孔限制值(L_s)日变化的影响

2.2.1 P_n 不同施肥处理对超高产小麦 P_n 日变化的影响不同. 由图2可知,各处理 P_n 在早晨和傍晚较低,11:00时达到最高值(平均为 $22.4 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),此后迅速下降,13:00时CK、 N_1P_1 及 N_1P_3 处理 P_n 处于低谷(平均为 $14.1 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),15:00时又出现第2个高峰(平均为 $16.1 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),但低于第一个高峰,日变化曲线呈双峰型. 其他处理在13:00—15:00下降缓慢,几乎持平,未出现光合午休现象. 各处理的 P_n 表现为: $\text{N}_2 > \text{N}_1 > \text{CK}$. 说明随氮素施用量的增加 P_n 增强,增加施氮量有利于维持小麦旗叶较长的光合功能期. 而磷素施用量对 P_n 增加的影响不如氮素明显,各处理间以 N_2P_2 和 N_2P_3 的 P_n 最高,并且两者的曲线接近,但下午 N_2P_2 的 P_n 下降较 N_2P_3 迅速. 对各处理氮、磷用量和 P_n 进行方差分析,结果表明,施肥各处理与CK存在极显著差异, N_2P_2 和 N_2P_3 与其他处理存在极显著差异,但两者差异不显著;氮、磷肥对超高产小麦 P_n 存在极显著的互作效应.

2.2.2 G_s G_s 的日变化曲线与 P_n 相似(图2),CK、 N_1P_1 及 N_1P_3 处理的双峰曲线高峰值分别出现在11:00 ($0.422 \text{ mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)左右和15:00 ($0.284 \text{ mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)左右,第1个高峰值显著高于第2个高峰值,在13:00时出现低谷; N_1P_2 及 N_2 各处理只在11:00时达到最高值 ($0.490 \text{ mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$),以后迅速下降,未出现低谷,即没有光合午休现象. 此外,上午 G_s 的增加较迅速,出现峰值后,施氮、磷量越大, G_s 峰值的降幅越小,说明

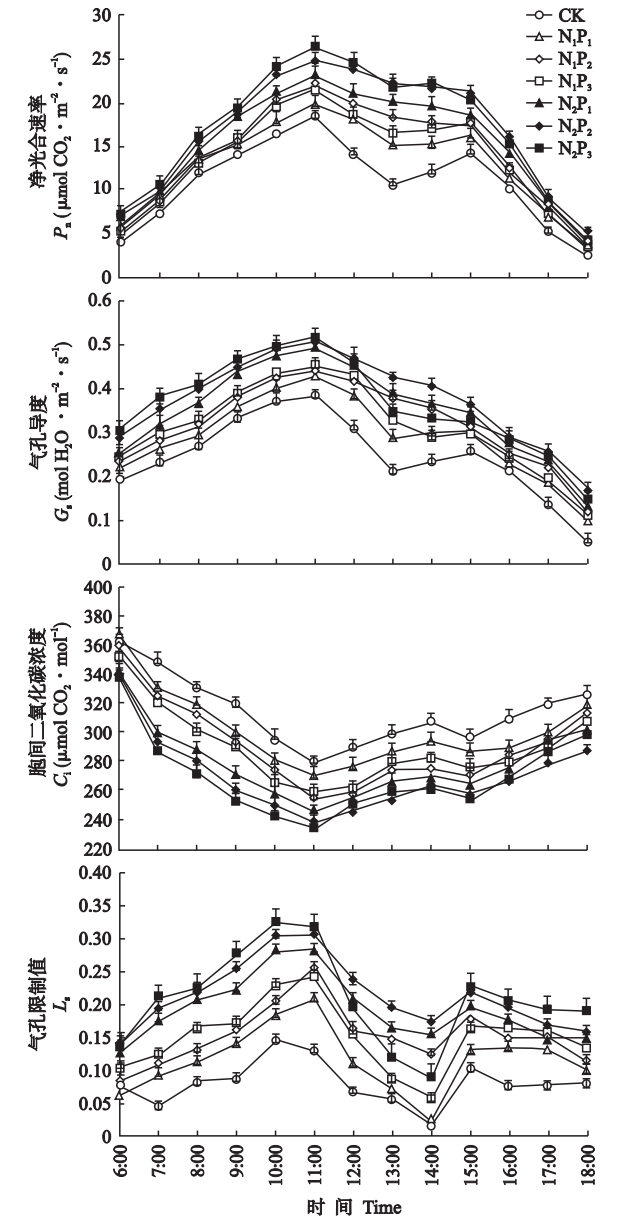


图2 氮磷配施对超高产小麦净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和气孔限制值日变化的影响

Fig.2 Effects of combined nitrogen and phosphorus fertilizers on diurnal variation of net photosynthesis rate (P_n), stomatal conductance (G_s), intercellular CO_2 concentration (C_i) and stomatal limitation value (L_s) of super-high-yield wheat (mean±SE).

CK: 对照 Control; N_1 : $225 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_2 : $300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; P_1 : $75 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$; P_2 : $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$; P_3 : $225 \text{ kg P} \cdot \text{hm}^{-2}$. 下同 The same below.

氮、磷量的增加有利于延缓叶片衰老,从而减缓 G_s 的降低,使低谷消失. 各处理间以 N_2P_2 处理的效果最好,且氮、磷肥对超高产小麦 G_s 存在极显著的互作效应.

2.2.3 C_i 和 L_s 由图2可知, C_i 的日变化与 P_n 和 G_s 基本上呈相反趋势,是单峰曲线,在清晨和傍晚

较其他时间高, 11:00 左右达到低谷 ($256 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$), 午后又呈上升趋势, 14:00 出现峰值 ($280 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$), 15:00 左右又达到低谷 ($271 \mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$). 低谷出现的时间与 P_n 和 G_s 峰值相对应, 说明二者的变化基本同步. 而 L_s 的日变化规律与 C_i 相反. 氮、磷配施对 C_i 的影响为增加施氮量可以提高小麦对胞间 CO_2 的利用能力, 以 N_2 处理对 CO_2 利用能力的增幅最大; 同时施磷量的增加也可以提高 CO_2 的利用能力. 方差分析表明, 不同氮素处理间 C_i 和 L_s 差异显著, 不同磷素处理间差异不显著. 氮、磷肥对超高产小麦 C_i 和 L_s 的互作效应不显著.

2.3 氮、磷配施对超高产小麦蒸腾速率(T_r)和水分利用效率(WUE)日变化的影响

不同肥料处理对超高产小麦 T_r 也有明显影响. 由图 3 可知, 小麦 T_r 日变化总体趋势是在日出后随 PAR 的增强而升高, 随 PAR 的减弱而降低, 呈先升后降的趋势. 6:00—8:00 T_r 处于较低水平, 8:00—10:00 快速升高, 11:00 达到最高值 ($6.09 \text{ mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 以后下降幅度较小, 15:00 后又迅速下降. 施肥处理的 T_r 峰值较高, 而 CK 处理在峰值后 T_r 急速下降, 这是由于灌浆期高 T_a 、高 PAR 、低

RH 使小麦叶片失水较多以及叶片气孔在中午时出现部分关闭所致, 而施肥处理 T_r 在 10:00—15:00 并没有下降, 尤其是 N_2P_2 处理, 15:00 以后的 T_r 值仍高于 CK 处理, 这与其气孔的部分恢复有关. 方差分析表明, 灌浆期施肥处理与 CK、 N_2 与 N_1 处理的 T_r 差异显著, N_2 各处理间、 N_1 各处理间 T_r 日变化差异不显著, 但氮、磷肥对超高产小麦存在显著的互作效应.

超高产小麦旗叶 WUE 日变化总体趋势为 (图 3): 在日出后随着 PAR 的增强急速升高, 8:00 达到峰值 ($6.81 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), 此后随 T_r 的增强而下降, 最后则维持在一个较低的水平 ($3.59 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). 8:00 之前, 小区内 RH 较大, 随着 PAR 的增加, T_r 相对较低, P_n 升高, 使 WUE 处于较高水平; 此后, 虽然 PAR 继续增加, 但叶片的光合潜力已经达到最大, 而 T_r 随着 RH 的降低继续升高, 最终引起 WUE 的下降. 各处理中, N_2P_2 处理的 WUE 显著高于其他处理, 各施肥处理与 CK 差异显著, 说明缺氮、缺磷均降低了小麦 WUE , 但缺氮的影响较大. 氮、磷配施对超高产小麦 WUE 有显著的互作效应.

2.4 氮、磷配施对超高产小麦产量及其构成因素的影响

由表 1 可以看出, 随着田间施氮量和施磷量的增加, 产量构成因素中穗粒数、千粒重、每公顷穗数都逐渐增加, N_1 与 N_2 处理差异显著, N_2P_2 和 N_2P_3 与其他处理差异极显著. 但当施磷量超过 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 穗粒数和千粒重均有所下降. 千粒重在 N_2P_2 处理达到最大后, 随着施磷量的进一步提高开

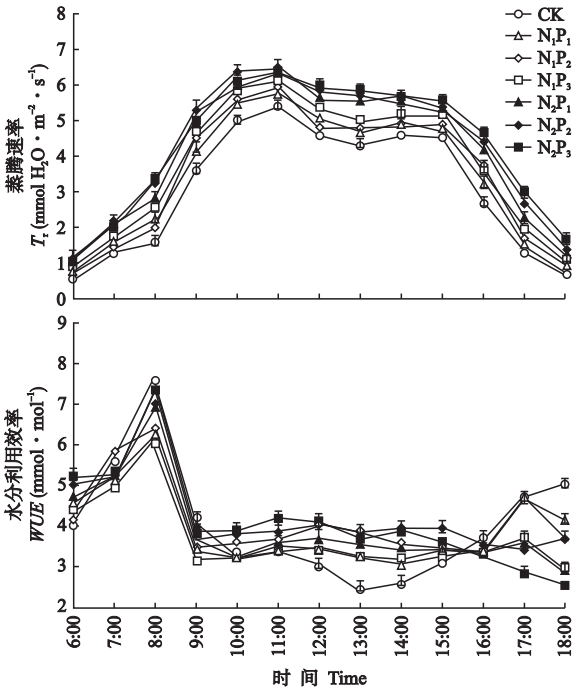


图 3 氮磷配施对超高产小麦蒸腾速率和水分利用效率日变化的影响

Fig. 3 Effects of combined nitrogen and phosphorus fertilizers on diurnal variation of transpiration rate (T_r) and water use efficiency (WUE) of super-high-yield wheat (mean±SE).

表 1 氮磷配施对小麦产量及其构成因素的影响
Tab.1 Effect of combined nitrogen and phosphorus fertilizers on yield and its components of wheat

处理 Treat- ment	穗粒数 Grainms per spike	千粒重 1000- grain mass (g)	穗数 Spike number ($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	产量 Grain yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
CK	35.75De	40.41Ee	614Dd	7540De
N_1P_1	36.81Cd	42.22Dd	628CDcd	8298Cd
N_1P_2	36.94Bc	42.97Cc	638CDc	8712BCc
N_1P_3	36.89Cd	42.32Dd	641BCc	8508Cd
N_2P_1	37.32Bb	43.18Bb	645BCc	9262Bb
N_2P_2	38.16Aa	44.24Aa	665ABb	10022Aa
N_2P_3	37.24Bb	43.07BCc	684Aa	9293Bb

CK: 对照 Control; N_1 : $225 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; N_2 : $300 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$; P_1 : $75 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$; P_2 : $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$; P_3 : $225 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{hm}^{-2}$. 同列不同大、小写字母分别表示不同处理的差异极显著 ($P < 0.01$) 和显著 ($P < 0.05$) Different capital and small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.01 and 0.05 levels, respectively.

表 2 济麦 22 各参数的相关性
Tab. 2 Correlation between parameters of Jimai 22

	净光合 速率 P_n	气孔导度 G_s	胞间 CO_2 浓度 C_i	气孔限 制值 L_s	蒸腾 速率 T_r	水分利 用效率 WUE	产量 Yield	光合有 效辐射 PAR	大气 温度 T_a	相对 湿度 RH	CO_2 浓度 C_a
净光合速率 P_n	1	0.988 **	-0.991 **	0.987 **	0.959 **	0.426	0.951 **	-0.614	-0.774 *	0.622	0.499
气孔导度 G_s		1	-0.990 **	0.995 **	0.961 **	0.371	0.978 **	-0.549	-0.723	0.535	0.418
胞间 CO_2 浓度 C_i			1	-0.996 **	-0.979 **	-0.326	-0.950 **	0.623	0.780 *	-0.612	-0.500
气孔限制值 L_s				1	0.975 **	0.341	0.963 **	-0.611	-0.772 *	0.590	0.482
蒸腾速率 T_r					1	0.196	0.913 **	-0.638	-0.789 *	0.626	0.515
水分利用效率 WUE						1	0.442	-0.379	-0.419	0.435	0.393
产量 Yield							1	-0.52	-0.694	0.497	0.394
光合有效辐射 PAR								1	0.974 **	-0.981 **	-0.986 **
大气温度 T_a									1	-0.959 **	-0.928 **
相对湿度 RH										1	0.981 **
CO_2 浓度 C_a											1

* $P<0.05$; ** $P<0.01$.

始 N_2P_2 处迅速下降, N_2P_2 处理的千粒重与其他处理差异达到极显著水平, 说明该处理的氮、磷水平有利于粒重的提高. 从最终产量来看, N_2P_2 与其他处理差异极显著, 达到了超高产水平, 是在超高产水平上较合理的氮、磷配比.

2.5 济麦 22 各参数的相关性

以济麦 22 各参数的平均值做相关分析: P_n 与 G_s 、 C_i 、 L_s 、 T_r 、 WUE 、 PAR 、 T_a 、 RH 和 C_a 日变化的相关系数分别为 0.988、-0.991、0.987、0.959、0.426、-0.614、-0.774、0.622 和 0.499, 其中 P_n 与 G_s 、 L_s 、 T_r 呈极显著正相关, 与 C_i 呈极显著负相关, 与 T_a 呈显著负相关; 产量与 P_n 、 G_s 、 C_i 、 L_s 、 T_r 、 WUE 、 PAR 、 T_a 、 RH 和 C_a 的相关系数分别为 0.951、0.978、-0.950、0.963、0.913、0.442、-0.520、-0.694、0.497 和 0.394, 其中产量与 P_n 、 G_s 、 L_s 、 T_r 呈极显著正相关 (表 2).

3 讨 论

关于“午休”现象, 一般将其归因于“气孔因素”与“非气孔因素”两个方面. 前者为气孔关闭造成光合原料 CO_2 供应不畅, 后者为光抑制致使叶绿体光合效率下降^[17]. 如果是“气孔因素”, 则在中午前后气孔导度会有所降低, 并造成胞间 CO_2 浓度降低, 气孔限制值增大; 如果是“非气孔因素”, 则存在光抑制现象, 光合膜受到一定的伤害, 并造成胞间 CO_2 浓度升高. 本研究中, 对于存在“午休”现象的各处理, 11:00—13:00, 气孔导度降低, 而胞间 CO_2 浓度却增大 (图 2), 说明“午休”现象是“气孔因素”与“非气孔因素”共同作用的结果, 这与前人的研究结果一致^[18-20]. 可以确定光抑制造成的胞间 CO_2 浓度

升高不但抵消了气孔限制所导致的 CO_2 供应不畅, 而且光合能力降低使 CO_2 在胞间有所积累. 对于未出现“午休”现象的处理, 可能是氮、磷的协调作用增加了气孔开度, 提高了叶片的光合速率. 随着一天中太阳辐射增强, 光量子通量增高, 叶温升高, 气孔导度也逐渐增加, 此外, 由于光强的提高, 叶片获得的能量增多, 叶温升高加大了水气的饱和差, 促使蒸腾作用加强. 当温度增大到一定程度, 蒸腾作用相当强烈, 此时气孔部分关闭来限制强烈的蒸腾作用. 由于这种反馈抑制只能减小而不能消除, 因此蒸腾作用会随温度升高继续增强, 而气孔导度的反馈作用也逐渐增大, 气孔导度逐渐降低.

张岁岐等^[21-22]认为, 合理的氮、磷、钾营养在一定程度上均可以改善作物的水分状况, 提高作物的渗透调节和气孔调节能力, 提高 P_n 和单叶及群体的 WUE , 这与本研究中缺氮、缺磷均不同程度地降低小麦旗叶 P_n 和 WUE 的结果一致. 氮是叶绿素的必要成分, 施氮可提高叶片的叶绿素含量和 P_n , 抑制作物蒸腾 (与本试验结果相反), 氮肥缺乏会加速植株叶片组织衰老, 加快蛋白质、酶的分解和氮素的转移, 使叶片 P_n 降低; 磷可促进叶绿素的合成, 磷在 ATP 的反应中起关键作用, 低磷处理可通过影响 ATP 酶的磷酸化过程而影响作物的光合作用.

小麦籽粒灌浆期, 叶片衰老, 旗叶叶面积减小, 但该期是籽粒建成和干物质积累的重要时期, 对光合产物的需求量大, 叶片同化物迅速向籽粒转移. 因此, 施肥状况直接影响着叶片营养状况、叶绿素的合成、植株光合代谢过程和籽粒产量. 研究发现, 氮、磷营养会显著影响小麦 P_n , 其中氮素起主要作用, 磷素次之, 而且随着营养均衡程度的提高, 叶片 P_n 提

高. 孙旭生等^[9-10]研究表明, 施氮量过多 ($N > 300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 虽然光合速率较高, 但冠层郁闭严重, 下部叶片衰老过快, 降低了群体叶面积指数, 最终导致穗粒数和千粒重下降, 产量降低. 本试验研究表明, 随着田间施氮量和施磷量的增加, 产量构成因素中穗粒数、千粒重、每公顷穗数均逐渐增加, 但当施磷量超过 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时, 穗粒数和千粒重有所下降. 在超高产麦田种植条件下, CK 处理田间群体养分不足, 功能叶片衰老过快, 限制了籽粒的灌浆, 造成粒重偏低, 而 N_2P_3 处理的群体过大, 无效分蘖消耗了大量养分, 灌浆期间出现养分亏缺, 造成功能叶片衰老迅速, 从而影响了千粒重的提高和产量的形成. 从光合“午休”现象和最终产量来看, N_2P_2 (N 为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 P 为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 不仅消除了光合“午休”现象, 而且与其他处理相比, 差异极显著, 达到了超高产水平, 是在超高产水平上较合理的氮、磷配比.

参考文献

- [1] Campbell CA, Cameron DR, Nicholaichuk W, *et al.* Effects of fertilizer N and soil moisture on growth, N content and moisture use by spring wheat. *Canadian Journal of Soil Science*, 1977, **57**: 289-310
- [2] Villalobos FJ, Fereres E. Evaporation measurements beneath corn, cotton, and sunflower canopies. *Agronomy Journal*, 1990, **82**: 1153-1159
- [3] Xu D-Q (许大全), Ding Y (丁勇), Wu H (武海). Relationship between diurnal variations of photosynthetic efficiency and midday depression of photosynthetic rate in wheat leaves under field conditions. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* (植物生理与分子生物学报), 1992, **18**(3): 279-284 (in Chinese)
- [4] Kalt-Torres W, Kerr PS, Usuda H, *et al.* Diurnal changes in maize leaf photosynthesis. I. Carbon exchange rate, assimilate export rate, and enzyme activities. *Plant Physiology*, 1987, **83**: 283-288
- [5] Usuda H, Kalt-Torres W, Kerr PS, *et al.* Diurnal changes in maize leaf photosynthesis. II. Leaves of metabolic intermediates of sucrose synthesis and the regulatory metabolite fructose 2, 6-bisphosphate. *Plant Physiology*, 1987, **83**: 289-293
- [6] Niu L-Y (牛立元), Ru Z-G (茹振钢), Liu M-J (刘明久). Studies on the diurnal variation of photosynthesis of flag leaf and evaluation method of photosynthetic potentiality in winter. *Journal of Triticeae Crops* (麦类作物学报), 2002, **22**(2): 51-54 (in Chinese)
- [7] Jiao J (焦健), Gao Q-R (高庆荣), Zhang A-M (张爱民), *et al.* Diurnal changes of photosynthetic and physiological parameters in different male sterile lines of wheat. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(8): 1267-1271 (in Chinese)
- [8] Wang J-L (王建林), Qi H (齐华), Song H (宋辉). Characteristic of diurnal changes of flag leaf photosynthetic rate in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under different nitrogen applications. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 2008, **39**(6): 643-647 (in Chinese)
- [9] Sun X-S (孙旭生), Lin Q (林琪), Li L-Y (李玲燕), *et al.* Effects of nitrogen supply on photosynthetic characteristics at later developing stages and yield in super high-yield winter wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2008, **14**(5): 840-844 (in Chinese)
- [10] Sun X-S (孙旭生), Lin Q (林琪), Liu Y-G (刘义国), *et al.* Effects of different nitrogen content on diurnal variation of photosynthesis in super-high-yield wheat at filling stage. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2008, **23**(1): 158-162 (in Chinese)
- [11] Yang Q (杨晴), Han J-L (韩金玲), Li Y-M (李雁鸣), *et al.* Effects of phosphorus fertilization on flag leaves photosynthesis and yield components in wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2006, **12**(6): 816-821 (in Chinese)
- [12] Zhang Y-L (张永丽), Li Y-M (李雁鸣), Xiao K (肖凯), *et al.* Effect of N and P rates on photosynthetic characteristics of flag leaf in hybrid wheat. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2004, **10**(3): 231-236 (in Chinese)
- [13] Xing Q (邢倩), Gu Y-F (谷艳芳), Gao Z-Y (高志英), *et al.* Effects of N, P and K nutrition on photosynthesis and water use efficiency of winter wheat. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2008, **27**(3): 355-360 (in Chinese)
- [14] Larcher W. Trans. Zhai Z-X (翟志席). *Plant Physiology*. Beijing: China Agricultural University Press, 1997 (in Chinese)
- [15] Penuelas J, Filella I, Llusia J, *et al.* Comparative field study of spring and summer leaf gas exchange and photo-biology of the Mediterranean trees *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*. *Journal of Experiment Botany*, 1998, **49**: 229-238
- [16] Gao J-L (高聚林), Zhao T (赵涛), Wang Z-G (王志刚), *et al.* The relationships of water use efficiency with leaf physiological characteristics in Gaodan grass. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2007, **33**(3): 455-460 (in Chinese)
- [17] Yu Q (于强), Ren B-H (任宝华), Wang T-D (王天铎), *et al.* A simulation of diurnal variations of photosynthesis of C_3 plant leaves. *Scientia Atmospherica Sinica* (大气科学), 1998, **22**(6): 867-880 (in Chinese)
- [18] Zheng G-S (郑国生), Wang T (王焘). Nonstomatic limitations in midday depression of photosynthesis in winter wheat leaves. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(5): 799-800 (in Chinese)
- [19] Liao J-X (廖建雄), Wang G-X (王根轩). Effect of drought, CO_2 concentration and temperature increasing on photosynthesis rate, evapotranspiration and water use efficiency of spring wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2002, **13**(5): 547-550 (in Chinese)
- [20] Frederick JR, Camberato JJ. Leaf net CO_2 -exchange rate and associated leaf trait of winter wheat grown with various spring nitrogen fertilization rates. *Crop Science*, 1994, **34**: 432-439
- [21] Zhang S-Q (张岁岐), Li Y-Y (李秧秧). Study on effects of fertilizing on crop yield and its mechanism to raise water use efficiency. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 1996, **3**(1): 185-191 (in Chinese)
- [22] Zhang S-Q (张岁岐), Shan L (山仑). Research progress on water use efficiency of plant. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2002, **20**(4): 1-5 (in Chinese)

作者简介 赵海波,男,1983年生,硕士.主要从事小麦超高产生理生态研究. E-mail: haibo1026@126.com

责任编辑 张凤丽