不同生育阶段夜温升高对双季水稻物质生产与养分吸收的影响*

魏金连 潘晓华**

(江西农业大学农业部双季稻生理生态与栽培重点开放实验室/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室,南昌 330045)

摘 要 利用2间玻璃室内夜间不同的温度条件,研究了水稻生长期间夜温升高对双季早、晚稻物质生产和养分积累的影响。结果表明:播种-幼穗分化期夜温升高增加早稻的干物质积累,而减少晚稻的干物质积累;幼穗分化期-抽穗的夜温升高对早、晚稻的干物质积累均有一定的负作用;抽穗后的夜温升高对早稻物质生产影响较小,但降低其茎鞘物质的转运,而晚稻的干物质生产和茎鞘物质的转运均提高。在早稻幼穗分化前夜温适度升高有利于提高根系活力,促进植株养分的积累,但不利于晚稻植株养分的积累;幼穗分化-抽穗期间的夜温升高均不利于早、晚稻植株的养分积累;灌浆结实期的夜温升高会造成早稻根系早衰,不利于养分吸收,但有利于保持晚稻根系较高活力,促进养分吸收。试验证明,不同生育阶段的夜温升高对双季水稻不同生育阶段的干物质生产和养分吸收的影响是不同的。

关键词 双季水稻;夜温升高;不同生育阶段;干物质生产;养分吸收

中图分类号 S511 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2009)12-2521-05

Effects of nighttime temperature increase at different growth stage on the dry matter production and nutrient absorption of double-cropping rice. WEI Jin-lian, PAN Xiao-hua (*Key Laboratory of Physiology, Ecology and Cultivation of Double Cropping Rice, Ministry of Agriculture, The People's Republic of China / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Jiangxi Agricultural University, Nanchang* 330045, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2009, **28**(12): 2521-2525.

Abstract: Different nighttime temperature was established in two glasshouses to study the effects of nighttime temperature increase (NTI) at different growth stages on the dry matter production and nutrient absorption of double-cropping rice. The NTI from seeding to panicle differentiation promoted the dry matter production of early rice but suppressed that of late rice, whereas the NTI from panicle differentiation to heading exerted definite negative effects on the dry matter accumulation of both early and late rice. Post-heading NTI had less effects on the dry matter production of early rice, but slowed down the translocation of assimilates in early rice stem and sheath. On the contrary, post-heading NTI increased the dry matter production of late rice, and promoted the translocation of assimilates in late rice stem and sheath. The NTI before panicle differentiation improved the root activity and nutrient accumulation of early rice but did the opposite to late rice, and the NTI from panicle differentiation to heading was not favorable to the nutrient accumulation of both early and late rice. The NTI at filling-ripening stage induced the root aging of early rice, but promoted the root activity of late rice. This study proved that the NTI at different growth stages of double-cropping rice had different effects on the dry matter production and nutrient absorption of early and late rice.

Key words: double-cropping rice (*Oryza sativa* L.); nighttime temperature increase (NTI); different growth stage; dry matter production; nutrient absorption.

* 国家自然科学基金资助项目(30860138)。

** 通讯作者 E-mail: xhuapan@163.com

收稿日期:2009-04-22 接受日期:2009-08-05

关于高温、低温对水稻等作物生长发育和产量的影响,在过去的近几十年里人们进行了大量研究(国际水稻研究所,1982;梁光商,1983;朱德峰等,1998;王琪等,2009)。随着全球气候变暖(Easterling *et al.*,1999;Houghton & Ding,2001),关于夜间温度升高对作物生长发育的影响,近年来引起了科学家们的高度关注(Peng *et al.*,2004;Lobell *et al.*,2005;张建平等,2006;Lobell & Ortoz-Monasterio,2007)。Peng 等(2004)研究表明,夜间最低温度每升高 1 ℃,水稻的生物产量和谷产量将下降 10%。而 Lobell 等(2007)研究指出,最高温与最低温对春小麦的影响在美国西部 3 个不同地区的影响存在差异。但是,关于较小幅度的夜间温度升高对产量影响的机理目前还不清楚。作物产量的形成实际上是光合产物的生产与分配的过程。Peng 等(2004)指出,夜温升高对产量的影响与生物产量下降有关。张荣铣等(1994)研究表明,夜温升高能明显缩短小麦叶片叶绿素含量缓降期和光合速率高值持续期,从而减少叶片的叶源量。生物产量是不同生育阶段的干物质积累量所构成。本研究利用玻璃温室夜间是否关窗影响室内温度的原理,设计夜间关窗与不关窗两个处理,研究不同生育阶段的夜温升高对干物质生产和养分吸收的影响,旨在探讨夜温升高对双季水稻产量影响的机理。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2007 年和 2008 年的 4—10 月在江西农业大学进行。供试土壤为本校科技园的水稻土,土壤基本理化性状:pH 6.4,有机质 24.6 g·kg^{-1},碱解氮 68.4 mg·kg^{-1},速效磷 53.2 mg·kg^{-1},速效钾 155.7 mg·kg^{-1}。试验前将土壤全部风干粉碎后再加入少量细沙,并充分混匀。育秧采用塑料盆,其长×宽×高为 48 cm×35 cm×13 cm,装土质量为 18 kg。移栽至成熟期用塑料桶,其上部内径 28 cm,底部内径 23 cm,桶深 27 cm,装土质量为 13.5 kg。供试品种:早、晚稻分别为“金优 402”(杂交水稻)、“082”(常规稻)和“天优 998”(杂交水稻)、“F2001”(常规稻)。早稻 4 月 10 日播种,5 月 1 日移栽;晚稻 6 月 25 日播种,7 月 20 日移栽,单本插植,4 穴·桶$^{-1}$。

1.2 试验设计

试验设置 2 个夜温处理,其他条件均相同。试验期间,在 2 间玻璃室温室内各挂一台双金属自动记录温度计。1)高夜温处理(以下简称处理)。白天玻璃温室全敞开,与外界保持通风,4、5、9、10 月夜间 18:00—6:00 全封闭,6、7、8 月夜间 19:30—5:30 全封闭;2)自然夜温(以下简称对照)。玻璃温室白天和夜间均全敞开,与外界保持通风。各处理 N、P、K 肥用量相等,苗期施含 N、P_2O_5、K_2O 各 15% 的复合肥 8 g·盆$^{-1}$,移栽前一次性施同样的复合肥 8 g·桶$^{-1}$作基肥。

1.2.1 播种-幼穗分化(一次枝梗原基分化期)夜温处理 将水稻种子分别播种于 2 个玻璃室内已装好等量同质水稻土的塑料盆中,移栽后也置于原玻璃温室内至幼穗分化期。

1.2.2 幼穗分化-抽穗(10% 左右稻穗抽出剑叶鞘 1 cm)夜温处理 用未进行夜温处理的秧苗进行移栽,移栽后置于露天,待幼穗分化后分别置于不同夜温处理的玻璃温室,至抽穗。

1.2.3 抽穗-成熟夜间温度处理试验 用没有进行夜温处理的秧苗进行移栽,移栽后置于露天,待抽穗后分别置于不同夜温处理的玻璃温室,至成熟期。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 干物质和养分测定 于处理当天和处理结束的当天,每处理每品种取样 2 桶,用于地上部干物质和养分的测定。植株分茎鞘、叶片和穗(抽穗后)分别烘干称量,干样粉碎后用于养分和糖含量的测定。用瑞士产的 FOSS-2300 型自动定氮仪测氮、钒钼黄比色法测磷、火焰光度法测钾。茎鞘可溶性糖和淀粉含量用硫酸蒽酮比色法测定。

1.3.2 根系活力测定 早稻采用 α-萘胺比色法;晚稻用伤流量重量法测定。

1.4 统计方法

利用 DPS 统计软件和 Excel 进行统计分析,用 t 测验法进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 处理间不同生育阶段的夜间温度差异

对测定温度的统计表明,早、晚稻的夜间平均温度,移栽至幼穗分化,处理分别为 26.7 ℃和 32.75 ℃,较对照分别高 2.2 ℃和 3.93 ℃;幼穗分化-抽穗,处理分别为 27.7 ℃和 27.06 ℃,较对照分别高 1.6 ℃和 3.07 ℃;灌浆结实期,处理分别为 31.0 ℃和 24.28 ℃,较对照分别高 1.9 ℃和 3.66 ℃。

表1 播种-幼穗分化期间的夜温升高对早稻干物质和养分积累的影响

Tab.1 Influences of nighttime temperature increase from sowing to panicle differentiation on accumulation of dry matter and nutrition of early rice plants

品种	夜温处理	根系氧化力(μg·g^{-1}·h^{-1})	地上部干物质量(g·穴$^{-1}$)	N(mg·穴$^{-1}$)	P_2O_5(mg·穴$^{-1}$)	K_2O(mg·穴$^{-1}$)
金优402	高夜温	145.6 aA	2.906 aA	343.59 aA	78.37 a	247.29 aA
	自然夜温	133.2 bA	2.078 bB	267.11 bB	74.12 a	195.72 bB
082	高夜温	140.5 aA	2.449 aA	358.10 aA	67.56 a	254.05 aA
	自然夜温	126.9 bA	1.529 bB	280.46 bB	64.79 a	202.91 bB

同列中同一品种的处理与对照数据后不同的大、小字母表示差异达1%和5%显著水平(t测验)。

2.2 播种-幼穗分化期间的夜温升高对干物质生产和养分积累的影响

2.2.1 对早稻干物质生产和养分积累的影响 处理结束时的测定表明(表1),金优402和082两品种地上部的干物质质量处理较对照分别高39.84%和60.16%,差异极显著;根系活力处理分别大于对照9.31%和10.71%,差异显著。金优402植株N、P_2O_5、K_2O的积累量处理较对照分别高34.03%、5.76%、26.36%;082处理较对照分别高42.98%、4.29%、25.21%。表明,在早稻幼穗分化前夜温适度升高有利于提高根系活力,促进植株养分的积累和干物质生产。

2.2.2 对晚稻干物质和养分积累的影响 处理结束时的测定表明(表2),夜温升高对天优998和F2001的伤流强度影响较小;地上部干物质质量处理较对照分别低22.74%和19.87%,差异均极显著。天优998处理植株的N、P_2O_5、K_2O的积累量较对照分别低17.69%、29.17%、20.68%;F2001处理较对照分别低19.08%、16.65%、16.79%。表明晚稻幼穗分化前的夜温适度升高不利于植株养分的吸收和干物质生产。

2.3 幼穗分化-抽穗夜温升高对干物质生产和养分积累的影响

2.3.1 对早稻干物质生产和养分积累的影响 处理结束时的测定表明(表3),金优402和082两品种地上部干物质质量处理分别较对照低5.92%和2.95%,但差异不显著;根系活力处理较对照分别低21.8%和23.11%,差异显著;茎鞘可溶性糖和淀粉含量处理均低于对照,差异达显著或极显著水平。此阶段植株的N、P_2O_5、K_2O积累量,金优402处理较对照分别低5.14%、17.17%、11.25%;082植株处理较对照分别低4.29%、20.79%、11.59%。说明幼穗发育期夜温升高不利于早稻的养分积累。

2.3.2 对晚稻干物质生产和养分积累的影响 处理结束时的测定表明(表4),天优998和F2001两品种地上部干物质质量处理较对照分别低8.33%和4.31%,根系活力处理较对照低6.84%和10.25%,差异显著;茎鞘可溶性糖含量和茎鞘淀粉含量,处理均显著低于对照。此阶段植株的N、P_2O_5、K_2O积累量,天优998处理较对照分别低7.25%、15.88%、24.45%;F2001处理较对照分别低4.31%、15.61%、16.66%。表明幼穗发育期夜温升高不利于晚稻干物质生产和养分的积累。

2.4 抽穗-成熟夜温升高对干物质生产和养分积累的影响

2.4.1 对早稻干物质生产和养分积累的影响 测定表明(表5),成熟期地上部的干物质质量,金优

表2 播种-幼穗分化期间的夜温升高对晚稻干物质和养分积累的影响

Tab.2 Influences of nighttime temperature increase from sowing to panicle differentiation on accumulation of dry matter and nutrition of late rice plants

品种	夜温处理	伤流强度(g·穴$^{-1}$·12 h^{-1})	地上部干物质量(g·穴$^{-1}$)	N(mg·穴$^{-1}$)	P_2O_5(mg·穴$^{-1}$)	K_2O(mg·穴$^{-1}$)
天优998	高夜温	1.253 bA	5.374 bB	295.6 bA	72.7 bA	248.5 bA
	自然夜温	1.474 aA	6.956 aA	329.0 aA	81.1 aA	270.3 aA
F2001	高夜温	1.150 bA	4.816 bB	271.1 bA	66.8 bA	237.9 bA
	自然夜温	1.362 aA	6.010 aA	315.0 aA	79.0 aA	265.3 aA

同列中同一品种的处理与对照数据后不同的大、小字母表示差异达1%和5%显著水平(t测验)。

表3 幼穗分化-抽穗期间夜温升高对早稻干物质和养分积累的影响

Tab.3 Influences of nighttime temperature increase from panicle differentiation to heading on accumulation of dry matter and nutrition of early rice plants

品种	夜温处理	茎鞘可溶性糖(%)	茎鞘淀粉(%)	地上部干物质量(g·穴$^{-1}$)	根系氧化力(μg·g^{-1}·h^{-1})	N(mg·穴$^{-1}$)	P_2O_5(mg·穴$^{-1}$)	K_2O(mg·穴$^{-1}$)
金优402	高夜温	23.1 bB	9.4 bB	11.76 a	121.3 bB	312.3 bB	103.9 bB	137.88 bB
	自然夜温	31.7 aA	16.7 aA	12.50 a	147.7 aA	370.6 aA	157.5 aA	194.56 aA
082	高夜温	26.8 bA	9.1 bB	12.82 a	126.8 bA	303.8 bB	112.81 bB	126.71 bB
	自然夜温	31.3 aA	18.9 aA	13.21 a	156.1 aA	362.2 aA	157.25 aA	178.35 aA

同列中同一品种的处理与对照数据后不同的大、小字母表示差异达1%和5%显著水平(t测验)。

表 4 幼穗分化-抽穗期间夜温升高对晚稻干物质和养分积累的影响

Tab. 4 Influences of nighttime temperature increase from panicle differentiation to heading on accumulation of dry matter and nutrition of late rice plants

品种	夜温处理	茎鞘可溶性糖 (%)	茎鞘淀粉 (%)	地上部干物质质量 (g·株$^{-1}$)	伤流强度 (g·穴$^{-1}$·12 h^{-1})	N (mg·穴$^{-1}$)	P_2O_5 (mg·穴$^{-1}$)	K_2O (mg·穴$^{-1}$)
天优 998	高夜温	15.16 bA	10.48 bA	24.76 bA	1.68 bA	293.4 bA	149.0 bA	268.4 bA
	自然夜温	18.34 aA	12.14 aA	27.01 aA	1.80 aA	318.7 aA	165.5 aA	292.1 aA
F2001	高夜温	19.12 bA	10.73 bA	23.24 bA	1.43 bA	276.3 bA	142.8 bA	251.0 bA
	自然夜温	22.33 aA	13.64 aA	24.24 aA	1.57 aA	299.6 aA	157.2 aA	269.6 aA

同列中同一品种的处理与对照数据后不同的大、小字母表示差异达 1% 和 5% 显著水平(t 测验)。

表 5 抽穗-成熟期间夜温升高对早稻干物质和养分积累的影响

Tab. 5 Influences of nighttime temperature increase from heading to maturity on accumulation of dry matter and nutrition of early rice plants

品种	夜温处理	地上部干物质质量 (g·穴$^{-1}$)	茎鞘物质输出率 (%)	根系氧化力 (μg·g^{-1}·h^{-1})	N (mg·穴$^{-1}$)	P_2O_5 (mg·穴$^{-1}$)	K_2O (mg·穴$^{-1}$)
金优 402	高夜温	40.33 a	16.95 bB	85.1 bB	168.4 bA	35.2 bB	187.0 bB
	自然夜温	41.11 a	30.65 aA	117.8 aA	192.1 aA	61.8 aA	279.1 aA
082	高夜温	38.95 a	14.41 bB	91.3 bA	125.0 bA	29.4 bB	175.4 bB
	自然夜温	38.67 a	27.54 aA	109.5 aA	156.8 aA	48.0 aA	222.5 aA

同列中同一品种的处理与对照数据后不同的大、小字母表示差异达 1% 和 5% 显著水平(t 测验)。

表 6 抽穗-成熟期间夜温升高对晚稻干物质和养分积累的影响

Tab. 6 Influences of nighttime temperature increase from heading to maturity on accumulation of dry matter and nutrition of late rice plants

品种	夜温处理	地上部干物质质量 (g·穴$^{-1}$)	茎鞘物质输出率 (%)	伤流强度 (g·穴$^{-1}$·12 h^{-1})	N (mg·穴$^{-1}$)	P_2O_5 (mg·穴$^{-1}$)	K_2O (mg·穴$^{-1}$)
天优 998	高夜温	48.45 a	19.7 aA	1.16 aA	140.8 aA	71.3 aA	131.5 aA
	自然夜温	46.52 a	13.4 bB	0.97 bA	87.3 bB	37.2 bB	56.5 bB
F2001	高夜温	44.29 a	20.4 aA	1.03 a	122.6 aA	68.7 aA	87.4 aA
	自然夜温	41.30 a	13.5 bB	0.96 a	75.0 bB	35.1 bB	34.4 bB

同列中同一品种的处理与对照数据后不同的大、小字母表示差异达 1% 和 5% 显著水平(t 测验)。

402 和 082 处理与对照差异不明显;但抽穗至成熟期间的茎鞘物质输出率和处理后 15 d 的根系活力,对照明显高于处理。此阶段植株的 N、P_2O_5、K_2O 积累量,金优 402 处理较对照分别低 12.37%、43.09%、32.98%;082 处理较对照分别低 20.30%、38.77%、21.30%。可见,早稻灌浆结实期的夜温升高会造成根系早衰,降低茎鞘物质的转运,不利于养分吸收。

2.4.2 对晚稻干物质生产和养分积累的影响 表 6 表明,成熟期地上部的干物质质量,天优 998 和 F2001 处理明显高于对照;抽穗至成熟期间的茎鞘物质输出率和处理后 15 d 的根系活力,处理也明显高于对照。此阶段植株的 N、P_2O_5、K_2O 积累量,天优 998 对照较处理分别低 38.01%、47.76%、57.03%;F2001 对照较处理分别低 38.82%、48.99%、60.65%。可见,对晚稻而言,灌浆结实期的夜温升高有利于保持根系较高活力,从而有利于干物质生产和养分积累。

3 讨 论

3.1 夜温升高与干物质积累

近年来,尽管夜温升高对作物生产的影响已引起人们的高度关注(Peng *et al.*,2004;Lobell *et al.*,2005;张建平等,2006;Lobell & Ortoz – Monasterio,2007),但对其影响的机理报道不多。Peng 等(2004)指出,较小的夜温升高对水稻影响的生理机制,以及夜温与昼温对水稻影响的差异还很不清楚。高夜温对水稻叶片的光合速率没有影响,但显著影响叶片的含氮量、花粉萌发和结实率(Mohammeda & Tarpley,2009a),提高呼吸速率、降低膜的热稳定性(Mohammeda & Tarpley,2009b)。夜间最低温度每升高 1 ℃,旱季热带水稻地上部的生物产量减少 10%,但其影响生物产量的机理很难用提高了呼吸作用来解释(Peng *et al.*,2004)。本研究表明,夜温

升高对干物质积累的影响并不是一种简单的关系，不同生育阶段、不同季别间存在明显差异。播种-幼穗分化期的夜温升高会增加早稻的干物质积累，而减少晚稻的干物质积累；幼穗分化期-抽穗的夜温升高对早晚稻的干物质积累均有一定的负作用。抽穗-成熟期间的夜温升高对早稻物质积累影响较小，但影响茎鞘物质的转运；对晚稻的干物质积累和茎鞘物质的转运则均有促进作用。早、晚稻不同生育阶段夜温升高对干物质积累的上述影响，并不是夜温升高会减少物质积累的一种简单关系，它与水稻生长发育阶段所处的温度条件有关。在适宜温度范围内，提高夜温有利于物质积累，而在温度高于适宜温度时，提高夜温则减少物质积累。

3.2 夜温升高与养分积累

温度对水稻养分吸收有明显影响。Chiu 等(1960)研究表明，较高的温度对钾吸收的促进作用最大，氮次之，磷最小；而 Zia 等(1992)指出，较高的水温对 N 吸收的促进作用最大，依次是 P、K 和 Zn。关于夜间温度升高对水稻养分吸收的影响，目前未见报道。和夜温升高对物质积累一样，夜温升高对养分积累的影响也与生育阶段有关。在早稻幼穗分化前夜温适度升高有利于提高根系活力，促进植株养分的积累，但不利于晚稻植株养分的积累；幼穗分化-抽穗期间的夜温升高均不利于早晚稻株的养分积累；灌浆结实期的夜温升高会造成早稻根系早衰，不利于养分吸收，但有利于保持晚稻根系较高活力，提高养分积累。可见，夜温升高对养分积累的影响与根系活力有关。

参考文献

国际水稻研究所. 1982. 气候与水稻. 北京：中国农业出版社.

梁光商. 1983. 水稻生态学. 北京：中国农业出版社.

王 琪，马树庆，郭建平，等. 2009. 温度对玉米生长和产量的影响，生态学杂志，**28**(2)：255–260.

张建平，赵艳霞，王春乙，等. 2006. 气候变化对我国华北地区冬小麦发育和产量的影响. 应用生态学报，**17**(7)：1179–1184.

张荣铣，方志伟. 1994. 不同夜间温度对小麦旗叶光合作用和单株产量的影响. 作物学报，**20**(6)：710–715.

朱德峰，章秀福，许 立，等. 1998. 水稻主茎叶片出生与温度关系. 生态学杂志，**17**(5)：71–73.

Chiu TF，Lian S，Hsu SC. 1960. Studies on nutrient absorption by rice plants in Taiwan (Part 1)：Effect of temperature on nutrient absorption by rice plants. *Journal of Agricultural Research of China*，**9**(4)：1–15.

Easterling DR，Horton B，Jones PD，*et al*. 1999. Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*，**277**：364–367.

Houghton JT，Ding Y. 2001. Climate Change 2000. The Scientific Basis. Cambridge：Cambridge University Press.

Lobell DB，Ortoz-Monasterio JI，Asner GP，*et al*. 2005. Analysis of wheat yield and climatic trends in Mexico. *Field Crops Research*，**94**：250–256.

Lobell DB，Ortoz-Monasterio JI. 2007. Impacts of day versus night temperature on spring wheat yield：A comparison of empirical and CERRES model predictions in three locations. *Agronomy Journal*，**99**：469–477.

Mohammeda AR，Tarpley L. 2009a. High nighttime temperatures affect rice productivity through altered pollen germination and spikelet fertility. *Agricultural and Forest Meteorology*，**149**：999–1008.

Mohammeda AR，Tarpley L. 2009b. Impact of high nighttime temperature on respiration，membrane stability，antioxidant capacity，and yield of rice plants. *Crop Science*，**49**：313–322.

Peng SB，Huang JL，Sheehy JE，*et al*. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*，**101**：9971–9975.

Zia MS，Salim M，Aslam M，*et al*. 1992. Effect of low temperature of irrigation water on rice growth and nutrient uptake. *Journal of Agronomy and Crop Science*，**173**：22–31.

作者简介 魏金连，1972 年生，女，硕士，实验师。主要从事作物生态研究。E-mail：zydzyd2000@163.com

责任编辑 李凤芹