

不同生育期增温对水稻产量及氮、磷含量的影响*

常少燕¹ 李仁英^{1,2†} 谢晓金¹ 徐向华¹ 张 婧¹ 杨健伟¹
刘煜椿¹

(1 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

(2 江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044)

摘要 人类活动导致全球温度上升, 明确增温对水稻产量和氮、磷含量的影响, 可为预测和评估未来气候条件下水稻产量及品质提供依据。选用泰瑞丰 5 号、镇稻 16 号两个品种水稻进行盆栽试验, 分别在分蘖期、孕穗期、抽穗期、开花期和灌浆期将水稻放入较对照高 5℃ 的生长箱中处理 7 d, 分析不同生育期增温对水稻产量及氮磷含量、氮磷收获指数的影响。结果表明, 不同生育期增温显著影响水稻的产量构成因素, 其中, 孕穗期和抽穗期增温对水稻产量影响最大; 孕穗期增温下泰瑞丰 5 号和镇稻 16 号的穗粒数、结实率和籽粒重最低。总体而言, 与对照相比, 不同生育期增温显著增加了泰瑞丰 5 号和镇稻 16 号茎、叶、壳、籽粒的氮含量 ($p < 0.05$)。而不同生育期增温对水稻磷含量的影响取决于增温时期及水稻品种。与对照相比, 分蘖期、抽穗期、开花期和灌浆期增温使泰瑞丰 5 号的氮收获指数显著降低, 而抽穗期增温使镇稻 16 号的氮收获指数显著降低。与对照相比, 抽穗期和灌浆期增温显著降低了泰瑞丰 5 号的磷收获指数, 分蘖期和抽穗期增温显著降低了镇稻 16 号的磷收获指数。本研究结果表明, 孕穗期和抽穗期是增温影响水稻产量和氮磷吸收的关键时期。

关键词 水稻; 温度; 产量; 氮收获指数; 磷收获指数

中图分类号 S161.2 文献标识码 A

随着全球工业化进程的加速, 温室气体的大量排放, 全球气温不断上升。据报道, 在过去的 100 年间, 大气温度平均升高了 0.78℃, 到 2100 年地球表面温度将升高 0.3~4.8℃^[1]。同时, 极端高温天气在亚洲等地发生的频率和强度进一步增加, 且持续时间更长^[1]。因此, 全球气候变暖已成为不争的事实。水稻是世界最重要的粮食作物之一, 供养世界 50% 的人口。全球变暖不仅影响水稻种植区域的分布, 还影响水稻生长发育和产量^[2]。预计 21 世纪 30 年代, 在全球水稻种植区域内, 16% 的水稻在生殖生长阶段将遭受超过 5 d 的高温胁迫, 受灾面积将从 21 世纪初的 8% 上升至 21 世纪 50 年代的 27%^[3]。近 20 年间, 我国长江流域多次发生极端高温天气事件, 严重威胁当地水稻生产和粮食安全^[4]。因此, 探讨增温对水稻

*江苏省自然科学基金项目 (BK20141479)、国家自然科学基金项目 (41001190, 41671318) 和国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2015ZX07204-002) 共同资助 Supported by the Natural Science Foundation of Jiangsu Province in China (No. BK20141479), the National Natural Science Foundation of China (Nos.41001190 and 41671318) and the National Major Science and Technology Program for Water Pollution Control and Treatment of China (No. 2015ZX07204-002)

† 通讯作者 Corresponding author E-mail: ryli75@163.com

作者简介: 常少燕 (1991—), 女, 江苏人, 硕士研究生, 主要从事气候变化对农业生产的影响研究。E-mail:1046451625@qq.com
收稿日期: 2017-11-24; 收到修改稿日期: 2018-01-31; 优先数字出版日期 (www.cnki.net):

生长及产量的影响至关重要。

温度是影响水稻生长发育的主要因素之一,它不仅影响水稻的生长及产量,还影响水稻对营养元素的积累。据研究,高温阻碍植物叶片光合作用,降低干物质积累速率、积累量和干物质在植物中分配比率,从而导致产量和品质下降^[5-6]。然而也有研究表明,气温升高可使植物吸收更多的氮、磷元素以用于物质生产,从而增强了单位土地面积的干物质生产能力^[7]。因此,还需要进一步明确升温对水稻干物质积累量的影响。

目前,增温对水稻影响的研究大多集中在水稻生殖生长阶段,研究内容多偏重于增温对水稻开花结实的影响,而不同生育期增温对水稻影响的研究则较少。鉴于此,本文以江苏常见的两个水稻品种为供试材料,探讨分蘖期、孕穗期、抽穗期、开花期和灌浆期等五个生育期增温对水稻的产量、氮磷含量及氮磷收获指数的影响,从而为不同生育期增温对水稻产量及水稻品质影响预测提供依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤采自南京信息工程大学农业气象试验站表层(0~20 cm)水稻土。土壤自然风干,拣去枯枝落叶和小石子后,过5 mm筛备用。供试土壤的基本理化性质按照常规方法^[8]测定。供试土壤 pH6.8、有机质 9.28 g kg⁻¹、全氮 1.06 g kg⁻¹、有效磷 6.89 mg kg⁻¹、速效钾 62.8 mg kg⁻¹。

为了比较,选用江苏省常用且生长期基本一致的泰瑞丰 5 号和镇稻 16 号两个品种水稻作为供试水稻。

1.2 试验设计

称取 2 kg 过 5 mm 筛的风干土壤,缓慢加入含氮(N)、磷(P)和钾(K)分别为 80 g L⁻¹、25 g L⁻¹和 50 g L⁻¹的 NH₄H₂PO₄、CO(NH₂)₂ 和 KCl 混合溶液 10 ml,充分搅拌,使土壤中施入的 N、P 和 K 分别为 400 mg kg⁻¹、125 mg kg⁻¹和 250 mg kg⁻¹,土壤充分混匀后,装入聚氯乙烯(PVC)盆(盆钵规格为:高 16 cm,上直径 15 cm,下直径 13.3 cm)中,再向土壤中加入自来水,保持土壤淹水,老化平衡一周。水稻种子用 30%的双氧水浸泡消毒 15 min,用蒸馏水洗净并浸泡,置于 30℃的培养箱中过夜。然后转移至吸水纸上,不断补充水分。发芽 5 d 后,选取长势一致的水稻秧苗进行盆栽试验。每盆移栽 5 棵水稻秧苗,成活后,间苗,使盆中保留长势一致的 3 棵秧苗。水稻生长期间,不断补充水分,保持水面高出土壤表面 2~3 cm。

试验共设 6 个温度处理(即分蘖期增温(T)、孕穗期增温(B)、抽穗期增温(H)、开花期增温(A)和灌浆期增温(F),并以整个生育期自然条件下生长的水稻作为对照(CK)),2 个水稻品种处理,每个处理 4 次重复,共 48 盆。在水稻生长至分蘖期时,随机选取每个

品种中的 4 盆，共 8 盆，置于人工气候箱中，增温处理 7 d，然后放回自然条件下继续生长至成熟，即为分蘖期增温处理；在水稻生长至孕穗期时，从剩下的 40 盆水稻中随机选取每个品种中的 4 盆，共 8 盆，置于人工气候箱中，高温处理 7 d，然后放回自然条件下继续生长至成熟，即为孕穗期增温处理；其他生育期增温处理依此类推。增温处理设置的温度在白天和夜晚分别较对照高 5 °C，白天和夜晚增温的时间段分别为 7:00-19:00 和 19:00-次日 7:00。人工气候箱湿度为 75%，保持 CO₂ 浓度与室外基本一致。

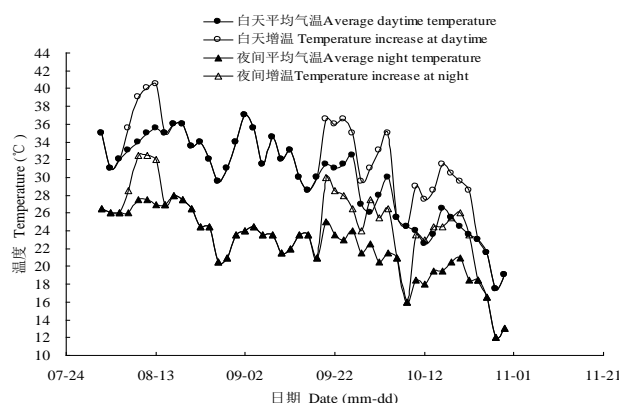


图 1 水稻生长阶段的温度变化

Fig.1 Temperature variation during the growth stages of rice

1.3 水稻样品的采集及分析

水稻于 2016 年 7 月 13 日至 7 月 15 日进行移栽，11 月 11 日收获。水稻成熟后，将植株分为叶片、茎鞘和穗三部分收获，由于根的采集会破坏盆栽土壤，影响后续试验，本试验未采集水稻根。收获的水稻样品先用自来水冲洗，再用蒸馏水洗净，吸水纸吸干后，放入 80°C 烘箱中烘至恒重。水稻穗手工脱粒，然后用水选法将饱满粒和空瘪粒分开，测定每盆的籽粒重、结实率和穗粒数等参数。各部位水稻样品用高速离心机粉碎，并用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮。消煮液中的氮采用凯式定氮法^[8]测定，磷采用钼锑抗比色法^[8]测定。

1.4 数据处理

氮（磷）收获指数 = 籽粒氮（磷）积累总量 / 植株氮（磷）积累总量

所有数据均采用 Microsoft Excel 2003 软件进行处理和图表绘制。利用 SPSS 16.0 统计软件对数据进行单因素方差分析（One-way ANOVA），并采用最小显著差异法（LSD）比较不同处理间的差异性。

2 结果

2.1 不同生育期增温对水稻产量构成因素的影响

由表 1 可知，不同生育期增温显著影响了水稻穗粒数、结实率、籽粒重等产量构成因素。除了孕穗期增温外，其他生育期增温未显著影响泰瑞丰 5 号的有效穗数。与对照相比，孕穗

期、抽穗期和开花期增温显著降低了泰瑞丰 5 号结实率和籽粒重 ($p<0.05$), 其中, 孕穗期增温时, 水稻结实率和籽粒重最低, 较对照减少 96.7%和 91.1% ($p<0.05$)。与对照相比, 分蘖期、孕穗期增温显著减少了泰瑞丰 5 号和镇稻 16 号的穗粒数, 孕穗期、抽穗期和开花期增温显著降低了镇稻 16 号的有效穗数、结实率和籽粒重。其中, 孕穗期增温时, 镇稻 16 号穗粒数、结实率和籽粒重最低, 与对照相比分别降低 33.9%、99.9%和 91.8%。

比较不同品种水稻的产量构成因素可知, 开花期增温时, 泰瑞丰 5 号的有效穗数显著高于镇稻 16 号。除分蘖期和灌浆期增温外, 其他温度处理时泰瑞丰 5 号穗粒数均显著高于镇稻 16 号。泰瑞丰 5 号的结实率在对照和分蘖期增温时显著低于镇稻 16 号。除灌浆期增温外, 其他各温度处理下, 泰瑞丰 5 号的籽粒重、茎重和叶重均高于镇稻 16 号, 其中, 在抽穗期增温时, 达到显著差异。

表 1 不同生育期增温下水稻的产量构成因素

Table 1 Yield components of rice relative to treatment

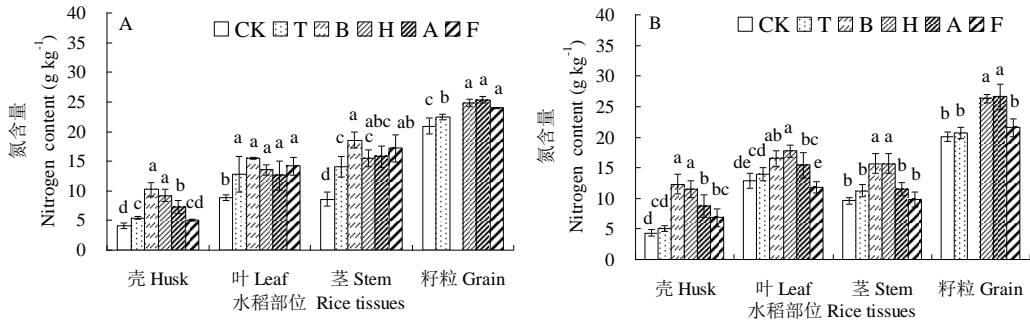
品种	处理	每盆有效穗数 Number of effective panicles per pot (n pot ⁻¹)	每盆穗粒数 Number of grains per pot (n pot ⁻¹)	结实率 Seed setting rate (%)	籽粒重 Grain weight (g)	茎重 Stem weight (g)	叶重 Leaf weight (g)
泰瑞丰 5 号	CK	8.00±1.41a	1031.0±162.3a*	77.71±2.92a*	18.13±5.37a*	5.39±0.56c	6.69±2.53bc
	T	7.00±1.71a	410.0±152.9b	75.70±4.35a*	8.15±5.00bc	5.14±0.44c	5.70±1.63c
Tairui feng 5	B	0.00±0.00b	489.0±87.90b*	2.63±2.37c	1.62±0.24c*	8.15±0.59b	10.79±1.51a
	H	6.00±2.65a	957.0±148.5a*	8.29±3.82c	4.31±0.97bc*	12.89±0.65a*	11.50±0.63a*
	A	7.00±1.00a*	891.0±217.5a*	20.43±6.21b	7.07±4.81bc	8.92±0.83b*	9.46±0.39ab
	F	6.00±1.53a	521.0±281.5b	80.23±1.60a	9.81±5.51b	2.70±0.78d*	8.47±2.18abc
镇稻 16 号	CK	7.00±2.06a	434.0±59.93ab	96.44±1.05a	10.45±2.44ab	5.45±0.74bc	4.58±0.59b
	T	6.00±0.00ab	340.0±42.00cd	94.88±2.81a	8.02±1.24b	4.32±0.62c	4.18±0.51b
Zhen dao 16	B	0.00±0.00d	287.0±57.19d	0.07±0.15d	0.86±0.18d	7.93±1.51a	8.69±1.20a
	H	4.00±1.89bc	313.0±24.71d	1.96±2.19d	1.60±0.74cd	6.67±0.68ab	7.35±0.46a
	A	3.00±1.41c	396.0±64.69bc	25.89±4.51c	3.78±1.85c	6.14±1.26b	5.43±0.94b
	F	8.00±0.58a	575.0±80.84a	77.05±5.937b	12.42±3.08a	4.46±0.44c	8.36±1.49a

注: CK、T、B、H、A、F 分别表示对照、分蘖期、孕穗期、抽穗期、开花期和灌浆期增温处理; 小写字母表示同一水稻品种内, 不同增温处理间在 0.05 水平上差异显著; *表示同一增温处理内, 不同水稻品种在 0.05 水平上差异显著。表中数据为平均值±标准差。下同 Note: CK, T, B, H, A and F stands for control, warming at the tillering stage, booting stage, heading stage, anthesis and filling stage, respectively. Lowercase letters indicate significant difference between treatments of the same rice variety at 0.05 level. * indicates significant difference between rice varieties treated with warming at the same growing stage at 0.05 level. Data in this table are means± standard deviation. The same below

2.2 不同生育期增温对水稻不同部位氮含量的影响

不同生育期增温对水稻各部位氮含量的影响见图 2。与对照相比, 分蘖期、孕穗期、抽穗期、开花期和灌浆期增温显著增加了泰瑞丰 5 号各部位的氮含量 ($p<0.05$) (图 2A)。其

中，孕穗期增温，谷壳、叶和茎中氮含量最高，分别较对照提高 149.1%、75.1%和 116.9%。开花期增温，籽粒中的氮含量最高。值得注意的是，孕穗期增温，水稻几乎未生成籽粒。除了孕穗期增温外，其他生育期增温下，泰瑞丰 5 号各部位氮含量从高至低依次为籽粒>茎>叶>壳。



注：A：泰瑞丰 5 号；B：镇稻 16 号。图中不同小写字母表示同一部位不同温度处理之间差异显著 ($p < 0.05$)，下同
Note: A: Tairuifeng 5; B: Zhendao 16. Different lowercase letters in the figure indicate significant difference between treatments with the same part of rice at 0.05 level ($p < 0.05$). The same below

图 2 不同生育期增温下水稻各部位的氮含量

Fig. 2 Nitrogen contents in various parts of rice relative to treatment

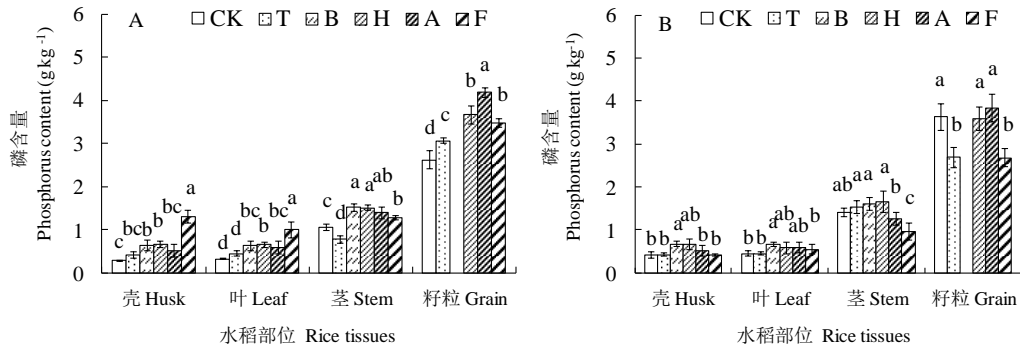
不同于泰瑞丰 5 号，增温对镇稻 16 号氮含量的影响取决于水稻生育期（图 2B）。与对照相比，孕穗期和抽穗期增温显著增加了镇稻 16 号茎中氮含量，孕穗期和开花期增温显著增加了谷壳、叶和籽粒中氮含量，然而，其他时期增温未显著影响水稻各部位中的氮含量。在抽穗期增温时，镇稻 16 号茎和叶中的氮含量最高，且显著高于对照 63.4%和 37.7% ($p < 0.05$)。在孕穗期增温时，镇稻 16 号谷壳中的氮含量最高，然而，谷壳中的氮含量在抽穗期和孕穗期增温之间无显著差异 ($p > 0.05$)。与泰瑞丰 5 号相同，孕穗期增温也几乎未形成水稻籽粒。除了孕穗期增温，其他生育期增温下，镇稻 16 号各部位氮含量均为籽粒>叶>茎>壳。

分蘖期、开花期和灌浆期增温使泰瑞丰 5 号茎中氮含量显著高于镇稻 16 号。对照和抽穗期增温使泰瑞丰 5 号叶中氮含量显著低于镇稻 16 号，而灌浆期增温则显著高于镇稻 16 号。分蘖期和灌浆期增温使泰瑞丰 5 号籽粒氮含量显著高于镇稻 16 号，而抽穗期增温时则显著低于镇稻 16 号。同一温度处理下，两个品种水稻壳氮含量未见显著差异。

2.3 不同生育期增温对水稻不同部位磷含量的影响

由图 3 可知，不同生育期增温显著影响了水稻各部位磷含量。与对照相比，孕穗期、抽穗期和灌浆期增温显著增加了泰瑞丰 5 号谷壳、叶和茎中磷含量 ($p < 0.05$)。除了孕穗期无籽粒外，其他各生育期增温显著增加了泰瑞丰 5 号籽粒中磷含量。其中，孕穗期增温时茎中磷含量最高，灌浆期增温时叶和谷壳中磷含量最高，开花期增温时籽粒中磷含量最高，且分

别较对照高出 44.1%、205.9%、369.0%和 59.7%。除了孕穗期增温外，其他生育期增温下，泰瑞丰 5 号磷含量从高至低依次为籽粒>茎>叶≈谷壳。



注：A：泰瑞丰 5 号；B：镇稻 16 号 Note: A: Tairuifeng 5; B: Zhendao 16

图 3 不同生育期增温下水稻各部位的磷含量

Fig.3 Phosphorus contents in various parts of rice relative to treatment

与泰瑞丰 5 号不同，孕穗期和抽穗期增温虽然影响镇稻 16 号茎中磷含量，但与对照相比，未达到显著差异，而开花期和灌浆期增温却显著降低了水稻茎中磷含量 ($p < 0.05$)。与对照相比，孕穗期增温显著增加了镇稻 16 号的谷壳和叶中磷含量，但其他生育期增温与对照相比，未达到显著差异。然而，与对照相比，分蘖期和灌浆期增温显著降低了镇稻 16 号籽粒中磷含量，其他处理与对照未见显著差异。镇稻 16 号磷含量从高至低依次为籽粒>茎>叶≈谷壳。

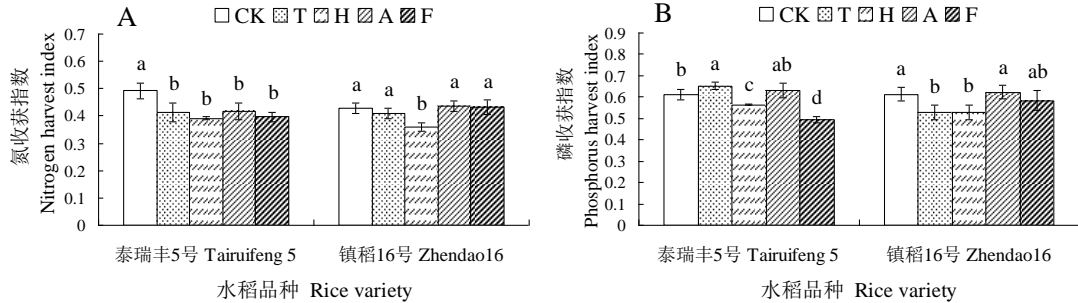
对照和分蘖期增温使泰瑞丰 5 号茎中磷含量显著低于镇稻 16 号。对照处理下，泰瑞丰 5 号叶、壳磷含量显著低于镇稻 16 号，而在灌浆期增温时，却显著高于镇稻 16 号。灌浆期增温时，泰瑞丰 5 号籽粒磷含量显著高于镇稻 16 号。

2.4 不同生育期增温对水稻氮、磷收获指数的影响

不同生育期增温时，2 个品种水稻的氮磷收获指数见图 4。与对照相比，分蘖期、抽穗期、开花期和灌浆期增温使泰瑞丰 5 号的氮收获指数显著降低 ($p < 0.05$)。虽然抽穗期增温时泰瑞丰 5 号的氮收获指数最低，但除对照外，其他增温处理之间未见显著差异；泰瑞丰 5 号的氮收获指数从高至低依次为对照>开花期增温>分蘖期增温>灌浆期增温>抽穗期增温。抽穗期增温使镇稻 16 号氮收获指数显著低于其他温度处理，但其他处理之间未见显著差异。镇稻 16 号氮收获指数从高至低依次为开花期增温>灌浆期增温>对照>分蘖期增温>抽穗期增温 (图 4A)。对照和抽穗期增温下，泰瑞丰 5 号的氮收获指数显著高于镇稻 16 号，其他温度处理下，两品种水稻的氮收获指数未见显著差异。

与对照相比，抽穗期和灌浆期增温显著降低了泰瑞丰 5 号的磷收获指数，而开花期增温泰瑞丰 5 号的磷收获指数与对照相比无显著差异。泰瑞丰 5 号的磷收获指数从高至低依次为分蘖期增温>开花期增温>对照>抽穗期增温>灌浆增温期。与对照相比，分蘖期和抽穗期增温镇稻 16 号磷收获指数显著降低，而开花期和灌浆期增温镇稻 16 号磷收获指数与对照相比

无显著差异。镇稻 16 号磷收获指数从高至低依次为开花期增温>对照>灌浆期增温>分蘖期增温>抽穗期增温（图 4B）。在灌浆期增温时，泰瑞丰 5 号的磷收获指数显著低于镇稻 16 号，其他温度处理下两品种水稻的磷收获指数未见显著差异。



注：A：氮收获指数；B：磷收获指数。图中不同字母表示同一品种不同增温方式之间差异显著($p < 0.05$)
Note: A: Nitrogen harvest index; B: Phosphorus harvest index. Different lowercase letters in the figure indicate significant difference between treatments with the same rice cultivar ($p < 0.05$)

图 4 不同生育期增温下水稻的氮磷收获指数

Fig.4 Nitrogen and phosphorus harvest index of rice relative to treatment

3 讨论

近年来，我国高温热害时有发生，江淮及江南等地出现多次大范围日最高超过 35℃ 的高温天气，对该地区水稻生长发育及产量产生了严重影响^[9]。据研究，高温对水稻产量的影响取决于高温出现的时期^[10]。孕穗期是水稻对高温最敏感的时期，此时高温对水稻产量有着重要影响^[11]。本研究中，孕穗期增温使两个品种水稻产生无效分蘖，泰瑞丰 5 号和镇稻 16 号的籽粒重较对照分别降低 91.1% 和 91.8%。本研究中，抽穗期是增温影响水稻产量的另一个关键期，增温处理使得泰瑞丰 5 号和镇稻 16 号的籽粒重较对照分别降低 76.2% 和 84.7%。水稻开花期是本研究中影响水稻产量的第三个敏感期，与对照相比，开花期增温显著降低了泰瑞丰 5 号和镇稻 16 号的结实率与籽粒重，该结果也被其他研究者^[12]所证实。开花期高温对水稻产量的影响主要表现为花粉粒不充实、花粉活力下降及小花生长发育受阻，最终导致每穗颖花数减少、结实率下降及千粒重降低^[9,12-13]。水稻灌浆期高温使灌浆期缩短^[14]，光合速度和同化产物积累量降低，秕谷粒增多和粒重下降，导致水稻产量损失^[15]。滕中华等^[16]研究表明，水稻灌浆期高温胁迫下，关键酶活性降低，叶片功能期缩短，光合能力及光合产物的运输与卸载能力下降，物质生产减少，导致籽粒淀粉合成降低、垩白度增加及蛋白质含量变化，最终造成水稻产量和品质降低，这也是水稻灌浆期高温影响产量和品质的原因之一。水稻的产量由穗数、穗粒数、结实率、千粒重构成^[17]，凡是影响穗数、水稻颖花分化数、谷壳大小及谷粒充实度等因素均影响水稻产量。

本研究结果表明，增温使水稻大部分部位中的氮含量增加。这个研究结果被其他研究者

所证实: Yuan 等^[18]研究表明, 气温升高会增加温带草原生态系统中草类植物地上部氮素的总积累量; 而 Cheng 等^[19]研究发现夜间增温会明显增加氮总量。据研究, 土壤中氮素硝化作用、矿化作用等受诸多因素影响, 其中, 受温度的影响较大^[20-21], 增温促进土壤有机质中的氮素释放到土壤中, 供植物吸收^[22]。马力等^[23]研究表明, 低温条件对土壤氮素矿化过程产生抑制。由此可知, 提高土壤中氮素的循环过程和供应能力, 有利于植物对氮素的吸收利用, 这可能是增温导致水稻氮含量增加的原因。本研究结果表明, 增温使水稻大部分部位中的磷含量增加, 这个结果也被其他研究者所报道: Hanisak 和 Harlin^[24]研究表明, 温度是浮萍生长和磷素吸收的主要影响因子。黄邦钦等^[25]认为磷酸盐的吸收速率与温度呈正相关。此外, 在一定范围内, 温度升高也能加快光合作用的光化磷酸化速率, 同样提高植物对磷酸盐的吸收速率。以上可能是增温使水稻磷含量增加的原因。

虽然增温提高水稻对氮磷的吸收能力, 使水稻大部分部位中的氮磷含量增加, 但增温却降低了水稻特别是籽粒中的氮磷积累量(数据未给出)。通过本研究可知, 增温显著降低了两个品种水稻的籽粒重(表 1)。氮磷在籽粒中的积累量不仅取决于籽粒中的氮磷含量, 还与籽粒的重量有关。由于温度对水稻生长特别是对产量的影响超过了对水稻氮磷吸收的影响, 从而使水稻籽粒中的氮磷积累量减少, 这表明增温不利于籽粒氮磷的积累。该研究结果被张立极等^[26]所证实, 即增温降低了水稻氮的积累量。

氮磷收获指数是反映作物氮和磷利用效率的重要指标, 指数越高表明植株积累的氮和磷较多地分配至籽粒, 减少了氮磷在秸秆中残留量, 促进氮磷的高效循环利用^[27]。增温使水稻叶片和茎的氮含量升高, 显著降低水稻产量、结实率、每穗颖花数及千粒重^[28]。在增温处理下水稻的氮收获指数显著降低^[29]。Nam 等^[30]研究表明, 气温升高会促进水稻的氮肥吸收效率, 但由于增温处理导致水稻颖花不育率升高, 产量降低, 因此, 水稻对氮素利用效率反而下降。孙诚^[12]研究表明, 增温处理对水稻地上部氮素积累能力的影响很小, 但是增温处理显著降低了水稻的结实率, 导致水稻的产量显著降低, 因此水稻的氮收获指数显著降低。本研究增温处理下, 两个品种水稻的氮收获指数均为抽穗期最低, 然而抽穗期籽粒氮含量高于其他处理, 这主要由于增温处理降低了水稻的结实率, 导致水稻籽粒量显著降低, 因此, 在增温处理下水稻氮素收获指数降低。

不同品种水稻的产量及氮磷含量对温度的响应存在一定的差异, 这种差异与水稻基因差异有关, 但目前为止, 相关研究的报道较少, 需要进一步研究。水稻产量、氮磷含量及氮磷收获指数除了与水稻增温有关外, 还与水稻品种有关。本研究结果表明, 孕穗期和抽穗期增温时, 泰瑞丰 5 号的穗粒数和籽粒重显著高于镇稻 16 号; 分蘖期、开花期和灌浆期增温时, 泰瑞丰 5 号茎中氮含量显著高于镇稻 16 号。造成这种差异的原因主要与控制水稻氮磷吸收的相关基因有关。李仁英等^[31]研究表明, 不同品种水稻的产量及其氮磷含量因品种不

同而具有一定差异,且水稻产量与总干物质量、穗粒数、氮磷积累量及氮磷收获指数存在显著的相关。不同品种水稻对产量及氮磷含量的影响也被其他研究者^[32]所证实。

4 结论

不同生育期增温显著影响水稻的产量构成因素。孕穗期、抽穗期和开花期增温显著降低了泰瑞丰 5 号和镇稻 16 号两个品种水稻的结实率和籽粒重,其中,孕穗期增温对水稻产量影响最大。增温处理显著增加了水稻各部位氮含量,而增温处理对水稻磷含量的影响取决于水稻品种和水稻部位。不同生育期增温显著降低了泰瑞丰 5 号的氮收获指数,而抽穗期增温使镇稻 16 号氮收获指数显著低于其他温度处理。抽穗期和灌浆期增温显著降低了泰瑞丰 5 号的磷收获指数,分蘖期和抽穗期增温镇稻 16 号磷收获指数显著降低。温度对产量及氮磷含量的影响因水稻品种不同而具有一定差异。由此可知,不同生育期增温显著降低了水稻的产量并影响了水稻对氮磷的吸收,其中,孕穗期是影响水稻产量及氮磷吸收的关键期。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of working group to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. London: Cambridge University Press, 2013
- [2] 万丙良, 查中萍. 气候变暖对水稻生产的影响及水稻耐高温遗传改良. 中国农学通报, 2012, 28(36): 1-7
Wang B L, Cha Z P. Effect of climate warming on rice production and genetic improvement for rice high heat-tolerance (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(36): 1-7
- [3] 张璐. 江苏省主要水稻种植模式对比分析. 南京: 南京农业大学, 2011
Zhang L. Contrastive analysis of major rice cropping pattern technology in Jiangsu Province (In Chinese). Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011
- [4] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883
Qin D H. Climate change science and sustainable development (In Chinese). Progress in Geography, 2014, 33(7): 874-883
- [5] 郑志广. 光温条件对水稻结实及干物质生产的影响. 北京农学院学报, 2003, 18(1): 13-16
Zheng Z G. The influence of temperature and light on grain-filling dry matter production of rice (In Chinese). Journal of Beijing Agricultural College, 2003, 18(1): 13-16
- [6] 谢晓金, 张耀鸿, 李仁英, 等. CO₂与夜温升高对郑单 958 生长特征及产量的影响. 河南农业科学, 2016, 45(7): 24-27
Xie X J, Zhang Y H, Li R Y, et al. Effects of increase of CO₂ concentration and night temperature on growth characteristics and yield of Zhengdan 958 (In Chinese). Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016, 45(7): 24-27
- [7] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000
Ling Q H. Quality of crop population (In Chinese). Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000
Lu R K. Analytical methods for soil and agrochemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [9] 张祖建, 王晴晴, 郎有忠, 等. 水稻抽穗期高温胁迫对不同品种受粉和受精作用的影响. 作物学报, 2014, 40(2): 273-282
Zhang Z J, Wang Q Q, Lang Y Z, et al. Effects of high temperature stress at heading stage on pollination and

- fertilization of different types of rice variety (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2014, 40(2): 273-282
- [10] 李留勇. 不同生育期高温处理对水稻生长及产量形成的影响. 武汉: 华中农业大学, 2015
Li L Y. Effects of high temperature treatment at different growth stages on the growth and yield formation of rice (In Chinese). Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015
- [11] 曹云英, 段骅, 杨立年, 等. 抽穗和灌浆早期高温对耐热性不同籼稻品种产量的影响及其生理原因. 作物学报, 2009, 35(3): 512-521
Cao Y Y, Duan Y, Yang L N, et al. Effects of high temperature during heading and early grain filling on grain yield of indica rice cultivars differing in heat-tolerance and its physiological mechanism (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(3): 512-521
- [12] 孙诚. 白天增温和夜间增温对水稻氮素积累及利用效率的影响. 武汉: 华中农业大学, 2014
Sun C. The effects of daytime warming and nighttime warming on nitrogen accumulation and use efficiency in rice (In Chinese). Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014
- [13] 张桂莲, 张顺堂, 肖浪涛, 等. 花期高温胁迫对水稻花药生理特性及花粉性状的影响. 作物学报, 2013, 39(1): 177-183
Zhang G L, Zhang S T, Xiao L T, et al. Effects of high temperature stress on physiological characteristics of anther and pollen traits of rice at flowering stage (In Chinese). *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(1): 177-183
- [14] Morita S, Yonemaru J I, Takanashi J I. Grain growth and endosperm cell size under high night temperatures in rice (*Oryza sativa* L.). *Annals of Botany*, 2005, 95(4): 695-701
- [15] Mohammed A R, Tarpley L. High night temperature and plant growth regulator effects on spikelet sterility, grain characteristics and yield of rice (*Oryza sativa* L.) plants. *Canadian Journal of Plant Science*, 2011, 91(2): 283-291
- [16] 滕中华, 智丽, 吕俊, 等. 灌浆期高温对水稻光合特性、内源激素和稻米品质的影响. 生态学报, 2010, 30(23): 6504-6511
Teng Z H, Zhi L, Lü J, et al. Effects of high temperature on photosynthesis characteristics, phytohormones and grain quality during filling-periods in rice (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6504-6511
- [17] 高良艳, 周鸿飞. 水稻产量构成因素与产量的分析. 辽宁农业科学, 2007(1): 26-28
Gao L Y, Zhou H F. Relationship between yield component factors and yield in rice (In Chinese). *Liaoning Agricultural Sciences*, 2007(1): 26-28
- [18] Yuan A, Wan S Q, Zhou X H, et al. Plant nitrogen concentration, use efficiency, and contents in a tallgrass prairie ecosystem under experimental warming. *Global Change Biology*, 2010, 11(10): 1733-1744
- [19] Cheng W, SaKai H, Yagi K, et al. Combined effects of elevated [CO₂] and high night temperature on carbon assimilation, nitrogen absorption, and the allocations of C and N by rice (*Oryza sativa* L.). *Agricultural & Forest Meteorology*, 2010, 150(9): 1174-1181
- [20] 穆兴民, 樊小林. 土壤氮素矿化的生态模型研究. 应用生态学报, 1999, 10(1): 114-118
Mu X M, Fan X L. A review on ecological model of soil nitrogen mineralization (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 114-118
- [21] 冯国忠, 王寅, 焉莉, 等. 土壤类型和施氮量对连作春玉米产量及氮素平衡的影响. 土壤学报, 2017, 54(2): 444-455
Feng G Z, Wang Y, Yan L, et al. Effect of soil type and nitrogen application rate on yield of monocropping spring maize and nitrogen balance in crop field (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 444-455
- [22] 王秋菊. 黑龙江地区土壤肥力和积温对水稻产量、品质影响研究. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012
Wang Q J. Effects of soil fertility and accumulated temperature on rice yield and quality in Heilongjiang area (In Chinese). Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012
- [23] 马力, 杨林章, 颜廷梅, 等. 长期施肥水稻土氮素剖面分布及温度对土壤氮素矿化特性的影响. 土壤学报, 2010, 47(2): 286-294
Ma L, Yang L Z, Yan T M, et al. Profile distribution and mineralization characteristics of nitrogen in relation to temperature in paddy soil under long-term fertilization (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 286-294
- [24] Hanisak M D, Harlin M M. Uptake of inorganic nitrogen by *Codium fragile* subsp. *Tomentosoides*

- (Chlorophyta). *Journal of Phycology*, 1978, 14(4): 450-454
- [25] 黄邦钦, 洪华生, 戴民汉. 环境因子对海洋浮游植物吸收磷酸盐速率的影响. *海洋学报*, 1993, 15(4): 64-67
Huang B Q, Hong H S, Dai M H. Effects of environmental factors on the uptake of phosphate by marine phytoplankton (In Chinese). *Acta Oceanologica Sinica*, 1993, 15(4): 64-67
- [26] 张立极, 潘根兴, 张旭辉, 等. 大气 CO₂ 浓度和温度升高对水稻植株碳氮吸收及分配的影响. *土壤*, 2015, 47(1): 26-32
Zhang L J, Pan G X, Zhang X H, et al. Effect of experimental CO₂ enrichment and warming on uptake and distribution of C and N in rice plant (In Chinese). *Soils*, 2015, 47(1): 26-32
- [27] 刘巽浩. 对西北旱区农业发展战略的思考. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(1): 1-2
Liu X H. On the strategy of agricultural development in northwest arid and semi-arid region of China (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(1): 1-2
- [28] Nguyen D N, Lee K J, Kim D I, et al. Modeling and validation of high-temperature induced spikelet sterility in rice. *Field Crops Research*, 2014, 156(2): 293-302
- [29] 林春波. 孕穗期高温对水稻生长发育及产量的影响研究. 南京: 南京农业大学, 2014
Lin C B. Effects of high temperature at booting stage on rice growth and yield formation (In Chinese). Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014
- [30] Nam H S, Kwak J H, Lim S S, et al. Fertilizer N uptake of paddy rice in two soils with different fertility under experimental warming with elevated CO₂. *Plant & Soil*, 2013, 369(1/2): 563-575
- [31] 李仁英, 李霖, 黄利东, 等. 不同品种水稻的产量构成因素及其对氮磷吸收的差异研究. *土壤通报*, 2016, 47(6): 1418-1424
Li R Y, Li L, Huang L D, et al. Yield components and uptake of nitrogen and phosphorus in different rice cultivars (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(6): 1418-1424
- [32] 陈贵, 施卫明, 赵国华, 等. 太湖地区主栽高产水稻品种对土壤和肥料氮的利用特性研究. *土壤*, 2016, 48(2): 241-247
Chen G, Shi W M, Zhao G H, et al. Characteristics of utilization of N sources from soil and fertilizer by rice varieties with high yield in Taihu Lake area (In Chinese). *Soils*, 2016, 48(2): 241-247

Effects of Warming at Different Growth Stages on Rice Yield and Nitrogen and Phosphorus Contents

CHANG Shaoyan¹ LI Renying^{1,2†} XIE Xiaojin¹ XU Xianghua¹ ZHANG Qi¹ YANG
Jianwei¹ LIU Yuchun¹

(1 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

(2 Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing 210044, China)

Abstract 【Objective】 Human activities have caused global warming. So it is essential to get to know how warming affects rice yield and contents of nitrogen (N) and phosphorus (P) in the soil, which may provide a certain basis for prediction of yield and quality of rice grains in future climate conditions. 【Method】 In the present study, rice cultivars of Tairuifeng 5 and Zhendao 16 were planted in pots, which were placed into a growth chamber with controlled temperature, 5°C higher than the air temperature outside for 7 days, at their tillering stage, booting stage, heading stage, flowering stage and filling stage, separately. Then effects of warming at different growth stages on rice yield and content of N and P in the plant were analysed. 【Result】 Results show that warming at different growth stages

affected significantly yield compositions of rice, with the warming at the booting stage and heading stage was the highest in the effect. The plants of Tairuifeng 5 and Zhendao 16 treated with warming at the booting stage were the lowest in number of grains per ear, seed setting rate and thousand grain weight. On the whole, warming at different growth stages increased significantly nitrogen content in stem, leaf, husk and grain of Tairuifeng 5 and Zhendao 16 ($p<0.05$). The effect of warming on P content depended on duration of the warming and rice cultivar. Compared with the control, Tairuifeng 5 treated with warming at the tillering stage, heading stage, flowering stage or filling stage was significantly lower in nitrogen harvest index, while Zhaodao 16 treated with warming at the heading stage was. Compared with the control, Tairuifeng 5 treated with warming at the heading stage and filling stage significantly was significantly lower in phosphorus harvest index, while Zhendao 16 treated with warming at the tillering stage and heading stage was. 【Conclusion】 All the findings in the present study show that the booting stage and heading stage are the critical periods when warming affects rice yield and uptake of nitrogen and phosphorus.

Key words Rice; Temperature; Yield; Nitrogen harvest index; Phosphorus harvest index

(责任编辑: 陈荣府)