

文章编号:1673-8411(2017)04-0054-04

增温对水稻生长影响研究进展

刘一江¹, 廖雪萍², 李耀先², 黄梅丽³, 李玉红², 覃峥嵘²

(1.南京农业大学,南京 210095;2.广西气象减灾研究所,南宁 530022;3.广西气象服务中心,南宁 530022)

摘要:从增温对水稻生长发育、光合特征、物质分配和产量组成的角度开展其影响研究进展综述。研究结果表明,较大幅度增温对水稻生长发育和光合生产造成不利影响,进而降低了水稻的产量。大部分研究手段是基于人工气候室或者控制试验,然而,其控温结果与实际温度变化规律的情况存在很大差距,并且增温对水稻生长发育影响机理并不清楚。为了精准模拟控制增温过程,围绕开放式增温技术方法的研究是必要的。

关键词:气候变暖;增温;水稻;影响;研究进展

中图分类号:P49

文献标识码:A

Research progress on the warming effect on rice growth

Liu Yijiang¹, Liao Xueping², Li Yaoxian², Huang Meili³, Li Yuhong², Qin Zhengrong²

(1 Agricultural University of Nanjing, Nanjing Jiangsu 210095; 2 Meteorological Disaster Alleviation Research of Guangxi, Nanning Guangxi 530022; 3 Guangxi Meteorological Service Center, Nanning Guangxi 530022)

Abstract: This paper is a review of the warming effect on rice growth, photosynthetic characteristics, material allocation, and yield components. The results showed that a large increase in temperature had a negative effect on rice growth and photosynthetic production, thereby reducing rice yield. Most of the research methods are based on artificial climate chambers or control tests, however, there is a big gap between the temperature control results and the actual temperature change, and the influence mechanism of warming on the growth and development of rice is not clear. Hence, in order to simulate the temperature control process accurately, it is necessary to study the open-warming technology.

Key words: global warming; warming; rice; impacts; research progress

0 引言

IPCC 第五次报告指出全球气候变暖已成为不争的事实,1880~2012 年全球地表平均温度上升了 0.85℃,模拟结果显示 21 世纪全球平均气温增幅可能超过 1.5~2℃^[1]。气温升高的同时也增加了极端高温天气出现的频率。大量模型预测和试验研究表明,全球变暖将对陆地生态系统尤其是农田生态系统产

生深远的影响。水稻是世界上最重要的食物来源之一,全球有超过一半的人口以水稻为主食。中国是重要的水稻生产国,水稻种植面积约占粮食总量的 30%,产量约占粮食总产的 40%。而温度是影响水稻生长最重要的环境因子之一。因此,正确认识水稻产量和品质形成对气候变化的响应和适应机制,对我国应对气候变暖,保证粮食安全至关重要^[2]。目前,已有的试验研究多数是在人工气候室或开顶箱中进

行的,虽然能够准确的控制环境条件,但会影响辐射、湿度、光周期等过程,因而不能模拟真实的自然条件。利用红外辐射大田增温系统模拟增温条件,研究水稻产量与品质对昼夜不同增温的响应机制,检验和验证模型的分析结果,对我国农业生产应对全球变暖,保证粮食安全及其战略决策的提出具有重要意义。

1 增温模拟的技术方法

国内外在全球变暖对陆地生态系统的影响方面做了大量研究,而这些研究主要集中在模型预测和历史数据分析上,田间试验较少。而田间模拟气候变暖的试验方法主要是田间环境下的增温试验,国际上增温试验采用的增温装置主要包括4大类:(1)温室^[3,4]和开顶箱;(2)土壤加热管道和电缆;(3)红外反射器;(4)红外辐射器^[5]。这些增温装置在设计、技术和增温机制上存在差异,因此有其各自的优点和弊端。温室和开顶箱是最简单、最普遍的一种被动增温方法。该增温装置可增加空气温度2~6℃,适用范围广,成本低,主要用于一些电力资源缺乏的高海拔地区。其缺点是不能很好的控制增温的幅度,影响光照、风速、湿度和动物活动,增温面积有限,不能模拟温度日变化。土壤加热管道是利用埋藏在土壤中的管道产生的热量增温,该方法可以增加土层温度。其缺点是影响了土壤生态过程,如微生物及根系活动,质子交换,气体扩散,水分径流等。红外反射器是利用反射红外线的帘布对其周围环境进行增温,其可以反射97%的直射光和96%的散射光,可使增温区域内年平均最低气温和土壤温度增加0.4~1.2℃,可以较好的模拟夜间增温。红外辐射器是利用悬挂在样地上方的红外灯管进行增温的主动增温装置,其可以在植被冠层保持自然的温度梯度,使冠层增温2~3℃^[6],而且其发射的近红外光几乎不引起光合作用,不改变微环境,是最能模拟变暖机制和应用最为广泛应用的增温装置^[7]。

2 增温对水稻光合特征的影响

光合作用是作物体内最重要的化学反应,而温度是光合作用最敏感的环境因子之一。籽粒灌浆物质80%左右来自抽穗以后的光合生产,抽穗以后的叶片光合特性对灌浆过程及籽粒产量形成十分重要,水稻剑叶的光合作用对于产量的形成贡献最大。关于温度对水稻叶片光合作用的影响已有大量的研

究,但研究结果不一致。灌浆期水稻遇到35℃及以上高温会加重剑叶光合抑制,从而影响稻株的营养供应能力。张桂莲^[8]等认为,高温下剑叶净光合速率和气孔导度下降,胞间CO₂浓度上升。张玉屏等^[9]对水稻抽穗期不同高温处理,发现高温下剑叶叶片伸长,温度升高,气孔导度增加,SPAD值增大。黄英金等^[10]研究结果表明,灌浆期高温胁迫使水稻剑叶光合速率和叶绿素含量均显著降低,且耐热性强的品种剑叶光合速率下降幅度明显较小,胁迫解除后恢复的程度会更高。夜间高温增加了水稻的呼吸作用和膜系统伤害,但对光合速率没有影响。另有研究认为夜间增温会通过呼吸驱动降低叶片碳水化合物的浓度而增加白天的光合速率。Dong等开放式增温试验得出增温降低了剑叶的光合速率,降低了呼吸速率,但增加了剑叶叶面积和叶绿素含量^[11]。而王小宁得出光合速率和气孔导度均表现为全天增温处理高于对照,对照高于白天增温处理的,夜间增温处理最低^[12]。可见,增温对作物光合作用的影响比较复杂,而昼夜不同增温对光合的影响可能更为复杂。

3 增温对水稻产量形成的影响

3.1 增温对水稻干物质分配的影响

温度是影响作物发育速度的基本因子之一。水稻生育期间温度的高低直接影响生育期的长短,进而可能引起干物质总量及其在器官间的分配比例。一般情况下,温度升高会促进水稻的生长发育,导致生育期缩短。高温胁迫下穗的干物质的分配比例下降,而茎鞘的干物质分配比例升高^[13]。Dong等用开放式昼夜不同增温得出,增温使水稻始穗期提前,但对始穗至成熟期的生育期基本不变,地上部分生物量降低,收获指数全天增温和白天增温增加而夜间增降低^[11]。陈金等在中国东北发现全生育期冠层夜间温度平均升高0.7℃~1.0℃,水稻始花期提前2~3d,而灌浆时间延长1~2d,但显著提高剑叶面积、花后总绿叶面积和叶面积指数^[14]。可见,增温对生育期及干物质分配的影响并不明确。

3.2 增温对水稻灌浆过程的影响

水稻灌浆期是产量和品质形成的关键时期,灌浆过程决定籽粒的结实率和充实度,进而影响粒重。一般认为温度主要影响灌浆速率和灌浆持续时间,对灌浆的不同阶段影响也不同。盛婧等研究得出灌浆结实期不同时段的高温对水稻结实的影响也存在显著差异:结实率对高温最敏感的时期是开花后

1~5d, 粒重对高温最敏感的时期是开花后 11~20d^[15]。戴云云等研究得出灌浆结实期夜间增温在抽穗后 13d 胚乳物质积累速率较快, 而对照胚乳物质积累速率一般在灌浆 15~20d 达到峰值, 并高于夜间增温灌浆速率的峰值^[16]。有研究认为, 高温加快了灌浆速率, 但灌浆持续时间缩短, 高温导致减产的原因是因为增加的灌浆物质积累速率的增加不能弥补灌浆持续时间的缩短引起的。施婉菊等全生育期夜间高温处理间高温缩尤其是花后生育期均缩短, 夜间高温提高了灌浆前中期碳氮在籽粒中的分配, 而降低了成熟期碳和氮在籽粒中的分配^[17]。但 Dong^[11]等的增温实验表明始穗至成熟期的生育期基本不变。然而 Kobata 等认为灌浆期高温导致水稻减产是因为同化物供应不足^[18]。灌浆过程也与粒位有关, 一般认为位于稻穗中上部的强势粒发育灌浆早、充实快, 而位于稻穗下部的弱势粒发育灌浆起步晚, 充实度较差, 易受环境的影响。Mohammed 等研究也表明夜间高温对籽粒粒重的影响与粒位有很大关系, 穗尖的粒重大于穗基部的粒重^[19]。而施婉菊等研究表明夜间高温下水稻穗的上、中、下三个部位籽粒的起始灌浆速率都有所增加, 最大灌浆速率和平均灌浆速率因品种而异, 有效灌浆期都缩短^[17]。

3.3 增温对水稻产量构成的影响

水稻产量构成因素主要包括单位面积有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重, 籽粒的灌浆过程对最终产量的形成至关重要。在不同的生育时期增温会对其不同的产量构成因素产生影响, 水稻的产量主要来自于花后的光合生产和抽穗前茎秆中储藏物质的输出率及其转换效率。单位面积穗数决定于有效分蘖终止期, 每穗粒数决定于每穗分化颖花数和退化颖花数, 千粒重取决于颖壳的大小和充实度。水稻开花期是对温度最敏感的时期, 温度可能通过影响花粉育性、花粉管萌发、柱头活性等而直接导致花粉败育和子房受精受阻, 结实率下降。Mohammed 在夜间对水稻 32℃ 高温处理发现增加了小花不育和呼吸消耗, 降低了水稻下部籽粒粒重, 从而导致水稻减产, 而对成熟期有效穗数无明显影响^[19]。在开放式增温方面, 张敬奇等在花后开放式日间增温 1.36℃、夜间增温 2.62℃, 得出增温处理对产量的影响主要表现在千粒重和结实率上, 而对有效穗数和穗粒数的影响不显著^[20]。Dong 等的开放式增温试验表明增温降低了千粒重, 而有效穗数有所增加, 穗粒数有所降低, 但均未达到显著水平^[11]。

4 增温对水稻营养品质的影响

4.1 增温对水稻淀粉含量的影响

随着人类生活质量的不断提高, 对稻米的品质也提出了更高的要求。稻米品质一般包括加工品质、外观品质、蒸煮品质和营养品质四个方面。在这些品质中营养品质是最重要的, 主要是淀粉、蛋白质的含量。淀粉是稻米的主体组成成分, 在食用精米中, 淀粉占胚乳总干重的 70%~80% 左右, 可分为直链淀粉和支链淀粉。其中直链淀粉是可溶性的, 约占非糯水稻品种胚乳总淀粉含量的 15%~30% 左右, 其余为支链淀粉。稻米品质的优劣主要取决于直链淀粉与支链淀粉含量的相对比例以及淀粉的精细结构^[21]。温度对稻米品质的影响与籽粒的灌浆充实过程有关^[22]。一般认为, 高温下籽粒物质灌浆过快, 灌浆时间缩短, 籽粒充实不够, 千粒重降低, 胚乳糊粉层细胞数量增多, 糠层变厚, 从而影响到加工品质^[23]。关于稻米直链淀粉含量与温度间的关系, 研究结果不一致, 大致可以归纳为以下三大类: 第一类是灌浆结实期温度与直链淀粉含量呈负相关。第二类是温度与直链淀粉含量因品种不同而异, 高直链淀粉含量品种同结实期温度呈正相关或不显著, 低直链淀粉含量品种同温度呈负相关。低、中等直链淀粉含量品种的直链淀粉含量与温度呈负相关, 而温度对高直链淀粉含量品种的影响小或相反。第三类是温度与直链淀粉含量的关系因品种而异, 但在高、低直链淀粉含量的品种中, 直链淀粉含量和温度的关系同第二类观点相反。高、中等直链淀粉含量品种的直链淀粉含量在结实期平均温度为 27.5~28.5℃ 条件下的值比 24.7℃ 条件下的值低, 而低和极低直链淀粉含量的品种则相反。戴云云等发现夜间增温降低了直链淀粉含量, 而白天增温增加了直链淀粉含量^[16]。

4.2 增温对水稻蛋白质组成的影响

蛋白质主要由清蛋白、球蛋白、谷蛋白和醇蛋白组成。蛋白质含量与稻米蒸煮食味质量呈负相关, 过高的蛋白质含量往往使稻米食味变差。大多数研究认为结实期增温有利于蛋白质含量的增加。而孟亚利^[24]等认为温度对蛋白质的影响因品种而异。黄英金^[10]等研究发现, 日均温与蛋白质含量呈正相关, 而日较差则与蛋白质含量呈负相关。结实期日均温为 24℃ 时蛋白质的含量最高, 温度偏高或偏低都不利于蛋白质的形成。而董文军等研究得出不同开发式增温处理均降低籽粒中蛋白质含量, 全天和夜间增

温差异显著,分别较常规对照降低 5.6% 和 4.0%^[25]。蛋白组分方面,黄英金^[10]等认为结实期不同时段温度对蛋白质各组分的影响不同,清蛋白和谷蛋白主要受灌浆前中期的温度控制,球蛋白、醇蛋白则主要受灌浆中后期的温度影响,但温度敏感性随品种本身蛋白质含量升高而下降,灌浆结实期白天和夜间增温均可提高稻米的蛋白质含量,其中清蛋白、球蛋白、谷蛋白含量升高,醇溶蛋白含量则降低。综上所述,以往的研究主要是在人工控温条件下,且多数是在籽粒灌浆结实期及不同日平均温度对稻米品质的影响,模拟的增温幅度也往往高于未来气候变暖的预测值。为了比较真实地揭示气候变暖对稻米品质形成的实际影响及其生理机制,田间增温试验试验方面的研究十分有限。

5 展望

随着全球气候变化的加剧以及各种极端天气的频繁发生,极端增温导致高温热害已经成为了威胁世界水稻生产的重要逆境之一。几十年来,有关增温模拟对水稻生长过程,国内外专家学者已经开展了大量的科研工作,以期系统的探究解析增温对水稻影响过程,取得了显著的效果,但是环境控制试验方法或手段有待于改进与完善,有必要在田块尺度利用开放式增温设备。不仅要符合日变化规律的温度波动模式,也要将 CO₂、湿度、风速和光照条件控制在一定水平。量化分析和模拟增温条件下水稻的叶面积衰减、光合生产、物质积累与分配、产量和品质形成的动态过程仍有待进行深入的研究,为评估增温对水稻生产的影响及热害的预警提供技术支持。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change . Synthesis Report: Summary for Policymakers. ed. <http://www.ipcc.ch> 2013.
- [2] Hertel TW, Burke MB, Lobell DB. The poverty implications of climate-induced crop yield changes by 2030 [J]. *Global Environmental Change*, 2010, 20(4): 577–585.
- [3] Dong W, Chen J, Wang L, et al. Impacts of nighttime post-anthesis warming on rice productivity and grain quality in East China [J]. *The Crop Journal*, 2014, 2(1): 63–69.
- [4] Das S, Krishnan P, Nayak M, et al. High temperature stress effects on pollens of rice (*Oryza sativa* L.) genotypes [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 101(0): 36–46.

- [5] 牛书丽,韩兴国,马克平,等.全球变暖与陆地生态系统研究中的野外增温装置[J].*植物生态学报*, 2007, (02): 262–271.
- [6] Bruhn D, Larsen KS, de Dato GD, et al. Improving the performance of infrared reflective night curtains for warming field plots [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 173(0): 53–62.
- [7] Aronson EL, McNulty SG. Appropriate experimental ecosystem warming methods by ecosystem, objective, and practicality [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1791–1799.
- [8] 张桂莲,陈立云,张顺堂,等.抽穗开花期高温对水稻剑叶理化特性的影响[J].*中国农业科学*, 2007, 40(7): 1345–1352.
- [9] 张玉屏,朱德峰,林贤青,等.高温对水稻剑叶生长和气孔导度影响[J].*江西农业大学学报*, 2012, 34(1): 1–4.
- [10] 黄英金,漆映雪.灌浆成熟期气候因素对早籼稻米蛋白质及其 4 种组分含量的影响[J].*中国农业气象*, 2002, 23(2): 9–12.
- [11] Dong W, Chen J, Zhang B, et al. Responses of biomass growth and grain yield of midseason rice to the anticipated warming with FATTI facility in East China [J]. *Field Crops Research*, 2011, 123 (3): 259–265.
- [12] 王小宁,申双和,王志明,等.白天和夜间增温对水稻光合作用的影响[J].*江苏农业学报*, 2008, 24(3): 237–240.
- [13] 马宝.高温对水稻光合特征生长发育和产量的影响[D].*中国农业科学院*, 2009.
- [14] 陈金,田云录,董文军,等.东北水稻生长发育和产量对夜间升温的响应[J].*中国水稻科学*, 2013, 27(1): 84–90.
- [15] 盛婧,陶红娟,陈留根.灌浆结实期不同时段温度对水稻结实与稻米品质的影响[J].*中国水稻科学*, 2007, 21(4): 396–402.
- [16] 戴云云.日夜温度升高对稻米品质的影响及其氮素穗肥的调控作用[D].*南京农业大学*, 2008.
- [17] 施婉菊.夜间温度升高对热带地区水稻产量形成及稻米品质的影响[D].*湖南农业大学*, 2013.
- [18] Kobata T, Uemuki N. High temperatures during the grain-filling period do not reduce the potential grain dry matter increase of rice [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(2): 406–414.
- [19] Mohammed AR, Tarpley L. Effects of high night temperature and spikelet position on yield-related parameters of rice plants [J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 33(2): 117–123.
- [20] 张敬奇.花后开放式增温对水稻产量与品质的影响研究[D].*南京农业大学*, 2012.
- [21] 贺晓鹏,朱昌兰,刘玲珑,等.不同水稻品种支链淀粉结构的差异 [22] 韦克苏.花后高温对水稻胚乳淀粉合成与蛋白积累的影响机理[D].*浙江大学*, 2012.
- [23] 高如嵩.稻米品质气候生态基础研究[M].*陕西科学技术*, 1994.
- [24] 孟亚利,周治国.结实期温度与稻米品质的关系[J].*中国水稻科学*, 1997, 11(1): 51–54.
- [25] 董文军,田云录,张彬,等.非对称性增温对水稻品种南粳 44 米质及关键酶活性的影响[J].*作物学报*, 2011, 37(5): 832–841.