

江陵杰, 范 鹏, 郭柯凡, 等. 水稻冠层温度研究进展[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(1): 234-242.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2020.01.033

## 水稻冠层温度研究进展

江陵杰<sup>1,2</sup>, 范 鹏<sup>1,2</sup>, 郭柯凡<sup>1,2</sup>, 金雨航<sup>1,2</sup>, 周 诚<sup>1,2</sup>, 沈新平<sup>1,2</sup>, 黄丽芬<sup>1,2</sup>, 蒋 敏<sup>1,2</sup>  
(1.江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省作物栽培生理重点实验室/扬州大学农学院, 江苏 扬州 225009; 2.江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/扬州大学, 江苏 扬州 225009)

**摘要:** 冠层温度是水稻重要的生理生态特征,可以综合衡量水稻的生长状况。通过冠层温度和田间诊断的结合,可以制定高效的田间管理措施,对水稻生产具有重要意义。中国水稻冠层温度研究工作起步较晚,但取得了一定成效,随着高效测温技术的普及,对水稻冠层温度应用的挖掘具有很高的科研价值。鉴于此,笔者从冠层温度的基本特性、影响因素、测定方法和成果转化等方面进行综述并提出建议,以期为水稻冠层温度方面的科研工作提供参考和借鉴。

**关键词:** 水稻; 冠层温度; 生理生态特征; 解剖结构特征

**中图分类号:** S511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2020)01-0234-09

## Research progress on the factors affecting canopy temperature of rice

JIANG Ling-jie<sup>1,2</sup>, FAN Peng<sup>1,2</sup>, GUO Ke-fan<sup>1,2</sup>, JIN Yu-hang<sup>1,2</sup>, ZHOU Cheng<sup>1,2</sup>, SHEN Xin-ping<sup>1,2</sup>, HUANG Li-fen<sup>1,2</sup>, JIANG Min<sup>1,2</sup>

(1.Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology/Agricultural College of Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2.Jiangsu Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops/Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** Canopy temperature is an important physiological and ecological characteristic of rice, which can comprehensively measure the physiological growth of rice. Through the combination of canopy temperature and field diagnosis, efficient field management measures can be formulated, which is of great significance for rice production. The research on rice canopy temperature started late in China, but some results were achieved. With the popularization of high-efficiency temperature measurement technology, the mining of canopy temperature application is of great scientific value. In view of this, this paper summarized the research results of the basic characteristics, influencing factors, determination methods and achievements transformation of canopy temperature in order to provide reference for scientific research on rice canopy temperature.

**Key words:** rice; canopy temperature; physiological and ecological characteristics; anatomical features

水稻冠层温度是指水稻茎、叶、穗表面温度的平均值<sup>[1]</sup>,是用来综合衡量水稻生理生长状况的重要

指标。1963年 Tanner<sup>[2]</sup>首次提出采用红外测温技术来测定作物冠层温度,并得到了广泛的应用。前人在禾本科、豆科等许多作物的不同品种上发现冠层温度存在非气候致变性差异<sup>[3]</sup>。近年来,在小麦、玉米、棉花等作物上关于水分状况监测、产量监测以及抗性基因筛选等方面对冠层温度进行了较深入的研究<sup>[4-5]</sup>,并获得一定成果。但目前大部分有关冠层温度的研究主要集中在旱地作物,对水稻的研

收稿日期:2019-05-03

基金项目:国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2017YFD0300102);国家自然科学基金项目(31801310)

作者简介:江陵杰(1992-),男,江苏南京人,硕士研究生,主要从事作物栽培与耕作学研究。(E-mail)2030206292@qq.com

通讯作者:蒋 敏,(E-mail)jiangmin@yzu.edu.cn

究偏少<sup>[6-7]</sup>,多数研究是基于田间肥水调控下冠层温度与水稻表观特征和产量构成的研究,缺乏从能量平衡条件下探究不同冠层温度水稻植株内在生理水平的差异,甚至有些学者研究结果互相排斥。本文对当下水稻冠层温度方面的研究结果进行梳理,将从水稻冠层温度的基本特性、影响因素、测量方法以及研究成果应用转化等方面进行阐述,致力于梳理现阶段水稻冠层温度研究的基本轮廓和发掘创新型测温技术的应用。以便今后学者更直观地了解水稻冠层温度及其相关研究成果,为以后对水稻冠层温度方面深层次、系统化研究提供参考和借鉴。

## 1 水稻冠层温度的基本特性

### 1.1 冠层温度的能量来源

水稻冠层温度是水稻生理生态特征之一。植物体温形成过程的研究始于 20 世纪 60 年代<sup>[8]</sup>,冠层温度取决于植物冠层的能量平衡,受遗传、自然环境和田间管理措施等综合影响<sup>[6-7, 9]</sup>。水稻冠层与外界环境通过辐射、传导、对流和蒸腾散热等方式进行热量交换,同时伴随光合作用、呼吸作用、酶促反应等系列代谢活动。水稻能够维持一定的冠层温度并依赖于水稻自身代谢与环境能量交换达到相对平衡。现阶段,受限于试验设计的复杂程度和精确监测技术的匮乏很难通过实测手段分析水稻冠层温度能量平衡的各项因素对于水稻体温的贡献大小。

### 1.2 水稻对冠层温度的自身调节方式

水稻是一年生作物,各生育期皆有适宜的温度范围,在能量平衡下,水稻也具有相对稳定的体温范围。因此,水稻在不同生长环境下对冠层能量平衡有一定微调能力。前人研究发现,水稻冠层温度与气温变化并非完全同步,而是随气温升高冠层温度上升幅度逐步减小,当气温升高时,水稻群体的叶片温度也随之升高<sup>[10]</sup>,叶片气孔导度变大,进而加快了水稻蒸腾速率,而水稻蒸腾作用的加强反过来又能降低叶面和叶室温度,但温度提高对蒸腾速率加大的影响是占主导地位的。因此,蒸腾作用是水稻群体在面临高温时对冠层温度进行有限调控的驱动力。水稻根部从土壤中吸收的水分进入根内导管,在蒸腾拉力作用下进入茎部导管提供各部分水分代谢。当气温过高时,水分迅速往叶内导管输送,通过气孔进行蒸腾作用实现水稻冠层温度的调节。不过这种调节受多种因素的影响,例如土壤缺水时,气孔

将会关闭以防止水分流失。

### 1.3 冠层温度的变化规律

1.3.1 日变化 水稻冠层温度的变化规律包括日变化规律和生育进程变化规律。中国关于水稻冠层温度变化规律的观察与研究起步较晚。在关于稻田生态效应的研究中普遍认为水稻冠层温度一般低于气温,但受气温影响较大<sup>[11]</sup>,在上午 7:00 至 11:00 由于日辐射的增强和气温的回升,水稻冠层温度迅速上升,在 11:00 至 15:00 点处于水稻植株代谢的稳定时段,冠层温度呈现平缓浮动变化状态,15:00 后随日辐射量和气温的降低迅速下降,与气温变化趋于一致<sup>[12]</sup>。夜间,即使气温较低,由于田间生态小气候的形成具有一定保温作用,可能出现水稻冠层温度高于气温的现象。Liu<sup>[13]</sup>在分蘖期对南粳 9108 进行了水稻冠层温度连续测量,认为同一品种和处理的水稻群体具有相同的冠层温度,在晴天的白天,水稻群体的温度低于气温,但是在夜间高于气温。在上午 10:00 至下午 4:00 之间,水稻作物与环境之间的温差相对显著。

1.3.2 生育进程变化 由于不同生育阶段水稻需水量不同,水稻的气冠温差在不同生育阶段有很大的波动。Liu 等<sup>[13]</sup>研究认为,水稻在每个不同的生长期保持一定的冠层温度,随着环境温度的变化,冠层温度变化不显著。例如,作物温度在 7 月 20 日为 31~33℃,8 月 16 日为 25.5~27.5℃,9 月 20 日为 21.0~22.5℃。有研究结果表明,经过缺水锻炼后的水稻对自身代谢有一定的调节能力以适应环境<sup>[14]</sup>,在一定限度水分亏缺的环境中仍然能够正常生长,因此水分胁迫下气冠温差会随生育期的推进而增加。对于水稻冠层温度变化规律的研究受众多因素限制。目前,数据依赖于人工采集,想要获得完整的温度变化数据十分困难。水稻冠层温度不仅受气温、光照、风速等自然条件因素的影响,而且还受施肥、供水等田间管理措施调控,为深入研究水稻冠层温度的变化特征需要更为严谨的试验设计以及大量试验工作投入。

### 1.4 水稻冠层温度与水稻其他性状的关联性

1.4.1 水稻冠层温度与产量构成的关系 对于水稻冠层温度与产量关系的研究始于上世纪九十年代,其中 Garrity 等<sup>[15]</sup>和 Singh 等<sup>[16]</sup>研究指出水稻冠层温度与其产量存在一定关联,并发现开花期水稻冠层温度与水稻结实率和产量呈显著负相关,相

关关系在孕穗期至灌浆结实期皆有体现<sup>[17]</sup>。抽穗开花期是水稻一生需水较多的时期,此时若受到水分胁迫,水稻植株因根系活力下降和蒸腾作用减弱会导致冠层温度升高。同时,缺水将导致水稻植株光合能力下降,有机物的合成运输受限,水稻的枝梗和颖花难以正常发育,甚至出现颖花退化和不育,而伴随着冠层温度的升高,水稻群体开花高峰提前,开花时间集中在花期前 3 d,严重影响穗质量和饱粒数<sup>[11]</sup>。而在水分充足条件下,不同温度型水稻同样存在产量上的差异,黄山等<sup>[18]</sup>研究不同温度型晚粳发现气冠温差与结实率均呈显著的正相关,产量的差异主要源于每穗粒数。灌浆期是决定每穗实粒数和千粒质量的关键时期,低温型水稻品种叶片功能期较长、叶绿素含量高、蒸腾旺盛、光合能力较强,成熟期相对较长,有利于体内碳氮代谢和籽粒的灌浆充实。以上研究结果表明,冠层温度可能与水稻植株内在代谢有着密不可分的关系,很大程度上或许直接影响着植株产量的高低。

然而,高继平等<sup>[19]</sup>在水稻冠层温度与产量关系的研究中却得到不同结果,对齐穗期东北 14 个不同品种(系)的粳稻在晴昼有水层、晴昼无水层和夜间有水层等不同环境条件下进行观测,同样发现不同品种(系)的水稻冠层温度存在明显差异,而试验结果表明暖温型水稻产量有略高于冷温型水稻。笔者认为冠层温度是水稻基因型、生态环境、植株生长状况及农业管理措施等多因素相互作用的综合反映,变异性很大,虽然发现了水稻冠层温度与产量之间存在一定相关性,但并不能解释其因果性。不同基因型品种在不同生育时期的冠层温度与其产量构成因子关系复杂,二者关系的稳定性和普遍性有待验证,其内在机制和定量关系也需要进一步探究。

**1.4.2 水稻冠层温度与稻米品质的关系** 水稻冠层温度是冠层小气候的重要表现。稻米品质受自身遗传特性影响的同时,其生长期的内外生态环境对稻米品质也起重要作用<sup>[20]</sup>,因此,冠层温度不同和水稻品质差异就具有一定同源关系<sup>[21]</sup>。较多的研究者也认为低温型早稻的碾米品质优于高温型品种。高继平等<sup>[22]</sup>通过在灌浆期对同一品种设置 5 种不同水分梯度以营造不同冠层温度来研究冠层温度与水稻稻米品质之间的关系,结果表明水分胁迫下水稻气冠温差与整精米率、蛋白质含量、直链淀粉、脂肪酸和食味值呈显著正相关,与秕粒数、垩白

度、垩白粒、碎米率呈显著负相关。但有研究发现,不同施氮量同样引起冠层温度差异,对早稻中后期稻米品质的研究指出整精米率与气冠温差呈显著负相关<sup>[23]</sup>。这说明,冠层温度对水稻品质的影响具有复杂的机理,导致同品种水稻冠层温度差异的因素不同,其对水稻稻米品质形成过程的影响也不尽相同。品种、水肥调控、栽培方式等都与水稻冠层温度和稻米品质存在关联,需找到引起冠层温度差异的原因,并从具体因素出发,明确水稻各个时期的内在生理代谢变化过程,以便进一步探究分析引起水稻稻米品质改变的原因。

## 2 水稻冠层温度的影响因素

### 2.1 生态系统气象变化水平

郭家选等<sup>[24]</sup>和 Patel 等<sup>[25]</sup>研究发现,净辐射通量是影响冠层温度高低的主要能量因子,而潜热通量、显热通量和土壤热通量是次要能量因子,它们对冠层温度的影响与天气状况有关。水稻冠层温度的形成源于吸收太阳以及周围环境的辐射,然后通过与外界环境的传导、对流和蒸腾作用对冠层温度进一步调整。因此,气象变化水平是影响水稻冠层温度的重要因素。

**2.1.1 大气温度** 冠层温度的变化与气温具有良好的线性关系<sup>[26]</sup>。同时大气也是与稻叶发生热对流和热传导的直接能量载体。热量会随着大气与水稻植株之间的温度梯度发生热传递。当气温高于水稻体温时,热量会从大气与水稻植株接触的边缘导热层将热量输送给植株,导致水稻体温上升,冠层温度也将随之上升;反之,水稻冠层温度相应随之降低。当气温超过水稻生长适宜温度时,水稻的各项生理代谢受到温度的抑制,失去对冠层温度的自身调节能力,导致冠层温度逼近气温。

**2.1.2 相对湿度** 相对湿度也是影响冠层温度的主要因素。相对湿度是实际水气压与饱和水气压的比值。大气相对湿度增加会减弱水稻蒸腾作用,这是因为大气中水汽压升高,稻叶内外的蒸气压差变小,气孔下腔的水蒸气不易扩散,进而使冠层温度升高<sup>[10, 27]</sup>,在高温和高湿的环境中,由于蒸腾作用减弱而导致稻叶灼伤的现象是常见的,蒸腾作用弱,叶片就有可能被灼伤。但空气相对湿度过小时,稻叶同样会发生暂时性萎蔫,稻叶片为避免水分过度流失,同样会关闭气孔,此时光合作用与蒸腾作用都会



暂时停止。空气相对湿度长期过低,会造成叶片边缘以及叶尖的坏死,主要原因是叶片内部气腔水气压与外界水气压相差过大,造成叶片内部水分供应不足而坏死。因此,大气相对湿度是通过影响植株的光合作用和蒸腾作用间接影响水稻冠层温度。

**2.1.3 光照度** 强光照不仅能直接以辐射能量的形式作用于水稻冠层使得水稻冠层温度相应升高<sup>[11]</sup>,同时也是大气环境升温的重要能量来源。光照通过短波蓝紫光满足水稻植株正常光合作用的同时,其长波红光会大量被水稻植株中的水分所吸收,导致植株的升温。而太阳辐射到达植株表面时,能耗主要表现在加热大气,升高的气温又将以热传导或热对流的形式间接影响冠层温度。强光往往导致高温,易造成水分亏缺,气孔关闭和  $\text{CO}_2$  供应不足,也会引起光合速率下降,从而影响植株的生长;而光照不足引起叶绿素分解,水稻叶片可能出现黄化现象。光照又是影响植物蒸腾作用的最主要的因素,光照能促进气孔开放,减小气孔阻力,光照还能提高大气及叶片温度,加快液态水的蒸发,增大叶内外的水蒸气压差,因而间接促进蒸腾。

**2.1.4 风速** 董振国等<sup>[9]</sup>发现环境的风速变化对冠层温度影响显著,随着空气流动,水稻冠层会加速与大气之间的热量传导与对流,同时能够增加冠层上方叶片表面的湿度梯度,提高蒸腾效率。适当的微风有利于改善水稻田间群体受光和气体交换。由于微风吹走了植株周围含低浓度  $\text{CO}_2$  的空气,补充新鲜空气,进而加速光合作用。

## 2.2 品种遗传特性

冠层温度具有较高的遗传特性,不同品种水稻冠层温度存在差异现象<sup>[28]</sup>,基因型不同导致水稻的各种生理代谢活动的遗传特性也不尽相同,调控力强的品种植株体内活性酶、叶绿素、可溶性蛋白质等含量都比较高,其蒸腾速率也相对较强<sup>[29]</sup>。此外,不同基因型水稻品种各自的形态特性也是产生冠层温度差异的重要因素。

### 2.2.1 形态特性

**2.2.1.1 根** 不同基因型品种之间根系发育存在差异,根系发达、活力强的品种能够从更深的土壤中吸收更多的水分<sup>[30]</sup>以提供和维持蒸腾作用消耗。水稻根系对地上部生长、产量和品质形成的影响不仅取决于根系的形态指标,而且与根系在土壤中的分布特征有密切关系。上层根系主要是在生育中后期

形成,对于提高结实率和籽粒质量作用明显,对产量形成有重大影响;下层根系主要在生育前期形成,有利于促进分蘖,为足穗大穗奠定基础<sup>[31]</sup>。前人研究结果<sup>[32]</sup>表明,根数、根质量与产量密切相关,根质量与谷质量、穗数,根数与穗质量、穗数、穗粒数、千粒质量关系密切。研究结果证明冷温型品种在产量和叶面积指数方面都优于暖温型品种,那么冷温型品种在根数和根质量等根部形态特征以及上下层根的分布关系上都应优于暖温型品种。

**2.2.1.2 叶面积指数** 水稻叶片不仅直接参与太阳辐射的接收,同时也是水稻冠层与外界发生热交换的重要场所。水稻叶片在接收太阳辐射能后,部分通过光合作用转化为化学能积累于有机物中,还有部分被叶片以荧光形式发散或因反射和透射等损失掉,其余很大部分短波红外辐射被植物体内水分吸收<sup>[33]</sup>。因此,叶面积指数高的品种单株热容量也较大,所以接收相同的能量其温度升高较叶面积指数低的水稻品种要小。另外,叶面积指数高的品种单位面积参与光合作用与呼吸作用的叶片较多,其代谢散热的能力也较强。但叶面积指数也非越高水稻冠层的降温调节效果就越好。过高的叶面积指数能够有效拦截太阳光照射,热量损失少,但群体过密导致通风效果差,水稻群体内部湿度较大,反而不利于蒸腾作用的进行。

**2.2.1.3 其他群体特征** 水稻群体形态特征对冠层温度的影响主要表现为不同形态的水稻群体对光照的接收和利用率以及其通风效果。目前有些研究发现冠层温度低的品种叶片基角和开张角等小于暖温型品种,但这也只表明冠层温度与水稻形态特征存在一定相关性,也有人认为水稻冠层温度高低与株高和穗弯曲度等群体特征存在联系,水稻群体具体如何利用这些群体特征达到调节冠层温度的相关理论目前还在研究中。

### 2.2.2 生理特性

**2.2.2.1 生理结构** 叶片是水稻生理代谢的重要场所,利用扫描电镜对不同温型水稻品种剑叶的观察发现,叶片的气孔密度和长宽均无明显差异<sup>[34]</sup>。因此,较强的代谢能力并不能单方面从气孔导度来解释,需要深层次挖掘差异性产生的根本原因。植株代谢活力与其解剖结构特征密不可分,较小的叶肉细胞不仅可以叠加更多的叶肉细胞层,同时单位面积下叶肉细胞的排列更为紧密,大大增加了单位体

积下叶肉细胞的数目和细胞总表面积,这意味着单位体积下具有更多叶绿体数目和更高的叶绿素含量,光合速率也相应较高。此外,单位横截面积茎中较多数目维管束和占茎横截面积较高百分率的维管束,有利于光合产物快速从叶肉细胞中被运走,提高叶片的光合效率,而且有利于土壤中水分及时地被运到叶片的各个部分,提高叶片的蒸腾速率和物质在植物体内的运转。叶片光合速率和蒸腾速率的提高,又有利于降低植物的冠层温度。这些差异在对同为禾本科的小麦植株的解剖研究中均有表现<sup>[35-36]</sup>。水稻根系不仅是吸收养分、水分的重要器官,还是植物激素、有机酸和氨基酸等物质合成与转化的重要场所,而根毛的多少则成为根部吸收田间水分和养分能力的重要标志。另外,伤流强度可视为根系生理活性指标,同时也反映地上部生长的盛衰,通过对作物根系伤流强度的研究可以把作物的地上部与地下部有效地联系起来。因此,冷温型水稻根部根毛密度和伤流强度可能大于暖温型品种。

由于目前缺乏针对冠层温度差异性而展开的不同温型水稻生理结构方面的研究,应加强对叶片细胞的大小、密度、叶绿素含量、维管束多少以及根毛密度等生理构造方面的研究,对冠层温度差异性的产生给出科学解释。

**2.2.2.2 生物化学过程** 普遍认为,高温环境下水稻叶片气孔导度增大可以提高蒸腾速率来降低叶温,但外界温度的变化同样可以影响光合作用强弱,从而对气孔的开闭产生重大的影响,故蒸腾降温是植物主动调节体温的机制,还是伴随光合作用的附加效应仍需要研究证实。有研究指出,冷温型品种水稻叶片 *SPAD* 值、胞间二氧化碳浓度以及气孔导度都高于暖温型品种<sup>[34]</sup>。这说明冷温型品种叶片叶绿体相对含量更高,同时也通过较大的气孔导度吸收更多二氧化碳作为光合作用原料,其较大的气孔导度又促进叶片蒸腾降温。此外,也有研究发现,植物叶黄素同样起到调节体温的作用,在强光照环境下,若光合作用的暗反应不能与高强度的光反应耦合,就会产生自由基,导致植物体内的能量过多。通过叶黄素的循环耗能降低或消除这种潜在威胁<sup>[37]</sup>,这也侧面解释部分地区由高温干旱而导致的稻叶灼黄现象的发生。

### 2.3 水肥管控水平

**2.3.1 水** 土壤水分作为蒸腾散热的主要载体对

水稻冠层温度具有十分重要的调控作用。水稻是沼泽植物,生理需水和生态需水量都很大,当土壤水分亏缺时,水稻难以汲取足够的水分维持自身代谢,叶水势显著降低,气孔导度降低即气孔阻抗值升高以减缓蒸腾作用来避免水分过快散失,水稻冠层将吸收的能量以热和荧光的方式释放出来,其冠层温度升高。高温干旱条件下,水稻植株为了避免或减轻水分散失关闭气孔降低蒸腾速率<sup>[38]</sup>,所以在环境水分胁迫条件下,排除其他环境条件影响,水稻冠层温度相比于水分充足的稻作区会相应提高。因此,适时灌溉能有效提供水稻代谢所需水分,维持叶水势以保证蒸腾作用来调节冠层温度。

**2.3.2 肥** 施肥管理措施能塑造不同的水稻群体特征<sup>[39]</sup>,适宜的肥料运筹对冠层温度有显著调节作用。充足的土壤肥力不仅能满足单株水稻生长发育的必要营养元素,同时也是水稻建立良好群体质量的必要条件。不同氮肥管理对作物群体冠层内的昼夜温度差和湿度差以及透光率等生态条件有明显影响<sup>[29]</sup>。适当施肥能增加叶面积指数,对冠层温度具有一定调节作用。相关研究结果也表明,氮肥的使用能显著增加水稻群体生物量,形成水稻群体遮掩效果,减少水稻群体内部对光能的接收。同时,充足的养分能够促进水稻群体代谢和蒸腾,增强群体散热能力。但过高的氮处理容易增加无效和低效叶面积指数,同时也增加了水稻群体染病的风险。目前,对于施肥量与冠层温度变化的线性关系尚不明确;不同的施肥期以及施肥量对同一品种造成冠层温度差异的情况也有待进一步探索。

### 2.4 栽培管理措施

不同的栽培方式和田间管理技术对水稻群体株高、茎蘖数、叶面积指数等有极显著的影响,合理的栽培与管理措施能够有效改善稻田通风性和透光率,维持相对稳定的冠层小气候。适当的密植是形成良好田间小气候的必要措施,过疏的种植密度不利于田间小气候的形成;而过密的栽培方式又容易导致水稻群体的养分、水分竞争,制约水稻群体的长相长势,使其难以形成良好的群体结构。因此,合理密植的同时,加强水肥管理是有效控制水稻田间小气候以调节冠层温度的重要措施。

## 3 水稻冠层温度的测量方法

从冠层温度被提出作为植物生长状况的综合性



指标以来,科学研究工作相继展开,不过一直受限于低效的测温技术,传统的水银温度计难以实现对水稻冠层温度的准确把握。传感器测温技术的诞生,在植物温度的测量方面得到了高效的应用,水稻冠层温度方面的研究得以广泛展开。

### 3.1 接触式

接触式测温仪通过直接与热源接触的测量元件进行温度测量,主要分为热电阻和热电偶 2 种测温原理。接触式测温仪因为其结构简单、成本较低而得到各领域测温方面的普遍应用,其中在农业试验方面的应用也较为广泛。但面对大面积田块统一测量时,使用接触式测温仪工作量较大,并且在长时间的连续测量过程中较难保持测温仪与待测叶片的接触方式不变和规范操作,况且叶片内外环境的改变同样会影响到操作的精确性。

**3.1.1 热电阻测温仪** 热电阻测温仪是利用其电阻值随温度的变化而变化这一原理制成的将温度量转换成电阻量的温度传感器。温度变送器通过给热电阻定量电流测量其两端电压的方法得到电阻值,再将电阻值转换成温度值,从而实现温度测量。

**3.1.2 热电偶测温仪** 热电偶测温仪由于其价格便宜、便携、热惯性小、准确度高、输出信号便于远传等特点成为目前接触式测温仪中应用最广的。相关研究表明热电偶测温仪比红外测温值更能代表水稻植株体温<sup>[40]</sup>。热电偶是利用物理学中的赛贝克效应制成的温敏传感器。当 2 种不同的导体组成闭合回路时,就构成了一个热电偶。感温部分为热端,连接仪表部分为冷端。当冷热端温度不同时,由于热电效应便在回路中产生电势差,称为热电势。当冷端温度保持不变时,通过热电势与待测温度之间的函数关系可以测得待测温度大小。但热电偶测温仪需保持与植株的直接接触,其对测温过程的操作有严格要求,而且其与植株接触部分易造成测温部位的外环境和水热条件的改变。由于电子元件本身的产热、热传导等因素,其测温误差难以避免。

### 3.2 非接触式

非接触式测温方式依托于各类测温传感器的搭载。伴随热红外测温技术应用的普及,攻克了难以对植物群体冠层温度进行统一化、标准化测定的难题。红外测温技术由于其灵敏度高、测量速度快以及方便对作物群体温度的采集,并且能较为精确反映植株体温而在农业管理中得到普遍应用。红外能

量聚焦在光电探测仪上并转变为相应的电信号。该信号经过放大器和信号处理电路按照仪器内部的算法和目标发射率校正后转变为被测目标的温度值。近 20 年来,非接触红外测温仪在技术上得到迅速发展,性能不断完善,品种不断增多,在不同规格的各种型号测温仪中,正确选择红外测温仪型号对使用者来说是十分重要的。

**3.2.1 红外测温技术** 虽然红外测温设备是一种非破坏性、快捷、高效的植物测温方式,但其使用过程中要求使用者规范的操作流程,如视角响应、温差的适应性、测量距离等都需要根据测温设备的型号遵循相应的操作规程,否则所测温度并不能准确反映水稻的冠层温度。常用的水稻冠层温度测温设备有点式测温仪和红外热像仪。

**3.2.2 无人机搭载红外摄像头测温技术的兴起** 水稻冠层温度的测定对于农学和作物生长研究很重要。商用红外测温仪不适合这项任务,因为无法大面积测定水稻冠层温度<sup>[41]</sup>。随着近年来无人机在大田农业中的投入以及应用技术的逐渐成熟,使无人机搭载红外测温设备进行大面积田间冠层温度数据的采集成为可能。基于无人机搭载红外测温设备高通量精准测定水稻冠层温度技术的开发成为当下脱颖而出的课题。无人机与红外测温仪的结合满足了大田生产中对水稻群体冠层温度信息的快速化、高精度采集,此项技术将有效提高水稻冠层温度方面的研究效率,促进水稻冠层温度成为水稻生产上的应用型指标。

## 4 水稻栽培和育种方面的应用

### 4.1 缺水诊断

水稻是沼泽植物,生理需水和生态需水量都很大,对冠层温度和水分状况的研究在节水灌溉和缺水诊断方面具有十分重要的意义。前面已经了解到田间水分对水稻冠层温度有重要影响,当水分逐渐亏缺时,水稻冠层温度会逐渐升高<sup>[42]</sup>,在 13:00 至 15:00 气温较高,水稻蒸散代谢旺盛,此时土壤含水率能够有效影响到植株叶水势和蒸散效率,该时段气冠温差能较好地反映水稻的水分状况<sup>[11, 43]</sup>。针对水稻冠层温度对土壤水分的敏感特性,建立基于冠层温度的田间缺水诊断可以高效快捷地捕捉田间水分状况,合理地制定灌溉制度<sup>[44]</sup>。赵扬搏<sup>[45]</sup>在水稻拔节期和开花结实期通过对船行灌区水稻的

气冠温差及土壤含水率的变化过程进行水稻缺水状况分析,证实水稻在拔节期和开花结实期气冠温差与田间水分胁迫存在关系,并初步建立了基于气冠温差的水稻缺水监测体系。通过对冠层温度与土壤水分关系的进一步研究,判定土壤水分状况是否满足作物的正常生理需要,根据当地推广品种受水分胁迫程度与冠层温度表现,建立相应缺水诊断模型,可以高效快捷掌握田间水分状况,避免了田间土壤墒情考察,节约大量人力物力。

#### 4.2 高温热害评估

高温热害是水稻遭受的主要气象灾害之一,通常导致水稻育性和光合能力下降,产量和品质降低<sup>[38, 46-49]</sup>。有报道称,可以通过台站气温推算稻田冠层温度结合卫星遥感反演水稻红外温度的方式,建立高温热害评估模型并对水稻高温热害实施监测与评估<sup>[12]</sup>。而无人机携带红外测温仪对大田条件下热害评估的判断尚未见报道。基于无人机携带红外测温仪可更为快捷、精确测量稻田冠层温度,通过对高温热害程度的分级,针对水稻生育期通常出现高温热害的具体时期,探究水稻冠层温度与高温热害等级及水稻高温热害程度与高温热害等级相关性的量化关系,建立更为精确化系统化的高温热害监测、警报和评估模型在农业生产上具有很大潜力。

#### 4.3 育种方面

1986年,国外学者首次提出利用冠层小气候变化的相关性来筛选作物抗旱基因型<sup>[50]</sup>。冠层温度应用于水稻抗旱基因型的筛选,从理论和实践上都是可行的,当冠层温度和其他抗旱性筛选方法(如感官判定、生理鉴定法等)结合起来使用时,在抗旱性筛选中能提供大量有用的信息<sup>[28]</sup>。目前,利用冠层温度筛选抗旱基因在其他作物上已经得到广泛应用,但在水稻抗旱性育种方面仍未产生体系化和理论化的研究成果。

低温敏感核不育水稻具有随温度变化而转换育性的特点<sup>[51]</sup>,可以通过检测植株温度敏感部位的温度判断温敏核不育水稻的育性转变。吕川根等认为采用幼穗部位的茎秆温度或冠层20 cm高度处气温判断育性转变比用百叶箱采集的大气温度更具有代表性<sup>[52-53]</sup>。因此,根据温敏不育系育性转变的具体时期和冠层温度信号值,可以更为直观、确切地对制种田不育系实施监测和评估。

## 5 展望

中国水稻冠层温度研究工作正处于初步阶段,研究方向和技术手段有较大的突破空间,结合国内外对作物冠层温度的研究现状提出以下几点建议:

(1)应加强对水稻冠层温度理论基础的研究。目前栽培稻品种繁多,根据不同稻作区的代表性品种,明确不同基因型品种冠层温度浮动范围,以及同一品种不同生育期冠层温度浮动差异性,探究不同因素引起的冠层温度变化对水稻具体生育期内生理状况差异以及生长发育的影响。

(2)针对冠层温度差异对水稻进行解剖结构特征分析研究。水稻的解剖结构特征反应生理代谢状况,同时生理代谢状况也体现了解剖结构特征。从根、茎、叶生理构造的差异明确不同品种水稻自身调节冠层温度的具体优劣势,对产生冠层温度差异给出生理构造方面的解释。

(3)亟待开发高效测温技术。对大田生产上水稻冠层温度的统一测量一直难以攻克。在保证测温精度的基础上,开发基于无人机搭载红外测温仪高效测温技术十分重要,从测温速度上来说更能保证大田统一测温。相比于耗时耗工接触式测温仪与手持式红外测温设备,使用无人机搭载红外测温设备采集的温度信息更具高效性和精确性。

(4)应加快水稻冠层温度相关研究成果的转化与应用。根据水稻品种的冠层温度特性,结合气象因素和田间水肥状况,制定合理的栽培管理措施;量化冠层温度与关联性状的相关关系,建立相关稻田监测、警报和评估系统,并最终形成便携仪器等物化产品,在高温、干旱以及育种方面推广应用。

致谢:感谢指导老师在本文撰写期间的支持和各位同学提供的帮助以及江苏高校优势学科建设工程的资助!

#### 参考文献:

- [1] 董振国. 作物层温度与土壤水分的关系[J]. 科学通报, 1986, 31(8): 608.
- [2] TANNER C B. Plant temperatures[J]. Agronomy Journal, 1963, 55: 210-211.
- [3] REYNOLDS M P, SINGH R P, IBRAHIM A, et al. Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments[J]. Euphytica, 1998, 100(1/3): 85-94.

- [4] YOSHIMOTO M, OUE H, KOBAYASHI K. Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO<sub>2</sub> enrichment [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 133(1/4): 226-246.
- [5] BALOTA M, PAYNE W A, EVETT S R, et al. Morphological and physiological traits associated with canopy temperature depression in three closely related wheat lines [J]. *Crop Science*, 2008, 48(5): 1897-1910.
- [6] BALOTA M, PAYNE W A, EVETT S R, et al. Canopy temperature depression sampling to assess grain yield and genotypic differentiation in winter wheat [J]. *Crop Science*, 2007, 47(4): 1518-1529.
- [7] REYNOLDS M, MANES Y, IZANLOO A, et al. Phenotyping approaches for physiological breeding and gene discovery in wheat [J]. *Annals of Applied Biology*, 2009, 155(3): 309-320.
- [8] SWAN J B. *Economical radiometer performance, construction and theory* [D]. Madison: University of Wisconsin Press, 1961.
- [9] 董振国, 于沪宁. 农田作物层环境生态 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1994: 417.
- [10] 闫川, 丁艳锋, 王强盛, 等. 穗肥施量对水稻植株形态、群体生态及穗叶温度的影响 [J]. *作物学报*, 2008, 34(12): 2176-2183.
- [11] 张文忠, 韩亚东, 杜宏娟, 等. 水稻开花期冠层温度与土壤水分及产量结构的关系 [J]. *中国水稻科学*, 2007, 21(1): 99-102.
- [12] 邹君, 杨玉蓉, 谢小立. 不同水分灌溉下的水稻生态效应研究 [J]. *湖南农业大学学报 (自然科学版)*, 2004, 30(3): 212-215.
- [13] LIU T, LI R, ZHONG X, et al. Estimates of rice lodging using indices derived from UAV visible and thermal infrared images [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 252: 144-154.
- [14] 张旭东, 陈伟, 迟道才, 等. 水稻需水关键期冠气温差变化规律试验研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(4): 80-83.
- [15] GARRITY D P, O'TOOLE J C. Selection for reproductive stage drought avoidance in rice, using infrared thermometry [J]. *Agronomy Journal*, 1995, 87(4): 773-779.
- [16] SINGH C V, SINGH R K, MOYA T B, et al. Influence of soil moisture stress during reproductive stage on physiological parameters and grain yield in upland rice. [J]. *Oryza*, 1999, 36(2): 130-135.
- [17] 黄山, 王伟, 毕永基, 等. 不同早稻品种冠层温度的差异及其与产量的关系 [J]. *江西农业大学学报*, 2014, 36(6): 1179-1184.
- [18] 黄山, 王伟, 段德洪, 等. 不同晚籼稻品种冠层温度的差异及其与产量的关系 [J]. *江西农业大学学报*, 2015, 37(4): 571-576.
- [19] 高继平, 韩亚东, 王晓通, 等. 水稻齐穗期冠层温度分异及其相关特性的研究 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2011, 42(4): 399-405.
- [20] 程方民, 刘正辉, 张嵩午. 稻米品质形成的气候生态条件评价及我国地域分布规律 [J]. *生态学报*, 2002, 22(5): 636-642.
- [21] 张嵩午, 刘党校. 小麦冠温的多态性及其与品质变异的关联 [J]. *中国农业科学*, 2007, 40(8): 1630-1637.
- [22] 高继平, 隋阳辉, 张文忠, 等. 水稻灌浆期冠层温度对植株生理性状及稻米品质的影响 [J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(5): 501-510.
- [23] 王伟. 水稻生育中后期冠层温度的变化规律及其与产量形成的关系 [D]. 江西: 江西农业大学, 2011.
- [24] 郭家选, 梅旭荣, 卢志光. 冬小麦冠层温度及其影响因素探析 [J]. *中国生态农业学报*, 2003, 11(4): 29-31.
- [25] PATEL N R, MEHTA A N, SHEKH A M. Canopy temperature and water stress quantification in rainfed pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 109(3): 223-232.
- [26] 陈金华, 岳伟, 杨天明. 水稻叶温与气象条件的关系研究 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(12): 19-23.
- [27] 梁银丽, 张成娥. 冠层温度-气温差与作物水分亏缺关系的研究 [J]. *生态农业研究*, 2000, 8(1): 26-28.
- [28] 程旺大, 赵国平, 姚海根, 等. 冠层温度在水稻抗旱性基因型筛选中的应用及其测定技术 [J]. *植物学通报*, 2001, 18(1): 70-75.
- [29] 周春菊, 张嵩午, 王林权, 等. 施肥对小麦冠层温度的影响及其与生物学性状的关联 [J]. *生态学报*, 2005, 25(1): 18-22.
- [30] NOVERO R P, O'TOOLE J C, CRUZ R T, et al. Leaf water potential, crop growth response, and microclimate of dryland rice under line source sprinkler irrigation [J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 1985, 35(1): 71-82.
- [31] 吴伟明, 宋祥甫, 孙宗修, 等. 不同类型水稻的根系分布特征比较 [J]. *中国水稻科学*, 2001, 15(4): 37-41.
- [32] 凌启鸿, 凌励. 水稻不同层次根系的功能及对产量形成作用的研究 [J]. *中国农业科学*, 1984(5): 3-11.
- [33] 于明含, 高广磊, 丁国栋, 等. 植物体温研究综述 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(12): 3533-3541.
- [34] 高明超. 水稻冠层温度特性及基于冠层温度的水分胁迫指数研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- [35] 苗芳, 冯佰俐, 周春菊, 等. 冷型小麦叶片显微结构的一些特征 [J]. *作物学报*, 2003, 29(1): 155-156.
- [36] 苗芳, 张嵩午, 王长发, 等. 低温小麦种质叶片结构及某些生理特性 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(3): 3408-3412.
- [37] THOMPSON K. *Plant physiological ecology*, 2nd edn [J]. *Annals of Botany*, 2009, 103(1): 8-9.
- [38] WANG Y, WANG L, ZHOU J, et al. Research progress on heat stress of rice at flowering stage [J]. *Rice Science*, 2019, 26(1): 1-10.
- [39] 张彬, 郑建初, 黄山, 等. 抽穗期不同灌水深度下水稻群体与大气的温度差异 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(1): 87-92.
- [40] LOMAS J, SCHLESINGER E, ISRAELI A. Leaf temperature measurement techniques [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1971, 1(4): 458-465.
- [41] WANG M, DONG D, ZHENG W, et al. Using infrared sensor for large area canopy total temperature measurements of rice plants



- [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, 29(1): 115-122.
- [42] 邓强辉, 潘晓华, 石庆华. 作物冠层温度的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(6): 1162-1165.
- [43] 韩亚东, 张文忠, 杨 梅, 等. 孕穗期水稻叶温与水分状况关系的研究[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(3): 214-216.
- [44] AKKUZU, ERHAN, KAYA, et al. Determination of crop water stress index and irrigation timing on olive trees using a handheld infrared thermometer[J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering Asce*, 2013, 139(9): 728-737.
- [45] 赵扬搏, 仝道斌, 王景才, 等. 基于冠层温度的水稻关键生育期缺水诊断[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(10): 931-936.
- [46] SHAOBING P, JIANLIANG H, SHEEHY J E, et al. Rice yields decline with higher night temperature from global warming[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2004, 101(27): 9971-9975.
- [47] 赵海燕, 姚凤梅, 张 勇, 等. 长江中下游水稻开花灌浆期气象要素与结实率和粒重的相关性分析[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(9): 1765-1771.
- [48] YAO F, XU Y, LIN E, et al. Assessing the impacts of climate change on rice yields in the main rice areas of China[J]. *Climatic Change*, 2007, 80(3/4): 395-409.
- [49] 谢晓金, 李秉柏, 申双和, 等. 高温胁迫对扬稻6号剑叶生理特性的影响[J]. *中国农业气象*, 2009, 30(1): 84-87.
- [50] CHAUDHUR U N, DEATON M L, KANEMASU E T, et al. A procedure to select drought-tolerant sorghum and millet genotypes using canopy temperature and vapor pressure deficit1[J]. *Agronomy Journal*, 1986, 78(3): 490-494.
- [51] 吕川根, 邹江石, 胡 凝, 等. 低温敏感不育水稻培矮64S育性转换的植株温度指标[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(1): 19-26.
- [52] 邹江石, 吕川根, 姚克敏, 等. 两系法杂交稻安全制种的低温防御灌水理论与技术[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(9): 1780-1786.
- [53] 吕川根, 夏士健, 胡 凝, 等. 温敏核不育水稻植株温度的变化规律及与环境关系的模型[J]. *中国水稻科学*, 2008, 22(2): 175-182.

(责任编辑:陈海霞)