

基于冠层温度的玉米缺水诊断研究

张立伟¹,张智郡¹,刘海军¹,刘 钰²,朱明承¹,丁 梅¹

(1.北京师范大学水科学研究院,北京 100875;
2.宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏 银川 750021)

摘 要:冠层温度是判断植物水分状况的一项重要指标。以玉米良玉 11 为试验作物,在 2014 和 2015 年玉米抽雄期(7—8 月)进行了 4 种不同梯度的土壤水分胁迫处理,研究了作物冠层温度、冠气温度比以及冠气温度差等指标与土壤含水量的关系,分析了冠气温度比与生理指标气孔导度的关系。研究结果显示:当土壤含水量低于 $0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,植株出现了明显的萎蔫现象,这时冠层温度、冠气温度比、冠气温度差也都分别达到了其最大值 34°C 、 1.2°C 和 5°C ;随着土壤含水量增大到 $0.20\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,冠层温度等指标均达到其最小值,约为 30°C 、 1.0°C 和 1°C ,且变化比较稳定,这时植株生长良好,说明土壤供水充足,植株未受到水分胁迫。冠层温度等指标与气孔导度有显著的线性关系,气孔导度随着冠层温度等指标的增加而线性降低,表明气孔关闭会使得冠层温度显著提升。

关键词:玉米;冠层温度;水分亏缺;土壤含水量;气孔导度

中图分类号: S152.7+3 **文献标志码:** A

Research on water deficit diagnosis of maize based on canopy temperature

ZHANG Li-wei¹, ZHANG Zhi-jun¹, LIU Hai-jun¹, LIU Yu², ZHU Ming-cheng¹, DING Mei¹

(1. Institute of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. College of Civil and Water Conservancy Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Canopy temperature is an important indicator to judge the crop water condition. The variety Liang Yu11 was used as test crop, and four different soil moisture stress treatments were carried out for tasseling stage of the maize in 2014 and 2015. The relationships between canopy temperature, canopy-air temperature ratio, canopy-air temperature difference with soil moisture were researched, and relationship between canopy temperature with stomatal conductance was analyzed. The results were shown that: when the soil water content was less than $0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$, the plant was appeared obvious wilting, at this time, the canopy temperature, canopy-air temperature ratio and canopy-air temperature difference were reached the maximum as 34°C , 1.2°C and 5°C , respectively. Along with the soil water content was increased to $0.20\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$, the canopy temperature, canopy-air temperature rate and canopy-air temperature difference were reached the least values about 30°C , 1.0°C and 1°C , at this time the plant growth was good, it was explained that soil water supply was sufficient and plant was not suffered water stress. There was the distinct linear relationship between the canopy temperature and stomatal conductance, the stomatal conductance was linearly decreased with increasing canopy temperature. It was indicated that stoma close will be let the canopy temperature notable increase. This research results can be provided the technical support for diagnosis of crop drought and drawing up the irrigation schedule.

Keywords: maize; canopy temperature; water deficit; soil moisture; stomatal conductance

农作物缺水研究对于探讨水分对作物生长发育、生理变化过程、指导田间试验等都有着重要的意义。当土壤水分含量降低,供水不充足时,作物生理指标,包括冠层温度、叶水势、气孔导度等首先会表示出一定的变化特征^[1-4]。冠层温度是指作物冠层茎、叶表面温度的平均值^[5]。作物吸收的水分绝大部分通过叶面蒸腾散失以维持叶面温度均衡。如果土壤水分不足,而空气中的蒸散强度很大,就会导致叶片蒸腾降低,叶面温度升高^[6]。因此,作物叶面温度上升就成为作物缺水的一个信号^[7-9],作物冠层

收稿日期:2016-05-13 修回日期:2017-03-22
基金项目:水利部公益项目(201401036);国家自然科学基金项目(51479004,51179005)
作者简介:张立伟(1992—),男,黑龙江绥化人,硕士,研究方向为节水与水资源高效利用。E-mail: zlwai@126.com。
通信作者:刘海军(1975—),男,陕西富平人,副教授,主要从事农业水肥高效利用机理和技术的研究。E-mail: shanxiljh@bnu.edu.cn。

温度已成为判别作物水分状况的重要指标^[10]。如刘恩民等^[11]采用不同方法模拟冬小麦缺水状况,实验结果表明水分亏缺导致冠层温度升高 1.5℃ ~ 2.0℃。韩亚东等^[12]研究发现,水稻孕穗期土壤含水量降低产生水分胁迫时,叶片温度会一定程度升高,严重条件下会超过大气温度。陈佳等^[13]通过试验认为水稻冠层温度与土壤水分含量关系密切,总体上,土壤含水量越低,冠层温度越高。Dejongs 等^[14]在美国北卡罗州研究发现,当玉米冠层温度高于 28℃ 时,玉米出现了干旱的特征,且基于冠层温度的干旱指标随着土壤水分的降低而线性增加。但是研究结果显示不同作物冠层温度存在明显的差异^[14-17],而且这种差异与作物种类、经济产量及抗旱性等特性密切相关^[16-20]。因此针对于不同的作物和种植环境需要开展相应研究。

本研究选定在我国玉米主产区吉林省梨树县进行,通过在玉米需水高峰期(抽雄期)设置不同的土壤水分亏缺处理,连续测定玉米冠层温度、气孔导度、土壤含水量等指标,分析玉米冠层温度与土壤含水量的关系,以及玉米冠层温度与气孔导度的关系,提出了判断作物水分亏缺的温度指标。研究成果为判定玉米旱情和制定玉米灌溉计划提供技术支撑。

1 试验材料与方法

1.1 试验概况

研究区位于吉林省四平市梨树县(123°45' ~ 124°53' E、43°02' ~ 43°46' N),该地区属北温带半湿润大陆季风性气候,四季分明,雨热同季,作物生长期日照、降水较充足。年平均气温 5.8℃,活动积温 3 207℃,平均年日照时数为 2 698.5 h,无霜期 152 d,年降水量平均为 577.2 mm,主要集中在 6—8 月,雨热同季,一般可满足一年一熟农作物的生长需要。梨树县是我国粮食生产重点县,玉米播种面积占全县播种面积的 80% 以上,有黄金玉米带的美誉。

1.2 试验布置以及装置

试验玉米供试品种为当地广泛种植的良好玉 11,种植时间为 2014 和 2015 年 5 月 1 日。本试验采用盆栽种植模式,盆高 60 cm,直径 50 cm,桶中土壤为当地农田中土壤。试验时每盆种植一棵植株,种植时每盆施底肥 12 g·盆⁻¹(氮磷钾含量分别为 24%、13% 和 15%),玉米生长期间没有追肥。为防止土壤水分蒸发对试验影响,在种植后对每个盆栽进行覆膜处理,直至试验结束。为防止天然降雨对试验的影响,本试验设置一个 3 m 高遮雨棚,在降水量将遮雨棚移至试验区,雨停后及时移走。

在玉米需水高峰期抽雄期设置试验处理,根据水分胁迫程度共分 4 个梯度处理,即在作物观察到萎蔫现象后,在萎蔫后的第 1 天、3 天、5 天、7 天(T1,T2,T3,T4)复水。试验中由于降水和气象条件的变化,实际复水的时间稍有调整。每个处理设置三个重复植株。试验中采用滴灌系统向每个盆栽玉米植株供水,以保障每棵玉米获得的水分相同。试验中 4 个处理及玉米植株和土壤水分监测图见图 1。

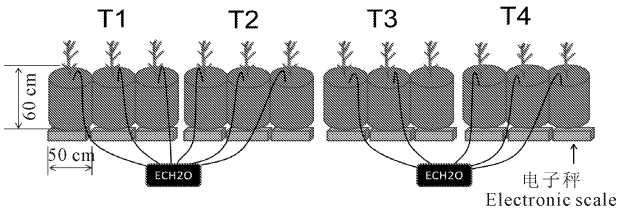


图 1 抽雄期玉米试验处理及装置示意图

Fig.1 The diagram of experimental treatments and device for tasseling stage of maize

1.3 测量指标及仪器

试验中观测指标主要包括冠层温度、土壤水分、气孔导度和气象条件。

冠层温度系指作物冠层茎、叶表面温度的平均值^[21],本试验利用手持红外线热像仪(FLUKE TI200,美国)对冠层温度进行测量,观测时间为每天的 11:00—13:00。由于通过手持红外线热像仪测得的数据为华氏温度,通过公式 $C = (F - 32)/1.8$ 换算成摄氏温度,式中 C 表示摄氏温度,℃, F 表示华氏温度。每天中午 12:00 左右利用稳态叶片气孔计(SC-1,美国)进行气孔导度测量。考虑到光照和叶片生长状况,测量玉米从上向下数第三片完全伸展叶子。本试验利用土壤含水量监测系统(ECH₂O,美国)对盆栽的土壤含水量进行连续监测,测量频率为半小时一次,以便分析不同含水量条件下植株的各项指标变化。本试验利用小型气象站(包括测量空气温(湿)度、风速、太阳辐射等指标)对试验地的气象条件进行自动监测。

2 结果与分析

2.1 冠层温度与土壤含水量的关系

图 2 和图 3 分别描述了 2014 年和 2015 年玉米抽雄期冠层温度与土壤含水量(体积)的关系。可以看出两年冠层温度与土壤含水量的关系的总体趋势相同,土壤含水量越高,冠层温度则越低,与张文忠^[22]的研究结果一致。综合两年数据可以看出土壤含水量在 0.16 ~ 0.20 cm³·cm⁻³ 之间冠层温度变

化较大,而当土壤含水量小于 $0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,冠层温度整体较高。同时可以看出在土壤含水量小于 $0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ (图 2) 和土壤含水量大于 $0.20\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ (图 3) 时,冠层温度变化较大。如图 2 显示,在土壤含水量小于 $0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,有部分冠层温度在 30°C ,明显小于该土壤水分所对应的大部分冠层温度(约为 34°C);图 3 显示当土壤含水量大于 $0.20\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时冠层温度分布也比较分散,在 $29^\circ\text{C}\sim 31^\circ\text{C}$ 之间变化。出现这种现象可能是因为冠层温度不仅与土壤含水量有关系,同时还受当时的空气温度等环境因素的影响,随着空气温度的上下浮动而发生变化^[23]。因此为了消除空气温度对冠层温度的影响,进一步分析了冠气温度比(冠层温度和空气温度比值)与土壤含水量的关系,见图 4 和图 5。

图 4 和图 5 分析了冠气温度比与土壤含水量的关系。总体上可以看出,冠气温度比表现出来的规律性比冠层温度与土壤含水量的关系要好。综合两年数据可以看出,不同土壤含水量对冠层温度比的影响不同,冠层温度比随着土壤含水量的升高而降低。当土壤含水量小于 $0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,冠气温度比较大,平均值约为 1.2。土壤含水量在 $0.16\sim 0.20\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间时,冠气温度比变化较大,总体在 1.0 与 1.2 之间变化。随着土壤含水量继续增高至大于 $0.2\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 后,冠气温度比整体较小,均值为 1.03 左右。

图 6 和图 7 进一步分析了 2014 年与 2015 年的冠气温度差与土壤含水量的关系,其关系与冠气温度比呈现出来的规律基本一致。在土壤含水量小于 $0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,冠层温度与空气温度之间差值较大,均值在 5.5°C 左右。土壤含水量在 $0.16\sim 0.20\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间时,冠气温度差波动范围较大,在 $2^\circ\text{C}\sim 5^\circ\text{C}$ 。土壤含水量继续增大,大于 $0.2\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,冠层温度与大气温度较接近,差值一般小于 1°C 。

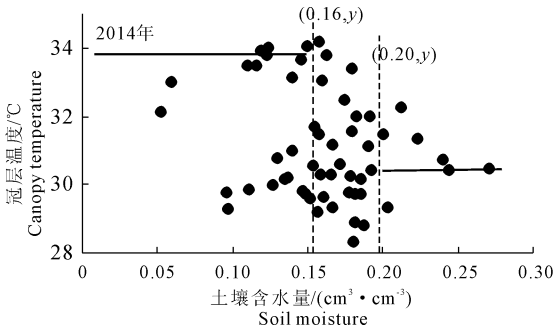


图 2 2014 年冠层温度与土壤含水量的关系
Fig.2 The relationships between canopy temperature and soil moisture in 2014

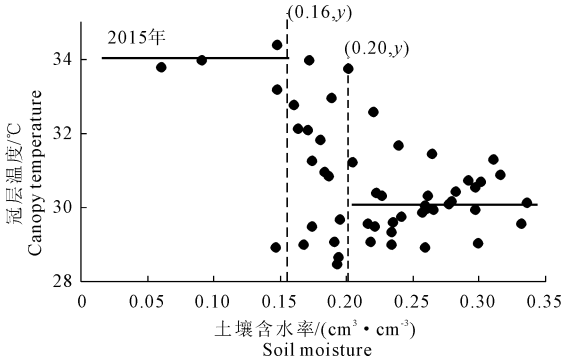


图 3 2015 年冠层温度与土壤含水量的关系
Fig.3 The relationships between canopy temperature and soil moisture in 2015

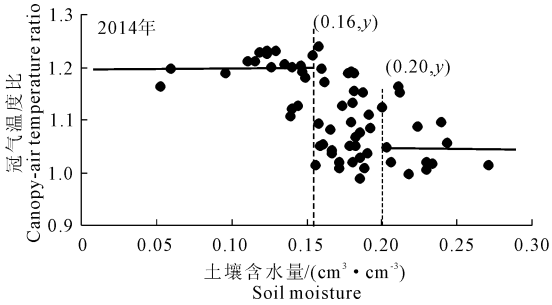


图 4 2014 年冠气温度比与土壤含水量的关系
Fig.4 The relationships between canopy-air temperature ratio and soil moisture in 2014

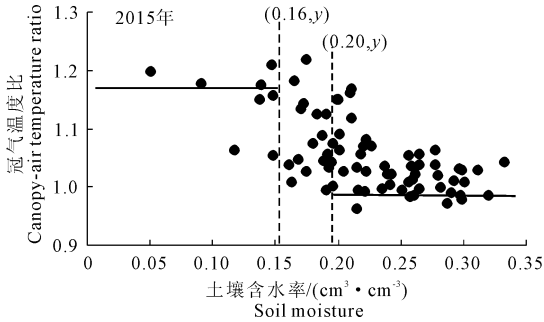


图 5 2015 年冠气温度比与土壤含水量的关系
Fig.5 The relationships between canopy-air temperature ratio and soil moisture in 2015

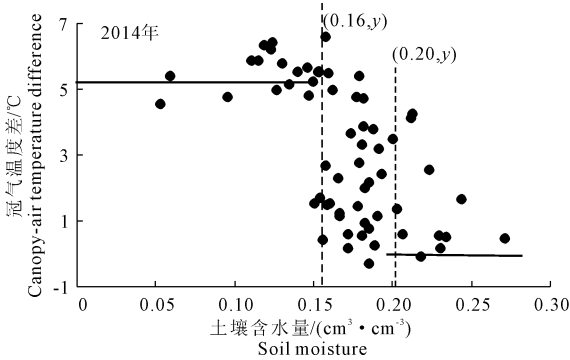


图 6 2014 年冠气温度差与土壤含水量的关系
Fig.6 The relationships between canopy-air temperature difference and soil moisture in 2014

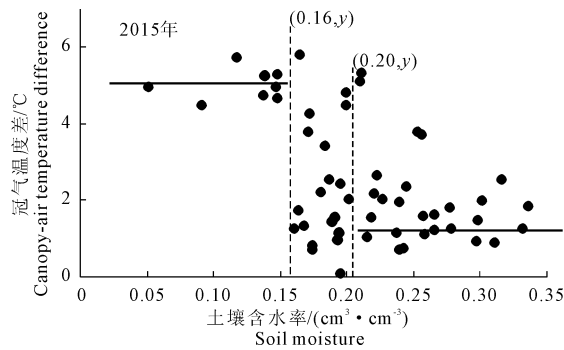


图 7 2015 年冠气温度差与土壤含水量的关系

Fig.7 The relationships between canopy-air temperature difference and soil moisture in 2015

从图 2 到图 7 可以看出,不同的土壤含水量对冠层温度的影响明显不同。当土壤含水量小于 $0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,冠层温度都明显较高且稳定在 34°C 左右,这时冠气温度比以及冠气温度差的数值也较大,冠气温度比约为 1.2,而冠气温度差在 5°C 左右。玉米的表观性状也显示这时玉米叶片出现了萎蔫现象,这说明当土壤含水量小于 $0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$,植株明显受到水分胁迫。当土壤含水量大于 $0.20\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,冠层温度、冠气温度比和冠气温度差三者的值较小,并且稳定,说明这时的土壤含水量充分,能满足植株正常的生理活动。当土壤含水量在 $0.16\sim0.20\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间时,冠层温度、冠气温度比和冠气温度差变化浮动较大,且变化范围在受水分胁迫和充分灌溉的数值之间。说明当土壤含水量在该范围内时,植株受到一定的水分胁迫,如果灌水及时,植株能够通过自身的能力恢复正常生理活动,植株生长不会受到很大的影响。而如果不能及时灌水,土壤含水量进一步降低,植株的正常生理生长活动都会受到很大的影响,并进一步影响产量。

2.2 冠气温度比与气孔导度的关系

叶片冠层温度升高主要是由于叶片气孔部分或者全部关闭,使得叶片蒸腾能力减弱,造成叶片对温度调节能力降低,气孔开闭的程度可用气孔导度表示。图 8 和图 9 分别描述了 2014 年和 2015 年试验季节冠气温度比与气孔导度的关系。可以看出,在整个试验阶段气孔导度在 $0\sim300\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间变化,而冠气温度比基本上在 $1.0\sim1.3$ 之间变化。一般当冠气温度比小于 1.1(对应于含水量 $>0.2\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$),气孔导度比较大,基本大于 $200\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$;而当冠气温度比接近于 1.2 时(对应含水量 $<0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$),气孔导度显著降低,一般小于 $50\text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,表明作物气孔接近关闭,叶片已经受到严重的水分胁迫。该结果与图 4、图 5

的结果一致,说明含水量 $<0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 会显著影响作物的生理活动。Han 等^[24]的研究发现,冠层温度指数随着气孔导度的增加而降低。

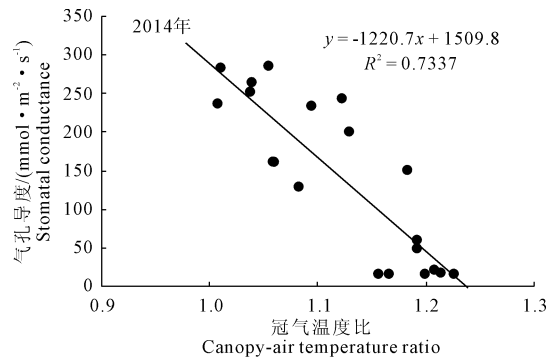


图 8 2014 年冠气温度比与气孔导度的关系

Fig.8 The relationships between canopy temperature ratio and stomatal conductance in 2014

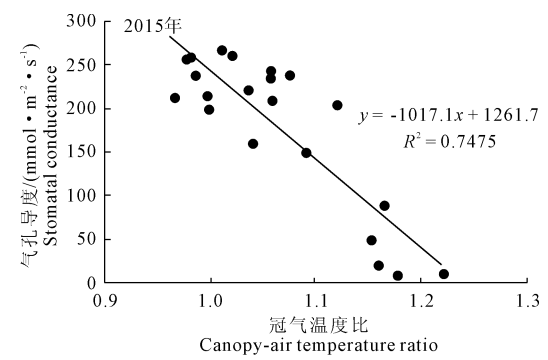


图 9 2015 年冠气温度比与气孔导度的关系

Fig.9 The relationships between canopy temperature ratio and stomatal conductance in 2015

3 结 论

冠层温度是判断作物缺水的一项非常重要指标,其变化与很多因素有关,如土壤含水量、大气温度、气孔导度等。本研究显示当土壤含水量小于 $0.16\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,试验条件下冠层温度在 34°C 左右,冠气温度比为 1.2 左右,冠气温度差约为 5°C ,这时植株受到水分胁迫明显,影响了植株的生理作用。当土壤含水量大于 $0.20\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,冠层温度在 30°C 左右、冠气温度比一般在 1.0 左右,冠气温度差一般小于 1°C ,各项指标均达到最低值,这时植株的水分供给充分,土壤水分能满足植物生理生长需求。当土壤水分在 $0.16\sim0.2\text{ cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间时,冠气温度比也在 $1.0\sim1.2$ 之间,试验条件下冠层温度在 $30^\circ\text{C}\sim34^\circ\text{C}$ 之间,冠气温度差一般在 $2^\circ\text{C}\sim5^\circ\text{C}$ 之间,这时植株受到一定的水分胁迫,但如果灌水及时,在植株的自我调节能力下不会影响植株的正常

生长,如果不及及时灌水,土壤水分持续下降,会对植株的正常生长产生影响,进而影响产量。气孔导度随着冠气温度比的增加而显著线性降低,说明冠层温度升高会显著影响作物的光合和蒸腾,进而影响作物的正常生长。考虑到冠层温度受到环境温度影响较大,建议利用冠气温度比和冠气温差指标可较好地判断作物的水分状况,为干旱监测和进行灌溉提供技术支撑。

参 考 文 献:

[1] 邱兆美,赵 龙,毛鹏军,等.不同缺水量对作物生理指标的影响研究[J].中国农机化学报,2016,37(4):260-263.

[2] 袁国富,唐登银,罗 毅,等.基于冠层温度的作物缺水研究进展[J].地球科学进展,2001,16(1):49-54.

[3] Taghvaeian S, Comas L, DeJonge K C, et al. Conventional and simplified canopy temperature indices predict water stress in sunflower[J]. Agricultural Water Management, 2014,144:69-80.

[4] Webber H, Martre P, Asseng S, et al. Canopy temperature for simulation of heat stress in irrigated wheat in a semi-arid environment: A multi-model comparison[J]. Field Crops Research, 2017,202:21-35.

[5] 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.

[6] Pratima P, Sharma N, Sharma D P. Canopy temperature and water relations of kiwifruit cultivar Allison in response to deficit irrigation and in situ moisture conservation[J]. Current Science, 2016,111(2):375-379.

[7] 王国宇,宋尚有,樊廷录,等.不同基因型玉米冠层温度与产量和水分利用效率的关系[J].玉米科学,2009,17(1):92-95.

[8] 李 丽,申双和,李永秀,等.不同水分处理下冬小麦冠层温度、叶片水势和水分利用效率的变化及相关关系[J].干旱地区农业研究,2012,30(2):68-72.

[9] 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.

[10] 项 艳,龚道枝,白清俊,等.冬小麦拔节期冠层温度与产量的

关系研究[J].灌溉排水学报,2009,(1):45-47.

[11] 刘恩民,于 强,谢贤群.水分亏缺对冬小麦冠层温度影响的研究[J].中国生态农业学报,2000,8(1):21-23.

[12] 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.

[13] 陈 佳,张文忠,赵晓彤,等.水稻灌浆期冠-气温差与土壤水分和气象因子的关系[J].江苏农业科学,2009,(2):284-285.

[14] Dejonge K C, Taghvaeian S, Trout T J, et al. Comparison of canopy temperature-based water stress indices for maize[J]. Agricultural Water Management, 2015,156:51-62.

[15] 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(10).

[16] Fischer R A, Rees D, Sayre K D, et al. Wheat yield progress associated with higher stomatal conductance and photosynthetic rate, and cooler canopies[J]. Crop Science, 1998,38(6):1467-1475.

[17] 诸葛爱燕,曲正伟,周春菊,等.冬小麦冠层温度及其生物学性状对施氮量的反映[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):148-154.

[18] 刘建军,肖永贵,祝芳彬,等.不同基因型冬小麦冠层温度与产量性状的关系[J].麦类作物学报,2009,29(2):283-288.

[19] 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,(6):1179-1184.

[20] 任学敏,朱 雅,王小立,等.花生产量性状与冠层温度的关系[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(12):39-45.

[21] 董振国.农田作物层温度初步研究—以冬小麦、夏玉米为例[J].生态学报,1984,(2):141-148.

[22] 张文忠,韩亚东,杜宏绢,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.

[23] Webber H, Ewert F, Kimball B A, et al. Simulating canopy temperature for modelling heat stress in cereals[J]. Environmental Modelling & Software, 2016,77:143-155.

[24] Han M, Zhang H, DeJonge K C, et al. Estimating maize water stress by standard deviation of canopy temperature in thermal imagery[J]. Agricultural Water Management, 2016,177:400-40.