

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

李 丽,申双和,李永秀,韩小梅,汪秀敏,李 倩,邹学智

(南京信息工程大学应用气象学院,江苏南京 210044)

摘 要:小区栽培冬小麦,设计5种程度的干旱胁迫,利用防雨棚分别控制土壤重量含水量为田间持水量的45%、55%、65%、70%、80%,观测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。结果显示,随着含水量的增加,各处理的平均和最高冠层温度整体呈下降趋势,叶水势和蒸腾速率呈上升趋势,在小麦抽穗期干旱胁迫最严重处理表现出最大水分利用效率,开花期的水分利用效率较抽穗期整体下降了50.70%;相关分析表明,抽穗期小麦的冠层温度与空气饱和差极显著正相关($P < 0.01$),开花期的冠层温度和叶水势呈显著负相关($P < 0.05$),冠层温度和空气饱和差存在着极显著正相关,空气饱和差和蒸腾速率极显著负相关,冠层温度和水分利用效率有着显著的正相关性。综上所述,冠层温度在小麦抽穗和开花期完全可以作为作物水分状况的有效监测指标之一。

关键词:冬小麦;冠层温度;叶水势;水分利用效率;相关分析

中图分类号: S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)02-0068-05

以冠层温度作为作物生理生态学和农业气象领域的研究对象已有几十年的历史,使用其来监测作物水分状况并应用于生产实践。结合遥感数据进行冠层温度测定与农田水分运动关系研究,是未来研究水分分布及区域性作物节水灌溉的重要方面^[1]。同时,冠层温度的获取较为方便:大范围的冠层温度可以通过航空或卫星遥感信息获取,为区域旱情的监测和水资源的调配和管理提供依据^[2];而小范围可以通过红外测温仪测定,是一种较简便、快速、客观的方法^[3]。

通过冠层温度来建立作物缺水指标的研究从20世纪70年代早期就已开始^[4-6]。Jackson^[7]曾经综述过这方面研究的早期进展,国内这方面的研究起步于80年代并已取得一些结果^[8-10],但尚缺乏各项指标参数的综合研究。此外利用作物本身的生理变化来反映作物的水分状况是作物缺水研究中一个主要的分支,这些生理变化指标主要有叶水势、冠层温度等^[2]。然而此前的研究主要集中在田间土壤湿度与冠气温差的关系上^[1,11-13],对于冠层温度与作物本身水分利用状况的关系则研究较少。

本研究主要以冬小麦为研究对象,为揭示冬小麦叶水势及蒸腾速率对冠层温度作用的实质,探索冠层温度与叶水势、蒸腾速率及水分利用效率的相

关关系。通过控制生育期间水分形成不同程度的干旱胁迫,观测冬小麦叶水势、蒸腾速率以及水分利用效率与冠层温度,建立冠层温度与这一系列指标之间的关系模型,分析以不同土壤水分条件为主导的作物自身生理变化对冠层温度的综合影响,为通过冠层温度监测土壤水分以及作物水分状况提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

农田试验地点设在南京信息工程大学农业气象试验站,当地多年年平均降水1100 mm,多年平均温度为15.6℃。土壤为潴育型水稻土,灰马肝土属,耕层土壤质地为壤质黏土,黏粒含量为26.1%,土壤pH(H₂O)值为6.1±0.2,有机碳、全氮的含量分别为19.4、11.5 g/kg。试验站内设有气象站,进行气温、湿度、降水、日照、水面蒸发、风速、气压和地温的气象观测。本试验每个小区长2.5 m,宽2.5 m,深1.2 m,各小区之间用钢筋水泥浇灌隔离,防止侧渗。

1.2 试验设计与数据获取

试验以当地大面积推广的宁麦16为供试材料,于2010年11月12日播种,11月24日出苗。每个

收稿日期:2011-07-15

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2010CB950702)

作者简介:李 丽(1987—),女,江苏盐城人,硕士研究生,研究方向为应用气象学。E-mail:totorolily@163.com。

通讯作者:申双和(1957—),男,教授,主要从事农业气象,生态环境气象研究。

试验小区内装有两个土壤水分传感器(AV - EC5, AVALON Scientific, USA),由数据采集器(CR1000, Campbell Scientific, USA)自动采集并记录每小时的土壤水分含量均值,据此计算需要的灌水量,用带小孔的PVC管道进行灌溉。于冬小麦孕穗期(次年4月15日)开始进行水分处理,直至小麦收获。每天对各小区进行灌水处理,直至所有小区小麦收获。试验共分5个水平处理,即分别灌水至土壤重量含水量占最大田间持水量的45%(T1)、55%(T2)、65%(T3)、70%(T4)、80%(T5)左右,每个处理设置3个重复。五种处理小区安有遮雨棚,排除降雨影响。此试验小区的最大田间持水量为0.27,试验中的土壤重量含水量采用烘干法测得。

冠层温度(CT)的测定采用手持式红外测温仪(ST80, RAYTEK, USA)。选择晴朗无云的天气,于冬小麦抽穗期(4月18日)、开花后期(5月5日)、乳熟期(5月18日)测定各小区的CT值,测定时间为8:00~17:00,1小时一次。观测时,按照农田小气候观测的对称法进行,测定时视场角取5°,手持测温仪置于1.5 m高度左右,其测点为群体生长一致、有代表性的部位,避开裸地影响。为减少误差,每个小区选取五个不同的测点,取其平均值作为该次测定的CT值。

在测定冠层温度时同步用Li - 6400便携式光合仪(LI - COR, USA)测定冬小麦旗叶的蒸腾速率[Tr, mmol/(m²·s)]、净光合速率[Pn, μmol/(m²·s)]和气孔导度[Gs, mmol/(m²·s)]等指标,每小区选取3个测点。同时利用WP4 - T露点水势仪(LI - COR,

USA)在同一天的11:00测定叶片水势。

测定数据分别采用Microsoft Excel整理作图和SPSS V17.0软件进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同水分胁迫之间小麦冠层温度的差异

在冬小麦生育期间,分别选取水分处理初期(4月18日)和后期(5月18日),进行冠层温度的日变化测定。以各水分处理下的冠层温度平均值来作比较,不同生育期各处理的冠层温度呈明显上升趋势,乳熟期(5月18日)的最高冠层温度达到了41.22℃。同时不同冠层温度的峰值在各生育阶段也不一样,随着小麦的逐渐成熟,冠层温度峰值的出现延迟现象。

以乳熟期的冠层温度对冠层温度日变化规律进行分析,冠层温度日平均值表现为T1 > T3 > T2 > T5 > T4(表1),表明随着灌溉量的增加,各处理的平均冠层温度整体呈下降趋势,说明冠层温度可反映田间土壤供水状况,但在整体下降趋势下T3、T5出现了暂时的上升。由于冠层温度的变化受到多个因素(对流、辐射、蒸腾等)的共同作用,所以呈现出单调的线性关系。这可能是因为当灌水量达到一定程度后,冠层的含水率反而下降,从而随着灌水量的增加冠层温度随之增加,而不是一直下降。从表中可以看出,各处理冠层温度日变化幅度最大为T5、T4,其变异系数均为0.097,其次T3、T2分别为0.091、0.087,T1的变异系数最小为0.083。各水分处理的冠层温度变化趋势基本一致,均呈单峰曲线(图1)。

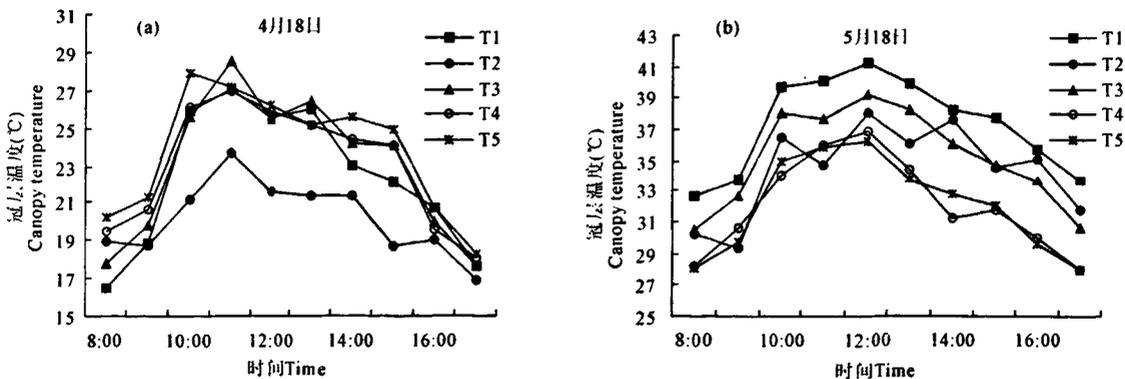


图1 不同水分处理下冬小麦的冠层温度变化

Fig.1 Canopy temperature of winter wheat under different water treatments

各小区冠层温度峰值基本都于12:00左右出现,T5为36.2℃,T4为36.86℃,T3和T2分别为39.20℃、38.08℃,T1为41.22℃,各处理的最高温随着水分胁迫的增强基本呈上升趋势。冠层温度的

日变化上,下午大体呈现出对称性变化。冠层温度从早上9:00开始迅速增加,其峰值在11:00~13:00之间出现,随后开始逐渐下降。

表 1 乳熟期不同水分处理冠层温度对比表

Table 1 Comparison of canopy temperature at milky stage under different water treatments

处理 Treatment	T1	T2	T3	T4	T5
平均冠温(°C) Average CT	37.31	34.40	35.13	32.10	32.11
最高冠温(°C) Highest CT	41.22	38.08	39.20	36.86	36.20

2.2 不同水分处理下小麦生理指标的变化

2.2.1 不同水分处理下叶水势的变化 分别取 4 月 18 日和 5 月 5 日上午 11:00 的叶片水势(图 2), 图中可以看出,随着土壤水分含量的增加,叶片水势总体呈逐渐上升趋势。以开花后期(5 月 5 日)的叶水势为例,T1、T2、T3、T4 处理较 T5 处理叶水势分别下降了 111.96%、128.88%、76.72%、26.59%。随着水分处理的持续时间增长,各处理间的叶水势差异加剧。4 月 18 日 T1 处理的水势偏高,可能出现叶片有表面水或人为误差。

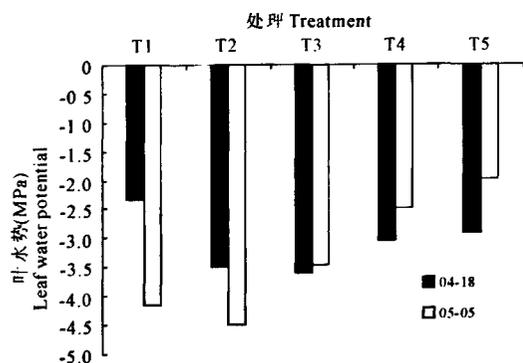


图 2 不同水分处理下叶水势的变化

Fig.2 Leaf water potential of winter wheat under different water treatments

2.2.2 不同水分处理下蒸腾速率的变化 随着水分胁迫的增强,蒸腾速率呈现逐渐下降的趋势(图 3)。图中取 4 月 18 日和 5 月 5 日上午 11:00 测得的蒸腾速率。可见开花后期,T1、T2、T3 处理较 T5 处理蒸腾速率分别下降了 84.21%、83.60%、65.09%,T4 处理较 T5 处理则增加了 7.09%。随着水分处理的持续时间增长,各处理间的蒸腾速率差异加剧,特别是水分相对充足的处理,蒸腾速率急剧上升。

2.2.3 不同水分处理下水分利用效率的变化 图 4 为 4 月 18 日和 5 月 5 日上午 11:00 的叶片水分利用效率,由公式 $WUE_L = P_n/T_r$ 得^[14], WUE_L 为叶片水平 WUE , P_n 和 T_r 分别为叶片光合速率和蒸腾速率。由图可知,在小麦抽穗期受水分胁迫最严重的叶片的水分利用效率最高,其余处理间差异不大。

开花后期的水分利用效率较抽穗期整体下降了 50.70%,不同处理间的水分利用效率为 $T3 > T1 > T5 > T2 > T4$,此时的水分利用效率随着土壤水分的不同并没有表现出规律性变化。

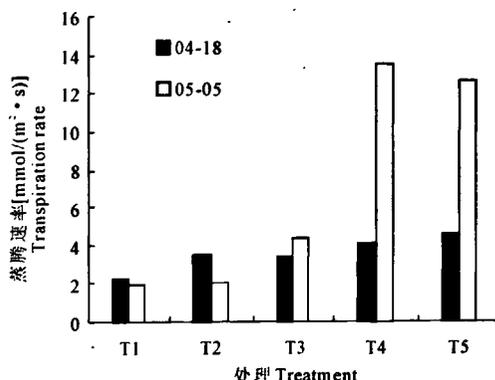


图 3 不同水分处理下蒸腾速率的变化

Fig.3 Transpiration rate of winter wheat under different water treatments

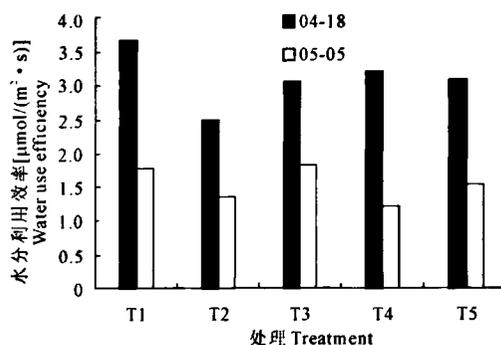


图 4 不同水分处理下水分利用效率的变化

Fig.4 Water use efficiency of winter wheat under different water treatments

2.3 冠层温度与叶水势、蒸腾速率及水分利用效率的相关分析

2.3.1 冠层温度与叶水势的相关分析 应用小麦开花期的观测结果(5 月 5 号),分析了同一生育期作物冠层温度对叶片水势变化的响应。图 5 给出了冠层温度和叶片水势的散点关系,回归分析得表达式如下:

$$WP = -0.017T^2 + 0.812T - 12.823 \quad (1)$$

$$R = 0.630, SE = 0.6932$$

式中, T 代表冠层温度(°C); WP 代表叶片水势(MPa)。可见,随着叶水势的减小,冠层温度有所增加,因为土壤水分减少导致叶水势降低,从而叶片的反射率变小,导致叶片反射的热量减少,冠层温度变大。相关分析表明,冠层温度和叶水势呈显著负相关($P < 0.05$)。而对抽穗期(4 月 18 日)和乳熟期(5 月 18 日)做相关分析发现冠层温度和叶水势不存在显

著相关。

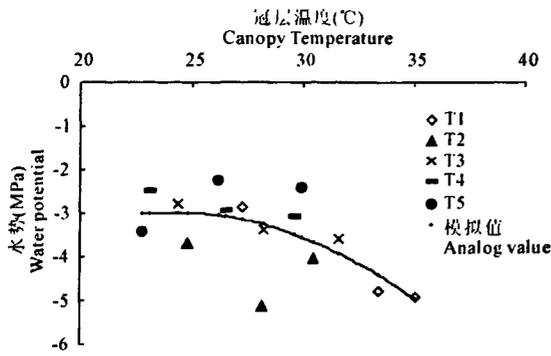


图5 不同水分处理下冠层温度与叶水势的关系
Fig.5 Relationship between canopy temperature and leaf water potential under different water treatments

2.3.2 空气饱和差与冠层温度、蒸腾速率的相关分析 饱和差反映了空气的干燥力,它不仅反映了冠层温度,而且也反映了空气湿度对蒸发的影响。应用小麦开花期的观测结果(5月5号)分析,图6(a)给出了空气饱和差和冠层温度的关系,回归方程如下:

$$T = 0.041D^2 - 1.429D + 38.956 \quad (2)$$

$$R = 0.54, SE = 2.89$$

式中, D 代表空气饱和差(hPa)。从图中可以看出,随着冠层温度的增加,空气饱和差也随之上升。这是因为冠层温度直接影响小麦的蒸散,从而影响空气中水分的含量,导致空气饱和差的变化。当冠层温度增加,作物的蒸散作用增强,导致周围空气中的

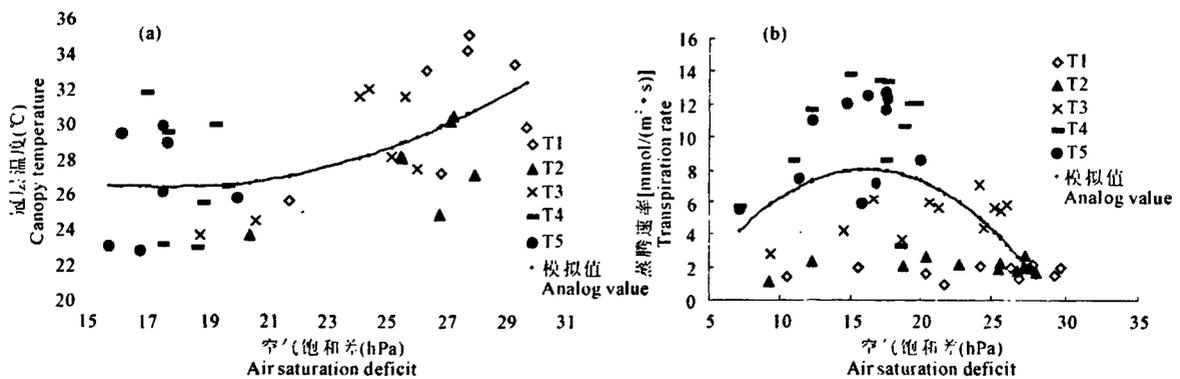


图6 空气饱和差与冠层温度、蒸腾速率两者的关系
Fig.6 Relationship between air saturation deficit and canopy temperature and transpiration rate

2.3.3 冠层温度与水分利用效率的相关分析 应用小麦开花期的观测结果(5月5号),分析了同一生育期作物冠层温度和水分利用效率的关系。图7给出了冠层温度和水分利用效率的散点关系,回归分析得表达式如下:

$$WUE = -0.012T^2 + 0.749T - 10.161 \quad (4)$$

水分含量增加,最终使得空气饱和差增加。并且, T4、T5 处理不管冠层温度如何变化,两者的空气饱和差都保持在一个相对较低的水平;而 T1、T2、T3 处理的空气饱和差则相对较高,基本均处于 25 hPa 以上。这表明灌水量高的空气饱和差比灌水量低的相关分析表明两者存在着极显著正相关($P < 0.01$)。

图 6(b)给出了空气饱和差和蒸腾速率的关系,两者关系如下:

$$T_v = -0.047D^2 + 1.523D - 4.236 \quad (3)$$

$$R = 0.58, SE = 3.40$$

式中, T_v 代表蒸腾速率[mmol/(m²·s)]。图中可以看出,水分胁迫相对严重的小麦的空气饱和差对应的蒸腾速率的点都处于拟合线的下方,而水分相对充足的都位于其上方。当空气饱和度较低时,小麦的蒸腾速率随着饱和度的上升而加快,当上升到一定高度时,呈下降趋势。同时, T1、T2、T3、T4、T5 处理的空气饱和差和蒸腾速率的关系基本都呈线性上升趋势,胁迫较严重的 T1、T2 处理的蒸腾速率基本保持在 0~2 mmol/(m²·s),两者空气饱和差和蒸腾速率的线性拟合线的斜率最低,而 T4、T5 处理的上升幅度最大, T3 处理的斜率则处于中等水平。相关分析表明空气饱和蒸腾速率呈极显著负相关。

同时将抽穗期的空气饱和差分别与冠层温度、蒸腾速率进行了相关分析发现,前两者之间也存在着极显著正相关关系。

$$R = 0.606, SE = 0.306$$

式中, T 代表冠层温度(°C), WUE 代表水分利用效率[μmol/(m²·s)]。从拟合曲线可以看出,随着冠层温度的增加,水分利用效率呈上升趋势,当冠层温度上升到一定高度时,水分利用效率便不再上升,之后随着冠层温度的升高水分利用效率反而下降。相关

分析表明,小麦开花期的冠层温度和水分利用效率有着显著的正相关性($P < 0.05$)。而对抽穗期的观测资料(4月18号)分析发现两者不存在显著相关。

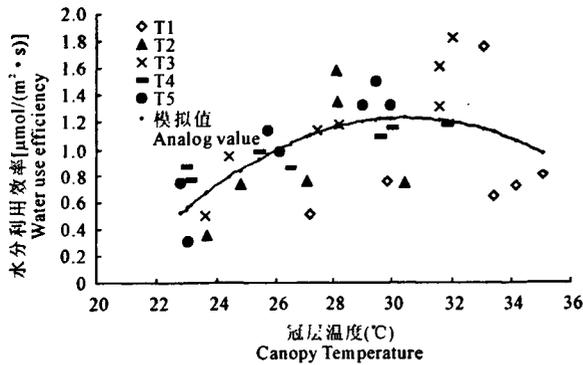


图7 不同水分处理下冠层温度与水分利用效率的关系

Fig.7 Relationship between canopy temperature and water use efficiency under different water treatments

3 讨论

研究通过5个层次的水分处理监测了冬小麦的几项指标,试图找出叶水势、蒸腾速率及水分利用效率与冠层温度之间的响应关系,得出如下结论:

1) 当灌水量控制在一定的范围内,各处理间的差异整体表现为随着胁迫的增强,冠层温度升高,这与刘学著^[15]的研究结果一致,同时随着灌溉量的增加,冠层温度反而有上升趋势,这与高鹭等^[12]的研究结果存在共同之处。这可能是因为土壤水分亏缺时,叶片因蒸腾失水,膨压下降,气孔阻力增大,蒸腾耗能减少,从而导致冠层温度的相对较高;另一方面,由于干旱胁迫导致小麦的叶面积指数减小和绿叶数量减少,也可以导致冠层温度增大。同时随着作物的生长,冠层温度峰值的出现时间发生了延迟现象,表明冠层温度的变化除了受土壤水分的影响外,还与作物生长发育阶段密切相关。

2) 冠层温度与叶水势的相关分析可以得出,冠层温度和叶水势在小麦不同生育期表现出的关系并不一致,在开花期两者存在着显著的相关性。冬小麦灌浆期各处理的蒸腾速率趋于一致,但在开花后期水分相对充足的小麦蒸腾速率明显高于其它处理,这可能是由于胁迫持续时间的增长并且处于不同生育期,导致各处理间蒸腾速率的差距拉大。空气饱和差在小麦的冠层温度和蒸腾速率之间起着一个纽带的作用,冠层温度影响着空气饱和差从而引起蒸腾速率的变化。

3) 植物水分利用效率是一个较为稳定的衡量碳固定与水分消耗关系的指标^[16-17]。高水分利用

效率是植物适应干旱环境的一种重要特征^[18]。T1处理下,作物水分利用效率相对最高,但由于此时叶片的气孔导度值低,使得光合作用强度低,干物质积累不足,最终导致作物生长发育不良。到开花后期,小麦的整体水分利用效率较抽穗期下降,说明在小麦抽穗期是水分供给关键期,随着小麦的生长,各生育期的水分需求存在极大的差异。

通过各相关分析得出冠层温度在小麦抽穗和开花期完全可以作为监测作物水分状况的一项指标。本研究主要是建立在冠层温度这一指标上,外界环境条件对其测定的准确性有着很大的干扰性,在如何排除气象因素对测定结果的影响还有待改善。

参考文献:

- [1] 陈四龙,张喜英,陈素英,等.不同供水条件下冬小麦冠气温差、叶片水势和水分亏缺指数的变化及其相互关系[J].作物学报,2005,25(5):38-43.
- [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,2000,16(1):49-54.
- [3] 程旺大,姚海根,赵国平,等.冠层温度在作物水分状况探测中的应用[J].中国农学通报,2000,16(5):42-44.
- [4] Aston A R, Van Bavel C H M. Soil surface water depletion and leaf temperature[J]. Agronomy Journal, 1972, 64: 21-27.
- [5] Abraham N, Hema P S, Saritha E K. Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature[J]. Agricultural Water Management, 2000, 45: 145-157.
- [6] Alerfasi A, Nielsen D C. Use of crop water stress index for monitoring water status and scheduling irrigation in wheat[J]. Agricultural Water Management, 2001, 47: 69-75.
- [7] Jackson R D. Canopy temperature and crop water stress[C]//Hillel D. Advances in Irrigation, Vol. 1. New York: Academic Press, 1982: 43-85.
- [8] 王宏.作物水分亏缺诊断的研究综述[C]//作物与水分关系研究.北京:中国科学技术出版社,1992:229-252.
- [9] 康绍忠,熊运章.作物缺水状况的判别方法与灌水指标的研究[J].水利学报,1991,(1):34-39.
- [10] 董振国.作物冠层温度与土壤水分的关系[J].科学通报,1986,31(8):608-610.
- [11] 刘学著.冬小麦冠气温差及其与叶水势的相关性实验研究[J].作物学报,1995,21(5):528-532.
- [12] 高鹭,陈素英,胡春胜,等.喷灌条件下冬小麦冠层温度的试验研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):1-5.
- [13] 蔡焕杰,熊运章,刘海军,等.用冠层温度-气温差方法诊断作物缺水状况的研究[J].干旱地区农业研究,1993,11(3):49-54.
- [14] 房全孝,陈雨海,李全起,等.灌溉对冬小麦水分利用效率的影响研究[J].农业工程学报,2004,20(4):34-39.
- [15] 刘学著,张连根.不同水分胁迫条件下冬小麦冠层温度日变化差异性研究[J].北京农业大学学报,1994,20(2):229-232.

(下转第106页)

Evaluation the influence of water deficit and irrigation on yield of winter wheat

CHENG Lin^{1,2}, LIU Rong-hua^{1,2}, MA Zhi-hong²

(1. Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, CMA, Zhengzhou, He'nan 450003, China;

2. He'nan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou, He'nan 450003, China)

Abstract: Comparing the affect of water deficit and irrigation on yield in different growing stage of winter wheat has significant sense for water saving irrigation and drought influence assessment. Based on two years' field water controlling experiments of winter wheat during 2008 and 2010, Profit & Loss Index (PLI), as well as Water Influence Rate (WIR) was introduced for analyzing the affect of water deficit and irrigation on final yield and yield's structure in different growing stage. The results explained that: the most obvious period which drought and irrigation effected on yield structure and final yield didn't appear at the same time. The wheatear number increased most at 0.14%/mm when irrigation between tillering and overwintering stage, however, decreased 0.32%/mm if lack of water during shooting ~ heading stage. Treatment of drought and irrigation in turning green ~ shooting stage and heading ~ grain filling stage conduced grain number per spike and mass of 1000 kernel varied greatly respectively. As for final yield, WIR was -0.33%/mm if water deficit during shooting ~ heading stage, while reached at 0.35%/mm if watering at turning green ~ shooting stage.

Keywords: winter wheat; yield; water; Profit & Loss Index; influence rate

(上接第 72 页)

[16] 孙学凯,范志平,王红,等.科尔沁沙地复叶槭等 3 个阔叶树种的光合特性及其水分利用效率[J].干旱区资源与环境, 2008,22(10):188-194.

[17] 郑淑霞,上官周平.8 种阔叶树种叶片气体交换特征和叶绿素

荧光特性比较[J].生态学报,2006,26(4):1080-1087.

[18] Cheruth A J, Ragupathi G, Beemaroo S, et al. Differential responses in water use efficiency in two varieties of *Catharanthus roseus* under drought stress[J]. C R Biologies, 2008,31:42-47.

Variation and interrelationship of winter wheat canopy temperature, leaf water potential and water use efficiency under different water treatments

LI Li, SHEN Shuang-he, LI Yong-xiu, HAN Xiao-mei, WANG Xiu-min, LI Qian, ZOU Xue-zhi

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

Abstract: To reveal the variation and interrelationship of winter wheat canopy temperature, leaf water potential and transpiration rate and water use efficiency, we designed five different degrees of drought stress through plot culture in rainproof installations, in which the water content was 45%, 55%, 65%, 70% and 80% of field capacity respectively. The results showed that with the increase in the amount of irrigation for each treatment, the average and maximum canopy temperature showed a downward trend as leaf water potential and transpiration rate showed a rising trend overall, when the wheat suffered the most severe drought stress in the heading stage, it showed the greatest water use efficiency, and it decreased by 50.70% overall at flowering stage compared with that at heading stage; Correlation analysis showed that canopy temperature and air saturation deficit was in very significant positive correlation at heading stage ($P < 0.01$), and at flowering stage, canopy temperature and leaf water potential was in significant negative correlation ($P < 0.05$), canopy temperature and air saturation deficit was in very significant positive correlation, air saturation deficit and transpiration rate was in significant negative correlation, canopy temperature and water use efficiency was in significant positive correlation. To sum up, at heading and flowering stages of wheat, canopy temperature can be used as one of the effective indexes to monitor water status of crops.

Keywords: winter wheat; canopy temperature; leaf water potential; water use efficiency; correlation analysis