

缺水和灌水对冬小麦产量影响评估

成林^{1,2}, 刘荣花^{1,2}, 马志红²

(1. 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 河南 郑州 450003; 2. 河南省气象科学研究所, 河南 郑州 450003)

摘要: 比较不同时期缺水和灌水对冬小麦产量的影响, 对于开展节水灌溉和干旱影响评估有重要意义。根据2008—2010两个年度冬小麦田间水分控制试验, 利用盈亏指标和水分影响率分析了不同时期缺水和灌水对冬小麦最终产量及产量构成要素的影响, 结果表明: 缺水和灌水对作物产量构成及最终产量影响最明显的时期并不完全一致; 分蘖~越冬期灌水对成穗数的贡献率最大, 为0.14%/mm, 而拔节~抽穗期缺水导致的成穗数亏损率最高, 达0.32%/mm, 返青~拔节期、抽穗~灌浆期缺水和灌水分别对穗粒数和千粒重影响较大。拔节~抽穗期缺水对产量的影响率达-0.33%/mm, 而灌水对产量影响率最高的时期为返青~拔节期, 为0.35%/mm。

关键词: 冬小麦; 产量; 水分; 盈亏指标; 影响率

中图分类号: S512.1; S161.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2012)02-0101-06

水是影响冬小麦生长和产量最重要的生态条件^[1]。水分不仅是构成植株体的主要成份, 还是进行一切生理代谢过程不可缺少的重要原料, 因此冬小麦生长发育的优良状况及产量的高低等都与水分因子有密切的关系^[2]。在我国华北平原等重要的冬小麦种植区域, 自然降水对冬小麦的需水满足率不足80%, 灌溉是保证冬小麦水分供给、提高产量的有效途径^[3-4]。另一方面, 水资源供需矛盾的不断激化导致干旱灾害频繁发生^[5], 冬小麦生产遭受巨大的经济损失, 开展干旱灾害影响评估有利于政府和生产部门及时掌握干旱灾害信息, 科学制定防灾减灾措施^[6-7]。

本文利用田间水分控制试验资料, 平行分析同一时期干旱和水分补给对冬小麦产量的影响, 从水资源充分利用和农民经济效益等角度考虑, 开展冬小麦干旱影响评估。

1 材料与方法

1.1 试验设计

冬小麦水分控制试验于2008—2009、2009—2010连续两个年度在郑州市农业气象试验站水分试验场进行。该试验场紧邻郑州国家基准气候站, 土壤质地为砂壤土, 田间持水量为19.7%。供试小麦品种为郑麦366, 播种日期均为10月20日。

试验基地从西向东设有19个水分试验处理, 每处理3个重复, 每重复面积为11 m²。各处理均埋有2 m深的铅管, 便于中子仪测定土壤水分; 四周设有150 cm深的隔离层, 以防止各处理之间土壤水分水

平交换; 试验场装有自动滴灌系统, 可根据试验要求定量均匀灌溉; 试验场上方有一个大型活动式防雨棚, 便于人为控制各试验处理的土壤水分。

从西到东的1、2处理为全生育期水分充足处理, 即冬小麦各发育期0~100 cm土壤相对湿度保持在70%~85%, 3、4小区为雨养处理。其他小区分出苗~分蘖、分蘖~越冬、越冬~返青、返青~拔节、拔节~抽穗、抽穗~灌浆、灌浆~成熟7个不同时期的缺水处理与灌水处理。缺水处理控制0~100 cm土壤相对湿度<60%, 从进入对应发育期至少前5 d进行挡雨准备, 其他阶段水分相对充足, 土壤相对湿度保持在70%~85%; 灌水处理保证对应处理发育期在该时段内墒情适宜, 土壤相对湿度达到70%~85%, 其他时段为雨养状态。分析时, 1、2处理作为不同发育期缺水处理的对照, 3、4处理为灌水处理的对照。灌水处理的灌溉量用下式计算^[8]:

$$I = 0.1 \times (\alpha \times \theta_i - \theta) \times \rho \times h \times 100 \quad (1)$$

式中, I 指控制土层达到目标湿度所需灌水量(mm); α 是目标系数, 指占田间持水量的百分比, 取值在0.75~1.0之间; θ_i 指重量田间持水量(%) (0~100 cm均值19.7%); θ 指监测或推算得到的土壤相对湿度(%); ρ 指土壤容重(g/m³) (0~100 cm均值1.49); h 指灌溉目标控制的土层厚度(m), 取 $h = 1.0$ m; 0.1为单位换算系数。

1.2 观测项目

1) 冬小麦发育期、密度及生长量的测定严格按

收稿日期: 2011-09-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(40875071); 中国气象局农业气象保障与应用技术重点开放实验室项目(AMF200907)

作者简介: 成林(1982—), 女, 新疆伊犁人, 工程师, 硕士, 主要从事农业气象研究工作。E-mail: rainwood2@163.com。

照《农业气象观测规范》执行^[9]。

2) 土壤湿度测定:利用美国产 503DR 型中子仪从播种当天开始,每旬末测定土壤容积含水率。测定深度为 160 cm,分为 10、20、40、60、80、100、120、140、160 cm 九个层次。由于中子仪测定近地表层土壤湿度误差较大,利用历年的标准计数及测定的 10、20 cm 以及 40 cm 以下数值与常规业务观测的对应层次土壤水分值分别建立不同的拟合方程作为转换公式,试验测定时利用标准计数和不同层次的转换公式,重点分析 0~100 cm 土壤湿度。

3) 产量及产量结构分析:收获前先调查穗密度,收获时每个重复取样 10 株,收获后测定试验小区实产,进行产量及产量结构分析,测定项目包括穗重、小穗数、穗粒数、千粒重等。

2 结果与分析

不同时期的水分条件不仅影响冬小麦最终产量,还对产量形成的各个环节均有影响。小麦的单位面积产量是由单位面积穗数、每穗粒数和粒重共同构成的^[10],不同时期的水分条件对上述三种要素的影响规律不同。由于单位面积穗数会受到播种密度的影响,田间试验不能保证各处理密度完全相同,故着重分析不同水分条件下株成穗数、穗粒数和千

粒重的变化。在此,利用盈亏指标定量分析不同时期、不同水分处理对冬小麦产量及产量构成要素的影响。盈亏指标:

$$PLI_i = (R_i - R_{ck}) / R_{ck} \times 100\% \quad (2)$$

式中, PLI_i 为某要素的盈亏指标, R_i 为不同时期、不同水分处理条件下该要素的观测值, R_{ck} 为该要素的对照值。盈亏指标反映了缺水条件下某要素 i 相对于对照处理的亏损率,或灌水条件下该要素的增长率。结果见表 1。

2.1 缺水和灌水对产量构成的影响

2.1.1 株成穗数 冬小麦穗数的形成是分蘖的发生与两极分化的结果^[11-12]。田间试验结果表明,冬小麦分蘖~越冬期水分充足,可促进大分蘖的形成,可提高 8.96% 的成穗数,越冬期间的水分状况对成穗率影响不大,返青冬小麦恢复生长以后至抽穗以前,水分供给有利于幼穗分化,也有助于提高株穗数,而后期灌水则对穗数基本无影响。缺水条件下,拔节~抽穗期缺水则导致的穗数减少最多,达 16.23%,这可能是拔节~抽穗期生长中心发生转变,幼穗分化由于水分供给不足而中止或死亡导致的;其次为分蘖~越冬期缺水处理;抽穗以后水分不足对穗数的影响变小。

表 1 不同时期缺水和灌水处理对冬小麦产量及产量构成要素的影响(%)

Table 1 Impact of treatments of water deficit and irrigation at different stage on yield and yield structure

时期 Period	代码 Code	株成穗数 Spike number per plant		穗粒数 Kernel number		千粒重 1000-grain weight		产量 yield	
		缺水 Water deficit	灌水 Irrigation	缺水 Water deficit	灌水 Irrigation	缺水 Water deficit	灌水 Irrigation	缺水 Water deficit	灌水 Irrigation
出苗~分蘖 Seedling emergence ~ tillering	SE-T	-12.71	0.50	-11.15	5.47	-4.88	4.42	-13.46	17.11
分蘖~越冬 Tillering ~ overwintering	T-O	-15.47	8.96	-11.10	18.67	-5.04	3.60	-14.37	17.77
越冬~返青 Overwintering ~ turning green	O-TG	-10.41	0.00	-1.16	11.00	-0.05	2.25	-11.84	11.72
返青~拔节 Turning green ~ shooting	TG-S	-14.24	4.23	-20.38	23.21	-1.63	4.17	-20.14	13.38
拔节~抽穗 Shooting ~ heading	S-H	-16.23	2.74	-1.34	16.84	-2.96	4.48	-17.02	20.17
抽穗~灌浆 Heading ~ grain filling	H-GF	-11.64	0.00	-1.11	19.68	-13.58	10.08	-20.97	24.45
灌浆~成熟 Grain filling ~ maturity	GF-M	-7.81	0.00	-6.73	13.70	-15.46	5.46	-21.12	19.96

实际上某发育阶段缺水处理的全生育期水分条件优于灌水处理,但从图 1 和表 1 中可以看出,缺水处理的株成穗率观测值整体小于灌水处理,缺水导致的株成穗数的亏损率也大于灌水处理的增长率,尤其拔节~抽穗期缺水对成穗数的负面影响最大,

但此期灌溉对穗数的贡献作用已不明显。根据冬小麦分蘖成穗的规律,大多数大分蘖形成于越冬前,而一部分分蘖在拔节后会相继死亡成为无效分蘖,不能抽穗结实^[13],拔节~抽穗期水分不足则加速了这部分分蘖的死亡,是成穗数偏低的主要原因。

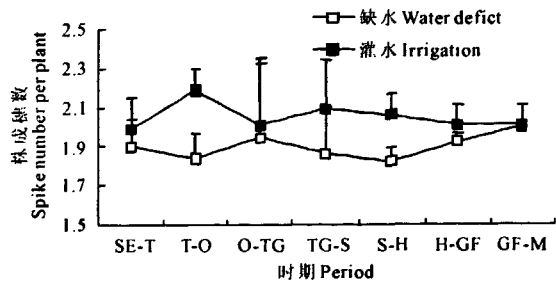


图 1 不同时期不同处理的冬小麦株成穗数
Fig.1 Spike number per plant of winter wheat for different treatments during different period

2.1.2 穗粒数 同一时期缺水和灌水处理对冬小麦穗粒数的影响也不完全相同。随机连续取样 10 穗统计的平均穗粒数受不同发育期、不同水分处理的影响出现较大波动(图 2)。灌水条件下,分蘖~越冬、返青~拔节、抽穗~灌浆三个时期出现了穗粒数小高峰,其中返青~拔节期灌溉的贡献率最明显达 23.21%,而此期缺水也导致穗粒数较对照处理偏低 20.38%。有研究表明,小麦的小穗数一般在起身期达到最大值^[14],返青~拔节时期的水分供给有不仅利于帮助小穗继续发育,还可减少一部分小穗的退化;小麦抽穗后很快便开花,水分条件有助于减少小花退化,也是穗粒数较多的原因之一。

若前期水分供给充足,冬小麦拔节以后干旱处理的穗粒数高于相应时期的灌水处理,因此,小麦返青以后,抽穗之前的水分供给对穗粒数的影响相对较大,要想提高穗粒数,应注意此期的水分状况。

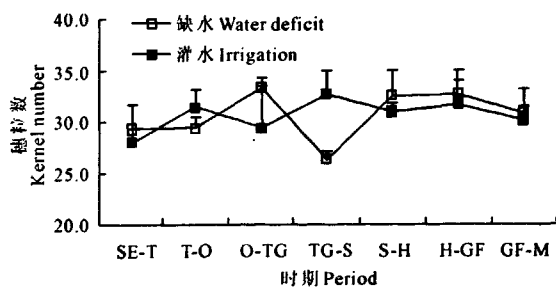


图 2 不同时期不同处理的冬小麦穗粒数
Fig.2 Kernel number of winter wheat for different treatments during different period

2.1.3 千粒重 冬小麦千粒重主要受灌浆期各种因子的影响^[15]。千粒重观测结果见图 3,抽穗~灌浆期灌水对千粒重的增长效果最明显,增重率达 10.08%,此时的水分供给可延长植株功能叶片的光合时间,为灌浆初期粒重的增长提供支持^[16];其次为灌浆~成熟期;而拔节以前各生育期灌溉处理的千粒重差异不大。

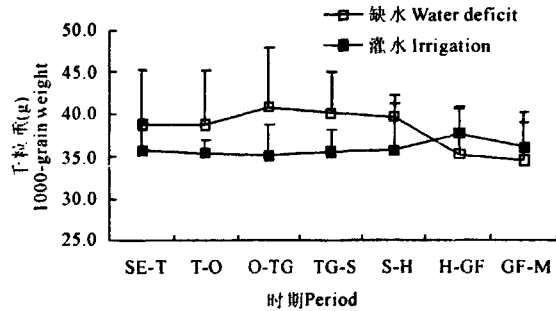


图 3 不同时期不同处理的冬小麦千粒重
Fig.3 1000-grain weight of winter wheat for different treatments during different period

由于其他时期水分条件相对充足,抽穗前各生育期缺水处理的千粒重值均大于对应时期的灌水处理,但越临近抽穗期,缺水处理的千粒重越低,即使前期冬小麦水分供应相对充足,抽穗~灌浆期以及灌浆~成熟期缺水处理的千粒重均降到同期灌水处理千粒重水平以下,亏损率为 13.58%~15.46%。

2.2 缺水和灌水对最终产量的影响

冬小麦实际产量反映了穗数、穗粒重、千粒重及其他各种环境因子对最终产量形成的真实影响。田间试验结果发现,缺水和灌水的产量盈亏指数级并不相当,其绝对最大值也不是同时出现。除返青~拔节期缺水处理的盈亏指标绝对值远大于此期灌水处理外,大多数发育期灌溉的增产率大于缺水导致的产量亏损率(表 1)。

由表 1 中的数值可见,若其他时段水分充足,返青~拔节、抽穗~灌浆或者灌浆~成熟期,任一时期缺水均可能导致冬小麦产量减少 20% 左右。抽穗~灌浆~成熟期是冬小麦产量形成最重要的时期,这期间冬小麦蒸散量大,光合作用旺盛,水分条件对穗粒数的最终确定和千粒重的形成均有影响;其次为返青~拔节期,虽然冬小麦刚刚开始恢复生长,但由于春季气温回升较快,冬小麦对水分的需要量逐渐增大,水分供应影响小穗的小花数,进而影响穗粒数,并对防止小穗退化有一定的帮助^[17-18];越冬期水分亏缺造成的产量灾损最小,这一时期水分不足对株成穗率、千粒重和穗粒数的影响均较小。实际上,拔节~抽穗期也是影响冬小麦产量形成的重要时期,对幼穗分化成穗有重要影响^[19],但根据试验分析,拔节~抽穗期持续时间相对其他发育期较短,拔节~抽穗期的缺水处理,由于拔节前的水分积累和抽穗后的水分补充,其他时段供水充足时,这一处理对最终产量影响的负面效应相对其他产量形成关键期不大;但如果其他时段为自然雨养状态,拔节~

抽穗期灌溉却能有效促进产量提高,增产效果仅次于抽穗~灌浆期灌水处理。

不同生育阶段的灌水处理,冬小麦生长前期,分蘖时保持田间土壤水分充足对产量的提高有一定的促进作用;生长后期抽穗~灌浆期灌水对提高穗粒数和千粒重均有贡献作用,是产量明显提高的主要原因。

2.3 缺水和灌水对产量的影响评估

由于同一时期缺水和灌水处理对应的水分亏缺量和补给量并不相等,为了更加直观地比较不同处理水分对作物产量及产量构成要素的影响,设定

WIR_i 为不同时期处理的水分影响率:

$$WIR_i = PLI_i / |W_{ck} - W_i| \quad (3)$$

式中, PLI_i 为盈亏指标, W_{ck} 为对照处理的全生育期耗水量, W_i 为第 i 生育期水分处理的全生育期耗水量。水分影响率反映了单位水分变化引起的产量或产量构成要素的变化率,便于开展缺水和灌水对产量的影响评估。

计算水分变化量时,根据观测的降水量和测定的土壤湿度值,利用农田土壤水分平衡方程计算出对照处理的耗水量,再计算灌水或缺水各处理的耗水量,二者之差作为实际的水分变化量。

表 2 不同时期缺水和灌水处理冬小麦产量构成要素的水分影响率(%/mm)

Table 2 Water influence rate of yield structure of winter wheat for different treatments during different period

时期 Period	代码 Code	株成穗数 Spike number per plant		穗粒数 Kernel number		千粒重 1000-grain weight	
		缺水 Water deficit	灌水 Irrigation	缺水 Water deficit	灌水 Irrigation	缺水 Water deficit	灌水 Irrigation
出苗~分蘖 Seedling emergence ~ tillering	SE-T	-0.18	0.01	-0.16	0.08	-0.07	0.06
分蘖~越冬 Tillering ~ overwintering	T-O	-0.22	0.14	-0.16	0.28	-0.07	0.05
越冬~返青 Overwintering ~ turning green	O-TG	-0.13	0.00	-0.02	0.21	0.00	0.04
返青~拔节 Turning green ~ shooting	TG-S	-0.20	0.11	-0.29	0.61	-0.02	0.11
拔节~抽穗 Shooting ~ heading	S-H	-0.32	0.04	-0.03	0.26	-0.06	0.07
抽穗~灌浆 Heading ~ grain filling	H-GF	-0.15	0.00	-0.01	0.26	-0.18	0.13
灌浆~成熟 Grain filling ~ maturity	GF-M	-0.09	0.00	-0.08	0.19	-0.18	0.07

从表 2 中可以看出,相同单位的水分亏缺和补给量对产量各要素的影响率并不对等,不同要素对水分的利用规律也不同。单位水量亏缺造成的株成穗数损失率远大于灌水处理,尤其是拔节~抽穗期,亏缺 1 mm 水分对株成穗数的影响率达 -0.32%,其次为分蘖~越冬期,水分影响率为 -0.22%/mm,而越冬~返青期以及抽穗后各发育期水分补给几乎不对成穗数造成影响。灌溉条件下,水分对穗粒数的促进作用更明显,主要表现在从绝对数值上看,灌水处理的水分影响率均大于缺水处理,在土壤湿度适宜范围内,返青~拔节期灌水 1 mm,可促进穗粒数增加 0.61%,而此期缺水 1 mm,则导致 0.29%的穗粒数损失。冬小麦粒重的形成主要取决于抽穗后的环境要素,抽穗以后缺水造成的千粒重损失较严重,达 0.18%/mm,返青~拔节及抽穗~灌浆期灌溉对粒重增加的贡献率达 0.11%/mm~0.13%/mm,前期作物的水分状况对粒重的影响率相对较小。

为平行比较不同水分条件下冬小麦最终产量的水分影响率,图 4 绘制了不同时期处理的产量 $|WIR|$ 值。整体看来,缺水条件下产量的水分影响率绝对值小于灌水,这表明灌溉条件下,作物对水分的利用能力更强,单位水分供给的促产效益更加明显。冬小麦返青之前,干旱和灌溉条件下水分对产量的影响率曲线变化一致,由于冬小麦群体生长并不旺盛,对水分的需求量小,且小麦仍处于营养生长期,各生育阶段水分不足造成的减产率在 0.2%/mm 以内,单位水量灌溉的增产率也在 0.23%~0.27%之间,其中越冬期水分条件对最终产量的影响最小。返青以后,冬小麦逐渐进入旺盛生长期,等量水分亏缺引起的产量损失率明显大于返青之前。缺水与灌水处理的水分影响率最大值并没有出现在同一时期:拔节~抽穗期缺水的产量亏损率达 0.33%/mm,其次为返青~拔节期,为 0.29%/mm;而灌溉的各处理中,返青~拔节期灌水的增产效益最明显,达 0.35%/mm,

其次为抽穗~灌浆期,增产率为0.32%/mm。

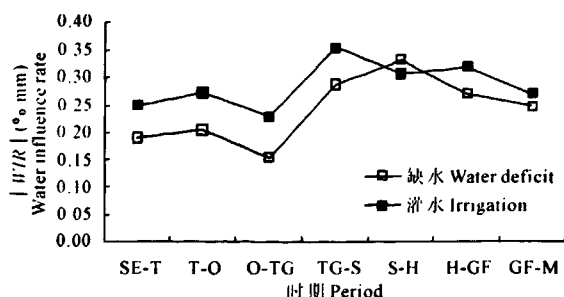


图4 不同处理下冬小麦产量的水分影响率

Fig.4 Water influence rate of yield of winter wheat for different treatments

3 结论与讨论

1) 基于连续两年的田间水分控制试验,利用盈亏指标判定灌溉对株成穗数、穗粒数和千粒重有明显促进作用的时期分别出现在分蘖~越冬期,返青~拔节期以及抽穗~灌浆期;但缺水条件下对上述三种产量构成要素形成不利影响最明显的时期则出现在拔节~抽穗期、返青~拔节期以及灌浆~成熟期。对于最终产量,除返青~拔节期以外,大多数发育期灌水增产的盈亏指标数量级大于缺水处理,且不同处理条件下水分对产量的影响,其绝对最大值也并不同时出现,这表明同一时期缺水和灌溉对冬小麦产量及产量构成性状的影响并不相互补偿。

2) 水分影响率反映了单位水量变化引起的产量或产量构成要素的变化率,灌水处理下可评估作物对单位水分的利用能力,通过判断灌溉量的多少,分析各要素或产量相对于干旱状态的可能增长率;缺水条件下可作为冬小麦干旱影响评估的重要参考,将计算的各时期潜在蒸散量近似为冬小麦需水量^[20-21],通过该时期降水量和土壤水分含量判定缺水量,从而评估不同时期缺水各要素及最终产量的亏损率。

3) 有关盈亏指标和水分影响率的结论均是在中等肥力、降水年型正常的条件下得出的。虽然通过田间试验得出某些作物生育期灌溉有助于增产的结果,但这并不代表灌溉量越大,越能够获得高产,因为灌溉量过大造成土壤偏湿,往往影响小麦根系通透性,影响作物正常呼吸作用或引起株植早衰,反而造成减产。同样地,缺水试验的各处理,土壤水分也未降到凋萎湿度以下,故水分影响率的应用是有一定前提的。

试验过程中某些时期处理的某些要素,如千粒重观测结果各重复间变异较大,这并不影响各项结

果变化趋势及分析。从上面的分析可知,缺水对作物产量构成及最终产量的影响最为严重的时期与灌溉促产的关键期并不完全一致,相比较而言,冬小麦生长后期水分不足对各要素的影响较明显,这对于科学开展冬小麦干旱影响定量评估有参考意义;从节水灌溉角度,把握关键时期灌溉有利于促进产量形成并节约水资源,分蘖~越冬期、返青~拔节期以及抽穗~灌浆期分别对穗数、穗粒数和千粒重的提高有促进作用,是开展节水灌溉的较好时期。

参考文献:

- [1] 刘吕明,魏忠义.华北平原农业水文及水资源[M].北京:科学出版社,1989.
- [2] 姜会飞.农业气象学[M].北京:科学出版社,2009.
- [3] 陈玉民,郭国双,王广兴,等.中国主要作物需水量与灌溉[M].北京:水利电力出版社,1995.
- [4] 张景略.冬小麦的需水特点与合理灌溉[J].河南农林科技,1981,(10):1-3.
- [5] 朱自玺,刘荣花,方文松,等.华北地区冬小麦干旱评估指标研究[J].自然灾害学报,2003,12(1):145-150.
- [6] 刘荣花,朱自玺,方文松,等.华北平原冬小麦干旱灾损风险区划[J].生态学报,2006,25(9):1068-1072.
- [7] 刘荣花,王友贺,朱自玺,等.河南省冬小麦气候干旱风险评估[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):1-4.
- [8] 方文松,朱自玺,刘荣花,等.夏玉米水分-产量反应系数研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):111-114.
- [9] 国家气象局.农业气象观测规范[M].北京:气象出版社,1993.
- [10] 王树安.作物栽培学各论(北方版)[M].北京:中国农业出版社,1995.
- [11] 于振文.小麦产量与品质生理及栽培技术[M].北京:中国农业出版社,2006.
- [12] 祝新建,张红卫,闫小珍.冬小麦分蘖死亡率与产量结构关系研究[J].气象与环境科学,2007,30(1):72-75.
- [13] 刘兆丽,王建林.施肥对小麦产量结构的影响[J].青岛农业大学学报(自然科学版),2008,25(3):189-192.
- [14] 河南省小麦高稳优低研究推广协作组.小麦生态与生产技术[M].郑州:河南科学技术出版社,1986.
- [15] 马体顺,马青荣,杨光仙,等.气候生态因子对冬小麦千粒重的影响[J].河南气象,2006,(3):56-57.
- [16] 吕丽华,胡玉昆,李雁鸣,等.灌水方式对不同小麦品种水分利用效率和产量的影响[J].麦类作物学报,2007,27(1):88-92.
- [17] 张娟,宋保谦.小麦冠层结构与产量及其构成因素的典范相关分析[J].华北农学报,2000,15(3):39-44.
- [18] 王绍中,田云峰,郭天财,等.河南小麦栽培学[M].北京:中国农业科学技术出版社,2010.
- [19] 崔金梅.小麦幼穗发育进程及温度对其影响的研究[J].河南农学院学报,1982,(2):1-12.
- [20] 冯绍元,罗遵兰,左海萍.河北省冬小麦水分生产函数模型初步分析[J].灌溉排水学报,2005,24(4):58-61.
- [21] 华北平原作物水分胁迫与干旱研究课题组.作物水分胁迫与干旱研究[M].郑州:河南省科学技术出版社,1991.

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