

喷灌条件下不同灌水处理冬小麦的叶水势特征^①

高 鹭^{1,2} 胡春胜³ 陈素英³

(1 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101; 2 中国科学院研究生院 北京 100049;

3 中国科学院遗传与发育生物学研究所 石家庄 050021)

摘 要 在喷灌区一季冬小麦的试验表明, 冬小麦叶水势值在各生育期每天的 14: 00 左右发生明显变化; 从生育期看, 返青期叶水势低谷值出现较晚, 持续时间短且恢复较快; 孕穗和开花期低谷出现有提前和持续时间延长趋势; 叶水势不完全随生育进程与土壤水分同步变化, 因为同一时期内土壤水分是造成叶水势差异的主导因素, 但同时外界条件的变化也对叶水势的变化有一定的影响作用。前期叶水势在黎明前和中午都与浅层土壤水分关系密切; 到开花和灌浆期叶水势则变为只在中午与浅层土壤水分关系密切, 黎明前更多依赖深层土壤水分状况, 表现为与深层土壤水分关系密切。喷灌条件下, 当返青后灌水量超过 150 mm 时, 灌水量对叶水势的影响减小。

关键词 喷灌; 冬小麦; 叶水势; 土壤含水量

中图分类号 S275.5

水资源亏缺是华北平原农业高效持续发展的限制因素, 发展节水农业、提高水分利用效率成为现代农业研究的重要课题, 而解决这一课题的关键之一就是准确地判断作物的水分亏缺程度, 确定合理的灌溉时间和灌水量^[1~3]。引起作物水分亏缺的原因主要有两个: 一是根区土壤水分不足伴随一定的蒸发势, 引起的作物水分亏缺; 二是在土壤水分充足条件下, 大气过高的蒸发势引起作物暂时性的水分亏缺。大多数情况下, 影响作物产量的是前者, 因此人们主要关心的是土壤水分不足引起的水分亏缺。水分是沿着水势的梯度运动的, 整个土壤-植物-大气系统 (SPAC) 中的水分都可用水势来表示^[4~8]。当植物水势和膨压减少到足以干扰植物的正常功能时, 即发生水分亏缺。叶水势是植物水分状况的最佳度量, 是叶片细胞液中水分子的能量水平, 是作物水分状况的表征。Turner 认为以作物的水分状况为灌溉依据比以土壤水分状况为依据更可靠^[9, 10]。在农业发达的国家, 叶水势已被广泛用于指导灌溉。喷灌作为工程节水的灌溉形式普遍应用于实际生产中, 并取得一定增产节水的效果。喷灌可以明显改善农田生态环境, 减少作物蒸腾驱动势, 使气孔阻力增大, 最终导致蒸腾速率降低。本文以叶水势为主, 研究喷灌条件下不同灌水处理冬小麦的水分状

况, 为华北地区节水农业的发展提供科学依据。

1 材料与方法

试验于 2002 年春季在中国科学院栾城农业生态系统试验站喷灌区进行。该站位于太行山山前平原高产农区, 区域内地势平坦开阔, 土层深厚, 有机质含量较高, 主要作物是冬小麦和夏玉米。试验供试作物为冬小麦, 于 10 月 7 日播种, 次年 6 月 13 日收获, 其田间管理与当地大田水平一致, 生育期间的降水量为 134.8 mm, 越冬前灌水 59.3 mm。试验地面积为 200 m × 15.8 m, 设 A、B、C 3 个处理, 在冬小麦返青后开始分处理灌溉: A 处理灌水 4 次, 每次灌 50 mm; B 处理灌水 4 次, 每次灌 40 mm; C 处理灌水 5 次, 每次灌水 30 mm。A 处理灌水时期为返青期、拔节稍晚、孕穗-抽穗、灌浆期; B 处理灌水时期为返青期、拔节稍晚、孕穗-抽穗、灌浆期; C 处理灌水时期为返青期、拔节期、孕穗期、抽穗-开花、灌浆期。具体灌水时间及灌水量如表 1 所示。每个处理设 3 个重复, 共 9 个小区, 小区面积为 12 m × 12 m。各处理施肥量为同一水平, 底肥施磷酸二氢铵 375 kg/hm², 返青追肥为尿素 285 kg/hm²。

试验测定项目如下:

①国家“863”计划项目 (2002AA2Z4231) 资助。

表1 各处理的灌水日期及灌水量

Table 1 Dates and rates of irrigation for different treatments in the experiment

日期	处理 A (mm)	日期	处理 B (mm)	日期	处理 C (mm)
2002-3-9	50	2002-3-9	40	2002-3-9	30
2002-4-19	50	2002-4-19	40	2002-4-13	30
2002-5-3	50	2002-5-4	40	2002-4-23	30
2002-5-28	50	2002-5-28	40	2002-5-14	30
				2002-5-29	30
总灌水量	200		160		150

(1) 各灌水处理土壤含水量的测定：每隔 10 天用土钻取土，烘干法测定土壤含水量。每个小区测定 1 点，然后取平均值作为各处理的测定值，测定层次分别为 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm。

(2) 各灌水处理叶片水势的测定：用压力室法测定。在冬小麦不同生育时期内，选择晴好天气进行连续观测，从 06:00~18:00 每隔 3h 取冬小麦最上部展开叶进行测定。每个小区测 3~4 片叶子，取平行测定值的均值。仪器为兰州大学生物系生产的 ZLZ-5 型植物水分仪。

(3) 小麦成熟时，人工收割，脱粒，风干后测定籽粒产量，并进行考种分析。同时用试验地点气象观测场的自动气象观测仪器记录温、湿、风、辐射。

2 结果与分析

2.1 叶水势的日变化及生育期内变化

3 个不同灌水处理在拔节、孕穗、抽穗、开花、灌浆 5 个时期的叶水势日变化，总趋势为早晨较高，随时间推移而下降，到午后 14:00 左右达到最低，然后逐渐回升，但每天因气象条件的变化而有所波动^[11]。Richter 认为叶水势在午后达到最低值；McDonald 等观察到各种水分条件下的小麦叶水势都是 13:00 以后逐渐下降；而 Idso 等发现小麦叶水势 12:00~16:00 时变化不大；Sojka 等和 Biscoe 等发现在晴朗无风的天气下，小麦叶水势在中午前后几个小时内保持不变。这些不同的结论显然与观测环境的差异有关^[12]。

各生育期冬小麦在清晨的叶水势值较高，在 14:00 时叶水势值达到最低，并发生明显分化，18:00 叶水势值上升并接近但低于清晨叶水势值。这是因

为夜间空气比较湿润，气孔关闭，蒸腾基本停止，植物通过根系吸水使叶水势值继续上升的缘故。整个生育期内 3 个处理间的叶水势日变化差异不明显，只是到生育后期（灌浆期）处理间的日变化才逐步趋于分化，但差异也不是很大，如图 1。

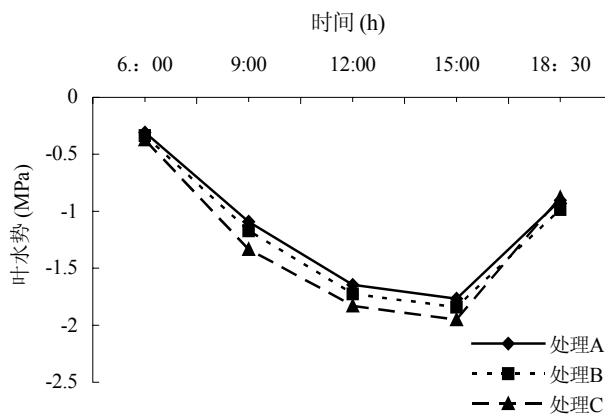


图1 灌浆期不同灌水处理叶水势日变化

Fig. 1 Diurnal changes in leaf water potential in different water treatments during the grain filling

从生育期看，返青期叶水势低谷值出现较晚，持续时间短且恢复较快；孕穗和开花期低谷有出现提前和持续时间延长的趋势^[13]。生育期变化为在整个生育期中，不同灌水处理各生育期清晨的叶水势值在拔节期差异较大，在拔节后生育期内的差异不大，随生育期进程叶水势值总体缓慢增大，到灌浆期又逐渐有减小的趋势（表 4）。

2.2 叶水势与土壤供水的关系

作物对土壤水分的吸收，土壤水势降低时，叶水势随着土壤水势的降低而降低；同样当外界条件的变化引起蒸腾速率的改变时，即使土壤水势没有改变，叶水势也随之而发生变化^[14~16]。因此，在用叶水势作为作物水分亏缺程度的判定指标时，必须

区分是土壤水分变化还是外界条件变化引起的叶水势变化。区分两者引起的作物叶水势变化规律时，首先应以充分供水条件下的叶水势随外界条件变化的规律为基础^[17, 18]。

叶水势不完全随生育进程与土壤水分同步变化，原因为同一时期内土壤水分是造成叶水势差异的主导因素，但同时外界条件的变化也对叶水势的变化有一定的影响作用。拔节期处理 A 土壤储水（1 m 深度内）比处理 B 和处理 C 分别多 35 mm 和 49 mm，相应早晨的叶水势分别比处理 B、C 高 0.172

MPa 和 0.353 MPa；中午的叶水势则分别高 0.352 MPa 和 0.367 MPa。灌浆初期处理 A 土壤储水比处理 B 和处理 C 分别多 55 mm 和 64 mm，相应早晨的叶水势分别比处理 B、C 高 0.027 MPa 和 0.062 MPa；中午的叶水势则分别高 0.078 MPa 和 0.183 MPa。表现为同一时期随灌水量差额的增大，水势值的差额也增大；但不同生育期比较则为在拔节期处理间水势值差额要大于灌浆期，这主要由不同生育期的作物生长状况的差异和气候条件变化引起（表 2）。

表 2 拔节期和灌浆初期的土壤储水量和叶水势值

Table 2 Stored soil water and leaf water potential of jointing stage and filling stage

小麦生育期	灌水处理	土壤储水量 (mm)	清晨叶水势 (MPa)	中午叶水势 (MPa)
拔节期	处理 A	238	-0.455	-2.058
	处理 B	203	-0.627	-2.410
	处理 C	189	-0.808	-2.425
灌浆初期	处理 A	286	-0.310	-1.647
	处理 B	231	-0.337	-1.725
	处理 C	222	-0.372	-1.830

进一步分析表明，前期叶水势在黎明前和中午都与浅层土壤水分关系密切，到开花和灌浆期叶水势则变为只在中午与浅层土壤水分关系密切，黎明前更多依赖深层土壤水分状况，表现为与深层土壤水分关系密切（表 3）。

表 3 不同土层土壤含水量与叶水势的相关性

Table 3 Correlation between leaf water potential and soil water content at various soil layers

日期	土层深度 (cm)	叶水势	相关系数
2002-4-10	0~10	黎明前	0.733*
2002-4-18	0~10	黎明前	0.723*
2002-4-27	0~10	中午	0.743*
2002-4-27	10~20	中午	0.782*
2002-4-27	20~40	中午	0.861**
2002-5-7	40~60	黎明前	0.742*
2002-5-7	60~80	黎明前	0.760*
2002-5-7	80~100	黎明前	0.706*
2002-5-7	10~20	中午	0.715*
2002-5-7	20~40	中午	0.778*
2002-5-7	40~60	中午	0.779*

小麦植株水分状况的动态变化直接或间接影响营养吸收、光合生产及物质运转和代谢，从而决定最终产量形成。生育中后期叶水势与深层土壤水分含量的相关程度增强，进一步分析发现开花期叶水势与产量相关极显著，因此，拔节后尤其开花前后维持较高叶水势对高产形成至关重要^[13, 19~21]。

2.3 叶水势与水分利用效率关系

夜间空气比较湿润，气孔关闭，蒸腾基本停止，植物可通过根系吸水使叶水势和土壤水势达到平衡，因此用早晨的叶片水势可更好地反映作物水分亏缺状况。3 个不同灌水处理间清晨的叶水势在拔节期差异较明显，随生育期进程处理间差异减小，因此最终产量没有很大差别，灌水多的处理水分利用效率低（表 4）。

在小麦蒸腾过程中，叶水势降低是不可避免的，关键是维持叶片膨压使生理功能较正常进行。研究表明在作物对水分的敏感时期，维持其叶片水势及膨压对最终产量的形成有重要意义。在本试验条件下，当冬小麦返青后的灌水量超过 150 mm 时，灌水量对小麦叶水势的影响减小，即冬小麦的叶水势对土壤水分变动有阈值反映。

表4 不同生育期的清晨叶水势与水分利用效率 (WUE)

Table 4 Pre-dawn leaf water potential and water use efficiency at each growing stage

处理	叶水势 (MPa)					产量 (kg)	WUE (kg/m ³)
	拔节	孕穗	抽穗	开花	灌浆		
A	-0.455	-0.482	-0.315	-0.435	-0.310	392.1	1.344
B	-0.627	-0.457	-0.383	-0.273	-0.337	392.7	1.379
C	-0.808	-0.448	-0.343	-0.31	-0.372	400.4	1.466

3 结论

3个不同灌水处理在拔节、孕穗、抽穗、开花、灌浆5个时期的叶水势日变化,总趋势为早晨较高,随时间推移而下降,到午后14:00左右达到最低,然后逐渐回升,但每天因气象条件的变化而有所波动。叶水势不完全随生育进程与土壤水分同步变化,因为同一时期内土壤水分是造成叶水势差异的主导因素,但同时外界条件的变化也对叶水势的变化有一定的影响作用。

同一时期内处理间随灌水量差额的增大,水势值的差额也增大;但不同生育期比较则为在拔节期处理间水势值差额要大于灌浆期,这主要由不同生育期的作物生长状况的差异和气候条件变化引起。进一步分析表明,前期叶水势在黎明前和中午都与浅层土壤水分关系密切,到开花和灌浆期叶水势则变为只在中午与浅层土壤水分关系密切,黎明前更多依赖深层土壤水分状况,表现为与深层土壤水分关系密切,因此在生育中后期通过灌水维持较高叶水势对最终产量的形成很重要。3个不同灌水处理间清晨的叶水势在拔节期差异较明显,随生育期进程处理间差异减小,因此其最终产量没有很大差别,灌水多的处理水分利用效率低。当返青后灌水量超过150mm时,灌水量对叶水势的影响减小。

致谢：本试验在中国科学院栾城农业生态系统试验站进行,得到了试验站各位老师和工作人员的热心帮助,在此表示诚挚的感谢。

参考文献

- 1 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.水利学报,1991,(1):34~39
- 2 王密侠,马成军,蔡焕杰.农业干旱指标研究与进展.干旱地区农业研究,1998,16(3):119~123
- 3 赵炳梓,徐富安,周刘宗,徐梦熊.水肥(N)双因素下的小麦产量及水分利用率.土壤,2003,35(2):122~125

- 4 张喜英,裴东,胡春胜.太行山山前平原冬小麦和夏玉米灌溉指标研究.农业工程学报,2002,18(6):36~41
- 5 张喜英,裴冬,由懋正.几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反映.植物生态学报,2000,24(3):280~283
- 6 张喜英.冬小麦、夏玉米叶水势、蒸腾和液态水流阻力的田间试验研究.地理学报,1997,52(6):543~549
- 7 Akmal M, Khan KS, Xu JM. Dynamics of microbial biomass in a rainfed soil under wheat cultivation. Pedosphere, 2004, 14(1): 53~62
- 8 Zhang MK, Jiang H, Liu XM. Phosphorus concentration and forms in surface and subsurface drainage water from wetland rice fields in the Shaoxing Plain. Pedosphere, 2003, 13(3): 239~248
- 9 张喜英.叶水势反映冬小麦和夏玉米水分亏缺程度的试验.植物生理学通讯,1997,33(4):249~253
- 10 Turner NC. Plant water relations and irrigation management. Agriculture Water Management, 1990, 17: 59~73
- 11 黄明斌,邵明安.不同有效土壤水势下植物叶水势与蒸腾速率的关系.水利学报,1996,(3):1~3
- 12 中国科学院台站《农作物耗水量研究》课题组.作物与水分关系研究.北京:中国科学技术出版社,1992,253~270
- 13 马瑞昆,骞家利,贾秀领,刘淑贞.高产冬小麦节水栽培的叶水势特征.作物学报,1995,21(4):451~457
- 14 Tomar VS, Toole JC. A field study on leaf water potential, transpiration and plant resistance to water flow in rice. Crop Science, 1982, (22): 5~9
- 15 Grimes DW, Yamada H, Hughes SW. Climate-normalized cotton leaf water potentials for irrigation scheduling. Agricultural Water Management, 1987, 12: 293~304
- 16 Wang Z, Zerihum D, Feyen J. General irrigation efficiency for field water management. Agricultural Water Management, 1996, 30: 123~132
- 17 Canny MJ. The forgotten component of plant water

- potential. *Plant Boil.*, 1999, (1): 595 ~ 597
- 18 Canny MJ. The forgotten component of plant water potential: A reply-tissue pressures are not additive in the way. *Plant Boil.*, 1999, (1): 598 ~ 601
- 19 李德全, 邹琦, 程炳嵩. 土壤水分胁迫下小麦水分渗透调节与膨压维持. *华北农学报*, 1991, 6(4): 100 ~ 105
- 20 武玉叶, 李德全, 赵世杰, 邹琦. 土壤水分胁迫下小麦叶片渗透调节与光合作用. *作物学报*, 1999, 25 (6): 752 ~ 758
- 21 刘坤, 陈新平, 张福锁. 不同灌溉策略下冬小麦根系的分布与水分养分的空间有效性. *土壤学报*, 2003, 40 (5): 697 ~ 703

CHARACTERISTICS OF LEAF WATER POTENTIAL OF WINTER WHEAT WITH DIFFERENT WATER TREATMENTS UNDER SPRINKLING IRRIGATION

GAO Lu^{1,2} HU Chun-sheng³ CHEN Su-ying³

(1 *Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;*

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;

3 Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, ShiJiaZhuang 050021)

Abstract It was shown by the experiment carried out in the sprinkling irrigation area that change in leaf water potential was obvious at 14:00 everyday; at the regreening stage the lowest leaf water potential appeared later and lasted a short time and recovered rapidly, while at the booting and blooming stages it showed up earlier and lasted longer; The change in leaf water potential was not completely in consistence with the change in soil water content during the growing stage, because besides soil water content, surrounding conditions also have influence on leaf water potential. A close relationship could be observed between pre-dawn and mid-day leaf water potentials and water content of soil surface at the early growth stage. With the plants grew up, the correlation of leaf water potential with soil water content in deeper soil layers was getting significant. Under sprinkling irrigation, when the irrigation rate exceeded 150mm after the wheat returned green, its effect on leaf water potential decreased.

Key words Sprinkling irrigation, Winter wheat, Leaf water potential, Soil water content