

花前干旱胁迫对冬小麦生长指标的影响

李彦彬¹, 冯 娅^{1*}, 边泽鹏¹, 李道西¹, 朱亚南²

(1.华北水利水电大学, 郑州 450046; 2.常熟市河道管理处, 江苏 常熟 215500)

摘 要:【目的】研究干旱胁迫对冬小麦生长指标的影响。【方法】选用周麦22为试验材料,在拔节期和抽穗期分别设置轻度干旱(土壤含水率控制在田间持水率的60%~70%)、中度干旱(土壤含水率控制在田间持水率的50%~60%)和重度干旱(土壤含水率控制在田间持水率的40%~50%),对比分析了冬小麦根系形态、根系分布、株高及叶面积的变化过程。【结果】干旱胁迫处理根长相比CK均降低,T1、T2、T3处理总根长随干旱程度的加深而增长;经过连续处理的各根系特征在轻旱、中旱条件下均大于单阶段处理,重旱条件下各根系特征则明显降低;但复水后拔节期处理的根系补偿恢复能力高于抽穗期。随着干旱胁迫程度及时间增加,根系向下伸展生长,使各根系指标向深层转移,但根系总体绝对量明显减少,T9处理根干质量相比CK降低64.79%,并且株高、叶面积所受的抑制增大。其中拔节期对株高影响更大,T1、T2、T3处理株高相比CK降低3.78%、7.59%、16.09%;抽穗期对叶面积影响更大,T4、T5、T6处理叶面积相比CK降低8.11%、23.45%、29.43%;而经连续干旱处理后的株高和叶面积都明显低于各单阶段处理;抽穗期经干旱胁迫处理的株高、叶面积在干旱胁迫1周后就表现出较强补偿效应,而拔节期表现则相对迟缓;在经历连续干旱胁迫后均无明显补偿。【结论】在冬小麦实际生产中应避免连续干旱,花前若需控水,应尽量满足拔节期供水,控水在抽穗期保持轻旱水平。

关 键 词: 干旱复水; 冬小麦; 根系; 株高; 叶面积

中图分类号: S279.2

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020399

OSID:



李彦彬, 冯娅, 边泽鹏, 等. 花前干旱胁迫对冬小麦生长指标的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 23-30.

LI Yanbin, FENG Ya, BIAN Zepeng, et al. Effect of Drought Stress before Anthesis on Growth Indexes of Winter Wheat[J].

Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 23-30.

0 引 言

【研究意义】小麦是我国重要的粮食作物,作为我国三大粮食作物之一^[1],冬小麦在我国的种植面积和总产量占到全国粮食作物的20%~30%^[2],其高产稳产直接关系到粮食安全与作物高效生产目标的实现^[3]。我国小麦主产区分布在东北、华北和西北,这些地区大多数为干旱、半干旱地区,水资源严重短缺。同时,由于自然降水的时空分布不均,使得小麦对水需求的不吻合,在实际生产中,小麦的生长常常暴露在干旱和复水的环境下,对小麦的生长发育造成直接和后效的影响^[4]。

【研究进展】近年来,有研究指出只要作物遭受干旱,其生长必然受到影响,从而产量下降,且随着

干旱胁迫程度的增加产量呈下降趋势^[5]。郭相等^[6]、王伟等^[7]、刘义国等^[8]研究指出在作物受到干旱胁迫时,为了适应逆境生长,植株通过调节叶片气孔开度的大小,降低植株蒸腾速度,导致叶片细胞的渗透物质质量分数和膜脂过氧化产物(MDA)质量分数升高,叶绿素质量分数降低,恢复供水后,叶片的一些生理生化指标会得到不同程度恢复,表现出作物亏水补偿或超补偿效应^[9-12]。同时张伟杨等^[13]研究指出,在适度的干旱复水后,会对作物有补偿或超补偿效应,可能使作物产量和水分利用效率增加。刘庚山等^[14]的夏玉米水分胁迫试验表明,复水增加了夏玉米叶片气孔导度和光合速率,提高叶片水平上的水分利用效率(WUE)。这表明面对不同的干旱时期、干旱程度,作物不同器官存在不同的响应,同时旱后效应和复水后作物的生理代谢恢复过程也不尽相同^[15]。李彦彬等^[16]研究表明轻度水分胁迫可实现节水和高产的统一,灌浆期为小麦光合作用需水关键期,合理的加强灌浆期水分管理可实现高产。在干旱胁迫下,冬小麦根系从土壤中吸收到的水分难以补偿冠部蒸腾的消

收稿日期: 2020-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779093); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(17IRTSHN026)

作者简介: 李彦彬(1973-),男,教授,博士生导师,研究方向为农业水资源高效利用与防灾减灾。E-mail: liyb101@sina.com

通信作者: 冯娅(1995-),女,硕士研究生,研究方向为农业水资源高效利用与防灾减灾。E-mail: 572616951@qq.com

耗,导致植株体内水分调节失衡,使冬小麦根、冠部正常的生长发育受到严重影响,最终导致小麦减产和品质降低^[17-18]。柴雨葳等^[19]研究表明水分胁迫条件下低温能够显著影响小麦干物质的积累。汤章城^[20]研究表明,冬小麦拔节和抽穗期生长旺盛,需水强度大,受干旱胁迫后,作物茎、叶生长受到抑制,导致株高降低,叶面积系数减小;干旱同时加速了叶片的衰亡速率,增加了黄叶面积,从而降低有效功能叶面积。在适度的干旱复水后,作物存在着生长的补偿。

【切入点】前人的研究主要集中于小麦花后生育时期且选取单一指标来分析短期干旱胁迫对冬小麦生长和产量的影响,对小麦花前连续生长阶段持续干旱胁迫各生长指标动态变化的研究较少,缺少对小麦各生长指标干旱逆境中如何协调动态变化的深入研究。【拟解决的问题】试验选用周麦 22 为研究对象,将针对小麦在干旱胁迫后,其根系形态、根系分布、株高及叶面积的变化情况,对小麦的生长指标进行分析,研究冬小麦花前拔节抽穗期在经历不同程度的干

旱胁迫后,对其生长指标影响,探究作物抗旱强度,分析作物复水补偿效应,以期对冬小麦抗旱稳产和确定高效的灌溉制度提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验于 2018 年 10 月—2019 年 6 月在中国农业科学院七里营综合试验基地(北纬 35°18′,东经 113°54′,海拔 81 m)的移动防雨棚下进行。该试验区位于黄淮海平原中部,多年平均气温 14℃,无霜期 210 d,日照时间 2 399 h,年均降水量 580 mm。

1.2 试验设计

本试验供试品种为“周麦 22”,试验采用桶栽,桶直径为 40 cm,装土深 55 cm,顶部预留 5 cm 用于灌水。每桶基施复合肥 10 g(N、P、K 量比例为 1:1:1),每桶装土体积质量为 1.3 g/cm³。2018 年 10 月 15 日播种,三叶一心时定株,每桶 40 株^[9]。试验土壤参数见表 1。

表 1 土壤参数

Table 1 Soil parameters

土壤深度/cm	粒径组成%			土壤质地
	黏粒(<0.002 mm)	粉粒(0.002~0.02 mm)	砂粒(0.02~2 mm)	
0~20	6.75	69.72	23.53	壤土
20~40	6.41	66.91	26.69	粉质(砂)壤土
40~55	10.19	69.96	19.83	粉质(砂)壤土

表 2 试验设计

Table 2 Test design

处理	土壤含水率占田间持水率比例	
	拔节期	抽穗期
CK	70%~80%	70%~80%
T1	60%~70%	70%~80%
T2	50%~60%	70%~80%
T3	40%~50%	70%~80%
T4	70%~80%	60%~70%
T5	70%~80%	50%~60%
T6	70%~80%	40%~50%
T7	60%~70%	60%~70%
T8	50%~60%	50%~60%
T9	40%~50%	40%~50%

试验设置拔节期和抽穗期 2 个生育阶段为水分胁迫阶段,其余生育时期均保持充分灌水。拔节期水分胁迫时期为 4 月 1—15 日,抽穗期水分胁迫时期为 4 月 16—30 日。4 个处理水平分别为:充分灌水(70%≤田间持水率<80%)、轻度干旱(60%≤田间持水率<70%)、中度干旱(50%≤田间持水率<60%)、

重度干旱(40%≤田间持水率<50%);田间持水率为 19%。本试验共设置 10 个处理(见表 2)。分别为 1 个全生育期充分灌水处理 CK;3 个单拔节期干旱处理:轻度干旱 T1、中度干旱 T2 和重度干旱 T3;3 个单抽穗期干旱处理:轻度干旱 T4、中度干旱 T5 和重度干旱 T6;3 个拔节抽穗期连续干旱处理:连续轻旱 T7、连续中旱 T8、连续重旱 T9;每个处理设 3 个重复。通过称质量法控制土壤水分,当田间持水率低于标准范围时,通过量杯补水至范围上限。

1.3 观测项目及方法

1) 根系。在收获当日,用根钻取 40 cm 根系,每 10 cm 为 1 层,用 2 mm 筛网人工筛选。使用 WinRHIZO 植物根系分析仪分析总根长和根表面积,烘干根系,测量根干质量。

2) 株高、叶面积。从拔节期处理开始每 7 天人工测量 1 次株高和叶面积。拔节期株高为抽穗前测量地面到最高叶长的高度,抽穗后测量地面到穗顶(不连芒)高度,叶面积为单株叶面积总和,分别测量每片叶的叶长和叶宽(叶面积=叶长×叶宽×0.83),每次测量处理设 3 个重复。拔节期处理测定时间为 2018

年4月7日（干旱处理1周）、4月14日（干旱处理2周）；拔节期试验复水后测定时间为4月21日（复水1周）、4月28日（复水2周）。抽穗期处理测定时间为4月21日（干旱处理1周）、4月28日（干旱处理2周）；复水后测定时间为5月6日（复水1周）、5月13日（复水2周）。连续干旱处理测定时间为4月30日（干旱处理4周后），复水后测定时间同单抽穗期处理。

1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 和 SPSS 8.0 软件进行统计分析，采用最小显著差数法（LSD 法）进行差异显著性检验（ $\alpha=0.05$ ）

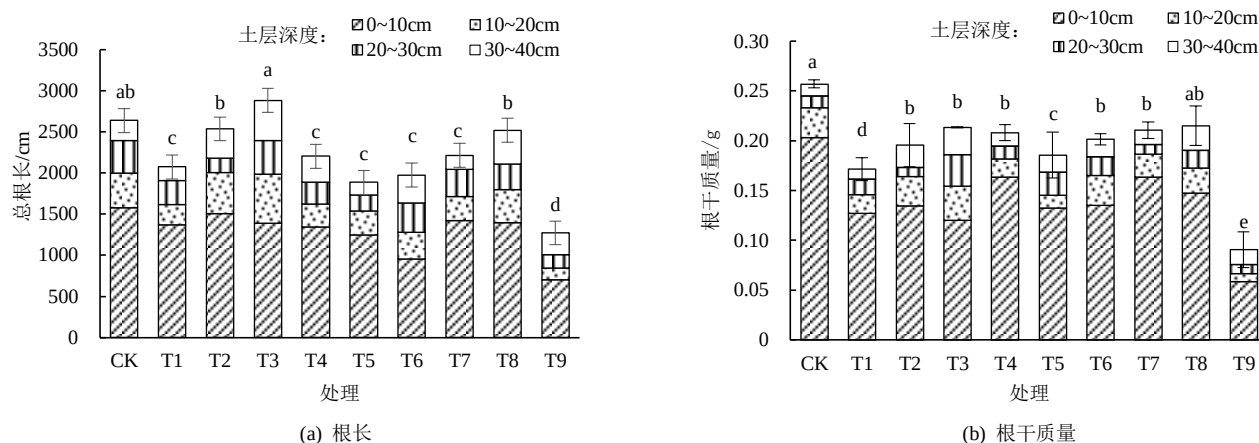
2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对根系形态指标的影响

不同处理根长分布见图 1（a）。由图 1（a）可以看出，T1、T2、T3 处理总根长随干旱程度的增加呈增大趋势。其中，与 CK 相比，T1、T2 处理根长降

低 21.38%、3.84%，T3 处理则增加了 9.32%；与 CK 相比，T4、T5、T6 处理根长降低 16.46%、28.46%、25.10%，其中 T4 处理所受影响最小，T5、T6 处理总根长受损严重；与 CK 相比，T7、T8、T9 处理总根长降低了 16.00%、4.44%、51.80%，其中 T9 处理所受影响较大，说明持续重旱对根系生长影响极大。综上可知，T1、T4 处理总根长变化没有差异，而 T2、T3 处理总根长显著高于 T5、T6 处理，说明拔节期干旱胁迫对根长的影响比抽穗期影响更大。

不同处理根干质量结果见图 1（b）。由图 1（b）可知，与 CK 相比，T1、T2、T3 处理根干质量降低 33.27%、23.93%、16.93%，其中，T1 处理受影响最大，T3 处理根干质量高于 T1、T2 处理，但仍低于 CK。T4、T5、T6 处理根干质量相比 CK 降低 19.07%、27.82%、21.60%，其中，T4 处理高于 T1 处理；而 T5、T6 处理低于 T2、T3 处理。T9 处理相比 CK 根干质量降低 64.79%，说明连续重旱对根系生长物质积累影响极大。



注 误差线为 0~40 cm 土层设置，下同。

图 1 不同处理下根长和根干质量分布

Fig.1 Root length and root dry mass distribution under different treatments

2.2 干旱胁迫对根系分布的影响

不同深度土层的冬小麦根系分布对干旱胁迫的响应不同。正常灌水处理下，0~10、10~20、20~30、30~40 cm 土层的总根长依次降低，分别占总体的 63.97%、14.77%、12.45%、8.82%。由图 1（a）可知，拔节期阶段土层根长随干旱胁迫程度的加深，表现为在 0~10 cm 土层的根长有减小趋势，深层根长有增加趋势，这说明干旱胁迫促进根系向深处生长，且 T3 处理，根系在 0~40 cm 的各土层比例分别为 45.34%、20.91%、15.21%、18.53%。可以看出，T3 处理的 20~40 cm 土层根长比例显著高于 CK，说明拔节期在田间持水率 50% 以下根系向下伸长明显。

由图 1（a）可知，T6 处理的 10~40 cm 各土层

的根长比例分别为 16.37%、18.12%、17.24%。表明从 T6 处理开始，表层根长比例开始降低，根系向深层伸长，抽穗期在田间持水率的 50% 下根系向下伸长明显。T7 处理开始，0~10 cm 土层的根长比例明显下降，经过连续处理后，T8 处理根系向下伸长明显。同时相比较其他处理，T8 处理的 30~40 cm 土层根长比例最大。

在 0~10 cm 土层中，T4、T7 处理的根长比例均明显增加，说明轻旱能够增加土壤浅层的根长比例；在 10~20 cm 土层中，T3 处理根长比例最高；在 20~30 cm 土层中，T6 处理根长比例最高；30~40 cm 土层中，T8 处理根长比例最高，说明随着冬小麦生长和干旱胁迫时间增长，根长比例会逐渐向土壤深层转移。

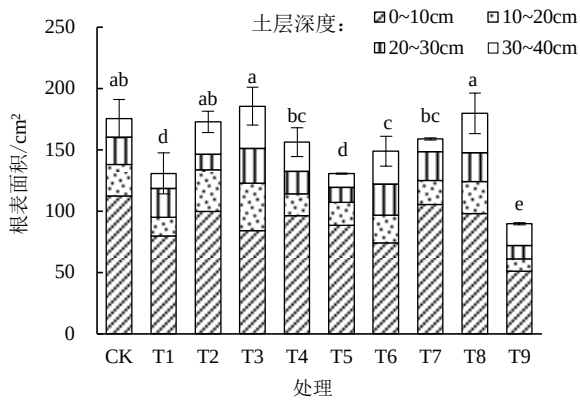


图2 不同处理下根表面积分布

Fig.2 Root surface area distribution under different treatments

2.3 干旱胁迫对株高的影响

正常灌水和不同干旱胁迫程度下株高变化见图3(a)、图3(b)。由图3(a)、图3(b)可知,在冬小麦的拔节期和抽穗期,干旱胁迫显著降低株高,干旱对株高的影响随着胁迫程度的加重而加剧。4月21日株高普遍降低的原因为冬小麦抽穗后株高的测量方式改变。

由图3(a)可知,在拔节期经干旱胁迫处理两周后与CK相比,T1、T2、T3处理株高降低3.78%、7.59%、16.09%。由方差分析得出,CK显著高于T1

处理,T1、T2处理差异不显著,T2处理显著高于T3处理。复水1周时,T1、T2处理株高没有表现出补偿效应,而是有明显的旱后效应,与CK相比株高分别降低7.16%、10.81%,而T3处理表现出轻微的补偿效应。在复水2周之后,T1、T2处理恢复至CK的95.33%和95.85%,与CK差异不再显著,表现出明显的补偿效应。

由图3(b)可知,在抽穗期处理2周后与CK相比,T4、T5、T6处理株高降低2.73%、6.06%、8.23%,T4处理与CK差异不显著,但显著高于T5、T6处理。复水1周后,T5、T6处理表现出的补偿效应明显高于T4处理,但在2周后T4处理株高仍表现出补偿效应,而T5、T6处理补偿效应消失,这说明抽穗期中旱和重旱补偿效应较高,且补偿效应在复水1周时最高。

正常灌水和不同连续干旱胁迫下株高动态变化情况见图3(c)。由图3(c)看出,在连续处理2周后与CK相比,T7、T8、T9处理后株高降低8.75%、11.45%、32.71%。T7、T8处理显著低于CK,但显著高于T9处理。综上可得,经过连续干旱处理后的各株高明显低于单阶段干旱处理。同时在复水后,受旱后效应较大,各处理并无明显的补偿效应。

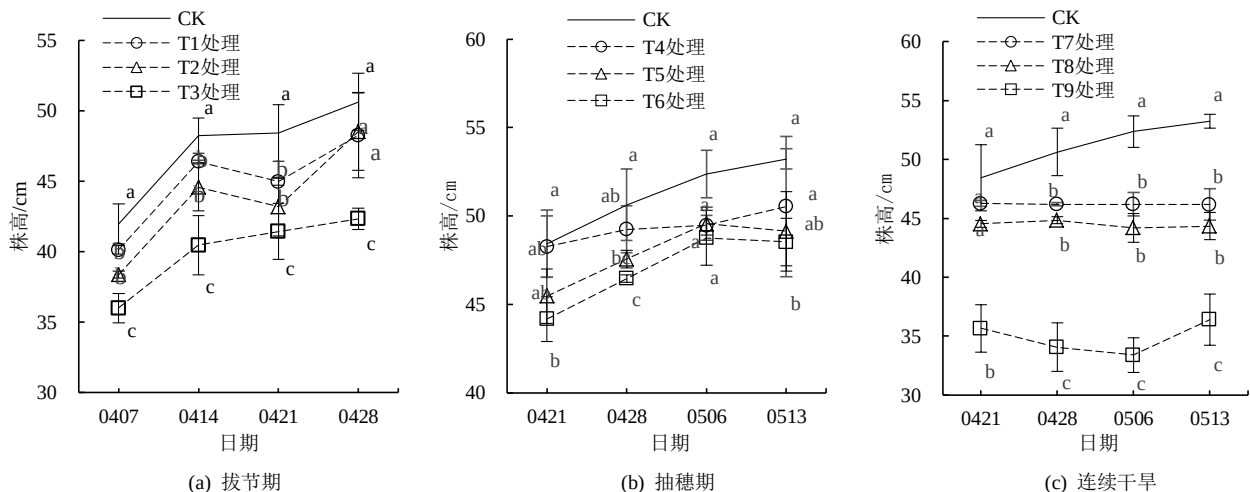


图3 不同时期干旱胁迫冬小麦株高动态变化

Fig.3 The dynamic change and variance analysis of winter wheat plant height in different periods of drought stress

通过比较株高在各阶段经历不同干旱胁迫后与CK相比的降低程度,可以看出,轻旱水平对株高影响为:T1处理>T4处理>T7处理;中旱水平对株高影响为:T2处理>T5处理>T8处理;重旱水平对株高影响为:T3处理>T6处理>T9处理。结果表明,无论单阶段或者连续干旱胁迫处理,株高所受的抑制随胁迫程度以及胁迫时间的增加而增大,其中相比抽穗期处理,在拔节期各处理的抑制程度更大。连续干旱处理的株高明显低于单阶段处理。对于株高的抑制,表现为连续干旱>拔节期>抽穗期。

复水后,T3、T6处理株高的补偿效应低于T1、T4处理和T2、T5处理;拔节期在复水2周后表现出明显的补偿效应,抽穗期处理在1周时便有明显的补偿效应,但在2周后补偿效应逐渐减弱;连续干旱后胁迫效应较强,在复水后仍无明显补偿效应。各处理复水后虽有补偿效应,但并不能抵消干旱造成的影响。

2.4 干旱胁迫对叶面积的影响

正常灌水和不同干旱胁迫程度下的叶面积动态变化情况见图4。由图4可知,在拔节抽穗期,干旱胁迫显著降低叶面积。4月14日叶面积普遍降低的

原因为冬小麦生长过程中最下方叶片的枯萎。

由图 4 (a) 可知, 在拔节期经干旱胁迫 2 周后与 CK 相比, T1、T2、T3 处理叶面积降低 9.61%、8.43%、14.97%。通过方差分析得出: CK 显著高于 T1 处理, T1、T2 处理后叶面积变化不显著, 但 T2 处理显著高于 T3 处理, 同拔节期株高变化一致。复水 2 周后, T1、T2 处理后叶面积并没有表现出补偿效应, 但有明显的旱后效应, 只有 T3 处理有明显补偿效应, 但显著低于 T1、T2 处理。

由图 4 (b) 可知, 在抽穗期经干旱胁迫处理 2 周后与 CK 相比, T4、T5、T6 处理叶面积降低 8.11%、23.45%、29.43%。可以看出, 各阶段处理后叶面积变化显著, CK 显著高于 T4、T5、T6 处理。复水 1 周后, 各阶段处理均表现出明显的补偿效应, T4 处理叶面积恢复到 CK 的 94.24%, 与 CK 差异不再显著,

T5、T6 处理差异不显著, 但仍低于 CK、T4 处理; 在复水 2 周后因干旱导致生育期提前, 冬小麦进入乳熟期, 叶子逐渐枯黄, T4、T5、T6 处理后表现出显著低于 CK 的现象。与 CK 相比, 轻旱处理的叶面积无明显变化, 而中旱和重旱处理后叶面积明显降低, 表现为 T5 处理 > T2 处理, T6 处理 > T3 处理。说明相比拔节期, 抽穗期各处理的叶面积抑制程度更大。

正常灌水和不同连续干旱胁迫程度下叶面积的变化情况见图 4 (c)。由图 4 (c) 可知, 经过连续干旱处理各阶段的叶面积明显低于单阶段干旱处理。与 CK 相比, T7、T8、T9 处理叶面积降低 20.56%、23.40%、45.32%。T7、T8 处理低于 CK, 高于 T9 处理。由于之前受旱处理后胁迫效应较大, 可以看出, 在复水后任一处理的叶面积没有表现出明显的补偿效应。

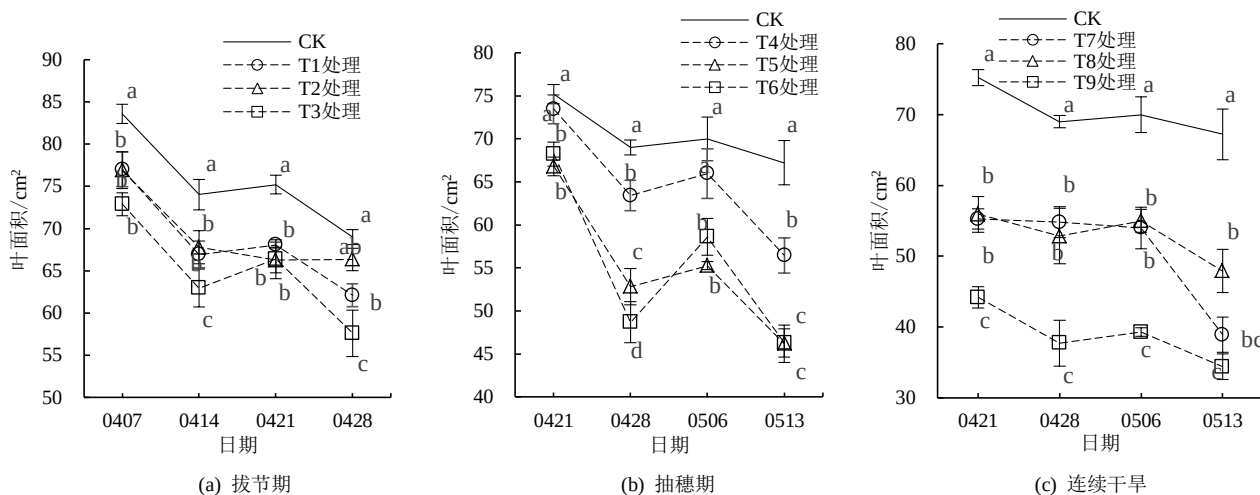


图 4 不同时期干旱胁迫冬小麦叶面积动态变化及方差分析

Fig.4 The dynamic change and variance analysis of winter wheat leaf area under drought stress in different periods

无论是单阶段还是连续干旱胁迫处理, 叶面积所受的抑制随胁迫程度以及胁迫时间的增加而增大, 相比拔节期, 抽穗期处理的抑制程度更大。连续干旱的每个阶段的处理水平均明显低于单阶段处理, 对于叶面积的抑制, 连续干旱 > 抽穗期干旱 > 拔节期干旱。复水后, 经过单阶段重旱处理的叶面积补偿效应较高, 抽穗期在复水 1 周后表现出较强补偿效应, 连续干旱在复水后无明显补偿。对于复水后的补偿效应, 表现为: 抽穗期 > 拔节期 > 连续处理。

3 讨论

本试验结果表明, 冬小麦在拔节期经历干旱胁迫后, 轻旱和中旱处理相较于 CK 表现出降低的趋势, 而重旱却高于 CK。原因可能是拔节期的干旱对根系影响严重, 即使是轻旱也能对根系造成较大的损伤, 复水后, 中旱和重旱补偿效应较高, 甚至出现超补偿效应。在抽穗期经历干旱胁迫后表现出轻旱 > 重旱 >

中旱的现象, 原因是干旱对根系有损伤, 在抽穗期重旱补偿效应高于中旱, 且抽穗期根系已生长至峰值, 以至于对轻旱影响较小所造成的。但由于根毛数量减少, 总根长、根表面积等指标降低, 从而导致根干质量下降。在干旱胁迫条件下, 根尖最易受影响。这种情况下, 由于总根长、根表面积等降低, 最终导致根干质量下降。这与黄正金等^[21]研究一致, 干旱条件下冬小麦单株次生根数、总根长、总吸收面积、活性吸收面积及根系活力均明显降低, 适当控水可促进根系向中下层延伸和生长。汤章城^[20]指出, 根系向深层发育有利于尽可能吸收较多水分, 以满足根系本身和地上部分的需要, 这是植物对于干旱环境的一种适应性变化。邱新强等^[22]研究表明, 小麦根系的生长重心随着生育进程的推进逐渐向深层转移。

本试验研究表明, 轻旱能够增加浅层中根长比例, 即随着小麦生长和干旱时间增长, 根长比例会向下层转移。本试验结果表明, 株高、叶面积会因干旱程度

的不同在受旱 1 周后发生差异性变化,无论单阶段或者连续处理阶段,株高、叶面积所受的抑制会随着胁迫程度以及胁迫时间的增加而增大,其中拔节期对株高影响较大,抽穗期对叶面积影响较大,连续干旱情况下的每个处理株高、叶面积都明显低于单阶段处理。

在干旱胁迫下,株高抽穗期减少的程度比拔节期低,主要原因在于冬小麦进入抽穗期后,其生长由营养生长向生殖生长过渡,此时株高已经达到了一定水平,所以受干旱影响相对较小。故对于株高、叶面积在干旱复水后的补偿效应,皆是抽穗期>拔节期>连续处理,连续干旱处理在复水后株高和叶面积都没有明显的补偿效应。叶面积对于干旱的响应比株高更敏感,这与孟兆江等^[23]研究一致:水分胁迫抑制叶面积的扩展,且比株高更加明显。

本次试验是通过桶栽种植小麦进行研究分析,试验条件具有一定的局限性,试验土体较小,与实际的大田生产存在一定的差异,可进一步进行大田试验进行验证分析。另外,本次研究仅选取了生长指标进行研究,可进一步扩展研究指标,如干旱复水条件下小麦可溶性物质、SOD 活性、生物碱等生理、生化指标进行进一步的研究。

4 结 论

1) 冬小麦根系在拔节和抽穗期遭受干旱胁迫,导致根质量下降,根系产生适应性生长。在水分下限为田间持水率 40%这一阈值之上,经过各单阶段处理的冬小麦在复水后均产生补偿效应。在中度干旱后,连续干旱胁迫使根系产生适应性增长,复水后其补偿能力更大;在连续重旱处理下,根系受损严重,无法恢复。干旱对根系的影响表现为拔节期>抽穗期,但复水后拔节期的根系补偿恢复能力高于抽穗期。

2) 随着干旱胁迫程度以及胁迫时间的增加,株高、叶面积所受抑制增大,株高表现为:拔节期>抽穗期,叶面积反之。经历复水后,抽穗期在 1 周后表现出较强的补偿效应,拔节期相对迟缓,且复水后并不能完全抵消干旱的影响;经历连续干旱处理在复水后并无明显补偿效应。

3) 应避免连续干旱,若需控水,应尽量满足拔节期供水,抽穗期轻旱对植株的生长影响较小。

参考文献:

- [1] SONG Y L, LINDERHOLM H W, WANG C Y, et al. The influence of excess precipitation on winter wheat under climate change in China from 1961 to 2017[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 690: 189-196.
- [2] 张笑培, 王和洲, 周新国, 等. 拔节期水氮处理对冬小麦耗水特性和水分利用效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(12): 19-26.
ZHANG Xiaopei, WANG Hezhou, ZHOU Xinguo, et al. Combined impact of irrigation and nitrogen application at the jointing stage on water consumption and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(12): 19-26.
- [3] 韩慧敏. 干旱胁迫及复水对小麦苗期生长的影响及其生理机理[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
HAN Huimin. Effects of waters stress and re-watering at seedlings stage on wheat growth and its physiological mechanisms[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.
- [4] 姚宁, 宋利兵, 刘健, 等. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(12): 2 379-2 389.
YAO Ning, SONG Libing, LIU Jian, et al. Effects of water stress at different growth stages on the development and yields of winter wheat in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(12): 2 379-2 389.
- [5] 袁蕊, 李萍, 胡晓雪, 等. 干旱胁迫对小麦生理特性及产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2016, 44(10): 1 446-1 449, 1 466.
YUAN Rui, LI Ping, HU Xiaoxue, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics and yield of wheat[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2016, 44(10): 1 446-1 449, 1 466.
- [6] 郭相平, 张烈君, 王琴, 等. 拔节孕穗期水分胁迫对水稻生理特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(2): 125-129.
GUO Xiangping, ZHANG Liejun, WANG Qin, et al. Effects of Water stress on photosynthetic and physiological characteristics of rice in Jointing-Booting stage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2006, 24(2): 125-129.
- [7] 王伟, 蔡焕杰, 王健, 等. 水分亏缺对冬小麦株高、叶绿素相对含量及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2009, 28(1): 41-44.
WANG Wei, CAI Huanjie, WANG Jian, et al. Effects of water deficits on plant height, relative leaf chlorophyll contents and yield of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(1): 41-44.
- [8] 刘义国, 位国峰, 商健, 等. 不同滴灌量对冬小麦旗叶衰老及产量的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(10): 96-101.
LIU Yiguo, WEI Guofeng, SHANG Jian, et al. Effects of irrigation amount on the flag leaf senescence and yield of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(10): 96-101.
- [9] 王贺正, 马均, 李旭毅, 等. 水稻开花期抗旱性鉴定指标的筛选[J]. *作物学报*, 2005, 31(11): 1 485-1 489.
WANG Hezheng, MA Jun, LI Xuyi, et al. Screening identification indexes of drought resistance at flowering stage in rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(11): 1 485-1 489.
- [10] 李长明, 刘保国, 任昌福, 等. 水稻抗旱机理研究[J]. *西南农业大学学报*, 1993, 15(5): 410-413.
LI Changming, LIU Baoguo, REN Changfu, et al. Studies on drought resistance mechanism in rice[J]. *Journal of Southwest Agricultural*

- University, 1993, 15(5): 410-413.
- [11] 马廷臣. 全基因组表达分析不同耐旱性水稻根系对不同强度干旱胁迫反应研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- MA Tingchen. Differential global genomic changes in two rice cultivars roots in response to different drought stress[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.
- [12] 刘素军, 孟丽丽, 蒙美莲, 等. 马铃薯对块茎形成期水分胁迫及胁迫后复水的生理响应研究[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(10): 45-51.
- LIU Sujun, MENG Lili, MENG Meilian, et al. Different global genomic changes in two rice cultivars root in response to different drought stress[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(10): 45-51.
- [13] 张伟杨, 钱希昉, 李银银, 等. 土壤干旱对小麦生理性状和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(4): 491-500.
- ZHANG Weiyang, QIAN Xiyang, LI Yinyin, et al. Effect of soli drought on the physiological traits and grain yield of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(4): 491-500.
- [14] 刘庚山, 郭安红, 任三学, 等. 夏玉米苗期有限水分胁迫拔节期复水的补偿效应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 24-29.
- LIU Gengshan, GUO Anhong, REN Sanxue, et al. Compensatory effects of Re-watering on summer maize threatened by water stress at seedling period [J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(3): 24-29.
- [15] 田梦雨, 李丹丹, 戴廷波, 等. 水分胁迫下不同基因型小麦苗期的形态生理差异[J]. 应用生态学报, 2010, 21(1): 41-47.
- TIAN Mengyu, LI Dandan, DAI Tingbo, et al. Morphological and physiological differences of wheat genotypes at seedling stage under water stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1): 41-47.
- [16] 李彦彬, 朱亚南, 李道西, 等. 阶段干旱及复水对小麦生长发育、光合和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 76-82.
- LI Yanbin, ZHU Yanan, LI Daoxi, et al. Effect of water depth over paddy field on nitrogen and phosphorus in the water after storms at tillering stage [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 76-82.
- [17] LEVITT J. Responses of plant to environmental stresses[M]. New York: Academic Press, 1972.
- [18] TURNER N C. Drought resistance and adaptation to water deficits in crop plants[A]. In: Mussel H, Stapes R C, Stress physiology in crop plants[C]. New York: Wiley, 1979: 343-372.
- [19] 柴雨葳, 黄彩霞, 陆军胜, 等. 水分胁迫条件下低温对小麦幼苗生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(4): 53-58.
- CHAI Yuwei, HUANG Caixia, LU Junsheng, et al. Effects of low temperature on growth and development of wheat seedling under drought[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(4): 53-58.
- [20] 汤章城. 植物对水分胁迫的反应和适应性: II 植物对干旱的反应和适应性[J]. 植物生理学通讯, 1983, 19(4): 1-7.
- TANG Zhangcheng. Plant response and adaptability to water stress: II plant response and adaptability to drought[J]. Plant Physiology Communications, 1983, 19(4): 1-7.
- [21] 黄正金. 拔节及抽穗期水分胁迫对扬麦 20 生理特性及产量与品质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2016.
- HUANG Zhengjin. Effects of water stress at elongation and heading stages on physiological characteristics, grain yield and quality of Yangmai 20[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2016.
- [22] 邱新强, 高阳, 黄玲, 等. 冬小麦根系形态性状及分布[J]. 中国农业科学, 2013, 46(11): 2 211-2 219.
- QIU Xinqiang, GAO Yang, HUANG Ling, et al. Temporal and spatial distribution of root morphology of winter wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(11): 2 211-2 219.
- [23] 孟兆江, 贾大林, 刘安能, 等. 调亏灌溉对冬小麦生理机制及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 66-69.
- MENG Zhaojiang, JIA Dalin, LIU Anneng, et al. Effect of regulated deficit irrigation on physiological mechanism and water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(4): 66-69.

Effect of Drought Stress before Anthesis on Growth Indexes of Winter Wheat

LI Yanbin¹, FENG Ya^{1*}, BIAN Zepeng¹, LI Daoxi¹, ZHU Yanan²

(1.North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2.Changshu River Management Office, Changshu 215500, China)

Abstract: Due to the global climate change, the intensity, frequency and scope of influence of agricultural drought disasters are increasing. Wheat is an important food and economic crop in China and it occupies an important position in food production. Therefore, to explore how crops respond to the changes of drought environment, and improve the resistance to drought stress and adaptability to drought environment are the key scientific problems to be solved urgently. **【Objective】** To study the effect of drought stress on growth indexes of winter wheat. **【Method】** Select Zhoumai 22 as the test material, set up a full irrigation treatment (namely CK) during the whole growth period, and set mild drought in the jointing and heading stages (soil moisture content is controlled at 60%~70% of field water holding rate, namely T1, T4 treatment), moderate drought (soil moisture content controlled at 50%~60% of

field water holding rate, namely T2, T5 treatment) and severe drought (soil moisture content controlled at 40% of field water holding rate %~50%, namely T3 and T6 treatments), and continuous light drought (soil moisture content controlled at 60%~70% of field water holding rate, namely T7 treatment) and continuous moderate drought (soil moisture content) and jointing and heading stage. Controlled at 50%~60% of field water holding rate, namely T8 treatment), continuous heavy drought (soil moisture content controlled at 40%~50% of field water holding rate, namely T9 treatment), comparative analysis of winter wheat root morphology, the change process of root distribution, plant height and leaf area. **【Result】** The root length of the T1—T9 stages of the drought stress treatment were all lower than that of CK, but the total root length of the three treatment stages in the jointing stage increased with the depth of the drought; the root dry quality after continuous treatment was in light drought and medium under drought conditions, it was greater than single-stage treatment. Under severe drought conditions, the root characteristics including root length, root dry mass, and root surface area were significantly reduced; however, the root compensation and restoration ability of jointing treatment after rewatering was higher than that of heading. With the increase of drought stress and time, the root system expands and grows downwards, so that various root system indicators including root length, root dry quality, root surface area, etc. are transferred to the deep layer, but the total absolute amount of root system is significantly reduced. The root dry quality of T9 treatment is compared with CK Reduced by 64.79%, and the inhibition of plant height and leaf area increased. The jointing stage has a greater impact on plant height. Compared with CK, the plant height of T1, T2, and T3 treatments is reduced by 3.78%, 7.59%, and 16.09%; the heading stage has a greater impact on the leaf area, and the leaf area of T4, T5 and T6 treatments is compared CK decreased by 8.11%, 23.45%, and 29.43%; while the plant height and leaf area after continuous drought treatment were significantly lower than each single-stage treatment; the plant height and leaf area after drought stress treatment at heading stage were reduced after one week of drought stress Shows a strong compensation effect, but the jointing stage performance is relatively slow; there is no obvious compensation after continuous drought stress. **【Conclusion】** Continuous drought should be avoided in the actual production of winter wheat. If water control is required before flowering, the water supply at the jointing stage should be satisfied as much as possible, and the water control should be maintained at a light drought level during the heading stage.

Key words: drought and rewatering; winter wheat; root system; plant height; leaf area

责任编辑：陆红飞

关于评选优秀论文的公告

本刊已开启优秀论文评选活动，每年评选优秀论文 10 篇，每篇奖励 800 元，并颁发获奖证书，届时将在期刊网站首页展示，同时微信公众号推送。欢迎广大读者、作者积极向我刊投稿。

《灌溉排水学报》编辑部