

阶段干旱及复水对小麦生长发育、光合和产量的影响

李彦彬¹, 朱亚南^{1*}, 李道西¹, 高 阳²

(1. 华北水利水电大学 水利学院, 郑州 450000;

2. 中国农业科学院 农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002)

摘 要:【目的】研究不同生育阶段和不同程度干旱胁迫及复水对小麦生长发育、光合和产量的影响。【方法】以冬小麦品种“矮抗58”为试验材料,在拔节期、抽穗期和灌浆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%),和全生育期充分供水(土壤含水率控制在田间持水率的70%~80%,CK)4个水平,对比分析了不同阶段受旱及复水条件下冬小麦的生理生态指标变化过程。【结果】拔节期、抽穗期和灌浆期中度和重度水分胁迫对小麦的株高和叶面积的影响达到显著水平,其中拔节期为株高和叶面积的需求敏感期,株高较CK下降了18.6%和29.0%,叶面积较CK下降了18.2%和49.5%;水分胁迫处理小麦的净光合速率和气孔导度与CK差异显著,复水后,轻度水分胁迫下小麦的净光合速率和气孔导度与CK无显著差异,中度和重度水分胁迫下小麦的净光合速率和气孔导度与CK之间依然存在显著差异;从复水补偿角度来看,灌浆期小麦的净光合速率和气孔导度比拔节期和抽穗期更难恢复,其中灌浆期为光合作用的需求关键期,气孔导度较CK下降了28.7%、34.0%和49.4%,净光合速率较CK下降了10.5%、23.2%和28.0%。中度和重度水分胁迫对小麦的产量的影响达到显著水平;拔节期和抽穗期水分胁迫降低小麦的有效穗数和穗粒数,从而引起产量下降;灌浆期水分胁迫导致小麦千粒质量下降,进而引起产量降低。【结论】在本试验条件下,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求关键期,合理的加强灌浆期水分管理可实现高产。

关 键 词:小麦; 干旱; 复水; 光合; 产量

中图分类号: S279.2

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0555

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.

0 引 言

由于全球气候变化和人类活动的加剧,地球上的水循环状况发生了剧烈的变化,导致很多地区和流域发生了严重的水资源问题和水环境危机,水资源紧缺已成为限制农业可持续发展的瓶颈^[1-2]。随着农业灌溉用水的减少和干旱灾害的频繁发生,作物生长发育期间遭受干旱胁迫已经成为一种普遍现象。水分对作物的影响以及作物对水分的响应是十分复杂的,国内外的一些研究已经取得了一定的成果。岳文俊等^[3]研究了拔节期水分胁迫程度与盆栽小麦的生长发育和产量的联系;郝树荣等^[4]研究表明了苗期和拔节期短期轻度干旱复水对玉米的生长补偿效应最佳;柴雨葳等^[5]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。一些研究证明水分胁迫对作物生长发育并不完全是负效应,在某个生育阶段经过适度水分胁迫后复水对作物生长和产量有补偿效应且能够提高水分利用效率^[6-8];还有一些研究认为干旱复水后的产量补偿效应因生育阶段的不同而存在差异^[9-11];米娜等^[12]通过田间试验认为干旱程度能够定量表示土壤干旱状况,与玉米减产率存在定量关系,可以通过计算干旱程度来预测玉米的减产情况;国外的一些研究揭示了植株生长状况对干旱的响应及其对产量形成的影响^[13-14]。但多数试验是针对不同生育期的短期干旱胁迫,且

收稿日期:2017-09-11

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(17IRTSTHN026)

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:朱亚南(1990-),男,硕士研究生。E-mail: 1534755675@qq.com

存在试验区域性差异,而短期干旱和长期干旱胁迫的影响差异明显,关于小麦不同生育阶段乃至整个生育期对持久干旱响应的试验仍不多见。

研究不同生育阶段不同干旱程度复水后对作物生长发育和产量的影响,确定受旱恢复的需水时间、需水量等边界阈值十分重要,是优化灌溉制度和水资源高效利用的基础工作。尽管相关研究开始的较早,但干旱后复水对小麦生理特性和产量的影响指标仍没有较为系统深入的试验研究。为此,兹以黄淮海平原地区小麦为研究对象,研究不同生育阶段不同程度水分亏缺及复水对冬小麦生长发育和生理特性的影响,分析冬小麦的株高、叶面积、光合特性和产量对干旱的响应机理,为今后优化灌溉制度和预测干旱胁迫对小麦发展趋势的影响提供一定的技术依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2016年10月—2017年6月在中国农业科学院七里营综合试验基地(35°18'N, 113°54'E,海拔81 m)防雨棚下的桶栽试验区进行。试验区多年平均气温 14 ℃,无霜期 210 d,日照时间 2 399 h,降水量 580 mm。供试冬小麦品种为“矮抗 58”,于2016年10月15日播种,三叶一心时定株,每桶60株。试验在不同生育阶段设置不同的水分处理,详见表1。设置水分胁迫的生育阶段分别为拔节期、抽穗期和灌浆期;水分胁迫设置4个水平,即充分供水(土壤含水率控制在田间持水率的70%~80%)、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%),分别用CK、L、M和S表示。通过每日称质量控制土壤水分,每日灌水量为相邻2 d桶称质量之差,灌溉量以60 cm深土层计算,用量筒精确量取所需水量,每隔5 d采用烘干法测定计划湿润层(0~60 cm)土壤含水率,灌水使达到该处理水分控制上限。此外,试验设置1个全生育期充分灌水处理作为对照,试验共10个处理,每个处理重复3次。试验所用测桶的直径为40 cm,高为60 cm。每桶施加复合肥10 g(N、P₂O₅质量比为2:1),每桶装土体积质量控制为1.36 g/cm³。其中,N肥的50%基施,另外的50%在拔节期追施,所有处理冬小麦的P肥和K肥全部基施。

表1 桶栽试验设计

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

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%),分别用CK、L、M和S表示。通过每日称质量控制土壤水分,每日灌水量为相邻2 d桶称质量之差,灌溉量以60 cm深土层计算,用量筒精确量取所需水量,每隔5 d采用烘干法测定计划湿润层(0~60 cm)土壤含水率,灌水使达到该处理水分控制上限。此外,试验设置1个全生育期充分灌水处理作为对照,试验共10个处理,每个处理重复3次。试验所用测桶的直径为40 cm,高为60 cm。每桶施加复合肥10 g(N、P₂O₅质量比为2:1),每桶装土体积质量控制为1.36 g/cm³。其中,N肥的50%基施,另外的50%在拔节期追施,所有处理冬小麦的P肥和K肥全部基施。

1.2 观测项目

1)土壤含水率的测定。每天进行灌水量测定,记录灌水量,采用称质量法计算土壤含水率。干旱处理开始后每隔5 d采用烘干法测定计划湿润层(0~60 cm)土壤含水率,每隔20 cm取土1次,以确定灌水量,计算为:

$$W = \gamma HA(W_s - W_0) \quad (1)$$

式中:W为灌水量(g); γ 为土壤体积质量(g/cm³);H为计划湿润层(cm);A为桶的表面积(cm²);W_s为设计灌水上限(%);W₀为灌前土壤实测含水率(%)。

2)株高和叶面积。于拔节期、抽穗期和灌浆期水分胁迫中间时期在各处理中随机选取5株能够代表整体长势的植株,用直尺分别测定小麦叶长(从叶枕到叶尖的距离)和叶宽(叶面最宽处的距离),然后按照叶面积=叶长×叶宽×0.85计算其面积;用直尺分别测定小麦株高(抽穗前,用直尺量从旗叶叶尖到茎基的距离,抽穗后,从穗顶端量到茎基的距离),拔节期、抽穗期和灌浆期水分胁迫条件下测定日期为4月6日、21日和5月4日。

3)叶片光合作用参数。分别于拔节期、抽穗期和灌浆期,选择晴朗无风的天气,在09:00—11:00用LI-6400便携式光合仪(LI-COR,美国)测定叶片光合速率P_n,使用AP4植物气孔计测定气孔导度g_s。测定时设定CO₂摩尔分数为400 μmol/mol,流速设为500 μmol/(m²·s²),光强由系统自带的LED提供,设置为1 000 mmol/(m²·s²),拔节期选取生长一致且受光方向一致、叶位一致且完全展开的倒2叶,抽穗期和灌浆期选取生长一致且受光方向一致、叶位一致的旗叶,每个处理重复测定3次,水分胁迫条件下测定日期为4月8日、

23日和5月5日;复水5 d后再次测定小麦复水恢复后的光合作用参数(2~5 d为植物的一个复水恢复周期),测定日期为4月12日、28日和5月10日。

4)产量。人工收割小麦后,记录每桶的有效穗数,脱粒、晒干、计产,测定穗粒数和千粒质量。

1.3 统计分析

采用Microsoft Excel和DPS 12.01 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 不同生育阶段水分胁迫对小麦株高和叶面积的影响

图1给出了不同生育阶段不同水分胁迫程度下小麦株高和叶面积的变化。由图1可知,随着水分胁迫的加剧,小麦的株高和叶面积减少的程度加大;T1、T4和T7处理的株高和叶面积与CK无显著差异,而T2、T3、T5、T6、T8和T9处理的株高和叶面积与CK差异显著,这说明不同生育阶段轻度水分胁迫对小麦的株高和叶面积的影响不大,而中度和重度水分胁迫都显著降低了小麦的株高和叶面积。中度和重度水分胁迫时可以看出各个生育阶段对小麦的株高和叶面积的影响大小依次为:拔节期>抽穗期>灌浆期。拔节期中度和重度水分胁迫小麦株高和叶面积下降幅度最大,与CK相比,T2和T3处理的株高下降了18.6%和29.0%,T2和T3处理的叶面积下降了18.2%和49.5%;灌浆期中度和重度水分胁迫小麦株高和叶面积下降幅度最小,与CK相比,T8和T9处理的株高下降了5.0%和8.0%,T8和T9处理的叶面积下降了8.0%和10.0%。拔节-抽穗期是小麦株高和叶面积增长的关键需水期,是小麦茎、叶等器官营养生长的主要时期,此阶段受到水分胁迫会造成植株体内水分缺失,影响细胞分裂,从而导致株高和叶面积的显著下降,此生育期后,小麦的株高和叶面积变化不大,抽穗期以后小麦的生长发育主要转为生殖生长,而且水分胁迫也造成了小麦叶片提前变黄、衰老,故灌浆期株高和叶面积与CK接近。

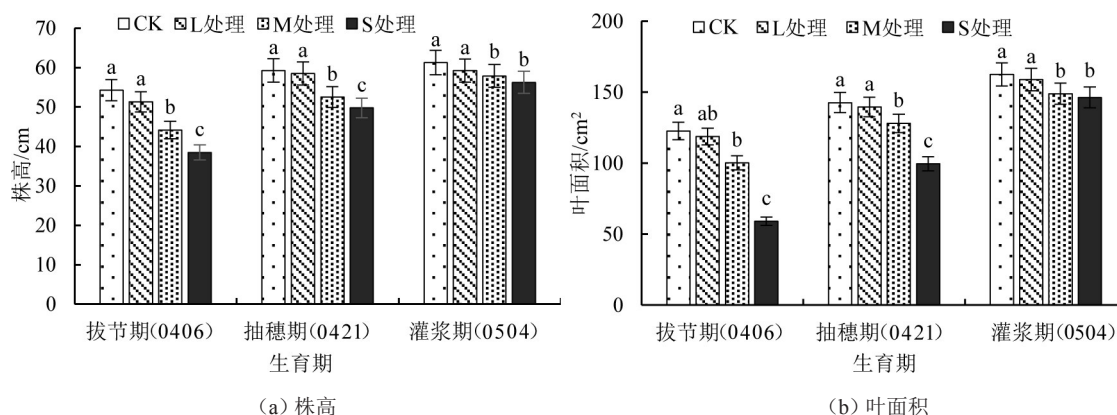


图1 不同生育阶段不同水分胁迫处理的小麦株高和叶面积

2.2 不同生育阶段水分胁迫及复水对小麦叶片气孔导度和净光合速率的影响

图2给出了不同生育期水分胁迫及复水后小麦叶片气孔导度的变化,图3给出了不同生育期水分胁迫及复水后小麦叶片净光合速率的变化。由图2(a)和图3(a)可知,随着水分胁迫程度的加剧,小麦叶片的气孔导度和净光合速率呈现出逐步下降的趋势。总体而言,任何程度的水分胁迫都会使小麦的净光合速率和气孔导度与CK出现显著性差异。拔节期、抽穗期和灌浆期3个生育时期中以灌浆期水分胁迫对小麦的净光合速率和气孔导度影响最为显著,相对于CK,T7、T8和T9处理的气孔导度分别下降了17.4%、33.2%和66%,净光合速率分别下降了22.1%、47.6%和58.1%。

由图2(b)和图3(b)可知,复水后小麦叶片的气孔导度和净光合速率都有所上升,T1和T4处理小麦的气孔导度与CK无显著差异,T2、T3、T5、T6、T7、T8和T9处理小麦气孔导度与CK均差异显著,但T7和T8处理小麦无显著差异;T1、T4和T7处理小麦的净光合速率与CK无显著差异,T2、T3、T5、T6、T8和T9处理小麦的气孔导度与CK差异显著。通过对比复水后与水分胁迫下小麦叶片的净光合速率和气孔导度,轻度水分胁迫复水后补偿效应明显,小麦叶片的净光合速率和气孔导度与CK无显著差异,中度和重度水分胁迫复水后补偿有限,小麦的光合作用依然受到显著抑制,小麦叶片的净光合速率和气孔导度与CK差异显著;同等水

分胁迫程度下,T7、T8和T9处理复水后小麦的光合指标受到的影响最为显著,相对于CK,T7、T8和T9处理的气孔导度分别下降了28.7%、34.0%和49.4%,T7、T8和T9处理的净光合速率分别下降了10.5%、23.2%和28.0%,和水分胁迫时相比与CK的差距已大大减小,这说明出现了较明显补偿效应,但恢复的程度不足以抵消减少的程度。

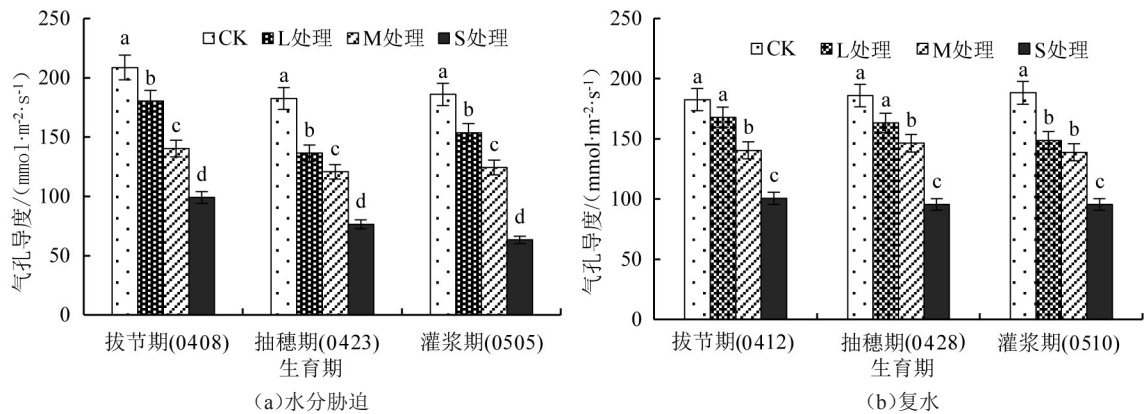


图2 不同生育期不同水分胁迫及复水后小麦的气孔导度

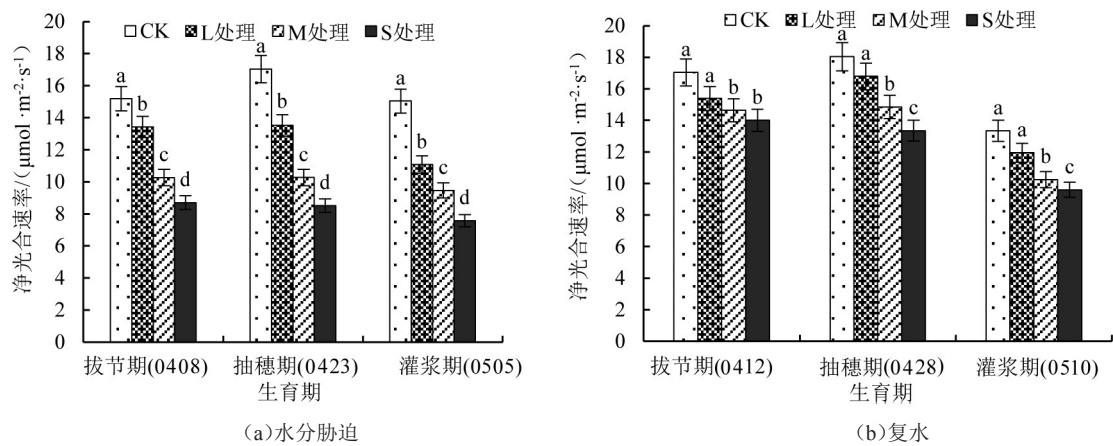


图3 不同生育期不同水分胁迫及复水后小麦净光合速率

2.3 不同水分胁迫处理对冬小麦产量及构成因子的影响

表2给出了不同水分胁迫处理下冬小麦产量及构成因子的变化。从表2可以看出,T1、T2、T3、T5、T6、T8和T9处理小麦的有效穗数和穗粒数与CK差异显著,这说明拔节期任何程度水分胁迫均能够显著降低小麦的有效穗数和穗粒数,抽穗期和灌浆期中度以上水分胁迫才能够显著降低小麦的有效穗数和穗粒数;T2、T3、T4、T5、T6、T7、T8和T9处理小麦的千粒质量与CK差异显著,这说明抽穗期和灌浆期任何程度水分胁迫均能够显著降低小麦的千粒质量,拔节期中度以上水分胁迫才能够显著降低小麦的千粒质量。同等水分胁迫下比较各个处理的有效穗数和穗粒数表现为:T7处理>T4处理>T1处理;T8处理>处理T5>T2处理;T9处理>T6处理>T3处理,结合各个水分处理与CK的差异性可以看出,拔节期水分胁迫对小麦的有效穗数和穗粒数的影响比抽穗期和灌浆期更为明显,与CK相比,T1、T2和T3处理的有效穗数下降了4.6%、23.1%和28.0%,T1、T2和T3处理的穗粒数下降了9.6%、19.7%和25.0%;比较各个处理的千粒质量表现为:T1处理>T4处理>T7处理;T2处理>T5处理>T8处理;T3处理>T6处理>T9处理,抽穗期和灌浆期水分胁迫对小麦的千粒质量的影响比拔节期更为明显,与CK相比,T7、T8和T9的千粒质量减少了9.8%、16.7%和22.8%。

表2 水分胁迫下小麦产量及其构成因子

处理	有效穗数/(个·桶 ⁻¹)	穗粒数/粒	千粒质量/g	平均单株产量/(g·株 ⁻¹)
CK	70.3a	51.2a	52.6a	1.64a
T1	67b	44.6b	48.6ab	1.59a
T2	54c	41.3c	46.5b	1.54b
T3	50.6d	38.4d	44.3c	1.33c
T4	68.5ab	47.6ab	47.8b	1.56 ab
T5	66.3b	44.5b	45.4bc	1.52b
T6	62.4bc	40.9c	42.1c	1.28c
T7	69.3ab	48.5ab	47.4b	1.5ab
T8	68.3b	44.7b	43.8c	1.47bc
T9	64.5bc	42.1c	40.6d	1.31c

注 同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

拔节期水分胁迫对小麦的有效穗数和穗粒数的影响比较大,抽穗期和灌浆期不同程度的水分胁迫对小麦千粒质量的影响较大。T1处理的平均单株产量与CK无差异,这表明拔节期轻度干旱水分胁迫对小麦的平均单株产量影响不大,T2、T3、T5、T6、T8和T9处理的平均单株产量与CK有显著差异,这说明抽穗期和灌浆期任何程度的水分胁迫都会导致小麦的平均单株产量显著下降。同等水分胁迫下比较各个处理的平均单株产量表现为:T1处理>T4处理>T7处理;T2处理>T5处理>T8处理;T3处理>T9处理>T6处理;灌浆期中度干旱对小麦平均单株产量的影响比拔节期和抽穗期中度干旱处理的大。

3 讨论

试验结果表明,不同处理之间小麦的株高与土壤含水率和生育阶段有关,总体来说任何程度的水分胁迫都不利于小麦株高的生长,且随着水分胁迫程度加剧而加剧。同等水分胁迫程度拔节期中度和重度水分胁迫小麦株高和叶面积下降幅度最大,与CK相比,T2和T3处理的株高下降了18.6%和29.0%,T2和T3处理的叶面积下降了18.2%和49.5%。拔节-抽穗期后小麦的生长发育主要是生殖生长而不再是茎、叶等器官的生长发育,抽穗期结束后小麦的株高基本不会再发生变化,灌水对小麦的节间伸长影响较弱。拔节—抽穗期为小麦株高和叶面积增长的敏感期,对株高和叶面积的影响远大于灌浆期,这与杨静敬等^[15]的研究结果一致。冬小麦的绿叶面积由于水分胁迫和小麦自身的生理特征因素在抽穗期结束后呈递减趋势,在收获期绿叶面积减少到最小。

随着水分胁迫程度的加深,小麦光合速率和气孔导度下降趋势逐渐加剧;拔节期、抽穗期和灌浆期任何程度水分胁迫对小麦的光合速率和气孔导度影响都较为显著。复水后小麦的光合速率和气孔导度均有一定程度的提升,但均低于CK,复水后出现了补偿效应^[16],复水后的补偿效应受胁迫阶段和胁迫程度影响,胁迫程度越大补偿效应越小。T1、T4和T7处理复水后补偿效应明显,小麦叶片的净光合速率和气孔导度与CK无差异,T2、T3、T5、T6、T8和T9处理复水后补偿有限,小麦叶片的净光合速率和气孔导度与CK差异显著,拔节期、抽穗期和灌浆期3个生育期中,灌浆期复水后小麦的光合指标受到的影响最为显著。影响T1、T4和T7处理小麦光合速率的因素主要是气孔因素,复水后叶片的气孔阻力变小,气孔对CO₂吸收的限制减弱,复水后光合作用未受到显著抑制;影响T2、T3、T5、T6、T8和T9处理光合速率的主要因素是小麦体内叶绿素量降低,激素水平改变,代谢紊乱,叶绿体的结构和功能遭到破坏,叶片细胞损伤,对叶片上的叶肉细胞造成永久性伤害,复水后光合作用依然受到显著抑制^[17-18]。

小麦作物的生长发育和最终产量的形成过程,实际上是作物与外界环境的能量交换过程,体现在光合作用和作物代谢后干物质积累的过程^[19],产量随着水分胁迫程度的加深,差异性愈发显著,T1、T4和T7处理小麦的产量与CK水平差异较小,T2、T3、T5、T6、T8和T9处理小麦的产量与CK差异较大。同等水分胁迫下拔节期小麦的有效穗数和穗粒数与CK之间的差异比抽穗期和灌浆期更为显著,而抽穗期和灌浆期小麦的千粒质量与CK的差异比拔节期更为显著,这与李尚忠^[20]、宋妮^[21]等的研究结果一致。这是因为拔节期水分胁迫下,小麦体内水分缺失,影响细胞分裂,导致小麦生长速率缓慢,植株矮小,导致结实小穗数减少,不孕小穗数增加,穗粒数减少;灌浆期水分胁迫改变了植物激素的水平,产生代谢变化,小麦通过分解已合成的蛋白质和脂类物质,加强呼吸作用,来适应和降低水分胁迫引起的代谢紊乱等负效应^[22],导致籽粒的蛋白质和脂类物质减少,引起千粒质量变小。与CK相比,T8处理的产量减少了10.3%,T2和T5处理的产量下降了6.0%和7.3%,主要因为灌浆期是小麦光合同化物向小麦籽粒转化的旺盛时期,小麦籽粒产量大部分来自灌浆期的光合同化产物^[23];与CK相比,T3、T6和T9处理的产量减少了18.9%、20.1%和21.9%,这与宋妮等^[21]盆栽试验的“同灌浆期同水分相比,拔节期水分胁迫对产量的影响更大”结果相左,而与赵世伟等^[24]研究结果一致,主要原因可能与拔节期和抽穗期复水后小麦的补偿生长有关。本次试验小麦采用桶栽方式,试验条件存在局域性,试验土体较小,蒸发量大,与大田实际生产存在一些差异,因而结果存在一定的局限性,还需要结合大田实验进一步深入研究,水分胁迫及复水对作物品质影响的研究,水分胁迫能够改善作物的品质,但其对蛋白质、可溶性糖及淀粉等成分也可能有相应的影响。

4 结论

1)拔节期、抽穗期和灌浆期中度和重度水分胁迫对小麦的株高和叶面积有显著影响,轻度水分胁迫对小麦的株高和叶面积无显著影响。拔节期为小麦株高和叶面积增长的关键需水期,株高较CK下降了18.6%

和 29.0%,叶面积较 CK 下降了 18.2%和 49.5%。

2)光合作用受抑制不仅发生在水分胁迫的控制过程中,复水后依然受到一定的抑制,其抑制程度与胁迫程度和生育阶段有关,灌浆期受到水分胁迫比拔节期和抽穗期更加难以恢复,气孔导度较 CK 下降了 28.7%、34.0%和 49.4%,净光合速率较 CK 下降了 10.5%、23.2%和 28.0%。

3)拔节期、抽穗期和灌浆期任何程度的水分胁迫都会使小麦的有效穗数、穗粒数和单株产量降低,中度和重度水分胁迫条件下小麦产量下降较为明显。拔节期和抽穗期水分胁迫导致小麦的结实小穗数减少,降低了小麦有效穗数和穗粒数,从而引起产量下降;灌浆期水分胁迫导致小麦千粒质量下降,籽粒干瘪,引起产量降低。

参考文献:

- [1] 张利平,陈小凤,赵志鹏,等. 气候变化对水文水资源影响的研究进展[J]. 地理科学, 2008, 27(3):60-67.
- [2] 张淑兰,于澎涛,张海军,等. 气候变化对干旱缺水区域中尺度流域水文过程的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(10):70-74.
- [3] 岳文俊,张富仓. 水分胁迫后复水对冬小麦生长及产量的影响[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 重庆, 2011:814-821.
- [4] 郝树荣,郭相平,王文娟. 不同时期水分胁迫对玉米生长的后效性影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7):71-75.
- [5] 柴雨葳,黄彩霞,陆明胜,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.
- [6] 高志红,陈晓远,刘晓英. 土壤水变动对冬小麦生长产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8):52-58.
- [7] 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.
- [8] 韩凯虹,张继宗,王伟娟,等. 水分胁迫及复水对华北旱区甜菜生长及品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(4):61-66.
- [9] 王俊儒,李生秀. 不同生育时期水分有限亏缺对冬小麦产量及其构成因素的影响[J]. 西北植物学报, 2000, 20(2):193-200.
- [10] 周秋峰,黄长志,王保林. 干旱胁迫对小麦生长发育及产量形成的影响[J]. 农业科技通讯, 2011(9):129-133.
- [11] 李钰春,袁淑杰,郭晓梅,等. 土壤水分条件对冬小麦生长发育及产量构成的影响[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(5):90-97.
- [12] 米娜,蔡福,张玉书,等. 不同生育期持续干旱对玉米的影响及其与减产率的定量关系[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5):1 563-1 570.
- [13] KATO Y, HIROSTU S, NEMOTO K, et al. Identification of QTLs controlling rice drought tolerance at seedling stage in hydroponic culture[J]. Euphytica, 2008, 160(3):423-430.
- [14] SEREGIN I V, KOZHEVNIKOVAA D. Strontium Transport, Distribution, and Toxic Effects on Maize Seedling Growth[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2004, 51(2):215-221.
- [15] 杨静敬,路振广,张玉顺,等. 水分亏缺对冬小麦生长发育及产量影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(1):116-120.
- [16] 何静丹,文仁来,田树云,等. 抽雄期干旱胁迫与复水对不同玉米品种生长及产量的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(3):408-415.
- [17] 刘丽平,欧阳竹,武兰芳,等. 阶段性干旱及复水对小麦光合特性和产量的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2 797-2 803.
- [18] 史吉平,董永华. 水分胁迫对小麦光合作用的影响[J]. 麦类作物学报, 1995(5): 49-51.
- [19] 袁永慧,邓西平. 干旱与复水对小麦光合和产量的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(7): 1 250-1 254.
- [20] 李尚中,王勇,樊廷录,等. 水分胁迫对冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 甘肃农业科技, 2007(10):3-6.
- [21] 宋妮,黄修桥,孙景生,等. 水分胁迫对盆栽冬小麦产量和部分品质性状的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(3): 476-479.
- [22] 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.
- [23] 郑灵祥. 作物(小麦、玉米)对水分胁迫的生理生化反应的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2010.
- [24] 赵世伟,管秀娟. 不同生育期干旱对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2001, 20(4):56-59.

Effects of Alternating Drought and Watering on Growth, Photosynthesis and Yield of Winter Wheat

LI Yanbin¹, ZHU Yanan^{1*}, LI Daoxi¹, GAO Yang²

(1.College of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, China;

2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China)

Abstract:【Objective】The purpose of this paper is to study the effect of alternating water stress and rehydration on growth, photosynthesis and yield of winter wheat at different growth stages.【Method】We took the variety of Aikang 58 as the model plant and examined four levels of water stress: slight water stress (60%~70% of field capacity), moderate water stress (50%~60% of field capacity), severe water stress (40%~50% of field capacity) with each occurring at jointing, or heading or filling stages. The control (CK) was to keep the soil moisture at 70%~80% of field capacity. In each treatment, we measured the physiological and growth characteristics under different drought-watering cycles.【Result】Moderate and severe water stress occurring at the jointing, heading and filling stage significantly reduced plant height and leaf area, especially at the jointing stage where moderate

and severe water stress reduced the plant height by 18.6% and 29.0% and leaf by 18.2% and 49.5%, respectively, compared to the CK. Net photosynthetic rate and stomatal conductance were sensitive to water stress. Watering can restore the reduced net photosynthetic rate and stomatal conductance after a slight water stress, but not after a moderate or severe drought. The net photosynthetic rate and stomatal conductance were more difficult to recover after moderate or severe drought occurring at the filling stage than occurring at the jointing or heading stage. Grain filling stage was most water-demanded for photosynthesis, during which slight, moderate and severe drought reduced the stomatal conductance by 28.7%, 34.0% and 49.4%, and the net photosynthetic by 10.5%, 23.2% and 28.0%, respectively, compared to the CK. The yield under moderate and severe water stress differed significantly, and water stress during the jointing and heading period reduced not only panicle number and the number of grains per spike, but also the yield and 1000-grain weight. **【Conclusion】** A slight water stress can save water without compromising yield. The grain filling stage is the key period for wheat photosynthesis and keeping sufficient water at this stage is critical to achieve high yield.

Key words: wheat; drought; re-watering; photosynthesis; yield

责任编辑:陆红飞

(上接第75页)

Effect of Water Depth over Paddy Field on Nitrogen and Phosphorus in the Water After Storms at Tillering Stage

WANG Jiao^{1,2}, YU Shuang'en^{1,2*}, WANG Mei^{1,2}, ZHANG Yidi^{1,2}, GAO Shikai^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Efficient Irrigation-drainage and Agricultural Soil-water Environment in Southern China Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: **【Objective】** Canopy density at tillering stage is low and the biofilm crust has yet formed. Rainstorm splash at this stage could therefore break the fragile soil crust resulting in soil erosion, and nitrogen and phosphorus loss from the paddy field. The purpose of this study is to investigate the impact of water depth over paddy field on this process. **【Method】** The experiments measured the changes in nitrogen and phosphorus concentrations in the surface water following rainstorms under three pre-storm water depths: shallow, moderate and deep. **【Result】** After a rainstorm, the concentration of nitrogen and phosphorus in all treatments increased steadily, especially when initial water depth was relatively shallow. Few days after the storm, the concentrations attenuated. The loads of nitrogen and phosphorus one day after a storm under different treatments were ranked in shallow>moderate>deep. **【Conclusion】** To abate non-point source pollution, drainage immediately after a rainstorm should be avoided. If drainage is indeed necessary, it should wait for at least four days until the concentration of nitrogen and phosphorus in the surface water declined to steady state.

Key words: Rainstorm; water depth; nitrogen and phosphorus load; rice

责任编辑:刘春成