

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.19175

# 生长后期干旱复水对饲草大麦产量、品质及叶绿素含量的影响

徐银萍, 潘永东\*, 刘强德, 任 诚, 姚元虎, 贾延春,  
陈文庆, 火克仓, 包奇军, 赵 锋, 张华瑜

(甘肃省农业科学院经济作物与啤酒原料研究所, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 为研究水分胁迫对饲草大麦生长、产量、籽粒关键品质和相关生理指标的影响, 于 2017 ~ 2018 年采用盆栽称重控水法对甘饲麦 1 号进行以干旱胁迫持续时间 (T) 为主因素 (10、20、30 d) 和旱后复水量为副因素 (W1、W2 和 W3) 的裂区试验, 测定其株高、穗长、生育期、单株产量及构成因子、关键品质指标以及叶绿素含量的变化。结果显示: 干旱胁迫时间显著影响了各项测定指标, 各项测定指标均表现出随着干旱胁迫时间的延长其显著降低, 指标测定值均表现出 T1>T2>T3。较 T1, T2 和 T3 处理的株高显著降低了 10.87 和 16.26 cm, 生育期显著提前了 5.12 和 14.00 d; 穗粒数、千粒重和单株产量分别显著降低了 37.77% 和 67.06%、15.68% 和 30.62%、28.72% 和 69.09%; 籽粒蛋白质含量显著提高了 4.33% 和 10.16%, 籽粒淀粉含量显著降低了 5.65% 和 22.78%, 籽粒饱满度显著降低了 12.83% 和 18.95%。在同一胁迫期内, 除了籽粒蛋白质含量以外, 其余各项测定指标值均随着复水量的减少而不同程度的降低, 指标测定值均表现为 W1>W2>W3, 且在 T2 和 T3 胁迫期下较对照 W1, W3 降低尤为明显。通过测定饲草大麦叶片叶绿素含量发现: 在 T1 和 T2 持续胁迫时间下, 复水后 W1 和 W2 处理存在显著的补偿效应, 而 W3 以及 T3 持续胁迫时间的所有复水处理均未产生显著的补偿效应。说明甘饲麦 1 号干旱复水补偿效应的利用应注意干旱胁迫持续时间不超过 20 d (土壤最大持水量的 60% ~ 65%), 旱后复水量不低于田间土壤最大持水量的 55% ~ 60% 为宜。

**关键词:** 干旱胁迫; 复水; 饲草大麦; 生长; 产量; 品质; 叶绿素

干旱胁迫是限制植物生长和生态系统生产力的主要因素之一<sup>[1]</sup>, 不仅影响植物生长和发育, 而且造成土地荒漠化以及生态环境的恶化, 是导致农牧业减产的首要环境因素<sup>[2]</sup>, 其影响超过其他环境胁迫的总和<sup>[3]</sup>。因此, 发展节水农业, 是实现农业可持续发展的重要途径, 其中生物节水较之农艺节水、工程节水和管理节水有着独特的优势<sup>[4]</sup>, 而植物抗旱能力的鉴定也是节水农业研究的重要组成部分, 植物的抗旱能力表现为对干旱胁迫的抵抗能力和旱后复水的快速生长能力, 复水后的生长过

程在作物抗旱中的意义相对更重要<sup>[5-6]</sup>。干旱后复水能够使植物的生理功能得到恢复, 可在一定程度上弥补干旱对植物造成的伤害<sup>[7]</sup>。植物在不同生育时期受旱对其物候期和产量的影响不同, 最终的产量损失不仅与胁迫强度有关, 还与植物的生长阶段有关<sup>[8-13]</sup>。饲草大麦等大田作物的后期生长阶段是对水分胁迫较为敏感的时期, 在此阶段水分胁迫直接影响作物的形态结构和生理生态指标, 进而影响其生长状况和产量<sup>[14-18]</sup>。有研究表明灌浆期缺水则会使小麦籽粒小而瘪<sup>[19]</sup>。灌浆期干旱可以明显影响小麦的灌浆速率, 而使小麦灌浆时间缩短, 显著影响小麦粒重和最终产量<sup>[20-21]</sup>。

饲草大麦是很好的谷物饲料, 除能量低于玉米外, 其氨基酸组成齐全, 可消化蛋白质含量高, 并含有较高的蛋白质和赖氨酸及大量的维生素和矿物质, 是精制优质混合饲料的主要原料, 在我国北方一些地区, 饲草大麦和燕麦一样是一种重要的一年生青饲料。但是目前关于饲草大麦的研究工作更多注重于新品种选育方面, 而关于其抗旱节水机理机制方面的研究还是一个空白。为此, 本研究以甘饲

收稿日期: 2019-04-24; 录用日期: 2019-06-24

基金项目: 甘肃省国际科技合作项目 (17YF1WA156); 甘肃省农业科学院农业科技创新专项科技支撑计划 (2018GAAS02); 甘肃省农业科学院科研条件建设及成果转化中青年基金项目 (2017GAAS74); 国家大麦 (青稞) 现代农业产业技术体系 (CARS-05); 甘肃省科技重大专项计划 (18ZD2NA008-4)。

作者简介: 徐银萍 (1978-), 女, 甘肃民勤人, 助理研究员, 硕士, 主要从事大麦青稞新品种选育与高效栽培技术研究工作。

E-mail: xuyinping7810@163.com。

通讯作者: 潘永东, E-mail: panyongdong1010@163.com。

麦1号为材料,以其生长后期为研究对象,探明在不同持续胁迫时间下,不同复水量对其生长、单株产量及其构成因素、关键品质及叶绿素变化特性。为培育抗旱、高产、优质兼备的饲草大麦新品种,以及缓解水资源危机,保障国家粮食安全、生态安全和社会可持续发展均具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于2017~2018年连续2年在甘肃省农业科学院旱地农业研究所抗旱棚进行,本试验供试品种为甘肃省农业科学院选育的饲草大麦新品种甘饲麦1号,采用盆栽土培方法进行,桶高30 cm,直径20 cm,桶底打孔;每桶装土6 kg,土壤取自试验地耕层20 cm,土壤理化性质为:有机质26.7 g/kg,碱解氮81.3 mg/kg,有效磷11.2 mg/kg,速效钾197 mg/kg,pH值8.3。每桶施磷酸二铵2 g、尿素3 g作为基肥一次施入,饲草大麦生育期不予追肥。试验为裂区设计,胁迫时间(T)为主因素,设置3个水平分别为:T1(胁迫10 d)、T2(胁迫20 d)、T3(胁迫30 d),土壤含水量分别控制在30%~40%、20%~30%、10%~20%;复水量(W)为副因素,设置3个水平分别为W1(CK)、W2和W3,分别是土壤含水量为田间土壤最大持水量的75%~80%(CK)、55%~60%和35%~40%共9个处理,每处理3次重复,每重复3盆。于3月15日(2017年)和3月13日(2018年)播种,出苗后每盆定植15株,干旱胁迫于5月20日(2017年、2018年)饲草大麦孕穗期开始,采用称重法控水,每天傍晚称重1次,并补充水分,保持各处理的土壤含水量基本稳定。自胁迫之日起每隔一周,即于5月20日、5月27日、6月2日、6月9日、6月16日、6月23日、6月30日测定各处理旗叶叶绿素含量。待饲草大麦完全成熟,统一收获后考种和品质测定。

### 1.2 测定项目与方法

饲草大麦籽粒蛋白质和淀粉含量采用瑞典FOSS公司生产的1241近红外快速品质分析仪测定,饱满度采用德国SORTMAT公司生产的型号为K3的分级筛测定,千粒重数1000粒称其重,叶绿素含量采用SPAD-502叶绿素仪测定。

### 1.3 数据统计方法

测定数据使用Excel 2007软件进行数据统计,

采用SPSS 18.0统计软件进行数据分析。数据均为2017和2018两年数据的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同胁迫时间和复水处理对饲草大麦生长特性的影响

由表1可见,干旱胁迫时间显著影响饲草大麦株高、穗长以及生育期,随着胁迫时间的延长,饲草大麦株高、穗长以及生育期显著降低。从T1到T3株高均值介于78.96~62.70 cm之间,T2和T3较T1株高分别显著降低了10.87和16.26 cm。在同一胁迫时间内大麦株高均随着复水量的减少而降低,W2和W3较对照W1株高分别降低了0.95和7.65 cm(T1)、3.83和4.58 cm(T2)、2.97和6.05 cm(T3)。从T1到T3大麦穗长均值介于9.05~6.87 cm之间,T2和T3较T1分别降低了1.38和2.18 cm,同一胁迫时期内大麦穗长均随着复水量的减少而变短,较对照W1,W2和W3穗长分别变短了1.07和1.77 cm(T1)、0.17和0.25 cm(T2)、0.31和0.1 cm(T3)。随着胁迫时间的延长和复水量的减少大麦生育期显著提前,从T3到T1大麦生育期均值介于91.98~105.98 d,T2和T3较T1生育期显著提前了5.12和14.00 d。较对照W1,W2和W3生育期分别缩短了3.92和6.08 d(T1)、0.23和2.73 d(T2)、2.99和4.06 d(T3)。

表1 不同胁迫时间和复水处理对饲草大麦生长特性的影响

干旱胁迫时间	复水量	株高 (cm)	穗长 (cm)	生育期 (d)
T1 (10 d)	W1	81.83a	10.00a	109.31a
	W2	80.88a	8.93a	105.39b
	W3	74.18b	8.22a	103.23c
	平均	—	78.96A	9.05A
T2 (20 d)	W1	70.89a	7.81a	101.85a
	W2	67.06b	7.64a	101.62b
	W3	66.31b	7.56a	99.12b
	平均	—	68.09B	7.67AB
T3 (30 d)	W1	65.71a	7.00a	94.33a
	W2	62.74b	6.69a	91.34b
	W3	59.66c	6.90a	90.27b
	平均	—	62.70C	6.87B

注:同列数据后标大写字母表示胁迫时间T之间差异显著,小写字母表示复水量W之间差异显著( $P<0.05$ );下同。

### 2.2 不同胁迫时间和复水处理对饲草大麦单株产量和产量构成因子的影响

整体而言胁迫时间和复水量均对饲草大麦单株

产量及其构成因子产生了明显的影响(表2),随着胁迫时间的延长和复水量的减少,饲草大麦穗粒数、千粒重以及单株产量均表现出不同程度的下降。由T1到T3穗粒数、千粒重和单株产量的均值分别介于26.63~15.94粒、51.27~39.25g和3.72~2.20g之间。T2和T3较T1穗粒数、千粒重和单株产量分别显著降低了37.77%和67.06%、15.68%和30.62%、28.72%和69.09%。在T1胁迫期内较对照W1水平,W2和W3穗粒数、千粒重和单株产量分别降低了7.29%和9.77%、0.72%和5.84%、13.75%和30.56%,且单株产量3个复水水平之间差异达到显著水平。在T2胁迫时期内3个复水水平之间除了穗粒数差异不显著外,千粒重和单株产量差异均达到显著水平。较对照W1,W2和W3穗粒数、千粒重和单株产量分别降低了4.83%和12.94%、4.35%和7.87%、8.11%和30.95%。T3胁迫时期内W3较W1其穗粒数、千粒重和单株产量分别显著降低了12.59%、18.71%和12.32%;较W1,W2穗粒数与其接近,而千粒重和单株产量较W1分别显著降低了4.04%和11.79%。

表2 不同胁迫时间和复水处理对饲草大麦单株产量和产量构成因子的影响

干旱胁迫时间	复水量	穗粒数(粒)	千粒重(g)	单株产量(g)
T1 (10 d)	W1	28.10a	52.36a	4.22a
	W2	26.19a	51.99a	3.71b
	W3	25.60a	49.47a	3.24c
	平均	—	26.63A	3.72A
T2 (20 d)	W1	20.42a	46.08a	3.20a
	W2	19.48a	44.16b	2.96b
	W3	18.08a	42.72c	2.52c
	平均	—	19.33B	2.89B
T3 (30 d)	W1	16.45a	41.70a	2.37a
	W2	16.77a	40.08b	2.12b
	W3	14.61b	35.97c	2.11b
	平均	—	15.94C	2.20C

### 2.3 不同胁迫时间和复水处理对饲草大麦籽粒关键品质的影响

由表3可见,胁迫时间显著影响大麦籽粒蛋白质含量,随着胁迫时间的延长大麦籽粒蛋白质含量显著变高,由T1到T3籽粒蛋白质均值介于12.01%~13.23%,T2和T3较T1其籽粒蛋白质含量分别显著提高了4.33%和10.16%。同一胁迫时期内不同复水水平之间均表现出籽粒蛋白质含量随着

复水量的减少而稍有增高的趋势,较对照W1,W2和W3籽粒蛋白质含量分别增加了2.54%和2.54%(T1)、0.81%和2.42%(T2)、1.54%和3.85%(T3)。大麦籽粒淀粉含量随着胁迫时间的延长和复水量的减少呈现出逐渐降低的趋势,由T1到T3饲草大麦籽粒淀粉含量均值介于56.87%~46.32%,T2和T3较T1显著降低了5.65%和22.78%,在同一胁迫时期内,籽粒淀粉含量均随着复水量的减少而降低,但复水水平之间差异均不显著。较对照W1,W2和W3大麦籽粒淀粉含量分别降低了0.88%和1.95%(T1)、2.05%和2.82%(T2)、3.30%和5.15%(T3)。大麦籽粒饱满度呈现出和籽粒淀粉含量相同的变化趋势,即随着胁迫时间的延长和复水量的减少其逐渐降低,由T1到T3大麦籽粒饱满度均值介于89.81%~75.50%,T2和T3较T1饱满度显著降低了12.83%和18.95%,在同一胁迫时期内较对照W1,W2和W3的大麦籽粒饱满度分别降低了0.33%和0.22%(T1)、0.95%和5.22%(T2)、1.06%和1.87%(T3)。

表3 不同胁迫时间和复水处理对饲草大麦关键酿造品质的影响 (%)

干旱胁迫时间	复水量	蛋白质	淀粉	饱满度
T1 (10 d)	W1	11.80a	57.40a	90.10a
	W2	12.10a	56.90a	89.80a
	W3	12.10a	56.30a	89.60a
	平均	—	12.01A	56.87A
T2 (20 d)	W1	12.40a	54.70a	84.60a
	W2	12.50a	53.60b	83.80a
	W3	12.70a	53.20b	80.40a
	平均	—	12.53B	53.83B
T3 (30 d)	W1	13.00a	53.10a	76.20a
	W2	13.20a	51.40a	75.40ab
	W3	13.50a	50.50a	74.80b
	平均	—	13.23C	46.32C

### 2.4 不同胁迫时间内不同复水量饲草大麦叶绿素的变化

由图1可以看出,在T1胁迫时间处理下,5月20日和5月27日即复水前3个复水处理之间叶绿素含量接近;而自5月30日复水后,同一测定日内饲草大麦叶绿素含量始终呈现出W1>W2>W3,且3个复水处理之间差异显著。随着测定日期的向后推移,W1和W2处理的叶绿素含量呈现出先逐渐升高后降低的趋势,且高峰值均出现在

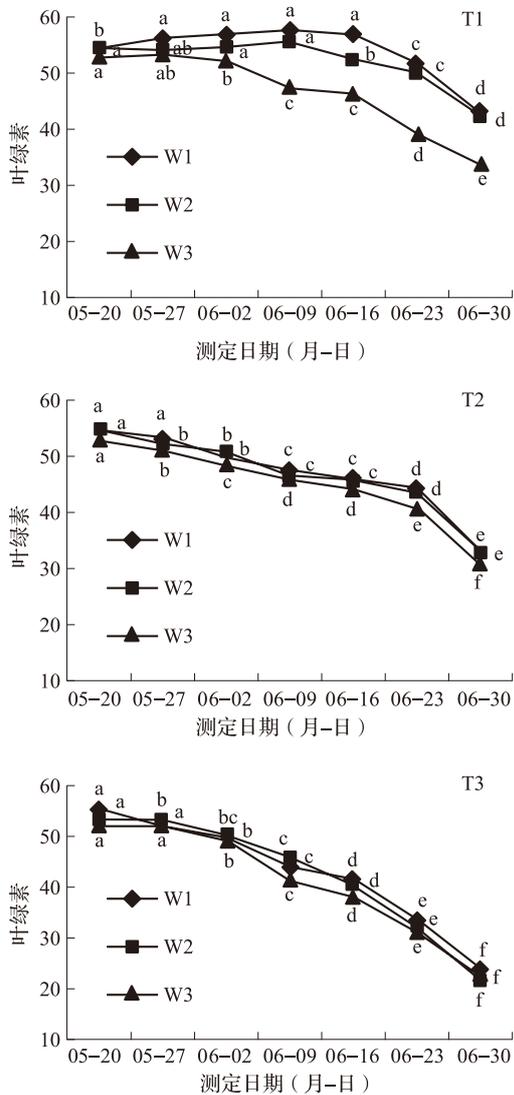


图1 不同胁迫时间下不同复水处理饲草大麦叶片叶绿素含量的变化

注: 不同小写字母表示不同复水量间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

6月9日, 这是因为干旱胁迫后复水饲草大麦生理功能得到一定程度的恢复, 具有一定的补偿效应; 而W3复水处理却呈现出随着测定日期的向后推移其叶绿素含量逐渐降低, 说明干旱胁迫后复水W3处理未产生明显补偿效应。方差分析表明: 同一复水处理不同测定日期之间在6月9日之前表现出相邻测定日之间差异不显著或无明显变化趋势, 而6月16日、6月23日和6月30日测定的数据显示随着测定日期的推后其叶片叶绿素含量显著降低。在T2胁迫时间内, W1、W2和W3处理的叶绿素含量较为接近, 同一测定日里3个复水处理之间差异不显著, 3个复水处理均呈现出随着测定日期的后推其叶片叶绿素含量显著降低, 且在6月9日后其叶绿素含量

降低趋势尤为明显。仅在复水后两次测定日(6月16日和6月23日)中W1与W2复水处理具有补偿效应, 而其余处理均未产生补偿效应。在T3胁迫时间内, 3个复水处理的叶绿素含量较为接近, 同一测定日期中3个复水处理之间差异均不显著, 3个复水处理均显示出随着测定日期的后推其显著降低。

### 3 结论与讨论

作物生长既受遗传因素的影响, 又受环境条件的制约。当环境发生变化时, 作物将通过结构的变化和功能的调节做出相应响应, 作物的生长动态可视为经过体内许多变化及自适应后最终表现出的综合效应。本研究中胁迫时间显著影响了大麦株高、穗长以及生育期, 一致表现出  $T1 > T2 > T3$ , 复水量也不同程度的影响了大麦株高、穗长以及生育期, 相同胁迫期内始终表现出  $W1 > W2 > W3$  的变化趋势, 且在3个胁迫期下较对照W1, W3除了穗长与其接近外, 株高变矮和生育期提前程度尤为明显。说明干旱胁迫可加速作物衰老, 缩短其生育期, 这与杨贵羽等<sup>[22]</sup>、姚宁等<sup>[23]</sup>和文汉等<sup>[24]</sup>在小麦和水稻上的研究结果相吻合; 郭相平<sup>[25]</sup>、陈晓远等<sup>[26]</sup>的研究表明, 胁迫期间作物根系平均长度和根冠比提高, 株高相对增加速率可超过对照, 而本研究中未涉及干旱胁迫对大麦根系和根冠比的研究问题, 且研究结果显示在T1胁迫期内W1和W2处理的株高和生育期接近, 而在T2和T3胁迫期内W2和W3株高和生育期接近; 干旱胁迫时间显著影响了大麦穗长, 但是在相同胁迫期内W1、W2和W3处理穗长较为接近。

水分是影响作物产量稳定性的一个极为重要的栽培环境因子, 以往关于水分胁迫对作物产量影响的研究很多, 大多认为胁迫在减少水分消耗的同时, 必然造成作物减产<sup>[27-29]</sup>。本研究结果表明, 干旱胁迫时间显著影响饲草大麦穗粒数、千粒重和单株产量, 由T1到T3穗粒数、千粒重和单株产量分别介于26.63 ~ 15.94粒、51.27 ~ 39.25g和3.72 ~ 2.20g之间。在T1胁迫期内单株产量3个复水处理之间差异达显著水平。在T2胁迫时期内3个复水处理千粒重和单株产量差异均达到显著水平。T3胁迫时期内W3较W1其穗粒数、千粒重和单株产量分别显著降低了12.59%、18.71%和12.32%; 较W1, W2穗粒数与其接近, 而千粒重和单株产量较W1分别显著降低了4.04%和

11.79%。说明随着干旱胁迫程度的加重即复水量的减少,大麦穗粒数、千粒重和单株产量逐渐降低,其中,W3较对照W1处理下降尤为明显,差异均达到显著水平。饲草大麦生长后期干旱可以明显影响饲草大麦灌浆速率,缩短饲草大麦灌浆时间,从而显著影响饲草大麦最终产量的形成。这与姚宁等<sup>[23]</sup>在冬小麦,陈小荣等<sup>[29]</sup>在水稻上的研究结果一致。

虽然大麦籽粒蛋白质含量、淀粉含量等关键品质因素主要受到遗传因子的控制,本研究中胁迫时间显著影响了大麦籽粒关键品质,不同胁迫时间之间大麦关键品质之间差异均达到显著水平,而在相同胁迫时间内除了T3处理下W1和W3水平之间差异显著外,其余复水处理之间差异均不显著。说明虽然大麦籽粒蛋白质含量和淀粉含量是遗传相对稳定的指标,受环境胁迫因子影响相对较小,但是在本研究中其不同程度的受到了干旱胁迫的影响。本研究发现,在干旱胁迫持续10d的情况下,饲草大麦籽粒蛋白质含量升高程度与淀粉含量及饱满度降低程度不明显;而胁迫时间持续达20d以上,饲草大麦籽粒蛋白质含量提高,淀粉含量和饱满度降低幅度较大。相同胁迫时期内随着复水量的减少饲草大麦籽粒蛋白质含量、淀粉含量以及饱满度均有不同程度的升高和降低,较对照W1处理,W3处理变化尤为明显。说明重度干旱胁迫可以促进饲草大麦籽粒蛋白质的积累,但不利于饲草大麦籽粒淀粉的积累形成。大麦籽粒饱满度随着干旱胁迫时间的持续和复水量的减少而降低是由于大麦生长后期干旱胁迫,明显影响大麦灌浆速率、缩短灌浆期,不利于籽粒干物质的积累,这也与姚宁等<sup>[23]</sup>在冬小麦上的研究一致,且本研究中饲草大麦千粒重的变化也印证了这一点。此外,为什么干旱胁迫持续的时间越久和干旱胁迫程度越重饲草大麦籽粒的蛋白质含量越高而淀粉含量越低?本研究均未涉及,所以干旱胁迫对大麦籽粒蛋白质和淀粉合成的机理机制问题还需进一步的探索研究。

叶绿素含量测定技术可以用来快速、灵敏和非破坏性地分析逆境因子对其光合作用的影响。叶片是植物进行光合作用的主要器官,其内的叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,叶绿素含量的高低在一定程度上可以衡量植物抗逆性强弱。有研究表明,干旱胁迫造成叶绿素分解,叶绿素含量降低<sup>[30-31]</sup>。但也有研究者在小麦<sup>[32]</sup>、金银花<sup>[33]</sup>得出相反的结论,植物在干旱胁迫下,其叶片叶绿素

含量会显著增加。本研究结果发现,在T1和T2胁迫期下,复水处理W1和W2存在显著的补偿效应,说明干旱胁迫后复水可以促进大麦叶片叶绿素的合成,这与以上小麦<sup>[32]</sup>和金银花<sup>[33]</sup>上的研究结果相一致;而T3胁迫期的所有复水处理以及T1和T2胁迫期的W3处理均未产生显著的补偿效应,说明重度的干旱胁迫造成了大麦叶片中叶绿素分解,从而使叶绿素含量降低,这与关义新等<sup>[30]</sup>和Schreiber等<sup>[31]</sup>的研究结果一致。说明饲草大麦干旱复水补偿效应的利用应注意水分胁迫持续时间和胁迫程度。

随着干旱胁迫时间的延长各项测定指标均显著降低,测定值表现出T1>T2>T3;在同一胁迫期内,各项指标测定值均表现为W1>W2>W3(籽粒蛋白质含量除外),且在T2和T3胁迫期下较对照W1,W3降低尤为明显。干旱胁迫10和20d情况下,复水后W1和W2处理存在显著的补偿效应。说明甘饲麦1号干旱复水补偿效应的利用应注意干旱胁迫持续时间不超过20d(土壤最大持水量的60%~65%),旱后复水量不低于田间土壤最大持水量的55%~60%为宜。

#### 参考文献:

- [1] 莱斯特·布朗,布里安·海尔威尔,陈佑启,等. 中国的水源短缺将震撼世界的食物安全[J]. 中国农业资源与区划, 1998, 19(4): 5-10.
- [2] 陈善福,舒庆尧. 植物耐干旱胁迫的生物学机理及其基因工程研究进展[J]. 植物学报, 1999, 16(5): 555-560.
- [3] 曲涛,南志标. 作物和牧草对干旱胁迫的响应及机理研究进展[J]. 草业学报, 2008, 17(2): 126-135.
- [4] 陈兆波. 生物节水研究进展及发展方向[J]. 中国农业科学, 2007, 40(7): 1456-1462.
- [5] Chaves M M, Oliveira M M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture [J]. Journal of Experimental Botany, 2004, 55: 2365-2384.
- [6] 曹丹. 不同抗性玉米品种苗期干旱及复水过程中的生理响应[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2015.
- [7] 赵丽英,邓西平,山仑. 水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J]. 应用生态学报, 2004, (3): 523-526.
- [8] Çakir R. Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn [J]. Field Crops Research, 2004, 89(1): 1-16.
- [9] Claassen M, Shaw R H. Water deficit effects on corn. I. grain components [J]. Agronomy Journal, 1970, 62(5): 652-655.
- [10] Doorenbos J, Kassam A H. Yield response to water [M]. Rome: Wood and Agriculture Organization of the United Nations, 1979.
- [11] 王晨阳,郭天财,彭羽,等. 花后灌水对小麦籽粒品质性状

- 及产量的影响 [J]. 作物学报, 2004, 30 (10): 1031-1035.
- [12] 胡继超, 曹卫星, 姜东, 等. 小麦水分胁迫影响因子的定量研究 [J]. 作物学报, 2004, 30 (4): 315-320.
- [13] 陈晓远, 罗远培. 开花期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究 [J]. 作物学报, 2001, 27 (4): 512-516.
- [14] 程宪国, 汪德水, 张美荣, 等. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响 [J]. 中国农业科学, 1996, 29 (4): 67-74.
- [15] 王俊儒, 李生秀. 不同生育时间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.
- [16] 申孝军, 孙景生, 刘祖贵, 等. 灌水控制下限对冬小麦产量和品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 6 (12): 58-65.
- [17] 胡梦芸, 张正斌, 徐萍, 等. 亏缺灌溉下小麦水分利用效率与光合产物积累运转的相关研究 [J]. 作物学报, 2007, 33 (10): 1711-1719.
- [18] 刘晓英, 罗远培, 石元春. 水分胁迫后复水对冬小麦叶面积的激发作用 [J]. 中国农业科学, 2001, 34 (4): 422-428.
- [19] 金善宝. 中国小麦学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [20] 吴少辉, 高海涛. 干旱对冬小麦粒重形成的影响及灌浆特性分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20 (2): 49-51.
- [21] 房稳静, 张雪芬, 郑有飞. 冬小麦灌浆期干旱对灌浆速率的影响 [J]. 中国农业气象, 2006, 27 (2): 98-101.
- [22] 杨贵羽, 罗远培, 李保国, 等. 不同土壤水分处理对冬小麦根冠生长的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21 (3): 104-109.
- [23] 姚宁, 宋利兵, 刘健. 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, 2016, 48 (12): 2379-2388.
- [24] 文汉, 聂凡. 干旱对水稻抽穗后期叶衰老和产量构成因子的影响 [J]. 安徽农业大学学报, 2000, 27 (2): 135-137.
- [25] 郭相平. 水分胁迫的滞后效应 [D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [26] 陈晓远, 高志红. 干湿变化条件下小麦的补偿效应研究 [J]. 内蒙古农业大学学报, 2001, 22 (2): 62-66.
- [27] 张丛志, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 作物对水分胁迫的响应及水分利用效率的研究进展 [J]. 节水灌溉, 2007, (5): 23-27.
- [28] 杨帆, 苗灵凤, 胥晓, 等. 植物对干旱胁迫的响应研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2007, 13 (4): 586-591.
- [29] 陈小荣, 刘灵燕, 严崇虎. 抽穗期干旱复水对不同产量早稻品种结实及一些生理指标的影响 [J]. 中国水稻科学, 2013, 27 (1): 77-83.
- [30] 关义新, 戴俊英. 水分胁迫下植物叶片光合特性研究 [J]. 植物生理学通讯, 1995, 31 (4): 293-297.
- [31] Schreiber U, Sehlwa U, Bilger W. Continuous recording of photochemical and nonphotochemical chlorophyll II fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer [J]. Photosynthesis Research, 1986, (10): 51-62.
- [32] 刘丽, 欧阳竹, 武兰芳, 等. 阶段性干旱及复水对小麦光特性和产量的影响 [J]. 生态学杂志, 2012, 31 (11): 2797-2803.
- [33] 王建伟, 周凌云. 土壤水分变化对金银花叶片生理生态特征的影响 [J]. 土壤, 2007, 39 (3): 479-482.

### Effects of rewatering after drought stress on yield quality and chlorophyll of forage barley in late growth period

XU Yin-ping, PAN Yong-dong\*, LIU Qiang-de, REN Cheng, YAO Yuan-hu, JIA Yan-chun, CHEN Wen-qing, HUO Ke-cang, BAO Qi-jun, ZHAO Feng, ZHANG Hua-yu (Economic Crops and Malt Barley Research Institute, Gansu Academy of Agricultural Science, Lanzhou Gansu 730070)

**Abstract:** In order to study the effects of water stress on growth, yield, key quality and related physiological indexes of forage barley, split plot experiment was conducted using drought stress time as the main factor (10, 20 and 30 d) and the rewatering level (W1, W2 and W3) as the secondary factor while weighting the pots to control water amount in 2017 and 2018. The changes in plant height, ear length, growth period, yield of per plant and composition factors, key quality indicators and chlorophyll content of forage barley were determined. The results showed that the drought stress time (T) significantly decreased the various indicators. The measured values of indicators showed as T1>T2>T3. Compared with T1, the plant heights of T2 and T3 were reduced by 10.87 and 16.26 cm, and the growth period was 5.12 and 14.00 d earlier; the grain number per spike, 1 000-grain weight and yield per plant were significantly reduced by 37.77% and 67.06%, 15.68% and 30.62%, 28.72% and 69.09% respectively; the grain protein content was increased by 4.33% and 10.16% significantly; the grain starch and plumpness were reduced by 5.65% and 22.78%, by 12.83% and 18.95% significantly. During the same stress period, all the measured indicators decreased with the reduction of rewatering levels in different degrees except for protein content, the measured values of the indicators were all expressed as W1>W2>W3. Compared with W1, the reduction of W3 was particularly obvious under the T2 and T3 stress time. By measuring the chlorophyll content of barley leaves, it was found that W1 and W2 treatments had significant compensatory effects after rewatering under T1 and T2 stress periods, while W3 treatments under T1 and T2 stress periods and all of rewatering treatments under T3 stress periods did not produce significant compensatory effects. The compensation effects of forage barley drought rehydration should be aware that drought stress period should not exceed 20 days, and the rehydration amount after drought should not be lower than 55% to 60% of the maximum soil water holding capacity.

**Key words:** drought stress; rewatering; forage barley; growth; yield; quality; chlorophyll