文章编号:1672-3317(2018)11-0020-06

# 旱后复水对冬小麦生长发育及水分利用效率的影响

倪胜利[1], 李兴茂[1], 王亚翠[2], 任根深[2]
(1.甘肃省农业科学院 旱地农业研究所/农业部西北作物抗旱栽培与耕作重点实验室, 兰州 730070;
2.平凉市农业科学院, 甘肃 平凉 744000)

**摘 要:**【目的】准确掌握冬小麦旱后复水下的形态变化规律及水分利用情况。【方法】采用盆栽试验方法,选取2个不同抗旱性的冬小麦品种(陇鉴108与西平1号)为试验材料,以全生育期充分供水处理为对照(CK),于返青—拔节期、返青—孕穗期、返青—灌浆初期进行不同程度干旱胁迫后,分别在拔节期、孕穗期及灌浆初期进行复水,分析研究了各时期干旱胁迫后复水处理对不同小麦生长发育及水分利用效率的影响。【结果】返青期中度干旱复水处理下,不同抗旱性冬小麦的生长发育、产量要素及水分利用效率均超过相应CK水平,尤其表现在水分利用效率上,陇鉴108为1.224 kg/m$^3$,西平1号为1.033 kg/m$^3$,发生超补偿效应;拔节期中度干旱处理下只有抗旱性强的品种陇鉴108的穗粒数、千粒质量及产量比CK略有增加,但增加不显著;其他干旱处理下2个品种的生长发育、产量要素、干物质积累均未达相应CK水平。重度干旱复水处理下,随着干旱胁迫程度的加强与复水时期的推迟,小麦的生长发育、产量要素、干物质积累与收获指数总体呈现下降趋势,且抗旱性中等的品种西平1号要比抗旱性较强的品种陇鉴108下降的快。【结论】不同抗旱性冬小麦品种在不同干旱胁迫程度后复水下生长发育的补偿效应不同,同等胁迫后同一复水时期处理下,抗旱性较强品种的生长发育恢复及水分利用明显高于抗旱性弱的品种,尤其是在相同处理水平下,抗旱性较强的品种陇鉴108的收获指数与水分利用效率均比抗旱性较弱的西平1号高。

**关 键 词:**冬小麦; 干旱; 复水; 生长; 产量; 补偿效应; 水分利用效率
**中图分类号:**S275; S512.11 **文献标志码:**A doi:10.13522/j.cnki.ggps.2017.0720
**倪胜利,李兴茂,王亚翠,等. 旱后复水对冬小麦生长发育及水分利用效率的影响**[J]. **灌溉排水学报**,2018,37(11):20-25.

## 0 引 言

冬小麦是西北干旱半干旱地区的主要粮食作物之一,水分供给与利用程度对于冬小麦的生长发育至关重要。2005—2015年,该区域阶段性干旱频繁发生,对主要农作物的种植生产影响很大,尤其是冬小麦在生长发育过程中受水分亏缺、复水不均及复水时期不当等原因,严重影响冬小麦的形态发育与产量[1-3]。因此,研究冬小麦各生育期干旱后复水对小麦生长发育及水分利用效率的影响,掌握冬小麦复水后的形态变化规律及水分补偿的准确生育时期及补给水量,对节水冬小麦新品种的选育及防灾减灾高产栽培技术具有重要的理论依据与实践指导意义。

前人研究表明,水分亏缺对冬小麦生长的影响主要是减弱细胞的扩张,但适度水分胁迫对冬小麦生长的影响在复水后能得到一定程度的恢复,甚至可以产生超补偿现象;同时,不同生育期复水,冬小麦各器官对干物质增大分配率的响应程度也有所不同[4]。旱后复水可使作物生长和产量产生一定的补偿效应,在一定程度上降低干旱造成的损失[5-6]。赵丽英等[5]指出,高等植物对水分胁迫-复水的响应方式是在胁迫解除后存在短暂的快速生长,以部分补偿胁迫造成的损失,作物在经受适度的干旱产生补偿效应是作物对环境变化的一种适应。陈晓远等[7]研究了不同生育时期复水对受旱小麦的补偿效应,认为拔节期复水的补偿效应最大;范雯雯等[8]研究表明,高土壤肥力条件有利于复水后光合系统恢复和单叶水分利用效率提高;王志强

**收稿日期:**2017-11-22
**基金项目:**国家自然科学基金项目(31460324);国家重点研发计划项目(2017YFD0101003);甘肃省重大科技专项(17ZD2NA016-7)
**作者简介:**倪胜利(1979-),男,甘肃华池人。副研究员,主要从事作物育种及生理生态研究。E-mail: NSL1979@163.com

等[9]研究认为冬小麦在拔节期中度干旱的高肥力条件下复水，光合速率比叶绿素更容易恢复。有关阶段亏水对冬小麦水分利用效率影响的研究较多，包括避雨条件下对冬小麦亏水补偿效应均进行了大量研究，但他们主要是针对单一品种，没有考虑作物品种的抗旱性。为此，采用盆栽控水试验方法，研究不同抗旱性冬小麦品种在返青期、拔节期及孕穗期受不同程度干旱后复水下的形态生长、产量构成因素、收获指数及*WUE*等的补偿效应，以期为小麦的抗旱生理和育种提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土壤情况及装盆方法

试验于2015—2016年设在农业部甘肃镇原黄土旱原生态环境重点野外科学观测站（35°30'N，107°29'E）的野外防雨棚中进行，试验地海拔1 254 m，年均降水量540 mm，年平均温度8.3 ℃。土壤为黑垆土，盆栽用土取田间耕层土（0~30 cm）过筛后的细土，将晾干的土壤与肥料混匀备用。盆钵规格为40 cm为土壤与肥料混匀备用（上内径×下内径×高度）的塑料盆，装桶前，盆底用直径3 mm的钢钻均匀打通10个小孔，盆底铺碎石子，上下各铺5层滤纸(滤纸+石子+滤纸，防止土壤渗入石子中)，每盆装混匀干土15 kg，土壤有机质质量分数为1.65%，全氮量为1.04 g/kg，速效磷量为22 mg/kg，速效钾量为261 mg/kg，土壤体积质量为1.16 g/cm$^3$，土壤田间持水率为22.8%左右，pH值为7.6。

### 1.2 试验材料及水分控制方法

供试材料为抗旱性强的冬小麦品种陇鉴108（甘肃省农科院旱地农业研究所提供）与抗旱性弱的冬小麦品种西平1号（平凉市农科院提供），在冬小麦抗旱性鉴定试验中陇鉴108抗旱性为2级，西平1号为3级。于2015年10月12日播种，15 穴/盆，3 粒/穴，穴距8 cm，10月28日定苗15株/盆。

试验共7个水分处理，每个处理3次重复（其中每盆作为1次重复）。对照（CK）为全生育期充分供水，T1为在返青期中度干旱胁迫（土壤相对含水率65%）后，拔节期开始复水；T2为在返青期重度干旱胁迫（土壤相对含水率55%）后，拔节期开始复水；T3为在返青期—拔节期中度干旱胁迫（土壤相对含水率65%）后，孕穗期开始复水；T4为在返青期—拔节期重度干旱胁迫（土壤相对含水率55%）后，孕穗期开始复水；T5为在返青期—孕穗期中度干旱胁迫（土壤相对含水率65%）后，灌浆期开始复水；T6为在返青期—孕穗期重度干旱胁迫（土壤相对含水率55%）后，灌浆期开始复水。盆栽土壤含水率采用称质量法（称质量感量为2 g）进行测定与控制，同时也将植株不断增加的质量考虑在内，每天试验前称其质量，尤其在孕穗期以后土壤水分蒸发量较大，每天称2次，计算各处理的土壤含水率来进行控制胁迫程度。控水时间于每天17:00进行，孕穗期以后每天08:30及17:30各进行补水1次，对照（CK）土壤相对含水率在试验期间一直保持在田间持水率的80%左右。

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 株高与穗长测定

灌浆期采用常规方法测量各处理固定3盆中小麦的株高与穗长，取每盆株高的平均值作为1次重复，共3次重复。

#### 1.3.2 旗叶叶面积测定

灌浆期测量各处理固定3盆中小麦旗叶的长和宽，采用王义芹等[10]的方法计算叶面积：旗叶面积=长×宽×叶面积系数。即：每盆测3株取其平均值作为1次重复，共3次重复。

#### 1.3.3 干物质积累与收获指数

小麦成熟后，取每个处理中固定的3盆，收获并测定每盆干物质积累量，计算各盆的收获指数并取其平均值。收获指数=籽粒产量/干物质积累量

#### 1.3.4 产量及产量构成因素

小麦成熟后，收获并测定每个处理中固定的3盆的籽粒产量，采用常规方法调查每盆的穗数、穗粒数和千粒质量。

#### 1.3.5 水分利用效率

水分利用效率（*WUE*）=籽粒产量/作物耗水量[11]，作物耗水量=播种前土壤储水量-收获后土壤储水量+灌水量。

### 1.4 数据分析

利用DPS2000及Excel 2007软件对测得的试验数据进行相关统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 旱后复水对冬小麦形态发育的影响

各处理小麦株高、穗长、旗叶叶面积分别如图1、图2、图3所示(图中同一品种不同字母表示差异达到显著水平($P<0.05$),下同)。在不同旱后复水处理下,冬小麦的株高、穗长及旗叶叶面积均发生了变化,随着复水时期推迟及干旱胁迫程度的加强,冬小麦的株高、穗长及旗叶面积呈降低趋势,且差异显著($P<0.05$),但在返青中旱复水(T1)处理水平下,无论是陇鉴108还是西平1号,其株高、穗长及旗叶叶面积值均比相应CK高,表现出超补偿效应。在不同旱后复水处理下,抗旱性强的品种陇鉴108的形态变化差异要比抗旱性弱的品种西平1号的形态变化差异小,尤其在返青期中度干旱胁迫后复水处理下,2个品种旗叶面积相对于各自CK的变化波动不同,西平1号的旗叶叶面积显著高于对应CK,而抗旱性强的陇鉴108旗叶叶面积相对于CK变化不显著。

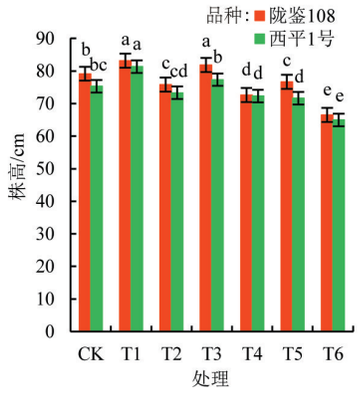


图1 各处理冬小麦株高

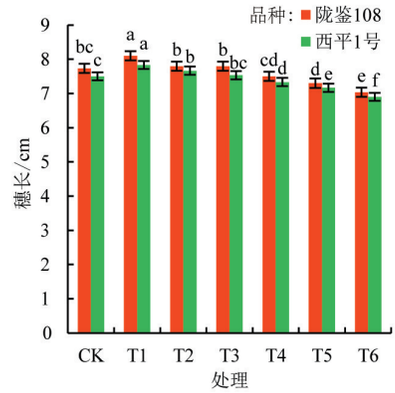


图2 各处理冬小麦穗长

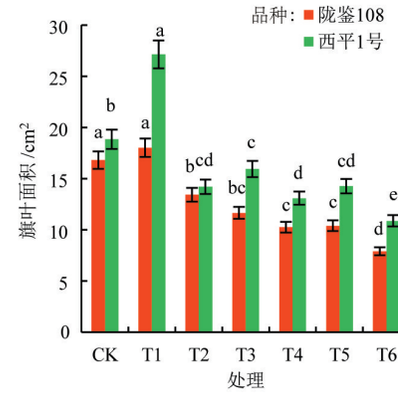


图3 各处理冬小麦旗叶叶面积

### 2.2 旱后复水对冬小麦干物质积累及收获指数的影响

从图4、图5可以看出,在不同旱后复水处理下,冬小麦的干物质积累及收获指数均发生了变化,随着旱后复水时间的推迟及干旱胁迫程度的加强,干物质积累与收获指数总体呈下降趋势,其中冬小麦的干物质积累量在中度胁迫后复水处理下变化差异不显著,但重度胁迫后复水处理下变化差异显著($P<0.05$)。且在返青期中旱复水处理水平下,不同抗性小麦的干物质积累及收获指数均比CK高,表现出超补偿效应,但差异不显著。就不同抗旱性小麦品种而言,无论在哪种旱后复水处理下,抗旱性强的品种陇鉴108收获指数明显比抗旱性弱的品种西平1号高,但干物质积累上,西平1号要明显高于陇鉴108(图5)。

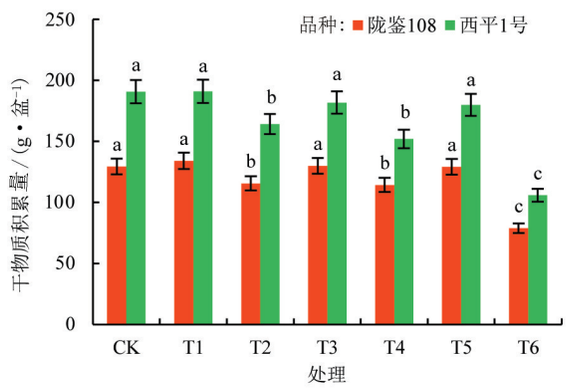


图4 旱后复水不同品种冬小麦干物质积累量

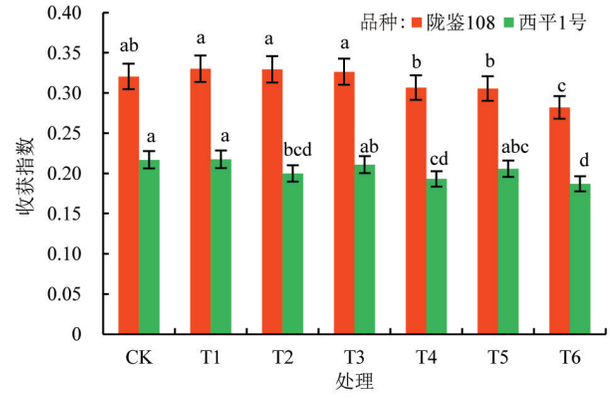


图5 旱后复水不同品种冬小麦收获指数

### 2.3 旱后复水对冬小麦产量要素的影响

随着旱后复水时期的延迟及各生育期干旱胁迫程度的加强,冬小麦产量及产量要素均逐渐降低,各处理间的差异显著(表1)。就同一品种的产量及产量构成要素而言,与相应CK相比,在返青中旱复水处理(T1)水平下,不同抗性品种的产量均有增加,产量表现出补偿效应,且抗旱性强的品种陇鉴108增产差异显

著，抗旱性弱的品种西平1号增产差异不显著（$P<0.05$），说明返青期中度干旱胁迫在拔节期复水对2种小麦的影响不大，反而在解除胁迫后产量有超补偿现象发生。穗数、穗粒数及千粒质量均有所增加，与CK相比，陇鉴108的穗数比CK增加明显，其产量也较CK增加显著，其穗数显著增加可能与品种的抗旱特性有关，还需要进一步研究验证。其他干旱处理下产量均未达CK水平，产量构成要素亦存在明显差异，即随着干旱胁迫程度的递增，穗数、穗粒数及千粒质量均逐渐降低，仅有抗旱性强的品种陇鉴108在拔节期中度干旱后复水处理下的穗数和千粒质量比CK有所增加，但不显著，其他中度及重度旱后复水处理下均未超过CK水平，且在重旱胁迫复水处理下，千粒质量与穗粒数均显著降低，抗旱性弱的品种西平1号要比抗旱性强的品种陇鉴108在受重旱胁迫处理后的下降幅度大。

表1 旱后复水不同小麦品种产量及产量构成要素

| 品种 | 水分处理 | 穗数/(穗·盆$^{-1}$) | 穗粒数/(粒·穗$^{-1}$) | 千粒质量/g | 产量/(g·盆$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|---|
| 陇鉴108 | CK | 43±1.15bc | 36±0.60a | 37±1.00b | 41.5±0.98b |
| | T1 | 48±4.00ab | 37±0.50a | 39±0.25a | 44.3±1.06a |
| | T2 | 42±5.00a | 31±0.50c | 34±0.42c | 38.0±0.38c |
| | T3 | 44±0.58abc | 32±1.03c | 38±0.15ab | 42.4±0.38b |
| | T4 | 40±5.29cd | 31±1.00c | 33±1.05c | 31±0.38d |
| | T5 | 40±2.00cd | 34±0.40b | 33±0.57c | 39.4±0.38c |
| | T6 | 34±2.08d | 29±0.89d | 31±1.08d | 22.3±0.38e |
| 西平1号 | CK | 41±1.00ab | 36±0.36b | 37±0.72ab | 41.2±0.40a |
| | T1 | 43±2.65a | 38±0.35a | 38±0.40a | 41.4±1.39a |
| | T2 | 41±1.53ab | 32±0.84e | 37±0.35a | 32.8±1.33c |
| | T3 | 39±3.51abc | 34±0.44d | 35±1.55ab | 38.3±0.90b |
| | T4 | 35±3.06d | 32±0.85e | 36±0.52ab | 29.4±2.48d |
| | T5 | 38±4.04bc | 35±0.32c | 34±3.57b | 32.1±2.16c |
| | T6 | 25±3.06d | 26±0.45f | 24±1.22c | 20.1±1.05e |

注 表中数字后的字母表示同一品种同一指标不同处理水平上的差异显著性（$P<0.05$）。

### 2.4 旱后复水对冬小麦水分利用效率的影响

从图6可以看出，水分利用效率随复水时期推迟及干旱胁迫程度加强而发生不同变化，品种不同，水分利用效率的变化也不同，但在返青期中旱复水与拔节期中旱复水处理下，小麦的水分利用效率均显著高于CK（$P<0.05$），尤其是返青期中度干旱胁迫后在拔节期复水处理下，无论是抗旱品种陇鉴108还是抗旱性弱的品种西平1号，水分利用效率均达到最大，陇鉴108为1.224 kg/m$^3$，西平1号为1.033 kg/m$^3$。在重旱程度下各生长阶段的复水处理中除抗旱性强的品种陇鉴108在孕穗期复水处理下水分利用效率显著升高外，其余处理下水分利用效率均呈下降趋势，且西平1号的水分利用效率相比对应CK显著下降，说明西平1号比陇鉴108在应对重旱胁迫能力上弱一些。

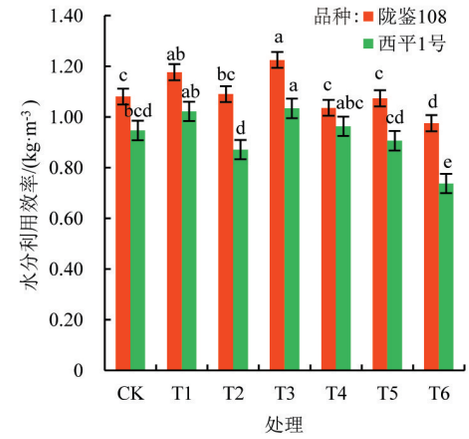

图6 旱后复水冬小麦水分利用效率

## 3 讨论与结论

### 3.1 不同品种冬小麦旱后复水下的形态补偿效应

形态适应是植物在器官乃至整体水平响应逆境的重要机制之一[12]。旱后复水对冬小麦的不同时期形态生长影响程度及危害不一致。本研究发现，在返青期中旱复水与拔节中旱复水均对小麦的形态发育可以起到补偿作用，尤其在返青期中旱复水表现超补偿效应，从株高、穗长及旗叶叶面积来看，均表现出返青期中旱复水处理大于拔节期中旱复水处理，这与前人研究结果[13-16]一致。同时，研究中还发现小麦形态适应与品种的特性关系紧密，抗旱性强的品种陇鉴108的株高、穗长及叶面积在旱后复水下形态恢复速度明显快于抗旱性较弱的品种西平1号，而且在拔节期中旱复水条件下，陇鉴108的形态补偿效应要比西平1号明显。

干旱胁迫期间的抗旱性及胁迫复水后的恢复能力是旱地作物在有限降雨条件下生长所需的主要特性，所以旱作区对种植作物品种的抗旱或耐旱性鉴选就显得非常重要。研究[17-18]表明，干旱胁迫对不同抗旱性玉米品种造成的生理伤害不同，并且不同品种恢复能力与其抗旱性强弱密切相关[19]。本研究表明，抗旱性强的冬小麦品种陇鉴108在返青期中旱复水与拔节期中旱复水条件下均能发生补偿效应，抗旱性较弱的品种西平1号则仅在返青期中旱复水条件下发生超补偿效应。无论是形态补偿还是产量补偿均是抗旱性强的品种大于抗旱性弱的品种，这与前人[20]的研究相一致。

### 3.2 冬小麦旱后复水的产量与水分利用效率

本研究发现在小麦拔节—孕穗期，2个小麦品种均对该阶段的干旱胁迫十分敏感，尤其在这个阶段中度干旱后复水下，小麦的株高、叶面积、穗长等都出现了明显的补偿和超补偿现象，其千粒质量、干物质积累和分配、产量和水分利用效率也都明显增加。其他处理下生长发育补偿效应均不明显，最终导致产量和水分利用效率也降低。卞城月等[21]也证明了这一点，适当干旱可以提高干物质的转移效率，从而提高水分有效率。相比较而言，抗旱性强的品种陇鉴108要比抗旱性弱的品种西平1号在旱后复水处理上补偿效果强一些，主要表现为收获指数升高、穗粒数及千粒质量增加，均比CK高。同时，除返青期中旱复水处理下干物质积累量较CK升高外，其余处理随干旱时期后移与干旱程度加重，干物质积累量逐渐降低。

### 3.3 需要进一步阐明的问题

作物经受不同程度的干旱后复水产生补偿效应是作物对环境变化的一种适应，也是作物正常生理生长的自我调控反应。本研究对不同抗旱性小麦品种的各个生育期水分胁迫后复水处理下的形态发育变化、产量要素及水分利用效率变化等方面进行了探讨，未考虑小麦生理生化指标的变化对复水补偿效应的影响，还有待于进一步深入研究与探讨。

**参考文献：**


[1] 张正斌，徐萍，周晓果，等.作物水分利用效率的遗传改良研究展望[J].中国农业科学，2006，39(2)：289-294.

[2] 方文松, 刘荣花, 马志红, 等.河南省冬小麦干旱评估指标初探[J].气象与环境科学，2008，31(3)：12-14.

[3] 丛建鸥, 李宁, 许映军, 等.干旱胁迫下冬小麦产量结构与生长、生理、光谱指标的关系[J].中国生态农业学报，2010，18(1)：67-71.

[4] 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.

[5] 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，2004，15(3)：523-526.

[6] 赵明，李建国，张宾，等.论作物高产挖潜的补偿机制[J].作物学报，2006，32(10)：1 566-1 573.

[7] 陈晓远，罗远培.不同生育期复水对受旱冬小麦的补偿效应研究[J].中国生态农业学报，2002，10(1)：35-37.

[8] 范雯雯，王志强，林同保，等.不同土壤肥力下旱后复水对冬小麦光合特性及水分利用效率的影响[J].麦类作物学报，2010，30(2)：362-365.

[9] 王志强，梁威威，范雯雯，等.不同土壤肥力下冬小麦春季干旱的复水补偿效应[J].中国农业科学，2011,44(8)：1 628-1 636.

[10] 王义芹, 杨兴洪, 李滨,等. 小麦叶面积及光合速率与产量关系的研究[J]. 华北农学报, 2008, 23(s2):10-15.

[11] 李全起，陈玉海，周勋波，等.灌溉和种植模式对冬小麦播前土壤含水量的消耗及水分利用效率的影响[J].作物学报，2009，35(1)：104-109.

[12] POTTERS G, PASTERNAK T P, GUISEZ Y, et al.Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble ? [J].Trends in Plant Science, 2007,12 (3): 98-105.

[13] 陈晓远，罗远培.土壤水分变动对小麦干物质分配及产量的影响[J].中国农业大学学报，2001，6(1)：96-103.

[14] 胡梦芸，张正斌，徐萍.作物几种光合酶与抗旱节水的关系研究进展[J].干旱地区农业研究，2008，(2)：251-256.

[15] 武仙山，王正航，昌小平，等.用株高旱胁迫系数分析小麦发育中的抗旱性动态[J].作物学报, 2008，34(11)：2 010-2 018.

[16] 杨春杰，程 勇, 邹崇顺，等.模拟干旱胁迫下不同甘蓝型油菜品种发芽能力的配合力与遗传效应分析[J].作物学报，2008，34(10)：1 744-1749.

[17] 梁爱华，马富裕，梁宗锁，等.旱后复水激发玉米根系功能补偿效应的生理学机制研究[J].西北农林科技大学学报，2008，36(4):58-64.

[18] 卜令铎，张仁和，韩苗苗，等.干旱复水激发玉米叶片补偿效应的生理机制[J].西北农业学报，2009，18(2)：88-92.

[19] 高悦，朱永铸，杨志民，等.干旱胁迫和复水对冰草相关抗性生理指标的影响[J].草地学报，2012，20 (2)：336-341.

[20] 刘承，李佐同，杨克军，等.水分胁迫及复水对不同耐旱性玉米生理特性的影响[J].植物生理学报，2015，51(5)：702-708.

[21] 卞城月，马长健，刘馨惠，等.灌溉频次与种植模式对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J].灌溉排水学报，2016, 35(2)：81-85.

# Physiological Development and Water Use Efficiency of Winter Wheat After Re-watering Following Drought Stresses at Different Growth Stages

NI Shengli[1], LI Xingmao[1], WANG Yacui[2], REN Genshen[2]

(1. Key Laboratory of Ministry of Agriculture for Northwest Crop Drought-resistant Production and Farming System/ Dryland Agriculture Institute, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China;
2.Pingliang Academy of Agricultural Sciences, Pingliang 744000, China)

**Abstract:**【Objective】The purpose of this work is to experimentally study the effects of re-watering after drought stress occurring at different growth stages on growth and water use of winter wheat under different growth stages. 【Method】The experiments were conducted in pots using two varieties with different drought tolerance: Longjian 108 and Xiping 1. For each variety, water stress was imposed between greening and jointing stage, or greening and booting stage, or booting and filling stage; sufficient irrigation was used as the control. The wheat was re-watered at the end of the imposed water stress. For each treatment, we measured physiological development and ultimate yield of the crops after re-watering.【Result】Re-watering after a moderate drought at greening period enhanced growth, yield and water use (*WUE*) of the two wheats, compared to CK, especially *WUE* which increased to 1.224 kg/m$^3$ for Longjian 108 and 1.033 kg/m$^3$ for Xiping 1. Re-watering after a moderate drought at the jointing stage only slightly improved the weight of the 1000-grain and the yield of Longjian 108, compared to the CK. Under other treatments, the growth, yield factors, dry matter accumulation of the two varieties were unable to recover their levels under CK. Re-watering after severe drought in other treatments also failed to recover the growth, dry matter accumulation, yield and harvest traits. The growth, growth traits, dry matter accumulation and harvest index after re-watering following a severe drought decreased, with the severity of the drought increasing and the re-watering delaying, especially for Xiping 1.【Conclusion】The compensative effects of re-watering after a drought stress varied with crop variety and the time that the drought stress occurred. Under the same drought and re-watering condition, the recovery of the more drought-resistant Longjian 108 was significantly quicker than the less drought-resistant Xiping 1. Under the same treatment, the harvest index and water use efficiency of Longjian 108 were also higher than that of Xiping 1.

**Key words:** winter wheat; drought; Re-watering; growth; yield; compensation effect; water use efficiency

责任编辑:白芳芳