

## 冬小麦补偿效应对保水剂用量的响应

杨永辉<sup>1,2</sup>, 武继承<sup>1,2</sup>, 李学军<sup>3</sup>, 李宗军<sup>3</sup>, 何方<sup>1,2</sup>, 侯占领<sup>4</sup>, 杨先明<sup>5</sup>

(1. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002;

2. 农业部作物高效用水原阳科学观测站, 河南 原阳 453514; 3. 通许县农业科学研究所, 河南 通许 475600;

4. 许昌市农业技术推广站, 河南 许昌 461000; 5. 郑州锦荣生物科技有限公司, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 为探明冬小麦补偿效应对保水剂用量的响应, 采用盆栽试验, 研究了轻度胁迫和充分供水条件下, 保水剂不同用量(0、27、54、81 mg/kg)对复水前后小麦叶片和根系生理特征及产量的影响。结果表明: 在拔节期, 复水前, 两水分条件下叶片细胞质膜透性均随保水剂用量的增加呈先降低后增加趋势, 且均显著低于对照(0 mg/kg 处理), 根系活力在轻度胁迫条件下表现为显著提高趋势, 在充分供水条件下则先增后降再增; 复水后, 两水分条件下均以 81 mg/kg 处理的细胞质膜透性最低, 且根系活力最强。在灌浆期, 轻度胁迫条件下, 复水前、后均以 81 mg/kg 处理的叶片质膜透性最高, 且显著高于对照; 而充分供水条件下复水前、后各处理间的叶片质膜透性差异均不显著。复水后, 在轻度胁迫条件下根系活力以 27 mg/kg 处理最高, 而充分灌水条件下以 54 mg/kg 处理的效果最佳。最终, 小麦产量和水分利用效率以充分供水条件下较对照增幅最大, 且以 54 mg/kg 处理效果最佳, 较对照增产 9.3%, 水分利用效率提高 9.0%。而轻度胁迫条件下以 27 mg/kg 处理效果最佳, 小麦产量和水分利用效率均较对照提高 6.9%。

**关键词:** 冬小麦; 水分条件; 保水剂; 生理特征; 补偿效应; 产量

中图分类号: S512.1<sup>+</sup>1 文献标志码: A 文章编号: 1004-3268(2013)12-0064-06

## Response of Compensation Effect of Winter Wheat to Different Rates of Water-retaining Agent

YANG Yong-hui<sup>1,2</sup>, WU Ji-cheng<sup>1,2</sup>, LI Xue-jun<sup>3</sup>, LI Zong-jun<sup>3</sup>, HE Fang<sup>1,2</sup>,  
HOU Zhan-ling<sup>4</sup>, YANG Xian-ming<sup>5</sup>

(1. Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Yuanyang Experimental Station of Crop Water Use,

Ministry of Agriculture, Yuanyang 453514, China; 3. Tongxu Institute of Agricultural Sciences, Tongxu 475600, China; 4. Xuchang Bureau of Agricultural Technology Extension, Xuchang 461000, China; 5. Zhengzhou Jinrong Bio-technology Co., Ltd., Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** In order to ascertain the response of compensation effect of the winter wheat to different rates of water-retaining agent (0 mg/kg, 27 mg/kg, 54 mg/kg, and 81 mg/kg), the pot experiment was employed to study the effect of water-retaining agent on the wheat leaf, root physiological characteristics and yield under the drought stress and efficient irrigation conditions. The results indicated that at jointing stage, leaf plasma membrane permeability dropped firstly, and then increased with the increase of water-retaining agent before rewatering under the two moisture conditions, which were lower than those of the control. In the drought stress condition, root vigor increased significantly with the increase of water-retaining agent, while it first increased, then

收稿日期: 2013-07-02

基金项目: 国家“863”节水农业项目(2006AA100215); 公益性行业(农业)科研专项(201203077)

作者简介: 杨永辉(1978-), 男, 陕西西安人, 助理研究员, 博士, 主要从事土壤生态与节水农业方面的研究。

E-mail: yangyongh@mails.ucas.ac.cn

dropped and increased again under the sufficient irrigation condition. After rewatering in the drought stress and efficient irrigation conditions, the treatment with 81 mg/kg of water-retaining agent had the lowest cytoplasm membrane permeability and the strongest root vigor compared with the control. To filling stage, the leaf plasma membrane permeability of the treatment with 81 mg/kg of water-retaining agent was significantly higher than that of the control before and after rewatering under the drought stress condition, while there was no significant difference among the treatments under the efficient irrigation condition. Under drought stress condition, the treatment with 27 mg/kg of water-retaining agent had the highest root vigor compared with the other treatments after rewatering, while the treatment with 54 mg/kg of water-retaining agent brought about the best effect under efficient irrigation condition. The wheat yield and water use efficiency of the water-retaining agent treatments under the efficient irrigation condition had higher increase than those under the drought stress condition, in which the treatment with 54 mg/kg of water-retaining agent performed the best effects, with yield and water utilization efficiency increasing by 9.3% and 9.0%, respectively, compared to the control. However, the treatment with 27 mg/kg of water-retaining agent performed the best effects under drought stress, and its yield and water utilization efficiency both increased by 6.9% compared with the control.

**Key words:** winter wheat; water condition; water-retaining agent; physiological characteristics; compensation effect; yield

作物生长过程中总要不断经历水分胁迫与复水。干旱胁迫时,作物细胞结构遭到一定破坏,叶绿素含量减少,光合速率降低。复水后细胞结构迅速恢复,叶绿素含量、光合速率、叶绿素荧光等光合作用参数出现超补偿现象<sup>[1]</sup>。近年来,生物节水研究的方法之一是对作物进行控水,使其在某段时期内承受一定程度的水分亏缺,在保证较高产量的同时,减少水分的无效损失,提高水分利用效率<sup>[2-5]</sup>。如,梁爱华等<sup>[6]</sup>研究发现,旱后复水玉米光合产物向根系的重新分配及新生侧根和根毛的形成,可能正是干湿交替水环境下玉米根系功能产生补偿效应的生理学基础。高志红等<sup>[7]</sup>研究表明,苗期受旱程度不同的冬小麦在分蘖期恢复供水后,其株高、单株叶面积、叶面积比率、生物量及产量等都超过中度和重度缺水的处理,植株通过激发生长而部分弥补了前期干旱所减少的生长量。薛设等<sup>[8]</sup>研究发现,适度水分胁迫后复水使刺槐苗木的抗氧化能力加强,激发补偿效应显著。而玉米受到严重干旱胁迫时,在开花期后复水,其花后光合产物转移至果穗的百分率较轻度干旱下显著提高,且花后干物质积累对产量的贡献率增大,部分补偿了前期干旱的损失<sup>[9]</sup>。此外,岳海等<sup>[10]</sup>研究表明,水分亏缺处理复水后 30 d,澳洲坚果的单叶面积、比叶面积、叶绿素总量均表现出显著的补偿效应。水分胁迫复水后补偿效应的大小因植物品种和生长期的不同而存在一定差异。

农用保水剂是吸水力强的高分子聚合物<sup>[11]</sup>,具有改善土壤结构<sup>[12-13]</sup>、促进团粒形成<sup>[14]</sup>、提高土壤持水能力<sup>[15-16]</sup>的作用。农用保水剂还有植物“微型水库”之称,能迅速吸收并保持自身质量数百倍乃至

数千倍的水分,当土壤干旱缺水时,可迅速释放出所吸收的水分,以供作物利用。施用保水剂可抑制土壤水分的无效损耗,减少径流及肥力流失<sup>[17-18]</sup>,提高水分和养分的有效性、利用率和利用效率等<sup>[19-20]</sup>。同时,还可以改善作物生理机能,提高作物根系活力<sup>[21]</sup>以及光合速率<sup>[22]</sup>等。如,陈宝玉等<sup>[23]</sup>研究表明,施用保水剂缓解了因水分胁迫导致的气孔阻力增加,使苗木可以继续进行正常的光合作用,维持其正常生长。辛小桂等<sup>[24]</sup>研究表明,泥炭、沸石、稀土、保水剂等化学材料能够部分补偿水分胁迫给玉米带来的伤害,提高玉米幼苗的抗旱性能,但各类化学材料的作用效果存在一定的差异。有关这方面的研究已屡见不鲜<sup>[25-28]</sup>,而关于不同水分条件下冬小麦叶片和根系生理特征对保水剂用量的响应程度及其差别的报道却不多见。

因此,研究不同水分环境条件下,保水剂用量对灌水前、后冬小麦生理特征及产量的影响,旨在为保水剂的进一步合理应用及其作用机制研究提供可靠的科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

盆栽所用土壤为褐土,土壤母质为黄土性物质,土壤有机质 12.3 g/kg、全氮 0.80 g/kg、水解氮 47.82 mg/kg、速效磷 6.66 mg/kg、速效钾 114.8 mg/kg。所采土壤前茬作物为玉米。土壤机械组成为:砂粒(2~0.02 mm)占 59.1%,粉粒(0.02~0.002 mm)占 22.5%,黏粒(<0.002 mm)占 18.4%。

## 1.2 试验材料

采用河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所研制的营养型抗旱保水剂,为白色粉末,主要成分为聚丙烯酰胺类物质、有机物质和稀土等。冬小麦品种为郑麦 9694。

## 1.3 试验设计

根据对该保水剂的前期研究结果,从经济角度、作物产量和水分利用率及对土壤结构的影响等方面出发,确定了保水剂合理施用量范围,将大田试验保水剂用量折合成单位质量土壤(耕层)的保水剂用量,以其 2 倍用量为盆栽保水剂用量,共设置 4 个用量处理,处理 1:0 mg/kg,作为对照(CK);处理 2:27 mg/kg(低用量);处理 3:54 mg/kg(中等用量);处理 4:81 mg/kg(高用量)。设置 2 个水分条件:轻度胁迫(占田间持水量 50%~65%)和充分供水(占田间持水量 70%~85%),即当对照处理的土壤含水量低于 50%或 70%时进行供水至其上限 65%或 85%。尿素(含氮量 46.2%)用量为 432 mg/kg,普通过磷酸钙(含磷量 12.0%)用量为 533 mg/kg。盆高 30 cm、上口口径 33 cm、下口径 25 cm,保水剂、肥料与 5 kg 过 10 mm 筛的土混匀装入盆中至 2/3 处,盆底层和上层均覆盖相同的过筛土壤,每盆装土(风干土)18 kg,然后浇足水(5 kg),待 7 d 后(2009 年 10 月 26 日)选择饱满的小麦种子播种,播量为 63 粒/盆。于返青期提苗,每盆留 36 株。每处理设 5 个重复,2 种水分条件分别为 4×5=20 盆。播种到返青期正常供水,且保持每盆的土壤含水量相同,均达到田间持水量(18.0%)的 85%,从返青期开始控水直至小麦收获。

## 1.4 测定项目与方法

分别于拔节期(复水前:2010 年 4 月 7 日;复水后:2010 年 4 月 10 日)和灌浆期(复水前:2010 年 5 月 16 日;复水后:2010 年 5 月 18 日)测定土壤含水

量,并在相同处理的不同重复内随机取样 3 处,每处取小麦 3 株,将相同处理的根系样品和叶片样品分别混合,用锡纸包好立即放入液氮中保存,用以测定根系活力和叶片质膜透性。土壤含水量采用烘干法测定,叶片质膜透性采用电导率仪(DS15)测定<sup>[29]</sup>,根系活力(取根尖部分)采用 TTC 法测定<sup>[30]</sup>。待小麦收获,取 5 株进行考种,将取样后剩余植株的产量折合成每盆 36 株的产量。

## 1.5 数据处理

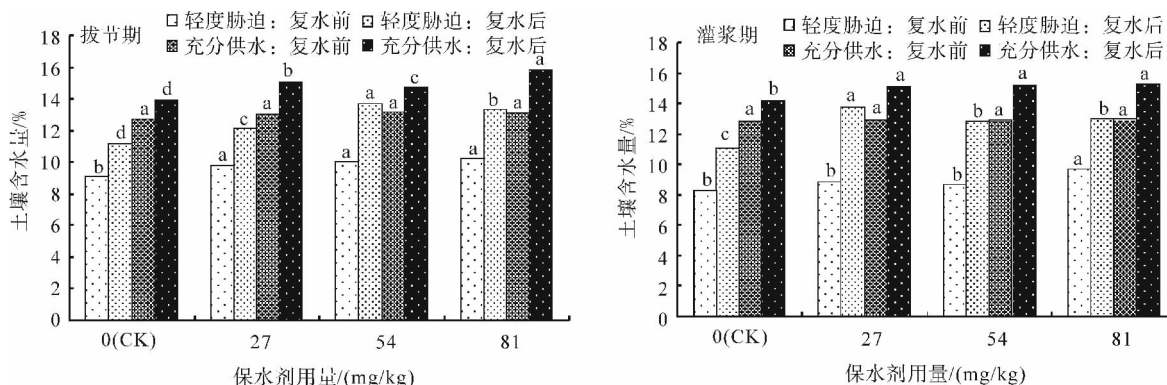
各指标值均为 3 次重复的算术平均值,植株及土样分析所得数据采用 DPS 软件进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分条件下各处理复水前后土壤水分变化特征

从图 1 可看出,在拔节期,轻度胁迫条件下,复水前对照的土壤含水量低于田间持水量的 50%,而保水剂处理均显著高于对照,各保水剂处理间差异不显著。复水后第 3 天以保水剂 54 mg/kg 处理的土壤含水量最高,为 13.7%,其次为 81 mg/kg、27 mg/kg 处理,对照仍最低。在充分供水条件下,复水前各处理间的差异不显著。而复水后第 3 天,各处理间的土壤含水量大小顺序为 81 mg/kg > 27 mg/kg > 54 mg/kg > CK ( $P < 0.05$ )。

到灌浆期(图 1),在轻度胁迫条件下,复水前,除保水剂 81 mg/kg 处理的土壤含水量显著高于对照外,其他处理与对照差异不显著。复水后第 2 天,经过作物蒸腾与土壤蒸发作用后,随保水剂用量的增加,土壤含水量分别提高 24.7%、16.4% 和 17.8%。而充分供水条件下,复水前,各处理间差异不显著。复水后第 2 天,随保水剂用量的增加,土壤含水量分别比对照提高 6.3%、6.3% 和 7.3%。



相同土壤水分条件下,不同处理间不同小写字母表示差异达显著水平 ( $P < 0.05$ ),下同

图 1 不同生育期各处理复水前后土壤水分变化特征

对 2 个时期土壤含水量进行比较得出,除 27 mg/kg 处理在灌浆期轻度胁迫条件下复水后的土壤含水量(13.8%)高于拔节期(12.1%)外,拔节期的土壤含水量均明显高于灌浆期,尽管拔节期复水后时间较灌浆期多 1 d,但灌浆期的土壤水分仍低于拔节期,反映了灌浆期作物转化干物质时吸收利用的水分较多,而保水剂的施用减少了土壤无效蒸发,提高了土壤含水量,促进了作物对水分的吸收利用。

2.2 拔节期不同水分条件下各处理复水前后冬小麦生理特征

作物受到一定水分胁迫后进行复水,其生理特征得到一定程度的恢复,甚至产生激发效应,而保水剂的施用会对这种激发效应产生一定的影响。

2.2.1 叶片细胞质膜透性 细胞质膜透性大小反映了作物受干旱胁迫的程度,可用相对电导率来表示,其值越大说明作物受胁迫程度越深。从表 1 可知,在拔节期,复水前充分供水条件下的叶片细胞质膜透性低于轻度胁迫处理,充分供水条件下,中、低用量保水剂处理的效果较好,以保水剂 27 mg/kg 处理细胞质膜透性最低。复水后,两水分条件下各处理的叶片质膜透性均较复水前明显降低,轻度胁迫条件下降低的幅度更大,其叶片质膜透性是复水前的 35.0%,尤其是保水剂处理,用量越大效果越显著,81 mg/kg 处理的相对电导率是复水前的 30.0%。说明在拔节期,对于干旱造成的生理伤害,复水后激发了小麦的生理补偿效应,且施用保水剂可使小麦的生理补偿效应更加显著,其细胞质膜透性显著降低。

表 1 拔节期复水前后不同水分条件下保水剂对小麦叶片相对电导率的影响 %

保水剂用量/(mg/kg)	复水前		复水后	
	轻度胁迫	充分供水	轻度胁迫	充分供水
0(CK)	13.9a	9.7a	5.3a	4.2a
27	10.8c	5.4c	4.0b	4.0a
54	11.3b	6.3b	4.1b	4.1a
81	10.8c	7.1b	3.3c	3.6b

2.2.2 根系活力 根系活力是根系吸收养分和水分功能强弱的指标之一,受到干旱胁迫时,根系活力下降<sup>[33-35]</sup>。从表 2 可以看出,在拔节期复水前、后,随保水剂用量的增加,根系活力均显著提高(充分供水条件下 54 mg/kg 处理复水前除外)。两水分条件相比,复水前充分供水条件下各处理的根系活力均明显大于轻度胁迫处理。复水后,各处理的根系活力均显著提高,但轻度胁迫条件下根系活力增幅

较大,平均较复水前提高了 349.7%,且随保水剂用量的增加,根系活力提高的幅度更大,81 mg/kg 处理较复水前提高了 400%。

综上所述,在拔节期不同水分条件下,保水剂的施用均显著提高了根系活力,且用量越大效果越佳,尤其在轻度胁迫条件下。说明,保水剂在小麦拔节期土壤含水量较低的情况下,对小麦根系的生理激发效应较显著。

表 2 拔节期复水前后不同水分条件下保水剂对小麦根系活力的影响  $\mu\text{g/g}$

保水剂用量/(mg/kg)	复水前		复水后	
	轻度胁迫	充分供水	轻度胁迫	充分供水
0(CK)	7.9d	59.6d	31.1d	81.7d
27	20.6c	81.8b	67.7c	99.9c
54	25.6b	74.0c	117.9b	126.2b
81	52.8a	101.4a	264.0a	131.0a

2.3 灌浆期不同水分条件下各处理复水前后冬小麦生理特征

小麦生育阶段不同,其代谢过程中植株体内的物质条件也会发生一定变化,进而导致其生理机能(生理特征)存在一定差异。

2.3.1 叶片细胞质膜透性 从表 3 可知,在灌浆期,复水前,轻度胁迫条件下随保水剂用量的增加叶片质膜透性增加,且中、高保水剂处理均显著大于对照,说明在灌浆期土壤水分较低时,保水剂的施用加剧了干旱胁迫程度,尤其是高用量保水剂处理更加明显;而充分供水条件下各处理间差异不显著。复水后,在轻度胁迫条件下,保水剂 27 mg/kg 和 54 mg/kg 处理的叶片质膜透性低于对照,而保水剂 81 mg/kg 处理显著大于对照;充分供水条件下各处理的叶片质膜透性均较复水前降低,虽然各处理差异仍不显著,但明显低于轻度胁迫条件下的处理。

以上结果说明,在小麦生长的灌浆期,水分含量较低条件下,保水剂用量过大会对作物地上部分产生一定的胁迫作用,且复水后仍不能恢复,而水分条件较好时影响不显著。

表 3 灌浆期复水前后不同水分条件下保水剂对小麦叶片相对电导率的影响 %

保水剂用量/(mg/kg)	复水前		复水后	
	轻度胁迫	充分供水	轻度胁迫	充分供水
0(CK)	10.6c	9.2a	10.8b	8.6a
27	10.5c	9.1a	9.7b	8.2a
54	12.2b	9.1a	8.6c	8.2a
81	17.9a	9.4a	14.7a	8.2a

2.3.2 根系活力 从表 4 可知,复水前,充分供水各处理的根系活力均明显高于轻度胁迫条件下的处理;随保水剂用量的增加,轻度胁迫条件下的根系活力降低,而充分供水条件下的根系活力先增加后降低,以保水剂 54 mg/kg 处理显著大于其他处理。复水后,两水分条件下保水剂处理的根系活力较复水前明显增大,且均显著高于对照,轻度胁迫条件下,以保水剂 27 mg/kg 处理的根系活力提高幅度最大,较复水前提高了 121.7%;充分供水条件下同样以保水剂 27 mg/kg 处理的根系活力增幅最大,但仅较复水前提高了 18.6%。说明在灌浆期,土壤含水量较低条件下,保水剂的施用加剧了作物的干旱胁迫程度,对其进行复水后,保水剂的作用得到了发挥从而对作物干旱胁迫具有缓解作用;而充分供水处理在复水后,其根系活力也有提高,但提高幅度远小于轻度胁迫条件下的处理。

综上所述,复水前后轻度胁迫条件下以保水剂 27 mg/kg 处理对根系活力提高最为有利,而充分灌水条件下以保水剂 54 mg/kg 处理的效果最佳。

表 4 灌浆期复水前后不同水分条件下保水剂对小麦根系活力的影响  $\mu\text{g/g}$

保水剂用量/(mg/kg)	复水前		复水后	
	轻度胁迫	充分供水	轻度胁迫	充分供水
0(CK)	80.7b	94.9b	82.9d	97.9d
27	89.6a	96.0b	198.6a	113.8b
54	67.7d	101.6a	87.7c	119.6a
81	69.0c	90.4c	98.6b	102.9c

## 2.4 保水剂对小麦成产要素、产量及水分利用的影响

保水剂在不同水分条件下对小麦生理特征的影响最终会影响到小麦的成产要素和产量。从表 5 可以看出,在轻度胁迫条件下,随保水剂用量的增加,穗粒数先增后降,每盆的穗数增加,而千粒重、穗长和小穗数在保水剂各处理间差异不显著,但均高于对照;各保水剂处理的小麦产量分别比对照增加 6.9%、4.9%和 2.9%,水分利用效率较对照提高了 6.9%、5.1%和 3.7%。在充分供水条件下,施用保水剂处理均提高了小麦穗粒数、千粒重、穗长、小穗数、穗数、产量及水分利用效率。保水剂 54 mg/kg 处理的小麦穗数、产量、水分利用效率均显著高于其他各处理,分别较对照增加 11.9%、9.3%和 9.0%。

表 5 不同水分条件下保水剂用量对小麦成产要素、产量及水分利用效率的影响

水分条件	保水剂用量/(mg/kg)	穗粒数/粒	千粒重/g	穗长/cm	小穗数/个	穗数/(穗/盆)	耗水量/L	产量/(g/盆)	水分利用效率/(kg/m <sup>3</sup> )
轻度胁迫	0(CK)	32.6c	40.0b	7.5a	16.8a	33b	40.734b	35.0b	0.859b
	27	37.4a	41.1a	7.9a	17.0a	38b	40.721b	37.4a	0.918a
	54	35.4b	41.6a	7.7a	17.0a	37b	40.695b	36.7a	0.903b
	81	35.8b	41.3a	7.6a	17.2a	41a	40.395c	36.0a	0.891a
充分供水	0(CK)	34.0c	40.3c	7.9b	17.4b	42b	49.448b	40.8c	0.825c
	27	38.6a	42.4a	8.2ab	18.6a	44b	50.120a	42.1b	0.839b
	54	39.8a	41.6b	8.5a	18.6a	47a	49.588b	44.6a	0.899a
	81	36.8b	42.8a	8.3ab	17.8ab	43b	49.757a	42.1b	0.845b

## 3 结论与讨论

保水剂的施用改善了土壤水分环境,有利于作物的生长,但在作物不同生育阶段以及不同水分条件下,其发挥的作用存在一定的差异。本研究发现,除轻度胁迫下 27 mg/kg 处理外,拔节期各处理的土壤含水量明显高于灌浆期,说明灌浆期作物转化干物质时吸收利用的水分较多,而保水剂的施用提高了土壤含水量,减少了土壤无效蒸发,促进了作物对水分的吸收利用。

不同水分条件下作物的生理特征会表现出一定的差异,干旱胁迫后对作物进行复水会产生一定的激发效应<sup>[5-10]</sup>,从而抵消或缓解因干旱胁迫而产生的伤害。但作物地上和地下部分对水分环境的敏感

程度不同,从而导致其生理响应程度存在一定差异。土壤施用保水剂时,其在缓慢释水的过程中会对作物生理特征产生一定的影响<sup>[21-22]</sup>。本研究表明,在拔节期,轻度干旱胁迫条件下,对于干旱造成的生理伤害,复水后激发了小麦的生理补偿效应,且施用保水剂使小麦的补偿效应更加显著,其细胞质膜透性显著降低、根系活力显著提高,尤其是 81 mg/kg 保水剂处理;而在充分供水条件下,复水前小麦叶片细胞质膜透性以中、低用量保水剂处理较低,复水后以 81 mg/kg 保水剂处理降低最多,小麦根系活力在复水前、后均随保水剂用量的增加而显著提高。到小麦生长的灌浆期,轻度胁迫条件下,保水剂用量过大会对小麦地上部分产生一定的胁迫作用,复水后仍不能恢复,但小麦根系活力在复水后均明显提高,以

保水剂 27 mg/kg 处理效果最佳;在充分供水条件下,各处理的叶片细胞质膜透性差异不显著,而根系活力在复水前、后均以保水剂 54 mg/kg 处理最大。

保水剂的施用在影响作物生理特征的同时,对作物产量及成产要素等也均产生重要影响。小麦生长的中后期,其产量和水分利用效率均与灌浆期的生理特征表现一致,即在轻度胁迫条件下,保水剂 27 mg/kg 处理效果最佳,较对照增产 6.9%,水分利用效率较对照提高了 6.9%;而充分供水条件下以保水剂 54 mg/kg 处理效果最佳,较对照增产 9.3%,水分利用效率较对照提高了 9.0%。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘晓宏,肖洪浪,赵良菊.不同水肥条件下春小麦耗水量和水分利用率[J].干旱地区农业研究,2006,24(1):56-59.
- [3] 山仑,邓西平,苏佩,等.作物对多变低水环境的适应与调节[J].中国农业科技导报,2000(2):66-69.
- [4] 山仑,苏佩,郭礼坤,等.不同类型作物对干湿交替环境的反应[J].西北植物学报,2000,20(2):164-170.
- [5] 丁端锋,蔡焕杰,王健,等.玉米苗期调亏灌溉的复水补偿效应[J].干旱地区农业研究,2006,24(3):64-67.
- [6] 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:自然科学版,2008,36(4):58-64.
- [7] 高志红,陈晓远,罗远培.冬小麦分蘖期复水对根、冠生长及其相互关系的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(5):145-150.
- [8] 薛设,王进鑫,吉增宝,等.旱后复水对刺槐苗木叶片保护酶活性和膜质过氧化的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(7):81-85.
- [9] 刘永红,杨勤,杨文钰,等.花期干湿交替对玉米干物质积累与再分配的影响[J].作物学报,2006,32(11):1723-1727.
- [10] 岳海,倪书邦,陈丽兰,等.水分胁迫及自然复水对澳洲坚果幼苗叶片性状的影响[J].云南大学学报,2008,23(4):540-544.
- [11] 杨连利,李仲谨,邓娟利.保水剂的研究进展及发展新动向[J].材料导报,2005,19(6):42-44.
- [12] 杨永辉,武继承,吴普特,等.秸秆覆盖与保水剂对土壤结构、蒸发及入渗过程的作用机制[J].中国水土保持科学,2009,7(5):70-75.
- [13] Gardner W R. Representation of soil aggregate size distribution by a logarithmic-normal distribution[J]. Soil Sci Soc Am Proc,1956,20:151-153.
- [14] 曹丽花,赵世伟,梁向锋,等.PAM对黄土高原主要土壤类型水稳性团聚体的改良效果及机理研究[J].农业工程学报,2008,24(1):45-49.
- [15] 杨永辉,赵世伟,黄占斌,等.沃特多功能保水剂保水性能研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(5):35-37.
- [16] 杨永辉,武继承,赵世伟,等.PAM的土壤保水性能研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(12):120-124.
- [17] 苟春林,杜建军,曲东,等.氮肥对保水剂吸水保肥性能的影响[J].干旱地区农业研究,2006(6):78-84.
- [18] Henderson J C, Hensley D L. Ammonium and nitrate retention by hydrophilic gel[J]. Hort Sci, 1985, 20: 667-668.
- [19] 庄文化,冯浩,吴普特.高分子保水剂农业研究进展[J].农业工程学报,2007,23(6):265-270.
- [20] 宫辛玲,刘作新,尹光华,等.土壤保水剂与氮肥的互作效应研究[J].农业工程学报,2008,24(1):50-54.
- [21] 杨永辉,武继承,吴普特,等.保水剂用量对冬小麦不同生育时期根系生理特性的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):72-78.
- [22] 杨永辉,吴普特,武继承,等.冬小麦光合特征及叶绿素含量对保水剂与N肥的响应[J].应用生态学报,2011,22(1):79-85.
- [23] 陈宝玉,王洪君,曹铁华,等.干旱胁迫下保水剂对廊坊杨苗木光合性能的影响[J].土壤通报,2011,42(1):163-168.
- [24] 辛小桂,黄占斌,朱元骏.水分胁迫条件下几种化学材料对玉米幼苗抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2004,22(1):54-57.
- [25] Haas H P, Rober R. Substrate additives, watering and growth of *Euphorbia pulcherrima* [J]. Gartenbau Magazine, 1993, 12(2): 68-70.
- [26] Huttermann A, Zommodi M, Reise K. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of pinus halepensis seedling subjected to drought[J]. Soil and Tillage Research, 1999, 50(4): 295-304.
- [27] Viero P W M, Little K M, Osocroft D G. Establishment of *Eucalyptus grandis* × *camaldulensis* clones in Zululand: the effect of a soil amended hydrogel[J]. IC-FR-Bulletin-Series, 2000, 7: 1-120.
- [28] 赵正雄,赵明,张福琐.育苗时使用保水剂对移栽玉米生长发育和产量的影响[J].耕作与栽培,2002(2):13-14.
- [29] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [30] 萧浪涛,王三根.植物生理学实验技术[M].北京:中国农业出版社,2005:65-66.