

复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应*

杨永辉^{1,2} 吴普特² 武继承¹ 赵西宁³ 黄占斌⁴ 何方¹

(1. 河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100;
3. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 4. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

【摘要】 为探明干旱胁迫复水前后作物水分消耗过程中冬小麦生理特征对保水剂用量的响应及作用机理, 采用盆栽试验以不施保水剂为对照, 测定了保水剂不同用量(无保水剂、27 mg/kg、54 mg/kg、81 mg/kg)条件下, 复水前后的土壤含水率及光合参数的持续变化特征。结果表明: 干旱胁迫时, 保水剂降低了小麦叶片光合速率、蒸腾速率、气孔导度, 提高了水分利用效率。复水后, 对照的光合速率、蒸腾速率及气孔导度仍较高, 保水剂处理依次为: 54 mg/kg、81 mg/kg、27 mg/kg。而当土壤含水率降至田间持水量的55%左右时, 各处理光合参数依次为: 27 mg/kg、CK、54 mg/kg、81 mg/kg; 水分利用效率依次为: 81 mg/kg、27 mg/kg、CK、54 mg/kg。随保水剂用量的增加, 小麦生物量增加, 但81 mg/kg处理显著高于对照。同时, 保水剂会影响叶片光合参数之间的相关性, 其中, 小麦气孔导度与光合速率、蒸腾速率的相关性以54 mg/kg处理最紧密, 依次为81 mg/kg处理、对照、27 mg/kg处理最差。而气孔导度与土壤含水率、水分利用效率及光合速率与土壤含水率、蒸腾速率、水分利用效率的相关性强弱从大到小的处理依次为: 81 mg/kg、54 mg/kg、CK、27 mg/kg。说明小麦叶片光合参数对保水剂的响应以54 mg/kg与81 mg/kg处理最显著。

关键词: 冬小麦 水分胁迫 复水 保水剂 光合特征

中图分类号: S311; S512.1⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)07-0116-08

Response of Photosynthetic Parameters of Winter Wheat before and after Re-watering to Different Rates of Water-retaining Agent

Yang Yonghui^{1,2} Wu Pute² Wu Jicheng¹ Zhao Xining³ Huang Zhanbin⁴ He Fang¹

(1. Institute of Plant Nutrition & Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China
2. College of Resource and Environmental Sciences, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China
4. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract

In order to ascertain the response of photosynthetic parameters of winter wheat during the course of soil water consuming from drought stress to re-watering to different dosage of water-retaining agent and make clear the acting mechanism of water-retaining agent, the pot experiment was employed and water-retaining agent was added to the soil at the following rates: 0 mg/kg, 27 mg/kg, 54 mg/kg, and 81 mg/kg. The results indicated that photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), and stomatal conductance (G_s) of wheat were decreased, but water use efficiency (WUE) was increased after the application of water-retaining agent under drought stress. After re-watering, P_n , T_r , and G_s of CK were still higher, and those of water-retaining agent, from high to low, were as the following: 54 mg/kg, 81 mg/kg, 27 mg/kg. When soil moisture content fell to about 55% of field capacity, the photosynthetic parameters of each treatment were ranged in order from the higher to the lower ones as the following: 27 mg/kg, CK,

收稿日期: 2010-08-31 修回日期: 2010-09-30
* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA100215)、河南省重大公益性科研资助项目(081100911500)和河南省杰出青年基金资助项目(104100510024)
作者简介: 杨永辉, 助理研究员, 西北农林科技大学博士生, 主要从事土壤生态与节水农业研究, E-mail: yangyonghui@mails.gucas.ac.cn
通讯作者: 吴普特, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持与节水农业研究, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

54 mg/kg, 81 mg/kg. WUE of different treatments were rank as the following: 84 mg/kg, 27 mg/kg, CK, 54 mg/kg. And with the increase of the amount of water-retaining agent, wheat biomass increased, but those of 81 mg/kg of water-retaining agent were significantly high compared with other treatments. Meanwhile, water-retaining agent had an effect on the relations among photosynthetic parameters of winter leaves. The correlations between G_s and P_n and T_r of wheat applied with 54 mg/kg of water-retaining agent were the most closely connected, next were the treatments with 81 mg/kg, CK and 27 mg/kg of water-retaining agent respectively. However, the connections of correlations between G_s and soil, WUE and those between P_n and soil water, T_r , and WUE all showed in the following order: 81 mg/kg, 54 mg/kg, CK, 27 mg/kg. It could be concluded that the treatments with 54 mg/kg and 81 mg/kg of water-retaining agent had significant effect on the correlations between photosynthetic parameters of wheat leaves.

Key words Winter wheat, Water stress, Re-water, Water-retaining agent, Photosynthetic characteristics

引言

小麦产量的 90% ~ 95% 来自于光合作用^[1]。高光合速率是作物产量提高的重要因素之一。水分胁迫会影响气孔阻力和水势,使叶片进入水分亏缺状态而导致气孔较早关闭,从而抑制光合生理代谢^[2],降低植物的最大净光合速率。适度干旱可有效提高叶片水分利用效率^[3],但复水后光合作用仍不能完全从干旱胁迫中迅速得到恢复^[4~8]。干旱胁迫对光合作用的伤害与复水后的不完全恢复是否受气孔的影响仍不清楚^[9~10]。

交联密度很低、高水膨胀性吸水力强的高分子聚合物^[11~12]保水剂,能够改善土壤结构^[13~15],促进团粒的形成^[16],有土壤“微型水库”之称,且能提高土壤的持水能力^[17~19],显著抑制土壤水分的无效损耗^[20]。而当土壤干旱缺水时,又可释放出所吸收的水分供植物吸收利用,提高作物叶片光合速率及水分效率^[21],有关这方面的研究已屡见报道。保水剂功能的有效发挥受土壤水分状况和植物的共同制约^[22~25],为明晰植物与保水剂所吸持水分之间的关系^[26],以及植物在经受一定干旱胁迫时,复水前后植物叶片光合生理特征的变化过程和对保水剂的响应程度等,本文以冬小麦为对象,研究不同用量保水剂在旱作区干旱胁迫条件下,冬小麦复水前后光合生理特征的影响,分析复水前后保水剂对小麦的作用机理。

1 试验

1.1 研究区概况

试验在节水农业禹州试验基地旱地的旱棚中进行,海拔 116.1 m,年均降水量 674.9 mm(其中 60% 以上集中在夏季);土壤为褐土,土壤母质为黄土物

质,该地区地势平坦,土壤密度为 1.22 g/cm³,肥力均匀,耕层有机质 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。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%,粘粒(<0.002 mm)占 18.4%。

1.2 材料与方法

1.2.1 试验材料

保水剂:采用河南省农科院植物营养与资源环境研究所研制的营养型抗旱保水剂,主要成分为聚丙烯酰胺类物质、有机物质和稀土等,为白色粉末状。

供试小麦品种为大穗型半冬性中早熟品种郑麦 9694。

1.2.2 试验设计

设置 4 个保水剂用量,处理 1:无保水剂(CK)。处理 2:27 mg/kg,处理 3:54 mg/kg,处理 4:81 mg/kg。试验为盆栽,不施氮肥,将普通过磷酸钙(P_2O_5 为 533 mg/kg)、保水剂与 5 kg 过 10 mm 筛土混匀施于盆 2/3 处,盆底层和上层均覆盖过筛的土,盆装土(风干土)18 kg,装好盆后每盆浇足水(5 kg),待 7 d 后选择饱满的小麦种子播种。播量为 63 粒/盆。于返青期剔苗,每盆剩 36 株。每处理设 5 个重复,共 20 盆。播种到返青期正常供水,并从返青期开始控水,控水范围:50% ~ 65%(占田间持水量),在拔节期当对照土壤水分低于田间持水量 50% 时,进行光合参数测定,复水后第 3 天开始连续观测 3d。装盆后田间持水量为 18%,土壤密度为 1.35 g/cm³。

1.2.3 测定项目与方法

(1) 光合作用测定

净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等采用美国 LI-COR 公司生产的 Li-6400 型光合仪测定。叶

片水分利用效率(单位质量的水分植物所能同化的CO₂)采用 Fischer 的方法^[27~28]计算

$$Y_{WUE} = P_n / T_r$$

式中 Y_{WUE} ——叶片水分利用效率, $\mu\text{mol}/\text{mmol}$
 P_n ——光合速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 T_r ——蒸腾速率, $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

(2) 土壤含水率及生物量测定方法

土壤含水率采用称量法测定,每处理 5 个重复中均随机取 1 株植株(地上部分),共计 5 株带回室内,在 105℃ 下杀青 25 min,65℃ 下干燥 8 h 称量。

1.2.4 数据处理

试验光合各参数值均为 9 次重复的算术平均值,土壤含水率为 5 次重复的平均值,所得数据均用统计学及相关的数理统计软件(DPS)进行处理。

2 结果与分析

2.1 复水前后土壤含水率变化特征

复水前后土壤含水率变化如图 1a 所示,复水前(3 月 28 日),各处理土壤含水率表现为:54 mg/kg 处理最低,其他处理差异不显著。复水 1.5 kg/盆后,土壤含水率迅速提高,但随小麦生长与蒸发,复水第 3 天(3 月 31 日)土壤含水率从大

到小的处理依次为:81 mg/kg、CK、27 mg/kg、54 mg/kg($P < 0.05$),随后 2 d 的土壤含水率变化趋势一致。说明在本次试验观测前进行控水后,54 mg/kg 处理土壤水分消耗(蒸腾)较高,导致观测时该保水剂用量的土壤含水率和复水后的土壤含水率均最低,这可能与该用量所保持的水分更易被作物根系吸收有关。而保水剂用量过高时,其保墒能力高于作物和土壤对水分的消耗,增强了土壤的持水能力,并缓慢释放水分供小麦吸收利用。

2.2 复水前后小麦蒸散量的变化特征

从图 1b 中可以看出,复水后第 3 天(3 月 31 日)的小麦水分蒸散量从大到小的处理依次为:54 mg/kg、81 mg/kg、27 mg/kg、CK;第 4 天(4 月 1 日),CK 与 27 mg/kg 处理蒸散量最大,54 mg/kg 保水剂处理水分蒸散最小,其次为 81 mg/kg 处理;第 5 天(4 月 2 日)与第 4 天趋势一致,但各处理间的差异($P < 0.05$)增大。复水后 5 d 累积蒸散量随保水剂用量的增加而减少。说明在复水后的高水条件下,54 mg/kg 处理的土壤水分更容易被蒸发和蒸腾而逸失,而当土壤含水率降低到一定程度时,其蒸散量降低。

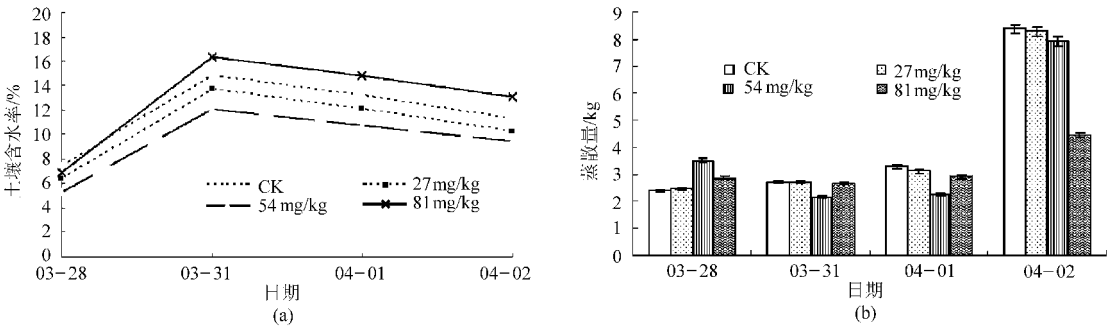


图 1 复水前后土壤含水率与蒸散量

Fig. 1 Characteristics of soil moisture and evaporation before and after re-watering

(a) 土壤含水率 (b) 蒸散量

2.3 复水前后冬小麦光合速率对保水剂不同用量的响应

从图 2a 中可以看出,干旱胁迫时(3 月 28 日),CK 与 27 mg/kg 保水剂处理的光合速率最高,54 mg/kg 保水剂处理次之,81 mg/kg 保水剂处理最低,说明在土壤水分过度干旱时,保水剂的施用降低了小麦的光合速率,且用量越高降低越明显。复水后光合速率迅速提高,复水后第 3 天,光合速率从大到小处理依次为:54 mg/kg、CK、81 mg/kg、27 mg/kg($P < 0.05$);第 4 天与第 3 天表现一致;第 5 天,虽然土壤含水率迅速下降,但 27 mg/kg 和 81 mg/kg 处理的光合速率较第 4 天有明显提高,其中 27 mg/kg 处理提高幅度较大,54 mg/kg 处理光合速率最

低。表明干旱胁迫时,施用保水剂降低了小麦的光合速率,且复水后土壤含水率较高时(4 月 1 日和 4 月 2 日),保水剂处理的光合速率仍较对照低。

2.4 复水前后冬小麦蒸腾速率对保水剂不同用量的响应

复水前后各处理的蒸腾速率如图 2b 所示,复水前各处理的蒸腾速率表现为:27 mg/kg、CK、54 mg/kg、81 mg/kg。复水后第 3 天,除 27 mg/kg 处理外,其他处理蒸腾速率均提高,其中,54 mg/kg 保水剂处理的蒸腾速率最高,CK 次之,81 mg/kg 处理居中,27 mg/kg 处理的蒸腾速率最低。复水后第 4 天各处理蒸腾速率均降低,且各处理间蒸腾速率表现与复水后第 3 天的一致。值得注意的是,随作物的生

长和土壤含水率的下降,除 54 mg/kg 处理外,其他处理的蒸腾速率均增大,其大小顺序依次为: 27 mg/kg、CK、81 mg/kg、54 mg/kg。表明复水后,除 54 mg/kg 处理外,随土壤含水率的降低,其他处理小

麦叶片蒸腾速率降低到一定程度后有所提高,尤其是 27 mg/kg 处理。总体来看,施用保水剂降低了小麦的蒸腾速率,尤其是在土壤含水率较低时(3 月 28 日和 4 月 2 日),有利于叶片水分利用效率的提高。

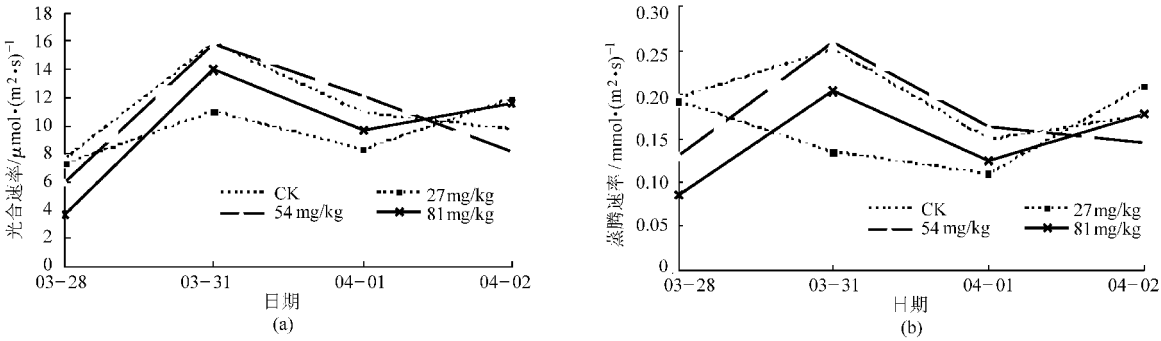


图 2 复水前后光合速率与蒸腾速率
Fig. 2 Characteristics of photosynthetic rate and transpiration rate before and after re-watering
(a) 光合速率 (b) 蒸腾速率

2.5 复水前后冬小麦叶片气孔导度对保水剂用量的响应

从图 3a 可以看出,干旱胁迫时(3 月 28 日), CK 和 27 mg/kg 处理的气孔导度显著大于 54 mg/kg 和 81 mg/kg,即随保水剂用量的增加气孔导度下降。而复水后第 3 天,除 27 mg/kg 外,其他处理气孔导度迅速上升,其中 54 mg/kg 处理气孔导度大,其次为 CK,81 mg/kg 处理居中,而 27 mg/kg 的最小。随土壤含水率的降低,气孔导度迅速下降,其中各处理大小表现与 3 月 31 日的趋势一致。复水后第 5 天,27 mg/kg 和 84 mg/kg 处理的气孔导度有所增大,而 CK 与 54 mg/kg 处理继续降低,但降幅变缓。其气孔导度从大到小的处理依次为: 27 mg/kg、CK、81 mg/kg、54 mg/kg。说明在保水剂用量适中(54 mg/kg)时,复水后在土壤含水率较高时的气孔导度显著高于其他保水剂处理。保水剂用量过低有利于干旱条件下气孔导度的增加(3 月 28 日和 4 月 2 日)。而保水剂用量过高(81 mg/kg)时,气孔导度复水前后均较低。

2.6 复水前后冬小麦水分利用效率对保水剂用量的响应

复水前后各处理小麦叶片水分利用效率的响应如图 3b 所示。干旱胁迫时,CK 与保水剂用量为 27 mg/kg 处理叶片水分利用效率最低,而 54 mg/kg 处理的最高,81 mg/kg 处理的居中。说明在干旱胁迫条件下,54 mg/kg 用量更有利于提高叶片水分利用效率,而用量过高,则水分利用效率有所下降。复水后第 3 天,27 mg/kg 处理的水分利用效率回升最快且较其他处理高,其次为 81 mg/kg 处理,54 mg/kg 处理最低,CK 居中。第 4 天,27 mg/kg 处理的水分利用效率显著降低,而其他处理继续升高;第 5 d,各处理水分利用效率均降低,表现为: 81 mg/kg 处理最高,其他处理差异不显著。说明,施用保水剂均显著提高了小麦复水前后的水分利用效率,而 54 mg/kg 处理的水分利用效率之所以低,可能因其叶片的气孔导度较大,虽然光合速率较高,但蒸腾速率较其他保水剂处理提高得更快,因此水分利用效率较低。

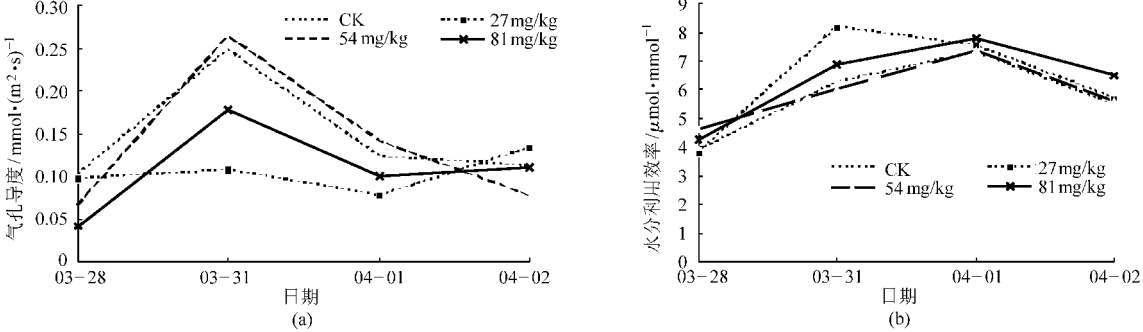


图 3 复水前后叶片气孔导度及叶水分利用效率
Fig. 3 Characteristics of stomatal conductivity and water use efficiency of leaves before and after re-watering
(a) 气孔导度 (b) 水分利用效率

2.7 小麦生物量对保水剂用量的响应

保水剂对光合生理特征的影响,最终体现在作物的干物质积累上。从图 4 中可以看出,施用保水剂后,小麦生物量显著增加($P < 0.05$),且随保水剂用量的增加而增加。其中生物量对保水剂用量的响应以 81 mg/kg 处理最显著。

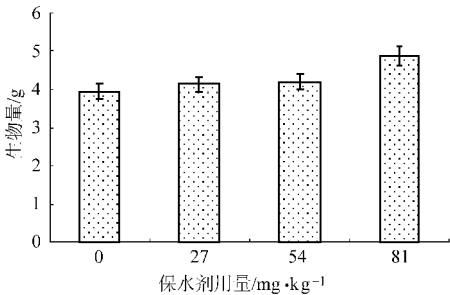


图 4 不同处理生物量比较

Fig. 4 Comparison of biomass between different treatments

2.8 气孔导度与土壤含水率、光合速率等的关系对保水剂用量的响应

气孔导度与土壤含水率、光合速率、蒸腾速率和

水分利用效率关系如图 5 所示。其中,除 27 mg/kg 处理的小麦叶片气孔导度与土壤含水率和水分利用效率成负相关关系外,其他处理气孔导度与土壤含水率、光合速率、蒸腾速率和水分利用效率均为正相关关系,但相关性强弱存在差异。气孔导度与土壤含水率的相关性以保水剂用量 81 mg/kg 处理最强,其次为 54 mg/kg 处理和 CK,27 mg/kg 处理的紧密度最低(图 5a)。气孔导度与光合速率的相关性以施用量 54 mg/kg 处理最强($P = 0.0389 < 0.05$),依次为 CK($P = 0.0402 < 0.05$)和 81 mg/kg 处理($P = 0.0483 < 0.05$)(图 5b),27 mg/kg 处理的紧密度最低($P = 0.2015$)。气孔导度与蒸腾速率的相关性以 54 mg/kg 处理最紧密($P = 0.0130 < 0.05$),依次为 81 mg/kg 处理($P = 0.0704$)和 CK($P = 0.1637$),27 mg/kg 处理的紧密度仍最低($P = 0.2486$)(图 5c)。气孔导度与水分利用效率相关性紧密程度各处理均较低($P = 0.3505 \sim 0.8054$),尤其是 27 mg/kg 处理(图 5d)。

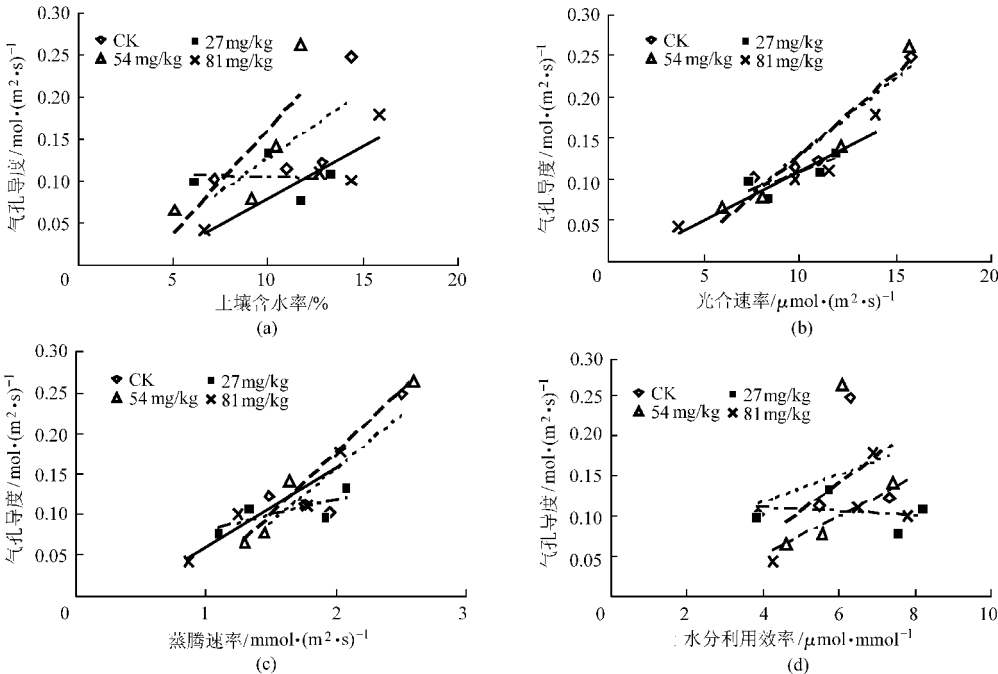


图 5 气孔导度与土壤含水率、光合速率、蒸腾速率及水分利用效率对保水剂不同用量的响应

Fig. 5 Response of the relation of stomatal conductivity and soil moisture, photosynthetic rate, transpiration rate, and water use efficiency to water-retaining agent

2.9 光合速率与土壤含水率、蒸腾速率等的关系对保水剂用量的响应

光合速率与土壤含水率、蒸腾速率和水分利用效率的关系均为正相关关系(图 6)。其中,光合速率与土壤含水率的相关性以施用量为 81 mg/kg 处理最强($P = 0.0620$),依次为施用量为 54 mg/kg 处理和 CK($P = 0.0966, P = 0.1018$)(图 6a),与

27 mg/kg 处理相关性最低($P = 0.4408 < 0.05$)。光合速率与蒸腾速率的相关性以 81 mg/kg 处理最显著($P = 0.0455 < 0.05$),其次为 54 mg/kg 处理($P = 0.0770$),对照($P = 0.3445$)和 27 mg/kg($P = 0.7677$)处理相关性最低(图 6b)。光合速率与水分利用效率相关性大小依次为:81 mg/kg、54 mg/kg、CK、27 mg/kg。但均不显著(图 6c)。表明保水剂不

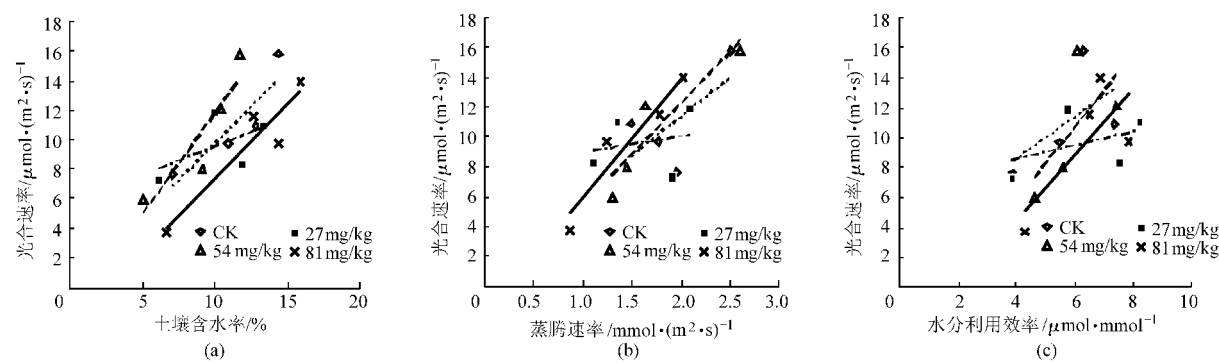


图 6 光合速率与土壤含水率、蒸腾速率及水分利用效率对保水剂不同用量的响应

Fig. 6 Response of the relation of photosynthetic rate and soil moisture, transpiration rate, and water use efficiency to water-retaining agent

同用量对小麦叶片气体交换参数的影响并不具有一致性,而 27 mg/kg 保水剂用量对于各参数相关性的影响最低。

3 结论

(1) 作物对水分的消耗一部分用于自身的蒸腾,而另一部分为无效蒸发损耗。施用保水剂能够提高土壤含水率、减少土壤无效蒸发,但不同用量处理表现各异。研究表明,81 mg/kg 处理的土壤含水率复水前后均最高,54 mg/kg 处理最低。在每处理灌水 1.5 kg 后,累计耗水量从大到小的处理依次为:CK、27 mg/kg、54 mg/kg、81 mg/kg。这与小麦的耗水特征及保水剂所吸持的水分状况能够被根系吸收利用的能力大小有关。

(2) 土壤含水率状况会影响叶片气孔阻力和水势,干旱胁迫会降低光合生理代谢^[2]及植物的最大净光合速率。施用保水剂可有效改善土壤含水率状况,促进作物的光合速率、产量和水分利用效率的提高^[21],但针对不同作物要注意保水剂用量。同时,干旱复水前后及土壤水分缓慢释放过程中,保水剂不同用量对作物气孔导度、光合速率、蒸腾速率等影响如何,对探明保水剂作用机理具有重要意义。

研究结果表明,干旱胁迫时,CK 与 27 mg/kg 处理的光合速率、蒸腾速率和气孔导度均最高。复水后各处理光合速率、蒸腾速率、气孔导度等迅速提高,而随土壤含水率的降低,CK 与 27 mg/kg 处理的光合速率、蒸腾速率及气孔导度降低到一定范围后又提高。这可能与其当时的水分条件及作物水分消耗特征有关。

复水后,81 mg/kg 处理的光合速率、蒸腾速率和气孔导度均较低,但 54 mg/kg 处理均高于其他处理,但最终的水分利用效率以 81 mg/kg 处理最高,

可能是该用量保水剂所吸持的水分在其释放供给小麦根系时较为缓慢而导致根系感受到一定的干旱胁迫,因此合成了较多的 ABA,从而促使地上叶片气孔导度降低,而在此过程中,只要作物的光合机构没有破坏,蒸腾散失对气孔的依赖大于光合作用,因此,植物光合速率的下降比率低于水分消耗的比率,从而提高水分利用效率^[29]。而 54 mg/kg 处理虽然较其他保水剂用量提高了小麦的光合速率,但其气孔导度也较其他处理高,因此,最终的水分利用效率因其蒸腾速率增加较快而导致较低。27 mg/kg 处理光合速率、蒸腾速率及气孔导度在复水后均较其他处理低,但蒸腾速率下降得更快,因此水分利用效率较高。而 CK 虽然光合速率较高,但其叶片蒸腾速率更高,导致最终的水分利用效率较低。这与文献^[25]研究结果一致。最终光合物质的积累随保水剂用量的增加而增加,且 81 mg/kg 处理最高。

(3) 光合速率和气孔导度与土壤含水率、蒸腾速率、水分利用效率之间具有一定正相关关系。气孔导度与光合速率、蒸腾速率的相关性以 54 mg/kg 处理最强,而与土壤含水率的相关性以 81 mg/kg 处理最强。光合速率与土壤含水率、蒸腾速率及水分利用效率的相关性均以 81 mg/kg 处理最强。表明保水剂在一定程度上改变了光合速率、气孔导度、土壤含水率、蒸腾速率、水分利用效率之间的相关关系。继而说明光合生理指标间的相关性对保水剂的响应存在用量上的差异,这对保水剂的正确推广应用具有重要的价值。

(4) 综上所述,过度干旱可能影响植物的部分光合器官,导致复水后保水剂处理的小麦光合速率仍低于对照,但最终的水分利用效率和生物量均以保水剂处理为高,且 81 mg/kg 处理的效果最佳。

参考文献

- 1 胡廷积,杨永光,马元喜,等. 小麦生态与生产技术[M]. 郑州:河南科技出版社,1986:19~23.
- 2 张正斌. 作物抗旱节水的生理遗传育种基础[M]. 北京:科学出版社,2003:202~431.
- 3 张香凝,孙向阳,王保平,等. 土壤水分含量对 *Larrea tridentata* 苗木光合生理特性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2008,30(2):95~101.
Zhang Xiangning, Sun Xiangyang, Wang Baoping, et al. Effects of soil moisture on photosynthetic characteristics of *Larrea tridentata* seedlings [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008,30(2):95~101. (in Chinese)
- 4 Calbo M E R, Moraes J A P V. Efeitos da deficiência de agua em plants de *Euterpe oleracea* (açai) [J]. Revista Brasileira Botânica, 2000, 23(3): 225~230.
- 5 Oliveira M A J, Bovi M L A, Machado E C, et al. Photosynthesis, stomatal conductance and transpiration in peach palm[J]. Scientia Agricola, 2002, 59(1): 59~63.
- 6 Souza R P, Machado E C, Silva J A B, et al. Photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence and some associated metabolic changes in cowpea (*Vigna unguiculata*) during water stress and recovery [J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, 51(1): 45~56.
- 7 Miyashita K, Tanakamaru S, Maitani T, et al. Recovery responses of photosynthesis, transpiration and stomatal conductance in kidney bean following drought stress [J]. Environmental and Experimental Botany, 2005, 53(2): 205~214.
- 8 Sarker B C, Hara M, Uemura M. Proline synthesis, physiological responses and biomass yield of eggplants during and after repetitive soil moisture stress [J]. Scientia Horticulturae, 2005, 103(4): 387~402.
- 9 Lawlor D W, Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficit in higher plants [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2): 275~294.
- 10 Galmés J, Medrano H, Flexas J. Photosynthetic limitations in response to water stress and recovery in Mediterranean plants with different growth forms [J]. New Phytol, 2007, 175(1): 81~93.
- 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.
Yang Lianli, Li Zhongjin, Deng Juanli. Development status and trend of super absorbent polymers [J]. Materials Review, 2005, 19(6):42~44. (in Chinese)
- 12 李秧秧,黄占斌. 节水农业中化控技术的应用研究[J]. 节水灌溉,2001(3):4~6.
Li Yangyang, Huang Zhanbin. Micro-irrigation membrane—a new micro-irrigation technique [J]. Water Saving Irrigation, 2001(3):4~6. (in Chinese)
- 13 汪亚峰,李茂松,宋吉青,等. 保水剂对土壤体积膨胀率及土壤团聚体影响研究[J]. 土壤通报,2009,40(5):1 022~1 025.
Wang Yafeng, Li Maosong, Song Jiqing, et al. Study on effect of absorbent on soil aggregates and ratio of soil bulks expanding [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009,40(5):1 022~1 025. (in Chinese)
- 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.
Cao Lihua, Zhao Shiwei, Liang Xiangfeng, et al. Improvement effects of PAM on soil water-stable aggregates and its mechanisms in different soils in the Loess Plateau [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(1):45~49. (in Chinese)
- 15 Sojka R E, Bjorneberg D L, Entry J A, et al. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management [J]. Advances in Agronomy, 2007,92: 75~162.
- 16 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.
Yang Yonghui, Wu Jicheng, Wu Pute, et al. Effect mechanism of straw mulching and water-retaining agent on soil structure, evaporation, and infiltration process [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2009,7(5):70~75. (in Chinese)
- 17 董英,郭绍辉,詹亚力. 聚丙烯酰胺的土壤改良效应[J]. 高分子通报,2004(5):83~87.
Dong Ying, Guo Shaohui, Zhan Yali. Polyacrylamide effects on soil amendments [J]. Polymer Bulletin, 2004(5):83~87. (in Chinese)
- 18 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.
Yang Yonghui, Zhao Shiwei, Huang Zhanbin, et al. Study on water-conserving ability of multifunctional water absorbent [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006,24(5):35~37. (in Chinese)

- 19 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.
Yang Yonghui, Wu Jicheng, Zhao Shiwei, et al. Effects of PAM on soil retention water [J]. Journal of Northwest A & F University: Nat. Sci. Ed., 2007,35(12):120~124. (in Chinese)
- 20 杨永辉,武继承,史福刚,等. 冬小麦生育期不同保水措施土壤水分变化研究[J]. 腐植酸,2008(5):8~23.
Yang Yonghui, Wu Jicheng, Shi Fugang, et al. Effect of different water-retaining methods on soil moisture during growing stages of winter wheat[J]. Humic Acid, 2008(5):8~23. (in Chinese)
- 21 杨永辉,武继承,何方,等. 保水剂用量对冬小麦光合特征及水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(4):131~135.
Yang Yonghui, Wu Jicheng, He Fang, et al. Effect of dosage of water-retaining agent on photosynthetic characteristics and water utilization in different growth stages of winter wheat [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009,27(4):131~135. (in Chinese)
- 22 Falatah A M, Alomran A M. Impact of a soil conditioner on some selected chemical-properties of a calcareous soil [J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1995, 9(1): 91~96.
- 23 Taban M, Naeini S A R M. Effect of aquasorb and organic compost amendments on soil water retention and evaporation with different evaporation potentials and soil textures [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2006, 37(13~14): 2 031~2 055.
- 24 闫永利,于健,魏占民,等. 土壤特性对保水剂吸水性能的影响[J]. 农业工程学报,2007,23(7):76~79.
Yan Yongli, Yu Jian, Wei Zhanmin, et al. Effects of soil properties on water absorption of super absorbent polymers [J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(7):76~79. (in Chinese)
- 25 庄文化,吴普特,冯浩,等. 土壤中施用聚丙烯酸钠保水剂对冬小麦生长及产量影响[J]. 农业工程学报,2008,24(5):37~41.
Zhuang Wenhua, Wu Pute, Feng Hao, et al. Effects of super absorbent polyer of sodium polyacrylate used in soil on the growth and yield of winter wheat [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(5):37~41. (in Chinese)
- 26 韦兰英,袁维圆,焦继飞,等. 紫花苜蓿和菊苣比叶面积和光合特性对不同用量保水剂的响应[J]. 生态学报,2009,29(12):6 772~6 778.
Wei Lanying, Yuan Weiyuan, Jiao Jifei, et al. The response of SLA and photosynthesis of Medicago sativa and Cichorium intybus to different rates of super absorbent polymer [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(12):6 772~6 778. (in Chinese)
- 27 Fischer R A, Turner N C. Plant production in the arid and semiarid zones [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978, 29: 277~317.
- 28 Powel S B. Photo inhibition of photosynthesis induced by visible light [J]. Annual Review of Plant Physiology, 1984, 35: 15~44.
- 29 Bassman J B, Zwier J C. Gas exchange characteristics of Populus trichocarpa, Populus deltoids and Populus trichocarpa × P. deltoids clone [J]. Tree Physiology, 1991, 8(2): 145~149.