

# 不同水分条件下保水剂对黄瓜根系和叶片生理特征的影响

纪冰祎<sup>1,2</sup>, 赵驰鹏<sup>1</sup>, 吴玥<sup>1</sup>, 宋吉青<sup>1</sup>, 白文波<sup>1</sup>

(1.中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081;

2.辽宁省现代农业生产基地建设工程中心, 辽宁 沈阳 110032)

**摘要:** [目的] 研究不同土壤干旱生境中保水剂对黄瓜根系和叶片生理特征的影响, 探讨其生长效应与土壤水分的内在联系, 为保水剂的合理施用和农田科学灌溉等提供一定的技术参考。[方法] 利用盆栽模拟试验, 通过定量灌水, 系统研究在 3 种不同的土壤水分条件下, 保水剂对黄瓜根际水分、根系形态特征、叶绿素荧光参数和叶片气孔性状等生理特性的影响。[结果] ①不同水分条件下, 保水剂处理的黄瓜根系生长受到明显抑制。与对照相比, 保水剂处理组在土壤含水量为田间持水量 70% (FC<sub>2</sub>) 和 55% (FC<sub>3</sub>) 时的总根长、平均根系直径、总根体积、根表面积和根干重均显著降低, 分别降低了 3.4%, 24.2%, 62.1%, 41.0% 和 51.6% 以上。②随着干旱胁迫的加剧, 保水剂处理叶片的有效光合效率 ( $F_v'/F_m'$ ) 和实际量子产量 [ $Y(II)$ ] 较对照出现先升后降的变化趋势, 非光化学淬灭 (NPQ) 则呈相反的变化; 尤其在 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 处理时, 保水剂处理促使黄瓜叶片的光化学淬灭 ( $q_P$ ) 较对照分别降低了 5.5% 和 9.1%。③与保水剂相比, 土壤水分条件对黄瓜叶片气孔开张比和气孔开张度的影响更大。[结论] 土壤水分状况是决定保水剂能否缓解作物干旱胁迫的重要因素之一。土壤含水量为田间持水量的 70% 和 55% 时, 保水剂反而会加重干旱胁迫对黄瓜根系生长和叶绿素荧光特性的不利影响。

**关键词:** 保水剂; 土壤水分; 根系形态; 叶片气孔; 荧光特性

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2022)02-0114-08

**中图分类号:** S642.2

**文献参数:** 纪冰祎, 赵驰鹏, 吴玥, 等. 不同水分条件下保水剂对黄瓜根系和叶片生理特征的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(2): 114-121. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220124.001; Ji Bingyi, Zhao Chipeng, Wu Yue, et al. Effects of super-absorbent polymers on physiological properties of cucumber roots and leaves under different water conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(2): 114-121.

## Effects of Super-absorbent Polymers on Physiological Properties of Cucumber Roots and Leaves Under Different Water Conditions

Ji Bingyi<sup>1,2</sup>, Zhao Chipeng<sup>1</sup>, Wu Yue<sup>1</sup>, Song Jiqing<sup>1</sup>, Bai Wenbo<sup>1</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese

Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Liaoning Province Modern

Agricultural Production Base and Construction Engineering Center, Shenyang, Liaoning 110032, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of super-absorbent polymers (SAPs) on physiological properties of cucumber roots and leaves under different drought conditions were studied in order to clarify the internal relationships between plant growth and soil water conditions with SAP applications. [Methods] A pot experiment with varying irrigation amounts was conducted to study the effects of SAPs on physiological properties of cucumber rhizosphere moisture, root morphology, leave chlorophyll fluorescence parameters, and stomatal characteristics were measured under three different water conditions. [Results] ① The growth of cucumber roots was significantly inhibited by the SAP treatments. Compared with the control, total root length, average root

收稿日期: 2021-07-12

修回日期: 2021-10-27

资助项目: 国家自然科学基金项目“保水剂—土壤多相体系中团聚体形成及水分传导的互作机理”(41601226)

第一作者: 纪冰祎(1991—), 女(锡伯族), 辽宁省沈阳市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事旱作与节水农业研究。Email: jibingyi1991@163.com。

通讯作者: 白文波(1980—), 女(汉族), 山西省偏关县人, 博士, 副研究员, 主要从事农业抗旱节水新材料研发与应用技术研究。E-mail: baiwenbo@caas.cn。

diameter, total root volume, root surface area, and root dry weight of SAP treatments were significantly reduced by 3.4%, 24.2%, 62.1%, 41.0%, and 51.6%, respectively, when soil water content was 70% (FC<sub>2</sub>) and 55%(FC<sub>3</sub>) of field capacity. ③ Effective photosynthetic efficiency ( $F_v'/F_m'$ ) and actual quantum yield [Y(II)] with SAP treatments initially increased and then decreased with increasing drought stress, while non-photochemical quenching (NPQ) showed the opposite change. Especially with FC<sub>2</sub> and FC<sub>3</sub>, the photochemical quenching ( $q_p$ ) values of cucumber leaves were significantly reduced by 5.5% and 9.1%, respectively, compared with the control. ③ The effects of soil water on open stomata number, total stomatal ratio, and stomatal opening of cucumber leaves were greater than the effects of SAPs. [Conclusion] Soil water content was one of the important factors determining whether SAPs can alleviate drought stress of plants. When soil water content was 70% and 55% of field capacity, SAPs aggravated the negative effects of drought stress on cucumber root growth and chlorophyll fluorescence characteristics.

**Keywords:** super-absorbent polymer (SAPs); soil water; root morphology; leaf stomata; fluorescence characteristics

土壤水分是“土壤—植物—大气连续体 (SPAC)”过程中的核心要素,提高根际土壤水分被植物有效吸收利用既是探究农业节水机理的关键,也将是农业高效用水技术发展的主流方向<sup>[1]</sup>。保水剂是一种含有大量羧基、羟基等亲水基团的高分子聚合物,不仅对水分有较强的吸附和保蓄能力,还具有反复吸水 and 释水的特点<sup>[2]</sup>,适量施用可明显提高土壤水分含量<sup>[3]</sup>,减少土壤水分蒸发和过度下渗<sup>[4-5]</sup>,改善土体结构<sup>[6]</sup>,调节作物生理节水效应,从而提高作物产量<sup>[7]</sup>,因此在节水农业生产和生态环境修复等领域得到了广泛应用。

保水剂主要通过两种方式影响植物的生长发育,一是通过改善植物根系和土壤界面的水分状况,在植物根系根压的作用下,直接将水分提供给植物;另一种是通过保水剂的分子链与水分子和土壤颗粒的结合,改善植物根际土壤结构,增强土壤水分保蓄能力,间接向植物供应水分<sup>[2,8]</sup>。已有的研究表明,保水剂对植物水分利用率和生长发育具有积极的调控作用<sup>[9-11]</sup>,但保水剂功能作用的有效发挥受多种因素制约,保水剂自身吸收的水分并不一定能完全被植物吸收利用<sup>[12-13]</sup>,甚至在干旱胁迫下会抑制植物生长<sup>[14]</sup>。目前关于保水剂对植物生长和生理参数的影响研究主要集中于保水剂种类<sup>[15]</sup>、施用量<sup>[12]</sup>和施用方式<sup>[16]</sup>影响等方面。对于保水剂改善作物生长和抗旱性的

作用是否与土壤水分状况有关,以及二者之间的关系问题尚鲜有报道。因此,本研究基于盆栽试验,通过控制灌水量来模拟不同的土壤干旱生境,比较研究在不同水分条件下,保水剂对黄瓜根际土壤水分、根系形态、根系生物量,以及叶片荧光特性和气孔特性等的影响,明确保水剂对黄瓜生长和生理指标的调控作用与土壤水分状况的内在联系,旨在规避保水剂实际应用中可能存在的潜在风险,为保水剂的合理施用和田间科学灌溉等提供一定的技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验所用保水剂为日本触媒公司生产的绿立普农用保水剂。外观为乳白色,主要成分为聚丙烯酸钠,颗粒大小为 0.30~0.85 mm。保水剂在蒸馏水、自来水和 0.9% NaCl 溶液中的吸水倍率分别为 196, 144 和 38 g/g。供试土壤选用细河沙,所有河沙过 2 mm 标准筛,清洗、灭菌后待用。河沙的基本理化性状为:田间持水量为 12.58%,pH 值 7.52,EC(可溶性盐浓度)值 1 833  $\mu$ S/cm。河沙的颗粒大小和组成详见表 1。试验中所用黄瓜种子为中国农业科学院蔬菜花卉所培育的中农 26 号,种子纯度、净度、发芽率和水分分别为 95.0%,99.0%,90.0%和 8.0%。

表 1 供试河沙的颗粒大小和组成

颗粒粒径/mm	>2	1~2	0.5~1	0.25~0.5	0.25~0.053	<0.053
颗粒组成/%	0	0.4	31.9	54.8	11.3	1.6

1.2 试验设计

盆栽试验于 2019 年 11 月至 2020 年 2 月在中国农业科学院环发所人工气候室进行。人工气候室的环境条件设置为:昼(7:30—19:30,温度 28  $^{\circ}$ C,湿度 60%);夜(19:30 至次日 7:30,温度 20  $^{\circ}$ C,湿度

60%),光照为 700~800  $\mu$ mol/(m<sup>2</sup>·s)。在底部带孔的直筒盆(直径 16 cm,高 17.5 cm)先平铺 2 cm 厚的河沙并适当压实,然后将一定量的保水剂,即保水剂与河沙以质量比 0%(CK 处理)和 0.3%(SAP 处理)分别与河沙充分混合均匀,铺在之前压实的河沙

上层约 10 cm,适当压实,最后再覆盖 2 cm 的河沙并压实。

挑选饱满的黄瓜种子,恒温 55 ℃ 浸种 20 min 后将种子捞出,放入培养皿中用保鲜膜封口,培养皿保持一定湿度;然后将培养皿置于恒温 28 ℃ 的培养箱中进行催芽。催芽后将长势一致的黄瓜种子播于试验盆中,播种深度为 1 cm,正常浇水种植。每隔 7 d 浇 1 次营养液。待黄瓜苗长到三叶一心期时开始进行控水处理。设置 3 个灌水水平,以每天 9:00 的土壤水分作为标准,采用称重法调节灌水量,每天 9:00 向试验盆内补充水分,使得土壤含水量分别达到田间持水量(FC)的 90%±2%(FC<sub>1</sub>),70%±2%(FC<sub>2</sub>)和 55%±2%(FC<sub>3</sub>)。试验每个处理设 3 次重复,共 18 盆。控水 20 d 后,取样当天未进行补充灌溉的情况下,取样测定各项指标。

### 1.3 测试项目与方法

**1.3.1 根系形态及根干重** 将黄瓜根系完整取出,小心冲洗附着在根系表面的泥沙和其他杂质,然后用吸水纸轻轻吸干根系表面多余的水分,将洗净的根系平铺在根系扫描盘上,利用根系扫描分析系统(Win RHIZO)按 1:1 比例进行扫描成像与数据分析。扫描结束后将根系放入烘箱中 70 ℃ 烘干 24 h 后测定黄瓜根干重<sup>[17]</sup>。

**1.3.2 叶绿素荧光参数** 将黄瓜植株暗处理 30 min 后,于 19:30—21:30 取各处理植株相同位置新鲜且完全展开的功能叶片,将叶片平铺于荧光成像系统(Imaging PAM2 000)的  $x-y$  台上,每个叶片以叶脉为轴对称选取 4 个点。打开弱测量光测定初始荧光  $F_o$ ,设置 7 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的饱和脉冲光测定最大荧光  $F_m$ ,关闭脉冲光后待荧光恢复至  $F_o$  附近并打开光化光,当荧光曲线达到稳定状态关闭光化光,记录相关的叶绿素荧光参数。叶绿素荧光参数计算公式为:

PS II 有效光合效率( $F_v'/F_m'$ ):

$$F_v'/F_m' = (F_m' - F_o')/F_m' \quad (1)$$

式中: $F_o'$ 、 $F_m'$  分别为光适应下的最小荧光和最大荧光。

PS II 的实际量子产量[Y(II)]:

$$Y(\text{II}) = (F_m' - F)/F_m' \quad (2)$$

式中: $F$  为任意时间的实际荧光产量。

非光化学淬灭(NPQ):

$$\text{NPQ} = (F_m - F_m')/F_m' \quad (3)$$

式中: $F_m$  为暗适应下的最大荧光。

光化学淬灭( $q_P$ ):

$$q_P = (F_m' - F_s)/(F_m' - F_o') \quad (4)$$

式中: $F_s$  为暗适应下的稳态荧光。

**1.3.3 叶片气孔特征** 采用指甲油印迹法<sup>[18]</sup> 制片。于 10:00—12:00 取各处理植株相同部位的功能叶片,随即在叶片上表皮涂抹面积约 1  $\text{cm}^2$  的透明指甲油,待其风干后,用透明胶带粘住指甲油的印迹,并适当压紧。然后用镊子小心撕下粘有叶片气孔的胶带,将胶带粘在载玻片上。利用光学显微镜(OLYMPUS CX23)在 40 倍目镜下观察叶片上表皮的气孔特征。每个叶片随机选取 5 个点进行制片,每个载玻片观察 6 个视野,即每个处理观察 90 个视野。利用 Image J 图像分析软件测量气孔相关指标。其中,测量视野面积,计算每个视野的气孔个数,取平均值后除以视野面积,得到气孔密度,即每  $\text{mm}^2$  含有的气孔个数<sup>[19]</sup>。气孔长宽为每个视野中选取 3 个完全闭合的气孔,长度为哑铃型保卫细胞的长度,宽度为垂直于哑铃型保卫细胞的最大宽度。气孔开张比为开张的气孔数与总气孔数之比。气孔开张度为每个视野选取 3 个开放气孔,测定气孔开放的孔径宽度。

**1.3.4 土壤相对含水率** 控水 20 d 后,取试验盆中 2—10 cm 土层适量土壤样品,用烘干法<sup>[20]</sup> 测定土壤重量含水率,通过公式换算土壤相对含水率。

土壤相对含水率 = 土壤重量含水率 / 土壤田间持水量

### 1.4 数据处理

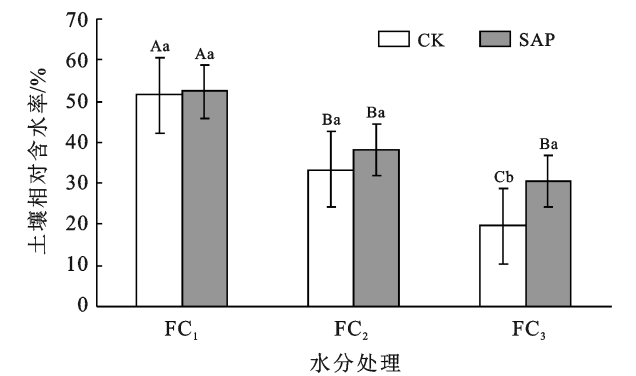
试验所得数据采用 Excel 2013 进行数据处理和图表绘制,采用 SAS 9.4 对数据进行方差分析。文中所有图表数据均为 3 次重复测定的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水分条件下土壤相对含水率的变化

图 1 为不同灌水量条件下土壤的相对含水率。当通过控制灌水量,将土壤含水量调节为田间持水量的 90%、70% 和 55% 时,实际取样测得的对照 CK 组的土壤相对含水率分别为 51.4%(FC<sub>1</sub>),33.4%(FC<sub>2</sub>)和 19.6%(FC<sub>3</sub>),各水分处理之间达到了显著差异;但 SAP 处理随灌水量减少引起的土壤相对含水率降低的幅度明显小于对照,FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 水分条件下并未达到显著差异。相同水分条件下所对应的 SAP 处理中,土壤相对含水率较 CK 均有不同程度的增加;但 FC<sub>1</sub> 和 FC<sub>2</sub> 水分条件下,各处理之间并未达到显著差异。当水分控制在 FC<sub>3</sub> 范围时,SAP 处理组的土壤相对含水率较 CK 显著增加了 56.5%,说明在水分处理为 FC<sub>3</sub> 时,保水剂对土壤保蓄水分的效果最好。





注:CK,SAP 分别表示对照和保水剂处理。FC<sub>1</sub>,FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 表示控制灌水量使土壤含水量分别达到田间持水量的 90%,70%和 55%。不同用量保水剂处理中不同的小写字母表示处理之间差异显著( $p<0.05$ );不同水分条件下,相同用量保水剂处理中不同的大写字母表示处理之间差异显著( $p<0.05$ )。下同

图 1 不同水分处理条件下土壤相对含水率的变化

2.2 不同水分条件下黄瓜根系形态和根系相关参数的变化

不同处理条件下的黄瓜根系形态见如图 2 所示。整体来看,相同水分处理,CK 组的黄瓜根系较 SAP 处理更发达,须根数量也相对较多。当土壤含水量由 FC<sub>1</sub> 减少到 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 时,CK 处理间黄瓜根系差异

不明显(图 2),但 SAP 处理黄瓜根系须根随土壤水分减少而明显递减。

通过数据处理软件进一步分析黄瓜根系参数,由表 2 可知,除 FC<sub>1</sub> 处理外,其余水分条件下保水剂引起黄瓜根系总根长较 CK 显著减小 3.4%(FC<sub>2</sub>)和 10.8%(FC<sub>3</sub>),且土壤含水量越小,SAP 处理的黄瓜根系总根长也越小。不管是否使用保水剂,黄瓜的平均根系直径均未因土壤水分的不同而产生显著差异。相同水分条件下,SAP 处理黄瓜平均根系直径、总根体积和根表面积分别较 CK 显著减小 24.2%~34.8%,56.5%~62.8%和 35.7%~46.2%。同时,SAP 所引起的总根体积和根表面积减小程度与土壤含水量成正比,即土壤含水量越少,总根体积和根表面积也相对较小。在 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 阶段,SAP 处理的黄瓜总根体积和根表面积较 CK 显著降低了 41.0%~62.8%,且 FC<sub>3</sub> 阶段降幅更大。黄瓜根系干重在不同水分条件下表现为 FC<sub>1</sub>>FC<sub>2</sub>>FC<sub>3</sub>。在 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 阶段,SAP 处理引起的根系干重减少较 FC<sub>1</sub> 处理更显著,相同水分条件下,这两个阶段,SAP 处理根干重较 CK 显著减小 51.6%~53.3%。说明当土壤含水量降至田间持水量的 70%和 55%时,保水剂会对黄瓜根系产生明显抑制。

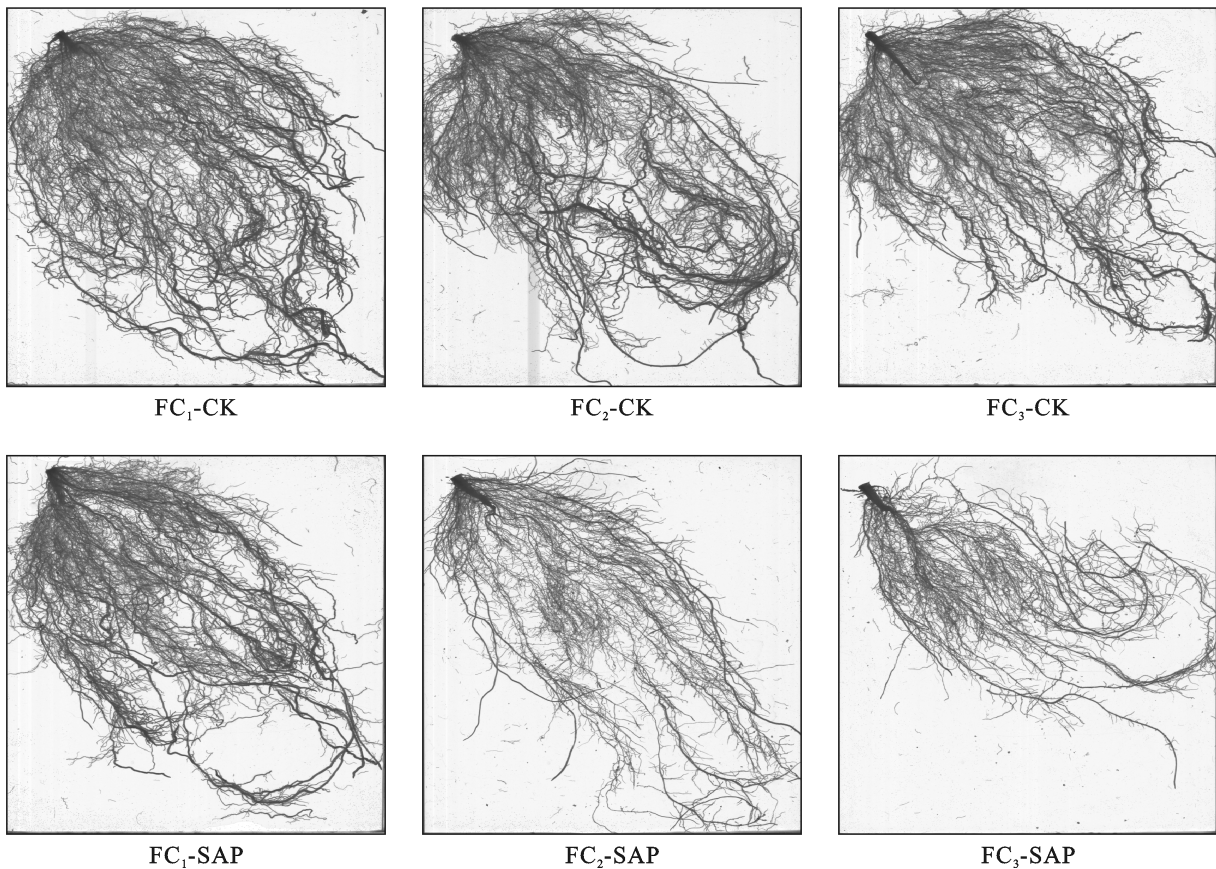


图 2 不同水分处理的黄瓜根系形态变化



表 2 不同水分处理下的黄瓜根系参数变化

水分条件	处理	总根长/cm	平均根系直径/mm	总根体积/cm <sup>3</sup>	根表面积/cm <sup>2</sup>	根系干重/g
FC <sub>1</sub>	CK	409 <sup>Ba</sup>	0.69 <sup>Aa</sup>	7.21 <sup>Aa</sup>	471 <sup>Aa</sup>	0.33 <sup>Aa</sup>
	SAP	411 <sup>Aa</sup>	0.45 <sup>Ab</sup>	3.14 <sup>Ab</sup>	303 <sup>Ab</sup>	0.21 <sup>Ab</sup>
FC <sub>2</sub>	CK	413 <sup>ABa</sup>	0.61 <sup>Aa</sup>	7.25 <sup>Aa</sup>	439 <sup>Ba</sup>	0.31 <sup>Aa</sup>
	SAP	399 <sup>Ab</sup>	0.44 <sup>Ab</sup>	2.75 <sup>Bb</sup>	259 <sup>Bb</sup>	0.15 <sup>Bb</sup>
FC <sub>3</sub>	CK	415 <sup>Aa</sup>	0.62 <sup>Aa</sup>	6.66 <sup>Aa</sup>	420 <sup>Ca</sup>	0.30 <sup>Aa</sup>
	SAP	370 <sup>Bb</sup>	0.47 <sup>Ab</sup>	2.48 <sup>Cb</sup>	226 <sup>Cb</sup>	0.14 <sup>Bb</sup>

2.3 不同水分条件下黄瓜叶片叶绿素荧光参数变化

土壤干旱胁迫能够增加植物光合系统的光抑制程度<sup>[21]</sup>。利用 PSII 有效光合效率( $F_v'/F_m'$ )、PS II 的实际量子产量 $[Y(II)]$ 、非光化学淬灭(NPQ)、光化学淬灭( $q_P$ )等叶绿素荧光参数,能够有效反映干旱胁迫对植物光合生理的影响<sup>[22]</sup>。 $F_v'/F_m'$ 为开放的 PS II 系统原初光能捕获效率, $Y(II)$ 为 PS II 系统有部分关闭时实际原初光能捕获效率。经过比较表 3 的数据发现,FC<sub>1</sub> 条件下,SAP 处理的  $F_v'/F_m'$  和  $Y(II)$  与 CK 间差异并不显著,当土壤含水量降至 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 时,二者则分别较 CK 显著减小 4.5%和 13.0%以上。

NPQ 表示 PS II 系统以热能形式耗散吸收的光能,能够有效的避免光抑制。随着土壤含水量逐渐减小,CK 和 SAP 处理的黄瓜叶片 NPQ 变化趋势有所不同,CK 处理下,当土壤含水量从 FC<sub>1</sub> 减少至 FC<sub>2</sub> 时,后者 NPQ 较前者显著增加 20.4%;但随着土壤含水量继续减少,二者之前差异并不显著。但是在 SAP 处理下,与 FC<sub>1</sub> 相比,当土壤含水量降至 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub>

时,相应地 NPQ 较 FC<sub>1</sub> 时分别显著提高了 74.6%和 92.7%。进一步比较同一水分条件下的各处理,FC<sub>1</sub> 阶段,SAP 处理的 NPQ 较 CK 显著降低了 30.7%;但在 FC<sub>3</sub> 阶段,SAP 处理的 NPQ 反而比 CK 显著增加了 16.9%。说明在 FC<sub>1</sub> 阶段,保水剂能在一定程度上缓解黄瓜的生理干旱;但土壤含水量降低至 FC<sub>3</sub> 阶段,反而会加剧了生理干旱,表现为 NPQ 显著增加,光抑制能力明显提高,通过增加光耗散来降低光抑制的程度,以维持正常的光合能力。

光化学淬灭  $q_P$  表示 PS II 天线色素吸收光能后用于光合作用电子传递的比例,关系着 PS II 系统的开放程度。随着土壤含水量的减少,CK 和 SAP 处理的  $q_P$  均呈现先降后升的变化趋势,当水分条件为 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 时,SAP 使黄瓜叶片的  $q_P$  值较 CK 分别显著降低了 9.1%和 5.5%,说明在这两个阶段,SAP 处理的黄瓜植株可能受到了更为严重的生理干旱影响,需要通过关闭部分 PS II 系统,以热耗散的形式散失过剩的光能。

表 3 不同水分处理下的黄瓜叶片叶绿素荧光参数

水分条件	处理	有效光合效率( $F_v'/F_m'$ )	实际量子产量 $Y(II)$	非光化学淬灭 NPQ	光化学淬灭 $q_P$
FC <sub>1</sub>	CK	0.624 <sup>Aa</sup>	0.503 <sup>Aa</sup>	0.358 <sup>Ba</sup>	0.807 <sup>Aa</sup>
	SAP	0.639 <sup>Aa</sup>	0.520 <sup>Aa</sup>	0.248 <sup>Bb</sup>	0.801 <sup>Aa</sup>
FC <sub>2</sub>	CK	0.601 <sup>Aa</sup>	0.430 <sup>ABa</sup>	0.431 <sup>Aa</sup>	0.715 <sup>Ba</sup>
	SAP	0.574 <sup>Bb</sup>	0.374 <sup>Bb</sup>	0.433 <sup>Aa</sup>	0.650 <sup>Cb</sup>
FC <sub>3</sub>	CK	0.608 <sup>Aa</sup>	0.456 <sup>Ba</sup>	0.409 <sup>ABb</sup>	0.751 <sup>ABa</sup>
	SAP	0.580 <sup>Bb</sup>	0.395 <sup>Bb</sup>	0.478 <sup>Aa</sup>	0.710 <sup>Bb</sup>

2.4 不同水分条件下黄瓜叶片气孔特征的变化

叶片主要通过气孔与外界进行气体交换,气孔的开闭程度影响着植物的水分含量和二氧化碳同化。当植株受到干旱胁迫时,气孔随之关闭以达到降低蒸腾速率,抑制植株内水分散失的目的<sup>[23]</sup>。对比不同水分处理的黄瓜叶片气孔特征(表 4),相同水分条件下,CK 和 SAP 处理的气孔开张比和气孔开张度均无显著差异。当土壤含水量降至 FC<sub>3</sub> 时,CK 和 SAP

处理的气孔开张比较 FC<sub>1</sub> 阶段分别显著降低了 27.7%和 32.1%,CK 和 SAP 处理的气孔开张度较 FC<sub>1</sub> 阶段分别显著降低了 14.9%和 15.2%,说明土壤水分条件对气孔开张比和气孔开张度的影响大于保水剂的影响。不同处理条件下的气孔长度、气孔宽度和气孔密度之间的差异均较小,这可能与此生长阶段黄瓜自身的气孔发育特征有一定关系。

表 4 不同水分处理的黄瓜叶片气孔特征

水分条件	处理	气孔开张比/%	气孔开张度/ $\mu\text{m}$	气孔长度/ $\mu\text{m}$	气孔宽度/ $\mu\text{m}$	气孔密度(个/ $\text{mm}^2$ )
FC <sub>1</sub>	CK	75.8 <sup>Aa</sup>	4.7 <sup>Aa</sup>	25.2 <sup>Aa</sup>	13.8 <sup>Aa</sup>	29 <sup>Aa</sup>
	SAP	75.7 <sup>Aa</sup>	4.6 <sup>Aa</sup>	24.4 <sup>Aa</sup>	13.6 <sup>Aa</sup>	28 <sup>Aa</sup>
FC <sub>2</sub>	CK	65.6 <sup>Aa</sup>	4.4 <sup>Aa</sup>	23.9 <sup>Aa</sup>	13.5 <sup>Aa</sup>	32 <sup>Aa</sup>
	SAP	73.4 <sup>Aa</sup>	4.3 <sup>Aa</sup>	24.6 <sup>Aa</sup>	13.6 <sup>Aa</sup>	30 <sup>Aa</sup>
FC <sub>3</sub>	CK	54.8 <sup>Ba</sup>	4.0 <sup>Ba</sup>	23.7 <sup>Aa</sup>	12.9 <sup>Aa</sup>	31 <sup>Aa</sup>
	SAP	51.4 <sup>Ba</sup>	3.9 <sup>Ba</sup>	24.6 <sup>Aa</sup>	13.1 <sup>Aa</sup>	31 <sup>Aa</sup>

3 讨论

本研究通过盆栽模拟试验,利用沙培控水法为作物营造不同的土壤干旱生境。试验中对照处理作物根际—土壤层的相对含水率分别为 51.4%(FC<sub>1</sub>), 33.4%(FC<sub>2</sub>)和 19.6%(FC<sub>3</sub>)(图 1),说明 FC<sub>1</sub> 近似于模拟了降水较常年偏少,土壤水分轻度不足的状况;FC<sub>2</sub> 时土壤水分供应持续不足;FC<sub>3</sub> 土壤水分则出现长时间严重不足<sup>[24]</sup>。

3.1 不同水分条件下保水剂对黄瓜根系的影响

根系是作物吸收土壤水分的重要器官,当作物受到干旱胁迫时,根系首先受到感应通过改变自身形态特征和分布状态来维持其功能行为,以适应胁迫后的水分条件<sup>[25]</sup>。一般认为,作物对于干旱胁迫的反应都是通过减少根系质量和根系直径,横向生长减弱而增加向土壤深层扩展吸收水分来实现的,对于干旱敏感的品种来说,这种下降的趋势更为明显<sup>[26-27]</sup>。有研究<sup>[28-29]</sup>表明,施加保水剂可增加作物根系生物量,从而提高作物水分利用效率,本研究中,SAP 处理的黄瓜根系干重相对较少,尤其当根际土壤含水量处于 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 阶段时,根系干重减少的程度更为明显(表 2)。结合根系扫描结果,进一步发现 SAP 处理的黄瓜根系须根明显减少,在 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 水分条件下尤为明显(图 2),推测这可能是导致黄瓜根系干重减少的重要原因之一。此外,除 FC<sub>1</sub> 阶段的 SAP 处理黄瓜总根长大于 CK 外,其余水分条件下 SAP 促使黄瓜的总根长、平均根系直径、总根体积和根表面积均有不同程度的降低趋势,说明此试验条件下,保水剂对黄瓜根系向深层土壤下扎、横向分布和须根增生等均有抑制作用。前人也有研究指出,土壤重度干旱时,保水剂会与作物根系竞争土壤水分而影响根系发育<sup>[30]</sup>。

结合本研究中叶片叶绿素荧光和气孔特性结果(表 3—4),发现当土壤处于 FC<sub>1</sub> 阶段时,保水剂并未加剧黄瓜叶片的受旱程度。分析黄瓜根系发育缓慢的原因,可能与试验所用土壤自身结构较为松散,持

水性能差有一定关系。土壤中混合的保水剂颗粒遇水后迅速吸收水分,体积急速膨胀,而且受保水剂自身保蓄水分作用的影响,相同水分条件下,保水剂—土壤混合体水分状况也相对较好,黄瓜根际土壤水分也相对较高,黄瓜根系无需过多延长,就可在保水剂—土壤混合层吸收到所需的水分,因此黄瓜根系较对照长势较弱,这可能也是植物自身适应外界环境的一种生理保护机制。此外,受频繁干湿交替的影响,保水剂与土壤颗粒相互作用,保水剂会加剧干燥土壤的紧实度<sup>[31]</sup>,这也可能是抑制根系生长的原因之一。

3.2 不同水分条件下保水剂对黄瓜叶片光合生理和气孔特征的影响

植物的光合作用是对于干旱相对较敏感的生理过程,能够判断植物的生长和抗逆性<sup>[32]</sup>。植物在一定程度干旱胁迫下,光合器官会受到损伤,抑制植物的光合作用,而受到损伤的最初部位与 PS II 密切相关<sup>[33]</sup>。本研究中,与 CK 相比,在 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 水分条件下,SAP 处理引起植株叶片  $F_v'/F_m'$ ,  $Y(II)$  和  $q_P$  值显著降低(表 3),说明在这两个阶段,黄瓜 PS II 捕获的光量子转化为化学能的效率降低,而且 PS II 反应中心的开放程度减小,黄瓜可能受到更严重的生理干旱影响。此外,SAP 处理下,当土壤水分在 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 条件下,叶片 NPQ 较 FC<sub>1</sub> 阶段时显著提高了 74.6%和 92.7%。进一步与相同水分条件下的 CK 处理相比,FC<sub>1</sub> 阶段,SAP 处理的 NPQ 显著降低 30.7%;但在 FC<sub>3</sub> 阶段,反而比 CK 显著增加了 16.9%,说明此时黄瓜叶片启动了抗旱响应,通过增加热耗散减少 PS II 和电子传递链的过分还原来保护自身光合结构<sup>[23]</sup>。进一步反应出在 FC<sub>1</sub> 水分条件下,保水剂可一定程度上减轻干旱对黄瓜幼苗叶片光合的影响,能提高叶片的光能转化率,但在 FC<sub>2</sub> 和 FC<sub>3</sub> 阶段,保水剂并不能缓解严重干旱对 PS II 反应中心受到的损伤,使黄瓜叶片对干旱更为敏感,甚至加剧抵御干旱胁迫的能力。有研究<sup>[34]</sup>结果表明,施用一定量的保水剂可提高作物的光合能力,缓解干旱胁迫对作物 PS II 系统造成的损伤。结合本研究的不同干旱生境

模拟试验,证明土壤水分状况是制约保水剂能否缓解干旱胁迫,促进作物正常光合作用的重要因素之一。

气孔的自我调节能力是作物抵御干旱胁迫的重要机制之一,作物叶片的气孔特征对干旱胁迫的响应与作物的种类和干旱胁迫程度都有一定关联<sup>[35]</sup>。本试验中,土壤含水量对气孔开张比的影响明显大于保水剂,表现为相同水分处理下,CK和SAP处理的气孔开张比并无显著差异。但是当土壤含水量降至 $FC_3$ 时,二者的气孔开张比和气孔开张度分别较 $FC_1$ 时显著降低了27.7%和14.9%以上(表4)。通常情况,随着土壤干旱胁迫加剧,作物叶片气孔开张程度会有所降低。本研究中,随着灌水量的进一步减少,土壤水分处于 $FC_3$ 阶段时,保水剂加剧了黄瓜的生理干旱,迫使黄瓜通过大幅度降低叶片气孔开张比和气孔开张度来减少植株体内的水分散失,以维持正常的生长代谢。

本研究重点关注了在单一土壤介质中,保水剂在不同土壤水分条件下对黄瓜根系形态、叶片光合结构、气孔性状等生理指标的影响效应,在频繁的干湿交替中,保水剂通过与土壤颗粒间的互作影响,对土壤蓄水能力、土壤结构的稳定性,以及土壤矿物胶体动态变化等的综合影响,都会制约土壤—根系—作物系统之间的水分吸收和传输功能的发挥。值得注意的是,保水剂不是造水剂,必须具备一定条件才能充分发挥其保水、改土和促进生长的作用,本试验中,土壤处于轻度干旱时,对黄瓜根系和叶片生理的促进效果最优。另一方面,由于土壤类型不同,土壤中盐分种类和数量也不同,通过反复的失水—复水过程,不同盐分和保水剂接触,对保水剂吸持水性能产生的影响也不尽相同,后续还需要通过相关试验进一步论证。因此,在实际应用中为了促使保水剂的节水保水效果得到充分发挥,必须综合考虑不同气候、土壤、作物类型及保水剂的施用量和施用方法等。

## 4 结论

本试验干旱胁迫下,施用保水剂显著降低黄瓜根系干重、总根长、平均根系直径、总根体积以及根表面积,对黄瓜根系生长起到明显抑制作用,并且随土壤含水量减小抑制效应加剧。保水剂对作物受旱程度的影响与土壤水分状态密切相关。在根际土壤含水量为田间持水量的70%和55%的状态,保水剂使黄瓜植株叶片 $F_v'/F_m'$ 、 $Y(II)$ 和 $q_p$ 显著降低,NPQ显著提高74.6%~92.7%,增加作物光合系统的光抑制程度,加剧作物受旱程度;在土壤含水量为田间持水量90%时,保水剂减轻干旱对黄瓜植株的胁迫,使叶

绿素荧光参数出现相反的变化趋势,促进作物光合作用正常进行。试验中不同处理之间的黄瓜叶片气孔长度、气孔宽度以及气孔密度的差异较小,而土壤水分条件对气孔开张比和气孔开张度的影响明显大于保水剂。

## [参考文献]

- [1] 党宏斌,却晓娥,冯金朝,等.土壤水分对黄土区苹果园土壤—植物—大气连续体(SPAC)中水势梯度的影响[J].应用生态学报,2020,31(3):829-836.
- [2] 黄占斌,孙朋成,钟建,等.高分子保水剂在土壤水肥保持和污染治理中的应用进展[J].农业工程学报,2016,32(1):125-131.
- [3] 王方玲,周亚茹,张明月,等.干旱胁迫下TS-PAA保水剂对雪茄烟生长发育和光合特性的影响[J/OL].中国农业科技导报,1-11[2021-11-15]. [http://doi.org/10/13304/j. nykjdb. 2020.0970](http://doi.org/10.13304/j. nykjdb. 2020.0970).
- [4] 周客,王利书,程东娟,等.保水剂对土壤水分运移和水吸力变化的影响[J].节水灌溉,2021(2):52-57.
- [5] 李霞,张丹,青会,等.保水剂结合豌豆翻压对季节性干旱区新垦植烟土壤的改良效应及烤烟品质的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):288-300.
- [6] Yang Yonghui, Wu Jicheng, Zhao Shiwei, et al. Effects of long-term super absorbent polymer and organic manure on soil structure and organic carbon distribution in different soil layers [J]. Soil and Tillage Research, 2021,206:104781.
- [7] 裴雪霞,党建友,张定一,等.休闲期耕作方式和施用保水剂对旱地小麦产量及水分利用率的影响[J].核农学报,2021,35(5):1243-1251.
- [8] 白文波,沈会有,刘红杰,等.淀粉基赋钾保水剂的制备表征与保水释钾性能优化[J].农业工程学报,2019,35(23):151-160.
- [9] Liu Yan, Zhu Yongfeng, Wang Yongsheng, et al. Synthesis and application of eco-friendly superabsorbent composites based on xanthan gum and semi-coke [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021,179:230-238.
- [10] 吴阳生,王天野,王呈玉,等.施用保水剂对半干旱地区玉米生长发育的影响[J].华北农学报,2019,34(S1):64-68.
- [11] 刘伟,钟奇,罗玲.不同灌溉量配施保水剂对芒果园土壤水分及果实的影响[J].西南农业学报,2019,32(10):2378-2382.
- [12] 杨永辉,吴普特,武继承,等.复水前后冬小麦光合生理特征对保水剂用量的响应[J].农业机械学报,2011,42(7):116-123.
- [13] 杜太生,康绍忠,魏华.保水剂在节水农业中的应用研究现状与展望[J].农业现代化研究,2000,21(5):317-320.
- [14] 宫丽丹,倪书邦,贺熙勇,等.干旱胁迫下保水剂对澳洲



坚果生长及水分特征参数的影响[J].热带农业科技, 2017,40(1):17-19.

[15] 侯贤清,李荣,何文寿,等.保水剂对旱作马铃薯产量及水分利用效率的影响[J].核农学报,2018,32(5):1016-1022.

[16] 包刚,王潮炎,徐丽君,等.农林保水剂对毛竹幼苗生长及叶片光合特性的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2013,42(4):385-390.

[17] 杨青华,高尔明,马新明.不同土壤类型对玉米根系干重变化及其分布的影响[J].土壤通报,2001,32(5):238-240.

[18] 陈奕凝,谭文文,彭冶,等.不同方法对海棠叶表皮的观察对比[J].安徽农业科学,2020,48(20):127-130,139.

[19] 王凯丽,高彦利,李姗,等.短期干旱胁迫下棉花气孔表现及光合特征研究[J].中国生态农业学报,2019,27(6):901-907.

[20] 环境保护部.HJ613-2011 土壤干物质和水分的测定重量法[S].北京:中国环境科学出版社,2011.

[21] 师生波,李天才,李妙,等.土壤干旱和强光对高山嵩草叶片 PSⅡ 反应中心非光化学淬灭的交互影响分析[J].植物生理学报,2015,51(10):1678-1686.

[22] 梁欢,韦宝,陈静,等.基于叶绿素荧光参数的紫花苜蓿种质苗期抗旱性评价[J].草地学报,2020,28(1):45-55.

[23] 王玉珏,付秋实,郑禾,等.干旱胁迫对黄瓜幼苗生长、光合生理及气孔特征的影响[J].中国农业大学学报,2010,15(5):12-18.

[24] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.GB/T20481-2017 气象干旱等级[S].北京:中国环境科学出版社,2017:2.

[25] 黄海霞,杨琦琦,崔鹏,等.裸果木幼苗根系形态和生理特征对水分胁迫的响应[J].草业学报,2021,30(1):197-207.

[26] Boguszewska-Mańkowska Dominika, Zarzyńska Krystyna, Nosalewicz Artur. Drought differentially affects root system size and architecture of potato cultivars with differing drought tolerance [J]. American Journal of Potato Research, 2020,97,54-62.

[27] 张馨月,王寅,陈健,等.水分和氮素对玉米苗期生长、根系形态及分布的影响[J].中国农业科学,2019,52(1):34-44.

[28] 杨永辉,武继承,吴普特,等.保水剂用量对小麦不同生育期根系生理特性的影响[J].应用生态学报,2011,22(1):73-78.

[29] Arbona V, Iglesias D J, Jacas J, et al. Hydrogel substrate amendment alleviates drought effects on young citrus plants [J]. Plant and Soil, 2005,270:73-82.

[30] 安东升,严程明,陈炫,等.季节性干旱下农艺节水措施对甘蔗生长和产量的影响[J].热带作物学报,2021,42(4):991-999.

[31] 吕国华,蒋树芳,白文波,等.聚丙烯酸钠的释水特征及对土壤物理参数的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(2):172-175.

[32] 赵丽英,邓西平,山仑,等.不同水分处理下冬小麦旗叶叶绿素荧光参数的变化研究[J].中国生态农业学报,2007,15(1):63-66.

[33] 史胜青,袁玉欣,杨敏生,等.水分胁迫对 4 种苗木叶绿素荧光的光化学淬灭和非光化学淬灭的影响[J].林业科学,2004,40(1):168-173.

[34] 李佳,刘立云,李艳,等.保水剂对于旱胁迫槟榔幼苗生理特征的影响[J].南方农业学报,2018,49(1):104-108.

[35] 李中华,刘进平,谷海磊,等.干旱胁迫对植物气孔特性影响研究进展[J].亚热带植物科学,2016,45(2):195-200.

(上接第 113 页)

[35] Kesik T, Blazewicz-Wozniak M, Wach D. Influence of conservation tillage in onion production on the soil organic matter content and soil aggregate formation [J]. International Agrophysics, 2010,24(3):267-273.

[36] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels [J]. Catena, 2002,47(2):133-149.

[37] Blanco-Canqui H, Holman J D, Schlegel A J, et al. Replacing fallow with cover crops in a semiarid soil: Effects on soil properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013,77(3):1026-1034.

[38] Cotrufo M F, Wallenstein M D, Boot C M, et al. The microbial efficiency-matrix stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: Do labile plant inputs form stable soil organic matter? [J]. Global Change Biology, 2013,19(4):988-995.