

网络出版时间:2025-07-02

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.s.20250701.1440.002

# 保水剂对新疆减灌春小麦光合性能、产量和水分利用效率的影响

于 珊, 陈广周, 贾永红, 李家豪, 李祎阳, 连世昊, 田文强, 张金汕, 石书兵

(新疆农业大学农学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

**摘要:**为解决新疆灌溉农业区因水资源时空分布不均而导致光合性能差、水分利用效率低的问题,以新疆北部主栽春小麦品种新春44号为材料,在减灌20%的条件下,采用双因素随机区组试验设计,设置颗粒状高分子吸水聚合物(SAP)、聚丙烯酸钾抗旱保水剂、聚丙烯酸钠抗旱保水剂和粉末状SAP共4种保水剂和3个用量水平(D1:30 kg·hm<sup>-2</sup>;D2:45 kg·hm<sup>-2</sup>;D3:60 kg·hm<sup>-2</sup>),以不施保水剂为对照(CK),研究保水剂对春小麦光合性能、产量和水分利用效率的影响。结果表明,与CK相比,保水剂处理提高了开花期和灌浆期春小麦的光合特性,提升了旗叶PSⅡ反应中心潜在光能转换效率和电子传递链整体功能活性,增强了植株对光能的捕获和传递效率,提高了春小麦的籽粒产量(5.36%~28.90%)和水分利用效率。同一用量下,聚丙烯酸钠抗旱保水剂和粉末状SAP处理间春小麦光合特性、综合性能指数和产量间差异不显著,但较颗粒状SAP处理分别提高5.47%~26.75%、30.76%~51.80%和11.39%~20.60%;聚丙烯酸钾抗旱保水剂和粉末状SAP水分利用效率显著高于聚丙烯酸钾抗旱保水剂和颗粒状SAP。同一类型保水剂处理下,春小麦光合特性、荧光参数、产量和水分利用效率大小依次均为D3>D2>D1,且D2、D3处理产量较D1处理分别显著增加1.02%~3.60%和2.66%~9.21%,D2、D3处理的水分利用效率较D1处理分别显著增加1.16%~6.66%和2.12%~8.00%。本试验条件下,新疆春小麦光合特性、产量及水分利用效率均以聚丙烯酸钠抗旱保水剂施用60 kg·hm<sup>-2</sup>处理下最高,是实现新疆减灌小麦高产和水分高效利用的最佳管理模式。

**关键词:**保水剂;减灌;春小麦;光合性能;水分利用效率

中图分类号:S512.1;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)08-1070-10

## Effects of Water-Retaining Agents on Photosynthetic Performance, Yield and Water Use Efficiency of Reduced-Irrigation Spring Wheat in Xinjiang

YU Shan, CHEN Guangzhou, JIA Yonghong, LI Jiahao, LI Yiyang,

LIAN Shihao, TIAN Wenqiang, ZHANG Jinshan, SHI Shubing

(College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of poor photosynthetic performance and low water use efficiency caused by uneven spatial and temporal distribution of water resources in irrigated agricultural areas of Xinjiang, the main spring wheat variety Xinchun 44 in northern Xinjiang was used as the material in this study. Under the condition of reducing irrigation by 20%, a two-factor randomized block design was used to set up four types of water-retaining agents: granular polymer water-absorbing polymer (SAP), potassium polyacrylate drought-resistant water-retaining agent, sodium polyacrylate drought-resistant water-retaining agent and powdered SAP and three dosage levels (D1: 30 kg·hm<sup>-2</sup>; D2: 45 kg·hm<sup>-2</sup>; D3: 60 kg·hm<sup>-2</sup>), with no water-retaining agent as control (CK), the effects of water-

收稿日期:2024-11-22 修回日期:2024-12-13

基金项目:新疆自治区重大科技专项“干旱绿洲现代农业高效用水关键技术研究—现代灌区作物高产高效用水技术研究”(2022A02003-6)

第一作者 E-mail:675588081@qq.com(于珊);ssb@xjau.edu.cn(石书兵)

通讯作者 E-mail:zhangjinshan0530@sina.com(张金汕)

retaining agent on photosynthetic performance, yield and water use efficiency of spring wheat were studied. The results showed that compared with CK, the water-retaining agent treatment improved the photosynthetic characteristics of spring wheat at flowering and filling stages, improved the potential light energy conversion efficiency of PSII reaction center in flag leaves and the overall functional activity of electron transport chain, and enhanced the light energy capture and transfer efficiency of plants. The grain yield (5.36%—28.90%) and water use efficiency of spring wheat were increased. Under the same application amount, there was no significant difference in photosynthetic characteristics, comprehensive performance indexes and yield of spring wheat between sodium polyacrylate drought-resistant water-retaining agent and powdered SAP treatment, but it was 5.47%—26.75%, 30.76%—51.80% and 11.39%—20.60% higher than granular SAP treatment. The water use efficiency of sodium polyacrylate drought-resistant water-retaining agent and powdered SAP was significantly higher than that of potassium polyacrylate drought-resistant water-retaining agent and granular SAP. Under the same type of water-retaining agent treatment, the photosynthetic characteristics, fluorescence parameters, yield and water use efficiency of spring wheat basically showed  $D3 > D2 > D1$ , and the yield showed that D2 and D3 significantly increased by 1.02%—3.60% and 2.66%—9.21% compared with D1, and the water use efficiency showed that D2 and D3 significantly increased by 1.16%—6.66% and 2.12%—8.00% compared with D1. Under the conditions of this experiment, the photosynthetic characteristics, yield and water use efficiency of spring wheat in Xinjiang were the highest under the management mode of sodium polyacrylate water retaining agent and  $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , it is the best management mode to achieve high yield and high water use efficiency of reduced irrigation wheat in Xinjiang.

**Keywords:** Water-retaining Agent; Reduced irrigation; Spring wheat; Photosynthetic performance; Water use efficiency

小麦是新疆最主要的粮食作物之一,年播种面积达  $1.21 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,总产量  $7.03 \times 10^6 \text{ t}$ ,在保障区域粮食安全中具有重要地位。新疆地处中国西北内陆,农业生产高度依赖灌溉,而当地水资源匮乏、水地矛盾突出限制了农业的发展<sup>[1]</sup>。因此,探索高效节水灌溉技术与栽培管理模式,缓解干旱胁迫对小麦生长发育的不利影响,提高水资源利用效率,对促进该区域小麦生产和可持续发展具有重要意义。保水剂作为一种新型高分子有机聚合物,能够反复吸水释水,其保水性能强,生产成本低<sup>[2]</sup>,施入土壤后能够改善土壤结构<sup>[3]</sup>,抑制水分蒸发,提高作物水分利用效率,尤其是在干旱地区的效果更加显著<sup>[4]</sup>。研究表明,施用保水剂处理能够提高作物净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_s$ )和气孔导度( $G_s$ ),增加植株耕层土壤含水量和最大持水量<sup>[5-7]</sup>,缓解干旱环境对植株光合作用的不利影响,进而提高作物产量。但也有研究认为,保水剂用量过高可能加剧作物耕层土壤水分竞争,改变根际微环境,降低植株光合能力,对产量影响不明显甚至导致减产<sup>[8-10]</sup>。目前,关于保

水剂对作物生长发育<sup>[11]</sup>、根系特征<sup>[12]</sup>、土壤特性<sup>[13-14]</sup>及产量形成<sup>[15]</sup>等方面的研究较多,然而轻度水分胁迫下保水剂对小麦光合特性、叶绿素荧光参数及水分利用效率的研究相对较少。本研究以新疆春小麦为对象,设置不同保水剂类型和用量组合,分析轻度干旱胁迫下对春小麦光合指标、叶绿素荧光参数、产量和水分利用效率的影响,以期新疆减水灌溉下保水剂的合理利用和春小麦的高效用水栽培提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验于2024年4月—7月在新疆农业科学院奇台麦类试验站( $89^{\circ}44'E, 43^{\circ}58'N$ )进行,该地为中温带大陆性气候区,无霜期约153 d,年均气温  $5.5^{\circ}\text{C}$ ,土壤为沙壤土,播前0~20 cm 土层土壤有机质含量  $37.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮含量  $74.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效磷含量  $43.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量  $633.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮含量  $2.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 值为8.7。试验期小麦全生育期日降水量和

气温变化见图 1。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 试验设计

供试小麦品种为新春 44 号, 试验采用二因素随机区组试验设计, 设置 4 种保水剂类型: 颗粒状高分子吸水聚合物 (SAP) (B1, 购于中山市赛普科技有限公司)、聚丙烯酸钾抗旱保水剂 (B2, 购于中山市赛普科技有限公司)、聚丙烯酸钠抗旱保水剂 (B3, 购于中山市赛普科技有限公司)、粉末状 SAP (B4, 购于广州珠海得米新材料有限公司), 及 3 个保水剂用量水平:  $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (D1)、 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (D2)、 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (D3), 设置不施用保水剂为对照 (CK), 共 13 个处理, 各处理均重复 3 次。

将保水剂和土壤按照 1:100 的比例混合均匀撒到地表后, 人工翻耕埋入土壤耕层, 耕层深度约为 15~20 cm。耙平地表后, 采用 0.2 m 等行距无覆膜条播, 播种量为  $360 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 播种深度 2~3 cm, 小区面积为  $10 \text{ m}^2$  (2 m×5 m)。播种后间隔 50 cm 设置一个毛管, 全生育期滴灌 8 次, 每次灌水量为较常规灌水量减少 20%。翻地前结合旋耕基施磷酸二铵  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 并在小麦拔节期随水滴入尿素  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 孕穗期随水滴入尿素  $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、磷酸二氢钾  $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小麦于 2024 年 4 月 5 日播种, 2024 年 7 月 16 日收获, 其他管理与大田一致。

#### 1.2.2 春小麦光合指标的测定

分别于春小麦开花期和灌浆期在各小区选取 6 株生长一致、有代表性植株, 使用 TARGAS-1 型光合仪 (Hansatech, UK) 测定旗叶净光合速率 ( $P_n$ ) 和气孔导度 ( $G_s$ )。

#### 1.2.3 叶绿素荧光动力学参数的测定

于春小麦开花期和灌浆期使用植物效率分析仪 (Pocket PEA, Hansatech, UK) 测定旗叶光化学效率 ( $F_v/F_m$ )、电子传递量子产额 ( $\Psi_{E_o}$ )、PSI 受体侧末端电子受体量子产额 ( $\Psi_{R_o}$ )、以吸收光能为基础的性能指数 ( $PI_{abs}$ ) 和综合性能指数 ( $PI_{total}$ )、单位反应中心吸收的光能 ( $ABS/CS_m$ )、单位反应中心捕获的光能 ( $TR_o/CS_m$ )、单位反应中心用于电子传递的光能 ( $ET_o/CS_m$ ) 和活性反应中心数量 ( $RC/CS_m$ )。所有处理下叶片测定前均暗适应 20 min。设定光源强度为  $3000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  红光进行诱导, 荧光信号至 2 s 结束, 数据记录频率为  $10^5 \cdot \text{s}^{-1}$ , 导出从  $10 \mu\text{s}$  到 1 s 快速叶绿素 a 荧光动力学参数。

#### 1.2.4 土壤水分的测定

于春小麦播种前和收获后在各小区采用不锈钢土钻进行取土, 按每 20 cm 一个土壤深度为间隔进行取样, 每段土样取上、中、下三部分称量, 重复 3 次, 并采用铝盒烘干法测定 0~100 cm 土壤的含水量 ( $\theta_s$ ), 采用环刀法测定土壤容重 ( $\rho_s$ ), 并计算土壤贮水量 (W)、灌溉水利用效率 (IWUE)

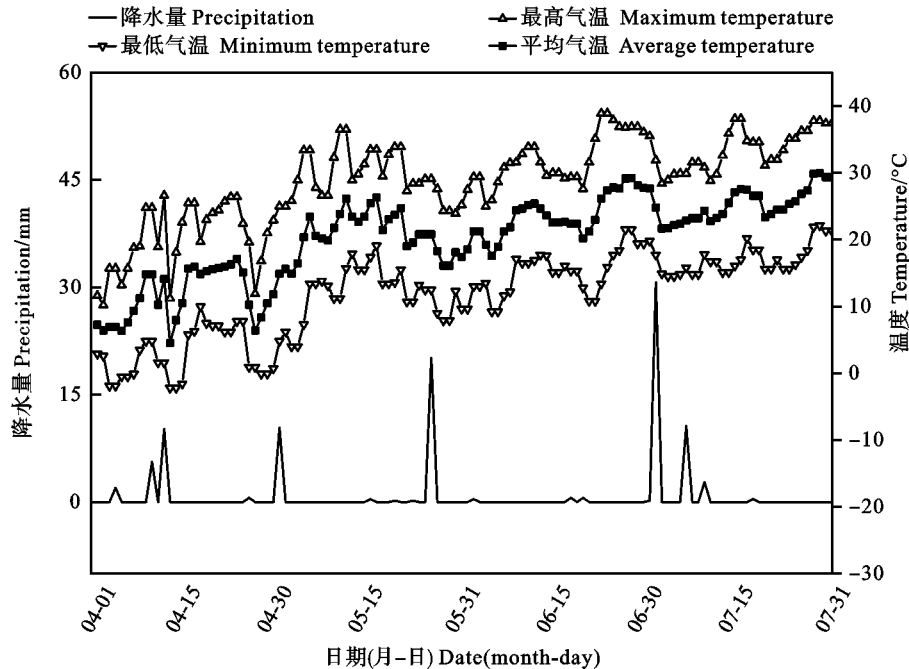


图 1 春小麦生育期日降水量和气温变化  
Fig. 1 Daily precipitation and temperature during the growth period of spring wheat

和水分利用效率(WUE)。计算公式如下:

$$W=10\times(\theta_s\times H_s\times\rho_w)/\rho_w$$

$$IWUE=Y/I$$

$$WUE=Y/(P+\Delta W+I)$$

式中, $\theta_s$  为各土层土壤含水率; $H_s$  为土层深度,取 20 cm; $\rho_w$  为水的密度,取  $1.0\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $P$  为生育期内降水量(mm); $\Delta W$  为生育期始末土壤贮水量之差(mm); $I$  为生育期内灌水量(mm); $Y$  为小麦收获期籽粒产量( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。本试验过程中,不存在地表径流,且深层渗漏忽略不计。

### 1.2.5 春小麦产量及其构成要素的测定

于春小麦收获期在各小区选取  $1\text{ m}^2$  的样方测定有效穗数,选取 30 个有代表性的完整小麦穗部脱粒晒干后,使用数粒板测定穗粒数。收获后测定千粒重和籽粒产量。

### 1.3 数据分析与处理

采用 IBM SPSS Statistics 26 进行数据分析(多重比较用 Duncan 新复极差法),显著性水平设定为  $\alpha=0.05$ ;采用 Origin 2022 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 保水剂类型和用量对春小麦旗叶光合指标的影响

由表 1 可知,保水剂类型对春小麦开花期和灌浆期旗叶  $P_n$  影响显著,用量对  $P_n$  和  $G_s$  均影响显著,保水剂类型和用量交互作用仅对开花期  $P_n$  影响显著。与 CK 相比,保水剂处理下  $P_n$  和  $G_s$  于开花期分别增加 11.75%~55.64%、1.47%~30.02%,于灌浆期分别增加 1.81%~19.28%、4.82%~26.85%。相同用量条件下, $P_n$  和  $G_s$  在 D1 用量下大小均表现为  $B4>B3>B2>B1$ ;在 D2 和 D3 用量下基本表现为  $B3>B4>B2>B1$ 。相同保水剂类型下, $P_n$  和  $G_s$  于开花期和灌浆期基本均随用量的增加而增加;开花期, B1、B2 类型下 D2、D3 用量的  $P_n$  均显著高于 CK,但  $G_s$  与 CK 差异不显著;B3、B4 类型下各处理  $P_n$  和  $G_s$  (除 B3D1 外)均显著高于 CK;灌浆期各处理的  $P_n$  和  $G_s$  均无显著差异。春小麦开花期和灌浆期旗叶  $P_n$  均以 B3D3 处理最大, $G_s$  分别以 B4D3 和 B3D2 最大。这说明保水剂处理能提高花后春小麦旗叶净光合速率。

表 1 不同处理下春小麦开花期和灌浆期旗叶光合指标

Table 1 Photosynthetic indicators of spring wheat flag leaf at flowering and filling stages under different treatments

生育时期 Growth stage	处理 Treatment	$P_n/(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$				$G_s/(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
开花期 Flowering stage	CK	11.54b	11.54b	11.54c	11.54c	122.6a	122.6a	122.6c	122.6b
	D1	12.90abB	13.81abAB	14.48bA	14.67bA	124.4aA	131.0aA	134.2bcA	141.6aA
	D2	13.47aB	14.38aB	16.70aA	16.67aA	130.4aA	134.0aA	144.8abA	147.8aA
	D3	14.17aB	14.53aB	17.96aA	15.05aAB	132.8aB	138.2aB	157.2aA	159.4aA
	均值 Mean	13.02B	13.57B	15.17A	14.48A	127.6B	131.5AB	139.7A	142.9A
	B			*			ns		
	D			*			*		
	B×D			*			ns		
灌浆期 Filling stage	CK	13.28a	13.28a	13.28b	13.28a	124.4a	124.4a	124.4b	124.4a
	D1	13.52aA	13.84aA	14.26abA	14.58aA	130.4aA	132.8aA	134.4abA	141.6aA
	D2	13.58aB	14.20aAB	15.64aA	14.76aAB	131.0aA	134.2aA	157.8aA	144.8aA
	D3	13.86aB	14.28aAB	15.84aA	14.88aAB	134.0aA	138.2aA	147.8abA	147.0aA
	均值 Mean	13.56B	13.90AB	14.76A	14.38AB	129.9A	132.4A	141.1A	139.5A
	B			*			ns		
	D			*			*		
	B×D			ns			ns		

B1~B4:保水剂类型;同行数据后不同大写字母表示相同用量下不同类型保水剂处理差异在 0.05 水平显著,同列数据后不同小写字母表示相同保水剂类型下不同用量处理间差异在 0.05 水平显著。ns:差异不显著;\* :  $P<0.05$ 。下同。

B1~B4: Types of water-retaining agents; Different capital letters after the data in the same row indicate that significant differences between treatments with different water-retaining agent types under the same dosage at 0.05 level, and different lowercase letters after the data in the same column indicate that significant differences between treatments with different dosages under the same water-holding agent type at 0.05 level. ns: no significant difference; \* :  $P<0.05$ . The same in table 2—table 4.

2.2 保水剂类型和用量对春小麦旗叶快速荧光动力学参数的影响

由表2可知,各处理春小麦灌浆期旗叶的  $F_v/F_m$ 、 $\Psi_{Eo}$ 、 $\Psi_{Ro}$ 、 $PI_{abs}$  和  $PI_{total}$  均较开花期分别下降了 1.89%~4.71%、3.38%~11.92%、11.21%~31.06%、27.18%~52.20%和 43.50%~80.44%。保水剂类型只对开花期  $PI_{total}$  和灌浆期  $F_v/F_m$ 、 $PI_{total}$  影响显著,用量对开花期和灌浆期  $F_v/F_m$ 、 $\Psi_{Eo}$ 、 $\Psi_{Ro}$ 、 $PI_{abs}$  和  $PI_{total}$  均影响显著,保水剂类型和用量交互作用仅对灌浆期  $PI_{total}$  影响显著。与CK相比,保水剂处理下开花期和灌浆期春小麦旗叶  $F_v/F_m$ 、 $\Psi_{Eo}$ 、 $\Psi_{Ro}$ 、 $PI_{abs}$  和  $PI_{total}$  均增

加。相同用量条件下,  $F_v/F_m$ 、 $\Psi_{Eo}$  和  $\Psi_{Ro}$  均无显著差异,灌浆期  $PI_{abs}$  均表现为 B3、B4 处理分别显著高于 B1 处理,  $PI_{total}$  于开花期和灌浆期均表现为 B3、B4 处理显著高于 B1 处理。相同保水剂类型条件下,春小麦旗叶  $F_v/F_m$ 、 $\Psi_{Eo}$ 、 $\Psi_{Ro}$ 、 $PI_{abs}$  和  $PI_{total}$  于开花期和灌浆期基本均随用量水平的增加而增加,  $F_v/F_m$ 、 $\Psi_{Eo}$  和  $\Psi_{Ro}$  在不同用量间差异不显著;  $PI_{abs}$  于灌浆期在 B2、B3 处理下的 D1、D3 用量间差异显著,  $PI_{total}$  在 B3 处理下 D3 显著高于 D1、D2 用量。这说明,保水剂处理能够增加旗叶快速荧光动力学参数指标,且用量水平在一定程度上对综合性能指标有较强的补偿效应。

表2 不同处理下春小麦开花期和灌浆期旗叶的快速荧光动力学参数  
Table 2 Rapid chlorophyll fluorescence kinetic parameters of flag leaves at flowering and filling stages of spring wheat under different treatments

指标 Index	处理 Treatment	开花期 Flowering stage				灌浆期 Filling stage			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
$F_v/F_m$	CK	0.831 5a	0.831 5a	0.831 5b	0.831 5a	0.801 4b	0.801 4b	0.801 4b	0.801 4b
	D1	0.842 7aA	0.842 8aA	0.844 3abA	0.846 0aA	0.808 8abB	0.814 4abAB	0.823 6aA	0.826 1aA
	D2	0.842 8aA	0.844 0aA	0.845 2abA	0.844 8aA	0.812 8abA	0.822 7aA	0.827 2aA	0.826 5aA
	D3	0.843 0aA	0.843 7aA	0.847 3aA	0.845 8aA	0.820 8aA	0.821 0aA	0.831 3aA	0.828 0aA
	均值 Mean	0.840 0A	0.840 5A	0.842 1A	0.842 0A	0.811 0B	0.814 9AB	0.820 9A	0.820 5A
	B			ns			*		
	D			*			*		
B×D			ns			ns			
$\Psi_{Eo}$	CK	0.616 9a	0.616 9a	0.616 9b	0.616 9a	0.548 3a	0.548 3a	0.548 3b	0.548 3b
	D1	0.619 2aA	0.640 5aA	0.652 8abA	0.660 0aA	0.568 6aA	0.578 2aA	0.616 8abA	0.614 2abA
	D2	0.646 8aA	0.654 8aA	0.657 6abA	0.657 6aA	0.569 7aA	0.614 7aA	0.629 3aA	0.627 3aA
	D3	0.652 8aA	0.656 2aA	0.662 4aA	0.655 4aA	0.580 5aA	0.613 0aA	0.639 9aA	0.633 3aA
	均值 Mean	0.633 9A	0.642 1A	0.647 4A	0.647 5A	0.566 8B	0.588 5AB	0.608 6A	0.605 8A
	B			ns			ns		
	D			*			*		
B×D			ns			ns			
$\Psi_{Ro}$	CK	0.330 8a	0.330 8a	0.330 8a	0.330 8a	0.228 0b	0.228 0a	0.228 0b	0.228 0b
	D1	0.332 9aA	0.334 8aA	0.345 8aA	0.354 3aA	0.245 0abA	0.244 7aA	0.253 4abA	0.296 7aA
	D2	0.340 1aA	0.345 2aA	0.352 9aA	0.353 9aA	0.258 7abA	0.254 3aA	0.275 0abA	0.301 8aA
	D3	0.345 1aA	0.347 5aA	0.354 4aA	0.351 2aA	0.286 1aA	0.287 5aA	0.300 1aA	0.311 9aA
	均值 Mean	0.337 2A	0.339 5A	0.346 0A	0.347 6A	0.254 5B	0.253 6B	0.264 1AB	0.284 6A
	B			ns			ns		
	D			*			ns		
B×D			ns			ns			
$PI_{abs}$	CK	14.45a	14.45b	14.45b	14.45b	6.91b	6.91c	6.91c	6.91b
	D1	15.53aA	16.00abA	16.47abA	17.05aA	8.12abC	9.20bBC	10.93bAB	11.61aA
	D2	15.76aB	16.16abAB	17.23aAB	18.04aA	8.63abC	10.65abB	12.45abAB	13.14aA
	D3	16.15aA	16.79aA	18.32aA	17.02aA	9.33aB	11.55aA	13.15aA	12.28aA
	均值 Mean	15.47B	15.85AB	16.62A	16.64A	8.25C	9.58B	10.86A	10.98A
	B			ns			ns		
	D			*			*		
B×D			ns			ns			
$PI_{total}$	CK	15.37a	15.37b	15.37c	15.37b	3.01b	3.01b	3.01c	3.01b
	D1	16.20aB	16.89abB	18.18bcA	20.33aA	4.61abC	5.96aBC	7.22bB	7.75aA
	D2	16.33aB	18.02abAB	20.16bA	21.30aA	5.96aB	6.82aB	8.96bA	9.91aA
	D3	17.52aB	18.68aB	22.97aA	20.95aA	6.44aC	7.25aBC	9.98aA	9.61aB
	均值 Mean	16.35B	17.24B	19.17A	18.99A	5.00B	5.76B	7.29A	7.57A
	B			*			*		
	D			*			*		
B×D			ns			*			

### 2.3 保水剂类型和用量对春小麦旗叶光能吸收、捕获和传递的影响

由图 2 可知,保水剂类型对春小麦开花期和灌浆期旗叶  $TR_o/CS_m$ 、 $ABS/CS_m$  (仅灌浆期)、 $ET_o/CS_m$  和  $RC/CS_m$  均影响显著,用量对  $ABS/CS_m$ 、 $TR_o/CS_m$ 、 $ET_o/CS_m$  和  $RC/CS_m$  均影响显著,保水剂类型和用量交互作用对各指标影响均不显著。与 CK 相比,保水剂处理下春小麦旗叶  $ABS/CS_m$ 、 $TR_o/CS_m$ 、 $ET_o/CS_m$  和  $RC/CS_m$  基本均增加。相同用量条件下,开花期 B1 处理下  $ABS/CS_m$ 、 $TR_o/CS_m$ 、 $ET_o/CS_m$  和  $RC/CS_m$  均低

于 B2, 差异不显著; B3、B4 处理均高于 B1、B2。灌浆期  $ABS/CS_m$  在相同用量条件下不同类型间无显著差异,  $TR_o/CS_m$  表现为 B3、B4 显著高于 B1 处理 9.56%~14.00% 和 9.98%~12.18%,  $ET_o/CS_m$ 、 $RC/CS_m$  在 B3、B4 处理的 D2、D3 用量下均显著高于 B1 处理。相同保水剂类型下,  $ABS/CS_m$ 、 $TR_o/CS_m$ 、 $ET_o/CS_m$  和  $RC/CS_m$  于开花期和灌浆期基本均随用量的增加而增加。这说明,保水剂能够增加叶片反应中心吸收和捕获的光能、叶片活性反应中心数量及反应中心活性,进而增强光能传递效率。

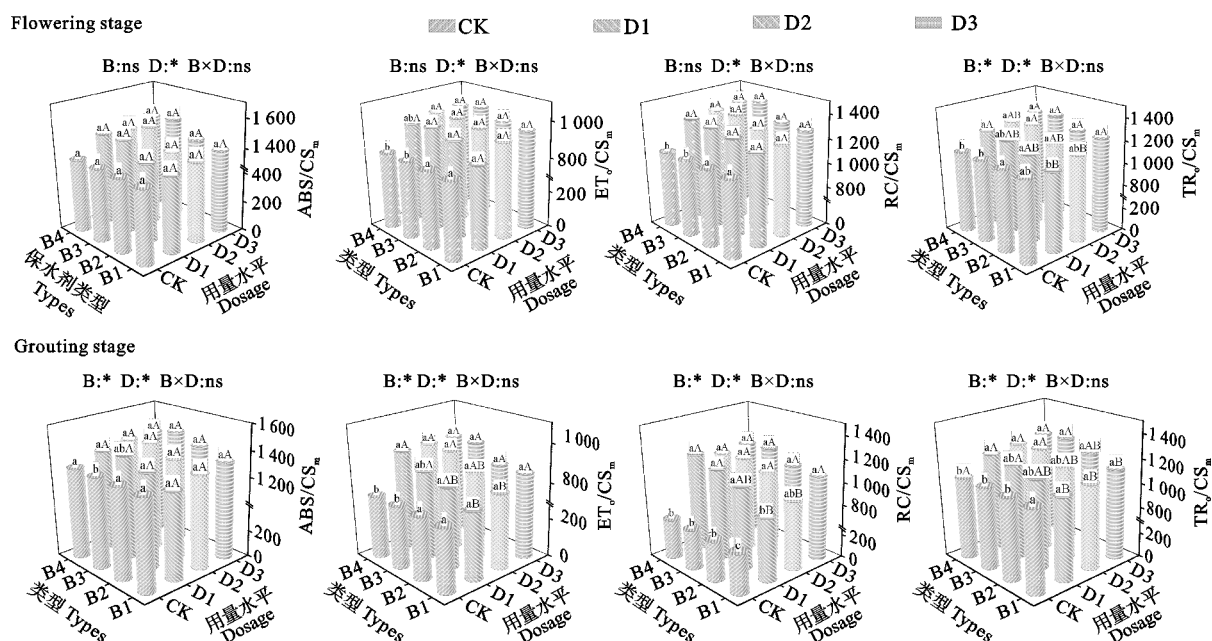


图 2 不同处理下开花期和灌浆期春小麦旗叶光能吸收、捕获、传递和单位反应中心数量

Fig. 2 Light energy absorption, capture, transfer and number of reaction centers per unit in spring wheat flag leaf at flowering and filling stages under different treatments

### 2.4 保水剂类型和用量对春小麦产量及构成要素的影响

由表 3 可知,保水剂类型对春小麦穗数、穗粒数、千粒重和产量均影响显著,用量对穗粒数、千粒重和产量影响均显著,保水剂类型和用量交互作用对穗数、穗粒数和产量影响均显著。与 CK 相比,保水剂处理下春小麦穗粒数、千粒重和产量分别增加 3.28%~12.43%、0.84%~4.64% 和

5.36%~28.90%。相同保水剂用量下, B3、B4 处理穗数均显著高于 B1、B2 处理,且 B1、B2 处理间无显著差异; B2、B3、B4 处理穗粒数较 B1 处理分别显著增加 1.70%~3.62%、3.04%~4.28% 和 2.72%~6.68%; D1、D2、D3 用量下千粒重分别以 B4、B3、B3 最高,且等量 B3、B4 间差异不显著;产量在 B3、B4 处理下分别显著高于 B1、B2 处理。相同保水剂类型下,春小麦穗数随用量的增加先

增后降(除 B4 外),且不同用量间差异不显著;穗粒数随用量的增加而增加,且 D2、D3 显著高于 D1;千粒重随用量水平增加而增加(除 B4 外),B1、B2、B3 在 D3 用量下较 D1 用量分别显著增加 2.33%、2.02% 和 1.95%;产量变化趋势与千粒重一致,且 D2、D3 较 D1 显著增加 1.02%~6.84% 和 2.66%~9.21%。这说明,保水剂处理能够有效促进春小麦穗粒数和千粒重的增加进而增加产量,且不同用量对穗粒数和千粒重影响显著。

**2.5 保水剂类型和用量对春小麦水分利用特性的影响**

由表 4 可知,保水剂类型、用量及其交互作用

对 IWUE 和 WUE 影响均显著。与 CK 相比,施用保水剂处理 IWUE 和 WUE 分别增加 5.36%~28.90% 和 6.99%~30.68%。相同用量条件下,D1、D2 处理 IWUE 和 WUE 均表现为 B4>B3>B2>B1,其中 B4 与其他处理间差异均显著;D3 处理下 IWUE 和 WUE 均表现为 B3、B4 均显著高于 B1、B2 处理。相同保水剂类型条件下,IWUE 和 WUE 均随用量水平的增加而增加(除 B4 外),且 IWUE 在 D3 处理下较 D1 处理显著增加了 2.61%~9.16%,WUE 在 D2、D3 处理下较 D1 分别显著增加 1.16%~6.66% 和 2.12%~8.00%。

表 3 不同处理对春小麦产量及其构成要素的影响

Table 3 Effects of different treatments on yield and its components of spring wheat

处理 Treatment	穗数 Spike number/( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )				穗粒数 Grain per spike			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
CK	583.87a	583.87a	583.87b	583.87b	35.95d	35.95d	35.95c	35.95c
D1	591.25aB	580.85aB	605.67abA	607.56aA	37.13cC	37.76cB	38.26bA	38.14bA
D2	579.17aB	591.92aB	621.45aA	610.15aA	37.89bD	38.44bC	39.51aB	40.42aA
D3	593.93aB	587.89aB	620.08aA	610.77aA	38.4aB	39.79aA	39.73aA	39.78aA
均值 Mean	587.05A	586.13A	607.77B	603.09B	37.34D	37.99C	38.36B	38.57A
B			*			*		
D			ns			*		
B×D			*			*		

	千粒重 Thousand-seed weight/g				产量 Yield/( $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
CK	40.07c	40.07c	40.07c	40.07b	5 575.38d	5 575.38d	5 575.38d	5 575.38c
D1	40.37bcC	40.62bBC	40.94bAB	41.18aA	5 874.01cC	5 907.41cC	6 580.35cB	6 697.93bA
D2	40.8bB	40.75bB	41.61aA	41.55aA	5 933.79bD	6 092.42bC	6 817.16bB	7 156.23aA
D3	41.31aA	41.44aA	41.74aA	41.59aA	6 030.45aD	6 126.97aC	7 186.45aA	7 132.78aB
均值 Mean	40.64B	40.72B	41.09A	41.1A	5 853.4D	5 925.55C	6 539.84B	6 640.58A
B			*			*		
D			*			*		
B×D			ns			*		

表 4 不同处理下春小麦灌溉水利用效率和水分利用效率

Table 4 Irrigation water use efficiency and water use efficiency of spring wheat under different treatments

处理 Treatment	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency/( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ )				水分利用效率 Water use efficiency/( $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2}$ )			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
CK	14.52c	14.52c	14.52c	14.52c	9.68d	9.68c	9.68d	9.68d
D1	15.30bC	15.38bcC	17.14bB	17.44bA	10.36cC	10.38bC	11.63cB	11.86cA
D2	15.45abC	15.87bC	17.75bB	18.64aA	10.48bC	10.83aC	12.15bB	12.65aA
D3	15.70aB	15.96aB	18.71aA	18.58aA	10.58aC	10.77aB	12.56aA	12.28bA
均值 Mean	15.24B	15.43B	17.03A	17.29A	10.27B	10.42B	11.51A	11.62A
B			*			*		
D			*			*		
B×D			*			*		

### 3 讨论

光合作用是植物进行物质生产的前提,为植物体生命活动提供物质基础,而光合特性是衡量光合作用能力的重要指标<sup>[16]</sup>。植物光合作用对水分胁迫的响应较为敏感,轻度干旱胁迫下,气孔开度降低,阻碍 CO<sub>2</sub> 吸收,净光合速率下降<sup>[17]</sup>。本研究发现,保水剂处理提高了春小麦旗叶净光合速率,这与前人<sup>[10,18]</sup> 研究结果一致,这可能是由于保水剂处理提高了春小麦生育后期旗叶气孔导度,改善叶片气体交换能力,从而提高其净光合速率。这有利于促进其光合作用活性,增强作物生育过程中碳代谢,促进干物质积累。本研究中春小麦旗叶净光合速率在不同保水剂类型间有明显差异,但气孔导度的差异相对较小,保水剂对气孔通透性的提升作用相对有限,这说明春小麦旗叶净光合速率在保水剂材料间的差异来源于非气孔因素限制<sup>[19]</sup>,可能是由于保水剂作用于植株土壤环境使其产生差异进而导致植株光合作用强弱表现不同。本研究中,灌浆期春小麦净光合速率在 45 kg·hm<sup>-2</sup> 和 60 kg·hm<sup>-2</sup> 时净光合速率增加比例较小,这说明适量的保水剂有利于提高作物净光合速率和气孔导度<sup>[9]</sup>,但超出一定用量水平后,其对光合作用的促进效果有限,出现这种现象的原因可能是本年度降水充足,植株逆境胁迫程度较轻,保水材料保水、持水效果减弱。

叶绿素荧光参数作为反映叶片光合系统的无损探针,能够快速测定植物体对光能的吸收、传递、耗散及分配情况<sup>[5]</sup>,与植物抗旱性和植物生理密切相关<sup>[20]</sup>。光合作用中的光系统 II (PS II) 是电子传递链中对逆境胁迫最敏感的作用单位,逆境胁迫后其电子传递受阻,进而导致光化学效率下降,光能转换效率降低<sup>[21-22]</sup>。大量研究表明,干旱胁迫下光系统 II 活性被抑制是作物减产的重要原因<sup>[23-24]</sup>。本研究中保水剂处理下春小麦的 PS II 反应中心潜在光能转换效率、功能活性指数和电子传递链的整体功能活性提高,表明保水剂可以缓解干旱胁迫对 PS II 反应中心造成的伤害,促进光合电子的增加与传递,这与杨晓波<sup>[25]</sup> 的研究结果基本一致。保水剂处理还提高了到 QB 的电子传输通量和电子受体还原产率,这有利于促进春小麦电子转化效率提升,提高其对 CO<sub>2</sub> 的固定和同化作用,进而促进植物光合作用。有研究表明,植物遭遇胁迫后,植株光能捕获、吸收效率

及光能利用率均降低<sup>[19,26]</sup>。本研究中保水剂处理能够缩减灌浆期光能利用参数的降低幅度,增加水分胁迫下叶片单位截面活性反应中心数量,进而引起反应中心吸收、捕获和用于电子传递光能增加,有利于提高春小麦生育中后期光能利用效率。对比保水剂类型对开花期和灌浆期春小麦荧光动力学参数和光能利用参数作用效果发现,不同生育时期综合性能指数在不同保水剂类型间表现不一致,这可能与保水剂材料的吸水-释水倍率和速率有关,灌浆期当地土壤蒸发强烈,不同保水剂材料间释水差异对植株根系土壤环境作用明显。

小麦产量受干旱胁迫程度<sup>[27]</sup>、土壤含水量<sup>[28]</sup>等多种生长环境因素的影响,相关研究表明,施用保水剂能够改善作物土壤环境,促进作物生长,进而提升作物产量和品质<sup>[7,11]</sup>。本研究发现,施用保水剂处理能够显著增加小麦产量(5.36%~28.90%),但进一步分析发现,产量差异主要来源于有效穗粒数和千粒重增加,说明本研究中保水剂对春小麦穗芽分化和子房发育阶段的促进作用更加显著。这与前人研究得出保水剂能够显著增加作物出苗率的结论略有不同<sup>[15,29]</sup>,这可能是由于春小麦播种前当地降水充足,土壤墒情较好,施用保水剂虽能改善土壤水分状况,但春小麦种子萌动出苗受土壤水分胁迫影响较小。适宜的生产栽培及农作技术不仅可以提高作物产量,同时具有提高作物养分积累、提高水肥贡献率和表观利用率等作用<sup>[30]</sup>。本研究中,保水剂处理下春小麦灌溉水利用率和水分利用效率均增加,且二者变动趋势基本一致,这是由于收获前期降水下渗,保水剂对土壤贮水作用效果较强,土壤持水贮水差异较小导致。

### 4 结论

在减水 20% 的灌溉条件下,保水剂处理提高了花后春小麦的净光合速率和气孔导度,促进其光合作用,同时提升春小麦 PS II 反应中心潜在光能转换效率和电子传递链的整体功能活性,提升光能利用效率及光合产物的积累,促进了春小麦穗粒数和千粒重增加,进而提高小麦产量和水分利用效率。本研究条件下,在新疆春小麦种植区域施用 60 kg·hm<sup>-2</sup> 的聚丙烯酸钠保水剂是实现小麦高产和水分高效利用的最佳管理模式。

## 参考文献:

- [1]李芳松. 发展灌溉试验挖掘新疆节水潜力[J]. 节水灌溉, 2013(5):71.  
LI F S. To tap water saving potential of Xinjiang by developing irrigation experiment [J]. *Water Saving Irrigation*, 2013(5):71.
- [2]党秀丽, 张玉龙, 黄毅. 保水剂在农业上的应用与研究进展[J]. 土壤通报, 2006, 37(2):2352.  
DANG X L, ZHANG Y L, HUANG Y. Research status and prospect on application of water holding agents in agriculture [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(2):2352.
- [3]郭东权, 饶良懿. 保水剂的发展现状及在农林和荒漠化修复中的应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(6):1372.  
GUO D Q, RAO L Y. Development situation of superabsorbent polymer and its application in agroforestry and desertification restoration [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(6):1372.
- [4]韩军, 薛焱, 胡宇, 等. 保水剂在牧草生产和草地沙化治理中的应用现状与前景[J]. 中国农学通报, 2024, 40(3):158.  
HAN J, XUE T, HU Y, *et al.* Application status and prospect of super absorbent polymer in forage production and desertification control [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024, 40(3):158.
- [5]赵和丽, 杨再强, 王明田, 等. 高温高湿胁迫及恢复对番茄快速荧光诱导动力学的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(8):2405.  
ZHAO H L, YANG Z Q, WANG M T, *et al.* Effects of high temperature and high humidity stress and restoration on the fast fluorescence induction dynamics of tomato leaves [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(8):2405.
- [6]张丽华, 闫伟平, 谭国波, 等. 保水剂不同施用深度对玉米产量及土壤水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(1):110.  
ZHANG L H, YAN W P, TAN G B, *et al.* Effects of different depth of water-retaining agent applied on maize yield and water use efficiency of soil moisture [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(1):110.
- [7]邓超超, 宿翠琴, 周琦, 等. 新型生态保水剂对青贮玉米光合特性及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2023(5):96.  
DENG C C, SU C C, ZHOU Q, *et al.* Effects of new ecological water-retaining agent on photosynthetic characteristics and yield of silage maize [J]. *Water Saving Irrigation*, 2023(5):96.
- [8]刘辰宇, 马蕊, 罗文静, 等. 保水剂用量对胡杨幼苗生长、光合特性和抗逆生理的影响[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3):36.  
LIU C Y, MA R, LUO W J, *et al.* Effects of super absorbent polymer dosage on growth, photosynthetic characteristics and stress-resistance physiology of *Populus euphratica* seedlings [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2022, 44(3):36.
- [9]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):6772.  
WEI L Y, YUAN W Y, JIAO J F, *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):6772.
- [10]许允硕, 高昱, 陈双, 等. 复合保水剂对盐碱地冬小麦旗叶光合、衰老及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(2):38.  
XU Y S, GAO Y, CHEN S, *et al.* Effects of compound water retaining agent on photosynthesis, senescence and yield of flag leaf of winter wheat in saline-alkali land [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(2):38.
- [11]魏秀华, 张志伟, 李升东, 等. 保水剂对旱地冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(1):33.  
WEI X H, ZHANG Z W, LI S D, *et al.* Effects of water retaining agent on growth and yield of winter wheat in dryland [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(1):33.
- [12]田露, 刘景辉, 米俊珍, 等. 缩行带状种植和保水剂对滴灌燕麦根系和叶片衰老特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(7):1.  
TIAN L, LIU J H, MI J Z, *et al.* Impact of planting spacing and soil amendment with water absorbent on root and leaf senescence traits of drip irrigated oat [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2023, 42(7):1.
- [13]范震, 丁新惠, 赵丹, 等. 玉米秸秆基纤维素保水剂对土壤持水性能及冬小麦根系生长的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(17):51.  
FAN Z, DING X H, ZHAO D, *et al.* Effects of maize straw cellulose-based super absorbent polymer on soil water retention capacity and root growth of wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(17):51.
- [14]HÜTTERMANN A, ZOMMORODI M, REISE K. Addition of hydrogels to soil for prolonging the survival of *Pinus halepensis* seedlings subjected to drought [J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 50(3-4):295.
- [15]高齐, 盛阳阳, 赵志伟, 等. 不同类型保水剂对旱作谷子水分利用的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(9):154.  
GAO Q, SHENG Y Y, ZHAO Z W, *et al.* Effects of different types of water retaining agents on water use of rainfed millet [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(9):154.
- [16]王磊, 董树亭, 刘鹏, 等. 水氮互作对冬小麦光合生理特性和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3):301.  
WANG L, DONG S T, LIU P, *et al.* Effects of water and nitrogen interaction on physiological and photosynthetic characteristics and yield of winter wheat [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3):301.
- [17]CAL A J, SANCANGCO M, REBOLLEDO M C, *et al.* Leaf morphology, rather than plant water status, underlies genetic

- variation of rice leaf rolling under drought [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019, 42(5):1532.
- [18]秦舒浩,王 蒂,张俊莲,等. 保水剂对旱作马铃薯土壤水分特性及马铃薯产量形成的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(2):30.
- QIN S H, WANG D, ZHANG J L, *et al.* Effects of aquasorbs on soil water characteristic and yield formation of potato [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2013, 48(2):30.
- [19]FARQUHAR, G D, SHARKEY, T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual review of plant physiology*, 1982, 33(1):330.
- [20]时丽冉,孙立永,李明哲. 干旱胁迫对不同品种谷子光合性能及叶绿素荧光动力学参数的影响[J]. 农业科学, 2020(12):1014.
- SHI L R, SUN L Y, LI M Z. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence parameters of different varieties of millet [J]. *Agricultural Sciences*, 2020(12):1014.
- [21]ZHANG Y, LI X K, WANG C J, *et al.* PROSPECT-PMP+: Simultaneous retrievals of chlorophyll a and b, carotenoids and anthocyanins in the leaf optical properties model [J]. *Sensors*, 2022, 22(8):3025.
- [22]姚春娟,郭圣茂,马英超,等. 干旱胁迫对 4 种决明属植物光合作用和叶绿素荧光特性的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(9):1880.
- YAO C J, GUO S M, MA Y C, *et al.* Effect of drought stress on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of four species of *Cassia* [J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(9):1880.
- [23]王志军,田又升,赵曾强,等. 干旱胁迫下陆地棉光合叶绿素荧光参数与产量品质间的关联性分析[J]. 分子植物育种, 2021, 19(21):7202.
- WANG Z J, TIAN Y S, ZHAO Z Q, *et al.* Correlation of photosynthetic chlorophyll fluorescence parameters and yield quality in upland cotton under drought stress [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2021, 19(21):7202.
- [24]李丽丽,侯智远,卢海博,等. 干旱胁迫和复水对‘张杂谷 3 号’光合特性和产量的影响[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(4):19.
- LI L L, HOU Z Y, LU H B, *et al.* Influence of drought stress and rewattering on the photosynthetic characteristics and yield of ‘Zhangzagu 3’ [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2017, 40(4):19.
- [25]杨晓波. 干旱胁迫下保水剂对苗木成活率及生理指标的影响 [D]. 郑州:河南农业大学, 2002.
- YANG X B. Effects of water-retaining agent on survival rate and physiological indexes of tree seedlings during water stress [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2002.
- [26]姚庆群,谢贵水,陈海坚. 干旱下保水剂对橡胶苗叶绿素荧光参数的影响[J]. 热带作物学报, 2006, 27(1):6.
- YAO Q Q, XIE G S, CHEN H J. Effects of water-retaining agent on chlorophyll a fluorescence parameters of *Hevea brasiliensis* under drought stress [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2006, 27(1):6.
- [27]王 欢,苏文平,赵鑫琳,等. 不同水氮处理对冬播春小麦产量和水氮利用效率的影响[J]. 麦类作物学报, 2022, 42(11):1381.
- WANG H, SU W P, ZHAO X L, *et al.* Effect of different irrigation and nitrogen application on yield, water and nitrogen use efficiency of spring wheat sown in winter [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2022, 42(11):1381.
- [28]田 露,刘景辉,米俊珍,等. 缩行配施保水剂对滴灌燕麦群体特征和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2023, 43(3):332.
- TIAN L, LIU J H, MI J Z, *et al.* Effect of combination of row spacing reduction and super absorbent polymercan on population characteristics and yield of oat under drip irrigation [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2023, 43(3):332.
- [29]张东昱,赵东霞,闫志利,等. 油菜不同地表覆盖栽培方式产量与效益的比较研究[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(6):1313.
- ZHANG D Y, ZHAO D X, YAN Z L, *et al.* Comparative study on yield and economic benefits of rape under different planting and mulching patterns [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(6):1313.
- [30]李 荣,夏 雷,王艳丽,等. 滴灌下施用保水剂对土壤水肥及玉米收益的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(12):1337.
- LI R, XIA L, WANG Y L, *et al.* Effects of water-retaining agent dose on soil water and nutrient contents, maize yield and economic benefit under drip irrigation [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(12):1337.