

# 补充灌溉对黄土高原谷子生长、产量及水分利用效率的影响

赵方洋<sup>1</sup>,曹红霞<sup>1</sup>,马丽娜<sup>2</sup>,党小文<sup>2</sup>,  
万宇<sup>2</sup>,彭美龄<sup>1</sup>,李志军<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100;

2. 榆林市农业技术服务中心,陕西 榆林 719000)

**摘要:**为研究关键生育时期补充灌溉对谷子生长、产量及水分利用效率的影响,确定有利于旱区水资源可持续高效利用的补灌策略,本研究以‘晋谷21号’为试验材料,在灌底墒水的基础上,设置6个生育期补灌处理:拔节水(J),抽穗水(H),苗期水+拔节水(SJ),拔节水+抽穗水(JH),拔节水+灌浆水(JF),拔节水+抽穗水+灌浆水(JHF),以不覆膜雨养(CK<sub>1</sub>)、覆膜只灌底墒水(CK<sub>2</sub>)为对照,共8个处理,探讨不同处理对谷子株高、茎粗、叶面积指数、叶绿素含量、干物质积累与分配、产量及水分利用效率的影响。研究表明:补灌处理对不同时期谷子生长发育有不同程度的改善作用,苗期、拔节期和抽穗期补充灌溉下谷子的株高、茎粗、叶面积指数和叶绿素含量分别较CK<sub>2</sub>提高了6.04%~43.21%、3.61%~17.89%、3.16%~109.40%和6.93%~22.77%,进而促进谷子的干物质积累;灌浆期补充灌溉可延缓叶片的衰老和失绿速度,使得叶面积指数在生育后期仍保持较高水平(较CK<sub>2</sub>提高了42.52%~70.56%)。籽粒产量在CK<sub>2</sub>处理下较CK<sub>1</sub>显著提高了113.97%,补灌处理较CK<sub>2</sub>显著提高了11.62%~39.97%,并随着生育期补灌次数的增加而增加;灌溉底墒水并覆膜通过显著提高出苗率进而显著提高公顷穗数并增产,补灌拔节水、抽穗水可通过提高谷子穗数和穗粒数提高产量,补灌灌浆水有利于谷子充分灌浆,提高谷子的千粒重;各处理中以JHF处理的谷子籽粒产量最高,JH处理的产量次之,与JHF处理产量差异不显著,但其灌溉用水量减少19.97%,灌溉水生产力和灌溉效益分别显著提高21.95%和20.34%。综上所述,在黄土高原地区,丰水年型下补灌拔节水+抽穗水的方式是获得较高谷子产量和水分利用效率的有效措施,同时建议拔节期和抽穗期的灌水上、下限分别为田间持水量的50%~80%和60%~90%。

**关键词:**谷子;补充灌溉;产量;水分利用效率;黄土高原

**中图分类号:**S515; S275 **文献标志码:**A

## Effects of supplementary irrigation on growth, yield, and water use efficiency of millet in the Loess Plateau

ZHAO Fangyang<sup>1</sup>, CAO Hongxia<sup>1</sup>, MA Lina<sup>2</sup>, DANG Xiaowen<sup>2</sup>,  
WAN Yu<sup>2</sup>, PENG Meiling<sup>1</sup>, LI Zhijun<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Yulin Agricultural Technology Service Center, Yulin, Shaanxi 719000, China)

**Abstract:** To study the effects of supplementary irrigation on millet growth, yield, and water use efficiency during key periods, and to establish an optimal irrigation strategy for sustainable and efficient water resource use in arid regions, ‘Jin Gu 21’ was selected as the experimental material. Six supplementary irrigation treatments of irrigation at the jointing stage (J), heading stage (H), seedling and jointing stages (SJ), jointing and heading stages (JH), jointing and filling stages (JF), and jointing, heading, and filling stages (JHF) were applied in addition to

basal irrigation. Rain-fed without mulching (CK<sub>1</sub>) and basal irrigation with mulching (CK<sub>2</sub>) were used as control treatments. The effects of irrigation timing on plant height, stem thickness, leaf area index, chlorophyll content, dry matter accumulation and distribution, yield, and water use efficiency were investigated. The results showed that irrigation treatments had varying degrees of improvement on the growth and development of millet at different growth stages. Plant height, stem thickness, leaf area index and chlorophyll content of millet under supplemental irrigation at seedling, jointing and heading stages were increased by 6.04%~43.21%, 3.61%~17.89%, 3.16%~109.40% and 6.93%~22.77% respectively compared with that in CK<sub>2</sub>, thereby promoting dry matter accumulation in millet. Appropriate filling irrigation delayed leaf senescence and maintained a high leaf area index in the late growth stage (42.52%~70.56% higher than that of CK<sub>2</sub>). Yield was significantly increased by 113.97% under CK<sub>2</sub> treatment compared with CK<sub>1</sub>, and the supplemental irrigation treatments significantly increased by 11.62%~39.97% compared with CK<sub>2</sub> and increased with the number of supplemental irrigations during the reproductive period. Irrigating with subsoil moisture water and mulching significantly increased seedling emergence, which in turn significantly increased the number of spikes per hectare and increased the yield. Irrigation at the grain filling stage contributed to adequate grain filling and increased the thousand-grain weight of millet. The treatment with jointing stage plus heading stage plus grain filling stage irrigation (JHF) had the highest grain yield. Compared to this, the yield of the JH treatment did not differ significantly, but the irrigation water amount decreased by 19.97%, and the irrigation water use efficiency and irrigation benefit increased significantly by 21.95% and 20.34%, respectively. In the Loess Plateau region, the combination of supplementary irrigation at jointing stage and heading stage is an effective measure to obtain higher millet yield and water use efficiency in wet years, and it is recommended that the upper and lower limits of irrigation at jointing stage and heading stage should be 50% to 80% and 60% to 90% of the field capacity, respectively.

**Keywords:** millet; supplementary irrigation; yield; water use efficiency; Loess Plateau

谷子 (*Setaria italica* L.) 是属禾本科狗尾草属一年生植物,是我国北方旱作农业地区具有代表性的特色粮食作物<sup>[1]</sup>。因其具有抗旱耐瘠、粮草兼用、营养多元等特点,被认为是应对未来水资源短缺和建设可持续农业的重要植物资源<sup>[2]</sup>。黄土高原是我国谷子优势主产区之一<sup>[2]</sup>,该地区为典型的旱作农业区,生态环境脆弱,自然降水少且年际间变化大,存在降水与作物需水时间错位的问题<sup>[3-4]</sup>,谷子生育期内干旱发生频率依然较高。关键生育期干旱胁迫可严重限制谷子生长发育,易造成谷子产量不稳定、水分利用效率低等不利影响<sup>[5-6]</sup>。因此,如何提高谷子水分利用效率,促进旱地谷子的稳产增产,是黄土高原谷子产业可持续发展的关键。

在干旱半干旱地区,为提高作物产量和水分利用效率,关键生育期进行补充灌溉已成为重要的水分管理措施。在作物需水期进行适量补充灌溉能促进作物生长发育,大幅提高作物产量。关于作物生长对关键生育期补充灌溉的响应,前人已做了大量研究。Zhang 等<sup>[7]</sup>试验发现,小麦拔节期灌溉 75 mm 和拔节期+开花期分别灌溉 75 mm 的处理在开花期的叶面积比播后不灌溉处理分别增加 19.3% 和 59.6%。杨文稼等<sup>[8]</sup>研究表明,在半干旱地区,与雨

养处理相比,平水年在小麦拔节期灌 30 mm 和拔节期+孕穗期分别灌 30 mm 水,可通过提高冬小麦花后群体数、叶面积指数、地上生物量、成穗率及穗粒数达到平均增产 8% 的效果。姚宁等<sup>[9]</sup>在研究不同生长阶段的水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响中发现,在返青期灌水能够提高冬小麦的株高、叶面积指数、有效穗数和穗粒数,且一定范围内灌水量越大效果越明显;在抽穗期补灌可以增加千粒重。大量试验表明,在雨养地区,作物关键生育期进行补充灌溉不仅能够提高作物产量,同时也提高了灌水和降雨的水分利用效率<sup>[10]</sup>。Feng 等<sup>[11]</sup>研究发现,在播种期水分管理一致条件下,补灌显著提升了小麦的穗数、穗粒数、产量和耗水量,且随着生育期补灌次数的增加,这些指标进一步提高;与返青期+拔节期+开花期补灌 3 次水处理相比,拔节期+开花期补灌 2 次水处理通过不降低或略有降低籽粒产量显著提高了水分利用效率。You 等<sup>[12]</sup>对冬小麦的研究表明,不同生育阶段灌溉可显著提高小麦产量,但当灌水量超过一定范围时,产量并未进一步提升,反而导致水分利用效率和灌水利用效率降低。因此,合理的灌溉制度是作物高产稳产的重要保障。

近年来,我国大规模推进高标准农田建设,在黄土高原地区重点建设高效节水应急补灌设施<sup>[13]</sup>这些设施在雨季可收集降雨,并在作物需水关键期进行补充灌溉,能有效解决因自然降雨与作物需水在时间上的供需错位矛盾而导致作物产量低而不稳的难题<sup>[14]</sup>。关于补充灌溉对作物生长、产量及水分利用效率的影响有诸多研究,但主要集中于小麦<sup>[8,12,15]</sup>、玉米<sup>[14]</sup>等大宗粮食作物,针对谷子的研究极少;此外,大部分研究采取多次定额补灌等方式补充土壤水分,总补灌量甚至超过 100 mm,而利用雨水积蓄进行补充灌溉的水量极其有限,且定额灌溉难以实现水分供给与作物需水的精确匹配,影响节水效果<sup>[16]</sup>。因此针对黄土高原旱作区季节性干旱严重,水资源有限的情况,采用测墒补灌的方式,探寻有限水量下的谷子最优补灌时期,这对提高水分利用效率以及高产稳产具有现实意义。本研究设置 8 个灌水处理,探讨苗期、拔节期、抽穗期和灌浆期 4 个关键时期灌水对谷子生长发育、产量及水分利用效率的影响,提出有利于旱区水资源持续高效利用的补灌策略,也为黄土高原旱作区谷子节水灌溉生产实践提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2022 年 5—9 月在陕西省榆林市国家现代农业科技示范区(37°56′26″N,109°21′46″E,海拔 1 229 m)进行,该区属温带干旱半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 371 mm,年蒸发量 1 900 mm,年降水分布不均,主要集中在 7—9 月,年日照时数 2 900 h,年均气温 8.6℃,≥10℃积温为 3 000~3 300℃,无霜期 167 d。试验地土壤类型为黄绵土,播种前 0~20 cm 土层的含水量为 11.86%(v/v,下同),田间持水量为 28.87%,土壤容重为 1.42 g·cm<sup>-3</sup>,pH 值为 8.6,有机质含量为 7.10 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量为 0.79 g·kg<sup>-1</sup>,铵态氮含量为 6.53 mg·kg<sup>-1</sup>,硝态氮含量为 22.89 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷含量为 36 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量为 105.6 mg·kg<sup>-1</sup>。2022 年全年降水量为 466.4 mm,属丰水年,其中谷子生育期(5~9 月)降水量为 382.6 mm,属丰水期;生育前期(5~6 月)降水偏少,生育中后期(7~8 月)降水量占全生育期降水量的 88%。2022 年谷子生育期(5—9 月)逐日降雨量和日平均温度如图 1 所示。

### 1.2 试验设计

试验在灌 15 mm 底墒水的基础上,设置 6 个生育期补灌处理:拔节水(J),抽穗水(H),苗期水+拔

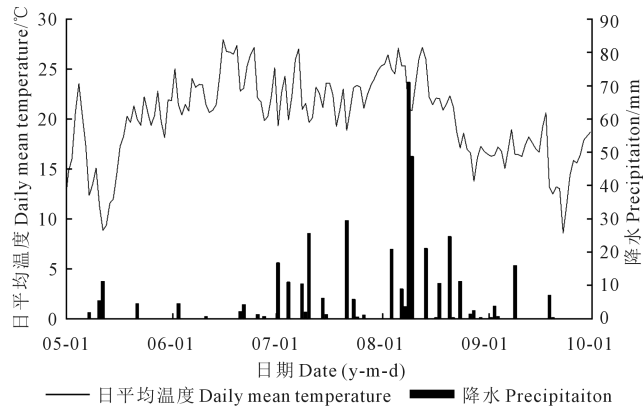


图 1 2022 年谷子生育期日平均温度及降水量

Fig.1 Daily mean temperature and daily rainfall during growing season of millet in 2022

节水(SJ),拔节水+抽穗水(JH),拔节水+灌浆水(JF),拔节水+抽穗水+灌浆水(JHF),以不覆膜雨养(CK<sub>1</sub>)、覆膜只灌底墒水(CK<sub>2</sub>)为对照,共 8 个处理,每个处理重复 3 次。由于该地区能用于补灌的水量极其有限,为保证水资源的高效利用,本研究按需进行精准补灌,采用测墒补灌的方式<sup>[16-17]</sup>,计划湿润层深度为 20 cm,参考西北地区谷子灌溉试验经验<sup>[18-19]</sup>和当地传统雨养种植模式确定灌水上下限分别为:苗期和拔节期 50%~80%  $\theta_f$ ( $\theta_f$ ,田间持水量);抽穗期和灌浆期 60%~90%  $\theta_f$ 。在各生育期计划湿润层的土壤含水量达到下限时,结合降水情况进行补灌,并按以下公式计算灌水量:

$$\text{灌水量 (mm)} = 10 \times H \times (\beta_i - \beta_j) \times p \quad (1)$$

式中, $H$ 为计划湿润土层深度(20 cm); $\beta_i$ 为目标含水量(%), $\beta_j = \theta_f \times$ 目标相对含水量); $\beta_j$ 为灌水前各处理实际土壤含水量(%), $p$ 为计划湿润比,取 0.75。各生育期具体试验处理见表 1。

试验采用随机区组设计,试验小区长 10 m,宽 4.8 m,面积为 48 m<sup>2</sup>,每个处理 3 次重复。采用宽窄行膜下滴灌的种植模式,宽行距 0.5 m、窄行距 0.3 m、穴距 0.15 m,播种密度为 16.65 万穴·hm<sup>-2</sup>,每穴留苗 2 株。除 CK<sub>1</sub>外,其余处理均于窄行中心铺设滴灌带并覆膜,即 1 膜 1 管 2 行,覆膜后膜宽 0.7 m,滴灌带直径 16 mm,滴头间距 30 cm,滴头流量 1.18 L·h<sup>-1</sup>,使用水表精准控制每个小区的灌溉量。各小区底肥按有机肥料 1 500 kg·hm<sup>-2</sup>,尿素 150 kg·hm<sup>-2</sup>,磷酸二铵 450 kg·hm<sup>-2</sup>,硫酸钾 113 kg·hm<sup>-2</sup>一次全部施于小区内。供试品种为‘晋谷 21 号’,于 5 月 15 号播种,6 月 1 号间苗,9 月 28 日收获,其他田间管理同当地大田生产保持一致。其中测得灌底墒水处理的出苗率为 83%,CK<sub>1</sub>处理的出苗率为 50%。

表 1 谷子具体灌水试验处理

Table 1 Specific experimental treatment of millet

处理 Treatment	底墒/mm Soil moisture	生育期灌水上限~下限(% $\theta_t$ )(灌水量/mm) Upper and lower limits of irrigation (% $\theta_t$ ) (Irrigation amount / mm)				总灌水量 Total irrigation amount/mm
		苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	灌浆期 Filling stage	
		CK <sub>1</sub>				
CK <sub>2</sub>	15.0					15.0
J	15.0		50%~80%(17.2)			32.2
H	15.0			60%~90%(16.8)		31.8
SJ	15.0	50%~80%(16.3)	50%~80%(16.5)			47.8
JH	15.0		50%~80%(17.2)	60%~90%(17.1)		49.3
JF	15.0		50%~80%(17.2)		60%~90%(13.5)	45.7
JHF	15.0		50%~80%(17.2)	60%~90%(17.1)	60%~90%(12.3)	61.6

注:拔节期灌水前,处理为 CK<sub>1</sub>、CK<sub>2</sub>、SJ 处理,其余处理与 CK<sub>2</sub> 视为重复;抽穗期灌水前,处理为 CK<sub>1</sub>、CK<sub>2</sub>、J 和 SJ 处理,H 处理与 CK<sub>2</sub> 视为重复,JH、JF、JHF 与 J 处理视为重复;灌浆期灌水前,处理为 CK<sub>1</sub>、CK<sub>2</sub>、J、H、SJ 和 JH 处理,JHF 与 JH 处理视为重复,JF 与 J 处理视为重复。

Note: Before irrigation at the jointing stage, the treatments were CK<sub>1</sub>, CK<sub>2</sub> and SJ, and the rest of the treatments were regarded as replicates with CK<sub>2</sub>. Before irrigation at the heading stage, the treatments were CK<sub>1</sub>, CK<sub>2</sub>, J and SJ, and the H treatment was regarded as replicates with CK<sub>2</sub>, while the JH, JF and JHF treatments were regarded as replicates with J treatments. Before irrigation at the filling stage, the treatments were CK<sub>1</sub>, CK<sub>2</sub>, J, H, SJ and JH, the JHF treatment was regarded as replicates with JH treatments, and the JF treatment was regarded as replicates with J treatments.

### 1.3 测定指标

1.3.1 生长指标 分别于谷子苗期、拔节期、抽穗期和灌浆期灌水后的第 7 d 及成熟期进行取样,在各试验小区选取 3 株长势一致的植株,测定其株高、茎粗、叶面积指数、叶绿素含量和干物质质量。

叶面积指数:采用打孔称重法测定谷子单株叶面积,单株叶面积=单株叶片质量×圆片总面积/小圆片叶总质量;叶面积指数(LAI)=单株叶面积×单位土地面积株数/单位土地面积。

叶绿素总含量:在各试验小区中选择无病虫害、无机械损伤的叶片,避开叶脉选取中间部分剪成细丝,用万分之一天平称 0.1 g,置于浸提液(95%乙醇)中,避光放置至叶片全部变白。用紫外分光光度计分别在波长 665、649、470 nm 下测定吸光度,以 95%的乙醇为空白对照,计算出叶绿素总含量。

干物质质量:清除表面泥垢后将谷子植株按叶片、茎鞘、穗轴(含颖壳)和籽粒进行分解,放进烘箱 105℃杀青 0.5 h,随后在 75℃下烘至恒重,用电子天平称其各器官干物质质量,并计算单株植株干物质总量。

1.3.2 作物耗水量与水分利用效率 谷子全生育期的耗水量(ET)采用水量平衡方程计算:

$$ET = W_0 - W_1 + P + I + K - R - D$$

式中, $W_0$ 、 $W_1$ 分别为试验小区播前及收获后 0~120 cm 土层土壤储水量; $P$ 为有效降水量; $I$ 为全生育期灌水量; $K$ 为地下水补给量; $R$ 为地表径流; $D$ 为深层渗漏量,单位均为 mm。本试验地地势平坦,小区间设置垄和隔离带,无地表径流,且地下水埋深 10 m 以下,因此  $K$  和  $R$  均忽略不计;试验中计划湿润

层为 20 cm,灌水量较小,灌溉水不会入渗到 120 cm 土层以下,因此  $D$  也忽略不计。

水分利用效率(WUE)、降水利用效率(PWUE)、灌溉水生产力(IWUE)、灌溉效益(IB)的计算公式如下:

$$WUE = GY/ET$$

$$PWUE = GY/P$$

$$IWUE = GY/I$$

$$IB = \Delta Y/I$$

式中, $GY$ 为籽粒产量(kg·hm<sup>-2</sup>); $\Delta Y$ 为灌水后相对 CK<sub>1</sub>增加的产量(kg·hm<sup>-2</sup>)。

1.3.3 产量及其构成因素 在谷子成熟期,于各小区选取 10 株有代表性的植株考种,进行产量构成要素测定,包括谷子的穗粒重和穗粒数。试验小区中央设 6 行×15 穴的测产区,成熟后单独收获,待谷穗自然风干后脱粒、称重,并折算成公顷产量,同时测定千粒重。

### 1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2023 软件对试验数据进行整理,采用 IBM SPSS Statistics 27 软件对数据进行统计学分析,使用 Origin 2021 软件进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 补充灌溉对谷子生长的影响

2.1.1 对株高、茎粗和叶面积指数的影响 与 CK<sub>1</sub> 和 CK<sub>2</sub> 相比,灌水处理对不同时谷子的生长发育均有不同程度的改善作用(表 2)。各处理下的谷子株高在生育期内变化趋势相同,均表现为苗期植株矮小,株高增长缓慢,在拔节期之后快速增长,于灌

浆期后变化不明显。谷子茎粗和叶面积指数均呈先升后降的变化趋势,除 CK<sub>1</sub>、CK<sub>2</sub>、H 处理的茎粗在抽穗期达到最大值,其余处理的谷子茎粗均在拔节期达到最大值,叶面积指数除 SJ、JF 处理在灌浆期达到峰值外,其余处理均在抽穗期达到峰值。

灌水处理均不同程度提高了谷子各生育期的株高、茎粗和叶面积指数。从不同生育期各指标变化情况看,在苗期各指标均表现为 SJ>CK<sub>2</sub>>CK<sub>1</sub>,其中 SJ 处理的株高、茎粗和叶面积指数均显著高于 CK<sub>1</sub>,但 SJ 处理与 CK<sub>2</sub> 差异不显著,表明补灌苗期水对覆膜并灌底墒水情况下谷子的生长发育改善有限。

在拔节期,各处理谷子的株高、茎粗和叶面积指数均为 SJ>J>CK<sub>2</sub>>CK<sub>1</sub>。灌水与不灌水处理之间株高存在显著差异,J 处理、SJ 处理的株高较 CK<sub>1</sub> 处理分别显著增加 21.23% 和 58.53%,较 CK<sub>2</sub> 处理分

别显著增加 9.52% 和 43.21%;SJ 和 J 处理下的谷子茎粗显著大于 CK<sub>1</sub>,但均与 CK<sub>2</sub> 差异不显著;SJ 处理的叶面积指数分别较 CK<sub>1</sub>、CK<sub>2</sub> 显著增加 282.81% 和 109.40%,J 处理较 CK<sub>1</sub> 显著增加了 120.31%,但与 CK<sub>2</sub> 差异不显著,表明灌苗期水+拔节水对谷子拔节期株高和叶面积指数的促进作用高于单灌 1 次拔节水。

抽穗期各灌水处理下的株高均显著高于对照,灌 2 次水处理的株高显著高于灌 1 次水的处理,且 J 和 H、SJ 和 JH 之间差异不显著;灌抽穗水提高了谷子的茎粗,各灌水处理之间差异不显著;灌水处理下叶面积指数表现为 JH>H>J>SJ,说明抽穗水对谷子叶面积的促进效果大于拔节水;因此,在抽穗期受旱时适当地进行补充灌溉,可以显著促进谷子的生长发育并缓解干旱胁迫带来的负面影响,并具有补偿效果。

表 2 不同处理下谷子的农艺性状

Table 2 Agronomic characters of millet under different water treatments

测定时期 Measurement time (m-d)	处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎粗 Stem diameter/mm	叶面积指数 LAI /(cm <sup>2</sup> ·cm <sup>-2</sup> )	叶绿素总含量 Chlorophyll content /(mg·g <sup>-1</sup> )
苗期 Seedling stage (06-18)	CK <sub>1</sub>	29.16b	6.83b	0.21b	1.97b
	CK <sub>2</sub>	47.92a	8.51ab	0.69ab	2.30ab
	SJ	59.54a	9.15a	0.97a	2.56a
拔节期 Jointing stage (07-13)	CK <sub>1</sub>	56.38d	8.53b	0.64c	2.13c
	CK <sub>2</sub>	62.41c	9.50ab	1.17b	2.42bc
	J	68.35b	10.99a	1.41b	2.65ab
	SJ	89.38a	11.20a	2.45a	2.95a
抽穗期 Heading stage (08-04)	CK <sub>1</sub>	125.24d	8.58b	2.11d	2.80d
	CK <sub>2</sub>	130.71c	9.70ab	3.16b	3.03c
	J	138.60b	10.35a	3.26b	3.24b
	H	142.35b	10.53a	3.97a	3.44b
	SJ	159.78a	10.05a	2.69c	3.37b
	JH	164.18a	10.56a	4.25a	3.72a
	JHF	176.08a	10.54a	3.65a	2.98a
灌浆期 Filling stage (09-13)	CK <sub>1</sub>	152.01d	8.53b	1.18b	1.76e
	CK <sub>2</sub>	160.57c	9.66a	2.14ab	2.25cd
	J	170.60ab	10.41a	2.80ab	2.33c
	H	169.88ab	9.88a	3.09a	2.36c
	SJ	167.45b	9.98a	3.27a	2.14d
	JH	176.41a	10.35a	3.32a	2.61b
	JF	170.17ab	10.10a	3.05ab	2.66b
成熟期 Maturity stage (09-28)	JHF	176.08a	10.54a	3.65a	2.98a
	CK <sub>1</sub>	153.75c	8.07b		0.51c
	CK <sub>2</sub>	163.22b	8.89ab		0.19c
	J	170.27ab	9.15ab		0.28c
	H	170.81ab	9.54a		1.38b
	SJ	171.42ab	9.84a		1.15b
	JH	178.85a	9.57a		1.89a
JF	174.24a	8.78ab		1.28b	
JHF	178.78a	9.43a		1.93a	

注:苗期、拔节期、抽穗期各处理农艺性状为相同处理的平均值。不同小写字母表示同一时期不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: The average agronomic traits of the same treatment were obtained during the seedling stage, jointing stage, and heading stage. Different lower-case letters indicate significant differences between treatments during the same growth stage ( $P<0.05$ ). The same below.

在灌浆期, 谷子株高在 JH 处理下达最大值并显著高于 SJ 处理, JHF、J、JF、H 处理与 JH 处理差异不显著, 茎粗和叶面积指数在 JHF 处理下最大, 且各灌水处理之间差异不显著; 除 SJ、JF 处理外, 其余处理的叶面积指数在灌浆期下降, 但 JHF 处理的下降量小于 JH 处理, 表明适宜的灌浆水可延缓叶片的衰老, 在生育后期 LAI 仍保持较高水平。成熟期各灌水处理之间的株高和茎粗差异不显著, 且均高于 CK<sub>1</sub> 处理。

**2.1.2 对叶绿素总含量的影响** 不同灌水处理对谷子各生育期叶绿素总含量的影响如图 2 所示。在整个生育期内谷子叶绿素总含量均呈现先上升后下降的趋势, 在抽穗期达到峰值。在苗期和拔节期, 叶绿素总含量随灌水次数的增加而增加, 表现为 SJ>J>CK<sub>2</sub>>CK<sub>1</sub>。在抽穗期, 各灌水处理的叶绿素总含量均显著高于对照, 且表现为 JH>H>SJ>J, 其中 JH 处理的叶绿素总含量显著高于其他灌水处理, 其他灌水处理之间差异不显著, 表明灌拔节水+抽穗水比只灌拔节水或抽穗水对抽穗期谷子叶绿素总含量的影响更大。在灌浆期, 各处理的叶绿素总含量较抽穗期均有不同程度的下降, 灌水处理表现为 JHF>JF>JH>H>J>SJ, 其中 JF 处理的叶绿素总含量的下降量最小, SJ 处理的下降量最大。成熟期, 随着植株的逐渐成熟, 此时期谷子植株出现了叶片黄化和老化等现象, JHF 和 JH 处理的叶绿素总含量显著高于其他处理, 并且两处理之间差异不显著, 补灌处理中以 J 处理叶绿素总含量最低, 且与 CK<sub>1</sub> 和 CK<sub>2</sub> 差异不显著。结果表明全生育期不灌水或只灌拔节水会使成熟期谷子叶绿素含量迅速下降, 灌 3 次水或灌拔节水+抽穗水的组合, 可较好延缓谷子生长后期的失绿速度。

**2.1.3 对干物质积累与分配的影响** 随着生育期推进, 各处理下谷子单株地上部干物质积累量均呈上升趋势, 营养器官所占比例逐渐减少, 生殖器官所占比例逐渐上升(图 2)。拔节期的茎鞘和叶片分别占植株干质量的 50.43%~55.75% 和 44.25%~49.57%; 在抽穗期, 茎鞘、叶片分别占植株干质量的 56.73%~62.23% 和 28.37%~36.71%, 穗轴(含颖壳)占植株干质量的 4.26%~11.03%, 叶片占比有所下降; 在灌浆期, 随籽粒的形成, 营养器官占比进一步下降, 其中生殖器官干物质质量占比达 27.81%~36.02%; 成熟期生殖器官占比达 39.17%~44.70%, 其中籽粒占比为 33.41%~37.21%, 显著高于叶片干物质占比。

与对照相比, 不同生育期补充灌溉均不同程度地提高了各生育期下谷子各器官的干物质积累量, 其中 SJ 处理能显著提高谷子在苗期和拔节期叶片和茎鞘的干物质积累量; H 处理在抽穗期灌水后, 相比 CK<sub>2</sub> 显著提高了茎鞘和穗轴(含颖壳)干质量, 表现出明显的补偿效果, 同时其单株干物质质量较 CK<sub>2</sub> 处理显著提高 31.48%, 表明该时期及时灌水可以显著促进抽穗期谷子的干物质累积; 在灌浆期和成熟期, JH 和 JHF 处理间、J 和 JF 处理间的单株干物质总量差异不显著, 表明灌浆水对谷子干物质积累的影响有限。谷子籽粒干物质积累量在 JHF 处理下最高; 2 次灌水处理中, JH 处理的促进作用显著大于 SJ 处理和 JF 处理, JHF 处理和 JH 处理差异不显著; 1 次灌水处理表现为 H>J, H 处理的促进作用也大于 SJ 处理和 JF 处理, 表明灌抽穗水对后期谷子籽粒干物质的积累至关重要, 且在该时期的干旱胁迫对作物产生不可逆影响。

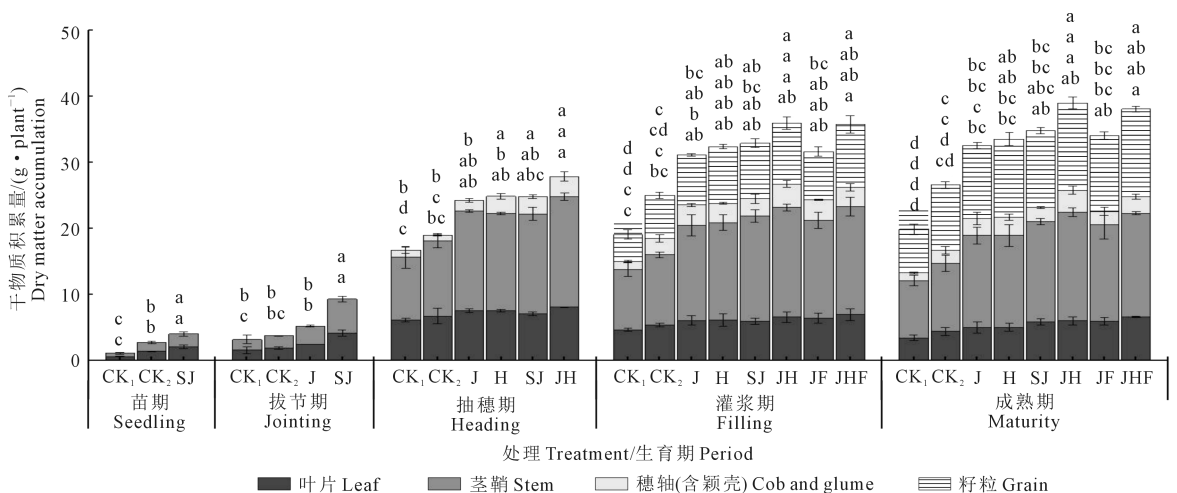


图 2 不同处理下谷子干物质动态积累和分配

Fig.2 Variation of dry matter accumulation and distribution of millet in different treatments

## 2.2 补充灌溉对谷子产量、水分利用效率的影响

2.2.1 对产量及构成因素的影响 由表 3 可知,与对照相比,补充灌溉下谷子籽粒产量、穗数、穗粒数均不同程度增加,但部分处理的千粒重有所减小。从籽粒产量来看,JHF 处理的籽粒产量最高,籽粒产量较 CK<sub>2</sub> 显著增加 39.97%,但与 JH 处理差异不显著,均显著高于其他处理;2 次灌水处理下,SJ、JH、JF 处理籽粒产量较 CK<sub>2</sub> 分别显著增加 19.10%、36.63%、14.33%,且 JH 处理籽粒产量显著高于 SJ 和 JF 处理;1 次灌水处理下,J、H 处理产量较 CK<sub>2</sub> 分别显著提高 11.62%和 19.71%,同时 H 处理的籽粒产量显著高于 J 处理;与 CK<sub>1</sub> 相比,CK<sub>2</sub> 处理显著增产 113.97%。以上结果表明,与 CK<sub>1</sub> 相比,覆膜并灌底墒水能显著提高谷子产量,并且籽粒产量随着生育期补灌次数的增加而增加,其中,抽穗水的作用优于拔节水,而灌浆水对产量的提高作用并不大。

分析谷子籽粒产量构成因素发现,与 CK<sub>1</sub> 相比,覆膜并灌底墒水的处理每公顷穗数显著提高了 43.75%~70.10%,随生育期灌水次数增多,每公顷穗数呈现逐渐增加的趋势,但处理间差异不显著。灌水处理下穗粒数表现为 JHF>JH>H>SJ>JF>J,其中 JHF 处理的穗粒数与 J 处理差异显著,均显著大于 CK<sub>2</sub>、CK<sub>1</sub>。对于千粒重,在 1 次灌水处理中,J、H 处理间差异不显著,2 次灌水处理中,千粒重表现为 JH>JF>SJ,其中 JH 处理显著高于 SJ 处理,JHF 处理与 JH 处理差异不显著,但显著大于其他处理。2022 年春季降水量少,土壤初始含水率较低,在雨养条件(CK<sub>1</sub>)下,谷子出苗率低,导致其穗数较少,覆膜并灌底墒水显著提高了公顷穗数和穗粒数,从而显著提高谷子产量。补灌拔节水通过提高谷子穗数和穗粒数提高产量;补灌抽穗水有利于谷子幼穗分化,通过提高穗粒数提高籽粒产量;补灌灌浆水有利于谷子充分灌浆,提高谷子千粒重;综上,JHF 处理的产量及构成因素均表现最优,但与 JH 处理差异不显著。

表 3 不同处理下谷子产量及其构成因素

Table 3 Yield and yield components of millet under different treatments

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm <sup>-2</sup> )	穗数 /(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	穗粒数 Kernels per ear	千粒重 1000-kernel weight/g
CK <sub>1</sub>	1835.70e	26.22b	2583.68d	2.77c
CK <sub>2</sub>	3927.87d	37.69a	3890.22c	2.80bc
J	4384.37c	40.20a	4657.63b	2.76c
H	4702.24b	41.46a	4940.33ab	2.75c
SJ	4678.05b	42.72a	4840.55ab	2.74c
JH	5366.78a	44.60a	5116.31ab	2.85ab
JF	4490.74bc	40.83a	4728.80ab	2.80bc
JHF	5497.97a	43.97a	5185.48a	2.91a

2.2.2 对水分利用效率的影响 如表 4 所示,随灌水量增加,谷子总耗水量呈增加趋势,与对照相比,补充灌溉不同程度地提高了 WUE 及 PWUE。分析各处理的 WUE 发现,JH 处理最高、JHF 处理次之,但两处理间无显著差异,与 CK<sub>2</sub> 相比,J 和 H 处理的 WUE 分别显著提高 6.36%和 15.45%,SJ、JH、JF、JHF 处理分别提高 7.27%、24.55%、4.55%、22.73%。PWUE 表现为 JHF>JH>H>SJ>JF>J,其中 JHF 和 JH 处理显著高于其他处理。IWUE 随着灌水量的增加而显著减小。IB 表现为 CK<sub>2</sub>>H>J>JH>SJ>JHF>JF。以上结果表明,JH 与 JHF 处理均可获得较高的 WUE 和 PWUE,但 JH 处理的灌水量和全生育期耗水量比 JHF 处理降低了 19.97%和 3.33%,IWUE 和 IB 分别显著提高 21.95%和 20.34%。因此,要提高灌溉水生产力和灌溉效益,同时获得较高的水分利用效率和籽粒产量,推荐合理的补灌组合是拔节水+抽穗水。

## 3 讨论

### 3.1 补充灌溉对谷子生长发育的影响

水资源缺乏限制了干旱和半干旱地区的作物生长和粮食产量<sup>[20]</sup>。灌溉被广泛用于抵消严重水胁迫造成的产量损失<sup>[12, 21]</sup>。在黄土高原地区,优化灌溉调度能显著促进作物生长<sup>[22]</sup>,优化调控作物冠层结构与群体指标,调控作物干物质的积累与分配规律<sup>[23]</sup>,促进籽粒发育,提高作物的籽粒产量<sup>[24]</sup>。

植物的形态指标可直观地反映出植物的生长状况,其中株高、茎粗和叶面积指数是作物生长状况对水分响应的重要农艺指标<sup>[25]</sup>。王永丽等<sup>[26]</sup>研究发现,灌水能有效提高谷子株高和顶叶叶面积,谷子在拔节期、孕穗期和抽穗开花期遭遇水分胁迫均会抑制谷子茎秆的伸长和顶叶叶面积的生长,而灌浆期进入生殖生长,水分胁迫对株高影响不明显。本研究发现,谷子株高在苗期增长缓慢,拔节后快速增长,灌浆期趋于稳定;谷子茎粗和叶面积指

表 4 谷子水分利用效率

Table 4 Water use efficiency of millet

处理 Treatment	ET /mm	WUE /(kg·m <sup>-3</sup> )	PWUE /(kg·m <sup>-3</sup> )	IWUE /(kg·m <sup>-3</sup> )	IB /(kg·m <sup>-3</sup> )
CK <sub>1</sub>	359.40d	0.51e	0.56e		
CK <sub>2</sub>	358.60d	1.10d	1.21d	26.19a	13.95a
J	374.68c	1.17c	1.35c	13.62c	7.92c
H	371.19c	1.27b	1.45b	14.79b	9.01b
SJ	396.26b	1.18c	1.44b	9.79e	5.96e
JH	393.15b	1.37a	1.65a	10.89d	7.16d
JF	389.38b	1.15cd	1.38bc	9.83e	5.81e
JHF	406.69a	1.35a	1.69a	8.93f	5.95e

数呈先升后降的变化趋势;拔节水和抽穗水对谷子株高、茎粗和叶面积指数均有显著影响,抽穗水的影响大于拔节水,苗期水和灌浆水的影响不显著。这是由于苗期谷子植株较小,耐旱需水少,因此灌苗期水处理与CK<sub>2</sub>之间差异不显著;拔节期作为谷子营养生长的关键时期,细胞分裂较快,对水分需求比较敏感,水分胁迫对株高、茎粗和叶面积指数的影响比较大,拔节期水分亏缺使得受旱的谷子补灌后通过自身调节能力对株高、茎粗和叶面积指数表现出明显的生长补偿和促进效应<sup>[6]</sup>;由于降雨量分布不均匀,试验期谷子在抽穗前期遭受干旱胁迫,谷子生长和穗发育受阻,出现“卡脖旱”现象,在抽穗期受旱时适当地进行补充灌溉,可以显著促进谷子的生长发育并缓解干旱胁迫带来的负面影响,并且具有补偿效果,而SJ处理下谷子前期生长较快,植株高大,蒸腾作用较强,在抽穗期遭遇“卡脖旱”时,受到的干旱胁迫最严重,导致SJ处理的叶面积显著小于其他补灌处理;抽穗开花后谷子主要以生殖生长为主,叶片和茎秆吸收及积累的养分转移至穗部供籽粒生长需要,因此茎粗和叶面积指数有所减小<sup>[27]</sup>,株高达到相对稳定的状态,且受到灌浆期水分的影响不明显,但适宜的灌浆水可延缓谷子叶片的衰老,在生育后期LAI仍可保持较高水平。植物绿叶中的光合色素是其进行光合作用的物质基础,具有吸收、传递和转换光能的作用<sup>[28]</sup>,叶片叶绿素含量与植物的光合作用密切相关。大量研究证明,作物受旱复水后存在补偿效应,能够缓解生育后期叶绿体的降解和其基粒片层结构的破坏,抑制叶绿素含量的下降,提高光合生产潜力,对保证作物的高产至关重要<sup>[29]</sup>。在不同生育阶段,叶绿素含量对补灌的响应存在一定的差异,赵欢等<sup>[30]</sup>研究认为,适当的灌溉次数和灌水量可以促进谷子叶绿素含量的提升,在拔节期和抽穗期各灌1次水就可维持较高的叶绿素量,这与本研究的结果相类似。本研究发现,抽穗期时JH处理比J处理或H处理对抽穗期谷子叶绿素总含量的影响更大;灌浆期时,JF和JHF处理的下降幅度最小,SJ处理的下降幅度最大,表明灌溉苗期水+拔节水导致作物前期营养生长过于旺盛,后期会出现早衰现象,而灌浆期灌水可以延缓谷子花后的失绿速度。全生育期不灌水或只灌拔节水会使成熟期谷子叶绿素含量迅速下降,灌拔节水+抽穗水+灌浆水或灌拔节水+抽穗水,可较好延缓谷子生长后期失绿速度。因此,关键生育期补充灌溉可以显著提高谷子叶片叶绿素含量,促进叶片捕光以提高光合能力。

作物的干物质累积量直接来源于作物光合性能,也是作物高产的基础<sup>[31]</sup>。张玉娜等<sup>[32]</sup>研究发现,不同生育时期干旱胁迫对谷子干物质积累和产量有极显著影响,拔节期是谷子茎、叶急剧生长阶段,抽穗期是干物质积累强度最高阶段,土壤水分在这些时期具有重要作用,这与本试验结果相似。补灌苗期水或拔节水对抽穗前期谷子干物质积累均有促进作用,但这种促进作用在抽穗期表现消失;补灌抽穗水显著提高了该时期谷子的干物质积累量,其中H处理的干物质积累量显著高于CK<sub>2</sub>处理,表明即使拔节期未补灌,但抽穗期谷子遭遇“卡脖旱”时及时补灌可以缓解干旱胁迫,促进谷子的补偿生长,显著提高该时期的叶面积指数和叶绿素含量,进而提供较高的光合产物,并对后期谷子籽粒干物质的积累至关重要;成熟期谷子籽粒干物质在JHF处理下最高,但与JH处理差异不显著,1次灌水处理表现为H>J,H处理的促进作用同时也大于SJ处理和JF处理。因此,在丰水年补灌拔节水+抽穗水更有利于谷子干物质积累。

### 3.2 补充灌溉对谷子产量和水分利用效率的影响

补充灌溉的主要作用在于使作物在需水关键期和敏感期度过缺水难关,因此补灌生态农业能以极少的供水量实现较高的增产效果<sup>[33]</sup>。单位面积穗数、穗粒数和千粒重是谷子产量构成的3个因素<sup>[34]</sup>,其形成于不同生育时期,苗期至拔节期是营养生长阶段,这一阶段决定了穗数,并为穗粒数的形成奠定基础<sup>[30]</sup>;从拔节到抽穗开花为营养生长和生殖生长并进时期,是巩固穗数、决定穗粒数阶段,并为千粒重奠定基础;灌浆期则是以籽粒干物质积累为主的生殖生长时期,该时期是决定谷粒饱满程度、增加穗粒重的关键时期<sup>[6]</sup>,不同生育阶段灌水对谷子产量及构成影响不同,协调好产量构成三因素间的关系,是谷子高产的保障<sup>[34]</sup>。王永丽等<sup>[26]</sup>研究发现,拔节期遭遇干旱胁迫可抑制谷子穗分化进程,穗粒数减少,进而产量下降,灌浆期干旱胁迫使谷子秕谷率最高,单株穗重、穗粒重和产量均最低。赵欢等<sup>[30]</sup>研究发现,谷子公顷穗数和千粒重均随灌水次数增多而增多,与全生育期不灌水处理相比,灌拔节水、拔节水+抽穗水、拔节水+抽穗水+灌浆水处理的产量分别显著提高22.20%、38.08%、37.21%。本研究中,与对照相比,补充灌溉下谷子籽粒产量、穗数、穗粒重、穗粒数均得到不同程度的提高,灌水时期明显影响产量构成。在种子萌发过程中,水分供应不足会导致谷子的萌发受阻,严重制约其出苗率及幼苗成活率<sup>[35]</sup>。2022试验年属丰



水年型,但降水分布不均(图 1),苗期降水较少,为确保出苗,播种时灌溉了底墒水,与 CK<sub>1</sub> 纯雨养处理相比,谷子出苗率在灌底墒水并覆膜条件下显著提高 66%,因此灌溉底墒水并覆膜通过显著提高出苗率及公顷穗数,最终使 CK<sub>2</sub> 产量比 CK<sub>1</sub> 显著增产 113.97%。在谷子生育期内,补灌拔节水通过提高谷子穗数和穗粒数提高产量;补灌抽穗水有利于谷子幼穗分化,通过提高穗粒数和穗粒重提高籽粒产量;补灌灌浆水有利于谷子充分灌浆,提高谷子千粒重。H 处理的产量显著高于 J 处理,表明相比于拔节期,抽穗期对水分更加敏感,该时期遭遇水分胁迫后,即使在花后有较为充足的降水对恢复产量的作用也变得十分有限,因此谷子抽穗期是水分需求的关键时期;3 水处理的产量构成因素均表现最优,因而籽粒产量最高,但与 JH 处理差异不显著。因此,在确保出苗率的基础上,在丰水年谷子的拔节期和抽穗期进行补充灌溉就可以显著提高穗粒数和千粒重,并获得高产。

Sun 等<sup>[36]</sup>认为,节水农业应寻求产量和水分利用效率的最佳结合。通过在作物关键生育期进行适时适量地补充灌溉和有效降低土壤水分无效蒸发的覆膜措施,可有效保障谷子在不同生育阶段对土壤水分的需求,进而获得较高的水分生产效率<sup>[19]</sup>。在本研究中,随灌水次数增加,耗水量增加,产量呈增加趋势,水分利用效率先升后降的趋势,灌溉水生产力和灌溉效益随着灌水量的增加而显著减小。与 JH 处理相比,JHF 处理产量增加不显著,反而造成灌溉水生产力和灌溉效益的显著降低,因此在拔节期和抽穗期进行补充灌溉可兼顾籽粒产量、WUE、PWUE、IWUE 和 IB 的协同提高。刘琴等<sup>[37]</sup>研究发现,与补灌处理相比,谷子不灌水处理的水分利用效率最高,这与本研究的结果不一致,可能是由于试验年份的降水分布不同,并且该研究每次灌水量为 69.44 mm,较大的补灌量可能存在无效蒸发现象,而本研究采用的是测墒补灌的方式,补灌量较少,可以减少无效的土面蒸发与深层渗漏,进而提高了水分利用效率。总之,考虑到降水年型也是影响谷子补充灌溉效果的重要因素,后续应进行长期补充灌溉试验,以获得不同降水年型下干旱半干旱地区谷子适宜的补充灌溉方案。

## 4 结 论

关键生育期补充灌溉能有效促进谷子生长,提高株高、茎粗、叶面积指数和叶绿素总含量,进而促进谷子的干物质积累。补灌苗期水+拔节水对谷子

生长的促进作用在抽穗期减弱,补灌拔节水+抽穗水比单独灌拔节水或抽穗水的促进效果更优,而补灌灌浆水对株高和茎粗的影响不显著,但可保持生育后期叶面积指数和叶绿素总含量的相对较高水平。

谷子产量在补灌处理下较覆膜只灌底墒水处理显著提高了 11.62%~39.97%,并且随着生育期补灌次数的增加而增加,灌抽穗水的作用优于拔节水,丰水年补灌灌浆水对产量的提高作用不大。补灌拔节水、抽穗水均有利于提高谷子穗数和穗粒数,补灌灌浆水有利于提高谷子千粒重。在考虑产量、水分利用效率、降水利用效率、灌溉水生产力和灌溉效益下,推荐丰水年在拔节期和抽穗期进行补充灌溉,实现最佳综合效益。

## 参 考 文 献:

- [1] 刁现民,程汝宏.十五年区试数据分析展示谷子糜子育种现状[J]. 中国农业科学, 2017, 50(23): 4469-4474.  
DIAO X M, CHENG R H. Current breeding situation of foxtail millet and common millet in China as revealed by exploitation of 15 years regional adaptation test data[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50 (23): 4469-4474.
- [2] 李顺国,刘斐,刘猛,等.中国谷子产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3): 459-470.  
LI S G, LIU F, LIU M, et al. Current status and future prospective of foxtail millet production and Seed industry in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 459-470.
- [3] 贾志宽,王龙昌,韩清芳,等.宁南半干旱偏旱区农业综合发展研究[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(4): 1-5.  
JIA Z K, WANG L C, HAN Q F, et al. Research on comprehensive development of agriculture in semiarid areas liable to droughts in South Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2001, 19(4): 1-5.
- [4] 山仑.提高半干旱地区旱地农田生产力的现实途径和未来策略[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988, (2): 1-9.  
SHAN L. Realistic approaches and future strategies to improve the productivity of dryland farmland in semi-arid areas [J]. Collection of Northwest Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, 1988, (2): 1-9.
- [5] 高亮,张维宏,杜雄,等.覆膜和补灌对杂交谷子产量形成与水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(1): 122-132.  
GAO L, ZHANG W H, DU X, et al. Effects of Plastic-Film mulching and supplementary irrigation on yield formation and water use efficiency of hybrid millet[J]. Acta Agronomica Sinica, 2017, 43(1): 122-132.
- [6] 董孔军,何继红,任瑞玉,等.不同生育阶段灌水处理对谷子生长发育的调控效应[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(5): 35-39.  
DONG K J, HE J H, REN R Y, et al. Effects of irrigation on growth and development of foxtail millet at different growth stages[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(5): 35-39.
- [7] ZHANG M, CHEN W W, JING M Y, et al. Canopy structure, light

- intensity, temperature and photosynthetic performance of winter wheat under different irrigation conditions [J]. *Plants-Basel*, 2023, 12 (19): 3482.
- [8] 杨文稼, 王仕稳, 李雨霖, 等. 半干旱地区补充灌溉对冬小麦根系及耗水特征的影响[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(4): 920-928.  
YANG W J, WANG S W, LI Y L, et al. Effects of supplementary irrigation on root system and water consumption of winter wheat in semiarid region[J]. *Arid Zone Research*, 2018, 35(4): 920-928.
- [9] 姚宁, 宋利兵, 刘健, 等. 不同生长阶段水分胁迫对旱区冬小麦生长发育和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, (12): 2379-2389.  
YAO N, SONG L B, LIU J, et al. Effects of water stress at different growth stages on the development and yields of winter wheat in arid region[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, (12): 2379-2389.
- [10] OWEIS T, HACHUM A. Optimizing supplemental irrigation; Tradeoffs between profitability and sustainability [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(3): 511-516.
- [11] FENG S W, DING W H, SHI C C, et al. Optimizing the spatial distribution of roots by supplemental irrigation to improve grain yield and water use efficiency of wheat in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 275: 107989.
- [12] YOU Y L, SONG P, YANG X L, et al. Optimizing irrigation for winter wheat to maximize yield and maintain high-efficient water use in a semi-arid environment [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 273: 107901.
- [13] 佚名. 旱地高标准农田建设技术规范(试行)[J]. *中国农业综合开发*, 2023, (10): 4-7.  
Anon. Technical specification for high standard farmland construction in dry land(trial)[J]. *Agricultural Comprehensive Development in China*, 2023, (10): 4-7.
- [14] 张祖光. 补充性灌溉对旱地玉米生长和产量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.  
ZHANG Z G. The effect of supplementary irrigation on the growth and yield of dryland maize[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [15] 王永华, 刘焕, 辛明华, 等. 耕作方式与灌水次数对砂姜黑土冬小麦水分利用及籽粒产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52 (5): 801-812.  
WANG Y H, LIU H, XIN M H, et al. Effects of tillage practices and irrigation times on water use efficiency and grain yield of winter wheat in lime concretion black soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(5): 801-812.
- [16] 王东. 黄淮流域冬小麦按需补灌方法及其应用[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 220-228.  
WANG D. A method of supplemental irrigation on-demand for winter wheat and its application in the Huang-Huai Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 220-228.
- [17] 王亚华. 不同生育期灌水对半冬性小麦生长、产量及效益的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2019.  
WANG Y H. Effects of irrigation at different growth stages on growth, yield, and economic efficiency of semi winter wheat[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.
- [18] 陈伟, 吴奇, 胡家齐, 等. 不同灌水控制下限对粟米生长、产量及耗水规律的影响[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(1): 67-72.  
CHEN W, WU Q, HU J Q, et al. Effect of different deficit irrigation on growth, water consumption and yield of millet[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition)*, 2019, 40 (1): 67-72.
- [19] 高晓丽, 马娟娟, 贾雨蕊, 等. 晋北谷子耗水规律和水分高效利用研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(9): 40-47.  
GAO X L, MA J J, JIA Y R, et al. The effects of deficit irrigation scheduling on water consumption and water use efficiency of millet in the northern Shanxi Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(9): 40-47.
- [20] YANG X L, CHEN Y Q, PACENKA S, et al. Managing food and bioenergy crops with declining groundwater levels in the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2019, 234: 1-14.
- [21] TOMAZ A, PALMA J F, RAMOS T, et al. Yield, technological quality and water footprints of wheat under Mediterranean climate conditions; A field experiment to evaluate the effects of irrigation and nitrogen fertilization strategies[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 258: 107214.
- [22] 贾倩民. 半干旱区集雨补灌与种植密度对玉米生长及光合生理特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.  
JIA Q M. The effects of rainwater harvesting and supplementary irrigation and planting density on the growth and photosynthetic physiological characteristics of maize in semi-arid areas [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [23] 卫婷. 集雨限量补灌对半干旱区农田土壤水分及冬小麦产量的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.  
WEI T. The effect of limited rainfall supplementary irrigation on soil moisture and winter wheat yield in semi-arid farmland[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017.
- [24] 李超, 刘文兆, 林文, 等. 黄土塬区冬小麦产量及水分利用效率对播前底墒变化与生育期差别供水的响应[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(18): 3549-3560.  
LI C, LIU W Z, LIN W, et al. Grain yield and WUE responses to different soil water storage before sowing and water supplies during growing period for winter wheat in the Loess Tableland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(18): 3549-3560.
- [25] 张泽宇, 曹红霞, 何子建, 等. 基于 AHP-EWM-TOPSIS 的温室辣椒最佳调亏灌溉方案优化研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41 (1): 111-120.  
ZHANG Z Y, CAO H X, HE Z J, et al. Study on greenhouse pepper optimal regulated deficit irrigation scheme based on AHP-EWM-TOPSIS[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(1): 111-120.
- [26] 王永丽, 王珏, 杜金哲, 等. 不同时期干旱胁迫对谷子农艺性状的影响[J]. *华北农学报*, 2012, 27(6): 125-129.  
WANG Y L, WANG J, DU J Z, et al. Effects of drought stress at different periods on agronomic traits of millet[J]. *Acta agriculturae bo-reali-sinica*, 2012, 27(6): 125-129.
- [27] 付巍. 水肥耦合对杂交谷子生长及水肥利用效率的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2015.  
FU W. The effect of water fertilizer coupling on the growth and water fertilizer utilization efficiency of hybrid foxtail millet[D]. Baoding: Agricultural University Of Hebei, 2015.