文章编号:1000-7601(2025)05-0199-13 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.20

关键生育期补灌对糜子生长、产量及水分利用效率的影响

彭美龄[1],曹红霞[1],陈越浦[2],马丽娜[3],党小文[3],刘家璇[1],任利宇[2]

(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. 陕西崇仁水利工程有限公司,陕西 西安 710000;
3. 榆林市农业技术服务中心,陕西 榆林 719000)

摘 要:为研究有限灌水条件下在关键生育期不同补充灌溉方案对糜子生长、产量和水分利用效率的影响,以‘榆糜 2 号’为研究对象,于 2022—2023 年在陕西榆林开展大田试验,试验以 0~20 cm 土层田间持水量(θ_f)的 50%为灌水下限,分别设计 0~20 cm 土层 70% θ_f和 90% θ_f为灌水上限,设置抽穗期补灌、拔节期+抽穗期补灌 2 个补灌时期,具体为:抽穗期补灌 70% θ_f(H70)、抽穗期补灌 90% θ_f(H90)、拔节期补灌 70% θ_f+抽穗期补灌 70% θ_f(J70H70)、拔节期补灌 70% θ_f+抽穗期补灌 90% θ_f(J70F90)、拔节期补灌 90% θ_f+抽穗期补灌 70% θ_f(J90H70)、拔节期补灌 90% θ_f+抽穗期补灌 90% θ_f(J90H90)。以不覆膜雨养条件作为对照(CK),研究不同补灌时期及补灌量对糜子株高、叶面积指数、干物质累积与转运、产量和水分利用效率的影响。结果表明,补灌显著促进糜子生长发育,干物质平均增长速率、穗数、穗粒数、水分利用效率及降水利用效率分别提高了 7.42%~116.24%、-9.89%~17.93%、8.9%~70.6%、19.82%~55.25%、32.81%~90.15%,快速生长期缩短了 1~8 d,灌溉水利用效率和灌溉效益分别降低了21.78%~62.11%和 8.48%~73.94%。抽穗期单次补灌下,H90 获得产量和水分利用效率较高,分别为 3 790.41~4 748.99 kg·hm^{-2}、1.45~1.85 kg·hm^{-3}。拔节期+抽穗期补灌条件下, J90H70 的产量和水分利用效率为最高(4 067.39~5 373.72 kg·hm^{-2}和 1.59~1.96 kg·m^{-3}),分别较 CK 提高了 54.41%~88.73%和 31.20%~55.25%。在有限灌水条件下,综合考虑产量、水分利用效率与灌溉效益, J90H70 是高产高效的最优补灌方案;当仅补灌 1 次水时,采用抽穗期补灌 90% θ_f(H90)灌溉策略能保证作物正常生长并达到一定增产效果。

关键词:糜子;关键生育期补灌;干物质累积;产量;水分利用效率

中图分类号:S516; S274; S365 **文献标志码**:A

Effects of supplementary irrigation at key growth stages on growth, yield and water use efficiency of broomcorn millet

PENG Meiling[1], CAO Hongxia[1], CHEN Yuepu[2], MA Lina[3],
DANG Xiaowen[3], LIU Jiaxuan[1], REN Liyu[2]

(1. *Research Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*;
2. *Shaanxi Chongren Water Conservancy Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi* 710000, *China*;
3. *Yulin Agricultural Technology Service Center, Yulin, Shaanxi* 719000, *China*)

Abstract: To study the effects of different supplemental irrigation systems on the growth, yield, and water use efficiency of broomcorn millet under limited irrigation conditions during the critical growth period, fram 2022 to 2023, using 'Yumi No. 2' as the research object, field experiments were conducted in Yulin, Shaanxi Province. In the experiment, 50% of the field water capacity (θ_f) of the 0~20 cm soil layer was taken as the lower irrigation limit, and 70% θ_f and 90% θ_f of the 0~20 cm soil layer were designed as the upper irrigation limit, respectively. Two supplemental irrigation periods were set up: supplemental irrigation at the heading stage and supplemental irrigation at the jointing stage + heading stage. Specifically: supplementary irrigation at heading to 70% θ_f(H70), supplementary irrigation at heading to 90% θ_f(H90), supplementary irrigation at the jointing to 70% θ_f+ supple-

收稿日期:2025-02-11 **修回日期**:2025-04-14

基金项目:陕西省重点产业创新链-农业领域项目(2023-ZDLNY-46);陕西杨凌农业高新产业示范区科技计划项目(2024NY-22)

作者简介:彭美龄(2001-),女,湖南岳阳人,硕士研究生,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:pengmeilingbk@ nwafu.edu.cn

通信作者:曹红霞(1971-),女,新疆五家渠人,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail:nschx225@ nwafu.edu.cn

mentary irrigation at the heading to 70% θ_f(J70H70), supplementary irrigation at the jointing to 70% θ_f+ supplementary irrigation at the heading to 90% θ_f(J70F90), supplemental irrigation at the jointing stage to 90% θ_f+ supplemental irrigation at the heading stage to 70% θ_f(J90H70), and supplemental irrigation at the jointing stage to 90% θ_f+ supplemental irrigation at the heading stage to 90% θ_f(J90H90). Non-mulched rainfed (CK) was used as a control. The effects of different supplemental irrigation periods and amounts on plant height, leaf area index, dry matter accumulation and translocation, yield, and water use efficiency of broomcorn millet were studied. The results showed that supplementary irrigation significantly promoted the growth and development of broomcorn millet. The average growth rate of dry matter, spike number, grain number per spike, water use efficiency, and precipitation use efficiency were increased by 7.42%~116.24%, −9.89%~17.93%, 8.9%~70.6%, 19.82%~55.25%, and 32.81%~90.15%, respectively. The rapid growth period was shortened by 1~8 days, and the irrigation water use efficiency and irrigation benefit were reduced by 21.78%~62.11% and 8.48%~73.94%. This study showed that the yield and water use efficiency of H90 were 3 790.41~4 748.99 kg · $hm^{-2}$and 1.45~1.85 kg · hm^{-3}. Under the condition of supplementary irrigation at the jointing stage + the heading stage, the yield and water use efficiency of J90H70 were the highest (4 067.39~5 373.72 kg · hm^{-2}, 1.59~1.96 kg · hm^{-3}), which were 54.41%~88.73% and 31.20%~55.25% higher than those of CK, respectively. Under the condition of limited irrigation, considering the yield, water use efficiency, and irrigation benefit, J90H70 was the optimal supplementary irrigation scheme for high yield and high efficiency. When the water was supplemented once, the H90 irrigation strategy could achieve the yield increase effect of J70H70 and save the production cost. This study can provide a theoretical basis for promoting the efficient production of water-saving agriculture in broomcorn millet in arid and semi-arid areas.

Keywords: broomcorn millet; supplementary irrigation in key growth period; dry matter accumulation; yield; water use efficiency

糜子(*Panicum miliaceum* L.)属禾本科黍属,浅根系作物,起源于我国北方,具有生育期短、耐干旱、耐瘠薄、籽粒营养成分丰富等特点,其作为一种“抗旱救灾”作物在我国陕北黄土高原雨养农业区广泛种植。陕北地区长期气候干燥,存在农业用水短缺、极端气候以及降水供需时空错位等问题,作物关键生长时期极易缺水而导致减产。有研究指出黄土高原地区采用膜下滴灌技术优化补充灌溉制度可以保证作物生长、提高有限水资源利用效率[1]。目前补灌实践中存在灌水次数较多、单次灌水量较大(≥60 mm)、水资源利用效率低的问题[2]。依据降水量和作物需水特征,合理减少作物对干旱不敏感生长阶段的灌溉次数和灌水量,可以保证不显著降低产量并将水分利用效率提高 10.0%~50.0%[3]。因此,如何在有限水资源条件下制定合理的节水补灌方案以保证糜子稳产高产、提高作物水分利用效率是陕北地区杂粮可持续生产亟待解决的问题。

在作物关键需水时期进行补充灌溉能提高雨养农业的稳定性和可持续性,是改善农田土壤水分状况、增强作物光合能力、实现稳产高产的重要途径[4]。陕北黄土高原地区糜子生长中期耗水量大,初期和末期的耗水量相对较小,分蘖~抽穗期耗水量占到总耗水量的 53.4%~58.0%[5]。拔节期为糜子水分敏感期之一,该时期稳定的土壤水分条件可通过调节叶片气孔大小与密度,提高叶片气孔导度来促进糜子光合作用和生长发育,提高水分利用效率[6]。抽穗期是作物由营养生长转为生殖生长的关键时期,在此期间作物营养器官贮存的同化物向生殖器官转运,受水分条件影响极大,发生干旱将对籽粒灌浆和籽粒发育产生负面影响[7]。Wang 等[8]认为拔节期补充灌溉可以延缓作物茎秆衰老,促进干物质向籽粒的运输,提高产量。董孔军等[9]研究表明不同阶段灌水处理中,拔节期灌水显著增加谷子的株高,但对株穗重和产量影响最大的灌水时期为抽穗期。Jiang 等[10]研究得出,抽穗期灌水对于保证作物高产至关重要。抽穗期灌水对于谷类粮食作物而言必不可缺,当作物生育期内仅进行一次灌溉时,时间应处于作物孕穗期后期~抽穗期[11]。Wei 等[12]研究表明在不同灌溉频率下,拔节期+抽穗期灌水相较于其他时期显著提高作物叶片光合能力和籽粒产量。然而关键生育期灌水过多会导致作物贪青晚熟,不利于增产,而水分不足则会影响作物的正常发育,因此探究关键补灌生育期补灌水量如何分配对于保产稳产、提高资源利用效率十分重要。

目前,关于糜子生长与水分之间关系的研究主

要集中于充分灌溉条件下水肥调控和不同耕作方式对糜子产量及水分利用的影响,且多数研究灌水量较大[13-14],针对有限水条件下糜子水分关键生育期进行补灌的研究较少,然而陕北黄土高原地区水资源极其匮乏,可利用的农业用水有限,无法保证全生育阶段灌溉用水,需要针对需水关键期进行补灌方案的研究。本研究假设抽穗期单次补灌、拔节期+抽穗期补灌均能促进糜子增产,而具体补灌水量如何分配以及对于产量以及水分利用效率的影响规律还有待探究。因此本研究以'榆糜 2 号'为研究对象,开展基于大田滴灌系统的补充灌溉试验,探究关键生育期补灌策略对糜子株高、叶面积指数、干物质累积与转运以及水分利用效率的影响,揭示有限水量下糜子高效生产的最优补灌方案,为推动干旱半干旱地区糜子节水高效生产提供技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2022—2023 年 6—9 月在陕西省北部榆林市国家现代农业科技示范区进行(108°58′~110°24′ E,37°49′~38°58′ N,海拔 1 229 m),该区位于我国黄土高原和毛乌素沙漠的交界处,属典型的干旱半干旱大陆性季风气候。试验地年平均气温 10℃左右,无霜期 160 d 左右,多年平均降水量 415 mm;试验区光照充沛,地势平坦,土壤多为黄绵土;试验地 0~20 cm 土壤容重为 1.46 g·cm^{-3},田间持水量为 28.87%,pH 值为 8.42,有机质含量为 7.14 g·kg^{-1},全氮含量为 0.94 g·kg^{-1},硝态氮含量为 12.67 mg·kg^{-1},铵态氮含量为 9.35 mg·kg^{-1},速效磷含量为 25.33 mg·kg^{-1},速效钾含量为 91.80 mg·kg^{-1}。试验选取'榆糜 2 号'为供试材料。2022—2023 年糜子生长季内降雨情况和气温变化如图 1 所示。2022 年和 2023 年糜子生育期内平均气温分别为 21.3℃和 22.4℃,有效降雨量分别为 313.9 mm 和 138.5 mm,降水频率分别为 23%和 96%,根据降水频率将 2022 年和 2023 年的水文年型分别为丰水年和特旱年。

1.2　试验设计

根据糜子需水特点,参考西北地区杂粮灌溉试验经验和当地传统雨养种植模式,试验以 0~20 cm 土层田间持水量(θ_f)的 50%为灌水下限,以 0~20 cm 土层田间持水量的 70%和 90%为灌水上限,设置抽穗期补灌、拔节期+抽穗期补灌 2 个补灌时期,具体为:抽穗期补灌 70% θ_f(H70)、抽穗期补灌 90% θ_f(H90)、

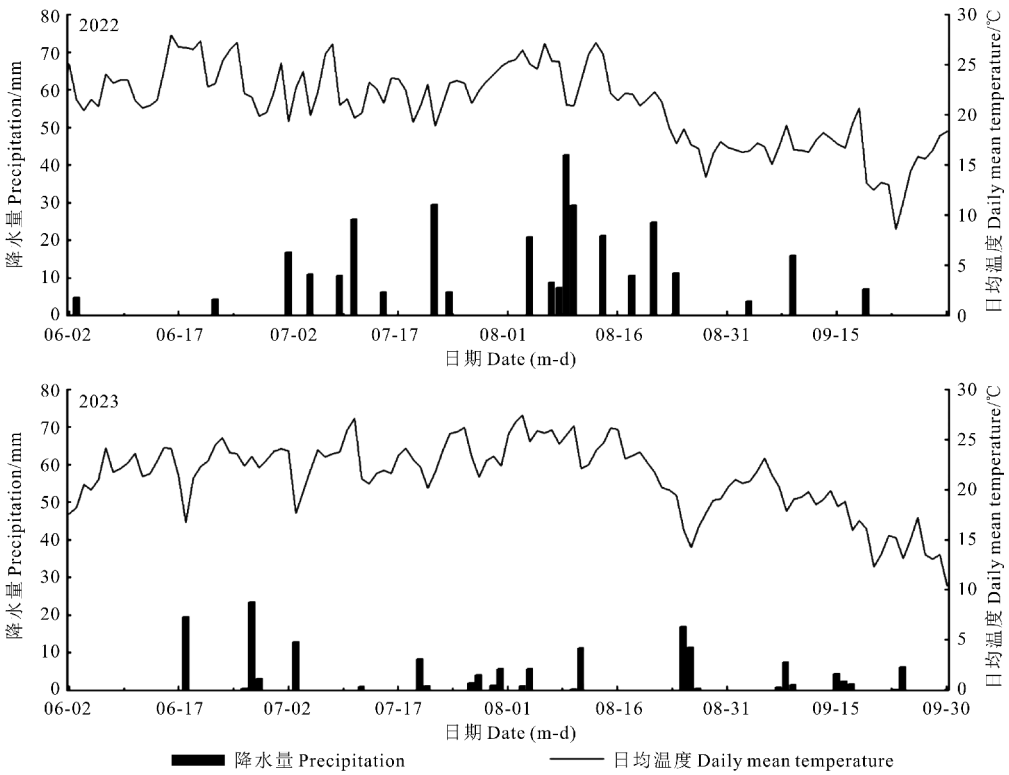


图 1　2022—2023 年糜子生育期内降水量及日平均温度

Fig.1　Daily mean temperature and precipitation during growing season of broomcorn millet in 2022-2023

拔节期补灌 70% θ_f+抽穗期补灌 70% θ_f(J70H70)、拔节期补灌 70% θ_f+抽穗期补灌 90% θ_f(J70F90)、拔节期补灌 90% θ_f+抽穗期补灌 70% θ_f(J90H70)、拔节期补灌 90% θ_f+抽穗期补灌 90% θ_f(J90H90)。以不覆膜雨养作为对照(CK)。试验小区面积为 32 m^2(8 m×4 m),采用一膜一管两行膜下滴灌种植模式,膜间行距 50 cm、膜内行距 30 cm,使用水表精准控制每个小区的灌溉量。株距 15 cm,每穴留苗 2 株,种植密度为 16.65 万株·hm^{-2}。各处理底肥一次性施入有机肥 1 500 kg·hm^{-2}、尿素 213 kg·hm^{-2}、磷酸二铵 163.5 kg·hm^{-2}、硝酸钾 163.5 kg·hm^{-2},肥料均匀撒施后翻耕。糜子于 2022 年 6 月 8 日播种,9 月 23 日收获;2023 年 6 月 9 日播种,9 月 13 日收获。其他管理措施同一般高产田。

本研究在关键生育期按需精准补灌,故采用时域反射法(time domain reflectometry, TDR)测定土壤含水率,具体补灌处理如表 1 所示,每个处理重复 3 次。

表 1 糜子试验处理

Table 1 Experimental treatment of broomcorn millet

年份 Year	处理 Treatment	拔节期 Jointing stage		抽穗期 Heading stage	
		生育期灌水上限/%(占田持百分比) Upper limit of irrigation during the growth period (percentage of θ_f)	灌水量 Irrigation amount /mm	生育期灌水上限/%(占田持百分比) Upper limit of irrigation during the growth period (percentage of θ_f)	灌水量 Irrigation amount /mm
2022	CK	0	0	0	0
	H70	0	0	70	8
	H90	0	0	90	17
	J70H70	70	8	70	8
	J70H90	70	8	90	17
	J90H70	90	17	70	8
	J90H90	90	17	90	17
2023	CK	0	0	0	0
	H70	0	0	70	9
	H90	0	0	90	15
	J70H70	70	9	70	9
	J70H90	70	9	90	15
	J90H70	90	15	70	9
	J90H90	90	15	90	15

$$灌水量(mm)=10\times h\times(\beta_i-\beta_j)\times Z \quad (1)$$

式中,h 为计划湿润土层深度(20 cm);β_i 为目标含水量(%),β_i=田间持水量(θ_f)×目标相对含水量;β_j 为灌水前各处理实际土壤含水量(%),Z 为计划湿润比,取 0.75。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 株高、叶面积指数 分别于拔节期、抽穗期、灌浆期、成熟期进行取样,在各小区选取长势一致的植株 3 株,使用卷尺测定株高;采用打孔称重法测定叶面积,并计算叶面积指数(LAI):

$$单株叶面积=单株叶片质量\times圆片总面积/小圆片叶总质量 \quad (2)$$

$$叶面积指数(LAI)=单株叶面积\times单位土地面积株数/单位土地面积 \quad (3)$$

1.3.2 干物质累积 干物质采集时间与株高、叶面积指数一致,将植株地上部分分为叶片、茎鞘、穗轴(含颖壳)和籽粒,放进烘箱 105℃杀青 0.5 h,再在 75℃下烘至恒重,用电子天平称得各器官干质量并计算单株作物干物质质量。

以播后天数为自变量,以地上部干物质累积量为因变量,选取 Logistic 模型拟合糜子干物质动态累积过程[15]。

$$A=\frac{A_{max}}{1+ae^{-bt}} \quad (4)$$

式中,A 为糜子的干物质累积量(kg·hm^{-2});A_{max} 为最大干物质累积量(kg·hm^{-2});t 为播种后天数(d);a 和 b 分别为待定系数。

对式(4)分别求一阶、二阶、三阶导数,可得:

$$T_1=\frac{\ln a-1.317}{b} \quad (5)$$

$$T_2=\frac{\ln a+1.317}{b} \quad (6)$$

$$V_{max}=\frac{bA_{max}}{4} \quad (7)$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 \tag{8}$$

$$T_3 = \frac{\ln a - 2.197}{b} \tag{9}$$

$$T_4 = \frac{\ln a + 2.197}{b} \tag{10}$$

$$V_{mean} = \frac{a}{T_4 - T_3} \tag{11}$$

式中,T_1为干物质快速累积起始时间(d);T_2为干物质快速累积结束时间(d);T_3为干物质累积有效增长起始时间(d);T_4为干物质累积有效增长结束时间(d);V_{max}为干物质最大累积速率(kg·hm^{-2}·d^{-1});V_{mean}为干物质平均累积速率(kg·hm^{-2}·d^{-1});ΔT为干物质快速生长期(d)。

1.3.3　*干物质转运和同化*　根据 Chen 等[16],花前营养器官(开花期茎鞘、叶片、穗轴+颖壳,下同)干物质转运量为开花期营养器官干物质积累量与成熟期营养器官(成熟期茎鞘、叶片、穗轴+颖壳,下同)干物质积累量的差值(kg·hm^{-2});花前营养器官干物质对籽粒的贡献率为花前营养器官干物质转运量占籽粒产量的比例(%);花后干物质同化量为籽粒产量与花前营养器官干物质转运量的差值(kg·hm^{-2});花后干物质对籽粒贡献率为花后干物质同化量占籽粒产量的比例(%)。

1.3.4　*糜子产量及构成因素*　于糜子成熟期各小区选取有代表性的植株 10 株,烘干后测定产量构成要素,包括穗粒数、穗粒重;在试验小区中央取 5 m^{2}收获,自然风干后脱粒、称重折算成公顷产量,并测定千粒重。

1.3.5　*作物水分利用效率计算*　糜子全生育期的耗水量(ET)采用水量平衡方程计算:

$$ET = W_0 - W_t + P + I + K - R - D \tag{12}$$

式中,W_0、W_t分别为试验小区播前、收获后 0~120 cm 土层土壤储水量(mm);P 为有效降水量(mm);I 为全生育期灌水量(mm);K 为地下水补给量(mm);R 为地表径流(mm);D 为深层渗漏量(mm)。

本研究试验地地势平坦,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;本试验计划湿润层为 20 cm 且灌水量较小,灌溉水不会入渗到 120 cm 土层以下,因此 D 忽略不计。

$$WUE = Y/ET \tag{13}$$

$$PUE = Y/P \tag{14}$$

$$IWUE = Y/I \tag{15}$$

$$IB = \Delta Y/I \tag{16}$$

式中,WUE 为水分利用效率(kg·hm^{-3});Y 为籽粒产量(kg·hm^{-2});PUE 为降水利用效率(kg·hm^{-2});$IWUE$ 为灌溉水利用效率(kg·hm^{-3});IB 为灌溉效益(kg·hm^{-3});ΔY 为灌水后相对 CK 增加的产量(kg·hm^{-2})。

1.4　数据计算与分析

使用 Microsoft Excel 2021 进行数据统计和表格制作,用 SPSS 26.0 软件中的双因素 AVNOVA 方法进行显著性分析,用 Origin 2024 软件制图。

2　结果与分析

2.1　株高、叶面积指数

2.1.1　*株高*　如图 2 所示,补灌时期和补灌量对糜子株高的影响较大,2022 年株高大于 2023 年。随着生育期的推进株高先增大后趋于平稳,其中拔节期到抽穗期作物株高快速增长,抽穗期到灌浆期株高增长速度逐渐变缓,灌浆期到成熟期株高基本保持稳定。

整体上看,补灌提高了糜子各生育阶段株高。不同处理株高整体表现为:拔节期+抽穗期补灌>抽穗期补灌>不覆膜雨养,其中在抽穗期~成熟期,J70H70 与 H90 处理无显著差异。与 CK 相比,H70、H90 处理拔节期~抽穗期株高显著提高了 9.79%~46.36%;生育期后期 H70、H90 处理对株高无显著影响。J70H70、J70H90、J90H70 和 J90H90 处理株高较 CK 提高了 5.1%~68.4%(P<0.05)。2022 年,J70H70 和 J90H70 从拔节期到抽穗期株高急剧生长,在灌浆期~成熟期生长幅度十分微小,其中 J90H70 为抽穗期最高处理;J70H90 和 J90H90 处理株高在抽穗期~灌浆期生长幅度高于 J70H70 和 J90H70 处理。2023 年株高随着总灌水量的增加而增加,J90H90 处理显著高于其他处理。在丰水年(2022 年)灌二水处理中,抽穗期灌水量较高时,株高增长持续时间更长。两年试验中,在抽穗期灌一水处理时,H90 处理促进拔节期~灌浆期生长作用优于 H70 处理,且促进效果与 J70H70 处理相当。说明并非所有拔节期+抽穗期补灌处理对株高促进效果均优于抽穗期补灌,当分配在拔节期和抽穗期的灌水量都较小时,将水分合并在抽穗期进行一次性灌溉亦能保证作物株高正常生长。

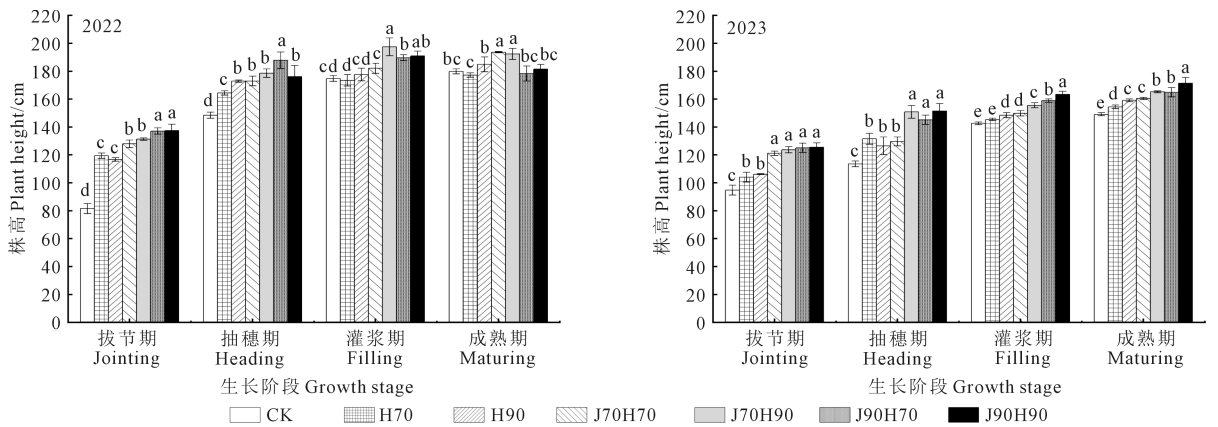
2.1.2　*叶面积指数*　不同补灌处理对糜子不同生育期叶面积指数的影响如图 3 所示,补充灌溉对糜子各生育期叶面积指数影响显著(P<0.05),各处理生育期内叶面积指数变化趋势为先增大后减小,在抽穗期达到峰值。拔节期~抽穗期不同处理叶面积指数均表现为:拔节期+抽穗期补灌最高,抽穗期补

灌次之,CK 最小。丰水年(2022 年)所有补灌处理在拔节期显著高于 CK;特旱年(2023 年),拔节期+抽穗期补灌显著提高叶面积指数。在抽穗期叶面积指数随着灌水量的增加而增加,J90H70 处理叶面积指数最高,为 7.34~7.41 $cm^2 \cdot cm^{-2}$,较 CK 提高了 53.96%;灌浆期,叶面积指数随着灌水量的增加先增加后降低,J70H90 处理最高,为 5.31~5.42 $cm^2 \cdot cm^{-2}$,较 CK 提高了 73.60%~139.02%。综上,补灌可以显著促进作物叶面积增大,拔节期+抽穗期补灌促进效果优于抽穗期补灌。当补灌两次且补灌量相同时,生育期内灌水不同分配情况也导致叶面积指数不同,J90H70 处理叶面积指数在拔节期和抽穗期显著大于 J70H90 处理,说明拔节期补灌量大能够保持植株叶面积指数维持在较高水平的时间较长。

2.2 干物质累积与转运

2.2.1 *干物质动态累积* 图 4 为 2022—2023 年糜子生育期内干物质动态累积过程,随着时间的推进,糜子地上部干物质累积量先增加后趋于平稳。与 CK 相比,补充灌溉影响糜子干物质累积,试验中干物质最大累积量最高的处理为 J90H90,总体上拔节期+抽穗期补灌干物质累积在各生育阶段均高于抽穗期补灌。在成熟期,抽穗期补灌处理、拔节期+抽穗期补灌处理干物质累积量分别较 CK 提高了 14.97%~32.93%、27.44%~51.42%。H90 处理最大干物质的增加效果比 H70 处理提高 8.26%~16.71%($P<0.05$)。拔节期+抽穗期补灌处理下,拔节期~灌浆期均为 J90H90>J90H70>J70H90>J70H70,成熟期表现为 J90H70>J90H90>J70H90>J70H70,J90H90 与 J90H70 处理在抽穗期和拔节期无显著差异。总体上,干物质累积量随着补灌水量的增加而增加,显然在补灌二水下,拔节期分配较多水分更有利于促进作物干物质累积。

2.2.2 *Logistic 方程拟合干物质累积* 2022—2023 年 Logistic 模型模拟干物质动态累计过程特征参数见表 2。本研究中 2022 年糜子生长周期比 2023 年长 15 d 左右。曲线拟合调整后的决定系数 *Adjust-*



注:不同小写字母表示同一生育期不同处理间差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments during the same period ($P<0.05$). The same below.

图 2 2022—2023 年不同补灌处理对糜子株高的影响

Fig.2 Effects of different treatments on plant height of broomcorn millet in 2022-2023

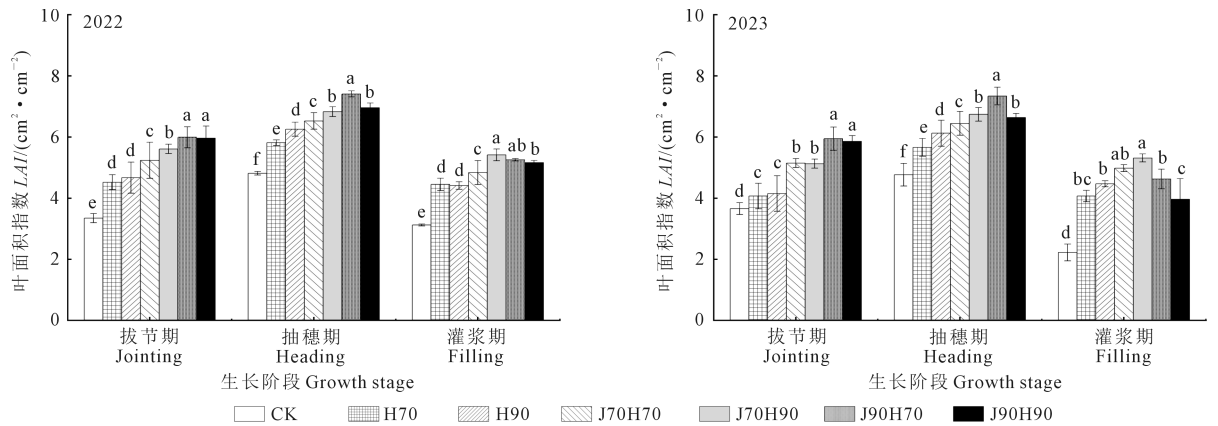


图 3 2022—2023 年不同补灌处理对糜子叶面积指数的影响

Fig.3 Effects of different treatments on *LAI* of broomcorn millet in 2022-2023

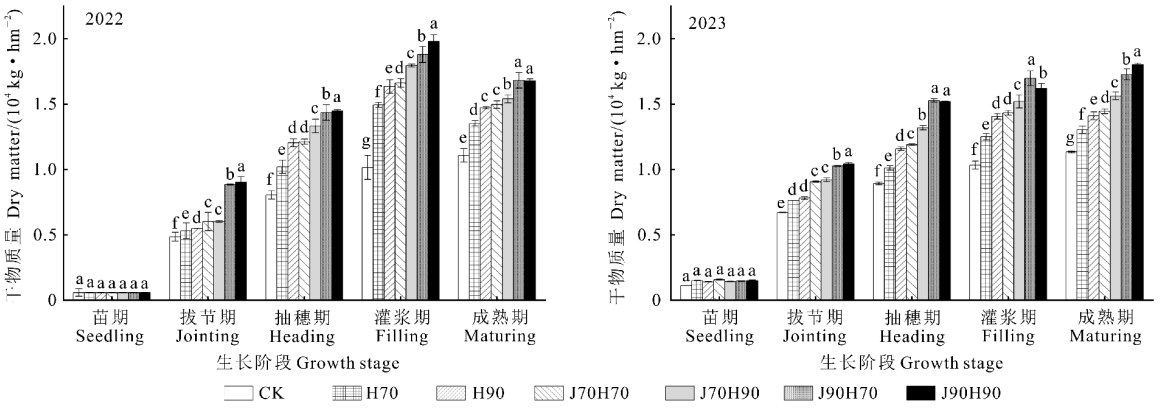


图 4　2022—2023 年糜子生育期内干物质动态累积过程

Fig.4　Dynamic accumulation process of dry matter during the growth period of broomcorn millet in 2022-2023

R^2均在 0.95 以上,此方程可以准确描述糜子干物质随播后天数(t)变化的动态累积过程。由表 2 可知,补灌显著提高了糜子理论最大干物质累积量,其中拔节期+抽穗期补灌>抽穗期补灌>不覆膜雨养。与 CK 相比,拔节期+抽穗期补灌处理理论最大干物质累积量提高 32.44%~66.12%,抽穗期补灌提高 18.22%~42.40%,2022 年 J90H90 在所有处理中最大,为 18 444 kg·hm^{-2},2023 年 J90H70 在所有处理中最大,为 17 244 kg·hm^{-2}。

补灌显著提高糜子干物质平均增长速率、干物质最大增长速率,减小干物质快速生长期及达到干物质最大增长率所需时间。各处理干物质平均增长速率与干物质最大增长速率排序为:J90H70/J90H90>J70H90>H90>J70H70>H70,总体上拔节期+抽穗期补灌高于抽穗期补灌,H90 处理增长速率在丰水年(2022 年)显著高于 J70H70 处理,而在特旱年(2023 年)二者无显著差异。在拔节期+抽穗期补灌处理中,干物质平均增长速率与干物质最大增长速率随着总灌水量的增加呈先增加后降低趋势,2022 年 J70H90 处理干物质平均增长速率与干物质最大增长速率最大,分别为 558 kg·hm^{-2}·d^{-1}和 613 kg·hm^{-2}·d^{-1};2023 年 J90H70 处理干物质平均增长速率、干物质最大增长速率为所有处理中最大,分别为 609 kg·hm^{-2}·d^{-1}和 669 kg·hm^{-2}·d^{-1}。干物质快速增长期与达到干物质最大增长率所需时间随着灌水量增多呈逐渐减小趋势,与 CK 相比,各处理干物质快速增长期缩短 1~8 d,达到干物质最大增长率所需时间缩短 1~4 d。

总体上,补充灌溉主要通过提高干物质平均增长速率和干物质最大增长速率从而提高糜子理论最高干物质量。虽然缩短了干物质快速生长期,但干物质增长速率的提高能充分抵消缩短干物质快速生长期所产生的影响。J90H70 促进干物质生长的效果最优;当灌水量较少时,H90 处理干物质平均增长速率、干物质最大增长速率和最大干物质累积量高于 J70H70 处理,说明与 J70H70 处理相比,H90 处理更有利于作物生长。

2.2.3　*干物质转运*　表 3 为不同补充灌溉处理对干物质转运过程的影响。补充灌溉与年份及两者之间的交互作用对糜子花前干物质的转运量及花前转运量对籽粒的贡献率、花后同化量及花后同化量对籽粒的贡献率影响极显著(P<0.01)。与 CK 相比,拔节期+抽穗期补灌、抽穗期补灌花前干物质转运量增幅分别为 92.69%~439.65%、26.65%~148.98%,花前干物质转运量对籽粒的贡献率增幅分别为 47.85%~249.52%、1.72%~89.99%。J90H70 处理转运量最高,为 2375.72~3085.00 kg·hm^{-2}。2022 年和 2023 年花前干物质对籽粒贡献率最高处理为 J70H90、J90H90 处理,分别为 57.92%、66.94%。

经补灌处理后,花后干物质同化量及其对籽粒的贡献率总体上随着灌水量的增大呈逐渐降低的趋势,降幅为 6.25%~59.17%,其中 2022 年 J90H70 处理花后干物质同化量高于 J90H90 和 J70H90 处理。H90 与 J70H70 处理花前干物质转运量和花后干物质的同化量差异较小(P>0.05)。以上结果表明,增加补灌次数和补灌量可以有效促进糜子生育期前期干物质的转运,同时将降低糜子生长后期干物质的同化,其中 J90H70 处理花前干物质转运量及其对籽粒贡献率最大。

2.3　产量

水文年型、补灌处理及两者之间的交互作用对产量及产量构成因素影响极显著(P<0.01)(表 4)。补充灌溉显著提高了糜子产量、穗数和穗粒数。与 CK 相比,2022 年补充灌溉显著降低了千粒重(P<0.05),2023 年灌两次水显著增加了千粒重(P<0.05)。

表 2 不同补灌处理糜子地上部干物质动态 Logistic 函数拟合参数

Table 2 Fitted parameters of Logistic equations of aboveground dry matter of broomcorn millet under different treatments

年份 Year	处理 Treatment	A_{max} /(kg · hm^{-2})	$Adjust-R^2$	ΔT/d	V_{mean} /(kg · hm^{-2} · d^{-1})	V_{max} /(kg · hm^{-2} · d^{-1})	T_{max}/d
2022	CK	10969	0.998	28	234	257	56
	H70	14384	0.983	24	380	418	56
	H90	15620	0.987	22	487	535	56
	J70H70	15881	0.986	22	464	509	55
	J70H90	16707	0.977	20	558	613	55
	J90H70	17806	0.984	20	494	543	52
	J90H90	18221	0.969	20	506	556	52
2023	CK	10904	0.994	22	310	341	48
	H70	12891	0.999	23	333	366	47
	H90	14201	0.999	21	418	459	47
	J70H70	14441	1.000	21	415	456	46
	J70H90	15504	0.999	19	494	542	46
	J90H70	17244	0.998	18	609	669	46
	J90H90	17215	0.984	17	601	661	46

注：A_{max}：理论最大干物质累积量；ΔT：干物质快速生长期；V_{mean}：干物质平均增长速率；V_{max}：干物质最大增长速率；T_{max}：达到干物质最大增长速率所需的时间；$Adjust-R^2$：校正后的决定系数。

Note: A_{max}: Maximum dry matter accumulation; ΔT: Rapid growth period of dry matter; V_{mean}: Average dry matter accumulation rate; V_{max}: Maximum accumulation rate of dry matter; T_{max}: Time to reach the maximum dry matter accumulation rate; $Adjust-R^2$: Adjusted coefficient of determination.

表 3 补充灌溉对糜子干物质转运和同化的影响

Table 3 Effects of supplementary irrigation on dry matter transport and assimilation of broomcorn millet

年份 Year	处理 Treatment	花前 Before flowering		花后 After flowering	
		转运量 Translocation/(kg · hm^{-2})	贡献率 Contribution/%	同化量 Translocation/(kg · hm^{-2})	贡献率 Contribution/%
2022	CK	571.67f	15.89e	3026.80b	84.11a
	H70	1358.13e	29.05d	3325.25a	70.95b
	H90	2024.44d	42.95c	2687.46cd	57.05c
	J70H70	1896.11d	39.99c	2837.68bc	60.01c
	J70H90	2852.56b	57.92a	2075.13f	42.08e
	J90H70	3085.00a	55.54ab	2471.32de	44.46de
	J90H90	2604.44c	53.25b	2286.44ef	46.75d
2023	CK	565.31f	19.02e	2407.19b	80.98a
	H70	715.96e	19.70e	2918.33a	80.30a
	H90	1327.07d	34.57d	2518.89b	65.43b
	J70H70	1322.65d	34.14d	2550.00b	65.86b
	J70H90	1557.93c	42.25c	2128.89c	57.75c
	J90H70	2375.72a	58.42b	1691.67d	41.58d
	J90H90	1995.20b	66.94a	988.22e	33.06e
水文年型 Hydrological year type (Y)		**	***	***	***
补充灌溉 Supplementary irrigation (T)		***	***	***	***
Y×T		***	***	***	***

注：同列不同小写字母表示每年度不同处理之间的差异显著($P<0.05$)。***和**分别表示在 $P<0.001$ 和 $P<0.01$ 水平上显著相关，NS 表示相关不显著($P\geqslant0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different treatments per year ($P<0.05$). *** and ** represent significant correlation at the $P<0.001$ and $P<0.01$ level, respectively. NS indicates insignificant correlation ($P\geqslant0.05$). The same below.

与 2022 年相比，2023 年极度干旱导致作物平均减产了 28.10%。CK 处理产量为 2 139.06~3 545.13 kg · hm^{-2}，与 CK 相比，各补灌处理增产范围为 30.93%~90.15%。在抽穗期补灌处理下，产量变化为 H90>H70；在拔节期+抽穗期补灌下，产量随着灌水量的增加先增后减($P<0.05$)，产量最高的处理为 J90H70，为 4 067.39~5 373.72 kg · hm^{-2}。J90H90 处理灌水量最多，其产量显著低于 J90H70，说明灌水量过多不利于糜子增产。总体上，产量随着生育期内降雨量和补灌次数的增加而增加，随着总灌水量增加呈先增加后降低的趋势。抽穗期补灌条件下，灌水量大的 H90 处理产量较高，且其增产效果

与 J70H70 相当。拔节期+抽穗期补灌且灌水量相同情况下(J70H90 和 J90H70),拔节期灌水量多时(J90H70)糜子产量更高($P<0.05$)。

从产量的组成来看,千粒重的变化与生育期内降水量有关,丰水年(2022 年)各补灌处理千粒重随着灌水量增加而减少,较 CK 减少了 2.6%~7.2%($P<0.05$);特旱年(2023 年)各补灌处理千粒重随着灌水量的增加而增加,较 CK 增加了 0.32%~8.49%($P<0.05$)。不同水文年补灌对于糜子穗数的影响效果不同。2022 年,与 CK 相比,各补灌处理每公顷穗数总体上增加了-9.89%~8.48%,J90H90 则比 CK 减少了 9.9%($P<0.05$)。2023 年穗数随着补灌量和补灌次数的增加而增加,较 CK 提高了4.22%~17.93%,最高为 J90H90 处理。补灌显著增加穗粒数,拔节期+抽穗期补灌增幅最大,抽穗期补灌次之,整体增加范围为 8.9%~70.6%。总体上,两年试验补灌增加了穗数和穗粒数,2022 年补灌对于穗数和穗粒数的增益效果超过了千粒重下降带来的减产效果。因此,补充灌溉主要通过增加穗数和穗粒数来提高产量,其中 J90H70 处理增产效果最优,H90 与 J70H70 处理产量及其组成无显著差异。

2.4　水分利用效率

如表 5 所示,水文年型、补灌处理以及两者之间的交互作用极显著影响作物耗水量、水分利用效率、降水利用效率和灌溉效益($P<0.001$),补灌处理及补灌与水文年型交互作用对灌溉水利用效率的影响极显著($P<0.001$)。

作物耗水量随着生育期内降水量和总灌水量的增加呈增加趋势,2023 年作物耗水量较 2022 年降低了 37.68%。补灌显著提高作物耗水量,较 CK 提高了 9.92%~28.21%,拔节期+抽穗期补灌>抽穗期补灌。2022—2023 年最高总耗水量分别为 J90H70(338.89 mm)和 J90H90(227.96 mm),分别较 CK 增加了 15.57%和 33.25%。

与 CK 相比,补灌显著提高水分利用效率及降水利用效率,增幅分别为 19.82%~55.25%、32.81%~90.15%,且两者随总灌水量的增加呈先增加后减小趋势。J90H70 处理的水分利用效率和降水利用效率最高,分别为 1.59~1.96 kg·hm^{-3}和 1.71~2.94 kg·hm^{-3},较 CK 提高了 31.16%~55.25%和 51.58%~90.15%($P<0.05$)。补灌显著降低灌溉水利用效率和灌溉效益,降幅分别为 21.78%~62.11%和 8.48%~73.94%。在拔节期+抽穗期补灌下,J70H90、J90H70 和 J90H90 处理作物耗水量较高,但 J90H70 的水分利用效率、灌溉水利用效率和灌溉效益比其他两处理分别提高了 6.45%~49.45%、6.81%~36.33%和 13.38%~61.12%($P<0.05$)。

总体而言,补灌提高了水分利用效率。与抽穗期补灌相比,拔节期+抽穗期补灌提高了水分利用效率、降水利用效率,但灌溉水利用效率和灌溉效益随之降低;H90 处理的作物耗水量较低,其水分利用效率、降水利用效率与 J70H70、J70H90 无显著差异,且 2023 年 H90 处理灌溉效益显著高于 J70H70、J70H90 和 J90H90 处理。因此当补灌水量足够拔节

表 4　补充灌溉对糜子产量及产量构成因素的影响

Table 4　Effects of supplementary irrigation on yield and yield components of broomcorn millet

年份 Year	处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm^{-2})	穗数 Spike number (10^4 ears·hm^{-2})	千粒重 1000-grain weight/g	穗粒数 Grains per spike
2022	CK	3545.13f	62.48a	8.87a	640.35d
	H70	4641.71d	62.15a	8.53c	877.92bc
	H90	4748.99cd	65.56a	8.53c	849.09c
	J70H70	4849.22c	64.44a	8.62bc	879.65bc
	J70H90	4867.15c	66.67a	8.33d	882.21bc
	J90H70	5373.72a	67.78a	8.39d	936.22b
	J90H90	5031.07b	56.30b	8.23e	1092.42a
2023	CK	2139.06f	87.78e	8.27d	295.06e
	H70	3634.30c	94.81c	8.26d	464.43b
	H90	3790.41b	91.48d	8.42c	480.05b
	J70H70	3872.65b	99.07b	8.29cd	471.44b
	J70H90	3686.81c	95.19c	8.51bc	455.37b
	J90H70	4067.39a	95.74c	8.61b	493.77a
	J90H90	2983.43d	103.52a	8.97a	321.38d
水文年型 Hydrological year type (Y)		* * *	* * *	* *	* * *
补充灌溉 Supplementary irrigation (T)		* * *	* * *	* * *	* * *
Y×T		* * *	* * *	* * *	* * *

表5 补充灌溉对糜子水分利用效率的影响

Table 5 Effects of supplementary irrigation on water use efficiency of broomcorn millet

年份 Year	处理 Treatment	总耗水量 *ET*/mm	水分利用效率 *WUE*/(kg·m^{-3})	降水利用效率 *PWUE*/(kg·m^{-3})	灌溉水利用效率 *IWUE*/(kg·m^{-3})	灌溉效益 *IB*/(kg·m^{-3})
2022	CK	293.23±3.48d	1.21±0.01c	1.13±0.01e		
	H70	322.31±4.88c	1.46±0.02b	1.50±0.01c	20.12±0.07a	4.97±0.07a
	H90	327.83±1.69bc	1.45±0.01b	1.51±0.00c	14.93±0.03c	3.79±0.03d
	J70H70	333.03±2.96ab	1.46±0.01b	1.54±0.01bc	15.25±0.12b	4.10±0.12c
	J70H90	337.39±7.53a	1.44±0.02b	1.55±0.01bc	12.11±0.10e	3.29±0.10e
	J90H70	338.89±1.49a	1.59±0.01a	1.71±0.01a	13.37±0.07d	4.55±0.07b
	J90H90	337.89±8.01a	1.49±0.05b	1.60±0.02b	9.42±0.11f	2.78±0.11f
2023	CK	171.08±21.98c	1.26±0.13c	1.54±0.06e		
	H70	201.03±9.10b	1.81±0.10ab	2.62±0.03c	20.19±0.22a	8.31±0.22a
	H90	204.93±2.21b	1.85±0.05ab	2.74±0.04b	15.79±0.25b	6.88±0.25b
	J70H70	201.20±8.45b	1.93±0.09a	2.80±0.04b	14.34±0.18c	6.42±0.18c
	J70H90	213.42±2.21ab	1.73±0.01b	2.66±0.03c	11.17±0.14e	4.69±0.14e
	J90H70	207.93±5.59b	1.96±0.07a	2.94±0.03a	12.33±0.11d	5.84±0.11d
	J90H90	227.96±9.41a	1.31±0.04c	2.15±0.04d	7.65±0.14f	2.17±0.14f
水文年型 Hydrological year type (Y)		* * *	* * *	* * *	NS	* * *
补灌处理 Supplementary irrigation (T)		* * *	* * *	* * *	* * *	* * *
Y×T		* * *	* * *	* * *	* * *	* * *

期+抽穗期两次补灌时,J90H70处理可以提高产量和水分利用效率,同时提高灌溉水利用效率和灌水效益;当补灌水量较少时,H90处理能一定程度上提高产量,并提高水分利用效率。

3 讨 论

3.1 补充灌溉对糜子生长发育的影响

西北干旱和半干旱地区缺水问题严重,导致作物在关键生育期遭受严重干旱胁迫,限制作物生长发育和粮食生产,优化灌溉制度能优化作物冠层结构,调控干物质的累积与转运规律,提高作物产量[17]。相关研究指出[18],细胞扩张生长是作物对水分变化响应最敏感的生理过程之一,作物受到干旱胁迫后,氮积累量降低,细胞扩张生长受限使干物质积累减慢并开始早衰,其中地上部农艺性状变化最为明显,如株高、茎粗、叶面积等指标显著降低。Yan等[19]研究得出,黄土高原地区重度水分亏缺处理冬小麦株高发育不良,且株高随着补灌量的增加而增大。李正鹏等[20]研究表明,灌水能延缓叶片衰老,促进株高增长,其中灌二水明显提高了最大叶面积指数和株高,与本研究结果一致。本研究得出株高、叶面积指数随着补灌次数的增加显著增大(P<0.05)(图2、3)且补灌对拔节期~抽穗期的增加效果大于灌浆期~成熟期。这是由于拔节期~抽穗期是作物生长的关键时期,对水分需求十分敏感,该时间段灌水可以促进细胞分裂来促进茎秆、叶片生长,增加叶绿素含量来提高光合能力[20]。H90处理的株高、叶面积指数显著高于H70处理,同时与J70H70处理无显著差异,因为抽穗期为作物重要的生殖生长关键时期,在该时期前受到干旱胁迫使作物生长和穗发育受到抑制,在抽穗期及时复水可以缓解干旱胁迫带来的不利影响[21];H70J70处理两次补灌水量均较小,由于拔节期补灌70% θ_f可以暂时缓解植物受到的干旱胁迫,促进茎叶生长,但不足以调节其恢复生长,此后直至抽穗期仍长时间受到严重干旱胁迫,叶面积较大使其蒸发旺盛,容易引起茎叶卷曲枯萎,在抽穗期70% θ_f补灌量无法刺激营养和生殖生长并使光合作用活动完全恢复。

干物质积累与转运是作物生长过程中产量形成的物质基础[22]。本研究表明,干物质量随着灌水次数的增加而增加,与已有研究[12]结果一致。Puértolas等[23]认为水分亏缺通过减少细胞生长和光合作用来减少植物生物量积累。本试验中在拔节期+抽穗期补灌条件下,最大干物质累积量随着补灌量的增加先增加后降低,主要原因有以下两点:一方面营养生长与生殖生长存在相互制约的关系,灌水量过高的处理在营养生长阶段枝叶徒长,作物"贪青晚熟"影响生殖生长,降低花前干物质转运量和花后干物质同化量,导致成熟期穗部发育较小,同时作物在成熟期生理活动减弱,光合作用随着叶片的衰老而降低,呼吸作用消耗的有机物大于光合作用合成的有机物,总干物质量低于其他灌水处理[24];另一方面,本研究发现从作物抽穗开始,拔节期+抽穗期补灌处理均发生不同程度倒伏,其中J90H90处理倒伏程度最严重。糜子易倒伏是生产

中普遍存在的现象,本试验中糜子受到干旱胁迫,茎秆变的细软不足以支撑沉重的穗部,倒伏更为严重。倒伏的植株茎叶相互重叠、冠层分布被打乱,叶片因得不到足够的光热而变黄腐烂,大量叶片掉落,植株光合能力降低[25-26],进而影响最大干物质累积量和最终产量。

3.2　补充灌溉对糜子产量和水分利用效率的影响

在糜子拔节期进行有限的补充灌溉可以提高作物产量和水分利用效率[27]。本研究中,与 CK 相比,补灌能显著提高作物产量,且产量随着总灌水量增加先增加后降低,H90J70 处理产量最高,这与李梦哲等[28]研究结果类似。这是由于拔节期~抽穗期进行补水可促进作物生长,提高抽穗期干物质累积量。抽穗期生物量是谷物产量的重要决定因素,该时期生物量越高,在谷物灌浆过程中可以转移到籽粒的光合产物就越多[29],因此适量补灌以保证抽穗期生物量对于作物产量的形成十分关键。本研究中拔节期+抽穗期补灌下,J90H70 处理产量最高,因为拔节期灌溉可显著降低分蘖死亡率、提高叶片光合能力和作物产量[30],抽穗期的中度干旱可以促进籽粒灌浆、同化物的运输和分布,改善养分从茎叶向籽粒的输送[31]。在拔节期+抽穗期补灌情况下,拔节期分配较多水量而抽穗期分配较少的水更有利于增产。2022 年,各补灌处理与 CK 之间千粒重差异不显著,但 J90H90 处理显著低于其他处理,与其严重倒伏有关,倒伏使植株光合作用受限,籽粒发育不良。补充灌溉显著提高穗数和穗粒数,但 2023 年穗数显著高于 2022 年,而 2023 年各处理穗粒数不到 2022 年的 50%,这可能是由于干旱稀植条件下,糜子的分蘖数增加,但严重的干旱胁迫导致多数分蘖穗无法完全发育成熟[32-33]。

不同水文年是显著影响糜子产量的重要因素。本研究中,2023 年产量较 2022 年降低 28.10%。因为 2023 年有效降水量不到 2022 年的一半,生育期内平均气温增加了 1℃,干旱炎热的环境增加土壤和植物水分流失,不利于作物生长。高温会导致糜子叶片气孔关闭、减少 CO_2 吸收,破坏叶绿体结构,抑制光合作用;干旱条件下,花粉活力和授粉成功率显著下降,导致结实率降低[34]。相关研究[29]表明籽粒灌浆持续时间是决定籽粒产量的重要因素,持续时间越长,穗状花序的光合作用和光合产物转运时间就越长,成熟期产量越高。本研究 2023 年糜子在整个生长季持续受到严重的干旱胁迫,且平均温度较高,缩短了作物生育期,尤其缩短了灌浆期籽粒灌浆进程而导致减产。

本研究表明,不同水文年、不同补充灌溉制度对作物水分利用效率和灌溉效益影响较大。与传统不覆膜雨养条件(CK)相比,补充灌溉不同程度上提高了糜子耗水量、水分利用效率及降水利用效率,三者均随着总灌水量的增加呈先增加后降低趋势。严富来等[35]研究得出,水分利用效率随着灌水量的增加先增加后减小,这与本研究结果一致。在关键生育期进行有限、合理的补灌,可以保证作物适宜的冠层结构,减少低效用水量造成的浪费并且提高水分生产力。在补灌量相同情况下,拔节期分配较多水量时(J90H70),水分利用效率、降水利用效率、灌溉水利用效率以及灌水效益均更高,因为拔节期补充灌溉能够促进作物根系的生长,有利于提高根系对拔节期~成熟期土壤水肥的吸收利用[36]。本研究还得出,H90 处理作物耗水量较低,其水分利用效率、降水利用效率与 J70H70、J70H90 无显著差异,灌溉效益显著高于 J70H70、J70H90 和 J90H90 处理。这是由于耐旱作物受旱复水后存在补偿效应,植物的生长活力恢复,缓解生育后期叶绿体的降解和其基粒片层结构的破坏,促进叶绿素合成,光合作用相关的酶(如 RuBP 羧化酶)活性增强,光合生产潜力提高[37]。因此,在有限灌水条件下综合考虑产量、水分利用效率与灌溉效益,拔节期补灌 90% θ_f+抽穗期补灌 70% θ_f 处理(J90H70)相较于其他补灌处理综合效益最优。当仅能满足一次补灌时,H90 亦能一定程度上保证产量的提高,并且显著提高灌溉效益。

4　结　论

关键生育期补充灌溉促进糜子生长发育,显著提高了株高、叶面积指数,优化糜子干物质累积和转运过程,显著提高干物质平均累积速率和最大累积速率,缩短了快速生长期。总体上,拔节期+抽穗期补灌对糜子生长促进效果优于仅抽穗期补灌效果,拔节期 90% θ_f+抽穗期 70% θ_f(J90H70)能使作物维持良好的冠层结构,促进作物生长的效果最优。

补灌通过提高花前干物质的转运量、增加穗数和穗粒数来提高籽粒产量,同时能够提高作物耗水量、水分利用效率及降水利用效率,灌溉水利用效率和灌溉效益随着补灌水量的增加而逐渐降低。产量随着生育期内降雨量和灌水次数的增加而增加,随着总灌水量增加呈先增加后降低的趋势。仅抽穗期补灌 90% θ_f 的水分利用效率、降水利用效率与 J70H70、J70H90 处理无显著差异,且灌溉效益较高;拔节期+抽穗期补灌下,拔节期灌水量较多的处

理(J90H70)产量(4 067.69~5 373.72 kg·hm^{-2})、水分利用效率(1.59~1.96 kg·hm^{-3})和灌溉效益(4.55~5.84 kg·hm^{-3})更高。因此在限水灌溉条件下,拔节期90% θ_f+抽穗期70% θ_f(J90H70)对糜子增产效果最优;当仅满足一次灌水时,采用抽穗期补灌90% θ_f能保证作物株高正常生长与稳产。

参 考 文 献:

[1] 王振华, 韩美琪, 宋利兵, 等. 加气对西北旱区膜下滴灌棉花生长与水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 108-116.
WANG Z H, HAN M Q, SONG L B, et al. Effects of aeration on the growth and water use efficiency of cotton under mulched drip irrigation in the dry areas of Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(14): 108-116.

[2] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 等. 黄土高原半干旱区集雨补灌生态农业研究进展[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3187-3194.
ZHAO X N, WU P T, FENG H, et al. Advance in research of supplemental irrigation of collected rain water for eco-agriculture insemi-arid loess plateau of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(9): 3187-3194.

[3] QIN S J, LI S E, KANG S Z, et al. Can the drip irrigation under film mulch reduce crop evapotranspiration and save water under the sufficient irrigation condition? [J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 128-137.

[4] ZHANG Y, QIANG S C, ZHANG G X, et al. Effects of ridge - furrow supplementary irrigation on water use efficiency and grain yield of winter wheat in loess plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2023, 289: 108537.

[5] 王改兰, 段建南, 张进峰, 等. 砖窑沟流域旱地土壤水分状况与糜子耗水特征[J]. 水土保持通报, 1990, (6): 30-33, 45.
WANG G L, DUAN J N, ZHANG J F, et al. Soil moisture status and water consumption characteristics of broomcorn millet in dryland of Zhuanyaogou watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, (6): 30-33, 45.

[6] 张鑫, 刘迪川, 龙怀玉, 等. 土壤水分时间变异性对糜子拔节期水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(7): 18-24.
ZHANG X, LIU D C, LONG H Y, et al. Effect of temporal soil water fluctuation on water use efficiency of broomcorn millet(*Panicum miliaceum* L.)at jointing stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(7): 18-24.

[7] HABASH D Z, KEHEL Z, NACHIT M. Genomic approaches for designing durum wheat ready for climate change with a focus on drought [J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(10): 2805-2815.

[8] WANG S, NIU Y, SHANG L, et al. Supplemental irrigation at the jointing stage of late sown winter wheat for increased production and water use efficiency[J]. Field Crops Research, 2023, 302: 109069.

[9] 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.

[10] JIANG Y W, ZHANG L H, ZHANG B Q, et al. Modeling irrigation management for water conservation by DSSAT-maize model in arid northwestern China[J]. Agricultural Water Management, 2016, 177: 37-45.

[11] WEN Y Q, SHANG S H, YANG J. Optimization of irrigation scheduling for spring wheat with mulching and limited irrigation water in an arid climate[J]. Agricultural Water Management, 2017, 192: 33-44.

[12] WEI S Y, KUANG N K, JIAO F L, et al. Exploring the effects of subsoiling tillage under various irrigation regimes on the evapotranspiration and crop water productivity of winter wheat using RZWQM2 [J]. Agricultural Water Management, 2023, 289: 108531.

[13] TIAN L X, YU S P, ZHANG L, et al. Effects of mulching types on the yield and water utilization by broomcorn millet (*Panicum miliaceum*): Results of a study in the loess plateau, China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345: 118856.

[14] 姚爱华, 冯佰利, 柴岩, 等. 不同耕作方式对小杂粮产量及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(1): 97-101.
YAO A H, FENG B L, CHAI Y, et al. Effect of different tillage techniques on yield and water use efficiency in minor grain crops[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(1): 97-101.

[15] 谷晓博, 宋慧, 白东萍, 等. 优化缓释氮肥与尿素配施比例提高冬小麦产量和氮肥利用效率[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 56-65.
GU X B, SONG H, BAI D P, et al. Combined the application of slow-release N fertilizer and urea to improve the yield and N use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(11): 56-65.

[16] CHEN K R, KUMUDINI S V, TOLLENAAR M, et al. Plant biomass and nitrogen partitioning changes between silking and maturity in newer versus older maize hybrids[J]. Field Crops Research, 2015, 183: 315-328.

[17] 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. Effects of rainwater-harvesting planting with supplemental irrigation and planting densities on the growth and photosynthetic physiology of maize in the semi-arid regions[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.

[18] COELHO A P, DEFARIA R T, LEAL F T, et al. Biomass and nitrogen accumulation in white oat(*Avena sativa* L.) under water deficit [J]. Revista Ceres, 2020, 67(1): 1-8.

[19] YAN S C, WU Y, FAN J L, et al. Optimization of drip irrigation and fertilization regimes to enhance winter wheat grain yield by improving post-anthesis dry matter accumulation and translocation in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2022, 271: 107782.

[20] 李正鹏, 宋明丹, 冯浩. 水氮耦合下冬小麦LAI与株高的动态特征及其与产量的关系[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 195-202.
LI Z P, SONG M D, FENG H. Dynamic characteristics of leaf area index and plant height of winter wheat influenced by irrigation and nitrogen coupling and their relationships with yield[J]. Transactions of

the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(4): 195-202.

[21] SONG H, LI Y B, ZHOU L, et al. Maize leaf functional responses to drought episode and rewatering[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 249: 57-70.

[22] 魏永霞, 曹晓强, 冀俊超, 等. 不同灌溉方式下旱直播水稻光合特性与干物质积累动态[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 358-368.
WEI Y X, CAO X Q, JI J C, et al. Effects of different irrigation methods on photosynthetic characteristics and dry matter accumulation dynamics of dry direct seeding rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 358-368.

[23] PUÉRTOLAS J, ALBACETE A, DODD I C. Irrigation frequency transiently alters whole plant gas exchange, water and hormone status, but irrigation volume determines cumulative growth in two herbaceous crops[J]. Environmental and Experimental Botany, 2020, 176: 104101.

[24] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 基于温室番茄产量和果实品质对加气灌溉处理的综合评价[J]. 中国农业科学, 2020, 53(11): 2241-2252.
ZHU Y, CAI H J, SONG L B, et al. Comprehensive evaluation of different oxygation treatments based on fruit yield and quality of greenhouse tomato[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(11): 2241-2252.

[25] KASHIWAGI T, SASAKI H, ISHIMARU K. Factors responsible for decreasing sturdiness of the lower part in lodging of rice(*Oryza sativa* L.)[J]. Plant Production Science, 2005, 8(2): 166-172.

[26] ZHONG Y N, ZHANG T, QIAO W J, et al. Optimizing canopy spacing configuration enhances foxtail millet grain yield and water productivity by improving stalk lodging resistance in the North Chinaplain [J]. European Journal of Agronomy, 2024, 158: 127230.

[27] OLESEN J E, MORTENSEN J V, JORGENSEN L N, et al. Irrigation strategy, nitrogen application and fungicide control in winter wheat on a sandy soil. I. Yield, yield components and nitrogen uptake[J]. Journal of Agricultural Science, 2000, 134(1): 1-11.

[28] 李梦哲, 张维宏, 张永升, 等. 不同水分管理下全田土下微膜覆盖的冬小麦耗水特性[J]. 中国农业科学, 2013, (23): 4893-4904.
LI M Z, ZHANG W H, ZHANG Y S, et al. Water consumption characteristics of winter wheat with soil-coated ultrathin plastic-film mulching under different water managements[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, (23): 4893-4904.

[29] GUTAM S. Dry matter partitioning, grain filling and grain yield in wheat genotypes[J]. Communications in Biometry&Crop Science, 2011, 6(2): 48-63.

[30] XU X X, ZHANG M, LI J P, et al. Improving water use efficiency and grain yield of winter wheat by optimizing irrigations in the North Chinaplain[J]. Field Crops Research, 2018, 221: 219-227.

[31] LI H R, JIA B, WANG H G, et al. Yield response of supplementary irrigation at the anthesis stage of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2023, 284: 108352.

[32] 冯佰利.杂粮百科:糜子[EB/OL]. (2018-12-21)[2025-02-11]. http://www.mgcic.com/.
FENG B L. Miscellaneous grain encyclopedia: Millet[EB/OL]. http://www.mgcic.com/.

[33] SHANG Y Q, WANG S, LIN X, et al. Supplemental irrigation at jointing improves spike formation of wheat tillers by regulating sugar distribution in ear and stem[J]. Agricultural Water Management, 2023, 279: 108160.

[34] 晁漫宁, 史新月, 张健龙, 等. 灌浆期持续干旱对小麦光合、抗氧化酶活性、籽粒产量和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(4): 494-502.
CHAO M N, SHI X Y, ZHANG J L, et al. Effects of persistent drought at grain filling stage on flag leaf photosynthesis, antioxidant enzyme activity, grain yield and quality of wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(4): 494-502.

[35] 严富来, 张富仓, 范兴科, 等. 水氮互作对宁夏沙土春玉米产量与氮素吸收利用的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 283-293.
YAN F L, ZHANG F C, FAN X K, et al. Effects of water and nitrogen fertilizer supply on yield and nitrogen absorption and utilization efficiency of spring maize in sandy soilarea in Ningxia[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 283-293.

[36] 李法计, 徐学欣, 何中虎, 等. 三种限水灌溉水平下中麦 175 干物质积累与水分利用特性解析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(2): 374-385.
LI F J, XU X X, HE Z H, et al. Dry matter accumulation and water use performance of winter wheat cultivarZhongmai 175 under three limited irrigation levels[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(2): 374-385.

[37] 赵方洋, 曹红霞, 马丽娜, 等. 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[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(5): 44-53, 84.
ZHAO F Y, CAO H X, MA L N, et al. Effects of supplementary irrigation on growth, yield, and water use efficiency of millet in the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(5): 44-53, 84.