麦类作物学报 2026,46(10):1366－1372
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.10.11

网络出版时间:2026-09-20
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260920.1143.006

河西地区滴灌量、播种方式与播种量对啤酒大麦产量和品质的影响

杨嘉宁[1,2],高亚峰[1,2],党志娟[1,2],辛建洋[1],朱 欣[1],马小乐[1,2],
姚立蓉[1,2],孟亚雄[1,2],王化俊[1,2],张 宏[1,2],汪军成[1,2]

(1.甘肃农业大学农学院,甘肃兰州 730070; 2.省部共建干旱生境作物学国家重点实验室,甘肃兰州 730070)

摘 要:为明确滴灌量、播种方式及播种量对河西地区大麦生长、产量和品质的影响,以甘啤6号为材料,采用裂区试验设计,以滴灌量为主区(W_1:1 800 $m^3 \cdot hm^{-2}$;W_2:2 250 $m^3 \cdot hm^{-2}$;W_3:2 700 $m^3 \cdot hm^{-2}$;W_4:3 150 $m^3 \cdot hm^{-2}$)、播种方式为副区(S_1:条播,播幅3～5 cm,行距15 cm;S_2:宽幅匀播,播幅10 cm,行距20 cm),同时设置2个播种量(D_1:248 kg·hm^{-2};D_2:284 kg·hm^{-2}),分析不同处理对啤酒大麦产量、品质的影响,并通过灰色关联度评价筛选最优栽培模式。结果表明,滴灌量为W_3时,甘啤6号产量最高(7 926.69 kg·hm^{-2}),显著高于W_1(23.2%)、W_4(6.1%),与W_2差异不显著;S_2较S_1显著增产(8.2%);播种量D_1较D_2显著增产(3.2%)。蛋白含量随滴管量增加呈先降后增趋势,表现为$W_1>W_2>W_4>W_3$,W_3的蛋白含量(12.23%)较W_1显著降低,降幅7.8%,与W_2、W_4差异不显著。酿造品质综合分析显示,$S_2>S_1$,$D_1>D_2$。灰色关联度评价结果表明,$W_3S_2D_1$栽培组合可有效节水并协调甘啤6号产量与品质的关系,可作为河西地区啤酒大麦优质高产节水栽培的优选模式。

关键词:大麦;滴灌量;宽幅匀播;播种量;产量;品质

中图分类号:S512.3; S311 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)10-1366-07

Effects of Drip Irrigation Amount, Sowing Method, and Sowing Amount on Yield and Quality of Malting Barley in Hexi Region

Yang Jianing[1,2], Gao Yafeng[1,2], Dang Zhijuan[1,2], Xin Jianyang[1], Zhu Xin[1], Ma Xiaole[1,2], Yao Lirong[1,2], Meng Yaxiong[1,2], Wang Huajun[1,2], Zhang Hong[1,2], Wang Juncheng[1,2]

(1. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To elucidate the effects of irrigation amount, sowing method, and seeding rate on the growth, yield, and quality of barley in the Hexi Corridor region, the malting barley cultivar Ganpi 6 was used as the experimental material. A split-plot design was adopted, with irrigation amount as the main plot factor(W_1: 1 800 $m^3 \cdot hm^{-2}$; W_2: 2 250 $m^3 \cdot hm^{-2}$; W_3: 2 700 $m^3 \cdot hm^{-2}$; W_4: 3 150 $m^3 \cdot hm^{-2}$), sowing method as the subplot factor(S_1: Drilling with a sowing width of 3－5 cm and row spacing of 15 cm; S_2: Wide-band uniform sowing with a sowing width of 10 cm and row spacing of 20 cm), and two seeding rates(D_1: 248 kg·hm^{-2}; D_2: 284 kg·hm^{-2}). The effects of different irrigation amounts, sowing methods, and seeding rates on yield and quality traits of malting barley were systematically analyzed, and the optimal cultivation pattern was determined using grey relational analysis. The results showed that the highest grain yield of Ganpi 6(7 926.69 kg·hm^{-2}) was obtained

收稿日期:2026-04-29 修回日期:2026-05-12
基金项目:国家大麦青稞产业技术体系项目(CARS-05-02A-02);甘肃农业大学大学生创新创业训练项目(202501081);国家自然科学基金项目(32160496,32460517);甘肃省教育厅产业支撑计划项目(2021CYZC-12);甘肃省现代寒旱特色农业麦类产业技术体系项目(GSARS-07);甘肃农业大学伏羲青年英才计划项目(Gaufx-03Y06,Gaufx-04Y011)
第一作者 E-mail:2282940311@qq.com(杨嘉宁)
通讯作者 E-mail:wangjc@gsau.edu.cn(汪军成); 442972640@qq.com(张 宏)

under W_3(2 700 $m^3 \cdot hm^{-2}$), which was significantly higher than that under W_1 and W_4 by 23.2% and 6.1%, respectively, while showing no significant difference compared with W_2. S_2 significantly increased yield compared with S_1 by 8.2%, and D_1 significantly outperformed D_2 by 3.2%. Grain protein content exhibited a decreasing-then-increasing trend across irrigation levels, following the order $W_1 > W_2 > W_4 > W_3$, with W_3 recording the lowest protein content(12.23%), which was significantly lower than that under W_1 by 7.8% and showed no significant difference compared with W_2 and W_4. Comprehensive analysis of brewing quality indicated that S_2 was superior to S_1, and D_1 was superior to D_2. Grey relational analysis identified the $W_3S_2D_1$ treatment combination as the optimal cultivation pattern, which effectively conserved irrigation water while achieving a balanced improvement in yield and quality. This regime is therefore recommended as a high-yield, high-quality, and water-saving cultivation model for malting barley production in the Hexi Corridor region.

Keywords: Barley; Drip irrigation amount; Wide row spacing and uniform sowing; Sowing quantity; Yield; Quality

大麦(*Hordeum vulgare* L.)具有生育期短、成熟早、适应性强等特性,在食品、饲料及酿造等领域具有广泛应用价值[1]。基于其优异的农艺性状与广适性,在中国多个区域得到大规模推广种植,其中河西走廊地区已发展成为大麦的重要产区之一[2]。但河西地区存在水资源短缺、传统灌溉方式水分利用效率低、播种方式单一和播种量配比不合理等问题,严重制约着大麦产量和品质的提升[3-5]。合理配置滴灌量、播种方式、播种量等栽培模式对于提高该地区大麦产量和品质具有重要意义。张立勤等[6]发现,灌溉量对啤酒大麦的生长具有显著影响,滴灌量过低或过高均不利于产量形成。倪晨等[7]认为,适量灌溉才有可能实现大麦产量与品质的协同提升。宽幅播种相较于传统条播可改善群体通风透光条件,提高光能利用率,进而显著提升小麦的产量[8]。Fan 等[9]证实,宽幅播种能够显著提高小麦花前干物质转运率和花后干物质积累量,对籽粒产量的形成具有显著促进作用。播种量是影响作物产量的重要栽培措施。Balducci 等[10]指出,播种量对大麦的穗粒数、千粒重及产量具有显著影响,对大麦产量形成具有明显的阈值效应。大麦群体过大会导致分蘖成穗率下降、穗粒数减少、千粒重降低,同时增加倒伏与病害风险,最终引起减产[11]。前人研究多集中于上述单一因素或双因素的效应,有关滴灌量、播种方式、播种量三因素对河西走廊地区啤酒大麦产量与品质效应的研究鲜见报道。

本试验选用河西走廊地区主栽大麦品种甘啤 6 号为材料,设置 4 个灌水量、2 种播种方式、2 个播种量,测定不同处理下大麦的产量及其构成因素、品质指标,并用灰色关联度分析进行综合评价,以筛选出适宜该地区甘啤 6 号节水、高产、优质的栽培组合,为大麦绿色高效生产提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验于 2025 年 3 月—8 月在甘肃农业大学武威黄羊镇牧草实验站(37°55′ N,102°40′ E)进行。该区域位于河西走廊,海拔约 1 660 m,属中温带大陆性荒漠灌区;年均气温为 7.2 ℃,极端高温达 34 ℃,极端低温为 −27.7 ℃;年降水量为 150～170 mm,年蒸发量约 1 990～2 400 mm。土壤为沙壤土,试验地 0～20 cm 耕层土壤有机质含量 8.04 $g \cdot kg^{-1}$,全氮含量 0.56 $g \cdot kg^{-1}$,全磷含量 0.71 $g \cdot kg^{-1}$,全钾含量 17.01 $g \cdot kg^{-1}$,速效磷含量 37.1 $mg \cdot kg^{-1}$,速效钾含量 276 $mg \cdot kg^{-1}$,土壤 pH 为 8.7。

1.2　试验设计

以河西走廊地区主栽大麦品种甘啤 6 号为供试材料。采用裂区设计,根据前期预试验结果,设置 4 个滴灌量为主区,分别为 1 800 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W_1)、2 250 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W_2)、2 700 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W_3)、3 150 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W_4);副区为 S_1(条播,播幅 3～5 cm,行距 15 cm)和 S_2(宽幅匀播,播幅 10 cm,行距 20 cm)2 种播种方式;设置 D_1(248 $kg \cdot hm^{-2}$)和 D_2(284 $kg \cdot hm^{-2}$)2 个播种量,其中 D_2 为当地生产常用播种量,每个处理重复 3 次。小区面积为 9.6 m^2(4 m×2.4 m),小区间距为 0.5 m。苗期各小区统一灌水 900 $m^3 \cdot hm^{-2}$;

全生育期共滴灌 4 次，分别在拔节前(5 月 1 日)、孕穗前(5 月 18 日)、抽穗期(6 月 5 日)、灌浆期(7 月 3 日)进行，每次灌水量分别为 450.0、562.5、675.0、787.5 $m^3 \cdot hm^{-2}$。

1.3 测定指标及方法

成熟期每小区取 1 m^2 代表性样点测定大麦有效穗数；各小区随机取 20 个穗进行室内考种，测定穗粒数，重复 3 次；按小区收获，晒干后测千粒重，并计算产量。

按小区取 500 g 晒干大麦种子，利用 Perten DD7250 近红外光谱仪(丹麦)测定蛋白质、淀粉和灰分含量，3 次重复。称取 300 g 通过 1.7 mm 筛的大麦籽粒，利用 Joe White Micromalting System 微型制麦系统(澳大利亚)制麦，根据 EBC(欧洲啤酒酿造协会)通用分析方法测定库尔巴哈值及糖化力[12]。

1.4 数据处理

使用 Excel 2024 与 SPSS 27.0 对数据进行统计分析，采用多因素方差分析并结合 Duncan 进行多重比较($P<0.05$)，绘图采用 Origin 2021。

2 结果与分析

2.1 不同处理对大麦产量及构成因素的影响

由表 1 可知，滴灌量、播种方式、播种量、滴灌量与播种方式互作、滴灌量与播种量互作均对产量有极显著效应($P<0.01$)。随滴灌量增加，产量呈先增后降趋势，表现为 $W_3>W_2>W_4>W_1$，W_3 的平均产量为 7 926.69 kg · hm^{-2}，较 W_1、W_2、W_4 分别增产 23.2%、1.4%、6.1%。播种方式 S_2 较 S_1 显著增产($P<0.05$)，增幅 8.2%。播种量 D_1 较 D_2 显著增产，增幅 3.2%。表明适宜滴灌量、宽幅匀播条件下适当降低播种量能提高大麦产量。

滴灌量和播种方式对穗粒数、有效穗数和千粒重均有极显著影响，播量对穗粒数和千粒重影响极显著，对有效穗数影响不显著。滴灌量与播种方式互作对穗粒数有极显著效应，对有效穗数的效应不显著，对千粒重效应显著。滴灌量与播种量互作及上述三因素互作对有效穗数有极显著效应。

表 1 不同处理下甘啤 6 号的产量及构成因素

Table 1 Yield and yield components of Ganpi 6 under different treatments

处理 Treatment		穗粒数 Grains per spike	有效穗数 Effective spikes/($\times10^4 \cdot hm^{-2}$)	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/(kg · hm^{-2})
W_1		23.92c	464.00b	48.33d	6 436.36c
W_2		28.58a	497.83b	52.00c	7 818.12a
W_3		29.58a	609.00a	55.42a	7 926.69a
W_4		26.58b	570.33a	53.75b	7 469.86b
S_1		26.38b	507.50b	51.71b	7 119.86b
S_2		27.96a	563.08a	53.04a	7 705.66a
D_1		28.29a	534.08a	52.96a	7 528.05a
D_2		26.04b	536.50a	51.79b	7 297.47b
F 值 F value	W	34.62**	22.07**	189.38**	290.75**
	S	13.89**	15.56**	36.57**	216.11**
	D	28.04**	0.03	28.00**	33.48**
	W×S	5.37**	1.76	3.52*	35.30**
	W×D	0.55	5.83**	0.48	5.33**
	S×D	0.00	3.56	0.14	2.29
	W×S×D	0.15	5.28**	0.24	1.08

W：滴灌量；S：播种方式；D：播种量；相同因素同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。*：$P<0.05$；**：$P<0.01$。下同。

W: Drip irrigation amount; S: Sowing method; D: Sowing amount; Different letters following data of same factors in same column mean significant difference($P<0.05$). *: $P<0.05$; **: $P<0.01$. The same in table 2.

滴灌量间比较,大麦的穗粒数表现为 $W_3>W_2>W_4>W_1$,有效穗数和千粒重均表现为 $W_3>W_4>W_2>W_1$。S_2 的穗粒数、有效穗数、千粒重均显著高于 S_1。穗粒数和千粒重均表现为 D_1 显著大于 D_2,两种播种量间有效穗数无显著差异。结果表明,适宜滴灌量(W_3)可以提高大麦的穗粒数、有效穗数和千粒重,宽幅匀播较条播更有利于提高大麦穗粒数、有效穗数、千粒重,降低播量有利于穗粒数和千粒重提升。

2.2　不同处理对大麦籽粒品质的影响

籽粒蛋白质、淀粉及灰分含量、库尔巴哈值、糖化力是评价大麦酿造品质的关键指标。由表 2 可知,滴灌量对大麦蛋白含量、淀粉含量、灰分含量、库尔巴哈值和麦芽糖化力的影响均极显著。播种方式对淀粉含量、灰分含量、库儿巴哈值和糖化力的影响均极显著,对蛋白含量的影响不显著。播量对蛋白含量、淀粉含量、库尔巴哈值和麦芽糖化力的影响极显著,对灰分含量影响显著。滴灌量与播种方式互作对蛋白含量、淀粉含量有显著效应,对灰分含量、糖化力有极显著效应,对库尔巴哈值的效应不显著。滴灌量与播种量互作、播种方式与播种量互作对糖化力有显著效应。

随滴灌量增加,大麦蛋白含量呈先降后增趋势,表现为 $W_1>W_2>W_4>W_3$,W_3(12.23%)较 W_1、W_2、W_4 分别降低 7.8%、1.8%、1.8%;淀粉含量及库尔巴哈值均在 W_3 下最高,灰分含量在 W_3 下最低,说明滴灌量 W_3 可以提高大麦淀粉含量、库尔巴哈值及糖化力,降低蛋白含量和灰分含量,更利于酿造品质提升。

S_2 下淀粉含量、库尔巴哈值、糖化力均显著高于 S_1,灰分含量显著低于 S_1,两者间的蛋白质含量差异不显著,说明宽幅匀播更有利于提高淀粉含量、库尔巴哈值和糖化力。

D_2 下平均蛋白和灰分含量显著高于 D_1,淀粉含量、库尔巴哈值、糖化力显著低于 D_1,说明低密度更有利于提高大麦淀粉含量、库尔巴哈值和糖化力,降低蛋白质和灰分含量,有利于大麦酿造品质的提升,更符合优质啤用大麦标准[13]。

采用灰色关联度分析法对不同处理下被测指标进行综合评价,结果(表 3)发现,排位前 3 的处理为 $W_3S_2D_1>W_3S_2D_2>W_2S_2D_1$,结合前文单因素评价结果,$W_3S_2D_1$ 处理下大麦的产量和品质指标综合表现较其他处理更高,适宜于啤用大麦生产。

表 2　不同处理下大麦籽粒品质

Table 2　Barley grain quality under different treatments

处理 Treatment		蛋白含量 Protein content/%	淀粉含量 Starch content/%	灰分含量 Ash content/%	库尔巴哈值 Kolbach index/%	麦芽糖化力 Diastatic power/wk
W_1		13.27a	53.25c	2.23a	36.92c	382.67c
W_2		12.46b	54.47b	2.03b	38.42b	386.50b
W_3		12.23b	55.59a	1.89b	40.58a	394.00a
W_4		12.45b	54.88ab	1.95b	39.75a	394.17a
S_1		12.69a	54.15b	2.11a	38.5b	387.83b
S_2		12.52a	54.95a	1.94b	39.33a	390.83a
D_1		12.39b	54.96a	1.98b	39.92a	390.79a
D_2		12.82a	54.14b	2.07a	37.92b	387.88b
F 值 *F* value	W	12.04**	11.58**	18.31**	49.42**	334.67**
	S	1.77	7.78**	23.09**	13.33**	92.57**
	D	10.63**	8.08**	7.29*	76.80**	87.50**
	W×S	3.57*	1.42*	5.48**	1.42	22.29**
	W×D	0.39	0.87	0.91	0.89	3.12*
	S×D	3.28	0.04	0.30	0.53	5.79*
	W×S×D	0.98	0.41	0.62	1.07	0.07

表 3 不同处理甘啤 6 号灰色关联度

Table 3 Grey correlation degree of Ganpi 6 in different treatments

处理 Treatment	穗数 Number of spikes	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 Thousand grain weight	产量 Yield	蛋白质 Protein	淀粉 Starch	灰分 Ash	库尔巴哈值 KI	糖化力 SP	关联度 Grey relativity	排名 Ranking
$W_1S_1D_1$	0.942	0.946	0.946	0.342	0.984	0.962	0.994	0.919	0.978	0.902	15
$W_1S_1D_2$	0.956	0.919	0.929	0.333	0.988	0.958	0.991	0.904	0.989	0.897	16
$W_1S_2D_1$	0.960	0.989	0.967	0.595	0.989	0.98	0.998	0.926	0.946	0.934	11
$W_1S_2D_2$	0.967	0.970	0.956	0.462	0.981	0.978	0.997	0.913	0.970	0.919	14
$W_2S_1D_1$	0.953	0.989	0.992	0.775	0.994	0.992	0.997	0.939	0.926	0.955	6
$W_2S_1D_2$	0.960	0.992	0.981	0.671	0.99	0.97	0.996	0.919	0.949	0.942	9
$W_2S_2D_1$	0.967	0.978	0.996	0.894	0.997	0.99	0.999	0.946	0.907	0.966	3
$W_2S_2D_2$	0.970	1	0.985	0.825	0.993	0.979	0.998	0.916	0.942	0.958	5
$W_3S_1D_1$	0.981	0.967	0.978	0.822	0.996	0.996	0.999	0.960	0.879	0.959	4
$W_3S_1D_2$	0.996	1	0.985	0.680	0.991	0.986	0.998	0.936	0.910	0.950	7
$W_3S_2D_1$	0.996	1	0.970	0.936	0.999	0.994	0.999	0.949	0.854	0.970	1
$W_3S_2D_2$	0.985	0.963	0.96	0.966	0.997	0.994	1	0.963	0.811	0.967	2
$W_4S_1D_1$	0.963	0.989	0.989	0.644	0.999	0.987	0.999	0.949	0.856	0.939	10
$W_4S_1D_2$	0.989	0.97	0.992	0.581	0.995	0.984	0.997	0.923	0.873	0.932	13
$W_4S_2D_1$	0.985	1	0.978	0.679	0.997	0.994	0.999	0.960	0.843	0.944	8
$W_4S_2D_2$	0.967	0.978	0.992	0.612	0.989	0.984	0.998	0.942	0.871	0.933	12

3 讨论

3.1 滴灌量对大麦产量与品质的影响

滴灌量直接影响大麦植株水分与矿质养分的吸收效率，进而调控产量与品质形成。本试验滴灌量的设置水平与河西走廊地区大麦目前灌溉已有研究的总体趋势保持一致[14]，进一步细化了滴灌量范围，发现在 W_3 滴管量下，产量最优。研究发现，适度水分供应可促进大麦淀粉积累，改善籽粒加工品质，但滴管量过高导致蛋白质含量升高，超出啤酒大麦专用品种的品质标准[15]。本试验中，W_3 滴灌量下，大麦库尔巴哈值和糖化力较高，蛋白质含量较低，打破了传统认知中“高产伴随高蛋白”的现象[15]，实现了啤酒大麦产量与品质的协同优化。需要注意的是，水分调控效应并非独立发挥作用，还与播种方式、播种量共同影响大麦群体结构与生长发育。

3.2 播种方式对大麦产量与品质的影响

播种方式通过改变大麦群体结构与个体生长空间，调控光照、通风及养分利用效率，是影响群体光合效能的关键因子[16]。本试验中，相较于条播(S_1)，宽幅匀播(S_2)下大麦穗粒数、有效穗数、千粒重显著提高，这说明宽幅匀播群体结构更合理，个体生长空间得到充分发挥，有效分蘖率、穗部粒数及籽粒充实度提升；条播(S_1)模式下行间郁闭严重，下层叶片早衰，光合效率受限，产量构成指标偏低。品质方面，宽幅匀播处理的籽粒淀粉含量提升，蛋白质含量更适配酿造标准。本试验结果与刘保华等[17]研究结论一致，即宽幅匀播可显著优化大麦群体结构，提升籽粒产量和品质。但对不同品种群体结构的调控还需与合理的播种密度相匹配，才能发挥最大效益。

3.3 播种量对大麦产量与品质的影响

播种量是决定大麦群体密度的关键因素，直接影响个体生长空间与资源竞争强度，是调控群体与个体关系的核心因子。本试验中，播种量 248 kg·hm^{-2} 下大麦产量与品质均优于播种量 284 kg·hm^{-2}。这与石晓旭等[18]结论一致。可能因为适宜播种量可构建合理的群体结构，既保证单位面积穗数，又避免个体间过度竞争，使叶片光合速率稳定，为产量形成提供了充足的物质基础。但与林志玲等[19]报道“增大播种量可以提高单位面积穗数”的结论不同，这可能与品种和试验环境条件有关。本研究发现，高播种密度会使植

株争夺光照和养分，单株生长空间受限，分蘖成穗率较低。因此，实现高产栽培的关键在于建立合理的群体结构。从品质层面看，播种量 248 kg·hm^{-2} 下大麦籽粒淀粉、蛋白质含量达到酿造最优平衡。高播种量 284 kg·hm^{-2} 则会导致籽粒淀粉含量降低，蛋白质含量较高，酿造品质下降[20]。综合本试验结果，单一播种量调控存在局限，播种量与滴灌量、播种方式协同作用，才能实现产量与品质同步提升。

3.4　滴灌量、播种方式与播种量对大麦产量与品质的互作效应

滴灌量、播种方式与播种量可通过互作效应调控大麦生长发育、产量、品质形成。本试验中，宽幅匀播与适宜滴灌量、播种量的组合（$W_3S_2D_1$）实现了甘啤 6 号的产量及品质指标均达到最优，灰色关联度综合评价排名第一。可能因为适宜滴灌量保障了水分供应，宽幅匀播优化了群体结构，适宜播种量平衡了群体与个体的关系，三者协同，共同促进了大麦光合效能提升与光合产物高效转运，平衡了高产伴随品质下降之间的矛盾[21-22]。

$W_3S_2D_1$ 处理不仅显著提升了产量与品质协同水平，而且滴灌量较传统漫灌模式减少 48.6%，播种量较当地常规播量降低 12.5%，在实现增产的同时大幅降低水肥、种子投入。有效节约了资源。这些栽培措施契合河西地区水资源紧缺背景下农业绿色、高效、可持续发展的需求，具有显著的推广应用价值和生态经济效益。

4　结论

滴灌量 2 700 m^3·hm^{-2}、宽幅匀播、播种量 248 kg·hm^{-2}（$W_3S_2D_1$）为河西地区甘啤 6 号实现高产、优质、抗倒与节水协同提升的最优栽培模式；相较于当地传统漫灌模式（5 250 m^3·hm^{-2}）节水 48.6%，较常规播种量减少 12.5%，显著提高了水肥利用效率。

参考文献：

[1]Shaaf S，Bretani G，Biswas A，*et al*. Genetics of barley tiller and leaf development [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*，2019，61(3)：226.

[2]Li H M，Nathaniel J，Chen J W，*et al*. Agricultural economic transformations and their impacting factors around 4000 BP in the Hexi Corridor，northwest China [J]. *Land*，2023，12(2)：425.

[3]辛培尧，普晓英，杜娟，等. 大麦籽粒和苗粉蛋白质含量的检测[J]. 麦类作物学报，2016，36(1)：58.
Xin P Y，Pu X Y，Du J，*et al*. Protein content determination of barley grain and seedling powder [J]. *Journal of Triticeae Crops*，2016，36(1)：58.

[4]Afzalinia S，Karimi A. Barley cultivars and seed rates effects on energy and water productivity of green fodder production under hydroponic condition [J]. *Indian Journal of Agricultural Research*，2020，54(6)：792.

[5]Singh Y P，Singh D. Pre-irrigation timing and sowing-method-impact on wheat(*Triticum aestivum*) after toria(*Brassica rapa*) on yield，energy indices，water productivity and soil properties [J]. *Indian Journal of Agronomy*，2021，66(3)：306.

[6]张立勤，马忠明，杨君林，等. 灌水和施肥对垄作沟灌啤酒大麦产量及水分利用效率的影响[J]. 麦类作物学报，2015，35(10)：1419.
Zhang L Q，Ma Z M，Yang J L，*et al*. Effect of irrigation and fertilizer on yield and water use efficiency of malting barley cultivated by raised bed planting [J]. *Journal of Triticeae Crops*，2015，35(10)：1419.

[7]倪 晨，张家豪，朱昌进，等. 水稻源流库形成与调控及其影响因素研究进展[J]. 中国水稻科学，2026，40(2)：155.
Ni C，Zhang J H，Zhu C J，*et al*. Research progress on the formation and regulation of rice source，flow and sink and their influencing factors [J]. *Chinese Journal of Rice Science*，2026，40(2)：155.

[8]李拴良，任长宏，格桑曲珍，等. 宽幅硬茬播种对冬小麦生长、产量及品质的效应[J]. 麦类作物学报，2015，35(1)：80.
Li S L，Ren C H，Ge sang Q Z，*et al*. Effect of no-tilled wide planting pattern on growth，yield and quality of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*，2015，35(1)：80.

[9]Fan Y L，Ma Y Z，Zaman A M，*et al*. Delayed irrigation at the jointing stage increased the post-flowering dry matter accumulation and water productivity of winter wheat under wide-precision planting pattern [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*，2023，103(4)：1925.

[10]Balducci E，Beccari G，Orfei M，*et al*. Nitrogen fertilization management and seeding density differently affect net blotch incidence and grain yield in one two-row and one six-row cultivar of barley [J]. *Italian Journal of Agronomy*，2024，19(3)：100019.

[11]Nowak R，Szczepanek M，Błaszczyk K，*et al*. Productivity of alternative barley genotypes under variable intraspecific competition resulting from increasing sowing density [J]. *Agronomy*，2024，14(10)：2275.

[12]汪军妹. 啤酒大麦主要品质性状的品种和环境变异研究[D]. 杭州：浙江大学，2003.
Wang J M. Study on cultivar and environmental variation in qualities of malting barley [D]. Hangzhou：Zhejiang University，2003.

[13]徐银萍. 不同氮磷水平对啤酒大麦产量和品质及氮肥农学效率的影响[J]. 西北农林科技大学学报（自然科学版），2016，44(11)：77.
Xu Y P. Effects of nitrogen and phosphate rates on yield，

quality and nitrogen use efficiency of malt barley [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(11): 77.

[14]尉元明, 朱丽霞, 周跃武, 等. 河西走廊水资源利用现状与节水灌溉工程分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 400.
Wei Y M, Zhu L X, Zhou Y W, *et al*. Utilization status of water resources and assessment on water-saving irrigation projects in Hexi Corridor [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(4): 400.

[15]Fonteyne S, Flores García Á, Verhulst N. Reduced water use in barley and maize production through conservation agriculture and drip irrigation [J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5: 734681.

[16]王鑫炜, 任爱霞, 孙 敏, 等. 播量对宽幅条播冬小麦群体结构和干物质积累分配的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(10): 1272.
Wang X W, Ren A X, Sun M, *et al*. Effect of sowing rate on population structure and dry matter accumulation, distribution of winter wheat sowing in wide strip [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(10): 1272.

[17]刘保华, 苏玉环, 申景梅, 等. 冀南麦区小麦适宜播种方式研究[J]. 河北农业科学, 2012, 16(8): 9.
Liu B H, Su Y H, Shen J M, *et al*. Study on suitable sowing methods of wheat in southern of Hebei Province [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2012, 16(8): 9.

[18]石晓旭, 杨美英, 刘海翠, 等. 播种量对过晚播元麦产量与品质的影响[J]. 大麦与谷类科学, 2022, 39(2): 21.
Shi Xx, Yang M Y, Liu H C, *et al*. Effects of sowing density on the yield and quality of extremely late-sown hulless barley [J]. *Barley and Cereal Sciences*, 2022, 39(2): 21.

[19]林志玲, 朱铁霞, 李天琦, 等. 种植密度对科尔沁沙地饲用燕麦产量和品质的影响[J]. 草地学报, 2019, 27(3): 760.
Lin Z L, Zhut X, Li T Q, *et al*. Responses of production and quality of *Avena* sativato planting density in horqin sandy land [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(3): 760.

[20]王舒琦, 李建波, 刘志萍, 等. 不同栽培模式下大麦产量与蛋白质形成的生理机制研究[J]. 作物杂志, 2025(6): 172.
Wang S Q, Li J B, Liu Z P, *et al*. Physiological mechanism of yield and protein formation in barley under different cultivation modes [J]. *Crops*, 2025(6): 172.

[21]Lu J J, Jiang T, Ge S H, *et al*. Wide-narrow row planting optimizes source-sink dynamics to sustain high yield and achieve water conservation in drip-irrigated winter wheat [J]. *Field Crops Research*, 2026, 343: 110497.

[22]Hamani A K M, Abubakar S A, Si Z Y, *et al*. Responses of grain yield and water-nitrogen dynamic of drip-irrigated winter wheat(*Triticum aestivum* L.) to different nitrogen fertigation and water regimes in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2023, 288: 108494.