麦类作物学报 2026,46(9):1230－1240
Journal of Triticeae Crops doi: 10.7606/j.issn.1009-1041.2026.09.11

网络出版时间:2026-09-03
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1359.S.20260902.1528.004

# 宽幅匀播和滴灌量对新疆冬小麦干物质、产量及水分利用率的影响

李 行[1],王运韬[1],刘 跃[1],陈广周[1],杨卫君[1],王建华[2],石书兵[1],张金汕[1]
(1.新疆农业大学农学院,新疆乌鲁木齐 830052; 2.中国农业大学农学院,北京 100193)

**摘 要**:为探明新疆地区冬小麦最适的播种方式和滴灌量组合,以冬小麦品种新冬22号为材料,采用裂区试验设计,主区设置4种宽幅匀播方式[播幅30 cm＋行距30 cm(B1)、播幅35 cm＋行距25 cm(B2)、播幅40 cm＋行距20 cm(B3)、播幅45 cm＋行距15 cm(B4)]和常规条播(CK),副区设置3种滴灌量[3 555 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W1)、3 870 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W2)、4 185 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W3)],比较分析了不同播种方式和滴灌量组合下新疆地区冬小麦叶片光合性能、干物质积累、转运与分配、土壤水分、产量及产量构成因素的差异。结果表明,在相同滴灌量下,与CK相比,宽幅匀播下冬小麦叶面积指数和净光合速率均显著提高,叶面积指数增幅为3.83%～21.55%,净光合速率增幅在开花期和灌浆期分别为16.12%～34.93%和12.34%～35.68%;宽幅匀播能促进营养器官干物质向籽粒中转运,显著提高冬小麦的籽粒产量和水分利用效率。在相同播种方式下,随着滴灌量的增加,冬小麦叶面积指数和净光合速率、干物质积累和转运量、产量及其构成因素均呈先增后降趋势,水分利用效率则呈下降趋势。本试验条件下,B3W2处理产量最高,达8 922.34 kg·$hm^{-2}$,是实现产量与水分利用效率的协同提升的最佳组合。

**关键词**:新疆;冬小麦;宽幅匀播;滴灌量;水分利用效率;产量
**中图分类号**:S512.1;S311 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-1041(2026)09-1230-11

# Effects of Wide-Width Uniform Sowing and Drip Irrigation Amounts on Dry Matter, Yield, and Water Use Efficiency of Winter Wheat in Xinjiang

**Li Hang[1], Wang Yuntao[1], Liu Yue[1], Chen Guangzhou[1], Yang Weijun[1], Wang Jianhua[2], Shi Shubing[1], Zhang Jinshan[1]**
(1. College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. College of Agriculture, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract**: To determine the optimal sowing method and drip irrigation rate combination for winter wheat in the Xinjiang region, a winter wheat variety Xindong 22 was used. A split-plot design was employed, with the main plots comprising four wide-width uniform sowing methods [30 cm row width ＋ 30 cm row spacing(B1), 35 cm row width ＋ 25 cm row spacing(B2), 40 cm row width ＋ 20 cm row spacing(B3), 45 cm ＋ 15 cm(B4)], and conventional row sowing(CK). The sub-plots were set up with three drip irrigation rates [3 555 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W1), 3 870 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W2), and 4 185 $m^3 \cdot hm^{-2}$(W3)]. A comparative analysis was conducted to examine differences in the photosynthetic performance of winter wheat, dry matter accumulation, transport and allocation, soil moisture, yield, and yield components under various combinations of sowing methods and drip irrigation rates in the Xinjiang region. The results indicated that, under the same drip irrigation rates, compared with the control(CK), the leaf area index and net photosynthetic rate of winter wheat were significantly higher under wide-width uniform sowing. The increase rate of leaf area index ranged from 3.83% to

收稿日期:2026-01-26 修回日期:2026-03-26
**基金项目**:新疆维吾尔自治区科技重大专项(2022A02003-6)
**第一作者** E-mail:609671007@qq.com(李 行)
**通讯作者** E-mail:zhangjinshan0530@sina.com(张金汕)

21.55%, whereas the increase rate of net photosynthetic rate during the flowering and grain-filling stages was 16.12%～34.93% and 12.34%～35.68%, respectively. Wide-width uniform sowing promotes the translocation of dry matter from vegetative organs to grains, significantly increasing winter wheat grain yield and water use efficiency. Under the same sowing method, as drip irrigation rate increased, the leaf area index, net photosynthetic rate, dry matter accumulation and translocation, yield, and its components all exhibited a trend of initial increasing and then decreasing, whilst water use efficiency showed a decreasing trend. Under the conditions of this experiment, the B3W2 treatment yielded the highest yield, reaching 8 922.34 kg · $hm^{-2}$, representing the optimal combination for achieving a synergistic improvement in both yield and water use efficiency.

**Keywords**: Xinjiang; Winter wheat; Wide-width uniform seeding; Drip irrigation amount; Water use efficiency; Yield

小麦是新疆主要的粮食作物之一,但新疆地区干旱少雨、水资源短缺,实现小麦节水生产至关重要。播种方式是调控小麦生长发育、实现增产的关键栽培措施。适宜的播种方式不仅能改善小麦的群体结构,促进干物质积累和合理分配[1],更能实现生育期内水分的高效利用[2-3]。因此,适宜的播种方式和滴灌量组合是实现小麦节水高产协同的关键。

目前,新疆地区玉米、棉花等主要作物种植中,条播、宽窄行播、匀播等播种方式得到应用[4-5]。对于小麦而言,常规条播会导致种子分布拥挤,不利于其个体生长发育,加剧株间竞争,限制了水分的有效利用,影响产量持续稳定增长[6]。宽窄行能较好发挥作物的边际效应优势,改善作物类群结构,较常规条播显著增产[7-9]。但宽窄行播种时行距过宽或过窄均会导致作物干物质积累量降低[10]。匀播条件下麦种的分布较均匀,相对于宽窄行播种,有利于小麦个体生长和构建合理群体,改善群体的通风透光性能,促进对光热水资源的充分利用,进而实现小麦高产[11-12]。宽幅匀播是在匀播栽培技术的基础上优化而来,通过扩大播幅、优化空间分布、提高群体光截获能力和叶面积指数,增产幅度可达 8%～13%,在黄淮冬麦区高产田已推广多年,有效提高了当地冬小麦产量[13]。该技术与新疆小麦的生产需求契合,有助于实现小麦节水与高产的双重目标。新疆地区小麦种植普遍采用滴灌技术,将滴灌带置于播幅中间,能够实现缩行聚水。研究表明,采用"10 cm+10 cm+10 cm+30 cm"播种方式配合 3 600 $m^3$ · $hm^{-2}$ 的滴灌量,有助于构建更合理的小麦群体结构,同时提升水分利用效率,并维持较高的产量水平[14]。

关于宽幅匀播效应,前人在山东[15]、河南[16]、甘肃[17]等地做了大量研究,而关于新疆采用宽幅匀播和滴灌量的耦合效应研究较少。本试验以冬小麦品种新冬 22 号作为研究对象,比较分析不同宽幅匀播方式和滴灌量下新疆冬小麦光合性能、干物质积累与分配、产量及水分利用效率的差异,为宽幅匀播在新疆地区小麦节水高产栽培中的应用提供参考依据。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验地概况

试验于 2024 年 9 月—2025 年 7 月在新疆农业科学院奇台麦类试验站(89°44′E,43°58′N)进行。该站地处中温带大陆性气候区,年平均气温约 5.5 ℃,全年无霜期约 151 d,土壤为沙壤土,播前耕层土壤有机质、碱解氮、速效磷和速效钾含量分别为 26.54 g · $kg^{-1}$、43.22 mg · $kg^{-1}$、16.6 mg · $kg^{-1}$ 和 578 mg · $kg^{-1}$,pH 8.15。试验期小麦全生育期日降水量和气温变化见图 1。

### 1.2　试验设计

试验以小麦品种新冬 22 号为材料,采用裂区设计:主区为播种方式,设 4 种宽幅匀播[播幅 30 cm+行距 30 cm(B1)、播幅 35 cm+行距 25 cm(B2)、播幅 40 cm+行距 20 cm(B3)、播幅 45 cm+行距 15 cm(B4)]和常规条播(CK,行距 15 cm),不同播种方式设计见图 2;副区为 3 种滴灌量[3 555 $m^3$ · $hm^{-2}$(W1)、3 870 $m^3$ · $hm^{-2}$(W2)、4 185 $m^3$ · $hm^{-2}$(W3)],不同生育时期滴灌量见表 1。每处理 3 次重复,小区面积 7.2 $m^2$(3.6 m×2.0 m),小区间隔为 1.0 m,播种量为 300 kg · $hm^{-2}$。宽幅匀播均采用匀播板进行人工播种(采用标准打孔板固定株、行距播种,B1、B2、

B3 和 B4 株距分别为 2.72、2.94、3.14 和 3.33 cm)。采用滴灌方式供水,通过水表准确计量滴灌量,滴灌带在每个处理的播幅中间铺设(毛管类型均为单翼迷宫式滴灌带,规格 16 mm,壁厚 0.18 mm,滴头流量均为 2.4 L·h$^{-1}$,工作压力≤100 kPa,生产中常规滴水的有效辐射面积为 22.5 cm)。各处理底施磷酸二胺 300 kg·hm$^{-2}$,拔节期随水滴施尿素 150 kg·hm$^{-2}$,孕穗期滴施尿素 225 kg·hm$^{-2}$ 和磷酸二氢钾 45 kg·hm$^{-2}$。其他管理措施同当地大田生产。小麦于 2024 年 9 月 15 日播种,2025 年 7 月 13 日收获。

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 叶面积指数的测定

于小麦拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期各小区选取 5 株长势均匀一致的小麦,测其叶长和叶宽,按照以下公式计算单株叶面积和叶面积指数(LAI)[18]。

单株叶面积=叶长×叶宽×0.83/10 000 (1)

LAI=单株叶面积×每公顷株数/10 000 (2)

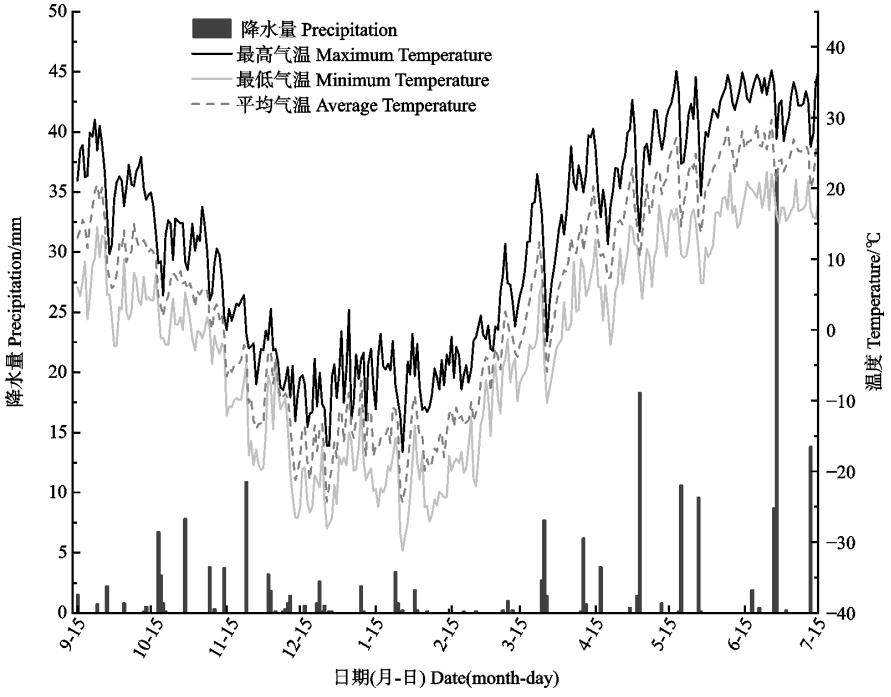



图 1 小麦生育期日降水量和气温变化

Fig. 1 Daily precipitation and temperature variations during wheat growth stages

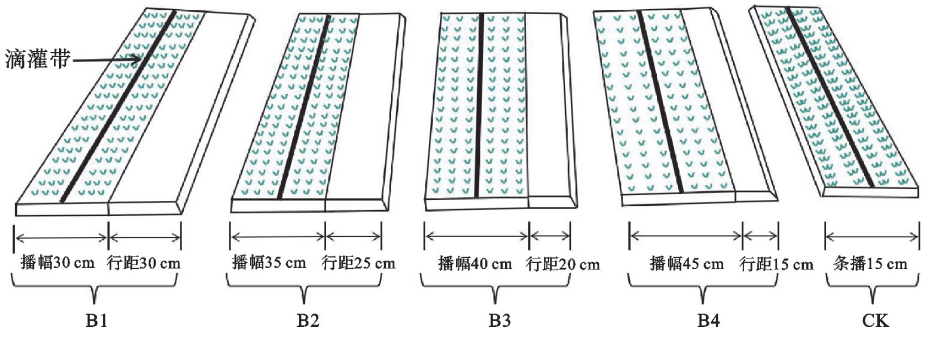



图 2 不同小麦播种方式设计

Fig. 2 Design of different wheat sowing methods

表 1 不同处理各生育时期滴灌量

Table 1 Drip irrigation amount for different stages of the life cycle m$^3$·hm$^{-2}$

| 处理 Treatment | 返青期 Re-greening | 拔节期 Jointing stage | 孕穗期 Booting stage | 开花期 Flowering stage | 灌浆期 Filling stage | 总量 Total |
|---|---|---|---|---|---|---|
| W1 | 425 | 996 | 996 | 569 | 569 | 3 555 |
| W2 | 462 | 1 084 | 1 084 | 620 | 620 | 3 870 |
| W3 | 505 | 1 170 | 1 170 | 670 | 670 | 4 185 |

1.3.2　净光合速率的测定

于开花期、灌浆期晴朗无风的上午各小区选择长势一致、完整无损的 5 株小麦,用 CI-340 手持式光合作用测量仪(美国 CID)测定旗叶净光合速率($P_n$)。

1.3.3　干物质积累转运、分配的测定

于小麦拔节期、孕穗期、开花期、灌浆期和成熟期,各小区取 5 株长势均匀一致的小麦,将叶片、茎鞘、穗轴+颖壳、籽粒分开装入纸袋,放入 105 ℃烘箱中杀青 30 min 后,80 ℃烘至恒重,分别测定各部分干重。参考赵艳等[19]的方法计算干物质积累转运参数。

花前干物质转运量=开花期营养器官干重−成熟期营养器官干重　　(3)

花前干物质对籽粒产量贡献率=花前干物质转运量/成熟期籽粒干重×100%　　(4)

花后干物质积累量=成熟期籽粒干重−花前干物质转运量　　(5)

花后干物质对籽粒产量贡献率=花后干物质积累量/成熟期籽粒干重×100%　　(6)

1.3.4　土壤水分的测定

于小麦播种前、拔节期(灌水后 2 d)、孕穗期灌水前后(灌水前 1 d、灌水后 2 d)、开花期灌水前后(灌水前 1 d、灌水后 2 d)、收获后在各小区用土钻进行取土,取土位置分别为各小区播幅中距离滴灌带 5、10、15 cm 处,用土钻采集 0～100 cm 土壤样品,每 20 cm 为 1 个土层,取样并装入铝盒,采用烘干法[20]测定土壤含水量。土壤容重($\rho$s)采用环刀法获取,参考于珊等[21]方法计算土壤贮水量、灌溉水利用效率和水分利用效率。

1.3.5　产量的测定

于小麦成熟期各小区选取 1 $m^2$ 测定收获穗数,并对其实收测产。另取 10 株进行室内考种,测定穗粒数和千粒重。

### 1.4　数据分析

采用 Excel 2021 和 DPS V9.50 软件进行数据统计分析,用 Duncan 法对数据进行显著性检验,显著性水平设定为 $\alpha=0.05$;使用 Origin 2022 软件作图。

## 2　结果与分析

### 2.1　播种方式和滴灌量对小麦叶片光合性能的影响

2.1.1　播种方式和滴灌量对小麦叶面积指数的影响

小麦 LAI 随生育进程推进呈先升后降趋势,在孕穗期达到最高(图 3)。相同播种方式下,LAI 随滴灌量的增加表现为先增后减;相同滴灌量下,拔节期到灌浆期宽幅匀播(B1～B4)的 LAI 均值较 CK 分别增加了 15.52%～21.55%、3.83%～8.47%、6.08%～10.99%和 8.50%～19.55%。孕穗期 B3W2 处理的 LAI 最大(7.83),较 B3W1 和 B3W3 处理分别增加 16.24%和 4.92%($P<0.05$)。

2.1.2　播种方式和滴灌量对小麦净光合速率的影响

同一播种方式下,开花期和灌浆期净光合速率变化趋势一致,均在 W2 下最大,表现为 W2>W3>W1(图 4)。同一滴灌量下,开花期和灌浆期宽幅匀播的净光合速率均值较 CK 分别增加了 16.12%～34.93%和 12.34%～35.68%;在所有处理中,B3W2 处理灌浆期小麦净光合速率相对于开花期的下降幅度最小,仅为 22.54%。这表明适宜的播幅和滴灌量有助于提升叶片的光合同化能力,从而延长其高效光合作用的持续时间。

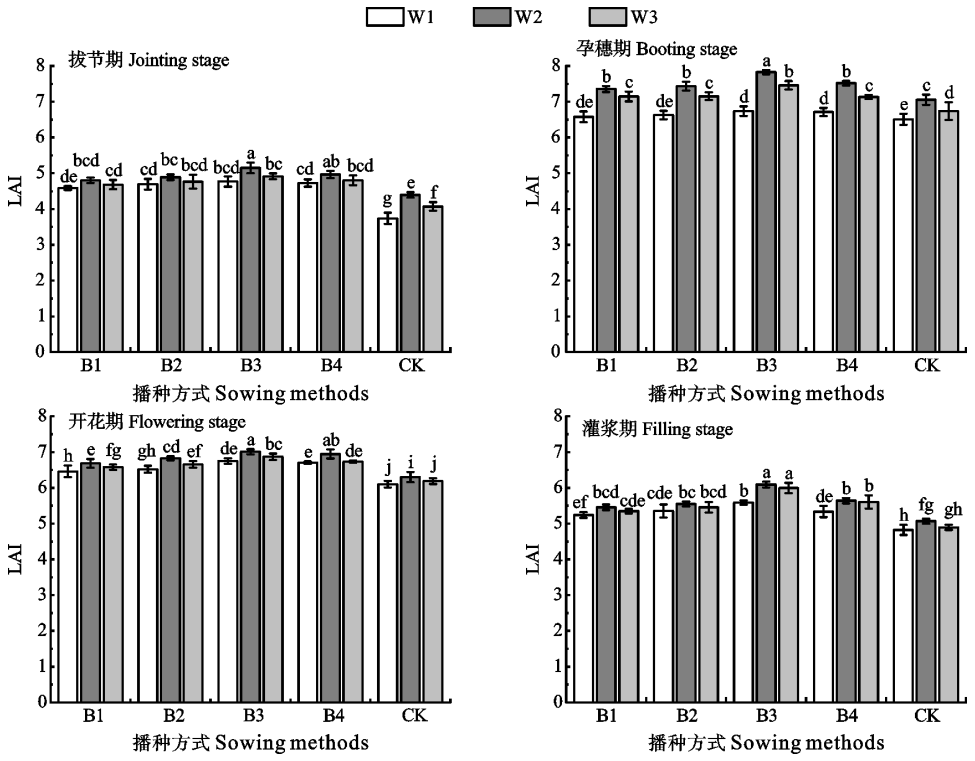
### 2.2　播种方式和滴灌量对小麦干物质积累、转运与分配的影响

2.2.1　播种方式和滴灌量对小麦单株干物质积累的影响

各处理下小麦单株干物质积累量随生育进程的推进呈逐步升高的趋势(图 5)。在相同播种方式下,W1 下单株干物质积累量在各时期均最低,其平均值较 W2 和 W3 分别降低 4.95%～10.47%和 3.17%～5.83%。在同一滴灌量下,宽幅匀播的单株干物质积累量在拔节至成熟期较常规条播均显著增加。成熟期 B3W2 处理干物质积累量最高,较 B1W2、B2W2、B4W2 和 CKW2 处理分别增加 5.96%、3.69%、1.83%和 17.29%。这说明宽幅匀播和适量灌水可促进小麦干物质积累。

2.2.2　播种方式和滴灌量对小麦干物质转运的影响

同一播种方式下,不同滴灌量间,W1 下花前干物质转运量最高;花前干物质转运对籽粒产量的贡献率在宽幅匀播下表现为 W1>W3>W2,在常规条播下则表现为 W3>W1>W2,且 W2 与 W3 无显著差异;花后干物质积累量及其贡献率在宽幅匀播下表现为 W2>W3>W1,常规条播下表现为 W2>W1>W3(表 2)。在同一滴灌量下,不同播种方式间花前干物质转运量表现 B2>CK>B4>B1>B3,对籽粒产量的贡献率表现为 B2>CK>B1>B4>B3;花后干物质积累量表现为 B3>B4>B1>B2>CK,对籽粒产量的贡献率表现为 B3>B4>B1>CK>B2。表明 B3W2 处理能够促进小麦开花后干物质的积累,有助于籽粒产量的提升。




不同图柱上不同小写字母表示同一播种方式不同滴灌量间差异显著($P<0.05$)。下图同。

Different lowercase letters above the columns indicate significant differences among different irrigation rates under the same sowing methods($P<0.05$). The same in figures 4－6.

**图 3 不同处理下小麦的 LAI**

**Fig. 3 Wheat LAI under different treatments**

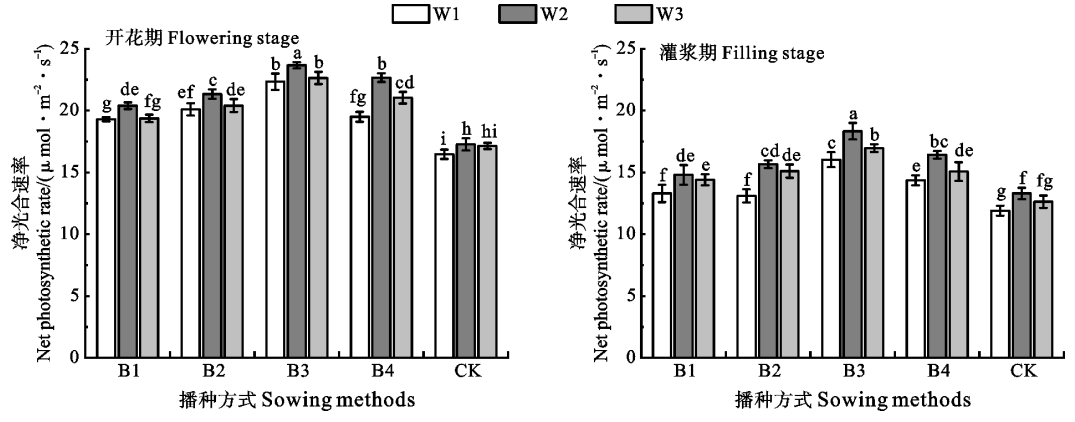



**图 4 不同处理下小麦旗叶净光合速率**

**Fig. 4 Net photosynthetic rate in wheat flag leaf under different treatments**

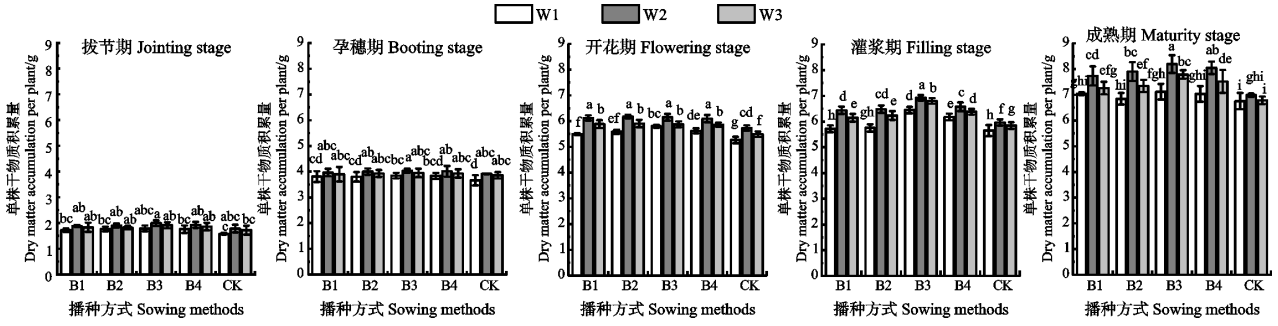



**图 5 不同处理下小麦单株干物质积累量变化**

**Fig. 5 Changes of dry matter accumulation per wheat plant under different treatments**

**表 2　不同处理下小麦干物质转运特点**

**Table 2　Characteristics of wheat dry matter transport under different treatments**

| 处理 Treatment | | 花前干物质 Pre-anthesis dry matter | | 花后干物质 Post-anthesis dry matter | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 转运量 Transportation amount/(g·plant$^{-1}$) | 贡献率 Contribution rate/% | 积累量 Accumulation amount/(g·plant$^{-1}$) | 贡献率 Contribution rate/% |
| B1W1 | | 0.95ab | 34.10abc | 1.83efg | 65.90efg |
| B1W2 | | 0.78bcd | 24.31efg | 2.43abc | 75.69abc |
| B1W3 | | 0.75cd | 26.92cdefg | 2.04def | 73.08abc |
| B2W1 | | 1.03a | 40.34a | 1.54g | 59.66g |
| B2W2 | | 0.85abc | 25.42efg | 2.50abc | 74.58abc |
| B2W3 | | 0.81abc | 27.15cdefg | 2.16cde | 72.85abc |
| B3W1 | | 1.01ab | 37.24ab | 1.73fg | 62.76fg |
| B3W2 | | 0.69d | 20.26g | 2.72a | 79.74a |
| B3W3 | | 0.75cd | 22.78fg | 2.57ab | 77.22ab |
| B4W1 | | 0.98ab | 34.53abc | 1.86efg | 65.47efg |
| B4W2 | | 0.78bcd | 23.06fg | 2.62ab | 76.94ab |
| B4W3 | | 0.82abc | 25.71defg | 2.35bcd | 74.29abc |
| CKW1 | | 0.91abc | 31.38bc | 1.98ef | 68.62cde |
| CKW2 | | 0.87abc | 29.76bcd | 2.06def | 70.24cde |
| CKW3 | | 0.90abc | 31.50bc | 1.98ef | 68.50cde |
| *F* 值 *F* value | B | 0.80$^{ns}$ | 2.00$^{ns}$ | 5.06$^{**}$ | 2.00$^{ns}$ |
| | W | 9.97$^{**}$ | 28.63$^{**}$ | 49.03$^{**}$ | 28.63$^{**}$ |
| | B×W | 0.70$^{ns}$ | 1.93$^{ns}$ | 3.60$^{**}$ | 1.93$^{ns}$ |

同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。ns:$P>0.05$;*:$P<0.05$;**:$P<0.01$。下同。

Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments($P<0.05$). ns: $P>0.05$; *: $P<0.05$; **: $P<0.01$. The same in tables 3 and 4.

2.2.3　播种方式和滴灌量对小麦成熟期干物质分配的影响

同一播种方式下,随着滴灌量的减少,成熟期穗轴+颖壳和籽粒干物质积累量均呈现先增加后降低的趋势(图 6),以 W2 最高,其与 W1、W3 差异显著;茎鞘干物质积累量表现为 W3>W2>W1,但不同滴灌量之间无显著差异;叶片干物质积累量表现为 W2>W1>W3,且 W2 和 W3 间显著差异。同一滴灌量下,B3 下穗轴+颖壳、籽粒、叶片、茎鞘干物质积累量整体上最大,较其余播种方式分别增加 0.19%~19.56%、0.65%~8.82%、0.45%~13.59%、0.93%~14.14%。这说明宽幅匀播和适量灌水有利于干物质向籽粒分配。

## 2.3　播种方式和滴灌量对小麦土壤水分时空分布变化的影响

从图 7 可以看出,在水平方向上,各处理土壤水分变化表现为随生育时期的推进逐渐降低。在垂直方向上,在小麦各生育时期不同处理下土壤含水量随土层加深呈现先增加后减少的趋势。同一播种方式下,小麦孕穗期和开花期灌水前土壤含水量均表现为 W2>W3>W1,其中土壤含水量在 40~60 cm 土层较高,距离滴灌带 5、10、15 cm 处 W2 的平均值比 W1 提高 9.59%~14.23%、5.93%~9.23%和 7.73%~19.35%;各时期灌水后土壤含水量均表现为 W3>W2>W1。同一滴灌量下,各时期灌水前后宽幅匀播的土壤含水量比常规条播高。其中,灌水前以 40~60 cm 土层较高,在距离滴灌带 15 cm 处提高 8.03%~29.76%;灌水后 20~40 cm 土层较高,增加了 5.44%~28.80%。由此可见,宽幅匀播有助于土壤水分保持较高水平。

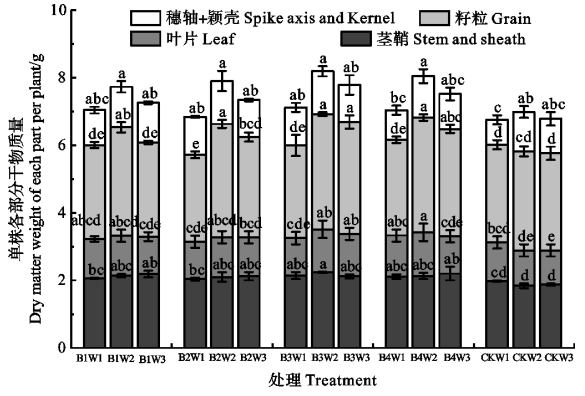
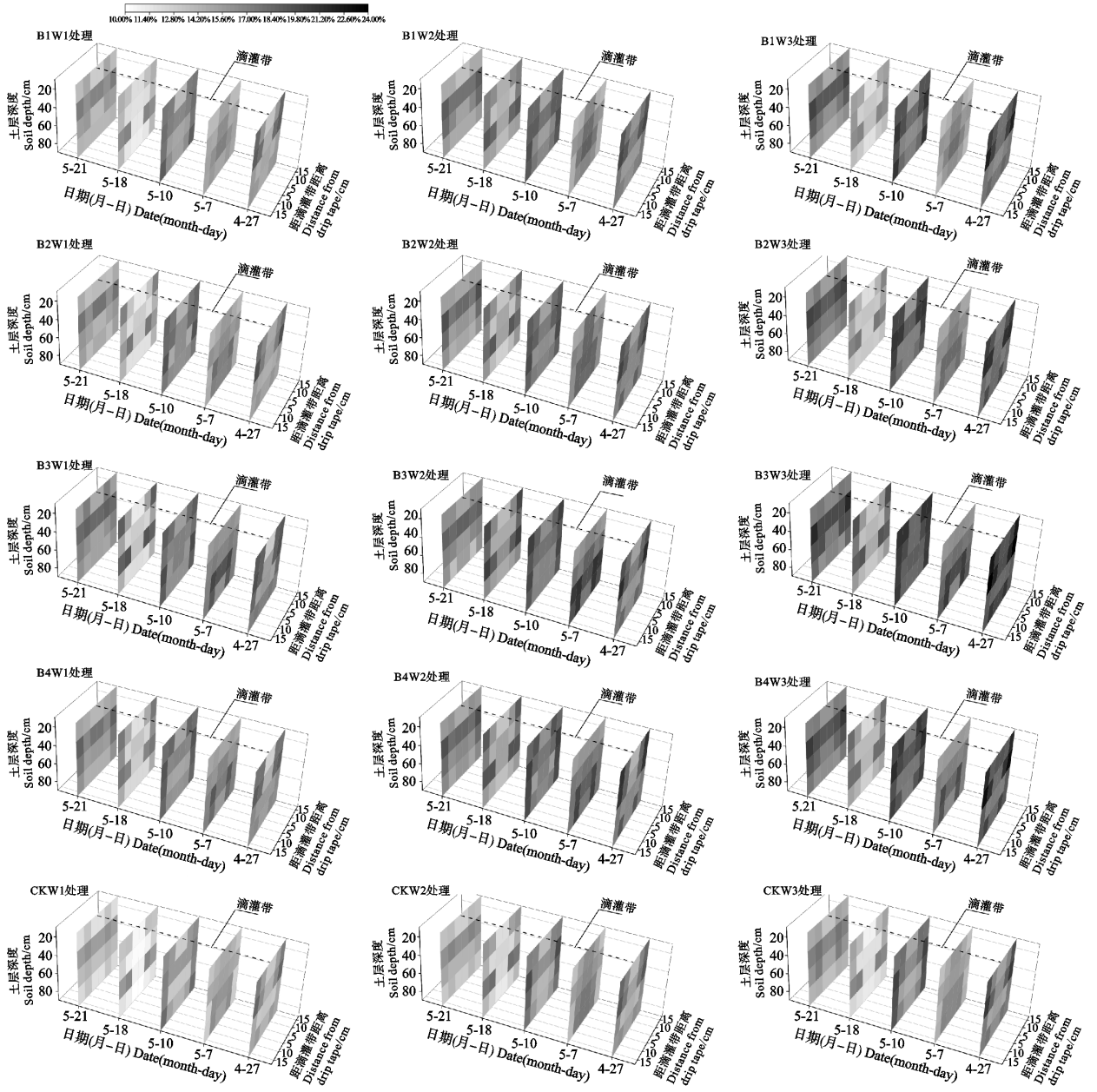



**图 6　不同处理下小麦成熟期干物质的分配特点**

**Fig. 6　Characteristics of wheat dry matter allocation at maturity stage under different treatments**




4-27:拔节期灌水后 2 d;5-7:孕穗期灌水前 1 d;5-10:孕穗期灌水后 2 d;5-18:开花期灌水前 1 d;5-21:开花期灌水后 2 d。

4-27: 2 d after irrigation at jointing stage; 5-7: 1 d before irrigation at booting stage; 5-10: 2 d after irrigation at booting stage; 5-18: 1 d before irrigation at flowering stage; 5-21: 2 d after irrigation at flowering stage.

**图 7 不同处理下小麦土壤水分的时空分布变化**

**Fig. 7 Spatio-temporal variations in soil moisture in wheat under different treatments**

### 2.4 播种方式和滴灌量对小麦水分利用特性的影响

相同播种方式下,随着滴灌量的增加,各处理的土壤耗水量增加,灌溉水利用效率和水分利用效率则减少(表 3)。同一滴灌量下,不同播种方式土壤耗水量大小表现为 CK>B1>B2>B4>B3,水分利用效率和灌溉水利用效率大小均表现为 B3>B4>B2>B1>CK,且宽幅匀播各处理显著高于 CK,B1、B2、B3、B4 处理灌溉水利用效率平均值较 CK 分别增加了 12.20%、12.66%、24.71%、18.39%;水分利用效率平均值分别增加了 14.10%、14.72%、30.92%、22.97%。

### 2.5 播种方式和滴灌量对小麦产量及其构成因素的影响

由表 4 可知,同一播种方式下,小麦穗数、穗粒数、千粒重及产量总体上大小均表现为 W2>W3>W1。W2 下小麦穗数、穗粒数、千粒重及产量

**表 3　不同处理下小麦水分利用特性**

**Table 3　Water use characteristics of wheat under different treatments**

| 处理 Treatment | 降水量 Precipitation/mm | 土壤耗水量 Soil water consumption/mm | 灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency/(kg·hm$^{-2}$·mm$^{-1}$) | 水分利用效率 Water use efficiency/(kg·hm$^{-2}$·mm$^{-1}$) |
|---|---|---|---|---|
| B1W1 | 191.90 | 82.84de | 21.59cd | 12.18d |
| B1W2 | 191.90 | 91.61bc | 20.37ef | 11.76f |
| B1W3 | 191.90 | 97.83b | 18.53h | 10.96g |
| B2W1 | 191.90 | 80.76de | 21.45cd | 12.14d |
| B2W2 | 191.90 | 93.29bc | 20.79de | 11.97e |
| B2W3 | 191.90 | 95.08bc | 18.50h | 10.98g |
| B3W1 | 191.90 | 61.70g | 23.73a | 13.86a |
| B3W2 | 191.90 | 69.62f | 23.06ab | 13.76a |
| B3W3 | 191.90 | 78.83e | 20.44ef | 12.42c |
| B4W1 | 191.90 | 66.06fg | 22.29bc | 12.92b |
| B4W2 | 191.90 | 77.51e | 21.84c | 12.88b |
| B4W3 | 191.90 | 87.47cd | 19.70fg | 11.82f |
| CKW1 | 191.90 | 90.87bc | 19.02gh | 10.60h |
| CKW2 | 191.90 | 106.89a | 18.32h | 10.34i |
| CKW3 | 191.90 | 108.75a | 16.56i | 9.64j |
| *F* 值 B | — | 75.67** | 96.05** | 211.43** |
| *F* value W | — | 60.60** | 131.85** | 102.07** |
| B×W | — | 0.89ns | 0.62ns | 6.77** |

**表 4　不同处理下小麦产量及其构成因素**

**Table 4　Yield and its components of wheat under different treatments**

| 处理 Treatment | 穗数 Spike number/($10^4$·hm$^{-2}$) | 穗粒数 Grain per spike | 千粒重 Thousand-grain weight/g | 产量 Yield/(kg·hm$^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|
| B1W1 | 624.07cdef | 32.89defg | 41.68de | 7 675.67e |
| B1W2 | 640.80bcd | 32.94defg | 43.35d | 7 882.51de |
| B1W3 | 631.87bcd | 33.84bcd | 42.23de | 7 756.77de |
| B2W1 | 596.73efg | 33.59bcd | 42.04de | 7 625.97e |
| B2W2 | 663.07abc | 34.28bcd | 43.83cd | 8 044.04cd |
| B2W3 | 628.53cdef | 32.83defg | 41.99de | 7 741.14de |
| B3W1 | 647.73bcd | 34.78abc | 45.98b | 8 437.64b |
| B3W2 | 696.67a | 36.50a | 48.28a | 8 922.34a |
| B3W3 | 667.87ab | 35.38ab | 46.52ab | 8 555.28b |
| B4W1 | 614.00defg | 34.25bcd | 43.45cd | 7 924.17cde |
| B4W2 | 655.40bc | 35.38ab | 46.43ab | 8 451.11b |
| B4W3 | 644.13bcd | 34.97abc | 45.47bc | 8 243.11bc |
| CKW1 | 576.20g | 31.56g | 38.77f | 6 763.17f |
| CKW2 | 612.40defg | 32.39efg | 40.69ef | 7 090.94f |
| CKW3 | 591.93fg | 31.94fg | 39.53f | 6 930.87f |
| *F* 值 B | 15.48** | 20.33** | 52.79** | 102.41** |
| *F* value W | 15.01** | 3.36* | 13.27** | 16.61** |
| B×W | 0.63ns | 0.92ns | 0.39ns | 0.50ns |

平均值较 W3 分别增加了 3.29%、1.49%、3.18%和 2.97%,较 W1 分别增加了 6.85%、2.65%、5.03%和 5.11%,W2 与 W1 之间差异显著。同一滴灌量下,穗粒数、千粒重和产量随播幅的增大而增加,于 B3 处理达最大;B3 下产量均值较 B1、B2、B4 和 CK 处理分别增加了 11.15%、10.70%、5.27%和 24.68%;其中,B3W2 处理产量最高,达 8 922.34 kg·hm$^{-2}$,较 B1W2、B2W2、B4W2、CKW2 处理分别增产 13.19%、10.92%、5.58%和 25.83%。

## 3　讨论

冬小麦产量与光合作用紧密相关,播种方式能有效调控群体空间分布,提升光合特性,延长绿叶持续期,增加干物质积累,为高产奠定基础[22-24]。前人研究表明[25],宽幅匀播较常规条播显著增加小麦叶面积指数和净光合速率[26],且减水 20%条件下较条播提高了地上干物质最大增长速率、平均增长速率,并延迟了最大增长速率的出现时间,最终实现增产[27]。本研究条件下,相较于常规条播,宽幅匀播能显著增加小麦叶面积指数、延缓后期光合作用衰减并增加小麦多项干物质积累与分配指标,以 B3 处理最优。王冀川等[28]研究表明,与高水处理相比,适水处理下的 LAI 在关键生育期能维持较高水平且降幅较缓,更利于同化物积累。赛力汗·赛等[29]研究表明,灌溉量在 3 600～4 500 m$^3$·hm$^{-2}$ 时,对冬小麦光合参数的增长有明显的促进作用。本研究中,当滴灌量超过一定范围,地上部干物质积累量呈下降趋势,这与前人研究结果[30]相似;滴灌量为 3 870 m$^3$·hm$^{-2}$ 时各指标表现更优,这可能是由于水分较多植株群体生长过旺、叶片披散荫蔽,导致底部叶片死亡。因此,适当减少灌溉,能提高光能利用率促进干物质累积。

常规条播条件下,小麦根系对土壤水分的竞争会导致土壤含水量出现局部过高或不足,进而影响根系呼吸,制约植株的正常生长[31]。本研究通过将宽幅匀播与优化滴灌配置相结合(毛管置于播幅中间),有效改善了土壤水分的空间分布。结果表明,该模式不仅缓解了常规条播下因根系竞争导致的水分局部失衡问题,还显著提升了深层土壤(40～60 cm)的含水量,其中 B3 处理效果最佳,较其他处理提高 8.03%～29.76%。这说明,宽幅匀播能通过实现水分的均匀分布,优化根系水分环境,从而提高土壤水分利用效率,为作物

生长发育和最终产量提升奠定了坚实基础。赵广才等[32]认为,适宜的土壤水分可提高小麦产量。前人研究表明,增加灌溉定额可显著提高 0～40 cm 土层土壤含水量,其中在 0～20 cm 土层土壤含水量增幅最大,其次是 20～40 cm 土层[33]。本研究结果显示,距离滴灌带 5、10、15 cm 处的土壤水分动态对灌溉定额响应显著,灌水后 0～100 cm 土层含水量随滴灌量增加而降低,且土壤表层变化更为明显;而在灌水前,0～100 cm 土层含水量随滴灌量增加呈先升后降的趋势,以 W2(3 870 $m^3 \cdot hm^{-2}$)处理表现最优,能维持土壤水分稳定。

传统种植方式难以满足作物生长发育对水分和养分的需求,甚至出现减产现象,主要表现为穗粒数和千粒重下降[34]。本研究表明,宽幅匀播较常规条播在同一灌水条件下显著提高了冬小麦穗粒数和千粒重,前人关于宽幅匀播具有增加粒数、促进粒重作用的结论与本研究结果相一致[35]。研究表明,水分是影响小麦产量的重要因素之一,适宜的土壤水分既可提高小麦产量[32]。但滴灌量过多或过少都不利于小麦产量的形成[36-37]。本研究结果表明,3 种滴灌水平下,W2 的籽粒产量显著高于 W3 处理。进一步分析表明,减少滴灌量并结合宽幅匀播播种方式,能够充分利用水分优势,增强植株对水分的利用效率,进而提高产量。且播种方式和滴灌量对水分利用效率存在交互作用,W1 处理的水分利用效率最优。综合本研究结果,滴灌量 3 555 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 下的水分利用效率和灌溉水利用效率较高,而滴灌量 3 870 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 结合宽幅匀播 B3 处理(播幅 40 cm＋行距 20 cm)具有高节水与高产优势。

## 4 结论

本试验条件下,与常规条播相比,宽幅匀播可显著提高冬小麦产量,过大和过小播幅均不利于光合物质积累和籽粒产量形成,40 cm 处理为适宜播幅,可以通过提高光合利用效率,提高中后期小麦干物质积累,协调穗数、穗粒数和千粒重,提高籽粒产量。在相同播种方式下,3 870 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 滴灌量因能维持灌浆期较高的净光合速率,并在灌水前保持较高的土壤含水量,有利于促进花后干物质积累。综上所述,宽幅匀播(播幅 40 cm＋行距 20 cm)结合 3 870 $m^3 \cdot hm^{-2}$ 滴灌量可实现产量与水分利用效率的协同提升,有效提高新疆小麦高产高效栽培。

**参考文献:**


[1]张 振,赵俊晔,石 玉,等.不同播幅对小麦花后叶片光合特性和产量的影响[J].作物学报,2024,50(4):981.
Zhang Z,Zhao J Y,Shi Y,*et al*. Effects of different sowing space on photosynthetic characteristics after anthesis and grain yield of wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2024,50(4):981.

[2]Hui L,Fu J X,Qiang Z G,*et al*. Response of yield increase for dryland winter wheat to tillage practice during summer fallow and sowing method in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Integrative Agriculture*,2017,17(4):817.

[3]岳俊芹,邵运辉,陈远凯,等.播种方式对土壤温度和水分及小麦产量的影响[J].麦类作物学报,2006,(5):140.
Yue J Q,Shao Y H,Chen Y K,*et al*. Effects of sowing methods on soil temperature,moisture and wheat yield [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2006,(5):140.

[4]王崇桃,李少昆,陈永生.奇台总场玉米生产技术特征与效益分析[J].玉米科学,2019,27(2):170.
Wang C T,Li S K,Chen Y S. Characteristics and benefit analysis of maize production techniques in Qitai General Farm [J]. *Journal of Maize Sciences*,2019,27(2):170.

[5]娄善伟,董合忠,田晓莉,等.新疆棉花"矮、密、早"栽培历史、现状和展望[J].中国农业科学,2021,54(4):720.
Lou S W,Dong H Z,Tian X L,*et al*. History,current status and prospects of "short,dense and early" cotton cultivation in Xinjiang [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2021,54(4):720.

[6]Fahong W,Xuqing W,Sayre K. Comparison of conventional,flood irrigated,flat planting with furrowirrigated,raised bed planting for winter wheat in China [J]. *Field Crops Research*,2004,87(1):35.

[7]梁 熠,齐 华,王敬亚,等.宽窄行栽培对玉米生长发育及产量的影响[J].玉米科学,2009,17(4):97.
Liang Y,Qi H,Wang J Y,*et al*. Effects of wide-narrow row planting on growth,development and yield of maize [J]. *Journal of Maize Sciences*,2009,17(4):97.

[8]刘 岩,周勋波,陈雨海,等.种植方式和灌溉对冬小麦叶绿素荧光参数及产量的影响[J].作物杂志,2011(1):38.
Liu Y,Zhou X B,Chen Y H,*et al*. Effects of planting patterns and irrigation on chlorophyll fluorescence parameters and yield of winter wheat [J]. *Crops*,2011(1):38.

[9]薛盈文,张英华,黄 琴,等.窄行匀播对晚播冬小麦群体环境、个体性状和物质生产的影响[J].生态学报,2015,35(16):5545.
Xue Y W,Zhang Y H,Huang Q,*et al*. Effects of uniform sowing with narrow row spacing on population environment,individual traits,and dry matter production in late-sown winter wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*,2015,35(16):5545.

[10]石 吕,薛亚光,魏亚凤,等.基于宽窄行种植模式下稻秸非均匀性覆盖对土壤特性及小麦产量的影响[J].核农学报,2021,35(7):1668.
Shi L,Xue Y G,Wei Y F,*et al*. Effects of non-uniform rice straw mulching based on wide-narrow row planting pattern

on soil properties and wheat yield [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*,2021,35(7):1668.

[11]赵广才.小麦立体匀播技术绿色节本高产高效[J].农民科技培训,2016(1):42.

Zhao G C. Wheat three-dimensional uniform sowing technology:green, cost-saving, high-yield and high-efficiency [J]. *Farmer Science and Technology Training*,2016(1):42.

[12]郝德有,郝志青.小麦机械化匀播无垄栽培理论与技术[J].北京农业,2014(21):15.

Hao D Y,Hao Z Q. Theory and technology of mechanized uniform sowing and ridge-less cultivation for wheat [J]. *Beijing Agriculture*,2014(21):15.

[13]杨毅轩,陈应枝,唐 芃,等.播种方式对黄淮海麦区西部冬小麦氮素利用与产量形成的影响[J].应用生态学报,2023,34(6):1572.

Yang Y X,Chen Y Z,Tang P,*et al*. Effects of sowing methods on nitrogen utilization and yield formation of winter wheat in the western Huang-Huai-Hai wheat region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2023,34(6):1572.

[14]王 晨.播种方式和滴灌量对冬小麦产量形成及水分利用效率的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2024.

Wang C. Effects of sowing methods and drip irrigation amount on yield formation and water use efficiency of winter wheat [D]. Urumqi:Xinjiang Agricultural University,2024.

[15]初金鹏,朱文美,尹立俊,等.宽幅播种对冬小麦'泰农 18'产量和氮素利用率的影响[J].应用生态学报,2018,29(8):2517-2524.

Chu J P,Zhu W M,Yin L J,*et al*. Effects of wide-width sowing on grain yield and nitrogen use efficiency of winter wheat 'Tainong 18' [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,2018,29(8):2517.

[16]刘 超,张建民,王石磊 .宽幅匀播不同行距配置对小麦产量的影响[J].现代农业科技,2018(9):25.

Liu C,Zhang J M,Wang S L. Effects of different row spacing configurations under wide-width uniform sowing on wheat yield [J]. *Modern Agricultural Science and Technology*,2018(9):25.

[17]刘广才.小麦宽幅匀播高产栽培技术规程[J].甘肃农业科技,2020(7):76.

Liu G C. Technical regulations for high-yield cultivation of wheat with wide-width uniform sowing [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*,2020(7):76.

[18]张永强,张 璐,陈传信,等.拔节期氮肥运筹对不同滴灌量下冬小麦光合特性及产量的影响[J].中国农学通报,2020,36(16):1.

Zhang Y Q,Zhang L,Chen C X,*et al*. Effects of nitrogen fertilizer management at jointing stage on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat under different drip irrigation amounts [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2020,36(16):1.

[19]赵 艳,罗 铮,杨 丽,等.氮肥运筹对稻茬小麦氮素转运、干物质积累、产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2022,42(8):1001.

Zhao Y,Luo Z,Yang L,*et al*. Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen translocation,dry matter accumulation,yield and quality of wheat after rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2022,42(8):1001.

[20]阎龙霞,马建涛,柴雨葳,等.不同覆盖方式对旱地冬小麦土壤水热及光合特性的影响[J].麦类作物学报,2024,44(9):1185.

Yan L X,Ma J T,Chai Y W,*et al*. Effects of different mulching methods on soil water,temperature and photosynthetic characteristics of winter wheat in dryland [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2024,44(9):1185.

[21]于 姗,陈广周,贾永红,等.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[J].麦类作物学报,2025,45(8):1070.

Yu S,Chen G Z,Jia Y H,*et al*. Effects of water retaining agent on photosynthetic performance,yield and water use efficiency of spring wheat under reduced irrigation in Xinjiang [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2025,45(8):1070.

[22]李欣欣,石祖梁,王久臣,等.施氮量和种植密度对稻茬晚播小麦干物质积累及光合特性的影响[J].华北农学报,2020,35(5):140.

Li X X,Shi Z L,Wang J C,*et al*. Effects of nitrogen application rate and planting density on dry matter accumulation and photosynthetic characteristics of late-sown wheat following rice in paddy fields [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*,2020,35(5):140.

[23]马尚宇,王艳艳,刘雅男,等.播期、播量和施氮量对小麦干物质积累、转运和分配及产量的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2020,28(3):375.

Ma S Y,Wang Y Y,Liu Y N,*et al*. Effects of sowing date,sowing rate and nitrogen application rate on dry matter accumulation,transport and distribution and yield of wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*,2020,28(3):375.

[24]刘小丽,王 凯,杨珍平 ,等.播期与播种方式的不同配套对一年两作区旱地冬小麦农艺性状及产量的影响[J].华北农学报,2018,33(2):232.

Liu X L,Wang K,Yang Z P,*et al*. Effects of different combinations of sowing date and sowing method on agronomic traits and yield of dryland winter wheat in double cropping area [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*,2018,33(2):232.

[25]韩钟英,杨义荣,陈桂平,等.干旱灌区宽幅匀播春小麦生长及产量构成对播量的响应[J].甘肃农业大学学报,2021,56(6):41.

Han Z Y,Yang Y R,Chen G P,*et al*. Response of growth and yield components of spring wheat to sowing rate under wide uniform sowing in arid irrigation area [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*,2021,56(6):41.

[26]Jiao F L,Hong S Z,Liu C Y,*et al*. Wide-precision planting pattern under different tillage methods affects photosynthesis and yield of winter wheat [J]. *Archives of Agronomy and*

*Soil Science*,2022,68(10):1352.

[27]陈桂平,程 辉,范 虹,等.绿洲灌区宽幅匀播和传统条播春小麦产量对水氮减量的适应性研究[J].中国农业科学,2023,56(13):2461.
Chen G P,Cheng H,Fan H,*et al*. Adaptability of yield of spring wheat under wide-width uniform sowing and conventional drilling to water and nitrogen reduction in oasis irrigation area [J]. *Scientia Agricultura Sinica*,2023,56(13):2461.

[28]王冀川,徐翠莲,韩秀锋,等.不同土壤水分对滴灌春小麦生长、产量及水分利用效率的影响[J].农业现代化研究,2011,32(1):115.
Wang J C,Xu C L,Han X F,*et al*. Effects of different soil moisture on growth,yield and water use efficiency of drip-irrigated spring wheat [J]. *Research of Agricultural Modernization*,2011,32(1):115.

[29]赛力汗·赛,张永强,薛丽华,等.新疆滴灌冬小麦灌溉量对产量形成与水分利用的影响[J].中国农业大学学报,2018,23(8):30.
Sailihan S,Zhang Y Q,Xue L H,*et al*. Effect of irrigation amount on yield formation and water use of drip-irrigated winter wheat in Xinjiang [J]. *Journal of China Agricultural University*,2018,23(8):30.

[30]吴海旭,闫博文,薛丽华,等.不同滴水量对冬播春小麦生长发育及水分利用效率的影响[J].江苏农业科学,2023,51(1):71.
Wu H X,Yan B W,Xue L H,*et al*. Effects of different drip irrigation amounts on growth,development and water use efficiency of winter-sown spring wheat [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*,2023,51(1):71.

[31]刘 冲,贾永红,张金汕,等.播种方式和灌水量对春小麦干物质和产量的影响[J].麦类作物学报,2019,39(6):728.
Liu C,Jia Y H,Zhang J S,*et al*. Effect of sowing method and irrigation amount on dry matter and yield of spring wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2019,39(6):728.

[32]赵广才,万富世,常旭虹,等.灌水对强筋小麦籽粒产量和蛋白质含量及其稳定性的影响[J].作物学报,2008,34(7):1247.
Zhao G C,Wan F S,Chang X H,*et al*. Effects of irrigation on grain yield,protein content and their stability in strong gluten wheat [J]. *Acta Agronomica Sinica*,2008,34(7):1247.

[33]刘 然,周伟伟,金圣爱,等.新型灌溉模式下测墒补灌对农田水氮及小麦产量的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(S1):39.
Liu R,Zhou W W,Jin S A,*et al*. Effects of supplemental irrigation based on soil moisture measurement on soil water,nitrogen and wheat yield under a new irrigation mode [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*,2023,42(S1):39.

[34]Guo Y,Yin W,Hu F,*et al*. Reduced irrigation and nitrogen coupled with no-tillage and plastic mulching increase wheat yield in maize-wheat rotation in an arid region [J]. *Field Crops Research*,2019,243:107615.

[35]郑飞娜,初金鹏,张 秀,等.播种方式与种植密度互作对大穗型小麦品种产量和氮素利用率的调控效应[J].作物学报,2020,46(3):423.
Zheng F N,Chu J P,Zhang X,*et al*. Regulating effects of sowing pattern and planting density on grain yield and nitrogen use efficiency of large-spike wheat cultivars[J]. *Acta Agronomica Sinica*,2020,46(3):423.

[36]Rozbicki J,Ceglinska A,Gozdowski D,*et al*. Influence of the cultivar,environment and management on the grain yield and bread-making quality in winter wheat [J]. *Journal of Cereal Science*,2015,61:126.

[37]翟羽雪,刘宇娟,张伟纳,等.水氮处理对稻茬小麦籽粒产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2018,38(5):578.
Zhai Y X,Liu Y J,Zhang W N,*et al*. Effect of water and nitrogen treatment on grain yield and quality of wheat following rice [J]. *Journal of Triticeae Crops*,2018,38(5):578.