

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.05.033

CSTR:32310.14.stbcbx.2026.05.033

胡艾,张凯,王兆基,等.监控施肥对探墒沟播旱地小麦产量形成及水分利用的影响[J].水土保持学报,2026,40(5):455-470.

Hu Ai, Zhang Kai, Wang Zhaoji, et al. Effects of monitored fertilization on yield formation and water use of dryland wheat under soil moisture-based furrow sowing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(5):455-470.

## 监控施肥对探墒沟播旱地小麦产量 形成及水分利用的影响

胡艾<sup>1,2</sup>, 张凯<sup>1,2</sup>, 王兆基<sup>1,2</sup>, 韩旭阳<sup>1,2</sup>, 高志强<sup>1,2</sup>,  
孙敏<sup>1,2,3</sup>, 林文<sup>1,2</sup>, 任爱霞<sup>1,2</sup>

(1.山西农业大学农学院,有机旱作山西省重点实验室,太原 030000; 2.作物生态与水肥高效利用山西省重点实验室,  
山西 太谷 030801; 3.山西农业大学山西功能农业研究院,山西 太谷 030801)

**摘 要:** [目的] 为探究黄土高原旱作麦区探墒沟播模式下水分高效利用的氮肥利用方式。 [方法] 于 2021—2023 年在黄土高原东部山西闻喜开展大田试验,以探墒沟播和常规条播为主区,以监控施肥(N-P-K:77.8-61.3-38.2)、监控减氮(N-P-K: 0-61.3-38.2)、监控减磷(N-P-K: 77.8-0-38.2)、监控减钾(N-P-K: 77.8-61.3-0)及农户施肥(N-P-K: 180-60-60)为副区。 [结果] 探墒沟播较常规条播可显著提高拔节—成熟期 0~200 cm 土层蓄水量 4~17 mm,降低花前耗水量 1~16 mm,增加花后耗水量 4~6 mm,显著增加群体分蘖数,成穗率有提高但未达显著水平,显著增加花后干物质积累量对籽粒的贡献率,提高可孕小穗数和花后 0~35 d 千粒重,增加穗数、穗粒数和千粒重,显著提高产量 3%~9%。采用探墒沟播,监控施肥(减氮 56%、增磷 2%、减钾 36%)较农户施肥,可显著降低旱地小麦花前 0~200 cm 土层土壤耗水量 4~6 mm,增加花后耗水量 2~4 mm,增加群体有效分蘖数,但产量和水分利用效率无显著差异;较监控减氮、监控减磷和监控减钾显著提高越冬—开花期 0~200 cm 土层土壤蓄水量 5~28 mm,降低花前土壤耗水量 2~16 mm,增加花后土壤耗水量 4~10 mm,显著提高成穗率,花后 0~35 d 千粒重,显著提高产量 3%~13%,提高水分利用效率 3%~14%。相关性分析表明,花后干物质积累及其对籽粒的贡献率、千粒重和产量均与花前土壤水分和花后耗水呈显著正相关( $r=0.68\sim0.84$ ),穗粒数与花后干物质积累量呈显著正相关( $r=0.71$ ),产量与花后干物质积累对籽粒的贡献率呈极显著正相关( $r=0.89$ )。 [结论] 探墒沟播配合监控施肥(减氮 56%、增磷 2%、减钾 36%)利于减少旱地麦田花前耗水,增加花后耗水、有效穗数和可孕小穗数的形成,花后干物质积累对于促进籽粒灌浆和增产具有关键作用,研究结果可为旱地小麦高产高效提供理论依据。

**关键词:** 旱地小麦; 探墒沟播; 监控施肥; 土壤水分; 产量

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0455-16

## Effects of Monitored Fertilization on Yield Formation and Water Use of Dryland Wheat under Soil Moisture-based Furrow Sowing

Hu Ai<sup>1,2</sup>, Zhang Kai<sup>1,2</sup>, Wang Zhaoji<sup>1,2</sup>, Han Xuyang<sup>1,2</sup>, Gao Zhiqiang<sup>1,2</sup>, Sun Min<sup>1,2,3</sup>, Lin Wen<sup>1,2</sup>, Ren Aixia<sup>1,2</sup>

(1.College of Agriculture, Shanxi Provincial Key Laboratory of Organic Dryland Farming, Shanxi Agricultural University,  
Taiyuan 030000, China; 2.Shanxi Provincial Key Laboratory of Crop Ecology and Efficient Utilization of  
Water and Fertilizer, Taigu, Shanxi 030801, China; 3.Shanxi Institute of Functional Agriculture,  
Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to explore nitrogen fertilizer utilization strategies for high water use efficiency under soil moisture-based furrow sowing in dryland wheat areas of the Loess Plateau. [Methods] Field

收稿日期: 2026-01-20

修回日期: 2026-03-27

录用日期: 2026-04-16

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-06-25

资助项目: 有机旱作农业全国重点实验室(筹)建设项目自主研发子课题项目(Z135050009017-3-8); 山西省科技重大专项计划揭榜挂帅项目(202301140601014-06C); 国家自然科学基金面上项目(32272216); 国家小麦产业技术体系专项(CARS-03-01-24); 小麦抗旱栽培生理“三晋英才”创新项目

第一作者: 胡艾(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事旱作栽培与作物生理研究。E-mail: 17385927085@163.com

通信作者: 任爱霞(1986—), 女, 博士, 副教授, 主要从事作物栽培生理研究。E-mail: rax\_renaixia@163.com

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

experiments were conducted in Wenxi, Shanxi Province, in the eastern Loess Plateau from 2021 to 2023. Treatments for main plots included soil moisture-based furrow seeding and conventional row seeding, and for subplots included monitored fertilization (N-P-K: 77.8-61.3-38.2), monitored nitrogen reduction (N-P-K: 0-61.3-38.2), monitored phosphorus reduction (N-P-K: 77.8-0-38.2), monitored potassium reduction (N-P-K: 77.8-61.3-0), and farmer's fertilization (N-P-K: 180-60-60). [Results] Compared with conventional row seeding, soil moisture-based furrow seeding significantly increased soil water storage in the 0–200 cm layer by 4–17 mm from jointing to maturity stages, reduced pre-flowering water consumption by 1–16 mm, and increased post-flowering water consumption by 4–6 mm. It significantly increased population tiller number, and contribution rate of post-flowering dry matter accumulation to grain yield, and increased spike rate but not significantly. It also significantly increased the number of fertile spikelets, 1 000-grain weight at 0–35 days after flowering, spike number, grains per spike, and 1 000-grain weight, and significantly increased yield by 3%–9%. Under the soil moisture-based furrow seeding treatment, compared with farmer's fertilization, monitored fertilization (56% less nitrogen, 2% more phosphorus, and 36% less potassium than farmer's fertilization) significantly reduced pre-flowering water consumption in the 0–200 cm layer by 4–6 mm and increased post-flowering water consumption by 2–4 mm for dryland wheat, while increasing the number of effective tillers in the population. However, there was no significant difference in yield or water use efficiency. Compared with monitored nutrient reduction (nitrogen, phosphorus, or potassium), monitored fertilization significantly increased soil water storage in the 0–200 cm layer from overwintering to flowering by 5–28 mm, reduced pre-flowering soil water consumption by 2–16 mm, and increased post-flowering soil water consumption by 4–10 mm. It significantly increased spike rate, number of fertile spikelets, and 1 000-grain weight at 0–35 days after flowering, and significantly increased yield by 3%–13% and water use efficiency by 3%–14%. Correlation analysis indicated that post-flowering dry matter accumulation and its contribution rate to grains, 1 000-grain weight, and yield were significantly positively correlated with pre-flowering soil moisture and post-flowering water consumption ( $r=0.68-0.84$ ). The number of grains per spike was significantly correlated with post-flowering dry matter accumulation ( $r=0.71$ ), and yield was extremely significantly positively correlated with the contribution rate of post-flowering dry matter accumulation to grains ( $r=0.89$ ). [Conclusion] Soil moisture-based furrow sowing combined with monitored fertilization (56% reduction of nitrogen, 2% increase of phosphorus, and 36% reduction of potassium compared with farmer's fertilization) helps reduce pre-flowering water consumption, increase post-flowering water consumption, and promote the formation of effective tillers and fertile spikelets in dryland wheat fields. Post-flowering dry matter accumulation plays a key role in promoting grain filling and yield improvement. The results provide a theoretical basis for high yield and high efficiency of dryland wheat.

**Keywords:** dryland wheat; soil moisture-based furrow sowing; monitored fertilization; soil moisture; yield

**Received:** 2026-01-20

**Revised:** 2026-03-27

**Accepted:** 2026-04-16

**Online**(www.cnki.net): 2026-06-25

黄土高原属于干旱半干旱区,小麦是该区主要的粮食作物之一,且为旱地小麦,干旱缺水是其生产的第一限制因素,常出现在播前、春季和生长后期,导致产量波动大、水分利用效率低等问题<sup>[1-2]</sup>。因此,采取有效的蓄水保水措施对于解决旱地麦田干旱缺水、抗旱稳产具有重要意义。近年来,蓄水保水措施应用增产增效效果显著<sup>[2-3]</sup>,其中探墒沟播技术在黄土高原旱作区应用广泛,开8~10 cm“倒梯形”沟,耢开表面干土层,沟底施肥,沟两侧湿土上播种2行小

麦,垄上干土秸秆覆盖,一次性完成灭茬、起垄、开沟、施肥、播种、覆土、镇压等作业,实现现代农机与传统农艺相结合的节水增产实用栽培技术<sup>[3]</sup>。赵杰等<sup>[2]</sup>和董飞等<sup>[4]</sup>研究表明,探墒沟播较常规条播,可显著提高旱地麦田花前2 m土壤蓄水量11~26 mm,提高生育期耗水2.0%~4.8%,降低花前群体无效分蘖,促进干物质积累,提高可孕小穗数占比,促进穗数、穗粒数和千粒重协同提升,最终可显著增产16%~19%。可见,探墒沟播播种有利于旱地小麦生

育期蓄水,通过调节生育期用水调控群体结构,从而协调产量构成因素,实现旱地小麦增产。

土壤养分是旱地麦田生产除水分外的另一重要限制因素,目前小农分散经营导致施肥不科学、过量施肥等问题,制约旱地小麦可持续发展<sup>[3,5]</sup>。因此,合理施肥对旱地农业增产和绿色可持续发展具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。监控施肥是通过监测土壤养分含量并结合目标产量进行监控施肥科学确定氮磷钾肥用量,是农业农村部推广的重要养分管理技术之一<sup>[8-9]</sup>。该技术能够优化作物养分吸收效率,促进小麦地上部及籽粒中养分积累,保障作物生长发育<sup>[10]</sup>,保证减少化肥投入的同时,提高土壤水分和养分利用效率,保障田间群体数量,达到节约水资源的目的,最终实现旱地小麦高产高效生产<sup>[7,11-12]</sup>。蔡慧芳等<sup>[13]</sup>在渭北旱地研究表明,采用常规条播,化肥监控施氮量减少20%,较农户习惯施氮量,可提高旱地小麦籽粒产量3%;陈新茹等<sup>[14]</sup>在晋南旱地研究表明,采用常规条播,监控施肥施氮量减少32.6%,较农户施肥,小麦产量无显著差异;张亚蓉等<sup>[15]</sup>在甘肃省雨养农业区研究表明,较农户习惯施肥,监控施肥通过增氮钾肥、减磷肥的养分优化方式,可提高旱地小麦干物质积累与转运效率,最终增加穗数21.1%,提高产量6.7%。目前监控施肥在常规条播技术上应用较多,

且主要集中在产量形成方面,而采用探墒沟播和生育期蓄水保墒播种方式配合监控施肥的研究鲜见报道。因此,本研究于黄土高原东南部山西运城闻喜开展施肥方式对不同播种方式旱地小麦产量形成和水分利用的影响研究,旨在探索旱地小麦稳产高效的探墒沟播生育期蓄水保墒效果,明确探墒沟播播种方式的监控施肥增产增效的水分利用和物质形成规律,以期为黄土高原旱作麦区高效稳产提供科学的养分管理理论与技术支持,助力该区实现节约化肥与提高生产效益的双重目标。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本试验于2021—2023年在山西省运城市闻喜县试验基地(35°31'N,111°38'E)进行。该地属干旱半干旱区,多为旱坡地;年平均气温13.7℃,休闲期降水约占全年降水量的60%。种植模式为一年一熟制,夏季休闲,试验田为丘陵旱地。2021—2022年、2022—2023年0~20 cm土层土壤pH分别为7.80和7.24,有机质含量分别为9.94、10.54 g/kg,2021—2022年速效磷、碱解氮、速效钾含量分别为18.46、69.33、107.91 mg/kg,2022—2023年速效磷、碱解氮、速效钾含量分别为17.03、61.21、109.39 mg/kg。2个试验年度降水量见图1。

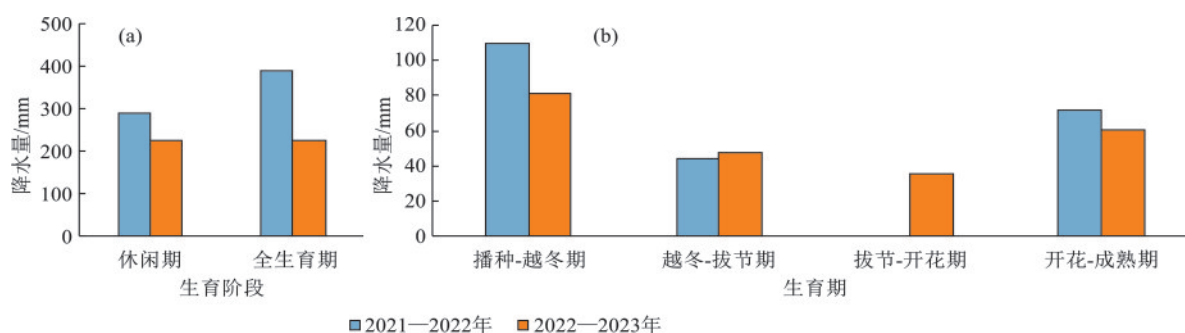


图1 不同生育阶段降水量

Fig.1 Precipitation at different growth stages

### 1.2 试验设计

供试小麦品种为“运旱618”,采用二因素裂区设计,以探墒沟播和常规条播为主区,以监控施肥、监控减氮、监控减磷、监控减钾和农户施肥为副区,共设10个小区(2×5),处理面积为34.5 m<sup>2</sup>(15.0 m×2.3 m),重复3次。探墒沟播垄宽20 cm,沟深10 cm,沟种2行,行距20 cm,一次性完成深开沟、深施肥、浅覆土和播种;常规条播是采用常规施肥条播机进行播种,行距20 cm(图2)。农户施肥采用当地农户常用施肥量,其他施肥处理的施肥量依据目标产量确定,具体施肥方案见表1。于2021年7月15日和2022年7月17日进行休闲期深翻,2021年8月15日和2022年8月17

日旋耕平整土地,2021年9月26日和2022年9月25日进行播种,播前按照试验设计施肥,基本苗225万株/hm<sup>2</sup>,生育期及时防治病虫害,无灌溉,于2022年6月7日和2023年6月8日收获。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤水分 于小麦播种前和收获后,在田块平坦处挖掘深至200 cm的土壤剖面,按每20 cm为1层分层取样,采用环刀法测定各层土壤体积质量<sup>[16]</sup>。在小麦关键生育时期(播种期、越冬期、拔节期、开花期和成熟期),使用土钻在0~200 cm土层深度、每20 cm为1层采集土样,参照王志鑫等<sup>[3]</sup>方法计算土壤蓄水量、耗水量和水分利用效率。

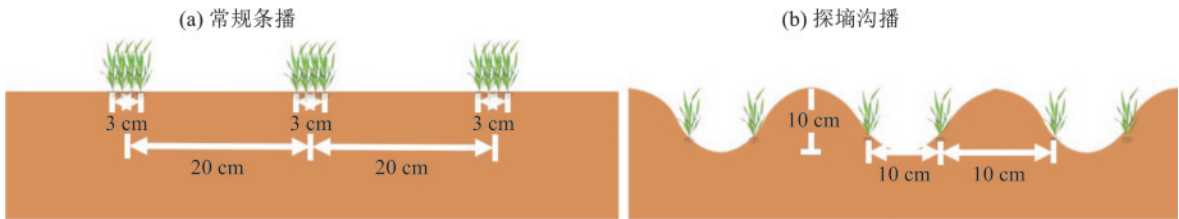


图 2 2种播种方式田间种植示意

Fig.2 Diagrams of field planting of two sowing methods

表 1 不同处理肥料用量

Table 1 Fertilizer dosage under different treatments

| 处理   | 肥料用量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |                               |                  |
|------|-----------------------------|-------------------------------|------------------|
|      | N                           | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O |
| 农户施肥 | 180.0                       | 60.0                          | 60.0             |
| 监控施肥 | 77.8                        | 61.3                          | 38.2             |
| 监控减氮 | 0                           | 61.3                          | 38.2             |
| 监控减磷 | 77.8                        | 0                             | 38.2             |
| 监控减钾 | 77.8                        | 61.3                          | 0                |

1.3.2 群体分蘖数 于小麦三叶期,在每个小区内选取长势均匀的 3 行小麦作为固定观测样段(面积 0.667 m<sup>2</sup>)。分别在越冬期、拔节期、孕穗期、开花期和成熟期调查样段内的总茎蘖数,并计算成穗率<sup>[17]</sup>。

1.3.3 干物质积累与运转 于开花期、成熟期调查各小区 0.667 m<sup>2</sup>样段内生长均匀且具有代表性的植株 20 株,并将植株分为不同器官,开花期分为叶片、茎秆(含叶鞘)和穗。至成熟期,取样进一步细分为叶片、茎秆(含叶鞘)、颖壳(含穗轴)和籽粒。经 105 ℃杀青 30 min 后,于 75 ℃下烘至恒重,称量记录各器官干重,参照张亚蓉等<sup>[15]</sup>方法计算花前干物质运转量及其对籽粒的贡献率、花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率。

1.3.4 穗部性状 开花期上午 9:00,选择同期开花、长势一致的麦穗挂牌标记,花后每隔 5 d,取长势均匀的 20 穗麦穗,剥离籽粒称重,计算花后籽粒千粒重<sup>[18]</sup>。在收获期采集植物样品,每小区随机选取 5 点混合取样,随机选取 20 株考种,调查穗长、可孕小穗数和不可孕小穗数。

1.3.5 产量及其构成 于成熟期随机抓取 20 穗麦穗,调查每穗平均粒数。每个小区调查 0.667 m<sup>2</sup>穗数,晒干脱粒后称重,即为实际产量,并测定千粒重。

1.4 计算方法与数据统计

$$F_N=Y_G/100\times 2.95\times 0.7\tag{1}$$

$$F_P=Y_G/100\times 1.09\times 1.5\tag{2}$$

$$F_K=Y_G/100\times 2.55\times 0.4\tag{3}$$

式中: $F_N$ 为监控施氮量,kg/hm<sup>2</sup>;  $Y_G$ 为目标产量,kg/hm<sup>2</sup>; 0.7 为施氮调整系数; 2.95 为每 100 kg 小麦籽粒平均需氮量,kg;  $F_P$ 为监控施磷量,kg/hm<sup>2</sup>; 1.5 为施

磷调整系数; 1.09 为每 100 kg 小麦籽粒平均需磷量,kg;  $F_K$ 为监控施钾量,kg/hm<sup>2</sup>; 0.4 为施钾调整系数; 2.55 为每 100 kg 小麦籽粒平均需钾量,kg。

$$SWS_i=W_i\times D_i\times H\times 10/100\tag{4}$$

式中:  $SWS$  为蓄水量,mm;  $i$  为土层;  $W$  为土壤含水量,%;  $D$  为土壤体积质量,g/cm<sup>3</sup>;  $H$  为土层深度,cm。

$$ET=P+\Delta W\tag{5}$$

式中:  $ET$  为生育期总耗水量,mm;  $\Delta W$  为播种与成熟期 2 m 土层土壤蓄水量之差,mm;  $P$  为生育期降水量,mm。

$$WUE=Y/ET\tag{6}$$

式中:  $WUE$  为生育期水分利用效率,kg/(hm<sup>2</sup>·mm);  $Y$  为小麦实际产量,kg/hm<sup>2</sup>。

$$ER=EN/EG\times 100\%\tag{7}$$

式中:  $ER$  为成穗率,%;  $EN$  为成熟期穗数,万株/hm<sup>2</sup>;  $EG$  为拔节期分蘖数,万株/hm<sup>2</sup>。

$$DMTBA-TA=DMA-DMM\tag{8}$$

$$DMTBA-CG=DMTBA-TA/DMG\times 100\%\tag{9}$$

$$DMAAA-AA=DMG-DMTBA-TA\tag{10}$$

$$DMAAA-CG=DMAAA-AA/DMG\times 100\%\tag{11}$$

式中:  $DMTBA-TA$  为花前干物质运转量,kg/hm<sup>2</sup>;  $DMA$  为开花期营养器官干物质积累量,kg/hm<sup>2</sup>;  $DMM$  为成熟期营养器官干物质积累量,kg/hm<sup>2</sup>;  $DMTBA-CG$  为花前干物质运转量对籽粒产量贡献率,%;  $DMG$  为成熟期籽粒干物质积累量,kg/hm<sup>2</sup>;  $DMAAA-AA$  为花后干物质积累量,kg/hm<sup>2</sup>;  $DMAAA-CG$  为花后干物质积累量对籽粒产量贡献率,%。

本研究数据的方差分析利用 DPS 9.01 软件进行二因素分析,差异显著性利用 DPS 9.01 软件,采用最小显著差异法 (least significant difference method, LSD) 进行多重比较 ( $\alpha=0.05$ ),相关性利用 Origin 2024 软件进行热图分析。

2 结果与分析

2.1 监控施肥对不同播种方式旱地小麦 0~200 cm 土层土壤水分积耗的影响

2.1.1 各生育时期 0~200 cm 土层土壤蓄水量 年份、播种方式、施肥处理、播种方式与施肥处理互作及年份、播种方式与施肥处理互作对土壤蓄水量有

极显著影响(表 2)。探墒沟播较常规条播,增加旱地小麦拔节—开花期 0~200 cm 土层土壤蓄水量达 4.1~14.8 mm。采用探墒沟播,监控施肥较农户施肥可显著增加旱地小麦拔节期、开花期和成熟期 0~200 cm 土壤蓄水量,分别达 2.4~6.2、3.7~8.5、2.5~4.5 mm;较监控减氮显著增加越冬期、拔节期、开花期和成熟期 0~200 cm 土壤蓄水量,分别达 14.4~19.4、12.5~27.6、9.8~18.6、3.0~6.3 mm,2021—2022 年;较监控减磷显著增加越冬期、拔节期、开花期和成熟期 0~200 cm 土壤蓄水量,分别达 9.2~10.5、6.6~13.2、5.1~14.7、1.4~7.3 mm;较监控减钾显著增加越冬期、拔节期、开花期和成熟期 0~200 cm 土壤蓄水量,分别达 4.1~6.3、5.1~12.7、5.5~11.3、2.3~4.1 mm。采用常规条播,监控施肥较农户施肥可显著增加拔节期、开花期 0~200 cm 土壤蓄水量,分别达 2.7~3.2、2.6~2.9 mm;较监控减氮可显著增加越冬期、拔节期、开花期和成熟期 0~200 cm 土层土壤蓄水量,分别达 10.5~10.7、10.4~10.7、11.6~12.5、4.6~6.3 mm;较监控减磷显著增加越冬期、拔节期、开花期和成熟期 0~200 cm 土层土壤蓄水量,分别达 7.1~9.6、6.1~6.8、1.6~8.3、1.2~5.3 mm;较监控减钾显著增加越冬期、拔节期、开花期和成熟期 0~200 cm 土壤蓄水量,分别达 4.4~5.4、3.2~3.6、1.3~9.6、1.0~5.8 mm。可见,采用探墒沟播利于旱地小麦越冬后土壤水分蓄积,配合监控施肥蓄水保水效果更好,配合监控减氮、监控减磷尤其影响旱地麦田花前土壤蓄水。

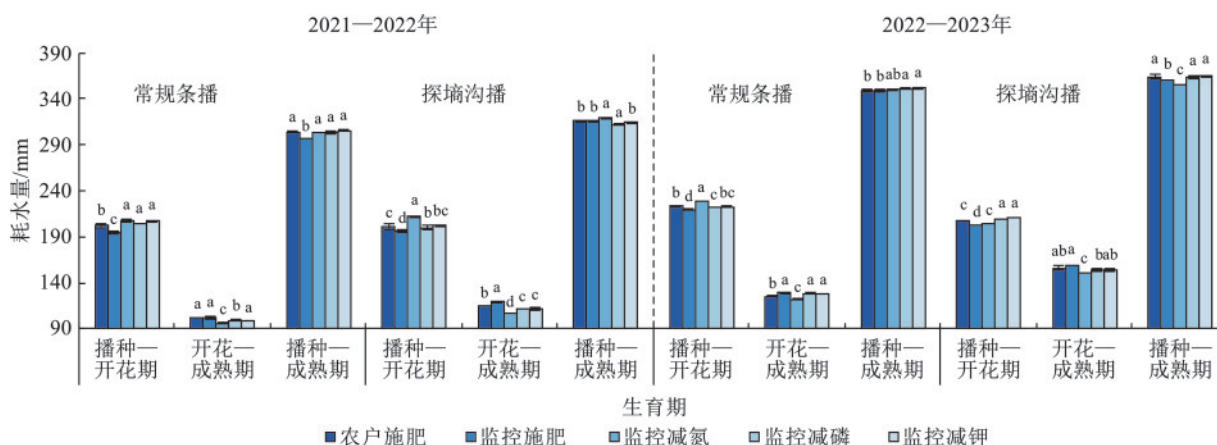
表 2 不同处理各生育时期 0~200 cm 土层土壤蓄水量  
Table 2 Soil water storage in 0~200 cm layer at different growth stages under different treatments mm

| 年份        | 播种方式         | 施肥处理 | 播种期         | 越冬期         | 拔节期         | 开花期        | 成熟期        |
|-----------|--------------|------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|
| 2021—2022 | 常规条播         | 农户施肥 | 321.9±2.0a  | 278.1±0.9b  | 274.4±0.1b  | 273.4±0b   | 242.8±0.4b |
|           |              | 监控施肥 | 317.4±1.2c  | 282.0±1.4a  | 277.6±0.6a  | 276.3±1.6a | 245.3±0.8a |
|           |              | 监控减氮 | 317.3±1.2c  | 271.6±1.1d  | 267.0±1.1d  | 263.8±0.8d | 239.0±0.1c |
|           |              | 监控减磷 | 319.0±0.5bc | 274.9±0.2c  | 270.8±0.6c  | 268.0±0.7c | 240.0±0.6c |
|           |              | 监控减钾 | 320.3±0.9ab | 277.6±1.5b  | 274.0±0.9b  | 266.7±0.6c | 239.5±0.5c |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 314.5±2.7b  | 281.1±0.3b  | 282.6±2.1b  | 267.4±0.3b | 223.5±0.1b |
|           |              | 监控施肥 | 318.6±1.0a  | 284.9±1.2a  | 288.8±0.3a  | 275.9±0.6a | 228.0±0.1a |
|           |              | 监控减氮 | 315.7±0.5ab | 265.5±0.6 e | 261.2±1.0d  | 257.3±0.4e | 221.6±0.3c |
|           |              | 监控减磷 | 307.5±1.9c  | 274.3±0.5d  | 275.6±0.3c  | 261.2±0.2d | 220.7±0.5c |
|           |              | 监控减钾 | 313.2±0.9b  | 278.6±0.2c  | 276.1±2.0c  | 264.6±1.2c | 223.8±0.8b |
| 2022—2023 | 常规条播         | 农户施肥 | 349.3±1.4ab | 371.2±1.4a  | 306.6±0.6b  | 291.1±0.6b | 226.7±0.1a |
|           |              | 监控施肥 | 348.6±0.4b  | 369.6±0.8a  | 309.3±0.4a  | 293.7±1.0a | 225.6±0.2b |
|           |              | 监控减氮 | 345.9±0.3c  | 358.9±0.3c  | 298.9±0.5d  | 282.1±0.5c | 221.0±0.2d |
|           |              | 监控减磷 | 349.8±0.1ab | 360.0±1.3c  | 303.2±0.6c  | 292.1±0.7b | 224.4±0.6c |
|           |              | 监控减钾 | 350.7±0.4a  | 364.2±0.4b  | 306.1±0.6b  | 292.4±0ab  | 224.6±0.1c |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 349.5±0.5a  | 386.2±2.0ab | 311.8±1.3b  | 306.2±2.3b | 210.8±0.4b |
|           |              | 监控施肥 | 347.6±0.1b  | 388.2±0.5a  | 314.2±1.8a  | 309.9±0.5a | 213.4±0.5a |
|           |              | 监控减氮 | 339.8±0.6c  | 373.7±1.7d  | 301.7±2.5d  | 300.1±0.3c | 210.4±0.2b |
|           |              | 监控减磷 | 349.8±0.3a  | 379.0±0.1c  | 307.6±0.8c  | 304.8±1.6b | 211.9±0.3b |
|           |              | 监控减钾 | 350.3±0.7a  | 384.1±0.4b  | 309.1±0.3bc | 304.4±1.1b | 211.1±0b   |
| 方差分析      | 年份           |      | **          | **          | **          | **         | **         |
|           | 播种方式         |      | **          | **          | **          | **         | **         |
|           | 施肥处理         |      | **          | **          | **          | **         | **         |
|           | 播种方式×施肥处理    |      | **          | **          | **          | **         | **         |
|           | 年份×播种方式×施肥处理 |      | **          | **          | **          | **         | **         |

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同年不同施肥处理间差异显著( $p<0.05$ );\*\*表示 $p\leq 0.01$ ; \*表示 $p\leq 0.05$ ;ns表示差异不显著。下同。

2.1.2 各生育阶段 0~200 cm 土壤耗水量 旱地麦田生育期 0~200 cm 土层土壤总耗水量达 297.1~364.9 mm, 其中播种—开花期总耗水量达 194.6~228.5 mm, 开花—成熟期总耗水量达 96.2~158.3 mm(图 3)。探墒沟播较常规条播, 显著提高旱地小麦生育期 0~200 cm 土层土壤总耗水量 11.6~12.5 mm, 降低花前土壤耗水量 1.0~16.3 mm, 显著增加花后土壤耗水量 13.4~28.0 mm。采用探墒沟播, 监控施肥较农户施肥, 显著降低播种—开花期土壤耗水量 (4.4~5.9 mm), 增加开花—成熟期土壤耗水量 2.2~4.0 mm, 2021—2022 年各处理间差异显著; 较监控减氮、减磷和减钾, 可以显著降低播种—开花期土壤耗水量, 分别降低 2.4~15.7、3.6~7.5、5.8~8.7 mm。

监控减氮显著增加开花—成熟期土壤耗水量, 分别增加 7.8~10.3、4.7~7.4、4.2~7.2 mm。采用常规条播, 监控施肥较农户施肥显著降低播种—开花期土壤耗水量 (3.8~7.8 mm), 增加开花—成熟期土壤耗水量 (0.4~3.7 mm); 较监控减氮、监控减磷和监控减钾, 播种—开花期土壤耗水量分别显著降低 8.9~12.4、2.6~9.9、0.2~3.3 mm。监控减氮显著增加开花—成熟期土壤耗水量, 分别增加 6.3~7.0、0.4~3.0、0.3~3.8 mm, 监控减磷和减钾 2021—2022 年差异显著, 监控减氮 2 个试验年度均差异显著。可见, 采用探墒沟播利于降低旱地小麦花前无效耗水, 促进花后高效用水, 且配合监控施肥土壤水分调控效果较好, 配合监控减氮和监控减磷尤其影响生育期有效耗水。



注: 图柱上方不同小写字母表示相同播种方式不同处理间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 3 不同处理下各生育阶段 0~200 cm 土层土壤耗水量

Fig.3 Soil water consumption of 0~200 cm layer at different growth stages under different treatments

## 2.2 监控施肥对不同播种方式旱地小麦干物质积累和运转的影响

2.2.1 开花期和成熟期干物质积累量 年份、播种方式、施肥处理、播种方式与施肥处理互作及年份、播种方式与施肥处理互作对开花期各营养器官干物质积累量具有显著或极显著影响(表 3)。探墒沟播较常规条播可显著提高旱地小麦开花期整株干物质积累量。采用探墒沟播, 监控施肥较农户施肥降低开花期各器官干物质积累量, 但各处理间无显著差异; 较监控减氮、监控减磷、监控减钾, 显著提高开花期各器官干物质积累量, 分别提高 26.1%~30.4%、2.8%~4.2%、1.2%~3.6%。采用常规条播, 监控施肥较农户施肥, 降低开花期各器官干物质积累量, 2021—2022 年差异显著; 较监控减氮、监控减磷、监控减钾可提高开花期各器官干物质积累量, 分别提高 26.7%~30.9%、2.2%~3.2%、0.9%~2.0%, 监控施肥与监控减氮、监控减磷差异显著。

播种方式、施肥处理、播种方式与施肥处理互作

及年份、播种方式与施肥处理互作对成熟期各器官干物质积累量有显著或极显著影响, 年份对茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳、籽粒及整株有极显著影响(表 4)。探墒沟播较常规条播可增加旱地小麦成熟期各器官干物质积累量, 2021—2022 年叶片处理间差异显著, 2022—2023 年茎秆+叶鞘、穗轴+颖壳处理间差异显著。采用探墒沟播, 监控施肥较农户施肥, 可降低整株干物质积累量, 但无显著差异; 较监控减氮、监控减磷、监控减钾, 显著增加成熟期整株干物质积累量, 分别增加 24.8%~37.2%、3.5%~4.2%、1.7%~2.9%。采用常规条播, 监控施肥较农户施肥, 降低整株干物质积累量, 但无显著差异; 较监控减氮、监控减磷、监控减钾, 显著增加成熟期整株干物质积累量, 分别增加 27.0%~36.9%、3.0%~3.8%、1.1%~2.4%。可见, 采用探墒沟播, 利于促进旱地小麦花后植株干物质积累, 配合监控施肥或农户施肥效果相当, 但配合监控减氮、监控减磷、监控减钾严重影响光合产物累积, 尤其监控减氮, 监控减磷次之。

表 3 不同处理下开花期各营养器官干物质积累量  
Table 3 Dry matter accumulation of each vegetative organ at flowering stage under different treatments kg/hm<sup>2</sup>

| 年份        | 播种方式         | 施肥处理 | 茎秆+叶鞘          | 叶片             | 穗轴+颖壳          | 整株            |
|-----------|--------------|------|----------------|----------------|----------------|---------------|
| 2021—2022 | 常规条播         | 农户施肥 | 5 355.7±28.4a  | 1 263.2±17.5a  | 2 148.5±48.6a  | 8 767.4±59.5a |
|           |              | 监控施肥 | 5 339.6±34.0ab | 1 279.1±56.7ab | 2 054.4±37.6b  | 8 673.1±14.8b |
|           |              | 监控减氮 | 4 047.1±71.7d  | 959.3±13.8c    | 1 621.4±59.2c  | 6 627.9±1.3d  |
|           |              | 监控减磷 | 5 095.2±19.9c  | 1 239.8±27.8ab | 2 067.8±15.0b  | 8 402.8±7.1c  |
|           |              | 监控减钾 | 5 183.0±66.9bc | 1 227.9±56.0b  | 2 092.9±23.3ab | 8 503.8±34.2b |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 5 321.5±2.4a   | 1 343.5±13.0a  | 2 246.2±31.6a  | 8 911.3±42.1a |
|           |              | 监控施肥 | 5 293.9±6.1ab  | 1 385.2±50.8a  | 2 191.6±9.4ab  | 8 870.7±66.4b |
|           |              | 监控减氮 | 4 162.3±7.4d   | 1 002.2±49.8c  | 1 636.7±93.5d  | 6 801.3±36.3d |
|           |              | 监控减磷 | 5 195.2±34.9c  | 1 222.0±20.7b  | 2 094.2±62.8c  | 8 511.4±48.5c |
|           |              | 监控减钾 | 5 240.0±8.3bc  | 1 203.5±20.1b  | 2 122.9±6.5bc  | 8 566.3±34.9b |
| 2022—2023 | 常规条播         | 农户施肥 | 5 475.8±7.7a   | 1 365.0±18.8a  | 2 071.7±31.6a  | 8 912.5±5.1a  |
|           |              | 监控施肥 | 5 368.0±16.0b  | 1 373.8±23.9a  | 2 135.1±1.0a   | 8 876.9±38.9a |
|           |              | 监控减氮 | 4 197.1±37.0c  | 1 106.7±64.9c  | 1 700.9±50.2b  | 7 004.7±51.7c |
|           |              | 监控减磷 | 5 300.6±5.1b   | 1 279.3±32.5b  | 2 109.7±25.5a  | 8 689.6±1.9b  |
|           |              | 监控减钾 | 5 379.6±65.5b  | 1 265.0±50.0a  | 2 149.2±74.7a  | 8 793.7±90.2a |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 5 474.9±15.1a  | 1 422.9±33.9a  | 2 201.1±40.6a  | 9 098.9±21.8a |
|           |              | 监控施肥 | 5 413.2±6.1b   | 1 330.4±22.4b  | 2 224.6±0.2a   | 8 968.2±28.7a |
|           |              | 监控减氮 | 4 262.3±50.0c  | 1 176.2±5.9c   | 1 671.7±32.3c  | 7 110.2±23.6d |
|           |              | 监控减磷 | 5 310.7±14.8b  | 1 274.9±5.0b   | 2 141.1±13.7b  | 8 726.6±4.0c  |
|           |              | 监控减钾 | 5 345.5±24.9b  | 1 329.5±70.9b  | 2 187.6±13.9a  | 8 862.6±81.9b |
| 方差分析      | 年份           |      | *              | *              | *              | **            |
|           | 播种方式         |      | *              | **             | **             | **            |
|           | 施肥处理         |      | **             | **             | **             | **            |
|           | 播种方式×施肥处理    |      | **             | *              | **             | **            |
|           | 年份×播种方式×施肥处理 |      | **             | *              | *              | **            |

2.2.2 花前干物质运转和花后干物质积累及其对籽粒的贡献率 年份、播种方式、施肥处理、播种方式与施肥处理互作及年份、播种方式与施肥处理互作对花后干物质积累及其对籽粒的贡献率有显著或极显著影响(表 5)。探墒沟播较常规条播,显著提高植株花后干物质积累量及其对籽粒的贡献率,分别提高 6.1%~7.3%、5.3%~5.6%。采用探墒沟播,监控施肥较农户施肥降低植株花后干物质积累量及对籽粒的贡献率,但无显著差异;较监控减氮、监控减磷,可显著增加花后干物质积累量及对籽粒的贡献率,分别达 10.1%~37.0%、0.8%~3.0%;较监控减钾,可增加花后干物质积累量及对籽粒的贡献率,2021—2022 年差异显著。采用常规条播,监控施肥较农户施肥可降低植株花后干物质积累量及对籽粒的贡献率,但无显著差异;较监控减氮、监控减磷,可显著增加花后干物质积累量及对籽粒的贡献率,分别达 18.2%~32.6%、2.3%~3.5%;较监控减钾,可增加花后干物质积累量及对籽粒的贡献率,2021—2022 年差异显著。可见,采用探墒沟播播种,利于旱地小麦花后光合产物向籽粒的分配,配合监控施肥或农户施肥效果较好,但配合监控减氮、监控减磷严重影响花后干物质积累。

**2.3 监控施肥对不同播种方式下旱地小麦产量形成及水分利用效率的影响**

2.3.1 穗数形成 年份、播种方式、施肥处理、播种方式与施肥处理互作及年份、播种方式与施肥处理互作对拔节期、成熟期群体分蘖数有显著或极显著影响,播种方式、施肥处理、播种方式与施肥处理互作对越冬期、返青期、开花期群体分蘖数有显著或极

http://stbcbx.alljournal.com.cn

显著影响(表6)。探墒沟播较常规条播,显著提高旱地小麦越冬期一成熟期群体分蘖数(22.3~25.1万株/hm<sup>2</sup>),提高成穗率0.3%~1.8%,但差异不显著(图4)。采用探墒沟播,监控施肥较农户施肥,群体分蘖和成穗率无显著差异;较监控减氮、监控减磷、监控减钾,可提高各生育时期群体分蘖数和成穗率,成穗率分别提高9.3%~9.4%、4.0%~4.3%、1.8%~3.5%,2个试验年度与监控减氮、监控减磷差异显著,2021—2022年与监控减钾差异显著。

采用常规条播,监控施肥较农户施肥,群体分蘖数和成穗率无显著差异;较监控减氮、监控减磷、监控减钾,可提高各生育时期群体分蘖数和成穗率,成穗率分别提高8.6%~8.8%、3.9%~4.3%、1.1%~1.8%。可见,采用探墒沟播利于旱地小麦成穗率增加,优化群体结构,增加有效穗数,且配合监控施肥或农户施肥效果均较好,但配合监控减氮、监控减磷、监控减钾严重影响群体结构,导致有效穗数下降,尤其监控减氮、监控减磷次之。

表 4 不同处理下成熟期各器官干物质积累量  
Table 4 Dry matter accumulation of each vegetative organ at maturity stage under different treatments kg/hm<sup>2</sup>

| 年份        | 播种方式         | 施肥处理 | 茎秆+叶鞘         | 叶片             | 穗轴+颖壳          | 籽粒             | 整株              |
|-----------|--------------|------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 2021—2022 | 常规条播         | 农户施肥 | 4 151.5±38.2a | 1 131.5±13.0b  | 2 137.9±25.1a  | 4 187.8±13.3a  | 11 608.6±63.7a  |
|           |              | 监控施肥 | 4 095.8±64.3a | 1 196.1±7.1a   | 2 064.1±22.1ab | 4 064.4±1.7a   | 11 420.5±47.6ab |
|           |              | 监控减氮 | 2 900.0±24.9d | 733.8±8.6c     | 1 345.2±34.5d  | 3 362.7±23.3b  | 8 341.7±74.1d   |
|           |              | 监控减磷 | 3 882.3±89.0c | 1 196.8±7.1a   | 1 920.1±75.7c  | 4 047.7±36.2a  | 11 046.9±30.1c  |
|           |              | 监控减钾 | 3 984.9±22.3b | 1 132.1±17.6b  | 1 997.3±83.5bc | 4 034.9±1.1a   | 11 149.2±42.4bc |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 4 327.3±10.0a | 1 262.2±97.0ab | 2 165.7±3.6a   | 4 203.3±27.6a  | 11 958.6±83.0a  |
|           |              | 监控施肥 | 4 230.0±25.5a | 1 297.5±30.0a  | 2 171.0±22.7a  | 4 107.5±22.8ab | 11 805.9±41.0a  |
|           |              | 监控减氮 | 2 883.1±11.0d | 945.7±44.6c    | 1 316.6±23.3c  | 3 462.7±62.1c  | 8 608.0±72.5c   |
|           |              | 监控减磷 | 3 931.0±30.0c | 1 187.0±8.3b   | 2 150.4±56.0a  | 4 061.2±7.0b   | 11 329.6±101.3b |
|           |              | 监控减钾 | 4 010.0±25.2b | 1 215.3±7.6ab  | 2 070.3±34.9b  | 4 176.6±50.7ab | 11 472.3±103.2b |
| 2022—2023 | 常规条播         | 农户施肥 | 4 229.6±84.5a | 1 248.2±35.0a  | 2 177.7±21.0a  | 4 134.0±30.5a  | 11 789.4±59.0a  |
|           |              | 监控施肥 | 4 225.8±16.8a | 1 246.3±42.7a  | 2 125.2±22.8ab | 4 119.0±50.6ab | 11 716.2±13.9a  |
|           |              | 监控减氮 | 3 130.1±13.0b | 855.8±5.6b     | 1 432.2±44.9d  | 3 806.5±21.3d  | 9 224.5±16.2d   |
|           |              | 监控减磷 | 4 150.6±57.7a | 1 130.7±57.2a  | 2 107.3±5.2bc  | 3 990.0±8.2c   | 11 378.6±13.8c  |
|           |              | 监控减钾 | 4 218.0±44.9a | 1 226.5±0.3a   | 2 072.7±33.2c  | 4 070.0±35.1b  | 11 587.1±43.3b  |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 4 464.9±44.9a | 1 259.0±12.2a  | 2 188.5±15.4a  | 4 208.3±10.8a  | 12 120.7±61.7a  |
|           |              | 监控施肥 | 4 353.2±50.0a | 1 247.3±0.8a   | 2 173.0±56.1a  | 4 194.3±6.4a   | 11 967.7±0.4b   |
|           |              | 监控减氮 | 3 210.7±14.8b | 921.3±75.8b    | 1 639.3±74.1b  | 3 818.6±18.3d  | 9 589.9±31.5 e  |
|           |              | 监控减磷 | 4 245.5±24.9a | 1 209.1±48.1a  | 2 112.3±11.2a  | 3 997.4±20.4c  | 11 564.3±63.9d  |
|           |              | 监控减钾 | 4 303.2±64.9a | 1 245.1±45.0a  | 2 139.9±2.5a   | 4 078.3±30.3b  | 11 766.4±52.7c  |
| 方差分析      | 年份           |      | **            | ns             | **             | **             | **              |
|           | 播种方式         |      | **            | **             | *              | **             | **              |
|           | 施肥处理         |      | **            | **             | **             | **             | **              |
|           | 播种方式×施肥处理    |      | **            | **             | *              | **             | **              |
|           | 年份×播种方式×施肥处理 |      | **            | *              | **             | **             | **              |

2.3.2 穗部性状 播种方式、播种方式与施肥处理互作对穗长有显著影响,施肥处理对穗长、可孕小穗数、不可孕小穗数有极显著影响(表7)。探墒沟播较常规条播,显著提高旱地小麦成熟期穗长、可孕小穗

数,分别提高4.7%~5.9%、0.7%~10.08%,降低2021—2022年不可孕小穗数3.1%。采用探墒沟播,监控施肥较监控减氮和监控减磷,可显著提高穗长、可孕小穗数,分别提高20.5%~24.0%、25.0%~

26.9% 和 9.2%~11.3%、7.1%~17.9%,降低不可孕小穗数;较监控减钾,可分别提高穗长、可孕小穗数 8.0%~8.3%、3.5%~10.0%;与农户施肥无显著差异。采用常规条播,监控施肥较监控减氮,分别显著提高穗长、可孕小穗数 16.9%~22.1%、18.5%~21.7%;较监控减磷和监控减钾,可分别提高穗长、可孕小穗数 3.7%~7.1%、12.0%~14.3% 和 2.2%~5.6%、6.7%~7.7%,降低不可孕小穗数;与农户施肥无显著差异。可见,采用探墒沟播利于促进可孕小穗数增加、降低不可孕小穗数,同时配合监控施肥或农户施肥穗粒数提升效果最佳,但配合监控减氮、减磷、减钾均不利于可孕小穗数形成,尤其是监控减氮。

表 5 不同处理下花前干物质运转和花后干物质积累及其对籽粒的贡献率

Table 5 Pre-flowering translocation and post-flowering accumulation of dry matter and their contribution rates to grain under different treatments

| 年份        | 播种方式         | 施肥处理 | 花前干物质运转                    |           | 花后干物质积累                    |           |
|-----------|--------------|------|----------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
|           |              |      | 运转量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 贡献率/%     | 积累量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) | 贡献率/%     |
| 2021—2022 | 常规条播         | 农户施肥 | 1 346.5±89.7b              | 32.2±2.3b | 2 841.3±100.6ab            | 67.9±2.3a |
|           |              | 监控施肥 | 1 317.0±52.4c              | 32.4±1.5c | 2 747.4±51.0a              | 67.6±1.5a |
|           |              | 监控减氮 | 1 648.9±40.4a              | 49.0±1.2a | 1 713.8±59.5c              | 51.0±1.2c |
|           |              | 监控减磷 | 1 403.6±10.8b              | 34.7±0b   | 2 644.1±18.8b              | 65.3±0b   |
|           |              | 监控减钾 | 1 389.4±7.7b               | 34.4±0.2b | 2 645.5±6.7b               | 65.6±0.2b |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 1 156.1±55.9c              | 27.5±1.2a | 3 047.3±33.4ab             | 72.5±1.2a |
|           |              | 监控施肥 | 1 172.3±39.3c              | 28.5±0.9b | 2 935.2±20.7a              | 71.5±0.9a |
|           |              | 监控减氮 | 1 655.9±38.1a              | 47.8±1.3a | 1 806.7±88.8c              | 52.2±1.3c |
|           |              | 监控减磷 | 1 243.0±37.3bc             | 30.6±0.9c | 2 818.2±43.1b              | 69.4±0.9b |
|           |              | 监控减钾 | 1 270.7±14.4b              | 30.4±0.6c | 2 906.0±55.8b              | 69.6±0.6b |
| 2022—2023 | 常规条播         | 农户施肥 | 1 257.1±19.1c              | 30.4±0.8c | 2 876.9±44.0a              | 69.6±0.7a |
|           |              | 监控施肥 | 1 279.7±1.7bc              | 31.1±0.6c | 2 839.4±43.1ab             | 68.9±0.5a |
|           |              | 监控减氮 | 1 586.7±11.6a              | 41.7±0.5a | 2 219.8±29.0d              | 58.3±0.4c |
|           |              | 监控减磷 | 1 301.0±3.0b               | 32.6±0.2b | 2 689.0±9.7c               | 67.4±0.1b |
|           |              | 监控减钾 | 1 276.6±9.7bc              | 31.4±0.5c | 2 793.4±38.3b              | 68.6±0.4a |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 1 186.5±77.0b              | 28.2±2.2b | 3 021.8±68.2a              | 71.8±1.8a |
|           |              | 监控施肥 | 1 194.8±17.9b              | 28.5±0.6b | 2 999.5±23.1ab             | 71.5±0.5a |
|           |              | 监控减氮 | 1 338.9±30.0a              | 35.1±1.1a | 2 479.7±45.0d              | 64.9±0.9c |
|           |              | 监控减磷 | 1 159.7±65.5b              | 29.0±1.8b | 2 837.7±48.9c              | 71.0±1.5b |
|           |              | 监控减钾 | 1 174.4±48.6b              | 28.8±1.2b | 2 903.8±23.8bc             | 71.2±1.0a |
| 方差分析      | 年份           | *    | *                          | **        | *                          |           |
|           | 播种方式         | **   | **                         | **        | **                         |           |
|           | 施肥处理         | **   | **                         | **        | **                         |           |
|           | 播种方式×施肥处理    | **   | **                         | **        | **                         |           |
|           | 年份×播种方式×施肥处理 | *    | *                          | **        | *                          |           |

2.3.3 千粒重动态变化 探墒沟播较常规条播,可显著提高花后 5~35 d 千粒重(5.6%~6.3%)(图 5)。采用探墒沟播,监控施肥较农户施肥,可降低花后 5~35 d 千粒重,但无显著差异;较监控减氮、监控减磷、监控减钾,提高花后 5~35 d 千粒重,分别提高 12.6%~14.5%、3.2%~4.2%、2.2%~4.8%。采用常规条播,监控施肥较农户施肥,降低花后 5~35 d 千粒重,但无显著差异;较监控减氮、监控减磷、监控减钾,提高花后 5~35 d 千粒重,分别提高 12.1%~12.3%、2.4%~3.4%、2.3%~3.5%,与监控减氮差异显著。可见,采用探墒沟播利于旱地小麦花后籽粒灌浆,配合监控施肥或农户施肥花后籽粒充实效果最好,但配合监控减氮、监控减磷、监控减钾严重影响粒重形成,尤其是监控减氮。

2.3.4 产量及其构成因素 播种方式、施肥处理、播种方式与施肥处理互作对产量及其构成因素有显著或极显著的影响,年份与年份、播种方式及施肥处理互作对穗粒数、千粒重及产量有显著或极显著的影响(表 8)。探墒沟播较常规条播可提高穗数 1.3%~3.0%、穗粒数 0.7%~9.3%、千粒重 0.5%~2.5%、产

量 2.7%~9.2%，2021—2022 年穗数、穗粒数差异显著，千粒重、产量 2 个试验年度差异显著，尤其 2021—2022 年。采用探墒沟播，监控施肥较监控减氮，显著提高穗数、穗粒数、千粒重，最终显著提高产量 11.7%~12.8%；较监控减磷，显著提高穗数、穗粒数，最终显著提高产量 3.8%~4.7%；较监控减钾，显著提高穗粒数、千粒重，穗数 2021—2022 年差异显著，最终提高产量 2.5%~4.1%，与 2021—2022 年差异显著；较农户施肥产量无显著差异。采用常规条播，监控施肥较监控减氮，可显著提高穗数、穗粒数、千粒重，最终显著提高产量 11.2%~12.3%；较监控减磷，显著提高穗数、穗粒数，最终显著提高产量 1.7%~4.7%；较监控减钾，可显著提高穗粒数和千粒重，2022—2023 年的差异显著，最终提高产量 1.2%~2.8%；较农户施肥产量无显著差异。可见，采用探墒沟播 2021—2022 年通过优化产量三因素、2022—2023 年通过优化千粒重增加产量，同时配合监控施肥或农户施肥进一步优化三因素实现稳产增产，但配合监控减氮严重影响产量三因素形成、监控减磷影响穗数和穗粒数形成、监控减钾影响穗粒数和千粒重。

表 6 不同处理下群体分蘖数  
Table 6 Population tiller number under different treatments

| 年份        | 播种方式         | 施肥处理 | 越冬期         | 返青期           | 拔节期            | 开花期          | 成熟期         |
|-----------|--------------|------|-------------|---------------|----------------|--------------|-------------|
| 2021—2022 | 常规条播         | 农户施肥 | 656.3±6.7a  | 968.3±5.5b    | 1 149.0±20.8a  | 555.8±10.4ab | 458.5±1.6a  |
|           |              | 监控施肥 | 666.0±17.1a | 1 067.3±12.9a | 1 128.8±11.6ab | 569.3±6.7a   | 449.5±3.7ab |
|           |              | 监控减氮 | 650.3±8.0a  | 955.5±11.0bc  | 1 109.3±11.6b  | 546.8±21.4ab | 397.8±6.3d  |
|           |              | 监控减磷 | 648.8±3.1a  | 912.8±27.6c   | 1 124.5±26.5ab | 504.8±4.3c   | 429.0±7.3c  |
|           |              | 监控减钾 | 651.8±5.5a  | 957.0±9.8bc   | 1 135.3±7.1ab  | 543.0±6.1b   | 442.0±2.4b  |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 684.0±1.2b  | 1 011.8±6.7b  | 1 146.8±3.1a   | 570.8±4.3ab  | 468.8±3.5a  |
|           |              | 监控施肥 | 711.8±4.3a  | 1 114.5±14.7a | 1 141.3±5.1a   | 577.5±13.5a  | 462.5±2.0a  |
|           |              | 监控减氮 | 684.0±6.1b  | 984.0±19.6c   | 1 112.3±4.3b   | 547.5±4.9bc  | 412.3±1.4d  |
|           |              | 监控减磷 | 675.8±9.2b  | 978.0±4.9c    | 1 141.3±11.2a  | 537.0±23.3c  | 443.3±2.7c  |
|           |              | 监控减钾 | 685.5±7.3b  | 1 001.3±4.3bc | 1 157.8±6.3a   | 560.3±6.7abc | 453.5±5.3b  |
| 2022—2023 | 常规条播         | 农户施肥 | 653.3±5.5b  | 973.5±11.0b   | 1 148.8±21.0ab | 560.3±25.1a  | 481.3±1.4a  |
|           |              | 监控施肥 | 681.8±3.1a  | 1 083.0±11.0a | 1 143.8±5.5ab  | 567.0±13.5a  | 474.3±0.6ab |
|           |              | 监控减氮 | 644.3±4.3bc | 960.8±12.9b   | 1 136.0±12.2b  | 554.3±16.5a  | 428.5±1.2d  |
|           |              | 监控减磷 | 638.3±5.5c  | 930.0±7.3c    | 1 167.8±10.8a  | 502.5±15.9b  | 459.0±7.3c  |
|           |              | 监控减钾 | 647.3±0.6bc | 957.0±3.7b    | 1 154.5±0.4ab  | 558.0±35.5a  | 470.5±4.1b  |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 697.5±0b    | 1 009.5±36.7b | 1 165.5±45.3a  | 571.5±1.2a   | 488.3±5.5a  |
|           |              | 监控施肥 | 721.5±9.8a  | 1 119.8±4.3a  | 1 167.0±31.8a  | 584.3±11.6a  | 483.8±4.7ab |
|           |              | 监控减氮 | 687.8±0.6bc | 993.8±9.2b    | 1 143.0±4.9a   | 556.5±20.8a  | 433.3±5.1d  |
|           |              | 监控减磷 | 682.5±6.1c  | 964.5±34.3b   | 1 161.5±4.1a   | 525.0±2.4b   | 463.0±4.9c  |
|           |              | 监控减钾 | 696.8±4.3b  | 991.5±13.5b   | 1 168.5±3.7a   | 562.5±14.7a  | 475.8±4.3b  |
| 方差分析      | 年份           |      | ns          | ns            | **             | ns           | **          |
|           | 播种方式         |      | **          | **            | *              | *            | *           |
|           | 施肥处理         |      | **          | **            | *              | **           | **          |
|           | 播种方式×施肥处理    |      | **          | **            | *              | *            | *           |
|           | 年份×播种方式×施肥处理 |      | ns          | ns            | *              | ns           | *           |

2.3.5 水分利用效率 探墒沟播较常规条播可提高水分利用效率 4.8% (图 6)。采用探墒沟播技术，监控施肥较监控减氮、监控减磷、监控减钾分别显著提高旱地小麦水分利用效率 10.1%~13.9%、3.4%~4.6%、3.67%~3.81%；与农户施肥无显著差异。

磷、监控减钾分别显著提高旱地小麦水分利用效率 11.8%~14.6%、4.0%~5.4%、3.7%~4.2%；与农户施肥无显著差异。

可见，采用探墒沟播配合监控施肥或农户施肥，有利于旱地小麦土壤水分高效利用，而配合监控减氮、减磷、减钾不利于水分利用，尤其是监控减氮。

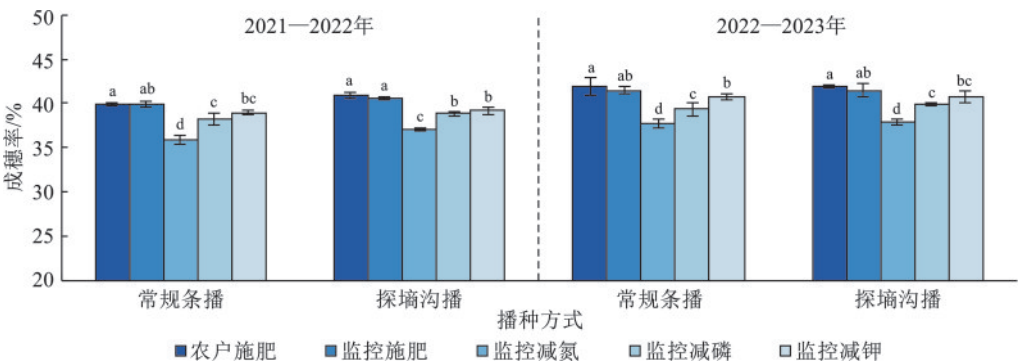


图 4 不同处理下的成穗率  
Fig.4 Spike rate under different treatments

表 7 不同处理下的穗部性状  
Table 7 Spike traits under different treatments

| 年份          | 播种方式         | 施肥处理 | 穗长/cm     | 可孕小穗数     | 不可孕小穗数   |
|-------------|--------------|------|-----------|-----------|----------|
| 2021—2022 年 | 常规条播         | 农户施肥 | 9.3±0a    | 14.0±0a   | 2.5±0.5a |
|             |              | 监控施肥 | 9.3±0a    | 14.0±0a   | 3.0±0a   |
|             |              | 监控减氮 | 7.6±0.5b  | 11.5±0.5c | 4.5±0.5b |
|             |              | 监控减磷 | 9.0±0a    | 12.5±0.5b | 3.0±0a   |
|             |              | 监控减钾 | 9.1±0a    | 13.0±0b   | 3.0±0a   |
|             | 探墒沟播         | 农户施肥 | 10.1±0.1a | 15.5±0.5a | 2.5±0.5c |
|             |              | 监控施肥 | 10.1±0.1a | 15.0±0a   | 3.0±0bc  |
|             |              | 监控减氮 | 8.2±0c    | 12.0±1c   | 4.5±0.5a |
|             |              | 监控减磷 | 9.3±0b    | 14.0±0b   | 3.5±0.5b |
|             |              | 监控减钾 | 9.4±0.1b  | 14.0±0b   | 3.0±0bc  |
| 2022—2023 年 | 常规条播         | 农户施肥 | 10.0±0.1a | 16.5±0.5a | 2.0±0c   |
|             |              | 监控施肥 | 10.0±0.1a | 16.0±0a   | 2.0±0c   |
|             |              | 监控减氮 | 8.6±0.5c  | 13.5±0.5c | 4.5±0.5a |
|             |              | 监控减磷 | 9.4±0b    | 14.0±0b   | 3.0±0b   |
|             |              | 监控减钾 | 9.5±0b    | 15.0±0a   | 3.0±0b   |
|             | 探墒沟播         | 农户施肥 | 10.7±0a   | 16.5±0.5a | 2.0±0c   |
|             |              | 监控施肥 | 10.7±0.2a | 16.5±0.5a | 2.0±0c   |
|             |              | 监控减氮 | 8.9±0.6c  | 13.0±0c   | 4.5±0.5a |
|             |              | 监控减磷 | 9.6±0b    | 14.0±0b   | 3.0±0b   |
|             |              | 监控减钾 | 9.9±0b    | 15.0±0b   | 3.0±0b   |
| 方差分析        | 年份           |      | ns        | ns        | ns       |
|             | 播种方式         |      | *         | ns        | ns       |
|             | 施肥处理         |      | **        | **        | **       |
|             | 播种方式×施肥处理    |      | *         | ns        | ns       |
|             | 年份×播种方式×施肥处理 |      | ns        | ns        | ns       |

2.4 相关性分析

旱地小麦花前土壤蓄水量、开花—成熟期土壤耗水量与花后干物质积累量对籽粒的贡献率呈显著正相关( $r=0.68\sim0.72$ ),与花前干物质转运量及其对籽粒的贡献率呈显著负相关( $r=-0.71\sim-0.65$ )(图 7)。播种—开花期土壤蓄水量、开花—成熟期土壤耗水量与千粒重、产量呈极显著正相关( $r=0.82\sim0.86$ )。

花后干物质积累量与穗数、穗粒数呈显著正相关( $r=0.69\sim0.73$ ),花后干物质积累量对籽粒的贡献率与产量呈极显著正相关( $r=0.89$ )。综上,本试验条件下,旱地小麦花后干物质积累及其对籽粒的贡献率、千粒重、产量均与花前土壤水分和花后耗水显著相关,穗粒数与花后干物质积累量显著相关,产量与花后干物质积累对籽粒的贡献率关系最为密切。

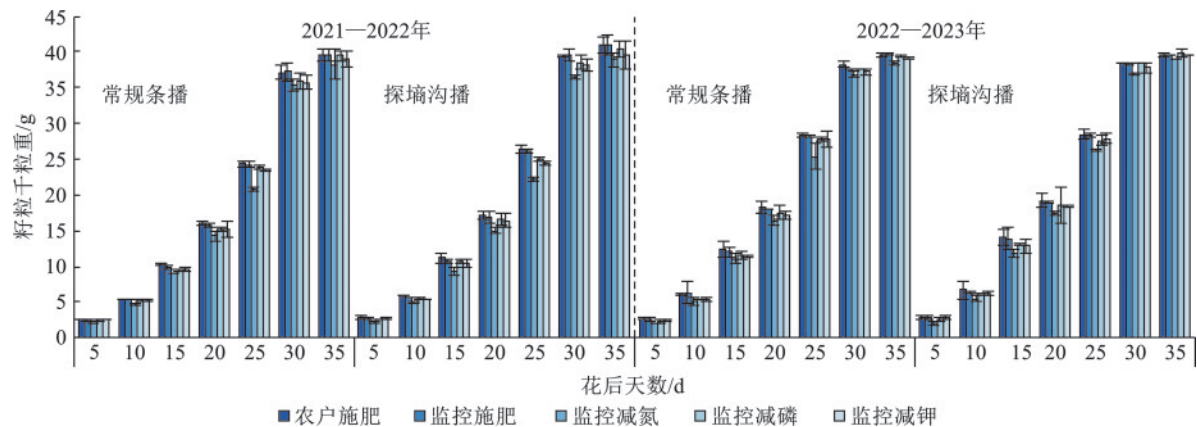


图 5 不同处理下的千粒重动态变化  
Fig.5 Dynamic changes of 1 000-grain weight under different treatments

表 8 不同处理下的产量及其构成因素  
Table 8 Yield and its component factors under different treatments

| 年份        | 播种方式         | 施肥处理 | 穗数/(10 <sup>4</sup> ·hm <sup>-2</sup> ) | 穗粒数        | 千粒重/g      | 产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
|-----------|--------------|------|-----------------------------------------|------------|------------|---------------------------|
| 2021—2022 | 常规条播         | 农户施肥 | 458.5±1.6a                              | 26.3±0.1a  | 39.1±0.5a  | 3 897.0±78.0a             |
|           |              | 监控施肥 | 449.5±3.7ab                             | 26.2±0.2a  | 39.3±0.2a  | 3 791.7±19.0ab            |
|           |              | 监控减氮 | 397.8±6.3d                              | 24.1±0.1c  | 38.5±0.1b  | 3 377.3±76.0c             |
|           |              | 监控减磷 | 429.0±7.3c                              | 25.1±0.4b  | 39.2±0.3a  | 3 730.0±23.1b             |
|           |              | 监控减钾 | 442.0±2.4b                              | 25.2±0.6b  | 39.0±0.1ab | 3 745.7±82.2b             |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 468.8±3.5a                              | 28.5±0.2a  | 40.6±0.5a  | 4 223.3±85.9a             |
|           |              | 监控施肥 | 462.5±2.0a                              | 28.4±0a    | 40.6±0.2a  | 4 173.9±71.8a             |
|           |              | 监控减氮 | 412.3±1.4d                              | 26.7±0.4c  | 38.7±0.3c  | 3 701.5±42.4c             |
|           |              | 监控减磷 | 443.3±2.7c                              | 27.5±0.1b  | 40.1±0.3ab | 3 986.7±4.6b              |
|           |              | 监控减钾 | 453.5±5.3b                              | 27.3±0.5bc | 39.8±0.2b  | 4 008.3±27.5b             |
| 2022—2023 | 常规条播         | 农户施肥 | 481.3±1.4a                              | 30.1±0.5a  | 40.0±0.2a  | 4 518.9±63.6a             |
|           |              | 监控施肥 | 474.3±0.6ab                             | 30.4±0.4a  | 39.7±0.3a  | 4 462.4±26.2ab            |
|           |              | 监控减氮 | 428.5±1.2d                              | 27.5±0.3c  | 37.8±0.2d  | 4 012.3±68.7d             |
|           |              | 监控减磷 | 459.0±7.3c                              | 28.6±0.2b  | 39.2±0.1b  | 4 260.4±40.5c             |
|           |              | 监控减钾 | 470.5±4.1b                              | 28.0±0bc   | 38.4±0.1c  | 4 341.4±74.9bc            |
|           | 探墒沟播         | 农户施肥 | 488.3±5.5a                              | 30.1±0.4a  | 39.5±0.1ab | 4 623.6±65.9a             |
|           |              | 监控施肥 | 483.8±4.7ab                             | 30.1±0.1a  | 39.7±0.2a  | 4 565.0±23.3ab            |
|           |              | 监控减氮 | 433.3±5.1d                              | 28.0±0.2c  | 38.2±0d    | 4 085.3±41.9d             |
|           |              | 监控减磷 | 463.0±4.9c                              | 28.8±0b    | 39.4±0.2ab | 4 397.5±79.0c             |
|           |              | 监控减钾 | 475.8±4.3b                              | 28.6±0.3b  | 39.2±0.1c  | 4 452.7±40.4bc            |
| 方差分析      | 年份           |      | ns                                      | **         | **         | **                        |
|           | 播种方式         |      | *                                       | **         | **         | **                        |
|           | 施肥处理         |      | **                                      | **         | **         | **                        |
|           | 播种方式×施肥处理    |      | *                                       | *          | **         | **                        |
|           | 年份×播种方式×施肥处理 |      | ns                                      | *          | **         | **                        |
|           |              |      |                                         |            |            |                           |

3 讨论

3.1 监控施肥对不同播种方式下旱地小麦 0~200 cm 土壤水分积耗的影响

探墒沟播技术通过优化土壤微地形结构,显著改变旱地小麦生育期内土壤水分的时空分配特征。本

研究表明,探墒沟播较常规条播显著提高拔节一成熟期 0~200 cm 土层土壤蓄水量 4.1~17.5 mm,降低播种一开花期的耗水量 0.9~16.3 mm,增加开花一成熟期耗水量 13.4~28.0 mm(表 2)。与任爱霞等<sup>[19]</sup>在黄土高原旱作区的研究结论一致,探墒沟播的深沟结构

能够有效截留降水并减少表层蒸发,从而增强土壤水库效应。监控施肥的引入进一步强化该机制。较农户施肥,监控施肥在减少氮肥投入的情况下,通过精准调控养分配比,显著增加拔节—成熟期土壤蓄水量

2.4~8.5 mm,同时减少花前无效耗水,增加花后有效用水(图 3),与马永鑫等<sup>[20]</sup>的研究结果相符,即合理减氮能够降低植株前期蒸腾耗水,同时通过光合效率和干物质积累的改善,促进花后水分高效利用。

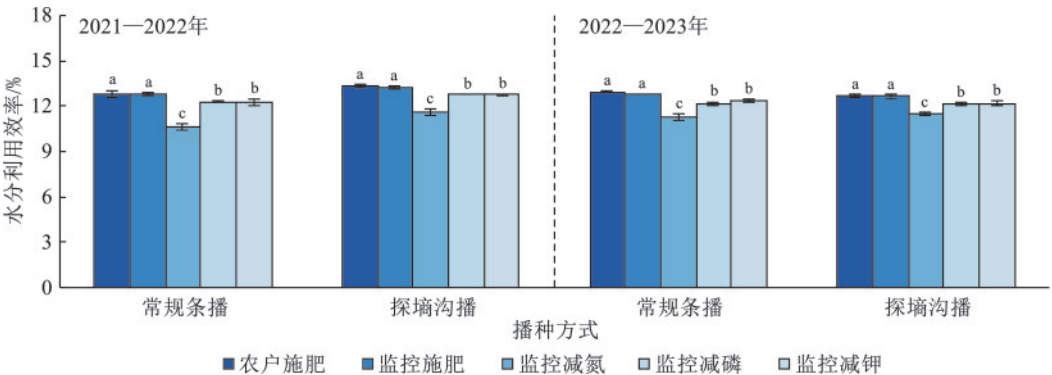


图 6 不同处理下的水分利用效率  
Fig.6 Water use efficiency under different treatments



注:SS、RS、JS、AS、MS分别为播种期、越冬期、拔节期、开花期、成熟期蓄水量;SS-AS、AS-MS、SS-MS分别为播种—开花期、开花—成熟期、播种—成熟期耗水量;SN、GNS、TGW分别为穗数、穗粒数、千粒重;DMTBA-TA、DMTBA-CG、DMAAA-AA、DMAAA-CG分别为花前干物质运转量、花前干物质运转对籽粒的贡献率、花后干物质积累量、花后干物质对籽粒的贡献率;\*\*\*、\*\*、\*分别表示 $p\leq 0.001$ 、 $p\leq 0.01$ 、 $p\leq 0.05$ 。

图 7 各生育时期蓄水量、各生育阶段耗水量与干物质、产量及其构成因素的相关性  
Fig.7 Correlation analysis of water storage and water consumption at different growth stages

本研究发现,在探墒沟播创造的“沟-垄”微域环境下,监控施肥通过优化养分供应,进一步放大播种方式的节水增产优势。其机制可能在于:第一,探墒沟播改善土壤水分入参与贮存,为根系创造良好的水分环境;第二,在此基础上的精准减氮,有效抑制作物前期的过度营养生长与无效蒸腾,使土壤蓄水更高效地保留至花后籽粒灌浆关键期;第三,均衡的磷钾供应保障花后光合器官功能与同化物转运,提高花后耗水转化为籽粒产量的效率。2021—2022年小麦生育期总降水量较2022—2023年降低约15%,且花前降水偏少(图1)。监控施肥处理在探墒沟播下的蓄水保墒与增产效应尤为突出(表2、表8)。其深层机制可能与水分胁迫下作物生理调控与

养分需求的改变有关。在降水较少条件下,作物根系对水分的竞争加剧,探墒沟播的蓄水保墒作用成为生存与产量的关键限制因子。监控施肥的减氮减少因氮素过量可能导致的叶片过度扩展和气孔导度升高,从而降低营养生长阶段的蒸腾耗水<sup>[21]</sup>;同时,干旱胁迫可能诱导作物对磷、钾养分吸收与利用效率的上调,而监控施肥处理中维持的磷钾供应正好满足该需求,增强作物的抗旱生理机能<sup>[22]</sup>。探墒沟播下监控施肥对土壤水分的调控效果在降水较少年份更为显著,与裴雪霞等<sup>[21]</sup>在晋南旱地的研究结果相符,表明降水较少年份沟垄微地形对有限降水的集蓄效率更高,能更有效缓解旱地小麦生育期水分供需错位矛盾。

### 3.2 监控施肥对不同播种方式下旱地小麦干物质积累和转运的影响

探墒沟播配合监控施肥重塑旱地小麦干物质积累与再分配的生理路径。本研究表明,探墒沟播显著提高花后干物质积累量、对籽粒的贡献率,分别提高达 6.1%~7.3%、5.3%~5.6%(表 5),与张亚蓉等<sup>[15]</sup>研究结果一致。较农户施肥,监控施肥虽降低开花期、成熟期植株整株干物质积累量,但无显著差异,与路佳慧等<sup>[23]</sup>研究结果相符,适度减氮可抑制营养器官过度生长,促进同化物向生殖器官的定向转运。不同养分缺失对干物质积累和转运的影响存在明显差异,本研究中,缺氮对旱地小麦生长的抑制作用最为严重,导致干物质积累显著降低(表 3、表 4),监控减氮处理导致花前干物质运转量异常高,但花后积累量显著降低(表 5),表明氮素匮乏迫使植株提前动用贮藏物质以维持籽粒发育,与张振等<sup>[24]</sup>、Li 等<sup>[25]</sup>研究结果一致。缺磷的影响仅次于缺氮,显著降低成穗率与花后物质积累,与卫乃翠等<sup>[26]</sup>关于小麦耐低磷特性的研究结果相符,磷浓度降低导致生物量分配策略发生变化,低磷促进根系生长,但抑制地上部生长。在降水较少年份,缺磷对花后物质积累的抑制作用更为明显,反映在水分胁迫条件下,磷素对于维持同化物转运的关键作用可能被进一步放大<sup>[22]</sup>。相比之下,缺钾对干物质积累的影响相对较小,主要表现为对花后干物质积累和籽粒灌浆过程的制约<sup>[15]</sup>,与张亚蓉等<sup>[15]</sup>在常规条播下的研究相比,本研究探墒沟播配合监控施肥使花后干物质对籽粒的贡献率提升至 71.5%(表 5),增幅提高,可能归因于沟播创造的微域水肥环境增强了花后光合产物向籽粒的转运效率<sup>[27]</sup>。从干物质分配与产量构成的关系来看,花后干物质积累量对产量贡献率与产量的极显著正相关则说明籽粒充实对后期同化物供应的绝对依赖性<sup>[28]</sup>。

### 3.3 监控施肥对不同播种方式下旱地小麦产量形成及水分利用效率的影响

探墒沟播与监控施肥的耦合显著提升旱地小麦产量构成要素的时空协同性。本研究表明,探墒沟播较常规条播,通过优化群体结构和穗部性状,最终产量提高增幅达 2.7%~9.2%(表 8),与王志鑫等<sup>[3]</sup>研究结果一致,说明深沟结构通过抑制无效分蘖提高群体质量。监控施肥的引入使该优势进一步放大,尽管分别减少氮、钾投入 56.8%、36.3%,采用探墒沟播方式,监控施肥仍通过优化花前分蘖质量与花后同化物分配,维持产量稳定性,与农户施肥产量差异仅 1.2%~1.3%,与马悦等<sup>[7]</sup>研究结果相符。路佳慧等<sup>[23]</sup>研究表明,在探墒沟播条件下,监控施肥能够在不减产的前提下实现化肥减量,具有显著的节肥减

排意义。从经济角度,减氮 56.8% 可大幅降低肥料成本;从环境角度,氮肥减施有助于减少  $N_2O$  排放和氮素淋失风险。水分利用效率的提升体现水肥协同的倍增效应。探墒沟播改善水分时空分布,而监控施肥通过精准供肥减少无效蒸腾(图 5),与 Huang 等<sup>[29]</sup>研究结果相符,即水分高效利用需以养分精准匹配为前提。监控减钾在降水较多年份产量与监控施肥无显著差异(表 8),可能与该年土壤降水充足有关。湿润年份良好的水分条件促进土壤矿物钾的释放和作物对钾的吸收效率,从而在速效钾含量相近的情况下,作物对钾肥的响应差异被缩小<sup>[30]</sup>。因此,钾肥的推荐需要综合考虑土壤钾库动态、年度降水等多因素进行动态调整。采用探墒沟播技术,监控施肥较农户施肥的水分利用效率在降水较少年份优于降水较多年份,主要因降水充足时深层水分冗余,探墒技术的节水优势被弱化<sup>[3]</sup>。从干物质分配与产量构成的关系来看,花后干物质积累量及贡献率与产量呈显著正相关,揭示籽粒充实对后期同化物供应的绝对依赖性。缺氮和缺磷对花后物质积累的强烈抑制作用进一步凸显氮、磷营养在源-库关系调节中的核心地位<sup>[24]</sup>。

综上所述,探墒沟播配合监控施肥通过“水肥时空协同”实现“花前蓄墒减耗、花后保水增效”,而缺素则通过干扰作物正常的生理代谢和同化物分配,显著影响旱地小麦的水分利用效率和产量形成,尤其是缺氮肥,水肥协同机制在降水较多年份表现出更大的增产增效潜力,为黄土高原旱作麦区高效稳产提供科学的养分管理理论与技术支持,助力该区实现节约化肥与提高生产效益的双重目标。

## 4 结 论

1) 较常规条播,探墒沟播能显著增加拔节至成熟期的土壤蓄水量 4~17 mm,减少花前无效耗水,增加花后有效耗水,从而为作物关键生育期创造更优的水分条件。

2) 探墒沟播配合监控施肥,在不减产的前提下,比当地农户习惯施肥显著减少氮 56.8% 和钾 36.3% 的投入,体现显著的节肥增效潜力。

3) 探墒沟播配合监控施肥,能增加有效分蘖与成穗率,促进可孕小穗数形成,促进花后干物质向籽粒的转运与积累,并优化穗粒数与千粒重,最终使产量比常规条播提高 3%~9%。

4) 相关性分析表明,花后干物质积累与籽粒产量、千粒重与花前蓄水及花后耗水均呈显著正相关。探墒沟播的蓄水保墒优势与监控施肥的减氮控水效应相结合,且在降水较少年份的增产增效效果更为突出。

5) 在探墒沟播方式下,缺氮对产量和生长的抑制最为严重,其次是缺磷。然而在湿润年份,缺钾处

理与全肥处理产量差异不显著,表明良好水分条件可能缓解作物对钾的依赖。

总之,探墒沟播与监控施肥相结合,能够在显著减少化肥用量的同时,维持旱地小麦的产量和水分利用效率,为黄土高原旱作农业的绿色可持续发展提供一个切实可行的技术方案。

#### 参考文献:

- [1] 闫秋艳,董飞,贾亚琴,等.耕作方式对旱地麦田土壤蓄水变化特征及小麦产量的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):222-228.  
Yan Qiuyan, Dong Fei, Jia Yaqin, et al. Effects of tillage patterns on soil water storage and wheat yield in dryland wheat field[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 222-228.
- [2] 赵杰,林文,孙敏,等.休闲期深翻和探墒沟播对旱地小麦水氮资源利用的影响[J].应用生态学报,2021,32(4):1307-1316.  
Zhao Jie, Lin Wen, Sun Min, et al. Effects of deep ploughing during the fallow period and soil moisture-based furrow sowing on water and nitrogen utilization of dryland wheat[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(4): 1307-1316.
- [3] 王志鑫,孙敏,任爱霞,等.施氮量对旱年探墒沟播旱地小麦土壤水分利用和产量的影响[J].生态学杂志,2021,40(11):3598-3607.  
Wang Zhixin, Sun Min, Ren Aixia, et al. Effects of nitrogen application rate on soil water use and yield of dryland wheat under furrow sowing in drought year[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11): 3598-3607.
- [4] 董飞,闫秋艳,杨峰,等.播种方式对不同灌溉条件下冬小麦产量及土壤水热条件的影响[J].河南农业科学,2020,49(4):7-14.  
Dong Fei, Yan Qiuyan, Yang Feng, et al. Effects of sowing method on winter wheat yield and soil hydrothermal conditions under different irrigation conditions[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(4): 7-14.
- [5] 党建友,姜文超,孙睿,等.旱地小麦产量和水分利用对翻耕时间和降水量及其分布的响应[J].中国农业科学,2024,57(6):1049-1065.  
Dang Jianyou, Jiang Wenchao, Sun Rui, et al. Response of wheat grain yield and water use efficiency to ploughing time and precipitation and its distribution in dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2024, 57(6): 1049-1065.
- [6] 李瑞雅,孙敏,任爱霞,等.耕作模式和播种方式对旱地小麦产量形成的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(2):17-26.  
Li Ruiya, Sun Min, Ren Aixia, et al. Effects of tillage and seeding methods on yield formation of dryland wheat[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 17-26.
- [7] 马悦,田怡,于杰,等.北方麦区土壤有效磷阈值及小麦产量、籽粒氮磷钾含量对监控施肥的响应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(10):1675-1691.  
Ma Yue, Tian Yi, Yu Jie, et al. Threshold of soil available P and the response of wheat yield and grain N, P, and K concentrations to test-integrated fertilizer application in the northern wheat production region of China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2021, 27(10): 1675-1691.
- [8] 马小艳,杨瑜,黄冬琳,等.小麦化肥减施与不同轮作方式的周年养分平衡及经济效益分析[J].中国农业科学,2022,55(8):1589-1603.  
Ma Xiaoyan, Yang Yu, Huang Donglin, et al. Annual nutrients balance and economic return analysis of wheat with fertilizers reduction and different rotations[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(8): 1589-1603.
- [9] 曹寒冰,王朝辉,师渊超,等.渭北旱地冬小麦监控施氮技术的优化[J].中国农业科学,2014,47(19):3826-3838.  
Cao Hanbing, Wang Zhaohui, Shi Yuanchao, et al. Optimization of nitrogen fertilizer recommendation technology based on soil test for winter wheat on Weibei dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(19): 3826-3838.
- [10] 杨慧敏,杨云马,黄少辉,等.优化施肥对小麦-玉米轮作体系产量、养分平衡与生态环境效益的影响[J].中国生态农业学报(中英文),2023,31(5):699-709.  
Yang Huimin, Yang Yunma, Huang Shaohui, et al. Effects of optimized fertilization on yield, nutrient balance, and eco-environmental benefits in wheat-maize rotation system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2023, 31(5): 699-709.
- [11] 赵凯男,吴金芝,黄明,等.返青后补灌与氮肥用量对旱地小麦产量及水氮利用效率的影响[J].中国农业科学,2023,56(17):3383-3398.  
Zhao Kainan, Wu Jinzhi, Huang Ming, et al. Effects of supplemental irrigation after regreening and nitrogen fertilizer application rates on wheat yield, water and nitrogen use efficiency in dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(17): 3383-3398.
- [12] 孙乾,顾晓鹤,孙林,等.不同灌溉条件下冬小麦冠层含水量的光谱响应[J].中国农业科学,2019,52(14):2425-2435.  
Sun Qian, Gu Xiaohu, Sun Lin, et al. Spectral response analysis of canopy water content of winter wheat under different irrigation conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(14): 2425-2435.
- [13] 蔡慧芳,李紫燕,史雷,等.监控施肥配施有机肥对渭北旱地小麦产量及养分吸收利用的影响[J].山西农业科学,2022,50(6):781-787.  
Cai Huifang, Li Ziyang, Shi Lei, et al. Effects of monitored fertilization combined with organic fertilizer on wheat yield and nutrient absorption and utilization in Weibei dryland[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(6): 781-787.
- [14] 陈新茹,吴仪涵,罗云琪,等.减氮覆膜对晋南旱地小麦产量及农田碳足迹的影响[J].植物营养与肥料学报,

- 2025,31(8):1532-1541.
- Chen Xinru, Wu Yihan, Luo Yunqi, et al. Impact of nitrogen reduction and film-mulching on wheat yield and carbon footprint in dryland of southern Shanxi Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2025,31(8):1532-1541.
- [15] 张亚蓉,程宏波,马建涛,等. 监控施肥对旱地冬小麦土壤水分、干物质积累转运和产量的影响[J]. *山西农业科学*, 2023,51(11):1307-1314.
- Zhang Yarong, Cheng Hongbo, Ma Jiantao, et al. Effects of monitoring fertilization on soil moisture, dry matter accumulation, transport and yield of winter wheat in dryland [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2023,51(11):1307-1314.
- [16] 王贵连,苗党生. 浅谈土壤容重的测定[J]. *北京农业*, 2012(3):86.
- Wang Guilian, Miao Dangsheng. Determination of the bulk density of soil[J]. *Beijing Agriculture*, 2012(3):86.
- [17] 丁锦峰,徐东忆,丁永刚,等. 栽培模式对稻茬小麦籽粒产量、氮素吸收利用和群体质量的影响[J]. *中国农业科学*, 2023,56(4):619-634.
- Ding Jinfeng, Xu Dongyi, Ding Yonggang, et al. Effects of cultivation patterns on grain yield, nitrogen uptake and utilization, and population quality of wheat under rice-wheat rotation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023,56(4):619-634.
- [18] 赫芳芳,杨龙龙,蒋桂英,等. 水氮互作对春小麦干物质积累、转运与灌浆特性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024,42(6):93-100.
- He Fangfang, Yang Longlong, Jiang Guiying, et al. Effects of water-nitrogen interaction on dry matter accumulation, transport and grain filling characteristics of spring wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024,42(6):93-100.
- [19] 任爱霞,任婕,全锦,等. 播量对探墒沟播旱地小麦籽粒产量及品质的影响[J]. *山西农业科学*, 2020,48(11):1791-1795.
- Ren Aixia, Ren Jie, Tong Jin, et al. Effects of sowing rate on grain yield and grain quality of dryland wheat under furrow sowing [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2020,48(11):1791-1795.
- [20] 马永鑫,谭军利,韦广源,等. 减氮节水对引黄灌区春小麦耗水特征及水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2024,42(6):150-160.
- Ma Yongxin, Tan Junli, Wei Guangyuan, et al. Effects of nitrogen reduction and water saving on water consumption characteristics and water use efficiency of spring wheat in Ningxia Yellow River irrigation area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024,42(6):150-160.
- [21] 裴雪霞,党建友,张定一,等. 不同降水年型下播期对晋南旱地小麦产量和水分利用率的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2017,25(4):553-562.
- Pei Xuexia, Dang Jianyou, Zhang Dingyi, et al. Impact of sowing date on yield and water use efficiency of wheat in different precipitation years in dryland of South Shanxi[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017,25(4):553-562.
- [22] 徐婷,邱悦,魏波,等. 不同水分条件下磷肥运筹对小麦旗叶和穗部叶绿素及核酸含量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021,27(4):654-664.
- Xu Ting, Qiu Yue, Wei Bo, et al. Effect of phosphorus management on chlorophyll and the nucleic acid contents in flag leaf and ear parts of wheat under different water conditions [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2021,27(4):654-664.
- [23] 路佳慧,王爽,李云,等. 减量施氮对春小麦不同器官氮肥利用及籽粒品质的影响[J]. *作物杂志*, 2024(5):220-227.
- Lu Jiahui, Wang Shuang, Li Yun, et al. Effects of reduced nitrogen application on nitrogen utilization and grain quality in different organs of spring wheat [J]. *Crops*, 2024(5):220-227.
- [24] 张振,石玉,于振文,等. 不同产量水平麦田植株氮素转运和籽粒氮素积累的差异[J]. *中国农业科学*, 2024,57(13):2539-2548.
- Zhang Zhen, Shi Yu, Yu Zhenwen, et al. The differences of plant nitrogen transport and grain nitrogen accumulation in different yield levels of wheat field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024,57(13):2539-2548.
- [25] Li Chunhui, Chang Yonglan, Luo Yongli, et al. Nitrogen regulates stem lodging resistance by breaking the balance of photosynthetic carbon allocation in wheat [J]. *Field Crops Research*, 2023,296:e108908.
- [26] 卫乃翠,陶金博,苑名杨,等. 山西小麦苗期耐低磷特性及遗传分析[J]. *中国农业科学*, 2024,57(5):831-845.
- Wei Naicui, Tao Jinbo, Yuan Mingyang, et al. Seedling characterization and genetic analysis of low phosphorus tolerance in Shanxi varieties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2024,57(5):831-845.
- [27] 房彦飞,罗晓颖,唐江华,等. 播种方式对旱地春小麦产量、干物质及水分利用效率的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2024,26(1):173-181.
- Fang Yanfei, Luo Xiaoying, Tang Jianghua, et al. Effects of sowing methods on yield, dry matter and water use efficiency of spring wheat in dryland[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024,26(1):173-181.
- [28] Zhuang Tingxuan, Ata-UI-Karim S T, Zhao Ben, et al. Investigating the impacts of different degrees of deficit irrigation and nitrogen interactions on assimilate translocation, yield, and resource use efficiencies in winter wheat [J]. *Agricultural Water Management*, 2024,304:e109089.
- [29] Huang Xiaomeng, Xu Xinpeng, Zhu Qichao, et al. Optimizing water and nitrogen inputs for sustainable wheat yields and minimal environmental impacts [J]. *Agricultural Systems*, 2024,220:e104061.
- [30] Römhild V, Kirkby E A. Research on potassium in agriculture: Needs and prospects [J]. *Plant and Soil*, 2010,335(1):155-180.