

测墒补灌对新麦26产量、品质及耗水特性的影响

李晓航^{1,2}, 蒋志凯¹

(1.河南省新乡市农业科学院,河南 新乡 453000;2.中国农业科学院农田灌溉研究所,河南 新乡 453000)

摘要:于2015—2016年选用优质小麦品种新麦26进行大田试验,在拔节期和开花期分别设置目标相对含水量为田间持水量的70%、75%、80%进行补灌。通过3个测墒补灌处理W70、W75、W80和一个传统灌溉Wck,用全生育期补灌水(W0)为对照,研究不同生育时期和不同目标含水量的测墒补灌对冬小麦产量、耗水特性、品质等的影响。结果得出:冬小麦在拔节期和开花期补充灌水量为Wck>W80>W75>W70;四个灌水处理下冬小麦对土壤水的消耗量主要分布在0~80 cm土层且测墒补灌处理增加了对土壤水的消耗比例。三个测墒补灌处理下的冬小麦湿面筋含量显著高于Wck。水分利用效率为W75>W70>W80>Wck>W0,W70、W75、W8处理之间差异不显著。W75处理下籽粒产量显著高于W70。综合考虑不同处理的灌水量、籽粒产量和水分利用效率等指标,可得在本试验条件下在冬小麦的需水关键期(拔节期、开花期)将土壤墒情保持在田间持水量的75%为较佳灌水处理,冬小麦高产节水成效显著。

关键词:冬小麦;测墒补灌;产量;品质;耗水特性

中图分类号:S274.1 **文献标志码:**A

Effects of soil moisture monitoring based supplemental irrigation on the yield, quality and water consumption characteristics of Xinmai 26

LI Xiaohang^{1,2}, JIANG Zhikai¹

(1. Xinxiang Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang, Henan 453000, China;

2. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Water Use and Its regulation, Xinxiang, Henan 453002, China)

Abstract: In this study, a high-quality wheat variety, Xinmai 26, was used for field trials in 2015–2016 season. The targeted relative water contents were set as 70% (W70), 75% (W75), and 80% (W80) of field capacity at the jointing and flowering stages. The W70, W75, W80, and a traditional irrigation (Wck) were applied by three kinds of sputum irrigation at different growth stages and the total growth period (W0) was used as a control to study the yield and quality of winter wheat. The results showed that the supplementary irrigation amount on winter wheat at jointing and flowering stages ranged in the order of Wck>W80>W75>W70. The soil water consumption of winter wheat under four irrigation treatments was mainly distributed in 0~80 cm soil layer and the supplemental irrigation based on the soil moisture monitoring data increased the consumption of the proportion of soil water. The wet gluten content of winter wheat under three mulching irrigation treatments was significantly higher than that under Wck. The water use efficiency was ranked as W75>W70>W80>Wck>W0. The difference among W70, W75, and W80 was not significant while the grain yield under W75 treatment was significantly higher than that of W70. Considering the different treatments of irrigation amount, grain yield, and water use efficiency, it is concluded that W75 at growth critical stages, jointing and flowering, was the optimum water content for high yield and water saving in winter wheat growth season.

Keywords: winter wheat; supplemental soil moisture measurement based irrigation; yield; quality; water consumption characteristics

收稿日期:2019-01-31

修回日期:2019-10-22

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(CRAS-3-2-35);2018年河南省重大科技专项(18110011020)

作者简介:李晓航(1987-),河南安阳人,助理研究员,主要从事冬小麦育种及节水栽培方面的研究。E-mail:li.xiaohang@163.com

通信作者:蒋志凯(1966-),河南新乡人,研究员,主要从事冬小麦育种及节水栽培方面的研究。E-mail:410733138@qq.com

黄淮平原小麦产量占全国总产量的75%^[1],该地区年均小麦播种面积约为全国总面积的62%^[2]。但是从我国的水系分布图可以看出,该地区水资源量仅占全国水资源总量的7.7%,人均占有量也仅占全国平均水平的20%。黄淮地区的降雨在时空上分布不均,农业生产需水有65%可以来源于降雨,全年总降雨量的70%以上集中在7—9月份,但是冬小麦的生育关键期降水偏少,无法满足冬小麦整个生育期的需水量,需通过补充灌溉以填补其亏缺部分^[3]。补充灌溉可以缓解该区域小麦生产可持续发展中遇到的问题,大力推广高效节水栽培技术可以实现社会、经济、生态效益协调发展。

提高冬小麦水分利用效率和产量,必须要优化灌溉制度,以前的很多研究多集中在灌水量、灌溉频率及灌水时间对冬小麦产量及水分利用效率的影响方面^[4-6]。土壤贮水、降水和灌溉水是冬小麦生育期内消耗水的主要来源。随着灌水量增加,总耗水量升高,土壤贮水消耗量与灌水量呈负相关^[7-9]。冬小麦需水关键期为小麦拔节~抽穗期,此时土壤缺水可严重影响产量^[10-13]。通过在冬小麦的越冬期、拔节期、开花期灌水可实现较高的经济产量和水分利用效率^[14]。关于灌溉对冬小麦品质的影响前期研究表明,“少量多次”灌溉可实现作物节水增效及品质改善的目标^[15]。Shao等^[16]研究表明,小麦生育期内灌水90 mm可实现最大产量,如果灌水量过多则会显著引起产量和水分利用效率的降低。王晓英等^[17]的研究结果得出,灌水频率会显著影响冬小麦的品质,籽粒蛋白和湿面筋含量会随着灌水频率的增加而提高^[17]。本研究在前人研究的基础上,在冬小麦不同生育时期设置不同水分控制下限,根据0~40 cm耕层土壤中的水分含量进行补充灌溉以满足冬小麦对水分的需求,研究各个测墒补灌处理对冬小麦耗水特点及产量、品质的影响,以期待为实现测墒补灌高效灌水技术的大力推广提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2015—2016年在新乡市农科院辉县试验基地(36°9'N, 113°7'E)进行,小麦播种前0~20 cm土层土壤含有有机质14.14 g·kg⁻¹、全氮1.08 g·kg⁻¹、速效磷11.39 mg·kg⁻¹、速效钾111.2 mg·kg⁻¹、pH 8.16。小麦播种前没有进行底墒水灌溉,采用国内通用环刀法测定田间持水量。地下水位在5 m以下,试验地土壤0~140 cm各土层田间持水量

和土壤容重见表1,小麦生长全生育期的降水量见表2。

1.2 试验设计

采用优质高产强筋小麦新麦26。试验设置5个处理,W0为小麦全生育期不浇水处理,Wck为当地传统灌溉处理即采用田间畦灌(土壤表面出现积水即为灌溉完成),W70、W75和W80为烘干法测墒补灌处理,即根据烘干法测定冬小麦在拔节期和开花期0~40 cm土层深度的实测含水量与70%、75%、80%的目标相对含水量之间的差值为单次灌水量。各测墒补灌处理的测墒深度、补灌时期及补灌的目标相对含水量如表3所示。本试验运用随机区组试验设计,小区面积2.6 m×9 m,每个处理3次重复,小区之间设置隔离区,隔离区不灌水,其他管理措施与大田相同。试验地块四周设置有保护区,保护区同样不灌水。小区在田间的排列参照图1。由于测墒补灌每次灌水量一般较少,不宜采用畦田漫灌的形式,可沿畦田方向,人工拖动输水带在田间喷洒,用水表计量实际灌水量,逐个小区灌溉,完成整畦灌水。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤含水率 采用烘干法测定土壤含水率:用土钻分层取土,每20 cm为一层,取土后立即装入铝盒,盖好盖子,以防水分散失。先称铝盒与土壤鲜重的总重量,然后置于烘箱中,105℃烘干12 h至恒重,称土壤干重和铝盒重,按以下公式计算土壤质量含水量和相对含水量。土壤质量含水量=(土壤鲜重-土壤干重)/土壤干重×100%。土壤相对含水量=土壤质量含水量/田间持水量×100%。

表1 2015—2016年播种前各土层田间持水量和土壤容重
Table 1 Field capacity and soil bulk density of each soil layer in experimental field before swing in 2015-2016

土层/cm Soil layer	田间持水量/% Field capacity	土壤容重/(g·cm ⁻³) Soil bulk density
0~20	37.85	1.27
20~40	27.17	1.53
40~60	27.76	1.50
60~80	32.59	1.39
80~100	37.57	1.32
100~120	31.95	1.39
120~140	30.62	1.43

表2 小麦各个生育时期的降雨量/mm

Table 2 Precipitation at different growing stages of wheat

生长季 Growing season	播种~拔节期 Sowing to jointing	拔节~开花期 Jointing to anthesis	开花~成熟期 Antesis to maturity	总量 Total
2015-2016	120.3	22.1	34.1	174.5

表 3 各处理测墒深度、补灌时期和目标相对含水量

Table 3 Parameters of soil depth, irrigation time and target water content

处理 Treatment	测墒深度/cm Depth	补灌时期 Irrigation time			
		播种期 Seeding stage	越冬期 Winter stage	拔节期 Elongation stage	开花期 Flowing stage
W0	—	不灌水 No irrigation	不灌水 No irrigation	不灌水 No irrigation	不灌水 No irrigation
Wck	—	传统灌溉 Traditional irrigation	传统灌溉 Traditional irrigation	传统灌溉 Traditional irrigation	传统灌溉 Traditional irrigation
W70	0~40	75%	70%	70%	70%
W75	0~40	75%	70%	75%	75%
W80	0~40	75%	70%	80%	80%

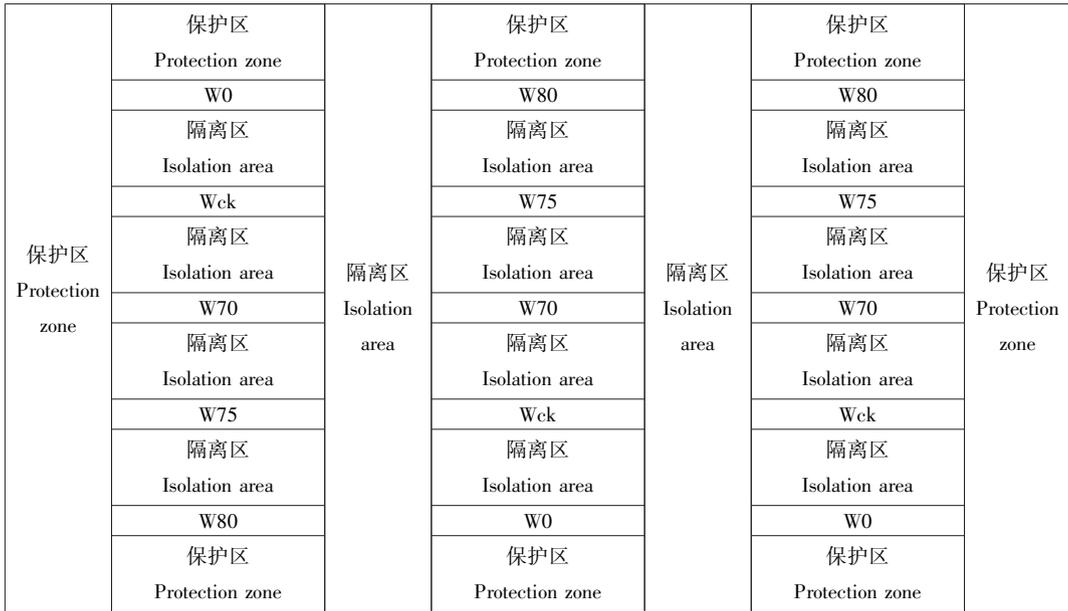


图 1 田间种植图

Fig.1 Field planting plan

1.3.2 小麦需水时期补灌量测定 测墒补灌是根据小麦关键生育时期的需水特点,设定关键生育时期的目标土壤相对含水量,根据目标土壤相对含水量和实测的土壤含水量,利用公式计算需要补充的灌水量。²

$$\text{补灌水量}(\text{m}^3 \cdot 666.7\text{m}^{-2}) = 20aH(B_1 - B_2) / 3$$

式中, a 为测墒土层土壤平均容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), H 为测墒土层深度(cm), B_1 为目标土壤质量含水量(田间持水量乘以目标土壤相对含水量); B_2 为灌溉前土壤质量含水量。

1.3.3 各生育时期群体总茎数调查 于冬前、返青、拔节、开花期定点调查群体总茎数。

1.3.4 籽粒产量及构成因素 将 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方内的小麦全部收获脱粒,待籽粒自然风干至含水率为 12.5% 时称量。此外,另取 3 个长度为 50 cm 样段,测定穗数、穗粒数及千粒质量。

1.3.5 小麦籽粒品质测定 利用新乡市农业科学院小麦品质实验室器材,用旋风磨(Foss 公司,美

国)制作全麦粉。利用 2200 型面筋数量和品质测定系统(erten 公司,瑞典),按 GB/T 5506.2—2008 方法测定湿面筋含量;用 Perten Centdfuge 2015 离心机的面筋筛测定面筋指数,即面筋筛上留存的面筋/(面筋筛上留存的面筋+过筛的面筋) $\times 100$ 。

1.3.6 麦田耗水量

麦田耗水量(mm) = 小麦全生育期总灌水量(mm) + 小麦全生育期有效降水量(mm) + 小麦全生育期土壤贮水消耗量(mm)

首先,记录小麦生育期间降水量和灌水量。小麦全生育期土壤贮水消耗量为 0~200 cm 土层土壤贮水消耗量,按照下式计算:

土壤贮水消耗量(mm) = $10 \times (0 \sim 200 \text{ cm 土层土壤平均容重}) \times 200 \times (\text{播种期灌水前 } 0 \sim 200 \text{ cm 土层平均质量含水量} - \text{成熟期 } 0 \sim 200 \text{ cm 土层平均质量含水量})$

1.3.7 水分利用效率和灌溉水效益的计算

水分利用效率指麦田每消耗 1 mm 水生产的小

麦籽粒产量,表示水分利用程度的高低。

水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$) = 籽粒产量 ÷ 麦田耗水量;

灌溉水利用效率 IWUE($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$) = 籽粒产量 ÷ 灌溉水量;

灌溉效益 IB($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$) = 灌溉后增加的籽粒产量 ÷ 灌溉水量。

2 结果与分析

2.1 不同处理的新麦26全生育期群体变化的影响

试验数据分析结果如图2可得,不同处理下的新麦26群体数量变化规律一致,在拔节期群体数量达到最高值。本年度冬季土壤墒情较好,W0、Wck、W70、W75、W80五个处理在越冬期群体数量均为1000万~1100万穗· hm^{-2} ,不同处理之间没有出现显著差异。后期根据试验设计的目标补灌量处理的不同,冬小麦发育受到土壤含水量的水分调控,开始出现差异,尤其到开花期W0处理由于完全没有灌水,冬小麦生长发育受到水分胁迫,群体数量显著低于其它灌水处理。但是Wck和W80属于“高水”处理,两者差异不显著,W70和W75可以满足冬小麦生长需水量,两个处理下的冬小麦并未出现群体分蘖显著减少,造成最后的减产。由此可得,冬小麦在拔节、开花期的水分处理控制下限在70%~75%是适宜的。

2.2 不同测墒补灌处理的补灌量比较

由表4的试验数据可知,依据冬小麦需水关键期的0~40 cm土壤含水量和试验设置的目标含水量计算出补充灌水量有所不同。由于播种时期的墒情较好和冬季降水满足冬小麦出苗期和越冬期的水分需要,土壤含水量达到了目标含水量因而未进行底墒和越冬期灌水。Wck、W70、W75、W80四个灌水处理在两次灌水量和总灌水量之间差异显著,

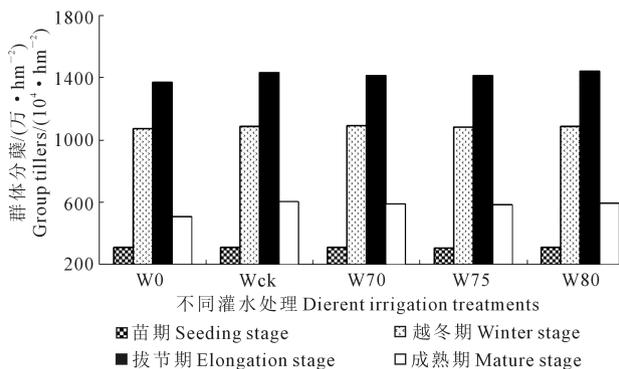


图2 不同测墒补灌处理对冬小麦群体的影响

Fig.2 Effect of different sputum irrigation treatments on winter wheat population

即Wck>W80>W75>W70。Wck处理的灌水标准则是依据试验小区内是否出现积水。当地常规灌水量一般在60mm左右,这种灌溉通常超过田间持水量造成土壤径流和渗水,水资源浪费严重。W70、W75、W80根据土壤实际墒情和试验设定的目标含水量进行灌溉,这三个处理下得出的拔节期灌水量普遍低于开花期灌水量,即冬小麦生育前期测墒补灌量偏少,在开花期补灌需水量增加显著。这是由于开花后光合作用增强,气温升高使蒸腾作用加强,作物需水量较大,但是只需保证正常生长需求即可,否则过多的无效蒸腾蒸发加剧水量消耗。在冬小麦需水关键期(拔节期、开花~灌浆期)及时进行适当水量补充,契合冬小麦生长发育的需水规律,实现水分高效利用^[18]。

2.3 不同测墒补灌处理对0~200 cm土层土壤贮水消耗量的影响

从图3可以看出,Wck处理在0~40 cm浅土层的土壤贮水消耗量显著高于其它灌水处理。过多的水分处理不利于小麦纵向生长、吸收深层土壤水,使得浅层根系发育过旺,浅层土壤贮水消耗量偏多;所有处理中0~80 cm土层中的土壤贮水消耗量较多,80~200 cm土层土壤贮水消耗量较少。这说明0~80 cm土层中的水分是冬小麦生长发育所需水分的主要来源。而且5个处理均表现出在0~60 cm土层中的土壤贮水消耗量随着土层加深不断增加,60~200 cm土层则随着土层深度的增加土壤贮水消耗量减少。W80处理0~60 cm土层的土壤贮水消耗量显著高于W70、W75,在140~180 cm土层的土壤贮水消耗量则显著小于W70、W75。Wck与W80处理在0~200 cm各个土层中土壤贮水消耗量没有显著性差异,Wck和W80的“高水”处理不利于冬小麦对深层土壤中水分的利用,不利于冬小麦根系的纵向生长。

表4 不同处理冬小麦不同生育期的补灌量及全生育期总灌水量/mm

Table 4 Supplemental irrigation at different growth stages and total irrigation amount during the whole growth period

处理 Treatment	越冬水 Water at wintering stage	拔节水 Water at jointing stage	开花水 Water at anthesis stage	总灌水量 Total irrigation amount
W0	0	0.0	0.0	0.0
Wck	0	60.0a	60.0a	120.0a
W70	0	20.4d	31.1d	51.4d
W75	0	26.3c	40.5c	66.8c
W80	0	31.2b	51.3b	82.5b

注:同列不同小写字母表示不同处理差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters within the same column meant significant difference among different treatments at 0.05 level.

2.4 不同测墒补灌处理冬小麦耗水量及其占总耗水量比例

如表 5 所示,在 2015—2016 年冬小麦生长季,各个灌水处理下冬小麦整个生育期总耗水量显著大于 W0 不灌水处理,土壤水和降水占总耗水量的比重较大。其中 3 个测墒补灌处理(W70、W75、W80)的降水利用比例和土壤水利用比例都高于传统灌溉处理,尤其是对降水的利用比例显著高于传统灌水高于传统灌水处理,各处理对降水的利用比例大小依次是 W0>W70>W75>W80>Wck,不同处理之间差异显著;土壤水是作物生长和生存的物质基础,长期过多的依赖消耗土壤水势必会影响土壤中生态环境,测墒补灌处理随着水分控制下限的提高加大了对土壤水的消耗,因此要选择适宜的水分控制下限,这样既能满足作物生长发育的需求又不破坏土壤水环境。水分亏缺促进冬小麦对降水的利用以维持正常的生长发育。以上结果表明,W70、W75、W80 依据 0~40 cm 土层土壤相对含水量进行测墒补灌,其补灌量均较 Wck 处理的补灌量小,促进了冬小麦对土壤贮水和降水的吸收利用,有利于节约灌溉水

2.5 不同测墒补灌处理对冬小麦籽粒品质的影响

根据表 6 得出的试验数据可知,冬小麦籽粒容重在 W0 处理下显著低于其他灌水处理,严重的水

分亏缺会造成冬小麦后期籽粒灌浆不足,造成籽粒容重降低。随着目标土壤相对含水量的增加,籽粒容重亦随之增大,呈现变化规律为 W80>W75>W70,W75 与 W80 处理之间差异不显著,W70 与 W80 之间差异显著,W75、W80 与 Wck 相比则没有出现籽粒容重显著降低。三个测墒补灌处理对冬小麦实施在特定生育时期水分限量供应并没有对籽粒容重产生影响。当目标土壤相对含水量设定在 75%~80%之间时,既可以减少灌溉水的投入,又不会影响籽粒容重。就不同灌水处理对籽粒湿面筋的影响而言,W70、W75、W80 三个处理与 Wck 相比显著提高了冬小麦的湿面筋含量。面筋指数则是灌水处理(Wck、W70、W75、W80)都大于未灌水处理(W0),且 W70、W75、W80 处理下的面筋指数高于 Wck,这与前人研究得出冬小麦在适宜的节水灌水处理下有利于籽粒品质改善的结论一致^[19]。

2.6 不同测墒补灌处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响

Wck 处理下的籽粒产量最高,为 7 515 kg·hm⁻²,显著高于 W0、W70、W80 处理,但与 W75 处理差异不显著。在 W70、W75、W80、Wck 处理下随着灌水量的增加,籽粒产量不断增加,增加幅度变小。测墒补灌处理下的水分利用效率、灌溉水利用效率、灌溉效益都高于常规传统灌溉处理,尤其是灌溉

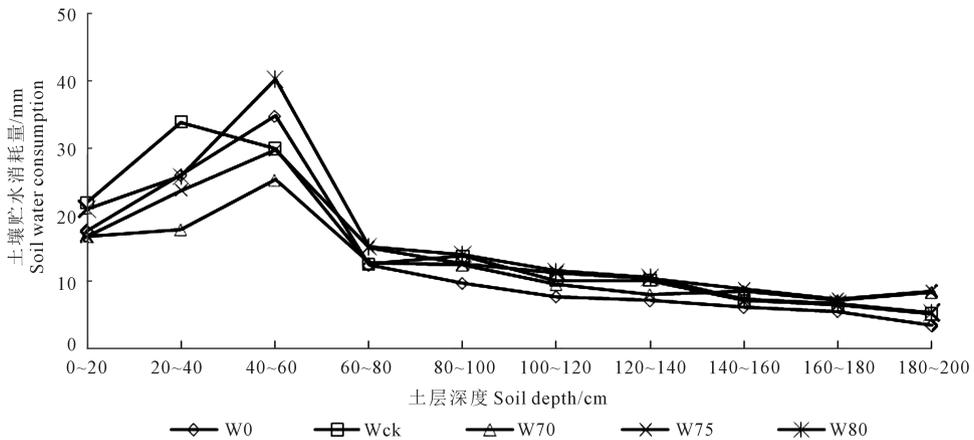


图 3 不同测墒补灌处理对各个土层土壤贮水消耗量

Fig.3 Soil water consumption in each soil layer by different irrigation treatments

表 5 不同处理耗水来源及其占总耗水量的比例

Table 5 Sources of water consumption under different treatments and their proportion of total water consumption

处理 Treatment	灌溉水 Irrigation		降水 Precipitation		土壤水 Soil water		总耗水量/mm Total water consumption
	数量/mm Amount	比例/% Percentage	数量/mm Amount	比例/% Percentage	数量/mm Amount	比例/% Percentage	
W0	0.00	0.00	174.5	57.9a	127.4a	42.1a	301.9d
Wck	120.0a	27.0a	174.5	39.4e	150.2a	33.5b	444.7a
W70	51.4d	14.7d	174.5	50.0b	123.4a	35.3b	349.3c
W75	66.8c	17.5c	174.5	45.8c	139.6a	36.6ab	380.9bc
W80	82.5b	20.1b	174.5	42.5d	154.3a	37.4ab	411.3ab

水利用效率和灌溉效益均显著提高。在三个水分控制下限的不断增大情况下,补灌处理的灌溉水利用效率却是显著降低。水分利用效率和灌溉效益的最大值出现在 W75 处理下,灌溉水利用效率的最大值则出现在 W70 处理下。可表明冬小麦需水关键期将其水分下限控制在 70%~75% 范围内较为合适。随之可得:在冬小麦生育需水关键期,适当的水分胁迫可增加其对水分的利用效率,促使水分较多地用于籽粒形成的生理过程,测墒补灌有益于提高地面灌溉的精确度和灌溉质量,减少水资源浪费。

表7 不同灌水处理冬小麦籽粒产量、水分利用效率

Table 7 Grain yield, water use efficiency, irrigation water use efficiency, and irrigation benefit of winter wheat under different treatments

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield /(kg·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	灌溉水利用效率 Irrigation water use efficiency /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)	灌溉效益 Irrigation benefit /(kg·hm ⁻² ·mm ⁻¹)
W0	5284d	17.56b	—	—
Wck	7515a	17.13b	63.27d	19.23c
W70	6711c	18.83ab	130.47a	27.73b
W75	7355ab	19.33a	110.13b	31.00a
W80	7370b	17.93ab	89.43c	25.83b

表6 2015—2016年度不同灌水处理下冬小麦的籽粒特性

Table 6 Grain characteristics of winter wheat under different irrigation treatments in 2015–2016

处理 Treatment	容重/(g·L ⁻¹) Bulk weight	湿面筋含量/% Wet gluten content	面筋指数/% Gluten index
W0	743.67c	33.02a	54.73a
Wck	760.83a	32.64b	57.56a
W70	751.67b	34.96a	61.79a
W75	757.33ab	34.23a	61.75a
W80	760.00a	34.12a	60.17a

3 讨论与结论

为解除河南北部冬小麦产业发展的限制瓶颈,提高水分利用效率、维持产量稳定和改良品质必须改进传统灌溉方式。寻求冬小麦合理的需水关键期以及适宜的灌水量也是降低其生育期耗水量及提高水分利用效率的主要途径。易立攀等^[20]得出:依据 0~40 cm 土层测墒补灌不仅在生产上易实现,而且有利于减少补灌量,促进对深层土壤水的消耗。前人研究认为,越冬水和拔节水是强筋小麦需水关键时期,不主张花后灌水^[21]。拔节期灌水处理 100 cm 土层以下的土壤水利用效率高于其它生育时期灌水^[22]。本试验在前人研究的基础上,设定在冬小麦需水关键时期(拔节期、开花期),通过测定 0~40 cm 土层墒情进行不同水分下限的精准补灌。本研究结论得出,W70、W75、W80 三个处理拔节期补灌量均少于开花期,随着补灌量增加,土壤贮水消耗量、土壤水利用效率和深层土壤水利用量减少。明确以土壤墒情为前提进行补灌有利于冬小麦抗旱锻炼,增强对土壤水和降水的利用,降低对灌溉水的依赖程度。

有研究表明,冬小麦籽粒品质会由于生育后期灌水而降低,籽粒中蛋白质含量随着灌水量的增加显著减少^[23-24]。王晨阳等^[25]研究结论得出,花后灌水量增加造成籽粒各品质性状显著减低^[25]。

W70、W75、W80 处理下的湿面筋含量和面筋指数均高于 Wck 处理,由此得出,一定程度下的水分亏缺有利于品质的提高。在降水量为 174.5 mm 前提下,W75 处理下的总灌水量为 66.79 mm,籽粒产量为 7 355 kg·hm⁻²,比传统灌溉补灌量减少 44%,而籽粒产量无显著减少,水分利用效率、灌溉水利用率、灌溉效益都显著提高。综合考虑籽粒产量、籽粒品质和水分利用效率等因子,在本试验条件下的 W75 处理是最佳处理。本试验根据土壤墒情和冬小麦本身需水特性相结合来确定灌水量,充分发挥降水和土壤贮水的作用,最终可实现冬小麦高产高效的节水栽培模式。该模式并未增加过多复杂程序和成本投入,便于农业生产上推广应用,是改良地面灌溉的新方式。此研究是基于河南北部气候土壤条件,对该地区强筋小麦新麦 26 具有参考价值,但如果加大推广面积还需要进一步加强研究,切实解决不同地域农业灌溉问题。

参考文献:

- [1] 科学技术部中国农村技术开发中心组.节水农业在中国[M].北京:中国农业科学技术出版社,2006:20.
- [2] Zwart S J, Bastiaanssen W G M, Fraiture C D, et al. A global benchmark map of water productivity for rainfed and irrigated wheat [J]. Agriculture Water Management, 2010, 97:1617-1627.
- [3] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain [J]. Agriculture Water Management, 2006, 85:211-218.

- [4] Liu X W, Shao L W, Sun H Y, et al. Responses of yield and water use efficiency to irrigation amount decided by pan evaporation for winter wheat [J]. *Agriculture Water Management*, 2013, 129:173-180.
- [5] Yang N, Wang Z H, Gao Y J, et al. Effects of planting soybean in summer fallow on wheat grain yield total N and Zn in grain and available N and Zn in soil on the Loess Plateau of China [J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 58:63-72.
- [6] Li J M, Inanaga S, Li Z H, et al. Optimizing irrigation scheduling for winter wheat in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 76:8-23.
- [7] 姚凤娟, 贺明荣, 李飞, 等. 花后灌水次数对强筋小麦籽粒产量和品质的影响 [J]. *应用生态学报*, 2008, 19(12): 2627-2631.
- [8] 吴永成, 张永平, 周顺利, 等. 不同灌水条件下冬小麦的产量、水分利用与氮素利用特点 [J]. *生态环境*, 2008, 17(5): 2082-2085.
- [9] 于利鹏, 黄冠华, 刘海军, 等. 喷灌水量对冬小麦生长、耗水与水分利用效率的影响 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2031-2037.
- [10] Zhang H P, Oweis T. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region [J]. *Agricultural Water Management*, 1999, 38:195-211.
- [11] Zhang X Y, Pei D, Hu C S. Conserving groundwater for irrigation in the North China Plain [J]. *Irrigation Science*, 2003, 21:159-166.
- [12] 孙宏勇, 刘昌明, 张永强, 等. 不同时期干旱对冬小麦产量效应和耗水特性研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(2): 13-16.
- [13] 肖俊夫, 刘战东, 段爱旺, 等. 不同灌水处理对冬小麦产量及水分利用效率的影响研究 [J]. *灌溉排水学报*, 2006, 25(2): 20-23.
- [14] 张忠学, 于贵瑞. 不同灌水处理对冬小麦生长季水分利用效率的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(2): 1-4.
- [15] 李全起, 沈加印, 赵丹丹. 灌溉频率对冬小麦产量及叶片水分利用效率的影响 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(3): 33-36.
- [16] Shao L W, Zhang X Y, Sun H Y, et al. Yield and water use response of winter wheat to winter irrigation in the North China Plain [J]. *Soil Water Conservation*, 2011, 66(2): 104-113.
- [17] 王晓英, 贺明荣, 杨洪斌, 等. 灌水频次对强筋小麦蛋白质组含量、粒度分布和品质的影响 [J]. *中国粮油学报*, 2010, 25(1): 7-12.
- [18] 盛坤, 杨丽娟, 蒋志凯, 等. 不同灌水处理对强筋小麦新麦 19 产量及品质的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(5): 41-47.
- [19] 许振柱, 于振文, 王东, 等. 灌溉条件对小麦籽粒蛋白质组积累及其品质的影响 [J]. *作物学报*, 2003, 29(5): 682-687.
- [20] 易立攀, 于振文, 张永丽, 等. 不同土层测墒补灌对冬小麦耗水特性及产量的影响 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1361-1366.
- [21] 王育红, 姚宇卿, 吕军杰, 等. 水分调控对强筋小麦产量和品质影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2006, 24(6): 25-28.
- [22] 刘耕山, 郭安红, 任三学, 等. 人工控制有限供水对冬小麦根系生长季土壤水分利用的影响 [J]. *生态学报*, 2003, 23(11): 2342-2352.
- [23] DU T S, Kang S Z, Sun J S, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in North China [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(1): 66-74.
- [24] Geerts S, Raes D. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(9): 1275-1284.
- [25] 王晨阳, 郭天财, 彭羽, 等. 花后灌水对小麦籽粒品质性状及产量的影响 [J]. *作物学报*, 2004, 30(10): 1031-1035.

(上接第 85 页)

- [28] Simunek J, Sejna M, Van G M T. The HYDRUS software package for simulating two-and three dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media, version 1.0 [M]. University of California, Riverside; Department of Environmental Sciences, 2007:248-261.
- [29] Simunek J, Van G M T, Sejna M. The HYDRUS software package for simulating two-and three dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated porous media, technical manual, version 2.0 [M]. University of California, Riverside; Department of Environmental Sciences, 2012:258-260.
- [30] Simunek J, Van G M T, Sejna M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer packages [J]. *Vadose Zone Journal*, 2016, 15(17): 1-25.
- [31] Van G M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5): 892-898.
- [32] 李虹辰. 黄土丘陵区鱼鳞坑覆盖组合措施枣树水分耗散机制研究 [D]. 咸阳杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [33] 邵东国, 杨霞, 徐保利, 等. 南方丘陵区多层土壤结构水平和垂向渗流特征试验与模拟研究 [J]. *水利学报*, 2017, 48(7): 799-807.
- [34] Cai Y H, Wu P T, Zhang L, et al. Simulation of soil water movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter [J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 192:244-256.
- [35] 范严伟, 邵晓霞, 王英, 等. 垂直线源灌土壤湿润体尺寸预测模型研究 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 336-346.
- [36] 潘岱立, 赵西宁, 高晓东, 等. 基于 VFSMOD 模型的黄土坡面草带产流产沙动态模拟 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 119-125.
- [37] Willmott C J. Some comments on the evaluation of model performance [J]. *Bull. Am Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1982, 63(11): 1309-1313.
- [38] Moriasi D N, Arnold J G, Vanliew M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations [J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(3): 885-900.
- [39] Zhang Y Y, Wu P T, Zhao X N, et al. Simulation of soil water dynamics for uncropped ridges and furrows under irrigation conditions [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2013, 93: 85-98.
- [40] Ebrahimian H, Liaghat A, Arsinjad M, et al. Simulation of 1D surface and 2D subsurface water flow and nitrate transport in alternate and conventional furrow fertigation [J]. *Irrigation Science*, 2013, 31: 301-316.
- [41] Ma L H, Wu P T, Wang Y K. Spatial distribution of roots in a desajujube plantation in the semiarid hilly region of the Chinese Loess Plateau [J]. *Plant and Soil*, 2012, 354: 57-68.