

喷灌定额和灌水频次对冬小麦产量及品质的影响分析

周丽丽¹ 薛彬¹ 孟范玉² 李晶晶¹ 臧文静¹ 严海军¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 北京市农业技术推广站, 北京 100029)

摘要: 为了解圆形喷灌机不同灌溉定额和灌水频次对冬小麦产量及籽粒品质的影响,于2014—2016年在北京市顺义区进行了水肥一体化大田试验,共设置3种灌水处理(W1、W2、W3),其中2014—2015年灌溉定额分别为135、112.5、90 mm,2015—2016年分别为154.5、132、109.5 mm。每种处理在冬小麦的返青-拔节、拔节-抽穗和抽穗-灌浆期土壤含水率分别达到田间持水量的70%、75%和75%时进行灌水。每个生育时期又按灌水定额设置为1次灌水(C1)和均分成2次灌水(C2),其中C2处理2次灌水时间间隔为9 d。试验结果表明,冬小麦拔节-抽穗期的阶段耗水量和日均耗水量均最大,W1处理产量最高。2015—2016年灌溉定额与灌水频次对水分利用效率的影响均不显著,但水分利用效率有随灌溉定额增加而降低的趋势,最大水分利用效率为W3处理的2.28 kg/m³。在W1和W2处理下,分2次灌水有利于提高冬小麦的穗数、产量和容重等指标,其中W1C2组合获得最高产量9 286.4 kg/hm²。灌溉定额与灌水频次组合对产量的效应中,灌溉定额起主导作用。建议北京地区冬小麦在圆形喷灌机条件下采用W1C2灌水方案,在返青-拔节、拔节-抽穗、抽穗-灌浆期分别灌水45、55.5、54 mm,且均分成2次灌水。

关键词: 冬小麦; 灌溉定额; 灌水频次; 产量; 品质; 圆形喷灌机

中图分类号: S275.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)01-0235-09

Effects of Irrigation Quota and Irrigation Frequency on Yield and Quality of Winter Wheat under Sprinkler Irrigation System

ZHOU Lili¹ XUE Bin¹ MENG Fanyu² LI Jingjing¹ ZANG Wenjing¹ YAN Haijun¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Beijing Agro-technology Extension Station, Beijing 100029, China)

Abstract: To explore the effects of different irrigation quotas and irrigation frequencies on winter wheat yield and grain quality under center pivot irrigation system, a field experiment on fertigation of winter wheat was carried out in 2014—2016 at Shunyi District, Beijing. Three irrigation treatments (W1, W2 and W3) were investigated with irrigation quotas of 135 mm, 112.5 mm and 90 mm in 2014—2015, and 154.5 mm, 132 mm and 109.5 mm in 2015—2016, respectively. Irrigations were applied at recovering-jointing stage, jointing-heading stage and heading-grain filling stage respectively, as the soil water content reached 70%, 75% and 75% of the field capacity, respectively. Each irrigation was sprayed at one time (C1) or at two times (C2) with equal irrigation amount at 9 d interval. The results showed that both the total water consumption and the average daily consumption of winter wheat from jointing to heading stage were the largest, and the highest yield was achieved under W1 treatment. The effects of the irrigation quota and irrigation frequency on water use efficiency were not significant in 2015—2016. The water use efficiency was decreased with the increase of irrigation quota, and the largest water use efficiency was 2.28 kg/m³ at W3 treatment. Under the treatments of W1 and W2, the irrigation at two times can improve the spike number, yield and bulk density of winter wheat. The maximum yield was 9 286.4 kg/hm² under the treatment of W1C2. The irrigation quota had more effect on wheat yield than irrigation frequency. Comprehensively, an effective method of irrigation was suggested for winter wheat in Beijing at recovering-jointing, jointing-heading and heading-grain filling stages with 45 mm, 55.5 mm and 54 mm, respectively. Each irrigation could be applied equally at two times under center pivot irrigation system.

Key words: winter wheat; irrigation quota; irrigation frequency; yield; quality; center pivot irrigation system

收稿日期: 2017-08-04 修回日期: 2017-10-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201502)、国家自然科学基金项目(51621061)和北京市粮经创新团队项目

作者简介: 周丽丽(1985—),女,博士后,主要从事作物栽培生理与信息化技术研究,E-mail: zhoulili@cau.edu.cn

通信作者: 严海军(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉技术与装备研究,E-mail: yanhj@cau.edu.cn

0 引言

华北地区是我国粮食主产区,小麦产量占全国小麦总产量的75%^[1]。水资源紧缺且分配不均,严重制约着该区小麦产业的发展。冬小麦生育时期耗水量较大,通常情况下高产冬小麦的整个生育时期需水量高于400 mm^[2-4],而同期降水量较少,因此补充灌溉是冬小麦高产栽培的重要措施。该地区农业灌溉主要采用机电井供水,井灌面积占全区农田有效灌溉面积的67.6%。由于地下水资源的过度开发,华北地区已经成为全国最大的地下水超采区,为此“十二五”期间国家启动了华北地区节水压采行动,大力发展喷灌和微灌等高效节水灌溉技术。圆形喷灌机喷灌作为一种重要高效节水灌溉技术,具有自动化程度高、控制面积大、运行成本低等优点^[5-6],近年来在华北地区得到了快速发展,主要应用于冬小麦、夏玉米、苜蓿等农作物。

前人研究结果表明,“少量多次”灌溉,可以实现作物节水增产及改善品质的目的。李全起等^[7]研究发现,总灌水量120 mm时,在拔节期和抽穗期各灌溉60 mm的产量显著高于拔节期一次灌溉120 mm的产量,水分利用效率也有显著提高。王晓英等^[8]研究认为,灌水频次对冬小麦的品质有显著影响,发现随着灌水频次的增多,籽粒蛋白质及湿面筋含量显著提高。在滴灌水肥一体化技术研究方面,蒋桂英等^[9]研究发现,在总灌水量375 mm时,中频灌溉(每7 d一次)与高频灌溉(每4 d一次)、低频灌溉(每10 d一次)相比,小麦产量分别增加7.6%及13.5%,水分利用效率提高2.6%及9.9%,表明适宜的灌水频次有利于提高冬小麦产量及水分利用效率。在微喷水肥一体化技术研究方面,张英华等^[10]研究发现,在总灌水量150 mm时,相对于2次微喷冬小麦全生育期的多次微喷(3次或4次)能使产量提高5.3%~18.9%,水分利用效率提高5.3%~27.8%。在喷灌水肥一体化技术方面,SPALDING等^[11]研究发现,圆形喷灌机水肥一体化与沟灌玉米相比,节水和节氮分别为66%及37%,且能显著减少土壤氮素淋失。圆形喷灌机操作简便,结合水肥一体化技术,易实现少量多次灌溉与施肥,课题组曾开展了圆形喷灌机条件下冬小麦灌溉施肥制度研究^[12],但是关于灌溉定额和灌水频次对冬小麦生长、产量及品质的影响研究尚未见报道。

本文在已有研究的基础上,围绕圆形喷灌机不同灌溉定额及灌水频次对冬小麦的生长、产量及品质的影响进行水肥一体化试验,旨在寻求适宜的冬

小麦水肥一体化技术模式和灌溉管理制度,为圆形喷灌机水肥一体化技术推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2014—2016年在北京市顺义区赵全营镇万亩示范基地进行(40°18'N,116°28'E,海拔高度约35 m),试验区属于暖温带半湿润大陆性季风气候,2015—2016年平均气温为13.0℃,年日照时数为2 478 h,年均相对湿度为50%,多年平均降水量为585 mm,其中6—8月集中了全年降水量的75%。2014—2015年及2015—2016年冬小麦生长季(当年10月至次年6月)有效降水量分别为125.3 mm和160.2 mm。试验区土壤质地为粉质壤土,0~80 cm土层平均田间持水量为29.8%,容重为1.55 g/cm³,耕层土壤有机质质量比为12.8 g/kg,硝态氮质量比为2.47 mg/kg,铵态氮质量比为30.47 mg/kg,有效磷质量比为26.4 mg/kg,速效钾质量比为82.0 mg/kg,pH值为7.8。

1.2 试验设计

试验用冬小麦品种为农大211,分别于2014年10月1日和2015年9月30日播种,行距为15 cm,播种深度为4 cm。表1是冬小麦不同生育时期灌水定额,越冬期各处理统一灌水,第1年越冬期灌水45 mm,第2年越冬期有效降水量为45.2 mm,故未进行越冬期灌水。从返青至灌浆期设置不同灌水处理,2014—2015年设置了3种灌溉定额处理(135、112.5、90 mm,分别记作W1、W2、W3);2015—2016年设置了3种灌溉定额处理(154.5、132、109.5 mm,分别记作W1、W2、W3)与2种灌水频次处理(1次灌水和均分成2次灌水,2次灌水时间间隔9 d,分别记作C1、C2),形成了6种灌溉处理,分别为W1C1、W1C2、W2C1、W2C2、W3C1、W3C2。根据冬小麦不同生育时期需水特点,在返青-拔节、拔节-抽穗和抽穗-灌浆期的灌水下限依次设定为田间持水量的70%、75%和75%。同时在各处理的每个试验小区取3个点测定平均土壤含水率。冬小麦返青和拔节期取0~50 cm土层深度,抽穗和灌浆期取0~80 cm土层深度。通过设定圆形喷灌机的百分率计时器数值,调整圆形喷灌机的行走速度,实现不同的灌水处理。

两年试验施肥处理相同,追肥采用圆形喷灌机水肥一体化技术,选用泵注式施肥装置,确保施肥均匀^[13]。施用底肥量为:750 kg/hm²的复合肥(N:P:K为17:20:8)和150 kg/hm²的磷酸二铵(N:P₂O₅为15:42),折合N为155 kg/hm²、P₂O₅为213 kg/hm²、

K₂O 为 60 kg/hm²。追肥分别在返青-拔节、拔节-抽穗和抽穗-灌浆期进行,肥料为水溶肥(N:P:K 为 27:12:14)及尿素(含氮 46.7%),折合 N 为 145 kg/hm²、P₂O₅ 为 22.5 kg/hm²、K₂O 为 30 kg/hm²。图 1 是试验布置图,2014—2015 年试验共 3 个处理,每个处理重复 3 次,共有 9 个小区;2015—2016 年试验共 6 个处理,每个试验处理设置 3 个重复,共有 18 个 7 m×10 m 试验小区;每个小区内取 3 个 1 m×1 m 样方进行观测记录。C1 和 C2 处理的施

肥量相同,C2 处理仅在第一次灌水时施肥。为避免不同处理间影响,同一处理内不同试验小区的间距为 13.5 m,不同处理间相邻试验小区的间距为 36 m。试验用圆形喷灌机共 3 跨,每跨长度为 61 m,末端悬臂长度为 21 m,整机长度为 204 m。选用美国 Nelson 公司生产的 D3000 低压喷头,尾枪为意大利 Sime 公司的 K1 型摇臂式喷头。喷灌机由 2 眼机井联合供水,入机压力为 0.17 MPa,入机流量为 71 m³/h。

表 1 冬小麦不同生育时期灌水定额

Tab.1 Irrigation amount for winter wheat at different growth stages

年份	处理	灌水量/mm			
		返青-拔节	拔节-抽穗	抽穗-灌浆	合计
2014—2015	W1	37.5	45.0	52.5	135.0
	W2	30.0	37.5	45.0	112.5
	W3	22.5	30.0	37.5	90.0
2015—2016	W1C1	45.0	55.5	54.0	154.5
	W1C2	22.5 + 22.5	27.75 + 27.75	27.0 + 27.0	154.5
	W2C1	37.5	48.0	46.5	132.0
	W2C2	18.75 + 18.75	24.0 + 24.0	23.25 + 23.25	132.0
	W3C1	30.0	40.5	39.0	109.5
	W3C2	15.0 + 15.0	20.25 + 20.25	19.5 + 19.5	109.5

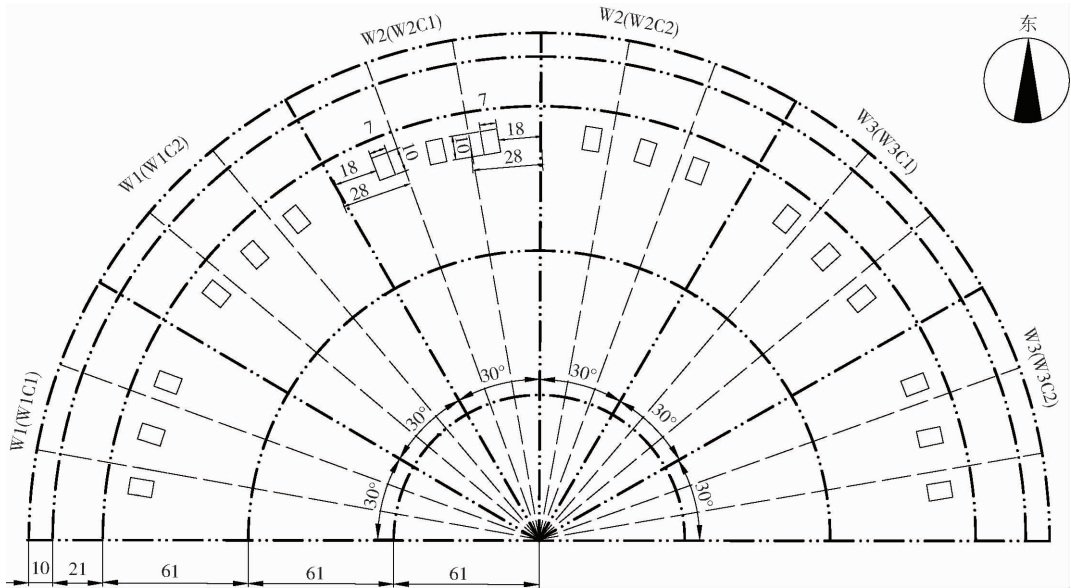


图 1 试验布置图

Fig.1 Test plot layout

1.3 测定指标与方法

1.3.1 气象数据

利用安装在试验地的田间气象站对降水量、风速、风向、空气温湿度、太阳辐射、日照时数等气象数据进行采集。

1.3.2 土壤含水率

采用烘干法测定土壤含水率,用土钻取 0 ~ 80 cm 土层土样,土层分为 0 ~ 20 cm、20 ~ 50 cm、

50 ~ 80 cm,置于铝盒中,称出鲜土质量,将温度调到 (105 ± 2) °C,干燥 8 h 后称土样质量,计算土壤质量含水率。

1.3.3 冠层温度

在冬小麦拔节、抽穗、扬花、灌浆及成熟期利用 HT-8962 型手持式红外线测温仪及 Kestrel4500 型手持气象仪测量冠层温湿度。具体测定时刻为测定当天 08:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和 18:00,测

量时感应器距地面 1.5 m,并与水平呈 30°夹角瞄准试验小区内群体长势一致的植株冠层,采用对称法在试验小区内朝 4 个不同方向测量取平均值。

1.3.4 籽粒产量及构成因素

将 1 m×1 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 籽粒品质

利用 DA7200 型近红外光谱仪测定冬小麦籽粒的蛋白质质量分数、淀粉质量分数、湿面筋质量分数、容重等品质,并进行显著性分析。

1.3.6 田间持水量

采用环刀法在室内测定田间持水量。用环刀取原状土样,带回实验室内,放在盛有蒸馏水的白色搪瓷盘中,吸水饱和 24 h。在相同的土层取土样风干,将吸水饱和后的土样放在风干土上 8 h 后,取环刀上面的原状土 20 g,放入干燥箱内干燥至质量恒定,测得的土壤含水率即田间持水量。3 次重复取算术平均值。

1.3.7 作物耗水量

采用水量平衡法计算作物耗水量,水量平衡法计算公式为

$$ET = I + \Delta W + P + E_p - D \tag{1}$$

式中 ET ——阶段耗水量,mm
 I ——阶段内灌水量,mm
 ΔW ——阶段内 80 cm 深度内土壤储水变化量,mm,由于灌水前后 0~80 cm 土层未达到田间持水量,故 80 cm 以下耗水量可忽略不计
 P ——阶段内有效降水量,mm
 E_p ——阶段内地下水补给量(试验区地下水位为 40 m,故 E_p 不考虑),mm
 D ——阶段内渗漏量,mm,经计算单次灌水量或降水量进入土壤后未达到土壤最大储水量,故 D 可忽略

1.3.8 水分利用效率

水分利用效率指植株生产单位面积产量所消耗的水量,即产量与作物生育期总耗水量的比值,水分利用效率 $W(\text{kg}/\text{m}^3)^{[14]}$ 计算公式为

$$W = 0.1Y/ET \tag{2}$$

式中 Y ——籽粒单位面积产量,kg/hm²

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2013 软件绘图;利用 t 检验进行 C1、C2 处理的显著性分析;利用 SPSS 20 进行

不同灌溉定额之间以及不同灌溉定额与灌水频次组合之间的显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同灌水处理对冬小麦产量及其构成因素的影响

2014—2015 年,冬小麦籽粒产量随着灌溉定额的增加而增加,W1 处理的籽粒产量显著高于 W2 和 W3 处理($P < 0.05$),但 W2 与 W3 处理之间无显著性差异($P > 0.05$),产量最大值为 8 503.1 kg/hm² (W1),最小值为 6 615.0 kg/hm² (W3)(表 2)。从产量构成因素来看,W1 处理的穗数显著高于 W2 ($P < 0.05$),但 W2 与 W3 以及 W1 与 W3 处理之间无显著性差异($P > 0.05$)。穗粒数随着灌溉定额的增加而增加,最大值为 W1 的 28.0,最小值为 W3 的 24.7。W1 处理的穗粒数显著高于 W3 处理($P < 0.05$),但 W2 与 W3 以及 W1 与 W2 之间无显著性差异($P > 0.05$)。千粒质量随着灌溉定额的增加而增加,但处理之间无显著性差异。2015—2016 年,在相同灌水频次下,籽粒产量、穗数、穗粒数、千粒质量都有随灌溉定额增加而增加的趋势。其中,在 C1 处理下,W1、W2 和 W3 处理间产量差异显著($P < 0.05$)。穗数、穗粒数和千粒质量均表现为 W1 处理显著高于 W3 处理,但 W1 与 W2 以及 W2 与 W3 之间无显著差异($P > 0.05$)。在 C2 处理下,W1、W2 和 W3 处理间产量差异显著($P < 0.05$),在产量构成因素方面,穗数和千粒质量 3 个处理间差异显著($P < 0.05$),而穗粒数 3 个处理间差异不显著。综合所有处理,产量最大值为 W1C2 的 9 286.4 kg/hm²,最小值为 W3C2 的 7 797.6 kg/hm²。

在相同灌溉定额下,增加灌水频次有提高产量趋势,但不同灌溉定额下的表现有所不同(表 3),在 W1 和 W2 处理下,C1 和 C2 产量差异显著($P < 0.05$);在 W3 处理下,增加灌溉频次对产量无显著影响(表 3)。可见,在高灌溉定额下增加灌水频次的增产效果更明显。在产量构成因素方面,穗数、穗粒数、千粒质量在 3 种灌溉定额下,C1 与 C2 处理之间均无显著性差异($P > 0.05$),W3 时 C1 处理的穗数、穗粒数及千粒质量均高于 C2,而 W1 及 W2 时 C1 处理的穗数小于 C2。综合上述结果可见,关于灌溉定额与灌水频次对产量的影响,灌溉定额起主导作用;在 W1 和 W2 处理下,高灌水频次(C2)更有利于提高产量;在 W3 处理下,低灌水频次(C1)有利于稳产。本研究从高产的角度考虑建议采用 W1C2 处理。

表 2 不同灌水处理下冬小麦产量及产量构成因素

Tab.2 Grain yield and yield components of winter wheat for different irrigation treatments					
年份	处理	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	穗数/(个·hm ⁻²)	穗粒数	千粒质量/g
2014—2015	W1	8 503.1 ^a	7.305 × 10 ^{6 a}	28.0 ^a	42.2 ^a
	W2	7 209.4 ^b	6.410 × 10 ^{6 b}	27.2 ^{ab}	41.7 ^a
	W3	6 615.0 ^b	6.913 × 10 ^{6 ab}	24.7 ^b	39.1 ^a
2015—2016	W1C1	9 127.0 ^a	7.785 × 10 ^{6 a}	29.7 ^a	43.3 ^a
	W2C1	8 625.3 ^b	7.229 × 10 ^{6 ab}	28.9 ^{ab}	42.0 ^{ab}
	W3C1	7 992.0 ^c	7.019 × 10 ^{6 b}	28.5 ^b	40.8 ^b
	W1C2	9 286.4 ^a	7.980 × 10 ^{6 a}	29.4 ^a	43.5 ^a
	W2C2	8 843.1 ^b	7.351 × 10 ^{6 b}	28.8 ^a	41.9 ^b
	W3C2	7 797.6 ^c	6.885 × 10 ^{6 c}	28.0 ^a	39.8 ^c

注:同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

表 3 2015—2016 年相同灌溉定额、不同灌水频次的冬小麦产量及产量构成因素

Tab.3 Grain yield and yield components of winter wheat at different irrigation frequencies under the same irrigation quota in 2015—2016					
处理	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	穗数/(个·hm ²)	穗粒数	千粒质量/g	
W1C1	9 127.0	7.785 × 10 ⁶	29.7	43.3	
W1C2	9 286.4	7.980 × 10 ⁶	29.4	43.5	
Sig	0.027 [*]	7.7 × 10 ⁴	0.616	0.795	
<i>t</i>	2.526	-1.888 × 10 ⁶	0.514	-0.267	
W2C1	8 625.3	7.229 × 10 ⁶	28.9	42.0	
W2C2	8 843.1	7.351 × 10 ⁶	28.8	41.9	
Sig	0.042 [*]	6.39 × 10 ⁵	0.951	0.855	
<i>t</i>	-2.277	-4.79 × 10 ⁵	0.062	0.187	
W3C1	7 992.0	7.019 × 10 ⁶	28.5	40.8	
W3C2	7 797.6	6.885 × 10 ⁶	28.0	39.8	
Sig	0.117	6.69 × 10 ⁵	0.450	0.080	
<i>t</i>	-1.688	4.36 × 10 ⁵	0.783	1.950	

注:Sig 小于 0.05 表示 2 个处理在 0.05 水平下差异显著,下同。

2.2 不同灌水处理对冬小麦耗水量及水分利用的影响

图 2 是不同处理下冬小麦不同生育时期阶段耗水量及日均耗水量变化趋势。从返青-成熟期的阶段及日均耗水量均呈现先增加后降低的趋势,峰值出现在拔节-抽穗期。返青-拔节期由于气温回升,小麦茎数进一步增加以及植株生长需要消耗水分,植株的阶段及日均耗水量显著升高。拔节-抽穗期的阶段耗水量在第 1 年及第 2 年占全生育时期的比重分别是 29.2% ~ 31.7% 及 24.0% ~ 25.0%,日均耗水量分别是 4.4 ~ 4.8 mm/d 及 3.8 ~ 4.4 mm/d。该时期耗水量大的主要原因是冬小麦的叶面积指数增大,植株的蒸腾作用增强,根系需吸收大量水分满足植株的营养生长与生殖生长。冬小麦植株在抽穗-成熟期以生殖生长为主,茎及穗的发育需要消耗大量的水分,该时期的阶段耗水量在第 1 年及第 2 年

占全生育期的比重分别是 27.8% ~ 28.5% 及 31.7% ~ 37.1%。

由图 2 可见,2015—2016 年的灌浆-成熟期的阶段及日均耗水量均较高,主要原因是该试验年份冬小麦生长后期降水量较大,气温较高,植株蒸腾作用强,籽粒灌浆消耗大量水分,2015—2016 年总耗水量大于 2014—2015 年。

从生育期总耗水量来看,在相同灌水频次下,总耗水量随着灌溉定额的增加而增加,且灌溉定额对总耗水量的影响显著($P < 0.05$) (表 4);在相同灌溉定额下,灌水频次对总耗水量影响有所不同,由表 3 知,W2 和 W3 处理下,灌水频次对总耗水量的影响不显著($P > 0.05$),但 W1 处理下,C2 的总耗水量显著高于 C1($P < 0.05$),表明增加灌水频次能显著提高该处理总耗水量。

从水分利用效率来看(表 4、表 5),在相同灌水频次下,随着灌溉定额的增加,水分利用效率呈下降的趋势。在 C1 处理下,W1 和 W3 的水分利用效率分别为 2.22 kg/m³ 及 2.28 kg/m³,在 C2 处理下,W1 和 W3 的水分利用效率分别为 2.20 kg/m³ 及 2.28 kg/m³,但处理间差异不显著($P > 0.05$);相同灌溉定额下不同灌水频次对水分利用效率没有显著影响($P > 0.05$)。

2.3 不同灌水处理对冬小麦籽粒品质的影响

由表 6 可知,在相同灌水频次下,不同灌溉定额对蛋白质质量分数影响显著($P < 0.05$),蛋白质质量分数随着灌溉定额的增加而增加,2 个灌水频次下不同灌溉定额对蛋白质质量分数影响的变化趋势一致($P < 0.05$),这与许振柱等^[15]研究认为适宜的灌水处理有利于籽粒蛋白质积累、改善籽粒品质的结论一致。对于湿面筋来说,随着灌溉定额的增加,湿面筋质量分数呈先升高后降低的趋势,2 个灌水频次下均以 W2 处理最高,C2 处理下,W1 和 W2 处理的湿面筋质量分数显著高于 W3 处理($P > 0.05$),

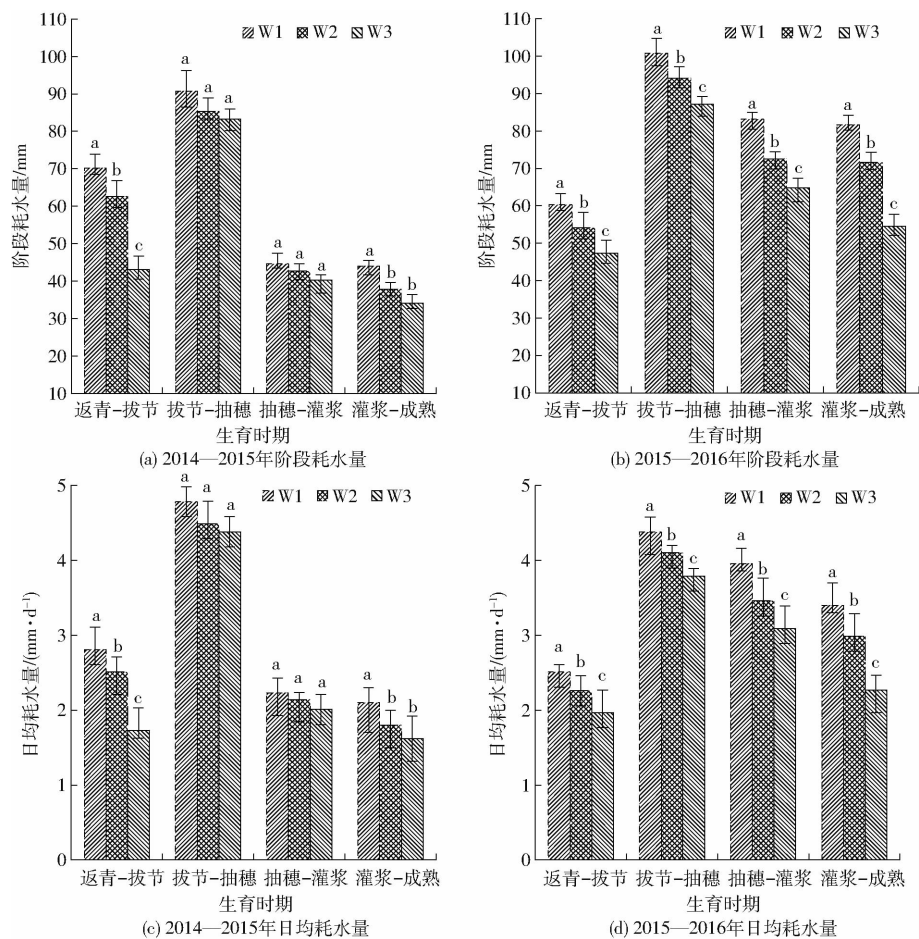


图 2 不同灌水条件下阶段耗水量及日均耗水量

Fig. 2 Water consumption and daily water consumption under different irrigation conditions

表 4 2015—2016 年相同灌水频次、不同灌水处理的
总耗水量及水分利用效率

Tab. 4 Total water consumption and water use efficiency
under the same frequency in 2015—2016

处理	总耗水量/mm	水分利用效率/(kg·m ⁻³)
C1W1	410. 62 ^a	2. 22 ^a
C1W2	379. 99 ^b	2. 27 ^a
C1W3	350. 10 ^c	2. 28 ^a
C2W1	422. 04 ^a	2. 20 ^a
C2W2	389. 09 ^b	2. 27 ^a
C2W3	341. 45 ^c	2. 28 ^a

注:同列同频次数据不同上角表示差异显著(P<0.05),下同。

W1 和 W2 处理之间差异不显著,C1 处理下,W1、W2 和 W3 处理之间无显著差异。从成熟期籽粒淀粉质量分数来看,相同灌水频次下淀粉质量分数随着灌溉定额的增加而增加,C1 处理下,W1 的淀粉质量分数显著高于 W3(P<0.05);C2 处理下,W1 的淀粉质量分数显著高于 W2 和 W3 处理。从成熟期籽粒容重来看,相同灌水频次下,容重随着灌溉定额的增加呈先增加后降低的趋势,其中,在 C1 处理下,W2 处理的容重显著高于 W1 和 W3 处理(P<0.05);C2 处理下,W1、W2 和 W3 处理之间无

表 5 2015—2016 年相同灌水量、不同灌水频次的
总耗水量及水分利用效率

Tab. 5 Total water consumption and water use efficiency
of different irrigation frequencies under the same
irrigation amount in 2015—2016

处理	总耗水量/mm	水分利用效率/(kg·m ⁻³)
W1C1	410. 62	2. 22
W1C2	422. 04	2. 20
Sig	0. 044 *	0. 692
t	-2. 894	0. 135
W2C1	379. 99	2. 27
W2C2	389. 09	2. 27
Sig	0. 223	0. 963
t	-1. 441	-0. 050
W3C1	350. 10	2. 28
W3C2	341. 45	2. 28
Sig	0. 064	1
t	2. 543	0

显著差异(P>0.05)。所有处理的籽粒容重均大于 790 g/L,达到一级小麦品质等级。

由表 7 可见,在相同灌溉定额下,C1 处理蛋白质及湿面筋的含量大于 C2 处理,淀粉质量分数及容重小于 C2 处理。这表明相同灌溉定额时,增加

灌水频次有利于提高籽粒蛋白质及湿面筋含量,灌水频次对淀粉质量分数和容重的变化规律与之相反。*t* 检验结果表明不同灌水频次对蛋白质质量分数、湿面筋质量分数、淀粉质量分数、容重均没有显著影响。以上研究结果表明,灌溉定额与灌水频次对冬小麦籽粒品质影响效应中灌溉定额起主导作用。

表 6 2015—2016 年相同灌水频次、不同灌溉定额的籽粒品质

Tab.6 Grain quality at different irrigation quotas under the same irrigation frequency in 2015—2016

处理	蛋白质质量 分数/%	湿面筋质量 分数/%	淀粉质量 分数/%	容重/ (g·L ⁻¹)
W1C1	14.05 ^a	30.64 ^a	78.50 ^a	793.00 ^b
W2C1	13.70 ^b	30.84 ^a	78.29 ^{ab}	799.67 ^a
W3C1	13.47 ^c	30.23 ^a	78.14 ^b	795.56 ^b
W1C2	13.85 ^a	30.21 ^a	78.87 ^a	797.44 ^a
W2C2	13.52 ^b	30.40 ^a	78.55 ^b	802.11 ^a
W3C2	13.29 ^c	29.71 ^b	78.42 ^b	796.78 ^a

表 7 2015—2016 年相同灌溉定额、不同灌水频次的籽粒品质

Tab.7 Grain quality at different irrigation frequencies under the same irrigation quota in 2015—2016

处理	蛋白质 量分数/%	湿面筋 质量分数/%	淀粉质量 分数/%	容重/ (g·L ⁻¹)
W1C1	14.05	30.64	78.50	793.00
W1C2	13.85	30.21	78.87	797.44
Sig	0.051	0.119	0.083	0.065
<i>t</i>	2.750	1.977	-2.304	-2.529
W2C1	13.70	30.84	78.29	799.67
W2C2	13.52	30.40	78.55	802.11
Sig	0.074	0.195	0.053	0.396
<i>t</i>	2.405	1.556	-2.723	-0.950
W3C1	13.47	30.23	78.14	795.56
W3C2	13.29	29.71	78.42	796.78
Sig	0.052	0.069	0.115	0.703
<i>t</i>	2.730	2.469	-2.009	-0.437

3 讨论

2 年试验结果均表明产量随着灌溉定额的增加而显著增加,这与汪顺生等^[16]和董志强等^[17]的研究结果不同,原因可能是本研究的灌溉定额设置范围不够大,没有达到产量峰值。2014—2015 年 W1 与 W2、W3 处理的产量差异显著,W2 与 W3 处理之间的产量差异不显著($P>0.05$),表明 W1 处理的产量较优。灌溉定额对穗数的影响显著,穗数在对产量影响的要素中起到了主导作用。2015—2016 年灌水频次一定时,冬小麦产量随灌溉定额的

增加而增加,且不同灌溉定额之间的产量差异显著。W1C2 处理显著高于 W1C1 处理,对其产量构成要素分析,可知 C2 处理的穗数及千粒质量要高于 C1,这与姚素梅等^[18]研究结果相近,表明 C2 处理的有效茎数大于 C1。C2 处理的分 2 次灌水有利于根系吸收 0~50 cm 土壤水分,进而减少无效分蘖,有利于提高产量。

本研究结果表明冬小麦在拔节-抽穗期的阶段耗水量最大,这与王松林等^[19]的研究结果一致。拔节-抽穗期为小麦需水的关键期,此期保证水分供应有利于植株的生长发育,提高植株光合作用,积累更多的干物质,提高水分利用效率与产量,这与肖俊夫等^[20]的研究结果相似。在保证产量的同时减少灌水量也是降低冬小麦生育期耗水量及提高水分利用效率的主要途径^[21-22],此外还可通过合理的灌溉模式来增加产量进而提高水分利用效率^[23]。陈健等^[24]研究得出畦灌条件下沧州、廊坊等地小麦的 WUE 为 1.0~1.9 kg/m³,汪顺生等^[16]研究得出沟灌及畦灌下水分利用效率分别为 1.9~2.1 kg/m³及 1.5~1.8 kg/m³。本文应用圆形喷灌机水肥一体化技术,不同灌水处理的水分利用效率变化范围为 2.20~2.28 kg/m³,与传统灌溉方式相比,显著提高了 WUE。灌溉定额对冬小麦籽粒蛋白质质量分数、淀粉质量分数有显著性影响,这与王晓英等^[8]的研究结果一致。本文对灌溉定额对冬小麦冠层温度的影响进行了初步研究,在灌浆期之前不同灌溉定额之间的冠层温度差异不明显,在灌浆期至成熟期,冠层温度随着灌溉定额的升高而降低,2 个灌水频次的变化趋势一致。其中在 C1 处理下,W3 处理的平均冠层温度比 W1 高 1.3~1.7℃,C2 处理下,W3 处理比 W1 高 2.6~2.8℃。这表明在气温较高时,利用圆形喷灌机灌溉可以显著降低冬小麦冠层温度,为籽粒灌浆创造适宜的温湿度环境,有利于延长冬小麦籽粒灌浆持续期,从而提高冬小麦产量及品质。此外,在灌浆期高温条件下进行适当灌水,能有效降低冬小麦的冠层温度,增加田间水汽压,降低植株蒸腾作用,减轻干热风的危害,有利于籽粒灌浆,提高籽粒产量,这与 LIU 等^[25-26]研究结果一致。

4 结论

(1)冬小麦产量随着灌溉定额及总耗水量的增加而增加,灌溉定额对产量的影响显著($P<0.05$),灌水频次对产量的影响不显著($P>0.05$),灌溉定额及灌水频次组合对产量的影响中,灌溉定额起主导作用。最高产量处理为 W1C2 的 9 286.4 kg/hm²。

建议北京地区冬小麦在返青-拔节、拔节-抽穗、抽穗-灌浆期分别灌水 45、55.5、54 mm,在圆形喷灌机条件下每个生育时期宜分 2 次灌水。

(2) 两年试验结果表明,冬小麦在拔节-抽穗期的阶段及日均耗水量均最大,灌溉定额对总耗水量的影响显著($P < 0.05$),但灌水频次对总耗水量的影响不显著($P > 0.05$)。水分利用效率随总耗水量的增加而减少,水分利用效率最大为 W3 处理的 2.28 kg/m^3 ,最小为 W1 处理的 2.21 kg/m^3 ,各处理

水分利用效率无显著性差异($P > 0.05$),适当提高灌溉定额可以增加产量,同时对水分利用效率影响不大。

(3) 灌溉定额及灌水频次对冬小麦籽粒蛋白质质量分数、淀粉质量分数有显著性影响($P < 0.05$),最优处理是 W1C1,其次是 W1C2,再次是 W2C1。小麦籽粒蛋白质质量分数 C2 处理小于 C1,表明灌浆后期 C2 处理的灌水会降低籽粒的蛋白质质量分数,建议在灌浆前、中期灌水。

参 考 文 献

- 1 国家统计局. 中国农业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2013.
- 2 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 28-32.
WANG Shufen, ZHANG Xiying, PEI Dong. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(2): 28-32. (in Chinese)
- 3 LIU C, ZHANG X Y, ZHANG Y Q. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(2): 109-120.
- 4 LI Q Q, CHEN Y H, LIU M Y, et al. Effects of irrigation and planting patterns on radiation use efficiency and yield of winter wheat in North China[J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(4): 469-476.
- 5 严海军, 朱勇, 白更, 等. 对内蒙古推广使用大型喷灌机的思考[J]. 节水灌溉, 2009(1): 18-21.
YAN Haijun, ZHU Yong, BAI Geng, et al. Discussion on application of large-sized sprinkler irrigation machines in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Water Saving Irrigation, 2009(1): 18-21. (in Chinese)
- 6 金宏智, 严海军, 王永辉. 喷灌技术与设备在我国的适应性分析[J]. 农业工程, 2011, 1(4): 42-45.
JIN Hongzhi, YAN Haijun, WANG Yonghui. Adaptability analysis of sprinkler irrigation technology and equipments in China[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(4): 42-45. (in Chinese)
- 7 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.
LI Quanqi, SHEN Jiayin, ZHAO Dandan. Effect of irrigation frequency on yield and leaf water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 33-36. (in Chinese)
- 8 王晓英, 贺明荣, 杨洪斌, 等. 灌水频次对强筋小麦蛋白质组分含量、粒度分布和品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(1): 7-12.
WANG Xiaoying, HE Mingrong, YANG Hongbin, et al. Effects of irrigation frequency on grain protein composition, kernel size and quality of strong gluten winter wheat[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(1): 7-12. (in Chinese)
- 9 蔣桂英, 刘建国, 魏建军, 等. 灌溉频率对滴灌小麦土壤水分分布及水分利用效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(4): 38-42.
JIANG Guiying, LIU Jianguo, WEI Jianjun, et al. Effects of irrigation frequency on soil water distribution and water use efficiency in wheat field under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(4): 38-42. (in Chinese)
- 10 张英华, 张琪, 徐学欣, 等. 适宜微喷灌水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 88-95.
ZHANG Yinghua, ZHANG Qi, XU Xuexin, et al. Optimal irrigation frequency and nitrogen application rate improving yield formation and water utilization in winter wheat under micro-sprinkling condition[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(5): 88-95. (in Chinese)
- 11 SPALDING R F, WATTS D G, SCHEPERS J S, et al. Controlling nitrate leaching in irrigated agriculture[J]. Journal of Environmental Quality, 2001, 30(4): 1184-1194.
- 12 薛彬, 李雪, 严海军. 圆形喷灌机条件下不同灌水施肥量对冬小麦产量的影响[J]. 节水灌溉, 2016(8): 33-37.
XUE Bin, LI Xue, YAN Haijun. Effects of different irrigation and fertilization amount on winter wheat yield under center pivot irrigation system[J]. Water Saving Irrigation, 2016(8): 33-37. (in Chinese)
- 13 严海军, 马静, 王志鹏. 圆形喷灌机泵注式施肥装置设计与田间试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 100-106.
http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150914&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.014.
YAN Haijun, MA Jing, WANG Zhipeng. Design and field experiment on fertilizer injection device in center pivot irrigation system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 100-106. (in Chinese)

14 HUSSAIN G. Effect of irrigation and nitrogen on water use efficiency of wheat in Saudi Arabia[J]. *Agricultural Water Management*, 1995, 27(5): 143 – 153.

15 许振柱, 于振文, 王东, 等. 灌溉条件对小麦籽粒蛋白质组分积累及其品质的影响[J]. *作物学报*, 2003, 29(5): 682 – 687.
XU Zhenzhu, YU Zhenwen, WANG Dong, et al. Effect of irrigation conditions on protein composition accumulation of grain and its quality in winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2003, 29(5): 682 – 687. (in Chinese)

16 汪顺生, 高传昌, 王兴, 等. 不同灌溉方式下冬小麦耗水规律及产量的试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(4): 11 – 14.
WANG Shunsheng, GAO Chuanchang, WANG Xing, et al. Experimental study on the water consumption characteristic and yield of winter wheat under different irrigation methods[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(4): 11 – 14. (in Chinese)

17 董志强, 张丽华, 李谦, 等. 微喷灌模式下冬小麦产量和水分利用特性[J]. *作物学报*, 2016, 42(5): 725 – 733.
DONG Zhiqiang, ZHANG Lihua, LI Qian, et al. Grain yield and water use characteristics of winter wheat under micro-sprinkler irrigation[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(5): 725 – 733. (in Chinese)

18 姚素梅, 康跃虎, 吕国华, 等. 喷灌与地面灌溉条件下冬小麦籽粒灌浆过程特性分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 13 – 17.
YAO Sumei, KANG Yuehu, LÜ Guohua, et al. Analysis on grain filling characteristics of winter wheat under sprinkler irrigation and surface irrigation conditions[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7): 13 – 17. (in Chinese)

19 王松林, 史尚, 王兴, 等. 不同种植模式冬小麦耗水特性及产量试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014(5): 49 – 52.
WANG Songlin, SHI Shang, WANG Xing, et al. Research on the water consumption characteristics and the yield of winter wheat under different planting patterns[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(5): 49 – 52. (in Chinese)

20 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.
XIAO Junfu, LIU Zhandong, DUAN Aiwang, et al. Studies on effects of irrigation systems on the grain yield constituents and water use efficiency[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(2): 20 – 23. (in Chinese)

21 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.

22 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.

23 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]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(1 – 2): 211 – 218.

24 陈健, 刘云慧, 宇振荣. 河北平原冬小麦水分生产率的模拟分析[J]. *麦类作物学报*, 2012, 32(1): 97 – 102.
CHEN Jian, LIU Yunhui, YU Zhenrong. Water productivity analysis of winter wheat in Hebei Plain using crop model[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(1): 97 – 102. (in Chinese)

25 LIU H J, KANG Y H. Regulating field microclimate using sprinkler misting under hot-dry windy conditions[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 95(3): 349 – 358.

26 LIU H J, KANG Y H. Effect of sprinkler irrigation on microclimate in the winter wheat field in the North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 84(1 – 2): 3 – 19.