

节水灌溉方式与磷钾肥减施对小麦产量、品质及水肥利用效率的影响

张晶, 党建友, 张定一, 裴雪霞, 王姣爱, 程麦凤, 闫翠萍

(山西农业大学小麦研究所, 山西 临汾 041000)

摘要: 为探明滴灌、微喷灌和磷钾肥减施对小麦产量、品质及水肥利用效率的影响, 通过田间试验, 以漫灌常量施肥为对照(CK), 设滴灌(W_1)和微喷灌(W_2) 2种节水灌溉方式, 生育期均灌水4次, 即越冬水+返青水+拔节水+灌浆水(越冬水、拔节水灌水 $600\text{ m}^3/\text{hm}^2$ 、返青水和灌浆水灌水 $300\text{ m}^3/\text{hm}^2$); W_1 和 W_2 下设磷钾肥常量(R_{PK})和磷钾肥减施20%(R_{PK-20}), 30%(R_{PK-30})和40%(R_{PK-40}), 施用方式均底肥撒施50%, 返青期和拔节水水肥一体化各施25%; 以磷钾肥常量全部底施为相对对照(CK_基), 11个处理, 调查分析产量及其构成、品质特性和水肥利用效率等。结果表明, W_1 和 W_2 减施处理的产量均随磷钾肥减施量增加而减少, 其中滴灌在磷钾肥减施20%时显著增产, 较CK增产15.49%, 增产主要与成穗数和穗粒数增加有关; 相同减施处理 W_2 产量低于 W_1 ; W_1 、 W_2 处理的蛋白质含量、沉降值及稳定时间均较CK显著提高, R_{PK} 和减施处理的沉降值 $W_1 > W_2$ 。相同减施处理生育期耗水量 $W_1 < W_2$, 水分利用效率则相反, 其中 W_1 较CK提高42.35%~105.24%, W_2 较CK提高36.06%~56.18%。磷钾肥底施+水肥一体化追施的水分利用效率高于CK_基; W_1 、 W_2 较CK氮磷钾肥偏生产力提高, 相同减施处理氮磷钾肥偏生产力 $W_1 > W_2$, 滴灌在磷钾肥减施20%时氮肥偏生产力显著提高; 滴灌磷钾肥减施对0—40 cm土壤养分含量影响较小, 但使有效磷含量有所提高。综合分析, 山西省南部麦区, 冬小麦采用滴灌浇水, 生育期灌4水($1\ 800\text{ m}^3/\text{hm}^2$), 磷钾肥减施且采用50%底施+返青期和拔节水水肥一体化追施25%时, 减施20%产量、水分利用效率和氮肥偏生产力最高, 是高产高效水肥管理模式, 减施30%虽产量次高, 但品质性状最好, 是稳产提质水肥管理模式。

关键词: 节水灌溉; 磷钾肥减施; 小麦; 产量; 品质; 水肥利用效率

中图分类号: S274; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)06-0166-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.06.024

Effects of Water-saving Irrigation and Phosphorus and Potassium Fertilizer Reduction on Yield, Quality, and Water and Fertilizer Use Efficiency of Wheat

ZHANG Jing, DANG Jianyou, ZHANG Dingyi, PEI Xuexia,

WANG Jiaoai, CHENG Maifeng, YAN Cuiping

(Institute of Wheat Research, Shanxi Agricultural University, Linfen, Shanxi 041000)

Abstract: To study the effects of water-saving irrigation and phosphorus and potassium fertilizer reduction on wheat yield, quality, and water and fertilizer use efficiency, field experiments were conducted to study the effects of drip irrigation (W_1) and micro-sprinkler irrigation (W_2) on water-saving irrigation with constant fertilization as control (CK), four times of irrigation during the growth period (overwintering water, jointing water irrigation $600\text{ m}^3/\text{hm}^2$, reviving water, and grouting water irrigation $300\text{ m}^3/\text{hm}^2$). Under W_1 and W_2 , phosphorus and potassium fertilizer constant (R_{PK}) and reduced by 20% (R_{PK-20}), 30% (R_{PK-30}), and 40% (R_{PK-40}) were applied with 50% basal fertilizer, and 25% of water and fertilizer were applied in returning green stage and jointing stage respectively, yield and its components, quality characteristics and water use and fertilizer efficiency were investigated and analyzed in 11 treatments. The results showed that

收稿日期: 2020-04-06

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0200404-07); 现代农业产业技术体系建设专项(CARS-3-2-7); 山西省重点研发计划项目(201903D221022)

第一作者: 张晶(1984—), 女, 副研究员, 主要从事小麦水肥高效利用研究。E-mail: zhangjing3298@163.com

通信作者: 党建友(1972—), 男, 研究员, 主要从事作物水肥高效利用研究。E-mail: dangjiyou8605@sina.com

the yield of W_1 and W_2 treatments decreased with the increase of phosphorus and potassium fertilizer reduction, and the yield of drip irrigation increased significantly for R_{PK-20} , was 15.49% higher than that of CK, which was mainly related to the increase of panicle number and grain number per spike. The yield of W_2 was lower than that of W_1 under the same treatment. The protein content, sedimentation value, and settling time of W_1 and W_2 treatments were significantly higher than those of CK. The sedimentation value of R_{PK} and decreasing treatment was $W_1 > W_2$. W_1 was 42.35%~105.24% higher than CK, W_2 was 36.06%~56.18% higher than CK. The water use efficiency of phosphorus and potassium fertilizer combined with bottom application and top application was higher than that of CK_相. The partial productivity of W_1 and W_2 were higher than that of CK. The same reduction of N, P, and K fertilizer was $W_1 > W_2$. The partial productivity of nitrogen increased significantly by $W_1 R_{PK-20}$. The effect of phosphorus and potassium fertilizer decreased on soil nutrient content was small in 0—40 cm soil, but the available P content was increased. Comprehensive analysis showed that in the wheat grow region in the south of Shanxi Province, drip irrigation was used for winter wheat, four times irrigation was used for growing period, and 50% basal application, and 25% of water and fertilizer application was integrated topdressing, and 20% reduction of phosphorus and potassium fertilizer yield and water use efficiency were the highest, it is a high-yield and high-efficiency water and fertilizer management mode. The 30% reduction of phosphorus and potassium was the best water and fertilizer management mode.

Keywords: water saving irrigation; phosphorus and potassium fertilizer reduction; wheat; yield; quality; water and fertilizer use efficiency

山西省南部麦区平均降水量 478.2 mm,主要集中在 6—9 月,而小麦生育期降水量为 143.2 mm,仅能满足冬小麦生育期耗水量的 25%~30%^[1]。目前农民普遍延用大水漫灌传统方法,水分有效利用率只有 30%~40%^[2]。滴灌、微喷灌水肥一体化技术是将灌溉与施肥相结合,可有效控制施肥、灌溉数量和时间,不仅控制水肥入渗深度,还能维持根区合理的养分供应浓度,使水肥供应与植株生长相协调,提高水肥利用效率,减少水肥损失^[3-5]。有研究^[6-8]表明,通过灌水量和灌水时期的调控形成适度水分胁迫,可提高小麦产量和水分利用效率,与传统漫灌相比,滴灌和喷灌可减少灌水量 12.9%~41.5%,产量和水分利用效率分别提高 11.3%~30.0%和 3.1%~56.0%^[9-11]。

在我国农业生产中,作物磷肥利用率偏低,大约为 7.3%~20.1%^[12-14]。施用适量的磷肥可以提高作物的产量和品质,施用过量则会造成磷素在土壤中的富集,且可通过地表径流、渗流等途径进入水体,造成环境污染^[15-17]。邓九胜等^[18]研究表明,适当减施磷肥并不会显著降低作物产量,反而可以提高磷的利用率和农学效率;史燕捷等^[19]研究表明,秸秆还田基础上磷肥减量低于 20%时,小麦产量差异不显著($P > 0.05$),且磷肥吸收利用效率较配方施肥分别提高 16.7%, 125.9%和 1.9%;王秀娟等^[20]也发现,磷肥减施 20%结合秸秆还田可以提高土壤磷素利用率和产量。本研究针对山西省以石灰性土壤为主,成土母质中主要含钾矿物长石,具有较高或中等偏高供钾水平,在秸秆还田后旋耕播种冬小麦情况下,研究滴灌、微喷灌

节水灌溉方式和磷钾肥减施对冬小麦产量、品质及水肥利用效率的影响,并对收获期 0—40 cm 土壤养分含量进行测定,以期对冬小麦生产中节水节肥高产高效模式提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017—2018 年在山西省农业科学院小麦研究所韩村试验基地(36°06′24″N, 111°30′55″E)进行。试验区为温带大陆性半干旱气候,属黄淮冬麦区北片,年平均气温 13.1℃,年平均降水量 453 mm,年日照时间 2 400 h 左右,年蒸发量 2 150 mm。试验地属中壤石灰性褐土,连续多年种植制度为小麦—玉米一年两熟轮作,2017 年冬小麦播种前 0—20 cm 土层含有机质 13.35 g/kg,碱解氮 55.84 mg/kg,速效磷 14.01 mg/kg,速效钾 130 mg/kg。

1.2 试验设计

采取随机区组设计,11 个处理,大区设计,大区面积为 138 m²(60 m×2.3 m),每个大区划分 3 个取样小区。设滴灌(W_1)和微喷灌(W_2) 2 种灌水方式,生育期灌水 4 次:越冬水+返青水+拔节水+灌浆水,灌水量分别为 600, 300, 600, 300 m³/hm²,共计 1 800 m³/hm²。磷钾肥设常量(P_2O_5 135 kg/hm², K_2O 90 kg/hm²)和减施 20%, 30%, 40%, 分别用 R_{PK} 、 R_{PK-20} 、 R_{PK-30} 、 R_{PK-40} 表示,磷钾肥施用方式均为底肥 50%+返青期 25%+拔节期 25%;磷钾肥常量全部底施为相对对照(CK_相);漫灌(越冬水+拔节水,灌水量:2 025+1 350=3 375 m³/hm²),且磷钾

肥常量为对照(CK)。底施为播前撒施,追施采用文丘里施肥器水肥一体化施入,施氮量均为纯 N 225 kg/hm²,底施 70%+30%拔节期追施(表 1)。滴灌采用内镶贴片式滴灌带,直径 16 mm,孔距 150 mm;微喷灌采用直径 40 mm 斜 5 孔微喷带,灌水量用水

表计数控制。机械条播,行距 19.5~20.0 cm,播种 300 kg/hm²。肥料为尿素(N 46.4%)、磷酸二铵(N:P₂O₅为 18:46)、氯化钾(K₂O 60%)。种植品种“品育 8012”,2017 年 10 月 15 日播种,2018 年 6 月 12 日收获,其他管理措施同大田生产。

表 1 试验设计

处理	灌溉方式	灌水时期与灌水量/(m ³ ·hm ⁻²)				施肥时期与施肥量/(kg·hm ⁻²)		
		越冬水	返青水	拔节水	灌浆水	底肥 (N+P ₂ O ₅ +K ₂ O)	返青期 (P ₂ O ₅ +K ₂ O)	拔节期 (N+P ₂ O ₅ +K ₂ O)
W ₁ R _{PK}	滴灌	600	300	600	300	157.5+67.5+45	33.75+22.5	67.5+33.75+22.5
W ₁ R _{PK-20}	滴灌	600	300	600	300	157.5+54+36	27+18	67.5+27+18
W ₁ R _{PK-30}	滴灌	600	300	600	300	157.5+47.25+31.5	23.625+15.75	67.5+23.625+15.75
W ₁ R _{PK-40}	滴灌	600	300	600	300	157.5+40.5+27	20.25+13.5	67.5+20.25+13.5
W ₁ CK _相	滴灌	600	300	600	300	157.5+135+90		67.5+0+0
W ₂ R _{PK}	微喷灌	600	300	600	300	157.5+67.5+45	33.75+22.5	67.5+33.75+22.5
W ₂ R _{PK-20}	微喷灌	600	300	600	300	157.5+54+36	27+18	67.5+27+18
W ₂ R _{PK-30}	微喷灌	600	300	600	300	157.5+47.25+31.5	23.625+15.75	67.5+23.625+15.75
W ₂ R _{PK-40}	微喷灌	600	300	600	300	157.5+40.5+27	20.25+13.5	67.5+20.25+13.5
W ₂ CK _相	微喷灌	600	300	600	300	157.5+135+90		67.5+0+0
CK	漫灌	2 025		1 350		157.5+135+90		67.5+0+0

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量 播种和收获当天每个划分小区各取 2 个点,测定 0—100 cm 土层土壤含水量,每 20 cm 为 1 层,共 5 层,用铝盒烘干法测定土壤质量含水量。按公式 $W=w \times \rho_s \times h \times 0.1$ 计算土层贮水量。式中:W 为土层贮水量(mm);w 为土层含水量(%); ρ_s 为土壤容重(g/cm³);h 为土层厚度(cm);0.1 为单位换算系数。生育期耗水(mm)=播前贮水量+生育期灌水量+降雨量-收获贮水量;产量水分利用率=产量/田间耗水量。

1.3.2 土壤养分含量 收获期在每个划分小区各取 2 个点的 0—20,20—40 cm 土层测定土壤养分。土壤有机质含量采用重铬酸钾外加热法测定;碱解氮含量采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用碳酸氢钠法测定;速效钾含量采用 NH₄OAc 浸提,火焰光度计法测定^[21]。

1.3.3 产量测定 收获当天在每个划分小区随机挑选长势均匀的 2 行冬小麦,每行中间选取长 20 cm 的区段作为样本,去除穗粒数<5 粒穗数后,准确计数有效成穗数,并调查每穗粒数,求平均值为穗粒数;各处理收获 2 个未取样调查样方外,再随机取 3 个 1.0 m²,脱粒,风干后称重;数取 500 粒称重,换算成千粒重,2 次重复(重复间相差≤0.5 g),80 ℃下烘至恒重,计算籽粒风干含水率,按 13%含水率计算千粒重和产量;氮(磷、钾)肥偏生产力=产量/氮(磷、钾)施用量。

1.3.4 品质测试 采用瑞士波通 DA7200 型近红外分析仪测定小麦蛋白质、吸水率、沉降值和稳定时间。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 DPS 15.10 软件进行数据处理与分析。

2 结果与分析

2.1 滴灌、微喷灌与磷钾肥减施对产量及其构成要素的影响

由表 2 可知,2 种节水灌溉方式下相同处理产量表现为滴灌(W₁)>微喷灌(W₂),产量随磷钾肥减施量增加而减少,其中滴灌磷钾肥减施 20%和 30%产量高于 CK,减施 20%时与 CK 差异显著;微喷灌磷钾肥减施及常量且分施产量与 CK 差异不显著。W₁ 磷钾肥减施及常量且分施小麦成穗数、穗粒数千粒重差异不显著,产量以 W₁R_{PK-20} 最高,W₁R_{PK-20} 较 CK 增产 15.49%,增产与成穗数和穗粒数增加有关,其次是 W₁R_{PK},W₁R_{PK-30} 与 W₁R_{PK-40} 差异不显著,滴灌磷钾肥分施产量高于全部底施,且差异显著。W₂ 磷钾肥减施处理成穗数、穗粒数、千粒重及产量差异均不显著,磷钾肥减施及常量且分施产量差异不显著,但显著高于常量全部底施,W₂ 磷钾肥减施较 CK 产量呈降低趋势,降低幅度 0.87%~6.59%,减产与成穗数和穗粒数减少有关。

2.2 滴灌、微喷灌与磷钾肥减施对加工品质的影响

由表 3 可知,滴灌、微喷灌各处理蛋白质、吸水率、沉降值及稳定时间较传统漫灌均有所提高,其中蛋白质、沉降值及稳定时间差异显著,2 种节水灌溉方式下磷钾肥减施及常量且分施沉降值均表现为 W₁>W₂。W₁ 减施处理蛋白质、沉降值和稳定时间随磷钾肥减施量先升高后降低,W₁R_{PK} 各项品质指标均较高,W₁R_{PK-30} 蛋白质和稳定时间最高且与除 W₁R_{PK} 外其余处理差异显著,沉降值仅次于 W₁R_{PK},滴灌磷钾肥减施对吸水率影响较小,对蛋白质和稳定时间影响较大。W₂ 减施处理吸水率、沉降值及稳定时

间随磷钾肥减施量先降低后升高, W_2R_{PK} 蛋白质和稳定时间较高且与其余处理差异显著,微喷灌磷钾肥减施对吸水率影响较大。

表 2 滴灌、微喷灌与磷钾肥减施处理下的小麦产量及其构成要素

处理	成穗数/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数/ 粒	千粒重/ g	产量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
W_1R_{PK}	656.70a	30.80ab	39.83ab	7137.56b
W_1R_{PK-20}	648.90a	35.20a	39.51ab	7643.01a
W_1R_{PK-30}	652.20a	32.60ab	37.76b	6778.88bc
W_1R_{PK-40}	571.65ab	34.80ab	40.67ab	6483.24cd
$W_1CK_{\text{相}}$	620.55ab	28.80b	37.96b	5976.30e
W_2R_{PK}	617.25ab	35.00a	40.01ab	6464.70cd
W_2R_{PK-20}	591.15ab	32.40ab	41.76a	6560.25cd
W_2R_{PK-30}	577.80ab	32.00ab	38.43ab	6555.59cd
W_2R_{PK-40}	598.95ab	29.20b	38.32ab	6182.06de
$W_2CK_{\text{相}}$	550.05b	32.20ab	38.28ab	5888.18e
CK	630.60ab	36.40a	39.93ab	6618.00cd

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.3 滴灌、微喷灌与磷钾肥减施对小麦水肥利用效率的影响

由表 4 可知,滴灌、微喷灌灌水量较传统大水漫灌减少 46.67%,其生育期耗水量减少 25.00%~38.30%,水分利用效率提高 36.06%~105.24%,2 种节水灌溉方式下相同处理水分利用效率均表现为 $W_1>W_2$;磷钾肥分施水分利用效率高于全部底施, W_1 差异显著。

表 4 滴灌、微喷灌与磷钾肥减施处理下的小麦水肥利用效率

处理	播前 贮水量/mm	收获期 贮水量/mm	有效 降水量/mm	灌水量/ mm	生育期 耗水量/mm	水分利用效率/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$)	NPFP/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	PPFP/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	KFPF/ ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
W_1R_{PK}	254.28	225.00	187.80	180.00	397.08ef	17.98b	31.72b	52.87e	79.31e
W_1R_{PK-20}	177.23	154.68	187.80	180.00	390.34f	19.58a	33.97a	70.77c	106.15c
W_1R_{PK-30}	253.22	169.71	187.80	180.00	451.31bc	15.02d	30.13bc	71.73bc	107.60bc
W_1R_{PK-40}	196.70	178.11	187.80	180.00	386.38f	16.78c	28.81cd	80.04a	120.06a
$W_1CK_{\text{相}}$	250.18	177.92	187.80	180.00	440.06cd	13.58e	26.56e	44.27g	66.40g
W_2R_{PK}	260.25	194.30	187.80	180.00	433.75cd	14.90d	28.73cd	47.89fg	71.83fg
W_2R_{PK-20}	259.81	157.92	187.80	180.00	469.69b	13.97de	29.16cd	60.74d	91.11d
W_2R_{PK-30}	255.07	170.30	187.80	180.00	452.57bc	14.49de	29.14cd	69.37c	104.06c
W_2R_{PK-40}	248.81	197.65	187.80	180.00	418.96de	14.76d	27.48de	76.32ab	114.48ab
$W_2CK_{\text{相}}$	258.94	173.14	187.80	180.00	453.60bc	12.98de	29.41cd	49.02ef	73.53ef
CK	251.56	150.23	187.80	337.50	626.23a	9.54f	26.17e	43.62g	65.42g

注:NPFP 为氮肥偏生产力;PPFP 为磷肥偏生产力;KFPF 为钾肥偏生产力。

2.4 滴灌、微喷灌与磷钾肥减施对收获期土壤养分含量的影响

由表 5 可知,滴灌、微喷灌处理 0—40 cm 有效磷含量表现为 $W_1>W_2$;滴灌磷钾肥减施 0—40 cm 土壤养分含量差异不显著,较 CK 有效磷含量提高;微喷灌磷钾肥减施 0—40 cm 有效磷、速效钾、碱解氮及 20—40 cm 有机质含量差异不显著。 W_1 处理 0—40 cm 土层有机质、速效钾含量及 0—20 cm 碱解氮含量差异不显著;0—20 cm 有效磷含量以 $W_1CK_{\text{相}}$ 最低,

W_1 生育期耗水量以 W_1R_{PK-30} 最高,其次是 $W_1CK_{\text{相}}$; W_1 减施处理水分利用效率随磷钾肥减施量先降低后升高, W_1R_{PK-20} 水分利用效率最高,其次是 W_1R_{PK} 。 W_2 减施处理生育期耗水量随减施量增加而减少,水分利用效率则相反。滴灌、微喷灌各处理较传统大水漫灌氮磷钾肥偏生产力分别提高 1.49%~29.81%, 1.49%~83.49%,1.50%~83.52%,2 种节水灌溉方式下减施处理氮磷钾肥偏生产力均表现为 $W_1>W_2$,氮肥偏生产力随减施量增加而降低,磷钾肥偏生产力则相反。 W_1 磷钾肥分施氮磷钾肥偏生产力显著高于全部底施, W_1R_{PK-20} 氮肥偏生产力最高,且与其余处理差异显著; W_1R_{PK-40} 磷钾肥偏生产力显著高于其余处理。

表 3 滴灌、微喷灌与磷钾肥减施处理下的小麦加工品质

处理	蛋白质/ %	吸水率/ %	沉降值/ mL	稳定 时间/min
W_1R_{PK}	14.92a	59.8a	31.5a	5.5a
W_1R_{PK-20}	14.68c	58.9bc	29.1d	5.1c
W_1R_{PK30}	14.94a	58.9bc	30.3b	5.6a
W_1R_{PK40}	14.55d	58.8bc	29.9bc	4.9d
$W_1CK_{\text{相}}$	14.51d	58.6c	30.0bc	5.3b
W_2R_{PK}	14.83b	58.7bc	29.9bc	5.5a
W_2R_{PK-20}	14.39e	58.4c	28.5e	5.2bc
W_2R_{PK-30}	14.73c	57.6d	28.2e	4.9d
W_2R_{PK-40}	14.68c	59.3ab	29.6c	5.2bc
$W_2CK_{\text{相}}$	14.67c	59.3ab	30.0bc	5.3b
CK	14.16f	58.3c	27.3f	4.6e

且与除 W_1R_{PK-20} 外的其余处理差异显著,20—40 cm 有效磷含量以 W_1R_{PK} 最高,且与其余处理差异显著, 20—40 cm 碱解氮以 $W_1CK_{\text{相}}$ 最高,且与 W_1R_{PK-40} 差异显著。 W_2 处理 0—20 cm 速效钾和碱解氮含量及 20—40 cm 有机质含量无显著差异。 0—20 cm W_2R_{PK-20} 处理有机质含量最高,与 W_2R_{PK-40} 处理差异显著,20—40 cm 有效磷含量以 W_2R_{PK} 处理最高, 且与磷钾肥减施处理及 CK 差异显著,20—40 cm 速效钾和碱解氮含量均以 W_2R_{PK} 处理最高。

表 5 滴灌、微喷灌与磷钾肥减施处理下的收获期土壤养分含量

处理	有机质/%		有效磷/(mg·kg ⁻¹)		速效钾/(mg·kg ⁻¹)		碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	
	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm	0—20 cm	20—40 cm
W ₁ R _{PK}	1.51ab	0.69a	24.83a	4.05a	149.00a	96.50ab	60.60a	25.85ab
W ₁ R _{PK-20}	1.61ab	0.73a	19.85ab	3.20abc	147.00a	100.00ab	62.42a	26.71ab
W ₁ R _{PK-30}	1.55ab	0.73a	26.00a	3.55bc	136.50a	81.00ab	63.80a	26.80ab
W ₁ R _{PK-40}	1.40ab	0.53a	23.03a	2.45bc	156.00a	105.50a	58.79a	23.26b
W ₁ CK _相	1.54ab	0.67a	14.45bc	2.65bc	110.50a	102.00a	63.11a	29.22a
W ₂ R _{PK}	1.66ab	0.73a	15.15ab	3.58ab	129.00a	107.00a	57.23a	28.70a
W ₂ R _{PK-20}	1.97a	0.74a	11.75c	1.63c	135.50a	80.00ab	69.94a	25.68ab
W ₂ R _{PK-30}	1.77ab	0.74a	12.03bc	2.30c	123.50a	71.00b	72.10a	27.75ab
W ₂ R _{PK-40}	1.27b	0.53a	10.13c	1.60c	160.00a	97.50ab	53.94a	23.51b
W ₂ CK _相	1.42ab	0.65a	13.73bc	2.53bc	117.00a	77.00ab	60.69a	25.24ab
CK	1.41ab	0.67a	14.42bc	1.65c	130.70a	105.00a	60.12a	26.83ab

3 讨论

3.1 节水灌溉方式与磷钾肥减施对小麦产量及其构成的影响

赵亚南等^[22]研究表明,与习惯施肥相比,减量施肥对小麦产量没有显著影响,产量构成因子中穗数和穗粒数没有显著变化,千粒重呈增加趋势。本研究中与传统漫灌常量施肥相比,微喷灌磷钾肥减施与其产量差异不显著,而滴灌磷钾肥减施 20%,30%产量提高,且当减施 20%时产量显著提高,增产主要与成穗数和穗粒数增加有关。张磊等^[23]通过对比滴灌随水施肥和滴灌正常施肥小麦产量,在等量施肥条件下,随水施肥可提高小麦产量。本研究结果表明,滴灌、微喷灌磷钾肥减量或常量 50%底施+返青期和拔节期水肥一体化追施 25%产量均显著高于全部底施。本研究进一步表明,相同处理滴灌产量高于微喷灌,增产幅度为 1.50%~16.50%,2 种灌溉方式产量均随磷钾肥减施量增加而减少。小麦—玉米一年两熟轮作是山西南部主要种植制度。玉米收获后秸秆还田播种小麦,整地质量差,土壤翘虚,导致小麦苗期发育不良,而滴灌灌溉均匀且水分主要聚集在土壤近表层,不会出现深层渗漏,大部分的水分正好处于小麦根系的主要分布区,易被吸收。本研究中,小麦生育期采用滴灌灌水 4 次且增量灌越冬水和拔节水,有利于提高成穗数和穗粒数,增加滴灌施肥次数可以维持生育后期叶片功能,提高干物质积累量,有利于籽粒灌浆和产量形成。

3.2 节水灌溉方式和磷钾肥减施对小麦加工品质的影响

侯芳芳等^[24]研究表明,微喷灌对小麦蛋白质含量没有显著促进作用,但提高籽粒硬度、面粉吸水率、面团最大拉伸阻力和最大拉伸面积。本研究中,滴灌、微喷灌较传统漫灌蛋白质、沉降值和稳定时间均显著提高,这与上述结论有所差异,这可能与品种特性以及小麦生育期灌水量和灌水次数不同有关。雷钧杰等^[25]研究表明,适宜的滴灌量不仅可以获得高产,而且还可显著提高籽粒品质,与本研究结果一致。沉降值是测定小麦品质的综合指标,与小麦粉食品加工品质呈显著或

极显著相关^[26],本研究表明,磷钾肥减施及常量且分施相同处理滴灌沉降值均高于微喷灌。

3.3 节水灌溉方式与磷钾肥减施对小麦水肥利用效率的影响

灌水量及灌水方式对冬小麦的生长、产量以及水分利用效率均有明显影响。本研究中采用滴灌灌水量 1 800 m³/hm²,生育期灌水 4 次,磷钾肥减施 20%且分施时水分利用效率最高,这与徐袁博等^[27]研究不同,这可能与种植条件不同有关。本研究结果表明,与传统漫灌常量施肥相比,滴灌、微喷灌生育期耗水量降低,水分利用效率提高;而相同处理滴灌水分利用效率高于微喷灌,这可能是因为滴灌相比其他的灌溉方式具有良好的均匀性,有利于根系提高吸收利用水分的能力,从而减少水分的无谓蒸散和垂直渗漏。土壤水分是影响养分吸收利用的重要因素,而且存在着调控和互补效应^[28]。本研究表明,滴灌、微喷灌常量或减量施肥较传统大水漫灌常量施肥氮磷钾肥偏生产力提高,滴灌磷钾肥减施 20%且分施氮肥偏生产力最高,这可能是在滴灌条件下,随水施肥可以提高肥料利用率,氮磷钾彼此间养分协调,从而显著提高小麦对氮素的利用率。传统大水漫灌条件下,肥料撒施和过量施肥是化肥偏生产力低下的主要原因。因此,结合山西水资源缺乏现状,通过滴灌磷钾肥分次随水追施是达到小麦高产高效的有效途径。

3.4 节水灌溉方式与磷钾肥减施对收获期土壤养分含量的影响

黄丽等^[29]研究表明,磷钾肥随水分施入在一定程度上可以提高速效磷和速效钾在土壤耕层的含量,有利于作物吸收利用。而本研究发现,滴灌磷钾肥减施且追施时随水分施可以提高耕层有效磷和速效钾含量,而微喷灌则差异不显著。李亚莉等^[30]研究表明,不同滴灌年限小麦土壤速效养分含量的最大值均在耕层,且随着土层深度的增加而逐渐降低,本研究结果与其一致。本研究中滴灌较微喷灌和漫灌提高土壤 0—40 cm 有效磷含量,这与亓沛沛等^[31]研究的

速效磷质量浓度和分布受灌溉方式的影响均不明显结果不同,该研究结果有待进一步验证。

4 结 论

山西省南部麦区,冬小麦采用滴灌浇水,灌水总量 1 800 m³/hm²时,生育期灌水 4 次,越冬前和拔节期增量灌水,磷钾肥减施且采用 50%底施+返青期和拔节期水肥一体化追施 25%时,减施 20%产量、水分利用效率和氮肥偏生产力最高,是高产高效水肥管理模式,减施 30%虽产量次高,但品质性状最好,是稳产提质水肥管理模式。

参考文献:

[1] 裴雪霞,党建友,张定一,等.近 54 年来晋南气候变化及其对旱地小麦产量的影响[J].麦类作物学报,2016,36(11):1502-1509.

[2] 姚素梅,康跃虎,刘海军,等.喷灌与地面灌溉条件下冬小麦光合作用的日变化研究[J].农业工程学报,2005,21(11):16-19.

[3] 郭丽,王丽英,张彦才,等.滴灌水肥一体化下施氮量对小麦氮素吸收及土壤硝态氮含量的影响[J].华北农学报,2017,32(3):207-213.

[4] 姚素梅,康跃虎,茹振钢,等.喷灌对冬小麦植株氮素积累运转及籽粒蛋白质含量的影响[J].应用生态学报,2013,24(8):2205-2210.

[5] 焦艳平,王福田,武剑,等.滴灌和微喷带灌溉对冬小麦生长及产量的影响[J].河北农业科学,2017,21(6):17-22.

[6] 李法计,徐学欣,何中虎,等.三种限水灌溉水平下中麦 175 干物质积累与水分利用特性解析[J].中国农业科学,2018,51(2):374-385.

[7] 曹彩云,党红凯,郑春莲,等.不同灌溉模式下小麦荧光特征及品种抗旱性研究[J].麦类作物学报,2017,37(11):1434-1444.

[8] 许骥坤,石玉,赵俊晔,等.测墒补灌对小麦水分利用特征和产量的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):277-281,329.

[9] 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.

[10] 王建东,龚时宏,高占义,等.滴灌模式对农田土壤水氮空间分布及冬小麦产量的影响[J].农业工程学报,2009,25(11):68-73.

[11] Ibragimov N, Evett S R, Esanbekov Y, et al. Water use efficiency of irrigated cotton in Uzbekistan under drip and furrow irrigation [J].Agricultural Water Management,2007,90:112-120.

[12] Guan G, Tu S X, Li H L, et al. Phosphorus fertilization modes affect crop yield, nutrient uptake, and soil biological properties in the rice-wheat cropping system[J].Soil Science Society of America Journal,2013,77(1):166-172.

[13] Wang Y, Zhao X, Wang L, et al. Phosphorus fertilization to the wheat-growing season only in a rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China [J].Field

Crops Research,2016,198:32-39.

[14] He Z L, Zhu J. Transformation kinetics and potential availability of specifically-sorbed phosphate in soils [J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,1998,51(3):209-215.

[15] 盛海君,夏小燕,杨丽琴.施磷对土壤速效磷含量及径流磷组成的影响[J].生态学报,2004,24(12):2837-2840.

[16] Cahoon L B, Ensign S H. Spatial and temporal variability in excessive soil phosphorus levels in eastern North Carolina [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004,69(2):111-125.

[17] Wang J, Lü G A, Guo X S, et al. Conservation tillage and optimized fertilization reduce winter runoff losses of nitrogen and phosphorus from farmland in the Chao-hu Lake region, China [J].Nutrient Cycling in Agroecosystems,2015,101:93-106.

[18] 邓九胜,张炜,朱荣松,等.基于土壤有效磷水稻磷肥施用推荐体系的探讨[J].西北农业学报,2011,20(2):81-84.

[19] 史燕捷,金梦灿,朱远芃,等.水稻秸秆还田下磷肥减量对小麦产量及养分利用效率的影响[J].中国土壤与肥料,2020(1):1673-6257.

[20] 王秀娟,解占军,何志刚,等.秸秆还田条件下减量施磷对玉米产量、磷素利用率及土壤磷质量分数的影响[J].河南农业科学,2018,47(8):39-44.

[21] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000:208-314.

[22] 赵亚南,宿敏敏,吕阳,等.减量施肥下小麦产量、肥料利用率和土壤养分平衡[J].植物营养与肥料学报,2017,23(4):864-873.

[23] 张磊,曾胜和,高志建,等.不同氮磷配比对滴灌小麦产量及养分利用效率的影响[J].西北农业学报,2012,21(5):79-83.

[24] 侯芳芳,张睿,孙燕妮,等.不同生育期喷灌对渭北旱地小麦产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2017,37(4):543-547.

[25] 雷钧杰,张永强,陈兴武,等.新疆冬小麦籽粒灌浆和品质性状对滴灌用水量的响应[J].应用生态学报,2017,28(1):127-134.

[26] 徐兆飞,张惠叶,张定一.小麦品质及其改良[M].北京:气象出版社,2000:51-54.

[27] 徐袁博,李援农,银敏华,等.不同微喷灌灌水量对冬小麦生长、产量和水分利用效率的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):121-125.

[28] 党建友,裴雪霞,王姣爱,等.灌水时间对冬小麦生长发育及水肥利用效率的影响[J].应用生态学报,2012,23(10):2745-2750.

[29] 黄丽,范兴科.磷肥和钾肥不同配施方式对其养分在土壤中迁移的影响[J].水土保持学报,2018,32(2):184-190.

[30] 李亚莉,赖宁,乔江飞,等.不同滴灌年限小麦土壤速效养分空间变异特征[J].新疆农业科学,2018,55(11):2069-2079.

[31] 亓沛沛,冉圣宏,张凯,等.不同灌溉方式对干旱区耕地土壤养分及其分布的影响[J].灌溉排水学报,2013,32(2):33-36.