

条带种植模式下微喷带对冬小麦产量和耗水特性的影响

宋鑫玥¹, 刘胜尧², 贾宋楠², 高震¹, 范凤翠^{1,2}, 杜雄^{1*}, 齐浩², 张哲²

(1.河北农业大学 农学院, 河北 保定 071001;

2.河北省农林科学院 农业信息与经济研究所, 石家庄 050051)

摘要: 【目的】缓解华北平原淡水资源匮乏与冬小麦高耗水的矛盾, 解决当地水资源利用率低的问题。【方法】以济麦22为试验材料, 在条带种植微喷带灌溉设置了4个灌水量处理: 在小麦拔节期、灌浆初期、灌浆中期(灌浆期5月下旬)3个生育时期设灌水量15 mm(W1)、22.5 mm(W2)、30 mm(W3)、37.5 mm(W4), 以等行距种植常规地面畦灌在拔节期和灌浆初期各灌60 mm为对照(CK), 分析了不同灌溉处理的耗水特性、籽粒产量及水分利用特征。【结果】小麦生育期内总耗水量在306.46~399.4 mm, W1、W2、W3、W4处理和CK土壤水占总耗水的比例分别为44.2%、42.97%、41.24%、40.15%和38.41%; 随着灌水量的增加, 灌溉水占总耗水的比例增加; 冬小麦拔节至灌浆初期耗水量最大, 占全生育期的45.33%~53.68%, 条带种植模式各处理在播种至灌浆初期耗水所占比重较大, CK则在灌浆初期至成熟期较大。微喷带灌溉条件下冬小麦籽粒产量随着灌水量的增加而增加, W4处理产量最高达9 682.66 kg/hm²; W3处理的水分利用率最高, 比CK提高了7.54%。【结论】微喷带灌溉灌水量在135~157.5 mm, 耗水量在367.5~400 mm时, 冬小麦能获得最高的产量和水分利用效率。

关键词: 冬小麦; 微喷带灌溉; 灌水量; 耗水特性; 产量

中图分类号: S512.1

文献标志码: A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2020271

OSID:



宋鑫玥, 刘胜尧, 贾宋楠, 等. 条带种植模式下微喷带对冬小麦产量和耗水特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(1): 15-21.

SONG Xinyue, LIU Shengyao, JIA Songnan, et al. The Effect of Hose-micro-sprinkling Irrigation Amount on Yield and Water Consumption of Strip-planted Winter Wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(1): 15-21.

0 引言

【研究意义】水资源匮乏已经成为全国重点关注的问题, 也是我国农业发展中面临的主要问题, 其中农业生产用水占全国水资源使用量的70%左右^[1]。河北平原作为冬小麦的主要产区, 存在自然降水和作物需水的供需矛盾^[2-5], 生产上需要抽取地下水进行补充灌溉, 导致地下水位以每年1 m的速度下降^[6], 同时大水漫灌造成无效耗水多, 水分利用率低, 水资源浪费严重等问题。因此研发高效的节水灌溉技术, 提高水资源利用率是实现农业可持续发展的重要途径。

【研究进展】伴随着节水灌溉技术的大量研究, 微喷带灌溉作为一种新的节水灌溉方式逐渐地发展起来, 可以精确地控制灌水量, 实现水肥一体化^[7-9]。与地

面灌溉相比, 微喷带灌溉可以改变土壤结构, 调节田间小气候, 降低冠层温度, 提高冬小麦籽粒产量及水分利用率^[10-12]。满建国等^[13]研究指出, 冬小麦拔节期和开花期采用微喷带测墒补灌, 开花期灌水量和总灌水量减少, 总耗水量显著降低, 但小麦籽粒产量和水分利用率显著增加。董志强等^[14]、徐袁博等^[15]研究发现单次灌水定额在30~45 mm可提高冬小麦籽粒产量和水分利用率, 发挥节水潜力。张西平等^[16]研究表明, 在河北省山前平原区分别在返青期和灌浆期每次灌水52.5~60.0 mm时, 可达到节水高产的效果; 周丽丽等^[17]研究发现喷灌量在109.5~154.5 mm范围内, 灌水量为154.5 mm时产量最高, 不同灌水量对水分利用率差异不显著。【切入点】目前关于微喷带灌溉、喷灌和传统灌溉模式(畦灌)条件下对小麦生长发育、产量和水分利用率的研究相对较多, 而对微喷带灌溉与小麦条带种植相结合方面的研究相对较少。【拟解决关键问题】在条带种植模式下, 采用地表微喷带灌溉方式探究定量灌溉对冬小麦生长发育、耗水特性和产量的影响, 以期为华北地区解决水资源利用率低,

收稿日期: 2020-05-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300908); 河北省重点研发计划项目(20326414D)

作者简介: 宋鑫玥(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事资源高效利用研究。E-mail: 1064977507@qq.com

通信作者: 杜雄(1979-), 男, 副教授, 主要从事作物丰产与资源高效利用工程研究。E-mail: duxiong2002@163.com

实现农业资源的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2018—2019 年在河北省农林科学院鹿泉市大河综合试验站进行。该区属温带半湿润偏旱大陆性季风气候,四季分明,日平均气温 13.6 ℃,年降水量 536 mm 且主要分布在 7、8 月,日照时间 2 554 h,无霜期 230 d。试验地土壤为黏壤质洪冲积石灰性褐土,0~100 cm 土体土壤体积质量 1.63 g/cm³,田间持水率为 21.17%;0~20 cm 耕层土壤有机质百分量 1.24%、全氮量 1.43 g/kg、速效氮量 96.58 mg/kg、速效磷量 31.21 mg/kg、速效钾量 180.71 mg/kg, pH 值 7.94。小麦生长季降水量为 81.2 mm。

1.2 试验设计

试验以济麦 22 为试验材料,将小麦等行距种植改为条带种植模式,采用 50:30 的条带种植模式,各处理每带种植行数相同,均种植 6 行,即 50 cm 种 6 行,空 30 cm,种植行与空行的边界为过渡行,于 2018 年 10 月 11 日播种,播种量 225 kg/hm²,播深 3 cm。条带种植模式下分别在小麦拔节期、灌浆初期、灌浆中期(灌浆期 5 月下旬)采用地表微喷带进行灌溉,喷灌管铺在 50:30 种植行中间,空行不进行铺设,设 15、22.5、30、37.5 mm 共计 4 个灌水量处理;对照为等行距种植(行距 15 cm)在拔节期和灌浆初期各灌水 60 mm,灌溉方式为常规地面畦灌;共 5 个处理,每个处理 3 次重复,随机排列。小区面积为 60 m²(行长 10 m,宽度 6 m)。条带种植模式施肥量按氮(N)49.5 kg/hm²、P₂O₅ 13.6 kg/hm²、K₂O 28.4 kg/hm²施底肥,之后随灌水总追施氮(N)175.5 kg/hm²、P₂O₅ 106.4 kg/hm²、K₂O 129.1 kg/hm²;对照施肥量按氮(N)108.7 kg/hm²、P₂O₅ 30.0 kg/hm²、K₂O 62.3 kg/hm²施底肥,之后随灌水总追施氮(N)116.3 kg/hm²、P₂O₅ 90.0 kg/hm²、K₂O 95.2 kg/hm²。其他管理措施同大田生产。

1.3 测定项目与方法

收获前定点调查穗数,计算单位面积穗数。随机取 20 穗,调查每穗结实粒数,取平均数为每穗粒数。成熟后各小区收获 2 m²,风干后称质量,计算籽粒产量。之后用晒干的籽粒测定千粒质量。

在播种前和小麦的关键生育时期用取土烘干法测定 0~100 cm 土层含水率(每 10 cm 为 1 层,共分 10 层),灌溉前后加测。采用农田水量平衡方程计算农田耗水量^[18]:

$$ET=\Delta W+P+I+U-R-F, \quad (1)$$

式中:ΔW 为土壤贮水消耗量(mm);P 为该时段的有效降水量(mm);I 为灌水量(mm);U 为地下水通过毛管的作用上移补给作物水量(mm);R 为地表径流量(mm);F 为补给地下水水量(mm)。本试验地块地势平坦,地下水埋深 10 m 以下,小麦生长季降水和灌水量≤75 mm^[19],因此计算式中 U、R、F 均可忽略。

作物水分利用效率 WUE (kg/m³) 计算式为:

$$WUE=Y/ET_a, \quad (2)$$

式中:Y 为籽粒产量(kg/hm²);ET_a 为作物全生育期的总耗水量(m³/hm²)。

灌溉水分利用率 IWUE (kg/m³) 计算式为:

$$IWUE=Y/I, \quad (3)$$

式中:Y 为籽粒产量(kg/hm²);I 为全生育期灌水量(m³/hm²)。

1.4 统计分析

用 Microsoft Excel 2013 处理数据和作图,采用 DPS7.05 软件进行方差分析,用新复极差法(Duncan)检验差异显著性。

表 1 不同处理灌水量

Table 1 Irrigation amount of different treatments					mm
处理	灌水量				总灌水量
	播种	拔节期	灌浆初期	灌浆中期	
W1	45	15	15	15	90
W2	45	22.5	22.5	22.5	112.5
W3	45	30	30	30	135
W4	45	37.5	37.5	37.5	157.5
CK	45	60	60	0	165

2 结果与分析

2.1 不同处理对产量及产量构成因素的影响

表 2 为不同处理冬小麦产量及构成因素,由表 2 可知,不同灌水量对产量具有显著影响,籽粒产量以 W4 处理最高,与 CK 和 W3 处理差异不显著,但显著高于 W1 和 W2 处理;说明增加灌水量显著提高冬小麦籽粒产量。W4 处理穗数最高,W1 处理最低,二者相差 17.00%,达显著水平(P<0.05),但 W4 处理与 CK 差异不显著;穗粒数在条带种植模式下随着灌水量的增加呈增加趋势,以 W4 处理最高,与 W3、W2 处理无显著差异,分别比 W1 处理和 CK 显著增加了 5.94%和 15.31%。可见,条带种植模式灌水可以改善冬小麦的穗部性状,提高穗粒数。千粒质量受灌水量的影响较小,各处理差异不显著。

表 2 不同处理冬小麦产量及构成因素

Table 2 Yield and components of winter wheat of different treatments

处理	穗数/(10 ⁴ hm ⁻²)	穗粒数	千粒质量/g	籽粒产量/(kg hm ⁻²)
W1	691.7±31.46b	28.17±1.39b	41.67±1.63a	7 526.20±248.41b
W2	740.87±27.43ab	31.11±1.75ab	42.65±3.00a	8 176.27±663.81b
W3	765.04±54.09ab	33.27±2.26a	42.32±1.36a	9 280.75±232.45a
W4	833.37±88.69a	33.51±2.25a	41.76±1.43a	9 682.66±301.20a
CK	796.70±43.69a	28.38±1.45b	43.85±0.81a	9 288.28±482.39a

注 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平，下同。

2.2 不同处理对耗水量和耗水特性的影响

小麦耗水主要由灌水量、降水量和土壤贮水量组成。由表 3 可知，生育期总耗水量及灌水量占总耗水量的百分比均随着灌水量的增加而增加，总耗水量在 306.46~399.4 mm，以 CK 和 W4 处理最高，二者与 W3 处理差异不显著，但显著高于 W1、W2 处理。灌水量及占总耗水量的比例均为 CK>W4 处理>W3 处理>W2 处理>W1 处理；降水量占总耗水量的比例表现为 W1 处理>W2 处理>W3 处理>W4 处理>CK，土壤贮水消耗量随灌水量的增加而增加，W1 处理的土壤耗水量最少，与 CK 相比减少 17.94%，CK、W4 处理和 W3 处理之间差异不显著；可能是由于 W1 处理和 W2 处理生育后期长势弱，作物需水量少，使降雨、灌溉水等保留在土壤中，进而增加后期土壤的含水率，降低土壤水消耗量；土壤耗水所占比例随灌水量的增加呈降低趋势，为 CK<W4 处理<W3 处理<W2 处理<W1 处理。在耗水组成中土壤贮水所占的比例最高。与 CK 相比，W3 处理灌水减少 30 mm，总耗水量比 CK 减少 31.41 mm，且 2 个处理的总耗水量和土壤水消耗量差异不显著；表明与常规种植灌溉相比，条带种植模式适宜的灌水量更有利于作物对水分的吸收利用，同时提高灌溉水的利用，减少灌溉水的无效消耗。

表 3 不同处理冬小麦耗水量及耗水特性

Table 3 Water consumption and characteristics of winter wheat of different treatments

处理	总耗水量/mm	灌水		降水		土壤贮水	
		灌水量/mm	比例/%	降水量/mm	比例/%	耗水量/mm	比例/%
W1	306.46c	90	29.37	81.00	26.43	135.46b	44.20
W2	339.30bc	112.5	33.16	81.00	23.87	145.80ab	42.97
W3	367.59ab	135	36.73	81.00	22.04	151.59a	41.24
W4	398.50a	157.5	39.52	81.00	20.33	160.00a	40.15
CK	399.40a	165	41.31	81.00	20.28	153.40a	38.41

2.3 不同处理对小麦不同生育期耗水量及耗水强度的影响

由表 4 可知，在冬小麦整个生育期内，W1 处理

除播种—拔节期外其余生育时期的耗水量显著低于 W2、W3、W4 处理、CK，表明灌水对冬小麦阶段耗水影响显著。播种到拔节期各处理耗水量在 72~82 mm，耗水模系数表现为 W1 处理>W2 处理>W3 处理>W4 处理>CK；拔节至灌浆初期各处理耗水量为 144.9~190.26 mm，是整个生育期耗水量最大的阶段，CK 和 W4 处理的耗水量显著高于其他处理，W3 处理耗水量比 CK 减少 39.36 mm，耗水模系数表现为 W1 处理>W4 处理>W3 处理>CK>W2 处理；表明拔节期灌水对该阶段各处理耗水表现出显著差异，条带种植模式各灌水处理占总耗水比例较大。灌浆初期到灌浆中期，阶段耗水量表现为 CK>W2 处理>W4 处理>W3 处理>W1 处理，CK 显著高于其他处理；灌浆中期到成熟期以 CK 的耗水量和耗水强度最大，说明 CK 增加了生育后期耗水量。阶段耗水量表明条带种植模式下微喷带灌溉对水分的消耗在播种至灌浆初期所占比重较大，CK 则在灌浆初期至成熟期较大，造成这一现象的原因可能是在冬小麦生育前期，主要以棵间蒸发为主，条带种植模式下的带间距加大了土壤蒸发，常规种植模式（CK）在生育后期冠层覆盖率高，叶面积达到最大，群体长势较旺，叶片呼吸与蒸腾速率增大，增加了后期作物的耗水量。

2.4 不同处理对小麦籽粒产量和水分利用率的影响

由表 5 可知，小麦籽粒产量以 W4 处理最高。条带种植微喷带灌溉条件下冬小麦籽粒产量随着灌水量的增加而增加（图 1），回归方程及决定系数为 $y=-0.1225x^2+63.992x+2701.7$ ($R^2=0.9773$)，拟合程度达到显著水平 ($P<0.05$)，畦灌（CK）灌水在 165 mm 时，产量为 9 283.52 kg/hm²，与 W3 处理差异不显著；表明与畦灌相比，微喷带灌溉显著提高冬小麦的籽粒产量。不同处理水分利用效率以 W3 处理最高，为 2.52 kg/m³，显著高于 CK，与 W1、W2 处理和 W4 处理差异不显著；与 CK 相比，W3 处理产量降低 0.08%，但水分利用率提高了 7.54%；灌溉水利用率表现为 W1 处理>W2 处理>W3 处理>W4 处理>CK，灌溉水利用率随着灌水量的增加而降低。W3 处理提高了土壤贮水占总耗水的比例，促进了小麦对土壤水

和灌溉水的吸收利用,与 CK 和 W4 处理相比减少了 135~157.5 mm 时,冬小麦能获得最高的产量和水分利用效率,即 W3 处理为获得高产和节水的最佳灌溉量。

表 4 不同处理冬小麦阶段耗水量及耗水强度

Table 4 Water consumption and water intensity of winter wheat of different treatments

处理	指标	生育阶段			
		播种—拔节期	拔节—灌浆初期	灌浆初—灌浆中期	灌浆中—成熟期
W1	耗水量/mm	81.93a	144.90b	18.41d	24.68d
	耗水模系数/%	30.35	53.68	15.97	9.15
	日耗水强度/(mm d ⁻¹)	0.46	4.67	2.71	1.18
W2	耗水量/mm	78.76ab	146.97b	54.80b	43.68b
	耗水模系数/%	24.29	45.33	30.38	13.47
	日耗水强度/(mm d ⁻¹)	0.44	4.74	6.65	2.08
W3	耗水量/mm	65.41c	150.90b	36.33c	43.43b
	耗水模系数/%	22.09	50.97	26.94	14.67
	日耗水强度/(mm d ⁻¹)	0.37	4.87	5.10	2.07
W4	耗水量/mm	72.26b	175.81a	51.19b	31.92c
	耗水模系数/%	21.82	53.08	25.10	9.64
	日耗水强度/(mm d ⁻¹)	0.40	5.67	5.79	1.52
CK	耗水量/mm	76.76ab	190.26a	85.92a	62.73a
	耗水模系数/%	18.47	45.77	35.76	15.09
	日耗水强度/(mm d ⁻¹)	0.43	6.14	10.15	2.99

表 5 不同灌水量冬小麦水分利用率

Table 5 Amount water use efficiency of wheat of different irrigation

处理	籽粒产量/(kg hm ⁻²)	WUE/(kg m ⁻³)	IWUE/(kg m ⁻³)
W1	7 526.20±248.41b	2.46±0.08ab	8.36±0.28a
W2	8 176.27±663.81b	2.41±0.01ab	7.27±0.59b
W3	9 280.75±232.45a	2.52±0.06a	6.87±0.17b
W4	9 682.66±301.20a	2.43±0.07ab	6.15±0.19c
CK	9 288.28±482.39a	2.33±0.11b	5.63±0.29c

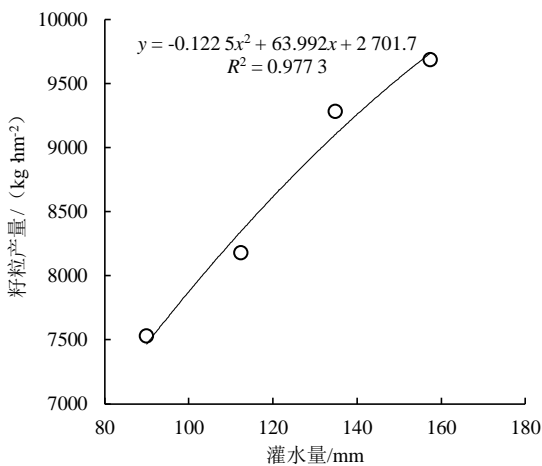


图 1 灌水量与产量的相关性

Fig.1 Correlation between irrigation amount and yield

3 讨论

3.1 不同灌水量的土壤耗水特性

节水农业的关键在于提高灌溉水和降水的利用率,对于灌溉水不足的地方,主要提高土壤贮水利用率^[20],如何协调三者比例,达到最优的水分利用率成为关键问题。有研究表明,减少灌水量会增加土壤贮水消耗量,提高土壤水的利用效率,降低麦田的总耗水量^[21]。本试验表明,总耗水量在 306.46~399.4 mm,随着灌水量的增加,总耗水量逐渐增加;降水和土壤贮水占总耗水量的比例随着灌水量的增加而降低,灌水量的增加降低作物对降水和土壤水的利用。有研究指出小麦在播种至拔节期和灌浆至成熟期耗水最多,分别占全生育期总耗水的 30%~40%和 20%~30%^[22];张兴娟等^[23]研究指出拔节至成熟期是冬小麦耗水的主要时期,占总耗水的 60%以上。研究表明,拔节至灌浆初期耗水量最大,达 144.6~190.26 mm,占全生育期总耗水量的 45.33%~53.68%。各处理在不同的生育阶段耗水模系数表现显著的差异,其中条带种植模式微喷带灌溉各处理在播种至灌浆初期对水分的消耗占比较大,常规种植模式(CK)在灌浆初期至成熟期对水分的消耗比重较大。可能是由于 CK 叶面积指数大,植株生长旺盛,群体蒸散量大,增大后期作物的耗水量。该研究中各阶段的耗水总量比全生育期

总耗水量少,可能是由于灌溉前后有部分水分消耗蒸发未能计算。根据灌溉前后土壤水分的分布,与CK相比,条带种植微喷带灌溉适宜的灌水量增加种植行土壤含水率,减少灌溉水向边行和空行的侧渗及深层土壤的下渗,提高灌溉水的利用率。

3.2 不同灌水量对冬小麦产量和水分利用率的影响

土壤水分通过对小麦籽粒贮藏物质量和转运的调控最终影响籽粒产量。有研究指出减少生育期总灌水量或生育后期多灌水及水分胁迫都不利于籽粒产量和水分利用率的提高^[24-25]。在一定范围内,随着灌水量的增加,产量也增加,但过量的灌水会降低作物产量和水分利用效率^[26]。吕丽华等^[27]研究指出微灌灌水量从90 mm增至180 mm时,冬小麦产量增加了747.6 kg/hm²,水分利用率仅降低了0.10 kg/m³。小麦经济产量由穗数、穗粒数、千粒质量三因素共同影响,在冬小麦关键生育期进行适量的灌水,可以有效改善冬小麦穗部性状,在拔节期和抽穗期各灌水60 mm处理的籽粒产量最高,主要由于穗数的增加^[15,28]。从本试验的结果可以看出,不同灌溉处理对千粒质量无显著差异,穗数和穗粒数是影响产量形成的主要因素,且灌水过多过少都不利于穗粒数的形成,条带种植模式下微喷带灌溉有利改善穗部性状。本试验表明,在微喷带灌溉下,产量随着灌水量的增加呈增加趋势,灌水量为157.5 mm的W4处理,产量最高为9 682.66 kg/hm²,与CK无显著差异,灌水量为135 mm(W3处理)时,产量与CK相比有所降低但差异不显著;灌水135 mm的W3处理具有最高的水分利用率,比CK提高了7.54%,灌溉水的利用效率随灌水的增加而降低,W3处理在不降低产量的同时还提高了作物的水分利用率。因此W3灌水处理提高了作物的产量和水分利用效率;CK灌水量大造成前期营养生长过旺,削弱了后期生殖器官的生长,降低了籽粒产量。因此,在该试验种植方式下于关键时期进行适量的微喷带灌溉,即能充分利用土壤水分,提高灌溉水的利用率,也有利于产量的提高。

4 结论

1) 不同种植和灌水处理下冬小麦总耗水量在306.46~399.4 mm之间,随着灌水量的增加,总耗水量逐渐增加;降水和土壤贮水占总耗水量的比例随着灌水量的增加而降低;微喷带灌溉W3处理减少无效水消耗,提高灌溉水的利用效率;全生育期内拔节至灌浆期耗水量最大,其中条带种植模式微喷带灌溉各处理在播种至灌浆初期对水分的消耗占比较大,常规种植模式(CK)在灌浆初期一成熟期对水分的消耗比重较大。

2) 本试验条件下,实现高产和水分高效利用相结合的最适灌溉量范围为135.0~157.5 mm,在该范围内,能获得9 682.66 kg/hm²籽粒产量,同时提高了冬小麦的水分利用率;因此适宜的微喷带灌溉量即提高作物产量,也提高水分利用率。

参考文献:

- [1] 黄占斌, 山仑. 水分利用效率及其生理生态机理研究进展[J]. 中国生态农业学报, 1998, 6(4): 19-23
HUANG Zhanbin, SHAN Lun. Research progress on water use efficiency and its physio-ecological mechanism[J]. Ecological Agriculture Research, 1998, 6(4): 19-23.
- [2] 宓文海, 江荣风, 刘全清, 等. 不同灌溉方式对华北冬小麦生长的影响[J]. 华北农学报, 2013, 28(2): 175-179.
MI Wenhai, JIANG Rongfeng, LIU Quanqing, et al. Influence of different irrigation technology on production of winter wheat in north plain[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(2): 175-179.
- [3] 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): 27-32.
WANG Shufen, ZHANG Xiyong, PEI Dong. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 27-32.
- [4] 梁硕硕, 关劼兮, 李璐, 等. 水分处理对冬小麦生育期耗水分配及产量影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 52-59.
LIANG Shuoshuo, GUAN Jiexi, LI Lu, et al. Impact of irrigation schedules on yield, water consumption and water use efficiency of winter wheat[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 52-59.
- [5] 张丽华, 姚艳荣, 曹洁璇, 等. 严重冬春干旱年型不同水分运筹方式对冬小麦产量的效应[J]. 华北农学报, 2013, 28(S1): 136-141.
ZHANG Lihua, YAO Yanrong, CAO Jiexuan, et al. Efficient of irrigation application regime on yield of winter wheat in a typical dry year[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(S1): 136-141.
- [6] YUAN Z J, SHEN Y J. Estimation of agricultural water consumption from meteorological and yield data: A case study of Hebei, North China[J]. Plos One, 2013, 8(3): 58 685.
- [7] 许金金, 张治平, 刘浩, 等. 长度和水压对微喷带沿程水肥均匀性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(10): 30-36.
XU Jinjin, ZHANG Zhiping, LIU Hao, et al. Effects of length and hydraulic pressure on the uniformity of spraying water volume and fertilizer concentration along micro-spraying hoses[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(10): 30-36.
- [8] 李金鹏, 宋文越, 姚春生, 等. 微喷水肥一体化对冬小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 1-9.
LI Jinpeng, SONG Wenyue, YAO Chunsheng, et al. Effects of nitrogen

- fertilizer application and micro-sprinkling irrigation integration on grain yield[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25 (3): 1-9.
- [9] 白珊珊, 万书勤, 康跃虎, 等. 作物遮挡下不同微喷带灌溉关键参数研究[J]. *灌溉排水学报*, 2015, 34(1): 27-32.
- BAI Shanshan, WAN Shuqin, KANG Yuehu, et al. Irrigation parameters of different micro-sprinkling hoses under crop shading[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 34(1): 27-32.
- [10] 王东, 徐学欣, 张洪波, 等. 微喷带灌溉对小麦灌浆期冠层温湿度变化和粒重的影响[J]. *作物学报*, 2015, 41(10): 1 564-1 574.
- WANG Dong, XU XueXin, ZHANG HongBo, et al. Effects of irrigation with micro-sprinkling hoses on canopy temperature and humidity at filling stage and grain weight of wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2015, 41(10): 1 564-1 574.
- [11] 徐学欣, 王东, 谷淑波. 微喷带灌溉对冬小麦耗水特性和产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(4): 472-482.
- XU Xuexin, WANG Dong, GU Shubo. Effect of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on water consumption characteristics and grain yield of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(4): 472-482.
- [12] 何昕楠, 林祥, 谷淑波, 等. 微喷补灌对麦田土壤物理性状及冬小麦耗水和产量的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(6): 879-892.
- HE Xinnan, LIN Xiang, GU Shubo, et al. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on soil physical properties, water consumption and grain yield of winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(6): 879-892.
- [13] 满建国, 王东, 张永丽, 等. 不同喷射角微喷带灌溉对土壤水分布与冬小麦耗水特性及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(24): 5 098-5 112.
- MAN Jianguo, WANG Dong, ZHANG Yongli, et al. Effects of irrigation with micro-sprinkling hoses of different sprinkling angles on soil water distribution and water consumption characteristics and grain yield of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(24): 5 098-5 112.
- [14] 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.
- [15] 徐袁博, 李援农, 银敏华, 等. 不同微喷灌溉水量对冬小麦生长、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.
- XU Yuanbo, LI Yuannong, YIN Minhua, et al. Effects of micro-sprinkler irrigation on growth, yield and water use efficiency of winter wheat[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36 (1): 121-125.
- [16] 张西平, 绳莉丽, 甄文超, 等. 不同灌水定额对河北省山前平原区冬小麦耗水规律和产量的影响[J]. *河北农业大学学报*, 2015, 38(5): 101-104, 115.
- ZHANG Xiping, SHENG Lili, ZHEN Wenchao, et al. Effect of different irrigation quota on water consumption and yield of winter wheat of the piedmont Plains in Hebei Province[J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 2015, 38(5): 101-104, 115.
- [17] 周丽丽, 薛彬, 孟范玉, 等. 喷灌定额和灌水频次对冬小麦产量及品质的影响分析[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(1): 235-243.
- ZHOU Lili, XUE Bin, MENG Fanyu, et al. Effects of irrigation quota and irrigation frequency on yield and quality of winter wheat under sprinkler irrigation system[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2018, 49(1): 235-243.
- [18] 陶毓汾, 王立祥, 韩仕峰. 中国北方旱农地区水分生产潜力与开发[M]. 北京:中国气象出版社, 1993.
- TAO Yufen, WANG Lixiang, HAN Shifeng. Potential and development of water production in dry farming areas in northern China[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993.
- [19] 何立谦, 张维宏, 杜雄, 等. 土下覆膜与适宜灌水提高冬小麦水分利用率[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(S1): 94-104.
- HE Liqian, ZHANG Weihong, DU Xiong, et al. Soil-coated ultrathin plastic-film mulching and suitable irrigation improve water use efficiency of winter wheat [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (S1): 94-104
- [20] 山仑, 徐萌. 节水农业及其生理生态基础[J]. *应用生态学报*, 1991, 2(1): 70-76.
- SHAN Lun, XU Meng. Water-saving agriculture and its physio-ecological basis[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1991, 2(1): 70-76.
- [21] 王德梅, 于振文. 灌溉量和灌溉时期对小麦耗水特性和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(9): 1 965-1 970.
- WANG Demei, YU Zhenwen. Effects of irrigation amount and stage on water consumption characteristics and yield of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19, (9): 1 965-1 970.
- [22] 杨静敬, 路振广, 潘国强, 等. 亏缺灌溉对冬小麦耗水规律及产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2013(4): 8-11.
- YANG Jingjing, LU Zhenguang, PAN Guoqiang, et al. Effect of deficit irrigation on water consumption and yield of winter wheat[J]. *Water Saving Irrigation*, 2013(4): 8-11.
- [23] 张兴娟, 薛绪掌, 郭文忠, 等. 有限供水下冬小麦全程耗水特征定量研究[J]. *生态学报*, 2014, 34(10): 2 567-2 580.
- ZHANG Xingjuan, XUE Xuzhang, GUO Wenzhong, et al. Quantitative study of water consumption characteristics of winter wheat under deficit irrigation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(10): 2 567-2 580.
- [24] 刘建刚, 赵勇, 裴源生, 等. 基于水分胁迫的植被生长模型的构建与应用[J]. *灌溉排水学报*, 2012, 31(2): 112-115.
- LIU Jiangan, ZHAO Yong, PEI Yuansheng, et al. Construction and applying of vegetation growth model forced by water stress[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2012, 31(2): 112-115.

- [25] 黄彩霞, 柴守玺, 赵德明, 等. 灌溉对干旱区冬小麦干物质积累、分配和产量的影响[J]. 植物生态学报, 2014, 38(12): 1 333-1 344.
HUANG Caixia, CHAI Shouxi, ZHAO Deming, et al. Effects of irrigation on accumulation and distribution of dry matter and grain yield in winter wheat in arid regions of China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38 (12): 1 333-1 344.
- [26] 黄玲, 杨文平, 胡喜巧, 等. 水氮互作对冬小麦耗水特性和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 168-174.
HUANG Ling, YANG Wenping, HU Xiqiao, et al. Effects of irrigation and nitrogen interaction on water consumption characteristics and nitrogen utilization of winter wheat[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 168-174.
- [27] 吕丽华, 王勤, 张经廷, 等. 不同水分运筹方式下小麦产量形成及水分消耗特征[J]. 华北农学报, 2016, 31(S1): 31-35.
LYU Lihua, WANG Qin, ZHANG Jingting, et al. Yield formation and water consumption characteristics of Wheat under different water irrigation amount[J]. Journal of North China Agriculture, 2016, 31(S1): 31-35.
- [28] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(3): 33-36.

The Effect of Hose-micro-sprinkling Irrigation Amount on Yield and Water Consumption of Strip-planted Winter Wheat

SONG Xinyue¹, LIU Shengyao², JIA Songnan², GAO Zhen¹,
FAN Fengcui^{1,2}, DU Xiong^{1*}, QI Hao², ZHANG Zhe²

(1.College of Agronomy, Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China; 2.Agricultural Information and Economic Research Institute, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: **【Background】** Hebei plain is one of the most important winter wheat production bases in China and plays an critical role in national food security. Most precipitations within wheat growth season in this region fall in July-August and cannot sustain wheat growth. Therefore, supplementary irrigation using groundwater is needed. Over exploitation of groundwater combining with the inefficient flood irrigation over the past few decades has led to serious environmental and ecological degradation, and developing water-saving irrigation techniques has thus become essential to sustaining wheat production in this region. **【Objective】** The purpose of this paper is to study how hose-micro-sprinkler irrigation amount impacts water consumption and yield of winter wheat planted in strip pattern, in attempts to improve water use efficacy without undermining crop yield. **【Method】** The field experiment was conducted in 2019 with the cultivar Jimai 22 used as the model plant. We compared four irrigation amounts: 15 mm (W1), 22.5 mm (W2), 30 mm(W3) and 37.5 mm(W4), with the 60 mm furrow-irrigation used by local farmers taken as the control (CK). Crops in each treatment were irrigated at jointing, early and middle grain-filling stages, respectively. During the experiment, we measured and calculated water consumption, grain yield and water use efficiency of the wheat. **【Result】** The total water consumption during the growth season was 306.46~399.4 mm, varying with treatments, and the proportion of soil water consumed by the crops under W1, W2, W3, W4 and CK was 44.2%, 42.97%, 41.24%, 40.15% and 38.41%, respectively. With the irrigation amount increasing, the proportion of irrigation water consumed by the crops increased. The crops were most water-demanding from the jointing stage to the early filling stage, with 45.33%~53.68% of the total water they consumed occurring in this period. The crops consumed more water from sowing stage to early grouting stage in all treatments, while in CK the crops took up more water they consumed between the early grain-filling stage and the ripening stage. The grain yield increased with irrigation amount, peaking at 9 682.66 kg/hm² in W4. In contrast, water use efficiency in W3 was the highest, increasing by 7.54% compared to the CK. **【Conclusion】** In terms of high-yield and high-water use efficiency, the most appropriate irrigation was 135~157.5 mm, with its associated water consumption being 367.5~400 mm.

Key words: winter wheat; micro-sprinkling-hoses irrigation; irrigation amount; water consumption; yield