

适宜微喷灌灌水频率及氮肥量提高冬小麦产量和水分利用效率

张英华¹, 张琪¹, 徐学欣¹, 李金鹏¹, 王彬¹, 周顺利¹, 刘立均², 王志敏^{1*}

(1. 中国农业大学农学院, 北京 100193; 2. 泰安丰园灌溉科技有限公司, 泰安 271039)

摘要: 为明确微喷水肥一体化条件下灌溉次数和氮肥用量对冬小麦产量形成和水分利用的影响, 该试验在灌水定额 1 500 m³/hm² 下设置微喷 2 次 (拔节期 750 m³/hm²+开花期 750 m³/hm²)、3 次 (拔节期 450 m³/hm²+开花期 750 m³/hm²+灌浆期 300 m³/hm²)、4 次 (拔节期 450 m³/hm²+孕穗期 300 m³/hm²+开花期 450 m³/hm²+灌浆期 300 m³/hm²) 和氮肥追施 45、90、135 kg/hm² 处理, N 肥随灌水等量分次施入, 考察群体光合特性、物质生产和水分利用特征。结果表明: 微喷 3 次和 4 次相比于微喷 2 次, 产量提高了 5.3%~18.9%, 水分利用效率提高了 5.3%~27.8%, 但微喷 3 次与 4 次之间差异不显著。适当增加微喷次数提高了开花期和灌浆期群体绿色叶面积指数, 延缓了叶片衰老, 提高了生育后期干物质积累, 增加了千粒质量, 进而提高了籽粒产量; 多次微喷 (3 次或 4 次) 降低了总耗水量和开花前耗水比例, 提高了开花后耗水比例; 适当增施氮肥能进一步提高花后物质积累和花后耗水比例。综合来看, 1 500 m³/hm² 灌溉定额下微喷 4 次, 追施氮肥 90 kg/hm² 产量和水分利用效率较高。

关键词: 灌溉; 氮肥; 作物; 冬小麦; 微喷次数; 产量; 水分利用

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.013

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-05-0088-08

张英华, 张琪, 徐学欣, 李金鹏, 王彬, 周顺利, 刘立均, 王志敏. 适宜微喷灌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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.013

http://www.tcsae.org

Zhang Yinghua, Zhang Qi, Xu Xuexin, Li Jinpeng, Wang Bin, Zhou Shunli, Liu Lijun, Wang Zhimin. Optimal irrigation frequency and nitrogen application rate improving yield formation and water utilization in winter wheat under micro-sprinkling condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(5): 88—95.

(in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.05.013 http://www.tcsae.org

0 引言

华北平原冬小麦生长季降水量少, 补充灌溉是小麦高产栽培的重要措施。目前大田生产上多采用漫灌方式, 灌水量难以精确控制, 往往造成灌水过多, 水分利用效率较低^[1-2]。提高灌溉水和土壤贮水利用效率是该区小麦生产亟待解决的问题。近年来随着国家田间工程方面资金投入的增加和微灌设备成本的降低, 滴灌、微喷技术不仅在蔬菜和果树等经济作物上得到广泛应用, 而且在大田小麦和玉米等作物上也有快速发展, 特别是新疆采用滴灌技术灌溉小麦, 产量和水肥效率都得到了大幅提升^[3-5]。微灌相对于传统漫灌有一定优势。在工程性状方面, 微灌能量损失少, 通过选择合适的带长和喷射角度能提高灌水均匀性^[6-11]。在农艺性状方面, 微灌可实现节水保墒, 提高冬小麦在关键生长期的叶面积指数, 促进其进行光合作用^[12-14]; 增加冬小麦生物量, 提高千粒质量, 提高产量^[15-17]; 改善农田小气候, 提高冠层相对湿

度, 降低蒸腾速率, 提高作物对灌溉水的利用效率^[18-20]。

目前华北平原冬小麦节水高产栽培主推拔节水和开花水的两水制度^[21], 灌水总额约 1 500 m³/hm², 在此总额下, 如果采用微喷技术则可实现增次和每次减量灌溉。增次减量灌溉是否更有利于冬小麦产量形成和水分利用, 目前未见报道。小麦生育后期是决定籽粒产量和籽粒品质的关键时期, 适当增加小麦后期的吸氮量, 维持植株较高的氮素水平, 有利于提高光合效率和延长叶片功能期^[22]。采用微喷技术可以实现水肥一体化, 使得氮肥后移更容易实现。有关微喷下后期水氮耦合对冬小麦产量形成和水分利用的影响也未见报道。

本试验在灌水总量一定条件下, 设置微喷 2 次、3 次、4 次和追施氮肥 45、90、135 kg/hm² 处理, 采用水肥一体化, 研究微喷次数和氮肥用量对冬小麦光合特性、物质生产、耗水特性以及产量和水分利用效率的影响, 初步提出适宜的微喷模式和氮肥用量, 为微喷下冬小麦产量的进一步提高和微喷技术的推广应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2012—2013 和 2013—2014 年度在中国农业大学吴桥实验站 (37°41'02"N、116°37'23"E) 进行。试验区属海河平原黑龙港流域中部, 暖温带季风气候, 海拔 14~22 m, 年降水量历年平均 562 mm, 主要分布在 6—8 月份。

收稿日期: 2015-08-22 修订日期: 2016-01-10

基金项目: 公益性行业科研专项 (201303133、201203031); 国家自然科学基金 (31401297); 北京市青年英才专项 (31056101)

作者简介: 张英华, 女, 博士, 副教授, 主要从事作物节水高产生理研究。北京 中国农业大学农学院, 100193。Email: zhangyh1216@126.com

*通信作者: 王志敏, 男, 博士, 教授, 主要从事作物节水高产栽培研究。北京 中国农业大学农学院, 100193。Email: zhimin206@263.net

土壤为冲积型盐化潮土，壤质底黏，地下水位 7~9 m，2 m 土体有效贮水 420 m³。耕层土壤有机质 11.2 g/kg，全氮 0.8 g/kg，速效磷 18.2 mg/kg，速效钾 76.8 mg/kg，土壤肥力中等。灌溉用井水，井深 40 m，井离试验地 25 m。

1.2 试验设计

以华北平原冬小麦现行节水高产灌溉制度（拔节水 和开花水）的灌水总额 1 500 m³/hm² 作为本试验灌水总量。在此灌水总量下设置不同微喷次数和水氮一体化处理。具体处理如表 1 所示。2012—2013 年度设置微喷 2 次（S2）、微喷 3 次（S3，包括 4 种组合即 S3-1、S3-2、S3-3 和 S3-4）、微喷 4 次（S4）和常规地面漫灌（拔节

水和开花水）对照（CK），总施氮量 195 kg/hm²，其中 105 kg/hm² 作底肥，90 kg/hm² 随灌水分次追施，分析不同微喷次数对冬小麦产量和水分利用效率的影响，明确微喷 3 次适宜的灌水模式。2013—2014 年度设置微喷 2 次（S2）、微喷 3 次（S3，与上年 S3-4 同）和微喷 4 次（S4），各处理底氮肥均为 105 kg/hm²，在此基础上设置不同追氮量（N1、N2、N3，分别为 45、90、135 kg/hm²）处理，追肥随灌水分次施用，分析水氮耦合对冬小麦阶段物质积累、阶段耗水以及产量和水分利用效率的影响。微喷 2 次、3 次、4 次，每次氮肥用量分别为总追氮量的 1/2、1/3、1/4。

表 1 不同微喷处理水氮用量
Table 1 Amount of irrigation and N fertilizer in different micro-sprinkling treatments

年份 Years	处理 Treatment	灌水 Irrigation/(m ³ hm ⁻²)					氮肥 N fertilizer/(kg hm ⁻²)					
		拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Anthesis	灌浆期 Grain filling	小计 Total	播前 Pre-sowing	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Anthesis	灌浆期 Grain filling	小计 Total
2012— 2013	CK	750		750		1500	105	45		45		195
	S2	750		750		1500	105	45		45		195
	S3-1	450	300	750		1500	105	30	30	30		195
	S3-2	750		450	300	1500	105	30		30	30	195
	S3-3	600		600	300	1500	105	30		30	30	195
	S3-4	450		750	300	1500	105	30		30	30	195
	S4	450	300	450	300	1500	105	22.5	22.5	22.5	22.5	195
2013— 2014	S2N1	750		750		1500	105	22.5		22.5		150
	S2N2	750		750		1500	105	45		45		195
	S2N3	750		750		1500	105	67.5		67.5		240
	S3N1	450		750	300	1500	105	15		15	15	150
	S3N2	450		750	300	1500	105	30		30	30	195
	S3N3	450		750	300	1500	105	45		45	45	240
	S4N1	450	300	450	300	1500	105	11.25	11.25	11.25	11.25	150
	S4N2	450	300	450	300	1500	105	22.5	22.5	22.5	22.5	195
	S4N3	450	300	450	300	1500	105	33.75	33.75	33.75	33.75	240

1.3 试验过程

各处理小区 10 m×8 m，3 次重复，采取裂区设计，以微喷次数为主区，以每次微喷量或追氮量为副区。供试小麦品种为济麦 22，10 月 15 日播种，15 cm 等行距种植，采用 Man 等^[23-24]设计的低压微喷灌溉系统（泰安丰园灌溉科技有限公司）进行灌水，水源为井水，灌水量定额可控，微喷带水压 0.02 MPa，每隔 8 行放置 1 个微喷带，带长 40 m，出水量 6.0 m³/h，喷射角 80°。播前底施纯氮 105 kg/hm²、P₂O₅ 120 kg/hm²、K₂O 90 kg/hm²，追肥采用尿素，先在施肥灌中溶解，如表 1 所示随水一同施入，常规灌溉氮肥地面撒施。

2012—2013 年度小麦季降雨 161.3 mm，2013—2014 年度小麦季降雨 137.1 mm，不同月份降雨量见图 1。微喷 2 次（或漫灌对照）2012—2013 年度冬小麦拔节期、开花期和成熟期分别为 2013 年 4 月 13 日、5 月 12 日和 6 月 15 日，2013—2014 年度拔节期、开花期和成熟期分别为 2014 年 4 月 3 日、5 月 1 日和 6 月 7 日，微喷 3 次和 4 次成熟期相应延后 2 d，其他时期出现的日期与微喷 2 次相近。

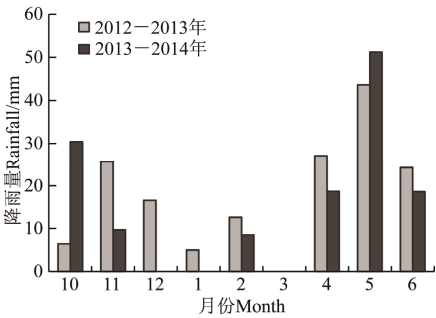


图 1 2012—2014 年度冬小麦生育期内降雨分布

Fig.1 Rainfall distribution during winter wheat growing seasons in 2012-2014

1.4 测定项目与方法

- 1) 群体叶面积指数 (leaf area index, LAI)：于开花期和灌浆后期（花后 25 d）用叶面积分析仪测定群体叶面积，换算成 LAI。
- 2) 旗叶绿素含量：于开花期和灌浆后期采用紫外可见分光光度计测定旗叶绿素 a、b 含量。
- 3) 群体干物质积累和分配：在拔节期、开花期和成

熟期测定群体干物质。各试验小区取代表性样段 2 cm×50 cm, 按照茎、叶、穗进行分样。105℃杀青 15 min, 80℃烘干至恒质量, 称量, 计算阶段干物质和分配比例。

4) 土壤水分: 于播种前、拔节期、开花期和成熟期测土壤水分含量。测定时, 用土钻在各小区取 0~200 cm 土层土壤, 每 20 cm 为一层, 取样后立即装入铝盒中, 称取新鲜土质量, 120℃烘干至恒质量, 计算土壤质量含水率。

5) 其他指标计算: 耗水模系数 (water consumption percentage) 为生育阶段水分蒸散量占全生育期水分蒸散总量的比例, %; 耗水强度 (water consumption intensity) 为生育阶段水分蒸散量与生育阶段持续天数的比值, mm/d; 水分利用效率 (water use efficiency) 为经济产量与全生育期水分蒸散总量 (evapotranspiration, ET) 的比值, kg/m³。ET 为

$$ET = \Delta S + P_r + I - D + W_g - R. \quad (1)$$

式中 ΔS 为生育期土壤水分变化量, mm; P_r 为降雨量, mm; I 为灌溉量, mm; D 为灌溉后土壤水向下层流动量; W_g 为深层地下水利用量; R 为地表径流。本试验地地下水位 9 m, 且无地表径流, D 、 W_g 和 R 均可忽略。

6) 测产及考种: 成熟期从各试验小区选取 4 m² (2 m×2 m) 区域, 单独人工收割, 脱粒后风干计产, 籽粒质量含水率计为 13%。同时各处理每小区取 1 m 双行样段, 用于调查穗数、穗粒数和千粒质量。

1.5 数据处理

数据用 Excel 2010 软件绘图, 用 SPSS15.0 统计分析软件进行方差分析与多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同微喷处理下产量和产量构成的变化

2012—2013 年度, 微喷 2 次 (S2) 与漫灌对照产量相近, 微喷 3 次处理中, S3-4 花后灌水比例最大, 其产量显著高于其他 3 个处理 ($P < 0.05$), 微喷 4 次 (S4) 与 S3-4 产量差异不显著 ($P > 0.05$), 但二者均显著高于 S2 处理 ($P < 0.05$) (表 2)。从产量构成因素来看, 增加微喷次数后, S3-1 和 S4 处理穗数与 S2 差异不显著, 其他处理穗数显著低于 S2 ($P < 0.05$); 穗粒数在开花期灌水量相同的处理 CK、S2、S3-1 和 S3-4 中无显著差异 ($P > 0.05$), 开花期灌水量下降的 2 个处理 S3-2 和 S3-3, 其穗粒数显著低于 S2 ($P < 0.05$), 孕穗期增加灌水 (S4) 则能减缓穗粒数下降的趋势; 微喷 3 次处理中只有 S3-1 千粒质量与 S2 差异不显著 ($P > 0.05$), 其他微喷 3 次和 4 次处理千粒质量显著高于 S2 ($P < 0.05$)。对于收获指数 (HI), 花后灌水比例增加的处理 S3-3 和 S3-4, 其 HI 显著高于 S2 ($P < 0.05$)。可见, 增加花后灌水比例有利于提高千粒质量和收获指数, 进而提高产量, 微喷 3 次以 S3-4 产量最高。

2013—2014 年度, 在微喷 3 次下, 适当增加氮肥用量 (N2) 能提高产量, 微喷 2 次和微喷 4 次条件下增加氮肥用量对产量无显著影响 (表 2)。在氮肥总量相同下, 增加微喷次数有提高产量的趋势, 但不同氮肥下的表现有所不同。在 N1 和 N2 处理下, 微喷 3 次和 4 次产量差

异不显著 ($P > 0.05$), 但显著高于微喷 2 次 ($P < 0.05$); 在 N3 处理下, 增加微喷次数对产量无显著影响 (表 2)。可见, 在低氮下微喷次数增加增产效果更明显。穗粒数与产量变化趋势略有不同, 千粒质量和收获指数的变化趋势与产量变化相近。处理间比较, S4N2 产量较高, 其千粒质量和收获指数也显著高于微喷 2 次处理 ($P < 0.05$)。

表 2 不同微喷处理冬小麦产量和产量构成

Table 2 Grain yield and yield components of winter wheat for different micro-sprinkling treatments

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spike number/ (个·10 ⁴ hm ⁻²)	穗粒数 Kernels per spike	千粒质量 Thousand grain weight/g	籽粒产量 Grain yield/ (kg·hm ⁻²)	收获 指数 Harvest index
2012— 2013 年	CK	831.0a	35.3a	32.9c	8626.5b	0.45c
	S2	823.5a	34.0a	32.3c	8658.0b	0.46bc
	S3-1	786.2ab	35.2a	33.1c	8424.8b	0.47ab
	S3-2	757.5b	32.5b	35.2b	8511.7b	0.46bc
	S3-3	730.5b	32.0b	38.5a	8551.5b	0.49a
2013— 2014 年	S3-4	736.5b	34.4a	36.8ab	9023.2a	0.48a
	S4	768.1ab	34.6a	35.4b	9119.5a	0.46bc
	S2N1	750.1a	34.2ab	47.3c	8010.2c	0.46cd
	S2N2	765.3a	31.3c	48.4bc	8445.3bc	0.47c
	S2N3	750.5a	34.4ab	48.2bc	8385.4bc	0.47c
	S3N1	750.3a	34.3ab	49.1b	9060.3b	0.47c
	S3N2	780.4a	32.6bc	49.2b	9600.1a	0.48bc
	S3N3	765.2a	35.1a	50.3ab	9090.2b	0.47c
	S4N1	735.2a	33.2b	49.2b	9525.2ab	0.48bc
	S4N2	765.1a	29.6c	51.3a	9855.3a	0.51a
	S4N3	765.3a	32.2bc	49.4b	9405.4ab	0.49b

注: 不同小写字母表示处理间 0.05 水平上差异显著; 下同。

Note: Different letters indicate significant difference among treatments at 0.05 level; The same as below.

2.2 不同微喷模式下群体叶面积指数和旗叶叶绿素含量的变化

对于群体叶面积指数 (leaf area index, LAI) 来说 (图 2a), 在微喷 2 次下增加氮肥用量没有增加开花期 LAI, 灌浆期 LAI 以 N2 处理较高, N1 与 N3 之间无显著差异; 在微喷 3 次和 4 次条件下, 开花期 LAI 随着氮肥用量增加先升高后降低, 以 N2 处理最高, 灌浆期 LAI 在 N1 和 N2 之间无显著差异 ($P > 0.05$), 继续增加氮肥用量, LAI 显著下降 ($P < 0.05$)。可见, N2 处理下开花期和灌浆期群体都有较高的 LAI。在相同追氮量条件下, 随着微喷次数增加, 开花期和灌浆期 LAI 均显著提高 ($P < 0.05$)。在 N1 处理下, S4 和 S3 开花期 LAI 相比 S2 分别提高 14.3% 和 5.0%, 灌浆期分别提高 66.4% 和 26.3%; 在 N2 处理下, S4 和 S3 开花期 LAI 相比 S2 分别提高 40.1% 和 35.5%, 灌浆期分别提高 46.9% 和 16.3%; 在 N3 处理下, S4 和 S3 开花期 LAI 相比 S2 分别提高 22.0% 和 3.6%, 灌浆期分别提高 45.8% 和 18.1%, 综合来看, N2 处理下增加微喷次数 LAI 提高效果更明显。

从开花期旗叶叶绿素 a+b 含量来看 (图 2b), 同样微喷次数下, 氮肥用量从 N1 增加到 N2 叶绿素含量显著提高 ($P < 0.05$), 之后继续增加氮肥用量, 叶绿素含量无显著变化 ($P > 0.05$); 同样氮素用量下, 随着微喷次

数增加，旗叶叶绿素含量显著提高 ($P<0.05$)，N1 处理下 S4 和 S3 叶绿素含量相比 S2 分别提高 21.3%和 5.7%，N2 处理下 S4 和 S3 相比 S2 分别提高 12.2%和 2.5%，N3 处理下 S4 和 S3 相比 S2 分别提高 13.4%和 3.8%，可见，N1 处理下增加微喷次数开花期叶绿素含量提高效果更明显。灌浆后期，S2 处理下增加氮肥用量能显著提高旗叶叶绿素含量 ($P<0.05$)，S3 处理下增加氮肥用量对旗叶叶绿素含量无显著影响，S4 处理下 N3 叶绿素含量显著高于 N1 和 N2 ($P<0.05$)，但 N1 与 N2 之间差异不显著 ($P>0.05$)。在 N1 和 N2 处理下微喷次数从 S2 增加到 S3，叶绿素含量显著提高，继续增加微喷次数对叶绿素含量无显著影响，N3 处理下增加微喷次数则能持续提高旗叶叶绿素含量。综合来看，S4 处理开花期和灌浆期旗叶叶绿素含量均较高。可见，水分后移和减量增次微喷对于延缓旗叶衰老、维持后期较高的叶绿素含量有重要作用。

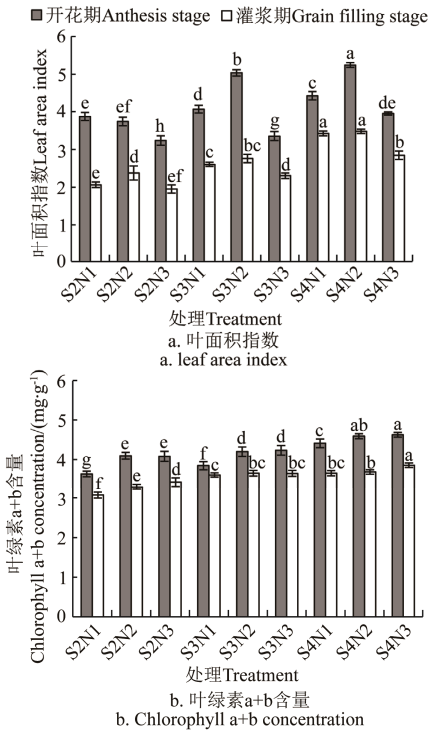


图 2 2013—2014 年不同微喷处理下开花期和灌浆期群体叶面积指数和旗叶叶绿素 a+b 含量的变化
Fig.2 Population leaf area index and chlorophyll a+b concentration of flag leaf at anthesis and grain filling stage in different micro-sprinkling treatments in 2013-2014

2.3 不同微喷模式下群体干物质积累和分配的变化
从成熟期群体总生物量来看 (表 3)，相同微喷次数下，增加氮肥用量并不能显著提高总生物量 ($P>0.05$)；在相同氮素用量下，微喷次数不同对群体总生物量的影响有所不同，N1 处理下增加微喷次数不能显著提高总生物量，N2 和 N3 处理下增加微喷次数能显著提高总生物量 ($P<0.05$)，但 S3 和 S4 之间差异不显著 ($P>0.05$)。从阶段干物质积累和分配来看 (表 3)，在 S2 处理下，N2 与 N1 阶段干物质积累和分配比例无显著差异 ($P>$

0.05)，继续增加氮肥用量，拔节-开花期干物质比例显著提高，开花-成熟期干物质比例显著下降 ($P<0.05$)；在 S3 处理下，增加氮肥用量能显著降低拔节-开花期干物质比例、显著提高开花-成熟期干物质积累比例 ($P<0.05$)，但花后干物质比例 N2 与 N3 之间差异不显著 ($P>0.05$)；在 S4 处理下，随着施氮量的增加，拔节-开花期干物质积累量和分配比例先升高后下降，且以 N2 处理最高，花后干物质积累量 N3 显著高于 N1 ($P<0.05$)，但与 N2 无显著差异 ($P>0.05$)，可见，N2 处理施氮量较适宜。在 N1 和 N2 处理下，增加微喷次数，花前花后干物质积累量都有增加的趋势，花后物质分配比例也有升高的趋势；N3 处理下增加微喷次数则花前干物质积累量和分配比例显著下降，花后干物质积累量和分配比例显著提高，可见增加微喷次数主要增加花后物质生产和花后物质分配比例，从而促进籽粒灌浆，提高粒重。

表 3 2013—2014 年不同微喷处理下的阶段干物质积累和分配
Table 3 Dry matter accumulation and distribution during different growing periods under micro-sprinkling treatments in 2013-2014

处理 Treat- ment	出苗-拔节 Seedling-jointing		拔节-开花 Jointing-anthesis		开花-成熟 Anthesis-maturity		总生物量 Total biomass/ (kg·hm ⁻²)
	生物量 Biomass / (kg·hm ⁻²)	比例 Ratio/ %	生物量 Biomass / (kg·hm ⁻²)	比例 Ratio/ %	生物量 Biomass / (kg·hm ⁻²)	比例 Ratio/ %	
S2N1	3681.9	18.5a	9297.0c	46.8b	6907.8de	34.7c	19886.7bc
S2N2	3681.9	18.9a	9343.2c	47.6b	6611.4ef	33.7c	19636.5c
S2N3	3681.9	18.9a	9595.9bc	49.2a	6238.2f	32.0d	19516.0c
S3N1	3681.9	17.8b	9860.4b	47.6b	7184.8d	34.7c	20727.0b
S3N2	3681.9	17.2bc	9568.7bc	44.6c	8216.8bc	38.3b	21467.3ab
S3N3	3681.9	18.1ab	8780.6d	43.3d	7833.3c	38.6b	20295.7b
S4N1	3681.9	17.0c	9774.8b	45.1c	8231.5bc	38.0b	21688.2ab
S4N2	3681.9	15.6d	11158.7a	47.4b	8714.8ab	37.0b	23555.3a
S4N3	3681.9	16.9c	8893.7d	40.9e	9154.4a	42.1a	21730.0ab

2.4 不同微喷模式下水分利用的变化

由表 4 可见，2012—2013 年度，随着微喷次数增加，总耗水量和土壤水消耗量有下降的趋势，其中 S3-1 和 S4 处理显著低于 S2 ($P<0.05$)，微喷 3 次处理中随着花后灌水比例的增加土壤水消耗量和总耗水量有增加的趋势，其中 S3-4 处理耗水量与 S2 无显著差异，但其产量较高，故水分利用效率 (water use efficiency, WUE) 显著高于 S2 和漫灌对照 ($P<0.05$)，S4 总耗水量显著低于 S2，产量高于 S2，因此 WUE 提高了 15.8% ($P<0.05$)。2013—2014 年度，S2 处理下增加氮肥用量，总耗水量、土壤水消耗量、WUE 处理间无显著差异 ($P>0.05$)；S3 和 S4 处理下增加氮肥用量，总耗水量和土壤水消耗量有先增加后下降的趋势，以 N2 处理较高，但 WUE 处理间无显著差异 ($P>0.05$)，可见，微喷次数相同时，增加氮肥用量对 WUE 影响不显著。相同氮肥用量下，增加微喷次数则可显著提高 WUE ($P<0.05$) (表 4)。

表 4 不同微喷模式下的耗水组成和水分利用效率
Table 4 Water consumption components and water use efficiency in different micro-sprinkling treatments

年份 Year	处理 Treatment	总耗水量 Total water consumption ET/mm	土壤耗水量 Soil water consumption ΔS/mm	降雨量 Rainfall P _r /mm	灌水量 Irrigation amount I/mm	水分利用效率 Water use efficiency WUE/(kg·m ⁻³)
2012 — 2013 — 2014 年	CK	457.3a	161.0a	161.3	150	1.9c
	S2	450.7a	154.4a	161.3	150	1.9c
	S3-1	407.6b	111.3bc	161.3	150	2.1ab
	S3-2	423.8ab	127.5b	161.3	150	2.0b
	S3-3	436.1a	139.8ab	161.3	150	2.0b
	S3-4	444.0a	147.7a	161.3	150	2.0b
2013 — 2014 年	S4	405.5b	109.2bc	161.3	150	2.2a
	S2N1	435.5a	163.4a	137.1	150	1.8cd
	S2N2	424.5a	152.4ab	137.1	150	1.9c
	S2N3	427.6a	155.5ab	137.1	150	1.9c
	S3N1	399.6b	127.5c	137.1	150	2.2ab
	S3N2	424.7a	152.6ab	137.1	150	2.2ab
	S3N3	419.9a	147.8b	137.1	150	2.1b
	S4N1	406.3ab	134.2c	137.1	150	2.3a
	S4N2	427.1a	155.0ab	137.1	150	2.2ab
	S4N3	408.8ab	136.7c	137.1	150	2.2ab

从阶段耗水来看(表 5)，微喷 2 次条件下，与 N1 处理相比，N2 处理显著降低了拔节期-开花期耗水比例，显著提高了开花期-成熟期耗水比例，N3 处理阶段耗水比例与

N1 相近；微喷 3 次条件下，N2 处理播种期-拔节期耗水比例显著低于 N1 ($P<0.05$)，拔节后耗水比例与 N1 相近，N3 处理则开花前耗水比例显著低于 N1 ($P<0.05$)，开花后耗水比例显著高于 N1 ($P<0.05$)；微喷 4 次下，N2 处理播种期-拔节期耗水比例显著低于 N1 ($P<0.05$)，开花后耗水比例显著高于 N1 ($P<0.05$)，N3 处理各阶段耗水比例与 N1 相近。可见，微喷 2 次的 N2 处理、微喷 3 次的 N3 处理和微喷 4 次的 N2 处理开花后耗水比例显著高于 N1 处理 ($P<0.05$)。在 N1 处理下，微喷 3 次和 4 次相比于微喷 2 次，播种期-拔节期耗水比例显著提高 ($P<0.05$)，拔节期-开花期耗水比例显著下降 ($P<0.05$)，微喷 4 次后开花期-成熟期耗水比例显著提高 ($P<0.05$)；N2 处理下，微喷 3 次和 2 次各阶段耗水比例相近，微喷 4 次拔节期-开花期耗水比例显著低于微喷 2 次 ($P<0.05$)，开花后耗水比例显著高于微喷 2 次 ($P<0.05$)；N3 处理下，随着微喷次数增加，拔节期-开花期耗水比例逐渐减少，播种期-拔节期和开花期-成熟期耗水比例逐渐增加，且花后耗水比例增幅较大。可见，相同氮素用量下，微喷 4 次花后耗水比例显著高于微喷 2 次。平均来看，水分处理以 S4 花后耗水比例最高，氮肥处理以 N2 花后耗水比例最高。

表 5 2013—2014 年不同微喷模式下阶段耗水特征
Table 5 Characteristics of water consumption at different growing periods under micro-sprinkling treatments in 2013-2014

处理 Treatment	播种期-拔节期 Sowing to jointing			拔节期-开花期 Jointing to anthesis			开花期-成熟期 Anthesis to maturity		
	CA/mm	CD/(mm·d ⁻¹)	CP/%	CA/mm	CD/(mm·d ⁻¹)	CP/%	CA/mm	CD/(mm·d ⁻¹)	CP/%
S2N1	220.7	1.2	49.3de	63.3a	2.3a	14.2a	163.4c	4.1cd	36.5de
S2N2	220.7	1.2	50.6cd	48.8c	1.8c	11.2b	166.8bc	4.2c	38.2c
S2N3	220.7	1.2	50.2d	64.1a	2.4a	14.6a	154.7d	3.9d	35.2e
S3N1	220.7	1.2	53.6a	45.1cd	1.7c	11.0b	145.6de	3.6e	35.4e
S3N2	220.7	1.2	50.6cd	57.0b	2.1b	13.1ab	158.9cd	4.0cd	36.4de
S3N3	220.7	1.2	51.1c	41.1d	1.5c	9.5c	169.9bc	4.2c	39.4c
S4N1	220.7	1.2	52.8ab	21.9e	0.8d	5.2d	175.6b	4.4b	42.0b
S4N2	220.7	1.2	50.3d	18.3e	0.7d	4.2d	200.1a	5.0a	45.6a
S4N3	220.7	1.2	52.5b	20.1e	0.7d	4.8d	180.0b	4.5b	42.8b

注：CA：耗水量 Water consumption amount; CD：耗水强度 Diurnal water consumption amount; CP：耗水模系数 Water consumption percentage.

从不同土层耗水来看(图 3)，在相同微喷次数下增加氮肥用量，上层土壤耗水量增加，下层土壤耗水量减少，且以 S3 处理下效应明显；在相同氮素用量下增加微喷次数，

上层土壤耗水量减少，下层土壤耗水量增加，S2 处理耗水基本达到 160 cm 土层，S4 处理可达 200 cm 土层，可见，增次减量微喷增加了作物对深层土壤水分的利用。

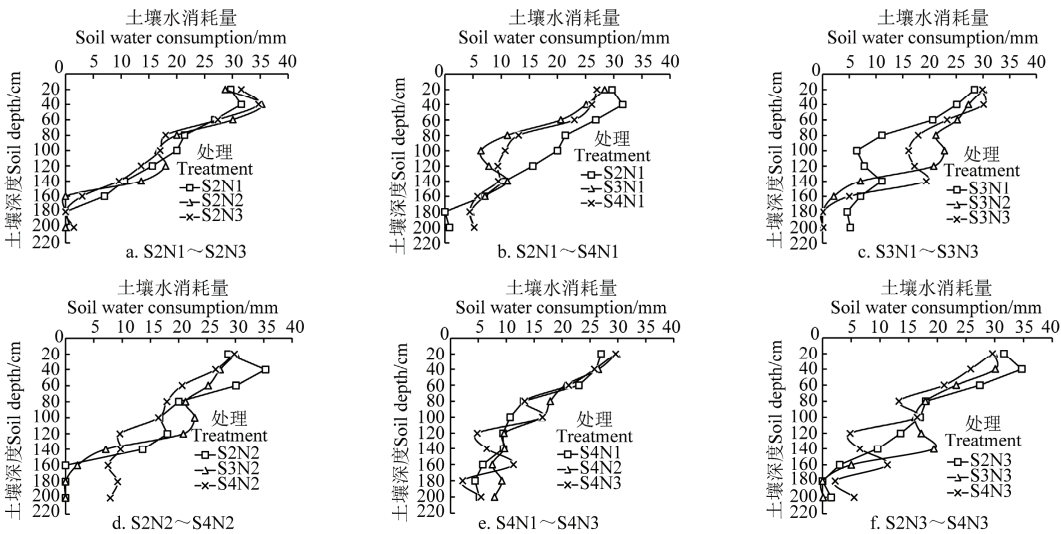


图 3 2013—2014 年不同微喷处理下整个生育期不同土层土壤耗水的消耗量

Fig.3 Soil water consumption in different soil layers from sowing to maturity in different micro-sprinkling treatments in 2013-2014

3 讨论

微喷带灌溉是一种节水的灌溉方式, 它结合了滴灌和喷灌的优点^[25]。有研究表明, 使用微喷带灌溉比常规地面漫灌节水 10%~40%, 产量提高 15%~19%, WUE 提高 25%^[26-28]。本研究中, 2012—2013 年度微喷 4 次比微喷 2 次产量提高了 5.3%, 微喷 2 次与常规地面漫灌产量相近, 微喷 3 次中只有 S3-4 产量高于微喷 2 次, 且与微喷 4 次差异不显著; WUE 微喷 3 次和 4 次比微喷 2 次提高 5.3%~15.8%, 以微喷 4 次提高幅度较大(表 2)。2013—2014 年度微喷 2 次和微喷 4 次条件下增加氮肥用量对产量无显著影响, 微喷 3 次下适当增加氮肥用量(N2)能提高产量, 主要由于微喷 3 次花后灌水比例较大, 维持后期物质生产需要氮素供给相应的增加; 中低氮供给(N1 和 N2)下增加微喷次数产量提高 13.1%~18.9%, 高氮(N3)下增加微喷次数对产量无显著影响(表 2)。相同微喷次数下增施氮肥对 WUE 无显著影响; 相同氮素用量下增加微喷次数 WUE 显著提高, 微喷 3 次和 4 次比微喷 2 次提高 10.5%~27.8%, 以微喷 4 次提高幅度较大(表 4)。

增次减量微喷产量提高主要由于千粒质量明显提高(表 2), 这与姚素梅等^[17]研究结果相近。千粒质量提高则是由于增次减量微喷使群体开花期和灌浆后期维持较高的叶面积指数和叶绿素含量(图 2), 延缓了叶片衰老, 提高了群体花后物质生产能力(表 3), 促进了籽粒灌浆。有研究表明^[17], 微喷处理使冬小麦强势粒、弱势粒灌浆的起始势增强, 到达最大灌浆速率的时间提前, 平均灌浆速率和最大灌浆速率均增大, 尤其使弱势粒的灌浆持续期延长, 弱势粒粒质量明显提高, 进而导致千粒质量提高。Bandyopdhyay 等^[29]、Liu 等^[30]和姚素梅等^[31]研究也发现微喷能促进旗叶光合和干物质积累, 提高产量和收获指数, 这可能由于微喷改变了群体微环境。在微喷过程中和微喷结束后冠层蒸汽压差和空气温度显著下降, 相对湿度明显增大^[32-34], 而灌浆期冠层温度低、相对湿度大有利于籽粒灌浆, 增加千粒质量^[35]。此外, 微喷后水汽流量降低, 叶片蒸腾和地面蒸发减少, 有利于减少耗水, 提高水分利用效率^[20]。本研究也显示, 微喷耗水低于传统漫灌, 主要由于微喷降低了开花前耗水, 尤以微喷 4 次表现明显。从阶段耗水比例来看, 增次减量微喷降低了开花前耗水比例, 显著提高了开花后耗水比例(表 5), 而开花后吸水增多为提高花后物质生产奠定了基础。本研究还发现, 在相同氮素用量下增加微喷次数能降低对上层土壤贮水的消耗, 增加对下层土壤贮水的消耗。这可能由于微喷次数增加后每次灌水量减少, 当表层水不能满足需求时会迫使植株吸收深层的水分。这与 Lü 等^[36]研究结果略有不同, 他们研究认为, 相对于传统漫灌, 微灌下上层土壤水分适宜, 根系分布较多, 根干重密度较大, 因此微灌下主要吸水区在上部土层^[36-37]。在他们的试验中, 每隔 1 d 灌溉 1 次, 因此有利于上部根系生长和吸水, 本研究尽管也是多次灌溉, 但灌溉频次相对较少, 根系分布特点可能与其不同, 还需进一步研究。

采用微喷灌溉可以实现水肥一体化, 使得氮肥分次施用和氮肥后移更容易实现。有研究表明, 氮肥后移可以延长后期叶片功能期, 提高产量^[22]; 在较高施氮水平下, 氮肥分次施用产量明显高于一次性基施^[38]。本研究也显示, 在氮肥总量一定时, 水肥一体多次施用(3 次或 4 次)能显著提高产量和 WUE; 在施用次数相同时, 适当的氮肥用量(195 kg/hm²)能促进花后物质积累, 增加后期耗水比例, 提高产量, 但氮肥过多(240 kg/hm²)则降低产量, 也不利于 WUE 的提高。总之, 灌水总额一定下, 增次减量微喷一方面降低了总耗水量, 另一方面使有限的水用到关键的生育后期提高了花后物质积累, 从而显著地提高了产量和水分利用效率。本试验仅比较了总灌水量一定下微喷次数和氮肥用量对产量和水分利用的影响, 有关灌水总量进一步减少后, 微喷水肥一体化对冬小麦产量形成和水氮利用的影响将在后续文章中加以分析。

4 结论

本研究表明, 在灌水总量一定的条件下, 增加微喷次数, 增加花后用水比例, 延缓了叶片衰老, 增加了花后干物质积累, 提高了千粒质量, 进而提高了籽粒产量; 增加微喷次数, 降低了总耗水, 减少了花前耗水, 增加了花后耗水量和耗水比例, 水分利用效率提高; 适当增加氮肥追施量能进一步提高花后物质生产和籽粒产量。综合来看, 在灌水定额 1 500 m³/hm² 条件下, 微喷 4 次和追施氮肥 90 kg/hm² 是实现高产高效的微喷水肥一体化模式。

[参 考 文 献]

- [1] 张依章, 刘孟雨, 唐常源, 等. 华北地区农业用水现状及可持续发展思考[J]. 节水灌溉, 2007, 6: 1—3.
Zhang Yizhang, Liu Mengyu, Tang Changyuan, et al. Discussion on status quo and sustainable development of agricultural water in North China[J]. Water Saving Irrigation, 2007, 6: 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王志敏, 王璞, 李绪厚, 等. 冬小麦节水省肥高产简化栽培理论与技术[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(5): 38—44.
Wang Zhimin, Wang Pu, Li Xuhou, et al. Principle and technology of water-saving, fertilizer-saving, high-yielding and simple cultivation in winter wheat[J]. Review of China Agricultural Science and Technology, 2006, 8(5): 38—44. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王晓华. 大力推行节水灌溉发展高效节水的现代农业[J]. 水科学与工程技术, 2009(1): 48—50.
Wang Xiaohua. Energetically promote water-saving irrigation develop efficient and waters-saving agriculture[J]. Water Science and Engineering Technology, 2009(1): 48—50. (in Chinese with English abstract)
- [4] 高杨, 任志斌, 段瑞萍, 等. 春小麦滴灌节水高产高效栽培技术研究[J]. 新疆农业科学, 2010, 47(2): 281—284.
Gao Yang, Ren Zhibin, Duan Ruiping, et al. Planting technique for spring wheat with saving water, high yield and high efficiency under drip irrigation system[J]. Xinjiang Agriculture Sciences, 2010, 47(2): 281—284. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李久生, 饶敏杰, 张建君. 干旱区玉米滴灌需水规律的田间试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(1): 16—21.
Li Jiusheng, Rao Minjie, Zhang Jianjun. Water requirements of drip irrigated maize in arid regions[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(1): 16—21. (in Chinese with English abstract)

- [6] 孙先明, 孙锦秀, 王春华. 微灌带的发展研究现状及前景[J]. 农机化研究, 2006(3): 33—34.
Sun Xianming, Sun Jinxiu, Wang Chunhua. Present situation of development and research on micro-irrigation Belt[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(3): 33—34. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈渠昌, 郑耀泉. 微灌工程设计灌水均匀度的选定[J]. 农业工程学报, 1995, 11(2): 128—132.
Chen Quchang, Zheng Yaoquan. Optimizing determination of irrigation uniformity in the design of micro-irrigation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1995, 11(2): 128—132. (in Chinese with English abstract)
- [8] 白丹, 党志良. 不规则微灌田间管网的优化[J]. 农业机械学报, 1997, 28(1): 53—57.
Bai Dan, Dang Zhiliang. Optimal design of irregular subunit network for micro-irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1997, 28(1): 53—57. (in Chinese with English abstract)
- [9] 满建国, 王东, 于振文, 等. 不同带长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]. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2186—2196.
Man Jianguo, Wang Dong, Yu Zhenwen, et al. Effects of irrigation with different length micro-sprinkling hoses on soil water distribution, water consumption characteristics of winter wheat, and its grain yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(8): 2186—2196. (in Chinese with English abstract)
- [10] 满建国, 王东, 张永丽, 等. 不同喷射角微喷带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): 5098—5112.
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): 5098—5112. (in Chinese with English abstract)
- [11] 张学军, 吴政文, 丁小明, 等. 微喷带水量分布特性试验分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 66—69.
Zhang Xuejun, Wu Zhengwen, Ding Xiaoming, et al. Experimental analysis of water distribution characteristics of micro-sprinkling hose[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(4): 66—69. (in Chinese with English abstract)
- [12] Yazar A, Howell T A, Dusek D A, et al. Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated corn[J]. Irrigation Science, 1999, 18(4): 171—180.
- [13] Xue Q, Zhu Z, Musick J T, et al. Root growth and water uptake in winter wheat under deficit irrigation[J]. Plant and Soil, 2003, 257(1): 151—161.
- [14] Man Jianguo, Wang Dong, White Philip J, et al. The length of micro-sprinkling hoses delivering supplemental irrigation affects photosynthesis and dry matter production of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2014, 168: 65—74.
- [15] Dogan E, Kirnak H, Dogan Z. Effect of varying the distance of collectors below a sprinkler head and travel speed on measurements of mean water depth and uniformity for a linear move irrigation sprinkler system[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(2): 190—195.
- [16] Caverro J, Jiménez L, Puig M, et al. Maize growth and yield under daytime and nighttime solid-set sprinkler irrigation[J]. Agronomy Journal, 2008, 100(6): 1573—1579.
- [17] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 13—17. (in Chinese with English abstract)
- [18] Kang Y H, Liu H J. Regulating field microclimate using sprinkler misting under hot-dry windy conditions[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95: 349—358.
- [19] 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: 3—19.
- [20] 刘海军, 康跃虎, 刘士平. 喷灌对冬小麦生长环境的调节及其对水分利用效率影响的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 46—51.
Liu Haijun, Kang Yaohu, Liu Shiping. Regulation of field environmental condition by sprinkler irrigation and its effect on water use efficiency of winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(6): 46—51. (in Chinese with English abstract)
- [21] 中华人民共和国农业部. 农业主导品种和主推技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014.
- [22] 金善宝. 中国小麦学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996.
- [23] Man J, Wang D, White P J, et al. The length of micro-sprinkling hoses delivering supplemental irrigation affects photosynthesis and dry matter production of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2014, 168: 65—74.
- [24] Man J, Yu J, White P J, et al. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on water distribution in soil and grain yield of winter wheat[J]. Field Crops Research, 2014, 161: 26—37.
- [25] 周斌, 封俊, 张学军, 等. 微喷单孔喷水量分布的基本特征研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 101—103.
Zhou Bin, Feng Jun, Zhang Xuejun, et al. Characteristics and indexes of water distribution of punched thin-soft tape for spray[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(4): 101—103. (in Chinese with English abstract)
- [26] Home P G, Panda R K, Kar S. Effect of method and scheduling of irrigation on water and nitrogen use efficiencies of Okra (*Abelmoschus esculentus*)[J]. Agricultural Water Management, 2002, 55: 159—170.
- [27] 周新国, 何俊卿, 郭树龙, 等. 多孔软管地面灌溉技术研究及应用[J]. 灌溉排水, 2002, 21(1): 55—57.
Zhou Xinguo, He Junqing, Guo Shulong, et al. Study and application for multiple outlets hoses surface irrigation technique[J]. Irrigation and Drainage, 2002, 21(1): 55—57. (in Chinese with English abstract)
- [28] 刘海军. 微压多孔软管水力性能研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
Liu Haijun. Study on Hydraulic Characteristics of Micro-pressure Perforated Flexible Hose[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [29] Bandyopadhyay K K, Misra A K, Ghosh P K, et al. Effect of irrigation and nitrogen application methods on input use efficiency of wheat under limited water supply in a vertisol of Central India[J]. Irrigation Science, 2010, 28: 285—299.
- [30] Liu H, Kang Y, Yao S, et al. Field evaluation on water productivity of winter wheat under sprinkler or surface irrigation in the North China plain[J]. Irrigation and Drainage, 2013, 62: 37—49.
- [31] 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.
Yao Sumei, Kang Yuehu, Liu Haijun, et al. Diurnal changes of photosynthesis of winter wheat under sprinkler irrigation

- and surface irrigation conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(11): 16–19. (in Chinese with English abstract)
- [32] Tolk J A, Howell T A, Steiner J L, et al. Role of transpiration suppression by evaporation of intercepted water in improving irrigation efficiency[J]. Irrigation Science, 1995, 16: 89–95.
- [33] Thompson A L, Gilley J R, Norman J M. A sprinkler water droplet evaporation and plant canopy model: II. Model application[J]. Transaction of ASAE, 1993, 36: 743–750.
- [34] Liu H, Kang Y. Effect of sprinkler irrigation on microclimate in the winter wheat field in the North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84: 3–19.
- [35] 高金成, 王润芳, 沈玉华, 等. 小麦粒重形成的气象条件研究: I. 粒花乳熟期适宜灌浆的气象条件分析[J]. 中国农业气象, 2001, 22(3): 44–49.
- Gao Jincheng, Wang Runfang, Shen Yuhua, et al. Study on meteorological conditions for wheat grain weight formation: I. Analysis of suitable meteorological conditions for grain filling at flower and milk stages[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2001, 22(3): 44–49. (in Chinese with English abstract)
- [36] Lü G, Kang Y, Li L, et al. Effect of irrigation methods on root development and profile soil water uptake in winter wheat[J]. Irrigation Science, 2010, 28: 387–398.
- [37] Bai W, Li L. Effect of irrigation methods and quota on root water uptake and biomass of alfalfa in the Wulanbuhe sandy region of China[J]. Agricultural Water Management, 2003, 62: 139–148.
- [38] 张霞, 罗延庆, 张胜全, 等. 氮肥对节水栽培冬小麦产量、土壤硝态氮残留的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 102–105.
- Zhang Xia, Luo Yanqing, Zhang Shengquan, et al. Effect of N application on grain yield of winter wheat and accumulation of NO_3^- -N under water-saving cultivation system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 102–105. (in Chinese with English abstract)

Optimal irrigation frequency and nitrogen application rate improving yield formation and water utilization in winter wheat under micro-sprinkling condition

Zhang Yinghua¹, Zhang Qi¹, Xu Xuexin¹, Li Jinpeng¹, Wang Bin¹, Zhou Shunli¹, Liu Lijun², Wang Zhimin^{1*}

(1. College of Agronomy, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Taian Fengyuan Irrigation Technology Limited Company, Taian 271039, China)

Abstract: Reducing the loss of irrigation water and increasing water use efficiency (WUE) are important problems needed to be solved in current wheat production. Micro-irrigation can realize a small amount of irrigation for many times and the integration of water and fertilizer. It has been applied in wheat production in recent years. However, the effect of micro-sprinkling times and nitrogen application rate on yield formation and water utilization in winter wheat is poorly understood. In this study, field experiments were conducted from October 2012 to June 2014 at the Wuqiao Experimental Station of China Agricultural University in Cangzhou, Heibei Province (37°41' N, 116°37' E). In 2012–2013, micro-sprinkling 2 times (S2, 750 m³/hm² irrigation water applied at jointing and anthesis, respectively), 3 times (S3-1, 450, 300 and 750 m³/hm² irrigation water applied at jointing, booting and anthesis, respectively; S3-2, 750, 450 and 300 m³/hm² irrigation water applied jointing, anthesis and grain filling, respectively; S3-3, 600, 600 and 300 m³/hm² irrigation water applied at jointing, anthesis and grain filling, respectively; S3-4, 450, 750 and 300 m³/hm² irrigation water applied at jointing, anthesis and grain filling, respectively), 4 times (S4, 450, 300, 450 and 300 m³/hm² irrigation water applied at jointing, booting, anthesis and grain filling, respectively), and flooding (CK, 750 m³/hm² irrigation water applied at jointing and anthesis, respectively) were designed to preliminarily reveal the effect of micro-sprinkling frequency on grain yield and WUE in winter wheat and select the optimal model for micro-sprinkling 3 times. Results showed that S2 had similar grain yield to CK; S3-3 and S3-4 with the higher ratio of irrigation after anthesis increased thousand grain weight and harvest index and finally improved grain yield, compared with S2; there was no significant difference ($P>0.05$) in grain yield between S4 and S3-4. So, S3-4 was the optimal model for micro-sprinkling three times. In 2013–2014, 3 micro-sprinkling treatments including S2, S3 (that was S3-4 in 2012–2013) and S4 as well as 3 nitrogen treatments including N1 (45 kg/hm²), N2 (90 kg/hm²) and N3 (135 kg/hm²) were designed to clarify the effect of water-nitrogen coupling on yield formation and water utilization in winter wheat. Result showed that grain yield was higher in N2 than in N1 treatment under S3 condition; however, there was no significant difference ($P>0.05$) in grain yield among nitrogen treatments under S2 and S4 conditions. The grain yield of S3 and S4 was higher 13.1% to 18.9% than that of S2 under N1 and N2 conditions; however, there was no significant difference ($P>0.05$) in grain yield among micro-sprinkling times under N3 condition. Nitrogen application rate had no significant effect ($P>0.05$) on WUE under the same micro-sprinkling time; however, micro-sprinkling time had significant effect ($P<0.05$) on WUE under the same nitrogen application rate, it in S3 and S4 was 10.5% to 27.8% higher than in S2, and the higher increase occurred in S4. Increasing micro-sprinkling times improved the leaf area index at anthesis and late grain filling stage, delayed leaf senescence, increased the dry matter accumulation after anthesis and thousand grains weight, and finally increased grain yield. Increasing micro-sprinkling times reduced the total water consumption and the proportion of water consumption before anthesis, but increased the proportion of water consumption after anthesis. Appropriately increasing nitrogen application rate (N2) can further increase the dry matter accumulation and the proportion of water consumption after anthesis. Comprehensively, 4 times of micro-sprinkling under the total irrigation rate of 1500 m³/hm² with suitable nitrogen fertilizer rate of 90 kg/hm² in spring could realize high yield and high water use efficiency.

Keywords: irrigation; nitrogen fertilizers; crops; winter wheat; micro-sprinkling times; yield; water utilization