

微喷水肥一体化对冬小麦产量和水分利用效率的影响

李金鹏 宋文越 姚春生 周晓楠 张震 王志敏 张英华*

(中国农业大学 农学院,北京 100193)

摘要 为探明不同微喷灌施氮方式对冬小麦产量及水分利用效率的影响,以‘济麦 22’为材料,在底施纯氮 105 kg/hm² 条件下,2016 年春季设置追施纯氮 45(N1)、90(N2)和 135 kg/hm² (N3),每个追氮量采用微喷灌拔节期一次性追施(JS)和分别在拔节、孕穗、开花和灌浆期 4 次等量追施(4T)2 种方式,测定冬小麦的产量和水分利用效率。结果表明:1)微喷灌条件下,随施氮量的增加,冬小麦产量先增加后降低,以 N2 处理产量最高;相同施氮量下,分次施氮处理产量显著高于拔节期一次性施氮,产量的增加主要由于显著提高千粒重;2)拔节期一次性施氮提高冬小麦开花期群体叶面积指数,而分次施氮处理灌浆期的叶面积指数显著高于拔节期一次性施氮,相同施氮量下分次施氮延缓灌浆中后期旗叶的衰老,从而有利于花后干物质积累和粒重的提高,但过多施氮导致粒重下降,总干物质积累量减少;3)不同施氮量处理间水分利用效率以 N2 处理最高,相同施氮量下分次施氮处理水分利用效率显著高于拔节期一次性施氮处理。综上所述,与拔节期一次性施氮相比,微喷灌采用分次施氮显著提高冬小麦的产量和水分利用效率,微喷水肥一体化 N2 处理下分次施氮为最佳的高产高效氮肥运筹模式。

关键词 冬小麦; 微喷灌; 氮肥运筹; 水分利用效率, 产量

中图分类号 S512.1

文章编号 1007-4333(2019)03-0001-09

文献标志码 A

Effects of nitrogen fertilizer application and micro-sprinkling irrigation integration on grain yield and water use efficiency of winter wheat

LI Jinpeng, SONG Wenyue, YAO Chunsheng, ZHOU Xiaonan, ZHANG Zhen,
WANG Zhimin, ZHANG Yinghua*

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract In order to explore the effects of nitrogen application and micro-sprinkling irrigation integration on the grain yield and water use efficiency of winter wheat in the North China Plain, a field experiment was conducted during the 2015–2016 growing season, and the high-yield wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar ‘Jimai22’ was taken as study object. Under the condition of 105 kg N/hm² as the base fertilizer, there were three nitrogen fertilizer application amounts (N1, 45 kg/hm²; N2, 90 kg/hm²; N3, 135 kg/hm²) with micro-sprinkling irrigation 4 times at jointing, booting, anthesis and filling stages. The nitrogen fertilizer was applied with two modes. One applied at jointing stage (N1-JS, N2-JS, N3-JS) and another one used the integration of water and fertilizer technology, i. e., nitrogen fertilizer was applied equally four times at jointing stage, booting stage, flowering stage and filling stage, respectively (N1-4T, N2-4T, N3-4T). The grain yield (GY), leaf area index (LAI), chlorophyll content of flag leaves during the grain filling, dry matter accumulation (DM) and harvest index (HI), and water use efficiency (WUE) of different treatments were investigated. The results showed that the grain yield first increased and then decreased with the increase of nitrogen application level under the micro-sprinkling irrigation. N2 obtained the highest GY. At anthesis stage, the LAIs of one-time nitrogen application at jointing stage were significantly higher than the treatment of splitting application of nitrogen

收稿日期: 2019-04-21

基金项目: 中国农业大学基本科研业务费(2019TC020);国家重点研发计划(2016YFD0300105);国家自然科学基金(31871563)

第一作者: 李金鹏, 博士研究生, E-mail: jinpeng0103@126.com

通讯作者: 张英华, 副教授, 主要从事作物节水高产生理研究, E-mail: zhangyh1216@126.com

fertilizer, but the former was significantly lower than the latter at filling stage. The micro-sprinkling irrigation with divided application of nitrogen fertilizer treatments delayed the senescence of flag leaves during the middle-late filling stage, which was beneficial to the DM after anthesis and increased the grain weight. The water use efficiency of N2 treatment was significantly higher than those of N1 and N3 treatments. Under the same nitrogen application amount, compared with one-time applied of nitrogen fertilizer at jointing stage, the divided application of nitrogen fertilizer treatment significantly improved the WUE. In conclusion, compared with the one-time nitrogen fertilizer applied at jointing stage, the grain yield and water use efficiency of winter wheat were significantly improved by the integration of water and fertilizer. In this study, using micro-sprinkling irrigation with water and fertilizer integrated, four times of nitrogen fertilizer application under N2 condition was the best treatment, which could be introduced as the high-yield and efficient nitrogen fertilizer application mode of winter wheat in the North China Plain.

Keywords winter wheat; micro-sprinkling irrigation; nitrogen application regimes; water use efficiency; grain yield

微喷带灌溉是近几年来国内外在结合滴灌和喷灌优点的基础上逐渐发展起来并应用于大田作物生产的灌溉新技术^[1-2]。微喷灌作为微灌的一种,可利用微喷带输水,有效地减少灌溉用水损失和土壤无效蒸发耗水,并且微喷设备成本低廉、抗堵性强、易于收放,也可实现按需定量、少量均匀灌溉^[3-4]。满建国等^[5-6]通过对微喷带铺设长度、喷射角度的优化使得微喷灌大大提高喷洒的均匀性,从而显著提高冬小麦的产量和水分利用效率。

水肥一体化技术可以将可溶性肥料溶于水中与灌溉水同时作用于作物冠层,且少量多次微喷效果较好。尽管已经发现微喷灌具有较高的节水潜力^[7-9],目前适宜于华北地区的微喷灌水肥施用模式尚未优化,使得其节水潜力难以发挥,也影响了该技术的大面积推广和应用。张英华等^[7]、李金鹏等^[8]、徐学欣等^[9]以及 Li 等^[10]研究表明,适宜的微喷频次和施氮量通过增加花后物质生产和水氮吸收利用显著提高了冬小麦产量和水分利用效率。并且,与传统漫灌相比,减量增次微喷水肥一体化使得每次的水肥集中供给主要的根系分布区域(0~60 cm),每次较少的灌溉量也促进了根系下扎,提高了作物对深层土壤水肥的吸收和利用,减少了土壤硝态氮的淋洗,最终实现了冬小麦对水氮资源的高效利用^[11]。也有研究发现,微喷水肥一体化条件下,通过优化施氮量可以显著地提高小麦旗叶 Fv/Fm ,增加花后 14~28 d 旗叶叶片中的叶绿素含量,提高籽粒平均灌浆速率,延长籽粒灌浆时间,从而提高产量和氮肥生产效率^[8,12]。

微喷灌水肥一体化少量多次水肥施用对小麦产量和水分利用效率有益效应方面的研究鲜有报道。本试验通过在不同施氮量下设置拔节期一次性追施氮肥和水肥一体化多次追施氮肥处理,分析微喷灌

下不同氮肥运筹对冬小麦籽粒产量、群体叶面积指数、花后旗叶叶绿素含量、干物质积累和水分利用效率的影响,旨在探明微喷水肥一体化少量多次水肥施用对小麦产量和水分利用效率的效应,以期对小麦微喷水肥一体化应用于大田生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2015—2016 年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,地下水位 7~9 m,年降水量历年平均 562 mm,主要分布在 6—8 月份,冬小麦生长季内降雨量历年平均 120 mm。本试验中小麦生育期内有效降水量为 127.7 mm,为平水年份。试验地前茬为夏玉米,土壤为壤质底黏潮土。0~40 cm 土壤有机质含量为 11.7 g/kg,全氮 0.95 g/kg,速效钾 104.4 mg/kg,速效磷 29.2 mg/kg。灌溉用井水,井深 40 m,井离试验地 25 m。2015—2016 年冬小麦生长季内具体的降雨分布和气温,见图 1。

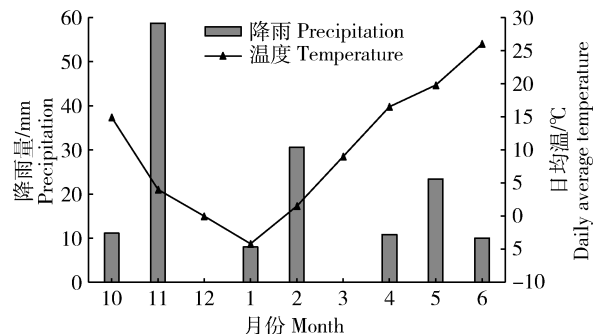


图 1 2015—2016 年冬小麦生育期内降雨分布和温度变化
Fig. 1 Precipitation and temperature during the 2015—2016 growing season in winter wheat

1.2 试验设计

供试冬小麦品种为‘济麦 22’，于 2015 年 10 月 15 日足墒播种，15 cm 等行距种植，2016 年 6 月 10 日收获。2016 年春季采用山东农业大学研发的小麦专用微喷带(ZL20122 0356553.7)进行灌水。灌水时期为：拔节期、孕穗期、开花期和灌浆期，每次 30 mm，水源为井水，灌水量定额可控，微喷带水压 0.02 MPa，每隔 6 行放置 1 个微喷带，带长 30 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，设置 3 个追氮量(N1、N2、N3 分别为 45、90 和 135 kg/hm²)和 2 个追氮方式(JS，拔节期一次性追施；4T，水肥一体化氮肥随灌水等量分次施用)，氮肥先在施肥罐中溶解，之后随灌水一同施入田间，具体的灌溉及氮肥施用时期和用量，见表 1。各处理小区面积 120 m²(4 m×30 m)，3 次重复，采取裂区设计，以氮肥用量为主区，以每次追施氮肥方式为副区。

表 1 灌溉和施肥时期及用量

Table 1 Irrigation schedule and nitrogen application in this study

处理 Treatment	灌溉时期及灌溉量/mm Irrigation stage and amount					氮肥施用时期及用量/(kg/hm ²) N application stage and amount					
	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Anthesis	灌浆期 Filling	总量 Total	底肥 Base fertilizer	拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Anthesis	灌浆期 Filling	总量 Total
N1-JS	30	30	30	30	120	105	45.00				150
N1-4T	30	30	30	30	120	105	11.25	11.25	11.25	11.25	150
N2-JS	30	30	30	30	120	105	90.00				195
N2-4T	30	30	30	30	120	105	22.50	22.50	22.50	22.50	195
N3-JS	30	30	30	30	120	105	135.00				240
N3-4T	30	30	30	30	120	105	33.75	33.75	33.75	33.75	240

注：N1、N2、N3 分别表示追氮量为 45、90 和 135 kg/hm²，其中 JS 表示氮肥为拔节期一次性追施，4T 表示氮肥在拔节期、孕穗期、开花期和灌浆期等量 4 次分施，下同。

Note: N1, N2 and N3 represent the nitrogen fertilizer application amounts of 45, 90 and 135 kg/hm², respectively. JS, the nitrogen fertilizer is applied one-time at jointing stage. 4T, the nitrogen fertilizer is applied at jointing, booting, anthesis and filling stages with the same amount. The same below.

1.3 测定项目及方法

1) 群体叶面积指数(Leaf area index, LAI): 于开花期和灌浆期(花后 20 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: 于花后每隔 5 d 在每个试验小区随机取 20 片旗叶叶片，剪碎混匀称取 0.20 g，用 50 mL 95%乙醇避光 48 h 浸提，提取液分别在 665 和 649 nm 波长下测定吸光度(OD)，重复 3 次，计算出相应的叶绿素(a+b)含量。

3) 群体干物质积累: 分别于开花期和成熟期测定干物质。各试验小区取相邻两行 50 cm 代表性样段，按照茎、叶、穗进行分样。105 °C 杀青 20 min 后

75 °C 烘干至恒重，称量，计算阶段干物质；花后干物质积累对籽粒贡献率为花后干物质积累量与成熟期籽粒干重的比值。

4) 土壤水分: 于播种前和成熟期测定土壤水分含量。测定时，用土钻在各小区取 0~200 cm 土层的土壤，每 20 cm 为 1 层，取样后立即装入铝盒中，称取新鲜土质量，然后 105 °C 烘干至恒重，称量干土重，计算土壤质量含水率。

5) 全生育期水分蒸散总量(Evapotranspiration, ET):

$$ET = \Delta SW + P + I - D + W_g - R$$

式中： ΔSW 为生育期 0~200 cm 土壤水分变化量，

mm; P 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。水分利用效率 (Water use efficiency) 为籽粒产量与 ET 的比值, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$ 。

6) 测产及考种: 在收获前, 每小区选取 1 m 6 行样段测量穗数, 每小区随机选取 60 个穗测量穗粒数。在成熟期, 每小区取 3 m^2 面积测量实际产量。籽粒产量含水量折算为 13%。从每个样品中称量 1 000 粒籽粒重量作为千粒重, 3 次重复。

1.4 数据处理

用 Excel 2010 软件对试验数据进行处理和作图, 用 SPSS 19.0 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 微喷灌氮肥运筹对冬小麦产量和产量构成的影响

表 2 可知, 微喷灌 2 种氮肥施用方式下增施氮肥对冬小麦产量均有显著影响, 以 N2 处理产量最高; 相同施氮量下, N1、N2 和 N3 采用分次施氮(4T)相比于拔节期一次性施氮(JS)产量分别增加 5.56%、6.35% 和 6.20%。从产量构成因素来看, 除 N1 处理外, 增加施氮量对穗数和穗粒数无显著影响, 施氮量及施氮方式主要显著影响千粒重。从施氮量来看, N2 处理千粒重显著高于 N3 和 N1 处理, N1 显著低于 N3 处理; 相同施氮量下, 氮肥分次施用处理(4T)千粒重显著高于拔节期一次性施氮(JS)。总之, 微喷灌适宜的施氮量和分次施氮处理(N2-4T)下取得的冬小麦的产量最高, 主要是该处理下取得了最高的千粒重。

表 2 微喷灌氮肥运筹对冬小麦产量和产量构成的影响

Table 2 Effects of micro-sprinkling with different nitrogen fertilizer application treatments on grain yield and yield components in winter wheat

处理 Treatment	产量/(kg/hm^2) Yield	千粒重/g 1 000-grain weight	穗粒数 Grain number per spike	穗数/($10^4/\text{hm}^2$) Spike number
N1-JS	7 085.2 e	44.8 e	29.7 a	668.2 b
N1-4T	7 478.7 d	45.3 d	29.3 a	674.7 ab
N2-JS	8 392.6 b	46.8 b	30.5 a	683.0 a
N2-4T	8 925.9 a	47.3 a	30.9 a	685.2 a
N3-JS	7 759.3 c	45.6 d	30.7 a	682.8 a
N3-4T	8 240.7 b	46.2 c	30.6 a	680.8 ab
N1	7 282.0 c	45.0 b	29.5 a	671.5 a
N2	8 659.3 a	47.0 a	30.6 a	684.1 a
N3	8 000.0 b	45.9 b	30.7 a	681.8 a

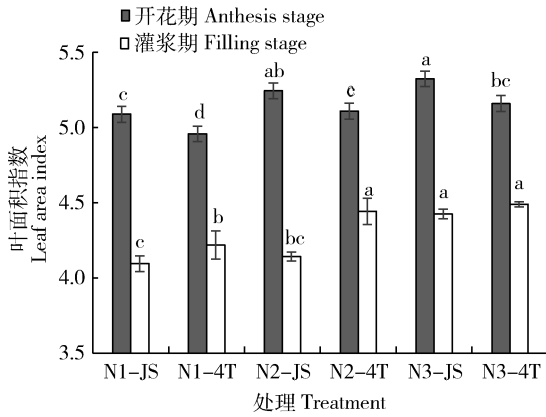
注: 不同小写字母表示处理间 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different letters indicate significant difference among treatments at $P < 0.05$. The same below.

2.2 微喷灌氮肥运筹对冬小麦群体叶面积指数的影响

图 2 可知, 微喷灌 2 种施氮模式下增施氮肥均有利于提高开花期的群体叶面积指数(LAI), 主要表现为 N2 和 N3 处理显著高于 N1 处理, 但前两者之间无显著性差异; 而相同施氮量下, 相比于氮肥分

次施用处理(4T), 拔节期一次性施氮处理(JS)显著提高开花期 LAI, 这可能由于拔节期是冬小麦叶片快速生长的重要时期, 一次性的施氮促进叶片的生长, 从而提高了 LAI。灌浆期时, 增施氮肥提高了 LAI, 但 N2-4T、N3-4T 和 N3-JS 之间无显著性差异; N1 和 N2 处理下, 氮肥分次施用(4T)显著提高



相同颜色柱子上的不同字母表示不同处理同一生育时期在 $P < 0.05$ 水平下差异显著。下同。

The different letters on the same color column indicate that there are significant differences among different treatments in the same growing stage at 0.05 level. The same below.

图 2 微喷灌氮肥运筹对冬小麦开花期和灌浆期群体叶面积指数的影响

Fig. 2 Effects of micro-sprinkling with different nitrogen fertilizer application treatments on population leaf area index at the anthesis and filling stage of winter wheat

LAI, 而 N3 下, 2 种施氮方式对 LAI 无显著影响。以上结果表明, 微喷灌适宜施氮量条件下, 氮肥分次施用可取得较高的灌浆期群体叶面积指数, 对保证灌浆期的物质生产有重要的作用。

2.3 微喷灌氮肥运筹对冬小麦旗叶叶绿素含量的影响

图 3 可知, 微喷灌条件下冬小麦花后旗叶的叶绿素含量总体上呈现出随施氮量的增加而增加的趋势。花后 5 d, 相同施氮量下, 旗叶叶绿素含量以拔节期一次性施氮处理 (JS) 高于氮肥分次施用处理 (4T), 花后 10 d 二者差异不显著, 而花后 15~30 d, 氮肥分次施用 (4T) 相比于拔节期一次性施氮处理 (JS) 旗叶叶绿素含量显著提高, 说明氮肥分次施用有利于延缓灌浆中后期旗叶的衰老, 这对灌浆期粒重的提高有重要影响。总之, 微喷灌条件下, 增加施氮量能延缓旗叶衰老, 且氮肥分次施用处理 (4T) 在灌浆中后期延缓叶片衰老的效果好于拔节期一次性施氮处理 (JS)。此外, N3 处理下, 灌浆后期 (花后 25 和 30 d) 叶片中叶绿素含量仍然较高, 显著高于 N2 和 N1 处理, 这可能会导致冬小麦贪青晚熟、粒重下降。

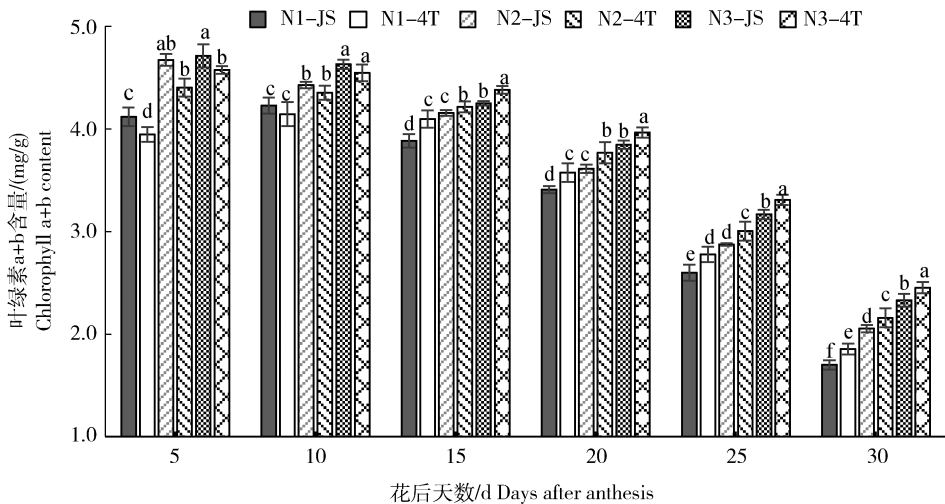


图 3 微喷灌氮肥运筹对冬小麦花后旗叶叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of micro-sprinkling with different nitrogen fertilizer application treatments on flag leaf chlorophyll content after anthesis in winter wheat

2.4 微喷灌氮肥运筹对冬小麦干物质积累及收获指数的影响

表 3 可知, 开花期群体干物质积累量随施氮量的增加而显著增加; N1 条件, 2 种施氮模式群体干物质积累无显著差异, 而 N2 和 N3 处理下拔节期一次性施氮 (JS) 均显著提高开花期群体干物质积累量。成

熟期和花后干物质积累量均表现为随施氮量的增加先升高后降低, 以 N2 处理最高, 且 N2 处理下分次施氮 (4T) 显著高于拔节期一次性施氮 (JS), 而 N1 和 N3 处理下施氮方式对成熟期和花后干物质积累量无显著影响。与拔节期一次性施氮 (JS) 相比, 分次施氮 (4T) 提高花后干物质积累对籽粒产量的贡献率, N1、

N2 和 N3 处理下贡献率分别提高 2.1%、2.3% 和 1.5%。此外, N2 处理收获指数显著高于 N1 和 N3,

并且 N2 和 N3 处理下微喷分次施氮处理(4T)收获指数显著高于拔节期一次性施氮处理(JS)。

表 3 微喷灌氮肥运筹对冬小麦干物质积累及收获指数的影响

Table 3 Effects of different micro-sprinkling nitrogen fertilizer application treatments on the dry matter accumulation (DM) and harvest index of winter wheat

处理 Treatment	开花期/ (kg/hm ²) Anthesis stage	成熟期/ (kg/hm ²) Maturity stage	开花后/ (kg/hm ²) Post-anthesis	花后干物质对 产量的贡献率/% Ratio of post-anthesis DM to grain yield	收获指数 Harvest index
N1-JS	11 641.3 e	16 915.3 c	5 274.0 d	71.7 e	0.435 d
N1-4T	11 548.5 e	17 060.2 c	5 511.8 d	73.8 de	0.438 d
N2-JS	12 066.0 c	18 631.6 b	6 565.6 b	77.1 abc	0.458 b
N2-4T	11 894.5 d	18 984.5 a	7 090.1 a	79.4 a	0.470 a
N3-JS	12 417.3 a	18 607.1 b	6 189.8 c	76.0 cd	0.438 d
N3-4T	12 250.7 b	18 689.5 b	6 438.9 bc	77.5 ab	0.444 c
N1	11 594.9 c	16 987.8 b	5 392.9 c	72.8 b	0.436 b
N2	11 980.2 b	18 808.1 a	6 827.9 a	78.3 a	0.464 a
N3	12 334.0 a	18 648.3 a	6 314.4 b	76.8 a	0.441 b

2.5 微喷灌氮肥运筹对冬小麦生育期内总耗水和水分利用效率的影响

图 4 可知, 生育期总耗水量(ET)表现为随施氮量的增加先增加后降低, 但 N2 与 N3 处理间差异不显著; N2 处理下, 微喷分次施肥(4T)ET 与拔节期一次性施氮(JS)无显著差异, 而 N1 和 N3 下分次施肥处理(4T)则显著低于拔节期一次性施肥处理(JS), 说明分次施氮处理(4T)有利于降低冬小麦生

育期内的总耗水量。

图 5 可知, 水分利用效率(WUE)在相同施氮方式下均表现为随施氮量的增加而先升高后降低, 以 N2 处理下最高; 相同施氮量下均表现为分次施氮处理(4T) WUE 显著高于拔节期一次性施氮处理(JS)。所有处理中, 以 N2-4T 处理 WUE 最高, 主要由于 N2 下分次施氮处理的籽粒产量最高(表 2)。总之, 适宜施氮量条件下, 采用微喷灌氮肥分次施用有利于冬小麦籽粒产量和 WUE 的同步提高。

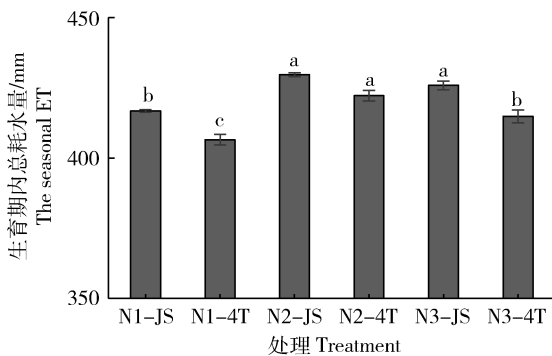


图 4 微喷灌氮肥运筹对冬小麦生长季内总耗水量(ET)的影响

Fig. 4 Effects of micro-sprinkling with different nitrogen fertilizer application treatments on the seasonal ET during winter wheat development

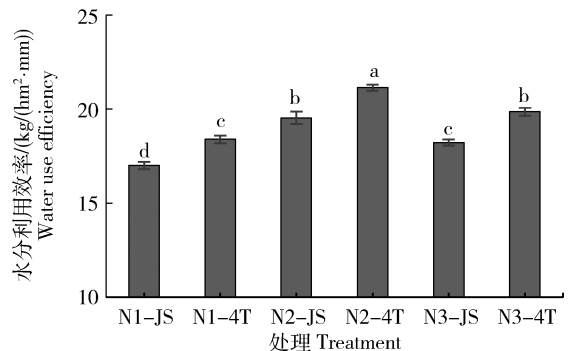


图 5 微喷灌氮肥运筹对冬小麦水分利用效率的影响

Fig. 5 Effects of micro-sprinkling with different nitrogen fertilizer application treatments on the water use efficiency of winter wheat

3 讨论

灌溉方式、施氮量及施肥方式对冬小麦产量和水分利用效率有很大的影响^[7,13-14]。张英华等^[7]研究发现,相同灌溉量条件下,采用水肥一体化减量增次微喷相对于传统漫灌能显著提高灌浆期群体绿色叶面积指数,延缓叶片衰老,提高生育后期干物质积累,增加千粒重,提高产量;多次微喷还能降低总耗水量和开花前耗水比例,提高开花后耗水比例,从而提高水分利用效率。可见,水肥一体化水氮耦合减量增次施用的增产增效作用明显好于传统漫灌处理。那么微喷水肥一体化条件下,这种增产增效作用的发挥是水分分次施用的影响还是水氮二者耦合的结果还不清楚。本研究发现,相同施氮量条件下,微喷灌分次施氮处理(4T)籽粒产量和水分利用效率显著高于拔节期一次性施氮处理(JS),并且产量的增加主要由于显著提高了千粒重,穗数和粒数无显著变化(表2),可见,微喷水肥一体化氮肥分次施用的效应好于拔节期一次性施氮。

开花后是籽粒灌浆的重要时期,提高灌浆期的群体叶面积指数,保证灌浆期叶片的光合性能,延缓花后叶片衰老对确保花后物质生产、提高籽粒灌浆速率和增加粒重有重要作用^[8,15-16]。小麦叶片叶绿素含量与施氮量密切相关,缺氮会导致叶绿素含量降低,因而降低叶片的光合速率^[17];但施氮过多容易导致植株贪青晚熟,不利于提高籽粒灌浆速率,结果粒重下降,产量降低^[10,13,18-19]。本研究发现,适当增施氮肥(N2),有利于提高灌浆期群体 LAI,延缓旗叶衰老,增加花后物质积累,而继续增加氮肥(N3),群体 LAI 增加不明显,尽管灌浆后期旗叶叶绿素含量仍然保持较高水平,但千粒重表现为下降,产量和水分利用效率也降低。相同施氮量下,拔节期一次性施氮处理(JS)能增加开花期群体叶面积指数和花后5d旗叶叶绿素含量,但灌浆期叶面积指数以及花后15d旗叶叶绿素含量以水肥一体化分次施氮处理(4T)较高。说明,微喷灌水氮耦合和氮肥后移更有利于延缓花后叶片衰老,维持花后物质生产。研究发现,花后的干物质生产及其对籽粒产量的贡献率与产量关系密切,提高花后干物质积累是提高产量的重要途径^[20-21]。本研究中,与拔节期一次性施氮(JS)相比,微喷灌分次施氮处理(4T)提高了花后干物质积累对籽粒产量的贡献率,N1、N2和N3分别提高2.1%、2.3%和1.5%。此外,较高

施氮量 N3 处理籽粒产量和花后干物质积累显著低于 N2 处理(表3),尤其是拔节期一次性施氮处理(JS)干物质积累量大幅度降低,这可能是过多施肥导致了植株贪青晚熟,降低灌浆期籽粒灌浆速率,因而降低粒重和成熟期干物质积累量及收获指数(表2)。

有研究表明,施氮量较高的情况下,氮肥分施产量和水分利用效率显著高于一次性底施^[22]。通过氮肥后移可以协调花前花后的氮素吸收和利用,从而大大地提高氮肥和水分利用效率^[23]。Li等^[10-11]研究发现,相比于传统的灌溉模式,减量增次微喷灌处理通过水氮后移实现根水肥同位,改变了冬小麦群体干物质和氮素积累特征,主要表现为水肥一体多次施氮可保证上层主要根系分布区域土壤的水氮供应,显著提高了花后的氮素吸收量,增加了花后氮素积累对籽粒氮素积累的贡献率,最终提高了产量和氮肥利用效率。并且,花后的叶面施肥还能在显著提高产量的同时改善籽粒品质^[24]。本研究中,微喷条件下,分次施氮处理(4T)耗水量低于拔节期一次性施氮处理(JS),并且由于氮肥分次施用处理(4T)产量较高,最终 WUE 在 N1、N2 和 N3 水平下分别提高 8.24%、8.21% 和 9.34%(表4)。拔节期一次性施氮处理(JS)ET 增加,可能是由于拔节期一次性施肥促进了群体叶面积的扩大,导致耗水量增加,而灌浆后期叶片衰老加快,影响了花后物质生产,导致产量下降,最终水分利用效率降低。微喷下水肥一体化氮肥后移可能也起到叶面施肥的作用,关于此方面的作用还需进一步的研究。

4 结论

微喷灌条件下,相同施氮模式下冬小麦产量均随施氮量的增加先升高后降低,以 N2(追施 90 kg/hm²)处理下产量和水分利用效率最高。相同施氮量时,相比于拔节期一次性施氮处理(JS),氮肥分次施用(4T,拔节+孕穗+开花+灌浆)显著提高了冬小麦产量和水分利用效率。分次施氮延缓了灌浆期叶片衰老,增加了花后物质积累,提高了粒重,进而提高了籽粒产量;分次施氮还减少了总耗水,因而显著提高了水分利用效率。施氮过多则可能导致贪青晚熟,降低花后物质积累和收获指数,最终产量降低。总之,微喷水肥一体化条件下,采用适宜的施氮量和氮肥分次施用(N2-4T)可以实现华北地区冬小麦的高产和水肥高效利用。

参考文献 References

- [1] 满建国, 王东, 于振文, 张永利, 石玉. 不同带长微喷带灌溉对土壤水分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 J G, Wang D, Yu Z W, Zhang Y L, Shi Y. 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)
- [2] 满建国, 王东, 张永丽, 石玉, 于振文. 不同喷射角微喷带灌溉对土壤水分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 J G, Wang D, Zhang Y L, Shi Y, Yu Z W. 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)
- [3] 王冰心, 于振文, 石玉, 赵俊晔, 王玉秋. 微喷带灌溉下带长对小麦耗水特性和籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(1): 90-96
- Wang B X, Yu Z W, Shi Y, Zhao J Y, Wang Y Q. Effect of micro-sprinkling irrigation by different lengths hose on water consumption characteristic and grain yield of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(1): 90-96 (in Chinese)
- [4] 张学军, 吴政文, 丁小明, 李欣. 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 X J, Wu Z W, Ding X M, Li X. Experimental analysis of water distribution characteristics of micro-sprinkling hose [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(4): 66-69 (in Chinese)
- [5] Man J G, Yu J S, White P J, Gu S B, Zhang Y L, Guo Q F, Shi Y, Wang D. 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
- [6] Man J G, Wang D, White P J, Yu Z W. 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
- [7] 张英华, 张琪, 徐学欣, 李金鹏, 王彬, 周顺利, 王志敏. 适宜微喷灌溉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 Y H, Zhang Q, Xu X X, Li J P, Wang B, Zhou S L, Wang Z M. 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*, 2016, 32(5): 88-95 (in Chinese)
- [8] 李金鹏, 王志敏, 张琪, 徐学欣, 王云奇, 刘洋, 周顺利, 张英华. 微喷灌和氮肥用量对冬小麦籽粒灌浆和氮素吸收利用的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(S1): 1-10
- Li J P, Wang Z M, Zhang Q, Xu X X, Wang Y Q, Liu Y, Zhou S L, Zhang Y H. Effect of micro-sprinkling irrigation and nitrogen application rate on grain filling and nitrogen uptake and utilization in winter wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(S1): 1-10 (in Chinese)
- [9] 徐学欣, 王东. 微喷补灌对冬小麦旗叶衰老和光合特性及产量和水分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(14): 2675-2686
- Xu X X, Wang D. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on flag leaves senescence and photosynthetic characteristics, grain yield and water use efficiency in winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(14): 2675-2686 (in Chinese)
- [10] Li J P, Wang Y Q, Zhang M, Liu Y, Xu X X, Lin G, Wang Z M, Yang Y M, Zhang Y H. Optimized micro-sprinkling irrigation scheduling improves grain yield by increasing the uptake and utilization of water and nitrogen during grain filling in winter wheat[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 211: 59-69
- [11] Li J P, Xu X X, Lin G, Wang Y Q, Liu Y, Zhang M, Zhou J Y, Wang Z M, Zhang Y H. Micro-irrigation improves grain yield and resource use efficiency by co-locating the roots and N-fertilizer distribution of winter wheat in the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 367-377
- [12] 郭培武, 石玉, 赵俊晔, 于振文. 水肥一体化条件下施氮量对小麦旗叶叶绿素荧光特性及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(8): 988-994
- Guo P W, Shi Y, Zhao J Y, Yu Z W. Effect of nitrogen application rate on flag leaf chlorophyll fluorescence characteristics and yield in winter under integration of water and fertilizer[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(8): 988-994 (in Chinese)
- [13] 宜丽宏, 王丽, 张孟妮, 毛平平, 党建友, 吴会军, 李银坤, 张永清, 张晶, 裴雪霞, 武雪萍. 不同灌溉方式对冬小麦生长发育及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(10): 14-19
- Yi L H, Wang L, Zhang M N, Mao P P, Dang J Y, Wu H J, Li Y K, Zhang Y Q, Zhang J, Pei X X, Wu X P. Effect of irrigation methods on growth and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(10): 14-19 (in Chinese)
- [14] 张振, 于振文, 张永丽, 石玉. 氮肥基追比对测墒补灌小麦耗水特性和籽粒产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(8): 957-962
- Zhang Z, Yu Z W, Zhang Y L, Shi Y. Effect of basal-topdressing N in nitrogen ration on water consumption characteristics and grain yield of irrigated wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(8): 957-962 (in Chinese)
- [15] Shi Y, Yu Z W, Man J G, Ma S Y, Gao Z Q, Zhang Y L. Tillage practices affect dry matter accumulation and grain yield

- in winter wheat in the North China Plain[J]. *Soil & Tillage Research*, 2016, 160: 73-81
- [16] 徐莹, 王林林, 陈炜, 李红兵, 邓西平. 施氮量对旱地小麦强势粒和弱势粒灌浆及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(3): 489-494
- Xu Y, Wang L L, Chen W, Li H B, Deng X P. Effect of different nitrogen levels on grain-filling characteristics and yield of two dry land wheat cultivars for superior and inferior grain[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(3): 489-494 (in Chinese)
- [17] Shangguan Z P, Shao M G, Dyckmans J. Effects of nitrogen nutrition and water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2000, 156(1): 46-51
- [18] 陈磊. 安徽省小麦干热风、高温逼熟、贪青晚熟、雪灾、倒伏灾害的防御[J]. *农业灾害研究*, 2014, 4(10): 53-57
- Chen L. Defense of wheat dry-hot wind, heat-forced maturity, over-green and late maturing, snow disaster and lodging disaster in Anhui Province[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2014, 4(10): 53-57 (in Chinese)
- [19] 赵长星, 马东辉, 王月福, 林琪. 施氮量和花后土壤含水量对小麦旗叶衰老及粒重的影响[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(11): 2388-2393
- Zhao C X, Ma D H, Wang Y F, Lin Q. Effects of nitrogen application rate and post-anthesis soil moisture content on the flag leaf senescence and kernel weight of wheat[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008 19(11): 2388-2393 (in Chinese)
- [20] 张法全, 王小燕, 于振文, 王西芝, 白洪立. 公顷产 10 000 kg 小麦氮素和干物质积累与分配特性[J]. *作物学报*, 2009, 35(6): 1086-1096
- Zhang F Q, Wang X Y, Yu Z W, Wang X Z, Bai H L. Characteristics of accumulation and distribution of nitrogen and dry matter in wheat at yield level of ten thousand kilograms per hectare[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(6): 1086-1096 (in Chinese)
- [21] 吴祯, 张保军, 海江波, 董永利, 陈军晓, 马娟娟, 韩雪冰. 不同种植方式对冬小麦花后干物质积累与分配特征及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(10): 1377-1382
- Wu Z, Zhang B J, Hai J B, Dong Y L, Chen J X, Ma J J, Han X B. Effect of different planting patterns on dry matter accumulation and distribution post-anthesis and yield of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(10): 1377-1382 (in Chinese)
- [22] 张霞, 罗延庆, 张胜全, 郑强, 冯汉宇, 王敏, 王志敏. 限水条件下氮肥用量及施氮时期对冬小麦产量、土壤硝态氮含量的影响[J]. *华北农学报*, 2007, 22(3): 163-167
- Zhang X, Luo Y Q, Zhang S Q, Zheng Q, Feng H Y, Wang M, Wang Z M. Effect of N application rate and time on grain yield of winter wheat and soil NO₃⁻-N content [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2007, 22(3): 163-167 (in Chinese)
- [23] 褚桂红, 李粉婵, 王仰仁. 水肥后移对冬小麦产量及水分利用效率的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(7): 82-86
- Chu G H, Li F C, Wang Y R. Effects of irrigation and fertilization postponement on the yield and water use efficiency in winter wheat [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2018, 32(7): 82-86 (in Chinese)
- [24] 左毅, 马冬云, 王晨阳, 朱云集, 刘骏, 郭天财. 花后叶面喷施氮肥和锌肥对小麦粒重及营养品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2013, 33(1): 123-128
- Zuo Y, Ma D Y, Wang C Y, Zhu Y J, Liu J, Guo T C. Effects of spraying nitrogen and zinc fertilizer safter flowering on grain weight and nutritional quality of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(1): 123-128 (in Chinese)

责任编辑:吕晓梅