



姚春生,任婕,张震,周晓楠,王志敏,张英华.微喷水肥一体化氮肥管理对冬小麦产量、品质、氮素积累和利用的影响[J].中国农业大学学报,2023,28(03):25-37.  
YAO Chunsheng, REN Jie, ZHANG Zhen, ZHOU Xiaonan, WANG Zhimin, ZHANG Yinghua. Effects of micro-sprinkler irrigation integration and nitrogen fertilizer management on yield, quality and nitrogen accumulation and utilization of winter wheat[J]. Journal of China Agricultural University, 2023, 28(03): 25-37.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.03.03

## 微喷水肥一体化氮肥管理对冬小麦产量、品质、 氮素积累和利用的影响

姚春生 任婕 张震 周晓楠 王志敏 张英华\*

(中国农业大学 农学院,北京 100193)

**摘要** 为探究冬小麦微喷水肥一体化适宜的氮肥施用方式,于2018—2019年在微喷水肥一体化条件下,以‘济麦22’为材料,设置120( $N_1$ )、210( $N_2$ )和300 kg/hm<sup>2</sup>( $N_3$ )3个施氮量处理,每个施氮量下设置拔节期一次性追氮(JS)和拔节期、孕穗期、开花期和灌浆期等量分次追氮(4T)2种追氮方式,测定冬小麦产量、蛋白质组分含量、面团品质、氮素积累和土壤硝态氮含量。结果表明:微喷灌条件下,氮肥分施(4T)显著促进冬小麦花后干物质积累,显著提高千粒重,进而显著提高籽粒产量, $N_3$ -4T处理的产量最高,为9 951.2 kg/hm<sup>2</sup>。在相同追氮方式下,随着施氮量的增加,JS处理显著提高了球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白含量,显著延长了面团稳定时间;4T处理随着施氮量增加,籽粒总蛋白含量无显著变化,清蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白含量均呈下降趋势,高氮处理下( $N_3$ )湿面筋含量和面团形成时间均显著下降。在相同施氮量下,相较于JS处理,4T处理可显著提高花后干物质积累、收获指数、千粒重和籽粒产量,但是4T处理显著降低了谷醇比,面团形成时间和稳定时间显著低于JS处理。4T处理显著提高了氮肥偏生产力,显著降低了深层土壤硝态氮含量,可降低硝态氮向深层土壤淋洗和迁移的风险。综上,微喷水肥一体化条件下增加施氮量可显著提高籽粒产量和蛋白质含量,分次追氮可进一步提高冬小麦籽粒产量和蛋白质含量,有效提高氮肥偏生产力,降低土壤硝态氮向深层土壤淋洗的风险。

**关键词** 微喷灌;氮肥管理;冬小麦;产量;面团稳定时间;氮素利用

中图分类号 S512.1

文章编号 1007-4333(2023)03-0025-13

文献标志码 A

## Effects of micro-sprinkler irrigation integration and nitrogen fertilizer management on yield, quality and nitrogen accumulation and utilization of winter wheat

YAO Chunsheng, REN Jie, ZHANG Zhen, ZHOU Xiaonan, WANG Zhimin, ZHANG Yinghua\*

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

**Abstract** To optimize the nitrogen fertilizer application method for winter wheat micro-sprinkler irrigation integration, ‘Jimai 22’ was used as study material under micro-sprinkler irrigation and fertilizer integration conditions from 2018 to 2019. Three nitrogen application rates, 120 ( $N_1$ ), 210 ( $N_2$ ) and 300 kg/hm<sup>2</sup> ( $N_3$ ), were set. Under each nitrogen application rate, two nitrogen application methods were set, which were one-time nitrogen application at jointing stage (JS) and equal amount and split nitrogen application at jointing stage, booting stage, anthesis stage and filling stage (4T). The yield, protein composition content, dough quality, nitrogen accumulation and utilization, and nitrate nitrogen content in soil of winter wheat were determined. The results showed that: Under micro-sprinkler irrigation, split nitrogen application (4T) significantly promoted post-anthesis dry matter accumulation, significantly increased the 1 000-grain

收稿日期: 2022-04-15

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300105); 国家现代农业产业技术体系(CARS-03)

第一作者: 姚春生(ORCID:0000-0001-5060-082X), 博士研究生, E-mail: yaoyiyao225@163.com

通讯作者: 张英华(ORCID:0000-0002-1356-6084), 教授, 主要从事作物节水高产生理研究, E-mail: yhzhang@cau.edu.cn

weight of winter wheat, and then significantly increased grain yield.  $N_3$ -4T treatment had the highest yield of 9 951.2 kg/hm<sup>2</sup>. Under the same nitrogen topdressing method, JS treatment significantly increased contents of globulin, gliadin and gluten, and significantly prolonged dough stability time with the increase of nitrogen application rate. With the increase of nitrogen application rate. Although the total protein content of grain in 4T treatment did not change, the contents of albumin, gliadin and gluten decreased, the wet gluten content and dough formation time in  $N_3$  treatment decreased significantly. Under the same nitrogen application rate, compared with JS treatment, 4T treatment significantly increased dry matter accumulation and harvest index post-anthesis, 1 000-grain weight and grain yield. However, 4T treatment significantly reduced both gliadin and gluten ratio, and the dough formation time and stabilization time were significantly lower than those of JS treatment. 4T treatment significantly increased nitrogen partial productivity, significantly reduced nitrate nitrogen content in deep soil, and reduced the risk of leaching and migration of nitrate nitrogen to deep soil. In general, increased nitrogen application rate significantly increased grain yield and protein content, and split nitrogen application further improved grain yield and protein content, effectively improved nitrogen partial productivity, and reduced the risk of soil nitrate leaching into deep soil.

**Keywords** micro-sprinkler irrigation; nitrogen fertilizer management; winter wheat; yield; dough stability time; nitrogen utilization

氮素是植物生长发育必需的营养元素和植物体的重要组成部分,对作物产量和品质形成具有重要作用<sup>[1]</sup>。然而氮肥的不合理施用不仅造成了大量的浪费,还造成了地下水硝酸盐污染和水体富营养化等诸多环境问题<sup>[2-3]</sup>。因此合理的氮肥管理措施对于小麦高产、优质和绿色生产尤为重要。

氮肥管理主要包括施氮量<sup>[4-10]</sup>、氮肥分施<sup>[11]</sup>、氮肥晚施<sup>[12]</sup>和施氮方式<sup>[13]</sup>等。周栋等<sup>[4]</sup>研究表明,施氮量在 0~180 kg/hm<sup>2</sup>,产量和品质随着施氮量增加而增加,超过 180 kg/hm<sup>2</sup>后产量和品质有所下降。另有研究表明,施氮量在 150~300 kg/hm<sup>2</sup>,随着施氮量的增加小麦产量和品质显著提高<sup>[5-7]</sup>,超过 300 kg/hm<sup>2</sup>,产量不再增加<sup>[8-9]</sup>,甚至会降低产量和品质<sup>[10]</sup>。这些不同的结果与各地不同地力水平和气候环境有很大关系。此外,分次追氮和氮肥晚施是增加小麦产量和品质的有效措施,不仅可以显著提高籽粒产量,还进一步提高籽粒蛋白质含量,进而提高籽粒品质<sup>[11-12]</sup>。在施氮方式上,Gooding 等<sup>[13]</sup>认为叶面施氮可显著提高冬小麦产量和蛋白质含量。在追氮时间上,有研究表明将追肥时间延迟至拔节期甚至是开花后,可以显著提高籽粒蛋白质各组分含量和烘烤品质<sup>[14-15]</sup>。然而传统的农艺措施很少在生育后期进行多次的灌溉追肥,难以实现追氮的晚施和分施,进而同步提高籽粒产量和籽粒蛋白质含量。近些年来,微喷灌在节水高产试验中的优势越来越明显。与传统畦灌相比,微喷灌水肥一体化灌溉显著提高了冬小麦产量和水分利用效率<sup>[16-17]</sup>,此外微喷灌显著提高冬小麦氮肥利用效率

和籽粒蛋白质含量<sup>[18]</sup>。微喷灌水肥一体化能够很容易地实现氮肥的晚施、分施和叶面喷施,因此微喷灌氮肥优化下的冬小麦产量和品质同步提升有很大的潜力。然而,微喷灌水肥一体化下适宜的氮肥管理策略及对冬小麦品质及氮素利用的研究鲜有报道。本试验通过在不同施氮量下设置拔节期一次性追氮和分次追氮处理,测定微喷灌水肥一体化不同施氮量及追氮方式下冬小麦籽粒产量、蛋白质组成、面团品质和氮素积累及利用等指标,旨在探究冬小麦微喷灌水肥一体化适宜的氮肥施用方式,以期小麦微喷灌水肥一体化应用推广提供理论依据和技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2018—2019 年在河北省沧州市吴桥县中国农业大学吴桥实验站(37°41′02″ N、116°37′23″ E)进行。试验地点位于海河平原的黑龙港地区中部,海拔 20 m,地下水位 7~9 m,历年平均降水量 562 mm,主要分布在 6—8 月份,2014—2019 年冬小麦生育期平均降水量 120 mm。2018—2019 冬小麦季有效降雨量为 62.3 mm,为干旱年型,具体的降雨分布和气温,见图 1。试验地前茬为夏玉米,土壤质地为粉砂质壤土,包括 12.1%粘粒、78.2%粉粒和 9.7%砂粒。0~40 cm 土壤有机质含量为 12.3 g/kg,全氮含量 1.01 mg/kg,速效钾 106.2 mg/kg,速效磷 30.1 mg/kg。灌溉用井水,井深 20 m,井距试验地 100 m。

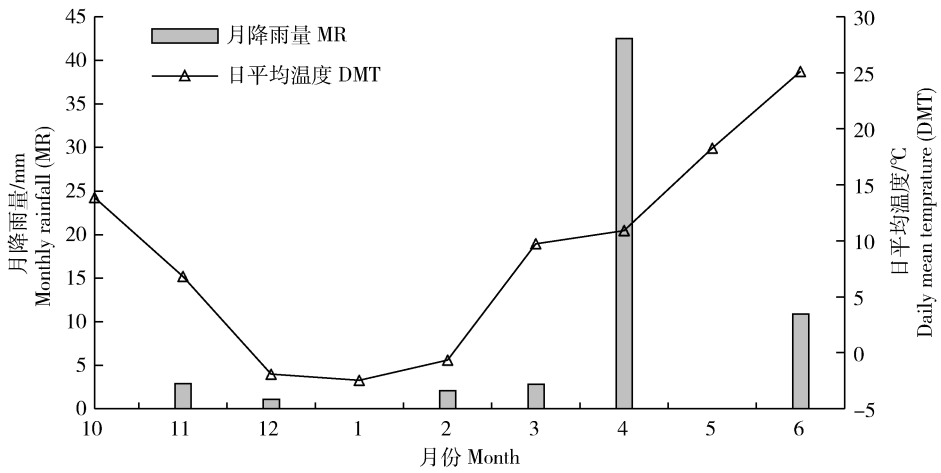


图 1 2018—2019 年冬小麦生长季降雨分布和温度变化

Fig. 1 Precipitation and temperature during 2018 to 2019 growing season in winter wheat

### 1.2 试验设计

设置 3 个施氮量分别为：120(N<sub>1</sub>)、210(N<sub>2</sub>) 和 300 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>3</sub>)；2 种追氮方式分别为：拔节期一次性追氮，孕穗期、开花期和灌浆期喷清水(JS)和拔节期、孕穗期、开花期和灌浆期等量 4 次追氮(4T)，基追比例为 5 : 5。追施氮肥先溶解于施肥罐中，之后随灌水一同喷入小区，具体的氮肥施用量和时期，见表 1。播前施用纯氮(尿素，N 含量为 46 g/100 g) 60(N<sub>1</sub>)、105(N<sub>2</sub>)和 150(N<sub>3</sub>)kg/hm<sup>2</sup>，纯磷(过磷酸钙，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 12 g/100 g)120 kg/hm<sup>2</sup>，纯钾(硫

酸钾，K<sub>2</sub>O 含量为 50 g/100 g)90 kg/hm<sup>2</sup>。采用裂区试验设计，以施氮量为主区，追氮方式为副区，小区面积为 120 m<sup>2</sup>，3 次重复。供试小麦品种为‘济麦 22’，于 2018 年 10 月 14 日播种，播种行距为 15 cm，基本苗为 634.5 万株/hm<sup>2</sup>，于 2019 年 6 月 11 日收获。春季采用山东农业大学研发的小麦专用微喷带<sup>[19]</sup>进行微喷灌，微喷带水压为 0.02 MPa，每 6 行小麦铺设一根微喷带，带长 30 m，出水量为 6.0 m<sup>3</sup>/h，微喷喷射角度为 80°。于拔节期、孕穗期、开花期和灌浆中期灌水，每次灌水量为 300 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

表 1 不同处理氮肥施用时期及用量

Table 1 N fertilizer application stage and amount for different treatments in this study kg/hm<sup>2</sup>

处理 Treatment	基肥 Base fertilizer	追氮时期 N application stage			
		拔节期 Jointing	孕穗期 Booting	开花期 Anthesis	灌浆期 Filling
N <sub>1</sub> -JS	60.00	60.00			
N <sub>1</sub> -4T	60.00	15.00	15.00	15.00	15.00
N <sub>2</sub> -JS	105.00	105.00			
N <sub>2</sub> -4T	105.00	26.25	26.25	26.25	26.25
N <sub>3</sub> -JS	150.00	150.00			
N <sub>3</sub> -4T	150.00	37.50	37.50	37.50	37.50

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 测产和考种

在收获前，每个小区选取 6 行 1 m 长样段考察

穗数，在样段内随机选取 60 个穗考察穗粒数。在收获期，每个小区取 3 m<sup>2</sup> 考察实际产量，含水量按 13% 折算，之后从每个测产样品中数取 1 000 粒考

察千粒重,3次重复。

### 1.3.2 蛋白质组分测定

开花期标记长势和开花一致的植株,于开花后第7、14、21、28和35天取样,剥出籽粒于75℃下烘至恒重,粉碎。蛋白质提取方法参照何照范<sup>[20]</sup>的连续震荡提取法,略有改动。步骤如下:取0.5g籽粒粉末干样置于10mL离心管,加入5mL蒸馏水,室温震荡5min,4000r/min离心15min,将上清液倒入消煮管,重复3次,得到清蛋白上清液;向上述沉淀残渣中加入5mL 10.0%(v/v)NaCl,室温震荡5min,4000r/min离心15min,重复3次,收集上清液得到球蛋白;向上述残渣加入5mL 75%(v/v)乙醇,80℃水浴振荡5min,室温再振荡5min,4000r/min离心15min,重复3次得到醇溶蛋白;向上述残渣加入5mL 0.2%(v/v)NaOH,室温振荡15min,4000r/min离心15min,重复3次得到麦谷蛋白;向上述残渣中加入5ml蒸馏水冲洗离心管后将残渣倒入消煮管得到剩余蛋白。将上述消煮管中的5种蛋白组分按照凯氏定氮法<sup>[21]</sup>测定氮素含量,蛋白质换算系数为5.7。

### 1.3.3 籽粒品质测定

取籽粒样品2000g,利用瑞士Buhler公司生产的MLU202型实验磨磨粉,瑞士Perten公司生产的2200型面筋仪测定湿面筋含量,德国Brabender公司生产的810106002型粉质仪测定粉质参数。按照GB/T5506.2—2008《仪器法测定湿面筋》<sup>[22]</sup>、GB/T14614—2019《粮油检验小麦粉面团流变学特性测试粉质仪法》<sup>[23]</sup>测定面粉湿面筋含量和粉质参数。

### 1.3.4 干物质和氮素积累及氮素利用考察

于开花期和成熟期选取2行0.5m长具有代表性的样段,按照茎、叶和穗部分离样品。105℃杀青30min后转入75℃烘干至恒重,称重记录。群体干物质和氮素积累等计算公式如下:

群体干物质积累量=

茎干物质质量+叶干物质质量+穗干物质质量

开花后干物质积累量=

成熟期干物质积累量-开花期干物质积累量

氮素积累量=干物质重量×氮素含量

开花后氮素积累量=

成熟期氮素积累量-开花期氮素积累量

收获指数=

成熟期籽粒干物质/地上部总干物质质量

氮素收获指数=

成熟期籽粒氮素积累量/地上部氮素总积累量

氮肥偏生产力=籽粒产量/施氮量

### 1.3.5 土壤硝态氮含量测定

于小麦成熟期采集2m深的土壤,20cm分为一层,共采集10层。采用CaCl<sub>2</sub>溶液浸提—紫外分光光度法<sup>[24]</sup>测定鲜土硝态氮含量。

## 1.4 数据处理

用Microsoft Excel 2010软件进行数据整理和作图,用SPSS 20.0统计分析软件进行方差分析和多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 微喷灌下不同施氮量和追氮方式对冬小麦产量及产量构成的影响

由表2可知,施氮量(N)和追氮方式(M)处理均显著影响‘济麦22’产量,以施氮量影响更为显著,二者的交互作用(N×M)对产量及产量构成影响不显著。追氮分施方式(4T)的N<sub>1</sub>(120kg/hm<sup>2</sup>)、N<sub>2</sub>(210kg/hm<sup>2</sup>)和N<sub>3</sub>(300kg/hm<sup>2</sup>)处理冬小麦产量分别比拔节期一次性追氮(JS)方式各施氮量增加4.1%、4.3%和5.6%。4T方式下,3个施氮量处理的千粒重均显著高于JS,这是4T有较高产量的原因。在相同追氮方式下,‘济麦22’籽粒产量均表现为随着施氮量的增加而显著增加,相较于N<sub>1</sub>,JS的N<sub>2</sub>和N<sub>3</sub>下产量分别增加9.9%和18.6%,4T在N<sub>2</sub>和N<sub>3</sub>下产量分别增加10.1%和20.3%。这是因为增加施氮量显著增加穗数和穗粒数,进而显著提高产量。由此可见,增加施氮量可使穗数和穗粒数显著增加,从而提高产量;分次追氮则显著增加了千粒重最终导致产量显著提高。

### 2.2 微喷灌下不同施氮量和追氮方式对冬小麦干物质积累和收获指数的影响

由表3可知,施氮量(N)和追氮方式(M)处理均显著影响‘济麦22’干物质积累和收获指数,其中以追氮方式影响更显著,且N×M对开花后干物质、成熟期干物质和收获指数均有显著影响。在同一追氮方式下,随着施氮量的增加,各处理开花期、开花后和成熟期干物质均显著提高,N<sub>3</sub>达到最高。在相同施氮量下,JS开花期干物质积累量均显著高于4T,4T花后干物质积累均显著高于JS处理;N<sub>2</sub>和N<sub>3</sub>条件下,4T成熟期干物质积累量均分别显著

表2 不同施氮处理的冬小麦产量和产量构成

Table 2 Yield and yield composition of winter wheat under different nitrogen application treatment

处理 Treatment	产量/(kg/hm <sup>2</sup> ) Yield	穗数/(×10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> ) Spike number	穗粒数 Grain per spike	千粒重/g 1 000-Grain weight
N <sub>1</sub> -JS	7 945.4±66.5 f	649.1±2.2 c	33.4±0.3 b	44.7±0.1 b
N <sub>1</sub> -4T	8 268.6±56.5 e	638.0±4.0 d	33.2±0.2 b	46.5±0.1 a
N <sub>2</sub> -JS	8 732.8±70.4 d	692.4±5.9 b	33.6±0.1 ab	43.7±0.2 c
N <sub>2</sub> -4T	9 107.5±14.6 c	685.4±3.7 b	33.5±0.3 b	45.4±0.2 b
N <sub>3</sub> -JS	9 419.6±61.3 b	718.5±1.4 a	34.3±0.2 a	43.3±0.1 c
N <sub>3</sub> -4T	9 951.2±36.3 a	713.0±0.6 a	34.6±0.4 a	45.3±0.3 b
N <sub>1</sub>	8 107.0±82.1 c	643.6±3.2 c	33.3±0.2 b	45.6±0.4 a
N <sub>2</sub>	8 920.1±89.7 b	688.9±3.5 b	33.5±0.1 b	44.5±0.4 ab
N <sub>3</sub>	9 685.4±123.1 a	715.7±1.4 a	34.5±0.2 a	44.3±0.5 b
JS	8 699.3±215.5 b	686.6±10.3 a	33.8±0.2 a	43.9±0.2 b
4T	9 109.1±243.7 a	678.8±11.1 a	33.8±0.3 a	45.7±0.2 a
N	***	***	**	***
M	***	*		***
N×M				

注：N,施氮量处理；M,氮肥追施方式处理。JS,拔节期一次性追氮；4T,拔节期、孕穗期、开花期和灌浆期分次等量追氮。\*、\*\*和\*\*\*分别代表0.05、0.01和0.001水平上差异显著。下同。

Note: N, nitrogen application rate treatment; M, nitrogen application mode treatment. JS, disposable topdressing nitrogen at jointing stage; 4T, equal amount of nitrogen was topdressing at jointing, booting, anthesis and grain filling stages. \*, \*\* and \*\*\* represent significant differences at 0.05, 0.01 and 0.001, respectively. The same below.

高于JS。从收获指数来看, N<sub>1</sub>条件下4T与JS之间无显著差异; N<sub>2</sub>和N<sub>3</sub>条件下4T均显著高于JS处理。由此可见, 4T处理主要是通过增加冬小麦花后干物质积累, 从而提高‘济麦22’的总生物量和收获指数。

### 2.3 微喷灌下不同施氮量和追氮方式对冬小麦氮素积累及利用的影响

由表4可知, 施氮量(N)、追氮方式(M)处理及二者的交互作用(N×M)均显著影响‘济麦22’氮素积累量和氮素利用。在N<sub>1</sub>条件下, 开花期氮素积累和氮素收获指数在拔节一次性追氮(JS)和氮肥分施(4T)处理之间无显著差异, 但4T花后氮素积累、成熟期氮素积累、籽粒氮素积累和氮肥偏生产力均显著高于JS; 在N<sub>2</sub>和N<sub>3</sub>条件下, JS开花期的氮素积累均显著高于4T, 但4T的花后氮素积累、成熟期氮素积累、籽粒氮素积累、氮素收获指数以及氮

肥偏生产力均显著高于JS处理。在相同追氮方式下, 随着施氮量的增加, ‘济麦22’开花期氮素积累量、籽粒氮素积累量和成熟期氮素积累量均呈增加的趋势, 氮素收获指数和氮肥偏生产力呈下降的趋势; JS花后氮素积累量随着施氮量的增加呈降低的趋势, 4T的花后氮素积累随着施氮量增加而先升高后降低。综上, 4T通过增加花后氮素积累, 从而导致‘济麦22’成熟期氮素积累和籽粒氮素积累的增加, 并进一步提升氮肥偏生产力。

### 2.4 微喷灌下不同施氮量和追氮方式对冬小麦籽粒蛋白质及其组分含量的影响

由表5可知, 施氮量(N)和追氮方式(M)及N×M均显著影响‘济麦22’成熟期籽粒总蛋白含量、清蛋白含量和麦谷蛋白含量; ‘济麦22’醇溶蛋白含量和谷醇比在不同的追氮方式之间差异显著。在相同施氮量下, 4T在N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>和N<sub>3</sub>下籽粒总蛋白

表3 不同施氮处理的冬小麦干物质积累和收获指数  
Table 3 Dry matter accumulation and harvest index of winter wheat under different nitrogen application treatment

处理 Treatment	干物质积累/(kg/hm <sup>2</sup> ) Dry matter accumulation			收获指数 Harvest index
	开花期 Anthesis stage	成熟期 Maturity stage	开花后 Post-anthesis	
N <sub>1</sub> -JS	12 811.5±32.4 e	19 916.5±179.5 e	7 105.0±160.1 f	0.450±0.01 a
N <sub>1</sub> -4T	12 391.3±30.3 f	19 986.9±163.8 e	7 595.6±133.9 e	0.447±0.01 ab
N <sub>2</sub> -JS	14 074.4±18.5 c	21 881.1±118.7 d	7 806.7±107.4 d	0.439±0.01 b
N <sub>2</sub> -4T	13 737.6±58.7 d	22 965.0±243.7 c	9 227.4±201.6 b	0.455±0.02 a
N <sub>3</sub> -JS	14 699.8±58.2 a	23 503.8±113.8 b	8 804.0±55.7 c	0.433±0.01 b
N <sub>3</sub> -4T	14 223.4±10.2 b	24 352.6±34.0 a	10 129.2±44.1 a	0.454±0.01 a
N <sub>1</sub>	19 951.7±109.8 c	12 601.4±96.0 c	7 350.3±144.0 c	0.449±0.01 a
N <sub>2</sub>	22 423.0±271.0 b	13 906.0±80.2 b	8 517.0±333.7 b	0.447±0.02 a
N <sub>3</sub>	23 928.2±197.1 a	14 461.6±109.7 a	9 466.6±298.0 a	0.443±0.01 a
JS	21 767.1±523.3 a	13 861.9±278.4 a	7 905.2±253.2 b	0.441±0.001 b
4T	22 434.9±649.6 a	13 450.8±274.7 a	8 984.1±377.5 a	0.452±0.002 a
N	***	***	***	
M	***	***	***	***
N×M		*	**	**

表4 不同施氮处理下的冬小麦氮素积累和利用

Table 4 Nitrogen accumulation and utilization of winter wheat under different nitrogen application treatment

处理 Treatment	开花期氮积累/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Nitrogen accumulation at anthesis	花后氮积累/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Post-anthesis nitrogen accumulation	籽粒氮积累/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Grain nitrogen accumulation	成熟期氮积累/ (kg/hm <sup>2</sup> ) Nitrogen accumulation at maturity	氮素收获 指数/% Nitrogen harvest index	氮肥偏生产力/ (kg/kg) Partial factor productivity
N <sub>1</sub> -JS	227.8±1.6 e	55.3±4.7 d	206.3±3.2 d	283.0±3.6 f	72.9±0.2 a	66.2±0.6 b
N <sub>1</sub> -4T	221.5±2.3 e	101.5±2.7 b	237.5±3.1 b	323.0±1.3 d	73.5±1.0 a	68.9±0.5 a
N <sub>2</sub> -JS	281.5±3.4 c	33.3±2.5 e	223.9±2.6 c	314.8±2.7 e	71.1±0.3 b	41.6±0.3 d
N <sub>2</sub> -4T	258.8±2.2 d	111.2±0.5 a	271.6±3.2 a	369.9±2.5 b	73.4±0.4 a	43.4±0.1 c
N <sub>3</sub> -JS	304.3±3.5 a	41.1±2.8 e	240.1±1.6 b	345.5±0.7 c	69.5±0.3 c	31.4±0.2 f
N <sub>3</sub> -4T	293.4±0.5 b	83.9±1.4 c	265.6±0.8 a	377.3±0.9 a	70.4±0.1 c	33.2±0.1 e
N <sub>1</sub>	224.6±1.9 c	78.4±10.6 a	221.9±7.3 b	303.0±9.1 b	73.2±0.5 a	67.6±0.7 a
N <sub>2</sub>	270.1±5.4 b	72.2±17.4 a	247.7±10.8 a	342.3±12.4 a	72.3±0.6 a	42.5±0.4 b
N <sub>3</sub>	298.9±2.9 a	62.5±9.7 a	252.9±5.8 a	361.4±7.1 a	69.9±0.3 b	32.3±0.4 c
JS	271.2±11.4 a	43.2±3.7 b	223.4±5.0 b	314.4±9.1 b	71.2±0.5 a	46.4±5.2 b
4T	257.9±10.4 a	98.9±4.1 a	258.2±5.4 a	356.8±8.5 a	72.4±0.6 a	48.5±5.3 a
N	***	***	***	***	***	***
M	***	***	***	***	**	***
N×M	*	***	**	***		***

表 5 不同施氮处理冬小麦籽粒的蛋白质组成和含量  
Table 5 Content of protein and its composition of winter wheat under different nitrogen treatment

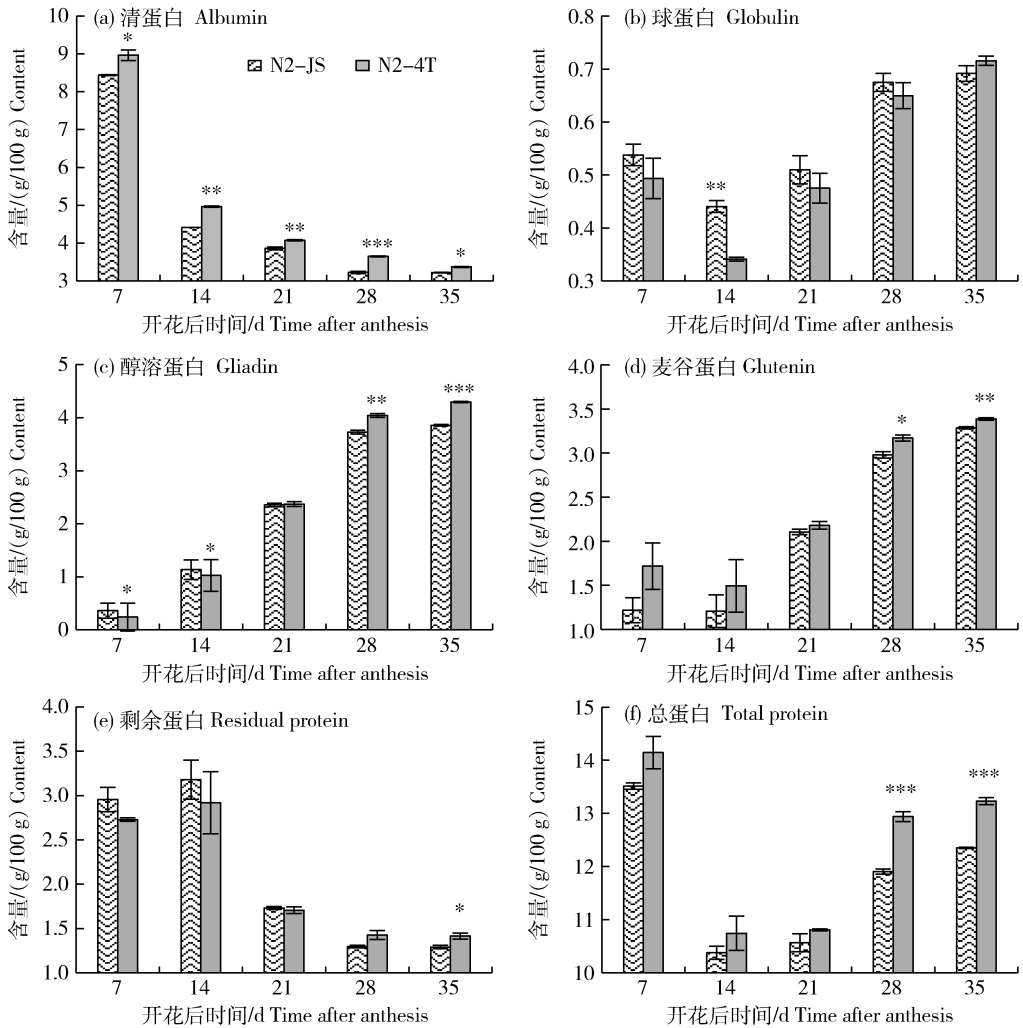
处理 T treatment	含量/(g/100 g) Content							谷醇比 Glutenin/ gliadin
	清蛋白 Albumin	球蛋白 Globulin	醇溶蛋白 Gliadin	麦谷蛋白 Glutenin	残余蛋白 Residual protein	总蛋白 Total protein		
N <sub>1</sub> -JS	2.99±0.01 c	0.56±0.01 c	3.47±0.03 d	3.51±0.01 c	1.86±0.02 b	12.39±0.03 e	1.01±0.02 a	
N <sub>1</sub> -4T	3.24±0.02 a	0.62±0.01 b	4.27±0.01 a	3.76±0.02 a	1.65±0.03 c	13.54±0.06 a	0.88±0.01 c	
N <sub>2</sub> -JS	2.95±0.04 c	0.60±0.02 b	3.70±0.02 c	3.45±0.04 c	2.05±0.03 ab	12.74±0.06 d	0.93±0.01 b	
N <sub>2</sub> -4T	3.09±0.01 b	0.65±0.01 a	3.96±0.03 b	3.68±0.03 ab	1.94±0.02 b	13.33±0.07 b	0.93±0.02 b	
N <sub>3</sub> -JS	3.00±0.03 c	0.66±0.02 a	3.72±0.02 c	3.67±0.01 b	2.07±0.04 a	13.13±0.04 c	0.99±0.01 a	
N <sub>3</sub> -4T	3.08±0.04 b	0.63±0.01 b	3.94±0.03 b	3.65±0.03 b	2.08±0.07 a	13.37±0.10 ab	0.93±0.02 b	
N <sub>1</sub>	3.12±0.06 a	0.59±0.01 b	3.87±0.18 a	3.63±0.06 a	1.75±0.05 b	12.96±0.01 a	0.95±0.07 a	
N <sub>2</sub>	3.02±0.04 a	0.62±0.02 ab	3.83±0.06 a	3.57±0.06 a	1.99±0.03 a	13.03±0.01 a	0.93±0.02 a	
N <sub>3</sub>	3.04±0.03 a	0.65±0.01 a	3.83±0.05 a	3.66±0.01 a	2.08±0.04 a	13.25±0.01 a	0.96±0.04 a	
JS	2.98±0.02 b	0.61±0.02 a	3.63±0.04 b	3.54±0.04 b	1.99±0.04 a	12.75±0.02 b	0.98±0.04 a	
4T	3.14±0.03 a	0.63±0.01 a	4.06±0.05 a	3.70±0.02 a	1.89±0.07 a	13.41±0.01 a	0.91±0.03 b	
N	**	*		**	***	**	***	
M	***		***	***	**	***	***	
N×M	*		***	***	***	***	***	

含量分别比 JS 增加 9.3%、4.6% 和 1.8%；在  $N_1$  和  $N_2$  下,4T 的清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和麦谷蛋白含量均分别显著高于 JS；在  $N_3$  下,4T 的清蛋白和醇溶蛋白含量显著高于 JS,但麦谷蛋白含量在 4T 与 JS 间差异不显著。在  $N_1$  和  $N_3$  下 JS 的谷醇比显著高于 4T,JS 的 3 个施氮量下谷醇比均值也显著高于 4T。在相同追氮方式下,JS 处理随着施氮量的增加,总蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和麦谷蛋白含量均呈增加的趋势；4T 处理随着施氮量的增加,总蛋白、清蛋白、醇溶蛋白和麦谷蛋白含量呈下降的趋势。相同施氮方式中,冬小麦籽粒清蛋白、醇溶蛋白、谷蛋白、总蛋白和谷醇比在 3 个施氮量间差异不显著；而 4T 可显著提高籽粒总蛋白含量,主要是由

于增加了清蛋白、醇溶蛋白和麦谷蛋白含量。综上,4T 方式可使小麦籽粒中的清蛋白、醇溶蛋白和麦谷蛋白含量显著提高,从而导致‘济麦 22’总蛋白含量的增加。

## 2.5 微喷灌下不同追氮方式对冬小麦花后籽粒蛋白质合成过程的影响

由图 2 可知,在  $N_2$  条件下,‘济麦 22’籽粒清蛋白含量随着灌浆的进程呈现先急剧下降再缓慢下降的趋势,在整个灌浆期 4T 均显著高于 JS。球蛋白含量在灌浆期呈现先下降后上升变化趋势,在花后 14 d JS 显著高于 4T。醇溶蛋白含量随着灌浆的进程始终呈增加趋势,从开花当天至花后第 14 天均表现为 JS 显著高于 4T,第 28—35 天 4T 均显著高于



\*、\*\* 和 \*\*\* 分别表示相邻柱子间的差异在 0.05、0.01 和 0.001 水平上达显著水平。下同。

\*, \*\*, and \*\*\* values indicate that differences between adjacent columns reach significant levels at 0.05, 0.01 and 0.001 levels. The same below.

图 2 不同追氮处理下花后籽粒蛋白质组分及含量的变化



JS。在整个灌浆期间,4T的麦谷蛋白含量均高于JS,花后第28—35天差异达显著水平。剩余蛋白含量随着灌浆的进行先升高后下降之后趋于平稳,仅在成熟期4T显著高于JS。综上,‘济麦22’籽粒蛋白质含量随着生育进程推进呈现出高一低一高的“V”型变化规律,在整个灌浆过程中4T的蛋白质含量始终高于JS处理,且在花后21 d后达到显著水平。

## 2.6 微喷灌下施氮量和追氮方式对冬小麦籽粒品质的影响

由表6可知,施氮量(N)和追氮方式(M)及 $N \times M$ 均显著影响‘济麦22’湿面筋含量和面团稳定时间, $N \times M$ 显著影响了面团的形成时间。在相

同施氮量下,4T的湿面筋含量均显著高于JS;面团形成时间和稳定时间则表现为,在 $N_1$ 条件下,4T与JS间差异不显著,在 $N_2$ 和 $N_3$ 条件下,4T显著低于JS;粉质指数在追氮方式之间差异不显著。在相同追氮方式下,随着施氮量的增加,JS处理湿面筋含量呈现先下降后上升的趋势,面团形成时间和稳定时间呈现先升高后降低的趋势,粉质指数在不同施氮量处理间差异不显著;4T处理随着施氮量的增加,湿面筋含量和面团形成时间呈下降趋势,面团稳定时间和粉质指数差异不显著。综上,小麦品质参数在不同施氮量之间差异不显著;与JS相比,4T显著增加‘济麦22’的湿面筋含量,但是降低了面团稳定时间,对面团形成时间和粉质指数影响不显著。

表6 不同施氮处理冬小麦的品质参数

Table 6 Quality parameters of winter wheat under different nitrogen application treatment

处理 Treatment	湿面筋含量/ (g/100 g) Content of wet gluten	面团形成时间/min Dough developing time	面团稳定时间/min Dough stability time	粉质指数 Farinograph quality number
$N_1$ -JS	37.4±0.2 c	2.3±0.1 b	2.1±0.1 b	46.0±0.6 a
$N_1$ -4T	39.2±0.2 a	2.5±0.1 b	2.2±0.1 b	43.3±3.2 a
$N_2$ -JS	36.4±0.2 d	2.8±0.1 a	2.9±0.1 a	51.7±3.3 a
$N_2$ -4T	38.7±0.1 a	2.5±0.1 b	2.2±0.1 b	47.0±3.8 a
$N_3$ -JS	37.5±0.1 c	2.6±0.1 ab	2.8±0.1 a	46.7±1.9 a
$N_3$ -4T	38.1±0.1 b	2.2±0.1 c	2.2±0.1 b	41.7±1.9 a
$N_1$	38.2±0.4 a	2.4±0.1 a	2.1±0.1 a	46.5±1.6 a
$N_2$	37.8±0.5 a	2.6±0.1 a	2.5±0.2 a	47.8±2.5 a
$N_3$	37.8±0.1 a	2.4±0.2 a	2.5±0.1 a	43.2±1.6 a
JS	37.1±0.2 b	2.5±0.1 a	2.6±0.1 a	48.1±1.4 a
4T	38.7±0.2 a	2.4±0.1 a	2.2±0.1 b	44.0±1.7 a
N	**		***	
M	***		***	
$N \times M$	***	**	***	

## 2.7 微喷灌下不同施氮量和追氮方式对冬小麦成熟期土壤硝态氮含量的影响

由图3可知,成熟期土壤硝态氮含量较高的土层集中在土壤表层(0—60 cm)和土壤深层(160—200 cm),中层的硝态氮被小麦根系吸收殆尽。在3个施氮量下,0—60 cm土壤硝态氮含量均以4T显

著高于JS处理;60—140 cm土壤硝态氮含量则表现为, $N_1$ 条件下4T显著高于JS, $N_2$ 和 $N_3$ 条件下4T与JS处理间差异不显著;而180—200 cm土壤硝态氮含量JS处理显著高于4T处理。在相同追氮方式下,随着施氮量的增加,土壤表层和深层硝态氮含量随之增加。综上,4T虽然表层土壤硝态氮残

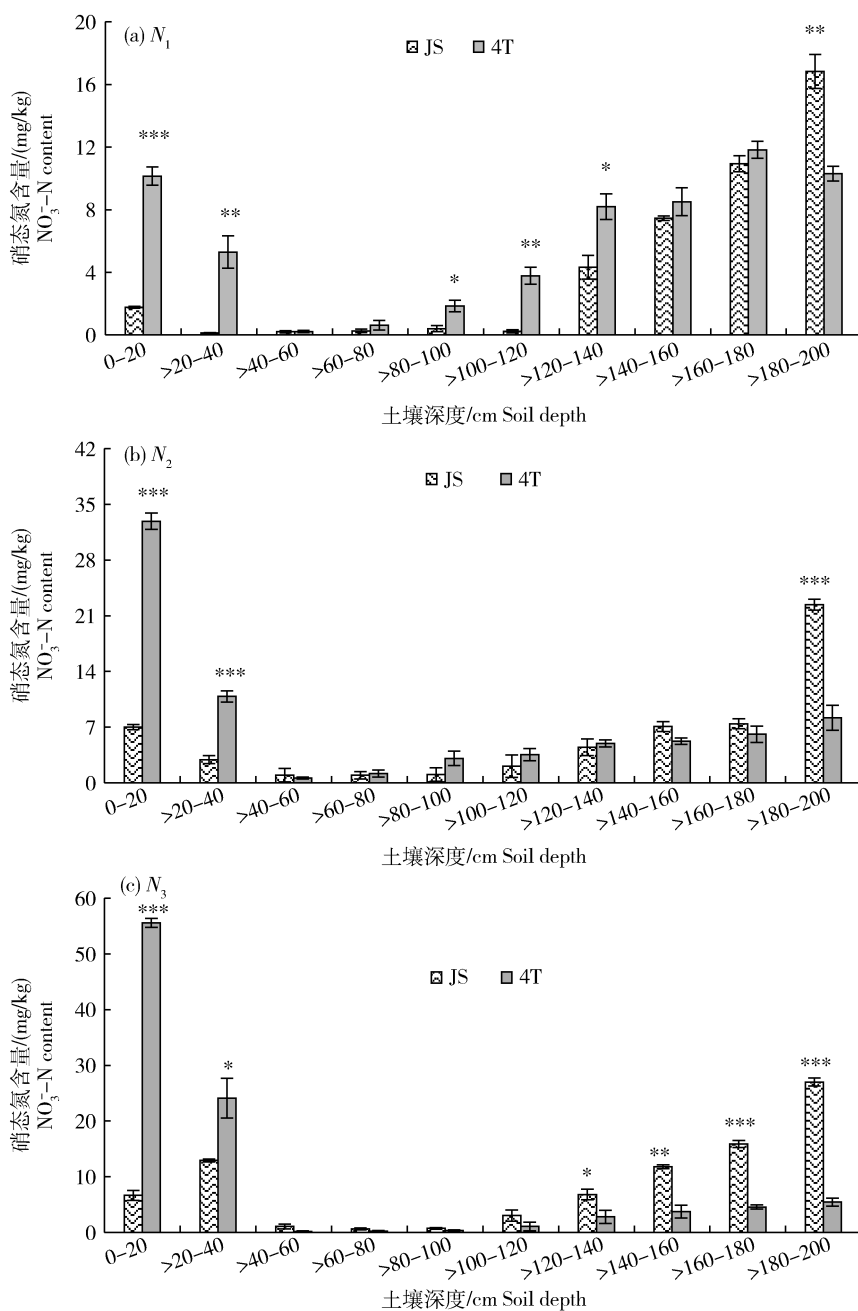


图3 不同施氮量处理下冬小麦成熟期不同土层硝态氮含量

Fig. 3  $\text{NO}_3^-$ -N content of different soil layer at winter wheat maturity stage under different nitrogen application treatment

留量较多,但是后茬作物可以很容易利用表层土壤的硝态氮。此外,4T的深层土壤硝态氮残留较小,减少了土壤硝态氮向更深层土壤的淋洗,对环境较为友好。

### 3 讨论

氮肥管理是作物栽培中最重要的管理措施之一,极大地影响着作物的产量和品质<sup>[25]</sup>。本研究

中,‘济麦22’在施氮量为  $300 \text{ kg/hm}^2$  时产量最高,而李金鹏等<sup>[26]</sup>研究认为‘济麦22’最适宜的施氮量为  $240 \text{ kg/hm}^2$ ,可能由于本试验年份为枯水年,小麦生育期内有效降雨量仅为  $62.3 \text{ mm}$ ,土壤水分不足可能限制了小麦对氮肥的吸收。有研究表明,生育后期追施氮肥显著提高了籽粒大小,延缓了植株衰老,提高了千粒重,进而提高了籽粒产量<sup>[14,27]</sup>。本研究也得到相似的结果,氮肥分施处理(4T)主要

通过增加千粒重进一步提高了籽粒产量。

蛋白质含量是小麦籽粒中重要的营养组成部分,也是衡量小麦品质等级和价格的重要标准<sup>[25]</sup>。小麦籽粒蛋白质中80%以上为贮藏蛋白<sup>[28]</sup>。贮藏蛋白是面筋的重要组成部分,由醇溶蛋白和麦谷蛋白组成,决定了面团的弹性和延展性,其含量的高低极大地影响着籽粒的品质好坏<sup>[29]</sup>。Xue等<sup>[11]</sup>研究表明,氮肥分施改变了籽粒蛋白质组成,提高了谷蛋白比例,进而改善了籽粒烘烤品质。Zhong等<sup>[15]</sup>的研究结果也表明,氮肥晚施提高了籽粒各蛋白组分含量,改善了籽粒品质。在本研究中,相比于拔节期一次性追氮(JS),拔节期、孕穗期、开花期和灌浆期分次追氮处理(4T)显著提高了籽粒的醇溶蛋白含量、谷蛋白含量、总蛋白含量和湿面筋含量,这与Xue等<sup>[11]</sup>研究结果相似。不同的是,本研究中,氮肥分施处理(4T)虽然显著提高了籽粒的贮藏蛋白含量,但是并没有提高谷蛋白与醇溶蛋白的比例,因而没有延长面团的稳定时间,反而降低了面团的稳定时间。其他研究也有报道,晚施氮肥虽然提高了籽粒蛋白质含量,但是并没有改善籽粒蛋白质组成,因而没有提高籽粒的烘烤品质<sup>[12]</sup>。Ma等<sup>[30]</sup>研究也认为,相比于蛋白质含量,蛋白质组成更能反映籽粒的品质好坏,沉降值、面团稳定时间和面团拉伸面积等是衡量籽粒品质更有效的指标。蛋白质含量高低与最终烘烤品质的关系需要更进一步深入的研究。

小麦籽粒蛋白质含量的高低很大程度上取决于小麦植株吸收氮素的有效性和吸收量<sup>[31]</sup>。Kichey等<sup>[32]</sup>研究认为小麦成熟期氮素50%~95%来源于开花前氮素的转移,花后氮素吸收只占5%~50%。然而这些结论是在传统的灌水施肥下得出来的, Li等<sup>[18]</sup>研究指出,微喷水肥一体化下花后氮占比可达39.5%~47.5%。本研究得出相似的结论,与拔节期一次性追氮相比,分次施氮显著增加了花后的氮素积累量,进而提高了籽粒和总氮素积累量,这是分次追氮提高籽粒蛋白质含量的主要原因。除此以外,有研究表明,将基肥的一部分氮肥推迟至后期供应可以显著提高冬小麦的氮素吸收和氮肥利用效率<sup>[33]</sup>。本研究结果也显示,分次追氮显著提高了小麦的氮素收获指数和氮肥偏生产力。

氮肥施用量直接影响了土壤硝态氮的浓度,从而影响着硝态氮在土壤中的迁移和积累<sup>[34]</sup>。张永帅等<sup>[35]</sup>研究表明,在小麦收获后,土壤中硝态氮残留量随着施氮量的增加而显著提高,本研究也有类似

的结果。Li等<sup>[36]</sup>研究表明,相比于传统畦灌,微喷灌下少量多次的灌溉施肥促进了根系下扎,提高了小麦对深层土壤水分和养分的吸收和利用。裴雪霞等<sup>[37]</sup>研究也认为,氮肥后移增加表层土壤硝态氮含量,减少中层土壤硝态氮含量,降低硝态氮向深层土壤淋洗和迁移的风险。本研究得到了相似的结论,相比于拔节期一次性追氮,分次追氮处理减少了深层土壤硝态氮含量,从而减少硝态氮向深层土壤的淋洗和迁移。

## 4 结论

在微喷水肥一体化条件下,冬小麦施氮量为300 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>3</sub>)、分次追氮方式(4T)下产量最高,增加施氮量可提高穗数和穗粒数,而4T可提高冬小麦千粒重,进一步提高籽粒产量。相比于拔节期一次性追氮(JS),4T可显著提高花后氮素积累量、醇溶蛋白、麦谷蛋白和湿面筋含量,同时降低深层土壤硝态氮的含量,提高氮肥偏生产力。

## 参考文献 References

- [1] Pask A J D, Sylvester-Bradley R, Jamieson P D, Foulkes M J. Quantifying how winter wheat crops accumulate and use nitrogen reserves during growth[J]. *Field Crops Research*, 2012, 126: 104-118
- [2] Dinnes D L, Karlen D L, Jaynes D B, Kaspar T C, Hatfield J L, Colvin T S, Cambardella C A. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in Tile-Drained Midwestern soils[J]. *Agronomy Journal*, 2002, 94(1): 153-171
- [3] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 1-6  
Cai Z C, Yan X Y, Zhu Z L. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(1): 1-6 (in Chinese)
- [4] 周栋, 于琦, 李敖, 李军. 施氮量对渭北旱地冬小麦产量和籽粒品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2020, 40(7): 818-825  
Zhou D, Yu Q, Li A, Li J. Effect of nitrogen application rate on winter wheat yield and grain quality in weibeidryland[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(7): 818-825 (in Chinese)
- [5] 徐凤娇, 赵广才, 田奇卓, 常旭虹, 杨玉双, 王德梅, 刘鑫. 施氮量对不同品质类型小麦产量和加工品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(2): 300-306  
Xu F J, Zhao G C, Tian Q Z, Chang X H, Yang Y S, Wang D M, Liu X. Effects of nitrogen fertilization on grain yield and processing quality of different wheat genotypes[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(2): 300-306 (in Chinese)
- [6] 赵广才, 常旭虹, 杨玉双, 李姗姗, 丰明, 丁玉萍, 王秀红, 张铁恒. 施氮量和比例对冬小麦产量和蛋白质组分的影响[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(2): 294-298  
Zhao G C, Chang X H, Yang Y S, Li S S, Feng M, Ding Y P, Wang X H, Zhang T H. Grain yield and protein components responding to the amount and rate of nitrogen application in winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(2): 294-298 (in Chinese)

- [7] 吴强, 张永平, 董玉新, 高飞雁, 谢岷. 施氮量和灌水模式对小麦产量、品质和氮肥利用的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(3): 334-342  
Wu Q, Zhang Y P, Dong Y X, Gao F Y, Xie M. Effect of nitrogen application rates and irrigation modes on yield, nitrogen use efficiency and quality in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020, 40(3): 334-342 (in Chinese)
- [8] 柏慧, 张秀, 初金鹏, 于海涛, 杨宏业, 徐晨展, 代兴龙. 氮肥水平对强筋小麦产量和氮素利用的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(4): 7-14  
Bai H, Zhang X, Chu J P, Yu H T, Yang H Y, Xu C C, Dai X L. Nitrogen fertilizer level: Effects on yield and nitrogen utilization of strong gluten wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(4): 7-14 (in Chinese)
- [9] 赵吉平, 任杰成, 郭鹏燕, 许瑛, 任超. 施氮量对小麦氮素代谢关键酶活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(10): 1222-1225  
Zhao J P, Ren J C, Guo P Y, Xu Y, Ren C. Effect of nitrogen rates on key enzyme activities related to nitrogen metabolism in wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2019, 39(10): 1222-1225 (in Chinese)
- [10] 张秀, 朱文美, 代兴龙, 初金鹏, 钱太峰, 贺明荣. 施氮量对强筋小麦产量、氮素利用率和品质的影响[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(8): 963-969  
Zhang X, Zhu W M, Dai X L, Chu J P, Qian T F, He M R. Effect of nitrogen application rate on grain yield, nitrogen use Efficiency and grain quality of strong gluten wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2018, 38(8): 963-969 (in Chinese)
- [11] Xue C, Schulte auf m Erley G, Rucker S, Koehler P, Obenauf U, Mühling K H. Late nitrogen application increased protein concentration but not baking quality of wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2016, 179(4): 591-601
- [12] Xue C, Auf M Erley G S, Rossmann A, Schuster R, Koehler P, Mühling K. Split nitrogen application improves wheat baking quality by influencing protein composition rather than concentration [J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, (2016-06-01). DOI: doi.org/10.3389/fpls.2016.00738
- [13] Gooding M J, Davies W P. Foliar urea fertilization of cereals: A review[J]. *Fertilizer Research*, 1992, 32(2): 209-222
- [14] Ottman M J, Doerge T A, Martin E C. Durum grain quality as affected by nitrogen fertilization near anthesis and irrigation during grain fill[J]. *Agronomy Journal*, 2000, 92(5): 1035-1041
- [15] Zhong Y X, Yang M T, Cai J, Wang X, Zhou Q, Cao W T, Dai T B, Jiang D. Nitrogen topdressing timing influences the spatial distribution patterns of protein components and quality traits of flours from different pearling fractions of wheat (*Triticum aestivum* L) grains [J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 120-128
- [16] Zhai L C, Lv L H, Dong Z Q, Zhang L H, Zhang J T, Jia X L, Zhang Z B. The water-saving potential of using micro-sprinkling irrigation for winter wheat production on the North China Plain [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(6): 1687-1700
- [17] 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  
Zhang Y H, Zhang Q, Xu X X, Li J P, Wang B, Zhou S L, Liu L J, 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)
- [18] Li J P, Wang Z M, Yao C S, Zhang Z, Liu Y, Zhang Y H. Micro-sprinkling irrigation simultaneously improves grain yield and protein concentration of winter wheat in the North China Plain[J]. *The Crop Journal*, 2021, 9(6): 1397-1407
- [19] 王东, 于振文, 满建国, 刘立钧. 小麦专用微喷带. 中国, CN202715493U[P]. 2013-02-06  
Wang D, Yu Z W, Man J G, Liu L J. Special microjet belt for wheat. China, CN202715493U[P]. 2013-02-06 (in Chinese)
- [20] 何照范. 粮油籽粒品质及其分析技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1985: 57-58  
He Z F. *Grain and Oil Quality and Its Analysis Techniques* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1985: 57-58 (in Chinese)
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000  
Bao S D. *Soil and Agricultural Chemistry Analysis* [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
- [22] GB/T 5506.2—2008. 小麦和小麦粉 面筋含量 第2部分: 仪器法测定湿面筋[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009  
GB/T 5506.2—2008. Wheat and wheat flour-Gluten content-Part 2: Determination of wet gluten by mechanical means[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese)
- [23] GB/T 14614—2019. 粮油检验 小麦粉面团流变学特性测试 粉质仪法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019  
GB/T 14614—2019. Inspection of grain and oils: Doughs rheological properties determination of wheat flour—Farinograph test[S]. Beijing: Standards Press of China, 2019 (in Chinese)
- [24] Norman R J, Edberg J C, Stucki J W. Determination of nitrate in soil extracts by dual-wavelength ultraviolet spectrophotometry [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(5): 1182-1185
- [25] Zörb C, Ludewig U, Hawkesford M J. Perspective on wheat yield and quality with reduced nitrogen supply[J]. *Trends in Plant Science*, 2018, 23(11): 1029-1037
- [26] 李金鹏, 宋文越, 姚春生, 周晓楠, 张震, 王志敏, 张英华. 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 J P, Song W Y, Yao C S, Zhou X N, Zhang Z, Wang Z M, Zhang Y H. Effects of nitrogen fertilizer application and micro-sprinkling irrigation integration on grain yield and water use efficiency of winter wheat[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(3): 1-9 (in Chinese)
- [27] 杨丽娜, 蒋志凯, 盛坤, 李晓航, 赵宗武. 氮肥追施时期对强筋小麦产量和面粉品质的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(6): 26-30  
Yang L J, Jiang Z K, Sheng K, Li X H, Zhao Z W. Effect of nitrogen dressing application in different period on the yield and grain quality of strong gluten wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(6): 26-30 (in Chinese)
- [28] Shewry P R, Tatham A S, Barro F, Barcelo P, Lazzeri P. Biotechnology of breadmaking: Unraveling and manipulating the multi-protein gluten complex[J]. *Bio/Technology*, 1995, 13(11): 1185-1190
- [29] Veraverbeke W S, Delcour J A. Wheat protein composition and properties of wheat glutenin in relation to breadmaking functionality[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2002, 42(3): 179-208
- [30] Ma M M, Li Y C, Xue C, Xiong W, Peng Z P, Han X, Ju H, He Y. Current situation and key parameters for improving wheat quality in China[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, [2021-02-15]. DOI: doi.org/10.3389/fpls.2021.638525
- [31] Bogard M, Allard V, Brancourt-Hulmel M, Heumez E, Machel J M, Jeuffroy M H, Gate P, Martre P, Le Gouis J. Deviation from the grain protein concentration-grain yield negative relationship is highly correlated to post-anthesis N uptake in winter wheat[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(15): 4303-4312
- [32] Kichey T, Hirel B, Heumez E, Dubois F, Le Gouis J. In winter wheat (*Triticum aestivum* L), post-anthesis nitrogen uptake and remobilisation to the grain correlates with agronomic traits and nitrogen physiological markers[J]. *Field Crops Research*, 2007, 102(1): 22-32
- [33] 陈祥, 同延安, 亢欢虎, 俞建波, 王志辉, 杨江锋. 氮肥后移对冬小麦

- 产量、氮肥利用率及氮素吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 450-455
- Chen X, Tong Y A, Kang H H, Yu J B, Wang Z H, Yang J F. Effect of postponing N application on the yield, apparent N recovery and N absorption of winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 450-455 (in Chinese)
- [34] 袁新民, 杨学云, 同延安, 李晓林, 张福锁. 不同施氮量对土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 累积的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2001, 19(1): 8-13, 39
- Yuan X M, Yang X Y, Tong Y A, Li X L, Zhang F S. Effect of N-fertilizer rate on soil nitrate nitrogen accumulation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2001, 19(1): 8-13, 39 (in Chinese)
- [35] 张永帅, 郭金强, 王娟, 彭振宝, 宋风强, 危常州. 不同施氮量下氮肥在土壤中的空间分布与作物吸收后残留规律[J]. 西北农业学报, 2007, 16(2): 70-74
- Zhang Y S, Guo J Q, Wang J, Peng Z B, Song F Q, Wei C Z. Study on nitrogenous fertilizer spatial variation and accumulation after harvest under fertigation treatment[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2007, 16(2): 70-74 (in Chinese)
- [36] 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
- [37] 裴雪霞, 王秀斌, 何萍, 张秀芝, 李科江, 周卫, 梁国庆, 金继运. 氮肥后移对土壤氮素供应和冬小麦氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 9-15
- Pei X X, Wang X B, He P, Zhang X Z, Li K J, Zhou W, Liang G Q, Jin J Y. Effect of postponing N application on soil N supply, plant N uptake and utilization in winter wheat[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 9-15 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅



**第一作者简介:** 姚春生, 中国农业大学农学院博士研究生, 专业为作物栽培学与耕作学。2022 年获得中国农业大学博士一等学业奖学金和农学院三好学生, 以第一作者分别在 *Agricultural Water Management* 和《中国农业大学学报》发表论文各 1 篇, 参与国家重点研发计划“黄淮海冬小麦产量与效率层次差异形成机制与丰产增效途径(2016YFD0300105)”。



**通讯作者简介:** 张英华, 博士, 中国农业大学农学院教授, 博士生导师, 国家小麦产业技术体系岗位专家, 美国德州农工大学和澳大利亚 CSIRO 访问学者。主要从事小麦高产优质高效栽培理论与技术研究, 主持多项国家自然科学基金项目和国家重点研发计划课题。先后获得农业部中华农业科技一等奖、河南省科技进步二等奖、滨州市科技进步一等奖等奖项。以通讯作者在 *Journal of Experimental Botany*、*Field Crops Research*、*Food Chemistry*、*Agricultural Water Management*、*Science of the Total Environment*、*The Crop Journal*、*Journal of Integrative Agriculture* 等国际专业期刊发表论文 40 余篇, 出版教材和专著 2 部。