

冬小麦群体结构及产量对播期和追氮时期的响应

王婷^{1,2}, 常旭虹², 王艳杰², 刘希伟², 杨玉双², 王德梅², 石书兵¹, 赵广才²

(1. 新疆农业大学农学院, 新疆, 乌鲁木齐, 830052; 2. 中国农业科学院作物科学研究所/
农业农村部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 北京 100081)

摘要: 为探究播期和追氮时期对冬小麦群体结构和籽粒产量的调控效应, 以冬小麦品种中麦 108 为材料, 通过开展不同播期(S1:9月29日;S2:10月31日)和追氮时期(N1:返青期;N2:拔节期)田间试验, 分析了冬小麦生育进程、归一化植被指数(NDVI)、群体动态、干物质积累、农艺性状、籽粒产量及其构成因素在不同处理间的差异。结果表明, S2 的出苗至返青的生长天数较 S1 少 35 d, 但返青至成熟的天数在两个播期间仅差 1 d。S1 的各生育时期 NDVI、群体茎蘖数、干物质积累量均高于 S2, 但 S2 的干物质积累量与 S1 差异随生育进程的推进逐渐缩小; S1 的籽粒产量和穗数显著高于 S2, 但穗茎比、小穗结实率和穗粒数表现相反。追氮时期对拔节期和灌浆后期的 NDVI 影响显著, N1 显著高于 N2; 但 N2 的开花期和成熟期干物积累量均高于 N1, 在 S1 条件下分别提高 6.9% 和 11.4%, 在 S2 条件下分别提高 4.4% 和 4.9%; 茎蘖成穗率、籽粒产量及其构成因素在 N1 与 N2 间无显著差异。总体来看, 晚播(S2)条件下冬小麦可以通过自身调节加速生育进程, 提高干物质生产速率、小穗结实率和穗粒数以保证一定的产量; 返青期追氮有利于提高晚播小麦的春季植被指数和茎蘖数, 拔节期追氮则有利于花后干物质的积累。

关键词: 冬小麦; 播期; 追氮时期; 群体动态; 物质积累; 产量

中图分类号: S512.1; S311

文献标识码: A

文章编号: 1009-1041(2025)03-0395-09

Population Structure and Yield Response of Winter Wheat to Sowing Date and Nitrogen Topdressing Stage

WANG Ting^{1,2}, CHANG Xuhong², WANG Yanjie², LIU Xiwei², YANG Yushuang²,
WANG Demei², SHI Shubing¹, ZHAO Guangcai²

(1. College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Open Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Cultivation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to investigate the regulatory effects of sowing date and nitrogen topdressing stage and their interaction on the population structure and grain yield of winter wheat, the field experiment was carried out using winter wheat cultivar Zhongmai 108. In this study, different sowing dates (S1: September 29; S2: October 31) and nitrogen topdressing stage (N1: Regreening stage; N2: Jointing stage) was conducted to analyze difference of growth process, normalized difference vegetation index (NDVI), population dynamics, dry matter accumulation, agronomic traits, grain yield and its components of winter wheat among different treatments. The results showed that days from seeding emergence to regreening of S2 was 35 days less than that of S1, but days from regreening to maturity was only 1 day less than that of S1. The normalized difference vegetation index (NDVI), tillers number and dry matter accumulation amount of S1 were higher than those of S2 at each growth stage, while

收稿日期: 2024-02-08

修回日期: 2024-03-14

基金项目: 国家现代农业产业技术体系专项(CARS-03); 国家重点研发计划项目(2016YFD0300407)

第一作者 E-mail: 862949286@QQ.com(王婷)

通讯作者 E-mail: dmwang312@163.com(王德梅); shbshi@sina.com(石书兵); zhaogc1@163.com(赵广才)

dry matter amount differences between S2 and S1 gradually narrowed following the growth process. The grain yield and spikes number of S1 were significantly higher than those of S2, however, the spike stem ratio, fertility rate of spikelets and grain number per spike were opposite. NDVI at jointing and late filling stage was significantly affected by nitrogen topdressing stage, which in N1 treatment was significantly higher than in N2. Nevertheless, dry matter accumulation amount at flowering and maturity stages of N2 was higher than that of N1, which increased by 6.9% and 11.4% under S1 conditions, and increased by 4.4% and 4.9% under S2 conditions, respectively. There was no significant difference in productive tiller percentage, grain yield and its components between N1 and N2. In general, under the condition of late sowing (S2), winter wheat can accelerate the growth process through self-regulation, increase dry matter production rate, spikelet seed setting rate and grain number per spike to ensure a certain yield; nitrogen topdressing at regreening stage was beneficial to improve the spring vegetation index and tillers number of late sown wheat, and nitrogen topdressing at jointing stage was favourable for promoting dry matter accumulation after anthesis.

Keywords: Winter wheat; Sowing date; Nitrogen topdressing stage; Population structure; Dry matter accumulation; Yield

小麦是中国主要口粮作物,是主要的商品粮和战略储备粮品种之一^[1]。小麦的稳产高产对保障国民经济发展和人民生活水平具有重要意义^[2-3]。随着全球气候的不断变化,极端天气频繁出现,严重威胁粮食生产。如 2021 年北方麦区遭遇罕见秋汛,致使冬小麦大面积晚播,冬前苗情长势总体偏弱,对小麦能否丰收构成极大挑战^[4]。此外,目前多地推行夏玉米—冬小麦的“双晚”种植栽培模式^[5-7],生产中不能适期播种的麦田越来越多,制约了区域小麦产量的提高。

播种时间和氮肥运筹作为主要栽培措施,对冬小麦的生长发育、群体结构和产量形成具有重要调控作用^[8-11]。播种过早时,冬小麦易苗期徒长,增加冬季冻害风险;播种过晚时,小麦不能形成冬前壮苗,不利于冬前群体和茎蘖质量的提高、安全越冬和春季返青及形成丰产群体^[12-13]。研究表明,随播期的推迟,小麦干物质积累量降低^[14],单茎分化小穗数和结实小穗数显著减少,有效穗数显著下降,导致减产^[15]。但也有研究发现,随着播期的延迟,小麦籽粒产量先升后降^[16],适当晚播可缩短小麦全生育期,减少小麦越冬前的生育进程,减轻冻害对小麦生长发育的影响^[17-18];还可显著降低小麦冬前分蘖数,促进春季分蘖的发生和成穗,提高分蘖成穗率^[19-20]。氮素是影响植物生长的重要营养物质之一^[21-22]。合理的氮肥运筹有利于小麦植株营养均衡,促进根系发育,易建成优势蘖群体,有利于单位面积穗数的提高和最终产量的增加^[23-25]。追氮是调控作物生长发育和

产量形成的重要措施,其中追氮时期的影响较大。与春 2 叶追氮相比,春 5 叶追氮更有利于提高小麦的产量^[26];追氮时期后移有利于小麦籽粒产量的增加^[26-27]。但关于追氮时期调控不同播期小麦群体结构和产量形成的研究鲜见报道,如何通过追氮提高晚播小麦籽粒产量也是亟需解决的生产问题之一。本研究重点分析播期和追氮时期及其互作对冬小麦生育进程、群体动态、农艺性状和产量及其构成因素的调控效应,以期为完善晚播冬小麦高产栽培技术提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2022—2023 年在中国农业科学院作物科学研究所北京中圃场试验基地(39°57'N, 116°19'E,海拔 36 m)进行。该地区属暖温带半湿润半干旱大陆性季风气候区。试验地土壤为壤土,小麦播种前 0~20 cm 土层含有有机质 27.97 g·kg⁻¹、全氮 1.48 g·kg⁻¹、速效氮 113.57 mg·kg⁻¹、速效磷 42.23 mg·kg⁻¹、速效钾 296.97 mg·kg⁻¹;20~40 cm 土层含有有机质 23.67 g·kg⁻¹、全氮 1.31 g·kg⁻¹、速效氮 69.06 mg·kg⁻¹、速效磷 34.32 mg·kg⁻¹和速效钾 199.49 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验以冬小麦品种中麦 108 为供试材料,采用裂区设计,其中主区为播种时期(S1:2022 年 9 月 29 日;S2:2022 年 10 月 31 日),副区为追氮时

期(N1:返青期; N2:拔节期),追施氮量均为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小区面积 3.6 m^2 ($3 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$),6行区,行距 20 cm ,每个处理重复3次。试验基本苗为 $3.6 \times 10^6 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。其他管理措施同一般高产田,2023年6月12日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生育时期记录

参照小麦主要生育阶段的记载标准^[28],准确观察和记录各试验处理的小麦生育进程,记载的生育时期包括播种日期、出苗期、返青期、拔节期、孕穗期、开花期和成熟期。

1.3.2 归一化植被指数(NDVI)测定

于小麦返青期、起身期、拔节期、孕穗期、开花期、灌浆中期和灌浆后期,采用 Greenseeker (Trimble, USA) 便携式光谱仪测定。测定时光谱仪传感器与小麦冠层保持平行,且高于植物冠层 60 cm ,顺麦垄方向采集 NDVI,每小区重复测定3次,取平均值。

1.3.3 茎蘖数的测定

小麦出苗后每小区选定长势均匀一致的2个固定样点(33.3 cm 双行)^[29],于小麦返青期、拔节期、开花期和成熟期调查茎蘖数。茎蘖成穗率 = 成熟期群体总茎数/拔节期群体总茎数 $\times 100\%$ ^[30]。

1.3.4 干物质积累量的测定

采用烘干法测定,分别于小麦返青期、拔节期、开花期、灌浆期和成熟期在各小区选取生长一致、具有代表性的20株小麦,取植株地上部分,开花期、灌浆期、成熟期样品分为茎、叶和穗,经 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min , $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘至恒重,待冷却后称重。

1.3.5 农艺性状和产量及其构成因素的测定

成熟时调查各样点的穗数,在样点中选取20株代表性植株,测定茎长、穗长、总小穗数、不孕小穗数、穗粒数,根据公式计算穗茎比和小穗结实率^[31]。各小区实收计产,并测定千粒重。穗茎比 = 穗长/茎长 $\times 100\%$;小穗结实率 = (总小穗数 - 不孕小穗数)/总小穗数 $\times 100\%$

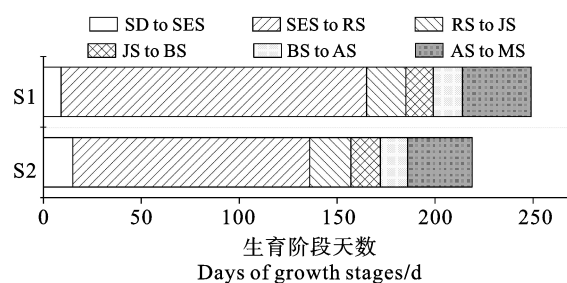
1.4 统计分析

采用 Microsoft Excel 2021 和 Origin 2021 Pro 对数据进行分析及图形绘制,使用 DPS 20.0.5 统计软件进行方差分析,多重比较选择 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 播期对冬小麦生育进程的影响

冬小麦各生育时期的时长在不同播期条件下表现不同(图1)。与 S1 相比,S2 的播种至出苗期的生育天数多6d,出苗至返青期的生育天数少35d,返青至拔节期和拔节至孕穗期的天数均多1d,孕穗至开花期的天数少1d,开花至成熟期的天数少2d,全生育期少30d。综上可知,不同播期间冬小麦生育进程的差异主要体现在出苗至返青期;在晚播条件下,小麦主要通过自身调节缩短出苗至返青期的时间以实现正常时期成熟。



SD to SES: 播种期至出苗期; SES to RS: 出苗期至返青期; RS to JS: 返青期至拔节期; JS to BS: 拔节期至孕穗期; BS to AS: 孕穗期至开花期; AS to MS: 开花期至成熟期。

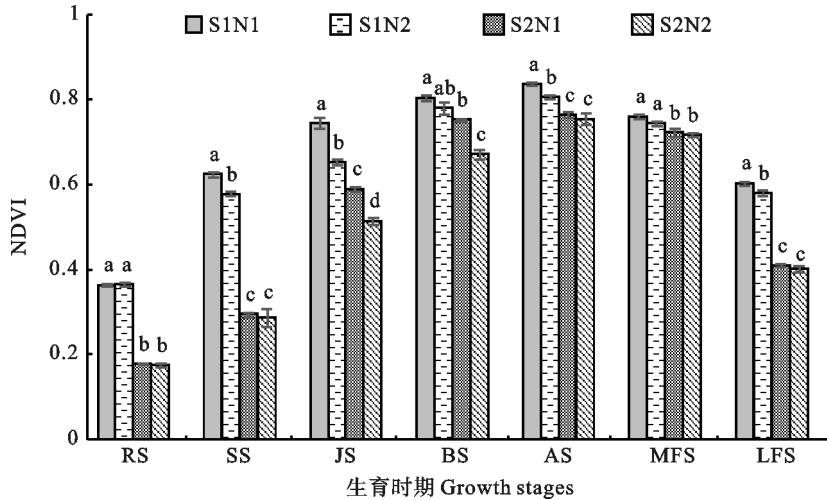
SD to SES: Sowing date to seedling stage; SES to RS: Seedling stage to regreening stage; RS to JS: Regreening stage to jointing stage; JS to BS: Jointing stage to booting stage; BS to AS: Booting stage to anthesis stage; AS to MS: Anthesis stage to maturity stage.

图1 播期对冬小麦生育阶段生育天数的影响

Fig. 1 Effects of sowing date on the development days of winter wheat at growth stages

2.2 播期和追氮时期对冬小麦归一化植被指数的影响

小麦归一化植被指数(NDVI)随着生育时期的推移呈先升后降趋势(图2),开花期达到最大值。与 S1 相比,S2 的 NDVI 在各生育时期均下降,且在返青期、起身期、拔节期和灌浆后期差异均显著,降幅分别为 51.5% 、 51.7% 、 21.0% 和 31.4% ,表明晚播不利于冬小麦群体形成,尤其是生育前期。S1 条件下,N1 的 NDVI 在起身期、拔节期、开花期和灌浆后期均显著高于 N2,其余时期差异不显著;S2 条件下,N1 的 NDVI 在拔节期、孕穗期均显著高于 N2,其余时期差异不显著。这表明与拔节期追氮相比,返青期追氮更利于提高冬小麦拔节后的群体发育。



RS:返青期;SS:起身期;JS:拔节期;BS:孕穗期;AS:开花期;MFS:灌浆中期;LFS:灌浆后期。同一时期不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$)。下图同。

RS: Re-greening stage; SS: Setting stage; JS: Jointing stage; BS: Booting stage; AS: Anthesis stage; MFS: Mid-filling stage; LFS: Late-filling stage. Different lowercase letters in the same period indicated significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same in the following figures.

图 2 播期和追氮时期对不同生育时期小麦 NDVI 的影响

Fig. 2 Effects of sowing date and nitrogen topdressing stage on NDVI of wheat at different growth stages

2.3 播期和追氮时期对冬小麦群体动态变化的影响

在小麦生育期中,总茎数在拔节期达到最大值(图 3)。其中,S1N1 和 S2N2 处理总茎数分别最多和最少,前者较后者增加 42.5%。S1 条件下返青期、拔节期、开花期和成熟期的小麦总茎数显著高于 S2,增幅分别为 31.2%、29.1%、16.6%和 16.0%,表明晚播导致冬小麦春季群体数量降低。两个播期条件下,N2 的返青期、拔节期、开花期和成熟期总茎数均低于 N1,表明返青期追氮较拔节

期追氮有利于小麦春季群体生长。

2.4 播期和追氮时期对冬小麦分蘖成穗率的影响

S2 的冬小麦茎蘖成穗率高于 S1,在 N2 条件下差异达到显著水平(图 4),表明推迟播期有利于提高冬小麦的茎蘖成穗。同一播期条件下,茎蘖成穗率在 N1 与 N2 间均无显著差异,表明追氮时期对小麦的茎蘖成穗亦无显著影响。

2.5 播期和追氮时期对冬小麦干物质积累的影响

S2 的小麦春季各生育时期干物质积累量均显著低于 S1 (图 5),返青期、拔节期、开花期和成熟

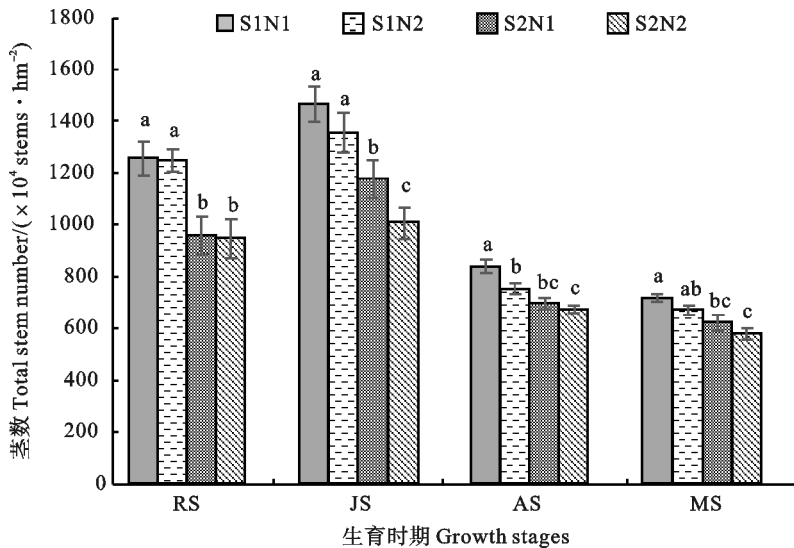


图 3 播期和追氮时期对小麦不同生育时期茎数的影响

Fig. 3 Effects of sowing date and nitrogen topdressing stage on total stem number of wheat at different growth stages

期的降幅分别为 88.0%、48.6%、29.4% 和 8.9%，表明推迟播期不利于小麦的干物质积累，但晚播小麦的干物质积累速率随生育进程在逐渐提高。同一播期下，N2 的开花期和成熟期的干物质积累量高于 N1，增幅在 S1 条件下分别为 6.9% 和 11.4%，在 S2 条件下分别为 4.4% 和 4.9%，说明与返青期追氮相比，拔节期追氮有利于冬小麦花后同化物的合成与积累。

2.6 播期和追氮时期对冬小麦农艺性状的影响

冬小麦农艺性状对不同播期和追氮时期也有明显反应(图 6)。S2 的穗长、茎长、总小穗数和不孕小穗数均显著低于 S1，降幅分别为 5.7%、20.9%、15.3% 和 51.8%；S2 的穗茎比和小穗结实率均显著高于 S1，增幅分别为 19.6% 和 8.0%。在同一播期下，N1 的穗长均大于 N2，茎长、穗茎比和总小穗数在两个追氮时期期间无显著差异。不孕小穗数和结实率对追氮时期的反应因播期而不同。在 S1 条件下，N1 不孕小穗数和小穗结实率分别大于和小于 N2，S2 条件下追氮时期间均无显著差异。这表明晚播有利于降低小麦株高和提高小穗结实率；晚播条件下追氮时期对小麦穗部性状影响较小。

2.7 播期和追氮时期对冬小麦籽粒产量及其构成因素的影响

由表 1 可见，在追氮时期相同条件下，S1 的籽粒产量和穗数均显著高于 S2，穗粒数表现则相反；S1 的千粒重在 N1 条件下与 S2 无显著差异，在 N2 条件下显著高于 S2。同一播期条件下，穗数、穗粒数、千粒重和籽粒产量在 N1 与 N2 间差异均不显著。这表明晚播对冬小麦有显著的减产效应，主要归因于穗数的降低，追氮时期对产量及其构成无显著影响。

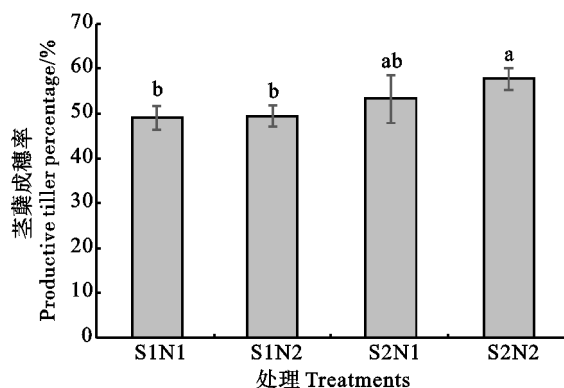


图 4 播期和追氮时期对冬小麦茎蘖成穗率的影响
Fig. 4 Effects of sowing date and nitrogen topdressing stage on productive tiller percentage of winter wheat

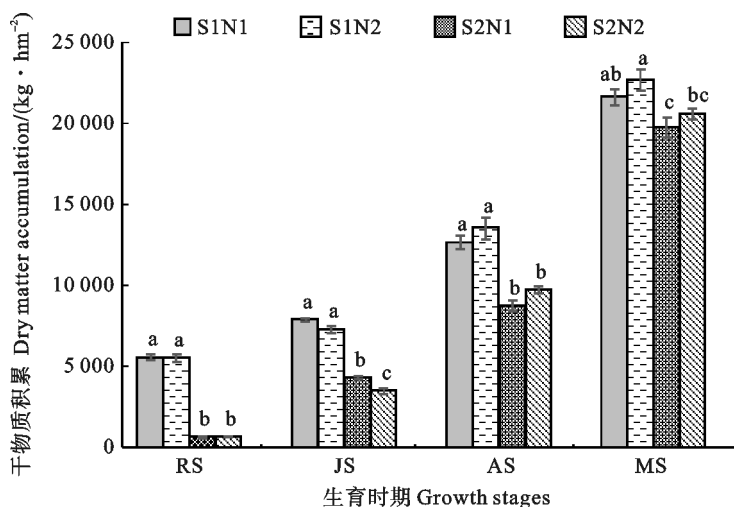


图 5 播期和追氮时期对不同生育时期小麦干物质积累的影响

Fig. 5 Effects of sowing date and nitrogen topdressing stage on dry matter accumulation of different growth stages in wheat

3 讨论

3.1 播期和追氮时期对冬小麦生育进程和农艺性状的影响

合理的播期和氮肥运筹对于小麦生长发育具有重要意义^[32-34]。随着播期的推迟，小麦进入穗

分化各时期的日期延迟，穗分化总历时缩短^[15]。邵庆勤等^[35]认为，播期推迟主要影响小麦拔节期前营养生长期长短；裴雪霞等^[36]提出，播期对优质小麦各生育时期及持续时间的影响主要表现在出苗至抽穗阶段。本研究发现，不同播期间冬小麦生育进程的差异主要体现在出苗至返青期，

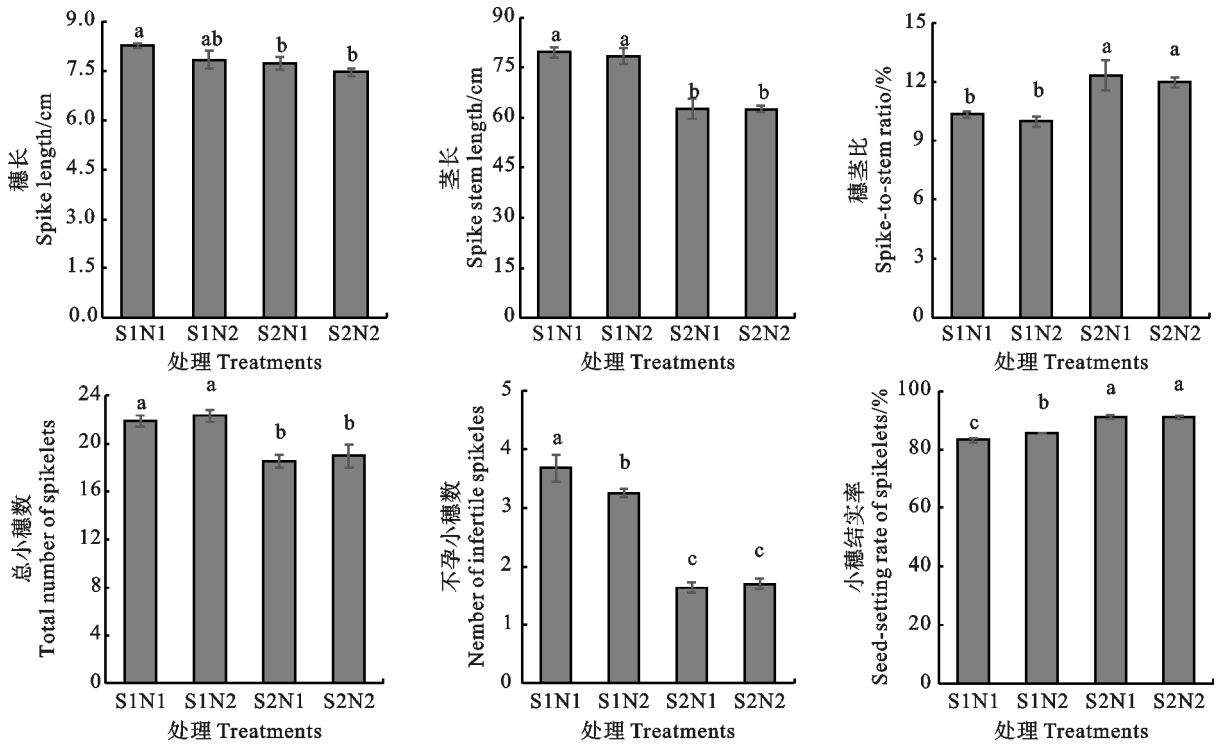


图 6 播期和追氮时期对冬小麦农艺性状的影响

Fig. 6 Effects of sowing date and nitrogen topdressing stage on agronomic traits of winter wheat

表 1 播期和追氮时期对冬小麦产量及构成因素的影响

Table 1 Effects of sowing date and nitrogen topdressing stage on yield and yield components of winter wheat

处理 Treatment	穗数 Spike number/($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grain number per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
S1N1	717.6a	38.5b	42.4ab	10 611.2a
S1N2	669.6ab	39.4b	43.9a	10 861.7a
S2N1	624.0bc	44.9a	41.9b	8 517.9b
S2N2	580.8c	43.3a	42.2b	8 769.9b

同列数据后不同小写字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters after the values in the same columns indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$).

返青至成熟期的生长天数几乎一致;晚播条件下,供试小麦品种中麦 108 可通过自身调节缩短出苗至返青期的时间,加速后期生长速率以实现正常时期成熟。本试验中, S2 的株高、总小穗数、不孕小穗数较 S1 均降低,但穗茎比、小穗结实率和茎蘖成穗率均提高,该结果与赵凯等^[37]、何井瑞等^[38]的研究结果基本一致,但与何盛莲等^[39]的研究结果存在差异。关于追氮时期调控小麦农艺性状的研究报道较少。有研究表明,在播种方式一定的条件下,小麦的穗长随着追氮时期的后移呈先增加后降低的趋势^[23]。本试验结果显示,茎长、穗茎比、总小穗数和茎蘖成穗率在不同追氮时期均无显著差异,但返青期追氮较拔节期追氮更利于提高小麦穗长,拔节期追氮则促进 S1 条件

下小麦小穗结实。

3.2 播期和追氮时期对冬小麦群体结构和物质积累的影响

播期对小麦的群体大小和物质积累影响显著^[40]。有研究表明,相较于晚播小麦,早播小麦的有效群体和成穗率较大^[14];随播期推迟,小麦开花期和成熟期的干物质积累量下降^[35]。本试验结果表明,晚播导致冬小麦拔节前和灌浆后期的 NDVI、春季各生育时期群体总茎数和干物质积累量大幅降低;但不同生育时期干物质积累量在不同播期处理间的差异随生育进程的推进逐渐缩小,可见晚播小麦的春季干物质生产速率较高。氮肥运筹是调节小麦物质积累的有效栽培措施。前人研究认为,因为晚播小麦前期生长量较少,后

期增加施肥更有利于其群体生长^[41]。本研究发现,改变春季追氮时期可调节小麦群体和物质积累,与拔节期追氮相比,返青期追氮更利于提高S2条件下冬小麦拔节后的NDVI、茎蘖数和春季群体数,拔节期追氮更有利于提高S2条件下小麦开花至成熟期间的干物质积累,是促进晚播小麦花后同化物合成的有效途径。

3.3 播期和追氮时期对冬小麦产量及其构成的影响

播期影响小麦的籽粒产量及其构成因素^[42-43]。有研究表明,小麦籽粒产量以适播的最高,过晚播种后小麦籽粒产量显著降低^[44];随播期延迟,穗粒数、千粒重相应提高,单位面积穗数降低^[45-46]。本试验中,S2的籽粒产量和穗数较S1显著降低,但穗粒数反之,千粒重在播期处理间的差异因追氮时期不同而存在差异;穗数的降低是导致晚播(S2)小麦籽粒产量下降的主要原因,这与前人研究结果基本一致。

追氮时期是影响小麦籽粒产量的重要因素。吴安昌等^[47]认为,拔节、孕穗期追氮比返青、起身期追氮更能提高小麦产量,其中拔节期追氮对小麦产量的提高尤为明显。王晓英等^[48]则发现,起身期和拔节期追氮处理间产量差异不显著,但二者显著高于孕穗期和开花期追氮处理。潘庆民等^[49]研究指出,拔节期或挑旗期是小麦高产优质兼顾的追氮时期。张耀兰等^[41]、杨扎根等^[50]认为,随着追氮时期的后延,千粒重逐渐增加。本试验结果表明,同一播期条件下,穗数、穗粒数、千粒重和籽粒产量在返青期与拔节期追氮处理间的差异虽未达显著水平,但返青期追氮处理的穗数相对较高,千粒重和产量有所降低。可见,返青期追氮有利于提高穗数,拔节期追氮则利于提升粒重和产量。因此,对于晚播冬小麦可以采取春季分次追氮的措施达到增群体、提粒重、实现高产的目的,但最优的分期追氮方案及其生理基础仍需进一步研究。

4 结论

本试验中,晚播降低了冬小麦拔节前和灌浆后期的NDVI、春季群体总茎数和干物质积累量,但晚播小麦可以通过提高春季干物质生产速率、小穗结实率和穗粒数以确保丰产。对于晚播小麦,返青期追氮有利于提高春季植被指数和茎蘖数,拔节期追氮则利于有促进花后干物质的积累。

参考文献:

- [1]赵广才,常旭虹,王德梅,等. 小麦生产概况及其发展[J]. 作物杂志,2018(4): 1.
ZHAO G C, CHANG X H, WANG D M, *et al.* General situation and development of wheat production [J]. *Crops*, 2018(4): 1.
- [2]王汉霞,单福华,田立平,等. 2006—2018年北京市审定冬小麦品种的综合性状分析[J]. 麦类作物学报,2020,40(7):789.
WANG H X, SHAN F H, TIAN L P, *et al.* Analysis of comprehensive characteristics of wheat varieties registered in Beijing from 2006 to 2018 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2020,40(7):789.
- [3]汤泽慧. 中国小麦进出口现状及依存度分析[J]. 农业展望, 2018,14(7):83.
TANG Z H. Imports and exports of China's wheat and its dependency [J]. *Agricultural Outlook*, 2018,14(7):83.
- [4]焦建. 全国夏粮总产丰收细节:播种面积和单产哪个更重要?[N]. 财经,2022-07-15.
JIAO J. Details of the national total summer grain harvest: which is more important, sown area or yield? [N]. *Caijing*, 2022-07-15.
- [5]孙爽,杨晓光,赵锦,等. 全球气候变暖对中国种植制度的可能影响Ⅱ. 气候变化背景下中国冬小麦潜在光温适宜种植区变化特征[J]. 中国农业科学,2015,48(10):1926.
SUN S, YANG X G, ZHAO J, *et al.* The possible effects of global warming on cropping systems in China Ⅱ. the variation of potential light-temperature suitable cultivation zone of winter wheat in China under climate change [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015,48(10):1926.
- [6]吕丽华,董志强,王学清,等. 冬小麦晚播、夏玉米晚收增产潜力分析[J]. 华北农学报,2019,34(S1):36.
LÜ L H, DONG Z Q, WANG X Q, *et al.* Analysis of yield-increasing potential of late sowing of winter wheat and late harvest of summer maize [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019,34(S1):36.
- [7]SUN Z, ZHANG Y, ZHANG Z, *et al.* Significance of disposable presowing irrigation in wheat in increasing water use efficiency and maintaining high yield under winter wheat-summer maize rotation in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2019,225:105766
- [8]KHICHAR M L, NIWAS R. Microclimatic profiles under different sowing environments in wheat [J]. *Journal of Agrometeorology*, 2006,8(2):201.
- [9]HOSSAIN I, EPPLIN F M, KRENZER E G. Planting date influence on dual-purpose winter wheat forage yield, grain yield, and test weight [J]. *Agronomy Journal*, 2003,95(5):1179.
- [10]FLOWERS M, JAMES C, PETRIE S, *et al.* Planting date and seeding rate effects on the yield of winter and spring wheat varieties results from the 2005—2006 cropping year [J]. *Agricultural Research*, 2006,12(2):72.
- [11]FAZLI S, MOHAMMAD K, JAMRO, *et al.* Effect of different planting date, seeding rate and weed control method on grain yield and yield components in wheat [J]. *Sarhad Journal of Agriculture*, 2004,20(1):51.
- [12]赵广才,常旭虹,王德梅,等. 小麦高产创建技术参考[J]. 作物杂志,2012(5):159.
ZHAO G C, CHANG X H, WANG D M, *et al.* Technical ref-

- erence for establishing high yield of wheat [J]. *Crops*, 2012 (5):159.
- [13] 刘阿康, 马瑞琦, 王德梅, 等. 覆膜和补施氮肥对晚播冬小麦冬前植株生长及群体质量的影响[J]. 作物学报, 2022, 48 (7):1771.
LIU A K, MA R Q, WANG D M, *et al.* Effects of filming and supplemental nitrogen fertilizer application on plant growth and population quality of late sowing winter wheat before winter [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2022, 48 (7): 1771.
- [14] 张敏, 王岩岩, 蔡瑞国, 等. 播期推迟对冬小麦产量形成和籽粒品质的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(2):325.
ZHANG M, WANG Y Y, CAI R G, *et al.* Regulating effect of delayed sowing date on yield formation and grain quality of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(2): 325.
- [15] 韩金玲, 杨晴, 王文颇, 等. 播期对冬小麦茎蘖幼穗分化及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(2):303.
HAN J L, YANG Q, WANG W P, *et al.* Effects of sowing date on the caulis and tillers differentiation of young spike and yield in winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(2):303.
- [16] 李东升, 温明星, 蔡金华, 等. 播期和密氮组合对镇麦10号干物质积累及产量的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2015, 35 (10):1426.
LI D S, WEN M X, CAI J H, *et al.* Effect of sowing date and the combination of planting density and nitrogen application on yield and dry matter accumulation of Zhenmai 10 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(10):1426.
- [17] 严惠敏, 周铭瑞, 徐志鹏, 等. 播期对江苏省冬小麦产量及其构成的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(4):293.
YAN H M, ZHOU M R, XU Z P, *et al.* Effect of sowing date on winter wheat yield and yield composition in Jiangsu Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38 (4):293.
- [18] DAI X, WANG Y, DONG X, *et al.* Delayed sowing can increase lodging resistance while maintaining grain yield and nitrogen use efficiency in winter wheat [J]. *The Crop Journal*, 2017, 5(6):541.
- [19] 王夏, 胡新, 孙忠富, 等. 不同播期和播量对小麦群体性状和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(21):170.
WANG X, HU X, SUN Z F, *et al.* Effect of different sowing dates and planting density on group characters and yield of wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27 (21):170.
- [20] 张晶, 王姣爱, 党建友, 等. 播期对小麦主茎及分蘖农艺性状、产量和品质的影响[J]. 农学学报, 2013, 3(8):1.
ZHANG J, WANG J A, DONG J Y, *et al.* Effect of sowing dates on agronomic character, yield and quality of the main stalks and tillers in wheat [J]. *Journal of Agriculture*, 2013, 3(8):1.
- [21] GRANT C A, WU R, SELLES F, *et al.* Crop yield and nitrogen concentration with controlled release urea and split applications of nitrogen as compared to non-coated urea applied at seeding [J]. *Field Crops Research*, 2012, 127:170.
- [22] BLACKSHAW R E, MOLNAR L J, JANZEN H H. Nitrogen fertilizer timing and application method affect weed growth and competition with spring wheat [J]. *Weed Science*, 2004, 52(4):614.
- [23] 赵凯男, 张保军, 王德梅, 等. 提高立体匀播冬小麦光合效能和产量的最佳追氮时期[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (8):1354.
ZHAO K N, ZHANG B J, WANG D M, *et al.* Optimum nitrogen topdressing time for improving photosynthetic efficiency and yield of tridimensional uniform sowing winter wheat [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(8):1354.
- [24] 郭丹丹, 刘哲文, 常旭虹, 等. 施氮处理对不同筋型小麦产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2020(6):158.
GUO D D, LIU Z W, CHANG X H, *et al.* Effects of nitrogen application on yield and quality of wheat with different gluten types [J]. *Crops*, 2020(6):158.
- [25] 吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等. 氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(16):5128.
WU G L, GUO L Y, CUI Z Y, *et al.* Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16):5128.
- [26] 李姗姗, 赵广才, 常旭虹, 等. 追氮时期对不同粒色类型小麦产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2):255.
LI S S, ZHAO G C, CHANG X H, *et al.* Effects of nitrogen top dressing time on yield and quality in wheat with different types of grain color [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2):255.
- [27] 卜冬宁, 李瑞奇, 张晓, 等. 氮肥基追比和追氮时期对超高产冬小麦生育及产量形成的影响[J]. 河北农业大学学报, 2012, 35(4):6.
BU D N, LI R Q, ZHANG X, *et al.* Effects of basal-topdressing ratio and topdressing time of nitrogen on the growth and development and grain yield formation in superhigh yielding winter wheat [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2012, 35(4):6.
- [28] 赵广才. 优质专用小麦生产关键技术百问百答[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020:150-151.
ZHAO G C. Questions and answers on key technologies of high-quality special wheat production[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020:150-151.
- [29] 郭丹丹, 刘哲文, 常旭虹, 等. 强筋小麦群体结构、光能利用及籽粒产量对种植密度与追氮模式的响应[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(1):82.
GUO D D, LIU Z W, CHANG X H, *et al.* Response of population structure, light utilization and grain yield to planting density and nitrogen topdressing in strong gluten wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(1):82.
- [30] 张宏芝, 高永红, 王立红, 等. 高产冬小麦品种群体动态及干物质积累、分配的差异[J]. 新疆农业科学, 2020, 57(12):2157.
ZHANG H Z, GAO Y H, WANG L H, *et al.* Differences in population dynamics, dry matter accumulation and distribution of high-yield winter wheat [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2020, 57(12):2157.
- [31] 张锋. 种植密度对匀播冬小麦群体质量及产量形成的影响

- [D]. 塔里木:塔里木大学,2023.
- ZHANG F. Effect of planting density on population quality and yield formation of uniformly sown winter wheat [D]. Tarim; Tarim University, 2023.
- [32]李筠,王龙,任立凯,等. 播期、密度和氮肥运筹对冬小麦连麦2号产量与品质的调控[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 303.
- LI J, WANG L, REN L K, *et al.* Effect of sowing date, density and nitrogen management on grain yield and quality of winter wheat Lianmai 2 [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2): 303.
- [33]KAWAKITA S, ISHIKAWA N, TAKAHASHI H, *et al.* Interactions of cultivar, sowing date, and growing environment differentially alter wheat phenology under climate warming [J]. *Agronomy Journal*, 2021, 113(6): 4982.
- [34]LIU F, CHEN Y, BAI N, *et al.* Divergent climate feedbacks on winter wheat growing and dormancy periods as affected by sowing date in the North China Plain [J]. *Biogeosciences*, 2021, 18(7): 2275.
- [35]邵庆勤,闫素辉,张从宇,等. 密度对沿淮晚播小麦产量形成及品质性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1366.
- SHAO Q Q, YAN S H, ZHANG C Y, *et al.* Effect of planting density on yield and quality of later-sown winter wheat along Huaihe River [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1366.
- [36]裴雪霞,王姣爱,党建友,等. 基因型和播期对优质小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5): 1109.
- PEI X X, WANG J A, DANG J Y, *et al.* Effect of genotype and sowing time on growth, development and yield of high quality wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5): 1109.
- [37]赵凯,黄玲,冯维营,等. 播期和播量对冬小麦生长发育和产量的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(32): 1.
- ZHAO K, HUANG L, FENG W Y, *et al.* Effects of different sowing dates and seeding rates on the growth and yield of winter wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(32): 1.
- [38]何井瑞,陈之政,张洪树,等. 不同播期与基本苗对小麦生长发育及产量构成的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(33): 37.
- HE J R, CHEN Z Z, ZHANG H S, *et al.* Effect of different sowing dates and basic seedlings on growth and yield formation of wheat [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(33): 37.
- [39]何盛莲,吴政卿,雷振生,等. 播期、播量对小麦新品种郑麦9962产量及其构成因素的影响[J]. 河南农业科学, 2013, 42(9): 22.
- HE S L, WU Z Q, LEI Z S, *et al.* Effect of sowing date and planting density on yield and yield components of winter wheat Zhengmai 9962 [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(9): 22.
- [40]ZHOU B, SUN X, GE J, *et al.* Wheat growth and grain yield responses to sowing date-associated variations in weather conditions [J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(2): 985.
- [41]张耀兰,曹承富,乔玉强,等. 超晚播条件下密度和追氮时期对淮东北地区小麦产量及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(36): 160.
- ZHANG Y L, CAO C F, QIAO Y Q, *et al.* Effect of density and topdressing time of nitrogen on yield and quality of wheat in Huaibei Area under super-late sowing [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(36): 160.
- [42]WEN P, WEI Q, ZHENG L, *et al.* Adaptability of wheat to future climate change: Effects of sowing date and sowing rate on wheat yield in three wheat production regions in the North China Plain [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 901: 165906.
- [43]PEAKE A S, BELL K L, FISCHER R A, *et al.* Cultivar \times management interaction to reduce lodging and improve grain yield of irrigated spring wheat: Optimising plant growth regulator use, N application timing, row spacing and sowing date [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 401.
- [44]DONG S, ZHANG X, CHU J, *et al.* Optimized seeding rate and nitrogen topdressing ratio for simultaneous improvement of grain yield and bread-making quality in bread wheat sown on different dates [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(1): 360.
- [45]杨桂霞,赵广才,许轲,等. 播期和密度对冬小麦籽粒产量和营养品质及生理指标的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 687.
- YANG G X, ZHAO G C, XU K, *et al.* Effect of sowing date and density on grain yield and nutrition quality and physiological index of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(4): 687.
- [46]周晓虎,贺明荣,代兴龙,等. 播期和播量对不同小麦品种产量及氮素利用效率的影响[J]. 山东农业科学, 2013, 45(9): 65.
- ZHOU X H, HE M R, DAI X L, *et al.* Effects of sowing time and density on yield and nitrogen utilization efficiency of different wheat varieties [J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2013, 45(9): 65.
- [47]吴安昌,黄正来,吴延华. 追氮时期对不同小麦品种光合特性和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(2): 342.
- WU A C, HUANG Z L, WU Y H. Effect of nitrogen topdressing stage on the photosynthesis and yield of different wheat varieties [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2): 342.
- [48]王晓英,贺明荣. 追氮时期和基追比例对强筋小麦产量和品质的调控效应[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(4): 711.
- WANG X Y, HE M R. Regulatory effect of topdressing stage and ratio of base and topdressing of nitrogen fertilizer on grain yield and quality of strong gluten winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2013, 33(4): 711.
- [49]潘庆民,于振文. 追氮时期对冬小麦籽粒品质和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2002, 22(2): 65.
- PAN Q M, YU Z W. Effects of nitrogen topdressing stage on grain quality and yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2002, 22(2): 65.
- [50]杨扎根,王姣爱,裴雪霞,等. 不同追氮时期对两种筋型小麦产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008(3): 32.
- YANG Z G, WANG J A, PEI X X, *et al.* The effect of N topdressing stage on the yield and quality of genotypes with different gluten content [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(3): 32.