

氮肥后移对燕麦籽粒产量及氮素积累转运的影响

刘渴鑫¹,张宇¹,赵宝平¹,王希全¹,武俊英²,米俊珍¹

(1. 内蒙古农业大学农学院, 内蒙古呼和浩特 010019; 2. 内蒙古农业大学职业技术学院, 内蒙古包头 014000)

摘要:为探究不同氮肥后移处理对燕麦籽粒产量及氮素积累转运的影响,采用随机区组设计,以坝蓂1号和定蓂8号为材料,于2021—2022年连续两年开展大田试验,在总施纯氮量 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下,设置全部基施(CK)、1/2基施+1/2分蘖期追肥(N1)、1/2基施+1/2拔节期追肥(N2)、1/3基施+1/3分蘖期追肥+1/3拔节期追肥(N3)4种氮肥处理,分析不同氮肥后移处理下燕麦产量、各器官干物质和氮素积累转运的差异。结果表明,氮肥后移极显著影响燕麦产量,与CK相比,N3处理下坝蓂1号、定蓂8号的产量均显著增加,且两年间产量平均增幅为 $7.96\%\sim 8.82\%$;而N1、N2处理下产量分别较CK降低 $9.64\%\sim 14.50\%$ 、 $4.12\%\sim 6.59\%$;N3处理下燕麦花前干物质、氮素转运量和花后干物质、氮素积累量均增加,增幅分别为 $21.83\%\sim 37.79\%$ 、 $23.59\%\sim 30.19\%$ 、 $7.58\%\sim 12.35\%$ 、 $8.48\%\sim 11.54\%$ 。因此,在总施氮量 $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 条件下,采用1/3基施+1/3分蘖期+1/3拔节期追肥处理可有效协调燕麦氮素积累与转运,提高籽粒产量。

关键词:氮肥后移;籽粒产量;干物质积累转运;氮素积累转运

中图分类号:S512.6;S311

文献标识码:A

文章编号:1009-1041(2025)10-1403-09

Effect of Postponing Nitrogen Application on Grain Yield and Nitrogen Accumulation and Translocation in Oats

LIU Kexin¹, ZHANG Yu¹, ZHAO Baoping¹, WANG Xiquan¹, WU Junying², MI Junzhen¹

(1. College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China;

2. Vocational and Technical College, Inner Mongolia Agricultural University, Baotou, Inner Mongolia 014000, China)

Abstract: To investigate the effects of different postponing nitrogen application treatments on oat grain yield and nitrogen accumulation and translocation, a randomized block design was adopted using two oat varieties Bayou 1 and Dingyou 8 as the experimental materials. Field trial were conducted in 2021 and 2022, and four nitrogen application treatments were set up under a total nitrogen rate of $100\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$: all basal application(CK), 1/2 basal application + 1/2 tillering stage fertiliser(N1), 1/2 basal application + 1/2 jointing stage fertiliser(N2), 1/3 basal application + 1/3 tillering stage fertiliser + 1/3 jointing stage fertiliser(N3). The effects of different postponing nitrogen application treatments on yield of oats, dry matter accumulation and translocation in each organ, and nitrogen accumulation and translocation in each organ were determined and analysed. The results indicated that different postponing nitrogen application treatments had an extremely significant impact on oat yield. Compared with CK, the yield of both Bayou 1 and Dingyou 8 significantly increased in N3 treatment, with an average increase rate of $7.96\% - 8.82\%$ over the two years. However, the yield of oats were reduced by $9.64\% - 4.50\%$ and $4.12\% - 6.59\%$ in N1 and N2 treatments respectively, N3 treatment enhanced the pre-anthesis dry matter and nitrogen translocation, post-anthesis dry matter, and nitro-

gen accumulation, with the increase rate of 21.83%–37.79%, 23.59%–30.19%, 7.58%–12.35%, and 8.48%–11.54%, respectively. Therefore, under a total nitrogen rate of 100 kg · hm⁻², applying 1/3 basal application + 1/3 tillering stage fertiliser + 1/3 jointing stage fertiliser better coordinated the nitrogen accumulation and transport of oats, and improved the yield.

Keywords: Postponing nitrogen application; Grain yield; Dry matter accumulation and translocation; Nitrogen accumulation and translocation

燕麦是禾本科燕麦属的一年生草本植物,是中国高寒地区适宜种植的重要粮食作物之一^[1-3]。在生产实践中,合理施用氮肥并提升氮肥利用效率是提高燕麦产量和品质的重要途径之一^[4-5]。氮肥后移是优化作物群体结构、调控生长发育,实现作物增产的重要调控措施。燕麦在各个生育阶段对氮素需求不同,整体呈“少-多-少”的变化趋势。在分蘖期,燕麦生长缓慢,对氮素的需求较少;拔节期生长速度加快,穗部开始发育,氮素需求显著增多;抽穗期后,燕麦对氮素的需求量再次减少^[6-8]。适当增加氮肥追施比例对燕麦干物质积累、氮素吸收分配及产量均具有显著影响^[9-10]。研究发现,在相同施氮量下,在播种期和拔节期施氮可显著提升燕麦地上部各个器官的氮含量,促进光合产物的积累与转运,从而提高产量^[11-12]。韩雪^[13]研究发现,在宽幅增密种植模式下,孕穗期追施氮肥是较优施肥模式。玉米生产中,生育后期氮肥供应不足会引起叶片早衰,减少光合产物,进而导致减产^[10]。

因此,本研究在前期确定的 100 kg · hm⁻² 总施氮量条件下^[14-15],将传统一次性基肥氮移至不同时期分次追施(分蘖期追施、拔节期追施、分蘖期+拔节期追施),分析不同氮肥后移处理对燕麦产量、各器官干物质和氮素积累转运的影响,以期为提高燕麦氮肥利用效率、降低氮素损失提供理论依据。

1 材料与与方法

1.1 试验地概况

本研究于 2021 和 2022 年在内蒙古自治区包头市土默特右旗沟门镇内蒙古农业大学现代农业博览园试验地(110°33.3'E,40°29.5'N)进行。该地属温带大陆性季风气候区,光照资源丰富,年日照时数较长,无霜期 132~150 d,2021 和 2022 年气温与降水量变化见图 1。试验地主要为沙壤土,2021 和 2022 年 0~20 cm 耕层土壤有机质含

量分别为 28.6 和 25.4 g · kg⁻¹,碱解氮含量分别为 133 和 141 mg · kg⁻¹,有效磷含量分别为 6.0 和 9.6 mg · kg⁻¹,速效钾含量分别为 83 和 85 mg · kg⁻¹,pH 值分别为 7.47 和 7.28。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,以燕麦品种坝菽 1 号、定菽 8 号为材料,在总施氮量 100 kg · hm⁻² 条件下,设置全部基肥(CK)、1/2 基肥+1/2 分蘖期追肥(N1)、1/2 基肥+1/2 拔节期追肥(N2)、1/3 基肥+1/3 分蘖期追施+1/3 拔节期追肥(N3)4 个氮肥处理,各处理重复 3 次,小区面积 16 m²,小区间隔 1 m。各处理的磷、钾肥均作为基肥一次性施入,且施用量一致,分别为 Ca(H₂PO₄)₂ 345 kg · hm⁻² 和 K₂SO₄ 82.5 kg · hm⁻²。在燕麦播种后根据各生育时期田间实际情况进行滴灌。燕麦于 2021 年 4 月 8 日和 2022 年 4 月 19 日人工条播,2021 年 7 月 20 日和 2022 年 7 月 11 日收获,播种量为 150 kg · hm⁻²,行距为 25 cm。

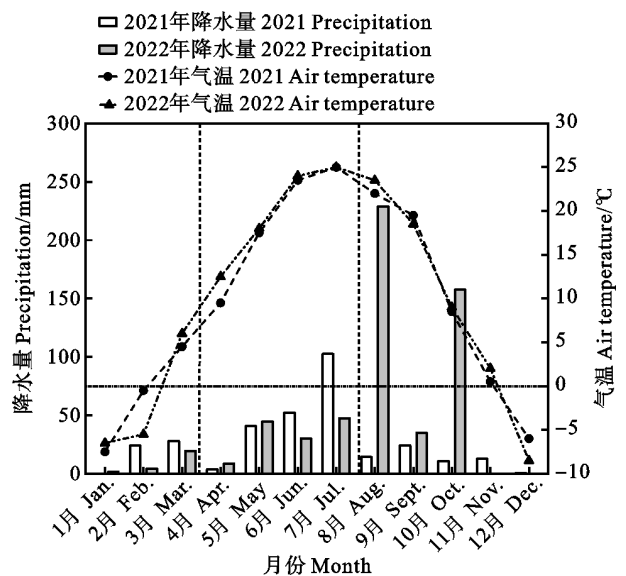


图 1 2021—2022 年试验地气温和降水量变化
Fig. 1 Variations of air temperature and precipitation in 2021–2022 experimental plot

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株各器官干物质和氮含量积累与转运测定

在燕麦开花期和成熟期分别在每小区随机选取 10 株长势均匀一致的植株,按照茎、叶、穗器官分样,于 105 ℃ 杀青 30 min,再于 80 ℃ 下烘干至恒重后称重,计算干物质积累与转运。将烘干样品粉碎后用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮,采用凯氏定氮法测定氮含量。

1.3.2 产量及其构成因素测定

燕麦成熟期在田间每小区随机选取 3 m² 测定燕麦产量、穗数、地上部生物量。同时每小区取 20 株室内考种,测定穗粒数、千粒重,并计算收获指数。

1.3.3 相关指标计算公式

花前干物质转运量 = 开花期植株干重 - 成熟期营养器官干重

花前干物质转运效率 = 花前干物质转运量 / 开花期植株干重 × 100%

花前干物质转运量对籽粒产量贡献率 = 花前干物质转运量 / 成熟期籽粒干重 × 100%

花后干物质积累量 = 成熟期植株干重 - 开花期植株干重

花后干物质积累量对籽粒产量贡献率 = 花后干物质积累量 / 成熟期籽粒干重 × 100%

花前氮素转运量 = 开花期植株氮素积累量 - 成熟期营养器官氮素积累量

花前氮素转运效率 = 花前氮素转运量 / 开花期植株氮素积累量 × 100%

花前氮素对籽粒氮贡献率 = 花前氮素转运量 / 成熟期籽粒氮素积累量 × 100%

花后氮素积累量 = 成熟期植株氮素积累量 - 开花期植株氮素积累量

花后氮素对籽粒氮贡献率 = 花后氮素积累量 / 成熟期籽粒氮素积累量 × 100%

收获指数 = 籽粒产量 / 地上部生物量。

1.4 统计分析

采用 Excel 2019 进行数据整理,用 SPSS 27.0、Origin 2024 进行统计分析和制图。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥处理对燕麦产量及其构成因素的影响

品种和氮肥均极显著影响坝菝 1 号、定菝 8

号的产量及其构成因素(表 1)。随氮肥后移比例的增加,坝菝 1 号、定菝 8 号两年的产量、穗粒数、千粒重及收获指数均呈先降后升趋势,且均在 N3 处理下表现最优;两年的穗数均在 N1、N3 处理间差异不显著,但 N1 处理显著高于 CK、N2 处理。与 CK、N1、N2 处理相比,坝菝 1 号、定菝 8 号两年产量均值在 N3 处理下增幅分别为 8.82%~17.63%和 7.96%~21.42%。与 CK、N2、N3 处理相比,坝菝 1 号和定菝 8 号穗数两年均值在 N1 处理下增幅分别为 0.98%~6.00%和 1.20%~12.77%。坝菝 1 号穗数、穗粒数、千粒重、产量及收获指数两年均值较定菝 8 号分别高 7.54%、40.05%、14.26%、18.59%和 11.82%。

2.2 不同氮肥处理对燕麦各器官干物质积累转运的影响

品种和氮肥显著或极显著影响两个燕麦品种开花期和成熟期(除 2021 年叶外)各器官干物质质量(图 2)。随氮肥后移比例的增加,两年中坝菝 1 号、定菝 8 号开花期和成熟期的单株干物质质量均表现为先降后升趋势,且均在 N1 处理下最低、N3 处理下最高。与 CK、N1、N2 处理相比,坝菝 1 号开花期和成熟期单株干物质质量在 N3 处理下两年平均增幅分别为 12.60%~33.32%和 2.14%~25.40%,定菝 8 号增幅分别为 12.27%~26.84%和 5.10%~16.91%。坝菝 1 号开花期和成熟期单株干物质质量两年平均较定菝 8 号分别高 24.91%和 15.59%。

品种和氮肥显著或极显著影响两个燕麦品种花前和花后干物质转运量、转运效率、对籽粒产量贡献率(表 3)。随氮肥后移比例的增加,坝菝 1 号、定菝 8 号两年的花前干物质转运量和花后干物质积累量均呈先降后升趋势,且均在 N1 处理下最低、N3 处理下最高。与 CK、N1、N2 处理相比,坝菝 1 号花前干物质转运量和花后干物质积累量在 N3 处理下两年均值增幅分别为 19.07%~50.28%和 2.79%~24.45%,定菝 8 号增幅分别为 21.83%~42.99%和 1.60%~12.69%。坝菝 1 号的花前干物质转运量和花后干物质积累量两年平均较定菝 8 号高 38.18%和 10.61%。不同氮肥处理下坝菝 1 号、定菝 8 号的花前干物质转运量对籽粒产量贡献率均低于花后干物质积累量对籽粒产量的贡献率。

表 1 不同处理下燕麦产量及其构成因素

Table 1 Yield and its components of oat under different treatments

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	穗数 Spike number/ ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Yield/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	收获指数 Harvest index	
2021	坝菽 1 号 Bayou 1	CK	413.23 \pm 5.99b	77.17 \pm 3.46ab	20.40 \pm 1.37b	2 223.56 \pm 36.94b	0.31 \pm 0.01b	
		N1	429.52 \pm 7.12a	65.67 \pm 3.51c	15.90 \pm 0.30d	1 985.88 \pm 55.36c	0.25 \pm 0.02cd	
		N2	402.93 \pm 3.55b	75.67 \pm 4.16b	19.44 \pm 1.01b	2 195.43 \pm 25.59b	0.30 \pm 0.03b	
		N3	428.08 \pm 5.11a	83.33 \pm 4.04a	22.03 \pm 0.45a	2 415.56 \pm 28.36a	0.38 \pm 0.02a	
	定菽 8 号 Dingyou 8	CK	367.23 \pm 5.04c	43.27 \pm 2.52e	17.47 \pm 0.50c	1 848.70 \pm 122.11d	0.27 \pm 0.02c	
		N1	411.31 \pm 6.94b	34.33 \pm 3.21f	13.17 \pm 0.25e	1 676.00 \pm 55.54e	0.23 \pm 0.01d	
		N2	357.96 \pm 3.86c	46.33 \pm 4.51e	15.73 \pm 0.80d	1 709.32 \pm 100.88e	0.28 \pm 0.02bc	
		N3	408.10 \pm 8.36b	56.00 \pm 4.58d	19.60 \pm 0.26b	2 054.43 \pm 23.90c	0.31 \pm 0.02b	
	F 值 F value	V		176.43**	384.49**	98.87**	203.30**	23.59**
		N		67.75**	26.81**	79.42**	40.03**	30.73**
V \times N			9.85**	0.82	0.85	1.91	1.48	
2022	坝菽 1 号 Bayou 1	CK	397.90 \pm 6.92bc	73.73 \pm 3.66a	18.00 \pm 0.44b	2 073.15 \pm 79.67b	0.31 \pm 0.01b	
		N1	421.39 \pm 6.91a	58.33 \pm 2.52b	14.67 \pm 0.47d	1 894.88 \pm 26.99c	0.23 \pm 0.01d	
		N2	396.89 \pm 8.83c	73.00 \pm 4.58a	17.25 \pm 0.35b	1 928.35 \pm 71.55c	0.30 \pm 0.01b	
		N3	414.53 \pm 5.05ab	79.00 \pm 5.57a	19.32 \pm 0.67a	2 295.86 \pm 74.39a	0.34 \pm 0.02a	
	定菽 8 号 Dingyou 8	CK	361.67 \pm 6.67d	40.30 \pm 1.40c	16.10 \pm 0.20c	1 724.01 \pm 84.42de	0.25 \pm 0.01cd	
		N1	404.31 \pm 8.48bc	33.33 \pm 4.16d	10.92 \pm 0.73e	1 384.79 \pm 61.03f	0.23 \pm 0.01d	
		N2	353.51 \pm 17.65d	44.00 \pm 4.00c	15.03 \pm 0.23d	1 626.78 \pm 43.28e	0.26 \pm 0.01c	
		N3	391.32 \pm 6.93c	53.67 \pm 4.04b	18.03 \pm 0.45b	1 832.08 \pm 48.33cd	0.31 \pm 0.02b	
	F 值 F value	V		63.91**	309.34**	139.67**	241.47**	40.25**
		N		23.32**	27.77**	164.18**	47.56**	54.59**
V \times N			2.55	1.51	7.31**	3.45*	4.48*	

同一年同列数据后不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。CK、N1、N2、N3 分别代表 N 肥全部基施、1/2 基施+1/2 分蘖期追肥、1/2 基施+1/2 拔节期追肥、1/3 基施+1/3 分蘖期追施+1/3 拔节期追施。V:品种;N:氮肥处理;V \times N:品种与氮肥互作, *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$ 。下同。

Different lowercase letters after data within the same columns and years indicate significant differences among different treatments at 0.05 level. CK, N1, N2, and N3 represent all basal application, 1/2 basal application + 1/2 tillering stage fertiliser, 1/2 basal application + 1/2 jointing stage fertiliser, and 1/3 basal application + 1/3 tillering stage fertiliser + 1/3 jointing stage fertiliser, respectively. V: Variety; N: Nitrogen fertiliser treatment; V \times N: Variety and nitrogen fertiliser treatment interactions, *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$. The same in tables 2 and 3.

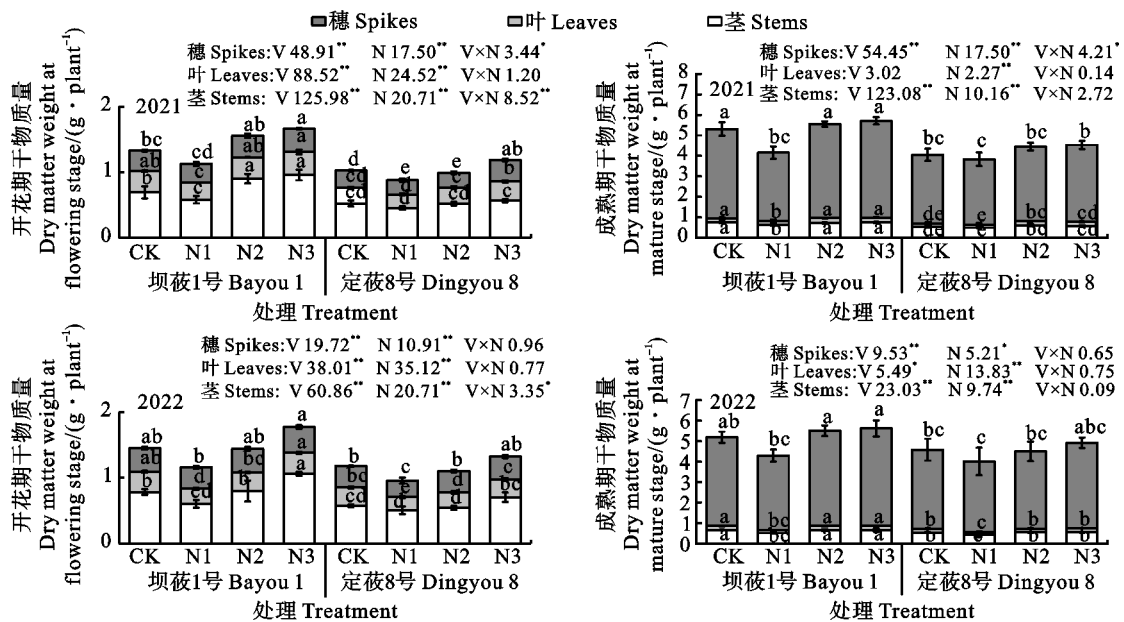


图 2 不同处理下燕麦开花期、成熟期各器官干物质质量

Fig. 2 Dry matter weight of oat organs at anthesis and maturity stages under different treatments

表 2 不同处理对燕麦花前、花后干物质积累与转运的影响

Table 2 Effects of different treatments on pre-anthesis and post-anthesis dry matter accumulation and translocation in oat

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	花前干物质 Pre-anthesis dry matter			花后干物质 Post-anthesis dry matter		
			转运量 Translocation amount/ (g · plant ⁻¹)	转运效率 Translocation rate/%	对籽粒产量贡献率 Contribution rate to grain yield/%	积累量 Accumulation amount/ (g · plant ⁻¹)	对籽粒产量贡献率 Contribution rate to grain yield/%	
2021	坝菽 1 号 Bayou 1	CK	0.45±0.04b	32.47±2.36bc	11.17±1.05b	3.61±0.06ab	88.83±1.05b	
		N1	0.35±0.03c	29.11±2.01bc	10.71±1.70b	2.98±0.32c	89.29±1.70b	
		N2	0.69±0.08a	41.41±2.56a	14.98±1.49a	3.90±0.08a	85.02±1.49c	
		N3	0.76±0.08a	43.22±2.47a	15.97±1.06a	3.97±0.10a	84.03±1.06c	
	定菽 8 号 Dingyou 8	CK	0.35±0.03c	34.34±1.89b	10.6±1.24b	2.99±0.30c	89.40±1.24b	
		N1	0.24±0.03d	27.53±4.65c	7.51±0.26c	2.96±0.30c	92.49±0.26a	
		N2	0.21±0.01d	20.88±2.49d	5.69±0.60c	3.43±0.19b	94.31±0.60a	
		N3	0.41±0.06bc	34.25±4.71b	10.83±1.25b	3.34±0.16bc	89.17±1.25b	
	F 值 F value	V		31.20**	12.31**	14.44**	14.38**	14.44**
			N	153.69**	33.73**	91.78**	24.41**	91.78**
			V×N	19.52**	15.53**	14.95**	2.68	14.95**
	2022	坝菽 1 号 Bayou 1	CK	0.59±0.06bc	40.28±2.71bcd	14.32±1.53bc	3.50±0.09abc	85.68±1.53cd
N1			0.48±0.03cd	42.47±1.19bc	13.20±1.06bcde	3.16±0.28c	86.80±1.06abcd	
N2			0.64±0.14b	42.55±4.63bc	13.81±2.26bcd	4.00±0.15ab	86.19±2.26bcd	
N3			0.91±0.08a	51.33±4.81a	17.99±1.90a	4.16±0.16a	82.01±1.90e	
定菽 8 号 Dingyou 8		CK	0.44±0.02d	37.40±1.85cd	11.57±1.64cde	3.41±0.53bc	88.43±1.64abc	
		N1	0.36±0.03d	37.56±3.15cd	10.58±1.14e	3.08±0.64c	89.42±1.14a	
		N2	0.40±0.04d	35.58±2.58d	10.79±2.18de	3.38±0.50bc	89.21±2.18ab	
		N3	0.63±0.06b	46.07±2.77ab	15.02±1.01b	3.58±0.16abc	84.98±1.01d	
F 值 F value		V		30.41**	13.21**	9.71**	4.54*	9.71**
			N	51.60**	14.86**	17.66**	5.15*	17.66**
			V×N	1.93	0.42	0.02	0.98	0.02

2.3 不同氮肥处理对燕麦各器官氮素积累转运的影响

氮肥对两个燕麦品种开花期、成熟期各器官氮含量的影响均达到极显著水平(图 3)。随氮肥后移比例的增加,坝菽 1 号、定菽 8 号开花期和成熟期各器官氮含量均表现为先降后升趋势,且均在 N1 处理下最低、N3 处理下最高。在燕麦开花期氮素主要集中在茎和叶中,穗部氮含量较低,而成熟期主要集中在穗部。与 CK、N1、N2 处理相比,在 N3 处理下坝菽 1 号开花期茎部氮含量两年均值分别增加 8.22%、17.70%和 9.76%,叶部氮含量分别增加 4.05%、18.2%和 11.10%;定菽 8 号茎部氮含量分别增加 12.60%、26.5%和 11.30%,叶部氮含量分别增加 1.81%、14.80%和 9.36%。成熟期坝菽 1 号在 N3 处理下穗部氮含量分别较 CK、N1 处理高 5.22%和 13.8%,定菽 8 号分别高 1.60%和 7.44%。

氮肥处理对两燕麦品种花前和花后氮素转运

量、转运效率、贡献率的影响均达到显著或极显著水平。坝菽 1 号、定菽 8 号两年的花前氮素转运量均在 N3 处理下最大,较 CK、N1、N2 处理增幅分别为 29.17%~48.94%和 23.59%~49.67%;花后氮素积累量在 N2 处理条件下最大,较 CK、N1、N2 处理增幅分别为 4.30%~35.68%和 4.96%~15.47%。坝菽 1 号的花前氮素转运量和花后氮素积累量两年均值较定菽 8 号分别高 19.46%和 19.24%。

3 讨论

3.1 氮肥后移下燕麦干物质积累转运的变化规律

较高的干物质积累是燕麦产量形成的基础,合理的施氮量和施氮时期可有效促进燕麦的干物质积累,有利于产量的形成。在燕麦生长初期植株相对较小,对氮肥需求量较低,因此在此阶段基肥施用过高会使土壤氮肥供应过于充足,植株无法完全吸收过多的氮素,导致氮肥流失^[16-17]。

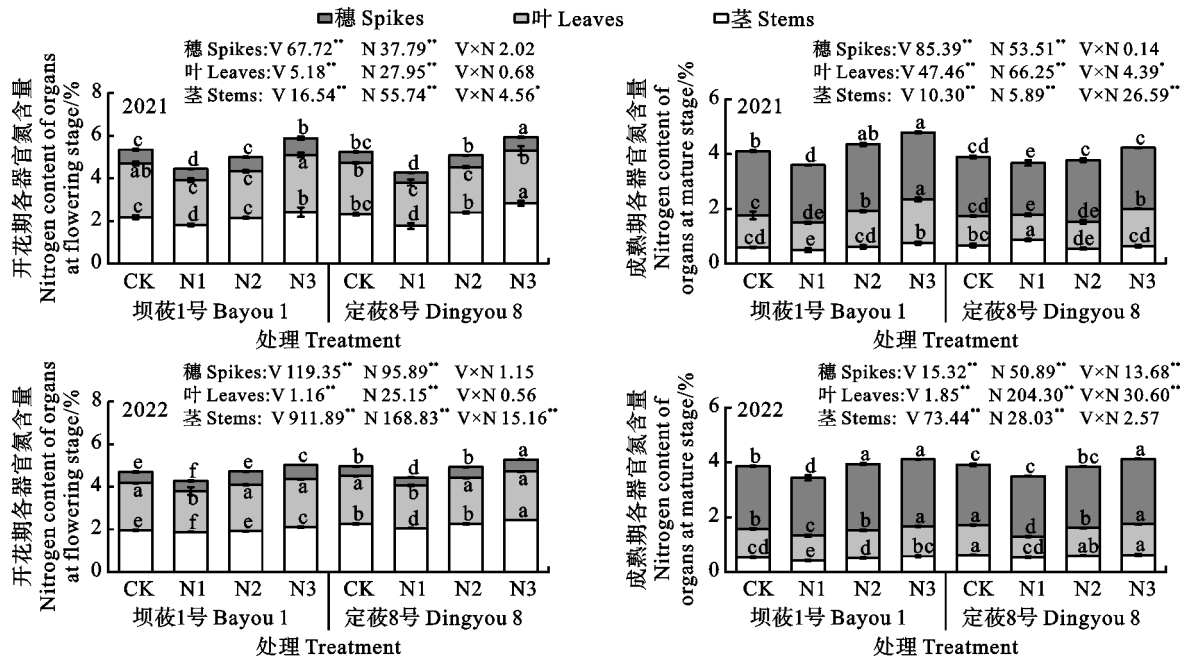


图 3 不同处理下燕麦开花期、成熟期各器官氮含量

Fig. 3 Nitrogen content in oat organs at the anthesis and maturity stages under different treatments

表 3 不同处理对燕麦花前、花后氮素积累转运的影响

Table 3 Effects of different treatments on pre-anthesis and post-anthesis nitrogen accumulation and translocation in oat

年份 Year	品种 Variety	处理 Treatment	花前氮素 Pre-anthesis nitrogen			花后氮素 Post-anthesis nitrogen	
			转运量 Translocation amount/ (g · plant ⁻¹)	转运效率 Translocation rate/%	贡献率 Contribution rate/%	积累量 Accumulation amount/ (g · plant ⁻¹)	贡献率 Contribution rate/%
2021	坝苽 1 号 Bayou 1	CK	17.55 ± 1.08b	69.33 ± 0.21bc	17.26 ± 2.57b	84.03 ± 11.16a	81.70 ± 3.65bc
		N1	12.60 ± 0.89c	71.47 ± 2.29bc	17.99 ± 1.02b	57.59 ± 5.67bc	82.01 ± 1.02b
		N2	18.18 ± 3.31b	70.05 ± 2.41bc	16.33 ± 3.39bc	93.56 ± 6.92a	83.67 ± 3.39ab
		N3	25.91 ± 1.35a	73.43 ± 1.92abc	22.43 ± 1.56a	89.70 ± 4.25a	77.57 ± 1.56c
	定苽 8 号 Dingyou 8	CK	13.84 ± 1.20c	68.54 ± 5.03c	19.31 ± 2.86ab	58.50 ± 8.54bc	80.69 ± 2.86bc
		N1	7.71 ± 1.29d	57.71 ± 3.17d	12.76 ± 2.42c	53.16 ± 8.25c	87.24 ± 2.42a
		N2	13.62 ± 0.67c	77.75 ± 2.30a	16.67 ± 0.31b	68.12 ± 3.75b	83.33 ± 0.31ab
		N3	18.85 ± 0.76b	74.35 ± 1.90ab	22.57 ± 0.50a	64.74 ± 4.40bc	77.43 ± 0.50c
F 值 F value	V	65.04 **	1.79	0.61	48.79 **	0.98	
	N	63.55 **	16.36 **	13.09 **	15.30 **	11.16 **	
	V × N	1.28	16.35 **	3.32 *	3.30 *	2.35	
2021	坝苽 1 号 Bayou 1	CK	20.07 ± 0.45b	83.55 ± 0.20abc	20.29 ± 1.17ab	79.10 ± 6.66ab	79.71 ± 1.17ab
		N1	14.93 ± 1.65cd	86.20 ± 1.82a	19.73 ± 4.66ab	62.15 ± 10.64b	80.27 ± 4.66ab
		N2	19.96 ± 3.00b	84.00 ± 1.66abc	17.66 ± 1.62b	92.64 ± 3.42a	82.34 ± 1.62a
		N3	27.92 ± 0.30a	87.00 ± 0.90a	24.08 ± 1.82a	88.50 ± 9.02a	75.92 ± 1.82b
	定苽 8 号 Dingyou 8	CK	17.05 ± 0.51c	82.26 ± 1.18bc	20.35 ± 2.89ab	67.68 ± 10.41b	79.65 ± 2.89ab
		N1	12.83 ± 1.45d	83.54 ± 3.54abc	17.1 ± 1.9b	63.06 ± 13.26b	82.90 ± 1.90a
		N2	15.43 ± 1.30cd	81.17 ± 1.52c	18.51 ± 3.79b	69.28 ± 11.57b	81.49 ± 3.79a
		N3	21.46 ± 2.11b	84.92 ± 2.10ab	21.58 ± 2.25ab	78.19 ± 6.14ab	78.42 ± 2.25ab
	F 值 F value	V	38.04 **	8.52 **	0.89	8.29 *	0.89
		N	47.01 **	4.50 *	3.77 *	5.92 **	3.77 *
		V × N	2.13	0.21	0.63	1.67	0.63

段连学等^[18]研究发现,将 75% 的氮肥采用分期施用显著提升燕麦成熟期地上部生物量。张晓娟等^[19]研究表明,氮肥后移处理下糜子的干物质积累量均显著高于氮肥前置和常规运筹处理。何杰等^[20]认为,在施氮量相同的情况下,分期施氮可以保证作物关键生育时期氮素供应,有效提高作物干物质积累。在本研究中,将一次性基施氮肥移至不同生育时期追施,随氮肥后移,燕麦开花期、成熟期单株干物质质量呈先降后增趋势,在分蘖期+拔节期同时追施氮肥处理下,燕麦单株干物质质量较一次性基施氮肥提高 7.37%~19.12%,这可能是分期施氮同时促进燕麦分蘖期和拔节期生长发育,有利于干物质的积累。但在分蘖期追施氮肥时,燕麦单株干物质质量比一次性基施氮肥低,这可能是由于分蘖期追肥使燕麦分蘖增多、群体密度变大,基础养分不够,导致单株干物质质量下降。分蘖期+拔节期追施氮肥显著提高燕麦花前干物质转运量和花后干物质积累量,该结果与代新俊等^[21]研究结果一致。

3.2 氮肥后移下燕麦氮素积累转运的变化规律

作物生长不同时期对氮素的响应不同,因此在制定氮肥施用策略时需要综合考虑多方面因素^[22-23]。马学琴等^[24]研究发现,氮肥后移对不同燕麦品种开花期和成熟期的植株总氮积累量以及籽粒氮积累量均影响显著。同时,氮肥后移较传统施肥能使氮素积累最大速率的持续天数延长,进而显著提高植株花后氮素积累量^[25-26]。孙旭东等^[27]报道,与基施相比,分次施氮提高了玉米花后氮素积累量、花后氮素同化量及成熟期玉米籽粒氮含量。高钰等^[28]提出,在同一施氮水平下,花期玉米茎秆和叶片氮含量随氮肥后移比例的增加而增加。本研究中,氮肥后移极显著影响燕麦开花期、成熟期各器官氮含量。在分蘖期+拔节期追施氮肥显著提高燕麦开花期、成熟期茎、叶、穗的氮含量。与一次性基施氮肥相比,分蘖期追施氮肥降低燕麦花前氮素转运量和花后氮素积累量,这可能是由于分蘖期追肥促进燕麦产生较多的无效分蘖,导致植株氮素积累量低。在分蘖期+拔节期追施氮肥显著提高燕麦花前氮素转运量和花后氮素积累量,同时增加燕麦花前氮素对籽粒氮素的贡献率,有利于提高燕麦花前营养器官中积累的氮素在生育后期向籽粒转运,促进成熟期氮素在籽粒中的积累,该结果与前人研究结果一致^[9]。

3.3 氮肥后移下燕麦籽粒产量的变化规律

作物产量除了受本身遗传特性的影响外,也与种植和施肥方式密切相关。氮肥一次性基施会使禾本科作物分蘖增多,出现更多无效分蘖,还会让作物徒长,增加倒伏和染病生虫的风险,减少光合产物向籽粒的转运^[29-30],同时导致作物前期氮素积累过多,抑制作物后期氮素吸收转运,不利于籽粒灌浆,导致产量降低,因此采用适当的氮肥后移措施,可保证土壤有效氮素的持续供应^[31-32]。研究发现,燕麦能够有效地调整氮素在植株内的分配,确保穗部有足够的氮素供应以满足籽粒发育的需求^[33]。郝代成等^[34]发现,氮肥基施:拔节期追施比例为 5:5 时,冬小麦穗粒数显著增加,粒重提高,进而实现超高产。在高产水平下,调整氮肥基追比例能通过显著增加小麦穗粒数、粒重获得高产^[35-36]。在本研究中,氮肥后移显著影响燕麦籽粒产量及其构成因素。与一次性基施氮肥相比,在分蘖期+拔节期追施氮肥条件下燕麦穗数、穗粒数、千粒重和收获指数均显著增加,籽粒产量提高 7.96%~8.82%。

4 结论

在施氮总量一定的条件下,氮肥后移显著影响燕麦花前和花后干物质积累与转运、氮素积累与转运、籽粒产量及其构成因素。坝苻 1 号、定苻 8 号均在 N3 处理下籽粒产量及开花期和成熟期各器官干物质质量和氮含量最高。因此,在施氮总量为 100 kg·hm⁻² 时,1/3 基施+1/3 分蘖期追施+1/3 拔节期追施氮肥为最优施氮模式,能较好地协调籽粒产量与氮素积累转运之间的关系。

参考文献:

- [1]郭婷,薛彪,周艳明,等.我国牧草产品生产、贸易现状及启示[J].草地学报,2019,27(1):8.
GUO T, XUE B, ZHOU Y M, et al. Current status and enlightenment of production and trade of forage product in China [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(1): 8.
- [2]王运涛,杨志敏,刘建成,等.冀西北地区 21 个燕麦品种生产性能与营养品质综合评价[J].草地学报,2020,28(5):1311.
WANG Y T, YANG Z M, LIU J C, et al. Comprehensive evaluation of production performance and nutritional quality of 21 oat varieties in northwest of Hebei Province [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(5): 1311.
- [3]JOKINEN I, PIHLAVA J M, PUGANEN A, et al. Predicting the properties of industrially produced oat flours by the characteristics of native oat grains or non-heat-treated groats [J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1552.

- [4] FRANCIS B, ARAVINDAKUMAR C T, BREWER P B, *et al.* Plant nutrient stress adaptation; A prospect for fertilizer limited agriculture [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2023, 213:105431.
- [5] PANASIEWICZ K. Response of three oat forms to sprinkling irrigation and nitrogen fertilization [J]. *Turkish Journal of Field Crops*, 2017; 81.
- [6] 巨晓棠, 张福锁. 氮肥利用率的要义及其提高的技术措施[J]. 科技导报, 2003, 21(4): 51.
JU X T, ZHANG F S. Correct understanding of nitrogen recovery rate [J]. *Science & Technology Review*, 2003, 21(4): 51.
- [7] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 192.
JU X T, ZHANG F S. Thinking about nitrogen recovery rate [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2003, 12(2): 192.
- [8] FINNAN J, BURKE B, SPINK J. The effect of nitrogen timing and rate on radiation interception, grain yield and grain quality in autumn sown oats [J]. *Field Crops Research*, 2019, 231: 130.
- [9] 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.
- [10] 李青军, 张炎, 胡伟, 等. 氮素运筹对玉米干物质积累、氮素吸收分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 755.
LI Q J, ZHANG Y, HU W, *et al.* Effects of nitrogen management on maize dry matter accumulation, nitrogen uptake and distribution and maize yield [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 755.
- [11] 段连学. 减量分期施氮对青海甜燕麦产量和氮肥利用效率的影响 [D]. 西宁: 青海大学, 2022.
DUAN L X. Effects of reduced and staged nitrogen application yield and nitrogen use efficiency of *Avena sativa* L. cv. Qinghai [D]. Xining: Qinghai University, 2022.
- [12] 焦瑞东. 施氮量对裸燕麦不同品种产量和品质影响的研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2004.
JIAO R Z. Effects of nitrogen application on the yield and quality of different variety naked oat [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2004.
- [13] 韩雪, 王英, 赵鑫瑶, 等. 氮肥对宽幅增密燕麦氮平衡指数、光合特性及产量的影响[J]. 北方农业学报, 2024, 52(1): 64.
HAN X, WANG Y, ZHAO X Y, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer on nitrogen balance index, photosynthetic characteristics and yield of wide-range densely planted oats [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2024, 52(1): 64.
- [14] 张宇, 赵宝平, 柳妍娣, 等. 施氮量对裸燕麦源库生理特性和茎鞘 NSC 积累与转运的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(2): 206.
ZHANG Y, ZHAO B P, LIU Y D, *et al.* Effects of nitrogen application rate on physiological characteristics of source-sink and NSC accumulation and transport in stem and sheath of hulless oat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2024, 44(2): 206.
- [15] 张宇, 赵宝平, 柳妍娣, 等. 氮肥对不同类型裸燕麦品种碳氮代谢的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(2): 40.
ZHANG Y, ZHAO B P, LIU Y D, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on carbon and nitrogen metabolism of different naked oat cultivars [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2025, 53(2): 40.
- [16] 宋建超, 鱼小军, 魏孔涛, 等. 施氮对高寒区垂穗披碱草饲草生产性能及营养品质的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(7): 1555.
SONG J C, YU X J, WEI K T, *et al.* Effects of nitrogen application on production performance and nutritional quality of *Elymus nutans* in alpine region [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(7): 1555.
- [17] 马雪琴, 赵桂琴, 龚建军. 高寒牧区播期和施氮对不同燕麦品种氮素利用的作用[J]. 草业科学, 2008, 25(5): 36.
MA X Q, ZHAO G Q, GONG J J. Effect of sowing date and N-fertilizer on nitrogen absorption and utilization of different oat varieties in alpine grassland area [J]. *Pratacultural Science*, 2008, 25(5): 36.
- [18] 段连学, 马祥, 琚泽亮, 等. 高寒地区氮肥减量分期施用对燕麦生物量及氮肥利用率的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(10): 3185.
DUAN L X, MA X, JU Z L, *et al.* Impact of reduced and split nitrogen fertilization on oat biomass and nitrogen use efficiency in alpine regions [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(10): 3185.
- [19] 张晓娟, 王湛, 杨军学, 等. 氮肥运筹对旱地糜子籽粒产量及氮素吸收的影响[J]. 华北农学报, 2023, 38(S1): 271.
ZHANG X J, WANG Z, YANG J X, *et al.* Effects of nitrogen management on grain yield and nitrogen uptake of proso millet in dryland [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(S1): 271.
- [20] 何杰, 李冰, 王昌全, 等. 不同控释氮肥比率对土壤无机氮、微生物及小麦生长的影响[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(3): 349.
HE J, LI B, WANG C Q, *et al.* Effect of different controlled release nitrogen fertilizer rate on soil inorganic nitrogen, microorganism and wheat growth [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(3): 349.
- [21] 代新俊, 夏清, 杨珍平, 等. 氮肥后移对强筋小麦氮素积累转运及籽粒产量与品质的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(3): 289.
DAI X J, XIA Q, YANG Z P, *et al.* Effects of postponing nitrogen application on accumulation and transport of nitrogen and yield and quality of grain in strong-gluten wheat [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(3): 289.

- [22] EISA M, RAGAUSKAITE D, ADHIKARI S, *et al.* Role and responsibility of sustainable chemistry and engineering in providing safe and sufficient nitrogen fertilizer supply at turbulent times [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(28): 8997-9001.
- [23] FAROOQ M S, WANG X K, UZAIR M, *et al.* Recent trends in nitrogen cycle and eco-efficient nitrogen management strategies in aerobic rice system [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 960641.
- [24] 马雪琴. 高寒牧区播期和氮肥对燕麦产量及其构成和氮素吸收利用与分配的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2007.
MA X Q. Effects of sowing date and N application on yield and its components, N uptake and allocation in oats in alpine region [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2007.
- [25] 吕鹏, 张吉旺, 刘伟, 等. 施氮时期对高产夏玉米氮代谢关键酶活性及抗氧化特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1591.
LÜ P, ZHANG J W, LIU W, *et al.* Effects of nitrogen application period on the nitrogen metabolism key enzymes activities and antioxidant characteristics of high-yielding summer maize [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1591.
- [26] 张经廷, 刘云鹏, 李旭辉, 等. 夏玉米各器官氮素积累与分配动态及其对氮肥的响应 [J]. *作物学报*, 2013, 39(3): 506.
ZHANG J T, LIU Y P, LI X H, *et al.* Dynamic responses of nitrogen accumulation and remobilization in summer maize organs to nitrogen fertilizer [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2013, 39(3): 506.
- [27] 孙旭东, 孙浒, 董树亭, 等. 包膜尿素施用时期对夏玉米产量和氮素积累特性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2017, 50(11): 2179.
SUN X D, SUN X, DONG S T, *et al.* Effect of coated-urea application times on yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(11): 2179.
- [28] 高钰, 闫耀廷, 赵刚, 等. 氮肥运筹对黄土高原春玉米产量形成和氮代谢的调控效应 [J]. *中国土壤与肥料*, 2023(6): 186.
GAO Y, YAN Y T, ZHAO G, *et al.* Regulation effects of nitrogen fertilizer management on grain yield formation and nitrogen transportation of spring maize in the Loess Plateau, China [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2023(6): 186.
- [29] 王乐, 张玉霞, 于华荣, 等. 氮肥对沙地燕麦生长特性及产量的影响 [J]. *草业科学*, 2017, 34(7): 1516.
WANG L, ZHANG Y X, YU H R, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer application on growth characteristics and yield of oats in sandy soil [J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(7): 1516.
- [30] 马迎辉, 王玲敏, 黄玉芳, 等. 氮肥运筹对冬小麦干物质累积、产量及氮素吸收利用的影响 [J]. *华北农学报*, 2013, 28(1): 187.
MA Y H, WANG L M, HUANG Y F, *et al.* Effect of nitrogen application on dry matter accumulation, yield and nitrogen utilization efficiency of winter wheat [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(1): 187.
- [31] 张振华, 宋海星, 刘强, 等. 油菜生育期氮素的吸收、分配及转运特性 [J]. *作物学报*, 2010, 36(2): 321.
ZHANG Z H, SONG H X, LIU Q, *et al.* Absorption, distribution, and translocation of nitrogen at growth stages in oilseed rape plant [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(2): 321.
- [32] 杨睿, 伍晓明, 安蓉, 等. 不同基因型油菜氮素利用效率的差异及其与农艺性状和氮营养性状的关系 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(3): 586.
YANG R, WU X M, AN R, *et al.* Differences of nitrogen use efficiency of rapeseed (*Brassica napus* L.) genotypes and their relations to agronomic and nitrogen characteristics [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(3): 586.
- [33] 许国芬. 氮钾肥对青引 1 号燕麦产量、品质与养分吸收的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2009.
XU G F. Effects of N and K fertilizer on yield, quality and nutrients absorption of oat [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2009.
- [34] 郝代成, 高国华, 朱云集, 等. 施氮量对超高产冬小麦花后光合特性及产量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(2): 346.
HAO D C, GAO G H, ZHU Y J, *et al.* Effects of nitrogen application rate on photosynthesis characteristics after anthesis and high grain yield of winter wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(2): 346.
- [35] 田纪春, 陈建省, 王延训, 等. 氮素追肥后移对小麦籽粒产量和旗叶光合特性的影响 [J]. *中国农业科学*, 2001, 34(1): 101.
TIAN J C, CHEN J S, WANG Y X, *et al.* Effects of delayed-nitrogen application on grain yield and photosynthetic characteristics in flag leaves of wheat cultivars [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(1): 101.
- [36] 姜丽娜, 郑冬云, 王言景, 等. 氮肥施用时期及基追比对豫中地区小麦叶片生理及产量的影响 [J]. *麦类作物学报*, 2010, 30(1): 149.
JIANG L N, ZHENG D Y, WANG Y J, *et al.* Effects of application time and basal/topdressing ratio of nitrogen fertilizer on leaf physiology and grain yield of wheat in central Henan [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1): 149.