

不同施氮量对饲用燕麦光合特性及氮素光合利用效率的影响

郑敏娜 梁秀芝 康佳惠 李荫藩 王 慧 韩志顺 陈燕妮

(山西农业大学高寒区作物研究所, 037008, 山西大同)

摘 要 为探明不同施氮量下饲用燕麦在晋北地区光合特性及氮素光合利用效率的差异,以4个国内外具有代表性的饲用燕麦品种为试验材料,研究其生物产量、光合特性及氮素光合利用效率的变化特点。结果表明,4个参试品种的干草产量均随着施氮量的增加呈递增趋势,均在施氮量 180kg/hm² 时最高;随着施氮量的增加,各品种净光合速率和氮素光合利用效率呈持续增加的趋势。综合各项指标可知,晋北地区蒙燕1号、甜燕麦、KONA和坝燕7号4个燕麦品种生产时,田间施氮量可控制在 180kg/hm² 水平。

关键词 饲用燕麦; 施氮量; 干草产量; 光合特性; 氮素光合利用效率

饲用燕麦 (*Avena sativa* L.) 广泛分布于欧洲和亚洲的温带地区,起源于地中海红燕麦及其祖先野红燕麦^[1],是牧区和农牧交错区广泛种植的一年生草料兼用作物,具有适应性强、营养价值高、耐贫瘠和可粗放管理等特点,利用方式多样,以青(干)草、青贮和籽实等方式可被家畜利用^[2]。自2016年以来,我国在草牧业发展中提出要扩大燕麦草等优质牧草的种植面积,这为饲用燕麦的快速发展提供了良好的机遇。然而,由于我国生态环境复杂多样,饲用燕麦生长期间的温度、光照和肥料供给等会对其产量和品质产生非常大的影响,因此,有必要了解各饲用燕麦在不同环境条件下的生长发育特点,尽可能提供适宜的光、温和肥等条件,使其生物产量达到最大。

氮素对植物的生长发育起着重要作用,是较容易控制的环境因子,也是作物增产增收的主要田间管理措施。饲用燕麦在产量形成过程中,要协调个体与群体发育的关系,最大限度地利用土壤肥力和光能,促进燕麦生长发育,提高燕麦物质生产和积累量。燕麦产量形成也是株高、分蘖数和叶量相互协调的复杂过程。燕麦喜氮,施肥对燕麦的干物质积累量影响很大,研究^[3]表明增施氮肥不但可以提高草产量,还能改善饲草品质。此外,氮素是构成植物体蛋白质和叶绿素的主要元素,可通过促进叶片生长和提高光合作用效率来影响饲草燕麦干物质的生产和积累^[4]。Fang等^[5]发现叶片的光合作用能力与氮肥有着显著的正相

关关系,而旗叶在植株上停留时间长也对谷物产量有重要贡献^[6]。叶绿素含量的高低直接决定植物光合能力的强弱,适当增加氮肥有利于提高光系统II的电子传递能力,提高生育后期光系统的最大光化学效率^[7],而缺氮会导致叶绿素含量减少,使植物叶片光合电子向光化学方向的传递速率降低^[8-10]。综上所述,其他禾本科谷类作物种间光合特性和氮肥光合利用效率差异的研究为本研究分析不同饲用燕麦品种间光合速率和氮肥光合利用效率差异奠定了理论基础。

本研究选取国内外具有一定生产潜力的4个饲用燕麦品种,在山西省朔州市毛家皂镇开展不同施氮量处理下品种间氮素光合利用效率差异机理的研究,测定其光合特性和生产性能,筛选适宜晋北农牧交错区域的优良饲用燕麦品种,为建立饲用燕麦高效生产体系提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于山西省朔州市毛家皂镇(112°34'~114°34'E, 39°03'~40°44'N),该地海拔 1010m,属大陆性季风气候,农业区划为中温带干旱区。试验基地土壤类型为轻壤偏沙,土壤有机质 14.71g/kg,全氮 0.831g/kg,有效磷 5.88mg/kg, pH 8.48。

1.2 试验材料

选取4个饲用燕麦品种为试验材料,种子为2019年收获,品种名称、来源及种子发芽率见表1。

作者简介:郑敏娜,主要从事燕麦栽培与育种研究, E-mail: zhengminna@126.com

基金项目:山西省牧草产业技术体系(2022年);国家燕麦荞麦产业技术体系大同综合试验站项目(CARS-07-G-2)

收稿日期:2022-02-12;修回日期:2022-06-15;网络出版日期:2022-07-01

表 1 参试饲用燕麦品种来源及发芽率
Table 1 Sources and germination percentages
of oat varieties in the experiment

编号 Number	品种 Variety	来源 Source	发芽率 Germination percentage (%)
1	蒙燕 1 号	内蒙古自治区农牧业科学院	98.5
2	甜燕麦	西藏海北农牧研究院	99.2
3	KONA	中国农业大学	98.9
4	坝燕 7 号	河北省高寒作物研究所	99.0

1.3 试验设计

试验采用裂区设计, 施氮量为主区, 设置 0 (N_0)、90 (N_1) 和 180 kg/hm² (N_2) 3 个施氮水平, 其中 N_0 为对照, 氮肥为尿素 (N 46%), 按照基肥: 拔节肥=6:4 施入; 品种为副区。于 2020 年 3 月 25 日播种, 小区面积 10 m² (2 m×5 m), 小区间隔 0.5 m, 3 次重复, 共计 36 个小区。除氮肥外, 磷钾肥作基肥一次性施入, 各小区磷肥和钾肥施用量均为 100 kg/hm²。播前精细整地, 人工开沟条播, 小区播种量均为 180 kg/hm², 行距约 25 cm, 播种深度为 3~6 cm。试验期间各小区管理措施一致, 小区四周设保护行, 播前灌溉 1 次, 生育期内不定期除草。于乳熟期进行取样并测产。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 光合特性相关指标 于乳熟期进行株高、产量和光合特性指标的测定^[1]。选取第 2 片旗叶测定相对叶绿素含量^[3] (relative chlorophyll content, RCC); 选取长势一致的燕麦旗叶中部, 在晴朗无风的天气于 9:00~10:30 采用 Li-6400(xt) 型便携式光合测定仪测定 4 个品种叶片的净光合速率 (net photosynthetic rate, P_n)、蒸腾速率 (transpiration rate, T_r)、气孔导度 (stomatal conductance, G_s) 和胞间 CO₂ 浓度 (intercellular CO₂ concentration, C_i) 等指标, 测定时光照强度 500~700 μmol/(m²·s), CO₂ 浓度 300~380 μmol/(m²·s), 每个处理测定 3 株, 每个叶片重复记录 5 组数据, 然后计算平均值。同时利用 YMJ-A 叶面积仪测定燕麦叶片叶面积指数 (leaf area index, LAI)。

1.4.2 氮素利用相关指标 植株叶片于 80℃ 烘干至恒重后称量干物质重, 并利用 Foss-8400 型全自动凯氏定氮仪测定叶片氮含量, 并按照公式计算单位叶片氮含量 (nitrogen content in unit leaf, N_a)、比叶重和氮素光合利用效率 (nitrogen photosynthetic utilization efficiency, PNUE), 计算公式如下: 比叶重 (t/hm²) = 干物质重 (t/hm²) / 叶面积指数;

氮素光合利用效率 [10 μmol/(g·s)] = 净光合速率 [μmol/(m²·s)] / 单位面积叶片氮含量 (kg/hm²)。

1.5 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 和 IBM SPSS Statistics 20.0 软件进行数据处理及统计分析, 用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同施氮量对饲用燕麦生物产量的影响

随着施氮量的增加, 4 个饲用燕麦的株高均呈递增趋势 (表 2), 且在 N_2 处理水平达到最大值。除了坝燕 7 号, 其他 3 个品种的 N_1 、 N_2 与 N_0 (对照) 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。方差分析结果表明, 施氮量和品种互作对饲用燕麦株高无显著影响。

表 2 施氮量对饲用燕麦株高和干草产量的影响
Table 2 Effects of nitrogen administration
on plant height and hay yield of fed oats

品种 Variety	处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	干草产量 Hay yield (kg/hm ²)
蒙燕 1 号 Mengyan No.1	N_0	90.66±8.88b	7015.23±123.61b
	N_1	102.82±9.35a	8319.16±222.32ab
	N_2	103.56±9.02a	8612.36±236.12a
	平均值	99.01	7982.25
KONA	N_0	80.36±5.36b	6023.45±99.64b
	N_1	90.10±6.33a	7051.86±102.45a
	N_2	94.56±9.01a	7836.15±136.42a
	平均值	88.34	6970.49
甜燕麦 Sweet oat	N_0	102.36±7.86b	7964.25±262.45b
	N_1	117.11±10.36a	8896.86±239.66ab
	N_2	118.12±11.22a	9945.37±258.41a
	平均值	112.53	9213.49
坝燕 7 号 Bayan No.7	N_0	82.16±4.78b	6627.19±194.31c
	N_1	96.23±5.67b	7405.70±185.24b
	N_2	99.31±6.02a	7936.69±206.98a
	平均值	92.57	7323.19
F		*	**
V		*	*
F×V		ns	*

同列不同小写字母表示相同品种的不同施氮量间差异显著 ($P < 0.05$)。 “*” 和 “**” 分别表示在 5% 和 1% 水平影响显著和极显著, ns 表示影响不显著, F: 施氮量, V: 品种, F×V: 施肥与品种互作, 下同

Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level among different nitrogen application amounts of the same variety. “*” and “**” indicate significant and extremely effects at 0.05 and 0.01 level, respectively, ns indicates no significant effect, F: nitrogen application rate, V: variety, F×V: the amount of nitrogen application and variety interaction, the same below

随着施氮量的增加, 4 个饲用燕麦的干草产量亦呈递增趋势 (表 2), 且在 N_2 水平时达到最大值, N_2 处理与 N_0 (对照) 处理间差异显著 ($P < 0.05$), 除坝燕 7 号外, 其余 3 个品种的 N_1 与 N_2 处理间差

异不显著。从表 2 可知, N₂ 处理对甜燕麦的增产效果最为明显。方差分析结果表明, 施氮量和品种对饲用燕麦干草产量有显著影响 ($P<0.05$), 可能是因为施氮显著增加了各参试燕麦品种的分蘖数, 从而提高了干草产量。

2.2 不同施氮量对饲用燕麦光合特性指标的影响及其相关性分析

2.2.1 对 P_n 、 T_r 、 C_i 、 G_s 、RCC 和 LAI 的影响 随着施氮量的增加, 蒙燕 1 号、KONA 和坝燕 7 号 3

个饲用燕麦品种的 P_n 呈递增趋势 (表 3), 且在 N₂ 处理达到最大值, N₂ 处理与 N₀ (对照) 处理间均差异显著 ($P<0.05$); 蒙燕 1 号、KONA 的 T_r 呈递增趋势, 坝燕 7 号 T_r 随施氮量增加呈先增后减趋势; 甜燕麦的 P_n 和 T_r 则随着施氮量的增加呈现先增加后降低的变化趋势, 在 N₁ 处理达到最大值。各品种平均 P_n 表现为甜燕麦>蒙燕 1 号>KONA>坝燕 7 号。此外, 方差分析结果表明, 施氮量和品种互作对饲用燕麦 P_n 有极显著影响, 对 T_r 有显著影响。

表 3 施氮量对饲用燕麦光合特性相关指标的影响
Table 3 Effects of nitrogen application rate on the photosynthetic properties of fed oats

品种 Variety	处理 Treatment	P_n [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)	G_s [$\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	T_r [$\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	RCC	LAI
蒙燕 1 号 Mengyan No.1	N ₀	12.15±0.45b	3.10±0.05b	174.32±12.31b	255.40±25.30a	40.31±1.26b	3.03±0.36c
	N ₁	12.72±0.51b	3.86±0.02a	188.41±13.20b	299.14±29.31a	44.67±3.12b	3.64±0.52b
	N ₂	14.24±0.62a	3.80±0.10a	224.51±14.60a	321.12±33.63a	52.36±4.79a	4.16±0.55a
	平均值	13.04	3.59	195.73	291.87	45.78	3.61
KONA	N ₀	11.53±0.32b	3.25±0.05b	196.21±14.01b	169.32±20.12b	41.96±5.36b	4.51±0.75b
	N ₁	12.19±0.48ab	4.16±0.15a	181.41±12.90b	314.73±32.62a	42.39±4.92b	4.91±0.86ab
	N ₂	14.90±0.66a	3.92±0.12a	225.61±14.91a	234.34±24.13a	53.16±5.97a	5.21±0.94a
	平均值	12.87	3.78	201.07	239.43	45.84	4.87
甜燕麦 Sweet oat	N ₀	11.25±0.29b	3.52±0.14b	180.22±13.41b	263.54±27.60a	41.35±5.14b	4.26±0.78c
	N ₁	14.23±0.60a	3.99±0.16ab	236.11±15.13a	276.40±28.11a	46.23±5.88b	4.78±0.79b
	N ₂	13.96±0.62ab	4.29±0.18a	226.40±14.71a	239.13±23.44a	53.32±6.02a	5.26±0.85a
	平均值	13.15	3.93	214.23	259.67	46.97	4.77
坝燕 7 号 Bayan No.7	N ₀	10.50±0.21c	3.45±0.13b	185.61±13.40b	316.24±32.10a	39.66±4.56b	3.02±0.23c
	N ₁	12.70±0.49b	4.21±0.14a	243.90±15.64a	295.31±29.44a	41.78±5.12b	3.59±0.38b
	N ₂	13.51±0.58a	4.19±0.17a	224.31±14.32a	216.44±22.60b	46.59±5.69a	4.02±0.61a
	平均值	12.24	3.95	217.93	275.97	42.68	3.54
F		**	**	**	**	*	**
V		**	**	**	*	*	*
F×V		**	**	**	*	ns	*

蒙燕 1 号、KONA 和坝燕 7 号的 C_i 均随着施氮量的增加呈现先增加后降低的变化趋势, 且在 N₁ 处理达到最大值 (表 3)。各品种平均 C_i 和 G_s 均表现为坝燕 7 号>甜燕麦>KONA>蒙燕 1 号。方差分析结果还表明, 施氮量和品种对饲用燕麦 C_i 和 G_s 有极显著影响。

4 个饲用燕麦品种的 RCC 和 LAI 均随着施氮

量的增加呈递增趋势 (表 3), 且均在 N₂ 处理达到最大, 各品种平均 RCC 表现为甜燕麦>KONA>蒙燕 1 号>坝燕 7 号, 而各品种平均 LAI 则表现为 KONA>甜燕麦>蒙燕 1 号>坝燕 7 号。此外, 方差分析结果表明, 施氮量和品种互作对饲用燕麦 RCC 无显著影响, 而对 LAI 有显著影响。

2.2.2 干草产量与光合特性指标的相关关系 表 4

表 4 不同施氮量下各品种干草产量与光合特性指标间的相关关系

Table 4 Correlations between photosynthetic property indicators and hay yield of each variety under different nitrogen doses

指标 Index	P_n	C_i	G_s	T_r	RCC	LAI	干草产量 Hay yield
P_n	1						
C_i	0.579*	1					
G_s	0.744**	0.661*	1				
T_r	-0.472	-0.188	-0.315	1			
RCC	0.879**	0.509	0.613*	0.652*	1		
LAI	0.574	0.497	0.379	-0.631*	0.652*	1	
干草产量 Hay yield	0.695*	0.578*	0.543	-0.269	0.676*	0.457	1

“*” 和 “**” 分别表示在 5% 和 1% 水平显著和极显著相关

“*” and “**” indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively

表明, P_n 与 G_s 、RCC 呈极显著正相关, 与 C_i 和干草产量呈显著正相关, 相关系数 $R \geq 0.579$; T_r 与 RCC 呈显著正相关性, 而与 LAI 呈显著负相关性; 干草产量与 P_n 、 C_i 和 RCC 呈显著正相关, 与其他指标相关性不显著。

2.3 不同施氮量对饲用燕麦氮素光合利用效率的影响

由表 5 可知, 施氮量、施氮量和品种互作对比叶重无显著影响, 各参试品种在不同施氮量处理下均差异不显著, 平均比叶重仅分布在 0.22~0.24t/hm²

范围内。施氮量和品种对叶片氮含量和 N_a 有显著或极显著影响, 且随着施氮量的增加 LNC 和 N_a 均呈现出递增的变化趋势, 在 N_2 处理达到最大值, 其中, 各品种平均叶片氮含量和 N_a 均表现为坝燕 7 号>甜燕麦>蒙燕 1 号>KONA。施氮量和品种对 PNUE 有极显著的影响, 但氮施氮量和品种互作对 PNUE 无显著影响; 随着施氮量的增加 PNUE 呈递减变化趋势, N_0 (对照) 与 N_1 、 N_2 处理间差异显著, 各品种平均 PNUE 则表现为 KONA>蒙燕 1 号>甜燕麦>坝燕 7 号。

表 5 施氮量对饲用燕麦比叶重、叶片氮含量、单位叶片氮含量和氮素光合利用效率的影响
Table 5 Effects of nitrogen application rate on specific leaf weight, leaf nitrogen content, N_a , and PNUE

品种 Variety	处理 Treatment	比叶重 Specific leaf weight (t/hm ²)	叶片氮含量 Leaf nitrogen content (g/kg)	N_a (kg/hm ²)	PNUE [10μmol/(g·s)]
蒙燕 1 号 Mengyan No.1	N_0	0.21±0.01a	8.56±0.12c	1.80±0.11c	67.59±0.10a
	N_1	0.23±0.01a	15.04±0.15b	3.46±0.15b	36.77±0.15b
	N_2	0.23±0.01a	18.33±0.10a	4.22±0.12a	33.78±0.10b
	平均值	0.22	13.98	3.16	46.05
KONA	N_0	0.23±0.01a	7.76±0.11b	1.75±0.20b	66.04±0.20a
	N_1	0.23±0.01a	14.64±0.13a	3.37±0.01a	41.20±0.01b
	N_2	0.23±0.01a	16.32±0.13a	3.67±0.01a	40.58±0.01b
	平均值	0.23	12.91	2.93	47.61
甜燕麦 Sweet oat	N_0	0.23±0.01a	7.68±0.05b	1.77±0.01b	63.69±0.01a
	N_1	0.23±0.01a	16.88±0.96ab	3.88±0.02a	36.65±0.02b
	N_2	0.23±0.01a	19.36±1.20a	4.45±0.21a	31.35±0.20b
	平均值	0.23	14.64	3.37	43.89
坝燕 7 号 Bayan No.7	N_0	0.24±0.01a	8.24±0.05c	1.98±0.05c	53.09±0.05a
	N_1	0.24±0.01a	16.60±0.32b	3.98±0.02b	31.88±0.02b
	N_2	0.25±0.01a	23.62±2.10a	5.91±0.02a	22.88±0.02c
	平均值	0.24	16.15	3.96	35.28
F		ns	**	**	**
V		*	*	**	**
F×V		ns	*	*	ns

2.4 施氮量与光合特性、氮素光合利用率和生物特性间的关系

通过对线性方程、对数方程、曲线方程和二次回归方程等模型 R^2 的比较, 发现二次回归方程 R^2 相对最高, 最适宜用来描述施氮量与光合特性指标、氮素光合利用指标及生物特性指标之间的关系, 因此, 以施氮量为自变量 (x), 以光合特性、氮素光合利用率及生物特性等 12 个相关指标为应变量 (y) 进行二次回归分析。回归分析结果 (表 6) 表明, 施氮量与 P_n 、 C_i 、 G_s 、RCC、叶片氮含量、 N_a 、PNUE 和饲草产量指标间极显著相关 ($P<0.01$), 与 T_r 和 LAI 显著相关 ($P<0.05$), 但与比叶重和株高间没有显著相关性。

3 讨论

3.1 施氮量对饲用燕麦产量的影响

饲草燕麦以收获植物营养体为目的, 地上部是经济效益的主要构成部分, 叶和茎秆的发育对后期饲草产量的积累具有重要作用^[11], 不同品种和施氮量耦合能协调地上和地下物质分配, 达到经济效益最大化。本研究发现不同施氮量对 4 个燕麦品种地上部叶的发育均存在显著影响, 在 180kg/hm² 氮肥处理下燕麦产量和叶片 P_n 最高, 说明在此氮施用量下, 4 个参试品种均能最大限度地提升氮素利用和消除种间竞争压力。赵桂琴^[2]研究表明, 施用氮肥能够显著促进燕麦的分蘖, 有利于饲草燕麦产量

表 6 施氮量与光合特性、氮素利用率和生物特性之间的关系

Table 6 Relationship between nitrogen application rate and photosynthetic properties, nitrogen utilization, and biological properties

指标 Index	与施氮量关系 Relationship with nitrogen fertilizer (x)
P_n (y_1)	$y_1=-0.00003x^2+0.0201x+11.358$ ($R^2=0.768^{**}$)
T_r (y_2)	$y_2=-0.0128x^2+1.6546x+251.01$ ($R^2=0.384^*$)
C_i (y_3)	$y_3=-0.00005x^2+0.012x+3.33$ ($R^2=0.798^{**}$)
G_s (y_4)	$y_4=-0.001x^2+0.4021x+184.080$ ($R^2=0.514^{**}$)
RCC (y_5)	$y_5=-0.003x^2+0.007x+40.82$ ($R^2=0.835^{**}$)
LAI (y_6)	$y_6=-0.000006x^2+0.0063x+3.705$ ($R^2=0.380^*$)
比叶重 Specific leaf weight (y_7)	$y_7=-0.0000007x^2+0.00014x+0.2263$ ($R^2=0.124^{ns}$)
叶片氮含量 Leaf nitrogen content (y_8)	$y_8=-0.0003x^2+0.1087x+8.06$ ($R^2=0.892^{**}$)
N_a (y_9)	$y_9=-0.00002x^2+0.0259x+1.8219$ ($R^2=0.837^{**}$)
PNUE (y_{10})	$y_{10}=0.0015x^2-0.4358x+62.603$ ($R^2=0.880^{**}$)
饲草产量 Hay yield (y_{11})	$y_{11}=-0.0214x^2+13.157x+6907.5$ ($R^2=0.450^{**}$)
株高 Plant height (y_{12})	$y_{12}=0.003x^2-0.4522x+88.885$ ($R^2=0.207^{ns}$)

“ns” 表示相关性不显著
“ns” indicates no significant correlation

的增加。李振松等^[12]认为，可通过增施氮肥来提高燕麦的粗蛋白含量和产量，施氮量为 100kg/hm²时有利于沙地地区燕麦的生产。张斌等^[13]在研究拔节期追施氮肥对燕麦生产性能与效益的影响时发现，在参试的 8 个试验品种中，坝苽 19 号和坝苽 13 号净效益增加分别居第 1 位和第 2 位，而坝苽 6 号减产，净效益降低，主要原因可能是拔节期追施氮肥导致燕麦徒长，生长后期倒伏严重。综上所述，不同燕麦品种对氮肥的响应不同，施氮后的增产效益差异较大，对于如何发挥不同品种的生产潜力，需要对不同品种的适宜氮肥用量进行深入研究。综合前人^[1,11-15]及本研究结果可知，当田间氮素投入量超过一定范围时，各燕麦品种的生物产量会出现不增反减的变化趋势^[10]。

3.2 施氮量对饲用燕麦光合特性的影响

光合作用作为植物体内一个复杂的生理过程，其光合效率不但与自身因素（叶绿素含量和叶片成熟程度等）密切相关，而且还受水肥等外界因子的影响^[16]。氮肥的使用是多数农作物增产增收的主要田间管理措施，氮肥通过促进叶片生长和提高光合作用效率来影响干物质的生产和积累^[7]，但与其他作物相比，氮肥对燕麦的益处并不明显，且由于雨水等气候条件易使燕麦倒伏，限制了氮肥在提高燕麦产量上的大量使用^[3]，因此明确不同燕麦品种饲草产量的适宜氮肥施用量，对本区域燕麦产业发展具有重要意义。

光合作用的实现依赖于叶绿素对光能的吸收，有研究^[17]指出，叶绿素含量与光合作用之间一般呈正相关。本试验中，在乳熟期测定各燕麦的相对叶绿素含量为 39.66~53.32，其中，甜燕麦的平均相对

叶绿素含量最高，对比表 2 发现，其平均 P_n 也最高。饲用燕麦生长到乳熟期时，燕麦旗叶开始衰老，叶绿体结构和功能会发生变化，若此时营养缺乏严重会影响叶绿素的生物合成，从而引起光合作用降低^[18]，也就是说，在一定范围内，叶绿素含量直接影响叶片光合能力。

叶片作为植物光合作用的主要场所，是对环境变化比较敏感、可塑性较强的器官，氮肥有助于其叶面积指数的增加，增强作物对光的利用效率，进一步影响干物质转移和分配^[19-20]。贾志峰^[3]研究结果表明，在青海湟中地区施氮量控制在 90~180kg/hm²时有利于燕麦光合效率的提升，且燕麦产量与叶片的光合作用能力显著相关。在本研究中，通过测定 4 个不同燕麦品种旗叶的光合特性发现，燕麦饲草产量与旗叶 P_n 和 C_i 显著相关，较高的旗叶光合能力对应较高的饲草产量，旗叶光合效率、饲草产量随施氮量由 0 至 180kg/hm²而逐渐增加，其中，甜燕麦的 P_n 最高，这表明旗叶光合效率决定乳熟期燕麦饲草产量的关键因素。胡继杰等^[21]研究结果也表明，作物产量与叶片的光合作用能力显著相关，而当氮素缺乏时，叶片光合速率降低，产量下降，与本研究结论基本一致。

氮素是调节燕麦生长发育的重要因子，不同的田间施氮量管理措施会对作物生理代谢和光合特性等产生重要影响，这可能与氮素光合吸收利用率和自身光合特性共同作用有关^[10]。饲用燕麦营养生长季，若氮肥不足，会降低植株生长速率和光合势，抑制光合产物的合成与积累^[22]，而过量的施氮量也会造成作物氮素奢侈吸收与损失，对土壤环境造成污染^[23]，在本研究中，在设定的最大

施氮量 180kg/hm² 水平时, 氮素均能被 4 个品种充分利用, 有利于提高氮肥光合利用效率, 且减少氮肥的损失。

4 结论

施氮量对不同品种的饲用燕麦产量有显著影响。随着施氮量的增加, 各品种 P_n 和氮素光合利用效率呈持续增加的趋势。晋北地区用蒙燕 1 号、甜燕麦、KONA 和坝燕 7 号 4 个品种进行大田生产时, 氮素施用量可在 180kg/hm² 水平。

参考文献

- [1] 陈宝书. 牧草饲料作物栽培学. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [2] 赵桂琴. 饲用燕麦及其栽培加工. 北京: 科学出版社, 2016.
- [3] 贾志峰. 施氮量和播种密度对高寒区燕麦种子产量及其相关性状的影响研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- [4] 贾志峰, 马祥, 琚泽亮, 等. 施氮量和播种量对燕麦光合特性、激素含量及种子产量的影响. 草地学报, 2021, 29(2): 291-302.
- [5] Fang X, Li Y, Nie J, et al. Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the leaf photosynthetic characteristics, agronomic traits and grain yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.). Field Crops Research, 2018, 219: 160-168.
- [6] White E, Finnan J. Crop structure in winter oats and the effect of nitrogen on quality-related characters. Journal of Crop Improvement, 2017, 31(6): 758-779.
- [7] 朱荣, 慕宇, 康建宏, 等. 不同施氮量对花后高温春小麦叶绿素含量及荧光特性的影响. 南方农业学报, 2017, 48(4): 609-615.
- [8] 魏海燕, 张洪程, 马群, 等. 不同氮肥利用效率水稻基因型剑叶光合特性. 作物学报, 2009, 35(12): 2243-2251.
- [9] 马群, 杨雄, 李敏, 等. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种的物质生产积累. 中国农业科学, 2011, 44(20): 4159-4169.
- [10] 黎星, 程慧煌, 曾勇军, 等. 不同时期超级杂交稻光合特性及氮素利用效率研究. 核农学报, 2019, 33(5): 978-987.
- [11] 高阳, 赵力兴, 朱铁霞, 等. 施氮量对科尔沁沙地燕麦生物量及物质分配规律的影响. 草地学报, 2018, 26(5): 1168-1172.
- [12] 李振松, 李向林, 万里强. 水氮耦合对科尔沁沙地燕麦生产性能的影响. 中国草地学报, 2020, 42(4): 145-152.
- [13] 张斌, 葛军勇, 杨万军, 等. 拔节期追氮对裸燕麦主栽品种生产性能与效益的影响. 作物杂志, 2017(2): 81-87.
- [14] 刘凯强, 刘文辉, 魏小星, 等. 不同播量和行距对‘青燕 1 号’燕麦种子产量的影响. 草业学报, 2020, 29(2): 82-91.
- [15] 雷占兰, 周华坤, 刘泽华, 等. 密度氮肥交互处理下高寒地区燕麦的生长特性与生殖分配. 草业科学, 2014, 21(6): 1110-1119.
- [16] Makino A. Photosynthesis grain yield and nitrogen utilization in rice and wheat. Plant Physiology, 2011, 155(1): 125-129.
- [17] 张丽妍, 杨恒山, 葛选良, 等. 不同生长年限紫花苜蓿花期光合特性及其种子生产性能. 中国草地学报, 2008, 35(5): 53-57.
- [18] 林久生, 王根轩. 渗透胁迫诱导的小麦叶片细胞程序性死亡. 植物生理学报, 2001, 27(3): 221-225.
- [19] Yan P, Zhang Q, Shuai X, et al. Interaction between plant density and nitrogen management strategy in improving maize grain yield and nitrogen use efficiency on the north china plain. Journal of Agricultural Science, 2015, 154(6): 978-988.
- [20] 童平, 杨世民, 马均, 等. 不同水稻品种在不同光照条件下的光合特性及干物质积累. 应用生态学报, 2008, 19(3): 505-511.
- [21] 胡继杰, 朱练峰, 钟楚, 等. 增氧模式对水稻光合特性及产量的影响. 中国水稻科学, 2017, 31(3): 278-287.
- [22] Muhammad S M, Shahid I Z, Ihtishamul H M, et al. Yield and quality of forage oat (*Avena sativa* L.) cultivars as affected by seed inoculation with nitrogenous strains. American Journal of Plant Science, 2015(6): 3251-3259.
- [23] Nehvi F A, Shafiq A, Wani, et al. Stability analysis for yield and yield related traits in fodder oats (*Avena sativa* L.). Asia Journal of Plant Science, 2007, 6(4): 628-632.

Effects of Different Nitrogen Application Rates on Photosynthetic Characteristics and Nitrogen Photosynthetic Utilization Efficiency of Fed Oats

Zheng Minna, Liang Xiuzhi, Kang Jiahui, Li Yinfan, Wang Hui, Han Zhishun, Chen Yanni

(High Latitude Crops Institute, Shanxi Agricultural University, Datong 037008, Shanxi, China)

Abstract In order to explore the differences of photosynthetic characteristics and nitrogen use efficiency of fed oats under different nitrogen application rates in northern Shanxi province, four typical forage oat varieties were used as experimental materials to study the biological yield, photosynthetic characteristics and nitrogen photosynthetic efficiency. The findings indicated that hay yields of four varieties increased with the increase of nitrogen application rates, and the nitrogen application rate of 180kg/ha produced the maximum hay yields. Net photosynthetic rate and nitrogen photosynthetic utilization efficiency both grew steadily with the increase of nitrogen application rate. The amount of field nitrogen application could be regulated at 180kg/ha during the production of Mengyan No.1, Sweet oats, KONA, and Bayan No.7 in northern Shanxi province according to the complete indicators.

Key words Fed oats; Nitrogen application rate; Hay yield; Photosynthetic characteristics; Nitrogen photosynthetic utilization efficiency