

# 氮素水平对科尔沁沙地羊草叶片氮代谢及产量的影响

侯文慧<sup>1</sup>, 张玉霞<sup>1</sup>, 杜晓艳<sup>1</sup>, 王鑫<sup>1</sup>, 鲍青龙<sup>2</sup>, 丛百明<sup>3</sup>

(1. 内蒙古民族大学, 内蒙古 通辽 028041; 2. 赤峰市草原工作站, 内蒙古 赤峰 024000;  
3. 通辽市畜牧兽医科学研究所, 内蒙古 通辽 028000)

**摘要:**合理的施氮量可以提高羊草氮素代谢关键酶活性, 促进羊草氮素积累和利用, 进而获得高产。为确定科尔沁沙地羊草适宜施氮量及其促高产的生理机制, 采用随机区组设计, 选取两块样地分别追施 0、50、100、150、200 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥(纯 N), 分别用 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub> 表示, 5 月 20 日测定羊草叶片氮代谢相关酶活性及含氮物质含量, 7 月 10 日测定羊草产量。结果表明: 羊草产量、硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸草酰乙酸转氨酶(GOT)、谷氨酸丙酮酸转氨酶(GPT)活性和游离氨基酸(AA)、可溶性蛋白(SP)含量均随施氮量的增加而呈现先增加后降低的变化趋势, 其中 NR、GS、GOT、GPT 活性和 AA 含量在 N<sub>3</sub> 水平下达到最大值; 羊草产量和可溶性蛋白含量在 N<sub>2</sub> 水平下达到最大值。结论: 在科尔沁沙地生境下追施 150 kg/hm<sup>2</sup> 氮肥(纯 N)羊草叶片的氮素代谢能力最强, 最有利于羊草干物质产量的积累。

**关键词:** 羊草; 氮肥; 氮素代谢; 产量

**中图分类号:** S812 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-5500(2021)05-0106-07

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cyycp.2021.05.025

羊草(*Leymus chiueusis*), 又名碱草, 为多年生广域性禾草, 隶属于禾本科(Gramineae)赖草属(*Leymus*)<sup>[1]</sup>。羊草是牛羊均喜食的牧草, 营养物质含量丰富, 被称为“牧草中的细粮”<sup>[2]</sup>, 集中分布于欧亚大陆草原东部, 而羊草在我国主要分布在东北草原和内蒙古草原, 约占全球总量的一半<sup>[3]</sup>。内蒙古草原属于欧亚草原的一部分, 我国草原的典型特征包括物种组成和群落结构<sup>[4]</sup>, 很容易在东北和内蒙古草原形成大面积

的单一优势植被<sup>[5]</sup>。羊草适口性好<sup>[6]</sup>, 叶量大, 产量高, 具有较高的经济价值。且具有抗旱、抗寒、耐盐碱等特征<sup>[7]</sup>, 根茎发达, 耐牧性强, 防风固沙, 可减少水土流失, 有很大的生态价值。因此, 种植羊草, 对治理草原“三化”, 促进畜牧业发展具有重要的作用<sup>[8-10]</sup>。

氮代谢与植物的生长和产量构成有关。大量研究表明, 谷氨酰胺合成酶和硝酸还原酶是氮素同化的关键酶, 对蛋白质合成具有重要的影响<sup>[11-15]</sup>。目前关于氮肥如何通过促进氮代谢, 促进生长发育的研究尚少。关于氮还原酶活性与植物氮化合物含量之间的关系, 一些研究发现氮含量与植物氮化合物含量呈正相关, 而另一些则不显著<sup>[15-17]</sup>。谷氨酰胺合成酶是氮代谢中心的多功能酶, 是各种氮代谢的调节剂, 通过适当增加氮肥用量, 可以提高氮同化效率, 促进蛋白质合成<sup>[18-19]</sup>。研究表明, 适当供应氮可以改善小麦氮代谢的关键酶活性, 改善氮在谷物中的分布和运输, 提高谷物产量<sup>[20]</sup>。

**收稿日期:** 2020-08-29; **修回日期:** 2021-04-13

**基金项目:** 内蒙古自治区科技储备项目(2018MDCB032); 荒漠草原区草畜一体化关键技术集成与示范(2019GG245)

**作者简介:** 侯文慧(1996-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生。

E-mail: 15848367900@163.com

张玉霞为通讯作者。

E-mail: yuxiazhang685@163.com

## 1 材料和方法

### 1.1 试验区自然概况

试验地设在内蒙古自治区通辽市科尔沁区育新镇(E 122°21', N 43°57')和内蒙古民族大学科技园区(E 122°28', N 43°53'),地理位置相距 10 km,均属温带半干旱大陆性气候。年均气温 0~6℃,≥10℃年积温 3 000~3 200℃,无霜期 140~150 d,年均降水量 350~400 mm,蒸发量是降水量的 5 倍,年均风速 3.0~4.4 m/s。通辽市育新镇土壤类型为风沙土,pH 值 8.0,土壤有机质 0.65%,碱解氮 36.37 mg/kg,速效磷含量 3.81 mg/kg,速效钾含量 78.51 mg/kg,全氮含量 0.037%。内蒙古民族大学农业试验站土壤类型为风沙土,耕层土壤为 20 cm,pH 值为 8.3,土壤有机质含量 0.64%,全氮含量 0.036%,碱解氮含量 35.37 mg/kg,速效钾含量 77.51 mg/kg,速效磷含量 3.71 mg/kg。

### 1.2 材料与方法

供试材料为吉农 1 号羊草品种,其中内蒙古民族大学科技园区为 2015 年人工建植的羊草草地,育新镇为 2016 年人工建植的羊草草地。

试验区采取随机区组设计,设置了 0(CK)、50、100、150、200 kg/hm<sup>2</sup> 的施氮(N)量,分别用 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>、N<sub>3</sub>、N<sub>4</sub> 表示,氮肥为尿素(氮含量为 46%),同时每个处理均施磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)200 kg/hm<sup>2</sup>,钾肥(K<sub>2</sub>O)200 kg/hm<sup>2</sup>,分别用重过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量为 44%)和氯化钾(K<sub>2</sub>O 含量为 60%)替代。小区面积为 16 m<sup>2</sup>,4 次重复,共 20 个小区。于 2020 年 4 月 20 日(分蘖期)进行人工追施氮肥,追施氮肥用量为全年用氮量的 50%,施肥采用撒施方式,施肥后立即进行灌水。于 5 月 20 日在科技园区和育新镇进行取样,取羊草叶片测定有关氮代谢关键酶活性及相关活性物质的含量,7 月 10 日测定羊草产量。

### 1.3 测定指标与方法

硝酸还原酶(NR)活性采用活体法测定<sup>[21]</sup>;谷氨酰氨合成酶(GS)酶活性参考金正勋的方法测定<sup>[22]</sup>;可溶性蛋白(SP)含量采用考马斯亮蓝 G-250 比色法测定<sup>[21]</sup>;游离氨基酸(AA)含量采用水合茚三酮比色法测定<sup>[21]</sup>;谷氨酸草酰乙酸转氨酶(GOT)和谷氨酸丙酮酸转氨酶(GPT)活性参照吴良欢<sup>[23]</sup>的方法测定。

产量测定:在取样小区内刈割 1 m<sup>2</sup>羊草,留茬高

度 5 cm,收割后称鲜重,鲜草风干后称干重并计算干鲜比。

### 1.4 数据分析

试验数据用 Microsoft Excel 2010 软件进行统计和分析,并制作表格,用 SPSS 17.0 软件对数据进行单因素方差显著性分析( $P < 0.05$ ),所有数据均采用平均值±标准差(mean±SD)表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮素水平对羊草产量的影响

随着施氮量的不断增加,科技园区和育新镇的羊草鲜草产量、干草产量和干鲜比均随着施氮量的增加呈先增加后降低趋势。在 N<sub>2</sub>水平下,科技园区和育新镇羊草的鲜草产量、干草产量和干鲜比均达最大值,其中科技园区羊草鲜草产量显著高于 N<sub>0</sub>和 N<sub>1</sub>水平( $P < 0.05$ ),而与 N<sub>3</sub>和 N<sub>4</sub>水平差异不显著( $P > 0.05$ );干草产量和干鲜比均显著高于其他氮素水平( $P < 0.05$ );育新镇羊草鲜草产量、干草产量和干鲜比均显著高于其他氮素水平( $P < 0.05$ )(表 1)。由此说明,两个样地在 N<sub>2</sub>水平下最有利于羊草干物质的积累。

### 2.2 氮素水平对羊草叶片含氮物质含量的影响

随着施氮量的不断增加,羊草叶片的可溶性蛋白含量和游离氨基酸含量均随着施氮量的增加而呈先增加后降低趋势。在 N<sub>2</sub>水平下,科技园区和育新镇羊草的可溶性蛋白含量达到最大值,其中,科技园区羊草叶片的可溶性蛋白含量与 N<sub>3</sub>水平差异不显著,但显著高于其他氮素水平( $P < 0.05$ );而育新镇羊草叶片的可溶性蛋白含量显著高于其他氮素水平( $P < 0.05$ )。在 N<sub>3</sub>水平下,科技园区和育新镇羊草的游离氨基酸含量达到最大值,并且显著高于其他氮素水平( $P < 0.05$ )(表 2)。由此说明,在 N<sub>2</sub>水平下可溶性蛋白含量最高,而游离氨基酸含量在 N<sub>3</sub>水平最高,施氮可以增加含氮物质的含量,提高氮素代谢能力。

### 2.3 氮素水平对羊草叶片氮素代谢酶活性的影响

随着施氮量的不断增加,科技园区羊草叶片的 GPT 活性和 GOT 活性均随着施氮量的增加而呈先增加后降低趋势。在 N<sub>3</sub>水平下,羊草叶片的 GPT 活性和 GOT 活性达到最大值,其中羊草叶片的 GPT 活性显著高于其他氮素水平( $P < 0.05$ );而羊草叶片的 GOT 活性显著高于 N<sub>0</sub>、N<sub>1</sub>和 N<sub>4</sub>水平,与 N<sub>2</sub>水平差异不显著。随着施氮量的不断增加,科技园区羊草叶片

表 1 不同 N 素水平处理下沙地羊草产量

Table 1 Fresh and dry biomass accumulation of *Leymus chinensis* in response to different N rates

样地	氮肥处理	鲜草产量/(kg · m <sup>-2</sup> )	干草产量/(kg · m <sup>-2</sup> )	干鲜比
科技园区	N <sub>0</sub>	1.23 ± 0.07 <sup>c</sup>	0.60 ± 0.03 <sup>d</sup>	0.48 ± 0.02 <sup>c</sup>
	N <sub>1</sub>	2.06 ± 0.03 <sup>b</sup>	1.03 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.50 ± 0.01 <sup>c</sup>
	N <sub>2</sub>	2.23 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.25 ± 0.01 <sup>a</sup>	0.56 ± 0.01 <sup>a</sup>
	N <sub>3</sub>	2.18 ± 0.02 <sup>a</sup>	1.17 ± 0.01 <sup>b</sup>	0.54 ± 0.01 <sup>b</sup>
	N <sub>4</sub>	2.16 ± 0.05 <sup>a</sup>	1.13 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.53 ± 0.01 <sup>b</sup>
育新镇	N <sub>0</sub>	0.70 ± 0.03 <sup>c</sup>	0.36 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.52 ± 0.00 <sup>d</sup>
	N <sub>1</sub>	1.41 ± 0.08 <sup>d</sup>	0.82 ± 0.05 <sup>d</sup>	0.59 ± 0.01 <sup>c</sup>
	N <sub>2</sub>	2.47 ± 0.08 <sup>a</sup>	1.57 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.64 ± 0.01 <sup>a</sup>
	N <sub>3</sub>	1.88 ± 0.06 <sup>b</sup>	1.17 ± 0.03 <sup>b</sup>	0.63 ± 0.00 <sup>b</sup>
	N <sub>4</sub>	1.68 ± 0.03 <sup>c</sup>	1.04 ± 0.02 <sup>c</sup>	0.62 ± 0.00 <sup>b</sup>

注:同行不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ ),下同

表 2 不同 N 素水平处理下沙地羊草叶片含氮物质含量

Table 2 Soluble protein content and free amino acids of *Leymus chinensis* in response to different N rates

样地	指标	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>
科技园区	SP/(mg · g <sup>-1</sup> FW)	8.41 ± 0.31 <sup>c</sup>	11.88 ± 0.69 <sup>b</sup>	14.62 ± 0.32 <sup>a</sup>	14.28 ± 0.86 <sup>a</sup>	12.43 ± 0.31 <sup>b</sup>
	AA/(mg · g <sup>-1</sup> FW)	0.49 ± 0.11 <sup>d</sup>	0.60 ± 0.05 <sup>d</sup>	0.83 ± 0.03 <sup>c</sup>	1.62 ± 0.06 <sup>a</sup>	1.09 ± 0.13 <sup>b</sup>
育新镇	SP/(mg · g <sup>-1</sup> FW)	9.17 ± 0.37 <sup>c</sup>	9.38 ± 0.33 <sup>c</sup>	16.95 ± 0.26 <sup>a</sup>	14.46 ± 0.08 <sup>b</sup>	13.85 ± 0.57 <sup>b</sup>
	AA/(mg · g <sup>-1</sup> FW)	0.81 ± 0.04 <sup>e</sup>	0.95 ± 0.01 <sup>d</sup>	1.49 ± 0.08 <sup>b</sup>	1.68 ± 0.10 <sup>a</sup>	1.18 ± 0.02 <sup>c</sup>

表 3 不同 N 肥水平处理下沙地羊草叶片关键酶活性

Table 3 The activity of four key enzymes in *Leymus chinensis* leaves in response to different N rates

样地	指标	N <sub>0</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>
科技园区	GPT/(μmol · g <sup>F</sup> W <sup>-1</sup> · h <sup>-1</sup> )	47.07 ± 1.14 <sup>c</sup>	51.22 ± 1.25 <sup>b</sup>	53.81 ± 1.41 <sup>b</sup>	57.22 ± 0.99 <sup>a</sup>	51.79 ± 0.55 <sup>b</sup>
	GOT/(μmol · g <sup>-1</sup> FW · h <sup>-1</sup> )	16.32 ± 0.52 <sup>c</sup>	17.56 ± 0.30 <sup>b</sup>	17.99 ± 0.29 <sup>ab</sup>	18.61 ± 0.52 <sup>a</sup>	17.56 ± 0.37 <sup>b</sup>
	GS/(μmol · g <sup>-1</sup> FW · min <sup>-1</sup> )	1.35 ± 0.03 <sup>d</sup>	1.72 ± 0.05 <sup>c</sup>	1.93 ± 0.04 <sup>b</sup>	2.15 ± 0.06 <sup>a</sup>	1.88 ± 0.06 <sup>b</sup>
	NR/(μg · g <sup>-1</sup> FW · h <sup>-1</sup> )	129.92 ± 7.29 <sup>e</sup>	168.21 ± 6.34 <sup>d</sup>	237.79 ± 2.52 <sup>b</sup>	288.85 ± 6.16 <sup>a</sup>	217.61 ± 1.90 <sup>c</sup>
育新镇	GPT/(μmol · g <sup>-1</sup> FW · h <sup>-1</sup> )	47.64 ± 1.93 <sup>b</sup>	47.81 ± 0.61 <sup>b</sup>	50.55 ± 0.52 <sup>b</sup>	54.58 ± 1.32 <sup>a</sup>	50.45 ± 1.13 <sup>b</sup>
	GOT/(μmol · g <sup>-1</sup> FW · h <sup>-1</sup> )	17.20 ± 0.59 <sup>b</sup>	17.44 ± 0.35 <sup>ab</sup>	17.60 ± 0.42 <sup>ab</sup>	18.57 ± 0.55 <sup>a</sup>	17.33 ± 0.14 <sup>ab</sup>
	GS/(μmol · g <sup>-1</sup> FW · min <sup>-1</sup> )	1.32 ± 0.03 <sup>c</sup>	1.65 ± 0.05 <sup>b</sup>	1.63 ± 0.06 <sup>b</sup>	1.84 ± 0.07 <sup>a</sup>	1.54 ± 0.04 <sup>b</sup>
	NR/(μg · g <sup>-1</sup> FW · h <sup>-1</sup> )	172.41 ± 2.74 <sup>d</sup>	193.39 ± 1.38 <sup>c</sup>	221.71 ± 4.97 <sup>b</sup>	243.74 ± 6.86 <sup>a</sup>	212.27 ± 4.97 <sup>b</sup>

的 GS 活性和 NR 活性均随着施氮量的增加呈先增加后降低趋势。在 N<sub>3</sub> 水平下,羊草叶片的 GS 活性和 NR 活性达到最大值,其中羊草叶片的 GS 活性和 NR 活性均显著高于其他氮素水平( $P < 0.05$ )。育新镇羊草叶片的 GPT 活性和 GOT 活性均随着施氮量的增

加而呈先增加后降低趋势。在 N<sub>3</sub> 水平下,羊草叶片的 GPT 活性和 GOT 活性达到最大值,其中羊草叶片的 GPT 活性显著高于其他氮素水平( $P < 0.05$ ),而羊草叶片的 GOT 活性显著高于 N<sub>0</sub> 水平,与 N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub> 和 N<sub>4</sub> 水平之间差异不显著。随着施氮量的不断增加,育新镇

羊草叶片的 GS 活性和 NR 活性均随着施氮量的增加而呈先增加后降低趋势。在  $N_3$  水平下,羊草叶片的 GS 活性和 NR 活性达到最大值,其中羊草叶片的 GS 活性和 NR 活性均显著高于其他氮素水平( $P < 0.05$ ) (表 3)。由此说明,在  $N_3$  水平下,两样地羊草叶片中 GPT、GOT、GS 和 NR 活性最强,施氮可以显著增强氮代谢酶活性,进而提升氮素代谢能力。

#### 2.4 羊草产量与氮代谢酶及含氮物质间相关性分析

科技园区羊草鲜草产量与干草产量和 AA 含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与干鲜比、GPT、GOT 和 GS 活性呈显著正相关( $P < 0.05$ );干草产量与 AA 含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与干鲜比、GPT、GOT、GS 和 NR 活性呈显著正相关( $P < 0.05$ );干鲜比与 AA 含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 GPT、GOT、GS 和 NR 活性呈显著正相关( $P < 0.05$ )。羊草叶片 GPT 与 GOT、GS、NR 活性及 SP 含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 AA 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ );GOT 与 GS、NR 活性及 AA 含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ );GS 与 NR 活性和

AA 含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 SP 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ );NR 活性与 AA 和 SP 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ )。育新镇羊草鲜草产量与干草产量、干鲜比和 AA 含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 SP 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ );干草产量与干鲜比和 AA 含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 NR 活性和 SP 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ );干鲜比与 NR 活性、SP 和 AA 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ );羊草叶片的 GPT 与 GOT 活性呈显著正相关( $P < 0.05$ ),与 NR 活性和 SP 含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ );GOT 活性与 GS、NR 和 SP 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ );GS 与 NR 活性呈显著正相关( $P < 0.05$ );NR 活性与 AA 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ )与 SP 含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ );AA 与 SP 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ) (表 4)。由此说明,两个样地的羊草产量受氮代谢酶活性及含氮物质含量的影响,且均与产量呈正相关关系,含氮物质含量越高,氮代谢酶活性越强,因此施氮有利于羊草氮素代谢,从而提高产量。

表 4 羊草产量和叶片氮代谢相关酶活性及含氮化合物相关性分析

Table 4 The correlation between *Leymus chinensis* yield and enzyme activities associated with nitrogen metabolism, nitrogen-containing compounds in leaves

样地	指标	鲜草产量	干草产量	干鲜比	GPT 活性	GOT 活性	GS 活性	NR 活性	AA 含量	SP 含量
科技园区	鲜草产量	1								
	干草产量	0.98**	1							
	干鲜比	0.81*	0.91*	1						
	GPT 活性	0.82*	0.85*	0.81*	1					
	GOT 活性	0.89*	0.90*	0.82*	0.99**	1				
	GS 活性	0.89*	0.91*	0.86*	0.98**	0.98**	1			
	NR 活性	0.77	0.83*	0.87*	0.97**	0.94**	0.97**	1		
	AA 含量	0.93**	0.97**	0.94**	0.92**	0.95**	0.94**	0.90*	1	
	SP 含量	0.56	0.61	0.62	0.87*	0.81*	0.87*	0.92*	0.67	1
育新镇	鲜草产量	1								
	干草产量	1.00**	1							
	干鲜比	0.95**	0.95**	1						
	GPT 活性	0.59	0.6	0.68	1					
	GOT 活性	0.45	0.45	0.52	0.91*	1				
	GS 活性	0.68	0.67	0.77	0.77	0.86*	1			
	NR 活性	0.81	0.81*	0.88*	0.94**	0.84*	0.87*	1		
	AA 含量	0.92**	0.93**	0.86*	0.69	0.45	0.51	0.81*	1	
	SP 含量	0.83*	0.84*	0.83*	0.93**	0.84*	0.81	0.97**	0.86*	1

注: \* 代表 0.05 水平上显著相关, \*\* 代表 0.01 水平上显著相关

### 3 讨论

硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶、谷氨酸草酰乙酸转氨酶和谷氨酸丙酮酸转氨酶是植物体内氮代谢过程的关键酶,彼此间具有紧密的协同性<sup>[24]</sup>。氮代谢在植物的生命活动中有重要的作用,氮代谢水平直接影响植物的生长发育<sup>[25]</sup>。NR 是植物体内氮代谢的关键酶,其酶活性的高低和氮同化能力相关;GS 是植物氮代谢过程中的多功能酶,参与多种氮代谢调节<sup>[26]</sup>,其活性的提高有利于氮素代谢能力的增强,进而促进氨基酸的合成和转化<sup>[27]</sup>。本研究表明,氮肥能够显著增加 NR 和 GS 活性,主要由于氮肥能为 NR 提供充足的催化底物,从而提高 NR 活性<sup>[28]</sup>。植物  $\text{NH}^{+4}$  的同化是通过 GS 协同配合循环进行的<sup>[29]</sup>。在氮素同化过程中,GS 将  $\text{NH}^{+4}$  同化形成谷氨酰胺,然后进一步转化成谷氨酸,形成氨基酸,进而形成不同的蛋白质<sup>[30]</sup>。

赵吉平等<sup>[31]</sup>研究表明,施氮量为  $240 \text{ kg/hm}^2$  时,小麦旗叶的 GS、NR 等关键酶活性最高,小麦旗叶氮素代谢关键酶活性与籽粒产量呈显著相关;张弦等<sup>[32]</sup>研究显示,小麦旗叶的 GS、NR 等酶活性在  $240 \text{ kg/hm}^2$  水平高于  $180 \text{ kg/hm}^2$  及  $350 \text{ kg/hm}^2$ ;郭萍等<sup>[33]</sup>研究结果表明,施氮显著提高了玉米叶片 GS 活性;孔令中等<sup>[34]</sup>研究结果表明,施氮量为  $279 \text{ kg/hm}^2$ ,玉米功能叶片 GS 活性最强;本试验结果表明,追施氮肥对硝酸还原酶活性具有明显的促进作用,且随施氮量的增加硝酸还原酶活性随之增加。许多研究证实<sup>[35]</sup>,氮肥的添加显著提高了 GS 的活性,提高了对氮肥的利用效率,从而促进了植物对氮的吸收和利用。本试验研究发现,追施氮肥有效提高了羊草叶片 GS 活性,施肥量为  $150 \text{ kg/hm}^2$  时,GS 活性达到最大,而当施肥量超过  $\text{N}_3$  后,对 GS 活性起到抑制作用,导致活性降低。

谷氨酸需要通过转氨作用形成植物来源的其他必需氨基酸,然后进行蛋白质合成,谷氨酸丙酮酸转氨酶(GPT)和谷氨酸草酰乙酸转氨酶是该代谢过程中的两个关键酶<sup>[36]</sup>。关于转氨酶与施氮量的关系研究较少,赵吉平等<sup>[33]</sup>研究施氮量对小麦氮素代谢关键酶活性的影响,结果表明,小麦旗叶的 GPT 活性随施氮量增加而先升后降,施氮  $240 \text{ kg/hm}^2$  时 GPT 酶活性最高,小麦旗叶氮素代谢关键酶活性与籽粒产量呈显著相

关。本试验结果发现,氮肥施用能显著提高 GPT、GOT 酶活性,GPT 和 GOT 酶活性变化规律一致,其峰值出现在  $\text{N}_3$  ( $150 \text{ kg/hm}^2$ ) 水平。说明适当增施氮肥能有效提高羊草叶片 GPT 和 GOT 酶活性,进而促进羊草体内蛋白的合成。

不同的氮含量会影响羊草的质量和产量,主要含氮物质的量会反映植物中的氮代谢。氨基酸是植物氮同化的产物,是蛋白质合成的基本单位,可溶性蛋白是植物储存氮能力的重要指标<sup>[24]</sup>。本研究发现,可溶性蛋白、游离氨基酸含量在一定范围内随着施氮量的增加而增加,但超过一定量后会下降,而游离氨基酸在  $150 \text{ kg/hm}^2$  氮素水平下含量最高。可溶性蛋白含量随着施氮量的增加而增加,在  $\text{N}_2$  水平下含量最高,超过  $100 \text{ kg/hm}^2$  时,含量不再增加而呈现下降趋势。

### 4 结论

适宜施氮量可以提高羊草氮代谢酶活性及含氮物质含量,进而提高羊草干物质产量,在科尔沁沙地建植人工羊草草地建议施氮量为  $150 \text{ kg/hm}^2$ 。

#### 参考文献:

- [1] LI Z, LIN J, ZHANG T, *et al.* Effects of Summer Nocturnal Warming on Biomass Production of *Leymus chinensis* in the Songnen Grassland of China: From Bud Bank and Photosynthetic Compensation [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2014, 200(1): 66–76.
- [2] 陈宝书. 牧草饲料作物栽培学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 314–317.
- [3] 李建东. 我国的羊草草原[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 1979(3): 145–151.
- [4] 郭本兆. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [5] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2000.
- [6] 祝廷成. 羊草生物生态学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2004.
- [7] WANG Y, ZHOU G, WANG Y. Modeling responses of the meadow steppe dominated by *Leymus chinensis* to climate change [J]. *Climatic Change*, 2007, 82 (3): 437–452.
- [8] 苏富源. 人工羊草地水肥效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [9] 董晓兵, 郝明德, 肖庆红, 等. 不同钾肥施用量对羊草产

- 量、品质及养分吸收的影响[J]. 草原与草坪, 2015, 35(1): 20—26.
- [10] 齐红, 康乐, 郭继勋. 松嫩草原羊草氮代谢对土壤盐碱化的响应[J]. 长春师范学院学报, 2013, 32(2): 71—73.
- [11] Magalhães J R. Study of Physiological parameters for the selection of maize genotypes efficient in ammonium uptake[J]. Empresa Capixaba de Pesquisa Agropecuária, 1990, 65: 104.
- [12] Bertrand, Hirel. Towards a better understanding of the genetic and Physiological basis for nitrogen use efficiency in maize[J]. Plant Physiology, 2001, 125(3): 1258—1270.
- [13] 戴廷波, 曹卫星, 孙传范, 等. 增铵营养对小麦光合作用及硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1529—1532.
- [14] 翁伯琦, 郑向丽, 赵婷, 等. 不同生育期花生叶片蛋白质含量及氮代谢相关酶活性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(1): 65—70.
- [15] Dechard E L. Nitrate reductase assays as prediction test for crosses and lines in spring wheat[J]. Crop Science, 1978, 18(21): 289—294.
- [16] 朱德群, 朱遐龄, 王雁, 等. 与冬小麦子粒蛋白质有关的几项生理参数[J]. 作物学报, 1991, 17(2): 135—144.
- [17] 胡润芳, 张广庆, 滕振勇, 等. 不同形态氮素对大豆硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性及蛋白质含量的影响[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(1): 31—35.
- [18] 孟维伟, 王东, 于振文. 施氮量对小麦氮代谢相关酶活性和子粒蛋白质品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 10—17.
- [19] 赵鹏, 何建国, 熊淑萍, 等. 氮素形态对专用小麦旗叶酶活性及子粒蛋白质和产量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2010, 15(3): 29—34.
- [20] 刘欢, 陈苗苗, 孙志梅, 等. 氮肥调控对小麦、玉米产量、氮素利用及农田氮素平衡的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(1): 237.
- [21] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 金正勋, 钱春荣, 杨静, 等. 水稻灌浆成熟期籽粒谷氨酰胺合成酶活性变化及其与稻米品质关系的初步研究[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(1): 103—106.
- [23] 吴良欢, 蒋式洪, 陶勤南. 植物转氨酶(GOT 和 GPT) 活度比色测定方法及其应用[J]. 土壤通报, 1998, 29(3): 41—43.
- [24] 张艳梅, 杨丽涛, 李翔, 等. 不同氮水平对三个甘蔗品种氮代谢关键酶活性及相关活性物质含量的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(5): 766—771.
- [25] 宗钊辉, 黄浩, 谢晋, 等. 基于 SPAD 值不同追施氮量对烤烟碳氮代谢与产质量的影响[J]. 江西农业学报, 2021, 33(2): 72—77+82.
- [26] 隽英华, 孙文涛, 韩晓日, 等. 春玉米土壤矿质氮累积及酶活性对施氮的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1368—1377.
- [27] Martin A, Lee J, Kichey T. Two cytosolic glutamine synthetase isoforms of maize are specifically involved in the control of grain production[J]. The Plant Cell, 2006, 18(11): 3252—3274.
- [28] 张智猛, 万书波, 戴良香, 等. 施氮水平对不同花生品种氮代谢及相关酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(2): 280—290.
- [29] 赵宪凤. 云南三地区烟草的代谢特征和差异分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2012.
- [30] 刘国顺, 赵春华, 叶协锋, 等. 氮素对烤烟烟苗蛋白质组分含量、硝酸还原酶活性和干物质积累量的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22(2): 71—74.
- [31] 赵吉平, 任杰成, 郭鹏燕, 等. 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.
- [32] 张弦, 苏豫梅, 高文伟, 等. 不同施氮水平对小麦旗叶氮素代谢相关酶活性的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2014, 37(4): 318.
- [33] 郭萍, 朱从桦, 查丽, 等. 缓释尿素与普通尿素不同配比对玉米氮代谢酶和氮素利用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(6): 99—105.
- [34] 孔令中, 孟瑶, 顾万荣, 等. 东北超高密度种植下氮肥对春玉米光合、氮代谢及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(3): 1020—1026.
- [35] Magalhães J R, Monte D C, Duzrna D. Nitrate oxide and ethylene emission in Arabidopsis thaliana[J]. Physiol Biol Plant, 2000, 6(2): 117—127.
- [36] 陈修斌, 蒋梦婷, 尹鑫, 等. 水氮配施对绿洲温室黄瓜氮素代谢及产量品质的影响[J]. 土壤与作物, 2021, 10(1): 79—90.

# Effects of nitrogen rates on yield and leaf nitrogen metabolism of *Leymus chinensis* grown in Horqin sand land

HOU Wen-hui<sup>1</sup>, ZHANG Yu-xia<sup>1</sup>, DU Xiao-yan<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>,  
BAO Qing-long<sup>2</sup>, CONG Bai-ming<sup>3</sup>

(1. Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028041, China; 2. Grassland Workstation of Chifeng City, Chifeng 024000, China; 3. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Science of Tongliao, Tongliao 028000, China)

**Abstract:** The application of reasonable amount of nitrogen fertilizer could increase the activity of key enzymes in nitrogen (N) metabolism, promote N accumulation and utilization and achieve high yield for *Leymus chinensis*. This study aimed to determine the appropriate level of nitrogen for *L. chinensis* in the Horqin sand land and its physiological mechanisms for high yield. Two sample plots were selected and topdressed with different levels of N fertilizer (pure N) at 0, 50, 100, 150, 200 kg/ha (denoted by N0, N1, N2, N3, and N4, respectively), using a randomized block design. The enzyme activities related to N metabolism and N content of the leaves were measured on 20th May, and the yield was measured on July 10. The results showed that *L. chinensis* yield, nitrate reductase (NR), glutamine synthetase (GS), glutamate oxaloacetate transaminase (GOT), glutamate pyruvate transaminase (GPT) activity and free amino acid (AA), and soluble protein (SP) content initially increased, followed by a decrease in response to the increasing N rates. Among them, NR, GS, GOT, GPT enzyme activity and AA content reached the maximum at the N3 level; the yield and SP content reaches its maximum at the N2 level. When topdressed with 150 kg/ha pure N fertilizer, *L. chinensis* grown in the Horqin sandy habitat had the strongest leaf N metabolism capacity, which was most beneficial to its dry matter accumulation.

**Key words:** *Leymus chinensis*; nitrogen fertilizer; nitrogen metabolism; yield