

DOI: 10.11686/cyxb2025188

http://cyxb.magtech.com.cn

马苹, 刘志国, 沙煜舒, 等. 紫花苜蓿苗期氮利用特性及氮高效品种的筛选. 草业学报, 2026, 35(4): 112—123.

MA Ping, LIU Zhi-guo, SHA Yu-shu, *et al.* Nitrogen utilization characteristics of alfalfa at the seedling stage and screening of nitrogen-efficient varieties. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(4): 112—123.

## 紫花苜蓿苗期氮利用特性及氮高效品种的筛选

马苹<sup>1,2</sup>, 刘志国<sup>1,2</sup>, 沙煜舒<sup>1,2</sup>, 刘亚玲<sup>1,2</sup>, 妥小梅<sup>1,2</sup>, 伏兵哲<sup>1,2</sup>, 高雪芹<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏 银川 750021; 2. 宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏 银川 750021; 3. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏 银川 750021)

**摘要:**本研究以20个紫花苜蓿品种为试验材料,通过低氮(20 mg·L<sup>-1</sup>)和正常氮(200 mg·L<sup>-1</sup>)处理,分析不同品种在生长特性、氮同化关键酶活性及氮利用效率等方面的差异,探究紫花苜蓿苗期的氮利用特性,并初步筛选氮高效品种。试验采用营养液水培法,以无氮Hoagland-Arnon营养液为基础,设置低氮(N<sub>20</sub>)和正常氮(N<sub>200</sub>)两个水平,对20个紫花苜蓿品种进行培养。测定株高、生物量、根长、根体积等生长指标,硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)活性等生理指标,以及全株氮含量、氮积累量和氮利用效率。通过相关性分析、多元线性回归和隶属函数法进行综合评价。结果表明:不同品种氮利用特性存在显著差异,在低氮(N<sub>20</sub>)条件下,不同紫花苜蓿品种的氮利用效率为2.71%~23.66%,品种标杆(MX13)表现出较高的生物量、发达的根系及较强的氮同化能力;品种北方SLT(MX9)表现出较低的生长性能及较低的氮同化能力。正常氮(N<sub>200</sub>)条件下,不同紫花苜蓿品种的氮利用效率为2.71%~22.36%,标杆(MX13)、岩石(MX16)、骑士2(MX19)的氮利用效率显著高于其他品种( $P < 0.05$ )。相关性分析显示,株高、根长、硝酸还原酶活性等指标与氮含量显著正相关,多元线性回归分析表明,氮利用效率受硝酸还原酶和地上生物量的显著影响,可用 $D = -8.390 + 0.487 \times X_8 + 0.476 \times X_2$ 回归方程进行预测。通过隶属函数法综合评价,品种熊岳(MX2)、耐盐之星(MX5)、雷达克之星(MX7)、标杆(MX13)、秘鲁(MX14)、骑士2(MX19)在N<sub>20</sub>和N<sub>200</sub>下综合值均大于0.50;皇冠(MX3)、岩石(MX16)、驯鹿(MX20)在N<sub>20</sub>条件下大于0.5,在N<sub>200</sub>条件下综合值小于0.5。经综合分析,筛选出氮高效型品种1个、常效型4个、低效型13个和反效型品种2个,研究结果为紫花苜蓿氮高效品种的选育及大田氮肥优化管理提供理论参考。

**关键词:**紫花苜蓿;氮利用效率;筛选;相关性分析;隶属函数分析

## Nitrogen utilization characteristics of alfalfa at the seedling stage and screening of nitrogen-efficient varieties

MA Ping<sup>1,2</sup>, LIU Zhi-guo<sup>1,2</sup>, SHA Yu-shu<sup>1,2</sup>, LIU Ya-ling<sup>1,2</sup>, TUO Xiao-mei<sup>1,2</sup>, FU Bing-zhe<sup>1,2</sup>, GAO Xue-qing<sup>1,2,3\*</sup>

1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021 China; 2. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China; 3. Innovation Key Laboratory of Efficient Production Mode of Local Forage in Agricultural and Rural Areas, Yinchuan 750021, China

**Abstract:** To screen nitrogen-efficient varieties of alfalfa, the nitrogen utilization characteristics of 20 alfalfa (*Medicago sativa*) varieties at the seedling stage were analyzed in a hydroponic experiment. The 20 varieties were grown in modified nitrogen-free Hoagland-Arnon nutrient solution supplemented with nitrogen at a low level (N<sub>20</sub>, 20 mg·L<sup>-1</sup>) or a normal level (N<sub>200</sub>, 200 mg·L<sup>-1</sup>). The growth traits, key nitrogen assimilation enzyme activities, and

收稿日期:2025-05-09;改回日期:2025-06-05

基金项目:国家草业技术创新中心(筹)(CCPTZX2023B04)资助。

作者简介:马苹(2000—),女,宁夏吴忠人,在读硕士。E-mail: 1828176931@qq.com

\* 通信作者 Corresponding author. E-mail: qinqin\_803@sina.com

nitrogen use efficiency (NUE) of the alfalfa plants were analyzed. The growth parameters determined were plant height, biomass, root length, and root volume; the physiological indices were nitrate reductase (NR) and glutamine synthetase (GS) activities, as well as whole-plant nitrogen content, nitrogen accumulation, and NUE. Correlation analysis, multiple linear regression analysis, and the membership function method were used to compare the performance of the 20 varieties. We detected significant differences in nitrogen utilization characteristics among the 20 varieties. Under low nitrogen ( $N_{20}$ ), the NUE of alfalfa varieties ranged from 2.71% to 23.66%. The variety 'Benchmark' (MX13) exhibited higher biomass, well-developed roots, and stronger nitrogen assimilation capacity, while 'Northern SLT' (MX9) showed weaker growth performance and a lower nitrogen assimilation ability. Under normal nitrogen ( $N_{200}$ ), the NUE of the varieties ranged from 2.71% to 22.36%, with 'Benchmark' (MX13), 'Rock' (MA16), and 'Knight 2' (MX19) demonstrating significantly higher NUE compared with those of the other varieties ( $P < 0.05$ ). Correlation analysis indicated that plant height, root length, and nitrate reductase activity were significantly positively correlated with nitrogen content. Multiple linear regression analysis revealed that NUE was significantly influenced by nitrate reductase activity and aboveground biomass. Using the membership function method for comprehensive evaluation, the varieties 'Xiongyue' (MX2), 'Salt-Tolerant Star' (MX5), 'Radak Star' (MX7), 'Benchmark' (MX13), 'Peru' (MX14), and 'Knight 2' (MX19) exhibited composite scores of  $> 0.50$  under both  $N_{20}$  and  $N_{200}$  conditions. In contrast, 'Crown' (MX3), 'Rock' (MX16), and 'Reindeer' (MX20) showed composite scores of  $> 0.50$  under  $N_{20}$  but  $< 0.50$  under  $N_{200}$ . Based on the comprehensive analysis, one high NUE variety, four normal NUE varieties, 13 low NUE varieties, and two nitrogen-inefficient varieties were identified. These findings provide a theoretical foundation for breeding nitrogen-efficient alfalfa varieties and optimizing nitrogen fertilizer management in field production.

**Key words:** alfalfa; nitrogen use efficiency; screening; correlation analysis; membership function analysis

紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 是世界上种植面积最大、范围最广的多年生豆科牧草,在我国已有两千多年的栽培历史<sup>[1]</sup>,其适口性好,营养价值高,富含蛋白质和微量元素<sup>[2]</sup>,且环境适应能力强,生产潜能大<sup>[3]</sup>。

氮是叶绿素的重要组成成分,可有效增强茎叶生长和根系发育,促进干物质的积累,在植物幼苗期发挥着重要作用<sup>[4]</sup>,作为豆科牧草,紫花苜蓿的生物固氮过程可为其生长发育提供氮素营养,但并不能完全满足其生长所需<sup>[5]</sup>,施氮能提升苜蓿产量和品质,但效应复杂,不同品种固氮能力不同,对施氮量的响应也不同<sup>[6]</sup>导致固氮与氮肥利用的协同性较差,影响生物量及氮素积累<sup>[7]</sup>,最终抑制苜蓿生长<sup>[8]</sup>。在粗放的苜蓿生产中,过量施氮的现象普遍存在<sup>[9]</sup>,已不能适应农业绿色可持续发展的要求。

关于作物氮高效种质的评价、筛选及氮高效机理的研究,前人已做了大量工作<sup>[10-13]</sup>。作物氮高效种质通常表现为高的生物产量(营养体、果实和籽粒)、氮浓度、氮积累量、叶数等<sup>[14-15]</sup>。有研究认为,包括根长和根体积在内的根系形态参数会影响作物地上部的生长和氮素吸收,进而影响氮利用效率的高低<sup>[16-17]</sup>。张鹏钰等<sup>[18]</sup>研究表明,低氮胁迫下,氮高效芝麻 (*Sesamum indicum*) 品种苗期具有较为发达的根系和较高的氮素同化、转运及再分配能力,从而获得较高的氮素积累量和氮利用效率。因此,生物量、根系参数和氮素积累是当前评价植物氮利用效率的常用参数。另外,在筛选时期的选择上研究者普遍认为,生育前期为作物对养分吸收的敏感时期,与成熟期的氮营养相关指标的性状存在显著相关性<sup>[19]</sup>,并且苗期试验周期短,适合对大规模材料进行氮利用效率初筛,苗期对作物进行氮利用效率的评价是简单、快速、可靠的科学方法。

因此,在减少氮肥施用量、提高氮肥利用率的基础上,研究不同氮素水平紫花苜蓿的生长状况、生理变化及氮素的吸收转运利用特性,可为紫花苜蓿氮利用效率遗传改良和大田养分调控优化提供理论基础。本研究以 20 个紫花苜蓿品种为试验材料,在 2 个供氮水平下研究了品种间氮利用效率差异特征及规律,筛选了氮高效品种,以期今后更好推广氮高效紫花苜蓿品种及开展农业育种研究工作提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试材料来自宁夏大学林业与草业试验基地种质资源圃保存的20个紫花苜蓿品种,且适宜在宁夏生长,农艺性状和品质综合表现优异,详情见表1。

表1 供试紫花苜蓿品种及来源

Table 1 Alfalfa varieties under study and their sources

编号 Code	品种 Variety	材料来源 Source of materials
MX1	甘农3号 Gannong 3	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
MX2	熊岳 Xiongyue	中国农业科学院草原所 Grassland Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences
MX3	皇冠 Crown	克劳沃(北京)生态科技有限公司 Crawford (Beijing) Ecological Technology Co., Ltd.
MX4	NY1	宁夏大学 Ningxia University
MX5	耐盐之星 Salt Tolerant Star	克劳沃(北京)生态科技有限公司 Crawford (Beijing) Ecological Technology Co., Ltd.
MX6	匈牙利 Hungary	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
MX7	雷达克之星 Star of Radacor	克劳沃(北京)生态科技有限公司 Crawford (Beijing) Ecological Technology Co., Ltd.
MX8	WL366HQ	北京正道 Beijing Zhengdao
MX9	北方 SLT North SLT	猛犸生物科技有限公司 Mammoth Biotech Co., Ltd.
MX10	猎人河 Hunter River	内蒙古农业大学 Inner Mongolia Agricultural University
MX11	公农1号 Gongnong 1	集宁 Jining
MX12	旱地 Dryland	克劳沃(北京)生态科技有限公司 Crawford (Beijing) Ecological Technology Co., Ltd.
MX13	标杆 Benchmark	北京正道生态科技有限公司 Beijing Zhengdao Ecological Technology Co., Ltd.
MX14	秘鲁 Peru	甘肃农业大学 Gansu Agricultural University
MX15	勇士 Warrior	宁夏草原工作站 Ningxia Grassland Station
MX16	岩石 Rock	宁夏草原工作站 Ningxia Grassland Station
MX17	巨能6 Giant 6	克劳沃(北京)生态科技有限公司 Crawford (Beijing) Ecological Technology Co., Ltd.
MX18	劲能 Jinneng	宁夏彭阳草原工作站 Ningxia Pengyang Grassland Station
MX19	骑士2 Knight 2	宁夏草原工作站 Ningxia Grassland Station
MX20	驯鹿 Reindeer	克劳沃(北京)生态科技有限公司 Crawford (Beijing) Ecological Technology Co., Ltd.

### 1.2 试验设计

本试验于2024年在宁夏大学贺兰山校区科技楼进行。挑选饱满健康且大小均一的紫花苜蓿种子,置于95%乙醇中灭菌5 min,用蒸馏水漂洗干净后,将种子均匀铺在垫有两层湿润滤纸的培养皿(直径为90 mm)中,每个品种4个培养皿,在25℃/18℃(白天/黑夜),14 h/10 h(光/暗)、相对湿度60%、光照强度为 $160 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的恒温培养箱中进行培养。萌发7~10 d后(幼苗长至3 cm高),选取形态基本一致的幼苗用Hoagland-Arnon营养液培养。长至15 cm高时,以无氮改良Hoagland-Arnon营养液(表2)为基本营养液,以 $\text{NH}_4\text{NO}_3$ 为氮源,进行不同氮水平的处理,设置前期本团队筛选的低氮( $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )、正常氮( $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )两个水平,分别用 $\text{N}_{20}$ 、 $\text{N}_{200}$ 表示。20个紫花苜蓿品种,共40个处理,每个处理重复3次,每周更换1次营养液,培养40 d后观测相关指标。

表2 无氮Hoagland-Arnon营养液配方

Table 2 Nitrogen-free Hoagland-Arnon nutrient solution formula

试剂 Reagent	浓度 Concentration ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )	试剂 Reagent	浓度 Concentration ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )
$\text{CaCl}_2$	444	$\text{H}_3\text{BO}_3$	6.2
$\text{K}_2\text{SO}_4$	435	$\text{MnSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$	16.9
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	136	$\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	8.6
$\text{MgSO}_4$	241	$\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.25
FeNaEDTA	36.7	$\text{CuSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$	0.025
KI	0.83	$\text{CoCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.025

### 1.3 指标测定与方法

**1.3.1 生长特性指标的测定** 各处理随机选取10株,用直尺测量植株绝对高度(株高),各处理重复3次。将植株冲洗干净后,用滤纸吸去多余水分,每个处理随机选取10株,将地上部分和地下部分分离,进行生物量称重。对鲜样进行105℃杀青15 min,在75℃烘干称其干重,重复3次。采用EPSON Expression扫描仪(10000XL,杭州)和Win RHIZO分析系统测定根系总长度和根体积,每个处理随机选取10株地下部分,重复3次。

**1.3.2 生理特性指标的测定** 采用元素分析仪(vario MACRO cube+rapid OXY cube®,德国)测定全株氮含量。每个处理随机选取10株,烘干粉碎后进行测量,重复3次。

氮素的吸收和利用效率的相关指标按以下公式计算<sup>[20]</sup>：

$$\text{氮积累量(mg)} = \text{氮含量} \times \text{全株干重}$$

$$\text{氮利用效率(\%)} = \text{氮积累量} / \text{供氮量} \times 100$$

参考邹琦<sup>[21]</sup>的方法测定硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶活性。

### 1.4 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2019进行数据处理,利用IBA SPSS Statistics 26进行数据统计分析,并通过Origin 2024制图,采用隶属函数法将紫花苜蓿各指标进行综合评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 紫花苜蓿在不同氮处理下苗期的生长特性

紫花苜蓿在低氮和正常氮条件下各生长性能存在差异(表3)。低氮水平下,不同紫花苜蓿品种的株高为19.10~25.63 cm,地上、地下生物量平均分别为367.18、229.18 mg·株<sup>-1</sup>,地上、地下干重平均分别为55.67、16.30 mg·株<sup>-1</sup>,总根长、根体积平均分别为263.20 cm、0.33 cm<sup>3</sup>,与正常氮相比,低氮处理下的株高、生物量、干物质、总根长、根体积均降低,仅为正常氮处理的71.29%,其中干物质低氮处理占正常氮处理的占比最小,为46%,根体积低氮处理占正常氮处理最大,为91%。在低氮条件下,标杆(MX13)的生长性能均最高,北方SLT(MX9)的生长性能较低;在正常氮条件下,甘农3号(MX1)、熊岳(MX2)、皇冠(MX3)、雷达克之星(MX7)、标杆(MX13)的地下干重均高于其他品种,北方SLT(MX9)的地上生物量、总根长、根体积相对较低。

### 2.2 紫花苜蓿氮同化关键酶对不同氮处理的响应

紫花苜蓿在不同氮条件下氮同化关键酶活性均存在差异。低氮(N<sub>20</sub>)处理下,不同紫花苜蓿品种的硝酸还原酶活性在8.16~14.69 μg·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>,谷氨酰胺合成酶含量为0.05~0.10 μg·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>,仅为正常氮处理的56.38%,谷氨酰胺占正常氮处理的61.18%。在低氮处理下,标杆(MX13)的硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性均显著高于其他品种;在正常氮条件下,熊岳(MX2)的硝酸还原酶活性显著高于其他品种,雷达克之星(MX9)和勇士(MX15)的硝酸还原酶活性显著低于其他品种(表4)。

### 2.3 紫花苜蓿在不同氮处理下的氮利用特性

在低氮条件下,不同紫花苜蓿全株氮含量、氮素积累量、氮利用效率分别为1.06%~3.93%、0.54~4.47 mg·株<sup>-1</sup>、2.71%~22.36%(表5),与正常氮相比,氮含量、氮素积累量均下降,分别为正常氮的56.38%、20.78%,氮利用效率为正常氮的2.08倍。标杆(MX13)在低氮和正常氮条件下全株氮含量、氮素积累量均显著高于其他品种,标杆(MX13)、岩石(MX16)、骑士2(MX19)在低氮条件下的氮利用效率显著高于其他品种。

### 2.4 紫花苜蓿氮利用特性的相关性分析

通过分析12个紫花苜蓿性状在不同氮素处理下的相关性发现,低氮条件下,株高、总根长、根体积、硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶与全株氮含量呈显著相关,且株高、地上生物量、总根长、根体积、硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶与全株氮含量呈极显著正相关;正常氮条件下,各个指标与全株氮含量都呈正相关关系,其中硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶与全株氮含量呈极显著相关,相关系数分别为0.73和0.81(图1)。

### 2.5 紫花苜蓿氮利用效率的回归分析

为建立一套比较全面、相对准确的紫花苜蓿氮利用效率的指标评价体系,把不同基因型紫花苜蓿的氮利用效

表3 不同紫花苜蓿品种在不同氮水平下生长特性的差异

Table 3 Differences in growth characteristics of different alfalfa varieties under different nitrogen levels

编号 No.	株高 Plant height (cm)	生物量 Biomass (mg·plant <sup>-1</sup> )		干重 Dry weight (mg·plant <sup>-1</sup> )		总根长 Total root length (cm)	根体积 Root volume (cm <sup>3</sup> )
		地上 Aboveground	地下 Underground	地上 Aboveground	地下 Underground		
N <sub>20</sub> MX1	23.80±0.80ab	345.33±34.78cd	289.00±11.14bc	52.53±0.70bcd	23.60±3.12ab	196.17±34.84ghi	0.35±0.02ab
N <sub>20</sub> MX2	25.63±0.12a	364.00±36.29cd	307.33±11.24b	53.69±0.75bcd	22.87±3.45abc	379.83±8.45ab	0.38±0.08ab
N <sub>20</sub> MX3	23.53±0.95abc	340.67±34.21cd	291.67±10.69bc	69.05±29.79ab	24.07±1.40a	284.57±8.45cde	0.26±0.04ab
N <sub>20</sub> MX4	20.37±1.36def	267.33±26.84efg	229.33±8.62efg	39.73±3.86cd	14.33±0.76def	222.84±8.45efghi	0.31±0.08ab
N <sub>20</sub> MX5	23.90±0.44ab	359.33±35.73cd	229.30±6.84efg	56.73±1.15bc	13.67±0.42def	323.97±15.65bc	0.40±0.10ab
N <sub>20</sub> MX6	21.63±0.80cdef	308.00±31.00def	264.67±9.71cd	43.73±3.36cd	18.00±0.72bcd	271.01±8.45cdef	0.34±0.09ab
N <sub>20</sub> MX7	24.73±0.72ab	262.67±26.27efg	304.67±11.68b	39.33±4.11cd	24.87±0.42a	374.11±15.65ab	0.39±0.10ab
N <sub>20</sub> MX8	20.43±1.65cdef	319.33±32.13cdef	246.00±9.17de	48.13±3.75bcd	15.33±0.90de	253.70±12.25defg	0.39±0.10ab
N <sub>20</sub> MX9	19.10±0.95f	205.00±20.42g	163.67±6.11i	30.67±2.16d	9.80±0.40ef	164.48±30.20i	0.21±0.05b
N <sub>20</sub> MX10	20.27±1.02def	387.00±38.94c	215.00±8.19fg	57.87±4.09bc	14.47±0.50def	243.22±13.09defgh	0.27±0.07ab
N <sub>20</sub> MX11	22.80±0.78abcd	321.67±32.52cdef	181.33±6.66hi	48.07±3.53bcd	13.40±0.60def	283.15±32.32cde	0.34±0.09ab
N <sub>20</sub> MX12	19.43±1.71ef	256.00±25.71fg	208.33±7.64gh	38.33±2.73cd	13.80±0.35def	186.90±13.09hi	0.28±0.07ab
N <sub>20</sub> MX13	25.73±0.40a	594.00±46.03a	344.00±12.77a	88.27±6.17a	25.40±3.70a	390.20±8.45a	0.48±0.06a
N <sub>20</sub> MX14	23.60±0.75ab	349.33±27.21cd	259.67±9.71d	51.80±3.49bcd	17.27±0.70cd	273.43±13.09cdef	0.35±0.09ab
N <sub>20</sub> MX15	19.87±1.66def	330.33±25.48cde	129.67±5.13j	49.07±3.37bcd	9.20±1.04f	169.85±8.45i	0.24±0.06ab
N <sub>20</sub> MX16	22.37±0.49bcde	576.67±44.88a	129.00±4.58j	85.60±5.92a	9.80±0.80ef	293.92±17.77cd	0.36±0.09ab
N <sub>20</sub> MX17	19.13±0.15f	358.00±27.78cd	224.67±8.08efg	53.33±3.95bcd	17.53±1.29cd	168.62±8.45i	0.26±0.03ab
N <sub>20</sub> MX18	20.03±1.08def	349.33±27.21cd	240.00±9.17def	51.80±3.49bcd	16.80±1.74d	211.67±8.45fghi	0.26±0.07ab
N <sub>20</sub> MX19	23.93±0.76ab	571.00±44.31a	212.00±8.19fg	84.73±5.69a	12.87±3.52def	294.99±47.24cd	0.35±0.09ab
N <sub>20</sub> MX20	22.03±1.42bcdef	478.67±37.07b	114.33±4.04j	71.13±5.00ab	8.93±1.10f	368.57±17.85ab	0.39±0.10ab
N <sub>200</sub> MX1	28.43±1.79abc	564.33±54.23abcde	402.67±23.67ab	78.27±23.71bcde	78.80±6.52a	388.98±4.42a	0.37±0.07abc
N <sub>200</sub> MX2	31.87±1.22a	629.67±60.92abc	432.00±23.00a	107.20±17.34abcd	79.07±7.57a	378.80±12.25a	0.37±0.10abc
N <sub>200</sub> MX3	27.63±0.86abc	504.00±48.57abcdef	396.33±24.00ab	85.60±14.4bcde	70.20±4.36abcd	329.17±8.45bc	0.27±0.07bc
N <sub>200</sub> MX4	25.17±0.25bc	490.67±47.39bcdefg	296.33±14.33cde	88.93±0.46bcde	65.73±1.42cdefg	274.18±9.51de	0.37±0.06abc
N <sub>200</sub> MX5	28.53±1.53abc	627.33±60.74abc	294.33±13.67cde	100.60±10.26abcde	66.93±2.20cdefg	303.56±3.39cd	0.46±0.07ab
N <sub>200</sub> MX6	26.97±0.81abc	433.67±41.88cdefgh	340.00±18.00bc	147.27±60.64a	68.67±0.92bcde	388.77±15.55a	0.45±0.07ab
N <sub>200</sub> MX7	31.50±0.44a	628.33±60.74abc	390.33±24.67ab	96.74±13.48abcde	77.00±2.16ab	290.98±8.45cd	0.45±0.07ab
N <sub>200</sub> MX8	25.57±1.77bc	345.33±33.20fgh	319.00±15.00cd	57.80±9.34cde	73.53±2.81abc	176.89±18.65g	0.45±0.07ab
N <sub>200</sub> MX9	24.93±1.07bc	268.67±25.87h	214.00±9.67fgh	44.20±4.45e	60.60±3.47defg	273.86±9.93de	0.24±0.04c
N <sub>200</sub> MX10	25.07±0.46bc	353.00±34.04fgh	278.67±14.33cdef	59.27±10.13cde	67.40±1.39bcdef	323.76±16.53c	0.32±0.05abc
N <sub>200</sub> MX11	28.10±2.36bc	504.33±48.72abcdef	237.00±13.33efg	88.67±16.9bcde	63.93±0.50cdefg	221.52±18.99f	0.39±0.06abc
N <sub>200</sub> MX12	24.13±0.84c	289.67±27.87gh	271.00±13.67cdef	51.73±14.63de	65.00±1.31cdefg	410.47±9.75a	0.30±0.05bc
N <sub>200</sub> MX13	28.67±5.17abc	701.00±13.89a	442.00±25.67a	114.40±18.2abc	78.87±1.30a	233.63±6.22ef	0.51±0.08a
N <sub>200</sub> MX14	29.63±1.69ab	412.33±8.11defgh	395.67±17.33ab	63.53±4.94bcde	76.80±0.92ab	244.51±25.49ef	0.37±0.06abc
N <sub>200</sub> MX15	25.15±0.05bc	389.33±7.54efgh	191.67±9.33gh	66.13±1.90bcde	59.07±0.92efg	314.59±17.73cd	0.31±0.05bc
N <sub>200</sub> MX16	27.27±1.23abc	612.00±12.17abcd	165.67±10.00h	102.33±6.27abcd	58.47±2.76fg	243.80±8.45ef	0.27±0.04bc
N <sub>200</sub> MX17	24.90±0.89bc	334.00±6.66fgh	287.67±17.67cde	50.60±2.27de	65.93±1.60cdefg	209.99±9.20fg	0.28±0.03bc
N <sub>200</sub> MX18	24.93±0.80bc	412.33±8.11defgh	210.67±17.00fgh	65.20±1.59bcde	60.87±1.42defg	315.56±12.57cd	0.30±0.05bc
N <sub>200</sub> MX19	29.40±0.62abc	674.00±13.32ab	266.67±13.00def	119.07±3.50ab	64.20±1.64cdefg	272.83±12.57de	0.38±0.06abc
N <sub>200</sub> MX20	26.63±0.40abc	519.00±10.44abcdef	166.67±8.67h	84.00±1.11bcde	57.53±0.70g	368.57±17.85ab	0.41±0.06abc

注: 同列不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。下同。Note: Different letters in the same column indicate significant differences ( $P<0.05$ ). The same below.

表 4 不同紫花苜蓿品种硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶活性在不同氮素水平下的差异

Table 4 Differences of nitrate reductase and glutamine synthetase activities in different alfalfa varieties under different nitrogen levels

编号 No.	NR ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )		GS ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )	
	N <sub>20</sub>	N <sub>200</sub>	N <sub>20</sub>	N <sub>200</sub>
MX1	12.03±0.30de	19.07±0.15ef	0.04±0.002cde	0.06±0.014ab
MX2	13.12±0.26b	23.01±0.16a	0.05±0.003ab	0.09±0.020ab
MX3	11.81±0.30e	16.34±0.11h	0.05±0.003ab	0.06±0.014ab
MX4	9.79±0.20gh	14.10±0.10i	0.04±0.002cd	0.07±0.015ab
MX5	12.78±0.25bcd	19.61±0.13cd	0.05±0.003ab	0.09±0.020ab
MX6	10.06±0.20fg	17.92±0.15g	0.05±0.003bc	0.07±0.015ab
MX7	13.00±0.27bc	19.96±0.13c	0.05±0.003ab	0.09±0.020ab
MX8	10.81±0.22f	16.58±0.11h	0.05±0.003ab	0.09±0.020ab
MX9	8.21±0.17j	12.60±0.09kl	0.03±0.002e	0.05±0.012abc
MX10	9.18±0.19hi	14.10±0.10i	0.04±0.002cde	0.06±0.014ab
MX11	12.35±0.25cde	18.95±0.13ef	0.05±0.003b	0.08±0.018ab
MX12	8.43±0.17ij	12.95±0.09jk	0.03±0.002de	0.05±0.012abc
MX13	14.69±0.30a	22.55±0.15b	0.06±0.003a	0.10±0.023a
MX14	12.56±0.25bede	19.27±0.13de	0.05±0.003ab	0.09±0.019ab
MX15	8.16±0.17j	12.53±0.09l	0.03±0.002de	0.06±0.013abc
MX16	12.36±0.25bede	18.96±0.13ef	0.05±0.003ab	0.09±0.019ab
MX17	8.23±0.17j	12.64±0.09kl	0.03±0.002de	0.05±0.011abc
MX18	8.64±0.18ij	13.26±0.09j	0.03±0.002de	0.06±0.013bc
MX19	12.89±0.26bc	19.78±0.13c	0.05±0.003ab	0.06±0.014c
MX20	12.24±0.25cde	18.79±0.13f	0.05±0.003b	0.09±0.019c

NR: 硝酸还原酶 Nitrate reductase; GS: 谷氨酰胺合成酶 Glutamine synthetase; 下同 The same below.

率( $D$ )作因变量,以不同氮水平下紫花苜蓿生长指标、关键酶指标、氮含量作为自变量,进行线性逐步回归分析,剔除回归系数不显著( $P>0.05$ )的因子,得到紫花苜蓿氮利用效率方程(表 6):  $D=-8.390+0.487X_3+0.476X_2$ ,相关系数  $r$  为 0.912,  $R^2$  为 0.813,表明回归方程中 2 个自变量可决定  $D$  值总变异的 81.3%。

## 2.6 紫花苜蓿氮利用效率类型的划分

通过对不同品种在低氮( $N_{20}$ )和正常氮( $N_{200}$ )条件下归一化后的氮利用效率数据进行划分(图 2),可将紫花苜蓿分为 4 类:高效型,标杆(MX13)在  $N_{20}$  和  $N_{200}$  下归一化后的氮利用效率均  $>0.5$ ;常效型,熊岳(MX2)、匈牙利(MX6)、雷达克之星(MX7)、公农 1 号(MX11)在  $N_{20}$  条件下归一化后的氮利用效率  $<0.5$ ,在  $N_{200}$  条件下  $>0.5$ ;低效型,甘农 3 号(MX1)、皇冠(MX3)、NY1(MX4)、耐盐之星(MX5)、WL366HQ(MX8)、北方 SLT(MX9)、猎人河(MX10)、旱地(MX12)、秘鲁(MX14)、勇士(MX15)、巨能 6(MX17)、劲能(MX18)、驯鹿(MX20)在  $N_{20}$  和  $N_{200}$  条件下综合值均  $<0.5$ ;反效型,岩石(MX16)和骑士 2(MX19)在  $N_{20}$  条件下归一化后的氮利用效率  $>0.5$ ,在  $N_{200}$  条件下  $<0.5$ (图 2)。

## 2.7 隶属函数综合分析

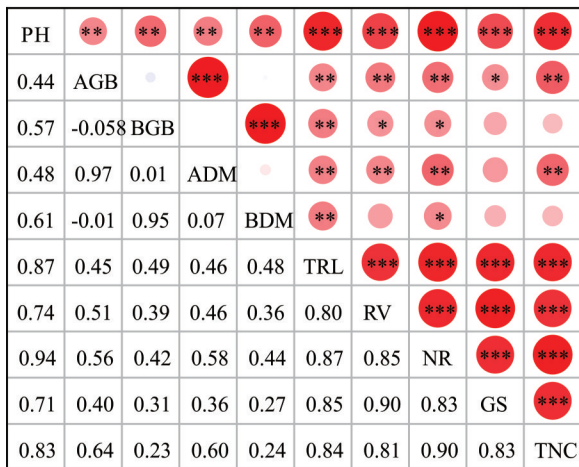
通过客观赋权得到评价指标的权重值(表 7)。通过隶属函数法和复合运算得到不同紫花苜蓿品种的氮利用效率综合指数(表 8)。在低氮( $N_{20}$ )条件下,熊岳(MX2),标杆(MX13)的隶属函数综合指数  $>0.70$ ,北方 SLT(MX9)、旱地(MX12)、勇士(MX15)低于 0.20;在正常氮( $N_{200}$ )条件下,熊岳(MX2)、雷达克之星(MX7)与标杆(MX13)的隶属函数综合指数高于 0.70,北方 SLT(MX9)、旱地(MX12)的隶属函数综合指数低于 0.20。

表5 不同紫花苜蓿品种在不同氮素水平下氮利用特性比较

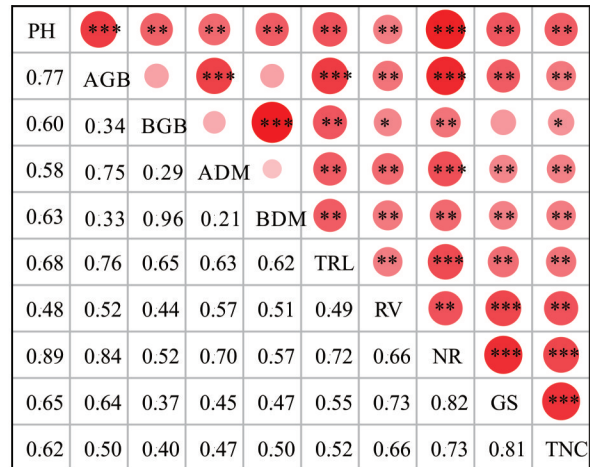
Table 5 Differences in nitrogen utilization of alfalfa under different nitrogen levels

编号 No.	全株氮含量 TNC (%)		氮素积累量 NA (mg·plant <sup>-1</sup> )		氮利用效率 NUE (%)	
	N <sub>20</sub>	N <sub>200</sub>	N <sub>20</sub>	N <sub>200</sub>	N <sub>20</sub>	N <sub>200</sub>
MX1	1.63±0.00g	3.61±0.00h	1.24±0.00fg	5.68±0.00hij	6.21±0.31fg	2.84±0.42hig
MX2	2.87±0.01b	5.93±0.01d	2.19±0.01c	11.04±0.01cd	10.97±0.42c	5.52±0.46cd
MX3	1.54±0.02h	2.46±0.02j	1.44±0.02ef	3.82±0.02jk	7.20±2.48ef	1.91±0.23jk
MX4	1.41±0.01i	3.57±0.01hi	0.76±0.01hi	5.52±0.01hij	3.80±0.28hi	2.76±0.02hij
MX5	2.74±0.02cdef	3.60±0.02h	1.93±0.02cd	6.03±0.02hi	9.66±0.17cd	3.01±0.19hi
MX6	1.52±0.00h	5.71±0.00e	0.94±0.00gh	12.35±0.00bc	4.70±0.30gh	6.17±1.78bc
MX7	2.79±0.01cd	7.96±0.01b	1.79±0.01d	13.83±0.01b	8.95±0.65d	6.92±0.62b
MX8	1.58±0.02gh	5.78±0.02e	1.00±0.02gh	7.59±0.02fgh	5.01±0.35gh	3.80±0.35fgh
MX9	1.34±0.00j	3.52±0.00i	0.54±0.00i	3.69±0.00jk	2.71±0.12i	1.84±0.03jk
MX10	1.12±0.01k	4.62±0.01g	0.81±0.01hi	5.85±0.01hij	4.05±0.25hi	2.93±0.22hij
MX11	2.68±0.11f	6.94±0.11c	1.65±0.11de	10.60±0.11cde	8.25±0.73de	5.30±0.59cde
MX12	1.06±0.00l	2.50±0.00j	0.55±0.00i	2.92±0.00k	2.77±0.14i	1.46±0.17k
MX13	3.93±0.02a	9.21±0.02a	4.47±0.02a	17.80±0.02a	22.36±1.99a	8.90±0.89a
MX14	2.74±0.01def	6.94±0.01c	1.89±0.01cd	9.74±0.01def	9.46±0.44cd	4.87±0.15ef
MX15	1.36±0.00ij	3.50±0.00i	0.79±0.00hi	4.39±0.00ijk	3.97±0.30hi	2.19±0.04ijk
MX16	2.79±0.01cd	5.89±0.01d	2.67±0.01b	9.47±0.01def	13.33±0.75b	4.73±0.25def
MX17	1.34±0.04j	2.47±0.04j	0.95±0.04gh	2.88±0.04k	4.76±0.34gh	1.44±0.05k
MX18	1.37±0.00ij	2.46±0.00j	0.94±0.00gh	3.11±0.00k	4.69±0.36gh	1.55±0.04k
MX19	2.80±0.00c	4.69±0.00f	2.73±0.00b	8.60±0.00efg	13.64±0.74b	4.30±0.11efg
MX20	2.71±0.00ef	4.62±0.00fg	2.17±0.00c	6.55±0.00ghi	10.83±0.74c	3.27±0.03gh

TNC: 全株氮含量 Whole plant nitrogen content; NA: 氮素积累量 Nitrogen accumulation; NUE: 氮利用效率 Nitrogen use efficiency. 下同 The same below.



N<sub>20</sub>下各指标的相关性  
Correlation analysis of various parameters under N<sub>20</sub> treatment



N<sub>200</sub>下各指标的相关性  
Correlation analysis of various parameters under N<sub>200</sub> treatment

图1 不同氮素水平下苗期各指标间的相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis of each index of alfalfa seedling stage under different nitrogen levels

PH: 株高 Plant height; AGB: 地上生物量 Aboveground biomass; BGB: 地下生物量 Underground biomass; ADM: 地上干物质 Aboveground dry matter; BDM: 地下干物质 Underground dry matter; TRL: 总根长 Total root length; RV: 根体积 Root volume; NR: 硝酸还原酶 Nitrate reductase; GS: 谷氨酰胺合成酶 Glutamine synthetase; TNC: 全株氮含量 Whole plant nitrogen content; 下同 The same below. \*: P<0.05; \*\*: P<0.01; \*\*\*: P<0.001.

表 6 不同氮水平下紫花苜蓿氮利用效率线性回归

Table 6 Multiple linear regression analysis of alfalfa nitrogen use efficiency under different nitrogen levels

保留变量 Retain variable	系数 Coefficient	显著性 Significance	VIF	r	R <sup>2</sup>	剔除变量 Remove variable
常量 Constant	-8.390			0.912	0.813	X <sub>1</sub> 、X <sub>3</sub> 、X <sub>4</sub> 、X <sub>5</sub> 、X <sub>6</sub> 、X <sub>7</sub> 、X <sub>9</sub> 、X <sub>10</sub>
硝酸还原酶 NR (X <sub>8</sub> )	0.487	0.009	2.724			
地上生物量 AGB (X <sub>2</sub> )	0.476	0.010	2.724			

X<sub>1</sub>: 株高 Plant height; X<sub>2</sub>: 地上生物量 Aboveground biomass; X<sub>3</sub>: 地下生物量 Underground biomass; X<sub>4</sub>: 地上干物质 Aboveground dry matter; X<sub>5</sub>: 地下干物质 Underground dry matter; X<sub>6</sub>: 总根长 Total root length; X<sub>7</sub>: 根体积 Root volume; X<sub>8</sub>: 硝酸还原酶 Nitrate reductase; X<sub>9</sub>: 谷氨酰胺合成酶 Glutamine synthetase; X<sub>10</sub>: 全株氮含量 Whole plant nitrogen content.

### 3 讨论

在育种工作中,筛选具有高效氮素利用特性的作物品种具有双重意义:既能有效降低农业生产中的氮肥施用量,又能显著提升作物的氮素利用效率,这一直是品种改良工作的重要研究方向<sup>[22-23]</sup>。本研究采用两种氮水平(20 mg·L<sup>-1</sup>低氮和 200 mg·L<sup>-1</sup>正常氮)处理,对 20 个紫花苜蓿品种的氮素利用特性进行了系统评估。研究结果显示,不同基因型紫花苜蓿在氮素吸收、同化和利用效率方面表现出明显的基因型差异。标杆(MX13)氮高效品种在低氮胁迫环境下仍能维持较高的地上部生物量积累,同时形成发达的根系结构并保持活跃的氮同化酶系统,这一发现与前人<sup>[24-25]</sup>的研究结论相吻合。更为重要的是,氮高效品种在正常氮供应条件下同样表现出优异的氮素利用

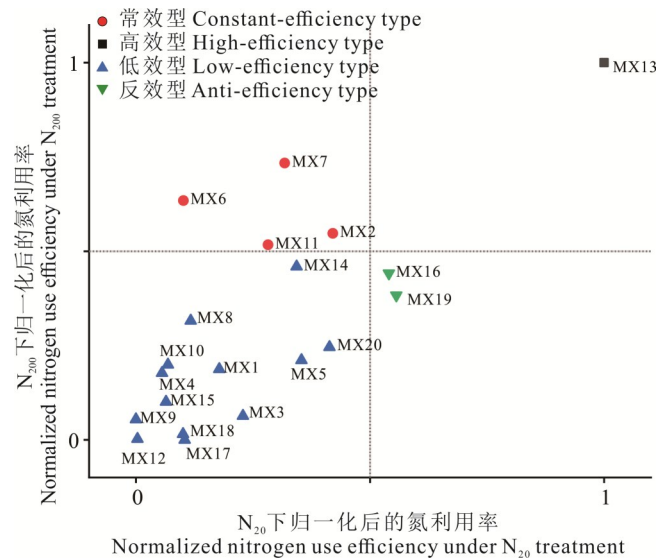


图 2 紫花苜蓿氮利用效率类型划分

Fig. 2 Classification of nitrogen efficiency of alfalfa

表 7 不同氮水平下紫花苜蓿各评价指标的变异系数和权重

Table 7 The variable coefficient and weight of each evaluation index of alfalfa under different nitrogen levels

氮水平 N level	指标 Parameter	PH	AGB	BGB	BDM	TRL	RV	NR	GS	TNC	NA	NUE
N <sub>20</sub>	变异系数 Variable coefficient	0.10	0.29	0.28	0.33	0.26	0.20	0.18	0.20	0.40	0.61	0.61
	权重 Weight	0.03	0.08	0.07	0.09	0.07	0.05	0.05	0.05	0.11	0.16	0.16
N <sub>200</sub>	变异系数 Variable coefficient	0.08	0.28	0.29	0.11	0.22	0.21	0.20	0.22	0.41	0.54	0.54
	权重 Weight	0.02	0.08	0.09	0.09	0.03	0.07	0.06	0.06	0.06	0.12	0.16

表 8 不同氮水平下紫花苜蓿氮利用效率隶属函数综合指数

Table 8 Comprehensive index of membership function of nitrogen efficiency of alfalfa under different nitrogen levels

编号 No.	N <sub>20</sub>	N <sub>200</sub>	编号 No.	N <sub>20</sub>	N <sub>200</sub>	编号 No.	N <sub>20</sub>	N <sub>200</sub>	编号 No.	N <sub>20</sub>	N <sub>200</sub>
MX1	0.44	0.56	MX6	0.36	0.54	MX11	0.47	0.51	MX16	0.58	0.44
MX2	0.70	0.76	MX7	0.65	0.75	MX12	0.14	0.20	MX17	0.23	0.22
MX3	0.50	0.45	MX8	0.38	0.48	MX13	0.92	0.85	MX18	0.26	0.21
MX4	0.27	0.40	MX9	0.03	0.13	MX14	0.55	0.56	MX19	0.65	0.54
MX5	0.58	0.55	MX10	0.26	0.31	MX15	0.13	0.22	MX20	0.51	0.41

性能,表明其氮高效特性具有环境稳定性。与此形成鲜明对比的是,甘农3号(MX1)和皇冠(MX3)等低效型品种在低氮环境中表现出明显的生长抑制,反映出其对氮素胁迫的适应能力较为有限。在低氮环境下,根部通过调节根长、根表面积、侧根数量等增加对氮的吸收,并将氮运输到植物体各部位以维持植物体的生长发育,氮被用来进行光合作用,或被酶进行还原,参与植物体代谢及其他生命体所需物质的合成等<sup>[26-28]</sup>。由此可见,如何在低氮条件下维持植物的正常生长发育是非常必要的。

相关性分析表明,在低氮条件下,株高、总根长、根体积、硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)与全株氮含量呈显著正相关(图1)。其中,NR和GS与氮含量的极显著相关性进一步验证了氮同化酶在氮利用效率中的关键作用。这一结果与张鹏钰等<sup>[18]</sup>的研究相符,即氮高效品种通过发达的根系和活跃的氮代谢酶系统提升氮素吸收和利用效率。此外,根系形态参数(如总根长和根体积)与氮含量的强相关性( $r>0.7$ )表明,根系构型优化是紫花苜蓿适应低氮环境的重要策略<sup>[16-17]</sup>。变异系数(CV)反映了各指标在不同品种间的变异程度。在低氮条件下,氮积累量(NA)和氮利用效率(NUE)的变异系数均高达0.61,表明这两个指标对氮胁迫的响应最为敏感,能够有效区分不同品种的氮利用效率差异。此外,NR和GS的变异系数分别为0.18和0.20,说明氮同化关键酶的活性在不同品种间也存在显著差异。权重分析进一步显示,NR和GS在氮利用效率评价中具有较高权重(分别为0.09和0.08),表明它们在氮代谢中的核心作用。通过回归分析构建了氮含量预测模型,不同氮条件下的回归方程解释了81.3%的变异,表明硝酸还原酶、根体积等指标在氮利用效率评价中具有重要作用。

不同氮利用效率类型的紫花苜蓿具有不同的生理特点。氮素的供应水平直接影响植物的生长速率和形态建成<sup>[29]</sup>。在低氮条件下,植物通常表现出生长迟缓、叶片黄化(缺氮症状)和生物量降低。本研究中紫花苜蓿在低氮( $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )条件下的株高和生物量显著低于正常氮( $200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )处理。氮素的供应水平不仅影响植物的总生物量,还会改变生物量在地上部和地下部的分配比例<sup>[25]</sup>。低氮胁迫下,植物会将有限的氮素优先分配给根系,以增强氮素的吸收能力,因此根系与地上部的比例(根冠比)往往增加。本研究显示,标杆(MX13)在低氮条件下表现出较长的根长和较高的根体积,说明其通过调节根系形态适应低氮环境,而在正常或高氮条件下,植物的生长速率和生物量积累通常显著提高,紫花苜蓿在正常氮条件下株高增加30%~40%,地上生物量提高50%以上,这与刘德明等<sup>[30]</sup>的研究一致。低氮条件下,植物倾向于将更多资源分配给根系,以扩大氮素吸收面积(本研究中紫花苜蓿在低氮条件下的地下生物量占比显著高于正常氮条件)。

氮素的吸收、同化和再利用是植物氮代谢的核心过程<sup>[31]</sup>。在植物的氮素同化过程中,需要许多氮转运酶参与。本研究表明,适量施加氮肥可以提高氮代谢酶活性,而过量施加氮肥则会抑制酶活性。Singh等<sup>[32]</sup>、黄高宝等<sup>[33]</sup>、张瑞珍等<sup>[34]</sup>均研究发现低氮胁迫导致GS活性降低,但氮高效基因型仍能保持较高的GS活性。低氮条件下,植物会激活氮素高效吸收和同化机制<sup>[35]</sup>,本研究中标杆(MX13)在低氮条件下的NR和GS活性显著高于其他品种,表明其具有较强的氮同化能力。多数研究<sup>[36-38]</sup>认为,在一定范围内增加施氮量会降低NUE,也有研究<sup>[39]</sup>认为增加施氮量会增加NUE。本研究发现,随着施氮量的增加,NUE逐渐降低。低氮条件会显著抑制植物的氮素吸收速率。在低氮环境下,植物会启动一系列适应性反应来维持氮素吸收。本研究表明,紫花苜蓿在 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的低氮条件下,其氮素积累量仅为正常氮条件下的27%~45%。这种吸收抑制主要源于两个方面:一是介质中有效氮浓度降低,直接减少了植物根系的接触机会;二是低氮胁迫会抑制硝酸盐转运蛋白(如NRT1.1、NRT2.1等)的表达和活性。

植物氮素利用效率的差异主要受遗传背景和环境因素的共同调控<sup>[40]</sup>,研究表明,氮素在根系吸收后,需要通过特定的转运蛋白系统完成跨膜运输过程,这些转运蛋白的活性和表达水平直接影响氮素的转运效率<sup>[41]</sup>。不同作物品种对低氮环境的适应性存在显著差异<sup>[42]</sup>。基于隶属函数分析,本研究将20个紫花苜蓿品种划分为4个氮利用效率类型:1)高效型品种在低氮和正常氮条件下均表现出色;2)常效型品种仅在正常氮条件下表现良好;3)低效型品种在两种氮水平下表现均不理想;4)反效型品种在低氮条件下表现优于正常氮条件。这种分类为紫花苜蓿的氮利用效率评价提供了新的参考依据。高效型品种如标杆(MX13)在低氮和正常氮条件下均表现优异,适合在氮素匮乏地区推广种植。常效型品种如熊岳(MX2)、匈牙利(MX6)等在正常氮条件下表现良好,但在低

氮条件下效率下降,需在施肥充足的区域应用。低效型如北方 SLT(MX9)、巨能 6(MX17)的适应性较差,可能不适合在低氮环境中种植。研究结果显示,部分紫花苜蓿品种在低氮环境中展现出优异的适应性表现。具体而言,这些氮高效品种能够通过优化根系构型、提升氮素吸收能力以及增强氮代谢酶活性等生理机制,在氮素受限条件下保持相对稳定的生物量积累和氮素利用效率。这一发现为农业生产中实施氮肥减量增效策略提供了重要的品种资源支持,同时也为深入解析植物耐低氮的生理机制提供了研究基础。例如,在宁夏等干旱半干旱地区,推广高效型品种可减少氮肥投入,降低生产成本<sup>[3]</sup>。此外,高效型品种的耐低氮特性可能与其遗传背景有关,未来可通过分子标记辅助育种进一步优化其性状。

#### 4 结论

本研究通过对 20 份紫花苜蓿苗期进行筛选鉴定,根据氮利用效率筛选指标的差异,并量化其氮利用效率,发掘出氮高效型材料 1 份,氮常效型材料 4 份,氮低效型材料 13 份,氮反效型材料 2 份。通过对不同紫花苜蓿品种各性状的相关性分析,得出株高、总根长、根体积、硝酸还原酶、谷氨酰胺合成酶与全株氮含量具有显著相关性,可作为氮利用效率的筛选指标。

#### 参考文献 References:

- [1] Lyu H G, Kang J M, Long R C, *et al.* Yield evaluation of 22 alfalfa cultivars in Hebei area. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(4): 948–958.  
吕会刚, 康俊梅, 龙瑞才, 等. 河北地区 22 个紫花苜蓿品种的生产性能比较研究. *草地学报*, 2018, 26(4): 948–958.
- [2] Li Y Z, Wu F, Shi S L, *et al.* Evaluation on production and nutritional value of 13 introduced alfalfa cultivars in Hexi Corridor of Gansu Province. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(5): 119–129.  
李玉珠, 吴芳, 师尚礼, 等. 河西走廊 13 个引进紫花苜蓿品种生产性能和营养价值评价. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(5): 119–129.
- [3] Wang Y, Cui G W, Yin H, *et al.* Effects of different fertilization schemes on alfalfa performance and nutritional quality. *Pratacultural Science*, 2019, 36(3): 793–803.  
王洋, 崔国文, 尹航, 等. 施肥对紫花苜蓿生产性能及营养品质的影响. *草业科学*, 2019, 36(3): 793–803.
- [4] Zhang T J, Zhao Z X, Long R C, *et al.* Study on effects of N, P and K fertilizers on alfalfa hay and recommended fertilizer rate in Huang-Huai-Hai area. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(1): 243–249.  
张铁军, 赵忠祥, 龙瑞才, 等. 黄淮海地区紫花苜蓿氮磷钾肥料效应与推荐施肥量研究. *草地学报*, 2019, 27(1): 243–249.
- [5] Yan Y L. Biological nitrogen fixation: Promote the reduction and efficiency of chemical fertilizers and help the green development of agriculture. *Biotechnology Bulletin*, 2019, 35(10): 6–7.  
燕永亮. 生物固氮: 促进化肥减施增效, 助力农业绿色发展. *生物技术通报*, 2019, 35(10): 6–7.
- [6] Yao Y B, Zhang S Q, Chai Y S, *et al.* Study on nitrogen accumulation characteristics of soybean varieties in different growth periods. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(5): 169–175.  
姚玉波, 张树权, 柴永山, 等. 不同生育期大豆品种氮素积累特性研究. *中国土壤与肥料*, 2021(5): 169–175.
- [7] Tong C C, Liu X J, Wu Y, *et al.* Regulation of endogenous isoflavones on alfalfa nodulation and nitrogen fixation and nitrogen use efficiency. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(3): 124–135.  
童长春, 刘晓静, 吴勇, 等. 内源异黄酮对紫花苜蓿结瘤固氮及氮效率的调控研究. *草业学报*, 2022, 31(3): 124–135.
- [8] Gao L M, Su J, Tian Q, *et al.* Effects of nitrogen application on nitrogen accumulation and root nitrogenase activity in *Medicago sativa* at different soil water contents. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(3): 130–136.  
高丽敏, 苏晶, 田倩, 等. 施氮对不同水分条件下紫花苜蓿氮素吸收及根系固氮酶活性的影响. *草业学报*, 2020, 29(3): 130–136.
- [9] Cherney J H, Duxbury J M. Inorganic nitrogen supply and symbiotic dinitrogen fixation in alfalfa. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, 17(12): 2053–2067.
- [10] Li Q, Ding G D, Yang N M, *et al.* Comparative genome and transcriptome analysis unravels key factors of nitrogen use efficiency in *Brassica napus* L. *Plant, Cell & Environment*, 2020, 43(3): 712–731.
- [11] Shi W M, Xu W F, Li S M, *et al.* Responses of two rice cultivars differing in seedling-stage nitrogen use efficiency to growth under low-nitrogen conditions. *Plant and Soil*, 2010, 326(1): 291–302.

- [12] Liu C J, Gong X W, Wang H L, *et al.* Low-nitrogen tolerance comprehensive evaluation and physiological response to nitrogen stress in broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) seedling. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 151: 233–242.
- [13] Liu Y N, Liu X J. Effect of fertilization on production performance and quality of different varieties of alfalfa. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2014, 49(1): 111–115.  
刘艳楠, 刘晓静. 施肥对两个紫花苜蓿品种生产性能及营养品质的影响. *甘肃农业大学学报*, 2014, 49(1): 111–115.
- [14] Erley G S A, Dewi E R, Nikus O, *et al.* Genotypic differences in nitrogen efficiency of white cabbage (*Brassica oleracea* L.). *Plant and Soil*, 2010, 328(1/2): 313–325.
- [15] Balint T, Rengel Z. Nitrogen efficiency of canola genotypes varies between vegetative stage and grain maturity. *Euphytica*, 2008, 164(2): 421–432.
- [16] Zhang H, Xue Y G, Wang Z Q, *et al.* Morphological and physiological traits of roots and their relationships with shoot growth in “super” rice. *Field Crops Research*, 2009, 113(1): 31–40.
- [17] Worku M, Baenziger M, Erley G S A, *et al.* Nitrogen efficiency as related to dry matter partitioning and root system size in tropical mid-altitude maize hybrids under different levels of nitrogen stress. *Field Crops Research*, 2012, 130: 57–67.
- [18] Zhang P Y, Wang D Y, Gao T M, *et al.* Difference in nitrogen absorption, transportation and utilization of sesame varieties with contrasting nitrogen efficiency at seedling stage. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2023, 38(6): 134–143.  
张鹏钰, 王东勇, 高桐梅, 等. 不同氮效率芝麻品种苗期氮吸收转运与利用差异. *华北农学报*, 2023, 38(6): 134–143.
- [19] Zhang N, Guo R F. Advancements in nitrogen efficient screening of germplasm resources and deficiency tolerance mechanism study in rice. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2014, 41(5): 66–70.  
张宁, 郭荣发. 水稻氮高效种质资源筛选及其耐低氮胁迫机理研究进展. *广东农业科学*, 2014, 41(5): 66–70.
- [20] Sun H N, Cao X, Shen Q, *et al.* Effects of planting density and nitrogen application rate on yield components of soybean variety Zhongji 602. *Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Science Edition)*, 2024, 39(2): 26–31.  
孙浩楠, 曹霞, 申晴, 等. 种植密度和施氮量对中吉 602 大豆产量构成因素的影响. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2024, 39(2): 26–31.
- [21] Zou Q. *Experimental guidance of plant physiology*. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2006.  
邹琦. *植物生理学实验指导*. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [22] Song X, Zhang K K, Huang C C, *et al.* Selection of nitrogen-efficient wheat varieties based on principal component analysis. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2020, 49(12): 10–16.  
宋晓, 张珂珂, 黄晨晨, 等. 基于主成分分析的氮高效小麦品种的筛选. *河南农业科学*, 2020, 49(12): 10–16.
- [23] Wu Z S, Luo C P, Li H, *et al.* Screening of high-quality conventional rice varieties with high nitrogen efficiency. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(1): 63–69.  
吴子帅, 罗翠萍, 李虎, 等. 氮高效型优质常规稻品种筛选. *南方农业学报*, 2021, 52(1): 63–69.
- [24] Zhou N N. *The research on the nitrogen's effect on rapeseed yield and quality and relevant analysis*. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2005.  
周年年. *氮素对油菜产量和品质的影响及相关分析研究*. 武汉: 华中农业大学, 2005.
- [25] Zhang H, Forde B G. An *Arabidopsis* MADS box gene that controls nutrient-induced changes in root architecture. *Science*, 1998, 279(5349): 407–409.
- [26] Hou Y P, Kong L L, Li Q, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on nitrogen absorption, utilization and soil inorganic nitrogen content under film mulch drip irrigation of maize. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(9): 1378–1387.  
侯云鹏, 孔丽丽, 李前, 等. 覆膜滴灌条件下氮肥运筹对玉米氮素吸收利用和土壤无机氮含量的影响. *中国生态农业学报*, 2018, 26(9): 1378–1387.
- [27] Liu L H, Fan T F, Shi D X, *et al.* Coding-sequence identification and transcriptional profiling of nine AMTs and four NRTs from tobacco revealed their differential regulation by developmental stages, nitrogen nutrition, and photoperiod. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 210.
- [28] Huang M, Wu J Z, Li Y J, *et al.* Effects of tillage practices and nitrogen fertilizer application rates on grain yield, protein content in winter wheat and soil nitrate residue in dryland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(24): 5206–5219.  
黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 耕作方式和氮肥用量对旱地小麦产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响. *中国农业科学*, 2021, 54(24): 5206–5219.
- [29] Sun M, Yan A, Li J Y, *et al.* Effects of different water and nitrogen treatments on growth, quality and water and fertilizer use efficiency of alfalfa. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2024, 61(6): 1512–1526.

- 孙萌, 颜安, 李靖言, 等. 不同水氮处理对紫花苜蓿生长发育、品质及水肥利用效率的影响. 新疆农业科学, 2024, 61(6): 1512–1526.
- [30] Liu D M, Liu Q, Rong X M, *et al.* Studies on relationship between the characteristics of root and coefficient of nitrogen use efficiency of oilseed rape. *Hunan Agricultural Sciences*, 2008(2): 64–66, 70.  
刘德明, 刘强, 荣湘民, 等. 油菜根系特性与氮效率系数的关系研究. 湖南农业科学, 2008(2): 64–66, 70.
- [31] Qu Y L, Xie C, Liu X Y, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer reduction on peanut yield and nitrogen use efficiency. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2023, 45(2): 1–8.  
曲艳丽, 谢畅, 刘欣宇, 等. 氮肥减施对花生氮素利用效率及产量的影响. 中国油料作物学报, 2023, 45(2): 1–8.
- [32] Singh P, Kumar K, Jha A K, *et al.* Global gene expression profiling under nitrogen stress identifies key genes involved in nitrogen stress adaptation in maize (*Zea mays* L.). *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 18.
- [33] Huang G B, Zhang E H, Hu H J. Eco-physiological mechanism on nitrogen use efficiency difference of corn varieties. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2001, 7(3): 293–297.  
黄高宝, 张恩和, 胡恒觉. 不同玉米品种氮素营养效率差异的生态生理机制. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(3): 293–297.
- [34] Zhang R Z, Zhang E H, Sun C Z. Study different genotype maize variety on diversity of nitrogen nutrition efficiency. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2003, 25(2): 183–186.  
张瑞珍, 张恩和, 孙长占. 不同基因型玉米品种氮素营养效率差异的研究. 吉林农业大学学报, 2003, 25(2): 183–186.
- [35] Bittsanszky A, Pilinszky K, Gyulai G, *et al.* Overcoming ammonium toxicity. *Plant Science*, 2015, 231: 184–190.
- [36] Pradhan S, Chopra U K, Bandyopadhyay K K, *et al.* Effect of water and nitrogen management on water productivity and nitrogen use efficiency of wheat in a semi-arid environment. *International Journal of Agriculture and Food Science Technology*, 2013, 4(7): 727–732.
- [37] Ye T, Ma J, Zhang P, *et al.* Interaction effects of irrigation and nitrogen on the coordination between crop water productivity and nitrogen use efficiency in wheat production on the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 2022, 271: 12.
- [38] Cui Z, Zhang F, Chen X, *et al.* Using in-season nitrogen management and wheat cultivars to improve nitrogen use efficiency. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(3): 976–983.
- [39] Si Z Y. Effects of water and nitrogen on yield and water and nitrogen utilization of winter wheat-summer cotton. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.  
司转运. 水氮对冬小麦—夏棉花产量和水氮利用的影响. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [40] Ma Y M, Feng Z Y, Wang W, *et al.* Genetic diversity analysis of winter wheat landraces and modern bred varieties in Xinjiang based on agronomic traits. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(12): 1997–2007.  
马艳明, 冯智宇, 王威, 等. 新疆冬小麦品种农艺及产量性状遗传多样性分析. 作物学报, 2020, 46(12): 1997–2007.
- [41] Li S S, Fu C, Sun J, *et al.* Effects of nitrogen amount on root physiological activity and grain protein quality in spring wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(6): 1139–1143.  
李双双, 付驰, 孙继, 等. 施氮量对春小麦根系生理活性及籽粒蛋白品质的影响. 麦类作物学报, 2012, 32(6): 1139–1143.
- [42] Stahl A, Pfeifer M, Frisch M, *et al.* Recent genetic gains in nitrogen use efficiency in oilseed rape. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 13.