

DOI:10.11686/cyxb2021157

http://cyxb.magtech.com.cn

刘晓静, 赵雅姣, 郝凤, 等. 紫花苜蓿氮效率及其类型特征研究. 草业学报, 2021, 30(12): 90—102.

LIU Xiao-jing, ZHAO Ya-jiao, HAO Feng, *et al.* Detection and characterization of nitrogen efficiency in alfalfa. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(12): 90—102.

紫花苜蓿氮效率及其类型特征研究

刘晓静*, 赵雅姣, 郝凤, 童长春

(甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为挖掘和利用紫花苜蓿自身潜力,实现优质高效生产,本研究拟建立紫花苜蓿苗期氮效率评价体系,筛选氮高效种质。以28个来源广泛的紫花苜蓿品种为材料,通过室内营养液砂培法,设低氮($2.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表示为: $\text{N}_{2.1}$)和适宜氮($210\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表示为: N_{210})2个水平,对苗期各品种紫花苜蓿的形态指标和氮相关指标进行综合分析,通过变异系数、相关分析和隶属函数筛选出苗期氮效率评价指标,并进行氮效率类型分类。氮效率为作物对氮素的综合响应。结果表明,LW6010在 $\text{N}_{2.1}$ 和 N_{210} 水平下,其株高、地上干物质重、地下干物质重、全株干物质重、地上氮积累量、地下氮积累量和全株氮积累量均表现为显著高于其他品种。公农3号在 $\text{N}_{2.1}$ 和 N_{210} 下均表现为地上干物质重显著小于其他品种。巨能601在 $\text{N}_{2.1}$ 和 N_{210} 下,其地上和全株氮含量均显著大于其他品种(除LW6010)。在 $\text{N}_{2.1}$ 下,甘农9号的根长最长,陇东苜蓿根长最短;在 N_{210} 下,皇冠根长最长,公农3号最短。在 $\text{N}_{2.1}$ 下,新疆大叶根体积最大,陇东苜蓿根体积最小;在 N_{210} 下,甘农7号根体积最大。地上干物质重、全株干物质重、根长、根体积、地上氮积累量和全株氮积累量的变异系数和相关系数均较大。同时,LW6010等品种在 $\text{N}_{2.1}$ 和 N_{210} 下综合值均大于0.5;甘农3号在 $\text{N}_{2.1}$ 下综合值小于0.5,在 N_{210} 下大于0.5;甘农7号在 $\text{N}_{2.1}$ 下综合值大于0.5,在 N_{210} 下小于0.5;陇东苜蓿在 $\text{N}_{2.1}$ 和 N_{210} 下综合值均小于0.5。综上,地上干物质重、全株干物质重、根长、根体积、地上氮积累量和全株氮积累量可作为紫花苜蓿苗期氮效率筛选的评价参数;通过对综合值的量化,可将紫花苜蓿分为氮高效型、氮常效型、氮反效型和氮低效型4个类型。

关键词:紫花苜蓿;氮效率;品种差异;类型特征

Detection and characterization of nitrogen efficiency in alfalfa

LIU Xiao-jing*, ZHAO Ya-jiao, HAO Feng, TONG Chang-chun

College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory Pratacultural Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-US Center for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China

Abstract: It would be beneficial to the livestock industries to develop and utilize the potential for improved forage quality and yield in alfalfa in order to achieve gains in production efficiency. This study planned to establish a nitrogen (N) efficiency evaluation system and screen alfalfa germplasm at the seedling stage for N efficiency. In this research, 28 alfalfa cultivars from a wide range of sources were investigated, and parameters linked to alfalfa N efficiency were evaluated at the seedling stage, based on variation coefficient, correlation analysis and subordinate function analysis of the morphological and N-related parameters. Seedlings were grown in sand culture in a greenhouse using nutrient solution with either a low N level ($2.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ N}$, designated $\text{N}_{2.1}$) or a normal N level ($210\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}\text{ N}$, designated

收稿日期:2021-04-26;改回日期:2021-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(32171674),甘肃省重点研发计划项目(20YF8NA130)和国家自然科学基金项目(31460622)资助。

作者简介:刘晓静(1968-),女,甘肃酒泉人,教授。E-mail: liuxj@gsau.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liuxj@gsau.edu.cn

N_{210}). N efficiency was assessed from the multivariate response of cultivars to N application. It was found that the plant height, shoot dry weight (SDW), root dry weight, plant dry weight (PDW), shoot N accumulation (SNA), root N accumulation and plant N accumulation (PNA) of LW6010 were significantly higher than other cultivars. The SDW of Gongnong No. 3 was significantly lower than that of other cultivars under both $N_{2.1}$ and N_{210} . The shoot N content and plant N content of Giant 601 were significantly higher than those of other cultivars. Under $N_{2.1}$, the root length (RL) of Gannong No. 9 was the longest, and that of Longdong was the shortest. Under N_{210} , the RL of Crown is the longest, and Gongnong No. 3 is the shortest. Under $N_{2.1}$, the root volume (RV) of Xinjiangdaye was the largest, and that of Longdong was the smallest. Under N_{210} , the RV of Gannong No. 7 was the largest. The parameters used to screen for N efficiency were SDW, PDW, RL, RV, SNA and PNA. The multivariate scores of LW6010 and some other cultivars were greater than 0.5 under $N_{2.1}$ and N_{210} ; the multivariate scores of Gannong No. 3 and some other cultivars were less than 0.5 under $N_{2.1}$, and were greater than 0.5 under N_{210} . The multivariate scores of Gannong No. 7 and some other cultivars were greater than 0.5 under $N_{2.1}$, and were less than 0.5 under N_{210} ; and those of Longdong and some other cultivars were less than 0.5 under $N_{2.1}$ and N_{210} . In conclusion, differences in N efficiency among alfalfa cultivars were found. SDW, PDW, RL, RV, SNA and PNA were adopted as the evaluation parameters for N efficiency screening of alfalfa at the seedling stage. By quantifying the multivariate score, alfalfa cultivars can be grouped into four N efficiency categories: very efficient, efficient, semi-efficient and inefficient.

Key words: *Medicago sativa*; N efficiency; differences of cultivars; characteristics of N efficiency types

作物的氮效率表现为作物对氮素的响应,主要表现在作物对氮素吸收效率和利用效率上的差异,进而表现出不同的生长及营养状况^[1]。自1939年Harvey^[2]首次发现玉米(*Zea mays*)的不同品种在氮素吸收方面存在差异以来,有关植物品种间氮效率差异引起了研究者的广泛关注,大量研究工作就此展开。目前,在对小麦(*Triticum aestivum*)^[3]、水稻(*Oryza sativa*)^[4]、玉米^[5]和油菜(*Brassica napus*)^[6]的研究中均证实同一种作物的不同品种在氮效率方面存在差异,主要表现为不同品种在不同氮素水平下对氮素的吸收和利用等方面的差异,同时,施用不同氮肥后其生长及生理特性也不尽相同。因此,在不同供氮水平下筛选具有产量增长潜力的氮高效品种以及发掘作物氮高效潜力,是提高氮肥利用效率,减少氮肥损失以及作物高效栽培的重要途径。

目前,针对多种作物进行的氮高效种质的筛选普遍认为,氮高效种质的筛选应满足以下条件:一是材料来源广泛具有代表性且遗传基础丰富多样;二是适宜的筛选条件,即评价指标、筛选压力、筛选时期和评价方法等。关于氮效率评价指标的选择主要集中在作物生长特性、根系、产量、氮素积累等方面,利用这些指标进行的氮效率筛选都获得了较为理想的研究结果。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^[7-8]。另有研究认为,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,进而影响氮效率的高低^[9-10]。因此,生物量、根系参数和氮素积累是当前评价植物氮效率的常用参数。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^[11],并且苗期试验周期短,适合对大规模材料进行氮效率初筛,苗期对作物进行氮效率的评价是简单、快速、可靠的科学方法。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是世界上栽培最早、分布最广的多年生豆科牧草,与禾谷类作物相比可以大大提高粗蛋白质的产出,是解决我国畜牧业发展中蛋白饲料资源短缺的重要途径和有效方法^[12]。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^[13]。为此,实践中为了达到优质高产的生产目的,必须确保高效生产的氮素所需,施用氮肥成为紫花苜蓿优质高效生产的必要保证。因此,氮肥使用量的逐年增加是促进紫花苜蓿高产的重要因素之一。然而,施氮也会带来一系列的不良影响,并且由此引起的“氮阻遏”效应,不仅大大降低了生物固氮这个自然界最为主要的氮积累途径的效率^[14-15],还会造成严重的环

境问题^[16]。而挖掘紫花苜蓿自身氮高效的遗传潜力、开发氮高效利用是提高其营养效率的重要途径之一,也是最快速、最易于推广“减肥”农业生产目标的方法。目前,已在实践中发现紫花苜蓿对氮肥的响应确实存在品种间差异,氮肥对生产性能的促进作用明显不同,品种间肥料报酬率存在极显著差异^[17]。因此,开展紫花苜蓿氮效率研究,了解其品种间氮效率差异特征及规律,有助于制定优化牧草生产和减少养分损失的施肥管理策略,对优质高效生产具有重要的理论价值和实践意义,也是进一步筛选氮高效种质、培育兼具高产与节肥新品种的必要基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

选用来源较为广泛,同时代表性强、遗传背景丰富的紫花苜蓿品种为试验材料(表1)。根瘤菌(*Sinorhizobium meliloti*)为“中华12531”,由甘肃农业大学提供。

表1 紫花苜蓿品种及编号

Table 1 Alfalfa cultivars and their marked numbers

| 序号 Number | 品种名称 Cultivars | 序号 Number | 品种名称 Cultivars | 序号 Number | 品种名称 Cultivars | 序号 Number | 品种名称 Cultivars |
|--------------|--------------------|--------------|---------------------|--------------|-------------------|--------------|-------------------|
| 1 | 甘农3号 Gannong No. 3 | 8 | 新疆大叶 Xinjiangdaye | 15 | LW6010 | 22 | 巨能2 Giant 2 |
| 2 | 甘农4号 Gannong No. 4 | 9 | 新牧1号 Xinmu No. 1 | 16 | 驯鹿 Reindeer | 23 | 赛迪7 Sadie 7 |
| 3 | 甘农5号 Gannong No. 5 | 10 | 龙牧806 Longmu 806 | 17 | 皇冠 Crown | 24 | 赛迪10 Sadie 10 |
| 4 | 甘农7号 Gannong No. 7 | 11 | 龙牧801 Longmu 801 | 18 | 金皇后 Goldqueen | 25 | 游客 Tourists |
| 5 | 甘农8号 Gannong No. 8 | 12 | 公农1号 Gongnong No. 1 | 19 | 巨能551 Giant 551 | 26 | 精英 Elite |
| 6 | 甘农9号 Gannong No. 9 | 13 | 公农3号 Gongnong No. 3 | 20 | 巨能601 Giant 601 | 27 | 威斯顿 Weston |
| 7 | 陇东苜蓿 Longdong | 14 | 肇东苜蓿 Zhaodong | 21 | 巨能6 Giant 6 | 28 | 阿尔冈金 Algonquin |

1.2 试验设计

试验于2016年在甘肃农业大学控温室内进行(光照28℃/14 h,黑暗20℃/10 h,光照强度260~350 mol·m⁻²·s⁻¹,相对湿度60%~70%)。试验为28个品种×2个氮水平=56个处理。试验选用均一且饱满的紫花苜蓿种子进行播种,播种前先进行消毒(70%酒精浸泡5 min,再用蒸馏水清洗3遍),同时对播种的细砂用蒸馏水反复清洗,并用烘箱进行灭菌和烘干(120℃烘5 h以上);播种时,将消毒后的紫花苜蓿种子撒播至直径9 cm、高12 cm装有灭菌砂的营养钵中,待出苗后,每盆保留10株健壮幼苗。长至2叶1心时,进行不同氮水平的处理(500 mL·盆⁻¹营养液),用蒸馏水每周进行冲洗,至沙子中积累的盐分冲洗干净后再重新浇入营养液。长至3片复叶时,每盆接种根瘤菌液(25 mL·盆⁻¹,OD₆₀₀为0.63~0.64)。处理35 d(苗期,根瘤已形成)后将紫花苜蓿茎叶和根系分开取样,进行形态和营养指标的测定。以Hoagland-Arnon营养液为基本营养液,以NO₃⁻-N:NH₄⁺-N=1:1(m:m)为氮源,设低氮(2.1 mg·L⁻¹)和适宜氮(210 mg·L⁻¹,该氮素水平为本团队筛选出的紫花苜蓿最适宜氮素浓度^[18])2个水平,分别以N_{2.1}和N₂₁₀表示,调节营养液pH为7,每个处理重复6次。

1.3 测定指标

紫花苜蓿氮效率高主要是由其生物量和氮素积累量高低决定的。株高的大小一般可以反映植株生长的快慢,根长和根体积一般可以反映植株对营养物质吸收的好坏。因此,本研究选用地面/地下干物质重、全株干物质重、株高、根长、根体积、地上/地下氮含量、全株氮含量、地上/地下氮积累量、全株氮积累量等指标对不同紫花苜蓿种质进行氮效率评价指标的筛选以及氮效率的划分。

采用直尺测定垂直高度(茎基部到生长点的距离);通过EPSON Expression扫描仪(10000XL,杭州)和WinRHIZO分析系统测定根系总长度和根体积;采用烘干法测定干物质重;采用半微量凯氏定氮法测定氮含量;氮素积累量=干物质量×氮含量^[19]。

1.4 数据分析

采用隶属函数法将紫花苜蓿氮效率评价指标进行综合评价^[20]。采用Excel 2007进行数据整理和图表绘制,采用SPSS 17.0进行显著性方差分析。

2 结果与分析

2.1 紫花苜蓿苗期性状的分析

2.1.1 不同氮水平对株高、干物质重的影响 LW6010在 $N_{2.1}$ 和 N_{210} 水平下(表2),其株高、地上干物质重、地下干物质重和全株干物质重均显著高于其他品种($P<0.05$)。游客在 $N_{2.1}$ 下,其株高显著小于其他品种;精英和威斯顿在 N_{210} 下,其株高显著小于其他品种($P<0.05$)。公农3号在 $N_{2.1}$ 和 N_{210} 下均表现为地上干物质重显著小于其他品种($P<0.05$)。公农3号在 $N_{2.1}$ 和甘农4号在 N_{210} 下,其地下干物质重显著小于其他品种($P<0.05$)。赛迪7在 $N_{2.1}$ 下,其全株干物质重显著低于其他品种($P<0.05$)。

表2 不同紫花苜蓿品种株高和生物量在不同氮素水平下的差异

Table 2 Differences of plant height and biomass of different alfalfa cultivars under different nitrogen levels

| 序号 No. | 株高 Plant height (cm) | | 地上干物质重 Shoot dry weight (g·plant ⁻¹) | | 地下干物质重 Root dry weight (g·plant ⁻¹) | | 全株干物质重 Plant dry weight (g·plant ⁻¹) | |
|-----------|-------------------------|--------------|---|-------------|--|--------------|---|--------------|
| | | | | | | | | |
| | $N_{2.1}$ | N_{210} | $N_{2.1}$ | N_{210} | $N_{2.1}$ | N_{210} | $N_{2.1}$ | N_{210} |
| 1 | 2.47±0.21defg | 15.17±0.21g | 0.38±0.02l | 0.37±0.02kl | 0.74±0.03mn | 8.00±0.20f | 2.23±0.22e | 0.24±0.01c |
| 2 | 2.33±0.09g | 15.90±0.15ef | 0.71±0.09ghi | 0.40±0.02ij | 1.11±0.10ij | 4.97±0.21o | 2.19±0.09e | 0.14±0.02ijk |
| 3 | 2.44±0.07efg | 17.68±0.15b | 1.07±0.09bc | 0.47±0.01h | 1.54±0.09de | 9.72±0.15c | 2.25±0.07e | 0.20±0.00def |
| 4 | 1.53±0.04n | 14.82±0.15h | 0.94±0.09cde | 0.44±0.01h | 1.38±0.09fg | 8.90±0.20d | 1.34±0.03k | 0.19±0.00efg |
| 5 | 1.35±0.09p | 14.80±0.15h | 0.55±0.04jk | 0.32±0.01m | 0.87±0.03klm | 6.58±0.20klm | 1.15±0.09l | 0.20±0.01def |
| 6 | 1.62±0.03mn | 13.72±0.15g | 1.01±0.09cde | 0.41±0.01i | 1.43±0.09efg | 7.57±0.21hi | 1.43±0.03k | 0.19±0.00efg |
| 7 | 1.88±0.03ijk | 13.38±0.15k | 0.65±0.03hij | 0.27±0.02n | 0.92±0.05kl | 8.80±0.20de | 1.72±0.04hij | 0.15±0.02hi |
| 8 | 2.59±0.03cde | 15.65±0.21f | 0.90±0.08de | 0.83±0.02b | 1.73±0.08c | 6.75±0.15kl | 2.42±0.03bed | 0.17±0.02gh |
| 9 | 2.75±0.10b | 17.35±0.21c | 0.85±0.03ef | 0.52±0.02g | 1.37±0.05fg | 6.55±0.15lm | 2.53±0.09bcd | 0.22±0.01def |
| 10 | 2.37±0.09fg | 15.98±0.21e | 0.96±0.09cde | 0.47±0.01h | 1.42±0.09efg | 6.88±0.20k | 2.25±0.09e | 0.12±0.00jkl |
| 11 | 1.96±0.09ij | 16.35±0.21d | 1.03±0.09cd | 0.51±0.02g | 1.53±0.10de | 7.22±0.15j | 1.84±0.09fgh | 0.12±0.01kl |
| 12 | 1.80±0.04jkl | 12.58±0.15m | 0.74±0.04fgh | 0.33±0.00m | 1.07±0.04ij | 7.33±0.15ij | 1.66±0.03ij | 0.14±0.01ijk |
| 13 | 1.09±0.09p | 14.72±0.15h | 0.24±0.01m | 0.07±0.00o | 0.31±0.01o | 8.85±0.15de | 0.97±0.09m | 0.13±0.00jkl |
| 14 | 2.57±0.04cde | 15.00±0.15gh | 0.96±0.09cde | 0.59±0.01f | 1.54±0.09de | 7.92±0.15fg | 2.33±0.04cde | 0.24±0.00c |
| 15 | 3.30±0.05a | 18.10±0.21a | 1.33±0.04a | 0.94±0.02a | 2.26±0.03a | 10.77±0.12a | 2.84±0.07a | 0.46±0.02a |
| 16 | 1.78±0.09kl | 16.48±0.21d | 0.82±0.09efg | 0.46±0.02h | 1.28±0.10gh | 6.83±0.15kl | 1.66±0.09ij | 0.11±0.00kl |
| 17 | 2.72±0.16bc | 15.90±0.15ef | 1.00±0.09cd | 0.68±0.02d | 1.68±0.10cd | 6.63±0.15klm | 2.46±0.16bc | 0.25±0.00c |
| 18 | 2.12±0.07h | 16.48±0.21d | 0.59±0.01ij | 0.58±0.02f | 1.17±0.03hi | 6.37±0.21m | 1.97±0.06f | 0.15±0.01hij |
| 19 | 2.02±0.04hi | 14.70±0.15h | 0.95±0.09cde | 0.36±0.09l | 1.31±0.09fgh | 7.87±0.21fgh | 1.91±0.04fg | 0.11±0.00l |
| 20 | 2.50±0.17def | 17.17±0.21c | 1.18±0.15b | 0.84±0.04b | 2.02±0.17b | 10.30±0.20b | 2.31±0.17cde | 0.19±0.00fg |
| 21 | 1.83±0.09jkl | 15.67±0.15ef | 0.70±0.03ghi | 0.63±0.01e | 1.34±0.04fg | 5.97±0.21n | 1.62±0.09ij | 0.21±0.01def |
| 22 | 2.61±0.08bcd | 14.35±0.21i | 0.89±0.09de | 0.71±0.02c | 1.60±0.10cd | 6.62±0.15klm | 2.26±0.09de | 0.35±0.05b |
| 23 | 0.78±0.04q | 12.30±0.15m | 0.43±0.03kl | 0.25±0.01n | 0.69±0.04n | 6.86±0.21k | 0.57±0.03n | 0.21±0.01de |
| 24 | 2.11±0.09h | 14.27±0.15i | 0.99±0.09cd | 0.45±0.01h | 1.45±0.09ef | 8.52±0.15c | 1.95±0.09f | 0.16±0.00gh |
| 25 | 0.81±0.04q | 15.98±0.21e | 0.54±0.09jk | 0.28±0.00n | 0.82±0.09lmn | 7.33±0.15ij | 0.64±0.04n | 0.17±0.01gh |
| 26 | 1.71±0.03lm | 13.03±0.15l | 0.70±0.03ghi | 0.28±0.00n | 0.97±0.04jk | 6.88±0.20k | 1.59±0.03j | 0.13±0.00jkl |
| 27 | 1.68±0.10lm | 13.03±0.21l | 0.92±0.09de | 0.46±0.02h | 1.38±0.10fg | 6.07±0.15n | 1.35±0.09k | 0.33±0.02b |
| 28 | 1.93±0.09ijk | 16.47±0.15d | 0.75±0.09fgh | 0.39±0.01jk | 1.13±0.09i | 7.63±0.15ghi | 1.78±0.09ghi | 0.15±0.01hi |

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: The different small letters in the same column mean the significant differences at $P<0.05$, the same below.

2.1.2 不同氮水平对根长、根体积的影响 不同品种紫花苜蓿的根长和根体积在不同氮素水平下均表现不同(表3)。N_{2.1}下,甘农9号的根长最长,其次为皇冠,陇东苜蓿最短;N₂₁₀下,皇冠最长,公农3号最短。N_{2.1}下,新疆大叶根体积最大,陇东苜蓿最小;N₂₁₀下,甘农7号最大,甘农4号、甘农5号、公农3号和赛迪10较小。

表3 不同紫花苜蓿品种根长和根体积在不同氮素水平下的差异

Table 3 Differences of root length and root volume of different alfalfa cultivars under different nitrogen levels

| 序号 No. | 根长 Root length (cm·plant ⁻¹) | | 根体积 Root volume (cm ³) | |
|-----------|--|------------------|------------------------------------|-------------------|
| | N _{2.1} | N ₂₁₀ | N _{2.1} | N ₂₁₀ |
| 1 | 90.13±18.66abc | 40.02±13.88bcde | 0.08±0.02abcd | 0.04±0.02cde |
| 2 | 71.79±9.69bcdef | 46.02±4.45bcde | 0.04±0.01hi | 0.02±0.01de |
| 3 | 75.13±5.71abcde | 39.72±7.67bcde | 0.08±0.01ab | 0.02±0.01e |
| 4 | 78.25±11.62abcde | 59.89±10.45b | 0.06±0.01bcdefgh | 0.09±0.04a |
| 5 | 80.14±8.15abcd | 37.14±10.18de | 0.05±0.01efghi | 0.03±0.02cde |
| 6 | 98.97±8.79a | 45.97±9.29bcde | 0.06±0.01bcdefgh | 0.03±0.00cde |
| 7 | 30.11±0.96g | 50.11±1.37bcde | 0.02±0.00i | 0.05±0.03bcd |
| 8 | 79.93±21.04abcd | 45.58±4.25bcde | 0.09±0.04a | 0.05±0.00bcd |
| 9 | 61.64±7.03def | 46.09±14.95bcde | 0.05±0.00defghi | 0.03±0.01cde |
| 10 | 54.67±14.04ef | 49.34±11.10bcde | 0.06±0.02bcdefgh | 0.05±0.02bc |
| 11 | 64.07±14.23def | 36.83±17.14de | 0.06±0.01abcdefgh | 0.03±0.01cde |
| 12 | 81.77±22.32abcd | 47.34±16.01bcde | 0.07±0.03abcde | 0.03±0.00cde |
| 13 | 66.61±18.22cdef | 30.02±0.95e | 0.05±0.02defghi | 0.02±0.00cde |
| 14 | 77.53±7.73bcde | 55.23±13.00bcd | 0.05±0.01cdefgh | 0.08±0.02a |
| 15 | 70.37±6.99bcdef | 37.28±10.08de | 0.05±0.01efghi | 0.03±0.02cde |
| 16 | 61.87±11.34def | 33.20±3.97e | 0.06±0.02bcdefgh | 0.03±0.00cde |
| 17 | 95.01±7.23ab | 80.11±3.19a | 0.06±0.00abcdefgh | 0.05±0.02cde |
| 18 | 61.68±14.92def | 43.13±8.69bcde | 0.06±0.02bcdefgh | 0.04±0.01cde |
| 19 | 54.71±7.21ef | 32.82±5.80e | 0.04±0.01fghi | 0.03±0.00cde |
| 20 | 78.64±16.63abcde | 44.13±17.64bcde | 0.07±0.01abcdef | 0.03±0.01cde |
| 21 | 62.05±3.52def | 62.05±3.52def | 0.04±0.01ghi | 0.04±0.01ghi |
| 22 | 69.97±0.63cdef | 69.97±0.63cdef | 0.07±0.02abcdefg | 0.07±0.02abcdefg |
| 23 | 75.68±14.86abcde | 75.68±14.86abcde | 0.07±0.01abcdefgh | 0.07±0.01abcdefgh |
| 24 | 62.53±7.97def | 32.57±11.04e | 0.04±0.01ghi | 0.02±0.00cde |
| 25 | 50.14±13.40fg | 50.14±13.40fg | 0.07±0.01abcdef | 0.07±0.01abcdef |
| 26 | 75.58±2.32bcde | 75.58±2.32abcde | 0.07±0.01abcde | 0.07±0.01abcde |
| 27 | 71.56±17.20bcdef | 71.56±17.20bcdef | 0.08±0.02abc | 0.08±0.02abc |
| 28 | 77.90±16.46bcde | 77.90±16.46abcde | 0.05±0.02cdefgh | 0.05±0.02cdefgh |

2.1.3 不同氮水平对氮含量的影响 巨能601在N_{2.1}和N₂₁₀下(表4),其地上氮含量和全株氮含量均显著大于其他品种(除LW6010)($P<0.05$)。N_{2.1}下,甘农9号地下氮含量显著大于其他品种;N₂₁₀下,公农1号显著大于其他品种($P<0.05$)。

2.1.4 不同氮水平对氮积累量的影响 LW6010在N_{2.1}和N₂₁₀下(表5),其地上氮积累量、地下氮积累量和全株氮积累量均显著大于其他品种($P<0.05$)。N_{2.1}下,甘农3号的地上氮积累量显著小于其他品种;N₂₁₀下,赛迪7和游客地上氮积累量显著小于其他品种($P<0.05$)。N_{2.1}下,陇东苜蓿、公农1号、赛迪7和精英地下氮积累量均显著小于其他品种($P<0.05$)。N_{2.1}下公农3号和N₂₁₀下赛迪7和游客的全株氮积累量均小于其他品种($P<0.05$)。

表4 不同紫花苜蓿品种氮含量在不同氮素水平下的差异

Table 4 Differences of nitrogen content of different alfalfa cultivars under different nitrogen levels (%)

| 序号 No. | 地上氮含量 Shoot nitrogen content | | 地下氮含量 Root nitrogen content | | 全株氮含量 Plant nitrogen content | |
|-----------|------------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|------------------------------|------------------|
| | N _{2.1} | N ₂₁₀ | N _{2.1} | N ₂₁₀ | N _{2.1} | N ₂₁₀ |
| 1 | 1.05±0.01q | 2.14±0.02o | 1.25±0.02j | 2.78±0.05ij | 1.16±0.02kl | 2.21±0.02mn |
| 2 | 1.18±0.00n | 2.96±0.15gh | 1.25±0.01ij | 3.49±0.01c | 1.18±0.03jkl | 2.99±0.14gh |
| 3 | 1.71±0.02c | 3.36±0.04bc | 1.42±0.01d | 3.10±0.07gh | 1.62±0.01a | 3.34±0.03cd |
| 4 | 1.46±0.01f | 3.25±0.04cd | 1.48±0.00c | 3.24±0.02e | 1.46±0.01d | 3.25±0.03de |
| 5 | 1.36±0.01hi | 2.28±0.08mn | 1.28±0.00h | 3.45±0.02c | 1.33±0.01g | 2.45±0.08l |
| 6 | 1.34±0.01hi | 3.19±0.02de | 1.74±0.00a | 3.30±0.01d | 1.45±0.01de | 3.20±0.02e |
| 7 | 1.23±0.00lm | 2.12±0.02o | 1.28±0.00hi | 2.64±0.02k | 1.24±0.00h | 2.17±0.02n |
| 8 | 1.05±0.07q | 2.80±0.05jk | 0.97±0.05o | 3.15±0.01fg | 1.01±0.06n | 2.82±0.04jk |
| 9 | 1.21±0.00mn | 2.48±0.02l | 1.14±0.01l | 3.44±0.06c | 1.17±0.00jkl | 2.55±0.02l |
| 10 | 1.33±0.02ij | 3.36±0.03bc | 1.21±0.01k | 3.59±0.00b | 1.30±0.01g | 3.37±0.03bc |
| 11 | 1.40±0.02g | 2.84±0.07hijk | 1.36±0.00e | 3.33±0.03d | 1.39±0.01f | 2.87±0.07ij |
| 12 | 1.18±0.02no | 2.87±0.04hij | 1.10±0.01m | 3.69±0.01a | 1.15±0.01l | 2.93±0.04hij |
| 13 | 1.65±0.01d | 2.82±0.03ijk | 1.26±0.01hij | 2.82±0.05i | 1.56±0.01b | 2.82±0.02jk |
| 14 | 1.14±0.01op | 2.96±0.11gh | 1.28±0.01h | 3.30±0.01d | 1.19±0.01ijk | 2.99±0.10gh |
| 15 | 1.85±0.05a | 3.44±0.03b | 1.34±0.01ef | 3.65±0.04a | 1.64±0.03a | 3.47±0.03ab |
| 16 | 1.46±0.02f | 3.11±0.05ef | 1.31±0.01g | 3.55±0.04b | 1.42±0.02ef | 3.14±0.05ef |
| 17 | 1.13±0.00p | 3.24±0.01d | 1.32±0.00fg | 3.23±0.04e | 1.21±0.00hij | 3.24±0.01de |
| 18 | 1.30±0.02jk | 3.03±0.05fg | 0.94±0.01p | 3.33±0.03d | 1.10±0.04m | 3.05±0.05fg |
| 19 | 1.64±0.02d | 2.72±0.04k | 1.32±0.00fg | 3.10±0.01gh | 1.55±0.01b | 2.74±0.04k |
| 20 | 1.79±0.05b | 3.57±0.03a | 1.43±0.01d | 3.69±0.01a | 1.64±0.02a | 3.57±0.03a |
| 21 | 1.25±0.00lm | 2.93±0.04ghi | 1.06±0.05n | 2.74±0.01j | 1.16±0.03kl | 2.91±0.04hij |
| 22 | 1.33±0.01ij | 3.37±0.02b | 1.09±0.01m | 3.56±0.04b | 1.22±0.01hi | 3.39±0.02bc |
| 23 | 1.14±0.00op | 2.45±0.02l | 1.31±0.01g | 3.47±0.01c | 1.21±0.01hij | 2.72±0.03k |
| 24 | 1.38±0.01gh | 3.16±0.03de | 1.21±0.01k | 3.05±0.03h | 1.33±0.01g | 3.15±0.03ef |
| 25 | 1.36±0.01ghi | 2.19±0.02no | 1.51±0.01b | 2.65±0.02k | 1.42±0.01ef | 2.28±0.01mn |
| 26 | 1.35±0.02hi | 3.14±0.17def | 1.25±0.01j | 3.23±0.04e | 1.33±0.02g | 3.15±0.16ef |
| 27 | 1.26±0.02kl | 2.38±0.01lm | 0.97±0.00o | 3.18±0.02ef | 1.15±0.01kl | 2.54±0.01l |
| 28 | 1.54±0.01e | 2.94±0.17ghi | 1.35±0.01e | 3.15±0.05fg | 1.51±0.04c | 2.95±0.16ghi |

2.2 紫花苜蓿各性状的变异分析

28个紫花苜蓿品种在N_{2.1}和N₂₁₀下各指标的变异幅度相差较大(表6)。N_{2.1}下,各指标变异系数范围为10.8%~29.1%,其中地上部氮积累量最大,为29.1%;单株氮含量最小,为10.8%。N₂₁₀下,各指标变异系数范围为9.4%~29.4%,其中地上部氮积累量变异系数最大,为29.4%;地下部氮含量最小,为9.4%。同时,在N_{2.1}和N₂₁₀下,地上部氮积累量、单株氮积累量、地下部氮积累量、地下部干重、根体积、地上部干重、单株干重和根长8个指标的变异系数较大(CV≥20%);而株高、地下部氮含量、单株氮含量、地上部氮含量4个指标的变异系数较小(CV<20%)。此外,地上部干重、地下部干重、株高、地下部氮含量、地下部氮积累量在N_{2.1}下的变异系数均大于N₂₁₀,其余指标相反。

2.3 相关性分析

N_{2.1}下,地上部干重、单株干重、根长、根体积、地上部氮积累量、地下部氮积累量、单株氮积累量之间呈极显著正相关,相关系数0.522~0.950(表7)。N₂₁₀下,地上部干重、单株干重、株高、根长、根体积、地上部氮积累量、单株氮积累量之间呈极显著正相关,相关系数0.538~0.996。在低氮和正常氮条件下,地上部干重、单株干重、根长、根体积、地上部氮积累量和单株氮积累量之间均呈极显著正相关关系。

表5 不同紫花苜蓿品种氮积累在不同氮素水平下的差异

Table 5 Differences of nitrogen accumulation of different alfalfa cultivars under different nitrogen levels ($\text{mg} \cdot \text{plant}^{-1}$)

| 序号 No. | 地上氮积累量 Shoot nitrogen accumulation | | 地下氮积累量 Root nitrogen accumulation | | 全株氮积累量 Plant nitrogen accumulation | |
|-----------|------------------------------------|--------------|-----------------------------------|----------------|------------------------------------|--------------|
| | $N_{2.1}$ | N_{210} | $N_{2.1}$ | N_{210} | $N_{2.1}$ | N_{210} |
| 1 | 0.39±0.02m | 4.78±0.48ghi | 0.46±0.02o | 0.67±0.03fg | 0.86±0.04m | 5.44±0.47ijk |
| 2 | 0.84±0.10jkl | 6.49±0.26de | 0.50±0.02mn | 0.48±0.05jklm | 1.31±0.12l | 6.97±0.27fg |
| 3 | 1.82±0.15c | 7.54±0.23c | 0.67±0.02gh | 0.61±0.01g | 2.49±0.15c | 8.15±0.23c |
| 4 | 1.37±0.13ef | 4.36±0.11i | 0.65±0.01h | 0.61±0.01g | 2.02±0.13defg | 4.96±0.12k |
| 5 | 0.74±0.05kl | 2.62±0.21l | 0.41±0.02p | 0.68±0.03fg | 1.16±0.04l | 3.30±0.22m |
| 6 | 1.36±0.12ef | 4.57±0.11hi | 0.72±0.02f | 0.62±0.01g | 2.07±0.13de | 5.19±0.10jk |
| 7 | 0.79±0.04kl | 3.66±0.08j | 0.34±0.02q | 0.41±0.05lmno | 1.14±0.06l | 4.07±0.07l |
| 8 | 0.94±0.09ijk | 6.78±0.08d | 0.80±0.02d | 0.53±0.06ij | 1.75±0.08hijk | 7.31±0.07ef |
| 9 | 1.03±0.04hij | 6.27±0.21ef | 0.60±0.02ij | 0.75±0.04def | 1.61±0.06jk | 7.02±0.25fg |
| 10 | 1.27±0.11efg | 7.56±0.30c | 0.57±0.01jk | 0.44±0.01klmn | 1.86±0.12efghi | 8.00±0.29cd |
| 11 | 1.44±0.12de | 5.23±0.25g | 0.69±0.02fg | 0.38±0.04no | 2.13±0.14d | 5.61±0.27ij |
| 12 | 0.87±0.05jkl | 4.77±0.10ghi | 0.36±0.00q | 0.50±0.03ijk | 1.23±0.05l | 5.27±0.12ijk |
| 13 | 0.40±0.01m | 2.73±0.24l | 0.09±0.00r | 0.35±0.01o | 0.49±0.02n | 3.08±0.24m |
| 14 | 1.09±0.10ghi | 6.90±0.11d | 0.75±0.02e | 0.80±0.01de | 1.84±0.11fghi | 7.70±0.11de |
| 15 | 2.45±0.07a | 9.77±0.23a | 1.25±0.02a | 1.69±0.07a | 3.71±0.05a | 11.46±0.17a |
| 16 | 1.20±0.13fgh | 5.16±0.27g | 0.60±0.02ij | 0.41±0.01mno | 1.81±0.15ghij | 5.57±0.27ij |
| 17 | 1.13±0.10gh | 7.98±0.52bc | 0.90±0.02c | 0.82±0.01d | 2.03±0.13def | 8.80±0.53b |
| 18 | 0.77±0.02kl | 5.99±0.19f | 0.54±0.02kl | 0.49±0.05ijkl | 1.29±0.03l | 6.48±0.22h |
| 19 | 1.56±0.14d | 5.21±0.10g | 0.47±0.00no | 0.33±0.01o | 2.03±0.14def | 5.55±0.10ij |
| 20 | 2.12±0.27b | 8.25±0.61b | 1.20±0.05b | 0.68±0.01fg | 3.31±0.28b | 8.93±0.62b |
| 21 | 0.88±0.04jkl | 4.75±0.27ghi | 0.67±0.01gh | 0.57±0.02hi | 1.55±0.05k | 5.32±0.26ijk |
| 22 | 1.18±0.11fgh | 7.62±0.29c | 0.77±0.02de | 1.24±0.16b | 1.95±0.13defgh | 8.86±0.26b |
| 23 | 0.50±0.03m | 1.39±0.08m | 0.33±0.02q | 0.73±0.02ef | 0.83±0.05m | 2.12±0.10n |
| 24 | 1.37±0.12ef | 6.17±0.27ef | 0.55±0.01kl | 0.50±0.01ijk | 1.92±0.12defgh | 6.67±0.27gh |
| 25 | 0.73±0.12l | 1.40±0.08m | 0.42±0.00p | 0.45±0.02jklmn | 1.16±0.13l | 1.85±0.10n |
| 26 | 0.94±0.05ijk | 4.99±0.11gh | 0.34±0.00q | 0.40±0.01mno | 1.29±0.05l | 5.39±0.10ijk |
| 27 | 1.16±0.11gh | 3.22±0.21k | 0.44±0.02op | 1.06±0.06c | 1.59±0.12k | 4.28±0.27l |
| 28 | 1.15±0.13gh | 5.22±0.25g | 0.52±0.02lm | 0.47±0.03jklm | 1.72±0.14ijk | 5.69±0.28i |

2.4 评价指标隶属函数综合值分析

通过客观赋权得到评价指标的权重值(表8)。通过隶属函数法和复合运算得到不同紫花苜蓿品种的氮效率综合指数(表9)。 $N_{2.1}$ 下,最大相差66倍,LW6010、巨能601、甘农5号综合指数大于80%。 N_{210} 下,最大相差14倍,LW6010、巨能601、甘农5号、龙牧806大于80%。在 $N_{2.1}$ 和 N_{210} 下,均在40%以下的6个品种分别是陇东苜蓿、威斯顿、巨能6、公农1号、游客和赛迪7。

2.5 氮效率类型划分

通过不同品种在 $N_{2.1}$ 和 N_{210} 下的综合指数(图1),可将紫花苜蓿品种分为4类:高效型,LW6010、甘农5号、龙牧806、巨能2、巨能601在 $N_{2.1}$ 和 N_{210} 下综合值均大于0.5;常效型,甘农3号、甘农4号、新疆大叶、新牧1号在 $N_{2.1}$ 下综合值小于0.5,在 N_{210} 下大于0.5;反效型,甘农7号、甘农9号、龙牧801、公农3号、精英、赛迪10、巨能551在 $N_{2.1}$ 下综合值大于0.5,在 N_{210} 下小于0.5;低效型,陇东苜蓿、甘农8号、公农1号、驯鹿、金黄后、威斯顿、游客、巨能6、阿尔冈金、赛迪7在 $N_{2.1}$ 和 N_{210} 下综合值均小于0.5。

表 6 紫花苜蓿苗期各性状在不同氮水平下的变化幅度

Table 6 Traits variations of alfalfa cultivars at the seedling stage under different nitrogen levels

| N 水平 N level | 指标 Parameter | SDW (g·plant ⁻¹) | RDW (g·plant ⁻¹) | PDW (g·plant ⁻¹) | PH (cm) | RL (cm·plant ⁻¹) | RV (cm ³ ·plant ⁻¹) |
|------------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---|
| N _{2.1} | 变幅 Range | 0.026~0.058 | 0.013~0.035 | 0.039~0.084 | 4.93~9.67 | 48.31~98.97 | 27.67~87.33 |
| | 均值 Average | 0.042 | 0.024 | 0.066 | 7.38 | 68.49 | 56.90 |
| | 变异系数 CV (%) | 22.3 | 24.3 | 20.0 | 15.2 | 20.0 | 23.6 |
| N ₂₁₀ | 变幅 Range | 0.061~0.125 | 0.006~0.012 | 0.071~0.136 | 12.27~18.03 | 30.11~55.72 | 23.00~55.33 |
| | 均值 Average | 0.097 | 0.009 | 0.106 | 15.20 | 42.39 | 36.82 |
| | 变异系数 CV (%) | 20.8 | 21.2 | 20.0 | 10.1 | 20.1 | 28.4 |
| N 水平 N level | 指标 Parameter | SNC (%) | RNC (%) | PNC (%) | SNA (mg·plant ⁻¹) | RNA (mg·plant ⁻¹) | PNA (mg·plant ⁻¹) |
| N _{2.1} | 变幅 Range | 1.12~1.64 | 0.92~1.74 | 1.07~1.55 | 0.34~0.90 | 0.17~0.52 | 0.51~1.27 |
| | 均值 Average | 1.35 | 1.26 | 1.32 | 0.57 | 0.30 | 0.87 |
| | 变异系数 CV (%) | 11.5 | 14.0 | 10.8 | 29.1 | 27.4 | 25.1 |
| N ₂₁₀ | 变幅 Range | 2.11~3.58 | 2.64~3.69 | 2.15~3.58 | 1.34~4.45 | 0.20~0.46 | 1.68~4.80 |
| | 均值 Average | 2.88 | 3.25 | 2.91 | 2.82 | 0.29 | 3.10 |
| | 变异系数 CV (%) | 14.8 | 9.4 | 13.7 | 29.4 | 24.6 | 27.9 |

SDW: 地上干物质重 Shoot dry weight; RDW: 地下干物质重 Root dry weight; PDW: 全株干物质重 Plant dry weight; PH: 株高 Plant height; RL: 根长 Root length; RV: 根体积 Root volume; SNC: 地上氮含量 Shoot nitrogen content; RNC: 地下氮含量 Root nitrogen content; PNC: 全株氮含量 Plant nitrogen content; SNA: 地上氮积累量 Shoot nitrogen accumulation; RNA: 地下氮积累量 Root nitrogen accumulation; PNA: 全株氮积累量 Plant nitrogen accumulation. 下同 The same below.

表 7 不同氮水平下紫花苜蓿苗期各指标的相关性分析

Table 7 Correlation of different alfalfa parameters at seedling stage under different nitrogen levels

| 指标 Parameter | SDW | RDW | PDW | PH | RL | RV | SNC | RNC | PNC | SNA | RNA | PNA | NUE |
|-----------------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|----------|----------|
| SDW | | 0.356 | 0.996** | 0.538** | 0.708** | 0.799** | 0.342 | 0.235 | 0.336 | 0.869** | 0.451* | 0.867** | -0.292 |
| RDW | 0.416* | | 0.435* | 0.160 | 0.454* | 0.394* | 0.175 | 0.089 | 0.193 | 0.349 | 0.903** | 0.408* | -0.139 |
| PDW | 0.907** | 0.758** | | 0.539** | 0.728** | 0.812** | 0.344 | 0.233 | 0.340 | 0.868** | 0.520** | 0.872** | -0.291 |
| PH | 0.385* | -0.186 | 0.190 | | 0.549** | 0.610** | 0.370 | 0.129 | 0.363 | 0.573** | 0.272 | 0.570** | -0.332 |
| RL | 0.642** | 0.358 | 0.626** | 0.422* | | 0.825** | 0.540** | 0.260 | 0.536** | 0.766** | 0.560** | 0.775** | -0.482** |
| RV | 0.950** | 0.447* | 0.890** | 0.371 | 0.695** | | 0.426* | 0.307 | 0.433* | 0.791** | 0.539** | 0.798** | -0.358 |
| SNC | 0.352 | -0.001 | 0.259 | 0.604** | 0.443* | 0.371 | | 0.499** | 0.997** | 0.750** | 0.375* | 0.746** | -0.987** |
| RNC | 0.275 | -0.100 | 0.141 | 0.454* | 0.328 | 0.251 | 0.392* | | 0.559** | 0.444* | 0.470* | 0.463* | -0.564** |
| PNC | 0.416* | -0.091 | 0.257 | 0.652** | 0.477* | 0.409* | 0.888** | 0.761** | | 0.748** | 0.412* | 0.747** | -0.990** |
| SNA | 0.917** | 0.307 | 0.802** | 0.563** | 0.684** | 0.885** | 0.688** | 0.362 | 0.685** | | 0.529** | 0.998** | -0.706** |
| RNA | 0.549** | 0.833** | 0.775** | 0.094 | 0.522** | 0.568** | 0.194 | 0.447* | 0.321 | 0.486** | | 0.586** | -0.360 |
| PNA | 0.902** | 0.552** | 0.903** | 0.460* | 0.716** | 0.885** | 0.594** | 0.449* | 0.642** | 0.941** | 0.752** | | -0.703** |
| NUE | -0.401* | 0.093 | -0.244 | -0.641** | -0.449* | -0.389* | -0.871** | -0.780** | -0.996** | -0.665** | -0.326 | -0.628** | |

右上方为常氮水平下的相关性, 左下角为低氮水平下的相关性。The upper right corner shows the correlation under normal nitrogen level, and the lower left corner shows the correlation under low nitrogen level. NUE: 氮素利用效率 Nitrogen utilization efficiency. **: $P<0.01$; *: $P<0.05$.

3 讨论

在本研究中, 不同紫花苜蓿品种苗期生物量、根系参数和氮素积累量等氮营养相关指标存在显著差异性, 这与小麦^[21-22]、水稻^[23-24]、玉米^[25-26]、大豆(*Glycine max*)^[27-28]等的研究结果一致, 表明供试紫花苜蓿基因型的氮素营养性状具有较大的遗传变异, 即品种间存在氮效率差异, 此结果也很好印证了本团队的前期研究发现^[17]。

表 8 不同氮水平下紫花苜蓿各评价指标的权重

| N 水平 N level | 指标 Parameters | SDW | PDW | RL | RV | SNA | PNA |
|------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| N _{2.1} | 变异系数 CV(%) | 22.3 | 20.0 | 20.0 | 23.6 | 29.1 | 25.1 |
| | 权重值 Weight | 0.159 | 0.143 | 0.143 | 0.169 | 0.208 | 0.179 |
| N ₂₁₀ | 变异系数 CV(%) | 20.8 | 20.0 | 20.1 | 28.4 | 29.4 | 27.9 |
| | 权重值 Weight | 0.142 | 0.136 | 0.137 | 0.193 | 0.201 | 0.191 |

表 9 不同氮水平下紫花苜蓿氮效率隶属函数综合指数

| Table 9 Integrated values of nitrogen use efficiency under different nitrogen levels | | | | | | | | |
|--|-----------------------------|------------------|-----------|-----------------------------|------------------|-----------|-----------------------------|------------------|
| 序号 No. | 综合指数 Comprehensive index | | 序号 No. | 综合指数 Comprehensive index | | 序号 No. | 综合指数 Comprehensive index | |
| | N _{2.1} | N ₂₁₀ | | N _{2.1} | N ₂₁₀ | | N _{2.1} | N ₂₁₀ |
| 1 | 0.214 | 0.711 | 8 | 0.296 | 0.773 | 15 | 0.910 | 0.967 |
| 2 | 0.384 | 0.769 | 9 | 0.438 | 0.714 | 16 | 0.426 | 0.276 |
| 3 | 0.866 | 0.840 | 10 | 0.510 | 0.814 | 17 | 0.535 | 0.798 |
| 4 | 0.593 | 0.267 | 11 | 0.754 | 0.346 | 18 | 0.214 | 0.468 |
| 5 | 0.135 | 0.068 | 12 | 0.281 | 0.247 | 19 | 0.617 | 0.339 |
| 6 | 0.711 | 0.286 | 13 | 0.604 | 0.166 | 20 | 0.998 | 0.980 |
| 7 | 0.015 | 0.169 | 14 | 0.558 | 0.766 | 21 | 0.331 | 0.285 |
| | | | | | | 22 | 0.548 | 0.747 |
| | | | | | | 23 | 0.179 | 0.183 |
| | | | | | | 24 | 0.579 | 0.420 |
| | | | | | | 25 | 0.033 | 0.255 |
| | | | | | | 26 | 0.770 | 0.326 |
| | | | | | | 27 | 0.399 | 0.216 |
| | | | | | | 28 | 0.400 | 0.329 |

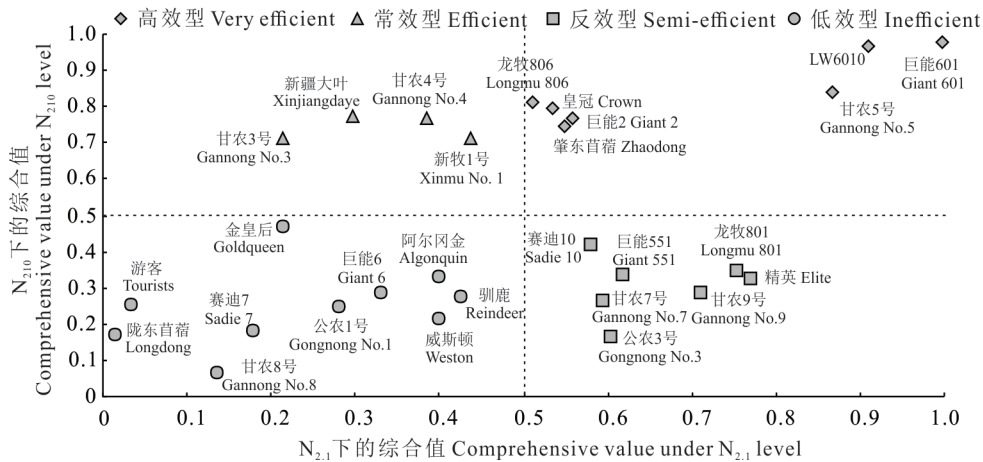


图 1 紫花苜蓿氮效率类型划分
Fig. 1 Classification of nitrogen efficiency of alfalfa

通过变异系数和相关性,本研究得出地上干物质重、全株干物质重、根长、根体积、地上氮积累量和全株氮积累量可作为苗期氮效率筛选的评价参数。在低氮和适宜氮水平下,紫花苜蓿地上干物质重、全株干物质重、根长、根体积、地上氮积累量和全株氮积累量等指标的变异系数较大,同时相互之间的相关性较高,表明该指标可以有效区分不同紫花苜蓿品种间的差异,适于筛选氮效率类型。同样,在现有的评价体系中,氮效率的评价参数也主要集中在生长特性、根系、产量和氮素积累等方面。例如,刘敏娜等^[29]选择地上部干物质质量作为菠菜(*Spinacia oleracea*)苗期氮效率的主要评价指标,地上部氮积累量、氮素吸收效率和氮素利用效率为辅助指标。李梁等^[11]认为相对分蘖数、相对茎叶干重和相对整株干重可作为大麦(*Hordeum vulgare*)苗期氮高效评价指标。匡艺等^[30]认为氮素利用率是主要指标,株高、地上部生物量可作为小黑麦氮高效评价辅助指标。同时,氮高效紫花苜蓿品种的地上干物质重、全株干物质重、根长、根体积、地上氮积累量和全株氮积累量无论在低氮还是高氮水平下均显著

高于氮低效品种,这也进一步说明该指标具有明显的代表性,可作为氮效率评价的指标。氮高效甘蓝型油菜在根和茎生物量、根形态、氮积累、氮肥吸收效率等方面也表现出比氮低效品种更高的值^[31]。根长和根体积代表了作物对氮素的吸收能力,而作物在生长前期对氮素的吸收能力又对其生长发育起关键作用^[32]。本研究中,根长和根体积与干物质重和N积累呈极显著正相关,这是因为根系发达,吸氮效率更高,生物量增加,植物氮积累量更大^[33]。魏海燕等^[34]对水稻的研究也指出根系的吸收能力是获得更高地上生物量的基础。因此,地上干物质重、全株干物质重、根长、根体积、地上氮积累量和全株氮积累量作为苗期筛选的评价参数是合理的。

对28个不同来源紫花苜蓿品种的氮效率关键指标通过隶属函数法进行综合评价和分析,这与使用类似氮效率参数评估作物氮效率的单一或平均表现的研究不同,由于作物氮素效率非常复杂,进行更全面地分析评价,可以得到更准确的结果。目前,使用该方法进行氮效率筛选也被越来越多的研究者们认可^[35-36]。研究中发现,紫花苜蓿氮效率表现为以下特征:LW6010和甘农5号等品种无论环境氮充足还是缺乏均表现为氮营养高效;甘农3号、甘农4号等品种在环境氮水平充足时表现为氮营养高效,缺乏时表现为氮营养低效;甘农7号、龙牧801等品种在环境氮充足时表现为氮营养低效,缺乏时却表现为氮营养高效;陇东苜蓿等品种无论环境氮充足还是缺乏均表现为氮营养低效,不同品种表现出了明显不同的氮效率差异规律,因此,根据本研究中紫花苜蓿所表现出氮效率特征的不同,将其按氮效率特征划分为4个类型,并分别命名为:氮高效型、氮常效型、氮反效型和氮低效型。不同作物的氮效率类型有不同的分类。例如,Tsai等^[37]将玉米分为3种氮效率类型,敏感型、中间型和非敏感型,在这一分类中,敏感型可以代表作物对环境氮的响应能力,而不能代表作物的氮效率。Kumar等^[38]对玉米氮效率的分类为高效与响应型、非高效与响应型、非高效与非响应型、高效与非响应型。He等^[6]将油菜品种分为4种氮效率类型:氮响应型、氮无响应型、氮高效型和氮低效型。这些类型的划分标准均是以不同作物品种对氮素的不同响应。Chen等^[35],刘敏娜等^[29]和赵春波等^[39]分别将玉米、菠菜和黄瓜(*Cucumis sativus*)分为4类:高效型、高氮高效型、低氮高效型、低效型,明确指出了环境氮素与作物的关系。在本研究中,氮效率类型直接反映了苜蓿的氮效率,类型划分及命名更为直观。同时,本研究将紫花苜蓿氮效率进行了量化,即通过地上干物质重、全株干物质重、根长、根体积、地上氮积累量和全株氮积累量6个指标在低氮和适宜氮下进行综合分析,并通过其综合值进行划分,即低氮和适宜氮下其综合值均大于0.5为氮高效型;低氮下小于0.5,适宜氮下大于0.5为氮常效型;低氮下大于0.5,适宜氮下小于0.5为氮反效型;低氮和适宜氮下均小于0.5为氮低效型。相对前人研究而言(以不同品种间对氮素响应的差异和比较来划分氮效率类型),本研究通过量化指标进而对氮效率进行划分更为直观、便捷,也具有较高的可重复性,同时对单个紫花苜蓿品种也可以通过此方法进行快速氮效率类型的认定。

不同氮效率类型的紫花苜蓿具有不同的生理特点,其生产中的管理和应用也不同。可以根据紫花苜蓿的氮效率类型特征有针对性地施用氮肥,以达到高产优质的目的,提高氮肥利用率,减少浪费^[40]。在本研究中,氮高效型紫花苜蓿品种具有较强的适应性和较高的利用价值。因此,LW6010和甘农5号等品种比其他品种可少施氮肥,同时表现出较好的产量和品质。Chen等^[35]发现高效型玉米品种的平均产量高于所有受试品种,在低氮、常氮和高氮条件下,高效型品种的产量分别比所有供试品种的平均产量高15.00%、6.62%和7.57%,潜在的氮肥节约量为25.2%~15.9%。Worku等^[41]报道表明,高效型玉米品种有可能增产10.7%,减少氮肥投入12.7%。因此,氮高效型紫花苜蓿可适用于所有农业系统,并且降低氮肥施用。对于常效型紫花苜蓿品种,本研究建议可通过适当施氮来提高产量,如甘农3号和甘农4号等。本团队前期研究发现,施氮后,甘农3号的株高、产量和品质均显著高于陇东苜蓿^[18],说明常效型品种具有较高的肥料利用率。Chen等^[35]研究表明,如果在华北和东北地区使用高效型和/或常效型玉米品种,产量可提高10%~15%,氮肥投入可减少10%~20%。氮反效型紫花苜蓿品种甘农7号和甘农9号对土壤低氮的耐受性强于其他类型,因此,它们可以在氮肥用量较少的土地上生长。对于氮低效型紫花苜蓿品种,虽然其氮效率低,对外源氮素不敏感,但其却具有其他方面的优势,例如陇东苜蓿因其具有较强的抗逆性,使其成为优良的地方品种。总的来说,氮效率的分类不仅可以发掘高效氮种质资源,而且可以指导紫花苜蓿生产中氮营养管理的针对性施肥。

4 结论

通过对不同紫花苜蓿品种苗期性状的变异分析和隶属函数综合值分析,得出地上干物质重、全株干物质重、根长、根体积、地上氮积累量和全株氮积累量可作为氮效率的筛选指标。

根据氮效率筛选指标的差异,并量化其综合值,在这个标准下可将紫花苜蓿分为4个类型:氮高效型、氮常效型、氮反效型和氮低效型。

参考文献 References:

- [1] Ren D X, Zhang L F, Liu Y H, *et al.* Evaluation of nitrogen efficiency on potatoes with different genotypes in cold and arid regions of Northern China. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(6): 13–21.
任冬雪, 张立峰, 刘玉华, 等. 华北寒旱区不同品种马铃薯的氮效率评价. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(6): 13–21.
- [2] Harvey P H. Hereditary variation in plant nutrition. *Genetics Society of America*, 1939, 24: 437–461.
- [3] Pang J Y, Palta J A, Rebetzke G J, *et al.* Wheat genotypes with high early vigour accumulate more nitrogen and have higher photosynthetic nitrogen use efficiency during early growth. *Function Planting Biology*, 2014, 41(2): 215–222.
- [4] Kessel B, Schierholt A, Becker H C. Nitrogen use efficiency in a genetically diverse set of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Crop Science*, 2012, 52(6): 2546–2554.
- [5] Wei D, Cui K, Ye G, *et al.* QTL mapping for nitrogen—use efficiency and nitrogen—deficiency tolerance traits in rice. *Plant and Soil*, 2012, 359(1/2): 281–295.
- [6] He H Y, Yang R, Li Y J, *et al.* Genotypic variation in nitrogen utilization efficiency of oilseed rape (*Brassica napus*) under contrasting N supply in pot and field experiments. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1–15.
- [7] Schulte auf'm Erley G, Dewi E R, Nikus O, *et al.* Genotypic differences in nitrogen efficiency of white cabbage (*Brassica oleracea* L.). *Plant and Soil*, 2010, 328: 313–325.
- [8] Balint T, Rengel Z. Nitrogen efficiency of canola genotypes varies between vegetative stage and grain maturity. *Euphytica*, 2008, 164(2): 421–432.
- [9] 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.
- [10] Worku M, Bänziger M, Erley G S, *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.
- [11] Li L, Du Z Z, Gao R H, *et al.* Low-nitrogen tolerances of different-region barley varieties at seeding stage and their cluster analysis. *Acta Agriculture Shanghai*, 2013, 29(1): 10–14.
李梁, 杜志钊, 高润红, 等. 不同地区大麦品种苗期耐低氮性及聚类分析. *上海农业学报*, 2013, 29(1): 10–14.
- [12] Liu J, Tang L, Gao H, *et al.* Enhancement of alfalfa yield and quality by plant growth-promoting rhizobacteria under saline-alkali conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(1): 281–289.
- [13] Yan Y L. Biological nitrogen fixation: Promote the reduction of fertilizer and increase of efficiency, and boost 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.
- [14] Coskun D, Britto D T, Shi W M, *et al.* Nitrogen transformations in modern agriculture and the role of biological nitrification inhibition. *Nature Plants*, 2017, 3(6): 17074–17084.
- [15] Roy S, Liu W, Nandety R S, *et al.* Celebrating 20 years of genetic discoveries in legume nodulation and symbiotic nitrogen fixation. *Plant Cell*, 2020, 32(1): 15–41.
- [16] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327: 1008–1010.
- [17] 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.
- [18] Liu X J, Liu Y N, Kuai J L, *et al.* Effects of different N levels on productivity and quality of alfalfa varieties. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(4): 702–707.
刘晓静, 刘艳楠, 蒯佳林, 等. 供氮水平对不同紫花苜蓿产量及品质的影响. *草地学报*, 2013, 21(4): 702–707.
- [19] Lu R K. Chemical analysis of soil agriculture. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

- [20] Hu B L, Yu S W, Wan Y, *et al.* Drought-resistance identification of Dongxiang common wild rice (*Oryza rufipogon* Griff.) in whole growth period. *Acta Agronomica Sinica*, 2007, 33(3): 425—432.
胡标林, 余守武, 万勇, 等. 东乡普通野生稻全生育期抗旱性鉴定. *作物学报*, 2007, 33(3): 425—432.
- [21] Du B J, Gao H J, Chang J, *et al.* Screening and cluster analysis of nitrogen use efficiency of different wheat cultivars at the seedling stage. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(6): 1349—1357.
杜保见, 郜红建, 常江, 等. 小麦苗期氮素吸收利用效率差异及聚类分析. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1349—1357.
- [22] Zhang X Z, Yang X B, Li T X, *et al.* Genotype difference in nitrogen utilization efficiency of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 369—375.
张锡洲, 阳显斌, 李廷轩, 等. 小麦氮素利用效率的基因型差异. *应用生态学报*, 2011, 22(2): 369—375.
- [23] Feng Y, Chen H F, Hu X M, *et al.* Nitrogen efficiency screening of rice cultivars popularized in South China. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1051—1062.
冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 等. 我国南方主推水稻品种氮效率筛选及评价. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(5): 1051—1062.
- [24] Fan J B, Shen Q R, Tan J Z, *et al.* Difference of root physiological and ecological indices in rice cultivars with different N use efficiency. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3052—3058.
樊剑波, 沈其荣, 谭炯壮, 等. 不同氮效率水稻品种根系生理生态指标的差异. *生态学报*, 2009, 29(6): 3052—3058.
- [25] Wu Y S, Zhou R Y, Wei X X, *et al.* Evaluation on nitrogen use efficiency in main maize inbred lines of Guangxi. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(9): 1330—1335.
吴永升, 周瑞阳, 韦新兴, 等. 广西主要玉米自交系氮利用效率评价. *南方农业学报*, 2012, 43(9): 1330—1335.
- [26] Zhou L D, Yuan H Y, Li D X, *et al.* Study on difference of nitrogen nutrition efficiency among corn genotypes. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2003, 12(1): 21—24.
周联东, 员海燕, 李得孝, 等. 玉米氮营养效率基因型差异研究. *西北农业学报*, 2003, 12(1): 21—24.
- [27] Li J H, Dong Z X, Liu J G, *et al.* Study on nitrogen efficiency on different genotype soybean. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 352—356.
李俊华, 董志新, 刘建国, 等. 不同基因型大豆氮效率的研究. *土壤通报*, 2005, 36(3): 352—356.
- [28] Liu Y L, Luan H H, He L, *et al.* Study on dynamic change of nitrogen accumulation in different soybean varieties. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2014(3): 30—34.
刘亚丽, 栾怀海, 何琳, 等. 不同基因型大豆植株氮素积累变化动态研究. *黑龙江农业科学*, 2014(3): 30—34.
- [29] Liu M N, Liu X X, Ding W Y, *et al.* Variation in nitrogen uptake and utilization efficiency in spinach genotypes and its evaluation. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences Edition)*, 2012, 38(5): 599—607.
刘敏娜, 刘晓霞, 丁文雅, 等. 不同菠菜基因型氮素吸收与利用效率的差异及其评价. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2012, 38(5): 599—607.
- [30] Kuang Y, Li T X, Zhang X Z, *et al.* Variation of nitrogen use efficiency of triticale in genotype and its evaluation. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2011, 17(4): 845—851.
匡艺, 李廷轩, 张锡洲, 等. 小黑麦氮利用效率基因型差异及评价. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 845—851.
- [31] Wang G, Ding G D, Li L, *et al.* Identification and characterization of improved nitrogen efficiency in interspecific hybridized new-type *Brassica napus*. *Annals of Botany*, 2014, 114(3): 549—559.
- [32] Pei X X, Wang J A, Dang J Y, *et al.* Studies on differences of nitrogen absorption and utilization in different genotypes of winter wheat. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007, 28(2): 21—27.
裴雪霞, 王姣爱, 党建友, 等. 小麦氮素吸收利用的基因型差异研究. *中国土壤与肥料*, 2007, 28(2): 21—27.
- [33] 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.
- [34] Wei H Y, Zhang H C, Zhang S F, *et al.* Root morphological and physiological characteristics in rice genotypes with different N use efficiencies. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(3): 429—436.
魏海燕, 张洪程, 张胜飞, 等. 不同氮利用效率水稻基因型的根系形态与生理指标的研究. *作物学报*, 2008, 34(3): 429—436.
- [35] Chen F J, Fang Z G, Gao Q, *et al.* Evaluation of the yield and nitrogen use efficiency of the dominant maize hybrids grown in North and Northeast China. *Science China Life Sciences*, 2013, 56(6): 552—560.
- [36] Ge L J, Fang X Y, Zhang Y Y, *et al.* Screening of nitrogen efficient varieties and its assessment system construction at seedling

- stage of chrysanthemum. Journal of Nanjing Agricultural University, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.s.20210629.1708.002.html>.
- 葛礼姣, 方馨妍, 张云月, 等. 菊花苗期氮高效品种资源筛选及氮效率评价体系建立. 南京农业大学学报, 2021, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1148.s.20210629.1708.002.html>.
- [37] Tsai C Y, Huber D M, Glover D V, *et al.* Relationship of N deposition to grain yield and N response of three maize hybrids. Crop Science, 1983, 24(2): 277—281.
- [38] Kumar N, Joshi V N, Dagla M C. Multivariate analysis for yield and its component traits in maize (*Zea mays* L.) under high and low N levels. Bioscan, 2013, 8: 959—964.
- [39] Zhao C B, Song S Y, Zhao J, *et al.* Variation in nitrogen uptake and utilization efficiency of different cucumber varieties in Northern China. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(8): 1569—1578.
- 赵春波, 宋述尧, 赵靖, 等. 北方地区不同黄瓜品种氮素吸收与利用效率的差异. 中国农业科学, 2015, 48(8): 1569—1578.
- [40] Kant S, Bi Y M, Rothstein S J. Understanding plant response to nitrogen limitation for the improvement of crop nitrogen use efficiency. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(4): 1490—1509.
- [41] Worku M, Bänziger M, Schulte auf'm Erley G, *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.