

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.007

引用格式:尹芊芊,申小霞,杨培志.不同品种紫花苜蓿刈割再生性能差异及生理机制解析[J].草地学报,2026,34(5):1632—1640

YIN Qian-qian, SHEN Xiao-xia, YANG Pei-zhi. Regrowth Performance after Cutting and Physiological Mechanisms among Different Alfalfa Cultivars[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1632—1640

不同品种紫花苜蓿刈割再生性能差异及生理机制解析

尹芊芊,申小霞,杨培志*

(西北农林科技大学草业与草原学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:针对高频刈割下紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)再生能力评价体系单一、品种分化机制不清的问题,本研究以9个紫花苜蓿品种为材料,测定刈割后株高、生长曲线、生物量、光合参数及非结构性碳水化合物含量,采用隶属函数法进行综合评价。结果显示:不同品种间再生性能存在显著差异。其中,‘WL363HQ’品种表现优异,其日均株高增长率达 $1.93\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$,显著高于其他参试品种;而‘北极星’品种综合表现最弱。本研究通过系统评价不同紫花苜蓿品种的再生能力差异,明确在高频刈割条件下,‘WL363HQ’为9个参试品种中再生能力最强的品种,‘北极星’则为再生能力最弱的品种。该研究结果为紫花苜蓿耐刈割品种选育提供了理论依据。

关键词:紫花苜蓿;刈割;再生能力;光合特性;生物量

中图分类号:S963.22+3.3

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1632-09

Regrowth Performance after Cutting and Physiological Mechanisms among Different Alfalfa Cultivars

YIN Qian-qian, SHEN Xiao-xia, YANG Pei-zhi*

(College of Grass Grassland Agriculture, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi Province 712100, China)

Abstract: Aiming at the problems of a single evaluation system for the regeneration ability of alfalfa (*Medicago sativa* L.) under high-frequency cutting and unclear mechanisms of varietal differentiation, this study took 9 alfalfa varieties as materials, determined the plant height, growth curve, biomass, photosynthetic parameters, and non-structural carbohydrate content after cutting, and conducted a comprehensive evaluation using the membership function method. The results indicated significant differences in regrowth performance among the various cultivars. Among them, ‘WL363HQ’ exhibited outstanding performance, with a mean daily plant height increase of 1.93 cm , which was significantly higher than that of the other tested cultivars. In contrast, the ‘Beiji Star’ cultivar demonstrated the weakest overall performance. Through systematic evaluation of the regrowth capacity differences among the alfalfa cultivars, this study confirmed that under high-frequency cutting conditions, ‘WL363HQ’ possessed the strongest regrowth ability among the nine tested cultivars, while ‘Beiji Star’ showed the weakest regrowth capacity. These findings provide a theoretical basis for the selection and breeding of alfalfa cultivars with enhanced tolerance to frequent cutting.

Key words: *Medicago sativa* L.; Cutting; Regeneration capacity; Photosynthetic characteristics; Biomass

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)作为全球种植面积最广的优质豆科牧草,被誉为“牧草之王”,在全球农牧业发展中占据举足轻重的地位^[1]。据联合

国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)统计,全球紫花苜蓿种植面积已超过3000万公顷,广泛分布于美国、中国、阿

收稿日期:2025-05-30;修回日期:2025-07-14

基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系资助

作者简介:尹芊芊(1999-),女,汉族,吉林松原人,硕士研究生,主要从事牧草逆境生物学方向,E-mail:yinqianqian12@163.cn;*通信作者
Author for correspondence, E-mail:yangpeizhi@126.com

根廷等国家,在保障畜牧业稳定发展和提高畜产品质量方面发挥着关键作用^[2]。紫花苜蓿的年产草量直接取决于刈割后的再生效率。高频刈割(年刈割4~6茬)制度下,再生能力成为限制生物量积累与营养品质的核心因子^[3-4]。因此,针对我国优质牧草产量不足的难题,牧草刈割后的再生机制研究已成为科学家日益关注的热点。

如何有效提高紫花苜蓿的刈割后再生能力成为当前的研究热点。再生能力是一个复杂的特征且受植株多种性状控制。An等^[5]研究发现植物线粒体电子传递链中的一条分支呼吸途径通过提高在总呼吸中的占比响应苜蓿返青,可调控气孔发育和光合酶活性以优化光合作用、减轻氧化损伤,还能增强低温耐受性(尤其低休眠品种),是该作物春季得以成功再生的重要机制之一。适当的田间管理可以提高紫花苜蓿刈割后的再生性能,其中刈割次数影响显著:多次刈割会使根中粗蛋白质和总糖含量降至最低,不利于其安全越冬及再生^[6]。水分和氮肥不足限制紫花苜蓿刈割后再生,水分亏缺显著降低再生生物量,施氮则通过调控新叶与根系中渗透保护相关基因、糖代谢、激素信号及关键转录因子的多基因网络和代谢途径重排改善再生生物量,且不同时期差异表达基因具有组织特异性^[7-9]。

但在该领域的研究仍存在系统性局限:一方面,现有评价体系多聚焦单一表型指标,如株高、生物量等,缺乏整合生长动态、光合恢复与非结构性碳水化合物时空分配的多维度综合评价;另一方面,品种间再生分化规律不清。苜蓿品种的秋眠级越高,其生产性能越低,如秋眠级 ≥ 8 的品种(如WL系列)再生速度较秋眠级 ≤ 4 品种快1.8倍,其背后碳氮代谢协同调控机制尚未解析。

本研究通过对9份紫花苜蓿材料进行两年田间观察,发现9份紫花苜蓿材料刈割后再生性能差异明显,因此本研究以9份紫花苜蓿品种为材料,集中于对其生长发育表型、光合作用效率及可溶性糖和淀粉含量等指标,开展多指标综合评价,旨在明确不同品种间再生能力的差异,揭示影响再生性的关键因素,为紫花苜蓿的高效育种和科学刈割管理提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

9个紫花苜蓿参试品种(表1)的种子收获于2021年9月,保存于西北农林科技大学草业与草原学院种质资源实验室-20℃冰箱内,以备试验所用。

表1 9个紫花苜蓿参试品种基本信息
Table 1 Basic information of the 9 tested alfalfa cultivars

编号 No.	品种 Cultivar	原产地 Place of origin	秋眠级 FD level	种子初始发芽率 Initial germination percentage/%
1	北极星 Beiji Star	中国 China	3	92.26
2	Bara 210	美国 USA	4.5	94.67
3	佰苜 202 I Baimu 202 I	加拿大 Canada	3	95.34
4	WL168HQ	美国 USA	4	91.22
5	佰苜 202 II Baimu 202 II	加拿大 Canada	3	94.56
6	WL363HQ	美国 USA	5	93.45
7	WL712	美国 USA	6	94.67
8	特列克 Telake	中国 China	2.5	92.23
9	游客 Youke	澳大利亚 Australia	7	96.00

1.2 试验设计

1.2.1 种子萌发与幼苗生长试验 每个品种各选取均匀饱满的紫花苜蓿种子100粒。种子表面消毒时,先将其浸泡于75%乙醇溶液中10分钟,随后用灭菌水冲洗7次,以彻底去除残留消毒剂。消毒后的种子放置于含有1/2 Murashige& Skoog (1/2 MS)培养基的培养皿中进行萌发。为促进种子萌发,首先将其置于4℃的黑暗环境中培养2天,模拟低温预处理过程。将种子转移至设定温度为25℃

的黑暗生长箱中,继续培养3天,促使种子萌发形成幼苗。挑选长势良好的幼苗,移栽至装满蛭石的小钵(7 cm×7 cm)中。采用随机区组设计划分小区,每品种60钵(每钵5株),每盆均匀间隔种植,确保幼苗拥有充足的生长空间,以及实验数据具备可靠性与重复性。

幼苗于人工气候室中培养,气候室环境条件严格控制如下:白天温度25℃,夜间温度18℃,光周期为光照/黑暗=16 h/8 h,光照强度为(320±20)

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在上述的环境条件下,幼苗持续生长40天。

1.2.2 试验处理与情况统计 选取生长至40日龄处于初花期的紫花苜蓿,测定株高后进行刈割处理,留茬高度设定为5 cm(激光测距仪校准)。为兼顾再生动态的连续观测与牧草充分生长所需时间,以刈割当日(0 d)为起点。在刈割后的第1,3,5,7,9,11,13和15天,每个时间点随机选取6盆生长态势良好且整齐的植株,进行各项指标的测定。再生高度是形态指标,变化快速连续且非破坏性,故选1~15天密集点以捕捉动态生长;可溶性糖和淀粉含量为能量指标,变化周期长且需破坏性取样,观察发现,在刈割后第7天,第14天时表现出较为显著的品种差异,因此,本试验选择第0,7,14天为可溶性糖和淀粉含量测定的取样时间点。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 株高测定 每日9:00选取3盆长势一致的紫花苜蓿,使用数显游标卡尺(精度0.01 mm)测量茎基部至顶芽垂直高度。对剩余植株刈割后逐一测量枝条长度,绘制生长曲线并统计平均枝条长度。采用Logistic模型 $y=1+e^{-k(t-t_0)a}$ 计算最大生长速率(k)。

1.3.2 生物量测定 于刈割后0,7,14天取样留茬5 cm的地上部分,地下部分蒸馏水冲洗3次后滤纸吸至无自由水渗出后称鲜重,烘箱105℃杀青30 min转80℃烘至恒重(48 h±2 h)后用精度1/1000天平测定干重。

1.3.3 可溶性糖与淀粉含量测定 参考硫酸-蒽酮比色法并进行改进。茎段108℃烘干至恒重,研磨过100目筛。称取0.1 g粉末,加10 mL 80%乙醇溶液,80℃水浴提取30分钟,收集上清液85℃蒸发测定可溶性糖。残渣用蒸馏水溶解后,经 $9.2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $4.6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HClO}_4$ 两次提取,采用蒽酮比色法测定淀粉浓度(试剂为0.2%蒽酮溶于浓硫酸)。

1.3.4 光合特性测定 选取顶端向下第3片完全展开叶,利用Li-6800光合作用测量系统,于刈割后0,3,5,7,9,11,13天(因刈割后1天再生新叶过小无法测定而剔除),测量时间为上午9:00—11:00,光照充足,试验地内 CO_2 浓度为 $400\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,光照强度设定为 $12\text{ }000\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。测量指标包括蒸腾速率(Transpiration rate, T_r)、净光合速率(Net photosynthetic rate, P_n)、胞间 CO_2 浓度(Intercellular

CO_2 concentration, C_i)、气孔导度(Stomatal conductance, G_s),每盆选取3片叶片,3次重复。

1.4 数据统计与分析

所有测定数据运用Excel 2021进行整理并计算出平均值和标准误差,使用IBM SPSS Statistics 26统计软件进行双因素方差分析(品种×时间),使用Duncan's法对平均值进行多重比较,根据测定指标对品种进行系统聚类分析。作图采用Origin 2021软件。采用隶属函数法,对9份紫花苜蓿品种的株高、平均枝条长、干重、可溶性糖和淀粉含量、光合特征进行客观、全面的综合评价,以评估9份紫花苜蓿品种的再生性。在所有的图表中,误差线表示标准误差,“*”($P<0.05$)或“**”($P<0.01$)分别表示显著差异或极显著差异。

2 结果与分析

2.1 刈割对紫花苜蓿生长的影响

为期15天的监测发现,9个紫花苜蓿品种的刈割后再生株高变化显著(图1),品种间再生生长动态不同($P<0.05$)。第15天的株高测定结果显示,‘游客’品种表现突出,株高达26.71 cm($P<0.01$);其次为‘WL363HQ’与‘佰苜202 II’,株高分别为25.92 cm与24.81 cm;‘佰苜202 I’‘WL168HQ’等中间型品种的株高介于18.30~22.71 cm之间;而‘北极星’再生能力最弱,株高仅13.29 cm,日均增长速率为 $0.88\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

基于三次多项式模型($R^2\geq 0.85$)的拟合曲线(图2)进一步揭示了品种间的生长模式差异。生长速率方面,‘WL363HQ’和‘游客’品种的日均增长速率突出,分别为 $1.93\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1.72\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$;而‘北极星’和‘Bara210’的速率较低,分别为 $0.81\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1.53\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。‘WL168HQ’和‘Telake’均表现出典型的双相生长特征,其生长曲线在第14~16天出现拐点,前期生长速率($1.32\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$)高于后期($0.82\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$);‘北极星’和‘WL363HQ’则保持单相线性增长。‘佰苜202 I’‘WL168HQ’等中间型品种的生长拐点多出现在第8~10天。稳定性分析表明,‘Bara210’和‘佰苜202 II’的拟合残差平方和(RSS)分别为4.27和3.89,显著高于其他品种均值(1.32 ± 0.41 , $P<0.001$),表型稳定性较低。

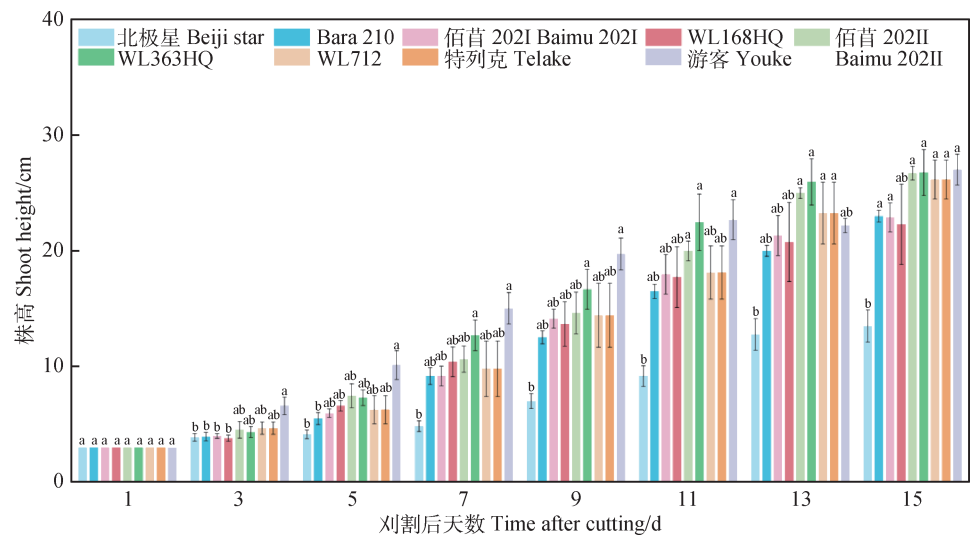


图 1 刈割再生后 9 个紫花苜蓿品种的株高

Fig. 1 Plant height of 9 alfalfa varieties after cutting and regrowth

注:不同字母表示同一时间点不同品种之间的显著性差异($P<0.05$),下同

Note: Different letters indicate significant differences among varieties at the same time point ($P<0.05$), applicable to this article

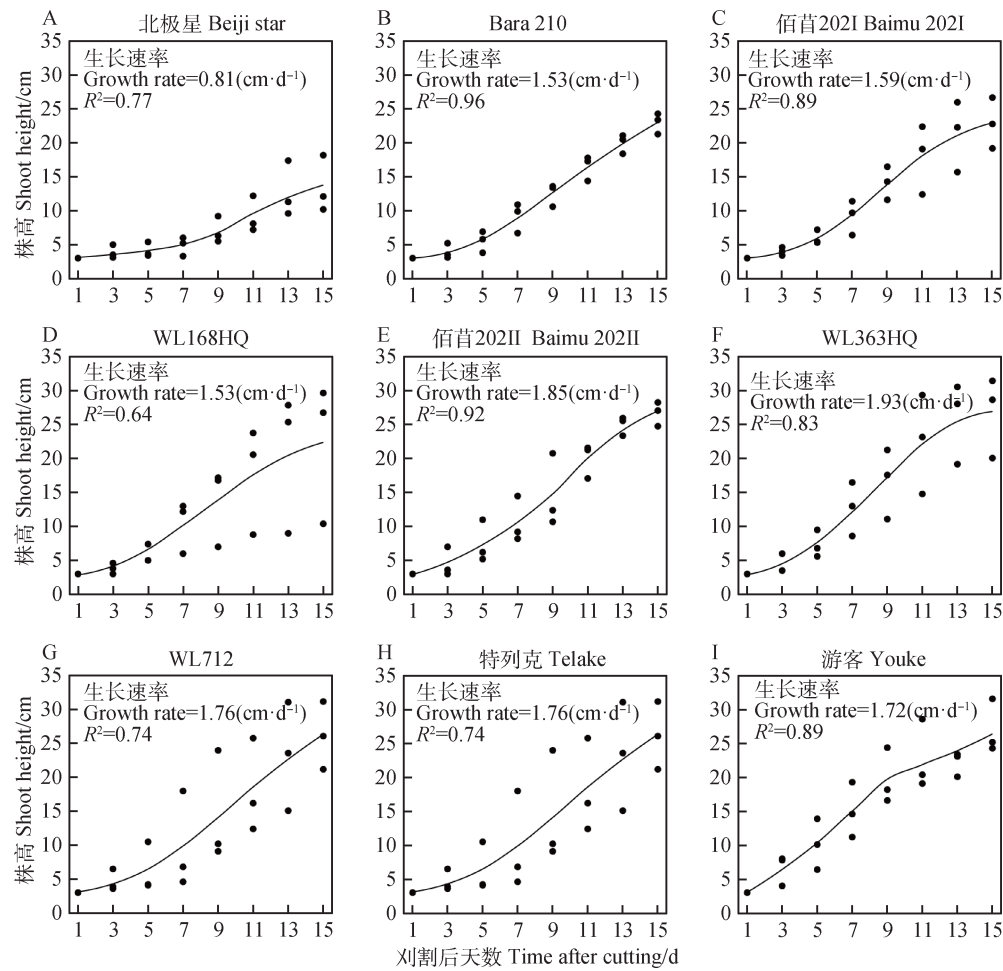


图 2 刈割再生后 9 个紫花苜蓿品种的生长曲线

Fig. 2 Growth curves of 9 alfalfa varieties after cutting and regeneration

2.2 刈割对非结构碳水化合物含量的影响

不同紫花苜蓿品种之间各时间的可溶性糖和淀粉含量差异显著($P < 0.05$)。在根颈可溶性糖含量方面,所有品种均呈现下降-回升的代谢补偿模式。至14 d恢复期,‘北极星’可溶性糖含量回升至7.1%,恢复率达17.4%,显著高于‘游客’的3.2%。在根颈淀粉含量上,所有品种均表现出V型代谢响应。刈割后7 d,淀粉降解率与初始储量呈负相关。其中,‘游客’淀粉含量从13.2%降至11.1%,降解率为15.9%;‘Telake’从12.0%降至10.25%,降解率为14.6%抗降解能力最强;‘北极星’从5.1%降至4.0%,降解率为21.6%,抗降解能力最弱。14 d恢复期,高储量型的‘游客’较初始值仅下降6.8%,

显著优于低储量型的‘北极星’(图3)。

在根系可溶性糖含量方面,所有品种均呈现快速消耗-缓慢恢复的模式。刈割后7 d,‘北极星’可溶性糖含量从12.3%降至5.1%,降幅达58.5%,高于‘游客’从3.2%降至2.0%。在14 d的恢复期内,高储量型的‘北极星’再生生物量与糖含量恢复率呈现同步升高的趋势;低储量型的‘游客’恢复率不足初始值的25%。在根系淀粉含量上,所有品种同样呈现V型代谢响应。刈割后7 d,‘北极星’淀粉降解率最低,‘游客’降解率最高。14 d恢复期,高储量品种‘北极星’再生速率与淀粉恢复量呈显著正相关;低储量品种‘游客’恢复量仅为初始值的34.4%。

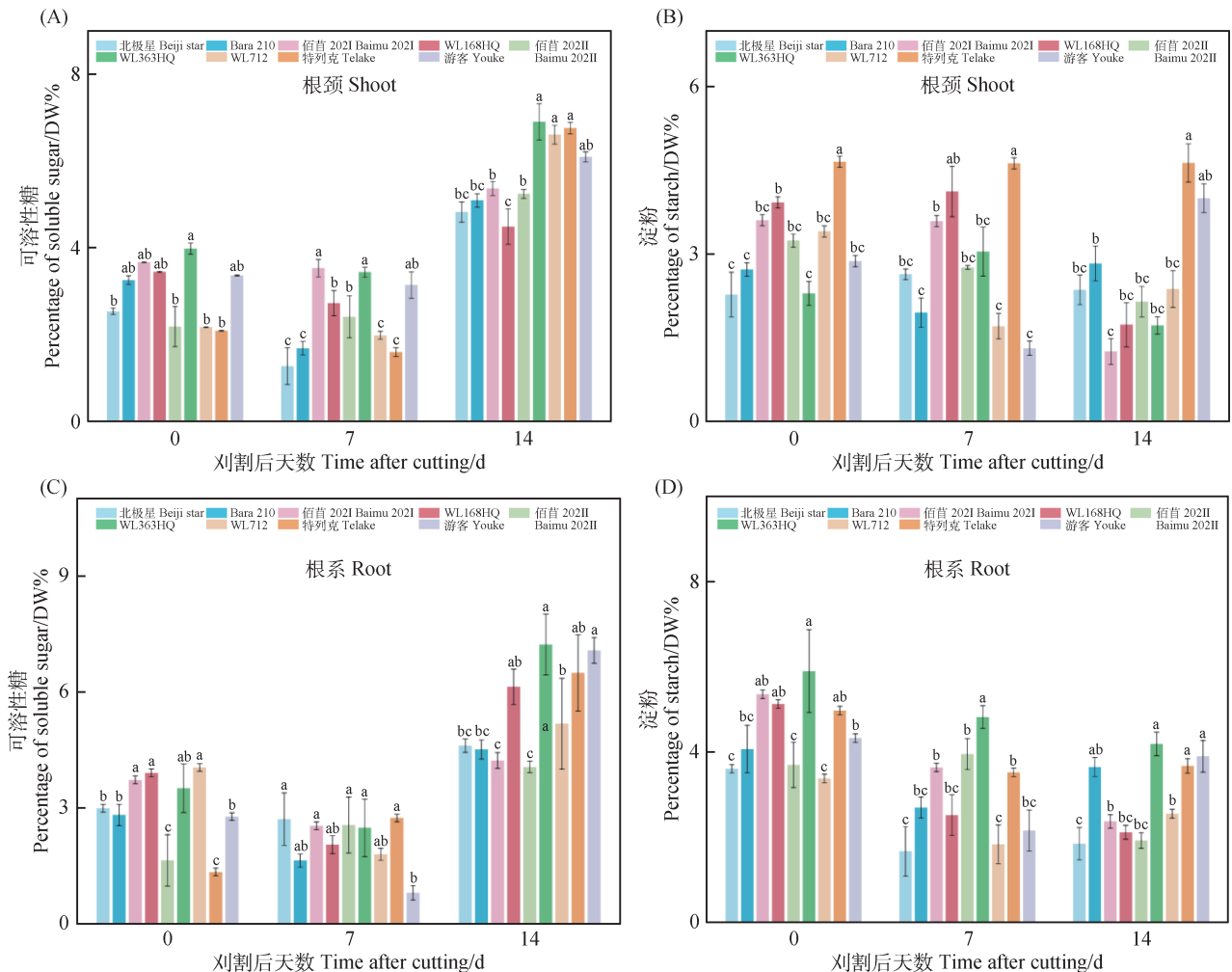


图3 不同时间下9个紫花苜蓿品种根颈非结构碳水化合物含量的差异

Fig. 3 Differences in non-structural carbohydrate content in the crown of 9 alfalfa varieties at different times

2.3 刈割对紫花苜蓿光合参数的影响

通过连续15天监测光合参数,发现不同品种的再生期光合恢复机制差异明显(图4)。各品种净光合速率(P_n)的恢复动态差异显著,据此可将

其划分为高恢复能力型与低恢复能力型两类品种。‘WL363HQ’在刈割后13天达峰值 $7.38 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,而‘北极星’始终低于 $0.32 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。 G_s 态分析显示,‘WL363HQ’刈割后7天 G_s 达峰值

$0.42 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 恢复速率为 $0.18 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 显著高于其他品种 ($P < 0.01$)。其高 G_s 值维持时间长, 保障 CO_2 持续供应。‘游客’的 G_s 峰值为 $0.38 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 恢复速率更快, 为 $0.21 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。‘北极星’的 G_s 峰值仅 $0.11 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 恢复速率为 $0.06 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 且波动显著。 C_i 变化明

显, ‘北极星’在刈割后 5 天 C_i 远高于正常值, 达 $312 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, ‘WL363HQ’维持 C_i 在最适同化区间 $218 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。 T_r 各品种动态变化趋势相同, 其中‘游客’到达峰值 $4.05 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, ‘WL363HQ’次之, 为 $3.82 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, ‘北极星’最低为 $0.98 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

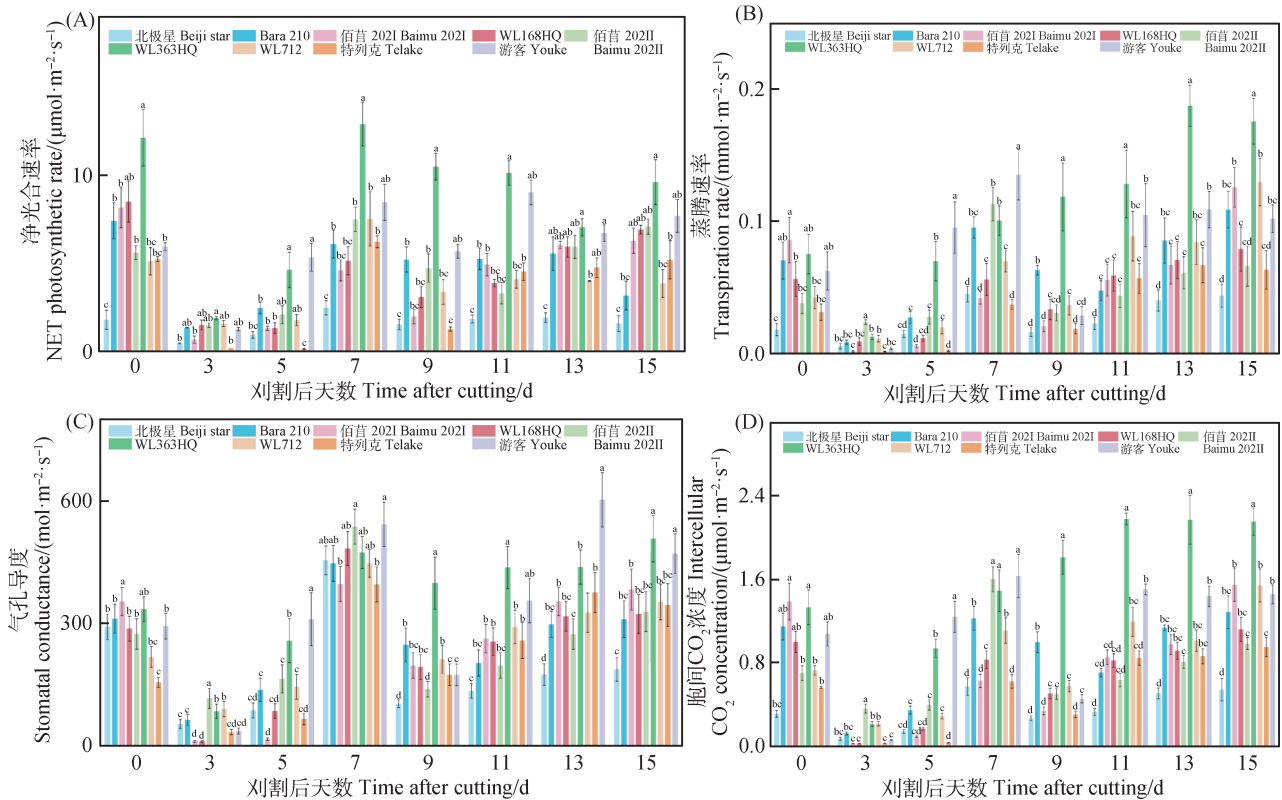


图4 刈割后再生过程中9个紫花苜蓿品种光合特征参数

Fig. 4 Photosynthetic characteristic parameters of 9 alfalfa varieties during the regrowth process after mowing

2.4 9种紫花苜蓿品种再生性的综合评价

采用隶属函数法整合6项关键指标建立评价体系(表2)。“WL363HQ”在综合得分中位居榜首, 得分高达0.65, 该品种的突出表现主要归因于其极高的净光合速率。‘北极星’综合得分仅为0.35, 排名末位, 在株高(0.61 cm)、干重(0.07 g)和净光合速率($0.32 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)等关键指标上, ‘北极星’的表现欠佳。‘Bara 210’‘佰苜 202I’‘WL168HQ’‘佰苜 202II’‘WL712’和‘Telake’的综合得分依次为0.42, 0.47, 0.51, 0.56, 0.59和0.53, 分别位居第8, 7, 6, 5, 4和3位。这些品种在各项指标上整体表现处于中等水平, 以‘佰苜 202II’为例, 其净光合速率为 $6.20 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 表现较为突出, 然而株高和干重相对较低; ‘Telake’的淀粉含量达 $0.05 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, 处于

所有品种的较高水平, 但是净光合速率仅 $1.49 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 相对较低。

2.5 紫花苜蓿刈割后生物量动态变化

以刈割即刻(0 d)的生物量为基准(图5), 所有9个供试品种经刈割处理(留茬高度5 cm)后, 地上部生物量初始值保持一致。在刈割后7 d这一关键转折期, ‘WL363HQ’的地上部生物量呈现快速恢复态势, 至14 d时株高及生物量均居首位; ‘WL168’与‘游客’两个品种表现优良, 生物量处于较高水平; 其余品种则处于中等水平。慢生型品种‘北极星’在7 d时生物量积累量较低, 至14 d时其地上部生物量显著低于其他品种。

表 2 9 个紫花苜蓿品种刈割后 6 个关键指标隶属函数值的计算及排序分析

Table 2 Calculation and ranking analysis of membership function values for 6 key indicators of 9 alfalfa varieties after cutting

品种 Cultivar	隶属函数值 Subordinative function value						综合得分 Composite score	排序 Rank
	株高 Height	平均枝条长 Average length	干重 Dry weight	可溶性糖 Soluble sugar	淀粉 Starch	净光合速率 Net photosynthetic rate		
北极星 Beiji star	0.61	10.87	0.07	0.08	0.03	0.32	0.35	9
Bara 210	2.06	15.84	0.28	0.02	0.02	3.07	0.42	8
佰苜 202I Baimu 202I	2.06	20.63	0.08	0.04	0.04	2.38	0.47	7
WL168HQ	2.47	15.48	0.13	0.03	0.04	2.44	0.51	6
佰苜 202II Baimu 202II	2.54	19.68	0.10	0.02	0.03	6.20	0.56	5
WL363HQ	4.23	18.53	0.14	0.02	0.03	9.38	0.65	1
WL712	2.27	16.89	0.14	0.02	0.02	3.42	0.59	4
特列克 Telake	2.27	17.46	0.09	0.02	0.05	1.49	0.53	3
游客 Youke	4.01	16.79	0.21	0.01	0.01	10.07	0.61	2

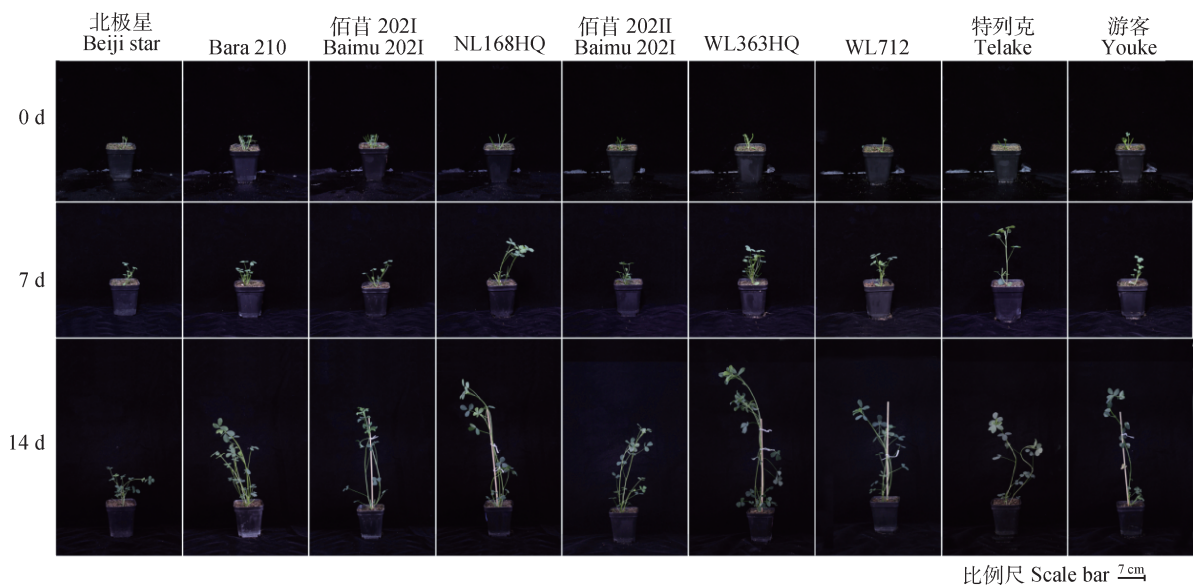


图 5 9 个紫花苜蓿品种刈割后 0, 7, 14 d 生物量动态变化比较

Fig. 5 Comparison of the dynamic changes in biomass of 9 alfalfa varieties at 0, 7, and 14 days after cutting

3 讨论

紫花苜蓿作为全球最重要的豆科牧草,其再生能力强弱直接决定年产草量和种植效益。本研究通过多维度综合评价,系统揭示了 9 个紫花苜蓿品种在高频刈割下再生能力的差异及其生理机制,为耐刈割品种选育提供了理论依据。

本研究证实不同紫花苜蓿基因型在刈割后再生能力存在显著差异。基于隶属函数的综合评价显示,‘WL363HQ’与‘游客’属于强再生型品种,而‘北极星’再生表现显著弱于其他基因型。该显著的基因型变异规律与南志标等对全球紫花苜蓿种质资源的研究结论一致,其研究表明不同遗传背景的品种在生物量积累与持久性方面存在显著差异^[10]。值得注意的是,本研究中高秋眠级品种(如

‘WL363HQ’, FD=5)表现出更强的再生能力,这与秋眠性调控苜蓿生长模式的报道相符。然而秋眠级并非唯一决定因素,如同属秋眠级 3 的‘佰苜 202I’与‘佰苜 202II’在再生表现上存在显著差异,表明除秋眠特性外,尚有其他重要遗传因子参与再生过程的调控,如聂佳明研究揭示的分蘖特性及腋芽萌发动态相关的遗传调控网络^[11]。

光合作用是牧草再生的重要能量来源。本研究揭示,净光合速率(P_n)可作为区分品种再生能力的关键指标。刈割后第 13 天,‘WL363HQ’的 P_n 值达 $7.38 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,显著高于其他品种。该发现与 Staacke 等^[12]在作物生理学研究提出的观点一致,即作物胁迫后恢复生长的核心机制在于快速重建光合源与生长库的平衡。深入分析表明,‘WL363HQ’的高 P_n 值归因于其气孔导度(G_s)的显

著提升,从而使其能够将胞间 CO_2 浓度(C_i)维持在最优化区间。这一发现与文献^[13]的结论相吻合,即耐刈割苜蓿品种可通过优化气孔行为与水碳交换效率来促进再生生长。相比之下,‘北极星’的 G_s 峰值仅 $0.11 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,且伴随 C_i 异常升高,表明其光合作用可能受非气孔限制因素影响,如光合机构损伤或碳同化代谢紊乱。

非结构性碳水化合物(NSC)是植物刈割后再生所需的重要储能物质。本研究发现,所有供试品种根颈淀粉含量在刈割后均呈现典型的V形变化趋势,符合多年生牧草碳储备利用的基本模式^[14]。值得关注的是,尽管‘游客’品种初始淀粉储量最高(达13.2%),其再生表现仍逊于‘WL363HQ’品种。这表明静态储备量并非决定再生能力的唯一因素,NSC的动员效率同样具有关键作用。已有研究指出,NSC的再利用优先级及速率较其静态储量更能决定再生表现^[15]。强再生型品种在刈割后7天维持较高的淀粉降解速率,并在第14天实现储备的快速恢复,这种动态平衡能力是其适应高频刈割的关键生理机制。

株高生长曲线分析显示,不同品种表现出不同的生长模式。‘WL363HQ’保持稳定的线性增长,而‘WL168HQ’和‘特列克’则呈现典型的双相生长。这种生长模式的差异可能与内源激素调控有关,与生长素和细胞分裂素的平衡会影响刈割后的再生模式研究结果一致^[16]。在生物量积累方面,刈割后14天时,‘WL363HQ’的地上部生物量显著高于其他品种,这与快速再生品种具有更高生物量分配效率的结论一致^[17]。值得注意的是,生物量积累与NSC消耗之间存在权衡关系,强再生型品种能够在维持一定储备的同时实现快速生长,体现出高效的碳资源配置策略。

基于本研究结果,建议在耐刈割苜蓿育种中应着重关注两个核心性状:一是刈割后光合速率的恢复能力,二是根颈淀粉储备及其动员效率。协同提升上述性状将有助于选育更适应高频刈割制度的品种。在栽培管理方面,需依据再生能力差异实施差异化栽培策略:强再生型品种可承受更高刈割频率,而弱再生型品种则需延长恢复周期,此策略符合现代精准农业的差异化栽培理念。

4 结论

本研究通过多指标综合评价,明确了紫花苜蓿

品种间再生能力的显著差异,并鉴定出‘WL363HQ’为最适合高频刈割的品种。研究揭示了品种再生能力差异的生理机制:高效的光合碳同化能力与优化的非结构性碳水化合物动态平衡是决定再生能力的关键。强再生型品种能够通过快速重建光合机构并有效利用储存碳源,实现刈割后的快速恢复。本研究建立的以净光合速率和根颈淀粉含量为核心的双指标筛选体系,可为耐刈割紫花苜蓿品种选育提供有效工具。

参考文献

- [1] 韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等. 紫花苜蓿(*Medicago sativa*)对干旱胁迫的光合生理响应[J]. 生态学报,2007,27(12):5229-5237
HAN R H, LU X S, GAO G J, et al. Photosynthetic physiological response of alfalfa (*Medicago sativa*) to drought stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5229-5237
- [2] 郑爱荣,牛岩,张晓霞,等. 发展草牧业应把握的几个关系[J]. 中国畜牧业,2023(15):26-31
ZHENG A R, NIU Y, ZHANG X X, et al. Several relationships to be grasp in developing grassland and animal husbandry industry[J]. China Animal Industry, 2023(15): 26-31
- [3] 邹敏,成慧,宁娇,等. 黄土高原4种高糖黑麦草在不同刈割方式下的营养价值评价[J]. 草地学报,2025,33(2):609-617
ZOU M, CHENG H, NING J, et al. Evaluation of nutritional value of four high-sugar ryegrass varieties on the Loess Plateau under different cutting methods[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2): 609-617
- [4] 张馨元,杨天辉,王文军,等. 多次刈割对黄土高原豆科牧草生产性能的影响[J]. 草地学报,2025,33(4):1163-1171
ZHANG X Y, YANG T H, WANG W J, et al. Effect of multiple mowing on the production performance of leguminous forage in Loess Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4): 1163-1171
- [5] AN C Q, LIU M J, ZHANG Z, et al. Contribution of the alternative pathway on spring rejuvenation of alfalfa[J]. Journal of Plant Physiology, 2024, 302: 154319
- [6] 祁希明,祁娟,孟祥君,等. 河西荒漠灌区紫花苜蓿生产及其碳密度对建植年限和茬次的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(4): 229-237
QI X M, QI J, MENG X J, et al. Effects of planting year and stubble on alfalfa production and vegetation carbon density in Hexi Irrigation Area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(4): 229-237
- [7] LI Z S, HE F, TONG Z Y, et al. Metabolomic changes in crown of alfalfa (*Medicago sativa* L.) during de-acclimation[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 14977
- [8] ADHIKARI L, LINDSTROM O M, MARKHAM J, et al. Dissecting key adaptation traits in the polyploid perennial *Medicago sativa* using GBS-SNP mapping[J]. Frontiers in Plant

- Science, 2018, 9: 934
- [9] HUANG X Z, LIU L, QIANG X J, et al. Integrative metabolic and transcriptomic analysis elucidates that the mechanism of phytohormones regulates floral bud development in alfalfa [J]. *Plants*, 2024, 13(8): 1078
- [10] 南志标, 王彦荣, 贺金生, 等. 我国草种业的成就、挑战与展望[J]. *草业学报*, 2022, 31(6): 1-10
- NAN Z B, WANG Y R, HE J S, et al. Achievements, challenges and prospects of herbage seeds industry in China [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(6): 1-10
- [11] 聂佳明. 分蘖期裸燕麦对 ABA 及其合成抑制剂 STD 的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024: 71-72
- NIE J M. Response of *Avena nuda* during tillering stage to ABA and its synthesis inhibitor STD [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024: 71-72
- [12] STAACKE T, MUELLER-ROEBER B, BALAZADEH S. Stress resilience in plants: the complex interplay between heat stress memory and resetting [J]. *The New Phytologist*, 2025, 245(6): 2402-2421
- [13] HU Y Z, DING R S, KANG S Z, et al. The trade-offs between resistance and resilience of forage stay robust with varied growth potentials under different soil water and salt stress [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157421
- [14] 杨秀芳. 末次刈割时间对 3 种紫花苜蓿越冬前后根颈非结构碳氮含量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(1): 9-16
- YANG X F. Effect of last cutting dates on contents of non-structural carbon and nitrogen in root necks of three alfalfa varieties before and after overwintering [J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2023, 51(1): 9-16
- [15] 吴冬青, 李洲, 郭春林, 等. 再生季稻与同期抽穗主季稻干物质分配特性及机制研究[J]. *作物学报*, 2023, 49(3): 755-771
- WU D Q, LI Z, GUO C L, et al. Dry matter partitioning properties and mechanism of ratooning rice and main crop (late season) synchronized in rice heading time [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2023, 49(3): 755-771
- [16] CHENG Z J, WANG L, SUN W, et al. Pattern of auxin and cytokinin responses for shoot meristem induction results from the regulation of cytokinin biosynthesis by AUXIN RESPONSE FACTOR3 [J]. *Plant Physiology*, 2013, 161(1): 240-251
- [17] 张政, 刘美君, 王婕, 等. 低温下紫花苜蓿叶片的光破坏防御作用[J]. *草地学报*, 2024, 32(5): 1429-1439
- ZHANG Z, LIU M J, WANG J, et al. The photoprotection mechanism of alfalfa leaves under low temperature [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5): 1429-1439

(责任编辑 闵芝智)