DOI:10.11686/cyxb2025477 http://cyxb.magtech.com.cn
苏日力格, 杨陶阳, 乌日力格, 等. 刈割对呼伦贝尔草原有毒植物狼毒大戟主要功能性状的影响. 草业学报, 2026, 35(11): 119－131.
Surilige, YANG Tao-yang, Wurilige, *et al*. Effects of mowing on key functional traits of the toxic plant *Euphorbia fischeriana* in the Hulunbuir grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(11): 119－131.

刈割对呼伦贝尔草原有毒植物狼毒大戟主要功能性状的影响

苏日力格[1,2],杨陶阳[2,3],乌日力格[1,2],姜娜[2],杨殿林[2],张海芳[2*],苏日古嘎[1,4*]
(1. 内蒙古师范大学生命科学与技术学院,内蒙古 呼和浩特 010022;2. 农业农村部环境保护科研监测所,天津 300191;3. 东北农业大学资源与环境学院,黑龙江 哈尔滨 150006;4. 内蒙古自治区高等学校蒙古高原生物多样性保护与可持续利用重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要:近年来,由于过度放牧和全球气候变化共同作用,我国北方天然草地退化严重。有毒植物狼毒大戟在天然草地中迅速扩张,成为天然草原退化的主要特征之一,严重制约区域生态、生产安全和草牧业可持续发展。刈割作为物理防控天然草地有毒植物狼毒大戟的主要手段,研究探明刈割时期对草原有毒植物功能性状的影响,是理解其扩张机制与制定生态调控策略的重要科学问题。本研究以呼伦贝尔草原主要有毒植物狼毒大戟为对象,设置不刈割对照(CK)、盛花期单次刈割(FM)、结实期单次刈割(RM)、黄枯期单次刈割(SM)、盛花期和结实期重复刈割(TM)处理,分析不同刈割时期和刈割频次对狼毒大戟主要植物功能性状的影响。结果表明:1)刈割均抑制了狼毒大戟的生长,其中以盛花期和结果期重复刈割(TM)效果最为显著,使狼毒大戟株高、密度、地上生物量、地下生物量、生殖枝数量分别比对照下降57.28%、86.80%、59.05%、56.44%、71.83%。2)从叶和根性状来看,刈割显著降低了叶厚度、单叶面积、比根长、比根面积,同时显著提高了叶氮、叶磷含量($P<0.05$),此外,盛花期和结果期重复刈割显著提高粗根全氮含量,盛花期单次刈割(FM)显著提高了细根直径($P<0.05$);Pearson相关性分析结果可知,狼毒大戟叶片与根系性状在刈割干扰下呈显著相关性,说明地上与地下功能性状之间存在协同响应关系。3)生殖枝数量为刈割干扰响应最为敏感性状,叶干物质含量、比叶面积、比叶重、细根组织密度及叶厚度,为刈割干扰响应的惰性性状。综上所述,盛花期和结果期重复刈割处理对狼毒大戟各项生长和功能性状指标影响最大,对狼毒大戟再生和开花结实抑制效果最为理想。

关键词:狼毒大戟;功能性状;毒害草;刈割

Effects of mowing on key functional traits of the toxic plant *Euphorbia fischeriana* in the Hulunbuir grassland

Surilige[1,2], YANG Tao-yang[2,3], Wurilige[1,2], JIANG Na[2], YANG Dian-lin[2], ZHANG Hai-fang[2*], Suriguga[1,4*]
1. *College of Life Sciences and Technology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot* 010022, *China*; 2. *Environmental Protection Research and Monitoring Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin* 300191, *China*; 3. *College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin* 150006, *China*; 4. *Key Laboratory of Biodiversity Conservation and Sustainable Utilization in Mongolian Plateau for College and University of Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot* 010022, *China*

Abstract: Grassland degradation in northern China has intensified in recent decades due to the combined effects of

收稿日期:2025-11-24;改回日期:2026-01-05
基金项目:国家重点研发计划(2023YFF1304102)和内蒙古自然科学基金项目(2023MS03011)资助。
作者简介:苏日力格(2001－),男,内蒙古通辽人,在读硕士。E-mail: hansrlg@163.com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: zhanghaifang01@caas.cn;suriguga@imnu.edu.cn

overgrazing and climate change. The poisonous species *Euphorbia fischeriana* has rapidly expanded across native grasslands, becoming a dominant indicator of grassland degradation and posing severe threats to regional ecological security, livestock production, and sustainable grassland management. Mowing is a key physical control measure for suppressing *E. fischeriana* invasion. Investigating the effects of mowing timing on functional traits of this weed is essential for understanding the mechanisms underlying its spread and for developing effective ecological regulation strategies. In this study, *E. fischeriana* populations in the Hulunbuir grasslands were subjected to five mowing treatments: no mowing (CK), single mowing at the flowering stage (FM), single mowing at the fruiting stage (RM), single mowing at the senescent stage (SM), and mowing at both the flowering and fruiting stages (TM). The effects of mowing timing and frequency on key plant functional traits were quantified. It was found that: 1) Mowing markedly inhibited *E. fischeriana* growth, with the TM treatment exerting the strongest suppression. Compared with the control, plant height, density, aboveground biomass, belowground biomass, and the number of reproductive branches decreased by 57.28%, 86.80%, 59.05%, 56.44%, and 71.83%, respectively. 2) With respect to leaf and root traits, mowing significantly reduced leaf thickness, individual leaf area, specific root length, and specific root surface area, while increasing leaf nitrogen and phosphorus contents. The TM treatment significantly elevated coarse root nitrogen content, and the FM treatment significantly increased fine root diameter ($P<0.05$). Pearson correlation analysis revealed significant associations between leaf and root traits, suggesting a coordinated above- belowground adaptive strategy under mowing disturbance. 3) Among all measured traits, the number of reproductive branches was identified as the most mowing-sensitive trait, whereas leaf dry matter content, specific leaf area, specific leaf weight, fine root tissue density, and leaf thickness were relatively insensitive. In conclusion, repeated mowing during the flowering and fruiting stages had the greatest impact on the growth and functional traits of *E. fischeriana*, achieving the most effective inhibition of its regeneration, flowering, and seed setting.

Key words: *Euphorbia fischeriana*; functional trait; poisonous weed; clipping

植物功能性状即植物为适应环境演化出的个体水平上的可量化特征,涵盖形态结构(如比叶面积)、生理代谢(如光合速率)及化学组成(如次生代谢物浓度)等维度[1]。这些特征通过调控资源获取、分配与利用效率,直接影响其植物生存适应力、生长发育效率及繁殖成功率[2]。植物功能性状是连接植物与环境的桥梁,反映了植物对环境变化的响应和适应策略[3]。在地上部分,植物高度作为核心功能性状之一,与光竞争和生物量积累密切相关。而叶片是植物光合作用的主要同化器官,其形态及化学性状显著影响光合能力和养分利用效率[4]。叶片作为植物对环境变化响应最敏感、可塑性最强的器官,其功能性状能够有效反映基本生理功能,进而有效表征植物的生理状态与环境适应能力[5]。在地下部分,细根(直径<2 mm)是植物吸收水分和养分最活跃的部位,对土壤环境的变化响应极为敏感[6]。细根的形态、结构以及其生理生化特性,决定了植物在资源获取、能量分配和生态系统物质循环中的关键作用[7]。植物功能性状的形成实质上体现了其在资源获取与生存维持之间的权衡策略[8]。植物地上功能性状所体现的“资源权衡策略”近年来已成为植物生态学的重要理论进展,为理解植物在环境梯度下的分布格局和适应机制提供了理论基础。然而,地下与地上功能性状的协同关系研究仍相对薄弱,这在一定程度上限制了对植物整体生态策略的全面认识[9]。

根据现有研究,植物功能性状与环境之间的相关性研究较为充分,多数集中在气候[10]、海拔[11]等自然环境因素,施肥[12]、放牧[13]、采伐[14]等人为干扰因素,然而,刈割干扰对植物功能性状影响的研究还相对匮乏且结论不一致。在众多干扰类型中,刈割是一种常见的草地管理和利用方式,同时也是入侵植物[15]和杂草[16]治理的重要物理控制手段。刈割通过直接移除地上生物量改变资源分配格局,同时影响光照、竞争关系、养分循环过程,从而诱导植物在“保守型-获取型”策略之间的动态转换[17]。例如,徐慧敏等[18]研究发现,长期刈割干扰下羊草(*Leymus*

chinensis)的植株高度、地上鲜重、叶面积、叶干重等呈显著降低趋势,而比叶重和比叶面积变化不显著。也有研究发现,刈割后比叶面积极显著升高,而叶干物质含量显著降低[19]。这些结果说明,植物对刈割的响应具有明显的性状可塑性,但其生态学机制仍不清晰。

草原生态系统约占地球表面积的40%,对于碳储存、气候调节等生态系统服务至关重要[20]。我国草地面积约2.93×10^8 hm^2,约占国土面积的30.5%[21]。由于长期的人类干扰和自然气候变化,我国的天然草地有90%左右处于不同程度的退化之中,其中严重退化草地占60%以上[22]。天然草地退化,优良牧草减少,毒草通过较强的适应力(如发达的根系)和竞争力(如化感作用)大范围蔓延成为优势种[23],造成牲畜中毒事件多发,甚至暴发,严重影响了草地畜牧业的发展和生态安全。狼毒大戟(*Euphorbia fischeriana*)为大戟科(Euphorbiaceae)大戟属(*Euphorbia*)多年生有毒草本植物[24],全株含有毒乳汁,根系粗壮发达、肉质明显。其在草原生态系统中具有明显的物候优势:4月中旬返青;5月中旬为现蕾期,下旬为盛花期;6月上旬结实,下旬枯黄[25]。主要分布在蒙古、西伯利亚东部、中国东北地区(内蒙古、辽宁、黑龙江)至山东沿海地区[26]。凭借其深根系统和较强的环境适应性,狼毒大戟在退化草地中迅速扩张,成为我国北方草原生态系统退化的重要指示种和控制难点。目前,关于狼毒大戟的研究主要集中于药用化学成分分离与鉴定、毒理机制及毒害草防控等方面,而其生态学特征与功能性状响应机制研究相对不足。植物功能性状作为连接植物与环境的关键纽带,对揭示物种生态适应与扩张机制具有重要意义。因此,本研究以内蒙古呼伦贝尔市鄂温克族自治旗狼毒大戟型退化草地为对象,基于狼毒大戟的关键物候阶段进行不同时期、不同频率刈割处理,探讨狼毒大戟主要功能性状对刈割的响应规律,并分析狼毒大戟功能性状对刈割干扰的响应程度、变异性及性状之间的关联关系,阐明刈割通过调控主要功能性状变化,从而抑制狼毒大戟生长与扩张的作用机制,为退化草地毒害草治理与生态恢复提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验样地概况

研究区位于内蒙古自治区呼伦贝尔市鄂温克族自治旗锡尼河东苏木(120°02′ E,48°46′ N),在内蒙古自治区东北部、呼伦贝尔大草原东南部,海拔752 m,属于中温带半干旱大陆性气候,冬天寒冷而漫长,夏天则温暖且短暂,年平均气温为−2.4 ℃,年均日照时数2497 h,年均降水量332.2 mm,主要集中在7和8月,土壤类型为典型黑钙土。草地类型为草甸草原,主要植物种有:狼毒大戟、洽草(*Koeleria macrantha*)、寸草(*Carex duriuscula*)、羽茅(*Achnatherum sibiricum*)、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、羊草、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、狗舌草(*Tephroseris kirilowii*)、北柴胡(*Bupleurum chinense*)、菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)、耧斗菜叶绣线菊(*Spiraea aquilegiifolia*)。

1.2　试验设计

试验于2024年5月进行,试验样地植物群落以狼毒大戟为优势种(盖度45%以上),密度约为7万株·hm^{-2}。试验采用随机区组设计,依据狼毒大戟的物候期,设置不刈割对照(control, CK)、盛花期单次刈割(flowering-stage mowing, FM)、结实期单次刈割(reproductive-stage mowing, RM)、黄枯期单次刈割(senescent-stage mowing, SM)、盛花期和结实期重复刈割(repeated mowing at the flowering and fruiting stages, TM),共5个处理。其中,盛花期刈割于2024年5月20日进行,结实期刈割于2024年6月10日进行,黄枯期刈割于2024年6月25日进行。每个处理4次重复,共20个小区,小区面积15 m×15 m。小区之间间隔2 m,区组间间隔5 m。刈割时使用手扶式除草机割草,刈割留茬高度3 cm。

1.3　样品的采集

选取与物种生长速率、养分循环及生态策略密切相关的植物功能性状(表1),于2025年5月狼毒大戟盛花期,在每个试验小区内设置1个5 m×5 m样方。从每个样方内随机选择生长良好的狼毒大戟5株,将完整植株(包括地上部分和地下根系)采集并装入自封袋进行编号标记,带回实验室测定植物功能性状,取样过程中避开样方边缘植株,并同步记录样方内植株密度。

表1 本研究中植物功能性状及其生态学意义

Table 1 Functional traits of plants and ecological significance in this research

编号 NO.	性状 Trait	代码 Code	单位 Unit	生态学意义 Ecological significance
1	株高 Plant height	H	cm	植物竞争光照能力的主要决定因素，是植物物种生态策略的关键组成部分[27]。Plant height is a major determinant of a plant's ability to compete for light and a key component of plant species' ecological strategies[27].
2	分枝数 Branches	B	个 No.·plant^{-1}	反映核心生存策略，与提升光合面积和繁殖潜力密切相关。It reflects core survival strategies and is closely associated with increases in photosynthetic area and reproductive potential.
3	叶面积 Leaf area	LA	cm^2	植物吸收和转化资源的能力取决于叶面积大小，与植物光合效率密切相关。The ability of plants to acquire and utilize resources depends on leaf area and is closely related to photosynthetic efficiency.
4	比叶面积 Specific leaf area	SLA	cm^2·g^{-1}	作为植物资源利用分类轴上对植物物种进行区分的关键性状，不仅反映植物的生长速率和资源获取策略，还与植物维持水分平衡和适应环境胁迫密切相关[28−29]。As a key trait distinguishing plant species along the plant resource-use spectrum, it not only reflects plant growth rate and resource acquisition strategies but is also closely related to the maintenance of water balance and adaptation to environmental stress[28−29].
5	比叶重 Specific leaf weight	SLW	mg·cm^{-2}	反映植物生态策略的重要性状之一，可用于定量衡量单位叶面积上光合产物的投入[30]。It is one of the important traits reflecting plant ecological strategies and can be used to quantitatively measure the investment of photosynthetic products per unit leaf area[30].
6	叶干物质含量 Leaf dry matter content	LDMC	g·g^{-1}	反映了植物在资源使用策略轴上的位置，与叶片的化学组成和细胞结构密切相关。It reflects the position of plants along the resource-use strategy axis and is closely related to leaf chemical composition and cellular structures.
7	叶厚度 Leaf thickness	LT	mm	反映植物在光合作用与资源利用上的保守策略，厚叶有助于保持水分和减少蒸腾。It reflects a conservative strategy of plants in photosynthesis and resource use, and thicker leaves help maintain water and reduce transpiration.
8	比根长 Specific root length	SRL	cm·g^{-1}	细根功能性状从资源获取效率、碳投入经济、生理功能权衡及环境适应等多个层面，系统地揭示了植物的生态策略，是连接植物个体与生态系统功能的关键桥梁，是定量衡量植物地下部分碳投入效率的关键参数[31]。Fine root functional traits systematically reveal plant ecological strategies from multiple perspectives, including resource acquisition efficiency, carbon investment economics, physiological trade-offs, and environmental adaptation. They also act as a critical link between plant individuals and ecosystem functioning and serve as key parameters for quantifying the efficiency of belowground carbon investment in plants[31].
9	比根面积 Specific root area	SRA	cm^2·g^{-1}	
10	细根组织密度 Fine root tissue density	FRTD	g·cm^{-3}	
11	细根直径 Fine root diameter	FRD	mm	
12	叶全氮含量 Leaf total nitrogen content	LNC	g·kg^{-1}	氮、磷是植物生长和新陈代谢的基本元素，植物器官的氮、磷含量反映其营养策略和环境适应能力，且与土壤肥力密切相关。Nitrogen and phosphorus are essential elements for plant growth and metabolism. The nitrogen and phosphorus contents of plant organs reflect their nutrient strategies and environmental adaptability and are closely related to soil fertility.
13	叶全磷含量 Leaf total phosphorus content	LPC	g·kg^{-1}	
14	根全氮含量 Root total nitrogen content	RNC	g·kg^{-1}	
15	根全磷含量 Root total phosphorus content	RPC	g·kg^{-1}	

1.4 相关指标的测定方法

1.4.1 功能性状的测定 1)分枝数(个)：在植株采集前，于野外样方内对用于功能性状测定的狼毒大戟进行原位调查，分别统计其营养枝数和生殖枝数(每个样方5株)；2)株高(cm)：在植株采集前，于野外样方内对用于功能性状测定的狼毒大戟进行原位测定，使用卷尺测量其自然株高(每个样方5株)；3)叶厚度：从每株上中下层各取3个叶片，选用精度为0.01 mm的游标卡尺测量；4)叶面积(cm^2)：首先，使用扫描仪(EPSON 10000XL，日本)对新鲜叶片进行扫描，并利用ImageJ软件测定叶面积；5)叶干物质含量(g·g^{-1})：将用于功能性状测定的叶片置于去离子水中避光浸泡约12 h，使其达到饱和状态，吸去表面水分后称量其饱和鲜重，随后将叶片在105 ℃下杀青

30 min，继而于 65 ℃烘干至恒重，称量其干重，叶干物质含量为叶片干重(g)与叶片饱和鲜重(g)之比；6)比叶面积($cm^2 \cdot g^{-1}$)：叶面积(cm^2)/叶干重(g)；7)比叶重($g \cdot cm^{-2}$)：叶干重(g)/叶面积(cm^2)；8)叶和粗根全氮、全磷含量：对叶和根样品进行研磨，用H_2SO_4-$HClO_4$消解法[32]进行消解，滤液使用流动分析仪(Seal analytical AA3，德国)测定全氮和全磷含量；9)细根直径、比根长、比根表面积、根组织密度：将植物根上附着的土冲洗干净，分离出细根(直径≤2 mm)，用 EPSON 10000XL 扫描仪(日本)进行扫描，再用 WinRHIZO 根系分析系统获得总根长、平均直径、总面积和总体积。然后将细根放入 60 ℃烘箱内烘 48 h 后称重，得到比根长(总长度/根干重，$cm \cdot g^{-1}$)、根组织密度(根干重/总体积，$g \cdot cm^{-3}$)、比根表面积(总面积/根干重，$cm^2 \cdot g^{-1}$)；10)地上、地下生物量($g \cdot 株^{-1}$)：在完成叶片和根系相关功能性状测定后，将采集的完整植株分为地上部分和地下根系，将植株在 105 ℃下杀青 15 min，65 ℃烘干 48～72 h 至恒重，称重。

1.4.2　可塑性指数和功能性状变异系数计算　　狼毒大戟功能性状的可塑性对不同刈割处理的响应程度用可塑性指数(plasticity index，PI)来衡量[33]：

$$PI = (max - min)/max$$

狼毒大戟功能性状在不同刈割处理下的变异程度用变异系数(coefficient of variation，CV)来衡量[34]：

$$CV = \sigma/\mu$$

式中：max 为不同刈割处理下某一变量的最大值，min 为刈割处理下某一变量的最小值，σ 为标准偏差，μ 为平均值。

1.5　数据分析

狼毒大戟生长指标、功能性状、可塑性指数和变异系数参数采用 Excel 2011 进行统计与计算，使用 SPSS Statistics 18 对狼毒大戟的各项指标进行 S-W 正态检验和单因素方差分析(Duncan 法检验)。采用线性回归方程拟合狼毒大戟功能性状对刈割的可塑性程度(PI)与变异性(CV)之间的关系。利用 Pearson 相关性分析比较狼毒大戟叶和根性状之间的关联，使用 Origin 2021 进行绘图。

2　结果与分析

2.1　刈割对狼毒大戟生长的影响

由图 1 可知，不同刈割处理对狼毒大戟株高、密度、地上生物量、地下生物量呈现出不同程度的抑制作用。与

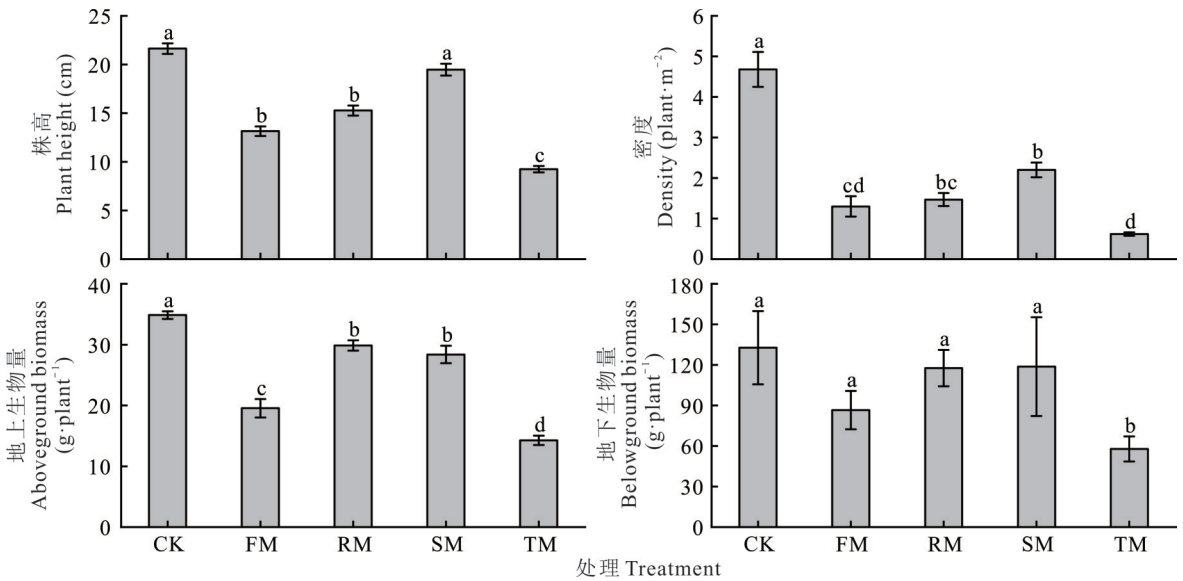

图 1　刈割对狼毒大戟生长的影响

Fig. 1　Effect of mowing on the growth of *E. fischeriana*

CK：不刈割 No mowing；FM：盛花期单次刈割 Flowering-stage mowing；RM：结实期单次刈割 Reproductive-stage mowing；SM：黄枯期单次刈割 Senescent-stage mowing；TM：盛花期和结实期重复刈割 Repeated mowing at the flowering and fruiting stages. 不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). 下同 The same below.

CK相比，FM、RM、TM处理显著降低了狼毒大戟株高、密度、地上生物量($P<0.05$)；TM处理下的株高、地上生物量和地下生物量均显著低于CK、FM、RM和SM。其中，TM处理的株高、密度、地上生物量、地下生物量较对照分别下降了57.28%、86.80%、59.05%、56.44%，对狼毒大戟的生长抑制作用最强。

与CK相比，不同刈割处理下狼毒大戟的总分枝数呈下降趋势(表2)，其中FM、RM和TM处理显著降低了总分枝数($P<0.05$)。与CK相比，FM和RM处理显著降低了狼毒大戟的营养枝数量，TM处理显著降低了狼毒大戟的生殖枝数量($P<0.05$)，降低幅度为71.83%，同时，TM处理下的生殖枝数量显著低于FM、RM和SM处理。说明两次刈割推迟了狼毒大戟的生殖生长，减少了其结实量。

表2 刈割后狼毒大戟分枝数的变化

Table 2 Changes in the number of branches of *E. fischeriana* after cutting (NO.·plant^{-1})

指标 Parameter	处理 Treatment				
	CK	FM	RM	SM	TM
总分枝数量 Total branch number	8.83±0.42a	5.35±0.45c	5.89±0.47bc	8.76±0.15a	6.87±0.29b
营养枝数量 Vegetative branch number	5.28±0.62a	2.49±0.45b	2.61±0.62b	5.28±0.37a	5.87±0.45a
生殖枝数量 Reproductive branch number	3.55±0.29a	2.87±0.10a	3.29±0.31a	3.47±0.28a	1.00±0.41b

注：数据为平均值±标准值，同行不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Data are presented as mean±standard error (SE). Different lowercase letters within the same row indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$). The same below.

2.2 狼毒大戟形态和功能性状对不同刈割处理的响应

狼毒大戟形态性状对刈割的响应敏感(表3)。狼毒大戟经过刈割处理后，叶厚度和单叶面积均有一定幅度的降低，差异达到显著水平($P<0.05$)。与CK相比，FM、RM和SM处理降低了比叶面积，而TM处理提高了比叶面积，但差异不显著($P>0.05$)。刈割后比叶重、叶干物质含量均无显著变化($P>0.05$)，比根长和比根表面积有降低的趋势，而细根直径表现出上升趋势。与CK相比，FM、RM、TM处理显著降低了比根长和比根表面积($P<0.05$)，FM处理显著提高了细根直径。此外，细根组织密度在不同刈割处理下差异不显著($P>0.05$)。

狼毒大戟经刈割处理后，其功能性状差异显著(图2)。从叶片性状来看，与CK相比，刈割处理均能提高狼毒大戟叶片氮含量，且RM和TM处理提高显著($P<0.05$)。与CK相比，FM、RM和TM处理显著提高叶片磷含

表3 刈割后狼毒大戟形态性状的变化

Table 3 Changes of morphological traits of *E. fischeriana* after mowing

形态性状 Morphological traits	处理 Treatment				
	CK	FM	RM	SM	TM
LT (mm)	0.21±0.00a	0.19±0.00bc	0.18±0.00cd	0.20±0.00b	0.17±0.00d
LA (cm^2)	6.37±0.53a	3.86±0.17c	5.08±0.36bc	5.87±0.53ab	3.90±0.35c
SLA (cm^2·g^{-1})	165.93±5.70ab	163.05±8.73ab	160.52±5.34b	165.32±7.20ab	182.26±5.12a
SLW (mg·cm^{-2})	6.08±0.20a	6.27±0.36a	6.31±0.21a	6.12±0.30a	5.57±0.15a
LDMC (g·g^{-1})	0.75±0.01a	0.75±0.00a	0.74±0.01a	0.75±0.00a	0.75±0.01a
SRL (cm·g^{-1})	33.08±1.19a	23.08±1.22bc	20.68±2.84c	27.88±3.31ab	24.97±1.11bc
SRA (cm^2·g^{-1})	263.66±12.54a	187.57±6.87c	190.59±17.39c	232.71±18.07ab	214.10±5.51bc
FRTD (g·cm^{-3})	0.64±0.05a	0.54±0.00a	0.66±0.03a	0.66±0.07a	0.59±0.08a
FRD (mm)	0.25±0.00b	0.34±0.01a	0.32±0.04ab	0.30±0.02ab	0.32±0.00ab

LT：叶厚度 Leaf thickness；LA：单叶面积 Leaf area；SLA：比叶面积 Specific leaf area；SLW：比叶重 Specific leaf weight；LDMC：叶干物质含量 Leaf dry matter content；SRL：比根长 Specific root length；SRA：比根表面积 Specific root area；FRTD：细根组织密度 Fine root tissue density；FRD：细根直径 Fine root diameter.

量，且 TM 处理显著高于 FM、RM 和 SM 处理。从根性状来看，与 CK 相比，TM 处理显著提高根氮含量（$P<0.05$），而 FM、RM 和 SM 处理与 CK 没有显著差异（$P>0.05$）。此外，各刈割处理下的根磷含量与对照组相比均无显著差异（$P>0.05$）。

2.3　狼毒大戟功能性状的可塑性特征及变异性

通过对不同刈割处理下狼毒大戟 19 个功能性状指标进行分析，结果显示（图 3），狼毒大戟的生殖枝数量、地上生物量、营养枝数量、株高、地下生物量、粗根全氮及叶片磷含量具有较高的可塑性（PI>0.45），为刈割干扰响应的敏感性状，其中可塑性最高的是生殖枝数量，其次为地上生物量。叶功能性状和根功能性状指标中可塑性较大的是叶片磷、粗根全氮含量（PI>0.45）。叶干物质含量、比叶面积、比叶重、细根组织密度及叶厚度的可塑性幅

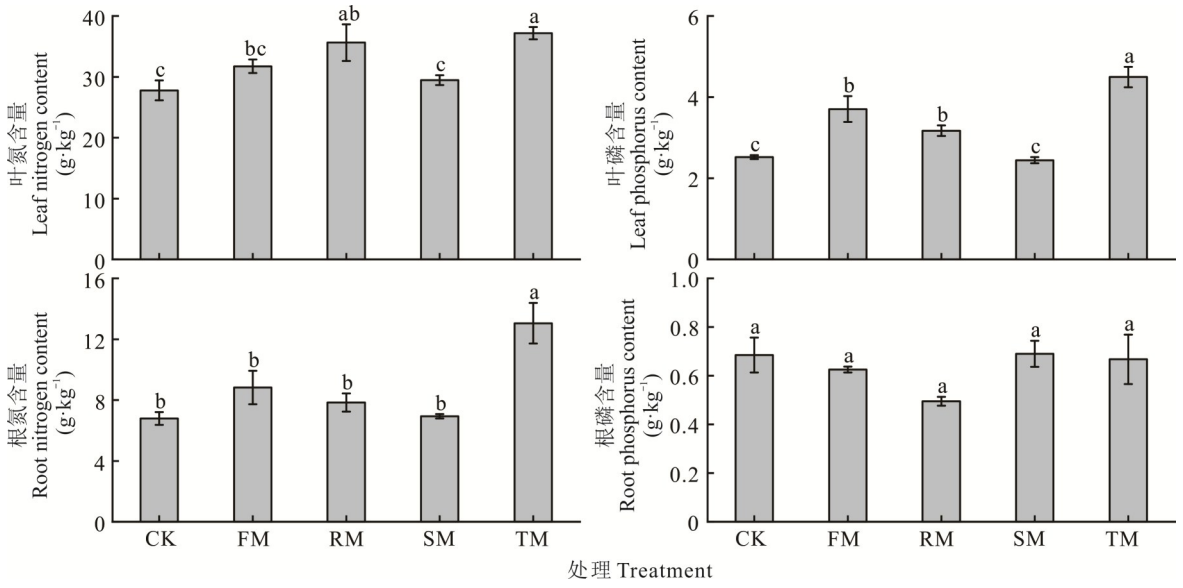

图 2　刈割后狼毒大戟功能性状的变化

Fig. 2　Changes of functional traits of *E. fischeriana* after mowing

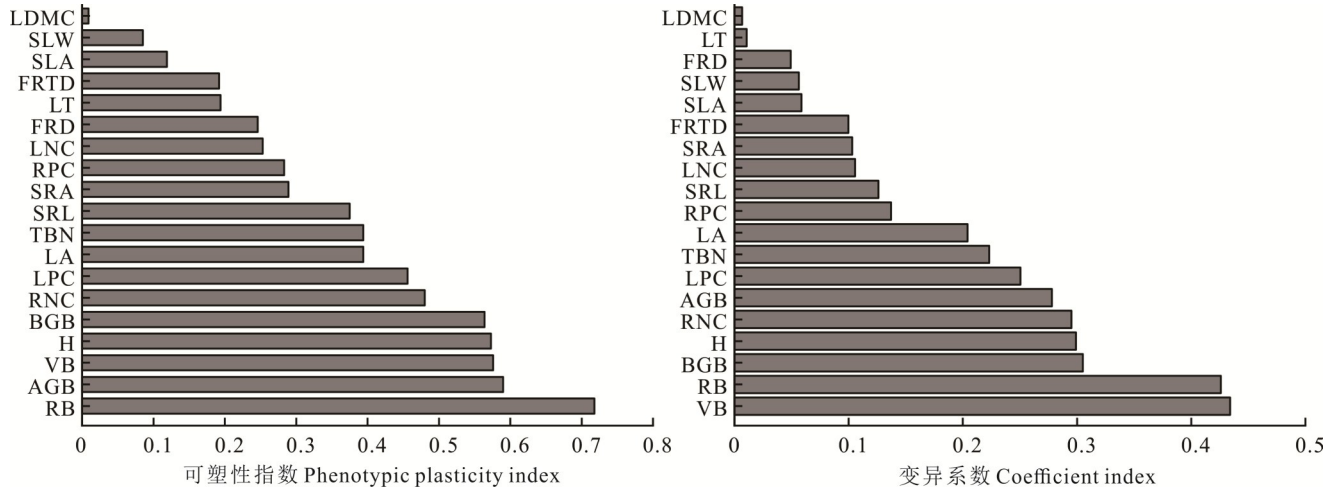

图 3　狼毒大戟各性状在刈割处理下的可塑性指数和变异系数排序

Fig. 3　Plasticity index（PI）and coefficient of variation（CV）ranking of *E. fischeriana* traits under different mowing treatments

LDMC：叶干物质含量 Leaf dry matter content；SLW：比叶重 Specific leaf weight；SLA：比叶面积 Specific leaf area；FRTD：细根组织密度 Fine root tissue density；LT：叶厚度 Leaf thickness；FRD：细根直径 Fine root diameter；LNC：叶全氮含量 Leaf total nitrogen content；RPC：粗根全磷含量 Root total phosphorus content；SRA：比根表面积 Specific root area；SRL：比根长 Specific root length；TBN：总分枝数 Total branch number；LA：单叶面积 Leaf area；LPC：叶全磷含量 Leaf total phosphorus content；RNC：粗根全氮含量 Root total nitrogen content；BGB：地下生物量 Belowground biomass；H：株高 Plant height；VB：营养枝数量 Vegetative branch number；AGB：地上生物量 Aboveground biomass；RB：生殖枝数量 Reproductive branch number. 下同 The same below.

度较小(PI<0.20),为刈割干扰响应的惰性性状。19种功能性状的变异系数存在差异,营养枝数量、生殖枝数量、地下生物量及株高的变异系数较大(CV>0.30),叶干物质含量的变异系数最低(CV<0.10)。狼毒大戟对刈割的响应程度(PI)与其变异性(CV)之间符合线性方程(y=1.437x+0.0951)拟合关系(R^2=0.940,P<0.001,图4)。

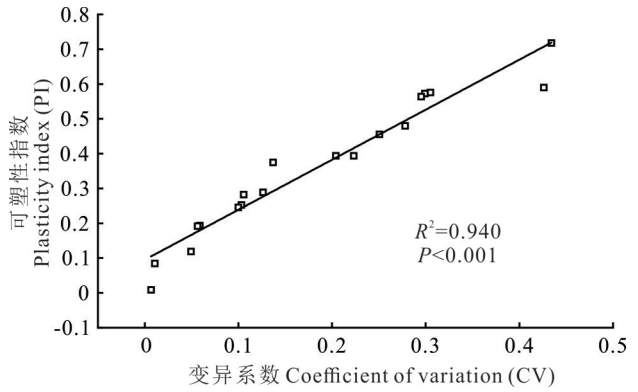

图4 狼毒大戟不同功能性状变异系数与可塑性指数的关系

Fig. 4 Relationship between the coefficient of variation (CV) and plasticity index (PI) across different functional traits of *E. fischeriana*

2.4 刈割干扰下狼毒大戟功能性状的关联

从Pearson相关性分析结果来看(图5),狼毒大戟的叶功能性状中SLA与SLW、LDMC,LT与LNC、LPC,LA与LPC呈极显著负相关(P<0.01);SLW与LDMC、LNC与LPC呈极显著正相关(P<0.01);LA与LT呈显著正相关(P<0.05)。从根功能性状来看,SRL与SRA呈极显著正相关(P<0.01);FRD与SRL、SRA呈极显著负相关(P<0.01)。从根和叶性状的相关性来看,LA与SRL、SRA,LT与SRA、RPC,LPC与FRD呈显著正相关(P<0.05);LT与SRL,LNC与FRD、

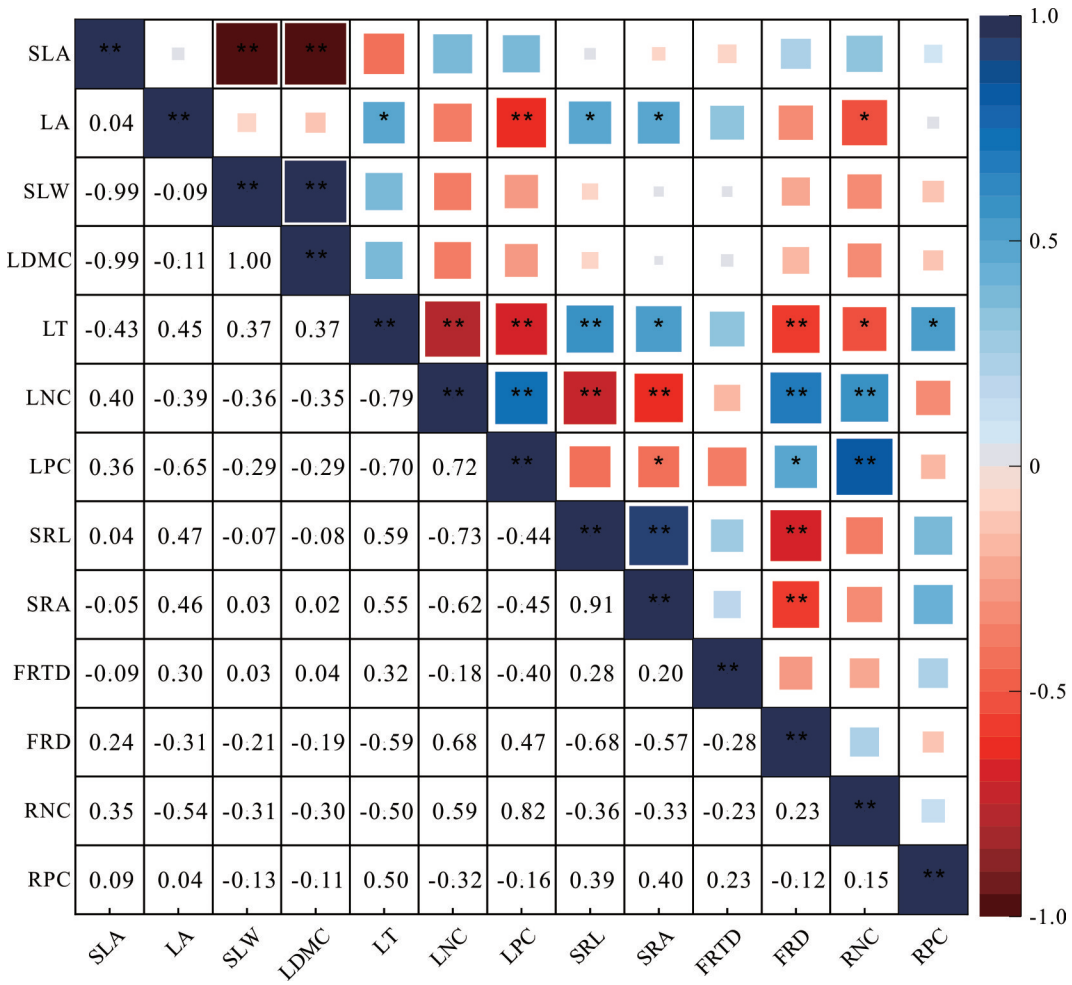

图5 狼毒大戟叶片和根功能性状特征的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis between leaf and root functional traits of *E. fischeriana*

色阶条代表相关性,红色表示正相关,蓝色表示负相关,颜色深浅表示相关性强弱。The color bar reflects correlation coefficients: red indicates positive correlations, blue indicates negative correlations, with color intensity representing correlation strength. *: P<0.05; **: P<0.01.

RNC，LPC 与 RNC 呈极显著正相关（$P<0.01$）；RNC 与 LA、LT，SRA 与 LPC 呈显著负相关（$P<0.05$）；LNC 与 SRL、SRA，LT 与 FRD 呈极显著负相关（$P<0.01$）。

3　讨论

3.1　狼毒大戟叶和根性状对不同刈割处理的响应

叶片作为对环境变化高度敏感的功能器官，其性状变异能够揭示植物的资源适应策略[35]。本研究发现，刈割显著降低狼毒大戟的单叶面积。这与王静等[36]在芨芨草（*Achnatherum splendens*）中的研究一致。单叶面积的下降可能与刈割引起的生境条件变化密切相关。刈割改变了群落冠层结构与光照分布，使地表光照增强、空气湿度下降；在高光与潜在蒸腾压力升高环境下，低叶面积有助于降低叶面温度和蒸腾速率，从而维持叶片水势稳定[37-38]。有研究认为，长期放牧会导致植物出现矮化型，来适应避牧对策[39]。在本研究中，狼毒大戟的单叶面积下降、分枝和生殖枝数量减少、株高与地上生物量的降低说明，狼毒大戟可能为了适应刈割干扰，通过个体的矮化或减少有性繁殖来逃避不利环境。此外，本研究还发现，刈割后狼毒大戟的叶厚度均显著下降，而比叶重和叶干物质含量没有显著变化。叶厚度的降低是通过调整叶的形态结构来降低建造成本并加快光合器官的恢复，从而补偿刈割造成的光合面积损失。有研究认为，当植物表现出较高的比叶重和叶干物质含量时，往往能够更有效地利用环境中的可用资源[40]。而狼毒大戟的叶干物质含量和比叶重未出现显著变化，反映出狼毒大戟在干扰环境下维持组织功能稳定的生长策略。从生理性状来看，刈割后狼毒大戟的叶片氮和磷含量显著升高。植物可能通过提升核酮糖-1，5-二磷酸羧化酶（rubisco）活性和磷脂合成，从而增强光合效率和细胞代谢速率，促进补偿生长[41]。同时，本研究发现，两次刈割显著提高狼毒大戟的粗根全氮含量。这可能与频繁刈割引发的碳氮重分配与养分储存策略转变有关。多次刈割导致地上碳源受限，植物通过增强根部氮素储备功能以维持代谢稳定性和再生潜力。粗根作为主要的贮藏器官，其氮含量升高反映了植物在重复扰动下形成的养分储备型适应策略，以应对后续干扰。

本研究发现，刈割显著降低了狼毒大戟吸收根的比根长与比根面积。相比之下，其吸收根直径在刈割后呈现增粗趋势，且在盛花期单次刈割后显著增加。一方面，较高的比根长有利于在单位生物量投入下提升资源获取效率，但也伴随着更高的代谢成本与更短的细根寿命；而较低的比根长与更粗的根系虽降低了吸收效率，却有助于延长根系寿命，增强在干扰环境下的持续生存能力[42]。另一方面，刈割可能会改变地表微气候（温度、湿度）及根际养分微环境，减少地上有机质归还及表层碳输入，进而抑制微生物活性与有机质矿化[43-44]。微生物及其代谢产物在促进细根生长和分支过程中起关键作用[45]，其活性受抑可能限制了吸收根的形态发育。因此，刈割诱导的地表与根际变化可能成为细根比根长与比根表面积下降的重要驱动因素。综上所述，刈割后低比根长和比根表面积、较大的根直径，表现为“高投入、低收益”资源保存型策略，有利于植株在多次刈割或干旱等胁迫环境中维持长期稳定的碳平衡。

3.2　狼毒大戟性状可塑性及性状之间的关联

较高的性状可塑性与变异程度通常意味着植物能够通过调节形态和生理特征来适应多变的环境，从而减轻外界环境波动对其生长发育的不利影响[33]。本研究发现，狼毒大戟在刈割干扰下，生殖枝、地上生物量、营养枝、株高、地下生物量、粗根全氮含量及叶片磷含量具有高的可塑性，属于敏感性状；叶干物质含量、比叶面积、比叶重、细根组织密度及叶厚度的可塑性较小，表现为惰性性状。可塑性程度整体呈现出生殖枝数量、生物量、生理等性状大于根和叶形态性状，这与孙平等[46]的研究结果一致。形态性状的可塑性指数相对较低，说明狼毒大戟主要通过调节繁殖、生理和生物量分配来适应刈割干扰。其中，受刈割干扰最为敏感的性状是生殖枝数量，说明狼毒大戟通过暂缓生殖分配来维持个体存活与营养器官功能。此外，狼毒大戟各性状的变异系数与可塑性指数排序部分重叠，且符合线性拟合关系（$R^2=0.940$，$P<0.001$）。说明可塑性较高的性状往往也具有较高的变异性，反映出狼毒大戟在环境响应机制上的稳定策略。

为明确在刈割胁迫背景下，狼毒大戟叶和根功能性状的协同变化规律，采用 Pearson 相关性分析探究性状间的内在联系。在本研究中，狼毒大戟叶功能性状之间、根功能性状之间以及叶和根性状之间具有不同程度的相关

性。其中,叶氮含量与比根长、比根表面积呈极显著负相关,与细根直径、粗根全氮含量呈极显著正相关。这一系列关联共同揭示了狼毒大戟在器官间的资源分配权衡,当氮素被优先分配给叶片时,植物会相应削减对高效吸收根网络的投资,转而构建更具贮藏功能的粗根。因此,根和叶的性状在刈割干扰下并非独立变化,而是呈现出显著的协同关联模式。本研究虽初步揭示了狼毒大戟地下部分对刈割的响应特征,但对其完整地下生态策略的系统解析仍受制于方法学局限。狼毒大戟根系延伸范围可达1 m[3][47],其粗壮的直根结构使传统挖掘法难以应用且破坏性强,未来研究可在非破坏性根系观测、地下生物量高精度成像等方面探索方法创新,以更全面揭示狼毒大戟的功能性状。

3.3 刈割对狼毒大戟扩张的抑制作用

植物高度直接影响其在群落中的竞争力和生存策略,是植物生态策略的核心组成部分[48],本研究发现,与单次刈割相比,两次刈割显著降低了狼毒大戟的株高,说明刈割次数的增加更有利于削弱其顶端优势及群落竞争能力。由于狼毒大戟在群落结构中处于上层,刈割削弱了其高度优势,为群落下层植物释放生态位,并增强矮生植物对资源的竞争作用,从而对狼毒大戟的再生形成持续竞争压力,限制其株高恢复[49]。尽管狼毒大戟具有一定的再生能力,但在其尚未完成高度恢复前再次移除地上部分,会持续消耗地下贮藏碳源,进而削弱其高度再建能力。这与张峰等[50]的研究结果一致。从功能性状响应的整体变化来看,本研究发现,单次和两次刈割均显著降低了狼毒大戟的单叶面积和叶厚度,并显著降低了细根比根长和比根面积,表明刈割干扰在地上和地下两个功能维度上同步改变了其资源获取策略。单叶面积减少和叶片变薄意味着叶片光捕获面积和光合组织构建投入减少,从而抑制植株的碳同化能力[51-52];而比根长和比根面积的下降则表明细根对土壤养分和水分的吸收效率受到削弱[42]。上述变化共同反映出刈割通过限制光合碳输入与地下资源吸收,从而抑制了狼毒大戟的生长。

尽管刈割在群落层面上有助于改善光照条件[37],但对于以根茎为主要储藏器官的多年生植物而言,频繁的生物量损失削弱其根部储备与再生能力[53]。本研究进一步发现,与单次刈割相比,两次刈割显著降低了狼毒大戟的地上和地下生物量,表明两次刈割对植株干物质积累的抑制作用更为显著。单次刈割主要通过降低地上生物量对植株生长产生限制,而两次刈割则同时降低地上和地下生物量,从而在光合碳输入与地下资源供给两个关键途径上共同削弱狼毒大戟的干物质积累,形成更强的综合抑制效应。在生殖性状方面,单次刈割未能显著降低狼毒大戟的生殖枝数量,而两次刈割则显著抑制其生殖投入,生殖枝数量下降幅度高达71.83%。生殖枝作为有性繁殖的直接载体,其数量的显著减少直接限制了花序和种子的形成[54],从源头上削弱了狼毒大戟的种群更新能力和扩张潜力。这种抑制效应在种群尺度上的直接体现为,两次刈割处理下狼毒大戟种群密度的下降幅度明显高于单次刈割处理。综上所述,两次刈割通过同步削弱狼毒大戟的高度竞争优势、光合碳输入、地下资源获取与储存能力,并抑制其生殖投入,从个体生长与种群更新两个层面共同限制其扩张。因此,相较于单次刈割,两次刈割是抑制狼毒大戟扩张更为有效且合理的管理措施。

4 结论

1)刈割抑制了狼毒大戟的生长,其中以盛花期和结果期重复刈割效果最为显著,使狼毒大戟株高、密度、地上生物量、地下生物量、生殖枝数量分别比对照下降57.28%、86.80%、59.05%、56.44%、71.83%。

2)从叶和根性状来看,刈割显著降低了叶厚度、单叶面积、比根长、比根面积,同时显著提高了叶氮、叶磷含量,此外,盛花期和结果期重复刈割显著提高粗根全氮含量,盛花期单次刈割显著提高了细根直径;Pearson相关性分析结果可知,狼毒大戟叶片与根系性状在刈割干扰下呈显著相关性,说明地上与地下功能性状之间存在协同响应关系。

3)生殖枝数量为刈割干扰响应的最为敏感性状,叶干物质含量、比叶面积、比叶重、细根组织密度及叶厚度,为刈割干扰响应的惰性性状。综上所述,盛花期和结果期重复刈割处理对狼毒大戟各项生长和功能性状指标影响最大,对狼毒大戟再生和开花结实抑制效果最为理想。

参考文献 References：

[1] Violle C, Navas M L, Vile D, *et al*. Let the concept of trait be functional! Oikos, 2007, 116(5): 882－892.

[2] Carmona C P, Bueno C G, Toussaint A, *et al*. Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function. Nature, 2021, 597(7878): 683－687.

[3] Bjorkman A D, Myers-Smith I H, Elmendorf S C, *et al*. Plant functional trait change across a warming tundra biome. Nature, 2018, 562(7725): 57－62.

[4] Wright I J, Reich P B, Westoby M, *et al*. The worldwide leaf economics spectrum. Nature, 2004, 428(6985): 821－827.

[5] Chen C F, Qin L, Duan Y X, *et al*. Effects of different management models on leaf functional traits and soil physical and chemical properties of natural secondary forest of *Quercus mongolica*. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8371－8382.
陈超凡, 覃林, 段艺璇, 等. 不同经营模式对蒙古栎次生林叶功能性状和土壤理化性质的影响. 生态学报, 2018, 38(23): 8371－8382.

[6] McCormack M L, Dickie I A, Eissenstat D M, *et al*. Redefining fine roots improves understanding of below-ground contributions to terrestrial biosphere processes. New Phytologist, 2015, 207(3): 505－518.

[7] Freschet G T, Roumet C, Comas L H, *et al*. Root traits as drivers of plant and ecosystem functioning: current understanding, pitfalls and future research needs. New Phytologist, 2021, 232(3): 1123－1158.

[8] Diaz S, Hodgson J G, Thompson K, *et al*. The plant traits that drive ecosystems: Evidence from three continents. Journal of Vegetation Science, 2004, 15(3): 295－304.

[9] Laliberté E. Below-ground frontiers in trait-based plant ecology. New Phytologist, 2017, 213(4): 1597－1603.

[10] Yu H Y, Chen Y T, Zhou G S, *et al*. Coordination of leaf functional traits under climatic warming in an arid ecosystem. BMC Plant Biology, 2022, 22(1): 439.

[11] Hu Y, Li X Y, Wang S K, *et al*. Patterns and driving factors of functional traits of desert species with different elevational distributions in the Tibetan Plateau and adjacent areas. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 371.

[12] Wan H W, Yang Y, Bai S Q, *et al*. Variations in leaf functional traits of six species along a nitrogen addition gradient in *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008, 32(3): 611－621.
万宏伟, 杨阳, 白世勤, 等. 羊草草原群落 6 种植物叶片功能特性对氮素添加的响应. 植物生态学报, 2008, 32(3): 611－621.

[13] Adler P B, Milchunas D G, Lauenroth W K, *et al*. Functional traits of graminoids in semi-arid steppes: a test of grazing histories. Journal of Applied Ecology, 2004, 41(4): 653－663.

[14] Döbert T F, Webber B L, Sugau J B, *et al*. Logging increases the functional and phylogenetic dispersion of understorey plant communities in tropical lowland rain forest. Journal of Ecology, 2017, 105(5): 1235－1245.

[15] Ping Y, Zhang L Q. Study on long-term effects of physical control measures on *Spartina alterniflora*. Marine Environmental Science, 2010, 29(1): 32－35.
平原, 张利权. 物理措施控制互花米草的长期效果研究. 海洋环境科学, 2010, 29(1): 32－35.

[16] Basky Z, Ladányi M, Simončič A. Efficient reduction of biomass, seed and season long pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.). Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 24(5): 134－140.

[17] Zhang J H, Wang Z, Huang Y M, *et al*. Effects of grassland utilization on the functional traits of dominant plants in a temperate typical steppe. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(8): 818－833.
张景慧, 王铮, 黄永梅, 等. 草地利用方式对温性典型草原优势种植物功能性状的影响. 植物生态学报, 2021, 45(8): 818－833.

[18] Xu H M, Bai T X, An N, *et al*. Effect of different cutting system on *Leymus chinensis* functional traits. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(6): 60－65.
徐慧敏, 白天晓, 安娜, 等. 不同刈割制度对典型草原羊草功能性状的影响. 中国草地学报, 2016, 38(6): 60－65.

[19] Luo H L, Zeng F J, Guo Z C, *et al*. Influence of spring and fall clipping on the leaf functional traits of *Alhagi sparsifolia*. Pratacultural Science, 2016, 33(4): 691－699.
罗瀚林, 曾凡江, 郭自春, 等. 春季与秋季刈割对疏叶骆驼刺叶片功能性状的影响. 草业科学, 2016, 33(4): 691－699.

[20] Wang J G, Wei K, Li Z Y, *et al*. Effects of mowing on root biomass, soil properties, microbial biomass, and microbial diversity in grasslands: a Meta-analysis. Land Degradation & Development, 2025, 36(5): 1483－1491.

[21] Fang J Y, Geng X Q, Zhao X, *et al*. How many areas of grasslands are there in China? Chinese Science Bulletin, 2018, 63(17): 1731－1739.

方精云，耿晓庆，赵霞，等. 我国草地面积有多大？ 科学通报，2018，63(17)：1731－1739.

[22] Bai Y F，Pan Q M，Xing Q. Fundamental theories and technologies for optimizing the production functions and ecological functions in grassland ecosystems. Chinese Science Bulletin，2016，61(2)：201－212.
白永飞，潘庆民，邢旗. 草地生产与生态功能合理配置的理论基础与关键技术. 科学通报，2016，61(2)：201－212.

[23] Zhang Z C，Sun J，Liu M，*et al*. Don't judge toxic weeds on whether they are native but on their ecological effects. Ecology and Evolution，2020，10(17)：9014－9025.

[24] Li Y N，Yang H，He J，*et al*. Chemical constituents and biological activities of *Euphorbia fischeriana* Steud. Chinese Pharmaceutical Journal，2022，57(17)：1419－1424.
李雅楠，杨华，赫军，等. 狼毒大戟化学成分及其生物活性研究. 中国药学杂志，2022，57(17)：1419－1424.

[25] Chi X X，Ma C Y，Zou Z H，*et al*. Efficacy test of five types of chemical herbicides on *Euphorbia fisheriana*. Journal of Weed Science，2017，35(2)：55－60.
迟晓雪，马崇勇，邹志和，等. 5种化学除草剂防除狼毒大戟药效试验. 杂草学报，2017，35(2)：55－60.

[26] Li Y N，He J，Zhang J，*et al*. Existing knowledge on *Euphorbia fischeriana* Steud.（Euphorbiaceae)：Traditional uses，clinical applications，phytochemistry，pharmacology and toxicology. Journal of Ethnopharmacology，2021，275(1)：95－114.

[27] Moles A T，Warton D I，Warman L，*et al*. Global patterns in plant height. Journal of Ecology，2009，97(5)：923－932.

[28] Liu G F，Freschet G T，Pan X，*et al*. Coordinated variation in leaf and root traits across multiple spatial scales in Chinese semi-arid and arid ecosystems. New Phytologist，2010，188(2)：543－553.

[29] Wright I J，Reich P B，Westoby M. Strategy shifts in leaf physiology，structure and nutrient content between species of high- and low-rainfall and high- and low-nutrient habitats. Functional Ecology，2001，15(4)：423－434.

[30] Liu M X，Liang G L. Research progress on leaf mass per area. Chinese Journal of Plant Ecology，2016，40(8)：847－860.
刘明秀，梁国鲁. 植物比叶质量研究进展. 植物生态学报，2016，40(8)：847－860.

[31] Wang J，Defrenne C，McCormack M L，*et al*. Fine-root functional trait responses to experimental warming：a global Meta-analysis. New Phytologist，2021，230(5)：1856－1867.

[32] Bao S D. Soil analysis in agricultural chemistry (The Third Edition). Beijing：China Agriculture Press，2008.
鲍士旦. 土壤农业化学分析(第三版). 北京：中国农业出版社，2008.

[33] Sultan S E. Phenotypic plasticity for plant development，function and life history. Trends in Plant Science，2000，5(12)：537－542.

[34] Pélabon C，Hilde C H，Einum S，*et al*. On the use of the coefficient of variation to quantify and compare trait variation. Evolution Letters，2020，4(3)：180－188.

[35] Yang Y Z，Kang L，Zhao J，*et al*. Quantifying leaf trait covariations and their relationships with plant adaptation strategies along an aridity gradient. Biology，2021，10(10)：1066.

[36] Wang J，Cheng J M，Wan H E，*et al*. The influence of cutting on *Achnatherum splendens* growth. Pratacultural Science，2005，22(6)：58－61.
王静，程积民，万惠娥，等. 刈割对芨芨草生长的影响. 草业科学，2005，22(6)：58－61.

[37] Molina C D，Tognetti P M，Graff P，*et al*. Mowing does not redress the negative effect of nutrient addition on alpha and beta diversity in a temperate grassland. Journal of Ecology，2021，109(3)：1501－1510.

[38] Ding X Y，Liu J J，Wang Y，*et al*. Effects of nitrogen addition on leaf functional traits of dominant species in Bayanbulak grassland，Xinjiang，China. Plants，2025，14(4)：597.

[39] Li X L，Hou X Y，Wu X H，*et al*. Plastic responses of stem and leaf functional traits in *Leymus chinensis* to long-term grazing in a meadow steppe. Chinese Journal of Plant Ecology，2014，38(5)：440－451.
李西良，侯向阳，吴新宏，等. 草甸草原羊草茎叶功能性状对长期过度放牧的可塑性响应. 植物生态学报，2014，38(5)：440－451.

[40] Feng Q H，Shi Z M，Dong L L，*et al*. Functional traits of deciduous trees and their relationships with meteorological factors in NSTEC. Chinese Journal of Agrometeorology，2009，30(1)：79－83.
冯秋红，史作民，董莉莉，等. 南北样带落叶乔木功能性状及其与气象因子的关系. 中国农业气象，2009，30(1)：79－83.

[41] Liu Z Y，Baoyintaogetao，Sun J，*et al*. Plant sizes mediate mowing-induced changes in nutrient stoichiometry and allocation of a perennial grass in semi-arid grassland. Ecology and Evolution，2018，8(6)：3109－3118.

[42] Ostonen I，Püttsepp Ü，Biel C，*et al*. Specific root length as an indicator of environmental change. Plant Biosystems，2007，141(3)：426－442.

[43] Lv D G, Li F D, Qin S J, *et al*. Effect of mowing on ecological factors of near-surface grassfield in grass covered orchard. Northern Horticulture, 2007(11): 37－39.
吕德国, 李芳东, 秦嗣军, 等. 刈割对自然生草果园近地表草域生态因子的影响. 北方园艺, 2007(11): 37－39.

[44] Zhang W W. Impacts of moving *Krascheninnikovia ceratoides* on rhizosphere soil microenvironment in the steppe desert. Hohhot: Inner Mongolia University, 2017.
张微微. 刈割对草原化荒漠区蛇绒藜(*Krascheninnikovia ceratoides*)根际土壤微环境的影响. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.

[45] Grover M, Bodhankar S, Sharma A, *et al*. PGPR mediated alterations in root traits: Way toward sustainable crop production. Frontiers in Sustainable Food Systems, 2021, 4(1): 618230.

[46] Sun P, Xu M Y, Wang Y L, *et al*. Response of functional traits of *Elymus nutans* to long-term grazing in Guinan alpine meadow, Qinghai. Pratacultural Science, 2025, 43(12): 1－13.
孙平, 许明圆, 王娅琳, 等. 青海贵南高寒草甸垂穗披碱草功能性状对长期放牧的响应. 草业科学, 2025, 43(12): 1－13.

[47] Chi X X, Guo S Q, Wang Z W, *et al*. Control methods of *Euphorbia fischeriana* in grassland. Grassland and Prataculture, 2022, 34(1): 47－50.
迟晓雪, 郭司群, 王志伟, 等. 草原狼毒大戟防控方法研究. 草原与草业, 2022, 34(1): 47－50.

[48] Quan Q, He N P, Zhang R Y, *et al*. Plant height as an indicator for alpine carbon sequestration and ecosystem response to warming. Nature Plants, 2024, 10(6): 890－900.

[49] Wang Q, Zheng J H, Zhao M L, *et al*. Effects of mowing intensity on community characteristics and soil physicochemical properties of *Stipa grandis* steppe, Inner Mongolia, China. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(2): 26－34.
王琪, 郑佳华, 赵萌莉, 等. 刈割强度对大针茅草原植物群落特征和土壤理化性质的影响. 草业学报, 2023, 32(2): 26－34.

[50] Zhang F, Yang Y, Qiao J R, *et al*. Effect of utilization on community functional diversity in *Stipa grandis* steppe. Grassland and Prataculture, 2018, 30(3): 36－43.
张峰, 杨阳, 乔荠瑢, 等. 利用方式对大针茅草原群落功能多样性的影响. 草原与草业, 2018, 30(3): 36－43.

[51] Wang X, Li Z Q, Gu W B, *et al*. Systemic regulation of anatomic structure and photosynthetic characteristics of developing leaves in sorghum seedlings under salt stress. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(11): 1941－1949.
王鑫, 李志强, 谷卫彬, 等. 盐胁迫下高粱新生叶片结构和光合特性的系统调控. 作物学报, 2010, 36(11): 1941－1949.

[52] Yang Z Z, Zhang C P, Cao Q, *et al*. Regulatory effects of mowing on biomass allocation and compensation growth mechanisms in *Elymus* species. Agriculture, 2025, 15(8): 1－20.

[53] Ramula S. Annual mowing has the potential to reduce the invasion of herbaceous *Lupinus polyphyllus*. Biological Invasions, 2020, 22(10): 3163－3173.

[54] Winter S, Jung L S, Eckstein R L, *et al*. Control of the toxic plant *Colchicum autumnale* in semi-natural grasslands: effects of cutting treatments on demography and diversity. Journal of Applied Ecology, 2014, 51(2): 524－533.