少花蒺藜草的多机制协同入侵与生态效应

苏 迅 任宪锋 肖智超 田 迅 陈宇杰 吕广超 马文静*

（内蒙古民族大学生命科学与食品学院，通辽 028000）

摘要：外来入侵植物对全球生态系统的稳定构成严重威胁。少花蒺藜草*Cenchrus pauciflorus*原产于美洲，自20世纪末入侵中国北方地区以来，迅速扩散至科尔沁沙地、辽河流域及内蒙古草原等典型生态脆弱区，成为威胁沙质草地和农牧交错带生态安全的主要入侵物种。少花蒺藜草的刺苞具倒刺状刚毛，易附着于传播媒介，有利于其传播扩散，加之对干旱、贫瘠及盐碱等逆境具有高度适应性，奠定了其成功入侵的基础。该文系统梳理目前关于少花蒺藜草的研究进展，从繁殖策略、胁迫响应、化感抑制作用及根际微生物互作4个维度，解析其适应机制与生态效应，并在此基础上提出当前研究的不足与未来发展方向，以期深化对入侵植物生态学理论的理解，并为少花蒺藜草的防控实践提供科学依据。

关键词：少花蒺藜草；繁殖策略；非生物胁迫响应；根际微生物互作；入侵物种

Synergistic invasion mechanisms and ecological effects of common sandbur *Cenchrus pauciflorus*

Su Xun Ren Xianfeng Xiao Zhichao Tian Xun Chen Yujie Lü Guangchao Ma Wenjing*

（College of Life Sciences and Food Engineering, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao 028000, Inner Mongolia Autonomous Region, China）

Abstract: Alien invasive plants pose a severe threat to the stability of ecosystems worldwide. *Cenchrus pauciflorus*, native to the Americas, has rapidly spread across northern China since its introduction in the late 20th century, invading ecologically fragile regions such as the Horqin Sandy Land, the Liaohe River Basin, and the Inner Mongolian grasslands, where it has become a major invasive species threatening the ecological security of sandy grasslands and agro-pastoral ecotones. The burrs of *C. pauciflorus* are armed with retrorse bristles that readily attach to dispersal vectors, facilitating long-distance dispersal. Coupled with its high tolerance to adverse conditions such as drought, nutrient-poor soils, and saline-alkaline environments, these traits have laid the foundation for its successful invasion. This review systematically summarizes recent research progress on *C. pauciflorus* from four perspectives: reproductive strategies, responses abiotic stress, allelopathic inhibition, and interactions with rhizosphere microorganisms. It further elucidates the multidimensional adaptive mechanisms and ecological effects underlying its invasion. Based on this synthesis, current research limitations and future research directions are proposed to deepen the understanding of invasion ecology and provide a scientific basis for the management and control of *C. pauciflorus*.

Key words: *Cenchrus pauciflorus*; reproductive strategy; abiotic stress responses; rhizosphere micro-

基金项目：内蒙古民族大学科研启动基金项目(BS673，BS615)，内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(GXKY26Z004)，国家自然科学基金项目(32360267，32260683)

* 通信作者（Author for correspondence），E-mail：mawj0902@163.com

收稿日期：2025-11-26

bial interactions; invasive species

外来植物入侵已成为威胁全球生态系统稳定性与生物多样性的重大环境问题之一。少花蒺藜草*Cenchrus pauciflorus*为禾本科一年生外来入侵植物。该物种的拉丁学名与中文学名的对应关系存在分歧，*Cenchrus pauciflorus*和*Cenchrus spinifex*均被广泛使用，依据安瑞军(2013)分类考证，二者为同物异名，所指为同一物种少花蒺藜草，为行文统一，本文综述中统一使用*Cenchrus pauciflorus*作为其拉丁学名。少花蒺藜草与长刺蒺藜草*Cenchrus longispinus*的分类地位存在争议，学界尚未形成共识，本文在梳理少花蒺藜草的研究进展时，将关于*Cenchrus longispinus*的文献一并纳入综述。目前，少花蒺藜草已在我国内蒙古、吉林、辽宁、新疆等省区呈现广泛入侵态势，对当地农牧业生产与生态系统造成严重影响(孟岩和邱娟，2024)。

少花蒺藜草对干旱、贫瘠及盐碱等逆境具有一定耐受性，其刺苞结构增强了远距离传播能力，两者共同提升了其在新生境中的入侵能力(Oreja et al.，2024)。已有研究表明，其成功入侵与异型种子的异时萌发策略(Zhang et al.，2016)、对逆境胁迫的生理调控(Zhang et al.，2017；Zhou et al.，2021)、化感抑制作用以及根际微生物互作等多重机制密切相关(Cao et al.，2021)。然而，当前研究多聚焦少花蒺藜草入侵的单一机制解析，对上述4种机制之间的关联以及如何共同促进少花蒺藜草入侵，尚缺乏系统研究。为此，本文围绕少花蒺藜草入侵过程中的传入、存活与扩张3个关键环节，从异时萌发策略、对逆境胁迫的生理调控、化感抑制作用以及根际微生物互作4个方面系统综述其多维度适应策略及生态效应，并提出“多机制整合入侵”的概念框架，以期揭示其成功入侵的生态与生理基础，为少花蒺藜草的防控与入侵地的生态修复提供理论依据。

1 少花蒺藜草的入侵机制概述

1.1 少花蒺藜草的异型种子繁殖策略

1.1.1 异型种子的形态与萌发分化

少花蒺藜草的种子包藏于球形刺苞内，刺苞表面生有倒刺，内部含1~3粒种子，多为2粒异型种子。异型种子在形态上存在较大差异，一粒相对较大，外形似柁果(M型种子)，另一粒相对较小，外形似李子(P型种子)(Zhang et al.，2017)。P型种子的种皮较M型更致密，淀粉粒水解孔滞后出现且孔径较小，延缓了水分与气体交换；干燥期脱落酸含量较高，能维持较深的休眠状态；而萌发前期可溶性蛋白含量与葡萄糖-6-磷酸脱氢酶活性均低于M型种子，磷酸戊糖途径启动较晚(郝丽芬等，2024；Xu et al.，2025)。上述差异影响了异型种子的萌发条件，M型种子的最低温度阈值和最低水势阈值均低于P型种子，表明M型种子可在较低温度和水势下启动萌发，而P型种子则需要更高的温度和水势(Zhang et al.，2016)。温度、湿度、盐碱、脱落酸等因子对异型种子的萌发均有显著影响(牛震等，2023；吴德宝，2023；刘桐宇等，2025)。一般情况下M型种子优先萌发，当M型种子受影响无法正常萌发时，P型种子会被启用，保证少花蒺藜草完成生活史并维持种群数量，二者在自然条件下同时萌发的概率仅为7%(曲婷，2022)，与白花鬼针草*Bidens alba*异型种子的萌发策略类似(闫小红等，2019)。张衍雷(2015)利用相对和绝对定量同位素标记(isobaric tags for relative and absolute quantitation，iTRAQ)技术对萌发和休眠的种子进行了动态蛋白质组学分析，共鉴定出1 984种蛋白质，其中有161个差异表达，并发现胰岛素信号通路可能通过调节核糖体合成和碳水化合物代谢促进种子萌发。同时Cao et al.(2025)利用非靶向代谢组学分析M型和P型种子萌发的幼苗在水分胁迫下的代谢响应，发现类黄酮是区分两种类型幼苗的关键差异代谢物。M型种子萌发的幼苗在胁迫下优先将生物量分配给根系，P型种子萌发的幼苗则优先供给穗部，反映了两者在生存繁殖权衡上的策略不同。这种异时萌发策略实现了当年扩张与跨年延续的功能互补，从而有利于少花蒺藜草在多变环境中保持种群增长(Zhang et al.，2016)。少花蒺藜草异型种子的形态与萌发分化是其分散繁殖风险的重要基础。

1.1.2 异型种子的入侵优势与生态功能

少花蒺藜草的入侵优势源于其高效的繁殖与传播策略。该草单株平均结实量大，可达80粒左右，使其能够在新生境中快速建立种群(徐礼莹，2024)。由于种子的自然散布距离较短，种群易形成集群分布。刺苞一方面能够抵御食草动物啃食；另一方面可附着于动物(如牛羊)皮毛、人类衣物或农业机具实现跨生境传播，从而促进种群的入侵扩散(周立业等，2013)。M型种子在适宜条件下会迅速萌发，快速抢占局部资源，在雨季或短期湿润窗口期

表现出超强的定殖能力，形成高密度斑块，农业集约化导致的氮沉降则进一步强化了M型种子的萌发优势，而P型种子则采取休眠策略，作为后备力，第2年再萌发、生长、繁殖（曲婷和周立业，2022）。这种异时萌发策略显著降低了环境波动导致的繁殖失败风险，有利于种群的持续（图1）。然而，其能否成功定殖还取决于异型种子对当地干旱、贫瘠及盐碱等非生物胁迫因子的适应能力。

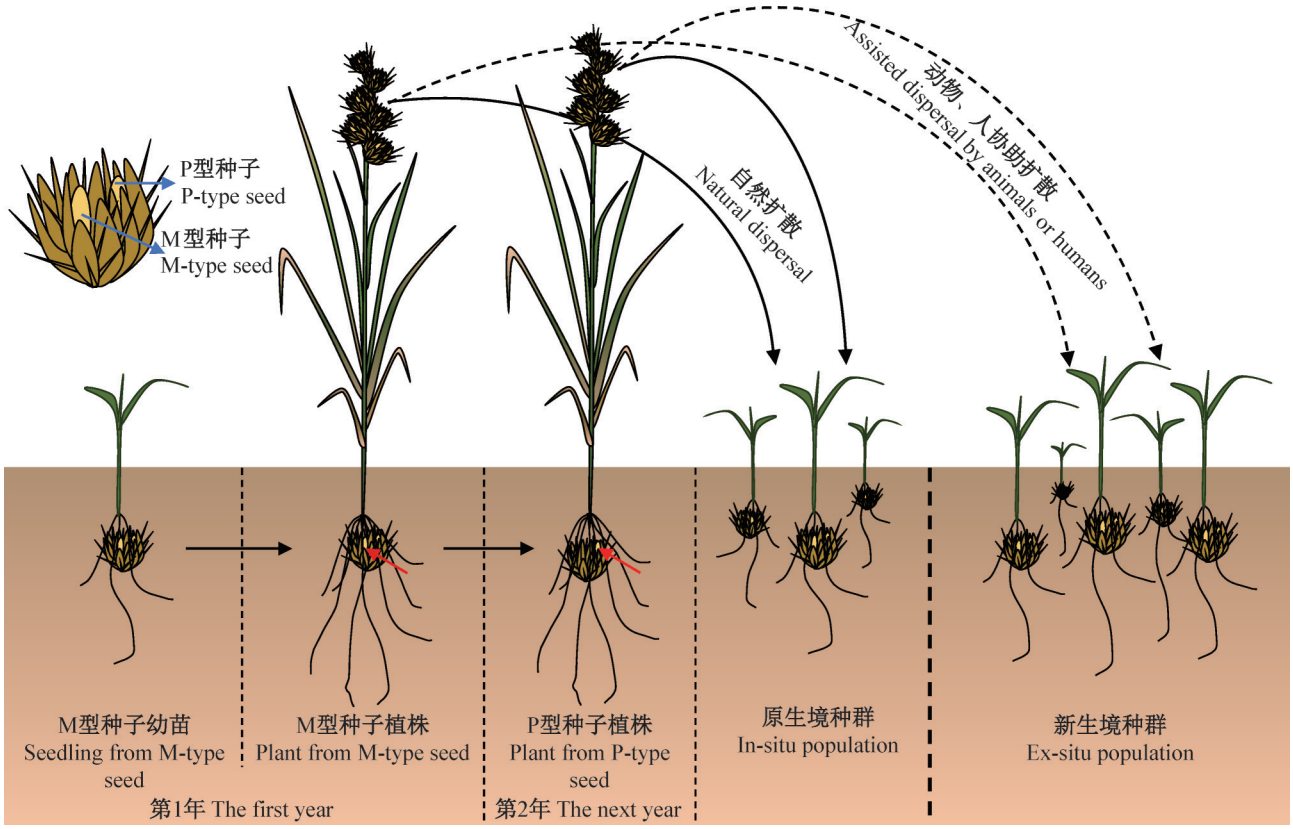


图1　少花蒺藜草异型种子萌发动态与传播

Fig. 1　Germination dynamics and dispersal of heteromorphic seeds of *Cenchrus pauciflorus*

1.2　少花蒺藜草的非生物胁迫响应和养分适应

少花蒺藜草对非生物胁迫的响应机制是其成功定殖的关键。在干旱条件下，少花蒺藜草通过提高抗氧化酶（如超氧化物歧化酶、过氧化物酶等）活性及渗透调节物质（如脯氨酸、可溶性糖等）含量以维持细胞稳态，并采用耐旱或逃旱策略调节生物量分配及生活史周期（张琦，2023；张琦等，2023）。在盐碱胁迫下，少花蒺藜草种子萌发受到抑制，但幼苗可通过增加渗透调节物质含量增强自身对逆境的耐受性（闫蒙等，2022）。此外，在不同养分条件下，少花蒺藜草通过优化光合特性及生物量分配来增加资源竞争能力（陈佳宁等，2024）。少花蒺藜草对非生物胁迫的响应机制是其突破生境限制、实现种群扩张的关键（张琦等，2023；陈佳宁，2024），该物种通过多层次的生理生化调控机制来缓解非生物胁迫造成的伤害，维持正常生长，增强入侵性和竞争力（孙英华等，2011；杜超等，2024）。

1.2.1　干旱胁迫下抗氧化防御与渗透调节的协同效应

在干旱胁迫下，少花蒺藜草启动活性氧清除系统以维持细胞稳态（Jiang et al.，2019），超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶等防御酶的活性分别提升至对照组的数倍（张琦等，2023），从而有效中和超氧阴离子和过氧化氢，防止膜脂过氧化及DNA损伤（陈佳宁等，2023）。同时，叶片内渗透调节物质含量增加，脯氨酸浓度在胁迫初期（7 d）激增45倍，而可溶性糖含量则在长期干旱胁迫下（21 d）持续上调，通过降低细胞水势来维持膨压（陈佳宁，2024），以降低细胞渗透势来适应干旱环境（马福林和马玉花，2022；张玉等，2022），但其淀粉含量则显著降低（Zhou et al.，2021），此外其还通过调节类黄酮和游离脂肪酸含量来适应干旱（Cao et al.，2025）。在气孔调节方面，干旱初期（0~5 d）气孔导度略有下降；长期干旱时（>5 d）气孔导度随时间的增加而降低，但渗透调节物质的积累使气孔不会完全关闭（陈佳

宁,2024),以维持基本的光合作用。在干旱胁迫下,少花蒺藜草表现出较强的形态可塑性,叶片数、叶面积、种子数等显著降低(张志新等,2012;姜野,2017),随着干旱胁迫程度逐渐加重,其营养体生物量逐渐降低,繁殖分配比例逐渐增加,从而保障种群繁衍(张琦,2023)。

1.2.2 盐碱胁迫下离子区隔化与萌发策略的权衡

在盐胁迫下,植物细胞内钠离子和氯离子会过量累积,造成细胞毒害(刘晓红和翟亚婷,2025)。少花蒺藜草能将多余的钠离子隔离到液泡中(王大江等,2024),降低细胞质离子浓度,维持细胞内离子平衡和生理代谢(闫蒙等,2022)。同时,超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶等抗氧化酶活性显著提高(闫蒙等,2022),及时清除体内的活性氧,减少氧化损伤。此外,合成和积累渗透调节物质维持细胞膨压(李智虓等,2025),并在一定程度上保护细胞内生物大分子免受盐碱胁迫的损伤。少花蒺藜草种子的萌发率随盐碱浓度升高而降低,在低盐碱胁迫下其萌发率最高可达56%以上,但在高盐碱条件下其萌发完全被抑制(闫蒙等,2022)。

1.2.3 养分适应下的生物量分配可塑性与资源竞争

少花蒺藜草的分蘖能力和生物量分配可塑性是其适应不同养分条件的关键(淑琴等,2023)。养分丰富的环境可促进少花蒺藜草的生长和入侵(肖荣,2024;李海韵等,2025)。在不同氮含量下,少花蒺藜草通过调节根长、根粗、茎粗等适应环境变化(张佳等,2024),其中低氮时增加地下生物量分配比例,高氮时增加地上生物量分配比例,并通过快速冠层扩张抑制邻近植物的光获取(陈佳宁,2024)。值得注意的是,少花蒺藜草的氮利用效率比本地优势种冰草 *Agropyron cristatum* 高1.3~1.8倍,磷利用效率高2.1~2.5倍,并能显著影响入侵生境土壤的氮库和氮转化效率(倪文华,2023;肖荣,2024)。在磷限制条件下,少花蒺藜草植株通过增加根系生物量和分泌磷酸酶来增加对磷的吸收,同时显著降低土壤有机质和速效磷的含量(高金会等,2022a),这种养分竞争模式可能导致群落中本土植物的竞争性衰退。农业集约化导致的氮沉降可能进一步增强了少花蒺藜草的生长优势,这种人为–自然双驱动机制使其在新生境中形成超线性扩散模式。

近年来,入侵植物养分适应研究已从表型比较深入到机制解析。在养分丰富的环境中,入侵植物能高效捕获和利用养分(Millar & Chapman,2025),并重塑根际氮循环(Wang et al.,2026);在养分贫瘠的环境中,则通过抑制氮损失、释放羧酸盐活化土壤磷或与丛枝菌根真菌共生维持竞争优势(Chen et al.,2023;Milutinović et al.,2025)。少花蒺藜草是否依赖上述策略获取磷以及其根系分泌物与丛枝菌根真菌的互作机制尚待阐明。此外,入侵植物在低养分条件下倾向于通过互作促进彼此生物量积累,而在高养分条件下转为竞争抑制(Oduor et al.,2024),少花蒺藜草与其他入侵种的互作关系是否同样受养分条件调控尚不清楚。少花蒺藜草对干旱、盐碱及养分胁迫的生理适应为其在资源受限生境中成功定殖提供了内在保障。然而,在种间竞争层面,该物种还通过化感作用抑制邻近植物的生长,从而削弱种间竞争。

1.3 少花蒺藜草的化感抑制作用

少花蒺藜草不同部位的浸提液对其他植物种子萌发的化感作用不同(包金连等,2023)。10.00%种子水浸提液对羊草 *Leymus chinensis* 种子萌发的抑制作用最强,综合化感效应指数为–0.76;10.00%叶水浸提液完全抑制野大豆 *Glycine soja* 种子萌发(佳文等,2024)。随着少花蒺藜草生长期的延长,其地上部分浸提液对燕麦 *Avena sativa* 种子萌发及幼苗生长的抑制作用逐渐增强,其中衰老期植株浸提液的抑制作用最高,结实期植株浸提液的抑制作用次之,幼苗期植株浸提液的抑制作用最弱(闫艳芳,2016)。这表明少花蒺藜草通过化感作用抑制了本地植物的生长及植物群落的多样性(包金连等,2023)。

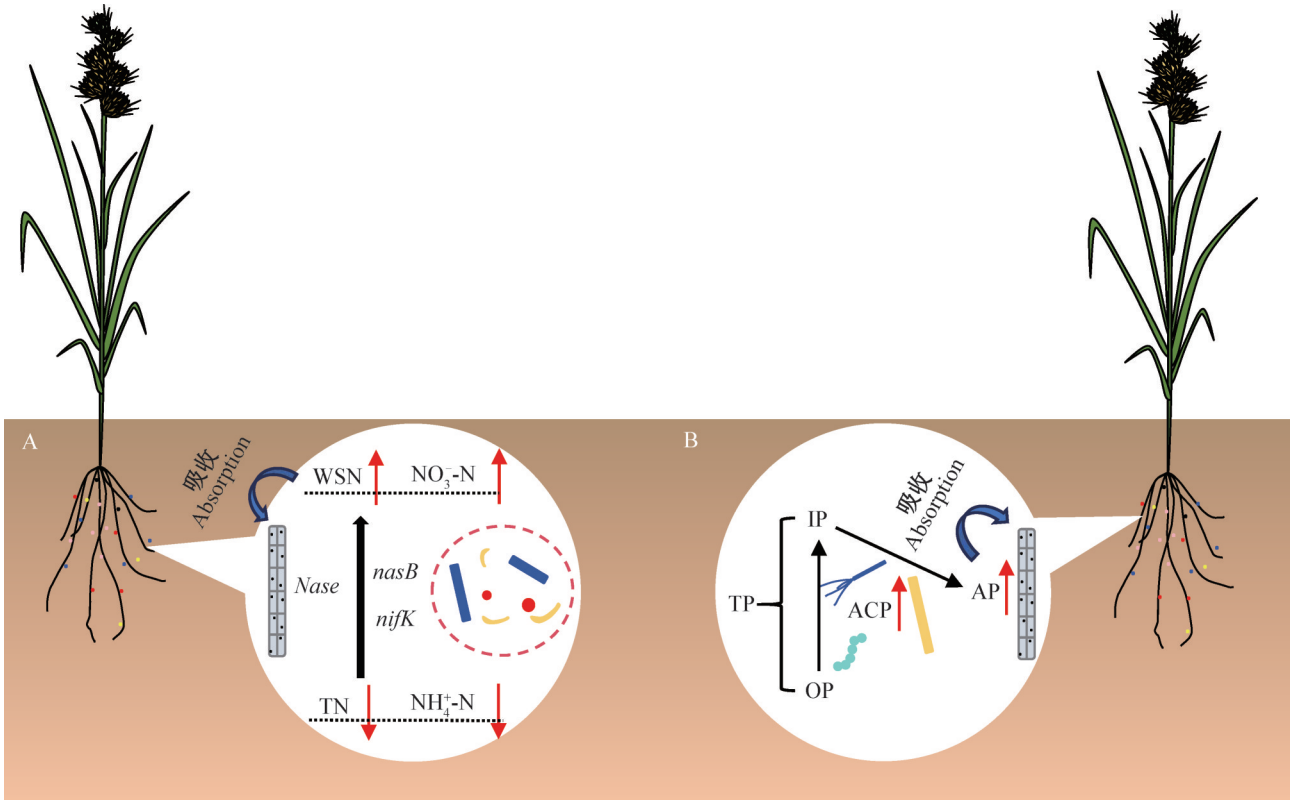
少花蒺藜草能分泌棕榈酸、亚油酸、亚麻酸、异香草醛、角鲨烯、邻苯二甲酸丁十一烷基酯等化感物质(王坤芳等,2017),其中棕榈酸会导致细胞膜脂过氧化,从而显著抑制豌豆 *Pisum sativum* 种子的萌发率(王娜等,2021;黄霖等,2024);亚油酸能抑制细胞的光合作用,并诱导氧化应激和细胞凋亡(王力超,2020;郭钟惠等,2023);亚麻酸会加剧细胞膜脂过氧化,并降低光合效率(丁宁等,2018),但在低浓度下可缓解植物受到的干旱胁迫(李东等,2018)。从少花蒺藜草根际土壤中提取的菜油甾醇、豆甾醇等可抑制马唐 *Digitaria sanguinalis* 种子胚根生长(王坤芳等,2017)。此外,其化感物质还能选择性抑制丛枝菌根真菌如球囊霉属 *Glomus* 的侵染率,削弱本地植物对磷等养分的获取能力(白皓然等,2024)。少花蒺藜草不仅可通过化感作用抑制邻近植物以削弱种间竞争,还可通过根系分泌物主动招募根际有益微生物,促进养分高效利用,二者共同服务于该物种在资源受限生境中的存活与扩张。

1.4　少花蒺藜草根际微生物招募与养分调控策略

1.4.1　根际微生物群落的功能性富集

少花蒺藜草根际可显著富集特定功能微生物类群，从而改变根际微生物群落结构，增加根系对土壤中氮、磷的吸收和利用。少花蒺藜草根际富集了链霉菌属*Streptomyces*、红色杆菌属*Rubrobacter*、慢生根瘤菌属*Bradyrhizobium*及氨氧化细菌等功能菌类群，改变了根际土壤的氮代谢过程（高金会等，2022b；马涛，2023；于建新，2023）。少花蒺藜草根际土壤的全氮、硝态氮等含量显著提升，其中硝态氮含量约为对照组的8倍（张婷，2017；高金会，2022）；固氮酶活性较非根际土壤提升数倍，从而每年可贡献一定的生物固氮量（马涛等，2024）。此外，少花蒺藜草的生物量及养分利用能力对氮形态的响应具有偏好性（倪文华，2023），推测其可能属于喜硝植物，能在不同生长时期有效利用土壤中的硝态氮（王然等，2020；于建新，2023）（图2-A）。

少花蒺藜草入侵显著提高了土壤根际解磷菌的多样性，主要包括*α*-变形菌、链霉菌等类群，这些微生物提高了土壤速效磷含量（高金会等，2022a）。宋振等（2022）进一步研究发现少花蒺藜草显著增加了根际土壤中解有机磷细菌和解无机磷细菌的数量和均匀度，其中解无机磷优势菌属鉴定为金黄杆菌属*Chryseobacterium*，多种解磷菌共同促进了少花蒺藜草对不同类型磷的吸收。在缺磷条件下，根际土壤中变形菌和链霉菌等类群的丰度显著增加，同时少花蒺藜草根系酸性磷酸酶的分泌能力显著增强，形成促进磷吸收的正反馈机制（王然，2020）（图2-B）。



WSN：水溶性氮；NO_3^--N：硝态氮；TN：总氮；NH_4^+-N：铵态氮；*Nase*、*nasB*、*nifK*：均为氮代谢功能基因；TP：全磷；IP：无机磷；OP：有机磷；AP：速效磷；ACP：酸性磷酸酶。WSN: Water-soluble nitrogen; NO_3^--N: nitrate nitrogen; TN: total nitrogen; NH_4^+-N: ammonium nitrogen; *Nase*, *nasB*, *nifK*: nitrogen metabolism-related functional genes; TP: total phosphorus; IP: inorganic phosphorus; OP: organic phosphorus; AP: available phosphorus; ACP: acid phosphatase.

图2　少花蒺藜草对氮（A）、磷（B）养分的吸收策略

Fig. 2　Nutrient uptake strategies for nitrogen (A) and phosphorus (B) in *Cenchrus pauciflorus*

1.4.2　微生物互作与入侵正反馈

少花蒺藜草入侵后，根际微生物群落的结构改变会引发一系列根际效应。在养分循环方面，氮代谢功能基因如*nasB*、*nifK*等基因的丰度增加（高金会，2022），根际硝化速率与磷酸酶活性同时增强，加速氮磷矿化（于建新，2023），重构土壤养分循环。根际富集的解磷菌（高金会等，2022a）和固氮菌（马涛等，2024）与少花蒺藜草根系形成互作关系，提升了

宿主的抗干扰能力和养分利用效率(宋振等,2022)。此外,根际富集的促生菌如链霉菌属、红色杆菌属能合成植物激素。有研究表明,根际促生菌的代谢产物可显著打破檀香*Santalum album*种子休眠,提高其萌发率(穆文强等,2022;Anjali et al.,2026)。虽然目前关于少花蒺藜草在上述方面无直接研究证据,但据此推测少花蒺藜草M型种子优先萌发的特性可能会被微生物源激素进一步促进,而P型种子的休眠维持也可能受到微生物信号(如挥发性有机物)的调控,但尚需进一步研究验证。

根际微生物能够诱导宿主的系统性抗逆性,如根际促生菌可使植物从干旱胁迫状态中恢复(Zhao et al.,2023),丛枝菌根真菌亦能增强植物对低磷、干旱等非生物胁迫的耐受性(肖雪峰等,2026)。少花蒺藜草根际显著富集假单胞菌*Pseudomonas*、芽胞杆菌*Bacillus*,且根际富集的丛枝菌根真菌类别与本地植物有较大差异(邢傲,2025),但这些微生物如何影响少花蒺藜草的抗逆性仍需进一步研究验证。入侵植物的植物-土壤反馈效应可分为两类:一类是正向直接反馈,通过增强自身与有益微生物的共生关系,提高养分获取效率与生产力;另一类是负向间接反馈,通过化感作用直接抑制邻近植物生长,或通过破坏本地植物与共生微生物的互惠关系、增加土传病原体丰度等方式,间接削弱其他物种的适合度(Lowry et al.,2024)。入侵植物相关微生物类群通过产生植物激素直接促进植物生长,或产生活性代谢物间接保障植物健康,在种群的建立和增殖中发挥着关键作用(Das et al.,2026)。然而,少花蒺藜草如何通过分泌物招募根际微生物以及这些微生物对宿主的反馈效应与作用机制尚待阐明。

少花蒺藜草异型种子的萌发分化不仅是一种繁殖保障策略,更是其成功入侵的基础。M型与P型种子在萌发时间上的分化,可能导致种群在年际间的密度波动,进而影响根际微生物群落的动态。在高密度斑块中根系分泌物总量增加,有利于特定功能微生物如固氮菌、解磷菌的富集;而低密度斑块则可能保留更多本地微生物类群(高金会等,2022a;马涛等,2024)。异型种子间接调控了根际微生物群落的组装过程,这一跨环节的因果联系尚未得到试验验证,但现有研究表明少花蒺藜草入侵后根际微生物群落结构与本地植物显著不同(宋振等,2022),暗示了种子策略对微生物招募的潜在调控作用(图3)。

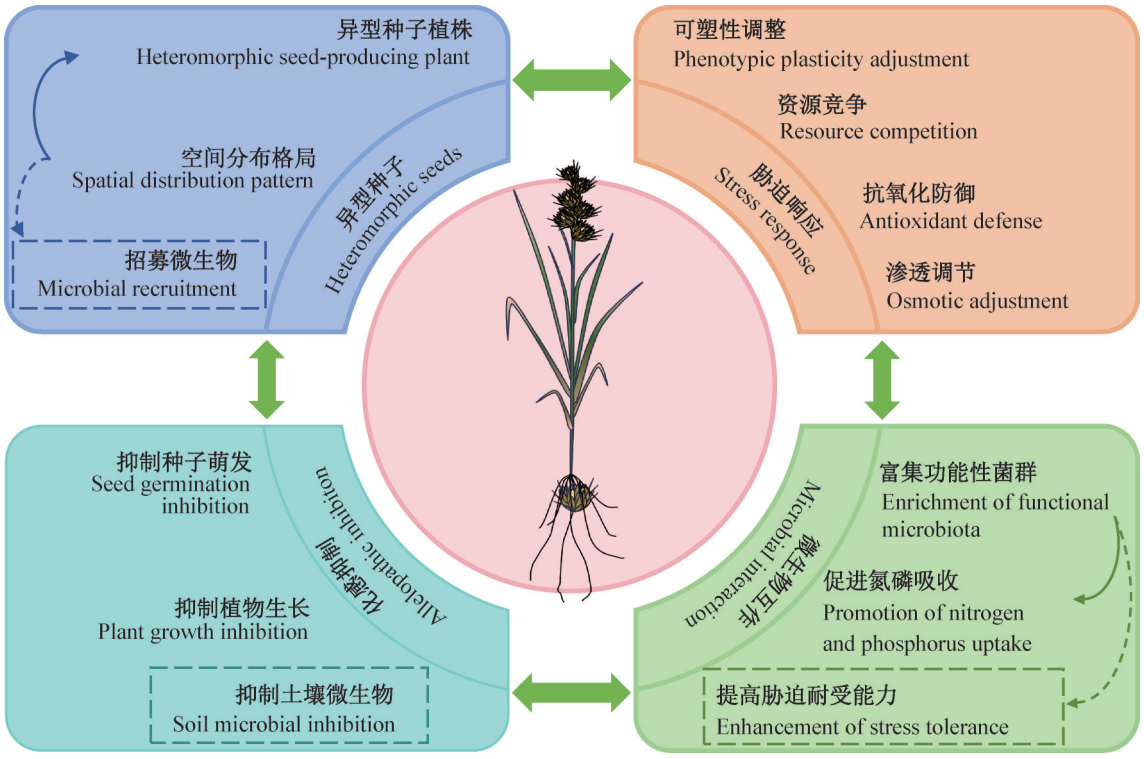


图3 少花蒺藜草入侵效应路径

Fig. 3 Pathways underlying the invasion effects of *Cenchrus pauciflorus*

图中虚线箭头与虚线框表示该路径研究尚未明析。Dashed arrows and dashed boxes indicate pathways that have not yet been fully elucidated.

2 少花蒺藜草的入侵生态效应

2.1 本地物种多样性降低

少花蒺藜草入侵对本地植物群落最直接的影响是物种多样性的显著下降。当少花蒺藜草严重入侵时，紫花苜蓿 *Medicago sativa* 株高较对照降低了41%，野大豆株高降低了28%，羊草株高降低了59%（许明贺等，2025）。当少花蒺藜草在草原中危害度达15%以上时，禾本科牧草所占比例逐渐增加，菊科和藜科植物重要值降低，这一选择性抑制效应改变了群落的功能群结构，同时植物多样性指数、优势度、均匀度和丰富度均随入侵程度加重而下降，表现为无入侵区>轻度入侵区>中度入侵区>重度入侵区（王坤芳等，2015）。随着入侵时间增加，少花蒺藜草在群落中的重要值持续增加，群落间相似系数上升而物种替代率降低，多样性下降，群落结构趋于简单化（徐军，2011）。

2.2 土壤氮循环失衡

少花蒺藜草显著改变了土壤功能。少花蒺藜草入侵虽使土壤总氮库增加，但0~50 cm土层的铵态氮含量显著降低了约25%；而浅土层（0~10 cm）的硝态氮含量则显著高于深土层（10~50 cm）（张婷，2017），其含量是狗尾草 *Setaria viridis* 根际土壤中硝态氮含量的3倍（马涛等，2024）。少花蒺藜草入侵后，土壤中氮素的积累和转化过程也发生明显改变，从而影响其他植物生长（Meng et al.，2024）。少花蒺藜草根际土壤的净硝化速率显著高于鹅观草 *Elymus kamoji* 根际土壤（王然等，2020），同时反硝化基因 *nirK*、*nosZ* 的表达量同步增强（于建新，2023），表明其通过增加土壤氮净矿化速率来形成土壤惰性氮库（王然等，2020）。少花蒺藜草入侵对土壤氮库的影响依赖于土壤功能菌的作用，这些微生物参与植物氮代谢及土壤氮循环过程，打破了原有的氮循环平衡（高金会等，2022b；马涛，2023），推动土壤氮循环向更有利于少花蒺藜草自身生长的方向调整，进一步促进其持续入侵。

3 基于微生物抑制剂的少花蒺藜草防控

目前，对少花蒺藜草的防控主要集中在机械防除和化学防除两方面。机械防除可以减少种子数量，抑制种群扩散（赵鑫宇等，2025），但人工和机械成本高；化学防除虽防治效果明显（周全来等，2021），但对牧草及农作物安全构成威胁；竞争替代通过竞争或化感作用抑制其生长达到防控效果（刘辉等，2022；王坤芳，2023），但见效缓慢且受生境限制。这些手段皆存在明显局限，基于少花蒺藜草与微生物的互作机制开发微生物抑制剂可能成为新的方向。

基于少花蒺藜草与根际微生物的协同互作机制，未来可探索以下靶向防控方向：在少花蒺藜草根际土壤中定向分离可破坏其与固氮菌、解磷菌等共生功能菌协同关系的拮抗菌株，并制成微生物菌剂，理论上可抑制根系对共生菌的招募，降低根际养分有效性，从而抑制植株生长和结实。筛选专性抑制丛枝菌根真菌的木霉菌 *Trichoderma* spp.，通过竞争性排斥或重寄生作用破坏根际菌根共生网络，有望削弱少花蒺藜草在贫瘠土壤中的适应优势。从少花蒺藜草患病叶片中分离的互隔交链孢霉 *Alternaria alternata* 等病原真菌，可直接侵染少花蒺藜草叶片，致使植株死亡（王桦等，2025）。目前，针对少花蒺藜草抑制性菌剂的开发研究较少，尚需更多的试验验证，各类型菌剂的开发和使用需重点关注对本地非靶向植物的生态安全性。

4 少花蒺藜草研究的挑战与机遇

少花蒺藜草异型种子的形态与萌发分化有助于其分散繁殖风险，同时使种子库具有强大的调节能力，有利于在多变环境中维持种群延续。然而，异型种子分化的遗传与发育机制尚不清楚，这类性状受单一主效基因还是多基因网络控制、相关发育通路在何时被激活（Žerdoner Čalasan & Kadereit，2023）等问题均尚待深入研究。徐礼莹（2024）已初步鉴定了 *CpACO1*、*CpPME1*、*CpPPO1* 及 *AP2/ERF* 等刺苞成熟关键调控基因，但上述基因是否直接参与异型种子分化仍需进一步验证。

M型与P型种子萌发的植株在生长性状、生理特性及代谢物种类方面存在差异（姜汇，2018；Cao et al.，2025），但具体分子调控机制尚不明确，今后需结合转录组学与代谢物分析加以解析。两种异型种子萌发的植株的性状分化是否通过根系分泌物驱动根际微生物群落进行差异化组装，进而影响宿主养分利用并反馈调节种群动态，这一因果路径尚缺乏直接证据。此外，根际微生物对下一世代种子萌发是否存在反馈效应仍不清楚。化感物质是否通过调控根际微生物群落结构间接增强少花蒺藜草的竞争效应，则是理解其多机制协同入侵的另一关键环节。

少花蒺藜草的分子适应机制为新型防控技术提供了潜在靶点。在刺苞发育调控方面，*CpACO1*、*CpPME1*、*CpPPO1* 及 *AP2/ERF* 被确定为刺苞成熟的关键调控基因（徐礼莹，2024），少花蒺藜草具抗旱、耐贫瘠的特点，未来研究可结合转录组学、代谢组学与宏基因组学等多组学手段，深入挖掘其适应性状的关键基因，在此基础上可借助CRISPR-Cas9、RNA干扰等技术验证基因功能，进一步明确其作为分子防除靶点的可行性。

参 考 文 献（References）

An RJ, 2013. Research on the scientific name of an invasive plant-field sandbur[J]. Plant Protection, 39(2): 82−85 (in Chinese) [安瑞军, 2013. 外来入侵植物: 少花蒺藜草学名的考证[J]. 植物保护, 39(2): 82−85]

Anjali KS, Jijeesh CM, Kunhamu TK, Jamaludheen V, Santhoshkumar AV, 2026. Plant growth promoting rhizobacterium (PGPR): an effective consortium for sandal (*Santalum album* L.) seed germination[J]. Plant Science Today, 13(S1): pst.11270

Bai HR, Hou M, Liu YJ, 2024. Mechanisms of the invasion of *Cenchrus spinifex* and drought effects on productivity of *Leymus chinensis* community[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 48(5): 577−589 (in Chinese) [白皓然, 侯盟, 刘艳杰, 2024. 少花蒺藜草入侵与干旱对羊草群落生产力的影响机制[J]. 植物生态学报, 48(5): 577−589]

Bao JL, Yan M, Xiong M, Ma W, Li SZ, Zhou LY, 2023. Effect of water extract of *Cenchrus incertus* on seed germination of *Setaria viridis*[J]. Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Sciences), 38(3): 227−230 (in Chinese) [包金连, 闫蒙, 熊梅, 马文, 李术芝, 周立业, 2023. 少花蒺藜草水浸提液对狗尾草种子萌发的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 38(3): 227−230]

Cao J, Li ZS, Monaco TA, Rong YP, 2025. Metabolite analysis indicates role of flavones and free fatty acids in water deficit stress response of *Cenchrus spinifex*[J]. Flora, 327: 152729

Cao J, Xu J, Pan XB, Monaco TA, Zhao K, Wang DP, Rong YP, 2021. Potential impact of climate change on the global geographical distribution of the invasive species, *Cenchrus spinifex* (Field sandbur, Gramineae)[J]. Ecological Indicators, 131: 108204

Chen JN, 2024. Effects of drought rehydration on the growth and physiological characteristics of *Cenchrus pauciflorus* and *Pennisetum centrasiaticum* under different nutrient conditions[D]. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University (in Chinese) [陈佳宁, 2024. 养分差异条件下干旱复水对少花蒺藜草和白草生长及生理特性的影响[D]. 通辽: 内蒙古民族大学]

Chen JN, Feng HX, Su H, Luo YY, Zhou LY, 2023. Physiological response and drought resistance evaluation of invasive plants *Cenchrus pauciflorus* to drought[J]. Grassland and Turf, 43(3): 77−83, 91 (in Chinese) [陈佳宁, 冯海旭, 苏慧, 罗亚勇, 周立业, 2023. 入侵植物少花蒺藜草对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 草原与草坪, 43(3): 77−83, 91]

Chen JN, Wang SQ, Luo YY, Zhou LY, Zhao XY, Xia M, Wang HS, Bao JL, 2024. Effects of nutrients and water on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities of *Cenchrus pauciflorus*[J]. Acta Agrestia Sinica, 32(10): 3091−3102 (in Chinese) [陈佳宁, 王舒琦, 罗亚勇, 周立业, 赵鑫宇, 夏咪, 王鹤松, 包金连, 2024. 养分及水分对少花蒺藜草光合特性及抗氧化酶活性的影响[J]. 草地学报, 32(10): 3091−3102]

Chen L, Wang MQ, Shi Y, Ma PP, Xiao YL, Yu HW, Ding JQ, 2023. Soil phosphorus form affects the advantages that arbuscular mycorrhizal fungi confer on the invasive plant species, *Solidago canadensis*, over its congener[J]. Frontiers in Microbiology, 14: 1160631

Das P, Sharma I, Patowary A, Agarwala N, 2026. Invasive plant-associated microbes ensure host plant survivability and performance: will these microbes provide fitness benefit to crop plants[J]. Symbiosis, 98(2): 133−151

Ding N, Wang RJ, Gao PK, Chen JL, Han M, Wang JG, Liu XX, Zheng NN, 2018. Allelopathic effects of linolenic acid secreted by macroalgae on *Prorocentrum donghaiense*[J]. Chinese Journal of Ecology, 37(5): 1410−1416 (in Chinese) [丁宁, 王仁君, 高配科, 陈嘉琳, 韩梅傲雪, 王建国, 刘秀霞, 郑宁宁, 2018. 大型海藻分泌物亚麻酸对东海原甲藻的化感效应[J]. 生态学杂志, 37(5): 1410−1416]

Du C, Baowuriga, He JY, 2024. The difference of drought and salt stress tolerance between *Cenchrus incertus* M. A., wheat and maize[J]. Grassland and Turf, https://link.cnki.net/urlid/62.1156.S.20241205.1411.002 (in Chinese) [杜超, 宝乌日嘎, 贺俊英, 2024. 入侵植物光梗蒺藜草与小麦和玉米的抗旱性和耐盐性的差异分析[J]. 草原与草坪, https://link. cnki. net/urlid/62.1156. S.20241205.1411.002]

Gao JH, 2022. The microecological mechanism of nitrogen efficient utilization of invasive alien plant *Cenchrus spinifex*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [高金会, 2022. 外来入侵植物少花蒺藜草对氮素高效利用的微生态机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院]

Gao JH, Wang R, Song Z, Yun LL, Fu WD, Wang ZH, Ma T, Wang Y, Zhang GL, 2022a. Effects of *Cenchrus spinifex* invasion on phosphorus bacteria community diversity in rhizosphere soil[J]. Journal of Biosafety, 31(4): 327−335 (in Chinese) [高金会, 王然, 宋振, 郓玲玲, 付卫东, 王忠辉, 马涛, 王伊, 张国良, 2022a. 少花蒺藜草入侵对根际土壤磷细菌群落多样性的影响[J]. 生物安全学报, 31(4): 327−335]

Gao JH, Zhang GL, Fu WD, Ma T, Yuan ZL, Song Z, 2022b. Effects of spiny burr grass *Cenchrus longispinus* invasion on rhizosphere nitrogen cycle based on metagenome sequencing[J]. Journal of Plant Protection, 49(5): 1349−1357 (in Chinese) [高金会, 张国良, 付卫东, 马涛, 袁至立, 宋振, 2022b. 基于宏基因组测序解析长刺蒺藜草入侵对根际土壤氮循环的影响[J]. 植物保护学报, 49(5): 1349−1357]

Guo ZH, Li JM, Zhang MX, 2023. A review on antialgal effectiveness among distinct allelochemicals and joint inhibitory effects on cyanobacterial growth[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 47(1): 177−194 (in Chinese) [郭钟惠, 李洁明, 张明霞, 2023. 不同类型化感物质抑制蓝藻效益比较及联合抑藻效应评述[J]. 水生生物学报, 47(1): 177−194]

Hao LF, Xu XY, Ji Y, Wang R, Wu DB, Li YY, Lin KJ, 2024. Comparison of the dynamic morphological and physiological characteristics of twin seeds during the germination of field sandbur[J]. Acta Prataculturae Sinica, 33(9): 40−50 (in Chinese) [郝丽芬, 徐晓阳, 季玉, 王瑞, 吴德宝, 李宇宇, 林克剑, 2024. 长刺蒺藜草两异型种子形态和萌发过程的生理动态特征比较[J]. 草业学报, 33(9): 40−50]

Huang L, Pan HZ, Li J, Xie F, Wei W, Xing Z, Lai JX, 2024. Allelopathic effect of *Chattonella marina* on *Gymnodinium catenatum*[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 40(4): 400−406 (in Chinese) [黄霖, 潘绘竹, 李杰, 谢芳, 韦维, 邢政, 赖俊翔, 2024. 海洋卡盾藻对链状裸甲藻的化感作用研究[J]. 广西科学院学报, 40(4): 400−406]

Jia W, Xu MH, Zhou LY, Gao K, Sun ZL, Xiong M, 2024. The allelopathy effects of water extract from invasive plant *Cenchrus spinifex* on seed germination of three forages[J]. Acta Agrestia Sinica, 32(8): 2548−2556 (in Chinese) [佳文, 许明贺, 周立业, 高凯, 孙忠林, 熊梅, 2024. 入侵植物少花蒺藜草水浸提液对3种牧草种子萌发的化感效应[J]. 草地学报, 32(8): 2548−2556]

Jiang H, 2018. Effects of artificial aging on physiological and biochemical characteristics of heteromorphic seeds of field sandbur (*Cenchrus pauciflorus*)[D]. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University (in Chinese) [姜汇, 2018. 人工老化对少花蒺藜草(*Cenchrus pauciflorus*)异型性种子生理生化特性的影响[D]. 通辽: 内蒙古民族大学]

Jiang Y, 2017. The effects of drought stress and nitrogen addition on physiological and ecological characteristics of different soil substrates of *Tribulus terrestris*[D]. Shenyang: Liaoning University (in Chinese) [姜野, 2017. 干旱胁迫和氮素添加对不同土壤基质少花蒺藜草生理生态特性的影响[D].沈阳: 辽宁大学]

Jiang Y, Cai TG, Tang FD, 2019. Effect of different drought stress on seedling growth and physiological characteristics of *Cenchrus pauciflorus* Benth[J]. OALib, 6(12): 1−14

Li D, Zhen CY, Chen DF, Chen XW, 2018. Effects of α-linolenic acid on germination of rice seeds under drought stress[J]. Guihaia, 38(8): 1025−1031 (in Chinese) [李东, 甄春燕, 陈德富, 陈喜文, 2018. α-亚麻酸对干旱胁迫下水稻种子萌发的影响[J]. 广西植物, 38(8): 1025−1031]

Li HY, Tian X, Lü GC, Wei SJ, Huang L, Long AG, Zhang Q, Chen YJ, Ma WJ, 2025. Effects of different nutrient levels on phenotypic characteristics and biomass allocation of the invasive plant *Cenchrus pauciflorus*[J]. Pratacultural Science, 42(6): 1428−1436 (in Chinese) [李海韵, 田迅, 吕广超, 韦世杰, 黄亮, 龙安刚, 张琦, 陈宇杰, 马文静, 2025. 不同养分水平对入侵植物少花蒺藜草表型特征及生物量分配的影响[J]. 草业科学, 42(6): 1428−1436]

Li ZX, Wang J, Fu YY, Luo ZY, Shi T, Zhou T, 2025. Physiological responses of five mangrove plant seedlings under salt stress[J]. Forest Science and Technology(8): 14−18 (in Chinese) [李智虓, 王晶, 符永钰, 罗振宇, 师涛, 周韬, 2025. 盐胁迫下5种红树植物幼苗的生理响应[J]. 林业科技通讯(8): 14−18]

Liu H, Dong XB, Qi DM, Chen SY, Chen MJ, Tian ZP, Yuan QF, An ZJ, Liu GS, 2022. Technology of controlling the damage of *Cenchrus spinifex* by *Leymus chinensis*[J]. Grassland and Prataculture, 34(1): 56−62 (in Chinese) [刘辉, 董晓兵, 齐冬梅, 陈双燕, 陈满军, 田志鹏, 苑庆飞, 安志军, 刘公社. 2022. 羊草控制少花蒺藜草危害的技术研究[J]. 草原与草业, 34(1): 56−62]

Liu TY, Song LQ, Cao J, Rong YP, 2025. Morphological differences in heterotypic seeds of *Cenchrus spinifex* and their germination in response to temperature[J]. Acta Agrestia Sinica, 33(2): 451−456 (in Chinese) [刘桐宇, 宋琳倩, 曹婧, 戎郁萍, 2025. 少花蒺藜草异型种子形态差异及其萌发对温度的响应[J]. 草地学报, 33(2): 451−456]

Liu XH, Zhai YT, 2025. Research progress on salt tolerance of Asteraceae plants[J]. Contemporary Horticulture, 48(9): 48−50 (in Chinese) [刘晓红, 翟亚婷, 2025. 菊科植物耐盐性研究进展[J]. 现代园艺, 48(9): 48−50]

Lowry CJ, Blocklove KM, Eckert KE, Koirala N, Rice EK, 2024. If you can't beat them, join them: using invasive plants to understand rhizodeposits as drivers of plant-soil feedbacks[J]. Frontiers in Agronomy, 6: 1363124

Ma FL, Ma YH, 2022. Effect of drought stress on plants and their response mechanism[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 43(4): 391−399 (in Chinese) [马福林, 马玉花, 2022. 干旱胁迫对植物的影响及植物的响应机制[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 43(4): 391−399]

Ma T, 2023. Structure and function of endophytic and rhizospheric azotobacter community in *Cenchrus longispinus*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [马涛, 2023. 长刺蒺藜草内生及根际固氮菌群落结构与功能研究[D].北京: 中国农业科学院]

Ma T, Song Z, Fu WD, Zhang Y, Wang ZH, Yuan ZL, Wang Y, Zhang GL, 2024. Research on the effect of rhizosphere bacteria on nitrogen utilization of *Cenchrus longispinus*[J]. Journal of Biosafety, 33(1): 38−47 (in Chinese) [马涛, 宋振, 付卫东, 张岳, 王忠辉, 袁至立, 王伊, 张国良, 2024. 根际细菌在长刺蒺藜草氮素利用中的作用[J]. 生物安全学报, 33(1): 38−47]

Meng M, Ren BH, Yu JX, Li DY, Li HY, Li JH, Yang JY, Bai L, Feng YL, 2024. *Cenchrus spinifex* invasion alters soil nitrogen dynamics and competition[J]. Microorganisms, 12(11): 2120

Meng Y, Qiu J, 2024. Two new records in Xinjiang of Poaceae exotic plants of China[J]. Chinese Wild Plant Resources, 43(3): 110−113 (in Chinese) [孟岩, 邱娟, 2024. 新疆禾本科2种中国外来植物新记录[J]. 中国野生植物资源, 43(3): 110−113]

Millar A, Chapman H, 2025. Adaptive nutrient responses vary with growing environment but not altitudinal origin in an invasive plant[J]. Journal of Evolutionary Biology, 38(12): 1657−1667

Milutinović M, Đunisijević-Bojović D, Maksimović V, Kostić Kravljanac L, Popović J, Marković M, 2025. Differential responses of invasive trees *Ailanthus altissima* Mill. Swingle and *Fraxinus americana* L. to soil phosphorus availability[J]. Plants, 14(20): 3204

Mu WQ, Kang SM, Li PL, 2022. Advances in rhizosphere growth-promoting bacteria function on plant growth facilitation and their mechanisms[J]. Chinese Bulletin of Life Sciences, 34(2): 118−127 (in Chinese) [穆文强, 康慎敏, 李平兰, 2022. 根际促生菌对植物的生长促进作用及机制研究进展[J]. 生命科学, 34(2): 118−127]

Ni WH, 2023. Effects of different nitrogen nutrient environments on interspecific competition and nutrient utilization strategies of *Cenchrus spinifex*[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese) [倪文华, 2023. 不同氮营养环境对少花蒺藜草竞争能力和养分利用策略的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学]

Niu Z, Jiang H, Zhang R, Xu LY, LüGC, Zhang ZX, Tian X, 2023. Differences in antioxidant physiological responses of heteromorphic *Cenchrus pauciflorus* seeds during artificial aging[J]. Chinese Journal of Grassland, 45(1): 115−120 (in Chinese) [牛震, 姜汇, 张瑞, 徐礼莹, 吕广超, 张志新, 田迅, 2023. 少花蒺藜草异型性种子人工老化过程中抗氧化生理响应差异[J]. 中国草地学报, 45(1): 115−120]

Oduor AMO, Yu H, Liu YJ, 2024. Invasive plant species support each other's growth in low-nutrient conditions but compete when nutrients are abundant[J]. Ecology, 105(10): e4401

Oreja FH, Del Fueyo PA, de la Fuente EB, 2024. Environmental factors regulating *Cenchrus spinifex* seed germination[J]. International Journal of Pest Management, 70(4): 668−675

Qu T, 2022. Effects of human disturbance on seed germination and seedling growth of *Cenchrus incertus*[D]. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University (in Chinese) [曲婷, 2022. 人为干扰方式对少花蒺藜草异型种子萌发和幼苗生长的影响[D]. 通辽: 内蒙古民族大学]

Qu T, Zhou LY, 2022. Seed germination strategy and seedling growth characteristics of heteromorphic seeds of the invasive weed *Cenchrus incertus*[J]. Acta Prataculturae Sinica, 31(6): 91−100 (in Chinese) [曲婷, 周立业, 2022. 入侵植物少花蒺藜草异型种子萌发策略及其幼苗生长特性[J]. 草业学报, 31(6): 91−100]

Shu Q, Sun ZL, Ma CY, Yao JB, Hua MY, Gao K, Zhou LY, Tian X, 2023. Phenotypic characteristics and biomass allocation of *Cenchrus pauciflorus* in four different habitats in Horqin Sandy Land[J]. Pratacultural Science, 40(2): 329−337 (in Chinese) [淑琴, 孙忠林, 马崇勇, 姚靖波, 华明阳, 高凯, 周立业, 田迅, 2023. 科尔沁沙地4种生境少花蒺藜草表型特征和生物量分配[J]. 草业科学, 40(2): 329−337]

Song Z, Wang R, Gao JH, Fu WD, Ma T, Yuan ZL, Zhang GL, 2022. Community diversity analysis of phosphorus solubilizing bacteria in rhizosphere of spiny burr grass *Cenchrus longispinus*[J]. Journal of Plant Protection, 49(5): 1358−1366 (in Chinese) [宋振, 王然, 高金会, 付卫东, 马涛, 袁至立, 张国良, 2022. 长刺蒺藜草根际土壤解磷细菌群落的多样性分析[J]. 植物保护学报, 49(5): 1358−1366]

Sun YH, Lü LY, Zhao Y, 2011. Risk assessment and control utilization strategies of *Cenchrus pauciflorus* Benth[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 39(8): 4580−4581 (in Chinese) [孙英华, 吕林有, 赵艳, 2011. 少花蒺藜草入侵风险评估及其防控策略[J]. 安徽农业科学, 39(8): 4580−4581]

Wang DJ, Liu Z, Lu X, Gao Y, Sun SM, Guo HX, Tian W, Wang L, Li ZC, Li LW, et al., 2024. Advances and prospect on mechanism of salt tolerance in plants[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 39(5): 80−92 (in Chinese) [王大江, 刘昭, 路翔, 高源, 孙思邈, 郭含欣, 田雯, 王霖, 李子琛, 李连文, 等, 2024. 植物耐盐机制研究进展及展望[J]. 华北农学报, 39(5): 80−92]

Wang H, Chen YH, Xu XY, Guo LZ, Li YY, Su HH, Hao LF, Lin KJ, 2025. Isolation, identification and weed control effect study of *Alternaria alternata* strain TL-3 from *Cenchrus longispinus*[J]. Chinese Journal of Grassland, 47(6): 90−99 (in Chinese) [王桦, 陈艺豪, 徐晓阳, 郭丽珠, 李宇宇, 苏宏华, 郝丽芬, 林克剑, 2025. 长刺蒺藜草生防菌TL-3分离鉴定及除草效果研究[J]. 中国草地学报, 47(6): 90−99]

Wang KF, 2023. Ecological restoration techniques of two alternative plants for *Cenchrus pauciflorus*[J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 35(4): 295−299 (in Chinese) [王坤芳, 2023. 两种替代植物对少花蒺藜草的生态修复技术[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 35(4): 295−299]

Wang KF, Ji MS, Peng S, 2015. Effect of different invasion degrees of *Cenchrus pauciflorus* on plant communities characteristics[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 46(11): 16−21 (in Chinese) [王坤芳, 纪明山, 彭爽, 2015. 不同入侵程度下少花蒺藜草对植物群落特征影响[J]. 东北农业大学学报, 46(11): 16−21]

Wang KF, Wang WC, Lei H, Yao FJ, Peng S, 2017. Allelopathy of *Cenchrus pauciflorus* and analysis of its allelochemical[J]. Modern Journal of Animal Husbandry and Veterinary Medicine(9): 13−20 (in Chinese) [王坤芳, 王文成, 雷虹, 姚凤军, 彭爽, 2017. 少花蒺藜草的化感作用及其化感物质成分分析[J]. 现代畜牧兽医(9): 13−20]

Wang LC, 2020. Allelopathic effect of *Humulus scandens* root extracts on the growth of invasive plant *Alternanthera philoxeroides*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University (in Chinese) [王力超, 2020. 葎草根提取物对入侵植物喜旱莲子草生长的化感效应分析[D]. 合肥: 安徽农业大学]

Wang N, Ma SY, Ma L, Yang N, Zhang XH, Zhang WX, Lian RF, Li S, Chai Q, 2021. Allelopathy effects of cinnamic acid and palmitic acid on seed germination and seedling growth of pea[J]. Plant Physiology Journal, 57(8): 1657−1667 (in Chinese) [王娜, 马绍英, 马蕾, 杨宁, 张旭辉, 张维霞, 连荣芳, 李胜, 柴强, 2021. 肉桂

酸和棕榈酸对豌豆种子萌发和幼苗生长的化感效应[J]. 植物生理学报, 57(8): 1657−1667]

Wang R, 2020. The micro-ecological mechanism of phosphorus utilization of *Cenchrus spinifex*[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [王然, 2020. 少花蒺藜草对磷元素高效利用的土壤微生态机制[D]. 北京: 中国农业科学院]

Wang R, Zhang T, Song Z, Zhang RH, Fu WD, Zhang GL, 2020. The effect of *Cenchrus spinifex* on nitrogen mineralization of Horqin sandy soil[J]. Ecology and Environment Sciences, 29(4): 709−716 (in Chinese) [王然, 张婷, 宋振, 张瑞海, 付卫东, 张国良, 2020. 少花蒺藜草对科尔沁沙地土壤氮转化效应的研究[J]. 生态环境学报, 29(4): 709−716]

Wang RN, Wang Z, Liao WB, Wang T, Su YJ, 2026. *Mikania micrantha* invasion restructures rhizosphere nitrogen cycling through enzyme activation, microbial recruitment, and allelopathic regulation[J]. Microbiome, 14(1): 97

Wu DB, 2023. Study on biological mechanism of heteromorphic seed germination of *Cenchrus longispinus*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University (in Chinese) [吴德宝, 2023. 长刺蒺藜草异型种子萌发的生物学机制研究[D]. 合肥: 安徽农业大学]

Xiao R, 2024. Effect of different water-nitrogen conditions on the invasiveness of *Cenchrus spinifex*[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese) [肖荣, 2024. 不同水氮条件对少花蒺藜草入侵性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学]

Xiao XF, Liu JM, Hao G, Xu L, Zan Y, 2026. Effects of silicon and arbuscular mycorrhizal fungi on chlorophyll fluorescence parameters and kinetic characteristics of *Bletilla striata* under drought stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 54(1): 169−175 (in Chinese) [肖雪峰, 刘济明, 郝刚, 徐璐, 咎悦, 2026. 硅与丛枝菌根真菌对干旱胁迫下白及叶绿素荧光参数及动力学特征的影响[J]. 江苏农业科学, 54(1): 169−175]

Xing A, 2025. Effects and mechanisms of arbuscular mycorrhizal fungi on the competitiveness of four invasive alien plants under different soil resource conditions[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese) [邢傲, 2025. 不同土壤资源条件下丛枝菌根真菌对四种外来入侵植物竞争能力的影响及机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学]

Xu J, 2011. The distribution and biological characteristics of alien invasive plant *Cenchrus pauciflorus*[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University (in Chinese) [徐军, 2011. 外来入侵植物: 少花蒺藜草的分布与生物学特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学]

Xu LY, 2024. Transcriptome-based identification of regulatory genes involved in the bur maturation in *Cenchrus pauciflorus* Benth[D]. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University (in Chinese) [徐礼莹, 2024. 基于转录组学的少花蒺藜草刺苞成熟发育相关调控基因发掘[D]. 通辽: 内蒙古民族大学]

Xu MH, Jia W, Bao JL, Zhou LY, Gao K, Sun ZL, 2025. Effects of the invasion of *Cenchrus pauciflorus* on the growth characteristics of native forage grasses in Tongliao, Inner Mongolia[J]. Pratacultural Science, 42(10): 2414−2422 (in Chinese) [许明贺, 佳文, 包金连, 周立业, 高凯, 孙忠林, 2025. 少花蒺藜草对内蒙古通辽地区乡土牧草的生长特性影响[J]. 草业科学, 42(10): 2414−2422]

Xu XY, Li YY, Guo LZ, Bao H, Lin KJ, Ji Y, Wang R, Hao LF, 2025. Transcriptomic dynamics associated with the seed germination process of the invasive weed *Cenchrus longispinus*[J]. Agronomy, 15(12): 2789

Yan M, Han SL, Bao JL, Zhou LY, 2022. Effects of saline-alkali stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Cenchrus incertus*[J]. Grassland and Turf, 42(4): 9−16 (in Chinese) [闫蒙, 韩肃磊, 包金连, 周立业, 2022. 盐碱胁迫对少花蒺藜草种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 草原与草坪, 42(4): 9−16]

Yan XH, Zeng JJ, Zhou B, Wang N, Yue DM, 2019. Effects of drought stress on germination and seedling growth of heteromorphic achenes of *Bidens alba*[J]. Chinese Journal of Ecology, 38(11): 3327−3334 (in Chinese) [闫小红, 曾建军, 周兵, 王宁, 岳冬梅, 2019. 干旱胁迫对白花鬼针草异型瘦果萌发与幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 38(11): 3327−3334]

Yan YF, 2016. Studies on allelopathic effects of *Cenchrus pauciflorus* on oats[D]. Shenyang: Liaoning University (in Chinese) [闫艳芳, 2016. 疏花蒺藜草浸提液对燕麦化感作用的研究[D]. 沈阳: 辽宁大学]

Yu JX, 2023. The impact of invasion of *Cenchrus spinifex* Cav. on key microbial communities for soil nitrogen transformation and their response to nitrogen addition[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University (in Chinese) [于建新, 2023. 少花蒺藜草入侵对土壤氮转化关键微生物群落的影响及其对氮添加的响应[D]. 沈阳: 沈阳农业大学]

Žerdoner Čalasan A, Kadereit G, 2023. Evolutionary seed ecology of heteromorphic Amaranthaceae[J]. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 61: 125759

Zhang J, Xiong M, Sun ZL, Su H, Zhou LY, 2024. Effects of nitrogen addition on vegetative growth and utilization efficiency of N, P and K in invasive plant *Cenchrus pauciflorus* Benth[J]. Ecological Science, 43(6): 53−59 (in Chinese) [张佳, 熊梅, 孙忠林, 苏慧, 周立业, 2024. 氮添加对入侵植物少花蒺藜草营养生长及对N、P、K利用效率的影响[J]. 生态科学, 43(6): 53−59]

Zhang Q, 2023. The drought adaptation strategies of invasive plant *Cenchrus pauciflorus*[D]. Tongliao: Inner Mongolia Minzu University (in Chinese) [张琦, 2023. 入侵植物少花蒺藜草的干旱适应策略研究[D]. 通辽: 内蒙古民族大学]

Zhang Q, Tian X, Ma WJ, Niu Z, Yang WG, Wu CZ, Pan ZJ, Lü GC, 2023. Adaptive countermeasures of invasive plant *Cenchrus longispinus* to different degrees of drought stress[J]. Plant Quarantine, 37(1): 27−32 (in Chinese) [张琦, 田迅, 马文静, 牛震, 杨伟光, 吴充政, 潘志杰, 吕广超, 2023. 入侵植物长刺蒺藜草对不同程度干旱胁迫的适应对策[J]. 植物检疫, 37(1): 27−32]

Zhang T, 2017. Effects of *Cenchrus spinifex* invasion on the soil nitrogen transform characteristics[D]. Beijing: Chinese Academy of

Agricultural Sciences (in Chinese) [张婷, 2017. 外来入侵植物少花蒺藜草对土壤氮转化特征的影响[D]. 北京: 中国农业科学院]

Zhang Y, Leng HN, Cao HJ, Xu MY, 2022. Study on the influence of drought stress on botany[J]. Heilongjiang Science, 13(14): 22−24, 47 (in Chinese) [张玉, 冷海楠, 曹宏杰, 徐明怡, 2022. 干旱胁迫对植物的影响研究[J]. 黑龙江科学, 13(14): 22−24, 47]

Zhang YL, 2015. Study on genetic diversity, seed germination and reproduction of *Cenchrus pauciflorus* Benth[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences (in Chinese) [张衍雷, 2015. 少花蒺藜草遗传多样性及萌发、繁殖特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院]

Zhang ZX, Tian X, Bai YG, Liu HF, Niu XL, Wang ZW, Wang Q, 2016. Field sandbur (*Cenchrus pauciflorus*) seeds in the same bur respond differently to temperature and water potential in relation to germination in a semi-arid environment, China[J]. PLoS ONE, 11(12): e0168394

Zhang ZX, Tian X, Sun L, 2017. Germination behaviour of *Cenchrus pauciflorus* seeds across a range of salinities[J]. Weed Research, 57(2): 91−100

Zhang ZX, Zhang K, Tian X, 2012. Characteristics of biological components of *Cenchrus pauciflorus* under wet and dry habitats[J]. Pratacultural Science, 29(12): 1899−1902 (in Chinese) [张志新, 章恺, 田迅, 2012. 干旱与灌溉生境下少花蒺藜草生物构件的特征[J]. 草业科学, 29(12): 1899−1902]

Zhao XW, Yuan XM, Xing YJ, Dao JC, Zhao DQ, Li YZ, Li WW, Wang ZT, 2023. A meta-analysis on morphological, physiological and biochemical responses of plants with PGPR inoculation under drought stress[J]. Plant, Cell & Environment, 46(1): 199−214

Zhao XY, Luo YY, Liu RX, Guo ZB, Wang HS, Zhang TL, 2025. Effects of cutting intensity on the growth characteristics of *Cenchrus pauciflorus* in Horqin Sandy Land[J]. Grassland and Turf, 45(6): 65−72 (in Chinese) [赵鑫宇, 罗亚勇, 刘瑞香, 郭占斌, 王鹤松, 张铁雷, 2025. 刈割强度对科尔沁沙地少花蒺藜草生长特性的影响[J]. 草原与草坪, 45(6): 65−72]

Zhou QL, Wang ZW, Qi FL, Yang DZ, Men HY, Sun B, Qi N, Cui X, Wang YC, 2021. Biological and ecological characteristics of *Cenchrus pauciflorus* and the integrated control strategies[J]. Chinese Journal of Ecology, 40(8): 2593−2600 (in Chinese) [周全来, 王正文, 齐凤林, 杨达志, 门红艳, 孙彪, 齐楠, 崔雪, 王永翠, 2021. 少花蒺藜草生物生态学特征与综合防除策略[J]. 生态学杂志, 40(8): 2593−2600]

Zhou LY, Tian X, Cui BM, Hussain A, 2021. Physiological and biochemical responses of invasive species *Cenchrus pauciflorus* Benth to drought stress[J]. Sustainability, 13(11): 5976

Zhou LY, Wang LP, Liu TY, 2013. Population dynamics of *Cenchrus pauciflorus* and community diversity of artificial sand-fixation forest community in Horchin[J]. Acta Agrestia Sinica, 21(1): 87−91 (in Chinese) [周立业, 汪丽萍, 刘庭玉, 2013. 科尔沁沙地人工固沙林群落中少花蒺藜草种群动态及群落多样性研究[J]. 草地学报, 21(1): 87−91]

（责任编辑：李美娟）