

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2024.04.004

6种牧草对恶性入侵植物黄花刺茄的替代控制效果

袁至立, 张国良, 张岳, 王忠辉, 宋振, 孙承宇, 付卫东*

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081

摘要:【目的】基于自然解决方案筛选有经济价值、生态价值、广适应性的替代植物及其组合,为遏制我国北方农牧交错区的恶性外来入侵杂草黄花刺茄的蔓延危害提供绿色防控技术。【方法】使用两因素多区组非对称性取代试验方法,通过异质性土壤盆栽试验筛选目标替代植物,分别测定黄花刺茄单种、与替代植物两两混种的叶绿素值,地上、地下以及单株生物量,通过竞争效应定量分析,筛选表现优异的替代植物,再进行小区试验筛选验证。【结果】褐土(S1、S2)处理组替代效果好的牧草为羊草、扁穗冰草、苇状羊茅,但其在S1及S2处理组中表现不同,S1处理组中其对黄花刺茄生物量抑制率依次为92.90%、92.31%以及92.31%,S2处理组中其对黄花刺茄生物量抑制率依次为56.7%、78.4%、54.9%;栗褐土(S3)处理组替代效果好的植物为紫花苜蓿、羊草、扁穗冰草、苇状羊茅,对黄花刺茄生物量抑制率依次为94.20%、91.95%、87.35%、86.21%;栗钙土(S4、S5)处理组替代效果综合表现最好的牧草为苇状羊茅,对黄花刺茄生物量抑制率为97.26%~85.19%,此外扁穗冰草在S4处理组中对黄花刺茄生物量抑制率达88.41%,紫花苜蓿在S5处理组中对黄花刺茄生物量抑制率达88.89%;黑钙土(S6)处理组替代效果好的牧草为紫花苜蓿,对黄花刺茄生物量抑制率为94.20%;新积土(S7)处理组替代效果好的牧草为羊草、苇状羊茅,对黄花刺茄生物量抑制率依次为94.57%、85.27%。小区试验结果表明:紫花苜蓿+羊草处理组合、紫花苜蓿+羊草+苇状羊茅处理组合,对黄花刺茄竞争抑制效果最好,相比于对照组(单种黄花刺茄)降低其单位面积生物量百分比分别为91.78%、91.2%。【结论】不同土壤处理组中,替代效果综合表现较好的是紫花苜蓿、苇状羊茅、羊草。在有机质含量较高的土壤处理组中,苇状羊茅、羊草对黄花刺茄表现出较好的竞争抑制效应;有机质较低的土壤处理组中,紫花苜蓿对黄花刺茄的抑制效果较好。紫花苜蓿+羊草、紫花苜蓿+羊草+苇状羊茅两种组合对吉林省白城市科尔沁草原上黄花刺茄抑制效果好、低成本、效益高、适应性强,可广泛应用于黄花刺茄发生区域的生态治理。

关键词: 黄花刺茄; 替代控制; 生态防治; 植物竞争; 牧草



开放科学标识码
(OSID 码)

Assessment of the replacement control effects of six forage species on the malignant invasive plant *Solanum rostratum*

YUAN Zhili, ZHANG Guoliang, ZHANG Yue, WANG Zhonghui, SONG Zhen, SUN Chengyu, FU Weidong*

Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of
Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

Abstract:【Aim】Relying on nature-based solutions, screen replacement control plants and their combinations of ecological, economic, and wide-ranging adaptability offer technical measures for controlling the spread of the malignant alien weed *Solanum rostratum*, which is invading the interlacing region of grazing and agriculture in northern China.【Method】This work employed pot experiments with varied soils in several locales to screen the target replacement control plant using a two-factor multi-block asymmetric substitution experiment. After *S. rostratum* was planted alone or in combination with pastures, the chlorophyll value, aboveground and belowground biomasses, and individual plant biomass of *S. rostratum* were measured to identify the best replacement control plant, which was then confirmed by field plot experiments.【Result】In the cinnamon soils (S1, S2) treatment group, the best replacement control plants are *Leymus chinensis*, *Agropyron cristatum*, and *Festuca arundinacea*; however, their performances were different between the S1 and S2 treatment groups; the biomass inhibition rates of *S. rostratum* were 92.90%, 92.31%, and 92.31% in the S1 treatment and 56.7%, 78.4%, and 54.9% in the S2 treatment. The best replacement control plants for the castano-cinna-

收稿日期(Received): 2024-03-12 接受日期(Accepted): 2024-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1400300)

作者简介: 袁至立, 女, 硕士研究生。研究方向: 外来入侵植物防控。E-mail: yuanzhili1998@163.com

* 通信作者(Author for correspondence), 付卫东, E-mail: fuweidong@caas.cn

mon soil (S3) treatment group were *Medicago sativa*, *L. chinensis*, *A. cristatum*, and *F. arundinacea*, with a *S. rostratum*'s biomass reduction percentage of 94.20%, 91.95%, 87.35%, and 86.21%, respectively. The best replacement control plant in the treatment of castanozems (S4, S5) was *F. arundinacea*, which reduced the biomass of *S. rostratum* by 97.26% to 85.19%. The inhibition rates of *S. rostratum* by *A. cristatum* were 88.41% in the S4 treatment, and that of *M. sativa* was 88.89% in S5. In the chernozems (S6) treatment group, the best replacement control plant was *M. sativa*, with an *S. rostratum* biomass reduction percentage of 97.26%. In the alluvial soil treatment group (S7), the best replacement control was *L. chinensis*. And *A. cristatum* with *S. rostratum* biomass reduction percentages of 94.57% and 85.27% respectively. The results of the plot experiment showed that *M. sativa*+*L. chinensis*, *M. sativa*+*L. chinensis*, and *F. arundinacea* had the best inhibitory effects on *S. rostratum*, with *S. rostratum* reducing percentages of 91.78% and 91.2%, respectively, compared to the control group (*S. rostratum* planted alone). 【Conclusion】 Among different soil treatment groups, *M. sativa*, *F. arundinacea*, and *L. chinensis* had the best comprehensive replacement effect. In treatments with higher organic matter contents, *F. arundinacea* and *L. chinensis* showed better competitive inhibition of *S. rostratum*. *M. sativa* had a stronger inhibitory effect on *S. rostratum* in the soil treatment group with lower organic matter, *M. sativa* had a better inhibitory effect on *S. rostratum*. The combination of *M. sativa* and *L. chinensis* and the combination of *M. sativa*, *L. chinensis*, and *F. arundinacea* had the best effect on controlling *S. rostratum* in the Horqin Steppe of Baicheng City, Jilin Province. These combinations are inexpensive and long-term planting can be used to rebuild the ecological environment and obtain economic benefits.

Key words: *Solanum rostratum*; replacement control; ecological control; plant competition; pasture species.

黄花刺茄 *Solanum rostratum* Dunal. 是一种入侵性极强的外来入侵植物。我国于 1981 年在辽宁省朝阳市首次发现, 该植物扩散迅速, 至今发现并报道其发生的地区有新疆、内蒙古、宁夏、河北、山西、辽宁以及吉林 (林玉和谭敦炎, 2007; 王瑞等, 2018; 周全来等, 2023)。黄花刺茄生长于河滩、草原、荒地、弃耕地、过度放牧的草场等生境, 对土壤养分条件要求低, 能适应多变气候和异质性生境。该植物在国内北方发生区域广泛, 其入侵能降低作物产量和生物多样性, 严重威胁当地的生态环境、农业生产、草原畜牧业、生物多样性和人类健康 (Zhang *et al.*, 2023)。

植物替代控制技术是一种生态防治方法, 选取有经济价值或有生态价值的土著植物通过种间竞争效应和群落演替规律, 控制入侵植物的扩张和蔓延, 达到抑制入侵植物的目的 (Levine *et al.*, 2004)。该方法具有生态安全、可持续、成本低廉等优势 (Gosper, 2009)。替代植物的选择综合考虑了植物的生态位、功能、生长特性、竞争能力、生物学特性以及对当地生态系统的影响等因素, 从而使植物替代过程更加高效 (张震等, 2018; Van Wilgen *et al.*, 2012; Vilà & Weiner, 2004)。研究表明, 减少牧场或自然栖息地植物入侵的最可行方法是保留本地的自然种群或种植非入侵性的牧草, 形成多样化的植物群落 (Al-Kahtani *et al.*, 2017)。黄花刺茄生态适应性强、繁殖力强, 传统的控制方法无法长期有效地控制其危害。因此, 可使用有经济价值且竞争

能力强的牧草控制在农牧交错区多发的黄花刺茄。

土壤是异质性生境的重要组成部分, 承载着多种生物群落的生长与发展, 影响着水分循环、养分转化等关键生态过程。入侵植物的防治效果依赖于环境 (Pile *et al.*, 2023), 植物可能在不同生境中发生表型变异 (陈天翌等, 2013)。而替代控制植物在不同生境中适应能力不同, 目前, 植物替代控制技术应用受限于替代植物对环境异质性的广适性较差, 缺陷主要在于选择替代植物时较少考虑不同土壤环境的影响, 而入侵植物分布广泛, 因此前期筛选替代植物时间长, 替代控制见效慢, 应用推广受限。通过研究入侵植物与替代控制植物在不同土壤类型下的适应性和竞争力, 可以筛选出广适性的替代控制植物, 从而进行推广应用, 促进生态系统的高效恢复和稳定。

非对称性竞争是指处于竞争状态的植物间不均分配资源, 较大的个体获得了不成比例的资源份额 (相对于它们的相对大小), 并抑制了较小个体的生长。例如 2 株植物生物量比例为 1 : 3, 但资源分配可能是 1 : 4 或 1 : 5, 导致较大个体对资源的利用效率更高, 生长速率更快, 生物量更大, 进而在生态系统中占据更多的空间和资源 (陈仁飞等, 2015; Freckleton & Watkinson, 2001; Weiner, 1990)。探究入侵植物与替代植物非对称性竞争对不同土壤类型的适应性和被影响程度, 有助于获得高效抑制入侵植物生长的方法。目前, 替代控制技术选用替代植物更注重植物本身对于入侵植物的

竞争效应影响,较少关注替代控制群体对于竞争结果的影响。本研究在替代控制技术中使用非对称性竞争,保持植株密度相同,通过提高替代控制植物比例,使入侵植物由于资源的不均衡而被根除。

目前,关于黄花刺茄替代控制研究主要集中在替代植物个体对入侵植物的影响,且忽略了异质性土壤环境的影响。因此,本研究在不同土壤类型中通过对黄花刺茄与替代控制植物进行非对称性竞争盆栽试验,筛选出不同类型土壤中对抑制黄花刺茄表现优异的替代控制植物;然后通过小区试验获得广适性、高效益、低成本、抑制黄花刺茄优异的替代植物组合,为生态阻截黄花刺茄扩散危害提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 盆栽试验

1.1.1 试验材料 土壤样本分别采集于吉林省白城市(黑钙土 S6)、新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市(栗钙土 S4)、内蒙古自治区通辽市(栗褐土 S3)、宁夏回族自治区石嘴山市(新积土 S7)、辽宁省北票市(褐土 S2)、河北省张家口市(褐土 S1)以及山西省大同市(栗钙土 S5),采集点土壤未有黄花刺茄发生(扫描本文 OSID 码,查看土壤采集点位信息)。设置营养土作为该变量的试验对照。

试验替代植物选取多年生豆科植物紫花苜蓿 *Medicago sativa* L.、沙打旺 *Astragalus adsurgens* Pall. 以及多年生禾本科牧草扁穗冰草 *Agropyron cristatum* (L.) Gaertn.、羊草 *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.、苇状羊茅 *Festuca arundinacea* Schreb.、披碱草 *Elymus dahuricus* Turcz.。黄花刺茄种子在 2022 年 9 月采集于河北张家口万全县洋河河滩,紫花苜蓿种子(商品名称:超人,北方高产型)在 2022 年 8 月购于北京金种子;其余牧草种子(商品名同种子名称)同期购于宁夏斗百草植物开发有限公司。试验用花盆高 20 cm,直径 25 cm。

1.1.2 种植区组设计 盆栽试验采取两因素完全随机区组试验设计,每类土壤分别单种 7 种植物(黄花刺茄、紫花苜蓿、沙打旺、扁穗冰草、羊草、披碱草、苇状羊茅)作为对照组,黄花刺茄分别与 6 种牧草按 1:3 比例混种作为处理组,设 3 次重复,共 264 盆(13 种植物方式×3 个重复×8 种土壤类型)。

1.1.3 种植处理方式 用 $0.083 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的赤霉素

处理黄花刺茄种子 24 h 后,于 2022 年 7 月末,在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所温室进行种植。混种植物比例设置为黄花刺茄:替代植物(1:3),单种的植株总数与混种相同。在出苗后期,通过拔除多余植株,保持盆内植物总数为 24 株。植物生长期间不额外施用肥料,定期定量浇水,并及时拔除盆中杂草。2022 年 11 月中旬黄花刺茄果实成熟后,测定盆栽试验数据。

1.1.4 数据测定 黄花刺茄叶绿素含量测定方法:每个植株上选择 2 片新鲜叶片,用毛笔或毛刷清除叶片表面的灰尘,用叶绿素仪(SPAD-502PLUS)测定叶片叶绿素含量。

生物量测定:收获需测定的植株的地上部分和地下部分(地下部分用自来水充分冲洗干净),放入事先写好编号的信封袋中,于 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱内烘干至恒重,称重并记录数据。

1.2 小区试验

1.2.1 试验地 小区试验地位于吉林省白城市洮北区平台镇与内蒙古交界的科尔沁草原黄花刺茄典型发生区域($45^{\circ}34'12'' \text{ N}$, $122^{\circ}51'0'' \text{ E}$),属温带大陆性季风气候,有明显的四季更替,春季干燥风大。年平均温度 $5.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,其中最冷月平均温度 $-16.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最热月平均温度 $23.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年平均降水量 398.5 mm ,其中作物生长季 4—9 月降水量为 372.0 mm 。试验所用牧草种子来源与盆栽试验相同。

1.2.2 小区设计及播种量 选用盆栽试验优势替代植物羊草、扁穗冰草、苇状羊茅、紫花苜蓿与黄花刺茄混种。小区设置以上单种牧草与黄花刺茄混种、2 种牧草与黄花刺茄混种、3 种牧草与黄花刺茄混种。小区试验共设置 20 个不同替代植物组合,每个处理 3 次重复,单独播种黄花刺茄的处理组(T1)作为对照组,不进行任何处理的小区作为空白对照组(T2)。

本研究设计替代牧草出苗量为试验区黄花刺茄土壤种子库单位面积储量的 3 倍,以此作为替代植物播种量的标准。为保证小区试验中黄花刺茄:替代控制牧草比例为 1:3,根据牧草预试验的发芽率、黄花刺茄的种子库储量(张瑞海等,2019)确定牧草播种量。试验选用的替代方案及播种量见表 1。

表 1 小区试验播种量
Table 1 Experimental seed sown in plots

单位 Unit: g

处理 Treatments	黄花刺茄 <i>S. rostratum</i>	羊草 <i>L. chinensis</i>	扁穗冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	苇状羊茅 <i>F. arundinacea</i>	紫花苜蓿 <i>M. sativa</i>
T1	9	-	-	-	-
T2	-	-	-	-	-
T3	9	-	554	-	-
T4	9	-	-	900	-
T5	9	711	-	-	-
T6	9	-	-	-	135.0
T7	9	-	277	450	-
T8	9	356	-	450	-
T9	9	-	-	450	67.5
T10	9	356	277	-	-
T11	9	-	277	-	67.5
T12	9	356	-	-	67.5
T13	9	237	185	300	-
T14	9	-	185	300	45.0
T15	9	237	-	300	45.0
T16	9	237	185	-	45.0
T17	-	-	-	-	180.0
T18	-	-	739	-	-
T19	-	947	-	-	-
T20	-	-	-	1200	-

1.2.3 种植方式及处理 小区试验播前深耕翻地, 翻地深度 20~25 cm。将试验地划分为 60 个小区, 每个小区宽 6 m、长 10 m, 每小区保护行间隔 1 m。2023 年 6 月末播种, 同年 10 月收割, 期间不进行任何管理, 保持植物自然生长。

1.2.4 生物量测定 2023 年 10 月收割白城基地的牧草及黄花刺茄。使用 1 m 的样方框在每个小区随机选择 3 个 1 m² 的样方, 收获黄花刺茄及牧草地上部分(具经济价值), 称鲜重后装进事先准备好的信封中, 带回实验室于 60 ℃ 的烘箱内烘干至恒重, 称重并记录数据。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2023 软件对相关数据进行整理并制图, 利用 SPSS 27.0 软件进行对盆栽试验或小区试验中不同种植方式导致的黄花刺茄叶绿素差异、地上部分与地下部分、单株生物量以及相对产量差异进行单因素方差分析 ($P < 0.05$)。用单样本 T 检验分析黄花刺茄与牧草的相对产量 (relative yield, RY) 与指定值 1 的差异。

入侵植物的叶绿素值与生物量降低的百分比计算方式为:

植物叶绿素值降低百分比/% = (对照组叶绿素值 - 处理组叶绿素值) / 对照组叶绿素值 × 100

植物生物量降低百分比/% = (对照组单株生物

量 - 处理组单株生物量) / 对照组单株生物量 × 100

相对产量 (RY) 的计算公式为:

$$RY_a = Y_{ab} / Y_a$$

$$RY_b = Y_{ba} / Y_b$$

式中, RY_a 为物种 a 的相对产量; RY_b 为物种 b 的相对产量; Y_{ab} 为混种时 a 的单株平均生物量; Y_{ba} 为混种时 b 的单株平均生物量; Y_a 为单种 a 的单株平均生物量; Y_b 为单种 b 的单株平均生物量。

若 $RY_a > 1.0$, 表明物种 a 的种内竞争大于种间竞争, 混种促进了其生长; 若 $RY_a < 1.0$, 表明物种 a 的种内竞争小于种间竞争, 混种阻碍了其生长; 若 $RY_a = 1.0$, 则种内竞争和种间竞争相等, 混种对其生长无影响。 RY_b 同理。

2 结果分析

2.1 盆栽试验结果

2.1.1 不同土壤处理组黄花刺茄单种与替代植物混种叶绿素值结果分析 根据不同土壤处理组中黄花刺茄单种与替代植物混种叶绿素值结果 (表 2), 黄花刺茄单种的叶绿素值均高于所有替代植物处理组。多重比较结果表明, 黄花刺茄与苇状羊茅、羊草 2 种禾本科牧草混种的叶绿素值与黄花刺茄单种叶绿素值均差异显著 ($P < 0.05$), 其叶绿素值降低幅度在 20.91% ~ 65.25%。此外, 在营养土处

理组、褐土(S2)以及栗褐土(S3)处理组,所有处理组叶绿素值都与单种黄花刺茄叶绿素值差异显著($P<0.05$)。

在褐土(S1)处理组,苇状羊茅以及羊草处理组的黄花刺茄叶绿素值与对照组(单种黄花刺茄)叶绿素值相比降低幅度较大,黄花刺茄叶绿素值降低百分比依次为 56.86%、44.87%;在褐土(S2)处理组,黄花刺茄叶绿素值降低最大的处理组是紫花苜蓿处理组,降低百分比为 58.87%,其次是沙打旺、苇状羊茅、羊草、扁穗冰草,降低百分比依次为 43.98%、42.89%、37.93%、36.69%;在栗褐土(S3)处理组,黄花刺茄叶绿素值降低最大的处理组是紫花苜蓿处理组,降低百分比为 84.83%,其次是沙打旺、羊草、苇状羊茅、披碱草处理组,降低百分比依

次为 69.70%、65.26%、52.69%、48.5%、37.25%;在栗钙土(S4)处理组,扁穗冰草以及苇状羊茅处理组黄花刺茄叶绿素值降低幅度最大,降低百分比均为 49.60%;在栗钙土(S5)处理组,黄花刺茄叶绿素值降低最大的处理组是苇状羊茅处理组,降低百分比为 43.91%,其次是羊草处理组,降低百分比为 40.82%;在黑钙土(S6)处理组,苇状羊茅处理组黄花刺茄叶绿素值降低幅度最大,降低百分比为 33.30%,其次是羊草,降低百分比为 31.12%;在新积土(S7)处理组,除披碱草处理组外,其他组黄花刺茄叶绿素值均与单种组有显著性差异($P<0.05$),黄花刺茄叶绿素值降低幅度较大的处理组为羊草、苇状羊茅组,黄花刺茄叶绿素值降低百分比依次为 54.32%、42.81%。

表 2 不同土壤处理组中黄花刺茄单种与以及替代植物混种的叶绿素值

Table 2 The chlorophyll values of *S. rostratum* planted alone and mixed with replacement control plants in different soil treatments

土壤类型 Soil type	S (4)	S : M (1 : 3)	S : As (1 : 3)	S : E (1 : 3)	S : L (1 : 3)	S : F (1 : 3)	S : Ag (1 : 3)
营养土 Nutritive soil	32.46±0.64a	23.69±2.31cd	30.42±2.31ab	24.51±1.02cd	19.87±4.12d	25.13±5.29bed	25.67±3.38bc
褐土(S1) Cinnamon soils	29.77±3.31a	24.39±28.83ab	21.31±5.15bc	22.79±1.89abc	16.41±1.16cd	12.84±4.91d	19.44±5.93bed
褐土(S2) Cinnamon soils	22.13±1.30a	9.10±3.11d	12.39±5.49cd	18.53±1.27cd	13.73±2.76bed	12.64±1.08d	14.01±3.11bc
栗褐土(S3) Castano-cinnamon soils	27.83±3.62a	4.22±0.59d	8.43±6.07cd	17.47±2.65b	9.67±0.86cd	13.17±4.37bc	14.33±6.62bc
栗钙土(S4) Castanozems	27.12±5.94a	17.70±4.25ab	16.63±0.51ab	19.15±8.79ab	13.87±8.83c	13.67±2.63c	13.67±1.56c
栗钙土(S5) Castanozems	23.31±1.68a	20.10±1.84ab	21.09±1.64ab	17.87±0.84b	13.80±3.36c	13.08±2.87c	18.75±2.19b
黑钙土(S6) Chernozems	28.24±2.88a	23.10±6.23c	23.10±2.82abc	27.15±0.18ab	19.45±1.03c	18.84±0.62c	22.46±2.38bc
新积土(S7) Alluvial soils	31.74±8.05a	26.64±2.70b	27.17±5.52b	24.80±3.16ab	14.50±2.23b	18.15±0.79b	19.05±4.32b

S: 黄花刺茄; M: 紫花苜蓿; As: 沙打旺; E: 披碱草; L: 羊草; F: 苇状羊茅; Ag: 扁穗冰草。处理栏中字母后的数字表示各物种比例, 同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

S: *S. rostratum*; M: *M. sativa*; As: *Astragalus adsurgens*; E: *E. dahuricus*; L: *L. chinensis*; F: *F. arundinacea*; Ag: *Agropyron cristatum*. The numbers following letters in the treatment column indicate the proportions of each species. Different lowercase letters in the same row denote significant differences ($P<0.05$).

2.1.2 不同土壤处理组黄花刺茄单种与替代植物混种干重、鲜重差异性分析 不同土壤处理组中黄花刺茄单种以及与替代植物混种其地上部生物量、地下部生物量以及单株生物量结果(表 3)表明,黄花刺茄单种时,其单株生物量可达到较高水平,当黄花刺茄与替代植物混种时,黄花刺茄植株生物量有所降低,扁穗冰草处理组在各类土壤处理组中对黄花刺茄地上生物量以及单株生物量均影响显著($P<0.05$)。

褐土(S1)处理组,黄花刺茄与牧草混种的地上部以及地下部生物量均显著低于对照组(黄花刺茄单种)生物量,羊草、扁穗冰草、苇状羊茅处理组对黄花刺茄地上部分和地下部分生物量及单株生物

量抑制较为显著,其单株生物量相比对照组(黄花刺茄单种)依次降低 92.90%、92.31%、92.31%。

褐土(S2)处理组,各种替代牧草对于黄花刺茄的生物量均有一定的抑制效果,但与其他土壤处理组相比抑制效果较差,所有替代控制植物对黄花刺茄单株生物量抑制率均未超过 85%,其中效果较好的替代控制植物为扁穗冰草、羊草、苇状羊茅、紫花苜蓿,其单株生物量相比对照组(黄花刺茄单种)依次降低 78.4%、56.9%、54.9%。

栗褐土(S3)处理组,各牧草处理组均对黄花刺茄的地上部生物量有影响,紫花苜蓿及羊草处理组对黄花刺茄地上部分和地下部分生物量及单株生物量降低效果最好,扁穗冰草、苇状羊茅次之,黄花

刺茄生物量相比对照组(黄花刺茄单种)生物量降低百分比依次为 94.25%、91.95%、87.35%、86.21%。

栗钙土(S4)处理组,各处理组都对黄花刺茄的地下部生物量有影响,对黄花刺茄地上部分和地下部分生物量及单株生物量降低影响最大的是苇状羊茅与扁穗冰草,黄花刺茄生物量相比对照组(黄花刺茄单种)生物量降低百分比 97.26%、88.41%。

栗钙土(S5)处理组,紫花苜蓿以及苇状羊茅对黄花刺茄地上部分和地下部分生物量及单株生物量抑制效果显著,黄花刺茄生物量相比对照组(黄花刺茄单种)降低百分比依次为 88.89%、85.19%。

黑钙土(S6)处理组,各牧草处理组均对黄花刺茄的地下部生物量有影响,紫花苜蓿对黄花刺茄地上部分和地下部分生物量及单株生物量降低效果显著,黄花刺茄混种生物量相比对照组(黄花刺茄单种)降低了 94.20%。

新积土(S7)处理组中,各处理组都对黄花刺茄的地上部生物量有影响,对黄花刺茄地上部分和地下部分生物量及单株生物量降低影响最大的是羊草,降低黄花刺茄单株生物量可达 94.57%。

根据以上分析结果,结合采集点位土壤的理化性质进行综合分析,发现优势竞争替代植物与土壤有机质含量相关。各土壤处理组中有机质含量从高到低依次为栗钙土(S4)处理组、褐土(S1)处理组、新积土(S7)处理组、黑钙土(S6)处理组、栗钙土(S5)处理组、栗褐土(S3)处理组、褐土(S2)处理组,在含量最高的前2个处理组中,苇状羊茅、扁穗冰草、羊草3种禾本科植物对黄花刺茄的抑制效果明显,在其余有机质含量较低的处理组中,豆科植

物紫花苜蓿对黄花刺茄的抑制效果明显。

2.1.3 不同土壤处理组中黄花刺茄与替代控制植物的相对产量分析 植物的相对产量小于1.0,表明在植物竞争的环境中,该种植物的生长产量低于其他参与竞争的植物(Wahua & Miller, 1978),说明该植物受到了竞争的影响,无法充分发挥其生长潜力,或者在与其他植物争夺资源(如阳光、水分、养分等)时处于劣势地位。根据不同土壤处理组中黄花刺茄与替代控制植物的相对产量结果(表4),褐土(S1)处理组中,黄花刺茄在扁穗冰草、羊草、苇状羊茅以及紫花苜蓿处理组中相对产量极显著(小于1.0),表明其在与这些牧草混种时资源竞争能力受到抑制影响。此外,褐土(S1)处理组中,紫花苜蓿、披碱草、苇状羊茅相对产量与1.0相比不显著,说明其受到种间竞争作用的影响不大,因此,S1处理组适宜选用的牧草是紫花苜蓿与苇状羊茅。在其他土壤处理组中,黄花刺茄的相对产量均小于1.0,说明选用的牧草均对其产生了抑制作用。褐土(S2)以及栗钙土(S4)处理组中,所有的替代控制牧草相对产量均大于1.0,表明各类牧草在该土壤处理组中均适宜作为黄花刺茄的替代控制植物。栗褐土(S3)、栗钙土(S5)、黑钙土(S6)处理组中,替代控制牧草相对产量均显著大于1.0或与1.0相近,与S4处理组试验结果相近,表明牧草在该土壤中同样适宜生存,受到黄花刺茄的影响小,主要受到种内竞争的影响。在新积土(S7)处理组中,披碱草、羊草、苇状羊茅的相对产量显著大于1.0,表明其主要是存在种内竞争,与黄花刺茄的种间竞争作用对其影响程度较小。

表3 在不同土壤处理组中黄花刺茄单种以及与替代植物混种其地上部生物量、地下部生物量以及单株生物量
Table 3 The biomass of aboveground and belowground biomass, and individual plant biomass of *S. rostratum* planted alone and mixed with replacement control plants in different soil treatments

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	黄花刺茄地上部生物量 Aboveground biomass of <i>Solanum rostratum</i>	黄花刺茄地下部生物量 Underground biomass of <i>Solanum rostratum</i>	单株生物量 Plant biomass
营养土 Nutritive soil	S (4)	1.51±0.28ab	0.76±0.59a	2.27±0.47a
	S : M (1 : 3)	0.63±0.22ab	0.13±0.08a	0.77±0.30bc
	S : As (1 : 3)	0.94±0.15ab	0.44±0.02a	1.38±0.17abc
	S : E (1 : 3)	1.78±1.15a	0.26±0.25a	2.04±1.40ab
	S : L (1 : 3)	0.70±0.29ab	0.15±0.06a	0.84±0.33c
	S : F (1 : 3)	0.67±0.16ab	0.13±0.06a	0.80±0.22abc
	S : Ag (1 : 3)	0.46±0.15b	0.12±0.06a	0.59±0.20bc

单位 Unit: g

续表 3

土壤类型 Soil type	处理 Treatment	黄花刺茄地上部生物量 Aboveground biomass of <i>S. rostratum</i>	黄花刺茄地下部生物量 Underground biomass of <i>S. rostratum</i>	单株生物量 Plant biomass
褐土(S1) Cinnamon soils	S (4)	1.15±0.15a	0.54±0.11a	1.69±0.25a
	S : M (1 : 3)	0.24±0.02c	0.04±0.00c	0.27±0.02c
	S : As (1 : 3)	0.08±0.01d	0.01±0.01c	0.27±0.16c
	S : E (1 : 3)	0.46±0.04b	0.13±0.05b	0.59±0.03b
	S : L (1 : 3)	0.10±0.04d	0.02±0.00c	0.12±0.04c
	S : F (1 : 3)	0.12±0.03cd	0.01±0.01c	0.13±0.03c
	S : Ag (1 : 3)	0.11±0.02d	0.03±0.01c	0.13±0.02c
褐土(S2) Cinnamon soils	S (4)	0.42±0.14a	0.09±0.04a	0.51±0.16a
	S : M (1 : 3)	0.17±0.12ab	0.07±0.02a	0.23±0.10ab
	S : As (1 : 3)	0.21±0.13ab	0.08±0.05a	0.29±0.17ab
	S : E (1 : 3)	0.20±0.05ab	0.06±0.02a	0.25±0.06ab
	S : L (1 : 3)	0.13±0.11b	0.09±0.10a	0.22±0.15ab
	S : F (1 : 3)	0.16±0.11ab	0.07±0.05a	0.23±0.16ab
	S : Ag (1 : 3)	0.08±0.04b	0.02±0.01a	0.11±0.04b
栗褐土(S3) Castano-cinnamon soils	S (4)	0.76±0.21a	0.15±0.03a	0.87±0.25a
	S : M (1 : 3)	0.03±0.01b	0.02±0.01b	0.05±0.02b
	S : As (1 : 3)	0.15±0.01b	0.13±0.12ab	0.24±0.04b
	S : E (1 : 3)	0.13±0.12b	0.02±0.01b	0.17±0.12b
	S : L (1 : 3)	0.06±0.01b	0.02±0.00b	0.07±0.03b
	S : F (1 : 3)	0.08±0.06b	0.04±0.01ab	0.12±0.06b
	S : Ag (1 : 3)	0.08±0.05b	0.03±0.02ab	0.11±0.07b
栗钙土(S4) Castanozems	S (4)	2.13±0.82a	1.14±0.31a	3.28±1.04a
	S : M (1 : 3)	1.20±0.24abc	0.59±0.14b	1.79±0.10b
	S : As (1 : 3)	1.41±0.42ab	0.37±0.21bc	1.78±0.56b
	S : E (1 : 3)	0.44±0.25bcd	0.20±0.09c	0.64±0.33bc
	S : L (1 : 3)	0.79±0.70bcd	0.32±0.22bc	1.11±0.89bc
	S : F (1 : 3)	0.07±0.10d	0.02±0.02c	0.09±0.13c
	S : Ag (1 : 3)	0.26±0.26cd	0.12±0.14c	0.38±0.40c
栗钙土(S5) Castanozems	S (4)	0.49±0.09a	0.05±0.01a	0.54±0.08a
	S : M (1 : 3)	0.44±0.17a	0.01±0.00b	0.06±0.04c
	S : As (1 : 3)	0.11±0.08b	0.01±0.01ab	0.15±0.04bc
	S : E (1 : 3)	0.16±0.12b	0.07±0.05ab	0.13±0.02bcd
	S : L (1 : 3)	0.08±0.06b	0.02±0.01ab	0.13±0.03bcd
	S : F (1 : 3)	0.04±0.03b	0.01±0.01b	0.08±0.01cd
	S : Ag (1 : 3)	0.13±0.01b	0.06±0.02ab	0.19±0.03b
黑钙土(S6) Chernozems	S (4)	1.46±0.41a	0.61±0.22a	2.07±0.21a
	S : M (1 : 3)	0.09±0.04c	0.04±0.02b	0.12±0.06c
	S : As (1 : 3)	0.90±0.55ab	0.15±0.08b	1.05±0.63b
	S : E (1 : 3)	0.37±0.26bc	0.08±0.05b	0.45±0.32bc
	S : L (1 : 3)	0.45±0.16bc	0.18±0.09b	0.63±0.25bc
	S : F (1 : 3)	0.26±0.18bc	0.09±0.07b	0.35±0.25bc
	S : Ag (1 : 3)	0.55±0.33bc	0.13±0.09b	0.68±0.41bc
新积土(S7) Alluvial soils	S (4)	1.11±0.06a	0.18±0.04ab	1.29±0.08a
	S : M (1 : 3)	0.40±0.17c	0.05±0.02ab	0.45±0.19bc
	S : As (1 : 3)	0.77±0.28b	0.22±0.13a	0.99±0.24a
	S : E (1 : 3)	0.46±0.12c	0.16±0.14ab	0.62±0.24b
	S : L (1 : 3)	0.05±0.04d	0.02±0.02b	0.07±0.07d
	S : F (1 : 3)	0.17±0.14cd	0.02±0.02b	0.19±0.15cd
	S : Ag (1 : 3)	0.27±0.11cd	0.03±0.01b	0.30±0.11bcd

S: 黄花刺茄; M: 紫花苜蓿; As: 沙打旺; E: 披碱草; L: 羊草; F: 苇状羊茅; Ag: 扁穗冰草。处理栏中字母后的数字表示各物种比例, 每个土壤处理同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

S: *S. rostratum*; M: *M. sativa*; As: *Astragalus adsurgens*; E: *E. dahuricus*; L: *L. chinensis*; F: *F. arundinacea*; Ag: *Agropyron cristatum*. In the table, the numbers following letters in the processing column represent the proportions of each species. Different lowercase letters within the same column for each soil treatment indicate significant differences ($P < 0.05$).

表4 不同土壤处理组中黄花刺茄与替代控制植物的相对产量
Table 4 Relative yields of *S. rostratum* and replacement control plants in different soil treatments

处理 Treatment	营养土 Nutritive soil	褐土(S1) Cinnamon soils	褐土(S2) Cinnamon soils	栗褐土(S3) Castano-cinnamon soils	栗钙土(S4) Castanozems	栗钙土(S5) Castanozems	黑钙土(S6) Chernozems	新积土(S7) Alluvial soils	
S : M	S	0.35±0.16**	0.32±0.32**	0.50±0.28**	0.06±0.03**	0.62±0.26**	0.12±0.09**	0.06±0.03**	0.35±0.16**
	M	3.42±1.48**	1.76±1.02	4.62±0.28**	2.45±0.88**	6.70±1.94**	1.84±0.77*	2.02±0.56**	1.15±0.41
S : As	S	0.63±0.15**	0.68±0.72	0.63±0.44*	0.30±0.11**	0.62±0.34**	0.29±0.09**	0.51±0.33**	0.77±0.20*
	As	1.26±0.65	0.35±0.10**	1.70±0.78*	3.01±1.33**	2.56±1.03**	0.37±0.19**	2.32±0.92**	3.07±3.62
S : E	S	0.85±0.78	0.28±0.18**	0.38±0.26**	0.12±0.12**	0.27±0.22**	0.27±0.07**	0.20±0.15**	0.34±0.27**
	E	0.88±0.53	0.86±0.31	2.08±0.68**	2.58±1.91*	4.44±1.63**	3.50±2.57*	2.13±0.64**	1.34±0.40*
S : L	S	0.39±0.18**	0.18±0.19**	0.46±0.39**	0.08±0.04**	0.38±0.39**	0.25±0.06**	0.31±0.13**	0.05±0.06**
	L	7.40±2.29**	0.69±0.18**	3.67±2.21**	1.14±0.81	5.27±2.26**	2.12±1.25*	3.05±1.65**	3.19±1.27**
S : F	S	0.37±0.13**	0.20±0.19**	0.49±0.40**	0.15±0.10**	0.03±0.05**	0.16±0.04**	0.17±0.13**	0.15±0.13**
	F	5.90±2.99**	1.02±0.81	3.13±0.68**	0.44±0.08**	2.31±1.56*	2.79±1.32**	0.74±0.71	2.26±1.76
S : Ag	S	0.27±0.12**	0.12±0.17**	0.23±0.12**	0.13±0.10**	0.13±0.17**	0.35±0.08**	0.33±0.22**	0.23±0.10**
	Ag	9.54±1.97**	2.47±2.07	7.22±1.60**	2.65±0.50**	9.35±6.46**	2.78±2.88	2.77±1.55**	2.76±0.55**

用 T 测验检验各值与 1.0 的差异显著性, * 和 ** 表示 0.05 和 0.01 水平显著; S: 黄花刺茄; M: 紫花苜蓿; As: 沙打旺; E: 披碱草; L: 羊草; F: 苇状羊茅; Ag: 扁穗冰草。盆中黄花刺茄植株与牧草植株的比例为 1 : 3。

The test was used to compare each value with 1.0; * and ** indicate significance at the 0.05 and 0.01 level, respectively. S: *S. rostratum*; M: *M. sativa*; As: *Astragalus adsurgens*; E: *E. dahuricus*; L: *L. chinensis*; F: *F. arundinacea*; Ag: *Agropyron cristatum*. The ratio of *S. rostratum* to pasture plants in the pots is 1 : 3.

2.2 野外小区试验结果分析

根据野外小区试验结果(表 5), 各植物替代控制组合的黄花刺茄鲜重与干重均与对照组差异显著 ($P < 0.05$), 除 T10 处理组(羊草+扁穗冰草混种)外, 其他牧草处理组合之间替代效果差异不显著。处理组对单位面积黄花刺茄干重产量相比于 T1 处理组(单独种植黄花刺茄, 即对照组)影响最大的是 T12 处理组(紫花苜蓿+羊草混种), 降低幅度为 91.78%, 效果与之相近的处理组为 T15 处理组(苇状羊茅+紫花苜蓿+羊草混种), 降低幅度为 91.2%。T6 处理组(紫花苜蓿), T7 处理组(苇状羊茅+扁穗冰草混种)以及 T16(紫花苜蓿+羊草+扁穗冰草混种)对黄花刺茄的控制效果相近, 相比于 T1 处理组(单独种植黄花刺茄)降低其单位面积产量幅度依次为 89.5%、88.89%、88.89%。

经济收益是评价替代控制技术效果的重要标准(高尚宾等, 2017), 通过比较各牧草种子成本, 计算牧草的全年预期经济效益, 比较牧草对黄花刺茄的控制效果, 综合选择使用的替代牧草。本试验收割时牧草生长期为 3 个月, 而牧草通常全年可以收获 3~4 茬, 据此推算牧草全年产量如表 5 所示。近年来的研究表明市场对优质饲草的需求稳中有升, 在甘肃庆城县, 紫花苜蓿青干草 2021 年地头收购

价格为 1500~1600 元·t⁻¹, 2022 年为 1600~1800 元·t⁻¹(魏利平, 2023); 重庆市 2023 年紫花苜蓿干草收购价格为 1800 元·t⁻¹(张皓文, 2024)。2023 年内蒙古牧草产业发展协会、草都饲草料研究院发布的牧草价格指数显示, 青干草产地价格指数为 1500 元·t⁻¹。紫花苜蓿收购价格通常高于禾本科牧草, 紫花苜蓿按照收购价格 0.45 元·kg⁻¹计算全年预期经济效益, 其余禾本科牧草按照青干草收购价格 0.375 元·kg⁻¹计算全年预期经济效益; 成本价依照购买成本核算。紫花苜蓿投入成本最低, 但干重产量相比苇状羊茅及扁穗冰草低; 羊草投入成本高, 并且干重产量较低; 苇状羊茅以及扁穗冰草的成本价格适中, 牧草干重产量高。根据表 5 数据, T15 处理组(紫花苜蓿+苇状羊茅+羊草混种)预期全年经济收益最高, T3 处理组(苇状羊茅单种), T14 处理组(紫花苜蓿+苇状羊茅+扁穗冰草混种)、T9 处理组(紫花苜蓿+苇状羊茅混种)、T11 处理组(紫花苜蓿+扁穗冰草混种)在种植第一年即可获利。T15 处理组(苇状羊茅+紫花苜蓿+羊草混种)对黄花刺茄有显著抑制效果, 种植一年以上即可获利, 因此在吉林省白城市科尔沁草原地区推广植物替代控制黄花刺茄技术时, 该组合可优先选用。

表 5 不同替代控制植物及组合处理对黄花刺茄生物量的影响以及替代控制植物经济效益对比

Table 5 Effects of different replacement control plant treatments on dry weight and fresh weight of *S. rostratum* and the economic benefits of replacement control plants

处理 Treatment	黄花刺茄干重产量 <i>S. rostratum</i> dry weight yield/(g · m ⁻²)	黄花刺茄鲜重产量 <i>S. rostratum</i> fresh weight yield/(g · m ⁻²)	预期牧草全年产量 Pasture production /(kg · hm ⁻²)	一次投入成本价 Cost price /(CNY · hm ⁻²)	预期牧草全年经济 收益 Economic gain /(CNY · hm ⁻²)
T1	19.00±11.95a	44.67±11.30a	-	-	-
T2	10.89±6.90b	30.11±1.55a	-	-	-
T3	3.33±2.69de	17.00±2.08bc	430.00±174.86def	1329.6	645.00±262.29fgh
T4	4.22±3.42cde	11.94±2.94bc	846.67±333.24a	1620.0	1270.00±499.86b
T5	6.00±3.20c	15.22±1.75bc	64.44±35.39i	2986.2	96.67±53.09i
T6	2.00±1.22e	10.56±2.80bc	110.00±43.59i	405.0	198.00±78.46i
T7	2.11±1.05e	10.89±2.75bc	621.11±139.14bc	1474.8	931.67±208.72def
T8	5.00±3.04cde	15.67±3.74bc	764.44±302.87a	2305.2	1146.67±454.30bcd
T9	3.22±3.11de	10.11±3.37bc	745.56±158.52ab	1012.5	1134.67±240.45bcd
T10	7.22±4.47c	17.24±3.39bc	413.33±274.50efg	2160.0	1066.67±598.14bcde
T11	2.11±1.05e	9.00±2.26bc	337.78±179.78fg	867.3	973.00±594.81cde
T12	1.56±1.01e	7.44±1.46c	157.78±56.74hi	1697.7	379.00±122.84hi
T13	4.56±2.55cde	25.67±8.56bc	591.11±178.78bc	1979.4	886.67±268.17defg
T14	3.44±2.51de	12.22±3.84bc	840.00±226.00bc	1119.0	1273.33±334.59b
T15	1.67±1.94e	6.11±1.26c	976.67±429.10cd	1670.4	1602.00±708.73a
T16	2.11±1.27e	9.33±1.91bc	370.00±121.55gh	1574.4	604.00±201.06gh
T17	-	-	121.11±65.09i	324.0	218.00±117.15i
T18	-	-	537.78±142.90cde	2217.0	806.67±214.34efg
T19	-	-	88.89±60.51i	3977.4	133.33±90.76i
T20	-	-	538.89±191.01cde	2880.0	808.33±286.52efg

S: 黄花刺茄; M: 紫花苜蓿; As: 沙打旺; E: 披碱草; L: 羊草; F: 苇状羊茅; Ag: 扁穗冰草。处理栏中字母后的数字表各物种比例, 同列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

S: *S. rostratum*; M: *M. sativa*; As: *Astragalus adsurgens*; E: *E. dahuricus*; L: *L. chinensis*; F: *F. arundinacea*; Ag: *Agropyron cristatum*. The numbers following letters in the processing column represent the proportions of each species. Different lowercase letters within the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

4 讨论与结论

植物之间的竞争主要包括对光、肥和水资源的利用效率竞争 (Gao *et al.*, 2014)。叶绿素是植物生长发育的关键影响因素, 在植物竞争光照资源方面起重要作用, 对植物的生物量有重要影响。本研究中禾本科牧草苇状羊茅和羊草对黄花刺茄的叶绿素值影响均较大, 可能是由于其生长迅速并且植株数量为黄花刺茄的 3 倍, 形成占位覆盖, 因此可以抑制黄花刺茄的生长。

入侵植物生物量变化是评估竞争能力的重要指标 (Keddy *et al.*, 1998), 竞争导致入侵植物生物量相比于单独生长植株的生物量显著减少。本研究筛选出的不同土壤处理组的优势植物对黄花刺茄的地上地下生物量以及单株生物量均有显著抑制作用, 表明在非对称性竞争中, 黄花刺茄竞争光照以及生存资源的能力显著低于替代控制牧草, 牧

草可以实现对黄花刺茄的高效替代。

土壤的物理化学性质均会影响土壤生产力, 同种类型的土壤营养状况与土壤所处环境相关, 具有空间异质性 (申桐等, 2023)。土壤营养状况也与人类活动相关, 同一点位的土壤不同深度土层的有机质含量有差异 (文鑫等, 2023)。这些因素可能导致同一土壤类型中的替代植物表现不同。根据本研究中竞争试验生物量结果, 土壤有机质含量较高的处理组中, 禾本科牧草苇状羊茅、扁穗冰草、羊草对黄花刺茄的生物量降低效果良好; 土壤有机质含量较低的处理组, 豆科植物紫花苜蓿对黄花刺茄的生物量降低效果较好。其他理化性质对于替代植物的优势无显著影响。因此, 在不同地区选择替代控制植物时, 可先按照统一的取土方法进行土壤有机质含量的测定, 然后选择合适的替代控制植物。通过采取将取土地点分类为耕地用土以及非耕地用

土、统一取土深度、统一取土季节等标准化方式,再进行试验,可以准确判断该地区适合使用的替代控制植物。

相对产量的试验结果表明,在非对称性竞争中黄花刺茄均处于劣势地位。本试验中黄花刺茄的相对产量在大多数情况下小于1.0,表明其在非对称性竞争中处于劣势,而替代控制植物在除张家口以外的地区相对产量均大于1.0,表明其受到种间竞争影响程度小。非对称性竞争保证了替代控制植物对于黄花刺茄的抑制效果,在以往的研究中,入侵植物与替代植物混种时,随着替代植物比例的增加,入侵植物与替代控制植物相对产量通常小于1.0,可以说明入侵植物与替代植物具有相同的生态位,并因竞争资源而产生竞争(王森森等,2021;岳茂峰等,2016)。也有研究表明,在竞争系统中,生态系统为了保持多样性,种内相互作用比种间相互作用更具竞争力,物种在影响群落中其他物种时表现出多样性,通常对群落中相邻植物既有竞争性也有促进性的影响,这些影响会随着其他植物的种类和环境条件的变化而变化(Biler *et al.*, 2024; Detto *et al.*, 2019)。本试验的替代控制植物相对产量大于1,可能是由于牧草在竞争中优先占据了较多资源,形成了种内促进作用。试验表明,在植物替代控制技术中使用非对称性竞争原则有利于牧草本身的生长以及对入侵植物的控制。

野外小区试验证明,紫花苜蓿的野外替代效果和盆栽试验结果一致,对黄花刺茄有显著抑制效果。在入侵生境中建立多样性群落有利于生境恢复与防止再次入侵(Singh & Byun, 2023),维持和提升土著植物种群遗传多样性也是必要的抵御植物入侵的管理措施。紫花苜蓿与其他牧草混种均显著抑制黄花刺茄生物量,因此在室内盆栽试验筛选出目标植物后推广应用时,可根据目标植物具有的生态特点进行组合,以获得更佳的生态效益。此外,本试验中紫花苜蓿的干重产量较低,是其生长特性所致,多年生紫花苜蓿一般在播种第二年至第四年进入生长旺期,第五年以后生长力逐渐下降(汪雪等,2024)。因此,为对黄花刺茄形成长期控制,紫花苜蓿作为替代控制植物必须与禾本科牧草混合种植。综合成本、替代控制效果、牧草产量及生态治理长久稳定性来看,使用紫花苜蓿与禾本科牧草混种是北方农牧交错区入侵植物使用替代控

制技术优先选用的组合类型。张瑞海等(2019)提出沙打旺、苇状羊茅、扁穗冰草、羊草混种组合对黄花刺茄控制效果最佳,使用豆科植物与禾本科植物混种对于长期维持对黄花刺茄的控制以及恢复生态具有积极作用,与本试验结论一致。在除吉林白城外的其他黄花刺茄发生地,例如宁夏回族自治区石嘴山市,可按照本研究得出的结果选用替代控制牧草组合,盆栽试验中该地区土壤处理组表现较好的牧草为羊草和苇状羊茅,而紫花苜蓿对黄花刺茄生物量降低的影响幅度小于这2种禾本科牧草,可能与紫花苜蓿自身固氮作用有关,但禾本科牧草可分别与紫花苜蓿混种,增加对黄花刺茄抑制作用,可作为该地区替代控制组合牧草。辽宁省朝阳市北票市土壤处理组中,选用的各替代控制植物均对黄花刺茄的生物量降低影响效果一般,可另外选择替代控制植物,例如本地种黑麦草 *Lolium perenne* L.、早熟禾 *Poa annua* L.等。

本研究筛选出了黄花刺茄适生区不同土壤类型可应用的替代控制植物。使用盆栽试验筛选出的豆科植物紫花苜蓿与禾本科植物苇状羊茅、扁穗冰草、羊草在野外小区试验的验证中搭配混种能显著减少单位面积黄花刺茄的产量。本研究完善了黄花刺茄的植物替代控制技术,为植物替代控制技术选择替代控制植物提供方法,该方法同样适用于其他入侵植物或被入侵的自然生态系统。现有研究表明,植物替代控制与化学防控、生物防控、机械控制等方式结合能取得更彻底、持续的控制效果(崔宇琛等,2022;李云琴等,2019; Harker & O'donovan, 2013)。因此,后续可针对复合措施对黄花刺茄的控制效果进行研究。

参考文献

- 崔宇琛, 钊丽, 温丽娜, 范泽文, 张付斗, 马光宗, 申时才, 徐高峰, 杨韶松, 徐云, 郑凤萍, 2022. 替代物种与除草剂对紫茎泽兰的防效及其互作效应. 生物安全学报, 31(4): 336-344.
- 陈仁飞, 姬明飞, 关佳威, 邓建明, 2015. 植物对称性竞争与非对称性竞争研究进展及展望. 植物生态学报, 39(5): 530-540.
- 陈天翌, 刘增辉, 娄安如, 2013. 刺萼龙葵种群在中国不同分布地区的表型变异. 植物生态学报, 37(4): 344-353.
- 李云琴, 季梅, 刘凌, 户连荣, 张知晓, 泽桑梓, 2019. 云南

- 省林地薇甘菊防控研究进展. *生物安全学报*, 28(1): 1-6.
- 林玉, 谭敦炎, 2007. 一种潜在的外来入侵植物: 黄花刺茄. *植物分类学报*, 45(5): 675-685.
- 申桐, 王恒飞, 杜文波, 周怀平, 王瑞, 张建杰, 靳东升, 徐明岗, 2023. 褐土区典型县域耕地土壤肥力时空演变特征及主控因素. *中国农业科学*, 56(21): 4259-4271.
- 高尚宾, 张宏斌, 孙玉芳, 张国良, 2017. 植物替代控制 3 种入侵杂草技术的研究与应用进展. *生物安全学报*, 26(1): 18-22, 102.
- 汪雪, 刘晓静, 王静, 吴勇, 童长春, 2024. 连续间作下的紫花苜蓿/燕麦根系与碳氮代谢特性研究. *草业学报*, 33(3): 85-96.
- 王瑞, 唐瑶, 张震, 万方浩, 2018. 外来入侵植物刺萼龙葵在我国的分布格局与早期监测预警. *生物安全学报*, 27(4): 284-289.
- 王森森, 贾宏定, 张志飞, 胡龙兴, 陈桂华, 2021. 入侵植物美洲商陆与 3 种牧草的竞争效应研究. *草地学报*, 29(1): 95-102.
- 魏利平, 2023. 庆城县紫花苜蓿产业发展探析. *畜牧兽医杂志*, 42(1): 35-37.
- 文鑫, 王艺惠, 钟聪, 胡宝清, 张新英, 2023. 贵州表层土壤有机质空间变异特征及其影响因素分析. *水土保持学报*, 37(3): 218-224.
- 岳茂峰, 崔焯, 冯莉, 张纯, 田兴山, 2016. 入侵植物飞机草与 4 种牧草的竞争效应. *生物安全学报*, 25(4): 270-274.
- 张皓文, 2024. 不同紫花苜蓿品种的生长、产量及经济效益分析. *中国饲料* (4): 89-92.
- 张瑞海, 宋振, 张国良, 王忠辉, 付卫东, 尹树红, 翟洪凯, 席坤鹏, 2019. 刺萼龙葵土壤种子库特征及其对替代控制的响应. *中国生态农业学报(中英文)*, 27(3): 337-347.
- 张震, 代宇雨, 王一帆, 吕得林, 王瑞, 2018. 入侵植物替代控制中土著种选择机制的研究. *生物安全学报*, 27(3): 178-185.
- 周全来, 曹伟, 张悦, 金永焕, 王永翠, 马璞培, 陈辉, 崔雪, 2023. 外来入侵植物刺萼龙葵的入侵特征与防治策略. *生物安全学报*, 32(4): 314-322.
- AL-KAHTANI S N, TAHA E K A, AL-ABDULSALAM M, 2017. Alfalfa (*Medicago sativa* L.) seed yield in relation to phosphorus fertilization and honeybee pollination. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 24(5): 1051-1055.
- BILER M D, STOUFFER D B, MARTYN T E, MAYFIELD M M, 2024. Plant interaction networks reveal the limits of our understanding of diversity maintenance. *Ecology Letters*, 27(2): e14376.
- DETTO M, VISSER M D, WRIGHT S J, PACALA S W, 2019. Bias in the detection of negative density dependence in plant communities. *Ecology Letters*, 22(11): 1923-1939.
- FRECKLETON R P, WATKINSON A R, 2001. Asymmetric competition between plant species. *Functional Ecology*, 15(5): 615-623.
- GAO Y, YU H W, HE W M, 2014. Soil space and nutrients differentially promote the growth and competitive advantages of two invasive plants. *Journal of Plant Ecology*, 7(4): 396-402.
- GOSPER C R, VIVIAN-SMITH G, 2009. Approaches to selecting native plant replacements for fleshy-fruited invasive species. *Restoration Ecology*, 17(2): 196-204.
- HARKER K N, O'DONOVAN J T, 2013. Recent weed control, weed management, and integrated weed management. *Weed Technology*, 27(1): 1-11.
- KEDDY P, FRASER L H, WISHEU I C, 1998. A comparative approach to examine competitive response of 48 wetland plant species. *Journal of Vegetation Science*, 9(6): 777-786.
- LEVINE J M, ADLER P B, YELENIK S G, 2004. A meta-analysis of biotic resistance to exotic plant invasions. *Ecology Letters*, 7(10): 975-989.
- PILE K L S, COYLE D R, DEY D C, FRASER J S, HUTCHINSON T, JENKINS M A, KERN C G, KNAPP B O, MADDOX D, PINCHOT C, WANG G, 2023. Invasive plant management in eastern North American forests: a systematic review. *Forest Ecology and Management*, 550: 121517.
- SINGH K, BYUN C, 2023. Ecological restoration after management of invasive alien plants. *Ecological Engineering*, 197: 107122.
- VAN WILGEN B W, FORSYTH G G, LE MAITRE D C, WANNENBURGH A, KOTZÉ J D F, VAN DEN BERG E, HENDERSON L, 2012. An assessment of the effectiveness of a large, national-scale invasive alien plant control strategy in South Africa. *Biological Conservation*, 148(1): 28-38.
- VILÀ M, WEINER J, 2004. Are invasive plant species better competitors than native plant species? — Evidence from pairwise experiments. *Oikos*, 105(2): 229-238.
- WAHUA T A T, MILLER D A, 1978. Relative yield totals and yield components of intercropped sorghum and soybeans 1. *Agronomy Journal*, 70(2): 287-291.
- WEINER J, 1990. Asymmetric competition in plant populations. *Trends in Ecology & Evolution*, 5(11): 360-364.
- ZHANG Y, GUO W C, YUAN Z L, SONG Z, WANG Z H, GAO J H, FU W D, ZHANG G L, 2023. Chromosome-level genome assembly and annotation of the prickly nightshade *Solanum rostratum* Dunal. *Scientific Data*, 10(1): 341.