

外来入侵植物刺萼龙葵的入侵特征与防治策略

周全来¹, 曹伟¹, 张悦^{1*}, 金永焕¹, 王永翠¹, 马瑛培², 陈辉³, 崔雪⁴

¹中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; ²沈阳大学环境学院, 辽宁 沈阳 110044;

³科尔沁左翼后旗林业和草原局, 内蒙古 通辽 028100; ⁴辽宁省林业和草原有害生物防治检疫工作站, 辽宁 沈阳 110804

摘要: 刺萼龙葵是原产于北美洲的恶性外来入侵植物, 在世界各地广为分布, 已入侵我国北方地区, 严重威胁我国农牧业安全, 亟待明确刺萼龙葵入侵过程与危害, 为我国制定刺萼龙葵防治策略提供参考。本文对刺萼龙葵生物学和生态学特性、传播途径、入侵历史和分布特征、危害、现有防除措施及存在等问题进行综述。刺萼龙葵具有花期长、花粉萌发率和结实率高、果实和种子产量大等高繁殖能力特征; 能适应多变气候和异质性生境; 具有自体传播、风力传播、水力传播、动物传播和人为传播等多种传播途径; 已先后入侵了我国9个省级行政区的55个区县, 向华北、华中和华东快速入侵的可能性高; 刺萼龙葵的植株及分泌物对人畜安全、动物皮毛质量、草地植被结构、农作物产量等方面造成严重危害, 并帮助传播植物病虫害。然而, 现有的化学和物理防除措施仍不能彻底遏制传播、消除危害和保障生产。为有效防除刺萼龙葵, 应开展刺萼龙葵入侵风险评估, 针对不同土地利用类型制定防治措施, 加强入侵机制和防控技术研究。

关键词: 刺萼龙葵; 生物生态学特性; 传播途径; 入侵特征; 防治策略



开放科学标识码
(OSID 码)

Invasion characteristics of the alien invasive plant *Solanum rostratum* and its control strategies

ZHOU Quanlai¹, CAO Wei¹, ZHANG Yue^{1*}, JIN Yonghuan¹, WANG Yongcui¹,
MA Yingpei², CHEN Hui³, CUI Xue⁴

¹Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China; ²College of Environment, Shenyang University, Shenyang, Liaoning 110044, China; ³Forestry and Grassland Administration in Horqin Left Back Banner, Tongliao, Inner Mongolia 028100, China; ⁴Station of Forest and Grassland Pest Control and Quarantine of Liaoning Province, Shenyang, Liaoning 110804, China

Abstract: Buffalobur (*Solanum rostratum* Dunal) is a well-known alien invasive plant native to North America that had spread globally before invading North China and posing a serious risk to the agricultural security and animal husbandry. Studying the invasion process and associated hazards of the invasive plant is imperative to provide a reference for developing prevention and control strategies. We reviewed the latest research on biological and ecological characteristics, dispersal routes, invasion history, distribution characteristics, damages, and existing control measures and challenges related to the plant. It possesses high reproductive potential owing to its long flowering period, high pollen germination rate, and high fruit and seed yield. It adapts to climatic variations and heterogeneous habitats and disperses its seeds through autochory, anemochory, hydrochory, zoochory, and anthropochory. It has invaded 55 municipal counties in nine provincial administrative regions in China and has a high probability of invading North, Central, and East China. The aboveground parts of the plant and its exudates may pose serious risk to human and animal security, animal fur quality, structure of grassland vegetation, and crop yield and transmit plant diseases and pests. However, the existing chemical and physical measures have not proven effective in controlling the spread of this plant and eliminating its negative impact on agricultural and livestock production. Performing invasion risk assessment for *S. rostratum* is critical for implementing control measures according

收稿日期 (Received): 2022-12-06 接受日期 (Accepted): 2023-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD1400303); 辽宁省重大专项项目 (2020JH1/10300006); 国家自然科学基金青年基金项目 (31971732, 41601588)

作者简介: 周全来, 男, 副研究员。研究方向: 种子传播生态学。E-mail: zhouquanlai@iae.ac.cn

* 通信作者 (Author for correspondence), 张悦, E-mail: zhangyue2019@iae.ac.cn

to each land-use type, strengthening research on invasion mechanisms, and effectively controlling the plant.

Key words: *Solanum rostratum*; bio-ecological characters; dispersal routes; invasion characteristics; control strategy

刺萼龙葵 *Solanum rostratum* Dunal, 隶属茄科, 又名黄花刺茄、壶萼刺茄, 原产于北美洲, 是一种恶性外来入侵植物, 目前已扩散到南美洲、欧洲、大洋洲、亚洲和非洲的 20 个国家和地区(阿丽亚·阿不拉, 2013; 陈菁等, 2020; 林玉和谭敦炎, 2007)。该植物自 1981 年在辽宁省朝阳县首次被发现后, 陆续在北京、吉林、河北、内蒙古、山西和新疆等地被发现(高芳等, 2005; 翟金玲, 2019; 赵晓英等, 2007)。已有研究表明, 华北、华东、华中、东北和西南地区为刺萼龙葵的高风险潜在分布区, 并有逐渐向西、向南蔓延的趋势(陈菁等, 2020; 郭章碧等, 2011; 王瑞等, 2018)。我国已将其列入《中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录》(2021 年更新)(中华人民共和国农业农村部 and 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2021) 和《中国自然生态系统外来入侵物种名单(第四批)》(中华人民共和国环境保护部和中国科学院, 2016)。本研究通过对刺萼龙葵生物学和生态学特性、传播途径、入侵范围、危害性、防除措施和存在的问题等进行综述, 以期为我国刺萼龙葵防治提供参考。

1 生物学特性

刺萼龙葵为一年生草本植物, 苗期 5—6 月, 花果期 6—10 月, 生长期约 150 d。刺萼龙葵株高 10~120 cm, 主茎分枝 4~7 个; 除花冠外, 整个植株皆有锥状硬刺, 刺长 0.5~1.2 cm, 有毒; 单叶互生, 呈不规则羽状深裂。花序 20~30 个, 每个花序有花 10~20 朵; 花冠黄色; 单花花期较短, 为 2~3 d, 但整株开花持续期较长, 约 50 d(周明冬等, 2009)。雄蕊的异型花粉总量约 3.8×10^5 粒, 萌发较快, 且萌发率较高($\geq 81\%$)(高芳等, 2005), 在原产地以异交为主, 而在我国局部地区可自发自交(张丽娟和娄安如, 2018)。

刺萼龙葵浆果直径 7.7~10.0 cm, 成熟后逐渐干裂; 单株果穗 21~120 个, 每穗具果 4~8 个, 单株产果 74~916 个; 每个果实有种子 27~56 粒, 单株产种子 1375~51566 粒; 种子的大小较均一, 长、宽、厚度分别为 (2.5 ± 0.2) 、 (2.0 ± 0.1) 和 (1.0 ± 0.1) mm(张少逸等, 2011b)。刺萼龙葵种子千粒质量 2.4~3.0 g, 单株种子质量 3.3~154.7 g(车晋滇等, 2006)。种子落到地面, 进入土壤中, 成为土壤种子

库, 严重受害区刺萼龙葵土壤种子库达到 $1.1 \text{ 万粒} \cdot \text{m}^{-2}$ (张瑞海等, 2019; 中国农业科学院, 2015)。其种皮厚而致密, 对胚有良好保护作用; 种子的胚发育完全、胚乳富含营养, 可为种子萌发提供良好的物质基础; 种子有越冬休眠性, 需要经历低温处理等后熟的休眠阶段才能萌发(车晋滇等, 2006; 丛建民等, 2016; 谷月, 2017; Shalimu *et al.*, 2012)。种子结构导致其短时间内发芽率低, 萌发时间延长, 如条件适宜, 萌发率可超过 80%, 这种特性虽不利于其种群在新生境中快速大量繁殖, 但是种皮的保护使之在恶劣条件下长期保持活力(张少逸等, 2011a; Shalimu *et al.*, 2012)。刺萼龙葵形态特征及其对草地危害见图 1。

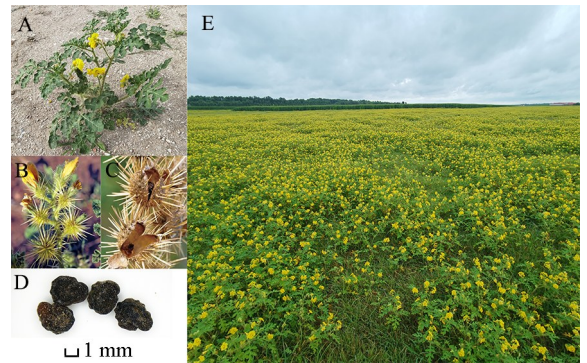


图 1 刺萼龙葵形态特征以及对草地的危害
Fig.1 Morphological characteristics of *S. rostratum* and its damage to grassland

A: 刺萼龙葵单株; B: 未成熟果实; C: 成熟开裂果实;
D: 种子; E: 重度危害的草地。

A: A single plant of *S. rostratum*; B: Unripe fruits; C: Ripe and dehiscent fruits; D: Seeds; E: Heavily damaged grassland.

刺萼龙葵可通过产生化感物质和调整耐旱策略等生理特征入侵和扩展新生境。刺萼龙葵植株中的化感物质主要集中在茎叶部位(Shao *et al.*, 2018), 提取物对反枝苋 *Amaranthus retroflexus* L. 和早熟禾 *Poa annua* L. 种子萌发、根和茎生长有抑制作用, 化感物质可能通过淋溶和凋落物分解等进入土壤, 直接影响其他植物生长(邵华, 2015)。在刺萼龙葵入侵的土壤中, 黄曲霉 *Aspergillus flavus* Link 等真菌显著增加, 这些微生物释放的曲酸对反枝苋和早熟禾根和茎生长有抑制作用(Shao *et al.*, 2017), 从而间接影响其他植物生长。

Yu *et al.* (2021) 研究发现, 刺萼龙葵对干旱胁

迫的响应策略存在差异,适应干旱区的种群具有较高的光合速率可塑性,以应对干旱胁迫,而适应半干旱区的种群靠聚集渗透调节物质、提高叶片干物质和丙二醛含量应对干旱胁迫。刺萼龙葵的这种表型可塑性使其既能适应恶劣干旱生境,也能适应温和湿润生境。

2 生态学特性

降雨量、光照、人类干扰强度、土壤质地、年平均温度等是影响刺萼龙葵入侵和分布的主要环境因子(塞依丁·海米提等,2019)。刺萼龙葵既能在干旱区生长、开花和结实(谷月,2017;宋珍珍等,2013;赵晓英等,2007),又能适应湿润生境,且在湿润生境中生长速度更快,植株更高大(车晋滇等,2006)。刺萼龙葵喜光照,在地表开阔、多光照的田边、荒地、过度放牧的草地、河岸、砂石坑、路边、垃圾场、林缘等都能生长(谷月,2017;郭晓艳等,2012;贺俊英等,2011;Eminniyaz *et al.*,2013),故结构简单、物种多样性低、受人类干扰的异质性生境有利于刺萼龙葵的生长和扩张(庞立东和孙余卓,2016)。

刺萼龙葵可适应多种土壤,尤其喜砂质土壤、碱性肥土或混和性黏土,对土壤养分要求低,既可入侵贫瘠的沙化草地,亦可入侵农田、果园、废弃的庭院等(郭章碧等,2011;宋珍珍等,2013)。王瑞等(2018)研究发现,年平均温度、平均月温差、昼夜温差与年温差比值、最湿季平均温度、最冷季平均温度、年降水量是影响刺萼龙葵分布的关键因素。郭佳等(2019)研究表明,年平均温度和最湿季平均温度是影响刺萼龙葵在中国东北分布的主要环境因子。Wei *et al.* (2009)研究指出,刺萼龙葵种子耐低水势和高盐胁迫,酸碱度对种子萌发无显著差异,但埋土深度影响种子出苗率,持续光照抑制种子萌发,种子在 12.5~45 °C 均能萌发,最适萌发温度为 25~35 °C。综上可知,刺萼龙葵具有适应多变气候、喜光、耐干扰、对土壤要求低等生态学特征,入侵新生境后易于建植和生长。

3 传播途径

刺萼龙葵的传播途径包括自然传播和人为传播。自然传播包括自体传播、风力传播、水力传播、动物传播;人为传播包括无意混杂传播、人为挟带传播和农贸传播(Zhou *et al.*,2021a)。刺萼龙葵自体传播是当果实成熟后,自动裂开,依靠重力、风力

或动物摇动枝条等,种子从果实裂缝中散落到地表(朱金雷和刘志民,2012;Oudtshoorn & Rooyen,1999)。刺萼龙葵风力传播包括 2 种情况:一是种子被风从开裂的刺苞上吹落,在下落过程中远离植株,进行短距离传播;二是果实成熟后,植株自茎基部折断,整株在开阔地随风滚动,沿途传播种子(包菡等,2022;庞立东和孙余卓,2016;Eminniyaz *et al.*,2013)。水力传播是刺萼龙葵长距离传播的主要途径,种子和果实均可借助水流长距离传播,种子在水中可漂浮或悬浮 4~7 h,果实则可长时间(>48 h)漂浮在水面;此外,种子还可通过蚂蚁携带进行短距离传播(Eminniyaz *et al.*,2013)。

关于大型动物对刺萼龙葵传播作用存在 2 种观点:一种认为牲畜接触刺萼龙葵枯干的果枝,刺萼扎入动物皮毛,通过动物觅食和迁徙等活动传播(庞立东和孙余卓,2016),并发现牛毛、羊毛中夹杂刺萼龙葵的刺苞和种子的现象(包菡等,2022);另一种认为刺萼龙葵果实成熟后,果实或果穗与植株之间结构紧实,不易从植株上脱落,难以附着到牛或羊等动物皮毛上,通过动物传播(Zhao *et al.*,2013)。此外,包菡等(2022)研究表明,刺萼龙葵可以通过动物取食种子过腹传播,然而大多数动物不喜欢取食刺萼龙葵,这种过腹传播是否具有普遍意义,尚需进一步研究。

随着国际贸易和旅游业的迅速发展,带有刺萼龙葵种子的商品可通过国内和国际市场进行贸易传播(塞依丁·海米提等,2019)。如刺萼龙葵种子掺杂到粮食、种子、牧草中,黏附到农具、车轮和鞋底上,或混于土壤和凋落物中,并通过运输或人为挟带等方式进行传播(王松,2018;Zhao *et al.*,2013)。

4 入侵历史和分布特征

4.1 入侵历史

在我国,刺萼龙葵首先在 1981 年辽宁省朝阳县被发现,推测可能是由于当地面粉厂进口的美国小麦中混入刺萼龙葵种子,种子随被抛弃的麦麸进入野外环境,在随后的 16 a 里,先后在辽宁省阜新市、朝阳市和大连市发现入侵的刺萼龙葵。2003 年,刺萼龙葵在北京密云被发现,随后在北京延庆也被发现。2005 年,在吉林省、河北省和新疆维吾尔自治区均发现了刺萼龙葵,次年在山西省、内蒙古自治区发现刺萼龙葵入侵,2017 和 2019 年,分别在天津市和宁夏回族自治区发现刺萼龙葵的分布(图 2)。刺萼

龙葵在中国的传播历史表明,其入侵地点呈现大幅度跨地域的不连续分布,造成这种分布格局有 2 种可能:一是人为传播能力不断强大;二是由同一地点或不同地点多次引入。日渐发达的交通、频繁往来的贸易和高度发展的旅游业等,促使人类无序流动

增大,打破了原有的地理空间壁垒,使刺萼龙葵快速传播成为可能。多次从不同地区引入可能是导致分布于同一地区(如吉林省白城市)的刺萼龙葵基因存在明显差异的重要原因(Zhao *et al.*, 2013)。



图 2 刺萼龙葵在中国的入侵历史
Fig.2 Invasion history of *S. rostratum* in China

4.2 分布特征

自刺萼龙葵首次被发现至今的 40 多年里,已入侵我国 9 个省级行政区的 55 个区县(表 1)。辽宁省作为首个入侵地,现已传播了 10 个地级市,较严重的有朝阳市、阜新市和大连市等。其次是内蒙古自治区,有 9 个盟市遭入侵,较严重的包括兴安盟、通辽市和赤峰市等地区。吉林省、河北省、北京市和新疆维吾尔自治区受害范围较小,山西省、宁夏回族自治区和天津市入侵时间短,受害较轻。

刺萼龙葵主要分布于我国的东北、华北和西北地区,从最西部新疆石河子到最东部辽宁本溪平山,东西跨经度 38.2°,直线距离超过 3000 km,从最北部内蒙古呼伦贝尔市鄂温克旗到最南部北京市房山区,南北跨纬度 8.5°,纬度直线距离超过 1100 km。内蒙古自治区和新疆维吾尔自治区之间存在较大的入侵空白,这可能是由于内蒙古自治区西部阿拉善盟、甘肃省和新疆维吾尔自治区东部地区广布沙漠,气候干旱、风沙严重、土壤贫瘠,降低了刺萼龙葵由东向西的入侵速度。此外,该地区人口稀少,城市分散,经济和交通不发达,经贸人员往来少,降低了刺萼龙葵的人为传播概率。

已有研究利用 MaxEnt、GARP 生态位模型,结合 ArcGIS 空间分析技术,预测刺萼龙葵在我国潜在适生区,发现影响其分布的主要气象因子是温度和降水;刺萼龙葵的潜在分布极广,在全国除西藏自治区、青海省、海南省及两广南部外的其他地区均适生,而在华中、华北及华东地区入侵风险极高,在华南各省入侵风险略小(塞依丁·海米提等,

2019; 郭佳等, 2019; 王瑞等, 2018; 钟良平等, 2009)。由此推断,刺萼龙葵可能处于由中国北方向华北、华中和华东快速扩散阶段,应引起相关部门的重视。

5 危害

刺萼龙葵给我国农业、畜牧业和社会经济等方面造成了严重危害。其通过茎叶挥发、淋溶、凋落物分解、根系分泌等途径向环境中释放化学物质,抑制相邻植物的种子萌发和根系生长,从而排挤土著植物(庞立东和孙余卓, 2016)。此外,其通过改变入侵地根际土壤真菌多样性及土壤酶活性,积累土壤中的过量硝酸盐,促进其根际细菌的生长和土壤微生物群落的变化(邵华, 2015; Zhou *et al.*, 2021b)。刺萼龙葵一旦成功入侵,便与入侵地物种争夺资源,排挤本地植物,可致 30% 以上的本土植物消失,大大降低入侵地的生物多样性,使农作物的产量与品质下降;刺萼龙葵还是一些农业有害微生物、昆虫和土壤线虫的寄主,随着刺萼龙葵的扩散而传播,极大影响农作物生存环境(郭章碧等, 2011; 林玉和谭敦炎, 2007; 寇紫倩等, 2022)。

刺萼龙葵是一种有毒植物,能够产生一种神经毒素(茄碱),对呼吸中枢神经系统有显著的麻醉作用,一旦被牲畜大量食用会出现运动失调、多涎、急喘、颤抖、腹泻、呕吐、出血、肠炎等症状;花粉还能引起人类过敏性鼻炎;植株上的刺,可扎进牲畜的皮毛和黏膜,降低牲畜皮毛的商业价值(车晋滇等, 2006; 谷月, 2017);严重时果实会致绵羊 *Ovis aries* L. 死亡(阿丽亚·阿不拉, 2013)。

表 1 刺萼龙葵在中国的分布

Table 1 Distribution of *S. rostratum* in China

省级行政区 Provincial administrative region	市级行政区 Municipal administrative region	县级行政区 County administrative region	文献 References
辽宁省 Liaoning Province	沈阳市 Shenyang	沈阳市区 Shenyang City	郭晓艳等,2012; 兰希平,2012; 曲波等,2011b, 2011c; 曲波和张延菊,2009
	朝阳市 Chaoyang	朝阳市区 Chaoyang City、朝阳县 Chaoyang County、建平县 Jianping County、凌源市 Lingyuan、北票市 Beipiao、喀喇沁左翼蒙古族自治县 Harqin left wing Mongolian Autonomous County	
	大连市 Dalian	普兰店区 Pulandian District、甘井子区 Ganjingzi District	
	阜新市 Fuxin	彰武县 Zhangwu County、阜新蒙古族自治县 Fuxin Mongolian Autonomous County、清河门区 Qinghemen District	
	锦州市 Jinzhou	义县 Yi County	
	铁岭市 Tieling	昌图县 Changtu County	
	葫芦岛市 Huludao	葫芦岛市区 Huludao City	
	盘锦市 Panjin	大洼区 Dawa District	
	本溪市 Benxi	平山区 Pingshan District	
营口市 Yingkou	鲅鱼圈区 Bayuquan District		
吉林省 Jilin Province	白城市 Baicheng	大安市 Da'an、洮北区 Taobei District、镇赉县 Zhenlai County	王彩凤等,2010; 薛爽,2015; 张瑞海等,2021
	松原市 Songyuan	乾安县 Qian'an County	
内蒙古自治区 Inner Mongolia Autonomous Region	兴安盟 Hinggan League	科尔沁右翼中旗 Horqin Right Wing Middle Banner、乌兰浩特市 Ulanhot、突泉县 Tuquan County	郭晓艳等,2012; 贺俊英等,2011; 卡哈尔·哈力克和李家春,2013; 宋国印等,2013; 王海林和贺俊英,2017; 王艳辉,2019
	通辽市 Tongliao	开鲁县 Kailu County	
	赤峰市 Chifeng	巴林右旗 Balin Right Banner	
	锡林郭勒盟 Xilingol League	锡林浩特市 Xilin Hot	
	乌兰布市 Ulanqab	察哈尔右翼前旗 Chahar Right Front Banner	
	包头市 Baotou	固阳县 Guyang County	
	呼和浩特市 Hohhot	金山区 Jinshan District	
	巴彦淖尔市 Bayan Nur	乌拉特前旗 Urad Gront Banner	
呼伦贝尔市 Hulun Buir	鄂温克族自治旗 Ewenki Autonomous Banner	包菡等,2022 葛金岩和达古拉,2022	
河北省 Hebei Province	张家口市 Zhangjiakou	怀来县 Huailai County、怀安县 Huai'an County、宣化区 Xuanhua District、万全县 Wanquan County、桥东区 Qiaodong District、桥西区 Qiaoxi District、承德县 Chengde County	翟金玲,2019
北京市 Beijing	-	房山区 Fangshan District、密云县 Miyun County、门头沟区 Mentougou District、延庆县 Yanqing County、顺义区 Shunyi District、通州区 Tongzhou District	向俊等,2011; 晏文峰等,2022
天津市 Tianjin	-	蓟州区 Jizhou District	李亚光和刘宏静,2017
山西省 Shanxi Province	大同市 Datong	阳高县 Yanggao County	郭章碧等,2011
宁夏回族自治区 Ningxia Hui Autonomous Region	石嘴山市 Shizuishan	大武口区 Dawukou District	田宗林等,2021
新疆维吾尔自治区 Xinjiang Uygur Autonomous Region	乌鲁木齐市 Urumqi	乌鲁木齐县 Urumqi County、头屯河区 Toutunhe District、石河子市 Shihezi、沙依巴克区 Saybag District	林玉和谭敦炎,2007; 薛爽,2015; 塞依丁·海米提等,2019; 宋珍珠等,2013; 苏海英等,2022
	吐鲁番市 Turpan	托克逊县 Tuokexun County	
	昌吉回族自治州 Changji Hui Autonomous Prefecture	昌吉市 Changji	

据统计,2012 年辽宁省刺萼龙葵入侵面积大于 $0.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 多年来,按照每年增加 $0.6 \times 10^4 \sim 0.8 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 计算(曲智,2021),面积已超过 $7.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,而吉林($1.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$)(王彩凤等,2010)、新疆($0.1 \times 10^4 \text{ hm}^2$)(苏海英等,2022)等地入侵面积较

小,有些则是零星分布;2020 年内蒙古自治区是刺萼龙葵危害面积最大的地区,入侵面积达 $12.2 \times 10^4 \text{ hm}^2$ (包菡等,2022)。刺萼龙葵对我国玉米 *Zea mays* L. 产业造成的潜在经济损失总值 29.4 亿 ~ 350.8 亿元,损失率 0.8% ~ 8.9%(吴志刚等,2015)。

6 现有防除措施和存在的问题

刺萼龙葵防除措施的效果评价如表2所示。

6.1 防除措施

6.1.1 化学防除 对于刺萼龙葵入侵严重、危害面积大的区域,多使用除草剂进行化学防除。一般在开花前和花期(前期),用除草剂进行茎叶喷雾,可防止其产生种子,防除效果明显,而花期后期刺萼龙葵对除草剂抗性增强,特别是在果期,即使用灭杀性除草剂也不能完全阻止其结实(Abu-nassar & Matzrafi, 2021)。除草剂采用单施或混施茎叶喷雾法,能够有效防治刺萼龙葵,在农田和荒地使用,在刺萼龙葵苗期防效达85%以上,但随着幼苗逐渐长大,防除效果下降(曲波等,2011a; 张少逸等,2011a)。已有研究表明,灭生性除草剂(如草甘膦、草铵膦等)防除效果好于选择性除草剂(如2,4-D丁酯、氯氟吡氧乙酸、三氯吡氧乙酸等),而土壤处理除草剂(如乙草胺、克草胺、莠去津等)防治效果受土壤和天气状况影响(曹新明,2014; 郭晓艳等,2012; 晏文峰等,2022)。

6.1.2 物理防除 物理防除包括机械防除和人工防除。刺萼龙葵全株具刺,幼苗期生长较慢,此后生长显著加快,植株成熟后,根系入土深且植株上的刺变硬,不方便铲除,故在其植株长有4片真叶前进行物理防除最佳(郭晓艳等,2012)。若在果实成熟时铲除,容易造成种子的散落和传播(兰希平,2012)。对于大面积发生的刺萼龙葵,多采用大型机械在4叶前期多次犁翻压埋,灭杀植株,减少当季危害和产生大量种子(晏文峰等,2022)。对发生面积较小、密度小的农田和草场中的刺萼龙葵,可在果实成熟前(刺质地较软,不易刺伤皮肤)用镐和锹将其连根拔起,此时没有成熟的种子产生,不会再有后代出现,防除效果最佳(阿丽亚·阿不拉,2013)。

物理防除需要连续多年多次进行,且在不同时间防除措施不同。在春季植物返青前,对防治区内刺萼龙葵的枯残枝、落果进行铲除、集中烧毁和深埋,以减少遗留在地表的种子量,减少种子来源(王松,2018);5月清除苗期植株;7月清除旺盛生长期植株;8月上旬清除种子成熟前植株;而进入9月后,刺萼龙葵种子成熟,物理清除法不再适用。另外,由于刺萼龙葵的种子有休眠机制,当年未萌发的种子可能在数年后萌发,所以,对刺萼龙葵入侵过的地方,要连续多年追踪调查和防除(卡哈尔·哈力克和李家春,2013; 庞立东和孙余卓,2016)。

6.1.3 生态防除 生态防除主要利用本地植物替代控制刺萼龙葵并进行生态修复,目前相关研究较少,但具有一定的可行性和应用潜力;植物替代控制结合物理防除,可增加植物多样性,抑制刺萼龙葵再次入侵(庞立东和孙余卓,2016)。刺萼龙葵幼苗期生长较缓慢,竞争能力弱,可密植其他生长快的植物与之竞争,削弱其生长势,减轻危害。紫穗槐 *Amorpha fruticosa* L. 和沙棘 *Hippophae rhamnoides* L. 生长较快,易形成密丛,对刺萼龙葵具有良好的控制效果(阿丽亚·阿不拉,2013; 郭晓艳等,2012)。在农田种植玉米和向日葵 *Helianthus annuus* L. 等高秆作物并结合铺设地膜可显著抑制刺萼龙葵的个体生长,并降低种群密度。种植草木犀 *Melilotus officinalis* (L.) Pall.+冰草 *Agropyron cristatum* (Linn.) Gaertn.+羊草 *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. 披碱草 *Elymus dahuricus* Turcz.+冰草或单种苜蓿 *Medicago sativa* L. 等,配以科学管理,可持续而有效地抑制刺萼龙葵对天然草原的入侵(李霄峰,2018; 晏文峰等,2022)。

6.2 存在问题

(1) 化学防除存在问题。除草剂药效随苗龄增加降低,进入果期后则无法用除草剂彻底杀死,除草剂使用受到植物生长期限制。一些广谱性除草剂除了杀死目标植物外,也会杀死多年生优良牧草甚至树木,增加环境危害,不宜大量使用。除草剂对土壤里的种子无效,施药后种子仍能萌发,仍会继续造成危害。因此,单独使用化学防除措施无法彻底防除刺萼龙葵。

(2) 物理防除存在问题。刺萼龙葵植株长满毒刺,不便于人工防除,防除效果低。人工防除需要大量人力和时间,工作效率低,适用面积小(庞立东和孙余卓,2016)。利用犁翻压埋机械措施防除速度快,适于大面积作业,但需要持续多次防除,且遗漏率大,遗漏植株仍会继续造成危害。故单独使用物理措施不能彻底防除刺萼龙葵。

(3) 生态防除存在问题。生态防除利用植物替代法限制刺萼龙葵长势、种子产量和密度,但是相当数量的植株仍然能够完成生活史,造成潜在危害。替代植物需要形成规模,才能达到抑制刺萼龙葵的效果,见效慢。而对于农田、路旁、天然草地等生境不适于开展植物替代法,无法抑制刺萼龙葵。故单独使用植物替代法无法彻底防除刺萼龙葵。

表 2 刺萼龙葵现有防除措施的效果评价
Table 2 Effect evaluation of existing control measures on *S. rostratum*

防除措施 Control measures	技术特征 Technical characteristics	防除效果 Control effect	存在问题 Existing problem	基本评价 Evaluation
化学防除 Chemical control	结果前期对植物茎叶喷雾 Spraying stems and leaves of plants before fruiting	>85%	随幼苗长大,防效下降;增加环境危害;对土壤种子无效 Control efficiency decreasing as seedlings growing, increasing environmental hazards, ineffective against soil seeds	见效快,但无法彻底阻止刺萼龙葵扩展 Quick effect but unable to control the <i>S. rostratum</i> from spreading
物理防除 Physical control	用镐头和铁锹将其连根拔起 Pulling roots up with picks and shovels	-	投入大量人力;只适用于小面积防除;对土壤种子无效;需要多次防除 Investing lots of manpower, applying to small area control only, ineffective against soil seeds, requiring several times to control	防除彻底安全、有效,但效率低,无法彻底防除刺萼龙葵 Controlling completely, safely and effectively, but inefficient and unable to control the plant
	在 4 叶前期多次犁翻压埋 Burying plant with plough before 4-leaf stage	-	对土壤种子无效;需要多次防除 Ineffective against soil seeds, requiring several times to control	防除速度快,但遗漏概率大,无法彻底防除刺萼龙葵 Controlling quickly, but more omissions and unable to control the plant
生态防除 Ecological control	利用栽种多年生灌木、牧草逐步排挤替代 Gradually replacing <i>S. rostratum</i> using shrubs and perennial grass	刺萼龙葵单株干质量降低 33%~83%,种群密度降低 49% Decreasing by 33%~83% of dry weight per <i>S. rostratum</i> and by 49% of population density	无法阻止土壤种子库增加;无法在特殊生境实施 Unable to decrease soil seed bank, unable to be used in some habitats	见效慢,无法彻底防除刺萼龙葵 Slow effect, unable to control the plant thoroughly

7 展望

7.1 开展刺萼龙葵入侵风险评估

针对刺萼龙葵危害区不同土地利用类型,开展植被、土壤、土地利用方式和危害程度调查,分析导致刺萼龙葵入侵、扩散的主导因子,以及各个因子之间的关系,筛选能够反映刺萼龙葵入侵风险的评估指标,建立刺萼龙葵风险评估指标体系以及综合评价方法。利用该评价方法,对不同立地类型开展入侵风险综合评价,针对评价结果,采取不同防除措施,落实防治重点,便于防治。

7.2 开展针对性的防治措施

针对不同立地类型采取不同防治策略:(1)农田,可采用化学、物理防除措施相结合方式,利用苗前施用灭生性和封闭性除草剂,苗后施用选择性除草剂,大面积灭杀刺萼龙葵幼苗,对于零星植株采用人工拔除措施;(2)人工草地,可种植苜蓿、冰草、羊草、草木犀和披碱草等替代植物,遏制刺萼龙葵扩散;(3)天然草地,应降低草地载畜量,补播乡土植物,加强围栏封育,遏制刺萼龙葵风力传播;(4)道路和河流,在路边和河岸建立机械围栏和绿篱等阻截带,阻止刺萼龙葵通过河流和交通工具远距离传播;(5)居民区附近的垃圾场、牲畜圈、空地等人员流动大的场所,及时发现并拔除刺萼龙葵。

7.3 加强入侵机制和防控技术研究

目前需要解决的关键理论问题有:(1)刺萼龙葵动物传播机制研究。通过野外观察和控制试验,研究刺萼龙葵能否利用具刺的植株和果实附着在动物体外,通过动物觅食和迁徙等活动进行体外传播;动物能否在无人喂饲的自然环境中,取食成熟的刺萼龙葵种子进行体内传播;不同传播途径对刺萼龙葵自然扩散的贡献。(2)刺萼龙葵人为传播机制研究。开展刺萼龙葵人为传播途径、过程,以及不同传播途径对刺萼龙葵入侵和扩散的贡献等方面研究,明确刺萼龙葵的人为传播机制。(3)不同生境土壤种子库中刺萼龙葵种子活性变化。目前无法确定不同自然生境中土壤种子在不同土壤深度的萌发特性,以及在自然条件下种子活性的持续时间等,亟待开展不同生境土壤种子库中刺萼龙葵种子活性变化研究。(4)研发刺萼龙葵土壤种子库萌发调控技术。利用物理、化学和生态学方法,研发抑制或激发土壤中刺萼龙葵种子萌发技术,以降低土壤中种子活力或使活力丧失,或激发种子同一季节萌发以便集中灭杀。(5)生物防治技术的研发与应用。除了研发引进原产地病原微生物和天敌昆虫外,发掘本土生物防治资源,用于抑制刺萼龙葵生长和扩散;通过基因工程,培育低毒、低入侵力、低化感作用的品种,通过自然杂交和基因表达,降低刺萼龙葵自然种

群的危害。因此,各高校与科研院所应通力合作,在刺萼龙葵入侵、定植和扩散机制和防控技术上开展研究,突破关键技术壁垒,提出最佳防控措施。

参考文献

- 阿丽亚·阿不拉, 2013. 恶性杂草刺萼龙葵的传入与防控. 新疆农业科技 (5): 9.
- 包菡, 傅建伟, 王跃飞, 罗军, 刘丹阳, 邵润蛟, 张雷, 2022. 外来入侵植物刺萼龙葵在内蒙古的分布格局和传播扩散影响因子分析. 环境与发展, 34(6): 104-108.
- 曹新明, 2014. 通州区刺萼龙葵的化学防除试验研究. 农药科学与管理, 35(8): 47-51.
- 车晋滇, 刘全儒, 胡彬, 2006. 外来入侵杂草刺萼龙葵. 杂草科学 (3): 58-60.
- 陈菁, 马方舟, 张彦静, 王晨彬, 徐海根, 2020. 不同生境中刺萼龙葵空间点格局分析. 南方农业学报, 51(2): 342-349.
- 丛建民, 郭娇娜, 陈凤清, 张敏, 梁云凤, 2016. 外来物种刺萼龙葵种子生物学研究. 中国农机化学报, 37(9): 188-194.
- 翟金玲, 2019. 黄花刺茄在张家口的分布、危害与防治. 绿色科技 (11): 147-148.
- 高芳, 徐驰, 周云龙, 2005. 外来植物刺萼龙葵潜在危险性评估及其防治对策. 北京师范大学学报(自然科学版), 41(4): 420-424.
- 谷月, 2017. 外来入侵植物刺萼龙葵研究进展. 农业科技与装备 (3): 18-19.
- 关广清, 高东昌, 李文耀, 叶金, 辛孝贵, 李树德, 1984. 刺萼龙葵——一种检疫性杂草. 植物检疫 (4): 25-28.
- 郭佳, 曹伟, 张悦, 高燕, 王莹莹, 2019. 黄花刺茄在中国东北潜在分布区预测. 草业科学, 36(10): 2476-2484.
- 郭晓艳, 张精哲, 郭卫东, 陆超, 2012. 外来入侵植物——黄花刺茄的生物学特性、危害与防控. 内蒙古林业调查设计, 35(6): 73-75.
- 郭章碧, 张国良, 付卫东, 郑浩, 2011. 外来入侵植物刺萼龙葵的研究概况及展望. 山东农业大学学报(自然科学版), 42(3): 460-464.
- 贺俊英, 哈斯巴根, 孟根其其格, 胡美珠, 2011. 内蒙古新外来入侵植物——黄花刺茄(*Solanum rostratum* Dunal). 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版), 40(3): 288-290.
- 葛金岩, 达古拉, 2022. 铲除外来物种“刺萼龙葵”有效保护生态环境. (2022-08-29)[2022-11-28]. <http://lcj.hlbe.gov.cn/News/show/983073.html>.
- 卡哈尔·哈力克, 李家春, 2013. 托克逊刺萼龙葵发生特点及防治对策. 农村科技 (11): 41-41.
- 寇紫倩, 刘煜光, 彭伟秀, 马毅超, 史宝胜, 2022. 外来植物刺萼龙葵对当地植被组成及多样性的影响. 林业与生态科学, 37(4): 466-472.
- 兰希平, 2012. 辽宁省外来植物刺萼龙葵的入侵警报及防控对策. 河北农业科学, 16(8): 25-27.
- 李霄峰, 2018. 利用高秆作物对刺萼龙葵进行生物防控的方法. 西华师范大学学报(自然科学版), 39(2): 143-146, 152.
- 李亚光, 刘宏静, 2017. 天津市蓟州区主要外来入侵植物调查与防控. 天津农林科技 (6): 27-29.
- 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.
- 庞立东, 孙余卓, 2016. 刺萼龙葵的入侵机理与控制策略研究进展. 中国植保导刊, 36(8): 20-25.
- 曲波, 张延菊, 2009. 刺萼龙葵与龙葵种子的形态比较. 种子, 28(9): 71-73.
- 曲波, 王承旭, 赵丹, 张国良, 付卫东, 陈旭辉, 李天来, 2011a. 3种除草剂对苗期刺萼龙葵的防除试验. 草业科学, 28(4): 614-617.
- 曲波, 祝明炜, 杨红, 李楠, 陈旭辉, 李天来, 2011b. 刺萼龙葵对入侵地土壤可培养真菌多样性影响. 土壤通报, 42(5): 1099-1104.
- 曲波, 祝明炜, 杨红, 李楠, 陈旭辉, 张国良, 付卫东, 李天来, 2011c. 辽宁省刺萼龙葵入侵区和未入侵区土壤真菌多样性研究. 草业学报, 20(3): 298-303.
- 曲智, 2021. 外来入侵植物刺萼龙葵在辽宁地区的发生与防控现状. 农业科技与装备 (5): 14-15.
- 塞依丁·海米提, 努尔巴依·阿布都沙力克, 阿尔曼·解思斯, 邵华, 维尼拉·伊利哈尔, 2019. 人类活动对外来入侵植物黄花刺茄在新疆潜在分布的影响. 生态学报, 39(2): 629-636.
- 邵华, 2015. 外来入侵植物刺萼龙葵的化感作用研究. 种子, 34(8): 101-104.
- 宋国印, 季开芳, 杨敏洁, 2013. 巴林右旗黄花刺茄防治技术. 内蒙古林业 (7): 18.
- 宋珍珍, 谭敦炎, 周桂玲, 2013. 入侵植物黄花刺茄(*Solanum rostratum* Dunal.) 在新疆的分布及其群落特点. 干旱区研究, 30(1): 129-134.
- 苏海英, 努尔江·斯哈克, 玛合帕丽·巴扎拜克, 2022. 新疆外来入侵植物刺萼龙葵入侵状况研究. 新疆农业科技 (1): 21-22.
- 田宗林, 曾继娟, 王娅丽, 朱强, 2021. 入侵植物黄花刺茄在宁夏的分布及风险评估. 宁夏农林科技, 62(8): 61-64.
- 王彩凤, 洪源, 孙亮, 2010. 关于白城发生的刺萼龙葵的生物学特性和防治方法分析. 吉林农业 (11): 83.
- 王海林, 贺俊英, 2017. 入侵植物黄花刺茄种子萌发特性的研究. 内蒙古林业科技, 43(1): 13-18.
- 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.

- 王松, 2018. 刺萼龙葵的传播、危害与防治. *现代农业* (10): 35.
- 王艳辉, 2019. 刺萼龙葵和少花藜藜草入侵及防控现状探讨. *现代农业* (9): 62-63.
- 吴志刚, 方焱, 秦萌, 秦誉嘉, 王聪, 赵谈, 李志红, 2015. 刺萼龙葵对中国玉米产业造成的潜在经济损失评估. *中国农业大学学报*, 20(6): 138-145.
- 向俊, 李翠妮, 刘全儒, 周云龙, 孙乐, 毛春明, 梁前进, 2011. 北京外来入侵植物刺萼龙葵的生态状况. *生态学杂志*, 30(3): 453-458.
- 薛爽, 2015. 外来入侵生物刺萼龙葵的防除. *现代农业* (3): 41-42.
- 晏文峰, 王珏, 郑雅楠, 2022. 重大入侵植物刺萼龙葵的危害现状及防控技术研究进展. *陆地生态系统与保护学报*, 2(3): 73-79.
- 张丽娟, 姜安如, 2018. 入侵植物刺萼龙葵的繁殖保障及其与种群大小的关系. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 54(4): 491-497.
- 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.
- 张瑞海, 宋振, 付卫东, 郢玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良, 2021. 植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响. *环境科学*, 42(1): 433-442.
- 张少逸, 魏守辉, 李香菊, 史致国, 黄红娟, 曹新明, 王金信, 张朝贤, 2011a. 21 种茎叶处理除草剂对刺萼龙葵的生物活性研究. *江西农业大学学报*, 33(6): 1077-1081, 1106.
- 张少逸, 魏守辉, 张朝贤, 黄红娟, 崔海兰, 李香菊, 王金信, 2011b. 刺萼龙葵种子休眠和萌发特性研究进展. *杂草科学*, 29(2): 5-9.
- 赵晓英, 马晓东, 徐郑伟, 2007. 外来植物刺萼龙葵及其在乌鲁木齐出现的生态学意义. *地球科学进展*, 22(2): 167-170.
- 中国农业科学院, 2015. 北方农牧交错带外来有毒杂草——刺萼龙葵综合防控技术研究取得突破. *休闲农业与美丽乡村* (9): 67-67.
- 中华人民共和国农业农村部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2021. 中华人民共和国进境植物检疫性有害生物名录. (2021-04-09) [2022-11-09]. <http://gkb.customs.gov.cn/dzs/2746776/3699554/index.html>.
- 中华人民共和国环境保护部, 中国科学院, 2016. 中国自然生态系统外来入侵物种名单(第四批). (2016-12-20) [2022-11-10]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201612/t20161226_373636.htm.
- 钟良平, 沈文君, 万方浩, 王进军, 2009. 用 GARP 生态位模型预测刺萼龙葵在中国的潜在分布区. *生态学杂志*, 28(1): 162-166.
- 周明冬, 刘淑华, 符桂华, 周泽容, 2009. 有害入侵生物刺萼龙葵在新疆的分布、危害与防治. *新疆农业科技* (1): 56.
- 朱金雷, 刘志民, 2012. 种子传播生物学主要术语和概念. *生态学杂志*, 31(9): 2397-2403.
- ABU-NASSAR J, MATZRAFI M, 2021. Effect of herbicides on the management of the invasive weed *Solanum rostratum* Dunal (Solanaceae). *Plants-Basel*, 10(2): 284.
- EMINNIYAZ A, QIU J, TAN D, BASKIN C C, BASKIN J M, NOWAK R S, 2013. Dispersal Mechanisms of the invasive alien plant species Buffalobur (*Solanum rostratum*) in cold desert sites of Northwest China. *Weed Science*, 61(4): 557-563.
- SHALIMU D, QIU J, TAN D, BASKIN C C, BASKIN J M, 2012. Seed biology of the invasive species Buffalobur (*Solanum rostratum*) in Northwest China. *Weed Science*, 60(2): 219-224.
- SHAO H, ZHENG X W, HAN C X, HU Y X, EMINNIYAZ A, ZHANG C, 2017. Potential allelopathic effects of fungus *Aspergillus flavus* isolated from *Solanum rostratum* Dunal invaded soil. *Allelopathy Journal*, 41(2): 177-187.
- SHAO Q, CHANG L, WEI Z, WEI Y, 2018. Separation of four flavonol glycosides from *Solanum rostratum* Dunal using solvent sublation followed by HSCCC and low column temperature preparative HPLC. *Journal of Chromatographic Science*, 56(8): 695-701.
- OUDTSHOORN K V R V, ROOYEN M W V, 1999. *Dispersal biology of desert plants*. Berlin: Springer-Verlag.
- WEI S, ZHANG C, LI X, CUI H, HUANG H, SUI B, MENG Q, ZHANG H, 2009. Factors affecting Buffalobur (*Solanum rostratum*) seed germination and seedling emergence. *Weed Science*, 57(9): 521-525.
- YU H L, ZHAO X Y, HUANG W D, ZHAN J, HE Y Z, 2021. Drought stress influences the growth and physiological characteristics of *Solanum rostratum* Dunal seedlings from different geographical populations in China. *Frontiers in Plant Science*, 12: 733268.
- ZHAO J, SOLIS-MONTERO L, LOU A, VALLEJO-MARIN M, 2013. Population structure and genetic diversity of native and invasive populations of *Solanum rostratum* (Solanaceae). *PLoS ONE*, 8(11): e79807.
- ZHOU Q, WU J, CUI X, LI X, LIU Z, MUSA A, MA Q, YU H, LIANG W, JIANG S, WANG Y, 2021a. Geographical distribution of the dispersal ability of alien plant species in China and its socio-climatic control factors. *Scientific Reports*, 11(1): 7187.
- ZHOU S, ZHU X, SHI K, HAN C, NIGORA K, ZHANG C, SHAO H, 2021b. Chemical composition and allelopathic potential of the invasive plant *Solanum rostratum* Dunal essential oil. *Flora*, 274: 151730.