

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2024.01.006

PEG 模拟干旱胁迫对加拿大飞蓬种子萌发及幼根生长的影响

吴生海¹, 王玉莹¹, 杨春波¹, 李黎明¹, 张 一¹, 杜凤国^{1,2*}
¹北华大学林学院, 吉林 吉林 132013; ²长白山特色森林资源保育与
高效利用国家林业局重点实验室, 吉林 吉林 132013

摘要:【目的】研究干旱胁迫对加拿大飞蓬种子萌发及幼根生长的影响,为科学防控加拿大飞蓬入侵提供依据。【方法】以当年生加拿大飞蓬成熟种子为材料,分别用蒸馏水(CK)和不同浓度5%、10%、15%、20%、25%的聚乙二醇溶液(PEG)(分别表示轻度、中度、重度、极度和极重度干旱胁迫强度)对加拿大飞蓬种子进行处理。测定日相对发芽率、发芽率、发芽势等指标,分析加拿大飞蓬种子萌发情况;测定幼苗根系宽、根系高、根平均直径、根面积、总根尖数及根分叉数,分析其幼苗根生长情况;并测定种子恢复萌发情况。【结果】无干旱胁迫的加拿大飞蓬种子萌发指标最高,随着干旱胁迫强度增加,种子萌发指标减小,极重度干旱胁迫下加拿大飞蓬种子不萌发。与CK相比,轻度干旱胁迫和重度干旱胁迫对加拿大飞蓬根平均直径影响不显著,但会促进侧根与不定根生长;重度干旱胁迫下,加拿大飞蓬的总根尖数和分叉数显著增加。加拿大飞蓬种子在PEG浓度为20.13%的干旱胁迫下不发芽。种子在极度和极重度干旱胁迫下不萌发,但当水分条件充足时,种子依然具有萌发的能力。【结论】建议在加拿大飞蓬种子尚未成熟前进行人工拔除,或在加拿大飞蓬入侵地种植耐旱强、生长快、根系发达、竞争性强的植物,以控制加拿大飞蓬的生长发育。

关键词: 加拿大飞蓬; 干旱胁迫; 种子萌发; 幼根生长; PEG 溶液



开放科学标识码
(OSID 码)

Effects of PEG simulated drought stress on *Conyza canadensis* seed germination and young root growth

WU Shenghai¹, WANG Yuying¹, YANG Chunbo¹, LI Liming¹, ZHANG Yi¹, DU Fengguo^{1,2*}
¹College of Forestry, Beihua University, Jilin, Jilin 132013, China; ²Key Laboratory of State Forestry Administration on
Conservation and Efficient Utilization of Precious and Rare Forest Resources in Changbai Mountain, Jilin, Jilin 132013, China

Abstract: 【Aim】 We investigated the effect of drought stress on *Conyza canadensis* seed germination and radicle growth, aiming to provide a scientific basis for the prevention and control of *C. canadensis* invasion. 【Method】 Mature *C. canadensis* seeds from the current year were treated with distilled water and polyethylene glycol (PEG) solutions of different mass fractions (5%, 10%, 15%, 20%, and 25%). These mass fractions represented mild, moderate, severe, extreme, and extremely severe drought stress intensities, respectively. We measured various indices, including daily relative germination rate, germination rate, and germination potential, to analyze the seed germination potential of *C. canadensis*. Additionally, we measured seedling root width, root length, average root diameter, root area, total number of root tips, and root branching number to assess radicle growth capacity. Seed recovery germination was also measured. 【Result】 Germination indicators were highest for *C. canadensis* seeds not exposed to drought stress. As drought stress intensity increased, seed germination indicators decreased, and *C. canadensis* seeds did not germinate under extremely severe drought stress. Compared with control seeds, mild drought stress and severe drought stress had no significant effect on the average root diameter of *C. canadensis* but did promote the growth of lateral and indefinite roots. These studies summarize the impact of PEG induced drought stress on the germination and radicle growth of *C. canadensis* seeds. *C. canadensis* seeds do not germinate under drought stress with a PEG mass fraction of 20.13%. Seeds do not germinate under extreme and severe drought stress, but when water conditions become sufficient, seeds regain the ability to germinate. 【Conclusion】 These results suggest manual removal of plants before *C. canadensis* seeds have matured or the planting of drought-resistant, fast-growing, well-rooted, and highly competitive plants in *C. canadensis* invasion areas to control the growth and development of *C. canadensis*.

Key words: *Conyza canadensis*; drought stress; seed germination; young root growth; PEG solution

加拿大飞蓬 *Conyza canadensis* (L.) Cronq. 又称小蓬草、飞蓬、小白酒草, 属菊科 Compositae 飞蓬属 *Conyza* 一年生草本植物, 原产于北美洲。1860 年, 加拿大飞蓬在我国烟台地区首次被发现, 现在我国各地广泛分布, 是一种区域性恶性杂草, 可对入侵区域的生物多样性和作物造成影响, 严重破坏城市绿化景观(万方浩等, 2005; 中国科学院中国植物志编辑委员会, 1978)。目前, 关于加拿大飞蓬的研究主要集中在群落特征(阿腾古丽·艾思木汗, 2021)、胚胎学(黄衡宇等, 2009)、生物学和生态学特性(诸葛晓龙等, 2011)、化感作用(高兴祥等, 2010, 2015)、危害及防治(陈韶军, 2014)等方面。加拿大飞蓬对环境条件的适应力较强, 可以生长在林缘、河边草地等湿生环境, 也可以在旷野、荒地、田边、乡村路旁、硬质封盖地缝等干旱环境下生长。

外来植物的入侵能力与繁殖能力呈正相关, 种子是植物的繁殖器官, 在外来植物的入侵过程中有举足轻重的作用。加拿大飞蓬种子每株产量约为 30~40 万粒(陈韶军, 2014), 数量巨大的种子为其繁殖、传播和扩散提供了支持。植物根系的形态特征在一定程度上受植物生长生境的影响(丁雪丹等, 2019)。入侵植物在入侵过程中会遭遇干旱环境且表现出一定的适应性。干旱环境条件对植物根系性状指标产生影响, 因此, 在研究根系对干旱胁迫响应时, 根长、根表面积和根总尖数等成为主要性状指标(丁国华等, 2020; 聂伟燕等, 2014)。干旱环境会影响加拿大飞蓬种子的萌发, 其根系可对干旱环境做出一定响应(Wensuo & Jianhua, 2008)。但是, 何种程度的干旱条件会对种子萌发有抑制作用, 对根系生长性状产生何种影响尚未明晰。因此, 有必要开展试验, 研究干旱环境对加拿大飞蓬种子和幼根的抑制作用。聚乙二醇(polyethyleneglycol, PEG) 为一种高分子化合物, 无法给种子提供营养物质, 为模拟干旱环境理想的试验材料。目前, PEG 已经在模拟种子干旱胁迫的研究中被广泛应用(李盈, 2014)。但关于干旱胁迫环境下加拿大飞蓬种子萌发情况和幼根在极端干旱情况下的响应, 以及种子在解除干旱胁迫后复萌状况尚未见报道。基于此, 本研究通过设置不同浓度 PEG 模拟加拿大飞蓬种子在不同干旱胁迫环境下的生根及发芽情况, 旨在为探究加拿大飞蓬入侵扩散原因及防控提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料采自吉林省吉林市北华大学校园内经过鉴定的加拿大飞蓬成熟种子。试验用品主要为锥形瓶、培养皿、移液枪、滤纸、Epson Expression 12000XL 植物根系扫描仪; 试验试剂为高锰酸钾、蒸馏水和聚乙二醇。

1.2 试验方法

1.2.1 试验材料处理 配制浓度为 3% 的高锰酸钾溶液并将加拿大飞蓬种子放置在盛有该溶液的烧杯中, 消毒 15 min; 消毒后用蒸馏水对种子进行反复冲洗, 直至冲洗干净后存放于阴凉处自然阴干。

1.2.2 试验设计 在培养皿内放置滤纸(直径 110 mm), 润湿后在每个培养皿内均匀放置 30 粒颗粒饱满的加拿大飞蓬种子。通过预试验得知, 加拿大飞蓬种子在 PEG 浓度为 20% 时几乎不萌发, 参照王玉莹等(2022)关于 PEG 浓度梯度设置方法, 分别将浓度为 5%、10%、15%、20%、25% 的 PEG 溶液和蒸馏水(CK) 各 3 mL 加到培养皿中并使溶液完全浸透滤纸, 5 个浓度梯度分别表示轻度、中度、重度、极度和极重度干旱胁迫强度, 设置 3 个重复。将培养皿放置在恒温生物培养箱中, 温度恒定 24 ℃, 于每日中午 12:00 在每个培养皿中加入 2.5 mL 蒸馏水或对应浓度 PEG 溶液, 使培养皿中的滤纸保持一定的湿润度, 以放入种子当日为第 1 天。以胚根露白为种子发芽标准(吴敏等, 2017), 之后每日 15:00 记录种子发芽数量, 10 d 后结束培养, 并对相关指标进行测定。在种子发芽结束(第 10 天)时从各培养皿中随机选取发芽的 3 株幼苗, 使用 Epson Expression 12000XL 植物根系扫描仪进行根系扫描。种子复萌试验则是将 20%、25% PEG 溶液处理的种子分别使用蒸馏水反复进行冲洗, 直到种子表面无黏腻感为止。清洗后将种子放置在已被蒸馏水完全浸湿的单层滤纸的培养皿中, 将培养皿放入恒温生物培养箱中培养 10 d, 使用与之前相同的培养条件观察种子复萌状况。

1.3 统计分析

加拿大飞蓬种子发芽及根系测定相关指标参考徐振朋等(2015)的方法并稍作修改。使用 Excel 2016 对试验数据进行计算和处理; 使用 SPSS 20 进行显著性分析; 使用 Origin 2022 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 PEG 模拟干旱胁迫条件下加拿大飞蓬种子日相对萌发率变化

由图 1 可知,不同浓度的 PEG 溶液对加拿大飞蓬种子萌发有不同的影响。从整体来看,随着 PEG 浓度的增加种子的萌发率逐渐降低。CK 组加拿大飞蓬种子在第3 天萌发率达到最大值,日相对萌发率为 23.33%;PEG 浓度为 5%处理的加拿大飞蓬种子在第4 天萌发率达到最大值,日相对萌发率为 12.22%;10% PEG 质量分数处理的加拿大飞蓬种子在萌发的第 2 天萌发率达到最高值,日相对萌发率为5.56%;而 20%和 25% PEG 浓度处理的加拿大飞蓬种子均未萌发。

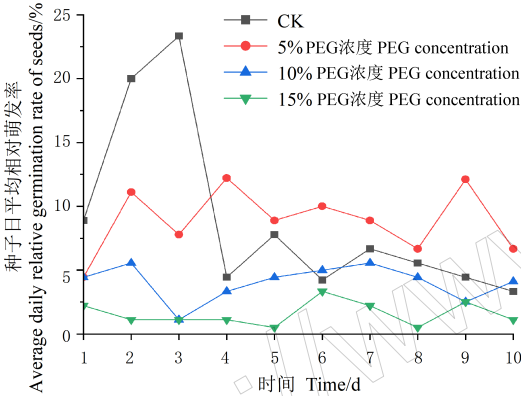


图 1 加拿大飞蓬种子日相对发芽率

Fig.1 Daily relative germination rate of *C. canadensis* seeds

2.2 PEG 模拟干旱胁迫条件下加拿大飞蓬种子萌发指标的变化

如表 1 所示,加拿大飞蓬种子的发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数随着干旱胁迫强度的增加而逐渐降低。发芽率和发芽指数的各组别之间差异显著($P<0.05$);CK 与浓度为 5%、10%、15% PEG 溶液处理的加拿大飞蓬种子发芽势差异显著($P<0.05$),不同浓度 PEG 溶液处理间的差异不显著;CK 与浓度为 10%和 15% PEG 溶液处理的加拿大飞蓬种子活力指数差异显著($P<0.05$),CK 与浓度为 5% PEG 溶液处理的差异不显著,5%和 10% PEG 溶液处理的差异不显著,5%和 15% PEG 溶液处理的差异显著($P<0.05$),10%和 15% PEG 溶液处理的差异不显著。在干旱胁迫条件下,加拿大飞蓬种子的萌发指标均有下降。与对照组相比,PEG 浓度为 5%、10%和 15%的加拿大飞蓬种子发芽率分别下降 8.89%、47.78%和 82.23%;发芽势分别下降 34.44%、41.11%和 47.79%;发芽指数分别下降 3.19%、6.06%和 8.76%;活力指数分别下降 4.93%、6.74%和 10.18%。

PEG 浓度与加拿大飞蓬种子萌发率之间的关系见图 2。拟合方程为 $y = 0.0115x^3 - 0.3204x^2 - 3.0069x + 96.5440$, $R^2 = 0.9964$ 。令 $y = 0$,可得出 $x \approx 20.13$,即 PEG 溶液浓度为 20.13%时的加拿大飞蓬种子发芽率为 0。

表 1 不同浓度聚乙二醇的加拿大飞蓬种子萌发指标

Tab.1 Germination indexes of *C. canadensis* seeds with different mass fractions of PEG

PEG 浓度 PEG mass fractions/%	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index/%	活力指数 Viability index
0 (CK)	96.67±1.92a	52.22±5.88a	10.15±0.49a	11.62±1.80a
5	87.78±1.01b	17.78±2.94b	6.96±0.72b	6.69±1.29ab
10	48.89±2.22c	11.11±4.84b	4.07±0.78c	4.88±1.72bc
15	14.44±1.11d	4.43±1.93b	1.39±0.34d	1.44±0.33c
20	0	0	0	0
25	0	0	0	0

同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。
Date followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level.

2.3 PEG 模拟干旱胁迫条件下加拿大飞蓬幼根相关指标的变化

由表 2 可知,随着 PEG 溶液浓度升高,加拿大飞蓬的根系宽、根系高及总根投影单位面积呈下降趋势,根系平均直径呈先上升后下降的趋势,总根尖数和根系分叉数呈上升趋势。加拿大飞蓬幼根根系宽,CK 与 15% PEG 溶液处理的差异显著($P<$

0.05), 5%和 15% PEG 溶液处理的差异显著($P<0.05$),其余各组之间差异不显著;加拿大飞蓬幼根根系高,CK 与 15% PEG 溶液处理的差异显著($P<0.05$),5%和 15% PEG 溶液处理的差异显著($P<0.05$),其余各组之间差异不显著;加拿大飞蓬幼根总根投影单位面积,CK 与 15% PEG 溶液处理的差异显著($P<0.05$),5%与 15% PEG 溶液处理的

差异显著 ($P<0.05$), 其余各组之间差异不显著; 加拿大飞蓬幼根根平均直径, 5% 与 15% PEG 溶液处理的差异显著 ($P<0.05$), 其余各组之间差异不显著。加拿大飞蓬幼根总根尖数和根分叉数, CK 与 15% PEG 溶液处理的差异显著 ($P<0.05$), 其余各组之间差异不显著。

在干旱胁迫条件下, 加拿大飞蓬幼根生长指标有不同程度的变化。与 CK 相比, PEG 浓度为 5%、10% 和 15% 的加拿大飞蓬幼根的总根投影单位面积平均值分别下降 0.002、0.011 和 0.016 mm; 根系宽平均值分别下降 0.24、0.37 和 0.64 mm; 根系高平均值分别下降 0.09、0.28 和 0.59 mm; 根平均直径平均值先上升 0.08 mm 后分别下降 0.06 和 0.16 mm; 总根尖数平均值分别上升 1.67、2.28 和 8.14 个; 根

分叉数平均值分别上升 0.28、0.73 和 1.87 个。

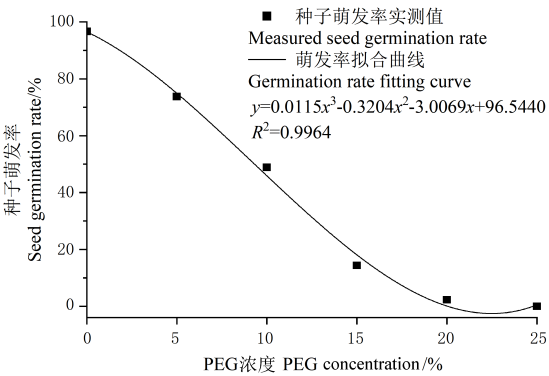


图 2 不同浓度聚乙二醇与加拿大飞蓬种子萌发率之间的关系

Fig.2 Relationship between different mass fractions of PEG and seed germination rate of *C. canadensis*

表 2 不同浓度聚乙二醇对加拿大飞蓬幼根生长的影响
Tab.2 Effects of different mass fractions of PEG on the growth of young roots of *C. canadensis*

PEG 浓度 PEG mass fractions/%	总根投影单位面积 Total root projection unit area/mm ²	根系宽 Root width /mm	平均直径 Average diameter /mm	根系高 Root height /mm	总根尖个数 Total number of root tips	分叉个数 Number of branching
0 (CK)	0.037±0.011a	1.590±0.445a	0.350±0.147ab	1.410±0.359a	7.720±4.212b	0.660±1.154b
5	0.035±0.012a	1.350±0.253a	0.430±0.176a	1.320±0.364a	9.390±6.222ab	0.940±0.416ab
10	0.026±0.007ab	1.220±0.336ab	0.290±0.141ab	1.130±0.365ab	10.000±7.211ab	1.390±0.777ab
15	0.021±0.001b	0.950±0.261b	0.190±0.009b	0.820±0.098b	15.860±9.156a	2.530±2.748a

同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Date followed by different lowercase letters in the same column are significantly different at 0.05 level.

2.4 解除极度、极重度干旱胁迫后加拿大飞蓬种子复萌情况

加拿大飞蓬种子在解除干旱胁迫后仍可继续萌发, 2 种浓度的加拿大飞蓬种子复萌情况见图 3。在浓度 20% PEG 溶液中的加拿大飞蓬种子在解除干旱胁迫后的第 2 天可萌发, 首次萌发率为 5.67%; 种子日萌发率最高在第 5 天, 日萌发率为 25.83%。10 天内累计萌发率为 93.07%; 在浓度 25% PEG 溶液中的加拿大飞蓬种子在解除干旱胁迫后同样在第 2 天可萌发, 首次萌发率为 3.33%。种子日萌发率最高在第 6 天, 为 21.66%。10 d 累计萌发率为 75.75%。

3 讨论与结论

本研究中, 不同干旱胁迫强度对加拿大飞蓬幼根生长指标影响不同。根平均直径随着干旱胁迫程度的增加呈现先增长后下降的趋势, 在达到轻度

胁迫后, 根平均直径开始下降。随 PEG 溶液浓度的增加, 根系面积、根系高、根系宽均下降, 根分叉数和总根尖数升高。

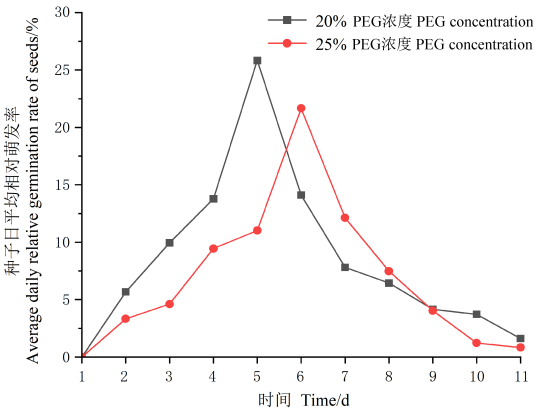


图 3 极度、极重度干旱胁迫解除后加拿大飞蓬种子平均日相对发芽率

Fig.3 Average daily relative germination rate of *C. canadensis* seeds after the lifting of extreme and severe drought stress

解除干旱胁迫后加拿大飞蓬种子仍有复萌能力。在极度和极重度干旱胁迫下加拿大飞蓬种子均不能萌发,但将种子残留的 PEG 溶液清洗干净且培养环境中具有充足水分条件时,种子仍然具有一定的复萌能力。而且随着干旱胁迫程度增加,复萌率逐渐下降,说明种子的复萌能力逐渐减弱。

加拿大飞蓬种子在水分条件良好的情况下具有良好的发芽率及根系生长力。但在干旱缺水情况下,种子萌发受到抑制,根系生长的各项指标如根面积、根尖数、侧根数等也随着环境条件的变化发生改变。Wang *et al.* (2019) 研究表明,PEG 模拟干旱环境影响薏苡 *Coix lacryma-jobi* L. 种子的萌发率,随着 PEG 浓度的增加,薏苡种子的发芽势、发芽指数和活力指数均有不同程度的下降,与本研究结果相似。王玉莹等(2022)研究表明,在 PEG 模拟干旱条件下,三裂叶豚草 *Ambrosia trifida* L. 种子随 PEG 浓度的增加而下降,根系宽、根面积随 PEG 浓度的增加而下降,根分叉数和总根尖数的数量上升,根系相关指标变化与本研究结论一致。齐淑艳等(2014)对牛膝菊 *Galinsoga parviflora* Cav. 进行干旱模拟试验,结果显示,20% 和 25% 浓度 PEG 处理的牛膝菊种子在适宜的条件下可以恢复萌发,但在相同侵种条件下,20% 处理的种子复萌率大于 25% 处理的种子,该结论与本研究的复萌情况相似。

加拿大飞蓬对环境的适应性强,其种子在不同干旱胁迫条件下发芽率不同,但都具备一定的发芽能力,且在解除极度和极重度干旱胁迫条件后,加拿大飞蓬也具有非常强的萌发能力,因此,应加强对加拿大飞蓬的综合防治。建议通过物理方法对小范围的加拿大飞蓬植株进行人工拔除;如果加拿大飞蓬已经形成一定规模的群落,则可通过机械设备进行铲除。也可以因地制宜地选择使用生物防治技术(高尚宾等,2017)阻止加拿大飞蓬的入侵。王宇超等(2023)研究表明,蒿属的一些植物如黄花蒿 *Artemisia annua* Linn. 和猪毛蒿 *Artemisia scoparia* Waldst. & Kit. 可对加拿大飞蓬的生长产生抑制作用。黄花蒿在我国全境都有分布,猪毛蒿也广泛分布于我国西北、华北和东北等地,二者均是防止加拿大飞蓬泛滥的理想植物。此外,有研究表明,白条银纹夜蛾 *Argyrogramma albostriata* Bremer *et* Grey 为寡食性昆虫,其食料植物多为菊科外来植物(陈谦等,2016),可在加拿大飞蓬侵入地投放该昆虫,

即可有效抑制加拿大飞蓬的生长发育,又不会对其野生植物和农作物产生影响,是抑制加拿大飞蓬生长的理想昆虫。综上,可将物理方法和生物方法相结合,防控加拿大飞蓬的入侵、繁殖和扩散。

参考文献

- 阿腾古丽·艾思木汗, 2021. 入侵植物小蓬草在新疆的群落特征及气候变化下的潜在分布估计. 硕士学位论文. 乌鲁木齐: 新疆大学.
- 陈谦, 王强, 何家庆, 2016. 加拿大一枝黄花天敌: 白条银纹夜蛾的寄主专性研究. 北京大学学报(自然科学版), 52(5): 776-784.
- 陈韶军, 2014. 加拿大一枝黄花和小飞蓬入侵潜力综述. 湖北林业科技, 43(1): 24-28.
- 丁国华, 白良明, 曹良子, 周劲松, 王彤彤, 洛育, 夏天舒, 杨光, 谢婷婷, 刘凯, 姜辉, 陈磊, 王荣升, 李坤, 王雪扬, 殷大伟, 湛立伟, 孙世臣, 2020. 干旱胁迫对寒地水稻不同种质资源萌发特性及幼苗生长的影响. 种子, 39(11): 38-43.
- 丁雪丹, 张继红, 梅雅茹, 蔡军火, 高璜, 唐山, 桂丽静, 季巍, 郑育桃, 2019. 干旱胁迫对 5 种花境植物形态的影响. 中南林业科技大学学报, 39(2): 53-58.
- 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.
- 高兴祥, 李美, 房锋, 2015. 小飞蓬不同部位对野燕麦和多花黑麦草的化感作用. 安徽农业科学, 43(15): 114-116.
- 高兴祥, 李美, 高宗军, 赵亚, 张宏军, 李志强, 宋国春, 2010. 外来入侵植物小飞蓬化感物质的释放途径. 生态学报, 30(8): 1966-1971.
- 黄衡宇, 龙华, 李鹏, 2009. 小蓬草的胚胎学研究. 武汉植物学研究, 27(3): 233-241.
- 李盈, 2014. 聚乙二醇(PEG)处理对植物种子的影响. 甘肃农业(14): 65-66.
- 聂伟燕, 赵尊练, 夏云飞, 房清鹏, 胡建超, 郭长美, 史联联, 徐乃林, 郭建伟, 2014. 水分胁迫对线辣椒根系生长及产量的影响. 干旱地区农业研究, 32(4): 30-36.
- 齐淑艳, 段继鹏, 郭婷婷, 董晶晶, 2014. 入侵植物牛膝菊种子萌发对 PEG 模拟干旱胁迫的响应. 生态学杂志, 33(5): 1190-1194.
- 万方浩, 郑小波, 郭建英, 2005. 重要农林外来入侵物种的生物学与控制. 北京: 科学出版社.
- 吴敏, 张文辉, 马闯, 周建云, 2017. 干旱胁迫对栓皮栎种子萌发能力的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 45(5): 91-100.

王宇超, 吕金林, 毛祝新, 李倩, 2023. 本土蒿属植物浸提液对农田入侵杂草生长的化感效应. 西北农业学报, 32(1): 117–129.

王玉莹, 袁梦琦, 吴生海, 兰雪涵, 徐炳芳, 张凯鹏, 徐海峰, 杜凤国, 2022. 干旱胁迫对三裂叶豚草种子萌发及幼根生长的影响. 北华大学学报(自然科学版), 23(4): 449–454.

徐振朋, 宛涛, 蔡萍, 张雅荣, 于静, 孟超, 2015. PEG 模拟干旱胁迫对罗布麻种子萌发及生理特性的影响. 中国草地学报, 37(5): 75–80.

中国科学院中国植物志编辑委员会, 1978. 中国植物志(第五十四卷). 北京: 科学出版社.

诸葛晓龙, 朱敏, 季璐, 崔旭红, 2011. 入侵杂草小飞蓬和

钻形紫菀种子风传扩散生物学特性研究. 农业环境科学学报, 30(10): 1978–1984.

WANG C, ZHOU L B, ZHANG G B, XU Y, GAO X, JIANG N, ZHANG L Y, SHAO M B, 2019. Effects of drought stress simulated by polyethylene glycol on seed germination, root and seedling growth, and seedling antioxidant characteristics in job's tears. *Agricultural Sciences*, 9(8): 991–1006.

WENSUO J, JIANHUA Z, 2008. Stomatal movements and long distance signaling in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 3(10): 772–777.

(责任编辑: 陈晓雯)

(上接第 11 页)

KRITICOS J M, KRITICOS D J, 2021. Pretty (and) invasive: the potential global distribution of *Tithonia diversifolia* under current and future climates. *Invasive Plant Science and Management*, 14(4): 205–213.

LADUKE J C, 1982. Revision of *Tithonia*. *Rhodora*, 84: 453–522.

OBIAKARA M C, FOURCADE Y, 2018. Climatic niche and potential distribution of *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray in Africa. *PLoS ONE*, 13(9): e0202421.

PAREPA M, FISCHER M, BOSSDORF O, 2013. Environmental variability promotes plant invasion. *Nature Communications*, 4(1): 1604.

SHACKLETON R T, NUNDA W, BEALE T, VAN WILGEN B W, WITT A B, 2019. Distribution of invasive alien *Tithonia* (Asteraceae) species in eastern and southern Africa and the socioecological impacts of *T. diversifolia* in Zambia. *Bothalia-African Biodiversity & Conservation*, 49(1): 1–11.

TAGNE A M, MARINO F, COSENTINO M, 2018. *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray as a medicinal plant: a com-

prehensive review of its ethnopharmacology, phytochemistry, pharmacotoxicology and clinical relevance. *Journal of Ethnopharmacology*, 220: 94–116.

TONGMA S, KOBAYASHI K, USUI K, 1999. Allelopathic activity and movement of water leachate from Mexican sunflower *Tithonia diversifolia* (Hemsl.) A. Gray leaves in soil. *Journal of Weed Science and Technology*, 44(1): 51–58.

XU H W, LIU Q, WANG S Y, YANG G S, XUE S, 2022. A global meta-analysis of the impacts of exotic plant species invasion on plant diversity and soil properties. *Science of the Total Environment*, 810: 152286.

YANG J, TANG L, GUAN Y L, SUN W B, 2012. Genetic diversity of an alien invasive plant Mexican sunflower (*Tithonia diversifolia*) in China. *Weed Science*, 60(4): 552–557.

YELENIK S G, D'ANTONIO C M, 2013. Self-reinforcing impacts of plant invasions change over time. *Nature*, 503: 517–520.

(责任编辑: 郑姗姗)