植物资源与环境学报，2025，**34**(1)：114-117
Journal of Plant Resources and Environment

加拿大一枝黄花水浸提液对红盖鳞毛蕨配子体发育的影响

秦　勤，汪玉婕，周婕妮，孙　锐，戴锡玲①
（上海师范大学生命科学学院，上海 200234）

摘要：为探讨加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis* Linn.)对蕨类植物配子体发育的影响，以 0.0 g·mL^{-1}水浸提液为对照，研究 0.8、2.4、4.0 g·mL^{-1}根、茎、叶水浸提液对红盖鳞毛蕨〔*Dryopteris erythrosora*（D. C. Eaton）Kuntze〕孢子萌发和性别分化的影响。结果表明：加拿大一枝黄花根、茎和叶水浸提液处理组的红盖鳞毛蕨孢子萌发率均低于对照组，且随着水浸提液质量浓度的增加，孢子萌发率逐渐降低，其中，4.0 g·mL^{-1}叶水浸提液处理组在培养 7~29 d 的孢子萌发率总体显著低于对照组，且在所有处理组中均最低。与对照组相比，各部位水浸提液处理组均使雄配子体占比上升、雌配子体和两性配子体占比下降，在同一质量浓度水浸提液处理下，茎水浸提液处理组的雄配子体占比总体最高，其中，4.0 g·mL^{-1}茎水浸提液处理组的雄配子体占比最高，达 80.4%；0.8 g·mL^{-1}根、茎、叶水浸提液处理组的 3 种配子体占比与对照组均无显著差异；4.0 g·mL^{-1}根、茎、叶水浸提液处理组的 3 种配子体占比与对照组总体差异显著。整体而言，加拿大一枝黄花叶水浸提液对红盖鳞毛蕨孢子萌发的抑制作用较强，茎水浸提液对性别分化的影响较强，地上部分水浸提液对孢子萌发的抑制作用以及对性别分化的影响强于地下部分，且影响呈现剂量效应关系。

关键词：加拿大一枝黄花；水浸提液；红盖鳞毛蕨；孢子萌发；性别分化

中图分类号：Q945.78；S682.35；S451　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674-7895(2025)01-0114-04
DOI：10.3969/j.issn.1674-7895.2025.01.13

Effects of water extracts of *Solidago canadensis* on gametophyte development of *Dryopteris erythrosora*

QIN Qin, WANG Yujie, ZHOU Jieni, SUN Rui, DAI Xiling① (College of Life Sciences, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, **34**(1): 114-117

Abstract: To investigate the effect of *Solidago canadensis* Linn. on the gametophyte development of ferns, 0.0 g·mL^{-1} water extract was taken as the control, and the effects of 0.8, 2.4, and 4.0 g·mL^{-1} water extracts from its roots, stems, and leaves on spore germination and sexual differentiation of *Dryopteris erythrosora* (D. C. Eaton) Kuntze were studied. The results show that the spore germination rates of *D. erythrosora* in water extract treatment groups of roots, stems, and leaves of *S. canadensis* are all lower than those in the control group, and with the increase of mass concentration of the water extract, the spore germination rates gradually decrease, among which, the spore germination rate in 4.0 g·mL^{-1} leaf water extract treatment group is significantly lower than that in the control group in general during the cultivation period of 7-29 d, and the spore germination rate is the lowest in all treatment groups. Compared with the control group, the water extract treatment group of each part all result in an increase in the proportion of male gametophytes and a decrease in the proportions of female and hermaphroditic gametophytes, and under water extract treatment at the same mass concentration, the proportions of male gametophytes in stem water extract treatment groups are generally the highest, in which, the proportion of male gametophytes in 4.0 g·mL^{-1} stem water extract treatment group is the highest, reaching 80.4%; there are no significant differences in proportions of the three types of gametophytes between 0.8 g·mL^{-1} root, stem, and leaf water extract treatment groups and the control group; the differences in proportions of the three types of gametophytes are significant in general between 4.0 g·mL^{-1} root, stem, and leaf water extract treatment groups and the control group. Overall, the inhibitory effect of leaf water extracts of *S. canadensis* on spore germination is relatively strong, the effect of stem water extracts on sex differentiation of *D. erythrosora* is relatively strong, the water extracts of the above-ground parts have a stronger inhibitory effect on spore germination and impact on sex differentiation compared with the under-ground parts, and these effects exhibit a dose-effect relationship.

Key words: *Solidago canadensis* Linn.; water extract; *Dryopteris erythrosora* (D. C. Eaton) Kuntze; spore germination; sexual differentiation

---

收稿日期：2024-08-22
基金项目：上海市绿化和市容管理局科学技术项目(G242415)
作者简介：秦　勤(2003—)，女，上海人，本科生，主要从事蕨类植物配子体发育研究。
①通信作者 E-mail：daixiling2010@shnu.edu.cn
引用格式：秦　勤，汪玉婕，周婕妮，等. 加拿大一枝黄花水浸提液对红盖鳞毛蕨配子体发育的影响[J]. 植物资源与环境学报，2025，34(1)：114-117.

加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis* Linn.)原产于加拿大和美国,由于具有化感作用和繁殖迅速等特点,已入侵包括中国在内的亚洲大部分地区、欧洲中西部和大洋洲等地,成为世界性入侵杂草[1-2]。加拿大一枝黄花的幼苗和根系可以分泌酮类、醇类、醛类、酚类、萜类、生物碱等次生代谢产物,激发受体植物氧自由基相关基因的表达,导致植物叶绿素含量下降,光合作用能力减弱,从而抑制周围植物的生长,如明显抑制植物种子的发芽率、发芽势、活力指数以及根长和苗高,且加拿大一枝黄花不同部位的化感作用强度存在差异[3],随着水浸提液浓度的增加,化感效应逐渐增强[4]。加拿大一枝黄花中的次生代谢产物还可以在短时间内改变土壤理化性质及微生物群落结构,使其在与相邻本土植物竞争时表现出更强的优势[5-6]。

野外调查发现,部分蕨类植物的自然分布区位于加拿大一枝黄花的入侵区和潜在扩散区中,但加拿大一枝黄花是否对蕨类植物的生长发育产生影响尚未可知。红盖鳞毛蕨〔*Dryopteris erythrosora* (D. C. Eaton) Kuntze〕隶属于鳞毛蕨属(*Dryopteris* Adanson),与加拿大一枝黄花生长条件相似[7],是加拿大一枝黄花入侵区和潜在扩散区的典型蕨类植物,具有重要的生态学意义。本研究初步探究加拿大一枝黄花不同部位水浸提液对红盖鳞毛蕨孢子萌发和性别分化的影响,以期为加拿大一枝黄花的危害范围及生物胁迫研究积累基础资料。

1　材料和方法

1.1　材料

2022 年 8 月,在上海师范大学植物园(北纬 30.8°、东经 121.5°)随机采集具成熟孢子且孢子囊未开裂的红盖鳞毛蕨叶片,置于信封中,待孢子囊开裂后收集孢子,保存于 4 ℃冰箱中。2023 年 5—6 月,在上海师范大学生物基地(北纬 31.2°、东经 121.4°)随机采集加拿大一枝黄花,每次取 10 株。

1.2　方法

1.2.1　*加拿大一枝黄花水浸提液制备及水浸提液 Knop's 培养基配制*　参考杨海艳等[8]的方法配制不同质量浓度加拿大一枝黄花各部位水浸提液。将整株加拿大一枝黄花去除病、老、残组织后用自来水洗净,蒸馏水冲洗,滤纸吸干水分。截取根(R)、茎(S)、叶(L) 中段部分各 16 g,切成长约 3 cm 的小块(段),浸泡于 200 mL 蒸馏水中。在 130 r · min^{-1}的摇床上振荡 24 h,用 3 层纱布过滤,得到质量浓度 8 g · mL^{-1}的水浸提液母液。将各部位水浸提液母液用蒸馏水进行梯度稀释,得到质量浓度 0.8、2.4 和 4.0 g · mL^{-1}水浸提液。以不含水浸提液(0.0 g · mL^{-1}水浸提液)的 Knop's 培养基(pH 5.5)为对照,参考张开梅等[9]的方法配制成含水浸提液的 Knop's 培养基(pH 5.5)。共 10 种培养基,即 10 种处理。

1.2.2　*红盖鳞毛蕨孢子接种与培养*　根据孙锐等[10]的方法制备红盖鳞毛蕨的无菌孢子悬液,将无菌孢子悬液于 4 000 r · min^{-1}离心 3 min,弃去上清液,将孢子以 30 cm^{-2}左右的密度均匀接种于上述培养基。放入 ZRX-300E 型光照培养箱(杭州钱江仪器设备有限公司)内培养,培养温度 25 ℃,光照时间 18 h · d^{-1},光照度约 2 000 lx,空气相对湿度 60%~70%。各处理 3 个重复,每个重复 6 个培养皿(直径 6 cm)。

1.2.3　*红盖鳞毛蕨孢子萌发和性别分化观察*　孢子产生初生假根视为萌发。在培养 5 d 开始计数,每 2 d 计数 1 次,直至萌发率不再上升。在每个培养皿中随机选取 5 个视野,统计萌发情况,计算每个培养皿中的孢子萌发率[11],结果以平均值计。培养 60 d,在各培养皿中随机选取 5 个视野,统计雌配子体、雄配子体和两性配子体的个数,并计算各自占比,结果以平均值计。

1.3　数据处理和分析

使用 EXCEL 2021 软件处理数据,使用 SPSS 26.0 软件进行单因素方差分析和 Duncan's 多重比较。

2　结果和分析

2.1　加拿大一枝黄花水浸提液对红盖鳞毛蕨孢子萌发的影响

观察和统计结果(表 1)显示:加拿大一枝黄花根、茎、叶水浸提液处理组红盖鳞毛蕨孢子的萌发趋势与对照(0.0 g · mL^{-1}水浸提液)组基本一致,随着培养时间增加孢子萌发率逐渐升高,培养 29 d 各处理组的孢子萌发率不再升高。2.4 g · mL^{-1}根水浸提液、4.0 g · mL^{-1}根水浸提液、4.0 g · mL^{-1}茎水浸提液、4.0 g · mL^{-1}叶水浸提液处理组的孢子在培养 7 d 开始萌发,其余处理组和对照组均在培养 5 d 开始萌发。

总体上看,0.8 g · mL^{-1}根、茎、叶水浸提液处理组在培养 7~25 d 的孢子萌发率与对照组无显著差异,2.4 g · mL^{-1}根、茎、叶水浸提液处理组在培养 7~17 d 的孢子萌发率与对照组无显著差异,4.0 g · mL^{-1}根、茎、叶水浸提液处理组在培养 17~29 d 的孢子萌发率与对照组差异显著,且 4.0 g · mL^{-1}叶水浸提液处理组在培养 7~29 d 的孢子萌发率在所有处理组均最低,在培养 29 d 的孢子萌发率较对照组降低了 47.3%,但与 4.0 g · mL^{-1}根、茎水浸提液处理组无显著差异。可见,加拿大一枝黄花叶水浸提液对红盖鳞毛蕨孢子萌发的抑制作用强于根和茎水浸提液。

2.2　加拿大一枝黄花水浸提液对红盖鳞毛蕨性别分化的影响

结果(表 2)显示:加拿大一枝黄花根、茎、叶水浸提液对 3 种配子体占比存在不同程度的影响。与对照(0.0 g · mL^{-1}水浸提液)组相比,各部位水浸提液处理组均使雄配子体占比上升、雌配子体和两性配子体占比下降。0.8 g · mL^{-1}根、茎、叶浸提液处理组的 3 种配子体占比与对照组均无显著差异;2.4 g · mL^{-1}根、叶水浸提液处理组的 3 种配子体占比与对照组总体无显著差异,2.4 g · mL^{-1}茎水浸提液处理组的 3 种配子体占比与对照组均差异显著;4.0 g · mL^{-1}根、叶水浸提液处

表1 加拿大一枝黄花不同部位水浸提液对红盖鳞毛蕨孢子萌发的影响($\bar{X}\pm SD$)[1)]

Table 1 Effects of water extracts from different parts of *Solidago canadensis* Linn. on spore germination of *Dryopteris erythrosora* (D. C. Eaton) Kuntze ($\bar{X}\pm SD$)[1)]

处理 Treatment	不同培养时间下的孢子萌发率/% Spore germination rate at different culture times												
	5 d	7 d	9 d	11 d	13 d	15 d	17 d	19 d	21 d	23 d	25 d	27 d	29 d
CK	8.0±0.0a	18.1±7.8a	19.3±6.4a	20.9±6.1a	21.6±5.9a	24.5±3.6a	27.5±2.2a	29.3±8.1a	29.6±4.9a	31.0±6.9a	33.4±3.6a	36.6±1.7a	37.2±8.4a
T_{1R}	6.0±1.0ab	16.2±2.6ab	18.7±2.9a	20.5±4.8ab	21.4±4.7a	22.2±5.2a	26.0±2.9a	26.1±1.8abc	26.5±1.3ab	27.0±2.0abcd	29.7±3.2ab	31.3±3.6b	32.8±1.9ab
T_{2R}	0.0±0.0d	12.7±0.0abc	16.9±0.8ab	16.7±2.4ab	18.2±1.7a	20.5±0.7a	21.6±1.2ab	21.7±0.0bcde	22.6±2.7bcd	22.9±2.6cdef	23.0±4.4cd	24.8±3.0de	27.7±1.0bc
T_{3R}	0.0±0.0d	9.9±1.5c	14.7±0.7abc	15.8±2.8ab	17.0±2.2a	17.7±3.3a	18.0±0.6b	18.7±0.6de	19.9±2.2cd	20.3±2.5ef	21.3±4.0cd	25.0±1.0de	25.7±1.5cd
T_{1S}	1.7±0.1cd	16.7±0.1ab	17.7±0.8ab	18.3±0.2ab	20.4±0.6a	22.2±1.7a	24.6±1.1ab	26.2±0.7abc	27.1±0.7ab	27.7±0.6abc	28.5±0.5ab	29.1±0.2bcd	29.6±0.4bc
T_{2S}	1.3±1.5d	12.1±4.1bc	17.3±1.5ab	18.2±1.5ab	19.0±0.3a	20.9±1.7a	21.6±1.5ab	22.4±1.2bcde	23.6±0.9bc	24.4±1.2bcde	25.0±0.8bc	25.7±0.4cde	26.4±0.3bc
T_{3S}	0.0±0.0d	8.9±0.4c	13.6±2.3bc	15.9±1.0ab	17.2±2.0a	17.5±0.2a	18.1±0.1b	20.0±0.9cde	20.9±0.5cd	22.0±0.7def	23.0±0.6cd	23.8±0.2e	24.6±1.3cd
T_{1L}	3.8±0.2bc	17.0±0.5ab	17.9±1.8ab	18.9±1.2ab	20.7±1.7a	23.2±6.6a	26.9±1.0a	27.1±5.3ab	28.8±5.6a	28.9±0.1ab	29.4±0.3ab	29.7±4.5bc	31.5±4.6abc
T_{2L}	2.1±3.6cd	16.3±1.3ab	17.2±4.5ab	17.4±5.0ab	19.3±1.7a	20.1±7.0a	24.6±1.4ab	24.7±3.9abcd	25.0±1.9abc	25.3±4.3bcde	25.5±4.7bc	26.7±2.2cde	28.0±5.8bc
T_{3L}	0.0±0.0d	8.2±1.1c	10.2±1.8c	14.0±3.3b	15.7±3.3a	17.4±1.8a	17.7±0.3b	17.8±1.5e	18.1±0.9d	18.4±0.2f	18.6±1.5d	19.2±2.2f	19.6±0.1d

1) CK: 0.0 g·mL^{-1}水浸提液(对照)0.0 g·mL^{-1} water extract (the control); T_{1R}, T_{2R}, T_{3R}: 分别表示0.8、2.4、4.0 g·mL^{-1}根水浸提液 Representing 0.8, 2.4, and 4.0 g·mL^{-1} root water extract respectively; T_{1S}, T_{2S}, T_{3S}: 分别表示0.8、2.4、4.0 g·mL^{-1}茎水浸提液 Representing 0.8, 2.4, and 4.0 g·mL^{-1} stem water extract respectively; T_{1L}, T_{2L}, T_{3L}: 分别表示0.8、2.4、4.0 g·mL^{-1}叶水浸提液 Representing 0.8, 2.4, and 4.0 g·mL^{-1} leaf water extract respectively. 同列中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$).

表2 加拿大一枝黄花不同部位水浸提液对红盖鳞毛蕨性别分化的影响($\bar{X}\pm SD$)[1)]

Table 2 Effects of water extracts from different parts of *Solidago canadensis* Linn. on sex differentiation of *Dryopteris erythrosora* (D. C. Eaton) Kuntze ($\bar{X}\pm SD$)[1)]

处理 Treatment	各类型配子体占比/% Proportion of each type of gametophyte		
	雌配子体 Female gametophyte	雄配子体 Male gametophyte	两性配子体 Hermaphroditic gametophyte
CK	14.9±1.0a	26.8±1.0c	58.4±9.0a
T_{1R}	9.8±0.5abc	34.3±2.9bc	56.0±3.1a
T_{2R}	10.1±1.4abc	37.3±2.2bc	52.6±3.5a
T_{3R}	2.7±0.4d	63.7±15.5ab	33.7±15.8ab
T_{1S}	10.7±3.8abc	47.7±6.8abc	41.7±10.1ab
T_{2S}	7.0±3.2bcd	75.7±2.4a	17.3±1.5b
T_{3S}	3.4±3.0d	80.4±1.7a	16.2±1.4b
T_{1L}	11.3±1.5ab	49.2±2.4abc	39.5±3.3ab
T_{2L}	5.6±2.3cd	49.5±2.2abc	45.0±3.4ab
T_{3L}	5.9±0.4bcd	66.6±7.0ab	27.5±6.9ab

1) CK: 0.0 g·mL^{-1}水浸提液(对照)0.0 g·mL^{-1} water extract (the control); T_{1R}, T_{2R}, T_{3R}: 分别表示0.8、2.4、4.0 g·mL^{-1}根水浸提液Representing 0.8, 2.4, and 4.0 g·mL^{-1} root water extract respectively; T_{1S}, T_{2S}, T_{3S}: 分别表示0.8、2.4、4.0 g·mL^{-1}茎水浸提液 Representing 0.8, 2.4, and 4.0 g·mL^{-1} stem water extract respectively; T_{1L}, T_{2L}, T_{3L}: 分别表示0.8、2.4、4.0 g·mL^{-1}叶水浸提液 Representing 0.8, 2.4, and 4.0 g·mL^{-1} leaf water extract respectively. 同列中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$).

理组的雌配子体和雄配子体占比与对照组差异显著,两性配子体占比与对照组无显著差异,4.0 g·mL^{-1}茎水浸提液处理组的3种配子体占比与对照组均差异显著。在相同质量浓度下,仅2.4 g·mL^{-1}根水浸提液处理组与茎水浸提液处理组间的雄配子体和两性配子体占比差异显著,且茎水浸提液处理组的雄配子体占比总体最高。可见,加拿大一枝黄花茎水浸提液对红盖鳞毛蕨性别分化的影响强于根和叶。

3 讨论和结论

研究结果显示:在培养29 d,加拿大一枝黄花根、茎、叶水浸提液各处理组的孢子萌发率不再升高,除了0.8 g·mL^{-1}根、叶水浸提液处理组与对照(0.0 g·mL^{-1}水浸提液)组无显著差异外,其余处理组的孢子萌发率均显著低于对照组,且随着水浸提液质量浓度的增加,孢子萌发率的降幅越大。说明加拿大一枝黄花水浸提液可明显抑制红盖鳞毛蕨孢子萌发,且抑制效果随水浸提液质量浓度的增加逐渐增强。与王家春等[12]对东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense* Lu)以及张冬雨等[13]对小麦(*Triticum aestivum* Linn.)的研究结果一致,说明加拿大一枝黄花对不同种类植物的影响普遍存在剂量效应关系。加拿大一枝黄花对受体植物的影响存在"低促高抑"的现象[14],该现象被认为是一种毒物兴奋效应,以应对环境条件的变化[15]。而本研究结果显示:红盖鳞毛蕨孢子萌发在不同处理条件下均受到抑制,孢子萌发率均低于对照组,这可能是由于实验设置的水浸提液最低质量浓度仍高于蕨类植物产生毒物兴奋效应的阈值。说明加拿大一枝黄花对不同物种的影响不尽相同。加拿大一枝黄花抑制红盖鳞毛蕨孢子萌发,可能与其产生的咖啡酸甲酯和咖啡酸乙酯能使细胞分裂基因 *cdc2a* 和细胞增殖标记基因 *pcna1* 表达量显著降低[16]有关。

性别分化观察发现,加拿大一枝黄花水浸提液对红盖鳞毛蕨性别分化有明显影响,产生的雄配子体比例明显上升,而两性配子体及雌配子体占比下降,进而影响其有性生殖。这可能是由于加拿大一枝黄花中的香豆素可促进蕨类精子器的形成、成熟或数量增加[17-18]。当处于干旱胁迫、养分胁迫、光照条件弱、接种密度过大等不利条件下,蕨类植物会通过提高雄配子体的分化比例来适应不利环境条件[19-20]。本研究中,

4.0 g · mL^{-1}加拿大一枝黄花茎水浸提液处理组的雄配子体占比最高,达 80.4%。可见,加拿大一枝黄花水浸提液处理对红盖鳞毛蕨配子体发育产生了胁迫,且以 4.0 g · mL^{-1}茎水浸提液处理的胁迫程度最强。

加拿大一枝黄花不同部位所含化感物质的种类、浓度、分泌方式、释放途径等存在差异[12,21],如加拿大一枝黄花中酚类化合物的含量及种类呈现叶最多、茎次之、根最少的现象[22]。本研究结果表明:加拿大一枝黄花不同部位水浸提液对红盖鳞毛蕨配子体发育的影响不同,叶水浸提液对红盖鳞毛蕨孢子萌发的抑制作用较强,茎水浸提液对雄配子体的分化影响较大,说明加拿大一枝黄花地上部分水浸提液对于红盖鳞毛蕨配子体发育的影响强于地下部分。与周嘉龙等[14]、Yu 等[23]的结论相符,推测是由于加拿大一枝黄花地上部分所含或分泌的化感物质含量更高,或化感物质种类更多,亦或化感物质更易溶出[24]。

综上所述,0.8~4.0 g · mL^{-1}加拿大一枝黄花根、茎、叶水浸提液可抑制红盖鳞毛蕨的孢子萌发,使雄配子体占比上升,雌配子体和两性配子体占比下降,从而影响有性生殖。加拿大一枝黄花地上部分水浸提液对孢子萌发的抑制作用以及对性别分化的影响强于地下部分,且影响呈现剂量效应关系。

参考文献:

[1] YE X Q, YAN Y N, WU M, et al. High capacity of nutrient accumulation by invasive *Solidago canadensis* in a coastal grassland [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 575.

[2] 许京璇, 薛丽芳, 强　胜. 原产地和入侵地不同细胞型加拿大一枝黄花幼苗期形态特征的比较[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(1): 44-51.

[3] 魏丹丹, 刘嘉艺, 徐明明, 等. 外来入侵植物加拿大一枝黄花的研究进展与资源化利用策略[J]. 中国现代中药, 2023, 25(9): 1853-1865.

[4] 白　羽, 黄莹莹, 孔海南, 等. 加拿大一枝黄花化感抑藻效应的初步研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(7): 1296-1303.

[5] LIAO M, XIE X M, PENG Y, et al. Characteristics of soil microbial community functional and structure diversity with coverage of *Solidago canadensis* L. [J]. Journal of Central South University, 2013, 20: 749-756.

[6] 彭鑫怡, 李永春, 王秀玲, 等. 植物入侵对土壤微生物的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(5): 1019-1027.

[7] 常　悦, 李玉静, 李周旭, 等. 基于 Maxent 和 ArcGIS 加拿大一枝黄花适生区预测[J]. 农学学报, 2024, 14(3): 40-47.

[8] 杨海艳, 祝　云, 徐成东, 等. 肿柄菊水提液对蜈蚣蕨孢子萌发的影响[J]. 西南农业学报, 2012, 25(4): 1449-1454.

[9] 张开梅, 沈　羽, 方炎明, 等. 三叶鬼针草茎水提液对井栏边草配子体的化感响应[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2016, 37(6): 603-608.

[10] 孙　锐, 包家茜, 曹建国, 等. 乌蕨卵细胞发育的超微结构观察[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(6): 80-86.

[11] 汪　盛, 刘恩德, 夏　漪, 等. 重金属铅对 3 种蕨类植物孢子萌发和配子体发育的影响[J]. 植物研究, 2015, 35(4): 499-503.

[12] 王家春, 陈应华, 吴常文. 加拿大一枝黄花水浸提液对东海原甲藻的化感作用研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2016, 35(1): 36-40.

[13] 张冬雨, 金　燕, 吕　波, 等. 加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis* L.)水浸提液对小麦的化感作用及机制[J]. 南京农业大学学报, 2014, 37(5): 87-92.

[14] 周嘉龙, 许哲伦, 仲珊珊, 等. 铜铅复合污染下加拿大一枝黄花根叶复合化感效应[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2023, 44(6): 557-565.

[15] AGATHOKLEOUS E. Environmental hormesis, a fundamental non-monotonic biological phenomenon with implications in ecotoxicology and environmental safety [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 148: 1042-1053.

[16] 杨浩娜, 周成言, 邬腊梅, 等. 植物化感物质的作用机理研究进展[J]. 湖南农业科学, 2022(3): 108-112.

[17] 宋莹莹, 高　晶, 戴绍军. 蕨类植物性别分化对环境的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5030-5038.

[18] 周建余. 群体感应信号分子对加拿大一枝黄花的生态作用及机制研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023: 44.

[19] 王玉玲, 陈清西. 植物生殖发育及环境胁迫相关特异蛋白质的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2006, 8(2): 32-35.

[20] 孙　鑫, 朱旋律, 张　莹, 等. 光照强度对水蕨孢子萌发及配子体性别分化的影响[J]. 植物研究, 2010, 30(2): 170-173.

[21] 吴　娜, 梅　艳, 石艳春, 等. 入侵植物加拿大一枝黄花的化学成分及其生物活性综述[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 5-9.

[22] 王建方, 陈佳铭, 吴德峰, 等. 加拿大一枝黄花不同部位酚类化合物的含量测定[J]. 中国中医药信息杂志, 2011, 18(2): 59-61.

[23] YU Y L, CHENG H Y, XU Z L, et al. Invasion intensity modulates the allelopathic impact of *Solidago canadensis* L. leaves and roots against *Lactuca sativa* L. during germination and early seedling stage [J]. International Journal of Environmental Research, 2022, 16: 48.

[24] MEDINA-VILLAR S, USCOLA M, PÉREZ-CORONA M E, et al. Environmental stress under climate change reduces plant performance, yet increases allelopathic potential of an invasive shrub[J]. Biological Invasions, 2020, 22(9): 1-23.

(责任编辑: 郭严冬)