

自毒和森林凋落物化感作用对极小种群野生植物大树杜鹃种子萌发的影响

刘芳黎, 张 越, 吴富勤, 杨 柳, 龙 波, 申仕康*

(云南大学 生命科学学院, 昆明 650091)

摘 要: 为了探讨立地条件对极小种群野生植物大树杜鹃的种子萌发和种群自然更新的作用机制, 该试验对大树杜鹃鲜叶、枯叶和植株冠幅下不同距离(0、2、5 和 10 m)的森林凋落物以及林下苔藓等浸提液对其种子萌发的影响, 以及自毒与森林凋落物的化感作用对大树杜鹃种群自然更新的影响进行分析。结果表明: (1) 大树杜鹃鲜叶和枯叶浸提液对种子萌发均具有抑制作用, 但枯叶浸提液对其种子萌发率和萌发的抑制强度较小; 而种子萌发率和萌发指数均随鲜叶浸提液浓度增加而显著降低, 当鲜叶浸提液浓度为 10% 时, 种子萌发率仅为 8%, 表明大树杜鹃具有较强的自毒作用。 (2) 大树杜鹃植株冠幅下不同距离的森林凋落物对其种子的萌发具有化感作用, 但不同距离的影响不同; 距离冠幅 5 m 的凋落物对其种子萌发的抑制作用最强, 在该距离下的凋落物浸提液浓度为 2% 时大树杜鹃种子萌发率和萌发指数分别显著降低为 77.33% 和 21.35, 较对照分别显著降低 18.32% 和 20.5%。 (3) 大树杜鹃林下苔藓对大树杜鹃种子萌发有一定的抑制作用, 但作用并不明显。研究认为, 大树杜鹃具有较强的自毒作用, 可能进一步影响其种群自然更新; 森林凋落物对大树杜鹃种子萌发具有一定的化感抑制效应, 推测立地条件可能会通过影响其种子萌发而进一步影响种群的自然更新。

关键词: 大树杜鹃; 自毒作用; 森林凋落物; 化感作用; 种群自然更新

中图分类号: Q945.7 **文献标志码:** A

Effect of Autotoxicity and Litter Allelopathy on Seed Germination of *Rhododendron protistum* var. *giganteum*, a Plant Species with Extremely Small Populations in China

LIU Fangli, ZHANG Yue, WU Fuqin, YANG Liu, LONG Bo, SHEN Shikang*

(School of Life Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: In order to elucidate the effect mechanism of stand characteristics on seed germination and natural regeneration of *Rhododendron protistum* var. *giganteum*, we investigated the effect of fresh and litter leaf, forest litter and forest moss aqueous extracts on its seed germination percentage and germination index. We also discussed the autotoxicity and litter allelopathy effects on the species' natural regeneration. The results indicated that: (1) both fresh and litter leaf aqueous extracts inhibited seed germination, the inhibiting effect of litter leaf aqueous extracts is relatively lower than that of fresh leaf. Seed germination percentage and germination index dramatically decreased with increasing fresh leaf aqueous extracts concentrations. When the fresh leaf aqueous extracts concentration reached 10%, seed germination percentage

收稿日期: 2017-03-11; 修改稿收到日期: 2017-05-07

基金项目: 国家自然科学基金(31360155, 31560224)

作者简介: 刘芳黎(1992—), 女, 硕士研究生, 主要从事植物种质保护研究。E-mail: 2316202260@qq.com.

* 通信作者: 申仕康, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事植物种质保护与系统进化研究。E-mail: ssk168@ynu.edu.cn

decreased to only 8%. Thus, the species has obvious autotoxicity effect on its germination. (2) Forest litters collected under the plant canopy with different distance (0, 2, 5 and 10 m) to adult individuals have allelopathic effects on seed germination. However, the effect varied among different distances and forest litter aqueous extracts concentrations. Forest litters collected from canopy 5 m distance have the strongest allelopathic effects on seed germination percentage and germination index. When the concentration of forest litter aqueous extracts reached to 2%, seed germination percentage and germination index decreased to 77.33% and 21.35, respectively. These indicators significantly reduced 18.32% and 20.5% compared to control, respectively. (3) The aqueous extracts of moss which collected under the plant canopy also inhibited seeds germination percentage of *R. protistum* var. *giganteum*. Based on above results, we concluded that the plant has autotoxicity effects on its seed germination, which may further influence its natural regeneration. The forest litters also have inhibited allelopathic effects on seed germination. Thus, we can reasonable to assume that the autotoxicity and allelopathic effects would affect the natural regeneration of *R. protistum* var. *giganteum* populations.

Key words: *Rhododendron protistum* var. *giganteum*; autotoxicity; allelopathy; forest litter; natural regeneration

植物化感作用(allelopathy)是植物在生长过程中将所产生的化感物质释放到环境中,对周围其他植物产生直接或间接的影响。化感作用是植物之间相互交流信息的一种方式,是生态系统内普遍存在的现象,几乎所有的植物都能产生含有化感作用的物质成分,并能对其他物种产生不同程度的影响^[1],植物通过化感作用可以提高自身对其他个体的竞争力^[2],这种相互作用是植物在长期进化过程中对光、水分、养分和空间的竞争等生态位要素所采取的生存策略。自毒现象(autotoxicity)是化感作用的重要形式之一,它是植物通过释放次生代谢物对自身或种内其它植物产生危害的一种现象,是植物适应种内竞争的结果^[3]。目前,国内外学者已经在湿地、森林以及淡水等生态系统广泛开展了植物化感作用研究^[4],并且明确提出,化感作用在植物自然更新^[3]、种群结构调节^[5]、群落演替、环境胁迫抵御^[6]、生物入侵^[7-8]以及重要化学信息传递等关键生态过程均发挥着至关重要的作用^[9-10]。

大树杜鹃 [*Rhododendron protistum* var. *giganteum* (Forrest) D. F. Chamberlain] 为杜鹃花科(Ericaceae)杜鹃属常绿杜鹃亚属最高大的多年生乔木,被誉为“杜鹃王”,大树杜鹃目前仅在云南省高黎贡山国家级自然保护区的原始森林中有分布^[11],因此,鉴于该植物的分布局限性及其种群和植株数量的稀少,大树杜鹃已经被《中国植物红皮书》列为Ⅱ级保护植物,并被国家林业局列入《全国极小种群野生植物拯救保护工程规划(2011—2015年)》的极小种群野生植物名录^[11]。Shen 等研究发现,立地条件可以通过物理作用影响大树杜鹃的种

子萌发和幼苗建成,进而影响其种群自然更新^[12],但是,立地条件特别是森林凋落物、林下苔藓等是否通过化感作用影响其自然更新仍然未知。鉴于此,本文通过室内培养皿滤纸培养鉴定的方法,研究大树杜鹃是否具有自毒效应,以及林下凋落物、苔藓等是否对其种子萌发具有明显的化感作用,并探讨其对极小种群野生植物大树杜鹃种群自然更新的作用,为物种的种群保护提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料采集

大树杜鹃分布于云南高黎贡山国家级自然保护区,2014年10月,在其分布地大河头居群(25°46′42″N;98°42′29″E)采集了大树杜鹃成年植株冠幅(4 m×5 m)下距母株不同距离[0(冠幅内)、2、5和10 m]的表层凋落物,同时采集大树杜鹃新鲜叶片、枯叶及其群落林下苔藓,大树杜鹃种子亦同时采集,带回实验室备用。

1.2 浸提液制备

室内采用电子天平($d=0.01$)称取野外所采集的大树杜鹃冠幅林下不同距离的凋落物、大树杜鹃新鲜叶、枯叶和苔藓各50 g,粉碎后加入500 mL蒸馏水黑暗条件下充分振荡浸提24 h,过滤后制成浓度为1:10(w/v)的母液,将母液稀释成浓度分别为1%、2%、5%和10%的溶液用于实验,对照组(CK)则用蒸馏水。

1.3 种子萌发试验

采用滤纸培养皿法进行种子萌发试验,选取饱满均匀的大树杜鹃种子用体积分数为10%的 H_2O_2

表面消毒 15 min,然后用蒸馏水冲洗 5~6 次。将已消毒的种子放置于垫有滤纸的培养皿(9 cm)中,每培养皿放置 50 粒种子。将不同浓度下的浸提液各取 5 mL 分别加入置有种子的培养皿,每个处理设有 3 个重复组。对照组(CK)加入等量的蒸馏水,置于上海博迅程控光照培养箱 BSG-400(RH 75%、温度 22 ℃、14 h 光照/10 h 黑暗、光照强度 15 000 lx)中萌发,每 24 h 观察并记录种子萌发情况。

1.4 数据统计与分析

参考文献资料^[13],本研究采用最终萌发率(germination percentage, GP)和萌发指数(germination index, GI)2 个指标,具体计算公式为:最终萌发率(GP)=最终萌发种子数/供试种子数×100%;萌发指数(GI)=∑Gt/Dt,其中 Gt 为在 t 日的发芽数,Dt 为相应的发芽日数。采用化感效应指数(RI)度量不同浸提液对大树杜鹃种子萌发率的影响,计算公式为^[14]: $RI=1-C/T$, $T>C$;或 $RI=T/C-1$, $T<C$,公式中 C 为对照值,T 为处理值。当 RI>0 时,表示促进作用;当 RI<0 时,表示抑制作用。RI 的绝对值表示作用强度的大小。

GP 和 GI 以各重复下的平均萌发百分数±标准差表示,在评估种子萌发对不同浸提液的响应时,用 SPSS 13.0(SPSS Inc. Chicago, Illiong)统计软件进行方差分析(ANOVA)以确定种子萌发在不同试验处理下是否存在差异,同时对差异达到显著的变量采用最少显著差数法(LSD)进行了均数的多重比较,选择概率为 0.05 的显著性水平。

2 结果与分析

2.1 大树杜鹃叶片浸提液对其种子萌发的影响

大树杜鹃新鲜叶片和枯叶浸提液对种子萌发的

影响如表 1 所示,大树杜鹃种子萌发率和萌发指数均随新鲜叶片浸提液浓度的增加而显著降低($P<0.01$),当浸提液浓度达到 10% 时,种子萌发率和萌发指数仅分别为 8.00% 和 0.93,化感效应指数亦表明,大树杜鹃新鲜叶片 RI 值介于-0.915 5~-0.105 6 之间(表 2),即具有抑制作用,故大树杜鹃新鲜叶片具有明显的自毒效应。大树杜鹃种子萌发率和萌发指数整体上均随枯叶浸提液浓度增加而降低,不同浸提液浓度下种子萌发率介于 86.00%~90.00% 之间,种子萌发指数介于 20.68~27.37 之间,方差分析表明,枯叶浸提液对种子萌发率和萌发指数均没有显著影响($P>0.05$)。通过种子萌发率化感效应指数亦发现,枯叶 RI 值介于-0.091 6~-0.049 3 之间(表 2),表明大树杜鹃枯叶具有一定的抑制作用,但是抑制强度较小。

2.2 大树杜鹃林下凋落物浸提液对其种子萌发的影响

大树杜鹃林下凋落物对种子萌发的影响如表 3 所示,整体来看,大树杜鹃植株冠幅内(0 m)及冠幅不同距离(2~10 m)的表层凋落物浸提液对其种子萌发率和萌发指数有一定的抑制作用,但不同距离和不同浸提液浓度的影响不同。大树杜鹃冠幅内(0 m)的凋落物浸提液对种子萌发率和萌发指数影响呈不规则变化,不同浓度处理下,种子萌发率和萌发指数分别介于 77.33%~96.00% 和 20.14~32.20 之间。而在距离冠幅 2 m 的凋落物浸提液处理下,大树杜鹃种子萌发率和萌发指数均随浓度增加而表现出下降趋势,但不同浓度凋落物浸提液对种子萌发率和萌发指数与对照组相比,均未达到显著性差异($P>0.05$)。大树杜鹃植株距离冠幅 5 m 和 10 m 的浸提液处理试验表明,不同浓度浸提液处理下种

表 1 大树杜鹃鲜叶和枯叶浸提液对种子萌发的影响

| 浸提液浓度 Concentration/% | 种子萌发率(GP) Seed germination percentage /% | | 种子萌发指数(GI) Seed germination index | |
|--------------------------|---|----------------|--------------------------------------|----------------|
| | 鲜叶 Fresh leaf | 枯叶 Litter leaf | 鲜叶 Fresh leaf | 枯叶 Litter leaf |
| | | | | |
| CK(0) | 94.67±2.31a | 94.67±2.31a | 32.56±0.99a | 32.56±0.99a |
| 1 | 84.67±3.06b | 90.00±10.39a | 27.36±0.02b | 21.04±7.54a |
| 2 | 81.33±11.02b | 82.67±9.02a | 23.85±2.11c | 20.68±10.98 a |
| 5 | 18.67±7.57c | 88.00±2.00a | 2.03±0.76d | 24.22±6.61a |
| 10 | 8.00±5.29c | 86.00±12.00a | 0.93±0.60d | 27.37±2.40a |

注:同列不同小写字母表不同浓度差异显著($P<0.05$);下同
Note: different letters (a—d) in each column are significantly different at the 0.05 level of probability; The same as below

表 2 大树杜鹃叶片、森林凋落物及林下苔藓浸提液对种子萌发率的化感效应指数(RI)

Table 2 The allelopathy response index (RI) of leaf, forest litter and moss under the canopy aqueous extracts on the seed germination percentage of *R. protistum* var. *giganteum*

| 浓度 Concentration /% | 新鲜叶片 Fresh leaf | 枯叶 Litter leaf | 苔藓 Moss | 森林凋落物/ Forest litter | | | |
|---------------------------|--------------------|-------------------|------------|----------------------|----------|----------|----------|
| | | | | 0 m | 2 m | 5 m | 10 m |
| 1 | −0.105 6 | −0.049 3 | −0.133 8 | −0.182 3 | −0.063 4 | 0.03 4 | −0.126 8 |
| 2 | −0.140 9 | −0.056 4 | −0.105 6 | 0.013 9 | −0.183 2 | −0.183 2 | −0.126 8 |
| 5 | −0.802 8 | −0.070 5 | −0.133 8 | −0.084 5 | −0.274 6 | −0.049 3 | −0.098 7 |
| 10 | −0.915 5 | −0.091 6 | −0.133 8 | −0.035 3 | −0.225 4 | −0.014 2 | −0.049 3 |

表 3 不同距离森林凋落物浸提液对大树杜鹃种子萌发的影响

Table 3 Effect of forest litters aqueous extracts collected from different distances to the adult tree on the seed germination of *R. protistum* var. *giganteum*

| 浸提液浓度 Concentration /% | 种子萌发率 Seed germination percentage / % | | | | 种子萌发指数 Seed germination index | | | |
|------------------------------|--|--------------|--------------|--------------|----------------------------------|---------------|--------------|--------------|
| | 0 m | 2 m | 5 m | 10 m | 0 m | 2 m | 5 m | 10 m |
| CK(0) | 94.67±2.31ab | 94.67±2.31a | 94.67±2.31a | 94.67±2.31a | 32.56±0.99a | 32.56±0.99a | 32.56±0.99ab | 32.56±0.99a |
| 1 | 77.33±15.14b | 88.00±17.44a | 98.00±3.46a | 82.67±17.01a | 20.14±11.86a | 22.30±15.40ab | 33.33±1.78a | 28.35±5.42ab |
| 2 | 96.00±2.00a | 77.33±8.08a | 77.33±12.06b | 82.67±10.07a | 32.20±1.12a | 19.91±7.35ab | 21.35±1.80c | 18.20±11.18b |
| 5 | 90.00±12.49ab | 68.67±22.30a | 90.00±3.46a | 85.33±8.32a | 26.43±9.23a | 12.29±4.37b | 29.12±2.96b | 25.25±8.39ab |
| 10 | 91.33±8.33ab | 73.33±15.14a | 93.33±5.03a | 90.00±2.00a | 31.10±3.73a | 21.28±4.88ab | 31.18±2.47ab | 28.25±3.85ab |

子萌发率和萌发指数整体上低于对照组(CK),方差分析则表明,与对照组相比,5 m 浸提液处理的种子萌发率和萌发指数均达到了显著性差异($P<0.05$)。

2.3 大树杜鹃林下苔藓浸提液对种子萌发的影响

林下苔藓是影响物种自然更新的重要因素之一,大树杜鹃林下苔藓浸提液对种子萌发率和萌发指数的影响如表 4 所示,不同浓度苔藓浸提液处理下,大树杜鹃种子萌发率和萌发指数分别介于 82.00%~84.67%和 25.21~25.98 之间,方差分析表明,不同浓度之间差异并不显著($P>0.05$),但与对照组相比,不同浓度苔藓浸提液降低了种子萌发率和萌发指数;此外,种子萌发率化感效应指数亦表明,不同浓度苔藓浸提液的 RI 值介于−0.133 8~−0.105 6之间(表 2),故表明大树杜鹃林下苔藓对其种子萌发具有一定的抑制作用。

3 讨 论

杜鹃属植物不仅是森林植被的重要组成成分,也是中国高山、亚高山生态系统的重要建群种类,其种群自然更新、群落演替与结构维持是区域生物多样性保护和生态系统稳定的关键^[15]。研究表明,杜鹃属植物群落会通过化感作用抑制其林下植物的自然更新^[16-17],李朝婵等用固相微萃取气相色谱质谱联用技术分析也证实了 3 种高山杜鹃(马缨杜鹃 *R.*

表 4 林下苔藓浸提液对大树杜鹃种子萌发的影响

Table 4 Effect of moss under the canopy on the seed germination of *R. protistum* var. *giganteum*

| 浸提液浓度 Concentration /% | 种子萌发率 Seed germination percentage / % | 种子萌发指数 Seed germination index |
|------------------------------|---|-------------------------------------|
| CK(0) | 94.67±2.31a | 32.56±0.99a |
| 1 | 88.00±6.00a | 28.35±5.42ab |
| 2 | 88.67±6.11a | 18.20±11.18b |
| 5 | 84.67±21.57a | 25.25±8.39ab |
| 10 | 82.00±9.17a | 28.25±3.85ab |

delavayi、迷人杜鹃 *R. agastum* 和露珠杜鹃 *R. irroratum*) 可以通过释放以萜烯类、酚类、酯类、有机酸类、烷烃类及其衍生物为主的化感物质来影响群落内其他植物的生长和发育^[18]。种子萌发是植物生活史的重要阶段,化感物质可通过影响种子萌发而影响种群的建立和更新,因此,通过研究物种立地条件对种子萌发的影响机制,可以有效探究影响物种自然更新的因素,为物种保护和种群恢复提供参考。Shen 等^[12]对大树杜鹃种子生理生态研究发现,立地条件可以通过物理作用影响大树杜鹃的种子萌发与幼苗建成。本研究通过室内种子萌发鉴定的方法,对大树杜鹃的自毒效应及其林下立地条件中的凋落物与苔藓的化感作用分析结果表明,大树杜鹃新鲜叶片具有明显的自毒效应,林下凋落物和

苔藓亦对其种子萌发具有化感作用,表明大树杜鹃林下立地条件可以通过化感作用影响其种子萌发和种群自然更新。

植物自毒作用是森林生态系统中普遍存在的现象,其常常导致群落生存力下降和种群自然更新障碍^[19]。大树杜鹃新鲜叶片和枯叶浸提液对其种子萌发均具有一定的抑制作用,种子萌发率和萌发指数随新鲜叶片浸提液浓度的增加而显著降低($P < 0.01$),表明新鲜叶片不仅影响种子的有效出苗,同时亦延长种子萌发的时间。种子萌发时间往往影响其幼苗的存活与建成,一般认为,早期萌发的种子具有更强的竞争力和适应性^[12, 20]。蒋有绪^[21]研究亦发现,新凋落杜鹃叶浸提液能延长冷杉种子发芽时间,降低冷杉种子发芽率。林思祖等对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)的自毒效应研究发现,杉木鲜叶的水浸提液对种子萌发率和萌发时间均具有显著的抑制效应^[22];潘存德等^[23]研究认为,天山云杉(*Picea schrekiana*)针叶中存在化感物质并影响其种子萌发率和萌发指数,故提出自毒效应是导致该物种种群自然更新困难的主要因素;张珊珊等^[3]亦证实了濒危植物云南蓝果树(*Nyssa yunnanensis*)具有自毒效应并影响其种群自然更新;周艳等^[24]研究发现,贵州百里杜鹃景区迷人杜鹃(*R. agastum*)枯叶浸提液对其种子萌发和幼苗生长具有抑制作用,并提出该物种具有化感自毒作用。因此,大树杜鹃鲜叶和枯叶浸提液对其种子萌发率和萌发指数的抑制效应亦表明该物种具有较强的自毒效应,并可能进一步影响其种群自然更新。

杜鹃属植物可以通过产生萜烯类、萘类、酚类、酯类、醇类、苯类、有机酸类、烷烃类及其衍生物等系列化感物质来影响自身及群落内植物的种子萌发和幼苗建成^[16, 18, 24]。但是,植物不同器官及其发育阶段的化感作用各不相同,这种差异主要与其本身含有化感物质的含量和种类有关。刘龙昌等^[25]对裂叶月见草(*Oenothera laciniata*)的化感作用研究发现,新鲜叶片和根内化感物质含量最多,枯叶内含量最少。曹子林等^[26]亦证实了紫茎泽兰(*Eupatorium adenophorum*)鲜叶的化感作用强于枯叶。此外,植物新鲜叶片的代谢活动较枯叶更强,能产生较多的化感物质,叶片在凋落前亦可通过新陈代谢将包括化感物质在内的系列物质转移到存活的组织(如鲜叶)中,减少枯叶中营养物质或化感物质的含量^[27]。本研究中,大树杜鹃新鲜叶片浸提液对其种子萌发的自毒作用较枯叶浸提液更为显著,推测认为可能

是由于大树杜鹃新鲜叶片中所含化感物质含量较高所致,但是大树杜鹃鲜叶与枯叶自毒作用的化感物质种类及含量仍然有待进一步分离鉴定。

森林凋落物是森林生态系统的重要组成部分之一,其在维持森林生态系统物质循环、种群自然更新与群落稳定等方面发挥着不可替代的作用^[28-30]。研究表明,森林凋落物可以通过挥发、淋溶、分泌和植物残体腐解等途径将其所含有的化感物质释放进入环境中,调节种群自然更新和群落物种组成并进一步影响群落演替等关键生态学过程^[30-33]。本研究中,大树杜鹃植株冠幅下不同距离的表层森林凋落物和苔藓浸提液对其种子萌发具有一定的化感作用,但是不同距离和不同浓度处理下,其化感作用的表现形式(抑制或促进)不同,大部分试验处理下,凋落物浸提液对种子萌发率和萌发指数的影响表现为抑制作用,但是在冠幅以内(0m)2%的凋落物浸提液和距离冠幅5m时1%的凋落物浸提液对大树杜鹃种子萌发率和萌发指数具有一定的促进作用,这与张珊珊等对云南蓝果树凋落物影响其自然更新的研究结论较相似,即不同凋落物的位置对其种子萌发的化感作用不同^[34]。此外,负密度制约假说亦提出,植物群落内的化感作用、资源竞争及有害生物侵害会影响不同扩散距离种子的萌发与幼苗建成^[35]。故推测大树杜鹃种群的负密度制约效应亦可能导致不同距离凋落物对其种子萌发的化感作用差异。罗侠对天山云杉的研究亦发现,不同浓度的凋落物浸提液对种子萌发的化感效应具有明显的差异性,甚至在一定的浓度范围内,浸提液的抑制作用会转变为促进作用^[36]。凋落物对种群自然更新的影响既有物理作用,同时也具有化学作用^[30],Shen等^[12]前期研究发现,过厚的凋落物会抑制大树杜鹃的种子萌发,本研究中,凋落物对大树杜鹃的种子萌发具有抑制作用,故认为,立地条件可以通过物理和化感作用共同影响大树杜鹃种子萌发和幼苗建成,并进一步影响种群自然更新。

综上所述,大树杜鹃叶片具有较强的自毒作用,且鲜叶自毒效应强于枯叶,大树杜鹃植株冠幅下及距离冠幅0~10m内的森林凋落物浸提液、苔藓浸提液均对大树杜鹃种子萌具有一定的化感作用,整体上表现为抑制作用。因此,基于试验研究提出自毒和化感作用可能是影响大树杜鹃种群数量稀少和种群自然更新障碍的因素之一。但是,鉴于本研究仅通过室内模拟探讨了其对种子萌发的影响,故建议今后应加强自然条件下大树杜鹃自毒和化感

作用对其种子萌发和幼苗建成的作用机制及效应研究,并揭示其对物种濒危的影响,为物种的种质保

护、种群恢复与管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] 彭少麟,邵 华. 化感作用的研究意义及发展前景[J]. 应用生态学报, 2001,**12**(5): 780-786.
PENG S L, SHAO H. Research significance and foreground of allelopathy[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, **12**(5): 780-786.
- [2] INDERJIT, WESTON L A. Are laboratory bioassays for allelopathy suitable prediction of field responses? [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2000,**26**(9): 2 111-2 118.
- [3] 张珊珊,向振勇,康洪梅,等. 云南蓝果树对种子萌发及幼苗生长的自毒效应[J]. 林业科学研究, 2014,**27**(4): 502-507.
ZHANG S S, XIANG Z Y, KANG H M, *et al.* Autotoxicity of *Nyssa yunnanensis* on seed germination and seedling growth [J]. *Forest Research*, 2014,**27**(4): 502-507.
- [4] 鲜 鸣,陈海东,邹惠仙,等. 淡水水生植物化感作用研究进展[J]. 生态学杂志, 2005,**24**(6): 664-670.
XIAN M, CHEN H D, ZOU H X, *et al.* Research advance in allelopathy of aquatic macrophytes[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005,**24**(6): 664-670.
- [5] EMDEN H F V. Host plant-aphidophaga interactions[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 1995,**52**(1): 3-11.
- [6] LORETO F, PINELLI P, MANES F, *et al.* Impact of ozone on monoterpene emissions and evidence for an isoprene-like antioxidant action of monoterpenes emitted by *Quercus ilex* leaves[J]. *Tree Physiology*, 2004,**24**(4): 361.
- [7] ROSCHINA V V, ROSCHINA V D. The Excretory Function of Higher Plants[M]. Berlin Heidelberg: Springer Press, 1993.
- [8] 许桂芳,刘明久,晁慧娟. 入侵植物小蓬草化感作用研究[J]. 西北农业学报, 2007, **16**(3): 215-218.
XU G F, LIU M J, CHAO H J. Study on allelopathy of the invasive plant *Conyza canadensis* [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2007,**16**(3): 215-218.
- [9] 柴 强,黄高宝. 植物化感作用的机理,影响因素及应用潜力[J]. 西北植物学报, 2003,**23**(3): 509-515.
CHAI Q, HUANG G B. Review on action mechanism affecting factors and applied potential of allelopathy[J]. *Acta Bot Boreali. -Occidenalin Sinica*, 2003,**23**(3): 509-515.
- [10] POPHOF B, SANGE G, ABRELL L. Volatile organic compounds as signals in a plant-herbivore system: electrophysiological responses in olfactory sensilla of the moth *Cactoblastis cactorum*[J]. *Chemical Senses*, 2005,**30**(1): 51-57.
- [11] WU F Q, SHEN S K, ZHANG X J, *et al.* Genetic diversity and population structure of an extremely endangered species: the world's largest *Rhododendron*[J]. *AoB Plants*, 2015,**7**(82): 1-8.
- [12] SHEN S K, WU F Q, YANG G S, *et al.* Seed germination and seedling emergence in the extremely endangered species *Rhododendron protistum* var. *giganteum* -the world's largest Rhododendron[J]. *Flora -Morphology, Distribution, and Functional Ecology of Plants*, 2015,**21**(6): 65-70.
- [13] SHEN S K, WU F Q, YANG G S, *et al.* Seed germination and seedling emergence of *Euryodendron excelsum* H. T. Chang; implications for species conservation and restoration [J]. *Plant Species Biology*, 2016,**31**(3): 233-239.
- [14] BRUCE W G, RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1988,**14**(1): 181-187.
- [15] 张 越,申仕康,张新军,等. 云南 10 种杜鹃属植物的叶片覆被物特征及其系统学意义[J]. 西北植物学报, 2016, **36**(11): 2 198-2 206.
ZHANG Y, SHEN S K, ZHANG X J, *et al.* Leaf abxial surface scale and indumentum characteristics and their systematic significance of 10 *Rhododendron* species in Yunnan Province [J]. *Acta Bot Boreali. -Occidenalin Sinica*, 2016,**36**(11): 2 198-2 206.
- [16] NILSEN E T, WALKER J F, MILLER O K, *et al.* Inhibition of seedling survival under *Rhododendron maximum* (Ericaceae): could allelopathy be a cause? [J]. *American Journal of Botany*, 1999,**86**(11): 1 517-1 525.
- [17] CHOU S C, HUANG C H, HSU T W, *et al.* Allelopathic potential of *Rhododendron formosanum* Hemsl in Taiwan[J]. *Allelopathy Journal*, 2010,**25**(1): 73-91.
- [18] 李朝婵,乙 引,全文选,等. 野生高山杜鹃群落林内自然挥发的化感成分[J]. 林业科学, 2015,**51**(12): 35-44.
LI C C, YI Y, QUAN W X, *et al.* The natural volatile components of allelochemicals in the wild alpine *Rhododendron* community[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015,**51**(12): 35-44.
- [19] 王 强,阮 晓,李兆慧,等. 植物自毒作用及针叶林自毒研究进展[J]. 林业科学, 2007,**43**(6): 134-142.
WANG Q, RUAN X, LI Z H, *et al.* Autotoxicity of plants and research of Coniferolls forest autotoxicity [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007,**43**(6): 134-142.
- [20] VERD Ú M & TRAVEST A. Early emergence enhances

plant fitness: a phylogenetically controlled meta-analysis[J]. *Ecology*,2005,**86**(6), 1 385-1 394.

[21] 蒋有绪. 川西亚高山冷杉林枯枝落叶层的群落学作用[J]. 植物生态学报, 1981,**5**(2): 4-13.

JIANG Y X. Phytocenological role of forest floor in subalpine fir forests in western Sichuan Province[J]. *Acta Phytocologia Geobotanica Sinica*, 1981,**5**(2): 4-13.

[22] 林思祖, 黄世国, 曹光球, 等. 杉木自毒作用的研究[J]. 应用生态学报, 1999,**10**(6): 661-664.

LIN S Z, HUANG S G, CAO G Q, *et al.* Autointoxication of *Cunninghamia lamceolata*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999,**10**(6): 661-664.

[23] 潘存德, 王 强, 阮 晓, 等. 天山云杉针叶水提取物自毒效应及自毒物质的分离鉴定[J]. 植物生态学报, 2009,**33**(1): 186-196.

PAN C D, WANG Q, RUAN X, *et al.* Biological activity and quantification of potential autotoxins from the leaves of *Picea Schrenkiana*[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009,**33**(1): 186-196.

[24] 周 艳, 陈 训, 韦小丽, 等. 凋落物对迷人杜鹃幼苗更新和种子萌发的影响[J]. 林业科学, 2015,**51**(3): 65-74.

ZHOU Y, CHEN W, WEI X L, *et al.* Effects of litter on the seedling regeneration and seed germination of *Rhododendron agastum*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015,**51**(3): 65-74.

[25] 刘龙昌, 董雷鸣. 外来物种裂叶月见草化感作用[J]. 中国农学通报, 2010,**26**(16): 256-261.

LIU L C, DONG L M. Allelopathic effects of the alien species *Oenothera laciniata* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010,**26**(16): 256-261.

[26] 曹子林, 王晓丽, 郭盘江, 等. 紫茎泽兰植株不同部位及浓度的水提液对蓝桉种子萌发和幼苗生长的化感效应[J]. 西部林业科学, 2009,**38**(1): 91-95.

CAO Z L, WANG X L, GUO P J, *et al.* Allelopathy effect of aqueous extracts of *Eupatorium adenophorum* of different parts with different concentrations on seed germination and seedling growth of *Eucalyptus globulus*[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2009,**38**(1): 91-95.

[27] 廖周瑜, 侯玉平, 赵则海, 等. 五爪金龙化感效应研究?. 凋落物的化感潜力[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008,**47**(4): 63-67.

LIAO Z Y, HOU Y P, ZHAO Z H, *et al.* Study on allelopathy effects of *Ipomoea cairica*. Allelopathic potentials of litters[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008,**47**(4): 63-67.

[28] BLAGOVESHCHENSKII Y N, BOGATYREV L G, SOLOMATOVA E A, *et al.* Spatial variation of the litter thickness in the forests of Karelia[J]. *Eurasian Soil Science*, 2006,**39**(9): 925-930.

[29] SAYER E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems[J]. *Biological Reviews*, 2006,**81**(1): 1-31.

[30] 羊留冬, 杨 燕, 王根绪, 等. 森林凋落物对种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2010,**29**(9): 1 820-1 826.

YANG L D, YANG Y, WANG G X, *et al.* Effects of forest litter on seed germination and seedling growth[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010,**29**(9): 1 820-1 826.

[31] CHOU C H. Roles of allelopathy in plant biodiversity and sustainable agriculture [J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 1999,**18**(5): 609-636.

[32] PENG S, LIU Q. The dynamics of forest litter and its responses to global warming[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002,**22**(9): 1 534-1 544.

[33] 宋新章, 江 洪, 张慧玲, 等. 全球环境变化对森林凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2008,**28**(9): 4 414-4 423.

SONG X Z, JIANG H, ZHANG H L, *et al.* A review on the effects of global environment change on litter decomposition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,**28**(9): 4 414-4 423.

[34] 张珊珊, 向振勇, 康洪梅, 等. 云南蓝果树凋落物对其天然更新的影响[J]. 东北林业大学学报, 2016,**44**(1): 6-10.

ZHANG S S, XIANG Z Y, KANG H M, *et al.* Effects of *Nyssa yunnanensis* litter on its nature regeneration[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2016,**44**(1): 6-10.

[35] 祝 燕, 米湘成, 马克平. 植物群落物种共存机制:负密度制约假说[J]. 生物多样性, 2009,**17**(6): 594-604.

ZHU Y, MI X C, MA K P. A mechanism of plant species co-existence: the negative density-dependent hypothesis [J]. *Biodiversity Science*, 2009,**17**(6): 594-604.

[36] 罗 侠. 天山云杉自毒作用的生化机制研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2006.

(编辑:潘新社)