

迷人杜鹃群落天然更新障碍的化感研究

李朝婵^{1,2}, 钱沉鱼¹, 全文选¹, 唐凤华¹, 许塔艳¹, 欧静³

(1. 贵州师范大学 贵州省山地环境重点实验室, 贵州 贵阳 550001; 2. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550018; 3. 贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为明确影响野生迷人杜鹃群落天然更新的化学因子, 探明迷人杜鹃各土壤层中的化感物质状况。通过发芽试验比较了不同土壤层的水浸提液处理的迷人杜鹃种子的萌发状况, 采用衍生化气质联用法(GC-MS)分析鉴定不同层次土壤中的化感物质。实验结果表明: 迷人杜鹃不同浸提液对种子萌发的化感效应差异显著, 其中枯枝落叶层对种子萌发的抑制作用最强, 显著抑制种子萌发; 枯枝落叶层、腐殖质层和土壤层中所含的化感物质总量表现为枯枝落叶层>腐殖质层>土壤层, 各土壤层中的化感物质均以棕榈酸含量最高。

关键词: 迷人杜鹃; 化感效应; 群落更新; 化感作用

中图分类号: S793.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-923X(2018)09-0009-05

Study on allelopathy of natural regeneration of *Rhododendron agastum* community

LI Chaochan^{1,2}, QIAN Chenyu¹, QUAN Wenxuan¹, TANG Fenghua¹, XU Tayan¹, OU Jing³

(1. Key Laboratory of Mountainous Environmental Protection of Guizhou, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, Guizhou, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550018, Guizhou, China; 3. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: To find out the allelochemicals in the soil layers of *Rhododendron agastum* community, the natural regeneration barrier was explained with chemical factors. The seed germination treated with aqueous extracts from different soil layers were compared through the germination test, and the GC-MS method was used to identify the allelochemicals in different soil layers. The results showed that the allelopathic effects of different layer extracts were significant, and the inhibitory effect of litter layer was the strongest and seed germination was inhibit considerably. The humus layer and the soil layer had some inhibitory effect on the seed germination, which was not significant compared with the control. The total amount of allelochemicals contained in litter layer, humus layer and soil layer was litter layer > humus layer > soil layer, and the relative content of palmitic acid was the highest in each layer.

Keywords: *Rhododendron agastum*; allelopathic effect; community germination; allelopathy

植物化感作用是当前化学生态学研究的热点, 森林植物通过向环境中释放化学物质, 从而抑制林冠层下及周围植物的生长和发育^[1-4], 其中优势树种产生的植物毒素不断积累从而影响土壤并抑制林下植物生长^[5-7]。前人对野生杜鹃群落化感作用的研究非常有限, 主要有极大杜鹃群落 *Rhododendron maximum*、台湾杜鹃群落 *Rhododendron formosanum* 和露珠杜鹃 *Rhododendron irroratum*^[8-10], 主要采用群落调查和室内发芽实验对其化感抑制作用进行研究, 目前采

用较为先进的色谱手段对杜鹃化感物质的研究较少。

在贵州百里杜鹃国家级森林公园内, 迷人杜鹃 *Rhododendron agastum* 是重要的建群种和优势种之一, 其因花色绚丽在群落景观中起着重要作用。但是, 目前迷人杜鹃群落有性繁殖及天然更新均出现了严重的障碍^[11-12], 天然更新障碍严重制约了森林公园的可持续发展, 所以天然更新的抑制因子和种子萌发的关键因子等一系列科学问题有待揭示。本研究从化感作用的视角出发, 比较迷人杜鹃群落林下调落物层、腐殖质层和表层

收稿日期: 2017-08-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(31460136, 31560223); 国家林业局948项目(2012-4-54); 贵州省林业科技项目(黔林科合[2012]10, [2018]11); 贵州省科技厅联合基金项目(黔科合LH字[2017]7354号, 黔科合SY字[2015]3022)

作者简介: 李朝婵, 副教授, 博士, 硕士生导师

通信作者: 全文选, 博士; E-mail: wenxuanq@gznu.edu.cn

引文格式: 李朝婵, 钱沉鱼, 全文选, 等. 迷人杜鹃群落天然更新障碍的化感研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(9): 9-13.

土壤的化学物质组成, 以期从化学生态学的角度解释迷人杜鹃林天然更新的障碍问题。

1 材料与方法

1.1 取样与调查

百里杜鹃国家级森林公园位于贵州西北部黔西县和大方县交界处(105°50'16" ~ 106°04'57"E, 27°10'07" ~ 27°17'55"N), 海拔1 060 ~ 2 121 m, 公园内年均相对湿度为84%。研究样地选取的迷人杜鹃群落位于森林公园的普底景区, 样地面积为50 m×50 m, 按照样地的上、中、下坡采集样品, 每个坡位的样地采集3个样点的枯枝落叶层(L层, 当年未分解的落叶)、腐殖质层(H层, 厚度约15 cm)和土壤层(S层, 表层土壤厚度约30 cm)样品。样品采用铝箔袋保存后, 立即带回实验室, 将样品自然阴干, 仔细挑去石块、根茎等, 用粉碎机研磨, 经孔径1 mm土壤筛过筛后在4 °C下冰箱保存, 供测试分析。

1.2 发芽试验

分别将L层、H层和S层样品按1g/3mL的比例加入蒸馏水, 常温浸泡48 h, 用灭菌纱布过滤后得到浸提液, 保存于4 °C冰箱中备用。迷人杜鹃种子用0.2%的高锰酸钾溶液消毒3 ~ 5 min, 然后用无菌蒸馏水冲洗3 ~ 5次至洗净, 进行发芽试验。发芽试验参照文献[13]的方法并加以改进, 分别在7 d和30 d时统计发芽情况。发芽率 $R_G = n/n_0 \times 100\%$ 。式中: n 为发芽种子数, n_0 为供试种子总数。

化感作用的效应指数 $I_R = 1 - C/T (T \geq C)$ 或 $I_R = T/C - 1 (T < C)$ 。式中: C 为对照值, T 为处理值。当 $I_R > 0$ 时, 表示促进作用; 当 $I_R < 0$ 时, 表示抑制作用; I_R 绝对值的大小代表化感作用的强弱^[14]。

1.3 仪器与方法

气质联谱仪: 美国Agilent, 7890A-5975C, 带CTC多功能自动进样器。样品前处理、衍生化处理、GC条件和质谱条件参照文献[15]的方法进行。

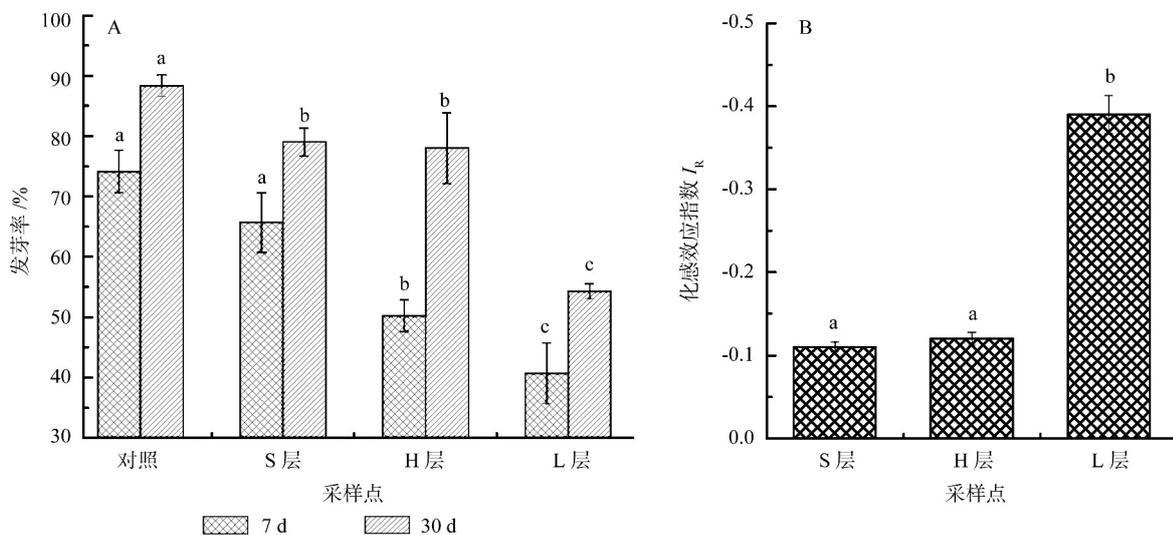
1.4 数据处理

总离子流的各峰经与Nist08和Wiley08标准谱库的检索及核对, 确定各土壤层中的化学物质, 并用内标法确定各物质的相对含量。采用SPSS17.0软件进行单因素方差分析和LSD多重比较, 采用Origin8.0绘图。

2 结果与分析

2.1 不同浸提液对迷人杜鹃种子萌发的化感效应

由图1可知, 7 d L层和H层浸提液处理的种子发芽率较对照差异极显著($P < 0.01$), 30 d L层、H层和S层浸提液处理的种子发芽率较对照差异极显著; 迷人杜鹃的发芽率依次是枯枝落叶层 < 腐殖质层 < 土壤层。3个层次浸提液处理30 d的化感效应指数均为负值, 其中腐殖质层、土壤层浸提液与枯枝落叶层相比差异极显著, 说明迷人杜鹃种子在不同浸提液处理后受到不同程度的抑制作用, 其中枯枝落叶层的抑制作用最强(见图1)。



图中不同字母表示不同处理间差异显著性, 小写字母表示 ($P < 0.01$)

图1 不同浸提液对种子萌发和化感效应的影响

Fig.1 Effect of different soil layer extracts on seed germination and allelopathy

2.2 不同层次化感物质的分离与鉴定

结合标准谱库及前人研究结果鉴定并确定了 31 种化感物质, 其分析结果见表 1。从杜鹃枯枝落叶层、腐殖质层和土壤层中鉴定出相同的化感物质共有 31 种, 主要为长链脂肪酸、有机酸类、醇类、生物碱类、酚酸类、氨基酸类等 6 大类物质, 均为化感物质。其中, 枯枝落叶层主要化感物质(相对含量超过 5%) 有 5 种, 从高到底依次为棕榈酸、丙三醇、2-羟基乙酸、硬脂酸和肌醇, 含量分别为 163.83、102.52、59.94、53.07 和 45.24 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

腐殖质层主要化感物质(相对含量超过 5%) 有 6 种, 从高到低依次为棕榈酸、2-羟基丙酸、2-羟基乙酸、2,2'-联吡啶、丙三醇和 2,3'-联吡啶, 含量分别为 81.38、77.96、34.53、33.53、32.05 和 27.56 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。土壤层主要化感物质(相对含量超过 5%) 有 9 种, 从高到低依次为棕榈酸、2-羟基丙酸、3-吡啶甲酸、硬脂酸、2-羟基乙酸、2,2'-联吡啶、丙三醇、对苯二酸、2,3'-联吡啶, 含量分别为 88.75、70.84、31.78、31.62、31.35、30.61、27.04、26.96 和 26.23 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

表 1 不同层次主要化感物质的含量[†]
Table 1 The main allelochemicals in different layers

序号	化合物名称	保留时间/min	化学式	含量 / ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)		
				L 层	H 层	S 层
1	2-羟基丙酸	17.05	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$	16.87±2.16 b	77.96±2.55 a	70.84±3.51 a
2	2-羟基乙酸	17.47	$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$	59.94±3.60 b	34.53±2.22 a	31.35±2.96 a
3	丙三醇	23.36	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$	102.52±2.77 b	32.05±0.29 a	27.04±5.62 a
4	3-吡啶甲酸	23.82	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2$	15.90±1.51 b	20.91±2.73 b	31.78±0.64 a
5	苯乙酸	23.97	$\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_2$	2.67±0.07 c	1.37±0.02 b	1.75±0.15 a
6	丁二酸	24.33	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$	3.13±0.14 a	3.36±0.32 a	2.93±0.43 a
7	2,3-二羟基丙酸	24.96	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_4$	4.81±0.37 b	3.69±0.03 a	3.54±0.19 a
8	2,2'-联吡啶	27.99	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{N}_2$	37.32±0.24 a	33.53±5.36 a	30.61±0.05 a
9	苹果酸	29.05	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$	5.73±0.85 b	6.09±0.22 b	4.47±0.07 a
10	脯氨酸	29.93	$\text{C}_5\text{H}_9\text{NO}_2$	33.86±0.24 c	6.40±0.23 b	18.95±3.51 a
11	2,3'-联吡啶	30.29	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{N}_2$	18.93±1.68 b	27.56±2.87 a	26.23±1.32 a
12	2,4'-联吡啶	30.40	$\text{C}_{10}\text{H}_8\text{N}_2$	13.83±0.42 b	21.36±3.90 b	20.94±1.01 a
13	3-羟基苯甲酸	30.84	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$	0.57±0.10 c	0.83±0.11 b	1.70±0.27 a
14	2,3,4-三羟基丁酸	30.95	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_3$	1.03±0.02 b	1.02±0.03 b	1.20±0.01 a
15	4-羟基苯甲酸	32.29	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_3$	3.21±0.40 b	2.44±0.24 a	2.78±0.24 ab
16	4-羟基苯乙酸	32.57	$\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_3$	0.47±0.03 b	0.58±0.02 ab	0.73±0.09 a
17	对苯二酸	35.94	$\text{C}_8\text{H}_6\text{O}_4$	23.05±3.91 a	23.84±3.55 a	26.96±0.81 a
18	3,4-二羟基苯甲酸	36.59	$\text{C}_7\text{H}_6\text{O}_4$	24.06±0.91 b	10.47±0.06 a	8.48±1.09 a
19	肉豆蔻酸	36.92	$\text{C}_{14}\text{H}_{28}\text{O}_2$	13.67±0.78 c	7.24±0.18 b	3.25±0.12 a
20	正十五酸	38.18	$\text{C}_{15}\text{H}_{30}\text{O}_2$	4.36±0.50 b	4.97±0.21 b	1.27±0.08 a
21	棕榈酸	40.79	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$	163.83±10.23 b	81.38±3.17 a	88.75±5.15 a
22	肌醇	42.31	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	45.24±2.05 c	24.78±1.51 b	9.31±0.69 a
23	甘露醇	43.20	$\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$	1.93±0.14 c	6.87±0.56 b	3.07±0.25 a
24	亚油酸	43.84	$\text{C}_{18}\text{H}_{32}\text{O}_2$	17.32±1.74 c	1.81±0.08 b	1.64±0.17a
25	油酸	43.91	$\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$	33.30±2.82 b	7.31±0.66 a	8.46±0.67a
26	亚麻酸	44.02	$\text{C}_{18}\text{H}_{30}\text{O}_2$	3.69±0.31 b	2.06±0.23 a	1.55±0.14 a
27	硬脂酸	44.32	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$	53.07±4.88 b	26.66±2.12 a	31.62±2.42 a
28	正二十醇	46.14	$\text{C}_{20}\text{H}_{42}\text{O}$	2.67±0.10 b	6.18±0.65 a	6.13±0.48 a
29	正二十酸	47.57	$\text{C}_{20}\text{H}_{40}\text{O}_2$	17.98±1.69 c	6.07±0.66 b	2.95±0.37 a
30	正二十二醇	49.31	$\text{C}_{22}\text{H}_{46}\text{O}$	14.39±0.54 b	18.53±1.37 a	18.28±1.40 a
31	正二十二酸	50.92	$\text{C}_{22}\text{H}_{44}\text{O}_2$	20.13±1.75 c	11.36±0.32 b	8.28±0.76 a

† 表中同行不同字母表示各层次间差异显著性, 小写字母表示差异极显著 ($P<0.01$), 下同。

2.3 不同层次化感物质的类别

根据 Rice 对化感物质的划分^[16], 从迷人杜鹃

枯枝落叶层、腐殖质层和土壤层中均鉴定到长链脂肪酸类(9种)、有机酸类(7种)、醇类(5种)、生物碱类(3种)、酚酸类(6种)和氨基酸类(1种)

等 6 大类化感物质 (见表 2), 其中, 长链脂肪酸类和有机酸类是土壤层、腐殖质层主要的化感物质, 长链脂肪酸类和醇类是枯枝落叶层主要的化感物质。枯枝落叶层、腐殖质层和土壤层化感物

质总量分别为 759.47、513.20 和 496.85 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 表现为枯枝落叶层 > 腐殖质层 > 土壤层, 枯枝落叶层与腐殖质层、土壤层的各化感组分之间差异极显著。

表 2 不同土壤层化感物质组分的类别与相对含量
Table 2 Classification and relative content of allelochemicals in different soil layers

组分	有机物序号	L 层相对含量 / ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	H 层相对含量 / ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)	S 层相对含量 / ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)
长链脂肪酸类	19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 29, 31	327.35 ± 24.68 a	148.85 ± 7.62 b	147.77 ± 9.87 b
有机酸类	1, 2, 4, 6, 7, 9, 14	107.42 ± 1.76 a	147.55 ± 2.29 b	146.12 ± 1.80 b
醇类	3, 22, 23, 28, 30	166.74 ± 0.56 a	88.42 ± 4.36 b	63.83 ± 2.79 b
吡啶类	8, 11, 12	70.08 ± 2.98 a	82.44 ± 1.41 b	77.78 ± 2.29 b
酚酸类	5, 13, 15, 16, 17, 18	54.02 ± 5.02 a	39.53 ± 3.14 b	42.41 ± 2.35 b
氨基酸类	10	33.86 ± 0.24 a	6.40 ± 0.23 c	18.95 ± 3.51 b
合计		759.47 ± 30.05	513.20 ± 11.65	496.85 ± 9.73

3 结论与讨论

3.1 化感作用与种子萌发

近年来, 科学家对化感作用进行定义并不断拓展其内涵^[17-19]。生态系统中的植物通过化感物质获得更多更大比例的资源, 植物因为自身化感物质而成功入侵并定居, 成为优势种^[20-21]。当群落中化感物质累积到一定程度就会影响自身以及其它植物的生长, 进而影响群落更新^[22-24]。目前, 研究区内野生杜鹃群落出现严重的天然更新障碍, 最终导致幼龄种群缺失严重, 可能造成巨大的可持续发展障碍。同时, 较厚的枯枝落叶层和腐殖质层对种子进入土壤起着物理的阻碍作用。本研究中枯枝落叶层对迷人杜鹃种子的萌发抑制作用最大, 在森林经营中要引起足够的重视, 同时要进一步开展去除枯枝落叶层促进种子萌发的大田试验和监测。

3.2 化感物质的来源及作用

植物群落内的枯枝落叶层和土壤层对种子萌发和早期幼苗的建立产生重要影响, 植物也通过挥发性化感物质的释放量来增强防御与传递信号^[25-27]。国内外专家对植物群落内的草本层、枯枝落叶层、腐殖质层和根际土的化感作用进行了研究和关注, 认为化感物质在植物群落的演替中起着重要驱动作用^[28-29]。本研究测定了迷人杜鹃群落林下 3 个土壤层中的化学物质, 其中枯枝落叶层是土壤中化感物质的主要来源。

化感物质可以影响森林冠层下的幼苗生长和物种组成, 对群落更新有直接影响^[30]。本实验表明迷人杜鹃群落土壤层中存在长链脂肪酸类、有

机酸类、酚酸类和醇类等物质, 这些物质均属于化感物质且具有抑制作用, 其中酚酸类物质在较小浓度下即具有较强的化感作用潜力。土壤特征有助于认识植物群落的养分循环规律^[31], 本实验中测定到的化感物质如何协同迷人杜鹃的土壤特征 (养分、温度、水分等因子) 对种子萌发起到抑制作用, 有待于进一步开展研究。

参考文献:

- [1] Kong C H. Ecological pest management and control by using allelopathic weeds (*Ageratum conyzoides*, *Ambrosia trifida* and *Lantana camara*) and their allelochemicals in China [J]. *Weed Biology and Management*, 2010, 10(2): 73-80.
- [2] Lorenzo P, Palomera-Perez A, Reigosa M J, et al. Allelopathic interference of invasive *Acacia dealbata* Link on the physiological parameters of native understory species [J]. *Plant Ecology*, 2011, 212(3): 403-412.
- [3] 张 权, 傅松玲, 姚小华, 等. 薄壳山核桃叶及青皮水浸液对 3 种植物的化感作用 [J]. *林业科学研究*, 2015, 28(5): 674-680.
- [4] 陈 锋, 孟永杰, 帅海威, 等. 植物化感物质对种子萌发的影响及其生态学意义 [J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(1): 36-46.
- [5] Loydi A, Lohse K, Otte A. Distribution and effects of tree leaf litter on vegetation composition and biomass in a forest-grassland ecotone [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2014, 7(3): 264-275.
- [6] Smith L M, Reynolds H L. Light, allelopathy, and post-mortem invasive impact on native forest understory species [J]. *Biological Invasions*, 2014, 16(5): 1131-1144.
- [7] Kimura F, Sato M, Kato-Noguchi H. Allelopathy of pine litter: delivery of allelopathic substances into forest floor [J]. *Journal of Plant Biology*, 2015, 58(1): 61-67.
- [8] 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): 1597-1605.
- [9] 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.
- [10] 李朝婵, 钱沉鱼, 全文选, 等. 野生露珠杜鹃林不同分解层的土壤化感潜力 [J]. *生态学报*, 2018, 38(13): 1-7.
- [11] 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.
- [12] 乙 引, 陈 训, 陈雪鹃, 等. 贵州百里杜鹃国家森林公园综合科学考察 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [13] Wang C M, Li T C, Jhan Y L, *et al.* The impact of microbial biotransformation of catechin in enhancing the allelopathic effects of *Rhododendron formosanum*[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8(12): e85162.
- [14] Williamson G B, Richaerdson D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, 14(1): 181-187.
- [15] Zhang L, Wang X, Guo J, *et al.* Metabolic profiling of chinese tobacco leaf of different geographical origins by GC-MS [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2013, 61(11): 2597-2605.
- [16] Rice E L. Allelopathy. 2nd edition [M]. London: Academic Press, 1984.
- [17] Rice K J, Gordon D R, Hardison J L, *et al.* Phenotypic variation in seedlings of a “keystone tree species (*Quercus douglasii*): the interactive effects of acorn source and competitive environment [J]. *Oecologia*, 1993, 96(4): 537-547.
- [18] Inderjit, Wardle D A, Karban R, *et al.* The ecosystem and evolutionary contexts of allelopathy [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(12): 655-662.
- [19] Meiners S J, Kong C H, Ladwig L M, *et al.* Developing an ecological context for allelopathy[J]. *Plant Ecology*, 2013, 213(8): 1221-1227.
- [20] 李朝婵, 田红红, 全文选. 基于 HPLC 对野生杜鹃林区土壤酚酸类物质的鉴定与评价 [J]. *贵州师范大学学报 (自然科学版)*, 2018, 36(2): 22-25.
- [21] 薛 立, 傅静丹. 影响植物竞争的因子 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(2): 6-15.
- [22] Souto X C, Bolano J C, Gonzalez L, *et al.* Allelopathic effects of tree species on some soil microbial populations and herbaceous plants [J]. *Biología Plantarum*, 2001, 44(2): 269-275.
- [23] Harris M R, Lamb D, Erskine P D. An investigation into the possible inhibitory effects of white cypress pine (*Callitris glaucophylla*) litter on the germination and growth of associated ground cover species [J]. *Australian Journal of Botany*, 2003, 18(51): 93-102.
- [24] 何 勇, 黄新会, 史晓莹, 等. 黑荆人工林植被稀少的成因—基于植物化感作用的研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(10): 79-83.
- [25] Li Q, Cai J, Jiang Z M, *et al.* Allelopathic effects of walnut leaves leachate on seed germination, seedling growth of medicinal plants [J]. *Allelopathy Journal*, 2010, 20(2): 235-241.
- [26] Su J W, Zeng J P, Qin X W, *et al.* Effect of needle damage on the release rate of Masson pine (*Pinus massoniana* Lamb.) volatiles [J]. *Journal of Plant Research*, 2009, 122(2): 193-200.
- [27] 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.
- [28] 雷日平, 陈 辉, 刘建军. 凋落物和土壤浸提液对油松种子萌发与幼苗生长的影响 [J]. *中南林学院学报*, 2001, 21(1): 82-84.
- [29] Yang L X, Wang P, Kong C H. Effect of larch (*Larix gmelini* Rupr.) root exudates on Manchurian walnut (*Juglans mandshurica* Maxim.) growth and soil juglone in mixed-species plantation [J]. *Plant and Soil*, 2010, 329(1): 249-258.
- [30] Mallik A U. Allelopathy in forested ecosystems[C]//Zeng R S, Mallik A U and Luo S M (Eds.). *Allelopathy in Sustainable Agriculture and Forestry*. New York: Springer, 2007: 363-386.
- [31] 喻阳华, 刘桂华, 杨苏茂. 赤水河上游水源涵养林的土壤特征 [J]. *贵州师范大学学报 (自然科学版)*, 2017, 35(4): 23-30.

[本文编校: 谢荣秀]