

刘 勇,刘 燕,王星星 等. 头花蓼整株及根际土壤水浸提液的化感自毒作用[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(17): 266-270.
doi: 10. 15889/j. issn. 1002-1302. 2019. 17. 065

头花蓼整株及根际土壤水浸提液的化感自毒作用

刘 勇^{1,2,3}, 刘 燕¹, 王星星¹, 杨 丹¹, 赵许朋¹, 胡茂飞¹

(1. 贵阳学院生物与环境工程学院, 贵州贵阳 550005;

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 550002; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用人工制备的 2 种水浸提液进行生物测定。结果表明, 头花蓼整株水浸提液浓度 ≤ 10 mg/mL 时对其种子发芽速率、发芽势、发芽指数和活力指数等均起不同程度的促进作用, 但随着浓度升高, 种子发芽率、日均发芽数、发芽势、发芽指数及活力指数降至对照组的 1/3, 发芽速率仅为对照组的 1/5, 幼苗根长、芽长为对照组的 1/2 ~ 2/3, 种子发芽率、发芽速率与发芽指数等指标的 RI 值和综合化感指数 M 值以 10 mg/mL 为界由正值转为负值, 表明头花蓼整株水浸提液的化感自毒作用十分明显。头花蓼根际土壤水浸提液浓度 ≤ 250 mg/mL 时种子胚芽长、发芽势、活力指数、活力指数均不同程度增加, 但浓度为 500 mg/mL 时种子发芽率由 58.3% 降至 49.2%、发芽速率由 1.4×10^{-1} 降至 0.8×10^{-1} 、发芽指数由 27.9 降至 17.5、活力指数由 136.0 降至 79.7, 各指标的 RI 值和综合化感指数 M 值均 < 0, 表明高浓度的头花蓼根际土壤水浸提液的化感自毒作用较明显。综上, 头花蓼 2 种水浸提液化感自毒作用很可能是其连作障碍的重要原因。

关键词: 头花蓼; 连作障碍; 化感自毒; 水浸提液; 发芽率; 发芽势; 发芽指数; 活力指数; RI 值; 综合化感指数

中图分类号: R284 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)17-0266-05

化感自毒作用是自然界普遍存在的现象, 即植物根分泌, 茎、叶等淋溶以及残茬降解等过程释放出的次生代谢产物, 对自身或种内其他植物产生危害的一种现象^[1-2]。土壤是植物化感自毒作用的媒介, 植物释放的化感类物质往往在土壤中经过一系列的滞留、转化、迁移等途径逐渐富集, 并维持一定的浓度和活性, 进而产生化感自毒效应及连作障碍现象^[3-4]。中药材栽培中往往产生更多的次生代谢产物, 更容易在土壤中不断积累造成土壤环境发生改变, 进而影响中药材的正常生长^[5-6]。研究表明, 地黄、当归、人参等许多中药材连作时产量和品质的降低均与此有关^[7-10]。因此, 研究中药材化感自毒作用对揭示其连作障碍的成因及防治具有十分重要的意义。

头花蓼 (*Polygonum capitatum* Buch. Ham ex D. Don) 为蓼科蓼属多年生草本植物, 是我国西南地区的知名苗药, 其主要药用成分没食子酸对于治疗泌尿系统感染颇具疗效^[11-12]。近年来, 贵州威门药业股份有限公司生产的“热淋清”颗粒是以此开发的用于治疗尿路感染的特效药^[13-14]。头花蓼作为贵州著名的药材, 其连作障碍问题一直比较突出, 严重影响其种植产量和药用成分品质, 成为制约该产业发展的主要因

素^[15-16]。目前, 关于头花蓼连作障碍的研究极少, 仅有头花蓼连作土壤养分及施肥调控等方面的少量研究报道, 而尚未发现有关其化感自毒作用的研究^[15, 17]。本研究通过提取头花蓼整株和根际土壤水浸提液, 采用生物学试验对比分析头花蓼 2 种水浸提液对其种子萌发及幼苗生长的影响, 为头花蓼连作障碍的成因分析及其防治措施提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 样品采集

2016 年 4 月于贵州省威门药业股份有限公司头花蓼种植基地分别采集生长旺盛的新鲜头花蓼整株、根际土壤及头花蓼种子若干。

1.2 头花蓼整株和根际土壤水浸提液制备

将新鲜头花蓼整株(含根、茎、叶)用无菌蒸馏水清洗干净, 滤干表面水分, 准确称量 100 g, 剪碎、研磨后置于烧杯内, 加入 100 mL 无菌蒸馏水, 室温(22 ℃)下浸提 48 h, 每隔 12 h 摇荡 1 次, 抽滤获得 1 000 mg/mL 原液, 倍量稀释法分别得到 5、50、100、250、500 mg/mL 头花蓼整株水浸提液。将新鲜根际土壤晒干, 过 60 目筛, 准确称量 100 g 根际土壤, 同样方法获得上述浓度头花蓼根际土壤水浸提液。

1.3 种子萌发试验

取 3 000 粒头花蓼种子置于烧杯, 35 ℃ 温水浸泡 24 h, 挑选籽粒健康饱满的种子, 置于垫有 2 层滤纸的培养皿(培养皿、滤纸均灭菌)中。每个培养皿摆放 40 粒种子, 加入不同浓度浸提液 5 mL 至滤纸湿润饱和为止, 3 次重复, 用蒸馏水作对照组。人工培养箱(22 ℃)、每 12 h 光照和 12 h 黑暗条件下培养, 每 2 d 加蒸馏水和 1 d 天加对应水浸提液补充皿内蒸发水分(确保每皿湿润饱和), 连续培养 15 d, 每天观察、统计种子萌发数, 直到持续 3 d 不再有新种子发芽为止, 直尺测

收稿日期: 2018-04-23

基金项目: 贵州省教育厅基金(编号: [黔教合 KY 字(2015)452 号]); 贵州省科技厅联合基金(编号: [黔科合 LH 字(2014)7168 号]); 贵州省生物学教学团队项目(编号: 2017158322); 贵州省教育厅大学生创新创业项目(编号: 20170275207)。

作者简介: 刘 勇(1987—), 男, 甘肃平凉人, 博士, 讲师, 主要从事环境生态与污染修复研究。E-mail: Lyong821mmm@163.com。

通信作者: 刘 燕, 硕士, 教授, 主要从事植物生理生态研究。Tel: (0851) 85231991; E-mail: glyly68@sina.com。

量种子胚根(芽)长。

1.4 幼苗生长试验

种子萌发试验结束后,每皿选取发芽良好的种子,去掉皿盖继续培养10 d进行幼苗生长,操作方法同上,直尺测量幼苗根(芽)长。

1.5 数据统计分析

发芽率 = (发芽种子数/总供试种子数) × 100%^[18]; 发芽速率 = $[N_1 + (N_2 - N_1)/2 + \dots + (N_i - N_{i-1})/i] \times 100\%$, 其中: N_i 为 t d 内种子发芽率^[19]; 发芽抑制率 = (1 - 发芽种子数/对照组发芽种子数) × 100%, 负值为促进, 正值为抑制^[20]; 发芽势 = (发芽高峰期种子数/供试种子数) × 100%, 表征种子发芽快慢与活力强弱^[18]; 发芽指数 $GI = \sum [(G_i/D_i)]$, G_i 为 t d 种子发芽数, D_i 为相应种子发芽时间, d ^[21]; 种子活力指数 $VI = \sum [(G_i/D_i)] \times S_x$, 其中, S_x 为种苗平均总长度^[22]; 化感指数 $RI = (1 - C/T) \times 100\%$, 其中, C 为对照组各指标平均值, T 为浸提液培养时各指标平均值, $RI > 0$ 为促进, $RI < 0$ 为抑制^[23]; 综合化感指数 M 即为各处理的化感指数 RI

相加求得的平均值, $M > 0$ 为促进, $M < 0$ 为抑制, 绝对值大小表征作用强弱^[24]。

2 结果与分析

2.1 头花蓼种子发芽表现特征

由表1可知,头花蓼整株、根际土壤水浸提液浓度升高时,种子长势逐渐变弱且胚芽倾倒现象较为明显,高浓度的整株水浸提液时甚至出现胚根发霉、胚芽腐烂等症状。头花蓼整株水浸提液浓度 ≤ 10 mg/mL 时,种子发芽数、日均发芽数均与对照组相似,但随着浓度升高,种子发芽数、日均发芽数均显著降低,当浓度为 500 mg/mL 时均仅为对照组的 1/3。根际土壤水浸提液分别在所有浓度下和 0 ~ 250 mg/mL 时对种子发芽数、日均发芽数均未产生显著影响,500 mg/mL 时种子日均发芽数略微下降。2 种水浸提液下的种子胚根长、胚芽长与对照组相比总体上差异不显著,但高浓度时种子胚根长均值略微减小,种子胚芽长均值有所增加,表明高浓度的 2 种水浸提液下头花蓼种子发芽不整齐。

表1 头花蓼2种水浸提液对其种子发芽表现特征影响

水浸提液浓度 (mg/mL)	整株水浸提液					
	发芽数(个)	日均发芽数(个)	叶片数(张)	胚根长(cm)	胚芽长(cm)	明显症状
0	24 ± 2d	1.5d	2	1.8 ± 0.3a	2.5 ± 0.3ac	
5	25 ± 1d	1.5d	2	1.8 ± 0.2a	2.8 ± 0.2abcd	
10	24 ± 3d	1.5d	2	1.7 ± 0.2a	2.4 ± 0.4a	除对照组外,所有浓度下种子长势较弱,部分胚芽倾倒明显。250 ~ 500 mg/mL 时种子胚根逐渐发霉,部分胚芽腐烂
50	17 ± 2c	1.0c	2	1.8 ± 0.2a	2.8 ± 0.3abcd	
100	13 ± 1b	0.8b	2	1.7 ± 0.2a	3.2 ± 0.3d	
250	12 ± 2b	0.8b	2	1.7 ± 0.1a	3.0 ± 0.2bcd	
500	9 ± 2a	0.5a	2	1.6 ± 0.1a	2.4 ± 0.6ab	
水浸提液浓度 (mg/mL)	根际土壤水浸提液					
	发芽数(个)	日均发芽数(个)	叶片数(张)	胚根长(cm)	胚芽长(cm)	明显症状
0	23 ± 1ab	1.4bc	2	1.8 ± 0.2ab	2.8 ± 0.6ab	
5	23 ± 3ab	1.4bc	2	1.7 ± 0.2ab	2.7 ± 0.5a	
10	23 ± 2ab	1.5c	2 ~ 3	1.8 ± 0.3ab	2.7 ± 0.3a	除对照组外,所有浓度下种子发芽逐渐出现长势变弱和胚芽倾倒现象
50	22 ± 3ab	1.4bc	2	1.9 ± 0.1b	3.8 ± 0.2e	
100	25 ± 2b	1.5c	2	1.7 ± 0.0ab	3.3 ± 0.2bcde	
250	20 ± 2a	1.3ab	2	1.4 ± 0.2a	3.1 ± 0.2abcd	
500	20 ± 2a	1.2a	2	1.5 ± 0.2ab	3.0 ± 0.1abc	

2.2 头花蓼种子发芽率及发芽速率

由图1-a可知,在整株、根际土壤水浸提液下,头花蓼种子发芽率分别介于21.7% ~ 61.7%、49.2% ~ 57.5%。随着整株水浸提液浓度升高,种子发芽率逐渐降低,当浓度 ≤ 10 mg/mL 时对种子发芽率未产生明显影响,但浓度 > 10 mg/mL 时种子发芽率均低于对照组,最低仅约为对照组的 1/3。根际土壤水浸提液下对种子发芽率均无显著影响,甚至发芽率略高于对照组。由图1-b可知,头花蓼整株、根际土壤水浸提液均为 5 mg/mL 时,种子发芽速率分别达最高值,为 0.15、0.14,均显著高于对照组,但浓度 ≥ 10 mg/mL 时种子发芽速率出现不同程度地降低,最低降至 0.03、0.08。

2.3 头花蓼种子发芽势、发芽抑制率、发芽指数及活力指数

由表2可知,随着头花蓼整株水浸提液浓度升高,种子发芽势总体呈下降趋势,由 25% 降至 5.8%,其中浓度 ≤ 10 mg/mL 时发芽势均大于对照组,种子发芽抑制率均为

负值,当浓度 > 10 mg/mL 时发芽势均小于对照组,发芽抑制率均为正值且随着浓度升高值由 28.9% 增加至 62.8%。根际土壤水浸提液下发芽势介于 13.3% ~ 25.0%,除浓度为 10 mg/mL 时发芽势小于对照组外,其他浓度时均大于对照组,最大值为 25.0%。根际土壤水浸提液浓度 ≤ 100 mg/mL 时(50 mg/mL 除外),发芽抑制率均为负值,浓度为 50、250、500 mg/mL 时发芽抑制率均为正值。

头花蓼整株、根际土壤水浸提液对其种子发芽指数和活力指数的影响具有显著差异性(图2-a、图2-b)。整株水浸提液浓度 ≤ 10 mg/mL 时,种子发芽指数和活力指数均大于对照组,其中 5 mg/mL 时分别达最大值(32.9、150.5),当浓度 > 10 mg/mL 时,种子发芽指数值逐渐降至 7.1,活力指数降至 28.7。根际土壤水浸提液浓度 ≤ 250 mg/mL 时,种子活力指数和发芽指数均大于对照组且分别高达 27.9、136.0,而浓度为 500 mg/mL 时,种子发芽指数和活力指数均小于对照组且分别降至 17.5、79.7。

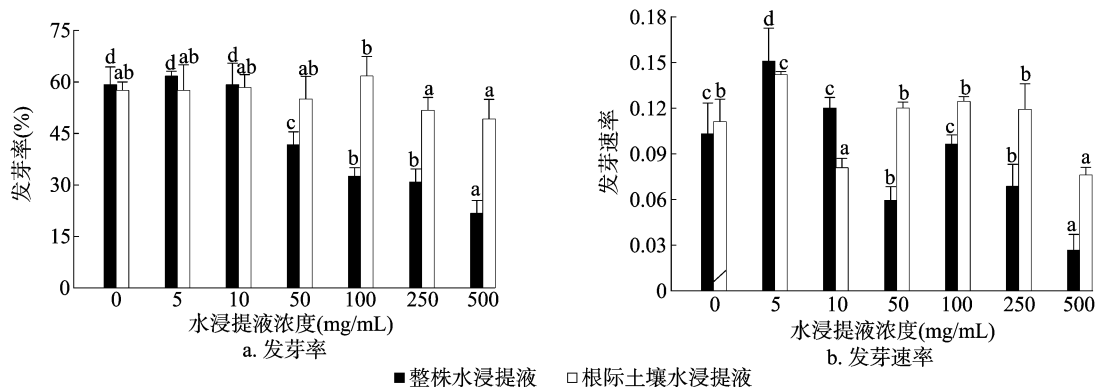


图1 头花蓼2种水浸提液对其种子发芽率及发芽速率的影响

表2 头花蓼2种水浸提液对其种子发芽势、发芽抑制率影响

水浸提液浓度 (mg/mL)	整株水浸提液		根际土壤水浸提液	
	发芽势 (%)	发芽抑制率 (%)	发芽势 (%)	发芽抑制率 (%)
0	16.7	0.0	15.0	0.0
5	25.0	-4.7	17.5	-0.3
10	23.3	-1.0	13.3	-1.8
50	13.3	28.9	25.0	3.9
100	14.2	44.7	18.3	-7.6
250	14.2	47.3	19.2	10.0
500	5.8	62.8	15.0	14.6

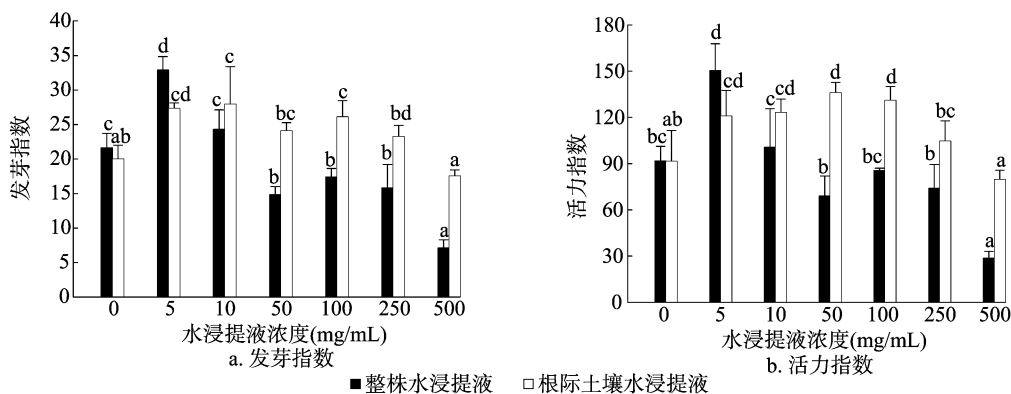


图2 头花蓼2种水浸提液对其种子发芽指数和活力指数的影响

2.5 头花蓼2种水浸提液下幼苗生长情况

头花蓼幼苗生长过程中,在高浓度的整株水浸提液下部幼苗根发霉或芽腐烂甚至死亡,而在根际土壤水浸提液下倾倒的幼苗长势重新好转等(表3)。头花蓼整株水浸提液浓度 ≤ 10 mg/mL时幼苗根长、芽长与对照组接近,分别为1.9、3.0 cm,而随着浓度进一步升高,幼苗根长、芽长总体呈现下降趋势,分别降至1.4、1.6 cm。根际土壤水浸提液下幼苗根长、芽长与对照组接近且变化趋势不明显,分别介于1.5~1.9、2.8~3.4 cm。通过计算头花蓼种子胚根芽比和幼苗根芽比(表4)与对照组相比2种水浸提液下其种子胚根芽比和幼苗根芽比总体上差异不显著且无明显变化规律。

3 讨论与结论

化感自毒作用是中药材连作障碍的重要发生机制之一。很多研究表明,中药材根、茎、叶等组织中广泛存在醛类、黄酮

2.4 头花蓼种子发芽各指标化感指数RI及综合化感指数M

通过计算头花蓼整株、根际土壤水浸提液对其种子发芽率、发芽速率、发芽指数等指标的化感指数RI值和综合化感指数M值(图3-a、图3-b)。随着头花蓼整株水浸提液浓度升高,其种子各指标RI值和综合化感指数M值均逐渐降低,其中浓度 ≤ 10 mg/mL时均为正值,分别高达0.04、0.3、0.3、0.2,而浓度 > 10 mg/mL时均为负值,分别降至-1.7、-2.9、-2.0、-2.2。根际土壤水浸提液浓度 ≤ 250 mg/mL时,除少部分指标RI值和综合化感指数M值略低于0之外,其余均为正值且分别高达0.1、0.2、0.3、0.2,而浓度为500 mg/mL时均为负值,降至-0.2、-0.5、-0.1、-0.3。

类、单宁类、生物碱、萜类和甾类等次生代谢产物^[25-28]。这些次生代谢产物通过雨水淋溶、自然挥发、根系分泌和植株分解等途径释放到土壤环境中形成一个微环境区域,对土壤的理化性质、微生物的群落结构、自身植株酶活性及代谢功能等产生重要影响,进而对自身具有明显的“低促高抑”化感作用。即当其浓度在一定范围内会作为营养物质促进中药材自身生长,但当浓度超过一定阈值后则会明显破坏种子或幼苗细胞膜透性和多种酶活性、干扰细胞的分裂和伸长并阻碍养分的吸收与利用等,造成中药材产量与品质大幅下降的连作障碍问题^[29-31]。本研究中头花蓼整株、根际土壤水浸提液对其种子发芽或幼苗生长的“低促高抑”化感作用明显,即2种水浸提液在低浓度时对种子发芽或幼苗生长有一定的促进作用,但是随着水浸提液浓度升高则出现种子发芽或幼苗生长长势较差或倾倒现象,甚至出现(胚)根发霉、(胚)芽腐烂等明显抑制影响。

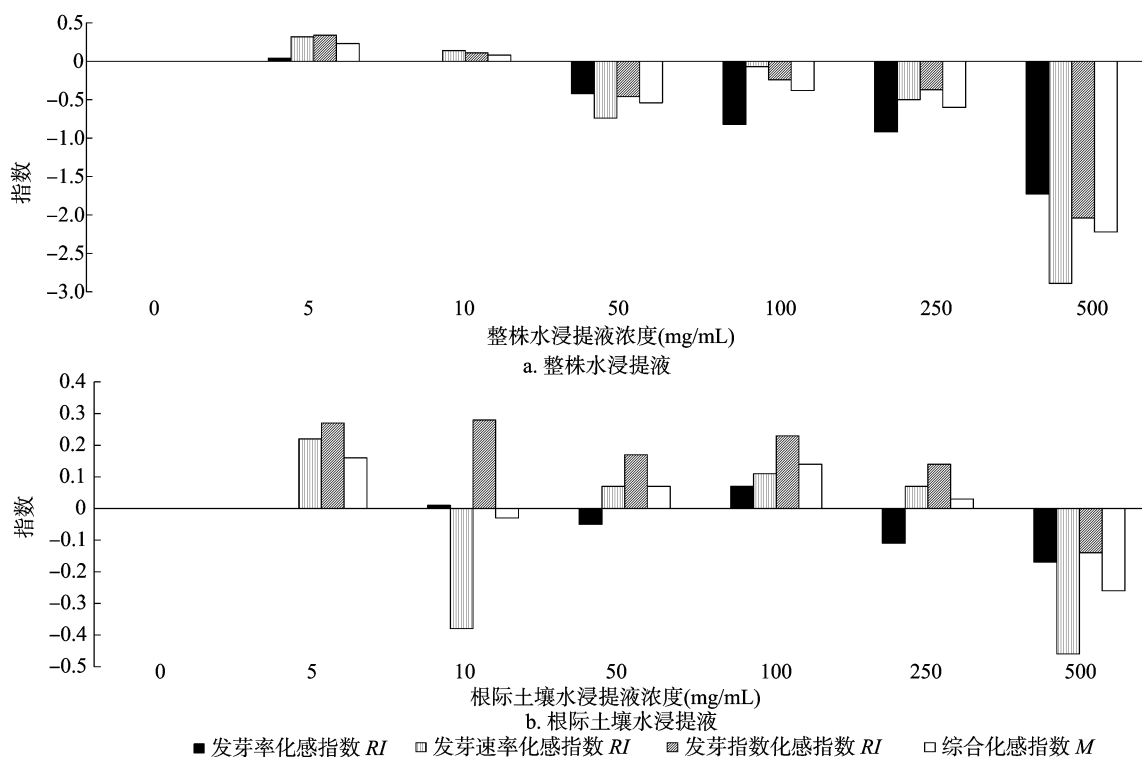


图3 头花蓼2种水浸提液对其种子发芽化感指数的影响

表3 头花蓼2种水浸提液对其幼苗生长的影响

水浸提液浓度 (mg/mL)	整株水浸提液				根际土壤水浸提液			
	叶片数	根长 (cm)	芽长 (cm)	明显症状	叶片数	根长 (cm)	芽长 (cm)	明显症状
0	2	2.1 ± 0.1d	2.8 ± 0.5bcd		2	1.8 ± 0.0bc	3.2 ± 0.5ab	
5	2	1.9 ± 0.2cd	3.0 ± 0.2cd	除对照组外长势均较弱; 250~500 mg/mL时部分根发霉或芽腐烂甚至死亡	2	1.8 ± 0.1abe	3.1 ± 0.3ab	除对照组外, 芽均略带粉色; 多数倾倒幼苗长势重新好转
10	2	1.6 ± 0.1b	2.6 ± 0.3bc		2	1.9 ± 0.2dce	2.9 ± 0.4ab	
50	2	1.4 ± 0.7ab	2.3 ± 0.5ab		2	1.9 ± 0.0d	3.1 ± 0.1a	
100	2	1.7 ± 0.2bc	2.8 ± 0.1c		2	1.8 ± 0.0b	3.4 ± 0.1b	
250	2	1.6 ± 0.1b	2.5 ± 0.2b		2	1.5 ± 0.1a	3.4 ± 0.2b	
500	2	1.4 ± 0.2a	1.6 ± 0.4a	2	1.8 ± 0.0c	2.8 ± 0.4a		

表4 头花蓼2种水浸提液对其种子发芽及幼苗生长(胚)根芽比的影响

水浸提液浓度 (mg/mL)	整株水浸提液		根际土壤水浸提液	
	种子胚根芽比	幼苗根芽比	种子胚根芽比	幼苗根芽比
0	0.7 ± 0.1b	0.8 ± 0.2ab	0.6 ± 0.1b	0.6 ± 0.1abce
5	0.6 ± 0.1ab	0.6 ± 0.1ab	0.7 ± 0.1b	0.6 ± 0.0bd
10	0.7 ± 0.1b	0.6 ± 0.1ab	0.7 ± 0.1b	0.7 ± 0.0e
50	0.6 ± 0.0ab	0.6 ± 0.2ab	0.5 ± 0.0ab	0.6 ± 0.0c
100	0.5 ± 0.1a	0.6 ± 0.1a	0.5 ± 0.0b	0.5 ± 0.0a
250	0.6 ± 0.1a	0.7 ± 0.0ab	0.5 ± 0.0a	0.5 ± 0.0a
500	0.7 ± 0.1ab	0.9 ± 0.1b	0.5 ± 0.1ab	0.7 ± 0.1cde

头花蓼整株水浸提液浓度 ≤ 10 mg/mL 时虽然对种子发芽(数)率、日均发芽数以及幼苗根长或芽长等影响较小,但发芽速率、发芽势、发芽指数和活力指数均大于对照组,分别高达0.2、25.0%、32.9、150.5,发芽抑制率为负值,表明头花蓼整株水浸提液在该浓度范围内其种子活力较强、发芽较快,总体起促进作用,但随着浓度升高,种子发芽率、日均发芽数、发芽速率分别骤降至21.7%、0.5、0,发芽势、发芽指数及活

力指数降至5.8%、7.1、28.7,发芽抑制率 > 0,幼苗根长、芽长分别降至1.4、1.6 cm,对种子发芽或幼苗生长的抑制影响十分明显。另外,种子发芽率、发芽速率与发芽指数等指标的RI值和综合化感指数M值均随着整株水浸提液浓度升高而不断减小,且以10 mg/mL为界由正值转为负值,表明头花蓼整株水浸提液的化感自毒作用较明显且随着浓度升高越来越强烈。

头花蓼根际土壤水浸提液浓度 ≤ 250 mg/mL 时对种子发芽(数)率、日均发芽数及幼苗根长、芽长等影响较小,而种子胚芽长、发芽势、发芽指数及活力指数均有不同程度增加,而种子发芽率、发芽速率与发芽指数等指标的 *RI* 值和综合化感指数 *M* 值大多为正值,表明头花蓼根际土壤水浸提液对种子发芽或幼苗生长的促进作用更明显,但是当浓度达 500 mg/mL 时,种子发芽率、发芽速率、发芽指数、活力指数均有所下降,分别由 58.3% 降至 49.2%、0.14 降至 0.08、27.9 降至 17.5、136.0 降至 79.7,各指标的 *RI* 值和综合化感指数 *M* 值均为负值,可见高浓度的头花蓼根际土壤水浸提液有明显的化感自毒作用。

综上,头花蓼整株、根际土壤水浸提液均具有化感自毒作用,其中整株水浸提液的化感自毒作用尤为突出,很可能是头花蓼连作障碍的重要原因。因此,在头花蓼连作栽培中可通过尽可能清理出土壤中头花蓼植株残留物、深耕翻土暴晒、筛选培育抗逆性强的头花蓼品种或建立科学的多种植物轮(间)作体系等措施有效减缓其连作障碍的发生。

致谢: 特别感谢贵州威门药业股份有限公司为本研究开展提供便利!

参考文献:

[1] Lin W X, Fang C X, Chen T, et al. Rice allelopathy and its properties of molecular ecology [J]. *Frontiers in Biology*, 2010, 5(3): 255 - 262.

[2] Duke S O. Allelopathy: current status of research and future of the discipline: a commentary [J]. *Allelopathy Journal*, 2010, 25(1): 17 - 29.

[3] Teasdale J R, Rice C P, Cai G M, et al. Expression of allelopathy in the soil environment: soil concentration and activity of benzoxazinoid compounds released by rye cover crop residue [J]. *Plant Ecology*, 2012, 213(12, SI): 1893 - 1905.

[4] Kaur H, Kaur R, Kaur S, et al. Taking ecological function seriously: soil microbial communities can obviate allelopathic effects of released metabolites [J]. *PLoS One*, 2009, 4(3): e4700.

[5] 张重义, 林文雄. 药用植物的化感自毒作用与连作障碍 [J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 189 - 196.

[6] 刘红彦, 王飞, 王永平, 等. 地黄连作障碍因素及解除措施研究 [J]. *华北农学报*, 2006, 21(4): 131 - 132.

[7] 张新慧, 张恩和, 王惠珍, 等. 连作对当归生长的障碍效应及机制研究 [J]. *中国中药杂志*, 2010, 35(10): 1231 - 1234.

[8] Yang M, Zhang X, Xu Y, et al. Autotoxic ginsenosides in the rhizosphere contribute to the replant failure of *Panax notoginseng* [J]. *PLoS One*, 2015, 10(2): 1 - 11.

[9] 唐堃, 李明, 董闪, 等. 广藿香根际土壤水浸液对其扦插苗的化感自毒作用 [J]. *中药材*, 2014, 37(6): 935 - 939.

[10] 林茂兹, 王海斌, 林辉锋. 太子参连作对根际土壤微生物的影响 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(1): 106 - 111.

[11] 吕炎峰, 王隶书, 程东岩, 等. 中药头花蓼的化学成分和药理作用研究概况 [J]. *中国药师*, 2017, 20(10): 1849 - 1853.

[12] 荆文光, 赵叶, 张开霞, 等. 头花蓼水提取物化学成分研究 [J]. *时珍国医国药*, 2015, 26(1): 47 - 50.

[13] 谢宇, 潘雯婷, 徐亮, 等. 头花蓼及热淋清颗粒薄层色谱特征图谱的建立 [J]. *贵州农业科学*, 2014, 42(7): 31 - 35.

[14] 王爽, 张丽艳, 谢宇, 等. HPLC 测定头花蓼及制剂热淋清颗粒中没食子酸的含量 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2012, 18(9): 112 - 115.

[15] 何佳芳, 唐兵, 赵欢, 等. 几种肥料对头花蓼连作障碍的调控 [J]. *西南农业学报*, 2016, 29(12): 2902 - 2907.

[16] 周涛, 艾强, 王彦君, 等. 基于不同地理种源头花蓼中没食子酸的含量分析 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2011, 17(1): 49 - 52.

[17] 周涛, 金艳蕾, 吴钰, 等. 贵州头花蓼遗传多样性的 ISSR 分析 [J]. *中国中药杂志*, 2010, 35(12): 1511 - 1517.

[18] 张子龙, 拱健婷, 程新宇, 等. 三七须根粉碎物土壤添加的自毒效应研究 [J]. *中国农学通报*, 2015, 31(7): 143 - 148.

[19] Chiapusio G, Sánchez A M, Reigosa M J, et al. Do germination indices adequately reflect allelochemical effects on the germination process? [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1997, 23(11): 2445 - 2453.

[20] 杨晓. 加拿大蓬水浸液对植物种子萌发的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(4): 1983 - 1986.

[21] 杜玮, 何池全, 陈玉丽, 等. 入侵植物互花米草水浸液对茼蒿的化感作用 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(4): 869 - 875.

[22] 赵欣欣, 宋丽荣, 权薇竹, 等. 高温高湿老化处理对不同豆类种子活力及生长能力的影响 [J]. *作物杂志*, 2017(5): 168 - 172.

[23] 朱慧, 马瑞君, 吴双桃, 等. 当归根际土对其种子萌发和幼苗生长的影响 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(5): 833 - 838.

[24] Bruce W G, Richardson D. Bioassays for allelopathy: measuring treatment responses with independent controls [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, 14(1): 181 - 187.

[25] 张秋菊, 张爱华, 孙晶波, 等. 植物体中萜类物质化感作用的研究进展 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(1): 187 - 193.

[26] 黄小芳, 李勇, 易茜茜, 等. 五种化感物质对人参根系酶活性的影响 [J]. *中草药*, 2010, 41(1): 117 - 121.

[27] 王波, 张晓艳, 黄攀, 等. 响应面法优化马齿苋黄酮超声波提取工艺 [J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(1): 166 - 171.

[28] 闫征, 王帆, 吴寒, 等. 不同烫漂方式对碱蓬活性成分及抗氧化能力的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2017, 33(5): 1150 - 1156.

[29] Calabrese E J, Baldwin I A. U-shaped dose-responses in biology, toxicology and public health [J]. *Annual Review of Public Health*, 2001, 22(1): 15 - 33.

[30] 林文雄, 熊君, 周军建, 等. 化感植物根际生物学特性研究现状与展望 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, 15(4): 1 - 8.

[31] 胡远彬, 陈俊, 肖天昊, 等. 劲直黄芪水浸液化感作用研究 [J]. *草业学报*, 2013, 22(6): 136 - 142.