

杨 彤, 张 梅, 陈丹阳, 等. 紫花苜蓿土壤浸提液对蜀葵的化感作用[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(1): 92–97.

YANG Tong, ZHANG Mei, CHEN Dan-yang, et al. Allelopathy of *Medicago sativa* L. soil extracts on *Althaea rosea* Cavan[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(1): 92–97.

紫花苜蓿土壤浸提液对蜀葵的化感作用

杨 彤, 张 梅, 陈丹阳, 郑璞帆, 石福臣*

(南开大学生命科学学院, 天津 300071)

摘 要:为探究紫花苜蓿对蜀葵种子萌发和生长的化感作用, 采取了紫花苜蓿根际及距离根际 20、40、60 cm 处表层 5~10 cm 的土壤, 采用高效液相色谱法(HPLC)检测土壤浸提液(分别表示为 R、D20、D40、D60)中 5 种有机酸类化感物质的含量。采用生物检测方法分析测定了土壤浸提液对蜀葵种子萌发的影响, 并通过盆栽试验测定了紫花苜蓿与蜀葵间作条件下蜀葵叶绿素、丙二醛(MDA)、可溶性蛋白及生物量等生理生态学指标。结果表明: 5 种有机酸在紫花苜蓿根际的含量最高, 随着与根际距离的增加有机酸含量逐渐减少; R 处理下, 蜀葵发芽率和发芽指数比对照(蒸馏水)分别降低 6.23% 和 31.32%, 根长和苗长则与对照相比分别显著减少了 56.11% 和 48.94%。盆栽实验结果表明, 紫花苜蓿和蜀葵间作对蜀葵地上和地下生物量均产生明显抑制作用, 与单种时相比分别减少 8.01% 和 23.99%; 间作使蜀葵叶绿素含量降低、MDA 和可溶性蛋白含量升高。研究表明, 紫花苜蓿对蜀葵有明显的化感作用, 种植时不宜过密, 应至少保持间距 60 cm。

关键词:紫花苜蓿; 蜀葵; 土壤浸提液; 种子萌发; 互作; 化感作用

中图分类号: S184

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)01-0092-06

doi: 10.13254/j.jare.2018.0361

Allelopathy of *Medicago sativa* L. soil extracts on *Althaea rosea* Cavan

YANG Tong, ZHANG Mei, CHEN Dan-yang, ZHENG Pu-fan, SHI Fu-chen*

(College of Life Sciences, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: In order to investigate the allelopathy of alfalfa (*Medicago sativa* L.) on seed germination and growth of hollyhock (*Althaea rosea* Cavan), the surface layer soil (5~10 cm) at the alfalfa rhizosphere (R) and 20, 40 cm, and 60 cm away from the alfalfa rhizosphere (D20, D40, D60, respectively) were collected. The contents of allelochemicals in soil extracts of these samples were detected by high performance liquid chromatography (HPLC). The effects of different soil extracts on the seed germination of hollyhock were studied using a bioassay method, and physiological and ecological indexes such as biomass, chlorophyll, malondialdehyde (MDA), and soluble sugar of hollyhock under intercropping conditions were determined by pot experiment. The results showed that the contents of five organic acids were highest at the alfalfa rhizosphere, and decreased gradually with increasing distance. Compared with the control, under R treatment, the germination percentage and germination index decreased by 6.23% and 31.32%, respectively; The root length and seedling length decreased by 56.11% and 48.94%, respectively. The results of the pot experiment showed that the intercropping of alfalfa and hollyhock significantly inhibited the aboveground and underground biomass of the hollyhock by 8.01% and 23.99%, respectively, which could also decrease the chlorophyll content, and increase the MDA content and soluble protein content. The study indicates that alfalfa has an obvious allelopathic effect on hollyhock, and should not be planted too densely, keeping at least 60 cm spacing.

Keywords: alfalfa; hollyhock; soil extracts; seed germination; interaction; allelopathy

收稿日期: 2018-12-13 录用日期: 2019-03-26

作者简介: 杨 彤(1994—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 从事环境与资源植物学研究。E-mail: sty6980@163.com

*通信作者: 石福臣 E-mail: feshi@nankai.edu.cn

基金项目: 天津市农业产业技术体系创新项目(ITTFPRS2018001)

Project supported: Tianjin Agricultural Industry Technology System Innovation Project(ITTFPRS2018001)

化感作用是植物或微生物产生的代谢物对环境其他植物或微生物有利或不利的的作用^[1],植物合成的化感物质主要通过植物体释放挥发、植物残体分解和根系分泌进入土壤。一些研究发现,松科、禾本科、豆科、玄参科等科属植物具有化感作用,并鉴定出了皂苷类、酚酸类、有机酸、芳香族化合物等多种化感物质^[2-7]。这些化感物质有些可以抑制其他植物的生长,表现出种间抑制性,有些则抑制了自身种子萌发、幼苗,表现出自毒作用,因此,研究化感作用对于深入了解植物种间、种内个体之间的相互作用具有重要的科学意义^[8]。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)是豆科苜蓿属多年生草本植物,具有耐盐性强、抗逆性强、分布广等特点^[9]。紫花苜蓿在农业上是优良牧草,在园林上因其具有较高观赏性常用于规模化种植^[10]。紫花苜蓿株高40~50 cm,枝叶翠绿,紫色总状或头状花序聚生枝端非常艳丽,因此工程上常用来单独成片种植或者同蜀葵相间种植或混合种植,以期获得立体、丰富多彩的景观效果。蜀葵(*Althaea rosea* Cavan)是锦葵科蜀葵属多年生草本植物^[9],株高一般为80~150 cm,具有生物量大、耐受性强等特点,适合广泛栽培。蜀葵花色艳丽多样,花瓣中的紫色素易溶于酒精及热水,可用作食品着色剂。蜀葵茎皮纤维可替代麻用,全草可入药,具有清热凉血的功效^[11-12]。园林工程实践中多注重服务半径和园林设计,而常忽略植物间相互作用的问题,使植物配置缺乏科学性。化感作用存在一定的作用范围,在进行景观设计时应该避免在小范围内种植相互抑制的植物,这样既可防止植物群落的单一化,提升景观设计效果,又可以减弱植物间的相互干扰。因此研究植物的化感作用对于明确植物种间关系和保持园林人工生态系统的稳定性均具有重要意义^[13-14]。

早期的研究表明,紫花苜蓿的化感作用较强,表现一定的自毒效应^[15-18]。目前,对于紫花苜蓿化感作用的研究大多涉及化感现象的观察、化感物质的分离提取和鉴定等方面,对于其化感作用受体的研究只局限在蔬菜、牧草、杂草等^[19-23],而对园林植物影响研究较少。为研究紫花苜蓿对蜀葵的化感作用,本研究通过研究紫花苜蓿根际及距紫花苜蓿根际不同距离处的表层土壤中化感物质含量,探讨紫花苜蓿的化感作用空间范围;通过培养皿滤纸培养法和盆栽间作试验研究紫花苜蓿对蜀葵的化感作用,为紫花苜蓿草地的更新、紫花苜蓿与其他园林植物的混种等园林绿化工

程的管理和实践提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试紫花苜蓿种子购自北京芳萱苑种子有限公司,蜀葵种子采自天津市蜀葵适生区。土样采自紫花苜蓿种植地。自紫花苜蓿草丛边缘开始,去除表层枯枝落叶,采集根际及距离根际半径为20、40、60 cm的5~10 cm表层土,土样装塑封袋中置于4℃冰盒带回实验室。挑去植物细根后,称取土样各10 g,分别置于锥形瓶中,每瓶中加入100 mL蒸馏水,封口,摇床150 r·min⁻¹振荡12 h,取下后静置12 h,再经3500 r·min⁻¹离心10 min后取上清,得到土壤浸提液。

1.2 土壤有机酸含量测定

紫花苜蓿根际及距根际不同距离的土壤有机酸类化感物质采用高效液相色谱法(HPLC)进行测定^[24]。采用C18反相柱(250 mm×4.6 mm,5 μm),柱温25℃,进样量20 μL,流速1 mL·min⁻¹,流动相为乙腈-0.1%磷酸(2:98,V/V)水溶液,检测波长为210 nm。

1.3 化感作用的生物检测

采用培养皿滤纸发芽法进行紫花苜蓿土壤化感效应的生物检测^[25]。实验设置土壤浸提液R(紫花苜蓿根际土壤浸提液)、D20、D40、D60(距紫花苜蓿根际半径分别为20、40、60 cm处土壤浸提液)4个处理,3次重复。培养皿中铺两层滤纸,分别加入土壤浸提液并使滤纸保持湿润。蜀葵种子经3% H₂O₂溶液消毒10 min,蒸馏水冲洗3次,转入各培养皿中,每皿20粒,将培养皿放置在(25±1)℃人工气候箱中培养。每日补充等量适量的土壤浸提液,以蒸馏水为对照(CK),每隔24 h记录各处理及对照发芽数。培养7 d后从各皿中随机选取10株幼苗,测定根长、苗长,计算发芽率(Germination percentage, GP)、发芽指数(Germination index, GI)、化感指数(Response index, RI)、化感综合效应指数(Mean of RI, M)等指标^[26-27],各指标采用如下公式计算:

$$\text{发芽率 GP} = \frac{\text{总发芽数}}{\text{供试种子数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽指数 GI} = \sum (G_i/D_i)$$

式中:G_i为*t*日的发芽数;D_i为相应的发芽日数。

$$\text{化感指数 RI} = T/C - 1 (T < C); \text{RI} = 1 - C/T (T \geq C)$$

式中:C为对照值;T为处理值。

$$\text{化感综合效应指数 } M = (\sum a)/n$$

式中:a代表同一处理下的各指标的RI;n为测定指标

的总个数。

1.4 盆栽试验

采用盆栽法进行间作实验。紫花苜蓿和蜀葵种子经3% H₂O₂溶液消毒10 min、蒸馏水冲洗3次后转入育苗盘中,种子萌发后待蜀葵幼苗长出3片叶时,将两种植物幼苗移入花盆中。间作处理每个花盆保留蜀葵1株、苜蓿5株,在室外遮雨网室中培养,期间定时定量浇水,保持水分田间持水量的60%左右。培养60 d后取样进行生理实验,70 d培养结束后将蜀葵连根取出,用蒸馏水和去离子水清洗,晾干后用剪刀将根部与地上部分分开,置于烘箱中105℃杀青30 min后80℃烘干至恒质量,称量根部与地上部生物量。叶绿素含量采用紫外分光光度法测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定^[28]。

1.5 数据分析

利用Microsoft Excel 2013和SPSS 20.0软件进行数据处理和统计分析,采用单因素方差分析和最小显著差异法检验种子萌发指标的差异显著性,对间作处理下生理生态指标进行t-检验。

2 结果与分析

2.1 不同距离处土壤中有机酸类化感物质的含量

HPLC法定量检测紫花苜蓿根际及距根际不同距离处的土壤中5种有机酸类化感物质含量,以有机酸溶液浓度为横坐标,色谱峰面积为纵坐标制作标准曲线,5种有机酸(水杨酸、苹果酸、草酸、柠檬酸、富马酸)在1~100 μg·mL⁻¹浓度范围内均呈现良好线性关系,得到线性回归方程分别为 $y=10\ 109x+28\ 094$ ($R^2=0.999\ 3$)、 $y=802.84x+41\ 254$ ($R^2=0.998\ 6$)、 $y=8\ 721.5x+37\ 942$ ($R^2=0.996\ 4$)、 $y=697.68x+6\ 566.4$ ($R^2=0.984\ 5$)、 $y=106\ 252x-39\ 344$ ($R^2=0.999\ 4$)。

根据回归方程分别计算各处理土壤中5种有机酸含量,结果(表1)显示,根际土壤浸提液的有机酸含量较高,随着距离的增加,根区土壤中有机酸含量降低,表明有机酸类化感物质的含量及分布与距紫花苜蓿植株的距离有关,呈现明显的空间分布特征。

2.2 紫花苜蓿不同土壤浸提液对蜀葵种子萌发的影响

各土壤浸提液处理对蜀葵种子发芽均产生影响。由图1可知,蜀葵各处理的发芽率均低于对照,R处理对种子萌发抑制作用最大,与对照相比发芽率显著降低了6.23%,各土壤浸提液处理间发芽率差异不显著。由表2可知,各处理蜀葵发芽指数均低于对照,

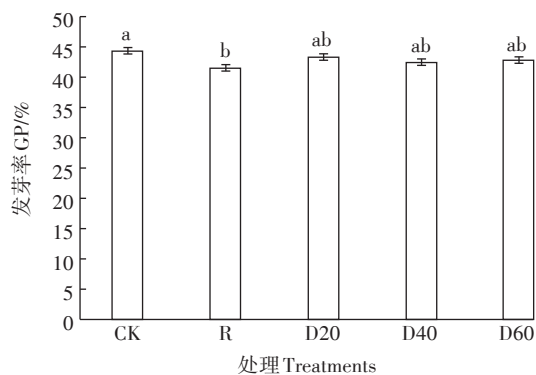
表1 不同处理土壤中有有机酸类化感物质含量(μg·mL⁻¹)

Table 1 Allelochemical contents of soil extracts in different treatments(μg·mL⁻¹)

处理 Treatments	水杨酸 Salicylic acid	苹果酸 Malic acid	草酸 Oxalic acid	柠檬酸 Citric acid	富马酸 Fumaric acid
R	11.22	17.01	10.10	9.63	0.47
D20	9.94	15.46	10.05	7.75	0.42
D40	3.36	15.14	9.91	6.31	0.39
D60	0.38	14.66	9.40	5.09	—

注:—表示未检出。R和D20、D40、D60分别表示紫花苜蓿根际及距根际20、40、60 cm处土壤浸提液。下同。

Note: — means not detected; R means rhizosphere soil extracts of alfalfa; D20, D40, D60 means soil extracts at 20, 40 and 60 cm away from alfalfa rhizosphere, respectively. The same below.



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below

图1 不同处理下蜀葵种子发芽率

Figure 1 Seed germination percentage of hollyhock in different treatments

表2 不同处理下蜀葵种子萌发性状

Table 2 Germination characteristics of hollyhock in different treatments

处理 Treatments	发芽指数 GI	根长 Root length/cm	苗长 Seedling length/cm
CK	17.18±1.30a	2.21±0.33a	0.94±0.30a
R	11.80±2.98b	0.97±0.23c	0.48±0.07c
D20	14.88±0.72ab	1.40±0.26b	0.49±0.06c
D40	13.92±0.19ab	1.46±0.25b	0.66±0.05b
D60	15.08±0.17ab	2.13±0.30a	0.80±0.14a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments($P<0.05$).

其中R处理下发芽指数与对照相比显著降低了31.32% ($P<0.05$)。各处理蜀葵根长和苗长随距离的增加总体呈现增加的趋势,R处理的蜀葵根长和苗长均最小,与对照相比分别显著减少了56.11%和48.94%

($P<0.05$)。

2.3 紫花苜蓿不同土壤浸提液对蜀葵种子萌发的化感效应

化感综合效应指数是衡量各萌发指标化感指数的综合效应,其绝对值的大小反映了化感效应的强弱。比较化感综合效应指数(表3)可以看出,距紫花苜蓿根际越近的土壤浸提液对蜀葵生长产生的抑制作用越强,根际土壤浸提液的抑制作用最强,当距离继续增加时,土壤浸提液对蜀葵抑制作用逐渐减弱。说明紫花苜蓿生长过程中产生的化感物质对周围植株有一定的影响,影响的大小与距紫花苜蓿植株的距离有关,距紫花苜蓿植株越近,受其化感作用的影响越严重。

2.4 紫花苜蓿与蜀葵间作的化感效应

与单种相比,紫花苜蓿与蜀葵间作时蜀葵植株较弱小,地上部生物量显著减少了8.01%($P<0.05$),由于与紫花苜蓿根系直接接触而受到其释放的化感物质的影响,蜀葵根部生物量相比于单种时显著减少了23.99%($P<0.01$)。间作时蜀葵的叶绿素合成受到抑制,叶绿素含量与单种时相比极显著降低,同时MDA含量与单种相比显著升高了15.72%($P<0.05$),可溶性蛋白含量与单种相比无显著差异(表4)。

3 讨论

3.1 紫花苜蓿根区土壤中化感物质的空间效应

化感物质是植物生命活动中产生的次生代谢物质,大多数为小分子的酚、酸,它们影响植物的生长调节、光合作用、呼吸代谢、营养吸收、蛋白质和核酸代谢等生命活动^[2]。植物根系能够分泌多种具有生物活性的化感物质,这是化感物质进入环境的重要通道^[29-30]。植物根系分泌的酚类化合物是抑制植物生长的重要物质^[31],Pérez等^[32]研究发现野燕麦根系分泌的对羟基苯甲酸、香草酸等化感物质对春小麦胚根和

表3 不同处理土壤浸提液对蜀葵种子萌发的化感效应

Table 3 Allelopathy of soil extracts in different treatments on seed germination of hollyhock

处理 Treatments	化感指数 RI				化感综合效应 指数 M
	发芽率 GP	发芽指数 GI	根长 Root length	苗长 Seedling length	
R	-0.062	-0.313	-0.562	-0.487	-0.356
D20	-0.021	-0.017	-0.365	-0.474	-0.219
D40	-0.041	-0.190	-0.340	-0.294	-0.216
D60	-0.030	-0.122	-0.035	-0.147	-0.084

表4 间作对蜀葵生理生态指标的影响

Table 4 Effect of intercropping on physiological and ecological indexes of hollyhock

处理 Treatments	单种	间作	t-检验 t-test
	Monoculture	Intercropping	
地上部生物量 Shoot biomass/g	5.49±0.02	5.05±0.01	*
根部生物量 Root biomass/g	3.21±0.01	2.44±0.01	**
叶绿素含量 Chlorophyll content/mg·g ⁻¹	2.86±0.01	2.11±0.01	**
丙二醛含量 MDA content/μmol·g ⁻¹	12.66±0.03	14.65±0.02	*
可溶性蛋白含量 Soluble protein content/mg·g ⁻¹	18.27±0.66	19.61±0.25	ns

注:**表示 $P<0.01$,*表示 $P<0.05$,ns表示无显著差异。

Note:** means $P<0.01$,* means $P<0.05$,and ns means no significance.

胚芽生长有显著抑制作用。紫花苜蓿根区土壤中含有多种化感物质,赵瑞林等^[33]采用GC-MS检测鉴定出,紫花苜蓿根际土壤中化感物质包括各种直链烷烃、环烷烃、烯烃、醇类、酚酸和芳香族化合物等多种物质,且根际土的邻苯二甲酸二丁酯等化感物质含量均高于非根际土。本研究中,紫花苜蓿土壤中的化感物质含量随着距根系距离的增加而减少,反映了化感物质的空间效应和浓度效应。

紫花苜蓿具有一定的自毒效应,种植多年后会越来越稀疏,并且与其伴生的植物也会减少^[16,25,34]。通过研究比较紫花苜蓿、黄花草木樨等几种豆科牧草地上部水浸提液的化感效应发现,黄花草木樨对稗草种子发芽率有显著抑制作用,而紫花苜蓿对稗草幼苗生长表现出了明显的抑制作用,但随着水浸提液浓度升高抑制效应的增强不再显著^[27]。本研究表明,紫花苜蓿根系不同距离的土壤浸提液对蜀葵种子萌发产生抑制作用,在幼苗发育过程中则呈现出“近抑远不抑”的趋势,距离紫花苜蓿植株较近处的土壤浸提液显著抑制蜀葵根和苗的生长,较远处的土壤浸提液则对蜀葵的生长无显著抑制作用,这可能是化感物质空间分布的结果,即距离较远处化感物质含量低,从而未表现出抑制效果,这与已有研究^[17,35-36]结果相似。

3.2 间作处理对蜀葵生长的影响

化感作用受到化感物质来源、浸提液浓度、受体植物种类和不同生命时期的敏感程度等因素的影响^[18,37-38]。紫花苜蓿根际土壤浸提液对蜀葵种子发芽指数的抑制作用强于发芽率,这表明土壤中化感物质使种子在萌发前发生劣变,从而延缓种子发芽时间。在蜀葵生长期,间作会使植株总生物量降低,其中根部生物量的减少更明显,可能是由于根直接接触化感

物质,而地上部受到的影响有一定滞后性^[23]。研究表明,化感胁迫往往伴随氧化胁迫的发生^[39],在间作处理中蜀葵经化感物质胁迫而产生活性氧(ROS),活性氧自由基将叶绿素等作为靶标,破坏其合成,使叶绿素含量减少。MDA含量是反映脂质过氧化作用强弱的重要指标,间作处理下的MDA含量升高,说明化感物质在一定程度上破坏了细胞膜系统,渗透调节物质可溶性蛋白对化感胁迫反应不敏感,但仍在细胞中进行积累以降低化感作用对自身的危害。

4 结论

(1)HPLC检测结果表明根际土壤化感物质含量高于非根际土壤,证明根际土壤化感效应强于非根际土壤。

(2)紫花苜蓿土壤浸提液对蜀葵种子萌发有抑制作用,随着与根际距离的增加,紫花苜蓿土壤浸提液对蜀葵根和苗生长的抑制作用减弱。

(3)间作处理下蜀葵生物量和叶绿素含量降低,紫花苜蓿产生的化感作用刺激蜀葵产生应激反应,丙二醛和可溶性蛋白含量升高。因此,在实践中应避免两种植物种植过密,至少保持种植间距不小于60 cm。

参考文献:

- [1] Rice E L. Allelopathy[M]. New York: Academic Press, 1984.
- [2] 王延平, 王华田. 植物根分泌的化感物质及其在土壤中的环境行为[J]. 土壤通报, 2010, 41(2): 501-507.
WANG Yan-ping, WANG Hua-tian. Allelochemicals from root exudation and its environment behavior in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(2): 501-507.
- [3] 曹光球. 杉木自毒作用及其与主要混交树种化感作用的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2006.
CAO Guang-qiu. Chinese fir autointoxication and interspecific allelopathy between Chinese fir and its associated tree species[D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2006.
- [4] 杨雪芳. 化感水稻对邻近植物的生物化学响应及其化感物质衍生物的抑草机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
YANG Xue-fang. Biological and chemical responses of allelopathic rice to neighboring plants and the weed-suppressive mechanism of rice allelochemical derivatives[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [5] 李光, 白文斌, 任爱霞. 高粱不同连作年限对其根系分泌物组成和化感物质含量的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3535-3544.
LI Guang, BAI Wen-bin, REN Ai-xia. Effects of continuous cropping duration of sorghum on components of root exudates and contents of allelochemicals[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(12): 3535-3544.
- [6] 王小兵, 骆永明, 刘五星, 等. 花生根分泌物的鉴定及其化感作用[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12): 2803-2808.
WANG Xiao-bing, LUO Yong-ming, LIU Wu-xing, et al. Identification of peanut root exudates and their allelopathic effects[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12): 2803-2808.
- [7] 陈枫. 地黄根际土壤中化感物质的筛选及化感作用研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
CHEN Feng. Screening of allelochemicals and research on allelopathy in the rhizosphere soil of *Rehmannia glutinosa* Libosch[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016.
- [8] 孔垂华. 植物种间和种内的化学作用[C]//中国第八届植物化感作用学术研讨会论文摘要集. 南京: 中国植物保护学会植物化感作用专业委员会, 2017.
KONG Chui-hua. Interspecific and intraspecific chemical cooperation of plants[C]//Summary of papers of the eighth symposium on allelopathy of plants in China[C]. Nanjing: Professional Committee on Plant Allelopathy of the Chinese Society for Plant Protection, 2017.
- [9] 中国科学院植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
Editorial Board of Flora, Chinese Academy of Sciences. Flora of China [M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [10] 纪英杰, 崔世杰. 腐植酸肥对园林植物——紫花苜蓿施用效应的研究[J/OL]. 城市建设理论研究(电子版), 2012(6).
JI Ying-jie, CUI Shi-jie. Study on the effect of humic acid fertilizer on landscape plants alfalfa[J/OL]. *Chengshi Jianshe Lilun Yanjiu*, 2012(6).
- [11] 饶璐璐. 多经济用途的蜀葵[J]. 蔬菜, 2004(1): 38.
RAO Lu-lu. A multi-economic hollyhock[J]. *Vegetables*, 2004(1): 38.
- [12] 周淑荣, 郭文场, 刘佳贺. 蜀葵栽培管理与园林绿化应用[J]. 特种经济动植物, 2016, 19(12): 34-35.
ZHOU Shu-rong, GUO Wen-chang, LIU Jia-he. Cultivation and management of hollyhock and its application in landscape greening[J]. *Special Economic Animal and Plant*, 2016, 19(12): 34-35.
- [13] 赵金辉. 浅谈园林植物化感作用与园林植物配植[J]. 中国林业产业, 2017(2): 85.
ZHAO Jin-hui. Allelopathy of landscape plants and planting of landscape plants[J]. *China Forestry Industry*, 2017(2): 85.
- [14] 谢苑. 白三叶水浸液对高羊茅化感作用的物候规律研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2008.
XIE Yuan. Phenological regularity of allelopathy of *Trifolium repens* water extract on *Festuca elata* Keng ex E. Alexeev[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2008.
- [15] Tran D X, Tsuzuki E. Varietal differences in allelopathic potential of alfalfa[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2010, 188(1): 2-7.
- [16] 李玉占, 梁文举, 姜勇. 苜蓿化感作用研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 186-191.
LI Yu-zhan, LIANG Wen-ju, JIANG Yong. Research progress in alfalfa allelopathy[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 186-191.
- [17] 朱晓红, 王朋, 梁文举, 等. 苜蓿化感作用的初步研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(3): 131-133.
ZHU Xiao-hong, WANG Peng, LIANG Wen-ju, et al. Preliminary study on allelopathic potential of alfalfa[J]. *Chinese Journal of Ecology*

- gy, 2004, 23(3):131-133.
- [18] 李志华, 沈益新. 紫花苜蓿化感作用的研究[J]. 草业科学, 2005, 22(12):33-36.
LI Zhi-hua, SHEN Yi-xin. Study on the allelopathy of alfalfa[J]. *Pratacultural Science*, 2005, 22(12):33-36.
- [19] 杨 倩, 王 希, 沈禹颖. 异龄苜蓿土壤浸提液对3种植物种子萌发的影响[J]. 草地学报, 2009, 17(6):784-788.
YANG Qian, WANG Xi, SHEN Yu-ying. Effect of soil extract solution from different aged alfalfa standings on seed germination of three species[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(6):784-788.
- [20] 贾鲜艳, 张晓峰, 海 棠, 等. 紫花苜蓿浸提液对受体牧草种子发芽的影响[J]. 中国草地学报, 2011, 33(6):107-112.
JIA Xian-yan, ZHANG Xiao-feng, HAI Tang, et al. Effects of alfalfa extract on recipient forage seed germination rate[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2011, 33(6):107-112.
- [21] 李志华, 沈益新. 不同品种紫花苜蓿根水浸提液化感作用效应的研究[J]. 中国草地, 2005, 27(4):39-46.
LI Zhi-hua, SHEN Yi-xin. Studies on allelopathic effects of the aqueous extracts of roots of different varieties of *Medicago sativa* L.[J]. *Grassland of China*, 2005, 27(4):39-46.
- [22] 周立业, 王亚东, 任秀珍, 等. 紫花苜蓿水浸提液对少花蒺藜草种子萌发的影响[J]. 草地学报, 2016, 24(6):1272-1277.
ZHOU Li-ye, WANG Ya-dong, REN Xiu-zhen, et al. Effects of aqueous extracts from alfalfa on seed germination and seedlings growth of *Cenchrus pauciflorus*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(6):1272-1277.
- [23] Zubair H M, Pratley J E, Sandral G A, et al. Allelopathic interference of alfalfa (*Medicago sativa* L.) genotypes to annual ryegrass (*Lolium rigidum*)[J]. *Journal of Plant Research*, 2017, 130(4):1-12.
- [24] Joanna N, Wieslaw O. Determination of alfalfa (*Medicago sativa*) saponins by high-performance liquid chromatography[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 1994, 42(3):727-730.
- [25] 李志华, 沈益新, 倪建华, 等. 豆科牧草化感作用初探[J]. 草业科学, 2002, 19(11):28-31.
LI Zhi-hua, SHEN Yi-xin, NI Jian-hua, et al. A preliminary study on the allelopathy of legumes[J]. *Pratacultural Science*, 2002, 19(11):28-31.
- [26] Williamson G B, Richardson D. Bioassays for allelopathy: Measuring treatment responses with independent controls[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1988, 14(1):181-187.
- [27] 郭晓霞, 沈益新, 李志华. 几种豆科牧草地上部水浸提液对稗草种子和幼苗的化感效应[J]. 草地学报, 2006, 14(4):356-359.
GUO Xiao-xia, SHEN Yi-xin, LI Zhi-hua. A study on the allelopathic effect of water extracts from aerial part of legume herbage on germination and seedling growth of barnyard grass[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2006, 14(4):356-359.
- [28] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
ZHANG Zhi-liang, QU Wei-jing. Guidance of plant physiology experiments[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [29] Michael A B, Keith C, Anthony M H, et al. Does allelopathy offer real promise for practical weed management and for explaining rhizosphere interactions involving higher plants? [J]. *Plant & Soil*, 2001, 232(1/2):31-39.
- [30] 马丹炜, 王亚男, 王 煜, 等. 化感胁迫诱导植物细胞损伤研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(5):1640-1645.
MA Dan-wei, WANG Ya-nan, WANG Yu, et al. Advance in allelochemical stress induced damage to plant cells[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(5):1640-1645.
- [31] 史刚荣. 植物根系分泌物的生态效应[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1):97-101.
SHI Gang-rong. Ecological effects of plant root exudates[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(1):97-101.
- [32] Pérez F J, Ormeño-Núñez J. Root exudates of wild oats: Allelopathic effect on spring wheat[J]. *Phytochemistry*, 1991, 30(7):2199-2202.
- [33] 赵瑞林, 蔡立群. 紫花苜蓿根系分泌物的鉴定及羟基苯甲酸的化感效应研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(35):34-41.
ZHAO Rui-lin, CAI Li-qun. The determination of root exudates of *Medicago sativa* and the study on allelopathic effect of typical exudation 3, 5-di-tert-Butyl-4-hydroxybenzaldehyde[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(35):34-41.
- [34] Chon S U, Kim J D. Biological activity and quantification of suspected allelochemicals from alfalfa plant parts[J]. *Journal of Agronomy & Crop Science*, 2010, 188(4):281-285.
- [35] 张文杰. 紫花苜蓿化感作用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
ZHANG Wen-jie. Study on allelopathy of alfalfa[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010.
- [36] 荣思川. 紫花苜蓿自毒物质含量及其效应研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2017.
RONG Si-chuan. Study on the autotoxin contents and its autotoxicity in *Medicago sativa* L. [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2017.
- [37] 陈 娟, 白尚斌, 周国模, 等. 毛竹浸提液对苦楮幼苗生长的化感效应[J]. 生态学报, 2014, 34(16):4499-4507.
CHEN Juan, BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, et al. Allelopathic effects of *Phyllostachys edulis* extracts on *Castanopsis sclerophylla*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(16):4499-4507.
- [38] Wu A P, Yu H, Gao S Q, et al. Differential belowground allelopathic effects of leaf and root of *Mikania micrantha*[J]. *Trees*, 2009, 23(1):11-17.
- [39] Renata B, Agnieszka G. ROS and phytohormones in plant-plant allelopathic interaction[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2007, 2(4):317-318.