西北植物学报,2024,44(8):1295-1304
*Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.*
http://xbzwxb.alljournal.net/xbzwxb/home

**引用格式**:何邦印,胡佳佳,裴婧宏,等.果树凋落叶浸提液对多年生黑麦草和紫花苜蓿的化感效应[J].西北植物学报,2024,44(8):1295-1304.[HE B Y, HU J J, PEI J H, et al. Allelopathic effects of litter extracts from fruit trees on *Lolium perenne* and *Medicago sativa*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024,44(8): 1295-1304.] **DOI**:10.7606/j.issn.1000-4025.20240059

# 果树凋落叶浸提液对多年生黑麦草和紫花苜蓿的化感效应

何邦印[1],胡佳佳[1],裴婧宏[1],房美艳[1],李江文[1,2*]

(1 延安大学 生命科学学院,陕西延安 716000;2 陕西省区域生物资源保育与利用工程技术研究中心,陕西延安 716000)

**摘　要**　**【目的】**探讨陕北地区红枣、核桃及苹果凋落叶的化感效应,为选择经济林下适生草种提供理论指导。**【方法】**以室外盆栽牧草多年生黑麦草和紫花苜蓿为材料,设置不同浓度红枣、核桃和苹果凋落叶浸提液(0.1,0.05,0.025,0.012 5 g/mL)处理,测定牧草生长和生理指标。**【结果】**(1)牧草单株干质量在3类凋落叶各浓度浸提液处理下大多比对照显著降低,且红枣浸提液的降幅较小。(2)牧草丙二醛含量在3类浸提液处理下均高于对照,而红枣浸提液的增幅较小,其叶绿素含量、抗坏血酸含量和抗氧化酶活性变化在3类浸提液间存在明显差异,且多年生黑麦草的变幅明显大于紫花苜蓿。(3)3类浸提液对牧草根系性状的影响存在明显差异,均抑制其根长生长,明显抑制多年生黑麦草根尖数,而促进紫花苜蓿根尖数。**【结论】**3种果树凋落叶浸提液对2种牧草生长多表现出显著抑制作用,并以红枣浸提液的抑制作用最小,且多年生黑麦草生长受抑制程度小于紫花苜蓿。

**关键词**　果树;凋落叶;黑麦草;紫花苜蓿;化感作用;生物量;根系性状;生化指标

**中图分类号**　S541.9　　**文献标志码**　A

# Allelopathic effects of litter extracts from fruit trees on *Lolium perenne* and *Medicago sativa*

HE Bangyin[1], HU Jiajia[1], PEI Jinghong[1], FANG Meiyan[1], LI Jiangwen[1,2*]

(1 College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China; 2 Shaanxi Engineering and Technological Research Center for Conversation and Utilization of Regional Biological Resources, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

**Abstract**　[**Objective**] The study aims to investigate the chemosensory effect of fading leaves of *Ziziphus jujuba*, *Juglans regia*, and *Malus pumila* in northern Shaanxi, and to provide theoretical guidance for the selection of suitable grass species under economic forests. [**Methods**] Outdoor potting forage *Lolium perenne* and *Medicago sativa* were set up with different concentrations of *Z. jujuba*, *J. regia*, and *M. pumila* withered leaf extracts (0.1, 0.05, 0.025, 0.012 5 g/mL) treatments to determine the growth and physiological indexes of the forage. [**Results**] (1) The dry mass of forage monocultures was significantly lower than the control in most of the three types of withered leaves treated with each concentration of leachate, and the decrease was smaller in the *Z. jujuba* leachate. (2) Forage malondialdehyde content was higher than the control under all three types of leachate treatments, while the increase in *Z. jujuba* leachate was smaller, and the changes in its chlorophyll content, ascorbic acid content and antioxidant en-

**收稿日期**:2024-01-18;**修改稿收到日期**:2024-04-04
**基金项目**:陕西省自然科学基础研究项目(2021JQ-623);延安大学大学生创新创业项目(D2023095)
**作者简介**:何邦印(1997—),男,在读硕士生,主要从事草地生态学和植物生态学研究。E-mail:1642953125@qq.com
*通信作者:李江文,硕士生导师,主要从事草地生态学和植物生态学研究。E-mail:jiangwen-0105@163.com

zyme activity differed significantly among the three types of leachates, and the variability of *L. perenne* was significantly greater than that of *M. sativa*. (3) There were significant differences in the effects of the three types of extracts on the root traits of the forages, all of which inhibited their root length growth, significantly inhibited the number of *L. perenne* root tips, and promoted the number of *M. sativa* root tips. [**Conclusion**] Three kinds of fruit tree leaf extract showed significant inhibition on the growth of two kinds of forage grasses, and the inhibitory effect of *Z. jujuba* extract was the smallest, and the growth of *L. perenne* was less inhibited than that of *M. sativa*.

**Key words** fruit trees; leaf litter; *Lolium perenne*; *Medicago sativa*; allelopathy; biomass; root traits; biochemical indexes

核桃、红枣和苹果是陕北地区主要的经济林树种,随着经济林面积的扩大,林下土地的传统农业用途受到限制,出现干层、水土流失等现象,降低了土地的综合利用效率[1]。农林复合系统可有效解决这类问题,通过促进生物多样性和土壤健康,对于植被恢复和提高土地利用率具有重要作用[2],经济林与牧草的间作关系对复合系统的成功至关重要,化感作用是影响林草间作的主要因素之一,且普遍存在于自然界中[3]。因此,研究核桃、红枣和苹果凋落叶化感物质对牧草的影响,为生产实践提供参考,指导农林生产者在实际种植和管理中更好地利用凋落叶资源,提高植物的生长效率和产量稳定性。

3 种不同人工经济林凋落叶产生的次生代谢物具有多样性[4],这类次生代谢物被称为化感物质,它们是植物体向周围环境释放的次生代谢物,能够促进或抑制周围植物的生长发育[5]。化感物质通过影响植物的光合作用、呼吸作用、根系生长和养分吸收等关键生理过程,以及调节细胞酶活性和抗氧化机制,综合作用于植物生长发育的整个过程[6-7]。研究表明,油茶(*Camellia oleifera*)和花生(*Arachis hypogaea*)间作的化感效应表现出显著的抑制作用,尤其是对花生的生长[8];当高地竹(*Oldeania alpina*)提取物浓度增加时,小麦(*Triticum aestivum*)的茎和根长度与对照组相比显著减少,证实了浓度效应的存在[9]。

在核桃叶中发现的胡桃醌等化感物质,随着浓度增加,会显著降低黄瓜(*Cucumis sativus*)的产量及品质,使黄瓜更易受到胁迫和病菌攻击[10]。众多研究观察到"低促高抑"现象,即低浓度的化感物质可能促进植物生长,而高浓度则抑制植物生长[11-12]。基于化感物质的种类及浓度效应,在农林复合系统中应重点考虑经济林与草种的搭配,提高牧草产量的同时,加强农林复合系统的稳定性。目前,对于陕北地区核桃、红枣和苹果凋落叶的化感效应尚不明确,研究其凋落叶浸提液对紫花苜蓿和多年生黑麦草的生物量及根系性状的影响具有重要意义。

研究旨在通过测定紫花苜蓿和多年生黑麦草在核桃、红枣和苹果凋落叶浸提液处理下的生物量、根系性状及生化指标,明确不同树种、不同浓度浸提液对牧草生长的影响,为陕北地区农林复合系统中林草间作的可持续发展提供科学依据,特别是在提高生态效益和经济效益方面。通过这种方式,可以更好地理解和利用林草共生系统,以实现生态平衡和资源的高效利用。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

该研究着重关注核桃、苹果和红枣凋落叶浸提液对多年生黑麦草和紫花苜蓿生长的化感效应,3 种凋落叶采集于延安市宝塔区(109°26′53″E,36°31′28″N),该地区海拔 898.5 m,年平均降水量 550 mm,属于温带大陆性季风气候,将 3 种样品风干并粉碎备用。多年生黑麦草和紫花苜蓿均购于北京正道种业有限公司。为排除种子是否适合在陕北地区生长,对试验结果产生影响,该品系在延安地区清耕地试种 2 年,表现良好。试验前选取紫花苜蓿、'惊喜'、WL343HQ、WL354HQ、WL358HQ、羊茅(*Festuca ovina*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、多年生黑麦草试种,其中紫花苜蓿和多年生黑麦草长势较好。

### 1.2 试验方法

将 100 g 核桃、红枣和苹果凋落叶粉末分别与 1 000 mL 灭菌蒸馏水混合并振荡均匀,于实验室室温放置 24 h,以 0.1 g/mL 为原始浓度浸提液(标记为 E 浓度,由林下单位面积实际落叶生物量和年降水量决定,3 种经济林单位面积凋落叶量差异不显著,取其平均值,假设全部参与浸提即浸提液最高浓度),使用灭菌蒸馏水将原始浓度浸提液分别稀释为

0.05，0.025，0.012 5 g/mL，分别记为 H、M 和 L，作为试验浸提液。

盆栽试验：每盆均匀播种 30 粒种子，每种草种设置 3 个重复，红枣、苹果和核桃凋落叶浸提液下各设置 5 个处理，计 90 盆，对照组喷洒蒸馏水，试验组每隔 7 d 喷洒不同浓度浸提液（500 mL），多年生黑麦草和紫花苜蓿成熟终止喷洒浸提液，测定相关指标。

数据采集：采用紫外分光光度计法测定叶绿素（Chl）含量，氮蓝四唑法测定超氧化物歧化酶（SOD）活性，硫代巴比妥酸法测定丙二醛（MDA）含量，高锰酸钾滴定法测定过氧化氢酶（CAT）活性，愈创木酚法测定过氧化物酶（POD）活性，二氯酚靛酚滴定法抗坏血酸（$V_C$）含量[13]。使用根系扫描系统测量并分析根系体积、长度、根表面积和根尖数。生物量测定，鲜质量：将牧草从根上部分进行刈割，装入塑封袋并做好标记，带回实验室称其质量；干质量：将新鲜牧草分别装入信封袋中并做好标记，置于 60 ℃烘箱中进行烘干，称其质量。

### 1.3　数据处理

用 Excel 整理数据；用 SPSS 23.00 进行单因素方差分析（one-way ANOVA）和双因素方差分析（two-way ANOVA），显著性检验在 0.05 水平下进行；用 Origin 21 对统计分析结果作图。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同浸提液对多年生黑麦草和紫花苜蓿生物量的影响

双因素方差分析结果（表 1）表明，不同浸提液类型、不同浓度之间多年生黑麦草和紫花苜蓿的生物量存在极显著差异（$P<0.01$），两者交互作用下 2 种草的生物量存在极显著差异（$P<0.01$）。

**表 1　不同树种浸提液对多年生黑麦草和紫花苜蓿生物量的双因素方差分析**

Table 1　Two-way ANOVA analysis of biomass of *L. perenne* and *M. sativa* under different tree extract treatments

| 草种 Species | 方差来源 Source of variation | 株高 Height | 单株干质量 Dry mass per plant | 单株鲜质量 Fresh mass per plant | 根鲜质量 Root fresh mass | 根干质量 Root dry mass |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 多年生黑麦草 *L. perenne* | 树种 Varieties of trees | 2.41 | 217.75** | 208.11** | 27.61** | 14.20** |
| | 浸提液浓度 Extract concentration | 51.84** | 120.54** | 116.99** | 25.31** | 21.42** |
| | 树种×浸提液 Varieties×Extract | 1.59 | 29.75** | 28.52** | 16.99** | 14.07** |
| 紫花苜蓿 *M. sativa* | 树种 Varieties of trees | 3.07 | 23.69** | 23.65** | 76.85** | 61.50** |
| | 浸提液浓度 Extract concentration | 103.75** | 56.68** | 56.53** | 23.97** | 91.27** |
| | 树种×浸提液 Varieties×Extract | 4.49* | 10.39** | 10.36** | 25.59** | 22.16** |

注：表中数值为 $F$ 统计量，* 表示在 0.05 水平下差异显著；** 表示在 0.01 水平下差异显著。下同。

Note: The values in the table are $F$-statistics. * indicates significant difference at 0.05 level. ** indicates significant difference at 0.01 level. The same as below.

表 2 表明，不同浓度苹果浸提液下，多年生黑麦草和紫花苜蓿单株干、鲜质量随浸提液浓度增加显著降低，E 浓度浸提液下多年生黑麦草根的干、鲜质量显著最高，紫花苜蓿根的干、鲜质量随浸提液浓度的增加而降低（$P<0.05$）；不同浓度红枣浸提液下，M、H 和 E 浓度处理下多年生黑麦草的生物量显著低于对照组和 L 处理，紫花苜蓿在 L 和 E 浓度处理下单株干、鲜质量显著低于其他处理，其根的生物量显著低于对照组（$P<0.05$）；不同浓度核桃浸提液下，处理组多年生黑麦草和紫花苜蓿单株干、鲜质量显著低于对照组，其中紫花苜蓿干、鲜质量随浸提液浓度增加而降低，E 浓度下多年生黑麦草根的干、鲜质量显著高于其他组，紫花苜蓿在浸提液处理下根的干、鲜质量显著降低（$P<0.05$），在 E 浓度下显著高于其他组。3 种浸提液处理下，2 种草的株高随浸提液浓度增加呈先上升后降低趋势。紫花苜蓿的生物量显著高于多年生黑麦草（$P<0.05$）。

同种浓度不同浸提液类型下多年生黑麦草生物量，L 和 H 浓度下单株干、鲜质量：红枣浸提液处理＞苹果浸提液处理＞核桃浸提液处理（$P<0.05$），根干质量无显著差异（$P>0.05$）；M 和 H 浓度下单株干、鲜质量：红枣浸提液处理＞苹果、核桃浸提液处理，核桃浸提液处理根鲜质量显著最高（$P<0.05$）。同种浓度不同浸提液类型下紫花苜蓿生物量，3 种浸提液的 L 浓度下单株干、鲜质量及根干质量无显著差异（$P>0.05$）；M 浓度下单株干、鲜质量：核桃、红枣浸提液

处理>苹果浸提液处理($P<0.05$),根干、鲜质量:核桃浸提液处理>红枣、苹果浸提液处理($P<0.05$);H和E浓度下单株干、鲜质量:红枣浸提液处理>苹果、核桃浸提液处理,核桃浸提液处理下根干、鲜质量显著最高($P<0.05$)。同种浓度不同浸提液类型下多年生黑麦草和紫花苜蓿株高无显著差异($P>0.05$)。

**表 2 不同树种浸提液对多年生黑麦和紫花苜蓿草生物量的影响**

Table 2 Effects of different tree extracts on the biomass of *L. perenne* and *M. sativa*

| 草种 Species | 浸提液类型 Type of extract | 浓度 Concentration | 株高 Height /cm | 单株干质量 Dry mass per plant/g | 单株鲜质量 Fresh mass per plant/g | 根鲜质量 Root fresh mass/g | 根干质量 Root dry mass/g |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 多年生黑麦草 *L. perenne* | 苹果 *M. pumila* | CK | 7.23±0.40Ba* | 0.52±0.03Aa* | 2.03±0.13Aa* | 0.81±0.08Ba* | 0.22±0.02Ba* |
| | | L | 10.23±1.31Aa* | 0.31±0.05Bb* | 1.22±0.19Bb* | 0.70±0.03Ba* | 0.19±0.01Ba* |
| | | M | 10.40±0.36Aa* | 0.15±0.02Cb* | 0.57±0.07Cb* | 0.79±0.15Ba* | 0.19±0.04Ba* |
| | | H | 7.10±0.66Ba* | 0.18±0.05Cb* | 0.69±0.17Cb* | 0.65±0.17Bb* | 0.18±0.04Ba* |
| | | E | 7.43±0.83Ba* | 0.10±0.03Db* | 0.39±0.13Db* | 1.73±0.14Ab* | 0.45±0.03Ab* |
| | 红枣 *Z. jujuba* | CK | 7.23±0.40Ca* | 0.52±0.03Ba* | 2.03±0.13Ba* | 0.81±0.08Aa* | 0.22±0.02ABa* |
| | | L | 8.73±0.21Ba* | 0.76±0.09Aa* | 2.94±0.36Aa* | 1.03±0.13Aa* | 0.29±0.04Aa* |
| | | M | 10.47±0.32Aa* | 0.37±0.04Ca* | 1.45±0.17Ca* | 0.54±0.06Ba* | 0.17±0.02BCa* |
| | | H | 7.23±0.15Ca* | 0.40±0.06Ca* | 1.55±0.23Ca* | 0.56±0.03Bb* | 0.18±0.01BCa* |
| | | E | 5.97±1.08Da* | 0.30±0.05Ca* | 1.18±0.17Ca* | 0.39±0.04Bc* | 0.12±0.02Cc* |
| | 核桃 *J. regia* | CK | 7.23±0.40BCa* | 0.52±0.03Aa* | 2.03±0.13Aa* | 0.81±0.08Ba* | 0.22±0.02Ba* |
| | | L | 9.90±1.01Aa* | 0.07±0.01Cc* | 0.26±0.04Cc* | 0.77±0.18Ba* | 0.20±0.05Ba* |
| | | M | 10.07±0.90Aa* | 0.13±0.01Bb* | 0.50±0.03Bb* | 0.80±0.10Ba* | 0.20±0.02Ba* |
| | | H | 7.43±0.78BCa* | 0.07±0.03Cc* | 0.27±0.11Cc* | 1.20±0.14Ba* | 0.27±0.05Ba* |
| | | E | 5.90±0.46Ca* | 0.07±0.02Cb* | 0.29±0.05Cb* | 2.57±0.21Aa* | 0.66±0.05Aa* |
| 紫花苜蓿 *M. sativa* | 苹果 *M. pumila* | CK | 67.37±0.78BCa* | 11.54±1.78Aa* | 44.73±6.91Aa* | 14.62±0.83Aa* | 5.74±0.29Aa* |
| | | L | 71.87±4.69Bb* | 6.27±1.92Ba* | 24.31±7.48Ba* | 10.55±1.34Ba* | 2.64±0.33Ba* |
| | | M | 78.30±1.08Aa* | 2.31±0.86Cb* | 8.97±3.31Cb* | 5.82±0.19Cb* | 1.55±0.06Cb* |
| | | H | 63.70±3.84CDa* | 2.39±0.65Cb* | 9.25±2.51Cb* | 5.92±0.23Cc* | 1.49±0.08Cb* |
| | | E | 60.17±2.95Da* | 2.17±0.79Cb* | 8.43±3.06Cb* | 7.47±1.02Cb* | 1.92±0.26BCb* |
| | 红枣 *Z. jujuba* | CK | 67.37±0.78Ba* | 11.54±1.78Aa* | 44.73±6.91Aa* | 14.62±0.83Aa* | 5.74±0.29Aa* |
| | | L | 76.23±3.42Ab* | 4.32±1.08Ba* | 16.75±4.19Ba* | 6.49±0.45Cb* | 1.79±0.10Ca* |
| | | M | 78.40±1.00Aa* | 8.88±0.52Aa* | 34.45±2.03Aa* | 5.49±0.25Cb* | 1.78±0.05Cb* |
| | | H | 63.37±1.04Ca* | 11.07±2.34Aa* | 42.93±9.06Aa* | 12.64±0.35Bb* | 3.56±0.29Ba* |
| | | E | 57.57±0.49Da* | 4.63±0.66Ba* | 17.95±2.56Ba* | 5.27±0.46Cb* | 1.79±0.16Cb* |
| | 核桃 *J. regia* | CK | 67.37±0.78Ca* | 11.54±1.78Aa* | 44.73±6.91Aa* | 14.62±0.83Ba* | 5.74±0.29Aa* |
| | | L | 79.50±0.50Aa* | 4.59±0.49Ca* | 17.82±1.88Ca* | 7.73±1.85Ca* | 1.93±0.49Ca* |
| | | M | 73.80±3.96Ba* | 7.40±0.90Ba* | 28.71±3.50Ba* | 14.36±1.27Ba* | 3.87±0.26Ba* |
| | | H | 60.40±2.42Da* | 5.19±0.81Cb* | 20.13±3.15Cb* | 15.77±0.87Ba* | 4.00±0.26Ba* |
| | | E | 51.07±4.00Eb* | 1.95±0.19Db* | 7.55±0.75Db* | 23.91±1.37Aa* | 6.27±0.28Aa* |

注:不同大写字母表示相同浸提液不同浓度之间差异性显著($P<0.05$);不同小写字母表示相同浓度不同浸提液之间差异性显著($P<0.05$);* 表示紫花苜蓿和多年生黑麦草之间的差异性显著($P<0.05$)。

Note: Different capital letters indicate significant differences between different concentrations of the same extraction solution ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences between different extracts of the same concentration ($P<0.05$). * indicates significantly different between *M. sativa* and *L. perenne* ($P<0.05$).

## 2.2　不同浸提液对多年生黑麦草和紫花苜蓿生化指标的影响

双因素方差分析结果（表 3）表明，不同浸提液类型、不同浓度之间紫花苜蓿和多年生黑麦草的抗氧化指标整体上存在极显著差异，两者交互作用下 2 种草的生化指标整体上存在极显著差异（$P<0.01$）。

图 1 表明，不同浓度核桃凋落叶浸提液下，多年生黑麦草：叶绿素含量在 L 浓度下显著低于其他组；E 浓度下过氧化物酶活性显著最低；M 浓度下过氧化氢酶活性显著高于对照组，且随浸提液浓度增加多年生黑麦草过氧化氢酶活性先升高后降低；E 浓度下丙二醛含量显著最高（$P<0.05$），其他组丙二醛含量无显著差异（$P>0.05$）；L 浓度下抗坏血酸含量显著最高；同对照相比 L 浓度下超氧化物歧化酶活性显著最高（$P<0.05$），其他组无显著差异（$P>0.05$）。紫花苜蓿：随浸提液浓度增加，紫花苜蓿叶绿素含量和过氧化物酶活性呈先增加后降低趋势；过氧化氢酶活性随浸提液浓度增加而增加；处理组丙二醛含量显著高于对照组；H 和 E 浓度下抗坏血酸含量显著高于其他组；L 和 E 浓度下超氧化物歧化酶活性显著低于对照组和中浓度组（$P<0.05$）。

不同浓度红枣凋落叶浸提液下，多年生黑麦草：不同浓度浸提液下叶绿素含量和超氧化物歧化酶活性无显著差异（$P>0.05$）；M 浓度下过氧化物酶活性显著低于其他组；过氧化氢酶活性随浸提液浓度增加而增加；E 浓度处理下丙二醛含量最高；随浸提液浓度增加抗坏血酸含量先增加后降低且均高于对照组（$P<0.05$）。紫花苜蓿：叶绿素和过氧化物酶活性整体上无显著差异（$P>0.05$）；过氧化氢酶活性随浸提液浓度增加先降低后升高；丙二醛含量随浸提液浓度先升高后降低；抗坏血酸和超氧化物歧化酶随浸提液浓度增加而降低（$P<0.05$）。

不同浓度苹果凋落叶浸提液下，多年生黑麦草：叶绿素和过氧化物酶活性处理组显著低于对照组；丙二醛含量过氧化氢酶活性随浸提液浓度增加而增加；抗坏血酸含量随浸提液浓度增加呈先升高后降低趋势；浸提液处理下超氧化物歧化酶活性显著高于对照组（$P<0.05$）。紫花苜蓿：处理组叶绿素含量显著低于对照组且 H 浓度处理叶绿素含量最低；对照组和 H 浓度下过氧化物酶活性显著高于其他组且 E 浓度下最低；E 浓度下过氧化氢酶活性最高；L 浓度下丙二醛含量最高且均高于对照组；中高浓度处理下抗坏血酸含量显著低于其他组；M 浓度下超氧化物歧化酶活性显著高于其他组（$P<0.05$）。同等浓度浸提液处理下多年生黑麦草和紫花苜蓿生化指标存在显著差异，不同类型浸提液处理下 2 种草的生化指标均有差异（$P<0.05$）。

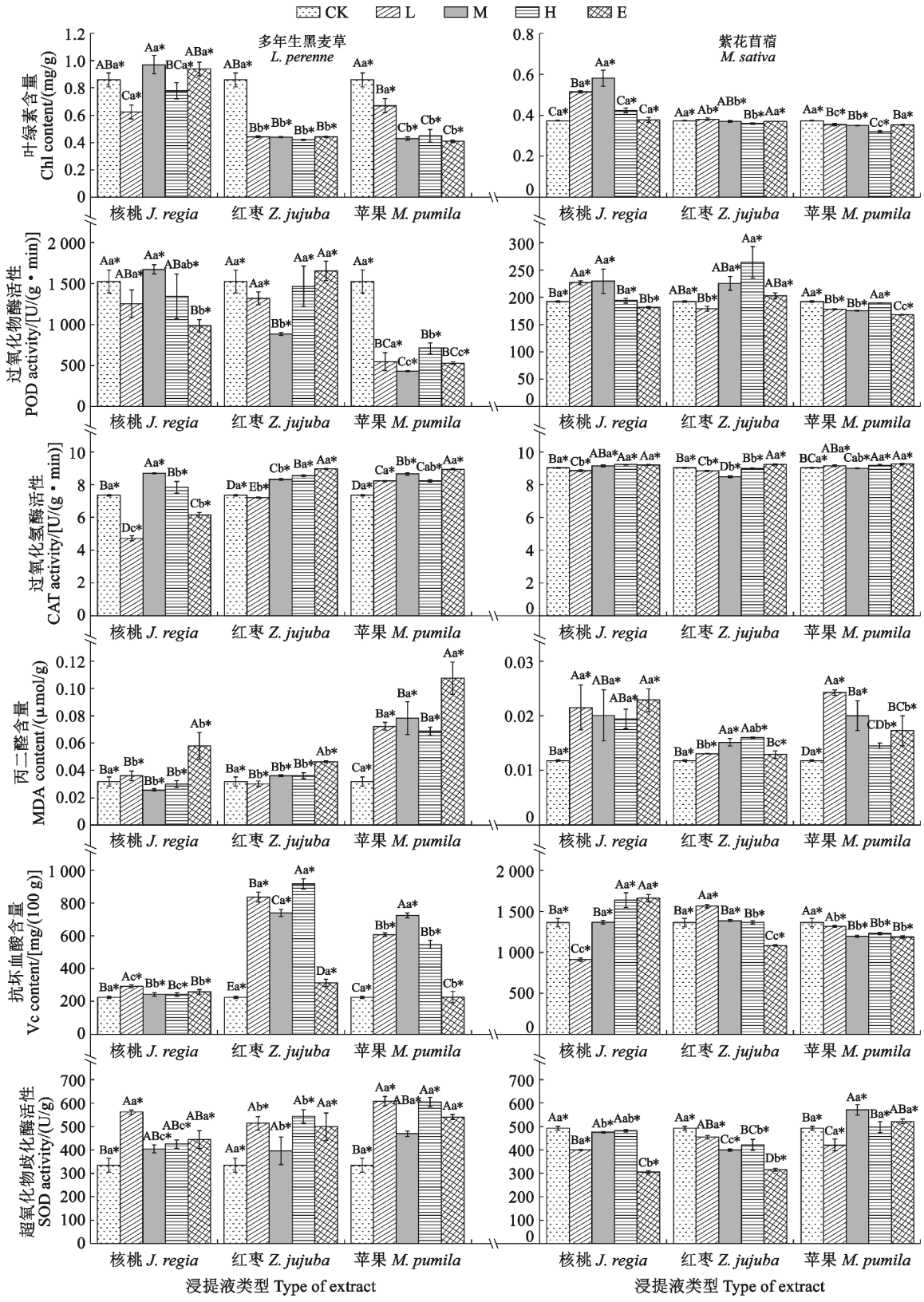
## 2.3　不同浸提液对多年生黑麦草和紫花苜蓿根系性状的影响

双因素方差分析结果（表 4）表明，不同浸提液类型、不同浓度之间多年生黑麦草和紫花苜蓿的根系性状整体上存在显著差异（$P<0.05$）。

**表 3　不同树种浸提液对多年生黑麦草和紫花苜蓿生化指标的双因素方差分析**

Table 3　Two-way ANOVA analysis of chemical indicators of *L. perenne* and *M. sativa* under different tree extract treatments

| 草种 Species | 方差来源 Source of variation | 抗坏血酸含量 Vc content | 叶绿素含量 Chl content | 丙二醛含量 MDA content | 过氧化物酶活性 POD activity | 过氧化氢酶活性 CAT activity | 超氧化物歧化酶活性 SOD activity |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 多年生黑麦草 *L. perenne* | 树种 Varieties of trees | 891.13** | 90.22** | 77.82** | 34.97** | 180.20** | 2.04 |
| | 浸提液浓度 Extract concentration | 441.02** | 29.25** | 22.05** | 7.77** | 112.14** | 5.41* |
| | 树种×浸提液 Varieties×Extract | 118.27** | 14.50** | 6.32** | 6.03** | 60.89** | 0.87 |
| 紫花苜蓿 *M. sativa* | 树种 Varieties of trees | 14.86** | 111.27** | 9.88** | 6.65* | 34.14** | 55.33** |
| | 浸提液浓度 Extract concentration | 6.26** | 20.61** | 7.10** | 2.50 | 34.08** | 34.99** |
| | 树种×浸提液 Varieties×Extract | 39.10** | 21.14** | 2.35* | 2.81* | 14.49* | 20.00** |




不同大写字母表示相同浸提液不同浓度之间差异性显著($P<0.05$)；不同小写字母表示相同浓度不同浸提液之间差异性显著($P<0.05$)；* 表示紫花苜蓿和多年生黑麦草之间的差异性显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同浸提液处理下多年生黑麦草和紫花苜蓿生化指标的分析

Different capital letters indicate significant differences between different concentrations of the same extraction solution ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences between different extracts of the same concentration ($P<0.05$). * indicates significantly different between *M. sativa* and *L. perenne* ($P<0.05$). The same as below.

Fig. 1 Analysis of chemical indicators of *L. perenne* and *M. sativa* under different extract treatments

**表 4　不同树种浸提液对多年生黑麦草和紫花苜蓿根系性状的双因素方差分析**

Table 4　Two-way ANOVA analysis of root traits of *L. perenne* and *M. sativa* under different tree extract treatments

| 草种 Species | 方差来源 Source of variation | 根表面积 Root surface area | 根长 Root length | 根体积 Root volume | 根尖数 Root tip |
|---|---|---|---|---|---|
| 多年生黑麦草 *L. perenne* | 树种 Varieties of trees | 10.45** | 8.64** | 10.65** | 9.10** |
| | 浸提液浓度 Extract concentration | 2.70* | 13.86** | 2.78* | 13.08** |
| | 树种×浸提液 Varieties×Extract | 1.85 | 2.30* | 1.90 | 1.12 |
| 紫花苜蓿 *M. sativa* | 树种 Varieties of trees | 4.11* | 0.64 | 4.13* | 4.40* |
| | 浸提液浓度 Extract concentration | 5.42** | 4.82** | 5.41** | 7.78** |
| | 树种×浸提液 Varieties×Extract | 2.25 | 0.82 | 2.28* | 2.86* |

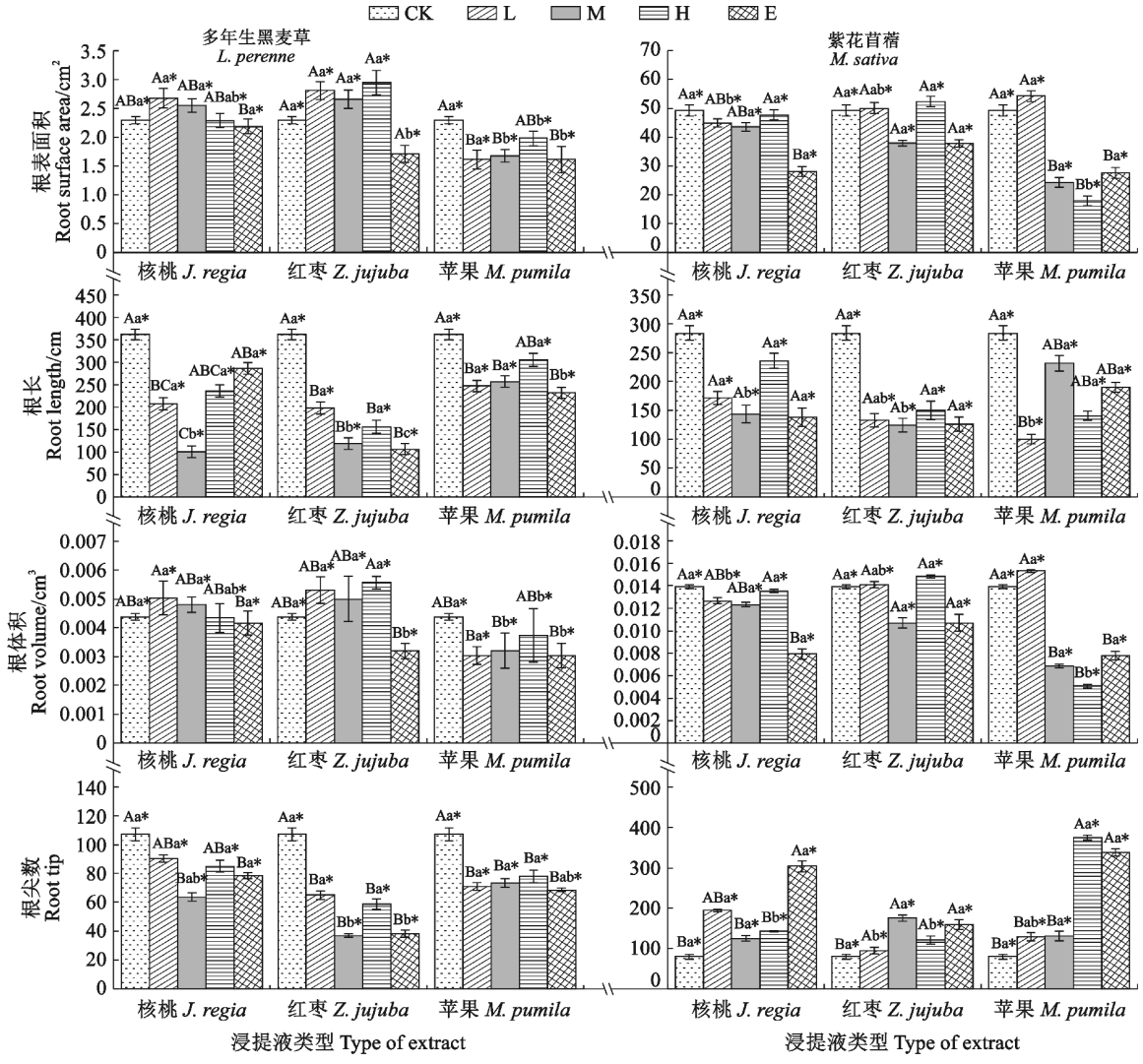



图 2　不同浸提液处理下多年生黑麦草和紫花苜蓿根系性状的分析

Fig. 2　Analysis of root traits of *L. perenne* and *M. sativa* under different extract treatments

由图 2 可知，根表面积：核桃浸提液，E 浓度处理下多年生黑麦草根表面积显著低于 L 浓度处理（$P<0.05$），同对照组相比其他浓度处理下根表面积无显著差异（$P>0.05$），E 浓度处理下紫花苜蓿根表面积显著低于对照组（$P<0.05$）；红枣浸提液下，多年生黑麦草和紫花苜蓿根表面积无显著差异（$P>0.05$）；苹果浸提液下，L、H 和 E 浓度处理多年生黑麦草根表面积显著低于对照组，M、H 和 E 浓度苹果浸提液下紫花苜蓿根表面积显著低于对照组和 L 浓度处理（$P<0.05$）。

根长：核桃浸提液下，L 和 M 浓度处理多年生黑麦草根长显著低于对照组（$P<0.05$），紫花苜蓿根长无显著差异；红枣浸提液下，对照组多年生黑麦草根长显著高于处理组（$P<0.05$），紫花苜蓿根长无显著差异（$P>0.05$）；苹果浸提液下，对照组多年生黑麦草根长显著高于 L、M 和 E 浓度处理，L 浓度处理下紫花苜蓿根长显著低于对照组（$P<0.05$），且其他组无显著差异（$P>0.05$）。

根体积：多年生黑麦草根体积，E 浓度核桃浸提液下多年生黑麦草根体积显著低于 L 浓度（$P<0.05$），其他处理无显著差异（$P>0.05$），E 浓度红枣浸提液下多年生黑麦草根体积最小，L、H 和 E 浓度苹果浸提液下多年生黑麦草根体积显著低于对照组；紫花苜蓿根体积，E 浓度核桃浸提液下紫花苜蓿根体积显著最低（$P<0.05$），红枣浸提液下紫花苜蓿根体积无显著差异（$P>0.05$），M、H 和 E 浓度苹果浸提液处理下紫花苜蓿根体积显著低于对照组和 L 处理（$P<0.05$）。

根尖数：核桃浸提液处理下，M 和 E 浓度处理多年生黑麦草根尖数显著低于对照组，红枣和苹果浸提液处理下多年生黑麦草根尖数显著低于对照组（$P<0.05$）；E 浓度核桃浸提液和 H 浓度苹果浸提液处理下紫花苜蓿根尖数显著最高（$P<0.05$），红枣浸提液处理下紫花苜蓿根尖数无显著差异（$P>0.05$）。相同浸提液处理多年生黑麦草和紫花苜蓿根表面积差异显著，不同类型浸提液处理下 2 种草的根表面积差异显著（$P<0.05$）。

## 3 讨 论

### 3.1 不同浸提液对紫花苜蓿和多年生黑麦草生物量的影响

植物向环境中释放的次生代谢物对其他植物有促进或抑制作用，这种影响主要体现在植物的根系发展、生物量增长以及抗氧化能力等方面[14-15]。生物量是衡量植物生长的重要指标，本研究结果表明，不同浓度苹果和核桃浸提液下，多年生黑麦草和紫花苜蓿单株干、鲜质量随浸提液浓度增加显著降低，体现出高浓度浸提液的抑制作用，这一现象与其他研究中观察到的杂草提取物对绿豆（*Vigna radioata*）生长量的影响[16]相似。在 0.012 5 g/mL 红枣浸提液处理下，多年生黑麦草单株干、鲜质量显著高于对照组，这可能是由于浸提液中营养成分大于化感效应，从而表现出低浓度的促进作用，使多年生黑麦草干、鲜质量增加[17]，这与甘薯（*Ipomoea batatas*）浸提液对胜红蓟（*Ageratum congzoides*）种子生长的影响[18]相似，均表现为低浓度促进作用。紫花苜蓿和多年生黑麦草的株高随浸提液浓度增加呈先上升后降低趋势，同已有研究结果一致，均表现为“低促高抑”现象[19]。高浓度凋落叶浸提液降低了紫花苜蓿和多年生黑麦草的高度，可能是浸提液中化感物质抑制了胚根的生长，从而影响了根系生长和养分吸收，最终导致植株生长缓慢[20]。不同浸提液对同种草的化感效应不同，相同浸提液对不同草的化感效应也存在差异，这与郭英姿等[21]的研究结果一致。

### 3.2 不同浸提液对紫花苜蓿和多年生黑麦草生化指标的影响

过氧化氢酶、超氧化物歧化酶和过氧化物酶是植物清除活性氧的重要组成部分，三者协同作用可防止膜脂氧化，降低植物受损程度[22]。在高浓度的 3 种不同人工经济林浸提液处理下，多年生黑麦草丙二醛含量显著增加，这表明膜脂遭受氧化胁迫更大，这一结果与李金鑫等[23]的研究一致。随红枣浸提液浓度的增加，紫花苜蓿丙二醛含量先升高后降低，这与众多研究结果有所出入，这可能由于随着浸提液浓度的增加，化感物质浓度超过了紫花苜蓿生长的阈值，导致细胞膜脂受到严重胁迫，影响丙二醛生成，进而降低其含量[24]。在核桃浸提液浓度增加的情况下，多年生黑麦草的过氧化氢酶活性先升高后降低，这与郭英姿等[21]的研究结果一致。核桃浸提液处理下，紫花苜蓿的过氧化氢酶活性随浸提液浓度增加而增加，苹果凋落叶浸提液下多年生黑麦草过氧化氢酶活性也呈现同样的趋势。这可能是由于在逆境下，植物体内活性氧含量增加，为了消除这些活性氧，过氧化氢酶的活性会相应增加，这与大狼毒（*Euphorbia jolkinii*）对紫花苜蓿生长影响的研究结果[25]一致。

在红枣浸提液处理下，紫花苜蓿的超氧化物歧化酶活性随浸提液浓度增加而降低，在一定的逆境中，超氧化物歧化酶活性增加，但当浸提液浓度达到一定值时，活性开始下降[26]。苹果浸提液处理下多年生黑麦草的超氧化物歧化酶活性显著高于对照组，这与高玉莲等[27]的研究结果一致。在本研究中，核桃浸提液处理下，过氧化物酶活性随浸提液浓度增加先上升后降低，在低胁迫时，植物体迅速合成过氧化物酶以清除活性氧，因此过氧化物酶活性增加。然而，在高胁迫时，由于过氧化物酶未能完全清除活性氧，细胞遭受破坏，导致过氧化物酶活性降低[25]。红枣和苹果浸提液处理下多年生黑麦草抗坏血酸含量先增加后降低，这与 3 种杂草浸提液对万寿菊（*Tagetes erecta*）和波斯菊（*Cosmos bipinnata*）的抗氧化代谢的影响[28]类似。在苹果浸提液处理下，紫花苜蓿和多年生黑麦草的叶绿素含量显著低

于对照组，这与化感物质对沉水植物及其相关微生物区系的生态毒性作用研究结果[29]一致。

### 3.3 不同浸提液对紫花苜蓿和多年生黑麦草根系性状的影响

根在植物生长发育过程中起着重要的作用，其对化感物质的响应不同[30]，主要参与植物体的水分及养分运输[31]，研究植物根系性状至关重要。本研究表明，在 0.1 g/mL 浓度的苹果和核桃浸提液处理下，紫花苜蓿和多年生黑麦草根表面积及根体积显著降低，体现出高浓度抑制的化感效应[32]，高浓度红枣浸提液处理下，多年生黑麦草的根长最低，这与于东立等[33]的研究结果一致。核桃和红枣浸提液下紫花苜蓿根长无显著差异，另一方面，在高浓度的苹果和核桃凋落叶浸提液处理下，紫花苜蓿的根尖数呈现显著增加，这一发现与先前的研究有所不同，可能归因于紫花苜蓿较强的固氮能力和根系的高活力，使其能有效抵抗浸提液的毒害作用[34]。相比之下，不同浸提液处理下的多年生黑麦草根尖数显著低于对照组，这可能是由于浸提液中化感物质对多年生黑麦草根尖产生了毒害作用[35]。

根据不同浓度不同类型浸提液选择适宜种植的牧草，对农林复合系统的发展至关重要，较低浓度苹果和核桃浸提液处理相比，红枣浸提液处理更适合黑麦草生长，对比 3 种浸提液，红枣浸提液处理下更适合紫花苜蓿生长，在设计和管理农林复合系统时，应充分考虑紫花苜蓿和多年生黑麦草与经济林之间的相互作用，为生产实践提供参考，可指导农林生产者在实际种植和管理中更好地利用凋落叶资源，提高植物的生长效率和产量稳定性，结合化感类型及浓度，以促进生态平衡和可持续发展。

## 4 结　论

(1)牧草单株干质量在 3 类凋落叶各浓度浸提液处理下大多比对照显著降低，且红枣浸提液的降幅较小。

(2)牧草丙二醛含量在 3 类浸提液处理下均高于对照，而红枣浸提液的增幅较小，其叶绿素含量、抗坏血酸含量和抗氧化酶活性变化在 3 类浸提液间存在明显差异，且多年生黑麦草的变幅明显大于紫花苜蓿。

(3)3 类浸提液对牧草根系性状的影响存在明显差异，均抑制其根长生长，明显抑制多年生黑麦草根尖数，而促进紫花苜蓿根尖数。

**参考文献：**


[1] 刘文超，刘纪远，匡文慧. 陕北地区退耕还林还草工程土壤保护效应的时空特征[J]. 地理学报，2019，74(9)：1835-1852. LIU W C，LIU J Y，KUANG W H. Spatiotemporal patterns of soil protection effect of the grain for green project in northern Shaanxi[J]. *Acta Geographica Sinica*，2019，74(9)：1835-1852.

[2] SCORDIA D，CORINZIA S A，COELLO J，*et al*. Are agroforestry systems more productive than monocultures in Mediterranean countries? A meta-analysis[J]. *Agronomy for Sustainable Development*，2023，43(6)：73.

[3] YU Y L，CHENG H Y，WEI M，*et al*. Silver nanoparticles intensify the allelopathic intensity of four invasive plant species in the Asteraceae[J]. *Anais Da Academia Brasileira De Ciencias*，2022，94(2)：e20201661.

[4] TRIPATHI A H，NEGI N，GAHTORI R，*et al*. A review of anti-cancer and related properties of lichen-extracts and metabolites[J]. *Anti-Cancer Agents in Medicinal Chemistry*，2022，22(1)：115-142.

[5] HIERRO J L，CALLAWAY R M. The ecological importance of allelopathy[J]. *Annual Review of Ecology，Evolution，and Systematics*，2021，52：25-45.

[6] CHENG Y S，LI M X，XU P. Allelochemicals：A source for developing economically and environmentally friendly plant growth regulators[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*，2024，690：149248.

[7] SHEN Y L，FAN M L，LI G，*et al*. Allelopathic effect of ginsenoside rd on ginseng seeds and seedlings[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*，2023，21(1)：59-72.

[8] WEN H，DAN P P，LIU T，*et al*. Allelopathic mechanisms in *Camellia oleifera-Arachis hypogaea* L. intercropping[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*，2023，71(49)：19434-19444.

[9] MAMUDE C，ASFAW Z. Allelopathic effects of *Oldeania alpina* (K. Schum.) Stapleton leaf aqueous extract on seed germination and initial seedling growth of two selected crops[J]. *Advances in Bamboo Science*，2023，4：100034.

[10] MEDIC A，ZAMLJEN T，SLATNAR A，*et al*. Effect of juglone and other allelochemicals in walnut leaves on yield，quality and metabolites of snack cucumber (*Cucumis sativus* L.)[J]. *Foods*，2023，12(2)：371.

[11] LALIA A，HARIZIA A，RIGHI K，*et al*. Chemical composition and allelopathic potential of *Schinus molle* L. (Anacardiaceae) essential oils against common weeds of wheat crop [J]. *Natural Product Research*，2023，25：1-7.

[12] HASSAN M O，MOHAMED H Y，OKLA M K，*et al*. Dense cover，but not allelopathic potential，of naturalized alien *Cenchrus echinatus* L. threatens the native species in urban vegetation[J]. *Plants*，2023，12(21)：3736.

[13] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京：高等教育出版社，2006.

[14] KONG J T，YIN K，ZHANG C X，*et al*. PLDδ，auxin，and $H_2O_2$ mediated the allelopathic effect of cycloastragenol on root growth in *Arabidopsis*[J]. *Journal of Plant Physiolo-*

gy，2023，282：153929.

[15] TOKGOZ A，EMSEN B，DOGAN M. Allelopathic effects of some lichens on growth and antioxidant activities of *in vitro* propagated *Bacopa monnieri*（L.）Wettst[J]. *Journal of Taibah University for Science*，2023，17(1).

[16] SAIF H B，KARIM M R，MOKARROMA N，*et al*. Allelopathic effects of selected weed species on seed germination and seedling growth of mungbean *Vigna radiata* L.[J]. *Asian Journal of Research in Crop Science*，2023，8(4)：335-343.

[17] GOSTYŃSKA J，PANKIEWICZ R，ROMANOWSKA-DUDA Z，*et al*. Overview of allelopathic potential of *Lemna minor* L. obtained from a shallow eutrophic lake[J]. *Molecules*，2022，27(11)：3428.

[18] ZHANG S S，CHENG W L，CHEN Y，*et al*. Allelopathic effects of water extracts of sweet potato（*Ipomoea batatas*）on seed germination of *Ageratum conyzoides*[J]. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*，2023，12(2)：124-133.

[19] 雷威肖，陈巧玲，陈康丽，等. 黄土高原常见蒿属植物对4种豆科牧草种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]. 中国草地学报，2020，42(1)：21-30.
LEI W X，CHEN Q L，CHEN K L，*et al*. Allelopathy of common *Artemisia* plants on seed germination and seedling growth of four excellent legumes in the Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Grassland*，2020，42(1)：21-30.

[20] 胡婧，李德颖，朱慧森，等. 草地早熟禾叶和根茎浸提液对3种花卉植物种子萌发的影响[J]. 草地学报，2019，27(1)：178-184.
HU J，LI D Y，ZHU H S，*et al*. Effect of water extractions from the leaves and rhizomes of Kentucky bluegrass on seed germination of three herbaceous ornamentals[J]. *Acta Agrestia Sinica*，2019，27(1)：178-184.

[21] 郭英姿，贾文庆，何松林，等. 花叶滇苦菜浸提液对3种花卉种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]. 草业学报，2022，31(9)：96-106.
GUO Y Z，JIA W Q，HE S L，*et al*. Allelopathic effects of extracts of *Sonchus asper* on seed germination and seedling growth of three herbaceous flower species[J]. *Acta Prataculturae Sinica*，2022，31(9)：96-106.

[22] HUANG W W，REDDY G V P，SHI P J，*et al*. Allelopathic effects of *Cinnamomum septentrionale* leaf litter on *Eucalyptus grandis* saplings[J]. *Global Ecology and Conservation*，2020，21：e00872.

[23] 李金鑫，叶俊伟，刘大会. 巴茅草水浸提液对3种作物种子萌发及幼苗生长的化感作用[J]. 应用生态学报，2020，31(7)：2219-2226.
LI J X，YE J W，LIU D H. Allelopathic effects of *Miscanthus floridulus* on seed germination and seedling growth of three crops[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*，2020，31(7)：2219-2226.

[24] 朱帅威，刘建功，袁泓昌，等. 凋落叶对樟子松幼苗生长和生理特性的影响[J]. 森林与环境学报，2023，43(3)：287-294.
ZHU S W，LIU J G，YUAN H C，*et al*. Effects of litter on growth and physiological properties of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seedlings[J]. *Journal of Forest and Environment*，2023，43(3)：287-294.

[25] 单贵莲，马祖艳，李嘉懿，等. 大狼毒对紫花苜蓿幼苗生理及内源激素含量的影响[J]. 草业学报，2023，32(10)：153-161.
SHAN G L，MA Z Y，LI J Y，*et al*. Effects of *Euphorbia jolkinii* on physiology and endogenous hormone content of alfalfa seedlings[J]. *Acta Prataculturae Sinica*，2023，32(10)：153-161.

[26] LOURENÇÃO A，MECINA G F，CORDEIRO-ARAÚJO M K，*et al*. Characterization of allelochemicals from *Pistia stratiotes* extracts and their effects on the growth and physiology of *Microcystis aeruginosa*[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*，2021，28(40)：57248-57259.

[27] 高玉莲，常静，王贻卉，等. 瑞香狼毒根提取物对3种作物种子萌发和幼苗生长的化感作用[J]. 草业学报，2021，30(10)：83-91.
GAO Y L，CHANG J，WANG Y H，*et al*. Allelopathic effects of *Stellera chamaejasme* on seed germination and growth of three crops[J]. *Acta Prataculturae Sinica*，2021，30(10)：83-91.

[28] 郭英姿，王政，贾文庆，等. 3种杂草浸提液对万寿菊和波斯菊的化感效应[J]. 植物生理学报，2023，59(9)：1830-1840.
GUO Y Z，WANG Z，JIA W Q，*et al*. Allelopathic effects of three kinds of weed extracts on *Tagetes erecta* and *Cosmos bipinnata*[J]. *Plant Physiology Journal*，2023，59(9)：1830-1840.

[29] LI B H，XU D D，FENG L，*et al*. Ecotoxic side-effects of allelochemicals on submerged plant and its associated microfloras effectively relieved by sustained-release microspheres[J]. *Science of the Total Environment*，2023，871：161888.

[30] 胡缓，何松林，张晋瑞，等. 小蓬草水浸液对2种花卉种子萌发及幼苗生长的化感作用[J]. 西北植物学报，2023，43(9)：1528-1536.
HU H，HE S L，ZHANG J R，*et al*. Allelopathic effects of aqueous extract from *Conyza canadensis* on seed germination and seedling growth of two herbaceous flower species[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*，2023，43(9)：1528-1536.

[31] VALVERDE-BARRANTES O J. Dissecting how fine roots function[J]. *The New Phytologist*，2022，233(4)：1539-1541.

[32] 曾亮，柴继宽，赵桂琴，等. 燕麦根浸提液对5种植物的潜在化感作用[J]. 草业科学，2023，40(8)：2048-2057.
ZENG L，CHAI J K，ZHAO G Q，*et al*. Potential allelopathic effects of oat root extract on five plants[J]. *Pratacultural Science*，2023，40(8)：2048-2057.

[33] 于东立，郭韶鑫，冯志培，等. 短尾铁线莲不同部位水浸提液对刺槐幼苗根系生长及生理特性的化感作用[J]. 河南农业大学学报，2022，56(2)：228-235.
YU D L，GUO S X，FENG Z P，*et al*. Allelopathic effects of water extracts from different parts of *Clematis brevicaudata* on root growth and physiological characteristics of *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. *Journal of Henan Agricultural University*，2022，56(2)：228-235.

[34] ZHANG L Y，LI N N，WANG Y W，*et al*. *Sinorhizobium meliloti* ohrR genes affect symbiotic performance with alfalfa（*Medicago sativa*）[J]. *Environmental Microbiology Reports*，2022，14(4)：595-603.

[35] MORENO-ROBLES A，CALA PERALTA A，SORIANO G，*et al*. Identification of allelochemicals with differential modes of phytotoxicity against *Cuscuta campestris*[J]. *Agriculture*，2022，12(10)：1746.