网络出版时间:2025-12-05 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.06.014

# 纹党参种子萌发和幼苗生长对其连作土壤水浸液的自毒响应

邵晓龄[1],黄钰芳[1],高婷婷[1],杜帅龙[1],杨扶德[1],朱田田[1],
安志刚[2],荔淑楠[1],高健[3]

(1 甘肃中医药大学 药学院,甘肃 兰州 730000;2 甘肃中医药大学 公共卫生学院,甘肃 兰州 730000;
3 甘肃文县中寨纹党产区代元有限公司,甘肃 陇南 742500)

[摘 要] 【目的】探究纹党参种子萌发和幼苗生长对其不同连作年限土壤水浸液的自毒响应,旨在为纹党参连作障碍发生机制的研究提供一定的理论依据。【方法】以纹党参连作1,2和3年的根际土壤为研究对象,设置不同质量浓度的土壤水浸液,以蒸馏水(CK)为对照,分析其对纹党参种子萌发、幼苗生长及幼苗生理指标的影响,并利用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)分析不同连作年限土壤中的自毒物质种类及含量。【结果】连作1,2和3年纹党参根际土壤水浸液对其种子萌发和幼苗生长的影响整体表现为抑制作用,且在同一质量浓度下,抑制效应随着连作年限的延长逐渐增强。在连作1年土壤水浸液处理下,纹党参幼苗SOD活性表现出低质量浓度促进、高质量浓度抑制的变化趋势,而在连作2年和3年土壤水浸液处理下则随着土壤水浸液质量浓度的升高而持续下降。各连作年限下,随着土壤水浸液质量浓度的增大,纹党参幼苗中POD、CAT活性及可溶性糖、脯氨酸、MDA含量均呈逐渐增加的趋势。GC-MS结果表明,连作1,2和3年土壤水浸液中分别存在6,6和18种化合物,其中咖啡因、油酸酰胺、乙酰柠檬酸三丁酯、对苯二甲酸二辛酯等化合物的相对含量较高。【结论】纹党参连作根际土壤水浸液对其种子萌发和幼苗生长具有一定的自毒效应,且连作年限越长自毒效应越强。

[关键词] 纹党参;连作障碍;自毒物质;土壤化感作用
[中图分类号] S567.5+.3 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)06-0134-10

# Autotoxic response of *Codonopsis pilosula* var. *modesta* seed germination and seedling growth to its water extracts from continuous cropping soils

SHAO Xiaoling[1],HUANG Yufang[1],GAO Tingting[1],DU Shuailong[1],YANG Fudei[1],
ZHU Tiantian[1],AN Zhigang[2], LI Shunan[1], GAO Jian[3]

(1 *College of Pharmacy,Gansu University of Traditional Chinese Medicine,Lanzhou,Gansu* 730000,*China*;
2 *School of Public Health,Gansu University of Traditional Chinese Medicine,LanZhou,Gansu* 730000,*China*;
3 *Wenxian Zhongzhai Wen Dang Production Area Daiyuan Co.,Ltd.,Longnan,Gansu* 742500,*China*)

**Abstract**:【Objective】This research aims to explore the autotoxic response of seed germination and seedling growth of *C. pilosula* var. *modesta* to the water extracts from rhizosphere soil under different years of continuous cropping, providing a theoretical basis for understanding the mechanisms of continuous cropping ob-

[收稿日期] 2025-03-30 [修回日期] 2025-06-06
[基金项目] 国家自然科学基金项目(82160714);甘肃省自然科学基金项目(25JRRA253);国家现代农业产业技术体系资助项目(CARS-21);甘肃省科技计划项目(21JR1RA271);甘肃省高等学校产业支撑引导项目(2021CYZC-40);甘肃省重点研发计划项目(23YFFA0069);甘肃省科技重大专项(23ZDFA013-1);国家药品监督管理局重点实验室项目(2024GSMPA-KL15)
[作者简介] 邵晓龄(1998—),女,甘肃天水人,在读硕士,主要从事中药资源保护、评价与可持续利用研究。E-mail:shaoxl1121@163.com
[通信作者] 黄钰芳(1977—),女,甘肃陇南人,副教授,博士,主要从事中药栽培与质量评价研究。E-mail:1049395950@qq.com

stacles in *C. pilosula* var. *modesta*.【Method】Rhizosphere soils from 1-, 2- and 3-year continuous cropping fields of *C. pilosula* var. *modesta* were selected as research subjects. Different concentrations of soil water extracts were used, with distilled water (CK) as the control to analyze their effects on seed germination, seedling growth and seedling physiological indicators of *C. pilosula* var. *modesta*. And gas chromatographymass spectrometry (GC-MS) was employed to analyze the types and contents of autotoxic substances in soils with different continuous cropping years.【Result】The rhizosphere soil water extracts of *C. pilosula* var. *modesta* cultivated for 1, 2, and 3 consecutive years exhibited an overall inhibitory effect on seed germination and seedling growth. Furthermore, at the same inhibitory concentration, the inhibitory effect became progressively intensified with increasing years of continuous cropping. SOD activity of the seedlings was promoted by low concentration and inhibited by high concentration of soil water extracts under 1-year continuous cropping, while SOD activity of the seedings was decreased continuously with the increase of soil water extracts concentration under 2- and 3-year continuous cropping. Across all continuous cropping years, the activities of POD and CAT, as well as the contents of soluble sugars, proline and MDA in seedlings, gradually increased with increasing concentrations of soil water extract. The results of GC-MS showed that there were 6, 6 and 18 compounds in the soil water extracts of rhizosphere soil under1-, 2- and 3-year continuous cropping, respectively, among which the relative contents of caffeine, oleamide, acetyl tributyl citrate and 1, 4-benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester were higher.【Conclusion】The rhizosphere soil water extracts of *C. pilosula* var. *modesta* under continuous cropping exhibit autotoxic effects on seed germination and seedling growth, with the autotoxicity becoming more pronounced as the continuous cropping years increase.

**Key words**: *Codonopsis pilosula* var. *modesta*; continuous cropping obstacles; autotoxic substances; soil allelopathy

纹党参为桔梗科(Campanulaceae)的植物素花党参(*Codonopsis pilosula* Nannf. var. *modesta* (Nannf.) L. T. Shen)，其干燥根具有补中益气、健脾益肺、养血生精等功效[1]，是甘肃省“四大名药”之一，主要分布于甘肃省的文县、武都区、舟曲县、宕昌县等地，其中以文县的产量最大、品质最佳。据统计，2023年底，文县纹党参种植面积达 7 300 $hm^2$，产量为 6 640 t，产值 29 880 万元[2]。近年来，随着市场对纹党参需求持续增长，受限于适宜栽培区域的土地资源约束，纹党参连作现象日益加剧，导致其产量和品质显著下降，已成为制约纹党参产业可持续发展的关键问题。连作障碍发生的原因复杂多样，主要包括土壤理化性质的恶化、病虫害加重、植物自毒作用以及土壤盐渍化和酸化等[3]，其中自毒作用是导致连作障碍的重要原因之一[4]。目前，很多学者已从植物连作根际土壤中分离鉴定出大量与自毒作用相关的化学物质，主要包括酚酸类、皂苷、酯类、有机酸、酮、醛、烷烃类、糖类以及其他类等化感自毒物质[5-12]。自毒物质主要通过挥发、淋溶、根系分泌和凋落物分解等方式释放到环境中，从而对下茬同种植物的生长产生抑制作用[13]。由此可见，研究自毒作用对于揭示药用植物连作障碍的发生机制，进而采取相应的缓解措施具有重要的现实意义。基于此，本试验以生长旺盛期连作 1，2 和 3 年的纹党参根际土壤为对象，研究纹党参种子萌发及幼苗生长对其连作土壤水浸液的自毒响应，并采用气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)鉴定纹党参连作土壤中的主要自毒物质，以期为纹党参连作障碍的发生机制及缓解措施的研究提供理论支撑。

## 1　材料与方法

### 1.1　试验材料

2023 年 7 月于甘肃文县，分别选取生长旺盛期连作 1，2 和 3 年的纹党参种植地，在每块地采用五点取样法采集 0～20 cm 土层的土壤样品，充分混匀后装入自封袋带回实验室，去除植物残枝、砂石等杂质，自然晾干。纹党参种子购自甘肃陇南文县当地药农，经甘肃中医药大学杨扶德教授鉴定为桔梗科植物素花党参(*Codonopsis pilosula* Nannf. var. *modesta*(Nannf.)L. T. Shen)。

### 1.2　纹党参连作土壤水浸液的制备

分别称取各连作年限根际土壤 250 g，加入 500 mL 蒸馏水，经超声辅助提取 2 h 后静置浸提 24 h，随后于 4 000 r/min 离心 20 min，取上清液经 0.45 μm

微孔滤膜过滤,得质量浓度为500 mg/mL的根际土壤水浸液母液,使用无菌水将其稀释为25,50,100,300和500 mg/mL溶液,于-4 ℃低温保存,用于种子萌发试验。

分别称取各连作年限根际土壤1 500 g,加入2 000 mL蒸馏水后,采用上述同样的方法进行提取、离心和过滤,得到750 mg/mL母液,将其稀释为0(CK),100,200,350,550和750 mg/mL溶液,于-4 ℃低温保存,用于后续幼苗生长试验。

### 1.3 连作土壤水浸液对纹党参的自毒作用

1.3.1 种子萌发试验 采用滤纸床法进行种子萌发试验。选取籽粒形态完整、种皮无机械损伤且无病虫害的纹党参种子,试验前浸泡12 h,促进种子吸胀,再经体积分数70%酒精浸泡20 s,进行表面灭菌,再放入质量分数2%NaClO中浸泡15~20 min,蒸馏水冲洗3次后备用。将100粒纹党参种子整齐摆放在铺有双层滤纸的发芽床(直径为9 mm),试验组分别添加不同质量浓度的土壤水浸液(4 mL/皿),对照组添加等体积无菌水,于25 ℃、光照12 h/黑暗12 h条件下培养,每个处理设3个重复。每日定量补充1 mL不同质量浓度的土壤水浸液以维持滤纸湿度,对照组补充等体积蒸馏水。以胚根突破种皮计为发芽,每隔24 h统计1次种子萌发数,当萌发进入平台期且连续72 h无新萌发时,即种子萌发试验结束。

1.3.2 幼苗生长试验 采用发芽盒(12 cm×12 cm×5 cm)作为容器,每个发芽盒中放入厚度约4 cm灭菌后的营养土,用蒸馏水浇透。选择籽粒形态完整、种皮无机械损伤且无病虫害的纹党参种子消毒(消毒方法同种子萌发试验)后,撒播至发芽盒,置于25 ℃、光照12 h/黑暗12 h条件下培养至种子萌发。待幼苗展露二叶时开始浇灌不同质量浓度的土壤水浸液,每周定量添加100 mL,其余时间每隔3 d添加1次100 mL蒸馏水保持营养土湿润,对照组全程施加等体积蒸馏水。每个处理设置3个重复,培养30 d后测定幼苗生长及生理指标。

### 1.4 测定指标及方法

1.4.1 种子发芽及幼苗生长指标 种子萌发试验结束后,统计发芽种子数,计算发芽率、发芽势及发芽指数;同时从同一处理的3个培养皿中分别随机选取10个发芽种子,用直尺测量胚根长和胚芽长,并计算平均值。

发芽率=(发芽种子数/100)×100%;

发芽势=(新发芽种子数最多时当天发芽种子总数/100)×100%;

发芽指数(GI)=$\sum(G_t/D_t)$,其中$G_t$为第$t$日内的发芽数,$D_t$为相应种子发芽的时间;

幼苗培养30 d后,在各处理中随机选取10株用直尺测定其根长和苗长,并用万分之一天平(PTXFA210S,福建)称量10株幼苗的总鲜质量,取其平均值,计算单株幼苗鲜质量。

采用WILLIAMSON等[14]的方法计算化感效应指数(RI):RI=$1-C/T$($T\geqslant C$)或RI=$T/C-1$($T<C$),其中$C$代表对照组测定值,$T$代表处理组测定值。当RI>0时,表示具有促进作用;当RI<0时,表示具有抑制作用。RI绝对值可用于衡量化感效应的强度,该值越大,表明化感作用强度越大。

综合化感效应指数(SE)为同一处理条件下纹党参不同测定指标化感效应指数(RI)的平均值,当SE>0时,表现为促进作用;当SE<0时,表现为抑制作用。|SE|大小可以反映化感作用的综合强度,该值越大,表明化感作用的综合强度越大。

1.4.2 幼苗生理生化指标 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性分别采用氮蓝四唑光还原法、愈创木酚法及紫外吸收法测定,丙二醛(MDA)、可溶性糖和脯氨酸(Pro)含量分别采用2-硫代巴比妥酸法、蒽酮比色法和茚三酮比色法测定[15]。

### 1.5 纹党参根际土壤中自毒物质的检测

取不同连作年限根际土壤样品,按照土液比1:4(质量体积比)制备土壤水浸液,采用超声辅助(40 kHz,300 W,2 h)提取后浸泡24 h,于4 000 r/min离心20 min,抽滤得上清液减压浓缩至适量,用氯仿萃取(3倍体积),再次浓缩至0.5 mL,经0.22 μm微孔滤膜过滤后,用于GC-MS进样检测。色谱柱为HP-5MS(30 m×0.25 mm×0.25 μm),升温程序为:起始温度50 ℃,保持1 min;以10 ℃/min升温至130 ℃,保持2 min;以4 ℃/min升温至160 ℃,保持2 min;以5 ℃/min升温至180 ℃,保持3 min;以5 ℃/min升温至200 ℃,保持5 min;以4 ℃/min升温至250 ℃,保持8 min;以10 ℃/min升温至280 ℃,保持14 min;以8 ℃/min升温至300 ℃结束。进样口温度250 ℃,载气为He,进样量1 μL,柱流速1.0 mL/min,离子源温度230 ℃,电离电压70 eV,全扫描,质荷比(mass-to-charge ratio)扫描范围为50~550 m/z。GC-MS检测结束后,利用NIST14.L质谱数据库进行质谱图分

析，并对化合物进行比对分析鉴定。

### 1.6　数据处理

采用 Excel 2019 软件处理原始数据，通过 SPSS Statistics 26.0 软件对试验数据进行单因素方差分析和显著性检验，利用 Origin 2024 绘制图表。

## 2　结果与分析

### 2.1　纹党参种子萌发对其连作土壤水浸液的自毒响应

由表 1 可知，不同连作年限下，各质量浓度土壤水浸液对纹党参种子萌发的影响存在一定的差异。当质量浓度为 25～300 mg/mL 时，连作 1 年土壤水浸液处理的纹党参种子发芽率、发芽势及发芽指数均呈先增后减的趋势，但与对照相比差异均不显著；而连作 2 年和 3 年土壤水浸液处理纹党参种子的发芽率、发芽势及发芽指数均呈递减的趋势。当质量浓度为 500 mg/mL 时，连作 1 年土壤水浸液处理纹党参种子的发芽率、发芽势及发芽指数较对照分别显著下降了 7.41%，26.92% 和 20.37%，连作 2 年处理分别显著下降了 9.88%，28.85% 和 21.52%，连作 3 年处理分别显著下降了 13.58%，61.54% 和 33.78%（$P<0.05$）。由以上可以看到，随着连作年限的增加，纹党参种子发芽率、发芽势及发芽指数的降低幅度均不断增大，说明连作年限越长，土壤水浸液对纹党种子发芽率、发芽势及发芽指数的抑制程度越强。

由表 1 还可知，不同连作年限下各质量浓度土壤水浸液处理纹党参种子胚根长的变化趋势存在一定的差异。当质量浓度为 25～500 mg/mL 时，各连作年限土壤水浸液处理纹党参种子胚根长均呈下降趋势。不同连作年限下，随着土壤水浸液质量浓度的增加，纹党参种子胚芽长均呈逐渐增加的趋势，其在连作 1 年土壤水浸液质量浓度为 100 mg/mL 时较对照开始显著增加，而在连作 2 年和 3 年土壤水浸液质量浓度均为 25 mg/mL 时较对照开始显著增加，增幅分别为 10.00% 和 19.38%（$P<0.05$）。

**表 1　纹党参种子萌发对其不同连作年限土壤水浸液的自毒响应**

Table 1　Autotoxic response of *C. pilosula* var. *modesta* seeds germination to soil water extracts under different continuous cropping years

| 连作年限/年 Continuous cropping years | 质量浓度/（mg·mL$^{-1}$） Concentration | 发芽率/% Germination rate | 发芽势/% Germination potential | 发芽指数 Germination index | 胚根长/cm Radicle length | 胚芽长/cm Plumule length |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | CK | 0.81±0.01 ab | 0.52±0.01 a | 48.79±1.51 ab | 1.10±0.06 a | 1.60±0.08 c |
| | 25 | 0.82±0.04 ab | 0.53±0.05 a | 49.86±4.04 a | 1.01±0.03 ab | 1.71±0.16 cd |
| | 50 | 0.85±0.01 a | 0.54±0.04 a | 50.51±2.32 a | 0.97±0.04ab | 1.76±0.10 cd |
| | 100 | 0.79±0.01 bc | 0.51±0.03 a | 49.48±1.13 a | 0.92±0.16 abc | 1.88±0.27 ab |
| | 300 | 0.78±0.01 bc | 0.49±0.06 a | 44.99±7.12 b | 0.84±0.03 bc | 1.90±0.05 ab |
| | 500 | 0.75±0.03 c | 0.38±0.03 b | 38.85±1.43 c | 0.77±0.17 c | 2.04±0.09 a |
| 2 | CK | 0.81±0.01 a | 0.52±0.01 a | 48.79±1.51 a | 1.10±0.06 a | 1.60±0.08 e |
| | 25 | 0.80±0.02 ab | 0.51±0.02 ab | 48.25±4.10 a | 0.99±0.16 ab | 1.76±0.10 d |
| | 50 | 0.79±0.06 ab | 0.50±0.02 ab | 46.80±3.63 a | 0.97±0.18 ab | 1.80±0.12 cd |
| | 100 | 0.79±0.04 ab | 0.47±0.05 ab | 46.69±4.34 a | 0.93±0.11 ab | 1.93±0.05 bc |
| | 300 | 0.78±0.03 ab | 0.46±0.02 b | 44.63±1.20 a | 0.78±0.17 b | 1.96±0.04 ab |
| | 500 | 0.73±0.04 b | 0.37±0.03 c | 38.29±1.95 b | 0.75±0.15 b | 2.09±0.08 a |
| 3 | CK | 0.81±0.01 a | 0.52±0.01 a | 48.79±1.51 a | 1.10±0.06 a | 1.60±0.08 b |
| | 25 | 0.79±0.01 ab | 0.49±0.02 a | 46.75±1.49 a | 0.95±0.09 ab | 1.91±0.13 a |
| | 50 | 0.77±0.04 ab | 0.47±0.01 a | 46.17±2.56 a | 0.93±0.14 bc | 1.99±0.17 a |
| | 100 | 0.76±0.04 abc | 0.46±0.03 a | 46.20±0.33 a | 0.91±0.05 bc | 2.08±0.08 a |
| | 300 | 0.74±0.03 bc | 0.41±0.07 a | 40.93±3.33 b | 0.78±0.09 cd | 2.08±0.27 a |
| | 500 | 0.70±0.04 c | 0.20±0.15 b | 32.31±1.78 c | 0.73±0.06 d | 2.18±0.07 a |

注：表中数据为“平均值±标准差”。同列数据后标不同小写字母表示同一连作年限下不同处理之间差异显著（$P<0.05$）。下同。

Note: The data in the table are presented as ‘mean±standard deviation’. Different lowercase letters after data in the same column indicate significant differences among different treatments under the same continuous cropping years ($P<0.05$). The same below.

表 2 显示，除连作 1 年 25～50 mg/mL 土壤水浸液处理外，其他土壤水浸液处理的纹党参种子 SE 值均为负值，说明纹党参根际土壤水浸液对其种子萌发的化感效应总体表现为抑制作用。当质量浓度为 100～500 mg/mL 时，各连作年限下，不同质量浓度土壤水浸液的|SE|值均呈逐渐增加趋势，说明在此质量浓度范围内，土壤水浸液质量浓度越大，其对纹党参种子的化感效应越强；而在同一质量浓

度条件下,连作3年土壤水浸液对纹党参种子萌发的抑制效应高于连作2年和1年土壤,说明随着连作年限的延长,根际土壤水浸液对纹党参种子萌发的抑制程度逐渐增强。

**表2 不同连作年限土壤水浸液对纹党参种子萌发的化感效应指数**

Table 2 Allelopathic effect index of soil water extracts under different continuous cropping years on seeds germination of *C. pilosula* var. *modesta*

| 连作年限/年 Continuous cropping years | 质量浓度/(mg·mL$^{-1}$) Concentration | 化感效应指数 Allelopathic effect index | | | | | 综合化感效应指数 Comprehensive allelopathic effect index |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 发芽率 Germination rate | 发芽势 Germination potential | 发芽指数 Germination index | 胚根长 Radicle length | 胚芽长 Plumule length | |
| 1 | 25 | 0.012 | 0.019 | 0.022 | −0.082 | 0.064 | 0.007 |
| | 50 | 0.047 | 0.031 | 0.034 | −0.118 | 0.091 | 0.017 |
| | 100 | −0.025 | −0.019 | 0.014 | −0.161 | 0.149 | −0.008 |
| | 300 | −0.037 | −0.051 | −0.078 | −0.236 | 0.158 | −0.058 |
| | 500 | −0.074 | −0.263 | −0.204 | −0.300 | 0.216 | −0.125 |
| 2 | 25 | −0.012 | −0.019 | −0.011 | −0.103 | 0.091 | −0.011 |
| | 50 | −0.025 | −0.032 | −0.041 | −0.115 | 0.111 | −0.020 |
| | 100 | −0.025 | −0.090 | −0.043 | −0.158 | 0.171 | −0.029 |
| | 300 | −0.037 | −0.109 | −0.085 | −0.291 | 0.184 | −0.068 |
| | 500 | −0.099 | −0.288 | −0.215 | −0.318 | 0.234 | −0.137 |
| 3 | 25 | −0.025 | −0.051 | −0.042 | −0.133 | 0.162 | −0.018 |
| | 50 | −0.049 | −0.096 | −0.054 | −0.152 | 0.196 | −0.031 |
| | 100 | −0.062 | −0.115 | −0.053 | −0.173 | 0.231 | −0.034 |
| | 300 | −0.086 | −0.205 | −0.161 | −0.288 | 0.231 | −0.102 |
| | 500 | −0.136 | −0.609 | −0.338 | −0.339 | 0.266 | −0.250 |

## 2.2 纹党参幼苗生长对其连作土壤水浸液的自毒响应

由表3可知,不同连作年限下,随着土壤水浸液质量浓度的升高,纹党参幼苗根长、苗长及幼苗鲜质量均呈不断下降趋势。

**表3 纹党参幼苗生长对其不同连作年限土壤水浸液的自毒响应及化感效应指数**

Table 3 Autotoxic response and allelopathic effect index of *C. pilosula* var. *Modesta* seedlings growth to soil water extracts under different continuous cropping years

| 连作年限/年 Continuous cropping years | 质量浓度/(mg·mL$^{-1}$) Concentration | 生长指标 Growth index | | | 化感效应指数 Allelopathic effect index | | | 综合化感效应指数 Comprehensive allelopathic effect index |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 根长/cm Root length | 苗长/cm Seeding length | 幼苗鲜质量/(g·株$^{-1}$) Seeding fresh weight | 根长 Root length | 苗长 Seeding length | 幼苗鲜质量 Seeding fresh weight | |
| 1 | CK | 5.59±0.53 a | 7.44±0.13 a | 0.042 1±0.02 a | — | — | — | — |
| | 100 | 5.38±0.21 ab | 7.16±0.14 a | 0.040 2±0.04 ab | −0.038 | −0.038 | −0.042 | −0.039 |
| | 200 | 5.14±0.37 ab | 7.08±0.20 a | 0.039 3±0.03 ab | −0.081 | −0.048 | −0.064 | −0.064 |
| | 350 | 5.07±0.47 ab | 7.07±0.17 a | 0.037 9±0.02 ab | −0.093 | −0.050 | −0.098 | −0.080 |
| | 550 | 4.75±0.21 bc | 6.94±0.53 a | 0.037 4±0.09 ab | −0.150 | −0.067 | −0.109 | −0.109 |
| | 750 | 4.33±0.23 c | 6.77±0.99 a | 0.028 8±0.09 b | −0.225 | −0.090 | −0.315 | −0.208 |
| 2 | CK | 5.59±0.53 a | 7.44±0.13 a | 0.042 1±0.02 a | — | — | — | — |
| | 100 | 4.93±0.09 ab | 7.31±0.29 a | 0.039 3±0.06 ab | −0.118 | −0.017 | −0.064 | −0.066 |
| | 200 | 4.86±0.57 ab | 7.18±0.50 a | 0.038 4±0.02 ab | −0.131 | −0.035 | −0.085 | −0.084 |
| | 350 | 4.76±0.31 abc | 7.08±0.24 a | 0.036 1±0.03 ab | −0.148 | −0.048 | −0.142 | −0.113 |
| | 550 | 4.32±0.47 bc | 6.90±0.47 a | 0.034 0±0.03 bc | −0.227 | −0.073 | −0.190 | −0.163 |
| | 750 | 3.94±0.41 c | 5.89±0.17 b | 0.028 4±0.05 c | −0.295 | −0.208 | −0.323 | −0.275 |
| 3 | CK | 5.59±0.53 a | 7.44±0.13 a | 0.042 1±0.02 a | — | — | — | — |
| | 100 | 4.92±0.21 ab | 6.80±0.20 ab | 0.035 6±0.06 b | −0.120 | −0.086 | −0.152 | −0.119 |
| | 200 | 4.64±0.33 abc | 6.65±0.56 ab | 0.034 5±0.05 bc | −0.170 | −0.106 | −0.178 | −0.130 |
| | 350 | 4.52±0.14 bcd | 6.66±0.19 ab | 0.031 1±0.01 bc | −0.191 | −0.105 | −0.259 | −0.183 |
| | 550 | 3.93±0.15 cd | 6.14±0.46 bc | 0.0286±0.03 cd | −0.297 | −0.175 | −0.319 | −0.264 |
| | 750 | 3.57±0.97 d | 5.81±0.74 c | 0.0224±0.01 d | −0.361 | −0.219 | −0.419 | −0.333 |

表3显示,与对照相比,使纹党参各生长指标发生显著降低的土壤水浸液质量浓度有所差异。其

中，幼苗根长在连作1年和2年土壤水浸液质量浓度≥550 mg/mL时均较对照显著下降（$P<0.05$），而在连作3年土壤水浸液质量浓度≥350 mg/mL时就显著降低（$P<0.05$）。

由表3可知，与对照相比，当质量浓度为100～750 mg/mL时，连作1年土壤水浸液处理幼苗苗长变化均不显著；当质量浓度为750 mg/mL时，连作2土壤水浸液处理幼苗苗长显著下降（$P<0.05$）；当质量浓度为550～750 mg/mL时，连作3年土壤水浸液处理幼苗苗长显著下降（$P<0.05$）。对于幼苗鲜质量而言，连作1年土壤水浸液仅在质量浓度为750 mg/mL时较对照显著下降了38.10%（$P<0.05$），连作2年土壤水浸液在质量浓度为550 mg/mL时，幼苗鲜质量较对照显著下降19.05%（$P<0.05$），而连作3年土壤水浸液在质量浓度为100 mg/mL时，幼苗鲜质量与对照相比显著下降（$P<0.05$）。由此可见，连作年限越长，促使纹党参幼苗各生长指标显著下降的土壤水浸液质量浓度越低，也说明纹党参幼苗对连作年限较长的土壤水浸液的自毒响应更敏感。

表3显示，当质量浓度为100～750 mg/mL时，不同连作年限土壤水浸液处理纹党参幼苗根长、苗长及幼苗鲜质量的化感效应指数均为负值，说明连作1，2和3年土壤水浸液对纹党参幼苗的根长、苗长及幼苗鲜质量均呈抑制作用；且在同一连作年限、同一质量浓度条件下，纹党参幼苗根长|RI|值高于苗长，说明连作土壤水浸液对根长的抑制效果更加显著。在同一连作年限处理下，随着土壤水浸液质量浓度的增加，纹党参幼苗各生长指标的|SE|值均逐渐增大，说明在设置质量浓度范围内，土壤水浸液质量浓度越大，对纹党参幼苗生长的抑制作用越强；在相同质量浓度条件下，连作3年处理的|SE|值最大，其次为连作2年处理，连作1年处理|SE|值最小，表明随着连作年限的延长，土壤水浸液对纹党参幼苗的抑制作用逐渐增强。

### 2.3　纹党参幼苗生理指标对其连作土壤水浸液的自毒响应

2.3.1　*抗氧化酶及渗透调节物质*　由表4可知，当连作1年土壤水浸液质量浓度为100～750 mg/mL时，纹党参幼苗SOD活性呈先升高后降低的趋势；而随着连作2年和3年土壤水浸液质量浓度的增加，纹党参幼苗的SOD活性总体均呈下降趋势。在不同连作年限下，纹党参幼苗POD和CAT活性均随土壤水浸液质量浓度的增加而增大。

**表4　纹党参幼苗抗氧化酶及渗透调节物质对其连作土壤水浸液的自毒响应**

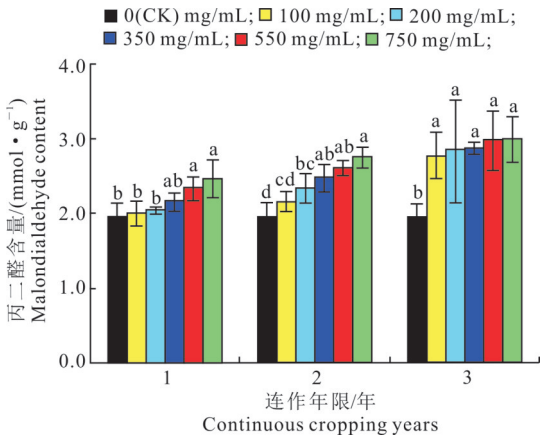
Table 4　Autotoxic response of antioxidant enzyme and osmotic adjustment substances in *C. pilosula* var. *modesta* seedings to soil water extracts under different continuous cropping years

| 连作年限/年 Continuous cropping years | 质量浓度/（mg·mL$^{-1}$） Concentration | SOD活性/（U·g$^{-1}$） SOD activity | POD活性/（U·g$^{-1}$） POD activity | CAT活性/（U·g$^{-1}$） CAT activity | 可溶性糖含量/% Soluble sugar content | 脯氨酸含量/（μg·g$^{-1}$） Proline content |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | CK | 1 296.85±32.96 bc | 95.50±2.81 b | 837.87±97.74 b | 1.03±0.16 c | 120.97±3.21 a |
| | 100 | 1 330.87±2.72 b | 119.23±43.43 ab | 849.32±67.27 b | 1.09±0.29 c | 121.43±11.10 a |
| | 200 | 1 347.95±15.68 ab | 131.40±26.46 ab | 871.15±68.87 b | 1.22±0.08 bc | 131.20±23.80 a |
| | 350 | 1 423.41±40.17 a | 140.04±18.98 ab | 890.22±69.38 b | 1.49±0.08 ab | 131.58±14.42 a |
| | 550 | 1 293.44±67.28 bc | 147.31±27.00 a | 917.47±67.53 b | 1.68±0.18 a | 141.00±13.78 a |
| | 750 | 1 225.32±72.73 c | 164.89±22.47 a | 1 049.09±35.26 a | 1.73±0.05 a | 147.64±19.80 a |
| 2 | CK | 1 296.85±32.96 a | 95.50±2.81 c | 837.87±97.74 b | 1.03±0.10 c | 120.97±3.21 d |
| | 100 | 1 234.37±110.26 ab | 126.59±27.91 bc | 870.06±156.36 b | 1.55±0.04 b | 124.79±9.99 cd |
| | 200 | 1 177.29±41.24 ab | 135.34±2.29 bc | 890.68±55.31 b | 1.70±0.07 ab | 126.95±14.19 cd |
| | 350 | 1 154.05±61.54 abc | 146.34±23.64 ab | 923.51±87.73 ab | 1.79±0.09 a | 147.47±13.39 bc |
| | 550 | 1 117.37±92.66 bc | 164.79±43.93 ab | 980.81±99.08 ab | 1.80±0.17 a | 153.15±17.41 ab |
| | 750 | 1 022.71±92.22 c | 185.95±20.28 a | 1 084.09±54.44 a | 1.85±0.12 a | 171.12±11.06 a |
| 3 | CK | 1 296.85±32.96 a | 95.50±2.81 b | 837.87±97.74 d | 1.03±0.16 d | 120.97±3.21 b |
| | 100 | 1 039.53±53.01 b | 197.39±70.75 a | 982.87±77.11 cd | 1.70±0.05 c | 172.03±11.80 a |
| | 200 | 1 043.14±50.68 b | 204.98±25.84 a | 1 028.11±105.91 bc | 1.83±0.20 bc | 166.05±14.69 a |
| | 350 | 1 027.59±89.15 bc | 213.15±42.74 a | 1 147.08±89.21 ab | 1.94±0.02 ab | 175.72±31.02 a |
| | 550 | 999.99±65.36 bc | 218.28±21.10 a | 1 175.91±46.98 ab | 1.99±0.06 ab | 179.77±7.07 a |
| | 750 | 914.80±61.39 c | 242.78±81.21 a | 1 253.38±80.18 a | 2.07±0.11 a | 187.78±41.82 a |

在不同连作年限下，随着土壤水浸液质量浓度的增加，纹党参幼苗的可溶性糖含量均呈不断上升趋势。当连作1年土壤水浸液质量浓度为350～750 mg/mL时，可溶性糖含量较对照显著增加了

44.66%～67.96%;当连作2年和3年土壤水浸液质量浓度为100～750 mg/mL时,可溶性糖含量较对照均显著上升。不同连作年限下,随着土壤水浸液质量浓度的增加,幼苗Pro含量总体呈增加趋势。

2.3.2 丙二醛 纹党参幼苗丙二醛对其不同连作年限土壤水浸液的自毒响应见图1。




图柱上标不同小写字母表示同一连作年限下不同处理之间差异显著($P<0.05$)。

Different lowercase letters above the bars indicate significant differences among different treatments under the same continuous cropping year($P<0.05$).

图1 纹党参幼苗丙二醛对其不同连作年限土壤水浸液的自毒响应

Fig. 1 Autotoxic response of malondialdehyde in *C. pilosula* var. *modesta* seedings to soil water extracts under different continuous cropping years

由图1可知,纹党参幼苗MDA含量随着土壤水浸液质量浓度的增加而增大。其中,当连作1年土壤水浸液质量浓度为550～750 mg/mL时,幼苗MDA含量较对照显著增加了19.90%～25.51%($P<0.05$);当连作2年土壤水浸液质量浓度≥200 mg/mL时,MDA含量较对照显著增加($P<0.05$);而连作3年土壤水浸液质量浓度为100～750 mg/mL时,MDA含量均显著高于对照($P<0.05$)。综上可知,纹党参幼苗各生理指标大多在低质量浓度土壤水浸液或低连作年限处理下与对照差异不显著;而随着土壤水浸液质量浓度的增大及连作年限的延长,纹党参幼苗的生理指标对土壤水浸液的响应敏感度不断提高。

### 2.4 不同连作年限纹党参根际土壤水浸液中自毒物质的检测

不同连作年限纹党参根际土壤氯仿萃取液化学成分的鉴定结果如表5所示。表5显示,从纹党参连作1,2和3年根际土壤中分别检测到6,6和18种化学物质。其中,对苯二甲酸二辛酯、油酸酰胺在连作1年根际土壤中的相对含量较高,分别为61.94%和18.24%;对苯二甲酸二辛酯和乙酰柠檬酸三丁酯在连作2年根际土壤中的相对含量较高,分别为72.15%和19.38%;对苯二甲酸二辛酯、咖啡因、油酸酰胺在连作3年根际土壤中的相对含量较高,分别为28.46%,16.04%和14.82%。

**表5 纹党参不同连作年限土壤氯仿萃取液中化学成分的鉴定**

Table 5 Identification of chemical components in choroform extracts from soil with different continuous cropping years in *C. pilosula* var. *modesta*

| 保留时间/min Retention time | 化合物名称 Name of compound | 分子式 Molecular formula | 相对含量/% Relative content | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 连作1年 Continuous cropping for 1 year | 连作2年 Continuous cropping for 2 years | 连作3年 Continuous cropping for 3 years |
| 6.778 | 苄基氯 Benzyl chloride | $C_7H_7Cl$ | — | — | 2.37 |
| 8.329 | 磷酸三乙酯 Triethyl phosphate | $C_6H_{15}O_4P$ | — | — | 1.43 |
| 9.982 | 2,5-二甲基苯甲醛 Benzaldehyde,2,5-dimethyl- | $C_9H_{10}O$ | 1.36 | — | 0.91 |
| 11.647 | 对丙基苯甲醚 Benzene,1-methoxy-4-propyl- | $C_{10}H_{14}O$ | — | — | 2.72 |
| 15.052 | 对羟基苯乙醇 Benzeneethanol,4-hydroxy- | $C_8H_{10}O_2$ | — | — | 0.85 |
| 15.218 | 邻苯二甲酸二甲酯 Dimethyl phthalate | $C10H_{10}O_4$ | 1.58 | — | — |
| 16.769 | 2,4-二叔丁基苯酚 2,4-Di-tert-butylphenol | $C_{14}H_{22}O$ | 6.47 | 1.31 | 6.21 |
| 21.180 | 三烯丙基异氰脲酸酯 1,3,5-Triazine-2,4,6(1H,3H,5H)-trione,1,3,5-tri-2-propenyl- | $C_{12}H_{15}N_3O_3$ | — | 1.80 | — |
| 25.535 | 正十八烷 Octadecane | $C_{18}H_{38}$ | — | 2.80 | — |
| 26.725 | 咖啡因 Caffeine | $C_8H_{10}N_4O_2$ | — | — | 16.04 |
| 27.572 | *E*,*E*,*Z*-1,3,12-Nonadecatriene-5,14-diol | $C_{19}H_{34}O_2$ | — | — | 0.92 |
| 28.785 | 7,9-二叔丁基-1-氧杂螺[4-5]癸-6,9-二烯-2,8-二酮 7,9-Di-tert-butyl-1-oxaspiro(4,5)deca-6,9-diene-2,8-dione | $C_{17}H_{24}O_3$ | 10.41 | 2.57 | 2.69 |

表 5（续）　Table 5(continued)

| 保留时间/min Retention time | 化合物名称 Name of compound | 分子式 Molecular formula | 相对含量/% Relative content | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 连作 1 年 Continuous cropping for 1 year | 连作 2 年 Continuous cropping for 2 years | 连作 3 年 Continuous cropping for 3 years |
| 29.683 | Cyclopropanebutanoic acid, 2-[[2-[[2-[(2-pentylcyclopropyl)methyl]cyclopropyl]methyl]cyclopropyl]methyl]-, methyl ester | $C_{25}H_{42}O_2$ | — | — | 1.69 |
| 30.444 | 邻苯二甲酸二丁酯 Dibutyl phthalate | $C_{16}H_{22}O_4$ | — | — | 7.20 |
| 31.680 | 1-Heptatriacotanol | $C_{37}H_{76}O$ | — | — | 1.28 |
| 33.094 | 2-Pentenoic acid, 5-[(1S, 4aS, 8aS)-decahydro-5, 5, 8a-trimethyl-2-methylene-1-naphthalenyl]-3-methyl-, (2E)- | $C_{20}H_{32}O_2$ | — | — | 0.51 |
| 40.618 | 乙酰柠檬酸三丁酯 Tributyl acetylcitrate | $C_{20}H_{34}O_8$ | — | 19.38 | — |
| 43.782 | 油酸酰胺 9-Octadecenamide, (*Z*)- | $C_{18}H_{35}NO$ | 18.24 | — | 14.82 |
| 44.944 | 2, 2′-亚甲基双(6-叔丁基-4-甲基苯酚) Phenol, 2, 2′-methylenebis[6-(1, 1-dimethylethyl)-4-methyl- | $C_{23}H_{32}O_2$ | — | — | 9.07 |
| 48.738 | 8, 14-Seco-3, 19-epoxyandrostane-8, 14-dione, 17-acetoxy-3beta.-methoxy-4, 4-dimethyl- | $C_{24}H_{36}O_6$ | — | — | 1.40 |
| 53.201 | 对苯二甲酸二辛酯 1, 4-Benzenedicarboxylic acid, bis(2-ethylhexyl) ester | $C_{24}H_{38}O_4$ | 61.94 | 72.15 | 28.46 |
| 68.072 | γ-谷甾醇 γ-Sitosterol | $C_{29}H_{50}O$ | — | — | 1.43 |

注：“—”表示未检出。

Note: “—” indicates not detected.

## 3　讨　论

### 3.1　纹党参种子萌发和幼苗生长对其连作土壤水浸液的自毒响应

种子萌发和幼苗生长构成了植物生命周期中至关重要的发育阶段，其不仅是植物个体形态建成的初始生物学过程，而且是植物对内外环境因子响应较为显著的生理时期[16-17]。此阶段，植物对环境变化非常敏感，连作模式下容易受到自毒物质的影响，因此本研究通过这两个阶段的试验可以更直观地观察到连作土壤浸提液对纹党参种子萌发及幼苗生长的自毒效应。本研究结果表明，纹党参根际土壤水浸液会抑制自身种子发芽和幼苗生长，且其质量浓度越高、连作时间越久，抑制作用越强，这与大多数植物自毒作用的研究结论一致[18-21]。本研究结果还显示，同一抑制质量浓度下，连作 3 年土壤水浸液的抑制作用最强，其次为连作 2 年，连作 1 年的抑制效应最弱，这可能与不同连作年限土壤中累积的自毒物质种类和数量有关。

此外，本研究还发现，各连作年限土壤水浸液对纹党参种子的胚根长均表现为抑制作用，而对胚芽长均表现为促进作用，出现根短芽长的现象，这与何智荣等[22]在研究问荆水浸液对油菜和青菜种子萌发时的化感作用研究结果一致。产生这一现象的原因可能是纹党参种子在受到自毒胁迫时，土壤水浸液中的自毒物质抑制了胚根的伸长，植物为了维持生长，种子将更多的生长资源分配给了胚芽，从而导致胚芽的生长相对加快，形成根短芽长的现象。但需要说明的是，根短芽长的现象并非自毒作用的直接结果，而是在自毒物质影响下植物生长受阻出现的表象，故在今后的研究中应综合考虑多种因素，以准确揭示自毒作用对植物生长的影响。

### 3.2　纹党参幼苗生理指标对其连作土壤水浸液的自毒响应

逆境胁迫下，植物细胞内活性氧（ROS）会增多，进而引发膜脂过氧化反应。为了应对氧化应激，植物通过激活体内抗氧化酶系统来消除过多的自由基，使其免受氧化损伤[23-24]，其中 SOD、POD 和 CAT 是植物体内重要的抗氧化酶。本研究中，纹党参幼苗叶片 SOD 活性随连作 1 年土壤水浸液质量浓度的增加呈先增加后减小的趋势，而随着连作 2 年和 3 年土壤水浸液处理质量浓度的增加呈不断下降趋势。这可能是在连作 1 年低质量浓度土壤水浸液自毒胁迫下，纹党参幼苗为维持体内 ROS 的平衡启动了防御保护机制，SOD 活性升高；但是随着土壤水浸液质量浓度的升高和连作年限的延长，大量 ROS 的积累促使纹党参幼苗膜脂过氧化程度加深，ROS 清除系统的功能逐渐降低，引起 SOD 活性下降。李梦琪等[25]研究发现，杉木幼苗的 POD 和 CAT 活性均随凋落物水浸液质量浓度的增大而增加。本研究中，不同连作年限下，随着土壤水浸液质量浓度的增大，纹党参幼苗的 POD 和 CAT 活性均不断增加，这与前人的研究结果[24]一致，这可能

是因为植物受到自毒胁迫时诱导了抗氧化酶活性的增加,以对抗自毒物质对植物细胞的氧化损伤。MDA作为细胞膜脂过氧化的标志性代谢产物,其浓度升高直接反映细胞膜脂过氧化程度加剧,表明细胞膜已遭受严重损伤[25]。本研究中,不同连作年限下,不同质量浓度土壤水浸液处理纹党参幼苗MDA含量均高于对照组,表明自毒胁迫诱导了植物体内ROS过量积累,进而引发膜脂过氧化反应,导致MDA积累和膜脂结构损伤。自毒作用胁迫下,植物通过积累渗透调节物质来维持细胞膜的稳定性,促使渗透调节物质含量增加[26]。本研究结果表明,各连作年限下,不同质量浓度土壤水浸液处理纹党参幼苗的可溶性糖及Pro含量均高于对照,说明自毒胁迫诱导了幼苗体内可溶性糖和Pro等渗透调节物质的积累,以提高幼苗对逆境胁迫的抵抗能力。

### 3.3 不同连作年限纹党参根际土壤中的化学物质鉴定

化感自毒物质是植物分泌或释放的化学物质,它们可以对同种或周围植物的生长产生抑制作用,其种类主要包括酚酸类、醇类、醛类、酮类、酯类等多种化合物。本研究对连作1,2和3年的纹党参根际土壤水浸液进行GC-MS分析,分别鉴定出了6,6和18种化合物,其中咖啡因、油酸酰胺、乙酰柠檬酸三丁酯及对苯二甲酸二辛酯等化合物相对含量较高,这些自毒物质在大量研究中已被报道[27-30],因此可推测这些化合物极有可能也是引起纹党参自毒效应的化学物质,但其自毒效应的大小及自毒作用的机制如何,将在后续试验中进行进一步研究。

## 4 结 论

纹党参种子萌发和幼苗生长对其连作土壤水浸液的响应表现为质量浓度和年限依赖性抑制效应,即抑制作用随土壤水浸液质量浓度的升高而增强,且在相同抑制质量浓度下,抑制作用随着连作年限的延长而增强。纹党参幼苗SOD活性在连作1年土壤水浸液处理下,表现为低质量浓度促进、高质量浓度抑制的变化,而连作2年和3年处理SOD活性则表现为随质量浓度升高持续下降;POD和CAT活性在所有连作年限下均随着土壤水浸液质量浓度的增大而升高;各连作年限下,纹党参幼苗可溶性糖、Pro及MDA含量均随土壤水浸液质量浓度的增加不断升高。纹党参连作1,2和3年根际土壤中分别检测出6,6及18种化学物质,其中咖啡因、油酸酰胺、乙酰柠檬酸三丁酯及对苯二甲酸二辛酯等化合物的相对含量较高,可能是纹党参的自毒物质。

## [参考文献]


[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部.[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020.
Chinese Pharmacopoeia Committee. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: vol Ⅰ[M]. Beijing: Chinese Medicine Science and Technology Press, 2020.

[2] 俞树红."五朵金花"盛开陇原[N]. 甘肃经济日报,2024-08-07(1).
YU S H. The 'Five Golden Flowers' are in full bloom across the Longyuan region[N]. Gansu Economic Daily, 2024-08-07(1).

[3] 钟淑敏,廖晓兰. 作物自毒作用研究进展[J]. 作物研究,2022,36(3):269-274,286.
ZHONG S M, LIAO X L. Review of research progress on crops autotoxicity[J]. Crop Research, 2022, 36(3): 269-274, 286.

[4] 尹玉玲,周劲松,汤泳萍,等. 芦笋连作障碍中的自毒物质研究进展[J]. 生态科学,2019,38(5):204-209.
YIN Y L, ZHOU J S, TANG Y P, et al. Review on autotoxicity of *Asparagus* (*Asparagus officinalis* L.) in continuous cropping system[J]. Ecological Science, 2019, 38(5): 204-209.

[5] 宁可真,袁学松,杨忠仁,等. 邻苯二甲酸和肉桂酸对沙芥属植物生长及保护酶活性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2021,49(11):97-104.
NING K Z, YUAN X S, YANG Z R, et al. Effects of phthalic acid on growth and activities of protective enzymes of *Pugionium cornutum* (L.) Gaertn. and *Pugionium dolabratum* Maxim [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(11): 97-104.

[6] 黄玉茜,韩立思,杨劲峰,等. 花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测[J]. 生态学报,2012,32(19):6023-6032.
HUANG Y Q, HAN L S, YANG J F, et al. Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6023-6032.

[7] 龚静,马海艳,郑顺林,等. 连作对马铃薯酚酸类自毒物质及根际真菌群落的影响[J]. 西北农业学报,2021,30(3):431-438.
GONG J, MA H Y, ZHENG S L, et al. Effect of continuous cropping on autotoxic substances and rhizosphere fungi communities in potato[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021, 30(3): 431-438.

[8] 刘雨艳,保丽美,魏云林,等. 连作三七根际土壤自毒物质与微生物互作研究进展[J]. 中药材,2022,45(1):242-247.
LIU Y Y, BAO L M, WEI Y L, et al. Research progress on interaction between autotoxic substances and microorganisms in rhizosphere soil of continuous cropping *Panax notoginseng*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2022, 45(1): 242-247.

[9] 游川，杨天杰，周新刚，等. 连作根系分泌物加剧土传病害的机制和缓解措施研究进展[J]. 土壤学报，2024，61(5)：1201-1211.
YOU C，YANG T J，ZHOU X G，et al. Research advances on mechanisms and preventions of soil-borne diseases exacerbated by root exudated in continuous cropping systems[J]. Acta Pedologica Sinica，2024，61(5)：1201-1211.

[10] 杨航，祁娟，刘文辉，等. 异龄老芒麦根际土壤中脂肪酸类物质检测及根际土壤的自毒效应研究[J]. 草地学报，2021，29(1)：52-59.
YANG H，QI J，LIU W H，et al. Fatty acid substance detection and self-toxic effect in rhizosphere soil of *Elymus sibiricus* L. with different planting years[J]. Acta Agrestia Sinica，2021，29(1)：52-59.

[11] YIN Q，ZHANG W C，SHI H F，et al. Identification of allelochemicals under continuous cropping of *Morchella* mushrooms [J]. Scientific Reports，2024，14(1)：31207.

[12] EFFAH E，MCCORMICK C A. Invasive plants' root extracts display stronger allelopathic activity on the germination and seedling growth of a New Zealand native species than extracts of another native plant or conspecifics[J]. Journal of Chemical Ecology，2024，50(12)：1086-1097.

[13] 陈福慧，申乃坤，姜明国，等. 作物重茬连作障碍中自毒物质的研究进展[J]. 中国农业科技导报，2022，24(10)：125-132.
CHEN F H，SHEN N K，JIANG M G，et al. Research progress of autotoxic secretions in crops replant successive cropping obstacles[J]. Journal of Agricultural Science and Technology，2022，24(10)：125-132.

[14] WILLIAMSON G B，RICHARDSON D. Bioassays for allelopathy：measuring treatment responses with independent controls[J]. Journal of Chemical Ecology，1988，14(1)：181-187.

[15] 陈刚，李胜. 植物生理学实验[M]. 北京：高等教育出版社，2016.
CHEN G，LI S. Plant physiology experiment [M]. Beijing：Higher Education Press，2016.

[16] 宋松泉，唐翠芳，程红焱，等. 种子萌发调控的研究进展[J]. 中国科学：生命科学，2024，54(7)：1226-1253.
SONG S Q，TANG C F，CHENG H Y，et al. Research progress in regulation of seed germination[J]. Scientia Sinica Vitae，2024，54(7)：1226-1253.

[17] 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.

[18] 范晓慧，马勇，钱嘉鑫，等. 10种典型城市绿化树木凋落叶对4种作物种子萌发及幼苗生长的化感效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2022，50(2)：25-33，44.
FAN X H，MA Y，QIAN J X，et al. Allelopathic effects of fallen leaves of ten typical urban greening trees on seed germination and seedling growth of four crops[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2022，50(2)：25-33，44.

[19] 荆蓉，彭祚登，李云，等. 刺槐林腐殖质浸提液对自身种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2023，51(7)：92-106.
JING R，PENG Z D，LI Y，et al. Effects of humus extracts from *Robinia pseudoacacia* forests on seed germination and seedling growth[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2023，51(7)：92-106.

[20] 李彦飞，初晓辉，李嘉懿，等. 大狼毒对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的化感效应研究[J]. 草地学报，2022，30(2)：394-402.
LI Y F，CHU X H，LI J Y，et al. Allelopathic effects of *Euphorbia jolkinii* on seed germination and seedling growth of alfalfa[J]. Acta Agrestia Sinica，2022，30(2)：394-402.

[21] 谢田朋，崔治家，黄钰芳，等. 独一味对自身及两种高寒地区作物种子和幼苗的化感作用[J]. 中国草地学报，2023，45(7)：30-40.
XIE T P，CUI Z J，HUANG Y F，et al. Allelopathic effects of *Lamiophlomis rotata* on seed and seedlings of itself and two crops in alpine areas[J]. Chinese Journal of Grassland，2023，45(7)：30-40.

[22] 何智荣，路曼晴，刘慧君，等. 问荆水浸液对油菜和青菜种子萌发及幼苗生长的化感效应[J]. 草业科学，2024，41(4)：899-907.
HE Z R，LU M Q，LIU H J，et al. Allelopathic effects of *Equisetum arvense* aqueous extract on *Brassica napus* and *B. chinensis* seed germination and seedling growth[J]. Pratacultural Science，2024，41(4)：899-907.

[23] 杨舒贻，陈晓阳，惠文凯，等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版)，2016，45(5)：481-489.
YANG S Y，CHEN X Y，HUI W K，et al. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)，2016，45(5)：481-489.

[24] 阮坤非，王天琪，侯立娜，等. 栾树凋落叶对3种中药材种子萌发及幼苗生长的化感效应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2024，52(6)：40-48，61.
RUAN K F，WANG T Q，HOU L N，et al. Allelopathic effects of *Koelreuteria paniculata* fallen leaves on seed germination and seedling growth of three medicinal plants[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)，2024，52(6)：40-48，61.

[25] 李梦琪，赵冲，罗航，等. 不同凋落物水浸提液对杉木种子萌发和幼苗早期生长的化感作用[J]. 江苏农业科学，2023，51(7)：138-146.
LI M Q，ZHAO C，LUO H，et al. Allelopathy of different litter water extracts on seed germination and early seedling growth of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2023，51(7)：138-146.

（下转第 169 页）