

DOI:10.11686/cyxb2024378

http://cyxb.magtech.com.cn

赵聪, 吴文慧, 王娟玲, 等. 结球甘蓝叶对3种作物芽期与苗期生长的化感效应. 草业学报, 2025, 34(9): 65-77.

ZHAO Cong, WU Wen-hui, WANG Juan-ling, et al. Allelopathic effects of cabbage leaf on germination and seedling stages of three crops. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(9): 65-77.

结球甘蓝叶对3种作物芽期与苗期生长的化感效应

赵聪^{1,2,3,4}, 吴文慧⁵, 王娟玲^{2*}, 梁改梅^{1,2,3,4,5*}, 李娜娜^{1,2,3,4,5}, 黄学芳^{1,2,3,4}

(1. 山西农业大学山西有机旱作农业研究院, 山西太原 030031; 2. 农业农村部有机旱作农业重点实验室(部省共建), 山西太原 030031; 3. 有机旱作农业山西省重点实验室, 山西太原 030031; 4. 国家农业环境晋中观测实验站, 山西太原 030031; 5. 山西农业大学农学院, 山西太原 030031)

摘要:为比较结球甘蓝对3种适宜在山西冷凉区旱作栽培的作物种子萌发及幼苗生长的化感效应差异,并从生理学层面揭示其作用机制,本研究采用培养皿滤纸法和盆栽培养法,开展结球甘蓝风干叶水提液对西葫芦、菜豆和玉米种子萌发、幼苗生长与生理特性的影响研究。结果表明,一定浓度的结球甘蓝叶水提液会对3种作物种子萌发与幼苗生长产生显著的抑制作用($P<0.05$),且该作用随浓度增加而增强。同一浓度处理,对西葫芦和玉米胚根伸长的抑制作用均强于胚芽,仅当水提液浓度为 $0.04\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,对菜豆胚根伸长的抑制作用小于胚芽。化感物质处理后菜豆和玉米幼苗的丙二醛含量均高于对照。当处理液浓度为 0.06 、 $0.08\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,受体作物幼苗抗氧化酶如超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)及过氧化氢酶(CAT)活性有所增强。3种受体作物的化感综合抑制作用强弱顺序为西葫芦>玉米>菜豆,该差异与作物体内丙二醛含量和抗氧化酶活性变化有关。因此,结球甘蓝茬衔接菜豆的种植模式可能是缓解该茬口化感负效应的方法之一。在采收结球甘蓝时,建议将地上部完全去除,避免化感物质累积于土壤中,进而影响下茬作物生长。

关键词:结球甘蓝;水提液;化感作用;丙二醛;抗氧化酶

Allelopathic effects of cabbage leaf on germination and seedling stages of three crops

ZHAO Cong^{1,2,3,4}, WU Wen-hui⁵, WANG Juan-ling^{2*}, LIANG Gai-mei^{1,2,3,4,5*}, LI Na-na^{1,2,3,4,5}, HUANG Xue-fang^{1,2,3,4}

1. Shanxi Institute of Organic Dryland Farming, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Dryland Agriculture (Co-construction by Ministry of Agriculture and Rural Affairs and Shanxi Province), Taiyuan 030031, China; 3. Shanxi Province Key Laboratory of Sustainable Dryland Agriculture, Taiyuan 030031, China; 4. National Agricultural Environment Observation and Experimental Station in Jinzhong, Taiyuan 030031, China; 5. College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China

Abstract: This research investigated, using petri dish filter paper and pot culture methods, the allelopathic effects and their physiological mechanisms of water extract of air-dried leaves of cabbage (*Brassica oleracea* var. *capitata*) on seed germination, seedling growth and physiological traits of three crops commonly cultivated in cold and arid areas of Shanxi Province: cocozelle (*Cucurbita pepo*), kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) and maize (*Zea mays*). It was found that tested concentrations of water extract of cabbage leaves had a significant inhibitory effect on seed germination and seedling growth of the three tested crops ($P<0.05$), and the inhibitory effect increased with an

收稿日期:2024-09-27;改回日期:2024-10-31

基金项目:山西省高等学校科技创新项目(2022L103),国家重点研发计划项目(2021YFD1901101-01),山西省科技重大专项计划项目(202101140601)和山西省自然科学基金项目(202303021211096)资助。

作者简介:赵聪(1984-),女,山东禹城人,副研究员,博士。E-mail: zhaocong502@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lgaimei@sxau.edu.cn; Juanling_Wang@sxau.edu.cn

increase in concentration. The inhibitory effect on radicle elongation of cocozelle and corn was stronger than that on germ elongation at the same concentration, while the inhibitory effect on radicle elongation of kidney bean was smaller than that on germination elongation at a cabbage leaf water extract concentration of $0.04 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$. The malondialdehyde content of kidney bean and corn seedlings after allelochemical treatments was higher than that of the controls. At cabbage leaf water extract concentrations of 0.06 and $0.08 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$, the antioxidase enzyme activities of test crop seedlings were enhanced, including SOD, POD and CAT. In multivariate analysis of the data, the allelopathic inhibitory effect of cabbage leaf extract on the three test crops ranked as cocozelle > corn > kidney bean. The differences in the inhibitory effect were related to the changes in malondialdehyde content and antioxidant enzyme activity *in vivo*. Therefore, planting kidney bean after cabbage may be one method to alleviate the negative effect of the stubble on the following crop. It is recommended that the aboveground parts should be completely removed during cabbage harvesting to avoid allelopathic substances accumulating in the soil and affecting the growth of the next crop.

Key words: *Brassica oleracea* var. *capitata*; water extract; allelopathic effect; malondialdehyde; antioxidant enzyme

在植物生命史中,种子萌发与幼苗生长是两个极为重要且敏感的阶段,其生长发育质量直接关系到农业生产的成败^[1]。由于该阶段涉及复杂的生理过程,除与其营养物质积累、激素水平、遗传因素等内部因素有关外,还受温度、光照、水分含量等外部环境因素制约。在诸多外部影响因素中,土壤中逐渐累积的化感物质对种子萌发的抑制作用也越发不容忽视。化感物质是由植物通过根系分泌,地上部挥发与雨雾淋溶或植物残体分解等途径释放的次生代谢产物,其进入土壤环境后能够不断累积^[2-3]。当化感物质在土壤中积累一定量后,就会抑制其他植物种子萌发和幼苗生长,进而影响植物的竞争力^[4-6]。研究表明,许多药用植物不仅自毒作用严重,还会对其他作物种子萌发与幼苗生长产生较强的化感抑制作用^[7-8]。此外,黄瓜(*Cucumis sativus*)、番茄(*Lycopersicon esculentum*)、苋菜(*Amaranthus tricolor*)、大蒜(*Allium sativum*)及大葱(*Allium fistulosum*)等蔬菜亦被证实具有化感抑制作用^[9-14],然而关于结球甘蓝(*Brassica oleracea* var. *capitata*)对其他作物生长影响的研究报道尚为数不多^[15-16]。

结球甘蓝是十字花科芸薹属一年生或两年生草本植物,目前的播种面积和产量在所有蔬菜中位居第三,已成为我国主栽的蔬菜品种之一,足见其在我国蔬菜产业中的重要地位^[17]。同时结球甘蓝所富含的生物活性成分已被现代营养学公认,以异硫氰酸盐^[18]、叶酸^[19]与酚酸^[20]的含量较为丰富。异硫氰酸盐和酚酸均具有抑制肿瘤^[21-22]、抗氧化^[23]、抑制微生物生长^[24-25]等功效;叶酸与神经系统形成密切相关,直接影响胎儿神经系统发育及普通人群心血管健康^[26]。不过由于酚酸亦为14类主要的化感物质之一;异硫氰酸盐/酯则是由芸薹属植物所特有的化感物质——硫配糖体水解而成的,从而奠定了结球甘蓝具有产生化感作用的物质基础。加之在山西冷凉旱区冬春季气温偏低、降水较少,土壤结构一般比较紧密,因而致使低温稳定、易水解与水溶性的化感物质在此类土壤中逐渐积累,一定程度上会加剧结球甘蓝的化感作用。故此,发现在该地区结球甘蓝茬土壤会明显抑制多种后茬作物的生长。例如,玉米(*Zea mays*)播种45 d后的叶片数要比番茄茬的少2~4片,株高仅为该茬口的60%,基生叶小且颜色发紫,严重影响玉米的生长。鉴于结球甘蓝在蔬菜生产中的基础地位与对居民饮食健康的重要性^[27],以及其在特定环境下种植障碍的加重程度,研究其对下茬作物生育前期的化感抑制作用显得尤为必要。

当植物受到化感物质等逆境胁迫后,细胞内酶活性通常会受到影响,从而改变细胞相关生物学功能。Zhou等^[28]研究表明,低浓度黄腐酸能显著提高稗草(*Echinochloa crusgalli*)体内谷胱甘肽基转移酶(glutathione S-transferases, GST)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)的活力,对稗草幼苗生长有显著的促进作用;高浓度黄腐酸显著抑制了稗草体内POD的活力,减缓了稗草幼苗的生长。可见,化感物质的浓度高低可以改变受体植物保护酶系的活力,进而影响植物的生长。关

于不同浓度的结球甘蓝叶水提液对受体作物体内抗氧化酶具体有何影响目前尚不得而知。因此,本文以结球甘蓝球叶为供体材料,开展其对山西旱地3种常见农作物西葫芦(*Cucurbita pepo*)、菜豆(*Phaseolus vulgaris*)和玉米芽期与苗期生长的化感作用研究,并分析其对3种受体作物幼苗丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量与抗氧化酶活性的影响,初步探讨该化感作用的生理机制,为揭示结球甘蓝种植障碍产生的原因与推荐合理的种植模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供体材料为结球甘蓝‘铁将军’(‘Tiejianjun’)的球叶,2022年8月取样于山西农业大学旱作节水河村示范基地,该地区年平均降水量约为450 mm,主要集中于6—9月,水热同期。受体材料西葫芦‘阿太一代’(‘Ataiyidai’)、菜豆‘晋绿王’(‘Jinlvwang’)与玉米‘并单16’(‘Bingdan16’)均购买于山西农业高新科技市场。

1.2 研究方法

1.2.1 甘蓝结球叶水提液制备 将洗净的结球甘蓝叶片于室内自然风干,粉碎后过筛(孔径为0.42 mm)。称取100 g粉碎物放入1000 mL蒸馏水中,置于恒温摇床中浸泡振荡24 h(温度25 °C、转速150 r·min⁻¹),静置后经双层定量滤纸过滤制得100 g·L⁻¹的浸提母液,用蒸馏水稀释母液,以获得质量浓度为0.01、0.02、0.04 g·mL⁻¹的浸提液用于种子萌发,以及质量浓度为0.06、0.08、0.10 g·mL⁻¹的浸提液用于幼苗生长。浸提液置于4 °C冰箱冷藏备用。

1.2.2 种子萌发试验 挑选健康饱满、质量接近的玉米、西葫芦和菜豆种子各30粒,用75%乙醇溶液消毒10 min后漂洗干净,均匀放入底部铺有双层滤纸直径为15 cm的无菌培养皿中,再分别加入20 mL的0.01、0.02、0.04 g·mL⁻¹甘蓝叶水提液,以蒸馏水为对照,然后将培养皿置于恒温培养箱中黑暗培养(温度25 °C,湿度60%),每天补充蒸发的水分,以保持滤纸湿润和处理液浓度不变^[5]。所有处理均设置4个重复,每24 h记录各培养皿中种子的萌发数量,以胚根长度大于种子的50%视为种子萌发。7 d后测量幼芽芽长、根长,并计算种子的发芽势与发芽率。待其风干后,称取芽与根干重。

按照如下公式计算发芽势和发芽率:

$$\text{发芽势} = \frac{\text{第3天的发芽种子数}}{\text{供试种子数}}$$

$$\text{发芽率} = \frac{\text{发芽种子数}}{\text{供试种子数}}$$

采用化感作用响应指数(response index, RI),简称化感指数,用来度量化感作用的类型和强度:

$$RI = 1 - \frac{C}{T} \quad (T \geq C)$$

$$RI = \frac{T}{C} - 1 \quad (T < C)$$

式中:C为对照值;T为处理值。RI>0为促进作用,RI<0为抑制作用,绝对值的大小表示作用强度。

本研究所测定的指标均通过上式换算成RI进行分析。采用综合效应对不同受体的化感效应进行评价。综合效应即为同一处理下受体作物各项生长指标对应的化感效应指数(RI)的算术平均数。

1.2.3 幼苗生长试验 采用盆栽法,将非甘蓝茬表层土壤过筛(孔径为0.850 mm),并调节土壤含水量至20%时装盆(上边长10 cm,下边长7 cm,高8 cm)。种下土壤质量为250 g,种上土壤质量为200 g。每盆播种2粒,放置于人工气候箱培养,光照强度为4000 lx,昼夜空气温度/相对湿度分别设为25 °C/50%和20 °C/60%,光照时长为12 h·d⁻¹。出苗后及时间苗,每盆中仅留1株幼苗。每个处理备有10个重复,以保证各品种作物可挑选大小均匀的4株幼苗开始进行试验处理,分别用浓度为0.06、0.08与0.10 g·mL⁻¹甘蓝叶水提液20 mL浇施,以等量蒸馏水为对照,每2 d浇施一次。试验过程中各处理的管理措施一致,处理最后一天测定株高、根长与生物量(地上部干重和地下部干重),并于上午9:00取幼苗叶片用锡箔纸包裹后迅速转入液氮中,待取样完成后转入-40 °C冰箱中保存用于生理指标测定。

1.2.4 生理指标的测定 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid, TBA)法^[29]测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性:以氮蓝四唑(nitroblue tetrazolium, NBT)光化还原法测定^[30],以每mg组织蛋白在1mL反应液中SOD抑制率达50%时所对应的SOD量为一个SOD活力单位(U)。过氧化氢酶(CAT)活性测定:采用紫外吸收法^[30]。以每mg组织蛋白每s分解1 μmol H_2O_2 的量为一个活力单位。过氧化物酶(POD)活性:采用愈创木酚比色法测定,在37 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,每mg组织蛋白每min催化产生1 μg 底物的酶量定义为一个酶活力单位^[30]。

1.3 数据处理

处理组与对照组的差异显著性检验采用SPSS 20.0软件的Duncan新复极差法分析。采用Excel软件作图。

2 结果与分析

2.1 结球甘蓝叶水提液对作物种子萌发的影响

各质量浓度结球甘蓝叶水提液对3种作物种子的发芽势均有显著($P < 0.05$)的抑制作用,但抑制的程度有所不同(图1A)。其中西葫芦种子的发芽势随处理液浓度增加而下降的幅度最大。当结球甘蓝叶水提液为最高浓度 $0.04 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,对西葫芦种子发芽势的抑制作用最强,与对照相比降幅高达76.8%。当处理液为最低浓度 $0.01 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,其发芽势显著($P < 0.05$)降低56.9%;其次为菜豆,随处理液浓度的增大其发芽势亦逐渐降低,但降幅均不及西葫芦明显。当处理液浓度由 $0.01 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 升至 $0.04 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,菜豆种子的发芽势较对照分别显著($P < 0.05$)降低了34.7%与62.5%;最后为玉米。不同浓度处理下,玉米种子的发芽势降幅均低于菜豆。当处理液浓度为 $0.04 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,玉米种子的发芽势较对照显著($P < 0.05$)降低了40.8%。当处理液浓度为 $0.01 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,对玉米发芽势的抑制作用最弱,仅显著($P < 0.05$)下降了21.1%。可见,3种作物种子的发芽势对处理液浓度均表现出了“剂量效应”,即随着结球甘蓝叶水提液质量浓度的增大,西葫芦、菜豆和玉米种子发芽势均逐渐降低。表明处理液浓度增大,对种子发芽势的抑制效果增强。

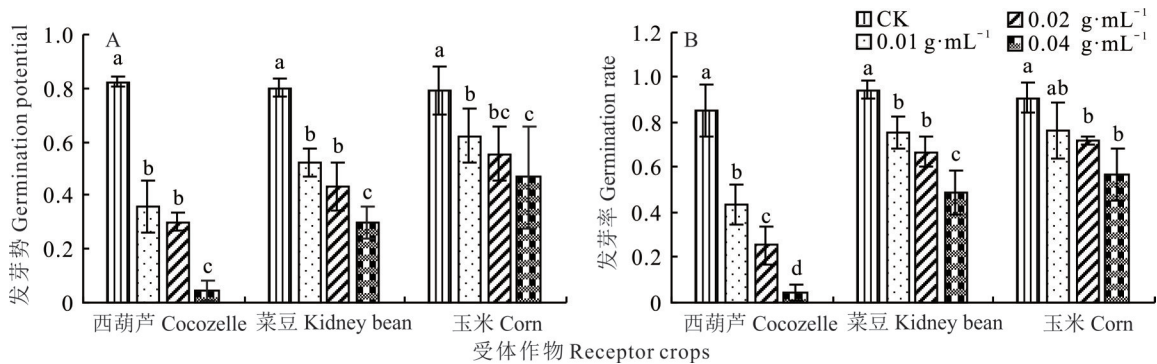


图1 结球甘蓝叶水提液质量浓度对3种作物种子发芽势与发芽率的影响

Fig. 1 Effects of mass concentrations of cabbage-leaf water extracts on the seed germination potential and rate of three crop seeds

不同小写字母表示相同供试作物不同质量浓度处理间差异达显著水平($P < 0.05$),下同。Different lowercase letters mean significant differences at 0.05 level among different concentration treatments of the same tested crop. The same below.

与对发芽势的影响类似,结球甘蓝叶水提液对3种作物发芽率的影响也均表现出随质量浓度的增大而降低的趋势(图1B)。其中各供试浓度均可显著($P < 0.05$)降低西葫芦与菜豆种子的发芽率,但对玉米种子而言,仅当浓度 $\geq 0.02 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,方可显著($P < 0.05$)降低其发芽率。从图1中还可以直观地看出,当结球甘蓝叶水提液质量浓度为 $0.04 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,对西葫芦种子发芽率的抑制程度最大,其抑制率高达95%。即便是质量浓度降为最低($0.01 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$)时,其抑制率达49%。此外,各质量浓度的结球甘蓝叶水提液对3种作物种子发芽率的抑制作用强弱顺序均一致,依次为西葫芦>菜豆>玉米。与菜豆和玉米相比,西葫芦种子萌发对结球甘蓝叶水提液更为敏感。

结球甘蓝叶水提液均可显著($P < 0.05$)抑制西葫芦、菜豆与玉米幼芽与胚根的伸长。但随着水提液质量浓度的增加,对3种作物胚根长的抑制程度略有不同。其中对西葫芦与玉米胚根长的抑制作用变化较为类似,均表现为先强后弱再强的趋势;而对菜豆胚根长的影响则完全不同,抑制作用呈现出先弱后强再弱的变化规律。与各自对照相比,3种供试作物胚根长受到最大程度抑制时所对应的质量浓度完全不同。其中西葫芦在最低质量浓度($0.01 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$)时,胚根最短,降幅高达88%;菜豆在中间质量浓度($0.02 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$),胚根缩短了约69%;而玉米则在添加最高质量浓度($0.04 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$)时,胚根长受到的抑制作用最强,降幅约为71%(图2A)。

3种作物种子胚芽长对不同质量浓度结球甘蓝叶水提液的响应各异。倍增结球甘蓝叶水提液质量浓度,仅对菜豆种子胚芽长表现出了阶梯性递减效应;而随处理液浓度的升高,西葫芦和玉米种子胚芽长的变化趋势较为相似,均表现为“先缩短—后略有增长—再减短”的规律。与对照相比,各处理浓度均可显著($P < 0.05$)降低菜豆的胚芽长。从浓度对胚芽长降幅的影响程度来看,西葫芦与菜豆均是在最高质量浓度($0.04 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$)时胚芽长最短,其降幅分别为59%与64%;玉米则是在最低质量浓度($0.01 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$)时胚芽长最短,降幅达到了25%。相对而言,结球甘蓝叶水提液对玉米胚芽长的影响最小(图2B)。

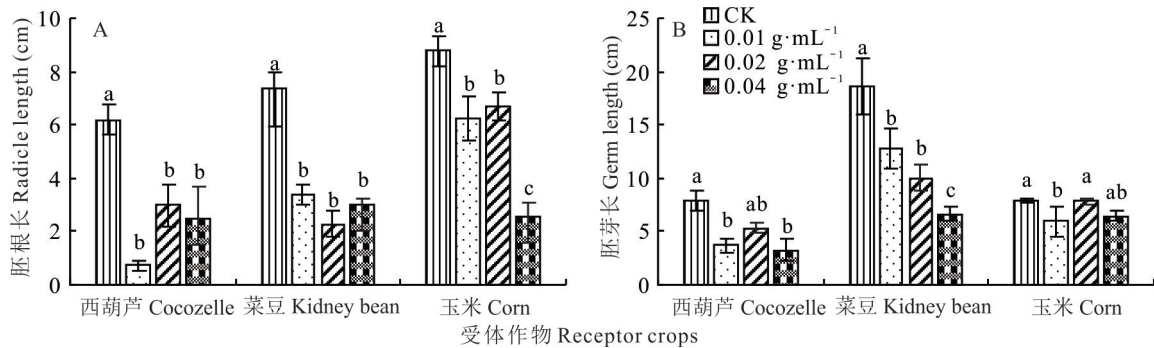


图2 结球甘蓝叶水提液质量浓度对3种作物种子胚根长与胚芽长的影响

Fig. 2 Effects of mass concentrations of cabbage-leaf water extracts on the radicle and germ length of three crop seeds

随着结球甘蓝叶水提液质量浓度的升高,3种供试作物胚根干重的变化情况可分为两类:一类是西葫芦的胚根干重表现出先降后升的趋势,仅 $0.01 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 浓度的处理显著低于对照($P < 0.05$);另一类是菜豆和玉米的胚根干重均基本呈下降趋势,且处理组均显著低于对照组($P < 0.05$)。其中菜豆胚根干重在添加甘蓝叶水提液质量浓度为 $0.02 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,降幅最大,为43%;玉米则是在添加甘蓝叶水提液质量浓度为 $0.04 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,胚根干重减轻最多,约为67%。值得一提的是,在处理浓度为 $0.04 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时尽管西葫芦的胚根长显著低于对照($P < 0.05$),但胚根干重却没有减轻反而略有升高,表明该处理浓度可使西葫芦胚根明显增粗(图2A和图3A)。

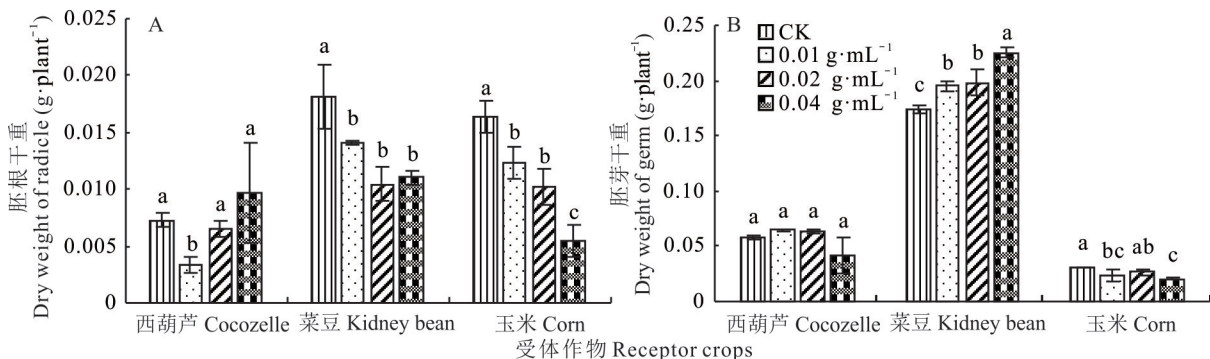


图3 结球甘蓝叶水提液质量浓度对3种作物种子胚根与胚芽干重的影响

Fig. 3 Effects of mass concentrations of cabbage-leaf water extracts on the radicle and germ dry weight of three crop seeds

各质量浓度结球甘蓝叶水提液对3种作物胚芽干重的影响不一。随着处理液浓度的升高,对西葫芦胚芽干重没有显著影响,但却显著增加了菜豆胚芽干重($P<0.05$),表现出了递增的趋势。当添加最小质量浓度($0.01\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的甘蓝叶水提液时,可使其增重12%;当添加最大质量浓度($0.04\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的处理液时,增重近30%。对玉米而言,添加低质量浓度($0.01\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$)和高质量浓度($0.04\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的甘蓝叶水提液均可显著降低其胚芽干重($P<0.05$),降幅分别为24%与34%,且在高质量浓度($0.04\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$)时降幅最大。综合结球甘蓝叶水提液对胚根与胚芽干重的影响结果可知,西葫芦的地上部生物量对浓度不敏感;而菜豆的胚根与胚芽干重对浓度的响应截然相反,抑制胚根而促进胚芽增重;增大处理液浓度可增强对玉米胚根生物量累积的抑制作用,但对胚芽干重仅呈小幅的波动抑制(图3B)。

供试浓度的结球甘蓝叶水提液对西葫芦、菜豆和玉米种子萌发的多项指标基本呈化感负效应。西葫芦种子的发芽率对最高质量浓度($0.04\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$)处理的响应最强,对应的化感指数为 -0.948 。其胚芽与胚根干重在甘蓝叶水提液浓度分别为 0.01 、 0.02 与 $0.04\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,对应的化感指数为正。表明在特定的浓度条件下,甘蓝叶水提液亦会对西葫芦胚根与胚芽的生物量有促进作用。甘蓝叶水提液对菜豆胚芽干重的化感效应也不同于其他检测指标,其对应的化感指数均为正值。说明供试浓度的处理液对菜豆胚芽干重均有促进作用,而对其他指标均表现为抑制效应。其中中间浓度($0.02\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的甘蓝叶水提液对菜豆胚根长的敏感性响应最强,其化感指数为 -0.688 ;最低浓度($0.01\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$)的甘蓝叶水提液对菜豆胚芽干重的敏感性响应最弱,其化感指数为 0.109 。不同质量浓度的结球甘蓝叶水提液对玉米芽期检测的各项指标均表现出化感负效应。玉米胚根长对最高质量浓度的甘蓝叶水提液响应最强,对应的化感指数为 -0.707 。玉米胚芽长对质量浓度为 $0.02\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的甘蓝叶水提液响应最弱,其化感指数为 -0.016 。此外,在相同浓度条件下,结球甘蓝叶水提液对西葫芦和玉米胚根长的抑制作用始终要强于胚芽长(表1)。

表1 不同结球甘蓝叶水提液质量浓度时3种作物种子萌发的化感指数

Table 1 Allelopathic index of the seed germination of three crops under different mass concentrations of cabbage-leaf water extracts

受体作物 Receptor crops	质量浓度 Mass concentra- tion ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	化感效应指数 Index of allelopathic effect					
		发芽势 Germination potential	发芽率 Germination rate	胚根长 Radicle length	胚芽长 Germ length	胚芽干重 Dry weight of germ	胚根干重 Dry weight of radicle
西葫芦 Cocozelle	0.01	-0.568	-0.494	-0.880	-0.532	0.107	-0.537
	0.02	-0.635	-0.701	-0.516	-0.325	0.088	-0.103
	0.04	-0.946	-0.948	-0.593	-0.589	-0.272	0.250
菜豆 Kidney bean	0.01	-0.347	-0.200	-0.535	-0.309	0.109	-0.224
	0.02	-0.458	-0.294	-0.688	-0.458	0.124	-0.425
	0.04	-0.625	-0.482	-0.586	-0.644	0.229	-0.390
玉米 Corn	0.01	-0.211	-0.159	-0.290	-0.248	-0.249	-0.245
	0.02	-0.296	-0.207	-0.240	-0.016	-0.150	-0.371
	0.04	-0.408	-0.378	-0.707	-0.187	-0.336	-0.670

结球甘蓝叶水提液在相同浓度下对同一受体作物胚根和胚芽生长的影响也存在差异(表2)。就生长长度而言,除菜豆在 $0.04\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度外,基本表现为胚根的敏感性强于胚芽。以对玉米的影响为例,甘蓝叶水提液的浓度分别为 0.01 、 0.02 、 $0.04\text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,玉米胚根相对长度分别为71.04%、76.02%与29.34%,而胚芽相对长度分别为75.19%、98.41%与81.36%。从生物量积累情况来看,也大体呈现出对胚根的抑制作用强于胚芽的规律,仅西葫芦在最大供试浓度与玉米在最小供试浓度例外。

表 2 结球甘蓝叶水提液质量浓度对 3 种作物种子胚根与胚芽相对生长的影响

Table 2 Effects of mass concentrations of cabbage-leaf water extracts on the relative growth of radicle and germ of three crop seeds

受体作物 Receptor crops	质量浓度 Mass concentration ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	相对胚根长 Relative radicle length (%)	相对胚芽长 Relative germ length (%)	相对胚根干重 Relative radicle dry weight (%)	相对胚芽干重 Relative germ dry weight (%)
西葫芦 Cocozele	0.01	12.00±1.11b	46.85±2.57b	47.92±8.57c	112.91±1.51a
	0.02	48.35±2.96a	67.51±3.96a	93.85±5.15b	110.58±2.97a
	0.04	40.67±2.15a	60.09±10.22ab	138.10±7.14a	73.39±8.95b
菜豆 Kidney bean	0.01	46.48±5.28a	69.06±12.55a	78.23±10.23a	112.08±4.88b
	0.02	31.21±3.14b	54.15±10.67a	57.97±14.16a	113.95±2.96b
	0.04	41.40±2.62a	35.56±3.10b	61.47±9.86a	129.53±3.53a
玉米 Corn	0.01	71.04±9.56a	75.19±10.48b	77.04±11.05a	75.61±12.41a
	0.02	76.02±5.21a	98.41±5.01a	64.14±9.87a	85.58±4.33a
	0.04	29.34±3.58b	81.36±4.39b	33.67±7.24b	66.87±2.15a

表中同列不同小写字母表示同种作物在不同浓度处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。Different lowercase letters within the same column indicate significant differences among different concentration treatments of the same crop at the 0.05 level. The same below.

2.2 结球甘蓝叶水提液对 3 种作物幼苗生长的影响

3 种供试作物幼苗株高、根长均随结球甘蓝叶水提液浓度增大而呈降低趋势(表 3)。0.08 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 结球甘蓝叶水提液处理下,西葫芦幼苗的株高显著低于对照 ($P<0.05$);0.10 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 结球甘蓝叶水提液处理下,菜豆幼苗的株高、根长及西葫芦根长与对照相比均显著降低 ($P<0.05$);0.06 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 结球甘蓝叶水提液即可显著降低玉米幼苗的株高和根长 ($P<0.05$)。在 3 种受体作物中,经最高浓度结球甘蓝叶水提液处理的玉米幼苗株高与根长的降低幅度均最大,与对照相比分别降低了 42.3% 和 57.9%;西葫芦幼苗的株高与根长降低幅度相对最小,分别为 35.6% 与 47.9%。

随着处理浓度升高,3 种作物幼苗地上部与地下部干重均表现出降低趋势。结球甘蓝叶水提液均能显著 ($P<0.05$) 抑制西葫芦幼苗根干物质的增加。较对照而言,西葫芦幼苗根干重降低了 27.1%~52.5%。当结球甘蓝叶水提液质量浓度为 0.08 与 0.10 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时能显著 ($P<0.05$) 降低西葫芦苗期的地上部干重,降幅分别为 14.7% 与 42.3%。最低质量浓度(0.06 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) 处理较对照仅下降了 8.6%。与对照相比,处理液可使菜豆根干重下降 28.4%~51.7%。菜豆地上部干重亦在处理浓度为 0.08 与 0.10 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时显著 ($P<0.05$) 降低,分别下降了 35.6% 与 43.9%。较 CK 而言,添加不同质量浓度的结球甘蓝叶水提液均可显著降低玉米幼苗根系与地上部的生物量 ($P<0.05$)。当添加最高质量浓度(0.10 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) 时,对根系与地上部干物质累积均表现出最强的抑制效果,抑制率分别高达 43.5% 与 55.8%;质量浓度降低至 0.08 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,对地上部干物质累积的抑制作用明显减弱,而对根干重的抑制效应仍未减轻;当质量浓度降至 0.06 $\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,对地上部干物质累积的抑制程度反而又显著 ($P<0.05$) 增强,但对根系干重的抑制作用明显减弱,抑制率仅为 16.8%(表 3)。

结球甘蓝叶水提液对 3 种受体作物幼苗生长指标的化感效应指数均为负值,表现为抑制作用。除玉米幼苗地上部干重外,随着处理浓度的加大,抑制作用基本呈逐渐增强的趋势。在 4 项检测指标中,最高浓度处理液分别对西葫芦和菜豆地下部干重的抑制作用最强,对应的化感效应指数分别为 -0.525 与 -0.517;最低浓度处理液分别对西葫芦地上部干重与菜豆根长的化感负效应最弱,响应指数分别为 -0.086 与 -0.122。各浓度结球甘蓝叶水提液对玉米幼苗株高、根长和地上部干重的抑制作用总体上要强于西葫芦与菜豆,而对地下部干重的化感负效应略轻于二者。玉米幼苗根长对高浓度处理液的敏感性响应最强,其化感效应指数为 -0.579,地下部干重对低浓度处理液的响应最弱,化感指数为 -0.168(表 3)。

表3 结球甘蓝叶水提液质量浓度对3种作物幼苗生长的影响

Table 3 Effects of mass concentrations of cabbage-leaf water extracts on the seedling growth of three crops

受体作物 Receptor crops	质量浓度 Mass con- centration (g·mL ⁻¹)	株高 Plant height		根长 Root length		地下部干重 Underground dry weight		地上部干重 Aboveground dry weight	
		测定值 Measured value (cm)	化感效应 指数 Re- sponse in- dex (RI)	测定值 Measured value (cm)	化感效应 指数 Re- sponse in- dex (RI)	测定值 Measured value (g· plant ⁻¹)	化感效应 指数 Re- sponse in- dex (RI)	测定值 Measured value (g· plant ⁻¹)	化感效应 指数 Re- sponse in- dex (RI)
		西葫芦 Cocozele	0	12.78±1.65a	—	9.78±0.76a	—	0.059±0.009a	—
	0.06	9.89±0.86ab	-0.226	8.28±0.81ab	-0.153	0.043±0.005b	-0.271	0.149±0.008ab	-0.086
	0.08	9.31±0.52b	-0.272	6.53±0.92ab	-0.332	0.040±0.009b	-0.322	0.139±0.009b	-0.147
	0.10	8.23±0.91b	-0.356	5.10±0.55b	-0.479	0.028±0.006c	-0.525	0.094±0.005c	-0.423
菜豆 Kidney bean	0	25.12±0.86a	—	11.98±0.85a	—	0.116±0.006a	—	0.289±0.012a	—
	0.06	21.30±1.17a	-0.152	10.52±1.23a	-0.122	0.083±0.009b	-0.285	0.215±0.043a	-0.256
	0.08	19.85±2.25ab	-0.210	8.75±1.86ab	-0.270	0.078±0.075b	-0.328	0.186±0.027b	-0.356
	0.10	14.59±1.32b	-0.419	6.16±0.59b	-0.486	0.056±0.007c	-0.517	0.162±0.038b	-0.439
玉米 Corn	0	46.69±3.31a	—	17.80±1.95a	—	0.131±0.007a	—	0.355±0.005a	—
	0.06	32.27±1.47b	-0.309	9.30±1.24b	-0.478	0.109±0.005b	-0.168	0.186±0.009c	-0.476
	0.08	31.63±2.27b	-0.323	9.10±0.95b	-0.489	0.095±0.009c	-0.275	0.228±0.011b	-0.358
	0.10	26.92±1.97c	-0.423	7.50±0.80c	-0.579	0.074±0.005c	-0.435	0.157±0.004c	-0.558

—: 无需计算该指标 There is no need to calculate this indicator.

2.3 结球甘蓝叶水提液对3种受体作物的化感综合效应

各质量浓度的结球甘蓝叶水提液对西葫芦、菜豆和玉米芽期与苗期生长的化感作用方向一致,均表现出抑制作用。其中高质量浓度(0.04 g·mL⁻¹)的结球甘蓝叶水提液对3种受体作物种子萌发的化感综合效应均强于低质量浓度(0.01与0.02 g·mL⁻¹),所对应的指数分别为-0.516,-0.416与-0.448。随着水提液质量浓度的降低,仅对菜豆的化感综合抑制效应表现出了逐渐减弱的趋势;而对玉米和西葫芦均呈先减弱后又有所反弹的变化情况。在低质量浓度(0.01与0.02 g·mL⁻¹)下,玉米芽期的化感综合效应指数较大。相对而言,结球甘蓝叶水提液在该浓度范围对玉米的化感综合抑制强度略低于其他两种作物。在高质量浓度(0.04 g·mL⁻¹)下,菜豆芽期的化感综合效应指数最大,受到的化感综合抑制作用最弱。在各供试浓度条件下,西葫芦芽期的化感综合效应均较强(表4)。

与对种子萌发的化感综合效应类似,最高浓度(0.10 g·mL⁻¹)的结球甘蓝叶水提液对西葫芦、菜豆和玉米幼苗生长的化感综合负效应均强于低浓度的,对应的指数分别为-0.447,-0.465与-0.497。与对种子萌发的化感综合效应不同,在3种受体作物中,供试浓度水提液对西葫芦幼苗生长的总体抑制作用相对最轻,而对玉米幼

表4 结球甘蓝叶水提液质量浓度对3种作物种子萌发与幼苗生长的化感综合效应

Table 4 Allelopathic comprehensive effects of mass concentrations of cabbage-leaf water extracts on the seed germination and seedling growth of three crops

受体作物 Receptor crops	结球甘蓝叶水提液浓度 Concentrations of cabbage-leaf water extracts (g·mL ⁻¹)						平均 Average	排名 Ranking
	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10		
西葫芦 Cocozele	-0.484	-0.366	-0.516	-0.185	-0.267	-0.447	-0.378	1
菜豆 Kidney bean	-0.251	-0.367	-0.416	-0.204	-0.291	-0.465	-0.332	3
玉米 Corn	-0.234	-0.213	-0.448	-0.356	-0.358	-0.497	-0.351	2

苗生长的抑制作用最强。根据对种子萌发与幼苗生长的综合作用排名,结球甘蓝叶水提液对 3 种作物的化感综合效应的顺序为西葫芦>玉米>菜豆(表 4)。

2.4 结球甘蓝叶水提液对 3 种作物幼苗生理特性的影响

与各自对照相比,除西葫芦在最低浓度即 $0.06 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 处理时,幼苗的丙二醛(MDA)含量略低外,其他处理均高于对照。随着处理浓度的升高,玉米幼苗的丙二醛含量明显增加。在最高浓度 $0.10 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 处理时,西葫芦与玉米幼苗的丙二醛含量均显著高于 CK ($P<0.05$),其含量上升幅度可达 2 倍以上。菜豆幼苗的丙二醛含量在各处理浓度下均未显著升高。当受到结球甘蓝叶水提液胁迫时,在 3 种供试作物中,仅菜豆幼苗膜系统可将 MDA 含量维持在一个相对稳定的范围内(表 5)。

表 5 不同质量浓度甘蓝叶水提液对 3 种作物幼苗生理指标的影响

Table 5 Effect of different mass concentrations of cabbage-leaf water extracts on the seedling physiological index of three crops

受体作物 Receptor crop	质量浓度 Mass concentration ($\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	MDA 含量 Malondialdehyde content ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	酶活性 Enzyme activity ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)		
			SOD	POD	CAT
西葫芦 Cocozelle	0	$3.92\pm 0.16\text{b}$	$51.2\pm 1.9\text{b}$	$20.1\pm 2.6\text{b}$	$1.6\pm 0.2\text{c}$
	0.06	$3.78\pm 0.49\text{b}$	$53.8\pm 3.1\text{b}$	$28.5\pm 4.1\text{ab}$	$5.3\pm 0.8\text{a}$
	0.08	$5.06\pm 1.84\text{a}$	$65.4\pm 2.6\text{a}$	$32.8\pm 3.9\text{a}$	$3.9\pm 1.6\text{b}$
	0.10	$7.89\pm 0.61\text{a}$	$39.5\pm 4.8\text{c}$	$14.2\pm 5.4\text{c}$	$3.4\pm 1.1\text{b}$
菜豆 Kidney bean	0	$2.56\pm 0.11\text{a}$	$146.2\pm 10.8\text{b}$	$2085\pm 105.0\text{b}$	$428.7\pm 20.0\text{a}$
	0.06	$2.79\pm 0.08\text{a}$	$149.4\pm 9.9\text{b}$	$2118\pm 158.0\text{b}$	$439.1\pm 11.0\text{a}$
	0.08	$3.16\pm 0.12\text{a}$	$171.9\pm 5.1\text{a}$	$2104\pm 102.0\text{b}$	$465.5\pm 6.0\text{a}$
	0.10	$3.65\pm 0.06\text{a}$	$143.6\pm 4.2\text{b}$	$2499\pm 162.0\text{a}$	$450.6\pm 13.0\text{a}$
玉米 Corn	0	$2.96\pm 0.28\text{b}$	$22.8\pm 1.3\text{b}$	$52.8\pm 6.4\text{b}$	$70.2\pm 2.7\text{b}$
	0.06	$3.37\pm 1.05\text{b}$	$34.6\pm 4.1\text{a}$	$63.9\pm 5.2\text{a}$	$72.5\pm 3.5\text{b}$
	0.08	$4.96\pm 2.29\text{a}$	$28.2\pm 3.2\text{ab}$	$56.7\pm 2.8\text{b}$	$89.3\pm 6.7\text{a}$
	0.10	$6.09\pm 1.18\text{a}$	$20.1\pm 2.4\text{b}$	$41.3\pm 3.5\text{c}$	$52.5\pm 7.4\text{c}$

MDA: 丙二醛 Malondialdehyde; SOD: 超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase; POD: 过氧化物酶 Peroxidase; CAT: 过氧化氢酶 Catalase.

本研究中,随着处理浓度的升高,西葫芦的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性基本呈先增强后减弱的变化特征。当处理浓度为 $0.08 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,上述两种酶的活性显著增强 ($P<0.05$);而当处理浓度继续上升至 $0.10 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,其活性则受到显著抑制 ($P<0.05$)。菜豆幼苗的 SOD 活性同样也在处理液浓度为 $0.08 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,显著强于其他处理 ($P<0.05$);而其 POD 活性却在处理液浓度为 $0.10 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时显著增强 ($P<0.05$)。尽管玉米的 SOD 和 POD 活性变化趋势均与西葫芦相似,但其活性最强时所对应的处理液浓度却与西葫芦不同,表现为在处理液浓度为 $0.06 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,玉米幼苗的 SOD 与 POD 活性均显著增强 ($P<0.05$)。当处理液升至最大浓度 $0.10 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,玉米幼苗 POD 活性受到显著抑制 ($P<0.05$)。西葫芦幼苗的过氧化氢酶(CAT)活性随处理浓度变化明显,当浓度为 $0.06 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,其活性显著升高 ($P<0.05$),上升幅度可达对照的 2 倍以上;而当处理液浓度升至 $0.08\sim 0.10 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,该酶活性却明显降低,但仍显著高于对照 ($P<0.05$)。玉米 CAT 的活性变化趋势与西葫芦类似,但仅当浓度升至 $0.08 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,其活性才显著增强 ($P<0.05$);当浓度升至 $0.10 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 时,该酶活性又显著低于对照 ($P<0.05$),降幅可达 25%。菜豆幼苗的 CAT 活性虽随处理浓度变化而略有起伏,但处理之间没有显著差异(表 5)。

3 讨论

3.1 结球甘蓝叶水提液对 3 种作物种子萌发与幼苗生长的影响

化感作用是指植物通过向外界环境中释放有效的化合物,对相邻的其他植物(包括微生物)产生促进或抑制

作用。这是目前植物化感作用最经典的定义。虽然在这个定义中包含了促进和抑制两方面的内容,但化感作用通常都表现出抑制效应^[31]。许多研究均证实了这一点。如蒋红云等^[32]的研究发现,石蒜(*Lycoris radiata*)水浸提物对萝卜(*Raphanus sativus*)、黄瓜、番茄和油菜(*Brassica napus*)幼苗生长均具有较强的抑制作用,浓度越大抑制越强;于建光等^[33]的研究表明,小麦(*Triticum aestivum*)秸秆浸提液对水稻(*Oryza sativa*)种子萌发和幼苗生长均产生抑制作用;罗钦等^[34]的研究证实,大狼毒(*Euphorbia jolkinii*)根、茎、叶浸提液处理抑制了多年生黑麦草(*Loium perenne*)种子萌发与幼苗生长。

与上述结果一致,本研究通过对种子萌发与幼苗生长阶段开展研究发现,当结球甘蓝叶水提液达到一定浓度可以显著抑制西葫芦、菜豆与玉米种子萌发和幼苗生长。在种子萌发阶段,0.01 g·mL⁻¹的处理液即可显著降低西葫芦与菜豆的发芽势与发芽率($P < 0.05$);当浓度达到0.02 g·mL⁻¹时可显著降低玉米发芽率。在幼苗生长阶段,3种供试作物对结球甘蓝叶水提液浓度的敏感性各异。在处理液浓度为0.06 g·mL⁻¹时,即可显著降低玉米的株高、根长与单株生物量($P < 0.05$);当浸提液浓度升至0.08 g·mL⁻¹时,西葫芦的株高和地上部干重也均显著降低($P < 0.05$)。与李彦飞等^[5]的研究结果相似。然而,结球甘蓝叶水提液虽然抑制菜豆胚根生长,但却对胚芽生物量的累积有明显的促进作用。这表明结球甘蓝叶中富含的化感物质可能会对同一受体植物的不同部位发挥截然相反的作用。

通常情况下,对同种作物种子胚根的化感效应要强于胚芽,可能与胚根最先接触化感物质有关。这与前人研究苍耳(*Xanthium sibiricum*)化感作用的结果相吻合^[8],但却不同于文献报道中石蒜水浸提物对多种受体作物芽和根抑制作用的研究结果^[32]。原因应归于不同供体作物释放化感物质的种类和数量差异^[35]。此外,在山西每年雨水较为充沛的时期也是结球甘蓝营养生长的旺盛期,作物加快了体内的代谢速度,产生了丰富的次生产物,相当一部分次生代谢物通过淋溶和浸溶等途径进入土壤环境。不过由于土壤对化感物质具有一定的缓冲和稀释能力,只有当化感物质在土壤中积累到一定量后才会影响到幼苗的生长。故本研究在预试验的基础上选用抑制种子萌发倍量浓度的水提液,添加到盆栽土壤中才表现出对幼苗生长的抑制效应。这与罗钦等^[34]的研究方法类似。值得一提的是,鉴于预试验的结果:当添加与本试验等量的0.01 g·mL⁻¹结球甘蓝叶水提液时,有利于盆栽西葫芦的苗期生长,表现为促进根系伸长,增加株高及地上部干重等;当质量浓度分别为0.01、0.03 g·mL⁻¹时,不影响盆栽玉米苗期生长。故此,在结球甘蓝成熟后应尽早采收,并建议清除地上部所有叶片,以免其化感物质持续进入土壤环境中,对下茬作物造成更加不利的影

综上可见,结球甘蓝对受体植物的影响主要表现在对其种子发芽率、发芽势、幼苗株高、根长与生物量等方面,且对不同受体作物的影响存在显著差异^[32],对同一受体的作用方向会因处理浓度而有所差别^[36]。

3.2 结球甘蓝叶水提液对3种作物化感作用的生理机制

植物受到化感物质作用后,首先伤害的是细胞膜,主要表现为影响植物细胞膜透性使细胞生理活动和物质运输出现紊乱,进而抑制植物生长。丙二醛作为膜脂过氧化作用的最终产物,其含量是膜脂过氧化程度的一个重要标志^[33]。由于它本身也是一种有害物质,可与细胞内各种物质发生反应。如抑制蛋白质合成,引起酶和膜的损伤,降低膜电阻与膜的流动性,最终导致膜结构及生理完整性的破坏。因此,丙二醛的含量也与细胞膜受损坏程度直接相关^[37]。本试验中,仅西葫芦在最低浓度(0.06 g·mL⁻¹)处理时,幼苗的丙二醛含量略低于对照。推测西葫芦可能通过调控抗氧化酶系统降低了丙二醛的含量,从而减少对幼苗的伤害。这可能也是在结球甘蓝叶水提液浓度较低时,西葫芦幼苗受到化感综合抑制作用最弱的生理机制之一。但随着处理浓度的升高,幼苗的丙二醛含量逐渐积累,表明当处理浓度超过调节范围后,便开始加大对西葫芦幼苗膜系统的破坏程度。王田涛等^[4]与高兴祥等^[8]的研究结果也均表明化感物质能够改变受体作物丙二醛的含量,但因化感物质种类、作用浓度与受体作物的不同,其含量呈现出不同的变化趋势。

逆境条件下植物体同时存在膜保护系统,能够清除体内多余的自由基。这一保护系统实际上是一个抗氧化系统。它是由许多酶和还原型物质组成,其中SOD、POD、CAT是最重要的抗氧化酶。SOD是天然存在的超氧自由基清除因子,主要功能是清除细胞内部的自由基,使自由基保持在一个较低水平上;POD可抑制逆境条件

下细胞膜脂过氧化作用,降低细胞膜遭受的伤害,因此该酶活性越高,植株抵抗不利环境的能力越强;CAT也是机体内控制活性氧累积的主要保护酶系之一。这3种酶在植物体内通常协同作用,在逆境胁迫中通过清除过量的活性氧,维持活性氧的代谢平衡,保护膜结构,从而使植物在一定程度上忍耐、减缓或抵御逆境胁迫的伤害。故其活性高低与植物的抗逆性具有较大的关系,可以在一定程度上反映植物受伤害的程度,但3种酶在植物抵抗逆境伤害中所发挥的作用可能存在差异^[37-38]。在本研究中,随着结球甘蓝叶水提液浓度的增大,西葫芦与玉米幼苗的3种抗氧化酶活性均呈先增强后减弱的变化特征。在最大浓度处理时,二者的SOD与POD活性均低于对照。这可能是幼苗在受到化感物质作用后,因体内活性氧增多而开启了保护机制,以增强幼苗抗氧化的能力。而当处理液浓度升高到一定范围时,抗氧化酶活性便开始下降,过氧化产物超量累积,致使幼苗无法通过调控来清除活性氧,因而增强了膜脂过氧化作用。这与杨振亚等^[39]报道高浓度的芝麻(*Sesamun indicum*)水浸提液会破坏毛竹(*Phyllostachys edulis*)的抗氧化酶系统,增加毛竹细胞中的活性氧含量,抑制毛竹生长发育的研究结果一致。不过,同在最大处理浓度时,菜豆幼苗的POD活性却显著增强。由于POD能够催化分解过氧化物及其他一些酶类,对因逆境胁迫引起的植物细胞膜氧化损伤有非常明显的缓解作用。所以这可能是菜豆幼苗膜系统即便在高浓度化感物质胁迫时,忍耐性也相对最强的原因之一。

本试验在光照、温度和水分保持一致的条件下,开展结球甘蓝叶水浸提物化感效应的研究。由于规避了环境中多种因素的干扰,可以客观地评价结球甘蓝的化感效应。但需要强调的是,在实际生产过程中,化感物质发挥作用时会受到诸多外界因素的影响,如降水、气候、土壤、植株生物量、凋落物密度、分解速度等^[8]。因此,本研究的结果与田间的真实作用情况还有很大差别。需进一步考虑土壤的质地与生物学性质,以及其他化感物质释放途径对作物种子萌发与幼苗生长及生理特性的影响。利用结球甘蓝对不同作物化感效应差异的特点,建立合理的作物种植制度,可以有效地缓解结球甘蓝的化感负效应。就其化感物质具体的成分鉴定、主要的释放途径及活性物质转化应用等方面还值得继续深入研究。

4 结论

结球甘蓝叶通过雨雾淋溶途径释放的化感物质会对西葫芦、菜豆和玉米种子萌发与幼苗生长产生不利影响。对3种作物的化感综合效应强弱顺序为西葫芦>玉米>菜豆,所产生的化感作用差异与体内丙二醛含量和抗氧化酶活性变化有关。因此,建议结球甘蓝茬衔接菜豆的种植模式可能是缓解该茬口化感负效应的方法之一;同时,在采收结球甘蓝时,应将地上部完全去除,避免其残留于土壤中影响下茬作物生长。

参考文献 References:

- [1] Liu J, Zhu K L, Yue H W, *et al.* Effects of seed coat on seed germination and physiological characteristics of maize. *Seed*, 2021, 40(9): 40-47.
刘京, 朱凯丽, 岳海旺, 等. 玉米果种皮对其种子萌发及生理特性的影响. *种子*, 2021, 40(9): 40-47.
- [2] Zhang Z Y, Lin W X. Continuous cropping obstacle and allelopathic autotoxicity of medicinal plants. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 189-196.
张重义, 林文雄. 药用植物的化感自毒作用与连作障碍. *中国生态农业学报*, 2009, 17(1): 189-196.
- [3] Cao P, Shen Y X. Study on allelopathic effects of bermudagrass on five gramineous weeds. *Acta Agrestia Sinica*, 2010, 18(3): 452-455.
曹璞, 沈益新. 狗牙根对5种禾本科杂草化感作用的研究. *草地学报*, 2010, 18(3): 452-455.
- [4] Wang T T, Wang Q, Wang H Z, *et al.* Autotoxicity of *Angelica sinensis* and allelopathy on tested plants. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(6): 1132-1138.
王田涛, 王琦, 王惠珍, 等. 当归自毒作用和其对不同作物的化感效应. *草地学报*, 2012, 20(6): 1132-1138.
- [5] Li Y F, Chu X H, Li J Y, *et al.* Allelopathic effects of *Euphorbia jolkinii* on seed germination and seedling growth of alfalfa. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(2): 394-402.
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. *草地学报*, 2022, 30(2): 394-402.
- [6] Fan L H, Wang P B, Wang Y X, *et al.* The allelopathy effect of *Artemisia scoparia* water extracts on grassland plants seeds

- germination. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(1): 96–103.
- 范丽花, 汪鹏斌, 王玉霞, 等. 猪毛蒿枯落物水浸提液对5种草地植物种子萌发的化感作用. 中国草地学报, 2021, 43(1): 96–103.
- [7] Zhang Z L, Wang W Q, Yang J Z, *et al.* Effects of continuous *Panax notoginseng* cropping soil on *P. notoginseng* seed germination and seedling growth. Soils, 2010, 42(6): 1009–1014.
- 张子龙, 王文全, 杨建忠, 等. 三七连作土壤对其种子萌发及幼苗生长的影响. 土壤, 2010, 42(6): 1009–1014.
- [8] Gao X X, Li M, Gao Z J, *et al.* Allelopathic potential of *Xanthium sibiricum* on seeds germination and seedling growth of different plants. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(2): 95–101.
- 高兴祥, 李美, 高宗军, 等. 苍耳对不同植物幼苗的化感作用研究. 草业学报, 2009, 18(2): 95–101.
- [9] Xu Y F, Huang B, Zhu C M, *et al.* Allelopathic effects of aqueous extract from composted tomato residues on the growth of cucumber and Chinese cabbage. Journal of Zhejiang A&F University, 2017, 34(2): 276–282.
- 徐勇峰, 黄斌, 朱陈名, 等. 堆制番茄秸秆浸提液对黄瓜和大白菜的化感作用. 浙江农林大学学报, 2017, 34(2): 276–282.
- [10] Zhao H, Wang T, Yu L. Allelopathic effects of garlic bulb aqueous extracts on seed germination and seedling growth of soybean. Soybean Science, 2019, 38(4): 548–553.
- 赵红, 王婷, 余李. 大蒜鳞茎浸提液对大豆种子萌发和幼苗生长的化感效应. 大豆科学, 2019, 38(4): 548–553.
- [11] Yao L B, Han H X, Li Q W, *et al.* Research on allelopathy of *Allium fistulosum* L. aqueous extracts and its physiological mechanism on *Raphanus sativus* L. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2017, 46(8): 115–120.
- 姚岭柏, 韩海霞, 李倩雯, 等. 大葱水浸液对萝卜的化感效应及其生理机制研究. 河南农业科学, 2017, 46(8): 115–120.
- [12] You H X. Study on the environmental effects of different planting patterns and the allelopathy mechanism of cucumber in facility condition. Yangling: Northwest A&F University, 2007.
- 由海霞. 设施黄瓜不同种植模式的环境效应及其化感作用研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [13] Guan A Q. Preliminary study on allelopathy of amaranth (*Amaranthus tricolor* L.). Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- 管安琴. 苋菜化感作用的初步研究. 南京: 南京农业大学, 2015.
- [14] Tong F, Cheng Z H, Jin R, *et al.* Allelopathy of methanol dissolved ingredient from garlic plant aqueous extracts. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007, 35(6): 119–124.
- 佟飞, 程智慧, 金瑞, 等. 大蒜植株水浸液醇溶成分的化感作用. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(6): 119–124.
- [15] Zhao C, Zhao M, Huang X F, *et al.* Allelopathic effect of water extract of *Brassica oleracea* var. *capitata* leaves on seedling growth of *Zea mays* and *Cucurbita pepo*. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(4): 838–844.
- 赵聪, 赵敏, 黄学芳, 等. 结球甘蓝叶片水提液对糯玉米和西葫芦幼苗生长的化感作用. 浙江农林大学学报, 2022, 39(4): 838–844.
- [16] Kural L, Özkan R Y. Allelopathic potential of white cabbage on some plants. Plant, Soil and Environment, 2020, 66 (11): 559–563.
- [17] Ma A M, Wang F, Pan G Y, *et al.* Analysis on the main processing and utilization ways of cabbage. China Fruit and Vegetable, 2018, 38(5): 5–8.
- 马爱民, 王峰, 潘国云, 等. 结球甘蓝主要加工利用途径分析. 中国果菜, 2018, 38(5): 5–8.
- [18] Tang L, Paonessa J D, Zhang Y, *et al.* Total isothiocyanate yield from raw cruciferous vegetables commonly consumed in the United States. Journal of Functional Foods, 2013, 5(4): 1996–2001.
- [19] Delchier N, Herbig A, Rychlik M, *et al.* Foliates in fruits and vegetables: contents, processing and stability. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 15(3): 506–528.
- [20] Cartea M E, Francisco M, Soengas P, *et al.* Phenolic compounds in *Brassica* vegetables. Molecules, 2010, 16(1): 251–280.
- [21] Singh S V, Singh K. Cancer chemoprevention with dietary isothiocyanates mature for clinical translational research. Carcinogenesis, 2012, 33(10): 1833–1842.
- [22] Jennings B A, Willis G. How folate metabolism affects colorectal cancer development and treatment: a story of heterogeneity and pleiotropy. Cancer Letters, 2015, 356(2): 224–230.
- [23] Sevgi K, Tepe B, Sarikurkcu C. Antioxidant and DNA damage protection potentials of selected phenolic acids. Food and Chemical Toxicology, 2015, 77: 12–21.
- [24] Merkl R, Hrádkov I, Filip V. Antimicrobial and antioxidant properties of phenolic acids alkyl esters. Czech Journal of Food

- Sciences, 2010, 28(4): 275—279.
- [25] Lin C M, Preston J F, Cheng I W. Antibacterial mechanism of allyl isothiocyanate. *Journal of Food Protection*, 2000, 63(6): 727—734.
- [26] Yang H T, Lee M, Hong K S, *et al.* Efficacy of folic acid supplementation in cardiovascular disease prevention: An updated meta-analysis of randomized controlled trials. *European Journal of Internal Medicine*, 2012, 23(8): 745—754.
- [27] Nooyens A C, Mesquita H B B, Boxtel M P J, *et al.* Fruit and vegetable intake and cognitive decline in middle-aged men and women: the Doetinchem Cohort Study. *The British Journal of Nutrition*, 2011, 106(5): 752—761.
- [28] Zhou S F, Tang Y, Pan L, *et al.* Effect of fulvic acid on barnyardgrass (*Echinochloa crusgalli*) seedling growth under flooding conditions. *Weed Science*, 2021, 69(2): 192—202.
- [29] Xu C C, Zhao S J, Zou Q. Separation and identification of malondialdehyde in plant tissue. *Plant Physiology Communications*, 1992, 28(4): 288—290.
许长成, 赵世杰, 邹琦. 植物组织内丙二醛的分离与鉴定. *植物生理学通讯*, 1992, 28(4): 288—290.
- [30] Zou Q. Experimental direction of plant physiology. Beijing: China Agricultural Press, 2001: 223—224.
邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2001: 223—224.
- [31] Rice E L. Allelopathy (the second edition). Orlando: Academic Press, 1984: 1—7.
- [32] Jiang H Y, Zhang Y N, Feng P Z, *et al.* Allelopathic effects of *Lycoris radiate* on radish, cucumber, tomato and rape seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(9): 1655—1659.
蒋红云, 张燕宁, 冯平章, 等. 石蒜对萝卜、黄瓜、番茄和油菜幼苗的化感效应. *应用生态学报*, 2006, 17(9): 1655—1659.
- [33] Yu J G, Gu Y, Chang Z Z, *et al.* Allelopathic effects of wheat straw extract and decomposition liquid on rice. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2): 349—356.
于建光, 顾元, 常志州, 等. 小麦秸秆浸提液和腐解液对水稻的化感效应. *土壤学报*, 2013, 50(2): 349—356.
- [34] Luo Q, Ma Z Y, Niu Q M, *et al.* Allelopathic effect and physiological mechanism of extracts from different parts of *Euphorbia jolkini* on growth of *Loium perenne* seedlings. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(10): 3212—3199.
罗钦, 马祖艳, 牛琼梅, 等. 大狼毒不同部位浸提液对多年生黑麦草幼苗生长的化感效应及生理机制. *草地学报*, 2023, 31(10): 3212—3199.
- [35] Zuo L, Wang S S, Ma Y M, *et al.* Effect of torch tree extract on seeds germination in two types of turfgrass. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(9): 1927—1933.
左郎, 王树森, 马迎梅, 等. 火炬树浸提液对两种草坪草种子萌发的影响. *草地学报*, 2021, 29(9): 1927—1933.
- [36] Chen H Z, Xu M S, Zhou T Y, *et al.* Allelopathic effects of extract from *Rabdosia serra* (Maxim.) Hara on seed germination and seedling growth of two weeds. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(7): 2118—2127.
陈幻真, 许明爽, 周天宇, 等. 溪黄草浸提液对2种杂草种子萌发和幼苗生长的化感作用. *草地学报*, 2024, 32(7): 2118—2127.
- [37] Gao Y L, Chang J, Wang Y H, *et al.* Allelopathic effects of *Stellera chamaejasme* on seed germination and growth of three crops. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(10): 83—91.
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. *草业学报*, 2021, 30(10): 83—91.
- [38] 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. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(9): 96—106.
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. *草业学报*, 2022, 31(9): 96—106.
- [39] Yang Z Y, Zou J Q, Ni H J, *et al.* Effects of aqueous extract from *Sesamun indicum* L. on seed germination and physiological characteristics of *Phyllostachys edulis*. *Journal of Northeast Forestry University*, 2023, 51(1): 11—17.
杨振亚, 邹景泉, 倪惠菁, 等. 芝麻浸提液对毛竹种子萌发及幼苗生理特性的影响. *东北林业大学学报*, 2023, 51(1): 11—17.