杨昕蕾,刘晓乐,路蓉,等.大白菜根系分泌物对幼苗自毒作用的研究[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(6):78-86.
Yang X L, Liu X L, Lu R, et al. A study on the autotoxicity of root exudates of chinese cabbage on seedlings[J]. Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(6):78-86.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202403049

大白菜根系分泌物对幼苗自毒作用的研究

杨昕蕾,刘晓乐,路蓉,惠麦侠*

(西北农林科技大学 园艺学院,陕西 杨凌 712199)

摘　要:[目的]目前连作障碍已经成为限制十字花科蔬菜生产最主要的原因之一,探究大白菜根系分泌物对自身幼苗生长产生的影响,可为解决大白菜栽培过程中的连作问题以及大白菜自毒作用的研究提供理论依据。[方法]本研究以大白菜品种'金麒麟'为试验材料,在室内进行水培,共设置8组处理:CK1(1/2 Hoagland营养液)、CK2(1/2 Hoagland营养液+活性炭)、T1(根系分泌物收集液)、T2(根系分泌物+活性炭)、T3(根系分泌物稀释2倍)、T4(根系分泌物稀释3倍)、T5(根系分泌物稀释4倍)、T6(根系分泌物稀释5倍),分析不同稀释倍数的根系分泌物对大白菜幼苗生长性状、生理生化指标和叶片质膜完整性的影响,探讨大白菜根系分泌物的自毒作用机理。[结果]与稀释后的各处理相比,T1处理导致大白菜幼苗的生物量显著减少,较CK1处理地上部鲜重显著降低了84.82%,根系活力较CK1处理显著减少了40.16%,损伤了根系结构;叶绿素含量减少32%以上,MDA含量增加,过氧化氢和超氧阴离子的积累增加,并对叶片质膜完整性造成破坏;与T1处理相比,T2添加活性炭与根系分泌物稀释各处理对幼苗的伤害均有所减轻,同时,大白菜幼苗自身可以通过提高渗透调节物质含量以及抗氧化酶活力来降低自毒作用所造成的伤害。[结论]大白菜根系分泌物对幼苗存在自毒作用,影响幼苗生长,而添加生物活性炭和稀释培养液在一定程度上可以减轻大白菜根系分泌物对幼苗的自毒作用造成的影响。

关键词:大白菜;根系分泌物;自毒作用;生理生化
中图分类号:S634.1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)06-0078-09

大白菜(*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*)属十字花科芸薹属植物,是我国种植规模第二大蔬菜作物[1],种植面积与市场销量大,由于连茬种植以及区域化的种植习惯,导致连作障碍问题凸显,病虫害加剧,植株生长缓慢、长势弱[2],且长期种植单一蔬菜作物,会导致品种退化问题加重,这可能与土壤养分流失、微生物种群特征改变和植物根系分泌有毒物质等原因有关[3]。研究认为,自毒作用是造成十字花科蔬菜连作障碍的重要原因之一。自毒作用(Autotoxicity)是指植物根系分泌或植株残茬降解后向环境中释放化学物质,危害自身或者种内植物,使其受到毒害的现象,同时也是植物适应种内竞争的表现[4-5]。土壤中过多的根系分泌物和植株残茬等自毒物质(如醌类、苯甲酸及其衍生物、肉桂酸及其衍生物、香豆素类等)的累积,加剧了连作障碍的发生,降低叶菜类农产品产量与品质[6]。研究表明,根系分泌物会刺激土壤中有害微生物的生长和繁殖,且经过长期积累,降低了花生的单叶光合速率、群体光合速率、叶片中可溶糖含量、氨基酸含量等,从而抑制花生的生长发育[7];高浓度的化感物质,如高浓度酚酸使玉米幼苗的株高、根长及鲜重降低,使丙二醛及脯氨酸含量增高,导致玉米细胞膜过氧化程度增高及细胞水分缺乏[8]。针对大蒜、小麦、花生和玉米等多种作物的根系分泌物自毒作用已有较多研究,而在芸薹属蔬菜中大白菜根系分泌物自毒作用的研究并不十分明确。本试验通过设置大白菜根系分泌物添加活性炭及稀释不同倍数处理,研究自毒作用胁

收稿日期:2024-03-18　　**修回日期**:2024-08-23
基金项目:国家现代农业产业技术体系(CARS-23-G22);太白县农业科技园区重点建设项目(2022TBNYKJ-2)
作者简介:杨昕蕾(ORCID:0009-0001-8301-2060),硕士研究生,研究方向:蔬菜遗传育种,E-mail:272382799@qq.com
*通信作者:惠麦侠(ORCID:0000-0002-7074-3198),教授,博士生导师,E-mail:maixiahui@163.com

迫对大白菜幼苗叶长、叶宽、鲜重、干重等生长发育特征,以及过氧化氢和超氧阴离子的积累与质膜完整性等生理特性的影响,旨在为揭示大白菜自毒作用的机理与大白菜连作障碍的克服及改良提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料与试剂

大白菜品种'金麒麟'(河北慕兰多种子有限公司),Hoagland营养液(上海麦克林有限公司)。

1.2　大白菜根系分泌物的收集

大白菜种子用蒸馏水进行催芽,并置于25 ℃组培室中。催芽1 d后,将幼苗用漂浮板固定并漂浮于1/4 Hoagland营养液中进行适应性培养。7 d后,将幼苗移到加入1/2 Hoagland营养液的组培瓶中,每瓶容量为200 mL营养液,培养4株幼苗,共设置100个组培瓶。组培瓶包锡箔纸避光,组培室培养环境为光照强度6000 lx、14 h、25 ℃,黑暗10 h、19 ℃。幼苗生长期间,调节pH保持在5.8~6.5,并监测营养液EC值及体积维持在200 mL并搅拌通气。培养20 d后,过滤收集水培液(根系分泌物)备用。

1.3　试验处理

将收集的根系分泌物分别按体积比用1/2 Hoagland营养液稀释2倍、3倍、4倍、5倍,之后设置8个处理,分别为CK1(1/2 Hoagland营养液)、CK2(1/2 Hoagland营养液+活性炭)、T1(根系分泌物)、T2(根系分泌物+活性炭)、T3(根系分泌物稀释2倍)、T4(根系分泌物稀释3倍)、T5(根系分泌物稀释4倍)、T6(根系分泌物稀释5倍)。其中,CK2与T2处理的每个组培瓶中添加0.05 g活性炭。每个处理设置4个组培瓶,每瓶4株幼苗,3次重复,每处理共48株。每周调节pH保持在5.8~6.5,并监测其EC值。期间每间隔4 d用量筒向每个组培瓶中添加1/2 Hoagland营养液并进行搅拌通气,添加溶液体积至200 mL。

1.4　测定性状与方法

1.4.1　生长指标的测定

每处理随机取5株长势基本一致的幼苗进行形态指标测定,重复3次。用直尺测量最大叶长、最大叶宽、株幅;用天平称量植株地上部鲜(干)重和地下部鲜(干)重。

1.4.2　根系指标及生理指标的测定

各处理随机选取5株长势基本一致的幼苗叶片混样,进行生理指标测定;取根部进行根系活力与根部扫描测定,重复3次。采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根系活力[9];植株根系用清水洗净后进行根系扫描(根系扫描仪,WinRhizo Basic03040415),分析根系形态指标。参考高俊凤[8]的方法测定生理指标:利用96%乙醇研磨提取比色的方法测定叶绿素含量(mg·g^{-1});采用考马斯亮蓝法测定叶片可溶性蛋白含量(mg·g^{-1});采用酸性茚三酮比色法测定脯氨酸含量(μg·g^{-1} FW);蒽酮比色法测定可溶性糖含量(mg·g^{-1});采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量(μmol·g^{-1});采用氯化硝基四氮唑(NBT)光化还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性(单位U·g^{-1} FW·min^{-1});采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性(单位U·μg^{-1} FW·min^{-1});采用紫外吸收比色法测定过氧化氢酶(CAT)活性(单位U·g^{-1} FW·min^{-1})。酶活性以1分钟内能转化1 μmol底物的酶量(即1 U=1 μmol·min^{-1})来表示,酶U缩写代表酶的活性单位。

1.4.3　过氧化氢和超氧阴离子积累及质膜完整性的染色观察

各处理随机选取长势基本一致的幼苗叶片,将叶片置于50 mL离心管,每个离心管可放入2~3个叶片,向离心管中加入染液。超氧阴离子、过氧化氢以及质膜完整性的组织化学染色分别参考Baker等[10]、Xu等[11]和Fryer等[12]方法。NBT溶液配置:称取0.5 g NBT,用50 mmol·L^{-1}磷酸缓冲液(pH 7.8)定容到1 L,得到0.5 mg·mL^{-1} NBT染液。DAB溶液配置:称取0.5 g DAB,先用30 μL盐酸预溶,再分次加入蒸馏水搅拌溶解;用盐酸将pH调至3.8,之后用蒸馏水定容至1 L,得到0.5 mg·mL^{-1} DAB染液。Evans blue染液配置:取2.5 g Evans blue溶于100 mmol·L^{-1} $CaCl_2$中,并将pH调整至5.6,得到0.25% Evans blue染液。

1.5　数据处理

采用Microsoft Excel 2016软件进行数据整理及图表绘制,使用IBM-SPSS 24.0软件,运用单因素方差分析(ANOVA)中的最小显著性差异(LSD)法对试验数据进行显著性差异分析,差异显著性水平α=0.05。

2 结果与分析

2.1 自毒作用对大白菜幼苗生长指标影响

如表1所示,与CK1处理相比,添加活性炭的CK2对大白菜幼苗的地上部鲜重无明显影响。T1处理的地上部鲜重比CK1处理显著降低了84.82%;添加活性炭的T2处理及T3~T5各稀释处理的地上部鲜重较T1处理均显著增加,并且T5和T6处理的地上部鲜重与CK1、CK2处理无显著差异,即根系分泌物稀释到一定倍数后则可减弱自毒物质的抑制作用。同样,地上部干重也表现出相似的规律。

从地下部鲜重可以看出,T1处理的地下部鲜重比CK1处理降低了28.30%,差异显著;添加活性炭的T2处理相比T1处理的地下部鲜重提高了9.43%;T4、T5、T6处理的地下部鲜重分别比CK1处理显著增加了18.63%、23.04%和40.20%;T1处理的地下部干重显著低于CK1处理;T4、T5、T6处理的地下部干重也显著高于CK1处理。

此外,T1处理的株幅、最大叶宽和叶长也受到明显影响,分别较CK1处理显著降低了53.18%、24.65%和28.30%;添加活性炭的T2处理的株幅、最大叶宽和叶长分别较T1处理增加了25.40%、8.89%、8.24%;根系分泌物培养液稀释后各处理的株幅、最大叶宽和叶长较T1处理有明显改善,尤其是稀释5倍后,幼苗的最大叶宽和叶长与CK1处理无显著差异。

表1 根系分泌物对大白菜幼苗生长指标影响

Table 1 Influence of root exudates on growth indices of cabbage seedlings

处理 Treatment	地上部鲜重/(g·plant^{-1}) Shoot fresh weight	地上部干重/(g·plant^{-1}) Shoot dry weight	地下部鲜重/(g·plant^{-1}) Root fresh weight	地下部干重/(g·plant^{-1}) Root dry weight	株幅/cm Crown diameter	最大叶宽/cm Maximum blade width	最大叶长/cm Maximum blade length
CK1	2.216±0.138a	0.694±0.029a	0.204±0.008c	0.019±0.001cd	14.082±0.342a	4.121±0.177a	5.680±0.271a
CK2	2.162±0.130a	0.658±0.028ab	0.198±0.019cd	0.018±0.002cd	13.736±0.507a	4.083±0.146ab	5.610±0.275a
T1	1.199±0.083d	0.429±0.020f	0.159±0.007e	0.013±0.002e	9.193±0.459e	3.306±0.160d	4.427±0.208d
T2	1.690±0.036c	0.509±0.012e	0.174±0.010de	0.016±0.002d	11.528±0.144cd	3.600±0.200cd	4.792±0.161cd
T3	1.730±0.038c	0.528±0.032de	0.210±0.015c	0.020±0.001bc	11.147±0.268d	3.496±0.229cd	4.687±0.220cd
T4	1.931±0.021b	0.572±0.041cd	0.242±0.011b	0.022±0.001ab	11.765±0.022c	3.769±0.110bc	4.902±0.167c
T5	2.080±0.109ab	0.607±0.033bc	0.251±0.019b	0.023±0.003ab	12.100±0.069bc	3.794±0.104bc	5.078±0.056bc
T6	2.122±0.033a	0.625±0.037bc	0.286±0.016a	0.025±0.001a	12.437±0.110b	4.026±0.079ab	5.397±0.146ab

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicated significant differences among the treatments ($P<0.05$)

2.2 自毒作用对大白菜幼苗根系影响

如图1所示,T1处理的根系活力较CK1处理显著减少了40.16%。除根直径外,T1处理总根长和根表面积等根系指标较CK1处理显著减少了41.18%~57.75%;而T2处理与稀释后T3~T6各处理根系指标均显著高于T1处理,并随稀释倍数增加而升高,T4、T5和T6处理植株根系体积、根系分支数和根系交叉数均显著高于CK1处理。T6处理根长、表面积、分枝数、交叉数显著高于其它处理。

2.3 自毒作用对大白菜幼苗叶绿素含量影响

表2表明,T1处理的叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素以及叶绿素a+b含量分别较CK1处理显著降低了52.87%、42.13%、32.99%和49.89%;T2根系分泌物添加活性炭处理的幼苗叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素以及叶绿素a+b含量较T1处理有所升高,但无显著影响;随根系分泌物稀释倍数增加,叶绿素含量也在不断增加,当根系分泌物稀释5倍后,T6处理的叶绿素b以及叶绿素a+b含量与CK1处理无显著差异。

2.4 自毒作用对大白菜幼苗渗透调节物质和MDA含量影响

图2显示,T1处理的可溶性蛋白含量、可溶性糖含量与脯氨酸含量均显著高于CK1和CK2,T2添加活性炭处理与各稀释处理较T1处理均有下降;其中,T6处理稀释5倍与CK1处理无显著差

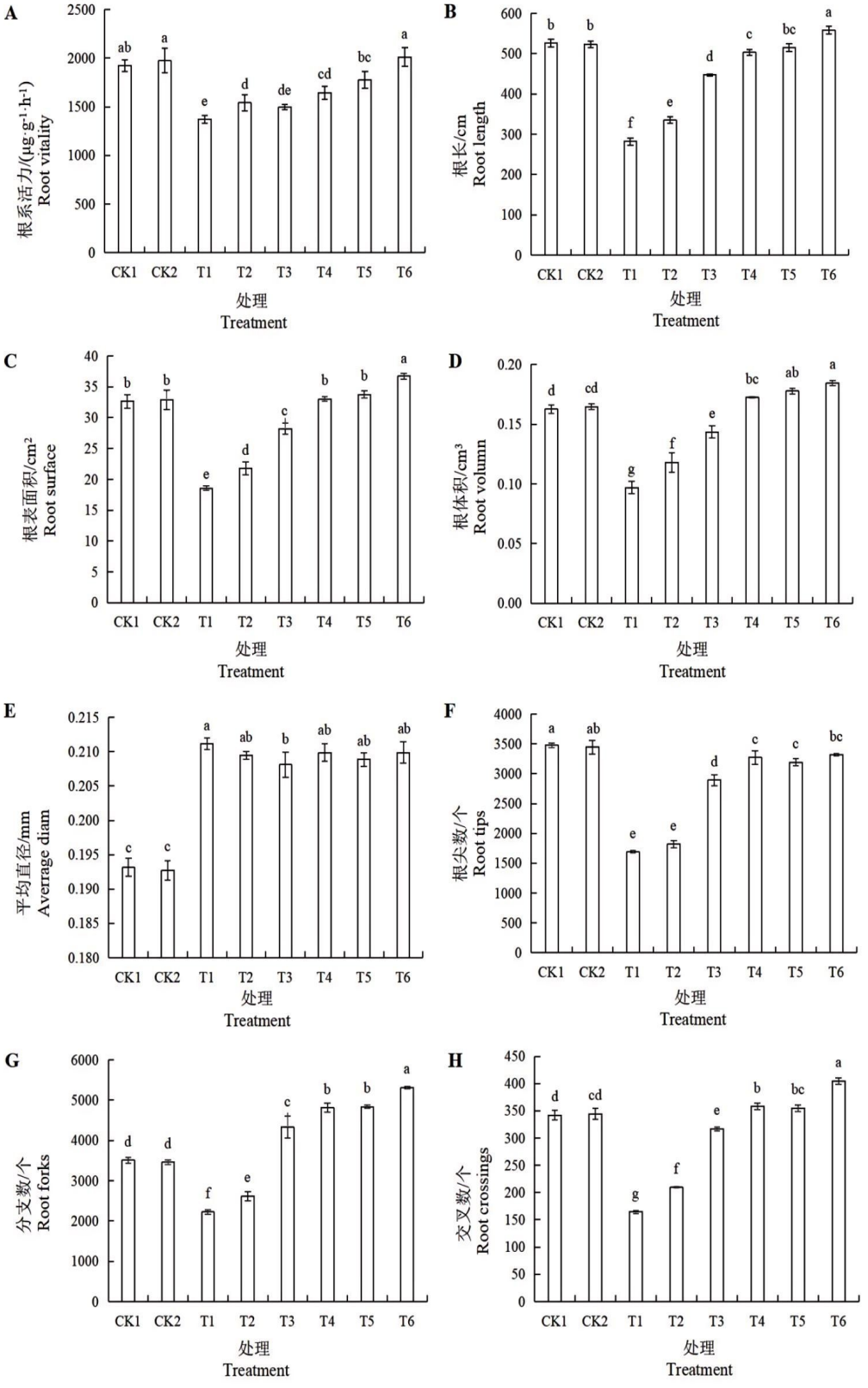


图1　根系分泌物对大白菜幼苗根系影响

Fig.1　Effects of root exudates on the seedling root systems

异。T1～T6各处理的MDA含量比CK1和CK2处理显著升高,以T1处理的MDA含量最高,为CK1处理的1.6倍;T2添加活性炭处理较T1处理显著降低了18.80%;培养液稀释不同倍数间

表2 根系分泌物对大白菜幼苗叶绿素含量的影响

Table 2 Effects of root secretion on chlorophyll content of cabbage seedlings

处理 Treatment	叶绿素a含量(mg•g^{-1}) Chlorophyll a content	叶绿素b含量(mg•g^{-1}) Chlorophy b content	类胡萝卜素含量(mg•g^{-1}) Carotenoid content	叶绿素a+b含量(mg•g^{-1}) Chlorophyll(a+b) content
CK1	1.489±0.077a	0.532±0.026ab	0.257±0.016a	2.022±0.102a
CK2	1.407±0.038ab	0.495±0.021b	0.257±0.010a	1.902±0.057bc
T1	0.974±0.046e	0.375±0.027d	0.194±0.008d	1.349±0.069f
T2	1.046±0.029e	0.411±0.030cd	0.202±0.012cd	1.457±0.026ef
T3	1.133±0.009d	0.437±0.029c	0.202±0.012cd	1.570±0.038e
T4	1.189±0.036cd	0.526±0.020ab	0.200±0.004cd	1.714±0.020d
T5	1.245±0.023c	0.545±0.036ab	0.213±0.006bc	1.790±0.017cd
T6	1.346±0.046b	0.564±0.034a	0.223±0.003b	1.910±0.078ab

注:各个处理的不同小写字母表示差异达到显著性水平($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicated significant differences among the treatment($P<0.05$)

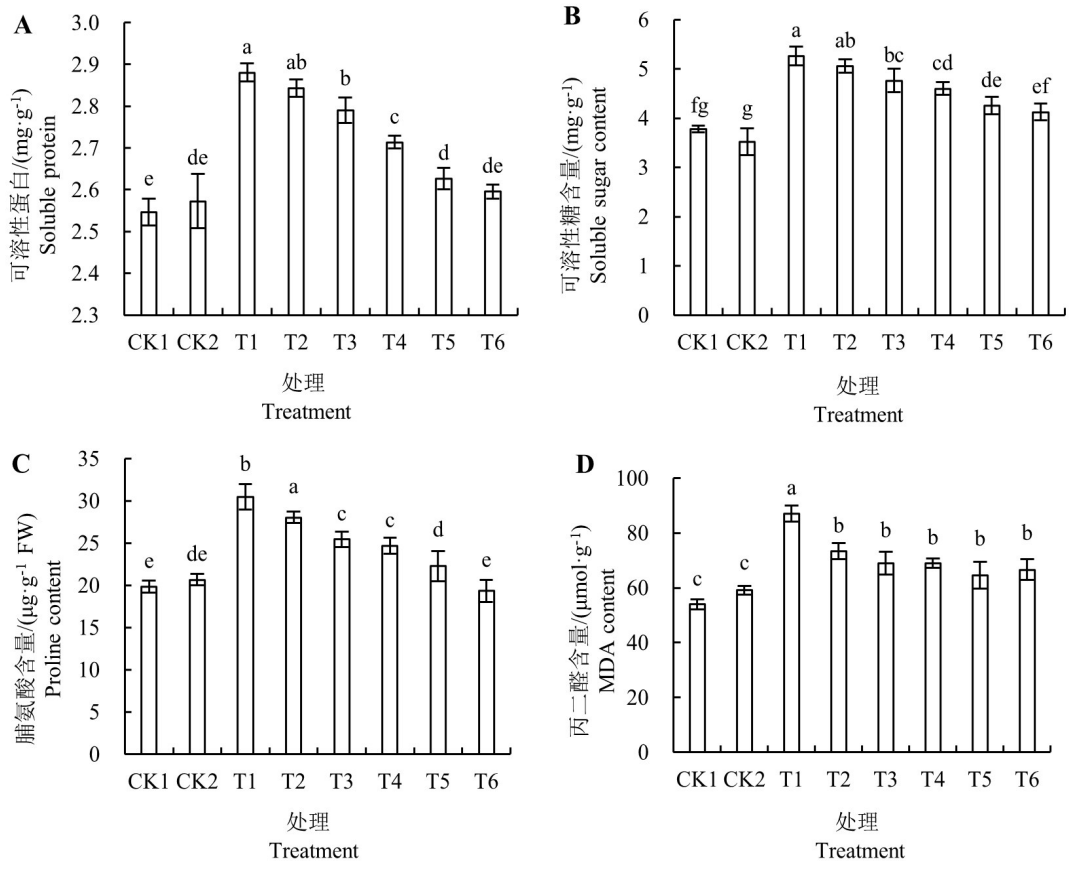


图2 根系分泌物对大白菜幼苗渗透调节物质和MDA含量影响

Fig.2 Effects of root secretions on osmoregulatory substances and MDA content in cabbage seedlings

MDA含量差异不显著,但均显著低于T1重茬液处理。

2.5 自毒作用对大白菜幼苗抗氧化酶活性影响

图3显示,T1~T6各处理酶活性均高于CK1和CK2处理,以T1处理最高,其中T1处理的SOD酶活性、POD酶活性、CAT酶活性较CK1处理分别显著升高了50.15%、50%、53.96%,T2添加活性炭处理较T1处理分别降低了5.90%、8.13%、9.11%;之后随着稀释倍数的增加而下降,均显著低于T1处理。其中T6根系分泌物稀释5倍后处理的各酶活性与CK1处理无显著差异。说明根系分泌物稀释后对植物的胁迫减小。

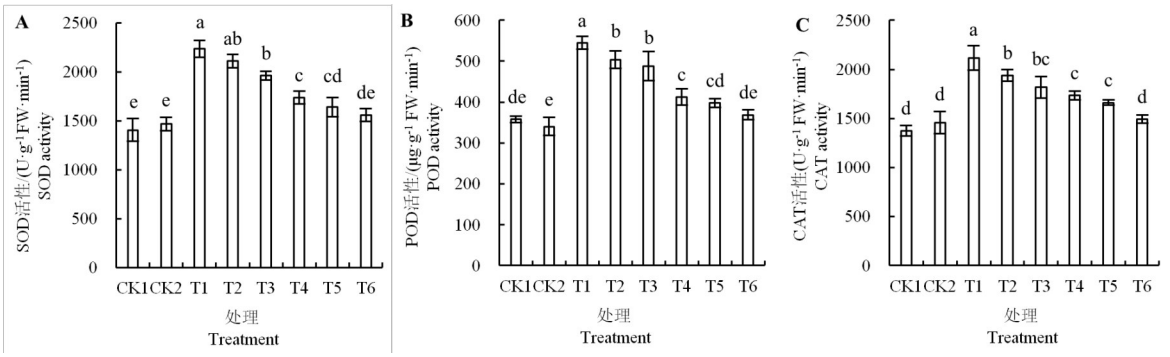


图3　根系分泌物对大白菜幼苗抗氧化酶活性影响

Fig.3　Effects of root secretions on antioxidant enzyme activities of cabbage seedlings

2.6　自毒作用对大白菜幼苗活性氧积累及质膜完整性影响

由图4可见,T1处理的大白菜幼苗叶片DAB染色程度较CK1和CK2处理棕褐色加深,NBT染色蓝紫色沉淀面积增大且叶片Evans blue染色的蓝色明显;而添加活性炭的T2处理会使叶片的染色程度减轻,随着稀释处理倍数的增加,叶片的染色程度也依次减轻。这说明T1处理使大白菜幼苗叶片的过氧化氢含量和超氧阴离子含量显著升高,并破坏了大白菜幼苗叶片的质膜完整性。

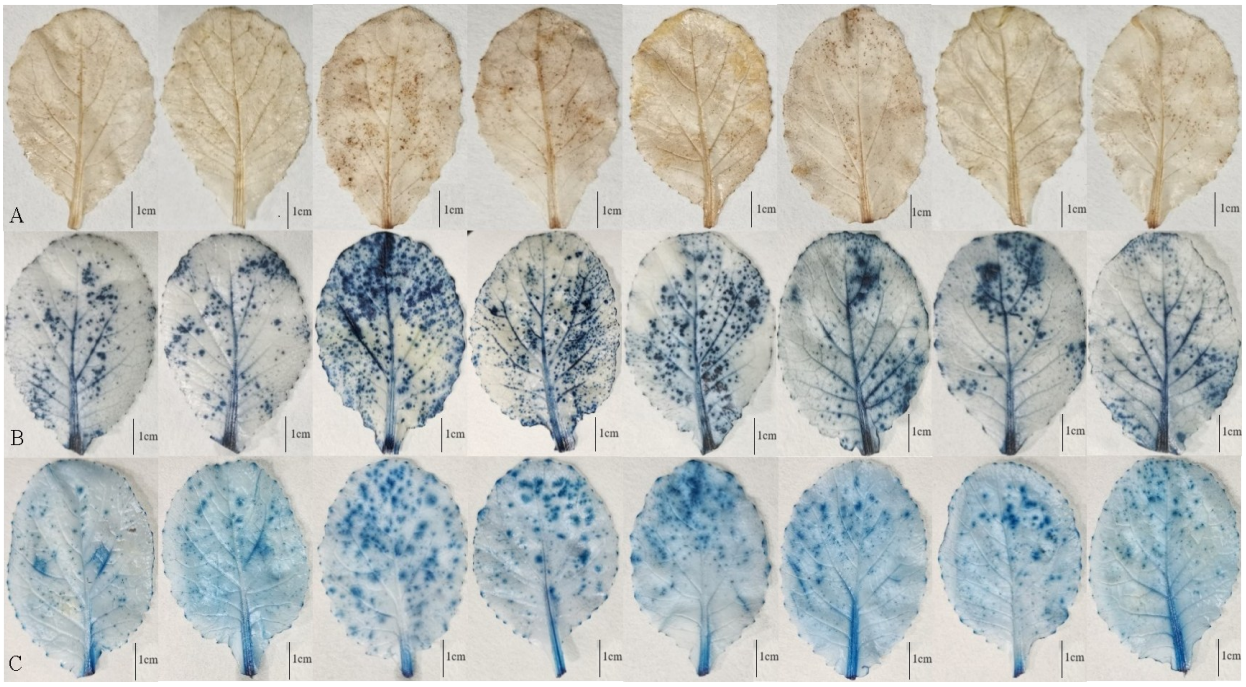
3　讨论

3.1　自毒作用对植株生长及根系影响

根系分泌物的自毒作用会阻碍种子萌发,减少植株的生物量。吴晓婷等[13]试验表明,100～1000 mg·L^{-1} 2,6-二叔丁基对甲酚与邻苯二甲酸二丁酯降低了烟草种子的发芽率以及幼苗鲜重,抑制苗高以及根的伸长。王璐等[14]报道称2 mL·株$^{-1}$大豆根系分泌物促进了小麦种子的萌发以及幼苗生长,而20 mL·株$^{-1}$的大豆根系分泌物则抑制了小麦种子萌发,这体现了根系分泌物的浓度效应。本研究表明,T1处理抑制了大白菜幼苗的生长,在添加活性炭后,缓解了自毒物质对幼苗的毒害作用,这与已报道的活性炭可缓解自毒作用的结果一致[15]。将根系分泌物稀释之后,大白菜根系分泌物的毒害作用也有所减弱,当稀释4倍以上,幼苗地下部鲜重显著高于CK1处理,这可能是由于较低浓度的根系分泌物对根系的发育有促进作用。陈君良[16]认为,较高浓度的兰州百合根系分泌物使得根系活力、总根长、根系表面积和根尖数等根系形态指标都有不同程度的下降。马文月[17]用龙牙百合根系分泌物中的N,N-二乙基-二甲基苯甲酰胺处理百合幼苗观察根尖细胞的超微结构,发现根尖细胞出现严重变形,细胞壁降解,最终使细胞变成空腔。此外,也有学者认为自毒物质会导致根尖细胞发生质壁分离[18-19]。本研究结果表明,T1处理的根系活力显著低于T2添加活性炭和CK1对照处理,这进一步证明了大白菜根系分泌物自毒效应;将培养液稀释后,抑制作用减轻,尤其当稀释5倍后,T6处理的幼苗根系活力显著高于CK1处理。T2添加活性炭和稀释后各个处理根系形态指标均高于T1处理,说明根系分泌物培养液稀释到一定倍数后可避免自毒物质抑制作用,较低浓度的根系分泌物对根系伤害较小,并且具有一定的生长刺激作用,也有可能是引起植株自身抗性的提高使得植物根系更能适应环境。

3.2　自毒作用对幼苗叶绿素含量及渗透调节物质影响

研究认为,自毒作用会影响蒸腾效率和导致气孔关闭,降低叶绿素含量[20-21]。齐永志等[22]和Wang等[23]认为自毒物质主要通过抑制PSII中的电子传递效率来影响碳同化和有机物积累。本研究发现T1处理的大白菜幼苗叶绿素含量显著低于CK1处理,这说明大白菜的根系分泌物会抑制叶绿素合成,从而影响植株光合同化能力,活性炭可吸附前茬大白菜根系分泌物中的部分自毒物质,使得叶绿素含量较T1处理有所升高。随着稀释倍数的增加,叶绿素含量也在不断增加。张磊等[24]报道称,低浓度的大蒜根系分泌物可增加当归叶片糖分积累,增强幼苗抗逆性,高浓度则抑制幼苗生长。郭伟等[25]认为,玉米、小麦、大豆以及芸豆的根系分泌物提高了芸豆幼苗渗透调节物质



A:DAB染色; B: NBT染色; C: Evans blue染色

A:DAB staining;B: NBTstaining; C: Evans bluestaining

图4 根系分泌物对大白菜幼苗活性氧积累及质膜完整性的影响

Fig.4 Effects of root secretions on reactive oxygen species accumulation and plasma membrane integrity in Chinese cabbage seedlings

的含量,可缓解根系分泌物对芸豆幼苗细胞膜的损伤。本研究中T1处理的MDA含量显著高于其它处理,同时,T1处理的3种渗透调节物质的含量达到峰值,而添加活性炭后渗透调节物质的含量有所减少,说明活性炭吸附了一些阻碍植物生长发育的有机物质,从而减轻了根系分泌物的自毒作用,这与李忠等[26]的研究结果一致,3种化感物质苯甲醛、对乙基苯甲酸及阿魏酸不同浓度处理均增加了SOD和POD活力及MDA含量,且都随着处理浓度的增加而增加。

3.3 自毒作用对幼苗抗氧化酶系统影响

许多研究表明,自毒作用存在着氧化胁迫[27],从而阻碍植物生长。Zhang等[28]研究认为,自毒作用使甜瓜幼苗根系积累了过量的活性氧,激活了大部分抗氧化酶。以上结果均表明抗氧化酶(SOD、POD和CAT)系统是一种有效的保护机制[29]。本研究的染色观察表明,T1处理破坏了大白菜幼苗的质膜完整性,增加了叶片的过氧化氢以及超氧阴离子积累,迫使大白菜幼苗产生氧化应激反应,激活防御系统。T1处理对大白菜幼苗的伤害最大,致使幼苗体内保护酶活性提高以清除过多的超氧阴离子和抑制过氧化氢积累。根系分泌物添加活性炭以及稀释之后的叶片过氧化氢含量与超氧阴离子含量也有明显降低,根系分泌物对叶片质膜完整性的破坏减轻。

4 结论

综上所述,大白菜根系分泌物降低幼苗的根系活力,损伤了根系结构;叶绿素含量减少,MDA含量增加,过氧化氢和超氧阴离子的积累增加,并对叶片质膜完整性造成破坏,从而影响大白菜幼苗的生长发育,对幼苗存在自毒作用,而添加生物活性炭和稀释后的重茬液在一定程度上可以缓解大白菜根系分泌物对幼苗的自毒作用产生的影响。本研究从生理水平揭示了大白菜根系分泌物影响幼苗生长的作用机制,为解决生产实践中根系分泌物导致的自毒作用问题提供理论依据。

参 考 文 献

[1]张凤兰, 于拴仓, 余阳俊, 等. “十三五”我国大白菜遗传育种研究进展[J]. 中国蔬菜, 2021(1): 22-32.
Zhang F L, Yu S C, Yu Y J, et al. Research progress on Chinese cabbage genetic breeding during ‘the thirteenth five-year plan’ in China[J]. China Vegetables, 2021(1): 22-32.

[2]卢维宏, 张乃明, 包立, 等. 我国设施栽培连作障碍特征与成

因及防治措施的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(4):651－658.
Lu W H, Zhang N M, Bao L, et al. Study advances on characteristics, causes and control measures of continuous cropping obstacles of facility cultivation in China [J]. Soils, 2020, 52(4):651－658.

[3]Wang T, Yang K X, Ma Q Y, et al. Rhizosphere microbial community diversity and function analysis of cut *Chrysanthemum* during continuous monocropping [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 801546.

[4]李大伟, 贾庆利, 巩振辉. 植物化感作用在蔬菜作物上的表现及其应用[J]. 陕西农业科学, 2004(4): 40-42.
Li D W, Jia Q L, Gong Z H. Manifestation and application of allelopathy in vegetable crops [J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2004(4): 40-42.

[5]贾倩. 蔬菜类作物根系分泌物化感作用研究初探[J]. 蔬菜, 2018(7): 21-23.
Jia Q. Research exploration in allelopathy of vegetable root exudates[J]. Vegetables, 2018(7): 21-23.

[6]王光飞, 高晓东, 马艳, 等. 生物有机类复合调理剂在设施叶菜障碍土壤上的应用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2020(2): 56-65.
Wang G F, Gao X D, Ma Y, et al. Amendment effect of bio-organic soil conditioner on leafy vegetable greenhouse soil with continuous cropping obstacle[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(2): 56-65.

[7]刘娟, 张俊, 臧秀旺, 等. 花生连作障碍与根系分泌物自毒作用的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(30): 101-105.
Liu J, Zhang J, Zang X W, et al. Research advances in continuous cropping obstacles and root exudates autotoxicity of peanut [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(30): 101-105.

[8]陈芸,鲍丽芹,王继莲.4种化感物质对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2014, 33(7): 10-14.
Chen Y, Bao L Q, Wang J L. Effects of allelochemicals on seed germination and seedling growth of maize[J]. Seed, 2014, 33(7): 10-14.

[9]高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[10]Jacyn Baker C, Mock N M. An improved method for monitoring cell death in cell suspension and leaf disc assays using Evans blue[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 1994, 39(1): 7-12.

[11]Xu J, Zhu Y Y, Ge Q, et al. Comparative physiological responses of *Solanum nigrum* and *Solanum torvum* to cadmium stress[J]. The New Phytologist, 2012, 196(1): 125-138.

[12]Fryer M J, Oxborough K, Mullineaux P M, et al. Imaging of photo-oxidative stress responses in leaves [J]. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(372): 1249-1254.

[13]吴晓婷, 常悦, 赖荣泉, 等. 大蒜根系分泌物分离、鉴定及其对烤烟的化感作用[J]. 武夷科学, 2019, 35(1): 21-28.
Wu X T, Chang Y, Lai R Q, et al. Isolation and identification of the main components of garlic root exudates and its their allelopathic effects on flue-cured tobacco [J]. Wuyi Science Journal, 2019, 35(1): 21-28.

[14]王璐, 陈明霞, 邵云, 等. 作物根系分泌物对小麦种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 河南农业科学, 2019, 48(1): 66-71.
Wang L, Chen M X, Shao Y, et al. Effects of root exudates of crops on wheat seed germination and seedling growth [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2019, 48(1): 66-71.

[15]阮弈平. 蔬菜连作障碍中自毒作用及其缓解措施研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
Ruan Y P. Study on autotoxicity in vegetable continuous cropping obstacle and its mitigation measures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[16]陈君良. 兰州百合根系分泌物自毒作用的研究及化感物质的GC-MS分析[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
Chen J L. Study on autotoxicity of lily root exudates in Lanzhou and GC-MS analysis of allelochemicals [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.

[17]马文月. 龙牙百合化感自毒物质的分离与鉴定[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2019.
Ma W Y. Isolation and identification of allelopathic autotoxic substances from *Lilium* longiflorum [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019.

[18]许彦国, 张潇丹, 钏有聪, 等. 三七自毒物质的鉴定及自毒机制研究[C]. 中国植物病理学会2015年学术年会论文集, 2015, 594.
Xu Y G, Zhang X D, Chuan Y C, et al. Yang M. Identification of self toxic substances in Panax notoginseng and study of self toxic mechanisms[C]. Proceedings of the 2015 Academic Annual Conference of the Chinese Society of Plant Pathology, 2015, 594.

[19]陈绍莉, 周宝利, 李夏, 等. 嫁接对自毒物质胁迫下茄子根系质膜、液泡膜酶及氧化还原系统的影响[C]. 中国第四届植物化感作用学术研讨会论文摘要集, 2009, 13.
Chen S L, Zhou B L, Li X, et al. The effects of grafting on the plasma membrane, vacuolar membrane enzymes, and redox system of eggplant roots under self toxic substance stress [C]. The 4th Academic Symposium on Plant Allelopathy in China, 2009, 13.

[20]吴秀华, 李羿桥, 胡庭兴, 等. 巨桉凋落叶分解初期对菊苣生长和光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1817-1825.
Wu X H, Li Y Q, Hu T X, et al. Effects of *Eucalyptus grandis* leaf litter at its early stage of decomposition on the growth and photosynthetic characteristics of *Cichorium intybus* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 1817-1825.

[21]姚丹丹, 王婧怡,周倩, 等. 香豆素对多花黑麦草种子萌发和幼苗生长化感作用的机理研究[J]. 草业学报, 2017, 26(2): 136-145.
Yao D D, Wang J Y, Zhou Q, et al. Effect of coumarin on Italian ryegrass seed germination and seedling growth[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(2): 136-145.

[22]齐永志, 甄文超. 对羟基苯甲酸胁迫对不同草莓品种光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(6):

1157-1166.
Qi Y Z, Zhen W C. Impacts of 4-hydroxybenzoic acid on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of different strawberry cultivars[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2016, 43(6): 1157-1166.
[23]Wang C M, Chen H T, Li T C, et al. The role of pentacyclic triterpenoids in the allelopathic effects of *Alstonia scholaris*[J]. Journal of Chemical Ecology, 2014, 40(1): 90-98.
[24]张磊, 邱黛玉, 魏鹏, 等. 大蒜根系分泌物不同极性成分对当归发芽及幼苗的影响[J]. 中国现代中药, 2015, 17(8): 815-820.
Zhang L, Qiu D Y, Wei P, et al. Effect of different polarity composition of garlic root exudates on *Angelica sinensis* germination and seedlings[J]. Modern Chinese Medicine, 2015, 17(8): 815-820.
[25]郭伟, 马倩, 于立河. 不同作物根系分泌物对芸豆碳氮代谢及抗氧化酶活性的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2018, 30(4): 6-11.
Guo W, Ma Q, Yu L H. Effect of root exudates from various crops on carbon-nitrogen metabolism and antioxidant enzyme activities of kidney bean[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2018, 30(4): 6-11.
[26]李忠, 江立庚, 唐荣华, 等. 花生根系分泌物的鉴定和化感作用研究[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(5): 48-53.
Li Z, Jiang L G, Tang R H, et al. Identification and allelopathy of chemical compositions of peanut root exudates[J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(5): 48-53.
[27]Sunaina, Singh N B. Alleviation of allelopathic stress of benzoic acid by indole acetic acid in *Solanum lycopersicum*[J]. Scientia Horticulturae, 2015, 192:211-217.
[28]Zhang Z Z, Zhang Z D, Han X Y, et al. Specific response mechanism to autotoxicity in melon (*Cucumis melo* L.) root revealed by physiological analyses combined with transcriptome profiling[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 200: 110779.
[29]齐永志, 孙雅如, 王冰, 等. 草莓根系分泌物和腐解物化感作用研究进展[J]. 园艺学报, 2021, 48(4): 778-790.
Qi Y Z, Sun Y R, Wang B, et al. Research progress on allelopathy of root exudates and decompositions of strawberry[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(4): 778-790.

A study on the autotoxicity of root exudates of chinese cabbage on seedlings

Yang Xinlei, Liu Xiaole, Lu Rong, Hui Maixia*
(*College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100, China*)

Abstract: [Objective] Continuous cropping obstacles are one of the main factors limiting the production of cruciferous vegetables. This study investigated how the root exudates of Chinese cabbage affected its own seedling growth, providing both practical and theoretical basis for addressing continuous cropping issues and understanding autotoxicity in Chinese cabbage. [Method] The Chinese cabbage variety 'Jin qi lin' was used as the experimental material and the experiment was conducted hydroponically indoors. A total of eight treatment groups were set up: CK1(1/2 Hoagland nutrient solution), CK2(1/2 Hoagland nutrient solution+activated carbon), T1(root exudates collection solution), T2(root exudates + activated carbon), T3(root exudates diluted twice), T4(root exudates diluted three times), T5(root exudates diluted four times), and T6 (root exudates diluted five times). The study analyzed how different dilution ratios of root exudates affected the growth characteristics, physiological and biochemical indicators, and leaf plasma membrane of Chinese cabbage seedlings. The mechanisms of autotoxicity caused by of root exudates in Chinese cabbage were studied. [Results] Compared to the diluted treatments, the T1 treatment led to a significant reduction in seedling biomass. Compared to CK1, T1 treatment reduced the fresh weight of the shoots by 84.82% and root vitality by 40.16%, causing structural damage to the roots. Additionally, chlorophyll content decreased by over 32%, while MDA levels, hydrogen peroxide, and superoxide anion accumulation increased, compromising leaf membrane integrity. However, compared to T1, the addition of activated carbon(T2)and the dilution of root exudates(T3~T6)alleviated the damage to seedlings. Moreover, cabbage seedlings mitigated autotoxic damage by increasing the content of osmoregulatory substances and the activity of antioxidant enzymes. [Conclusion] The root exudates of Chinese cabbage exhibit autotoxic effects that inhibit seedling growth. However, adding bioactive carbon and diluting the root exudate solution can partially alleviate the autotoxic effects.

Keywords: Chinese cabbage, Root exudates, Autotoxic effects, Physiology and Biochemistry

(编辑:郭玥微)