邻苯二甲酸与对羟基苯甲酸对燕麦幼苗生长及抗氧化特性的影响

郭伟*, 薛盈文, 于崧, 孙海燕

黑龙江八一农垦大学农学院/黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室, 黑龙江大庆163319

摘要: 为明确玉米秸秆腐解的化感物质对燕麦种子萌发及幼苗生长的影响, 分别采用0.2、0.4、0.6、0.8和1.0 mmol·L^{-1}的邻苯二甲酸(PA)和对羟基苯甲酸(*p*-HBA)胁迫处理燕麦种属裸燕麦(*Avena nuda*)品种'白燕2号'的种子, 测定根系鲜重、幼芽鲜重、根长、超氧阴离子自由基(ROS)含量和丙二醛(MDA)含量, 以及抗氧化系统活性。结果表明: 随着化感物质PA和*p*-HBA处理浓度的增加, 燕麦根系和幼芽的ROS含量逐渐增加, 诱导超氧化物歧化酶(SOD)活性逐渐增强; 而过氧化氢酶(CAT)活性的变化受PA和*p*-HBA浓度影响较为复杂; 同时, ROS积累导致了过氧化物酶(POD)活性的提高。PA和*p*-HBA作用导致了燕麦幼苗的膜脂过氧化, 处理浓度>0.6 mmol·L^{-1}幼芽的MDA含量显著增加; 根长显著降低, 根冠比达到最低值。PA和*p*-HBA对根系的抑制程度大于幼芽, 且PA的抑制作用大于*p*-HBA, 根系损伤是两种物质对燕麦化感效应的直接体现。

关键词: 玉米秸秆; 燕麦; 萌发; 化感作用; 邻苯二甲酸; 对羟基苯甲酸

化感作用(allelopathy)是指植物分泌的次生代谢产物或向土壤和环境中释放的分解产物, 对另一种或多种植物造成的影响, 广泛存在于农业生态系统之中(Aslam等2017)。由植物毒素抑制而导致的抗氧化酶系活性降低、细胞完整性破坏而引起的作物连作障碍就是典型的化感作用(Zhang等2015), 尽管轮作可以在一定程度上消除连作障碍, 但前茬作物的根系分泌物或秸秆腐解产物还是有可能对后茬作物造成不利影响(Dhima等2012; Tian等2015)。玉米(*Zea mays*)是中国播种面积最大的旱田作物, 尤其是东北地区, 玉米面积超过全国的30%, 每年有大量的玉米秸秆被粉碎还田(吕开宇等2013)。研究认为, 玉米秸秆还田可以提高土壤肥力和固碳量(Zhu等2017), 提高土壤水分利用效率(Yin等2015), 改善土壤物理特性(慕平等2012), 抑制病原菌生长(郭晓源等2016), 从而提高作物产量。但也有研究认为, 秸秆还田在土壤中腐解产生多种化感物质(杨思存等2005), 这些化感物质引起微生物种群结构失衡及土壤酶活性降低(陈慧等2007), 抑制了其他作物的种子萌发和幼苗生长(耿广东等2008; 杨梅等2011; 李晶等2015)。酚酸类物质作为最重要的玉米秸秆腐解产物(李晶等2015; 郭晓源等2016), 降低了植物叶片水势、气孔导度和光合速率(Booker等1992; Siddiqui 2007; Materska等2003), 其中, 邻苯二甲酸(phthalic acid, PA)和对羟基苯甲酸(*p*-hydroxybenzoic acid, *p*-HBA)就是玉米秸秆腐解后产生的两种典型的化感物质(梁春启等2009; 李晶等2015; 郭晓源等2016)。PA对萝卜(*Raphanus sativus*)萌发及幼苗生长的化感效应表现为"低促高抑" (李轶修等2009; 杨延杰等2013), PA浓度与生菜(*Lactuca sativa*)叶片谷胱甘肽的含量高度相关(孙海燕和王炎2012), 浓度大于0.1 mmol·L^{-1}会降低植物的抗氧化酶活性, 引起细胞膜损伤(耿广东等2008)。*p*-HBA是引起黄瓜(*Cucumis sativus*)自毒效应较大的物质之一(王文等2010), 随着*p*-HBA浓度的升高, 黄瓜种子胚根伸长的抑制作用明显增加(孙莎莎等2016)。*p*-HBA通过影响对羟基苯甲醛脱氢酶活性, 而影响 NAD$^+$合成(Sircar等2011), 降低光合系统II的光量子产量, 1.5 mmol·L^{-1}浓度的*p*-HBA处理下鸭茅(*Dactylis glomerata*)光化学猝灭和非光化学猝灭同时降低, 叶片含水量和渗透势显著降低, 根系生长和物质积累受阻(Hussain等2015)。另外, *p*-HBA还会抑制黄瓜种子萌发过程中胚乳淀粉的分解(孙莎莎等2016), 提高根际土壤脱氢酶活性, 改变根际微生物群落, 从而抑制黄瓜幼苗的生长(Zhou等2012)。目前, 关于化感物质PA和*p*-HBA的研究主要集中在生菜、黄瓜等模式植物或蔬菜上, 对于大田作物, 尤其是我国北方玉米-小麦/大豆/经济作物等轮作制度下玉米下茬主栽作物的影响研究较少。本研究以北方重要粮饲兼用型经济作物燕麦为受体, 分析了玉米秸秆腐解

收稿 2017-06-19 修定 2017-09-08

资助 国家重点研发项目(2017YFD0300502)、黑龙江农垦总局计划项目(HNK135-07-03)和黑龙江八一农垦大学博士启动项目(XDB2015-24)。

* 通讯作者(E-mail: agrigw@163.com)。

的化感物质PA和*p*-HBA对燕麦种子萌发及幼苗生长的影响, 对其化感机制进行探讨, 以期为玉米生产中秸秆还田技术应用提供参考。

材料与方法

1 试验材料与设计

将AR级别纯度的化学试剂PA和*p*-HBA用少量乙醇溶解后, 用蒸馏水分别配成0.2、0.4、0.6、0.8和1.0 mmol·L^{-1}的标准溶液。

将燕麦属(*Avena* L.)裸燕麦(*Avena nuda*)品种‘白燕2号’的种子, 用10% (*V*/*V*)的双氧水溶液漂洗30 min, 再用蒸馏水反复冲洗5次, 然后将种子均匀放在铺有2层滤纸的发芽盒中, 每盒150粒, 每盒分别用处理溶液25 mL浸润滤纸(等量蒸馏水为对照), 3次重复。处理后的发芽盒在光照培养箱中培养, 每天恒重补水。

培养7 d后每个处理选择生长整齐一致的幼苗30株测定根长、根鲜重、幼芽鲜重, 以及丙二醛(malonaldehyde, MDA)、超氧阴离子自由基(reactive oxygen species, ROS)含量, 超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)活性。

2 测定方法

在室温21~23°C条件下, 采用高俊凤(2006)方法测定ROS、MDA含量, 以及SOD、CAT、POD活性。

根冠比=根系鲜重/幼芽鲜重。

3 数据处理与统计分析

所有的数据采用Excel 2007进行方差分析, 结果以3次测量的算术平均值表示, Duncan’s多组样本间差异显著性分析(P<0.05); 图表采用Excel 2007绘制。

实验结果

1 化感物质对燕麦幼苗生长的影响

由图1和2可知, 化感物质PA作用下燕麦种子萌发后幼芽和根系的生长受到不同程度的抑制, 随着PA浓度的增加抑制程度逐渐增强, 尤其是PA浓度在0.6 mmol·L^{-1}时根系鲜重达到最低值, 而幼芽鲜重在0.8 mmol·L^{-1}时达到最低值, 可见, 与幼芽比较, 根系生长对PA更敏感。

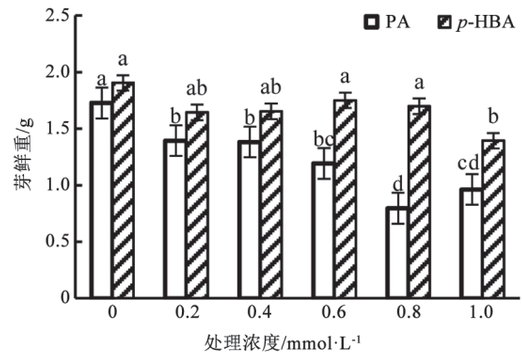

图1 化感物质对幼芽鲜重的影响

Fig.1 Effects of allelochemicals on fresh weight of shoots

图中不同的小写字母表示在P<0.05水平, 同种化感物质不同处理浓度数据间有显著差异, 下图同此。

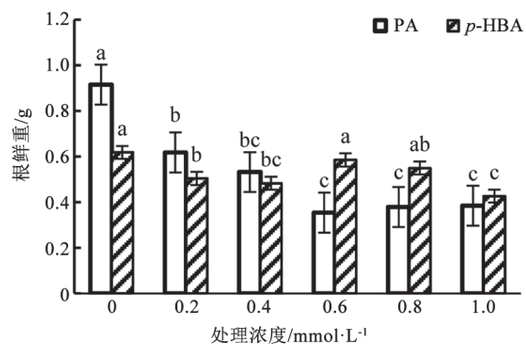

图2 化感物质对根系鲜重的影响

Fig.2 Effects of allelochemicals on fresh weight of roots

化感物质*p*-HBA作用下幼芽鲜重在1.0 mmol·L^{-1}处理时显著低于对照, 而根系鲜重在0.2和0.4 mmol·L^{-1}时即显著低于对照, 而浓度增加到0.6和0.8 mmol·L^{-1}时显著高于0.4 mmol·L^{-1}处理, 浓度>0.8 mmol·L^{-1}时又显著降低(图1和2)。根系生长对*p*-HBA反应较幼芽更敏感, 与PA处理相似。

由图3可知, 随着PA浓度的增加燕麦幼苗的根冠比先降低后增加, 0.6 mmol·L^{-1}处理根冠比最低, 大于0.6 mmol·L^{-1}显著增加; *p*-HBA各浓度处理的根冠比无显著差异。结合图1化感物质对幼芽和根系鲜重的影响分析可知, 化感物质对两者均有抑制, 但对根系的抑制程度大于幼芽; 且PA抑制强度大于*p*-HBA。

随着化感物质PA与*p*-HBA浓度的增加根长先降低再增加(图4), 0.6 mmol·L^{-1}处理的根长最短, 分

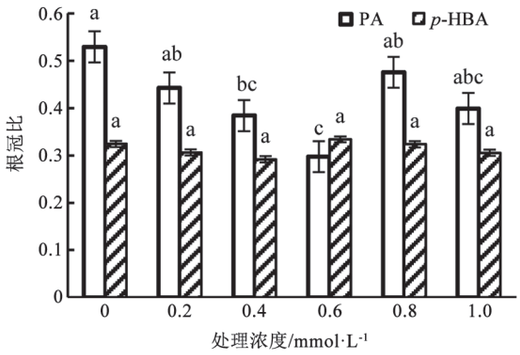

图3 化感物质对根冠比的影响

Fig.3 Effects of allelochemicals on roots/shoots ratio

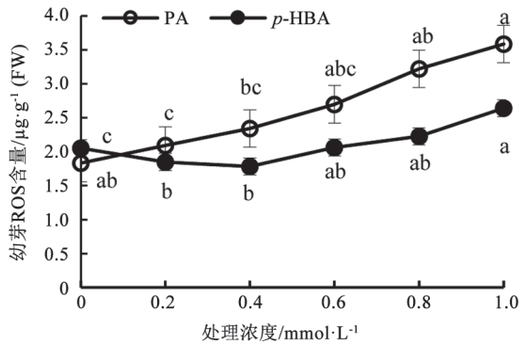

图5 化感物质对幼芽超氧阴离子自由基含量的影响

Fig.5 Effects of allelochemicals on ROS content in shoots

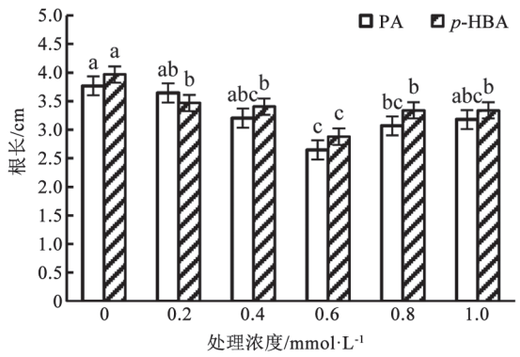

图4 化感物质对根长的影响

Fig.4 Effects of allelochemicals on roots length

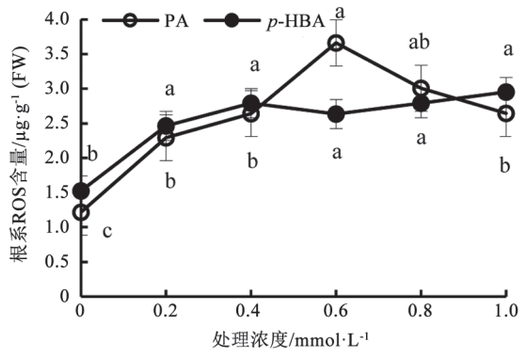

图6 化感物质对根系超氧阴离子自由基含量的影响

Fig.6 Effects of allelochemicals on ROS content in roots

别显著低于对照29.8%和23.6%。结合图2化感物质对根系鲜重的影响分析, *p*-HBA处理的根系鲜重最低值为1.0 mmol·L^{-1}处理, 根长最短的是0.6 mmol·L^{-1}处理; PA处理的根系鲜重与根长变化趋势一致, 但相比对照0.2和0.4 mmol·L^{-1}处理的根系鲜重显著降低, 根长下降幅度并不显著。可见, 减少根系物质积累而促进根系伸长是减缓化感物质对根系生长抑制的重要表现。

2 化感物质对燕麦幼苗抗氧化系统的影响

化感物质PA和*p*-HBA处理造成燕麦根系ROS含量的显著增加(图6)。随着化感物质PA浓度的增加根系中ROS含量呈单峰曲线, 峰值处理为0.6 mmol·L^{-1}; 而*p*-HBA处理的ROS含量呈增加-降低-增加的趋势, 拐点浓度分别为0.4和0.6 mmol·L^{-1}。

幼芽ROS含量随化感物质PA浓度的增加逐渐增加(图5), 尤其浓度>0.8 mmol·L^{-1}较对照显著增加了75.6%和95.5%; 随*p*-HBA浓度的增加ROS含量先降低再增加, 最低值为0.4 mmol·L^{-1}处理, 但各处理与对照间差异不显著。

对照的幼芽ROS含量大于根系; 而化感物质*p*-HBA及PA处理浓度在0.2~0.6 mmol·L^{-1}处理的幼芽ROS含量均小于根系; PA浓度>0.8 mmol·L^{-1}时, 幼芽ROS含量大于根系。化感物质处理的根系与幼芽的ROS含量比均大于对照(见图7), 随着处理浓度的增加根系与幼芽的ROS含量比呈单峰曲线, PA处理的峰值含量为0.6 mmol·L^{-1} (达到1.36), 而*p*-HBA处理为0.4 mmol·L^{-1} (达到1.74)。可见, 根系ROS积累是燕麦对化感物质响应的最直接表现, 而修复根系的ROS损伤是燕麦幼苗响应化感作用的一种重要机制。

由表1可知, 随着化感物质PA浓度的增加根系和幼芽SOD酶活性逐渐增加, 浓度分别超过0.6和0.8 mmol·L^{-1}时SOD酶活性又降低, 峰值酶活性较对照分别增加了3.6倍和1.9倍; 随着化感物质

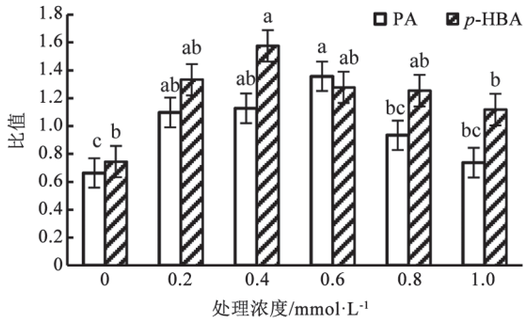

图7 根系和幼芽超氧阴离子自由基含量的比值

Fig.7 Ratio of ROS content between roots and shoots

p-HBA浓度的增加, 幼芽SOD酶活性逐渐降低, 但处理间差异不显著; 而根系SOD酶活性逐渐增加, 但仅有1 mmol·L^{-1}处理显著高于对照3.7倍; PA和*p*-HBA处理的根系SOD酶活性显著高于幼芽2.0~3.8倍和1.7~6.9倍。

随着化感物质PA和*p*-HBA浓度的增加根系和幼芽CAT酶活性高低波动(见表1), 其中PA处理下根系CAT活性随着浓度增加而降低-升高-降低-升高, 最高值较对照提高了127.7%; 幼芽CAT活性的变化与根系CAT活性变化相反; *p*-HBA处理的根系和幼芽CAT酶活性与PA处理相反, 处理的根系酶活性最大值较对照提高了66.0%, 而幼芽的处理间酶活性差异不显著。

表1 化感物质对根系和幼芽抗氧化酶系活性的影响

Table 1 Effects of allelochemicals on activities of anti-oxidative enzymes in roots and shoots

化感物质	处理浓度/mmol·L^{-1}	SOD活性/U·g^{-1} (FW)·min^{-1}		CAT活性/U·g^{-1} (FW)·min^{-1}		POD活性/U·g^{-1} (FW)·min^{-1}	
		根系	幼芽	根系	幼芽	根系	幼芽
PA	0	0.19^{b}	0.14^{b}	3.55^{b}	3.50^{a}	11.38^{b}	44.99^{a}
	0.2	0.40^{ab}	0.18^{b}	3.25^{b}	3.77^{a}	12.27^{b}	40.70^{a}
	0.4	0.51^{ab}	0.20^{b}	3.86^{b}	3.48^{a}	16.04^{a}	47.65^{a}
	0.6	0.86^{a}	0.23^{b}	8.08^{a}	2.50^{a}	16.77^{a}	49.27^{a}
	0.8	0.80^{a}	0.41^{a}	5.23^{ab}	2.85^{a}	17.28^{a}	58.05^{a}
	1.0	0.54^{ab}	0.27^{b}	5.55^{ab}	2.46^{a}	16.92^{a}	54.23^{a}
p-HBA	0	0.07^{b}	0.08^{a}	4.03^{ab}	3.55^{a}	12.47^{b}	40.09^{b}
	0.2	0.16^{ab}	0.10^{a}	6.01^{a}	3.08^{a}	14.39^{ab}	41.82^{b}
	0.4	0.18^{ab}	0.07^{a}	4.83^{ab}	4.62^{a}	15.83^{ab}	42.19^{b}
	0.6	0.19^{ab}	0.06^{a}	3.61^{b}	5.15^{a}	16.44^{ab}	42.75^{b}
	0.8	0.20^{ab}	0.06^{a}	6.69^{ab}	3.37^{a}	18.84^{a}	46.03^{b}
	1.0	0.32^{a}	0.05^{a}	3.83^{ab}	6.16^{a}	18.77^{a}	54.74^{a}

表中不同的小写字母表示对同一取材部位的生理指标在P<0.05统计水平, 同种化感物质不同处理浓度数据间有显著差异。

随着化感物质PA和*p*-HBA浓度的增加根系和幼芽POD酶活性(表1)逐渐增加, PA处理的根系POD酶活性逐渐提高了40.9%~51.8%; 幼芽POD酶活性增加了5.9%~29.0%, 但处理间差异不显著。随*p*-HBA浓度的增加根系和幼芽POD酶活性逐渐增加了15.4%~51.1%和4.3%~36.6%。PA和*p*-HBA各浓度处理的幼芽POD酶活性分别是根系酶活性的2.94~3.36倍和2.44~2.92倍。

由图9可知, 化感物质*p*-HBA浓度达到1 mmol·L^{-1}时燕麦根系中MDA含量显著提高, 0~0.8 mmol·L^{-1}范围内各处理间无显著差异; 而PA处理根系的MDA含量随其浓度的增加逐渐提高, 浓度>0.4 mmol·L^{-1}后MDA含量显著提高了218.3%~336.2%, 且显著高于*p*-HBA各相应浓度处理。随着化感物质浓度的增加, 幼芽MDA含量显著增加, 尤其浓度>0.6 mmol·L^{-1}后PA和*p*-HBA分别增加了143.9%~252.9%和105.8%~325.6% (图8)。

由幼苗生长指标与幼芽、根系的抗氧化特性指标间的相关分析可知(表2), 根长与根系的ROS含量、SOD活性、CAT活性、POD活性及MDA含量均显著负相关, 根鲜重与根系的ROS含量、SOD活性、MDA含量, 以及幼芽的ROS含量、SOD活性、POD活性及MDA含量均显著负相关, 可见根系的生长受到化感物质的直接抑制, 而根系物质积累同时受到幼苗生长受损的间接抑制。化感物质浓度的增加是造成燕麦幼苗ROS积累和质膜损

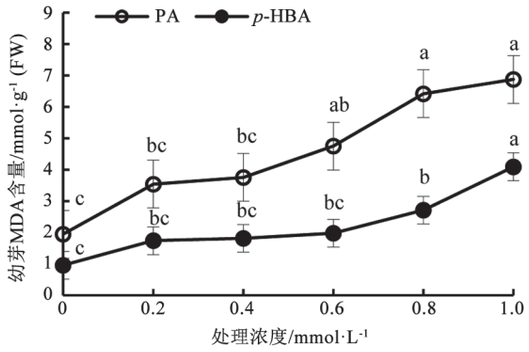

图8 化感物质对幼芽丙二醛含量的影响

Fig.8 Effects of allelochemicals on MDA content in shoots

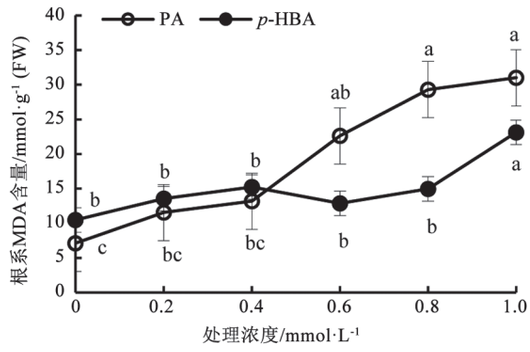

图9 化感物质对根系丙二醛含量的影响

Fig.9 Effects of allelochemicals on MDA content in roots

表2 燕麦幼苗生长与抗氧化特性的相关分析

Table 2 Analysis of correlation coefficient between growth of oat and antioxidant activity

抗氧化特性测定指标	ROS含量		SOD活性		CAT活性		POD活性		MDA含量	
	根系	幼芽	根系	幼芽	根系	幼芽	根系	幼芽	根系	幼芽
化感物质浓度	0.62*	0.75*	0.46	0.23	0.34	0.13	0.91*	0.71*	0.83*	0.71*
根长	–0.69*	–0.49	–0.68*	–0.35	–0.52*	0.10	–0.68*	–0.49	–0.57*	–0.54*
根鲜重	–0.55*	–0.90*	–0.88*	–0.89*	–0.29	0.43	–0.37	–0.74*	–0.87*	–0.96*
幼芽鲜重	–0.91*	–0.61*	–0.66*	–0.39	–0.54*	0.08	–0.77*	–0.58*	–0.79*	–0.70*

*为显著水平(P<0.05)。

伤的直接原因(化感物质浓度与根系和幼芽的ROS含量、MDA含量显著正相关), 同时, 也是POD活性增加的主要诱导因素。

讨 论

目前, 关于植物的化感物质形成以及化感作用机理研究还存在很大争议, 研究认为化感物质对其他植物的影响存在着浓度和他感的双重效应(张凤娟等2008; Wu等2009)。玉米秸秆腐解液对单子叶作物种子(玉米、冬小麦)和双子叶作物(大豆)的化感效应试验表明, 0.5 g·mL^{-1}浓度的腐解液即抑制小麦种子萌发(严锐等2014), 而PA和*p*-HBA是玉米秸秆腐解液中引起化感效应的两种重要酚酸化合物(李晶等2015), *p*-HBA在猪粪、稻草等物料中的含量为6~7 μg·g^{-1}, 且在腐解20~30 d时含量最高(朱林等2001), 可见, 其在腐解液中峰值浓度可达到约3 mg·L^{-1}, 因此, 在进行秸秆还田时要注意还田数量和秸秆腐解程度, 将秸秆腐解的负面影响降低到最小。本研究中PA和*p*-HBA的处理浓度超过0.2 mmol·L^{-1} (约0.03 mg)即影响燕麦根系的伸长和鲜重, 且根系和幼芽的ROS含量、MDA含量等指标间均表现为化感物质PA和*p*-HBA间, 及同一化感物质浓度间的显著差异, 且物质与浓度间互作显著; 而SOD活性、CAT活性在化感物质处理间差异不显著; POD活性在化感物质间、浓度间的差异均不显著。可见, 本研究中化感物质对燕麦种子存在着浓度和他感的双重效应, 但表现在某个生理过程或指标上, 化感物质的作用途径上既有相似之处, 也存在一定差异, 化感物质*p*-HBA和PA的作用机制有待于进一步研究。

由根、芽鲜重和根长变化分析可知, 燕麦根系和幼芽在PA作用下均受到显著抑制, 而*p*-HBA对幼芽的影响并不显著, *p*-HBA主要是抑制根系的生长和干物质积累。结合根系和幼芽的ROS含量比值的变化, 以及MDA含量的变化分析, 燕麦幼苗对两种化感物质响应机制和程度存在一定差异, PA诱导幼芽对ROS清除能力的提高, 而*p*-HBA处理的幼芽对ROS清除并不是依靠SOD-CAT途径。张凤娟等(2008)对黄顶菊茎叶浸提液对白菜和水稻幼苗化感作用研究表明, 水浸提液对白菜根长

的影响大于对苗高的影响; 对水稻苗高的影响大于对根长的影响, 也说明了不同种植物对同一化感物质的响应机制存在较大差异。*p*-HBA和PA对生菜的化感研究中发现, H_2O_2的积累可能是造成SOD-CAT系统活性受到反馈抑制的重要原因(郭伟等2017a), 同时也是诱导氮代谢过程加强, 从而产生更多的脯氨酸等小分子渗透调节物质的直接结果(Saberi等2011; Wang等2016)。Batish等(2007)也认为植物渗透调节机制的激发是植物响应化感效应, 延缓衰老的重要途径。在*p*-HBA和PA对生菜的化感效应研究中发现, 生菜幼苗通过促进脱落酸和赤霉素的合成, 影响糖信号传导, 增加总可溶性糖含量, 从而提高对渗透失衡的调控能力(郭伟等2017b)。另外, 化感物质也可通过基因调控脱落酸和赤霉素合成, 抑制脱落酸降解, 而提高叶片气孔限制(Chi等2011; 杨梅等2011), 影响光合碳同化和干物质积累(Parizotto等2017)。

参考文献

Aslam F, Khaliq A, Matloob A, Tanveer A, Hussain S, Zahir ZA (2017). Allelopathy in agro-ecosystems: a critical review of wheatallelopathy-concepts and implications. Chemoecology, 27: 1–24

Batish DR, Lavanya K, Singh HP, Kohil RK (2007). Phenolic allelochemicals released by *Chenopodium murale* affect the growth, nodulation and macromolecule content in chickpea and pea. Plant Growth Regul, 51 (2): 119–128

Booker FL, Blum U, Fiscus EL (1992). Short-term effects of ferulic acid on ion uptake and water relations in cucumber seedlings. J Exp Bot, 43 (5): 649–655

Chen H, Hao HR, Xiong J, Qi XH, Zhang CY, Lin WX (2007). Effects of successive cropping *Rehmannia glutinosa* on rhizosphere soil microbial flora and enzyme activities. Chin J Appl Ecol, 18 (12): 2755–2759 (in Chinese with English abstract) [陈慧, 郝慧荣, 熊君, 齐晓辉, 张重义, 林文雄(2007). 地黄连作对根际微生物区系及土壤酶活性的影响.应用生态学报, 18 (12): 2755–2759]

Chi WC, Fu SF, Huang TL, Chen YA, Chen CC, Huang HJ (2011). Identification of transcriptome profiles and signaling pathways for the allelochemical juglone in rice roots. Plant Mol Biol, 77 (6): 591–607

Dhima K, Vasilakoglou I, Paschalidis KA, Gatsis T, Keco R (2012). Productivity and phytotoxicity of six sunflower hybrids and their residues effects on rotated lentil and ivy-leaved speedwell. Field Crops Res, 136: 42–51

Gao JF (2006). Plant Physiology Experiment Guide. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [高俊凤(2006). 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社]

Geng GD, Zhang SQ, Cheng ZH (2008). Allelopathy of 1, 2-benzenedicarboxylic acid and its mechanism. J Hunan Agr Univ (Nat Sci), 34 (6): 656–659 (in Chinese with English abstract) [耿广东, 张素勤, 程智慧(2008). 邻苯二甲酸对莴苣的化感作用及其作用机理. 湖南农业大学学报(自然科学版), 34 (6): 656–659]

Guo W, Sun HY, Wang Y (2017a). Effect of *N*-phenyl-2-naphthylamine and phthalic acid on antioxidant system and mineral nutrient uptake of lettuce. Plant Physiol J, 53 (1): 71–78 (in Chinese with English abstract) [郭伟, 孙海燕, 王炎(2017a). N-苯基-2-萘胺和邻苯二甲酸对生菜抗氧化系统及矿质养分吸收的影响. 植物生理学报, 53 (1): 71–78]

Guo W, Sun HY, Wang Y (2017b). Effects of *N*-phenyl-2-naphthylamine and phthalic acid on endogenous hormones and carbon-nitrogen metabolism of lettuce. Plant Physiol J, 53 (2): 273–279 (in Chinese with English abstract) [郭伟, 孙海燕, 王炎(2017b). *N*-苯基-2-萘胺和邻苯二甲酸对生菜内源激素及碳氮代谢的影响. 植物生理学报, 53 (2): 273–279]

Guo XY, Jing DX, Zhou RJ, Fu JF (2016). Detection of phenolic acids in crop straw decomposed liquid and their effect on pathogen of northern leaf blight of corn. J Maize Sci, 24 (4): 166–172 (in Chinese with English abstract) [郭晓源, 景殿玺, 周如军, 傅俊范(2016). 玉米秸秆腐解液酚酸物质含量检测及对玉米大斑病菌的影响. 玉米科学, 24 (4): 166–172]

Hussain MI, Reigosa MJ, Al-Dakheel AJ (2015). Biochemical, physiological and isotopic responses to natural product *p*-hydroxybenzoic acid in cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.). Plant Growth Regul, 75 (3): 783–792

Li J, Zhao XL, Qiao TC, Gu WR, Jiao J, Li GL, Luo N, Wei S (2015). Physiological effects of maize stalk decomposition liquid on seedlings and detection of phenolic allelochemical ingredients. J Nucl Agr Sci, 29 (9): 1799–1805 (in Chinese with English abstract) [李晶, 赵先龙, 乔天长, 顾万荣, 焦健, 李改玲, 罗宁, 魏湜(2015). 秸秆腐解液对玉米幼苗的生理效应及酚酸类化感成分的检测. 核农学报, 29 (9): 1799–1805]

Li YX, Zhou BL, Liu N, Fu YW (2009). Effect of different concentration dibutyl phthalate (DBP) on the germination and growth of three vegetable seeds. Acta Agr Boreali-Occident Sin, 18 (2): 217–220, 224 (in Chinese with English abstract) [李轶修, 周宝利, 刘娜, 付亚文(2009). 邻苯二甲酸二丁酯对3种蔬菜作物种子萌发及幼苗生长的影响. 西北农业学报, 18 (2): 217–220, 224]

Liang CQ, Zhen WC, Zhang CY, Yin BZ (2009). Determination of phenolic acids in decomposing products of maize straw and their allelopathy on pathogens of wheat soil-borne disease. Chin Agr Sci Bull, 25 (2): 210–213 (in Chinese with English abstract) [梁春启, 甄文超, 张承胤, 尹宝重(2009). 玉米秸秆腐解液中酚酸的检测及对小麦土传病原菌的化感作用. 中国农学通报, 25 (2): 210–213]

Lü KY, Qiu HG, Bai JF, Xu ZG (2013). Development of direct return of corn stalk to soil: current status, driving forces and constraints. Chin Popul Resour Env, 23 (3): 171–176 (in Chinese with English abstract) [吕开宇, 仇焕广, 白军飞, 徐志刚(2013). 中国玉米秸秆直接还田的现状与发展.中国人口资源与环境, 23 (3): 171–176]

Materska M, Piacente S, Stochmal A, Pizza C, Oleszek W, Perucka I (2003). Isolation and structure elucidation of flavonoid and phenolic acid glycosides from pericarp of hot pepper fruit *Capsicum*

annuum L. Phytochemistry, 63: 893–898

Mu P, Zhang NH, Wang HN, Fang YF (2012). Effects of continuous straw return to soil on maize growth and soil chemical and physical characteristics. Chin J Eco-Agr, 20 (3): 291–296 (in Chinese with English abstract) [慕平, 张恩和, 王汉宁, 方永丰(2012). 不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响. 中国生态农业学报, 20 (3): 291–296]

Parizotto AV, Marchiosi R, Bubna GA, Bevilaqua JM, Ferro AP, Ferrarese MLL, Ferrarese-Filho O (2017). Benzoxazolin-2-(3*H*)-one reduces photosynthetic activity and chlorophyll fluorescence in soybean. Photosynthetica, 55 (2): 386–390

Saberi M, Shahriari A, Tarnian F, Jafari M, Safari H (2011). Influence of some chemical compounds on germination and early seedling growth of two range species under allelopathic conditions. Front Agric Chin, 5: 310–321

Siddiqui ZS (2007). Allelopathic effects of black pepper leachings on *Vigna mungo* (L.) Hepper. Acta Physiol Plant, 29 (4): 303–308

Sircar D, Mukherjee C, Beuerle T, Beerhues L, Mitra A (2011). Characterization of *p*-hydroxybenzaldehyde dehydrogenase, the final enzyme of *p*-hydroxybenzoic acid biosynthesis in hairy roots of *Daucus carota.* Acta Physiol Plant, 33 (5): 2019–2024

Sun HY, Wang Y (2012). Effect of root exudated potential allelochemicals in hot pepper (*Capsicum annumm* L.) on antioxidative metabolism for lettuce (*Lactuca sativa* L.). Plant Physio J, 48 (9): 887–894 (in Chinese with English abstract) [孙海燕, 王炎(2012). 辣椒根系分泌的潜力化感物质对生菜幼苗抗氧化代谢的影响. 植物生理学报, 48 (9): 887–894]

Sun SS, Gong B, Wen D, Wang XF, Wei M, Yang FJ, Li Y, Shi QH (2016). Effect of exogenous melatonin on physiological and biochemical characteristics of cucumber radicals under *p*-hydroxybenzoic acid. Chin J Appl Ecol, 27 (3): 897–903 (in Chinese with English abstract) [孙莎莎, 巩彪, 温丹, 王秀峰, 魏珉, 杨凤娟, 李岩, 史庆华(2016). 对羟基苯甲酸胁迫下褪黑素对黄瓜胚根生理生化特性的影响. 应用生态学报, 27 (3): 897–903]

Tian G, Bi YM, Sun ZJ, Zhang LS (2015). Phenolic acids in the plow layer soil of strawberry fields and their effects on the occurrence of strawberry anthracnose. Eur J Plant Pathol, 143 (3): 581–594

Wang FB, Zhu H, Kong WL, Peng RH, Liu QC, Yao QH (2016). The *Antirrhinum* AmDEL gene enhances flavonoids accumulation and salt and drought tolerance in transgenic *Arabidopsis*. Planta, 244 (1): 59–73

Wang W, Chen ZD, Luo QX, Cao W (2010). Effects of exogenous NO on growth and active oxygen metabolism in cucumber seedlings under cinnamic acid stress. Sci Agr Sin, 43 (17) : 3677–3683 (in Chinese with English abstract) [王文, 陈振德, 罗庆熙, 曹委(2010). 外源一氧化氮对苯丙烯酸胁迫下黄瓜幼苗生长及活性氧代谢的影响. 中国农业科学, 43 (17): 3677–3683]

Wu AP, Yu H, Gao SQ, Huang ZY, He WM, Miao SL, Dong M (2009). Differential belowground allelopathic effects of leaf and root of *Mikania micrantha*. Trees, 23 (1): 11–17

Yan R, Ren XH, Zhang LX, Li H, Quan S (2014). Study on allelopathic effects of corn stalk decomposition liquid on crops. J Green Sci Tech, (5): 160–163 (in Chinese with English abstract) [严锐, 任相浩, 张龙轩, 李红, 全爽(2014). 玉米秸秆腐解液对作物化感作用的研究. 绿色科技, (5): 160–163]

Yang M, Cao GQ, Huang YH, Lin SZ (2011). Allelopathic effect of salicylic acid on endogenous hormone content in Chinese fir clone. Chin J Eco-Agr, 19 (1): 124–129 (in Chinese with English abstract) [杨梅, 曹光球, 黄燕华, 林思祖(2011). 邻羟基苯甲酸对不同化感型杉木无性系内源激素含量的化感效应. 中国生态农业学报, 19 (1): 124–129]

Yang SC, Huo L, Wang JC (2005). Allelopathic effect of straw returning. Acta Agri Boreali-Occident Sin, 14 (1): 52–56 (in Chinese with English abstract) [杨思存, 霍琳, 王建成(2005). 秸秆还田的生化他感效应研究初报. 西北农业学报, 14 (1): 52–56]

Yang YJ, Wang XW, Zhao K, Chen N, Lin D (2013). Effects of phthalic acid on seed germination, membrane lipid peroxidation and osmoregulation substance of radish seedlings. Acta Ecol Sin, 33 (19): 6074–6080 (in Chinese with English abstract) [杨延杰, 王晓伟, 赵康, 陈宁, 林多(2013). 邻苯二甲酸对萝卜种子萌发、幼苗叶片膜脂过氧化及渗透调节物质的影响. 生态学报, 33 (19): 6074–6080]

Yin W, Yu AZ, Chai Q, Hu FL, Feng FX, Gan YT (2015). Wheat and maize relay-planting with straw covering increases water use efficiency up to 46%. Agr Sustain Dev, 35 (2): 815–825

Zhang FJ, Xu XY, Chen FM, Guo AY, Long R (2008). Allelopathic effect of aqueous extract of *Flavera bidentis* (L.) Kunta on Chinese cabbage and rice seedlings growth. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 28 (8): 1669–1674 (in Chinese with English abstract) [张凤娟, 徐兴友, 陈凤敏, 郭艾英, 龙茹(2008). 黄顶菊茎叶浸提液对白菜和水稻幼苗化感作用的初步研究. 西北植物学报, 28 (8): 1669–1674]

Zhang XH, Lang DY, Zhang EH, Wang ZS (2015). Effect of autotoxicity and soil microbes in continuous cropping soil on *Angelica sinensis* seedling growth and rhizosphere soil microbial population. Chin Herb Med, 7 (1): 88–93

Zhou XG, Yu GB, Wu FZ (2012). Responses of soil microbial communities in the rhizosphere of cucumber (*Cucumis sativus* L.) to exogenously applied *p*-hydroxybenzoic acid. J Chem Ecol, 38 (8): 975–983

Zhu L, Zhang CL, Shen QR, Yuan F, Peng Y (2001). Phenolic acids in decomposing organic materials. Acta Pedologica Sin, 38 (4): 471–475 (in Chinese with English abstract) [朱林, 张春兰, 沈其荣, 袁飞, 彭宇(2001). 稻草等有机物料腐解过程中酚酸类化合物的动态变化. 土壤学报, 38 (4): 471–475]

Zhu LX, Xiao Q, Shen YF, Li SQ (2017). Effects of biochar and maize straw on the short-term carbon and nitrogen dynamics in a cultivated silty loam in China. Environ Sci Pollut R, 24 (1): 1019–1029

Effects of phthalic acid and *p*-hydroxybenzonic acid on seedling growth and antioxidant properties of oat (*Avena nuda*)

GUO Wei*, XUE Ying-Wen, YU Song, SUN Hai-Yan

Heilongjiang Provincal Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Germplasm Improvement, College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China

Abstract: The purpose of this paper is to elucidate effects of potential allelochemicals decomposed from maize stubble on germination and seedling growth of oat. Oat seeds of 'Baiyan 2' were treated with 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 and 1.0 mmol·L^{-1} of phthalic acid (PA) and *p*-hydroxybenzonic acid (*p*-HBA). Fresh weights of root and shoot, contents of reactive oxygen species (ROS) and malonaldehyde (MDA), antioxidant system activity of oat root and shoot were sampled and determined in order to explore allelopathy mechanism of *p*-HBA and PA decomposed from maize stubble. The results showed that ROS contents of root and shoot gradually increased and enhanced induced activity of superoxide dismutase (SOD) with increasing stress concentrations of PA and *p*-HBA, however, activity changes of CAT were much complex. Simultaneously, peroxidase (POD) activity of root were induced. Treatments of PA and *p*-HBA caused membrane lipid peroxidation of shoot and root in oat. Contents of MDA with treatments of over 0.6 mmol·L^{-1} increased markedly, and root shoot ration tumbled to bottom with decrease of roots length. Therefore, root damage were direct reflection for allelopathic effect of PA and *p*-HBA, inhibition level for root was stronger than that of shoot in oat, and PA was more important than *p*-HBA.

Key words: maize stubble; oat; germination; allelopathy; phthalic acid; *p*-hydroxybenzonic acid

Received 2017-06-19 Accepted 2017-09-08

This study was supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFD0300502), the Key Technology Research Project of Heilongjiang Farms and Land Reclamation Administration (Grant No. HNK135-07-03), and Doctoral Program of Heilongjiang Bayi Agricultural University (Grant No. XDB2015-24).

*Corresponding author (E-mail: agrigw@163.com).