

唐龙珠, 钟淑敏, 陈德远, 等. 植物自毒作用及生物降解研究进展[J]. 江西农业学报, 2025, 37(6): 46-54, 121.

植物自毒作用及生物降解研究进展

唐龙珠, 钟淑敏, 陈德远, 廖晓兰*

(湖南农业大学 植物保护学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: 土壤自毒物质累积是导致农田土壤连作障碍的重要因素之一, 土壤自毒物质主要来源于植物根系分泌物、残体分解、挥发及淋溶作用, 种类涵盖酚类、萜类及含氮化合物等, 土壤自毒物质不仅通过抑制植物酶活性、破坏细胞膜结构、降低光合作用效率及干扰矿质元素吸收等机制对作物生长产生不利影响, 还会通过改变土壤理化性质与微生物群落结构, 促进病原菌增殖, 进而加剧土壤生态系统失衡。综述了自毒物质的主要来源与种类, 系统整理了近年来用于降解自毒物质的生物降解方法, 并归纳了其关键分子机制, 为利用绿色技术解决连作障碍提供了理论依据与研究思路。

关键词: 连作障碍; 自毒物质; 微生物降解; 次生代谢产物; 分子机制

中图分类号: S182.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8581 (2025) 06-0046-09

Research Progress in Plant Autotoxicity and Biodegradation

TANG Long-zhu, ZHONG Shu-min, CHEN De-yuan, LIAO Xiao-lan*

(College of Plant Protection, Hunan Agricultural University, Changsha 410000, China)

Abstract: The accumulation of autotoxic substances in soil is a significant factor contributing to continuous cropping obstacles. These substances mainly originate from plant root exudates, decomposition of residues, volatilization and leaching processes. They encompass phenolic compounds, terpenoids and nitrogen-containing compounds. These substances adversely affect crop growth by inhibiting plant enzyme activity, disrupting cell membrane structures, reducing photosynthesis efficiency, and interfering with mineral nutrient absorption. Additionally, autotoxic substances alter soil physicochemical properties and microbial community structures, promoting the proliferation of pathogenic microorganisms and exacerbating ecological imbalances. This review summarizes the primary sources and types of autotoxic substances, systematically organizes recent advancements in biological degradation methods for these substances, and elucidates their key molecular mechanisms, providing theoretical foundations and new research perspectives for addressing continuous cropping obstacles using green resources.

Key words: Continuous cropping obstacles; Autotoxic substances; Microbial degradation; Secondary metabolites; Molecular mechanism

0 引言

受市场对作物需求增长与土地面积有限、土壤承载力不足之间矛盾的驱动, 农户常在同一块土地上连续单一种植作物, 致使农田土壤连作障碍问题日益凸显。即使在常规的种植条件下, 作物仍可能会出现生长受阻、产量与品质下降及病虫害加剧等现象^[1-2]。长期田间试验的研究结果表明, 大麦 (*Hordeum vulgare* L.)、棉花 (*Gossypium hirsutum* L.)、小麦 (*Triticum aestivum* L.) 等作物的频繁

连作会导致产量逐年下降^[3-5]。自毒物质在土壤中的大量积累被认为是现代农业中连作障碍形成的主要原因。化感作用是指植物向周围环境中释放一些次生代谢产物直接或间接影响植物生长的现象, 参与植物化感作用的各类次生代谢产物被称为化感物质^[6]。同种植物种内发生化感作用, 则被称为自毒作用, 自毒作用是化感作用在植物种内的一种表现形式, 自毒作用产生的代谢物及其衍生物即为自毒物质^[7]。自毒物质可通过干扰植物膜运输、光合作用、呼吸作用、细胞分裂及根的生长抑制植物生

收稿日期: 2025-02-13

作者简介: 唐龙珠 (2000—), 女, 湖南衡阳人, 硕士研究生, 研究方向为资源利用与植物保护。* 通信作者: 廖晓兰。

长,并改变土壤理化性质,进而导致作物产量逐年减少、病虫害危害加剧,最终引发连作障碍^[8-9]。

目前,常采用改良土壤、优化种植方式及合理施肥等传统农艺措施预防或缓解连作障碍^[10-11]。生物降解方法因其绿色高效特性,在连作障碍治理中具有广泛应用前景和重要推广价值,其中从土壤中筛选对自毒物质具有降解作用的微生物已成为研究热点。微生物中可能存在的相关代谢途径能够降解自毒物质,并将其转化为危害较小或没有危害的其他代谢产物^[12]。基于此,本文综述了植物自毒物质的来源、种类以及自毒作用的危害,总结了近年来生物降解自毒物质的研究进展,并对微生物降解自毒物质的分子机制进行了分析与讨论,以期安全、高效降解自毒物质提供理论参考。

1 自毒物质的来源及种类

1.1 自毒物质来源

自毒物质有多种来源,主要包括植株自身根系分泌物、雨水淋溶、叶片挥发及植株残体,种子萌发和花粉扩散所产生的物质^[13]。

1.1.1 根系分泌和植株残体 根系分泌物是植物自毒物质的主要来源。植物生长过程中,根部以主动或被动的方式分泌某些次生代谢物,这些物质可能被土壤中的微生物分解代谢,也可能与土壤中原来的自毒效应次生代谢物共同累积,进而对下一代植株产生自毒作用,影响其生长发育。水稻(*Oryza sativa* L.)在生长过程中可通过根系不断向土壤释放黄酮类、香豆酸等化学成分,从而抑制自身生长^[14]。刘红彦等^[15]通过对土壤、块根、残叶进行盆栽处理发现,造成地黄(*Rehmannia glutinosa* L.)的连作障碍可能来自地黄的根系分泌物,其次是来自地黄的残叶。植物残体在土壤中被微生物分解后释放内含物质或转化为次生代谢产物,释放或转化产生的自毒物质留存于土壤,影响植物生长。杨广超等^[16]利用西瓜(*Citrullus lanatus*)植株残体水浸液开展种子发芽与幼苗生长试验,发现该水浸液可抑制西瓜种子萌发,并影响幼苗体内与种子萌发相关酶的活性。

1.1.2 挥发及淋溶作用 植物体表挥发物以及附着于体表的物质经雨水、露水、雾淋溶后沉降至植物体或土壤,被植物吸收后进而影响其生长^[17]。张重义等^[18]研究表明,酚类、萜类物质分别为水溶性、挥发性物质中的代表物质,符合雨雾淋溶、

挥发为化感物质主要释放方式的特点。大部分萜类物质通过地上部茎、叶、花的挥发进入环境,如从叶、根的表皮细胞或分泌腺中释放出来,松针叶树脂道中的单萜必须从针叶表面的气孔释放^[19]。黎华寿等^[20]对香茅(*Cymbopogon citratus*)的挥发物进行了化学成分分析,发现了较多的萜类化合物,其中茎叶的挥发性成分包含单萜和倍半萜,而根部的挥发性成分则是倍半萜。Chaves Lobón等^[21]在棕斑岩蔷薇(*Cistus ladanifer* L.)幼叶渗出物中提取出类黄酮和二萜,检测发现其对棕斑岩蔷薇种子的发芽指数和发芽率均造成负面影响。

1.2 自毒物质的种类

植物受温度、光照、养分、水分等环境胁迫,产生的自毒物质在种类和数量上存在差异,对植物的危害程度也不同。近年来,研究人员从百合科(Liliaceae)、唇形科(Lamiaceae)、茄科(Solanaceae)、葫芦科(Cucurbitaceae)、禾本科(Gramineae)、伞形科(Umbelliferae)、豆科(Leguminosae)等多种植物中分离鉴定出自毒物质^[22-27]。自毒物质种类范围从简单的碳氢化合物到复杂的多环芳香族化合物^[28],主要包括酚类及其衍生物、水溶性有机酸、生物碱、甾族化合物、醛类、醌类、非蛋白氨基酸、醇类、氨基酸和多肽、酮类、萜类等^[29-30]。根据其生物合成途径可分为三大类,即含氮化合物生物合成途径、酚类化合物合成途径和萜类化合物合成途径^[25]。

1.2.1 含氮化合物 含氮化合物是指结构组成含有氮的化合物,主要包括生物碱和非蛋白氨基酸^[25]。生物碱作为植物长期适应外界环境产生的次生代谢产物之一,具有调节生长发育、响应环境胁迫及防御虫害等特殊功能^[31]。Ye等^[32]从白英(*Solanum lyratum*)中分离鉴定出2种糖苷生物碱,发现其对南苜蓿(*Medicago polymorpha* L.)和麦仙翁(*Agrostemma githago* L.)的胚根生长均具有抑制效果。

1.2.2 酚类化合物 酚类物质主要分为简单酚、黄酮类、香豆素和单宁等^[25,33]。酚酸类物质具有水溶性,植物可通过根系分泌和雨雾淋溶使其在土壤积累,进而产生自毒作用^[25,34]。酚酸类物质是导致连作障碍的主要自毒物质之一,常见的酚酸类自毒物质有香豆酸、阿魏酸、对羟基苯甲酸、苯甲酸等^[8,35]。李敏等^[36]使用22种常见酚酸处理宁夏枸杞(*Lycium barbarum* L.)种子,以探索酚酸类物质对萌发的影响,发现其抑制了枸杞种子的萌发。杨小燕等^[34]研究不同酚酸物质对莴苣(*Lactuca sa-*

tiva L.) 的化感作用,发现4种苯甲酸型酚酸(对羟基苯甲酸、水杨酸、香草酸、丁香酸)和4种肉桂酸型酚酸(肉桂酸、阿魏酸、对香豆酸、咖啡酸)对莴苣的根长和株高均有抑制作用,且苯甲酸型酚酸的抑制作用高于肉桂酸型酚酸。

1.2.3 萜类化合物 萜类化合物是基于异戊二烯的天然产物,主要包括单萜、二萜、三萜、半萜。植物中的萜类物质多以挥发油的形式存在^[37-38]。石茅(*Sorghum halepense*)挥发物主要为倍半萜类,其挥发油饱和水溶液对其生长均有较强的抑制作用^[39]。Peñuelas等^[29]研究了胁迫条件下迷迭香(*Rosmarinus officinalis* L.)单萜类物质的释放量,发现环境胁迫下其叶片中的挥发性萜类化合物含量显著增加,进而抑制自身生长。Abd-ElGa-

wad等^[40]在杂草防控的研究中发现,单萜、香茅醛、芳樟醇可延缓杂草的萌发及后续发育。

1.3 自毒物质的影响

自毒作用严重影响了农、林、果、蔬等产业的生产。大量研究表明,粮食作物、经济作物、药用植物及林木等均可通过释放自毒物质产生自毒作用,对作物生长产生了多个方面的影响^[8]。自毒物质通常会损伤植物细胞、降低光合作用和呼吸作用,并影响根系对水分和养分的吸收;同时引起土壤理化性质、酶活性与微生物群落的变化,且随着种植年限的延长导致自毒物质在土壤中累积,严重影响了植物的生长发育^[41-42]。植物主要自毒物质及其对植物的影响如表1所示。

表1 植物主要自毒物质及其作用机理

自毒物质	类型	来源植物	产生部位	自毒作用	参考文献
苯甲酸、阿魏酸、丁香酸、对香豆酸、对羟基苯甲酸	酚酸类	三七[<i>Panax notoginseng</i> (Burkill) F. H. Chen ex C. H. Chow]	根系分泌物	抑制植物苗高、根长、可溶性蛋白质含量、根系活力、CAT活性、POD活性及叶绿体含量	[43-45]
对(邻)苯二甲酸二辛酯、2,4-二叔丁基苯酚、邻苯二甲酸	酚酸类	兰州百合[<i>Lilium davidii</i> var. <i>willmottiae</i> (E. H. Wilson) Raffill]	根系分泌物	改变生理代谢过程,降低膜系统稳定性,影响百合的生长发育;导致真菌病原体增加,并降低植物有益菌种群的数量	[2,46]
苯丙烯酸、二羟基苯甲酸、苯甲酸、软脂酸、对羟基苯甲酸、香豆酸、咖啡酸、香草酸	酚酸类	黄瓜(<i>Cucumis sativus</i> L.)	根系分泌物、植株残体	显著降低气孔导度、光合作用	[47]
人参皂苷Rb ₁ 、Rb ₂ 、Rc、Rd、Re和Rg ₁	皂苷类	人参(<i>Panax ginseng</i> C. A. Mey)	根系分泌物、植物残体	刺激根际腐生真菌的生长,造成该植物的土传病害	[48]
甘草苷	黄酮类	甘草(<i>Glycyrrhiza uralensis</i> Fisch.)	根系分泌物	抑制幼苗根部生长发育	[49]
棕榈酸甲酯、十七烷酸甲酯和硬脂酸甲酯	脂肪酸酯类	老芒麦(<i>Elymus sibiricus</i> L.)	根系分泌物	抑制种子萌发及幼苗生长	[50]
香草醛、洋地黄毒素、雪松醇、植酮、诱虫烯、β-谷甾醇、胆甾烷醇、胆甾烷-3-酮	醛、醇、酮类	烤烟(<i>Nicotiana tobacum</i> L.)	根系分泌物	造成烟叶产量、品质下降	[51]
倍半萜内酯	萜类	灯芯草(<i>Juncus effusus</i> L.)、茶[<i>Camellia sinensis</i> (L.) Kuntze]、蟛蜞菊[<i>Sphagneticola calendulacea</i> (L.) Pruski]	植物挥发物	抑制自身种子萌发和幼苗的生长发育	[52]
禾草碱、大麦芽碱	生物碱	大麦(<i>Hordeum vulgare</i> L.)	根系分泌物	植物胚根长度减少、胚根尖端活力下降,使胚根出现细胞壁受损、液泡增大、细胞器发生解体等现象,影响细胞亚显微结构及细胞分裂	[53]

1.3.1 影响植物酶活性和细胞膜结构 自毒物质能影响植物体内过氧化物酶(peroxidase, POD)和超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)等抗

氧化酶的活性,从而导致细胞膜透性增加、内溶物溢出并加剧细胞膜质的过氧化作用而引起植物组织的生长迟缓或死亡^[49]。黄钰芳等^[54-55]研究发

现, 兰州百合中的自毒物质对苯二甲酸二辛酯和 2,4-二叔丁基苯酚能改变百合的生理代谢过程, 降低膜系统稳定性。李蕾^[52]利用根际土壤浸提液处理显著抑制了薏苡(*Coix lachryma-jobi* L.) 种子的萌发, 其株高、茎粗、叶面积等主要形态指标均显著下降, 也使其叶片光合作用能力以及抗氧化酶活性显著降低, 而脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量显著增加, 最终导致薏苡幼苗生长缓慢。

1.3.2 影响植物光合作用和呼吸作用 自毒物质不仅能够损害膜结构, 还会影响植物的光合作用和呼吸作用, 其对光合作用造成的影响主要表现为抑制气孔呼吸, 降低叶绿素含量, 以及阻碍根系对各类元素的吸收, 进而导致叶绿素合成受阻^[56]。杨昕蕾等^[57]利用大白菜(*Brassica rapa* ssp. *pekinensis*)根系分泌物处理幼苗, 发现其根系活力显著降低, 并且叶绿素含量减少, 对叶片质膜的完整性造成破坏; Liu 等^[58]研究发现, 肉桂酸对植物根系生长和叶片光合色素的合成均有明显的抑制作用, 降低根系对水和营养元素的吸收能力及叶片对光能的吸收转化速率, 最终影响植株的光合作用及干物质积累。

1.3.3 影响水和矿质元素吸收 自毒物质能损害根系胚根顶端的细胞壁并抑制根尖细胞的有丝分裂^[59], 进一步抑制根的细胞伸长生长, 以及植物在外部环境对水分及营养元素的吸收。Alsaadawi 等^[60]

研究发现, 丁香酸、咖啡酸和原儿茶酸等自毒物质均能影响豇豆[*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]幼苗对 N、P、K、Fe 和 Mo 等元素的吸收, 从而影响其生长发育。

1.3.4 自毒物质对环境的影响 有毒物质的过量积累会抑制有益微生物的生长与繁殖, 病原菌因土壤环境改变在土壤中广泛富集并定殖, 这被认为是连作土壤易导致植物发病的原因^[61]。刘云露等^[62-63]研究发现, 阿魏酸、水杨酸、肉桂酸等酚类物质对黄连(*Coptis chinensis*)土壤微生物以及土壤理化性质均产生不良影响, 根际土壤微生物总量及多样性逐年减少, 未种植期间微生物总量逐年增加, 土壤微生态环境逐步改善。自毒物质积累会导致土壤偏酸、病原真菌数量增多, 而土壤酶活性则随连作年限的延长而降低, 进而造成土壤微生物比例失衡、病虫害加剧^[64]。

2 自毒物质的生物降解方法

生物降解是指在适宜条件下通过微生物或生物酶将有毒物质转化为无毒或低毒物质, 且不会造成作物营养损失及引发二次污染^[65]。目前, 自毒物质生物降解的研究主要包括单一微生物降解(细菌、真菌、放线菌)和复合菌群协同降解^[65-66]。表 2 列举了部分自毒物质降解菌及其可降解自毒物质和降解率。

表 2 可降解自毒物质的微生物种类及其降解率

降解菌名称	可降解自毒物质种类	浓度/(mg/L)	降解率/%	参考文献
枯草芽孢杆菌(<i>Bacillus subtilis</i>)	苯甲酸	500	87.50	[67]
醋酸钙不动杆菌(<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>)	阿魏酸、对羟基苯甲酸	100	72.36~74.29	[68]
伯克霍尔德氏菌属(<i>Burkholderia</i> sp.)、 假单胞菌属(<i>Pseudomonas</i> sp.)	阿魏酸、咖啡酸、肉桂酸、水杨酸、香草醛、没食子酸、原儿茶酸、香草酸、对香豆酸和芥子酸	25	30.44~100.00	[69]
寡养单胞菌属(<i>Stenotrophomonas</i>)	皂苷	400	87.42	[70]
纤维化纤维微菌(<i>Cellulosimicrobium cellulans</i>)	肉桂酸、苯甲酸、对氨基苯甲酸和苯酚	100	64.10~79.32	[71]
齿孢青霉(<i>Penicillium daleae</i>)	阿魏酸	200	87.50	[62]
木霉(<i>Trichoderma</i>)	对羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸、香兰素、香豆酸、阿魏酸、苯甲酸	100	18.00~35.00	[72]
黄孢原毛平革菌(<i>Phanerochaete chrysosporium</i>)	阿魏酸、丁香酸、香草酸、对羟基苯甲酸	500000	78.80~94.00	[73]
嗜吡啶红球菌(<i>Rhodococcus pyridinivorans</i>)	对羟基苯甲酸、香草酸和没食子酸	2000	88.93~99.00	[74]
淡紫褐链霉菌(<i>Streptomyces enissocaesilis</i>)	阿魏酸	50	94.32	[75]

2.1 细菌降解

自然界中存在多种对自毒物质具有降解作用的细菌。研究发现, 假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)、芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)、不动杆菌属(*Acinetobacters* sp.)、根瘤菌(*Rhizobia*)等降解细菌对酚酸类物质

具有较好的降解效果^[67,70,76]。王洁等^[77]从香草兰(*Vanilla planifolia*)连作根际土壤中筛选出枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、炭疽芽孢杆菌(*Bacillus anthracis*)、解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*)等降解细菌, 其均可降解香草兰根系分泌

的苯甲酸、水杨酸和对羟基苯甲酸等酚酸类自毒物质,且对尖孢镰刀菌具有一定的拮抗作用。向维等^[70,78-80]研究显示,在三七[*Panax notoginseng* (Burk.) F. H. Chen]连作土壤中分离得到假单胞菌(*Pseudomonas*)、寡养单胞菌属(*Stenotrophomonas*)、芽孢杆菌(*Bacillus* sp.)等自毒物质降解细菌,对皂苷均具有良好的降解效果,并具有拮抗三七病害及缓解连作障碍的生防潜力。肖蓉等^[81]从土壤中分离出绿针假单胞菌(*Pseudomonas chlororaphis*) ZH2,其不仅能够缓解对羟基苯甲酸对黄瓜幼苗的毒害作用,而且能够促进黄瓜苗的生长,具有良好的促生作用。

2.2 真菌降解

木霉菌(*Trichoderma*)、青霉菌(*Penicillium*)是应用于自毒物质生物防治中的重要真菌^[82]。Chen等^[83]利用哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)降解黄瓜根系分泌物苯甲酸、香豆酸等自毒物质,并在170 h内可以完全降解此类自毒物质。安淑辉^[84]筛选出深绿木霉(*Trichoderma atroviride*)、绿木霉(*Trichoderma virens*)、哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)等生防木霉菌株,发现其均可高效降解对羟基苯甲酸、香草酸、丁香酸、对香豆酸、阿魏酸、苯甲酸等酚酸类自毒物质,减轻西洋参(*Panax quinquefolius* L.)主要致病菌属及酚酸类自毒物质对西洋参生长的负面影响。王义坤等^[85]在连作土盆栽平邑甜茶(*Malus hupehensis* Rehd.)条件下施用圆弧青霉(*Penicillium cyclopium*)、哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)、草酸青霉(*Penicillium oxalicum*)3种菌肥后,土壤酚酸含量降低,且3种菌肥对平邑甜茶幼苗均有不同程度的促进作用,其中哈茨木霉和草酸青霉菌肥效果相对较好。

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)与宿主植物根系结合形成的菌根共生体,可调节寄主植物的代谢活动,增强其抗病能力,同时也能缓解连作障碍对植株地上部分产生的不良影响^[86]。AMF通过调节植物根系分泌物来降解酚酸类物质,有效减少了酚酸类物质在土壤中的积累^[87]。Shi等^[88]研究发现,摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*)可调控连作大豆(*Glycine max* L.)的功能基因及酚酸代谢途径的表达,抑制大豆连作地酚酸自毒物质的积累,减缓连作影响。

2.3 放线菌降解

接种生防放线菌对土壤微生物群落有明显

的调节作用,可增加根际土壤中有益微生物的数量,减少有害微生物的数量^[89-90]。Wu等^[91]研究发现,暗灰链霉菌(*Streptomyces canus*)可通过激活磷酸酶、过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶的活性,并影响土壤微生物群落,进而缓解黄瓜阿魏酸和对羟基苯甲酸的胁迫。毛宁等^[92]研究发现,肉质链霉菌(*Streptomyces carnosus*)与密旋链霉菌(*Streptomyces pactum*)对草莓连作土传病原菌具有明显的抑制作用,同时对土壤中苯甲酸和对羟基苯甲酸有较强的降解能力,且添加有机质可明显促进对羟基苯甲酸的降解。

2.4 混合菌群降解

由于单一菌株对不同自毒物质的作用效果存在差异,或需特定菌株产生特定辅酶以协同辅助降解,当单一菌株对土壤复杂组分中的自毒物质降解效果不理想时,常采用混合菌种复配方案以实现更佳的降解效果^[93]。Chang等^[94]从11个分离菌株中筛选出的6个联合菌株可降解11种化感物质,显著降低了烟草青枯病的发生。

3 自毒物质微生物降解的分子机制

目前,针对自毒物质的微生物降解问题,国内外研究多集中于高效降解菌株的筛选和微生物降解效果等方面,但存在一定的局限性,关于微生物降解自毒物质的关键基因与关键酶的研究报道较少。

3.1 降解酶的研究

研究发现,微生物对自毒物质的降解主要通过酶促反应实现。酶促反应是指微生物分泌的降解酶直接作用于自毒物质,其机制主要体现在以下两个方面:一是微生物自身携带降解酶基因,可直接利用降解酶系完成降解过程;二是自身无法分泌降解酶系的微生物在自毒物质的胁迫下,通过基因重组产生新的降解酶系以实现降解^[95]。

微生物对酚酸类物质的代谢通常涉及脱羧酶、羟化酶和加氧酶的协同作用,其通过酶促反应将酚酸降解为小分子化合物或矿物质,如菌株可将苯甲酸降解为儿茶酚、乙酸和丙酮酸等小分子化合物^[61,96-97]。Chen等^[83]在研究4-羟基苯甲酸微生物降解过程中,发现4-羟基苯甲酸首先羟化为3,4-二羟基苯甲酸,继而转化为儿茶酚,然后在三羧酸(TCA)循环中氧化为顺,顺-2,4-己二烯二酸,在这一过程中分别是4-HBA羟化酶、3,4-二羟基苯甲酸脱羧酶、儿茶酚1,2-二氧酶参与降解并发挥作用。Xiong等^[98]通过对*Pigmentiphaga kullae*

CHJ604 菌株全基因组进行测序和注释,筛选出对苯二甲酸 1,2-双加氧酶和邻苯二甲酸 4,5-双加氧酶,其中对苯二甲酸 1,2-双加氧酶可催化 4-羟基苯甲酸、4-羟基-3-甲氧基苯甲酸、4-羟基苯甲醛及 4-羟基-3-甲氧基苯甲醛的降解,邻苯二甲酸 4,5-双加氧酶可催化邻苯二甲酸、二异丁基邻苯二甲酸和二丁基邻苯二甲酸的降解。这 2 种酶有助于菌株同时降解多种自毒物质和外源物质。周鑫等^[99]发现了毛栓菌(*Trametes hirsuta*) 27-1 产生的漆酶能完全降解香草酸、咖啡酸和芥子酸。

部分微生物所含有的 β -葡萄糖苷酶能特异性水解不同类型皂苷的不同部位糖苷键。Quan 等^[100]从栽培人参(*P. ginseng*)的土壤中分离出一株酯香微杆菌(*Microbacterium esteraromaticum*),并从该菌中克隆得到一个 β -葡萄糖苷酶(*Bgp1*)基因,使用重组 *Bgp1* 转化人参皂苷 *Rb₁*,得到人参皂苷 *Rg₃*。高娟^[101]从种植人参的土壤中分离出一株草酸青霉(*Penicillium oxalicum*),对其发酵液进行分离纯化得到的胞外糖苷酶 GH1、GH3-1 和 GH3-2,这些酶对人参皂苷均具有较好的水解效果。

3.2 降解基因的研究

微生物一般通过表达特定的降解基因产生一系列的代谢反应,进而实现对自毒物质的转化和降解。Lubbers 等^[102]鉴定了编码羟基肉桂辅酶 A 合成酶(*hcsA*)、多功能 β -氧化水合酶/脱氢酶(*foxA*)、3-酮酰辅酶 A 硫醇酶(*katA*)及 4 种 A 硫酯酶(*theA-D*)的基因参与了多种羟基肉桂酸的降解。刘云露等^[103]研究发现,橄榄色链霉菌(*Streptomyces olivochromogenes*)基因组含有编码辅酶 A 连接酶、辅酶 A 缩醛酶、苯甲酸双加氧酶、原儿茶酸双加氧酶等酚酸降解过程中关键酶的基因。在对乙酸钙不动杆菌(*Acinetobacter calcoaceticus*)和假单胞菌(*Pseudomonas putida*)的研究中发现 2 条苯甲酸的降解途径(邻位降解和间位降解途径)的 2 个降解基因。一个是从乙酸钙不动杆菌的拟核 DNA 上发现的 *benABC*,其可以编码苯甲酸 1,2-双加氧酶,但是却对大多数含取代基的苯甲酸没有降解作用;另一个在恶臭假单胞菌的 TOL 质粒上发现的可以编码甲苯 1,2-双加氧酶的基因,其不仅可以催化苯甲酸的羟基化,还能催化 3-、4-位取代基苯甲酸的羟基化^[104]。

4 总结与展望

利用微生物技术解决植物根系土壤中自毒物

质的积累问题,是避免连作障碍和保护农业生态环境的重要措施之一。微生物对土壤中的自毒物质具有很强的代谢活性和分解能力,可以直接或间接地降解土壤中的自毒物质。在连作障碍土壤中,自毒物质通常由几种甚至十几种共同存在,而自毒物质的降解需要多种微生物及不同降解途径协同作用。微生物技术的应用受土壤的酸碱度、微生物种类、温度和湿度等环境与生物因素的影响,这些因素可能降低微生物在田间应用的稳定性,进而影响生物防治效果。因此,筛选可高效降解多种自毒物质的菌株,并通过遗传改良使其更好地适应不良环境条件及耐药特性,是利用生物技术缓解连作障碍的关键。

近年来,针对自毒物质生物降解的研究取得了显著进展,但利用生物降解减少或消除自毒物质的研究相对较少。因此,建议从 3 个方面开展进一步研究:(1)当前自毒物质降解机制研究仍不深入,随着分子生物学的快速发展,运用分子手段研究自毒物质的降解过程,深入探究降解机理,明确降解条件并开展降解产物毒性评估,有助于确定关键的降解限制因素,从而通过优化降解条件提高降解效率及环境适应性;(2)利用新型生物酶挖掘技术发掘自毒物质降解酶,推进降解酶结构修饰与分子改造,通过降解酶改良提高降解效果;(3)结合传统遗传育种手段与现代基因工程技术,筛选优良作物品种并导入自毒物质相关基因,使植物在保持优良性状的同时克服植物自毒作用。

参考文献:

- [1] Bennett A J, Bending G D, Chandler D, et al. Meeting the demand for crop production: The challenge of yield decline in crops grown in short rotations [J]. *Biological Reviews*, 2012, 87(1): 52-71.
- [2] 张博洋. 兰州百合自毒物质的典型降解菌株筛选及降解效应研究[D]. 兰州: 甘肃中医药大学, 2024.
- [3] Hulugalle N R, Scott F. A review of the changes in soil quality and profitability accomplished by sowing rotation crops after cotton in Australian Vertosols from 1970 to 2006 [J]. *Soil Research*, 2008, 46(2): 173-190.
- [4] Kirkegaard J, Christen O, Krupinsky J, et al. Break crop benefits in temperate wheat production [J]. *Field Crops Research*, 2008, 107(3): 185-195.
- [5] Arshad M A, Franzluebbers A J, Gill K S. Improving bar-

- ley yield on an acidic boralf with crop rotation, lime, and zero tillage [J]. Soil and Tillage Research, 1999, 50(1): 47–53.
- [6] 李浩然,林伟,王天一,等.人参化感作用研究进展[J/OL].分子植物育种:1–9[2025–02–11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20240715.1254.002.html.
- [7] Singh H P, Batish D R, Kohli R K. Autotoxicity: Concept, organisms, and ecological significance [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1999, 18(6): 757–772.
- [8] 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.
- [9] Wang Y, Zhang W, Zhang Z, et al. Isolation, identification and characterization of phenolic acid-degrading bacteria from soil [J]. Journal of Applied Microbiology, 2021, 131(1): 208–220.
- [10] Shan A Q, Pan J Q, Kang K J, et al. Effects of straw return with N fertilizer reduction on crop yield, plant diseases and pests and potential heavy metal risk in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive wheat-rice cycles [J]. Environmental Pollution, 2021, 288: 117741. DOI:10.1016/j.envpol.2021.117741.
- [11] Shimada B S, Simon M V, do Socorro Cunha L. Cultural control: A sustainable method of pest and disease control [J]. Journal of Experimental Agriculture International, 2021,43(6):19–26.
- [12] Nikolaivits E, Dimarogona M, Fokialakis N, et al. Marine-derived biocatalysts: Importance, accessing, and application in aromatic pollutant bioremediation [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 265.
- [13] Murphy S D. Biochemical and physiological aspects of pollen allelopathy [M]//Mallik A U. Chemical Ecology of Plants: Allelopathy in Aquatic and Terrestrial Ecosystems. Basel: Birkhäuser Basel, 2002: 245–260.
- [14] 孔垂华,徐效华,梁文举,等.水稻化感品种根分泌物中非酚酸类化感物质的鉴定与抑草活性[J].生态学报,2004,24(7):1317–1322.
- [15] 刘红彦,王飞,王永平,等.地黄连作障碍因素及解除措施研究[J].华北农学报,2006,21(4):131–132.
- [16] 杨广超,吕卫光,朱静,等.西瓜根、茎、叶水浸提液对西瓜种子萌发及幼苗中酶活性的影响[J].西北农业学报,2005,14(1):46–51.
- [17] 王强,阮晓,李兆慧,等.植物自毒作用及针叶林自毒研究进展[J].林业科学,2007,43(6):134–142.
- [18] 张重义,林文雄.药用植物的化感自毒作用与连作障碍[J].中国生态农业学报,2009,17(1):189–196.
- [19] 李继泉,金幼菊,沈应柏,等.环境因子对植物释放挥发性化合物的影响[J].植物学通报,2001,36(6):649–656,677.
- [20] 黎华寿,黄京华,张修玉,等.香茅天然挥发物的化感作用及其化学成分分析[J].应用生态学报,2005,16(4):763–767.
- [21] Chaves Lobón N, Ferrer de la Cruz I, Alias Gallego J C. Autotoxicity of diterpenes present in leaves of *Cistus ladanifer* L. [J]. Plants, 2019, 8(2): 27. DOI:10.3390/plants8020027.
- [22] Wu B, Shi S L, Zhang H H, et al. Anabolic metabolism of autotoxic substance coumarins in plants [J]. PeerJ, 2023, 11: e16508. DOI:10.7717/peerj.16508.
- [23] 于鑫,李丽娜,黄琪,等.龙牙百合根际土壤中自毒物质的鉴定及其对幼苗的化感作用[J].中药材,2024,47(9):2154–2159.
- [24] 丁凯鑫,王立春,单莹,等.马铃薯连作障碍及其防控的研究进展[J].中国马铃薯,2022,36(1):71–77.
- [25] 张晓燕.紫花苜蓿响应自毒物质香豆素的生理及分子机制[D].兰州:甘肃农业大学,2022.
- [26] 郑阳霞,唐海东,李焕秀,等.嫁接西瓜根系分泌物的化感效应及其化感物质的鉴定[J].果树学报,2011, 28(5):863–868.
- [27] 胡帅珂.水稻秸秆化感物质对水稻生长发育的影响及消除化感影响的研究[D].长春:吉林农业大学,2012.
- [28] Cheng Y S, Li M X, Xu P. Allelochemicals: A source for developing economically and environmentally friendly plant growth regulators [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2024, 690: 149248. DOI:10.1016/j.bbrc.2023.149248.
- [29] Peñuelas J, Llusià J. Effects of carbon dioxide, water supply, and seasonality on terpene content and emission by *Rosmarinus officinalis* [J]. Journal of Chemical Ecology, 1997, 23(4): 979–993.
- [30] Chon S U, Choi S K, Jung S, et al. Effects of alfalfa leaf extracts and phenolic allelochemicals on early seedling growth and root morphology of alfalfa and barnyard grass [J]. Crop Protection, 2002, 21(10): 1077–1082.
- [31] 黄玉香,谭何新,于剑,等.药用植物生物碱次生代谢工程研究进展[J].中草药,2016,47(23):4271–4281.
- [32] Ye W C, Wang H, Zhao S X, et al. Steroidal glycoside and glycoalkaloid from *Solanum lyratum* [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2001, 29(4): 421–423.
- [33] Harborne J B. Twenty-five years of chemical ecology [J]. Natural Product Reports, 2001, 18(4): 361–379.
- [34] 杨小燕,李立,张奇,等.不同类型酚酸物质对茼蒿的化感作用[J].福建农林大学学报:自然科学版,2017, 46(1):21–26.

- [35] 田给林,毕艳孟,孙振钧,等.酚酸类物质在作物连作障碍中的化感效应及其调控研究进展[J].中国科技论文,2016,11(6):699-705.
- [36] 李敏,张丽叶,张艳江,等.酚酸类自毒物质微生物降解转化研究进展[J].生态毒理学报,2019,14(3):72-78.
- [37] Bergman M E, Davis B, Phillips M A. Medically useful plant terpenoids: Biosynthesis, occurrence, and mechanism of action [J]. *Molecules*, 2019, 24(21): 3961. DOI:10.3390/molecules24213961.
- [38] Boncan D A T, Tsang S S K, Li C D, et al. Terpenes and terpenoids in plants: Interactions with environment and insects [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(19): 7382. DOI:10.3390/ijms21197382.
- [39] 孟庆会,黄红娟,刘艳,等.假高粱挥发油化学成分及其化感潜力[J].植物保护学报,2009,36(3):277-282.
- [40] Abd-ElGawad A M, El Gendy A E G, Assaeed A M, et al. Phytotoxic effects of plant essential oils: A systematic review and structure-activity relationship based on chemometric analyses [J]. *Plants*, 2020, 10(1): 36. DOI:10.3390/plants10010036.
- [41] 管艳辉,金自学,徐朗,等.温郁金连作和熏蒸处理土壤微生物种群数量分析[J].广东农业科学,2024,51(6):96-108.
- [42] Zhang S S, Jin Y L, Zhu W J, et al. Baicalin released from *Scutellaria baicalensis* induces autotoxicity and promotes soilborn pathogens [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2010, 36(3): 329-338.
- [43] 吴立洁.三七根际土壤中酚酸类物质化感作用及其干预措施研究[D].北京:北京中医药大学,2014.
- [44] 向维.三七根系分泌物的自毒作用及自毒物质研究[D].南宁:广西大学,2016.
- [45] 沈玉聪,张红瑞,张子龙,等.酚酸类物质对三七幼苗的化感影响[J].广西植物,2016,36(5):607-614,631.
- [46] Hua C P, Xie Z K, Wu Z J, et al. The physiological and biochemical effects of phthalic acids and the changes of rhizosphere fungi diversity under continuous cropping of Lanzhou lily (*Lilium davidii* var. *unicolor*) [J]. *HortScience*, 2019, 54(2): 253-261.
- [47] 李明,税军峰,马永清.化感作用在设施黄瓜连作中的应用研究[J].中国生态农业学报,2006,14(4):25-28.
- [48] Nicol R W, Yousef L, Traquair J A, et al. Ginsenosides stimulate the growth of soilborne pathogens of American ginseng [J]. *Phytochemistry*, 2003, 64(1): 257-264.
- [49] 施梦馨,刘莹,官会林,等.药用植物化感自毒作用及消减措施[J].中国现代中药,2023,25(9):2013-2019.
- [50] 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.
- [51] 陈冬梅,杨宇虹,晋艳,等.连作烤烟根际土壤自毒物质成分分析[J].草业科学,2011,28(10):1766-1769.
- [52] 李蕾.薏苡连作障碍效应和自毒作用初步研究[D].贵阳:贵州大学,2023.
- [53] Lovett J V, Hoult A H, Christen O. Biologically active secondary metabolites of barley. IV. Hordenine production by different barley lines [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1994, 20(8): 1945-1954.
- [54] 黄钰芳,张恩和,张新慧,等.兰州百合不同连作年限土壤中化感物质的检测及其自毒效应的研究[J].干旱地区农业研究,2021,39(2):62-68,94.
- [55] 崔佳佳.两种典型化感自毒物质对兰州百合生长及微生物作用研究[D].兰州:甘肃农业大学,2021.
- [56] 董晓民,高晓兰,刘伟,等.桃连作障碍中自毒作用的研究进展[J].黑龙江农业科学,2021(2):123-127.
- [57] 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.
- [58] Liu J, Wu F Z, Yang Y. Effects of cinnamic acid on bacterial community diversity in rhizosphere soil of cucumber seedlings under salt stress [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(2): 266-274.
- [59] 邹子湘,刘营,周定港,等.甘蓝型油菜秸秆水浸液对水稻萌发和生长的化感作用[J].中国油料作物学报,2022,44(6):1286-1295.
- [60] Alsaadawi I S, Al-Hadithy S M, Arif M B. Effects of three phenolic acids on chlorophyll content and ions uptake in cowpea seedlings [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1986, 12(1): 221-227.
- [61] 谢星光,陈晏,卜元卿,等.酚酸类物质的化感作用研究进展[J].生态学报,2014,34(22):6417-6428.
- [62] 刘云露,郑守豪,叶磊鑫,等.黄连土壤阿魏酸降解菌的筛选及降解特性[J].西南大学学报:自然科学版,2019(1):46-50.
- [63] 张丹.基于黄连化感物质与微生物群落结构变化的连作障碍机制研究[D].成都:成都中医药大学,2015.
- [64] 王兴祥,张桃林,戴传超.连作花生土壤障碍原因及消除技术研究进展[J].土壤,2010,42(4):505-512.
- [65] 宁雪悦,常晓娇,孙长坡,等.单端孢霉烯族毒素生物降解及降解机理研究进展[J].食品与发酵工业,2025,51(6):328-335.
- [66] 裴聪.三七连作障碍自毒物质降解菌的研究[D].杭州:浙江理工大学,2016.
- [67] 刘紫英,黄磊,袁斌,等.一株草莓连作自毒障碍主要物质苯甲酸降解细菌的筛选及其降解效果研究[J].浙江农业学报,2018,30(10):1699-1704.

- [68] 程增颜. 不动杆菌P13菌株的分离及缓解黄瓜连作障碍的应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- [69] Tang S S, Zhang Z R, Liu X D, et al. Study on screening and degradation effect of autotoxin-degrading bacteria in muskmelon [J]. *Agronomy*, 2023, 13(5): 1334. DOI:10.3390/agronomy13051334.
- [70] 向维, 韦小兰, 曹科鑫, 等. 三七皂苷类自毒物质降解细菌分离及其降解特性[J]. *广西植物*, 2023, 43(7): 1173–1181.
- [71] Yu G H, Xie Y H, Chen Y H, et al. Mitigating the repress of cinnamic acid to cucumber growth by microbial strain [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2006, 46(6): 934–938.
- [72] 张璐. 连作甜瓜土壤中酚酸类物质的变化规律和木霉菌降解作用研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [73] 王刚. 黄孢原毛平革菌(*Phanerochaete chrysosporium*)厚垣孢子在切花菊连作障碍修复中的应用[D]. 新乡: 河南师范大学, 2014.
- [74] 卢惠娇. 一株降解PHBA红球菌的筛选、鉴定及其生物活性研究[D]. 南宁: 广西民族大学, 2023.
- [75] 王晓辉. 西瓜自毒物质阿魏酸降解放线菌筛选及其降解效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [76] 李敏, 闫兴富, 马丽, 等. 酚酸类化感自毒物质对枸杞种子萌发的抑制作用[J]. *生态学报*, 2020, 40(6): 2072–2079.
- [77] 王洁, 王蓓蓓, 尚方剑, 等. 香草兰酚酸类自毒物质降解菌的筛选和鉴定及其抑菌效果[J]. *热带生物学报*, 2022, 13(6): 595–604.
- [78] 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.
- [79] 王罗涛, 杨冬英, 邓琳梅, 等. 三七根际土壤中皂苷类自毒物质降解拮抗细菌的分离筛选[J]. *南方农业学报*, 2020, 51(2): 305–312.
- [80] 王成先. 沼液联合芽孢杆菌防治三七根腐病及消减连作土壤中自毒皂苷的研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2023.
- [81] 肖蓉, 邓舒, 赵菁, 等. 自毒物质对羟基苯甲酸降解细菌ZH2的分离与应用[J]. *农学学报*, 2021, 11(7): 84–91.
- [82] 张照然. 绿色木霉菌缓解甜瓜连作障碍机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [83] Chen Y, Peng Y, Dai C C, et al. Biodegradation of 4-hydroxybenzoic acid by *Phomopsis liquidambari* [J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 51: 102–110.
- [84] 安淑辉. 抑制西洋参土传病害木霉菌的筛选及其连作障碍因子消除机制的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2022.
- [85] 王义坤, 孙琪然, 段亚楠, 等. 三种菌肥对苹果连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生长的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(4): 630–638.
- [86] 崔利, 郭峰, 张佳蕾, 等. 摩西斗管囊霉改善连作花生根际土壤的微环境[J]. *植物生态学报*, 2019, 43(8): 718–728.
- [87] Zeng R S, Mallik A U. Selected ectomycorrhizal fungi of black spruce (*Picea mariana*) can detoxify phenolic compounds of *Kalmia angustifolia* [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2006, 32(7): 1473–1489.
- [88] Shi H, Lu C C, Wu Y S, et al. AMF inhibit the production of phenolic acid autotoxins at the seed-filling stage in soybeans with continuous monocropping [J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24(1): 732. DOI:10.1186/s12870-024-05330-y.
- [89] 胡琴琴. 生防放线菌筛选及对西瓜连作障碍修复机制研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [90] 何斐, 张忠良, 崔鸣, 等. 生防放线菌剂对魔芋根域微生物区系的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(2): 221–227.
- [91] Wu F H, Shi Q H, Wang X J, et al. *Streptomyces canus* GLY-P2 degrades ferulic and p-hydroxybenzoic acids in soil and affects cucumber antioxidant enzyme activity and rhizosphere bacterial community [J]. *Plant and Soil*, 2019, 436(1): 71–89.
- [92] 毛宁, 薛泉宏, 唐明. 2株放线菌对土壤中苯甲酸和对羟基苯甲酸的降解作用[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(5): 143–148.
- [93] 张博洋, 陈彦宏, 栗锦鹏, 等. 自毒物质降解菌缓解药用植物连作障碍的作用及机制研究进展[J]. *中国野生植物资源*, 2023, 42(11): 7–14.
- [94] Chang X H, Wang Y, Sun J G, et al. Mitigation of tobacco bacteria wilt with microbial degradation of phenolic allelochemicals [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 20716. DOI:10.1038/s41598-022-25142-0.
- [95] Chen S L, Zhou B L, Lin S S, et al. Accumulation of cinnamic acid and vanillin in eggplant root exudates and the relationship with continuous cropping obstacle [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, 10(14): 2659–2665.
- [96] Malhotra M, Gupta D, Sahani J, et al. Microbial degradation of phenol and phenolic compounds [M]// *Recent Advances in Microbial Degradation*. Singapore: Springer Singapore, 2021: 297–312.
- [97] 吁安, 桂伦, 马吉平, 等. 基于非靶向代谢组技术研究不同水力滞留时间对厌氧发酵中代谢产物的影响[J]. *江西农业学报*, 2024, 36(10): 76–83.

(下转第 121 页)

- [9] 徐政,郑霖豪,丁守海.新质生产力促进共同富裕的内在机理与策略选择[J].改革,2024(4):41-49.
- [10] 侯冠宇,张震宇.新质生产力赋能共同富裕的理论逻辑、关键问题与现实路径[J].云南民族大学学报:哲学社会科学版,2024,41(3):93-100.
- [11] 黄陈晨,刘方平.新质生产力赋能共同富裕的政治经济学研究[J].甘肃行政学院学报,2024(1):76-89,127.
- [12] 罗明忠,魏滨辉.数字技术何以赋能农村共同富裕?基于经济与生态效益的考察[J].云南财经大学学报,2023,39(12):82-95.
- [13] 纪园园,杨岚,程东坡.数字经济赋能共同富裕:基于分位数回归方法[J].系统工程理论与实践,2024,44(9):2887-2901.
- [14] 王怀月.新质生产力、城乡公共服务均等化与共同富裕[J].统计与决策,2024,40(10):28-33.
- [15] 田艳丽,傅德印.中国共同富裕水平测度、动态演进与空间溢出效应[J].统计与决策,2024,40(9):73-78.
- [16] 龚斌磊,钱泽森,李实.共同富裕的测度与驱动机制研究[J].数量经济技术经济研究,2023,40(12):5-26.
- [17] 康茜,林光华.工业机器人与农民工就业:替代抑或促进[J].山西财经大学学报,2021,43(2):43-56.
- [18] 芦婷婷,祝志勇.人工智能是否会降低劳动收入份额:基于固定效应模型和面板分位数模型的检验[J].山西财经大学学报,2021,43(11):29-41.
- [19] 段学慧,张娜.数据要素及其形成新质生产力的机理研究[J].经济纵横,2024(7):18-28.
- [20] 聂昀秋,马晓君,郑佳宁.数据要素发展水平与经济增长:影响效应和机制分析[J].中国流通经济,2024,38(8):56-68.

(责任编辑:管珊红)

(上接第54页)

- [98] Xiong J X, Du L S, Li N N, et al. *Pigmentiphaga kullae* CHJ604 improved the growth of tobacco by degrading allelochemicals and xenobiotics in continuous cropping obstacles [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 465: 133466. DOI:10.1016/j.jhazmat.2024.133466.
- [99] 周鑫,缪晓磊,余学军.毛栓菌27-1漆酶对酚酸类化合物降解的效能分析[J].中国农学通报,2021,37(13):35-41.
- [100] Quan L H, Min J W, Jin Y, et al. Enzymatic bio-transformation of ginsenoside Rb1 to compound K by recombinant β -glucosidase from *Microbacterium esteraromaticum* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(14): 3776-3781.
- [101] 高娟.糖苷酶转化人参皂苷的研究[D].长春:东北师范大学,2012.
- [102] Lubbers R M, Dilokpimol A, Visser J, et al. *Aspergillus niger* uses the peroxisomal CoA-dependent β -oxidative genes to degrade the hydroxycinnamic acids caffeic acid, ferulic acid, and p-coumaric acid [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2021, 105(10): 4199-4211.
- [103] 刘云露.黄连土壤微生物多样性及其酚酸降解菌筛选与降解机制[D].重庆:西南大学,2019.
- [104] 何昊.桃根泌自毒物质苯甲酸降解菌的分离鉴定及应用潜力研究[D].武汉:华中农业大学,2019.

(责任编辑:李聪)