

苹果园重茬障碍防治研究进展

尹晓宁¹, 刘芬¹, 马明¹, 王文丽², 牛军强¹, 董铁¹, 孙文泰¹, 杨泽华¹

(1. 甘肃省农业科学院林果花卉研究所, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院
土壤肥料与节水农业研究所, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 解决苹果重茬障碍成为现阶段苹果产业健康、稳定发展的重要任务之一。随着苹果重茬障碍理论的日臻完善, 重茬障碍防治也得以不断创新和发展。通过对国内外以农艺防治和生物防治为主减缓苹果重茬障碍方面的研究成果进行了归纳整理并加以详细阐述, 在强调综合措施防治的基础上结合苹果重茬障碍发生的实际情况, 通过分析现阶段苹果重茬障碍防治中依然存在的问题, 提出未来需深入研究的重点和方向, 以期苹果重茬障碍有效防控及老果园重建提供参考和建议。

关键词: 苹果; 重茬障碍; 土壤消毒; 农艺措施; 生物防治; 抗性砧木与品种; 综合防治

中图分类号: S661.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2025)03-0197-13

[doi:10.3969/j.issn.2097-2172.2025.03.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-2172.2025.03.001)

Research Progress on the Prevention and Control of Replant Disease in Apple Orchards

YIN Xiaoning¹, LIU Fen¹, MA Ming¹, WANG Wenli², NIU Junqiang¹, DONG Tie¹,
SUN Wentai¹, YANG Zehua¹

(1. Institute of Fruit and Floriculture Research, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. Institute of Soil, Fertilizer and Water-saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: Addressing apple replant disease has become one of the important tasks for the healthy and stable development of the apple industry at present. With the continuous improvement of the theory of apple replant disease, the methods of prevention and control of replant disease have also been continuously innovated and developed. This article summarizes the domestic and international research results on agricultural and biological control as the main methods to alleviate apple replant disease in recent years, emphasizing comprehensive measures applying. Considering reality and analyzing the issues that still exist in current prevention and control, the key points and directions that need to be further studied has been proposed in the future, and reference and suggestions for effective prevention and control of apple replant disease and the reconstruction of old orchards has been provided.

Key words: Apple; Replant disease; Soil disinfection; Agronomic measure; Biological control; Resistant rootstock and variety; Integrated control

苹果重茬障碍由来已久, 是一个世界性问题。我国东西部苹果主产区老果园已进入更新期, 但因重建不当造成树体生长发育迟缓、小叶黄叶、坐果率低, 果实发育不良、甚至死树现象时有发生。反复建园延迟成园, 既浪费了人力物力, 也对苹果产业稳定发展造成了负面影响, 苹果重茬障碍亟待解决。目前普遍认为土壤有害微生物增

多、化感自毒物质累积和土壤理化性状恶化是引起重茬障碍的三大主要因素。国内外针对苹果重茬障碍防治方法多种多样, 其中传统防治方法效果显著, 但费时费工, 药剂防治对环境又有污染, 现代防治见效快但稳定性需提高。我国东部渤海湾产区在防治苹果重茬障碍方面已有丰富经验, 提出了一些较实用的模式和方法可供借鉴, 但针

收稿日期: 2023-08-30; 修订日期: 2024-12-25

基金项目: 甘肃省农业科学院重点研发计划(2023GAAS15); 国家重点研发计划(2022YFD1602107); 财政部和农业农村部国家苹果产业技术体系(CARS-27)。

作者简介: 尹晓宁(1969—), 男, 甘肃静宁人, 研究员, 研究方向为果园水肥及果树生理。Email: 1959822608@qq.com。

通信作者: 马明(1964—), 男, 甘肃秦安人, 研究员, 硕导, 研究方向为苹果栽培生理与育种。Email: 2380734362@qq.com。

对自然地理条件不同的西部产区,成熟的技术措施尚在探索中,仍有较长的路要走。我们综述了从传统农艺抗重茬措施到近年来以间套熏蒸植物、施用生防菌剂等为主的现代生物防治措施的研究进展和最新成果,分析了各自的优缺点和应用前景,强调了综合防治的优势,并提出加强重点领域研究,以期寻找到适合当地的抗重茬措施,为彻底解决苹果重茬障碍这一难题提供参考和借鉴。

1 传统土壤消毒

有研究认为,85%左右的连作障碍源于病原菌引起的土传病虫害^[1]。土壤物理或化学消毒可有效杀灭连作土壤中的有害病原菌和根结线虫^[2],是目前解决连作障碍较为有效的方法^[3-4]。

1.1 物理消毒

连作苹果园土壤直接置于70℃左右蒸汽中一段时间^[5-6],或者利用日晒加覆膜或塑料布等材料加热土壤至70℃持续4h^[7],能完全消除重茬障碍病害,促进苹果生长^[8]。太阳光曝晒可减少连作土壤中病原菌数量^[9];γ-射线灭菌更显著,能消除苹果再植病害^[10],使微生物群落明显向利于重新定殖方向发展^[11-12]。物理土壤消毒消除重茬障碍效果明显,但可行性还需进一步提高。

1.2 化学消毒

土施化学药剂是杀除病原菌,防治苹果重茬障碍最有效方法之一^[13]。溴甲烷的替代剂如棉隆、威百纳、克菌丹、三氯硝基甲烷、1,3-二氯乙烯、氯化苦等^[14-17],部分杀菌剂如多菌灵、福美双、咯菌腈和代森锰锌等^[18-19],以及防腐剂福尔马林、杀线虫剂卫地素等^[20-21],以上化学药剂对连作苹果园土壤消毒效果较好,可有效降低微生物总量和真菌数量,增加细菌数量和细菌/真菌比值。据报道,苹果重茬建园前施用噁唑酮+三乙磷酸铝、氨基乙二酰颗粒、咪鲜胺和甲基立枯磷等药剂灭杀土壤中的卵菌和真菌效果较好^[22]。但这些化学药剂对环境和果品安全生产的威胁不容忽视^[23],会显著降低土壤酶活性及土壤微生物活性,抑制土壤有机氮、碳和磷的矿化^[24],有一定的生态毒理效应,极大地降低了农业土壤的可持续生产力^[25],生产中逐渐被其他措施取代。一些对土壤较安全的药剂如双氧水、微酸性电解水、石硫合剂等对重茬病原菌有毒性效应^[26-28],H₂O₂、

O₂、KMnO₄、Ca(ClO)₂等可氧化降解酚酸类物质而降低化感毒性^[29-30],值得进一步研究和推广。

2 农艺措施

2.1 客土和晒土

客土可有效克服再植病,但因费工和土地资源受限,实践上应用较少,但有必要避开原树穴深翻改土^[31]。深翻晒土预防重茬危害简单有效^[32]。植物残根及枯枝落叶是病原菌侵染源,其腐解后产生的自毒物质也是连作障碍的重要原因之一,应将刨出的残根和枝叶一同集中烧毁或深埋^[31]。

2.2 轮作、间作和套作

轮作、间作和套作等传统农艺措施均可明显改善土壤理化与生物特性,促进作物生长,有效防控苹果连作障碍^[33]。轮作病原菌非寄主植物,可降低病原菌数量,改变根系分泌物组成,减少土传病害和减弱自毒作用,提高土壤细菌群落的多样性和土壤养分的有效性,能从根本上解决连作障碍问题^[34-35]。连作果园轮作效果较好的作物有高粱^[7]、苜蓿和菊花^[36]、小葱和小麦^[37],其中小葱在减少连作土壤中真菌数量和土壤酚酸总量、增加地下生物量、减轻苹果连作障碍效果更佳^[37]。但轮作一般需要3a以上,不同轮作物的效果差别较大^[34],苹果生产中不常用。而王海燕等^[34]和毛志泉^[35]采取1a内连续接茬种植3种作物(冬种小麦,春夏种葱和芥菜)后,苹果连作障碍得到有效缓解,值得借鉴。间作和套作是在重茬无法避免的情况下果树行间种植适宜的植物,利用非寄主植物根系分泌的化感物质来抑制病原菌及线虫的发育繁殖,促进果树健康生长,因此选择合适的植物间套种是必须的^[38]。常见的用于改善土壤微生物群落结构的植物有小麦、大麦、芥菜、紫花苜蓿和万寿菊、葱、三叶草、小冠花等^[3,37,39-42],其中苜蓿等耗水量较大的作物需据当地墒情因地制宜。

2.3 施肥

2.3.1 化肥 施用磷酸盐肥料可有效改善连作树体状况^[43-44],苹果连作土壤添加适量的硫黄在改善土壤微生物环境,促进幼苗生长方面作用显著^[45],但大多数条件下仅靠施肥补充土壤所缺养分,对控制苹果重茬没有显著影响^[8,46]。土壤调查也证实了土壤养分水平不会直接导致连作障碍^[6,47],

推测营养元素间接影响连作障碍^[27], 如氮素在培养基中表现出对连作障碍致病真菌的抑制或土施后能阻止其对苹果根系的侵染^[48]。土壤微生物环境改善是氮促进砧木生长的主因^[49], 且铵态氮降低土壤致病尖孢镰孢菌数量较硝态氮和酰胺态氮更显著^[49]。氮肥和磷肥均能提高土壤酶活性^[50], 但二者配施效果更佳, 且较氮肥单施在增加土壤细菌数量, 提高细菌真菌比, 增加苹果砧木根系生长和幼苗生物量方面更突出^[51]。

2.3.2 有机肥 增施有机肥可在一定程度上克服再植障碍。施用有机肥对细菌的促进作用大于真菌^[33], 微生物总量与有机肥显著正相关^[52]; 同时有机肥能抑制病原菌繁殖, 改善连作土壤微生物群落结构^[53], 使土壤逐渐从“真菌型”向适宜作物生长的“细菌型”转化^[53-54], 能促进根系生长, 有利于植物的健康生长和发育^[53, 55]。另外有机肥中腐殖酸有机-无机复合体能吸附植物毒素, 可以减轻酚酸对作物的毒害, 提高光合与生长^[56]。据报道, 连作土壤添加 20~40 g/kg 的海藻肥或 1.0 g/kg 甲壳素在优化微生物群落结构方面突出^[57]; 啤酒糟和白酒糟在未经灭菌下抑制连作土壤中的层出镰孢菌达 39%和 58%等^[58]。研究表明, 有机堆肥用量需达到体积比 20%或土壤中有有机质含量超过 25 g/kg 时, 才能较好缓解连作障碍^[59-60]。但多数情况下, 由于缺乏对致病真菌的快速杀灭能力, 增施有机肥难以在短时间内有效控制连作障碍^[61]。有机物料(包括禽畜粪、土杂肥、生物有机肥以及绿肥和秸秆类等)配施或混施后, 通过提高土壤中激素活性增强作物抗性^[57, 62-63], 促进树体生长并影响土壤微生物及土壤酶活性, 优化土壤环境等综合作用减轻重茬障碍程度效果较好^[64]。如用羊粪和草炭(体积比为 1:3)混合的有机物料, 与连作土按 0.2%的比例混合播种平邑甜茶种子, 显著提高细菌真菌比值, 增加连作苹果苗生长量^[36]。Zhang 等^[63]认为, 有机物料厌氧发酵流体较固体堆肥缓解苹果连作障碍效果更好, 可对 14 种病原菌不同程度抑制^[65]。如以猪粪、鸡粪、羊粪与秸秆质量比均为 4:1 和猪粪、鸡粪、羊粪、秸秆等 4 种物料质量比为 3:3:2:2 厌氧发酵的发酵流体, 均较有氧发酵的堆肥在提高连作土壤中平邑甜茶幼苗生物量, 增加土壤微生物数量和

土壤细菌与真菌的比值, 降低土壤酚酸总量等方面效果更为突出^[54]。用鸡粪、羊粪、牛粪、秸秆按体积比 6:1:1:2 混匀下的发酵流体按土重 1%~3%浓度施入, 土壤细菌数量增长最显著, 真菌数量增长最少, 且以 3%发酵流体浇灌的苹果幼树株高最显著, 能更好地减轻苹果连作障碍^[66]。其次, 一些特殊的发酵物如残次苹果发酵产物(酵素)在改善苹果连作土壤理化性质, 抑制苹果重茬主要 4 种病原真菌, 促进平邑甜茶幼苗生长方面与溴甲烷接近^[67]; 一定浓度的核桃壳木醋液(即植物酸)也可显著抑制某些再植病原真菌, 促进八棱海棠幼苗生长^[68]。有机物料缓解重茬障碍效果较佳, 但施用量大、成本较高。

2.3.3 生物炭 木屑、秸秆和家禽粪便等生物质制成的生物炭(Biochar), 比表面积较大, 吸附力较强, 富含有机碳和矿质营养。普遍认为土壤中添加生物炭是改善土壤理化性状和生物特性的有效做法^[57, 69]。将苹果枝在 300℃高温下和稻壳在 450℃高温下制备的生物炭添加到连作土中, 均显著增加了细菌和放线菌数量而降低了真菌数量, 根皮苷等酚酸含量降低, 平邑甜茶幼苗生物量增加显著^[57, 70]。壳聚糖改性生物炭改善土壤养分与微生物环境, 在促进树体生长方面更加突出^[70]。

2.3.4 小分子有机物 重茬土壤中施用一些小分子的糖类、有机酸草酸、褪黑素等均被证实能够减轻苹果连作障碍^[71-73]。老龄苹果园土壤添加 0.1‰苦参碱, 可显著降低土壤中 4 种镰孢菌基因拷贝数, 提高了细菌真菌比, 促进平邑甜茶幼苗光合与生长^[74]。潘凤兵^[75]从蚯蚓发酵产物中分离纯化出一种小分子生物活性肽干粉, 可高效抑制重茬土中镰孢属有害真菌, 显著提高有益被孢霉属真菌丰度, 优化了微生物群落结构, 对提高连作土壤酶活性、降低土壤酚酸类物质含量、提高树体光合与生长方面作用显著。

3 生物防治

狭义的生物防治是指利用一些有益菌或拮抗菌, 通过抑制土壤中病原菌数量或干扰其侵染寄主植物来缓解或克服连作障碍等土传病害^[76]。广义的生物防治还应包括生物熏蒸。生物防治环境友好又不产生抗体, 是农业可持续发展的重要目标^[77]。

3.1 微生物防治

生防微生物主要是拮抗细菌和真菌(包括丛枝菌根真菌)。拮抗细菌能够有效抑制病原菌对再植苹果幼树根系的侵染^[59],其中各类芽孢杆菌应用范围最广。Rumberger等^[78]报道了苹果幼树接种枯草芽孢杆菌可免受疫霉病和根腐病的侵害。刘丽英等^[79]从有机物料发酵流体中分离出的4株芽孢杆菌L11、L12、L13、L14,拮抗苹果再植障碍主要病原菌,其菌液浇灌盆栽处理发现,显著增加了连作土壤中细菌和放线菌数量,在抑制真菌和提高根系活力上优于溴甲烷熏蒸处理。王佳佳^[80]从苹果根部重茬土中筛选出的Bs-0728枯草芽孢杆菌,对19种苹果再植病害病原菌有抑制作用,能定殖于苹果根际土壤中达120d,可促进海棠胚根生长,减弱苹果再植病病原菌的致病力。其次,从苹果连作土壤中分离得到的SNB-86枯草芽孢杆菌和B6甲基营养型芽孢杆菌也是缓解苹果连作障碍的生防菌^[81-82]。胡秀娜^[83]研究认为,多黏类芽孢杆菌PY7和甲基营养型芽孢杆菌FKM10较路德维希杆菌KD49缓解苹果连作障碍效果更好。贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)是芽孢杆菌属的一个种,具有广谱抑菌活性和促生作用,近年来研究逐渐兴起^[84]。闫助冰^[85]筛选出一株解淀粉贝莱斯芽孢杆菌XC1,其菌体产生的挥发性气体和发酵产物即能拮抗4种重茬病原镰孢菌,又能降解根皮苷,还可高产蛋白酶和纤维素酶这两种胞外酶,提高土壤主要酶活性,减轻连作障碍。一些假单胞杆菌(*Pseudomonas* SP.)能抑制病原菌生长并提高苹果幼苗生物量^[86],如SH1菌株能以苯甲酸、邻羟基苯甲酸和间羟基苯甲酸作为碳源和能源生长^[87],生脂固氮螺(*Azospirillum lipoferum*)BL2菌可降解邻苯二甲酸^[88],6-3菌可降解根皮苷等^[89],相继被报道。苗木接种某种拮抗菌也是抗重茬行之有效的一种方法,如用放射形农杆菌(*Agrobacterium radiobacter*)感染苹果苗木和砧木,对抑制重茬病较重果园土壤有害致病菌,增强苗木长势,减少重茬病发生有积极作用^[90];连作苹果园接种B8菌系、EBW-4菌系和GI(*Glomus intraradices*)6a试验表明,均降低了恶疫霉、根腐霉的感染率,显著提高了再植苹果的产量和树干横截面积^[91]。但也有研究认为,土壤中分离的拮抗

细菌易受外界条件影响,防效不够稳定^[92],而植物内生菌能够稳定地在植物体内定殖与运转,具有固氮、溶磷、解钾、产铁载体等作用,从而提高土壤酶活性,提高土壤可利用养分,且能产生与宿主植物代谢相同或相似的生理活性物质^[93],如生长素等促进作物生长^[94],因而具有更好的抑菌效果^[95]。2种内生拮抗菌枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)SRB-1和漠海威芽孢杆菌(*Bacillus mojavensis*)SRB-11等比例混合菌剂^[96],对连作环境下平邑甜茶幼苗生长及其根系3种保护酶活性、4种土壤酶活性都有着显著地促进和提高作用,且SRB-1针对尖孢镰刀菌、串珠镰刀菌和链格孢菌而SRB-11针对腐皮镰刀菌、层出镰刀菌、链格孢菌和炭疽菌各有着突出的抑控作用。内生菌Y1枯草芽孢杆菌能诱导苹果幼苗产生系统抗性,免受尖孢镰刀菌感染,显著增加苹果苗的生长量^[62]。

拮抗真菌也能缓解苹果连作障碍^[6],其中丛枝菌根真菌是土壤中分布范围最广、生物量最大、作用最显著的有益真菌,能与地球上90%的维管植物建立互惠共生关系,植物抗逆性的增强主要是依赖于它对植物生理代谢的调节^[97]。试验表明,接种VA菌根能够减轻寄生疫霉(*Phytophthora parasitica*)、立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)、镰刀菌(*Fusarium solan*)、青枯菌(*Rastonia solanacearium*)等病原菌引起的病害^[98-101]。泡囊-丛枝菌根(Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza, VAM)真菌可与果树达成有益共生的关系,属于内生菌根真菌,可有效控制重茬园中土壤线虫增殖和有害微生物对根系的侵害,有效防止缺磷现象发生,促进苗木生长^[102]。苹果连作苗圃接种泡囊菌根后枝条可增加78%~113%,根长增加81%~84%^[103]。其次,从连作苹果根系或老果园中分离出的草酸青霉(A1)、哈茨木霉明显拮抗镰孢属有害真菌生长^[104-105],促进平邑甜茶幼苗生长,具有较好的生防潜力。据报道,D12哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)和草酸青霉(*Penicillium oxalicum*)A1减缓苹果连作障碍优于圆弧青霉(*Penicillium cyclopium*)菌肥^[106]。球毛壳(*Chaetomium globosum*)ND35可增加连作土壤中有益细菌和放线菌数量,减少有害真菌数量,减轻苹果连作障碍^[107]。其他菌种如从重茬健康苹果根际(品种为烟富3号,砧木为M9T337)分离得

到的 W6(*Ochrobactrum haematophilum*) 苍白杆菌菌株, 也可显著降低重茬土壤中根皮苷含量和有害真菌腐皮镰孢菌数量, 增加根系抗氧化酶活性, 提高叶片光合色素含量, 缓解重茬造成的光合参数下降, 增加植株生长量^[108]。

混合微生物防治效果优于单一菌剂, 且具有较好的稳定性^[6,109]。如施用普通青霉和罗伊氏乳杆菌混合发酵产物较单一菌剂发酵物在提高土壤酶活性, 增加土壤细菌数量减少真菌数量, 提高平邑甜茶幼苗根系保护酶活性降低丙二醛含量, 促进根系呼吸速率和幼苗生长等方面效果更佳^[110]。木美土里复合微生物菌剂含有好氧菌和厌氧菌, 其保护树体抵御病毒和真菌性病害, 促根生长和养分吸收运输, 可有效缓解苹果重茬障碍症状^[111]。施用微生物复合菌剂重茬建园, 还可提高苹果园苗木成活率^[112]。

生防菌通过调节土壤微生态环境和改善土壤微生物群落结构等抑制土壤中的病原菌, 有效促进树体生长, 缓解苹果连作障碍^[82,104,106-107,111], 常被认为是最绿色、安全、高效的防治手段。但生防菌在土壤中的定殖受很多环境因素影响, 又因其作用的发挥需要维持较高的种群密度, 在没有持续施入的情况下会因与原有土壤微生物竞争而下降^[77]。再者, 重茬土壤中致病真菌多样, 仅施用少量几种拮抗细菌/真菌, 仍难以彻底消除连作障碍^[113]。

3.2 生物熏蒸

狭义的生物熏蒸是指十字花科或菊科等植物释放的有毒杀生气体, 抑制或杀死土壤害虫与病菌的过程^[113]。十字花科植物中的硫代葡萄糖苷水解物之一异硫氰酸酯, 对有害生物有很好的抑制作用^[114]。国外报道黑芥子(*B. nigra*)、埃塞俄比亚芥菜(*B. carinata*)和芥菜(*B. juncea*)均可显著抑制土壤中的镰孢菌病原体^[115]。国内研究也表明, 芥菜与苹果幼树混作优先恢复被孢霉属等拮抗菌相对丰度, 显著降低连作土壤中致病菌镰孢菌属相对丰度, 其烘干粉末对 4 种主要致病镰孢菌菌丝生长也有显著的抑制作用^[7,116]。芥菜还能显著降低苹果连作土壤主要酚酸含量, 显著提高幼苗生物量^[6]。芥菜籽粕和油菜籽粕都可显著抑制重茬病害, 明显缓解苹果连作障碍^[39,117-118]。甘蓝型油

菜籽粕以体积比 0.1% 施入土壤, 能抑制丝核菌(*Rhizoctonia* spp.) 和北方根腐线虫(*Pratylenchus penetrans*) 的侵染, 明显促进再植地苹果生长^[119]。报道球茎甘蓝在室内条件下对南方根结线虫防治效果较好^[120]。据研究, 万寿菊秸秆中石竹烯、法尼烯、柠檬烯等挥发性萜类化合物含量较高, 并试验得出万寿菊强抑菌作用是多种抑菌成分协同、多靶点作用的结果, 而且各形态中以风干粉末效果最佳^[116]。适量的万寿菊粉末不仅显著促进重茬幼苗株体和根系生长, 而且降低重茬土壤中根皮苷等酚酸类物质含量, 增加土壤中细菌数量而降低真菌数量, 真菌群落结构改变, 土壤环境和土壤微生物群落结构显著改善。但万寿菊生长旺盛, 需合理间作混作, 避免与果树竞争, 也可通过异地还田利用。葱根系分泌的二甲基二硫醚和二烯丙基二硫醚能够显著抑制 4 种镰孢菌菌丝的生长和孢子萌发^[6], 葱根系分泌物还能显著降低根皮苷等主要酚酸含量, 这可能是丰富的细菌将其转化为其他物质^[121], 并显著提高连作幼苗的株高和鲜重。葱的特点在于与苹果混栽或间作后, 可通过根系不断分泌抑菌物质明显减轻连作障碍的发生, 较小麦、芥菜混栽效果更佳^[6,40]。Arnault 等^[122]在土壤中施入葱属植物(韭菜、洋葱)废料也具有较好的生物熏蒸效果, 但低温烘干处理葱会造成挥发性成分损失, 降低抑菌效果^[116]。

广义的生物熏蒸用材料还应包括绿肥、家禽粪便甚至动物有机体, 利用其有机质在分解过程中产生的挥发性杀生气体抑制或杀死土壤有害生物, 也被称作生物消毒^[41,116,122-125]。先将有机材料与土壤参混, 经灌水后用塑料膜覆盖^[126], 促使土壤形成厌氧环境, 有机碳源被分解成挥发性有毒物质抑制土壤中的病原微生物, 也被称为厌氧熏蒸^[127]。Shrestha 等^[128]总结出生物熏蒸和厌氧熏蒸对细菌、卵菌和真菌的抑制率为 59%~94%。同期 Yim 等^[14]研究证实, 真菌受生物熏蒸的影响较细菌大^[14]。生物(厌氧熏蒸)生态和环境风险小, 且作物产量与传统化学熏蒸差异不显著, 可成为代替化学熏蒸控制连作障碍的有效措施^[14,122,128]。但 Mazzola 等^[129]认为, 生物熏蒸植物残体的活性物质很容易挥发和消耗, 有害真菌会逐渐恢复并再次感染。因此, 需结合其他方法才能发挥生物

熏蒸的最佳效果。

4 抗性砧木与品种

砧木抗性与苹果重茬连作障碍程度密切相关,因此选育出抗性强品种或砧木,有望从根本上解决苹果重茬障碍^[123]。国内外学者在抗重茬砧木的选育和抗性比较上开展了研究,取得了部分成效。Zurawicz 等^[130]研究发现,连作条件下 M 系列的 M9 和 M26 以及 P 系列的 P14、P60 和 P67 砧木抗性较好。美国康奈尔大学培育出了 G 系列或 CG 系列对苹果重茬病具有较好抗性的砧木,对腐霉菌 (*Pythium ultimum*) 的抗性明显高于 M26、MM111 和 MM166^[131],其中 G935 在病原菌侵染的条件下比 B9 表现出更强的抗性^[132]。Isutsa 等^[133]较早从总生物量、根坏死、根部真菌和根腐线虫评价发现,CG30 和 CG6210 也表现出比 M 系列砧木具有更好的抗重茬特性,此后也被其他学者所证实^[76, 134-135]。但国内报道不同,通过不同砧木嫁接同一富士冠军品种盆栽生长及生理指标的比较,得出 M26、G41、Re1:54-118、G11 砧木耐重茬, G935、G30、GX、T337 砧木较耐重茬,而 Pajam2、B9、Pajam1、M9 砧木不耐重茬^[136]。此外,王来平等^[137]从生长量、叶绿素含量、叶片光合以及叶片抗氧化酶活性等方面研究认为,引进的砧木 AM1(山东省果树所从美国引进)抗重茬能力强,次为平邑甜茶和八棱海棠,而 M9T337 抗重茬能力最弱。这些结论与国外报道不一致,可能与砧木来源、土壤类型、试验时期等因素有关,还需在不同自然条件下进一步验证。

国内学者对我国现有几个主要砧木从叶根生理和土壤生物特性等方面也做了抗重茬评价^[13, 137-142],一致得出平邑甜茶抗重茬性较强,生长受重茬的影响小,适应和改善重茬土壤环境较好,其次为楸子、八棱海棠和新疆野苹果。但平邑甜茶抗盐碱能力差,不宜在西北地区推广应用。高付凤^[143]以砧木光合参数和抗氧化能力为指标,初选出耐受重茬能力强于平邑甜茶的 E2-23 等砧木优系。刘小勇等^[144]比较了嫁接品种的成活率和叶根重等指标,发现倒挂珍珠砧木较抗重茬。姜中武等^[145]采集八棱海棠和烟台沙果进行硬枝扦插,筛选出易扦插生根的有望抗重茬优良株系。赵续生等^[146]将组织培养与根皮胥胁迫诱变相结合,筛选出 2

株抗根皮胥突变体。倪蔚茹等^[147]以平邑甜茶为砧木,研究 5 个嫁接品种各项参数后认为,“富士 2001”和“宫崎短富”较抗重茬,而“烟富 3 号”“红将军”和“首富 1 号”等苹果品种受重茬障碍影响较大。

此外,脱毒技术也是解决重茬的有效途径之一。传统苹果苗木繁育还是大树改接和引种,都通过嫁接无性繁殖,长此以往容易造成病害累积和传播。我国 60%~80% 的苹果主栽品种带有潜伏性病毒^[148]。果树感染病毒后树势衰弱,品质和产量降低,脱除病毒后植株长势快,产量显著提高。据报道,以八棱海棠为基础的 5 年生脱毒苹果品种红将军植株,在重茬园的无花叶、花脸锈果症状,以及长势、产量、品质方面均显著高于或优于未脱毒果树^[149]。脱毒品种烟富 3 号同样表现出良好的抗重茬性^[150]。

5 综合防治

苹果重茬障碍是多因素综合作用的结果,单一防治措施很难达到理想的效果。因此,综合措施防控苹果连作障碍逐渐被重视^[151],这也在实践中得到验证。一是传统土壤消毒、化学熏蒸与生物熏蒸结合。刘小勇等^[32]研究认为,重茬园采用土壤暴晒+福尔马林倍液消毒+定植孔填埋绿肥的综合措施较单一措施能更好促进苹果幼树生长。二是化学熏蒸与微生物防治结合。高锰酸钾对土壤灭菌后或过硫酸铵处理连作土壤后施用木霉菌肥^[152-153],棉隆熏蒸土壤后施入海藻菌肥^[154],多菌灵与微生物有机肥掺混后一同施入土壤等^[155],或土壤消毒后人工接种 VAM 来控制苹果再植病^[20, 31, 156],这类措施的共同特点在于提前杀灭病原菌,在降低土壤原有微生物种类与数量的前提下引入外源菌,减少了菌间竞争,更利于有益外源菌种的定殖^[77]。三是化学熏蒸与生物熏蒸结合。棉隆熏蒸+葱轮作,较其单一种植措施显著增加了平邑甜茶幼苗地下地上生物量^[4];杀菌剂与十字花科种子粉混合施入土壤,分别起到了降低有害真菌侵染再植幼树和改善土壤微生物群落组成,苹果产量同化学熏蒸相近^[118]。四是生物熏蒸与抗性砧木结合。在种植前土壤中使用少量芸苔-芥菜种子粉可以使苹果再植病得到有效的控制,与抗重茬砧木 G41 或 G210 等结合效果更好^[157]。五是生物炭与化肥结

合。生物炭与磷肥配施条件下, 平邑甜茶幼苗生长量与土壤酶活性显著高于单施生物炭处理^[50]。六是生物炭与有机肥结合。生物炭与甲壳素等有机肥配施后显著促进树体生长发育, 提高土壤酶活性和减少尖孢镰孢菌数量, 较生物炭或有机肥单一施用效果更好^[158-159]。七是有益微生物与肥料结合。有益微生物与有机肥结合的生物有机复合肥对分解植物毒素有促进作用^[121]。夏季施化肥配合秋季施生物有机复合肥可显著改善重茬苹果园土壤环境及对苹果幼树生长发育的影响^[160]。八是各种技术的综合利用。如毛志泉等^[123]提出的“冬前开沟、清除残根、穴施菌肥、葱树混栽”综合技术, 较好地解决了苹果重茬障碍。另外, 鉴于有害真菌的顽固性, 也需制定果园的短期和长期应对策略, 以免病原菌重新生长繁殖和连作障碍的反复发作。

6 建议与展望

国内环渤海湾产区苹果园重茬研究较早, 在主要致病机理和防治上开展了大量试验, 对指导生产有积极意义。近年来西北黄土高原苹果陆续进入更新期, 但重建经验不足, 缺乏有效的防治措施, 故需在借鉴东部已有的防治技术基础上, 结合实际筛选深化、组装创新, 使其更加经济实用, 需开展如下几个方面的研究。一是抗重茬砧木和品种筛选。加大对国内现有主要砧木和栽培品种的抗重茬试验, 在已有的基础上挖掘苹果自身遗传潜力, 筛选低敏感高耐受, 适合乔化和矮化的适宜砧木, 以及抗重茬的优良品种; 同时对从国外引进的具有抗重茬倾向的矮砧试验筛选。二是拮抗菌筛选与应用。针对病原菌筛选拮抗有益菌种, 研发适宜载体以维持长久的抗病菌群数量, 提高果园定植和抗重茬效果, 研发与其他有益菌的复合制剂。三是熏蒸植物筛选。从各种适宜果园种植的植物中, 筛选有抑制或杀灭病原微生物的拮抗植物。四是土壤处理技术研发。研发低毒、无残留、高效的矿物源土壤处理剂。五是绿色综合防控研究。应用各种绿色环保措施包括有机物料和生物炭等措施的联合应用研究^[161-162], 结合果园肥水等管理, 改善果园环境, 综合提高果园生态和经济效益。

总之, 应综合运用各种抗重茬技术, 注重高

效和无害化, 结合多层次的耕作制度和管理制度, 开展以农业防治和生物防治为主的综合防治措施, 优势互补, 兼顾生态效应, 综合发挥抗重茬作用, 将有利于长期、有效、稳定解决苹果重茬障碍, 也成为未来再植病害防控的方向。

参考文献:

- [1] 梁志怀, 魏林, 李世东, 等. 植物病原性连作障碍研究报告进展[J]. 湖南农业科学, 2012(5): 73-77.
- [2] BUNLONG Y, KORNELIA S, TRAUD W. Evaluation of apple replant problems based on different soil disinfection treatments—links to soil microbial community structure? [J]. *Plant and Soil*, 2013, 366(1-2): 617-631.
- [3] 李家家, 相立, 潘凤兵, 等. 平邑甜茶幼苗与葱混作对苹果连作土壤环境的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(10): 1853-1862.
- [4] 徐少卓, 赵玉文, 王义坤, 等. 棉隆熏蒸加短期轮作葱对平邑甜茶幼苗生长及其生理的影响[J]. 园艺学报, 2018, 45(6): 1021-1030.
- [5] 肖宏. 土壤消毒和轮作对克服苹果连作障碍效果的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2004.
- [6] 王功帅. 环渤海连作土壤真菌群落结构分析及混作葱减轻苹果连作障碍的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [7] PERUZZI A, RAFFAELLI M, GINANNI M, et al. An innovative self-propelled machine for soil disinfection using steam and chemicals in an exothermic reaction[J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 110: 434-442.
- [8] 杭波, 韩青海, 李庆军, 等. 重茬苹果园土壤理化性质变化及对幼树生长结果的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(21): 12732-12734; 12738.
- [9] 张利英, 李贺年, 翟姗姗, 等. 太阳能土壤消毒在草莓保护地栽培中的应用效果[J]. 北方园艺, 2010(14): 67-68.
- [10] MANICI L M, KELDERER M, FRANKEWHITTLE I H, et al. Relationship between root-endophytic microbial communities and replant disease in specialized apple growing areas in Europe [J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 72(10): 207-214.
- [11] STRAUSS S L, KLUEPFEL D A. Anaerobic soil disinfection: A chemical-independent approach to preplant control of plant pathogens[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2015, 14(11): 2309-2318.
- [12] CAPUTO F, NICOLETTI F, PICIONE F D L, et al. Rhizospheric changes of fungal and bacterial communi-

- ties in relation to soil health of multi-generation apple orchards[J]. *Biological Control*, 2015, 88: 8–17.
- [13] 赵新. 苹果砧木根系分泌物中酚类物质与连作障碍抗性关系的初步研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [14] YIM B, HANSCHEN F S, WREDE A, et al. Effects of biofumigation using *Brassica juncea* and *Raphanus sativus* in comparison to disinfection using Basamid on apple plant growth and soil microbial communities at three field sites with replant disease[J]. *Plant and Soil*, 2016, 406: 389–408.
- [15] 徐少卓, 王义坤, 王珂, 等. 不同浓度棉隆熏蒸对老龄苹果园土壤微生物环境的动态影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 290–297; 342.
- [16] MAZZOLA M, HEWAVITHARANA S S, STRAUSS S L. Brassica seed meal soil amendments transform the rhizosphere microbiome and improve apple production through resistance to pathogen reinfestation[J]. *Phytopathology*, 2015, 105: 460–469.
- [17] SPATH M, INSAM H, PEINTNER U, et al. Linking soil biotic and abiotic factors to apple replant disease: a greenhouse approach[J]. *Journal of Phytopathology*, 2015, 163(4): 287–299.
- [18] 赵国玲, 姜兴印, 孙燕, 等. 三种杀菌剂对平邑甜茶生理指标的影响[J]. *果树学报*, 2013, 30(5): 823–828.
- [19] 刘勇, 姜兴印, 许青青, 等. 三种杀菌剂连续两年施用对连作苹果园土壤镰刀菌及土壤酶活性的影响[J]. *果树学报*, 2014, 31(2): 276–281.
- [20] 薛炳焯, 罗新书. 克服苹果苗圃连作障碍的初步研究[J]. *山东农业科学*, 1990, 4: 18–19.
- [21] LINE M, HEATH A, BROWN G. Apple replant disease available fumigation treatments[J]. *Tree Fruit*, 2003, 9: 22–23.
- [22] TILSTON L E, DEAKIN G, BENNETT J, et al. Effect of fungal, oomycete and nematode interactions on apple root development in replant soil[J]. *CABI Agriculture and Bioscience*, 2020, 1(1): 265–271.
- [23] KLOSE S, ACOSTA-MARTÍNEZ A, AJWA H A. Microbial community composition and enzyme activities in a sandy loam soil after fumigation with methyl bromide or alternative biocides[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(6): 1243–1254.
- [24] 姚建华, 牛德奎, 李兆君, 等. 抗生素土霉素对小麦根际土壤酶活性和微生物生物量的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(4): 721–728.
- [25] NICOLA L, TURCO E, ALBANESE D, et al. Fumigation with dazomet modifies soil microbiota in apple orchards affected by replant disease[J]. *Applied Soil Ecology*, 2017, 113(5): 71–79.
- [26] 周一凡. 双氧水对苹果连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生长的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- [27] 相立. 老果园连作障碍关键因子及砧木响应其感染机制的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [28] 姜伟涛, 陈冉, 明常军, 等. 晶体石硫合剂熏蒸对苹果连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生长的影响[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(9): 1825–1832.
- [29] 李海航, 龚莉红, 张宗耀, 等. 酚顿试剂对竹林土壤中酚类化合物的降解作用[J]. *热带亚热带植物学报*, 2007, 15(6): 513–520.
- [30] 王青青, 胡艳丽, 周慧, 等. 根皮苷对平邑甜茶根系 TCA 循环酶的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(15): 3108–3114.
- [31] 尹承苗, 王玫, 王嘉艳, 等. 苹果连作障碍研究进展[J]. *园艺学报*, 2017, 44(11): 2215–2230.
- [32] 刘小勇, 马彦, 于良祖, 等. 重茬苹果园土壤处理试验[J]. *中国果树*, 2005(2): 16–18.
- [33] GARBEVA P, VAN VEEN J A, VAN ELSAS J D. Microbial diversity in soil: selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness[J]. *Annual Review of Phytopathology*, 2004, 42: 243–270.
- [34] 王海燕, 盛月凡, 李前进, 等. 葱、芥菜和小麦轮作对老龄苹果园土壤环境的影响[J]. *园艺学报*, 2019, 46(11): 2224–2238.
- [35] 毛志泉. 优化重茬土壤环境, 防控苹果重茬障碍[J]. *落叶果树*, 2021, 53(5): 1–4.
- [36] 张江红. 酚类物质对苹果的化感作用及重茬障碍影响机理的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2005.
- [37] 吕毅, 宋富海, 李园园, 等. 轮作不同作物对苹果园连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生理指标的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(14): 2830–2839.
- [38] 吴凤芝, 赵凤艳, 刘元英. 设施蔬菜连作障碍原因综合分析防治措施[J]. *东北农业大学学报*, 2000, 31(3): 241–247.
- [39] BHARAT K N. Evaluation of components for integrated management of apple replant disease in Himachal Pradesh[J]. *Plant Disease Research*, 2017, 32(1): 15–21.
- [40] 马子清, 段亚楠, 沈向, 等. 不同作物与再植苹

- 果幼树混栽对再植植株及土壤环境的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(19): 3815-3822.
- [41] MANICI L M, KELDERER M, CAPUTO F, et al. Impact of cover crop in preplant of apple orchards: relationship between crop health, root inhabiting fungi and rhizospheric bacteria[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2015, 95: 947-958.
- [42] 王 俊, 李凤民, 贾 宇, 等. 半干旱黄土区苜蓿草地轮作农田土壤氮、磷和有机质变化[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 439-444.
- [43] UTKHEDE S R, SMITH M E. Evaluation of monoammonium phosphate and bacterial strains to increase tree growth and fruit yield in apple replant problem soil[J]. Plant and Soil, 1993, 157: 115-120.
- [44] GUR A, LUZZATI J, KATAN J. Alternatives for soil fumigation in combating apple replant disease[J]. Acta Horticulturae, 1998, 477(477): 107-114.
- [45] 姜伟涛, 李前进, 王海燕, 等. 硫磺对苹果连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生长的影响[J]. 园艺学报, 2020, 47(7): 1225-1236.
- [46] WILSON S, ANDREWS P, NAIR T S. Non-fumigant management of apple replant disease[J]. Sci. Hort., 2004, 102(2): 221-231.
- [47] 王晓宝, 王功帅, 刘宇松, 等. 西北黄土高原地区苹果连作障碍与土壤真菌群落结构的相关性分析[J]. 园艺学报, 2018, 45(5): 855-864.
- [48] UTKHEDE R S, SMITH E M. *Phytophthora* and *Pythium* species associated with root rot of young apple trees and their control[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1991, 23(11): 1059-1063.
- [49] 王 玫, 段亚楠, 孙申义, 等. 不同氮形态对连作平邑甜茶幼苗生长及土壤尖孢镰孢菌数量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(4): 1014-1021.
- [50] 王艳芳, 王 珂, 徐少卓, 等. 生物炭介导下磷水平对连作苹果幼苗及土壤环境的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 232-237.
- [51] 王 玫, 姜伟涛, 孙申义, 等. 添加适宜氮磷对连作平邑甜茶幼苗生长及土壤环境的影响[J]. 植物生理学报, 2017, 53(9): 1687-1694.
- [52] MARINARI S, MASCIANDARO G, CECCANTI B, et al. Evolution of soil organic matter changes using pyrolysis and metabolic indices: A comparison between organic and mineral fertilization[J]. Bioresource Technology, 2007, 98: 2495-2502.
- [53] 苏立涛, 沈 向, 郝云红, 等. 有机物料对连作平邑甜茶幼苗生长及微生态环境的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(20): 187-192.
- [54] 张国栋. 有机物料厌氧和有氧发酵产物对苹果连作土壤环境及平邑甜茶幼苗生物量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [55] WANG Y, FU F, LI J, et al. Effects of seaweed fertilizer on the growth of *Malus hupehensis* Rehd. seedlings, soil enzyme activities and fungal communities under replant condition[J]. European Journal of Soil Biology, 2016, 75: 1-7.
- [56] 王 玫, 尹承苗, 孙萌萌, 等. 黄腐酸微生物菌剂对连作平邑甜茶光合特性的影响[J]. 植物生理学报, 2019, 55(1): 99-106.
- [57] 王艳芳. 苹果连作土壤中根皮苷含量的年动态及其调控措施研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [58] 王 森, 段亚楠, 孙申义, 等. 苹果连作土壤加入酒糟可减轻连作障碍[J]. 园艺学报, 2017, 44(6): 1157-1166.
- [59] MAZZOLA M, MANICI LM. Apple replant disease: role of microbial ecology in cause and control[J]. Ann Rev Phyto-pathol, 2012, 50: 45-65.
- [60] MANICI L M, CIAVATTA C, KELDERER M, et al. Replant problems in South Tyrol: Role of fungal pathogens and microbial population in conventional and organic apple orchards[J]. Plant and Soil, 2003, 256: 315-324.
- [61] 王晓琪, 姜伟涛, 姚媛媛, 等. 苹果连作障碍土壤微生物的研究进展[J]. 园艺学报, 2020, 47(11): 2223-2237.
- [62] JU R C, ZHAO Y H, LI J Y, et al. Identification and evaluation of a potential biocontrol agent, *Bacillus subtilis*, against *Fusarium* sp. in apple seedlings[J]. Annals of Microbiology, 2014, 64(1): 377-383.
- [63] ZHANG Z B, CHEN Q, YIN C M, et al. The effects of organic matter on the physiological features of *Malus hupehensis* seedlings and soil properties under replant conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 146: 52-58.
- [64] 毛志泉, 张继祥, 胡艳丽, 等. 有机物料对平邑甜茶根系 32 P 吸收动力学参数的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(11): 2365-2371.
- [65] 尹 芳, 张无敌, 宋洪川, 等. 沼液对某些植物病原菌抑制作用的研究[J]. 可再生能源, 2005(2): 9-11; 36.
- [66] 尹承苗, 陈学森, 沈 向, 等. 不同浓度有机物料发酵液对连作苹果幼树生物量及土壤环境的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(6): 1450-1458.

- [67] 杜文艳, 王 玫, 闫助冰, 等. 残次苹果发酵产物对连作土壤环境及‘平邑甜茶’幼苗生长的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(5): 1443-1450.
- [68] 韩建玮. 核桃壳木醋液防治苹果再植病初步研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2019.
- [69] SAIFULLAH, DAHLAWI S, NAEEM A, et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities[J]. Science of the Total Environment, 2018, 625: 320-335.
- [70] 吕伟静, 陈 冉, 马志婷, 等. 生物炭及改性生物炭对平邑甜茶幼苗生长及土壤的影响[J]. 植物生理学报, 2021, 57(3): 597-604.
- [71] 毛云飞, 郭小静, 王增辉, 等. 麦芽糖等糖类对重茬土壤改良和苹果砧木生长的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 298-304.
- [72] 李俊芝, 王功帅, 胡艳丽, 等. 几种低分子量有机酸对连作平邑甜茶幼苗光合与根系生长的影响[J]. 园艺学报, 2014, 41(12): 2489-2496.
- [73] LI CHAO, ZHAO QI, GAO TENG TENG, et al. The mitigation effects of exogenous melatonin on replant disease in apple[J]. Journal of pineal research, 2018, 65(4): 12523.
- [74] 王 柯. 苦参碱对苹果连作土壤微生物及平邑甜茶幼苗影响的研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [75] 潘凤兵. 蚯蚓发酵产物对苹果连作障碍防控效果及机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [76] RUMBERGER A, YAO S, MERWIN I A, et al. Rootstock genotype and orchard replant position rather than soil fumigation or compost amendment determine tree growth and rhizosphere bacterial community composition in an apple replant soil[J]. Plant and Soil, 2004, 264: 247-260.
- [77] MAZZOLA M, FREILICH S. Prospects for biological soilborne disease control: application of indigenous versus synthetic microbiomes [J]. Phytopathology, 2017, 107:256-263.
- [78] RUMBERGER A, MERWIN I A, THIES J E. Microbial community development in the rhizosphere of apple trees at a replant disease site[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39: 1645-1654.
- [79] 刘丽英, 刘珂欣, 朱 浩, 等. 有机物料厌氧发酵液中拮抗苹果再植障碍病原真菌的细菌筛选及其防治效果[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3407-3415.
- [80] 王佳佳. Bs-0728 菌株室内发酵条件及其对苹果再植病害的防治作用研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
- [81] 刘丽英, 刘珂欣, 迟晓丽, 等. 枯草芽孢杆菌 SNB-86 菌肥对连作平邑甜茶幼苗生长及土壤环境的影响[J]. 园艺学报, 2018, 45(10): 2008-2018.
- [82] 刘丽英, 丁文龙, 曹雅杰, 等. 苹果连作生防细菌 B6 对平邑甜茶幼苗生物量及连作土壤环境的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(12): 4165-4171.
- [83] 胡秀娜. 苹果根际促生菌的筛选鉴定及其对苹果砧木平邑甜茶的促生效果[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [84] 陶永梅, 潘洪吉, 黄 健, 等. 新型生防微生物因子贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*) 的研究与应用[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(9): 26-33.
- [85] 闫助冰. 苹果连作障碍生防菌的筛选、鉴定及验证[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [86] WATSON T T, FORGE T A, NELSON L M. Pseudomonads contribute to regulation of *Pratylenchus penetrans* (Nematoda) populations on apple[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2018, 64 (11): 775-785.
- [87] 张富国, 王玉香, 韩宇宁, 等. 假单胞菌 SH1 菌株对苯甲酸类化合物的生物降解[J]. 南开大学学报(自然科学版), 1999(4): 43-47.
- [88] 祁国振, 毛志泉, 胡秀娜, 等. 苹果根际自毒物质降解菌的筛选鉴定及降解特性研究[J]. 微生物学通报, 2016, 43(2): 330-342.
- [89] 张 一, 王凤忠, 张铭铄, 等. 苹果园土壤中一株根皮苔降解菌的筛选[J]. 山东农业科学, 2011(12): 59-63.
- [90] 蒋汉林, 李广华, 易图永. 苹果再植病防治研究进展[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(16): 68-70.
- [91] UTKHEDE R, SMITH E. Impact of chemical, biological and cultural treatments on the growth and yield of apple in replant-disease soil[J]. Australasian Plant Pathology. 2000, 29(2): 129-136.
- [92] SAINI R, DUDEJA S S, GIRI G, et al. Isolation, characterization and evaluation of bacterial root and nodule endophytes from chickpea cultivated in Northern India [J]. Journal of Basic Microbiology, 2015, 55: 74-81.
- [93] CARRIÓN V J, PEREZ-JARAMILLO J, CORDOVEZ V, et al. Pathogen-induced activation of disease-suppressive functions in the endophytic root microbiome [J]. Science, 2019, 366: 606-612.
- [94] WENJIA W, LIANFENG G, SHANWEN Y, et al. Genome-wide analysis and transcriptomic profiling of

- the auxin biosynthesis, transport and signaling family genes in moso bamboo (*Phyllostachys heterocycla*) [J]. BMC genomics, 2017, 18(1): 870.
- [95] 邓振山, 马亚茹, 何 园, 等. 苹果树内生菌筛选及其对苹果腐烂病防治效果[J]. 微生物学杂志, 2016, 36(4): 16-21.
- [96] 刘丽英, 许 超, 刘珂欣, 等. 两株植物内生拮抗菌对连作土盆栽平邑甜茶幼苗生长及土壤酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2019, 46(7): 1238-1248.
- [97] 李 亮, 蔡伯岩. 丛枝菌根真菌缓解连作障碍的研究进展[J]. 生态学杂志, 2016, 35(5): 1372-1377.
- [98] VIGO C, NORMAN R J, HOOKER E J. Biocontrol of the pathogen *Phytophthora parasitica* by arbuscular mycorrhizal fungi is a consequence of effects on infection loci[J]. Plant Pathology, 2000, 49(4): 509-514.
- [99] ABDEL-FATTAH G M, SHABANA Y M. Efficacy of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus clarum* in protection of cowpea plants against root rot pathogen *Rhizoctonia solani* [J]. Zeitschrift fur Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz, 2002, 109(2): 207-215.
- [100] ABDALLA E M, ABDEL-FATTAH M G. Influence of the endomycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on the development of peanut pod rot disease in Egypt [J]. Mycorrhiza, 2000, 10(1): 29-35.
- [101] 朱红惠, 姚 青, 李浩华, 等. AM 真菌对青枯菌的抑制和对酚类物质的影响[J]. 微生物学通报, 2004(1): 1-5.
- [102] XUE BINGYE, YAO SHENG RUI, VEGHELYI K. Studies on replant problems of apple and peach [J]. Acta Hort., 1998, 477: 83-88.
- [103] RAJ H, SHARMA S. Integration of soil solarization and chemical sterilization with beneficial microorganisms for the control of white root rot and growth of nursery apple [J]. Sci. Hortic., 2009, 119(2): 126-131.
- [104] 张先富, 相 立, 王艳芳, 等. 草酸青霉 A1 菌株的鉴定及对苹果 4 种镰孢病菌的拮抗作用[J]. 园艺学报, 2016, 43(5): 841-852.
- [105] 徐文凤. 环渤海湾地区重茬苹果园土壤真菌群落多样性及生防真菌的筛选[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
- [106] 王义坤, 苏厚文, 段亚楠, 等. 三种菌肥对连作平邑甜茶根系生长和土壤真菌群落多样性的促进效应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 316-324.
- [107] 宋富海, 王 森, 张先富, 等. 球毛壳 ND35 菌肥对苹果连作土壤微生物和平邑甜茶幼苗生物量的影响[J]. 园艺学报, 2015, 42(2): 205-213.
- [108] JIANG W, CHEN R, ZHAO L, et al. Isolation of phloridzin-degrading, IAA-producing bacterium *Ochrobactrum haematophilum* and its effects on the apple replant soil environment [J]. Horticultural Plant Journal, 2023, 9(2): 199-208.
- [109] 李恩琛, 张文军, 张树武, 等. 生防细菌复配对苹果主要病原真菌抑菌活性筛选及其稳定性[J]. 西北农业学报, 2020, 29(8): 1270-1277.
- [110] 张 荣, 黄君霞, 段亚楠, 等. 普通青霉 D12 和罗伊氏乳杆菌发酵产物促进平邑甜茶幼苗生长和连作土壤生物环境改善[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(2): 344-356.
- [111] 赵 璐, 刘 胜, 胡同乐, 等. 复合微生物菌剂对苹果再植病害的生防效果测定及拮抗菌株鉴定[J]. 植物保护学报, 2019, 46(1): 208-215.
- [112] 王建斌, 孟玉萍, 曹秋芬. 重茬苹果园早果丰产优质栽培试验[J]. 中国果树, 2014(5): 17-19.
- [113] BERENDSEN R L, VISMANS G, YU K, et al. Disease-induced assemblage of a plant-beneficial bacterial consortium [J]. The ISME Journal, 2018, 12: 1496-1507.
- [114] 曹焯程, 刘晓漫, 郭美霞, 等. 作物土传病害的危害及防治技术[J]. 植物保护, 2017, 43(2): 6-16.
- [115] SMOLINSKA U, MORRA M J, KNUDSEN G R, et al. Isothiocyanates produced by Brassicaceae species as inhibitors of *Fusarium oxysporum* [J]. Plant Disease, 2003, 87(4): 407-412.
- [116] 王晓芳. 万寿菊生物熏蒸对苹果连作障碍缓解效果及其机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [117] DMN W, REARDON C L, PAULITZ T C, et al. Long-term suppression of *Pythium abappressorium* induced by *Brassica juncea* seed meal amendment is biologically mediated [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 51, 44-52.
- [118] MAZZOLA M, BROWN J. Efficacy of brassicaceous seed meal formulations for the control of apple replant disease in conventional and organic production systems [J]. Plant Disease, 2010, 94: 835-842.
- [119] MAZZOLA M, GRANATSTEIN D M, ELFVING D C, et al. Suppression of specific apple root pathogens by *Brassica napus* seed meal amendment regardless of glucosinolate content [J]. Phytopathology, 2001, 91: 673-679.
- [120] 曹素芳, 邹雅新, 马 娟, 等. 生物熏蒸对南方根结

- 线虫存活的室内测定[J]. 华北农学报, 2009, 24 (增刊): 270-274.
- [121] LAUZON C, POTTER S, PROKOPY R. Degradation and detoxification of the dihydrochalcone phloridzin by enterobacter agglomerans, a bacterium associated with the apple pest, *Rhagoletis pomonella*[J]. Environmental Entomology, 2003, 32(5): 953-962.
- [122] ARNAULT I, FLEURANCE C, VEY F, et al. Use of Alliaceae residues to control soil-borne pathogens[J]. Industrial Crops and Products, 2013, 49: 265-272.
- [123] 毛志泉, 尹承苗, 陈学森, 等. 我国苹果产业节本增效关键技术 V: 苹果连作障碍防控技术[J]. 中国果树, 2017(5): 1-4; 14; 102.
- [124] 李明社, 李世东, 缪作清, 等. 生物熏蒸用于植物土传病害治理的研究[J]. 中国生物防治学报, 2006, 22(4): 296-302.
- [125] 郝永娟. 土壤添加剂防治作物土传病害研究概述[J]. 天津农业科学, 2000, 6(2): 52-54.
- [126] MOMMA N. Biological soil disinfestation (BSD) of soilborne pathogens and its possible mechanisms[J]. Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ, 2008, 42(1): 7-12.
- [127] HEWAVITHARANA S S, MAZZOLA M. Carbon source-dependent effects of anaerobic soil disinfestation on soil microbiome and suppression of *Rhizoctonia solani* AG-5 and *Pratylenchus penetrans*[J]. Phytopathology, 2016, 106(9): 1015-1028.
- [128] SHRESTHA U, AUG R M, Butler D M. A meta-analysis of the impact of anaerobic soil disinfestation on pest suppression and yield of horticultural crops[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7: 1254.
- [129] MAZZOLA M, REARDON C L, BROWN J. Initial *Pythium* species composition and Brassicaceae seed meal type influence extent of *Pythium*-induced plant growth suppression in soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 48: 20-27.
- [130] ZURAWICZ E, PRUSKI K, LEWANDOWSKI M, et al. Effect of replant disease on growth of *Malus x domestica* 'ligol' cultivated on P-series apple rootstocks[J]. Journal of Agricultural Science, 2013, 5(10): 28-34.
- [131] MAZZOLA M, BROWN J, ZHAO X, et al. Interaction of brassicaceous seed meal and apple rootstock on recovery of *Pythium* spp. and *Pratylenchus penetrans* from roots grown in replant soils[J]. Plant Disease, 2009, 93: 51-57.
- [132] ZHU Y, SHIN S, MAZZOLA M. Genotype responses of two apple rootstocks to infection by *Pythium ultimum* causing apple replant disease[J]. Canadian Journal of Plant Pathology, 2016, 38(4): 483-491.
- [133] ISUTSA DK, MERWIN IA. Malus germplasm varies in resistance or tolerance to apple replant disease in a mixture of New York orchard soils[J]. Hort. Sci., 2000, 35(2): 262-268.
- [134] LEINFELDER M M, MERWIN I A. Rootstock selection, preplant soil treatments, and tree planting positions as factors in managing apple replant disease [J]. HortScience, 2006, 41(2): 394-401.
- [135] MARTINEZ C A, LOUREIROA M E, OLIVA M A, et al. Differential responses of superoxide dismutase in freezing resistant *Solanum curtilobum* and freezing sensitive *Solanum tuberosum* subjected to oxidative and water stress[J]. Plant Science, 2001, 160: 505-515.
- [136] 张春禹. 不同苹果矮化自根砧的抗重茬和抗旱性比较研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [137] 王来平, 薛晓敏, 陈汝, 等. 重茬胁迫对不同苹果砧木叶片光合能力及抗氧化酶活性的影响[J]. 天津农业科学, 2019, 25(9): 10-14.
- [138] 王元征, 尹承苗, 陈强, 等. 苹果 5 种砧木幼苗对连作土壤的适应性差异研究[J]. 园艺学报, 2011, 38(10): 1955-1962.
- [139] 郭小静, 韩甜甜, 王荣, 等. 重茬胁迫下苹果不同砧木幼苗生长及根系吸收的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1312-1319.
- [140] GUO X J, WANG R, ZHANG Z, et al. The influence of replant stress on hormone and absorption of root for different apple rootstocks[J]. Advanced Materials Research, 2015, 1120: 926-931.
- [141] 尹承苗, 相立, 孙传香, 等. 不同苹果砧木对连作土壤微生物及酶活性的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(12): 2423-2430.
- [142] 张江红, 张殿生, 毛志泉, 等. 苹果砧木幼苗根系分泌物的分离与鉴定[J]. 河北农业大学学报, 2009, 32(4): 29-32.
- [143] 高付凤. 初选苹果砧木优系重茬抗性检测及组培快繁[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
- [144] 刘小勇, 马彦, 彭勤文, 等. 重茬苹果园砧木比较试验[J]. 山西果树, 2005(1): 38.
- [145] 姜中武, 于青, 刘美英, 等. 苹果抗重茬砧木的扦插筛选试验[J]. 烟台果树, 2011(4): 13-14.

- [146] 赵绪生, 王亚南, 齐永志, 等. 两种苹果砧木抗根皮甘突变体筛选及生理特性研究[J]. 中国植保导刊, 2012, 32(7): 13-16.
- [147] 倪蔚茹, 王安然, 贺锡燕, 等. 重茬土对相同砧木不同苹果品种生理指标及叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 49(18): 3597-3607.
- [148] 姜中武, 宋来庆, 刘娟, 等. 苹果病毒病与无病毒苗木建园[J]. 烟台果树, 2014(1): 27-30.
- [149] 李晶, 王新语, 张焕春, 等. 脱毒红将军苹果品种在重茬果园的栽培表现与果实品质分析[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(13): 59-60, 82.
- [150] 冯万强, 姜福东, 于强. 重茬对‘烟富3号’苹果生理指标及叶片抗氧化酶活性的影响[J]. 烟台果树, 2021(02): 14-16.
- [151] DEAKIN G, FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ F, BENNETT J, et al. The effect of rotating apple rootstock genotypes on apple replant disease and rhizosphere microbiome[J]. *Phytobiomes Journal*, 2019, 3: 273-285.
- [152] 徐少卓, 王晓芳, 陈学森, 等. 高锰酸钾消毒后增施木霉菌肥对连作土壤微生物环境及平邑甜茶幼苗生长的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(5): 1285-1293.
- [153] 黄君霞. 过硫酸铵加施菌肥对连作土壤环境及苹果幼苗生长的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
- [154] 刘超, 相立, 王森, 等. 土壤熏蒸剂棉隆加海藻菌肥对苹果连作土微生物及平邑甜茶生长的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(10): 1995-2002.
- [155] 付风云, 相立, 徐少卓, 等. 多菌灵与微生物有机肥复合对连作平邑甜茶幼苗及土壤的影响[J]. 园艺学报, 2016, 43(8): 1452-1462.
- [156] 杨兴洪, 罗新书, 刘润进, 等. 利用 VA 菌根真菌解决苹果重茬问题[J]. 落叶果树, 1992(4): 5-7.
- [157] WANG L K, MAZZOLA M. Interaction of brassicaceae seed meal soil amendment and apple rootstock genotype on microbiome structure and replant disease suppression[J]. *Phytopathology*, 2019, 109(4): 607-614.
- [158] 王艳芳, 相立, 徐少卓, 等. 生物炭与甲壳素配施对连作平邑甜茶幼苗及土壤环境的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(4): 711-719.
- [159] 王玫, 徐少卓, 刘宇松, 等. 生物炭配施有机肥可改善土壤环境并减轻苹果连作障碍[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 220-227.
- [160] 刘威. 不同施肥组合对重茬苹果园树体生长的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [161] 柳建伟, 李金峰, 史广亮, 等. 平凉市苹果叶部病害绿色防控技术规程[J]. 寒旱农业科学, 2024, 3(4): 388-392.
- [162] 韩富军, 刘小勇, 彭海, 等. 临夏花椒主要病虫害及综合防治措施[J]. 寒旱农业科学, 2022, 1(12): 260-266.