

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2022)01-0071-07

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2022.01.009

马铃薯连作障碍及其防控的研究进展

丁凯鑫*, 王立春, 单莹, 田国奎, 王海艳, 李风云, 潘阳, 庞泽, 史乔丹

(黑龙江省农业科学院克山分院/农业农村部马铃薯生物学与遗传育种重点实验室, 黑龙江 齐齐哈尔 161600)

摘要: 连作障碍现象在马铃薯生产中普遍存在, 已成为制约中国马铃薯产业发展的主要原因之一。马铃薯连作障碍的形成是多个复杂因素相互作用产生的结果, 包括土壤酶活性的改变、土壤养分失衡、自毒物质积累、土壤微生物区系改变、土壤次生盐渍化及酸化。如何解决马铃薯连作障碍已成为当前迫在眉睫的问题, 因此针对难题具体阐述了轮作、抗性品种应用、土壤灭菌消毒、植物生长调节剂的应用和生物防治技术防控措施, 以期缓解马铃薯连作障碍, 从而提高马铃薯生产质量。文章综述了连作障碍对马铃薯生长发育的影响、成因和防控的关键措施, 并对今后如何更有效的解决连作障碍进行了展望, 为后期研究马铃薯连作障碍提供更深入的有力支撑。

关键词: 马铃薯; 连作障碍; 形成原因; 措施

Research Progress in Potato Continuous Cropping Obstacles and Their Prevention and Control

DING Kaixin*, WANG Lichun, SHAN Ying, TIAN Guokui, WANG Haiyan, LI Fengyun, PAN Yang, PANG Ze, SHI Qiaodan

(Keshan Branch, Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences/Potato Biology and Genetics Key Laboratory of Ministry of

Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, Qiqihar, Heilongjiang 161600, China)

Abstract: The phenomenon of potato continuous cropping obstacles has been widespread and has become the main reason restricting the development of the potato industry. The formation of potato continuous cropping obstacles is the result of the interaction of multiple complex factors, including the changes in soil enzyme activity, soil nutrient imbalance, auto-toxin accumulation, soil microflora changes, soil secondary salinization and acidification. How to solve the obstacle of continuous potato cropping has become an urgent problem. Therefore, the prevention and control measures such as crop rotation, application of resistant varieties, soil sterilization and disinfection, application of growth regulators, and biological control technology are specifically explained in response to the problem. The purpose was to alleviate continuous potato cropping obstacles, thereby improving the quality of potato production. This article reviewed the influences of continuous cropping obstacles on potato growth and development, the causes of continuous potato cropping obstacles and key measures for prevention and control, and looks forward to how to solve the continuous cropping obstacles more effectively in the future, providing more in-depth and powerful support for the later research on potato continuous cropping obstacles.

Key Words: potato; continuous cropping obstacle; cause; measure

收稿日期: 2021-12-27

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-09-ES37)。

作者简介: 丁凯鑫(1996-), 男, 硕士, 研究实习员, 从事马铃薯遗传育种研究。

*通信作者(Corresponding author): 丁凯鑫, E-mail: 584039625@qq.com。

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是重要的薯类作物之一,其作为薯类品种的主要输出产品,具有比较突出的经济效益,在薯类种植业生产中占据重要地位^[1]。马铃薯不仅富含淀粉、蛋白质、氨基酸等营养元素,还含有人体所需的维生素C和B族维生素,其块茎还含有大量优质纤维素和微量元素^[2,3]。且粮菜兼用,在中国广泛种植。但随着中国马铃薯种植面积增大,连作年限逐渐增长,势必会影响马铃薯叶片、根系以及块茎的生长和发育。近年来,中国农业快速发展,薯类产品在市场领域价值收入可观,但由于种植户连年在一块土地上栽种马铃薯或其近缘作物,从而引发马铃薯的连作障碍,导致植株生长发育异常,以及降低马铃薯的抗病性和抗逆性,进而影响产量和品质^[4]。其表现为作物生长发育缓慢,质量产量不佳,在恶劣天气情况下,由于作物抗逆性较低,往往会出现局部死苗或不发苗现象。连作物根系短小,入土不深,分枝变短,生理活性降低,造成作物不能有效吸收水分和养分^[5,6]。连作所涉及的作物有很多种,主要包括粮食类:马铃薯、玉米、大豆等;药用植物类:三七、地黄、人参等;园艺作物类:花卉、果树、观赏植物等;饲草类:豆科牧草、禾本科牧草及类牧草等。经过长期连作马铃薯,势必造成马铃薯生产性能下降,因此缓解连作障碍是当前马铃薯种植业急需解决的问题。近年来,虽然人们对连作障碍进行了大量研究,但始终没有发现有效克服的措施,现有措施只是对连作物有缓解作用或是在产量和质量上有相对改变。本文总结连作对马铃薯生长发育的影响,综述连作障碍的成因以及针对该问题的防控技术,为今后马铃薯实际生产中缓解连作障碍提供理论依据。

1 连作对马铃薯生长发育的影响

连作会造成马铃薯各器官生长发育异常,影响最终产量的形成^[7]。有研究表明,马铃薯连作后可导致幼苗的净光合速率降低,以及叶片的SPAD(Soil and plant analyzer development)值下降,连作达到3年时,马铃薯的株高、茎粗以及

地上部生物量均显著低于对照^[8]。沈宝云等^[9]研究指出,连作3年以上,会导致马铃薯株高、块茎产量出现显著降低。长期连作会造成马铃薯茎秆和叶片损伤,以及对植株形态的密度和高度损害程度很大,对植株生长产生抑制作用^[10]。回振龙等^[11]研究表明,马铃薯连作5年,可导致幼苗叶片中细胞膜稳定指数、渗透调节物质含量显著下降,块茎产量和硬度降低。也有研究表明,与非连作马铃薯相比,连作3~5年显著降低了马铃薯源叶器官的活性,主茎分枝数和叶片干物质含量也均显著降低,同时导致生育后期同化产物向块茎的运输减少,降低块茎产量^[12]。刘星等^[13]研究表明,马铃薯连作3年后,植株同化物转运和利用失衡导致块茎产量下降,降幅达21.68%~75.67%,严重限制了植株生产力。

马铃薯根系及土壤环境受连作的影响也发生相应变化。连作障碍对植物的影响首先作用于根系。马铃薯连作3年后会显著增加植株根系的总根长、表面积和根尖数,并且土壤中的微生物群落结构改变,导致微生物群落结构失去平衡^[14]。连作会使栽种马铃薯的地块土壤有机质含量下降,同时土壤含盐量和容重上升,改变土壤理化性质^[15]。有研究表明,连作会降低马铃薯根系活力,降幅达28.6%~63.1%^[12]。马铃薯连作会导致地上和地下部生物量降低,连作5年内,植株的总根长、根表面积、根尖数和根冠比逐年增加^[16]。张文明等^[17]研究指出,马铃薯连作会降低根系活跃吸收面积,随着连作年限的增加,根系活力的降幅也逐年增加,并且马铃薯通过增加根系生长来主动应对连作逆境,从而调节植株的生长发育。

2 连作障碍的成因

2.1 土壤酶活性的改变

连作栽培时间的延长,会导致土壤理化性质改变,其中土壤酶活性的劣变是引发连作障碍的主要因素之一。土壤中过氧化氢酶通过分解过量的过氧化氢从而减轻其对植株的毒害作用,并且分解过程中产生的代谢物为植株的生长发育进程

提供原料。碱性磷酸酶作为最为活跃的土壤酶之一, 通过促进土壤中无机磷酸盐或有机磷酸化合物转化为植物更好吸收的无机磷, 脲酶通过促进土壤中氮素的转运来反映土壤氮素水平^[18]。周华兰等^[19]研究表明, 连作多年较新开垦土壤种植的马铃薯, 土壤中脲酶活性和磷酸酶活性有所下降。白艳茹等^[20]通过研究马铃薯连作对土壤酶活性的影响发现, 随着连作年限的延长, 土壤中蔗糖酶和脲酶活性呈下降趋势, 而不同茬次间土壤中性磷酸酶与过氧化氢酶活性无显著差异。马铃薯连作的年限越多, 土壤中的蔗糖酶、转化酶、酚氧化酶和氧化还原酶均显著下降^[21,22]。土壤酶活性与连作年限的延长有着密不可分的联系, 影响着植株的物质循环和能量交换能力, 且年限越长影响越严重。

2.2 土壤养分失衡

随着马铃薯连作年限的增加, 会造成根系土壤养分失衡。多年连作, 马铃薯根系会有选择的吸收利于自身抵御逆境的物质, 造成土壤单一养分过度消耗, 这会导致植株缺乏某些必需的营养元素, 引发马铃薯缺素症, 影响马铃薯的生长发育^[23], 而一些未被吸收的元素会随着连作年限的增加不断积累, 同样会引发土壤中次生盐渍化现象, 降低植株的抗病和抗逆性^[24]。孙权等^[25]研究表明, 连作会促使栽种马铃薯的土壤有机质含量下降, 同时显著降低了土壤中全氮、全磷及全盐含量。胡宇等^[26]研究表明, 旱地连作马铃薯, 会降低土壤中碱解氮、速效磷、速效钾含量, 同时土壤全氮、全磷、全钾含量逐渐下降, Fe、Mn 含量降低。连作也会导致微量元素比例失调, 土壤有机质含量下降, 当不能及时得到补充, 便会抑制马铃薯植株对土壤养分的吸收和利用^[27]。随着连作年限延长, 土壤性质改变较大, 因此需要利用一些措施干预此现象的发生, 达到恢复土壤肥力, 改善土壤性质的目的。

2.3 自毒物质积累

连作会导致马铃薯植株向周围环境释放出化学物质, 产生自毒作用, 从而抑制植株的生理代谢能力, 以及降低根系活力, 使植株不能正常生长。有研究表明, 植物自毒物质包含香豆素、酚

酸类、生物碱及萜类等, 以及根系分泌物和作物秸秆残渣分解产生的物质^[28,29]。杨桂丽等^[30]研究表明, 马铃薯长期连作会导致邻苯二甲酸二丁异酯及顺式-14-二十九烯等化感物质积累, 进而引发连作障碍。有些根系自毒物质尚在鉴定和研究中, 现在已经鉴定研究的自毒物质如香豆素类是通过和其他化合物之间相互影响抑制马铃薯生长^[31], 萜类通过根系直接分泌到土壤中, 生物碱其种类较多, 是一种植物毒素, 与其他化合物混合增强毒性^[32], 酚酸类对不同品种作物产生的抑制强度不同, 其可增加种子萌发时间, 抑制根系生长^[33]。

2.4 土壤微生物区系改变

马铃薯连作导致土壤微生物群落改变也是引发连作障碍的主要原因之一。根系土壤微生物主要包含两大类: 细菌、真菌。土壤中细菌和真菌的生物量可直接反映生态系统的稳定性, 但随着连作年限的增加, 会降低土壤中真菌含量^[30], 破坏了土壤主要微生物类群间相对含量的动态平衡, 同时一些寄生能力强的和快速适应生长环境的病原菌、线虫数量激增, 成为土壤中的优势种群, 抑制马铃薯生长, 发生土传病害^[34]。土传病害也是影响土壤微生物变化诱因之一, 在农业生产中, 由于农民过度使用化肥, 导致土壤中病原菌拮抗菌减少, 加速了土传病害的发生几率, 抑制植株生长^[35]。研究表明, 马铃薯连作后, 显著降低了土壤细菌/微生物和细菌/真菌的比值, 并且多年连作导致茄病镰刀菌和尖孢镰刀菌快速增加^[36]。马得祯等^[37]研究表明, 多年连作会显著降低马铃薯根系土壤中氨化细菌、硝化细菌、好氧性纤维素分解菌和厌氧性纤维素分解菌数量。马玲等^[38]研究表明, 马铃薯连作年限增加, 放线菌、真菌数量会先增加后降低, 细菌数量逐渐减少。谭雪莲等^[39]通过研究连作对马铃薯土壤微生物区系和产量的影响, 发现多年连作会降低根系土壤中纤维素分解菌、氨化细菌、固氮菌等有益细菌生理群数量, 造成马铃薯生长发育不良, 从而影响产量。

2.5 土壤次生盐渍化及酸化

土壤水溶性盐离子含量及其组成发生改变是连作障碍的主要诱因^[40]。马铃薯连作会降低根系土壤

溶液渗透势,造成土壤中盐分不能充分挥发和淋溶,大量积聚在土壤耕层中,引发土壤次生盐渍化及酸化现象,根系不能正常吸收水分和肥料,导致马铃薯抗病性降低,从而引发生理性病害^[41,42]。吴丹丹等^[43]研究表明,马铃薯连作种植后,根系土壤环境达到中等盐渍化水平,随着连作年限的增加,土壤中全盐量逐渐增加。有研究证实,当土壤电导率(Electric conductivity, EC)达到0.40 ms/cm时为马铃薯所能承受的最大耐盐程度,多年连作会使土壤盐分量急剧升高,抑制植株的生长速率,严重时可导致死亡^[44]。

3 马铃薯连作障碍的防控关键技术

3.1 轮作

轮作(Crop rotation)是用地养地相结合的一种方式,有利于调节利用土壤养分和防治病虫害,还能有效改善土壤的理化性质,增加土壤肥力,最终达到增产增收的目的^[45]。轮作指在同一田块上有顺序地在季节间和年度间轮换种植不同作物或复种后留茬播种玉米种组合的种植方式。马铃薯轮作要根据土壤中的微量元素和养分合理搭配物种,让土壤中微量元素和营养物质均衡稳定,并根据生长周期合理调整,能有效减少自毒物质的产生^[46]。应根据土壤酸碱度情况来选择适宜的作物轮作,使土壤pH保持稳定,以达到增产的效果。研究表明,旱地轮作模式对马铃薯根际土壤中病原营养型真菌的富集有明显的促进作用^[47]。也有研究指出,马铃薯和赤小豆轮作与马铃薯连作相比,轮作有效改善了根际土壤真菌群落结构,减少病害的发生^[48]。王晓军等^[49]研究表明,马铃薯长期轮作,可不同程度提高土壤中速效氮、速效磷及速效钾含量,促进植株生长。

3.2 抗性品种应用

当前在农业领域,随着育种技术的逐步提高,通过筛选和培育马铃薯抗性品种来解决连作障碍也是比较合适的方式,利用作物对病虫害的抗性,选育具有抗性的作物品种防治病虫害,如选育抗马铃薯晚疫病的马铃薯品种、抗镰刀菌枯萎病的亚麻品种、抗花叶病的甘蔗品种、抗麦秆

蝇的小麦品种,都已经取得很不错效果。在马铃薯的育种过程中,通过提高抗逆性来达到缓解连作障碍的目的,选育优良的抗性品种对马铃薯晚疫病、黑胫病、早疫病、粉痂病、枯萎病、线虫等都有较好的防治效果。目前,黑龙江省农业科学院克山分院马铃薯育种研究所已经培育出多个抗性品种,如‘克新1号’和‘克新13号’,但对抗连作品种还需更深入的研究,从根本上把连作障碍问题合理的解决。

3.3 土壤灭菌消毒

土壤灭菌消毒对缓解或克服连作障碍也具有一定效果。土壤的灭菌消毒共有3大措施,包括生物、物理、化学途径消杀灭菌^[50]。生物灭菌是利用生物制剂熏蒸的方法达到杀菌消毒的效果;物理灭菌主要以蒸气灭菌消毒和太阳能灭菌为主;化学灭菌主要以一些化学制剂如石灰氮、阿维菌素、链霉素、福尔马林、二甲基二硫等物质对土壤进行消杀,来达到抗连作的目的。以上方式能很好地改良土壤理化性质,增加土壤的通透性,对细菌、真菌、线虫都有显著的消杀作用,并且有效减少马铃薯连作障碍中的自毒物质。土壤灭菌消毒具有高效性、多样性、系统性等特点^[51],能很好地解决马铃薯的连作问题,从而提高马铃薯品质。

3.4 生长调节剂的应用

中国目前允许使用的植物生长调节剂大约有30多种,如烯效唑、赤霉素、乙烯利、胺鲜脂、多效唑等。主要用于水果、蔬菜、马铃薯、棉花、小麦、水稻、大豆等作物^[52,53]。应用植物生长调节剂是植物抵御不良环境的有效途径之一。适宜浓度的植物生长调节剂可促进植株的生长发育和增产。有研究表明,低温胁迫下,烯效唑(S3307)能够促进绿豆叶片碳代谢能力和抗氧化系统活性,缓解低温造成的损伤^[54]。王诗雅等^[55]研究表明,植物生长调节剂能够增加水分胁迫下大豆叶片关键酶活性和抗氧化剂含量,维持活性氧(Reactive oxygen species, ROS)代谢平衡,增加植株的抗胁迫能力。项洪涛等^[56]研究表明,小豆苗期淹水胁迫,喷施植物生长调节剂能够增加

叶片脯氨酸和可溶性蛋白含量, 同时 H_2O_2 和丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量显著降低, 增强其抗逆性。植物生长调节剂还能够促进马铃薯的生理代谢能力, 缓解干旱对植株造成的伤害, 起到稳产、改善品质的效果^[57]。其还可以有效促进细胞分裂、分化和伸长。烯效唑可提高低温胁迫、盐胁迫等逆境条件下作物的产量和品质^[58,59]。植物生长调节剂对植株生理功能和形态变化起重要作用, 同时也能增加植物抗逆性能, 从而缓解连作产生的减产问题^[60]。

3.5 生物防治技术

在当前农业发展过程中, 生物防治技术是国内研究的热点问题, 针对马铃薯的连作障碍情况, 采取生物防治技术也是一种有效途径, 其具有成本低、环保好、安全性高、效果显著、对虫害的杀伤力强等特点, 而且生物防治有较长的持续时间, 应用后土壤中无残留^[61]。生物防治技术是利用作物相互间的种间竞争性, 以优势品种抑制劣势品种, 抗性品种或是近缘野生种一直以来是生物防治的首选, 通过应用生物技术可以有效促进马铃薯的生长发育, 降解土壤中根际分泌的有毒物质, 减少酚酸类物质的释放, 同时改善土壤中微生物群落, 抵御病害的发生^[62]。李彩虹等^[63]通过筛选出6株对尖孢镰刀菌有抑制作用的菌株, 经鉴定发现贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)对马铃薯枯萎病菌抑制作用最明显。有研究表明, 通过分离鉴定芽孢杆菌得到的1603菌株可有效防治马铃薯晚疫病, 抑菌率达到55.6%, 进行马铃薯离体块茎试验, 接种菌株1603的薯块未被侵染^[64]。以生物防治生态控制为主的有害生物综合治理, 逐步减少化学农药的使用, 对实现农业可持续发展、保护生物多样性具有重要意义^[65,66]。

4 展 望

马铃薯在长期连作的情况下, 其自身的生长指标、生理指标和土壤指标都发生了改变, 抗逆性降低, 造成产量质量下滑, 这一系列变化最终形成了连作障碍。针对马铃薯连作障碍的问题, 国内外研究人员对连作障碍的形成原因进行了细

致的剖析, 对病虫害加重、土壤养分失衡、自毒物质积累、土壤微生物区系改变、土壤次生盐渍化及酸化等多个角度综合分析其连作障碍的机理, 目的就是为了解决马铃薯连作障碍造成的减产问题。但连作障碍的发生是个比较复杂的难题, 以现有的技术只是初步掌握基本的理论和普遍的规律, 并针对现有的难题, 应用一些缓解连作障碍的措施, 如轮作、抗性品种应用、土壤灭菌消毒、生长调节剂的应用和生物防治技术, 这些技术都得到了广泛的应用, 起到了缓解作用。但缓解方式还是有局限性, 如轮作的方式时间久、见效慢; 抗性品种的研究难度大, 育种时间长; 土壤灭菌消毒应用大面积作物时, 效果不显著; 植物生长调节剂成本高, 效果显著, 但是不稳定; 生物防治技术覆盖的不全面, 针对连作的复杂问题, 不能全部解决。因此, 马铃薯的连作障碍解决措施还需要继续深入研究合理的方式方法, 达到最佳的效果, 仍是今后的主要研究方向, 而且马铃薯作为高产的粮食作物, 仍需更加的重视连作障碍的问题。针对马铃薯连作障碍的产生原因和防控技术深入研究可以从下列几个方面切入:

(1) 马铃薯连作年限增加后, 其根系分泌物产生的酚酸类自毒物质是如何抑制马铃薯的生长发育?

(2) 马铃薯连作年限增加后, 土壤中的微生物群落和微量元素的变化是否是影响马铃薯减产的主要原因?

(3) 马铃薯连作年限增加后, 其生理指标如超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(Peroxidase, POD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)、MDA、SPAD的变化趋势是否影响马铃薯的抗逆性能?

(4) 如何将马铃薯连作障碍的主要机理摸索清楚, 并针对难题找到合理的解决方式?

(5) 如何有效调节连作土壤中的微生物数量, 并控制在合理的范围? 如何阻断马铃薯病原菌的侵染?

[参 考 文 献]

- [1] 刘洋, 易晓峰, 罗其友, 等. 中国马铃薯贸易与营销策略分析[J]. 中国农学通报, 2016, 32(2): 180-185.

- [2] 杨鑫, 樊吴静, 唐洲萍, 等. 广西马铃薯产业现状分析及其发展建议[J]. 南方农业学报, 2021, 52(6): 1501-1509.
- [3] 杨雅伦, 郭燕枝, 孙君茂. 我国马铃薯产业发展现状及未来展望[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(1): 29-36.
- [4] 胡双, 孙文静, 高林怡, 等. 药用植物连作障碍研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(16): 38-48.
- [5] 陈鹏, 刘奇志. 草莓连作障碍研究进展[J]. 北方园艺, 2021(9): 132-137.
- [6] 原霁虹. 马铃薯连作障碍的研究进展[J]. 中国马铃薯, 2015, 29(1): 46-50.
- [7] 宋佳承, 王天, 闫士朋, 等. 不同种植模式对土壤质量及马铃薯生长的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 490-499.
- [8] 焦润安, 徐雪风, 杨宏伟, 等. 连作对马铃薯生长和土壤健康的影响及机制研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 94-100.
- [9] 沈宝云, 刘星, 王蒂, 等. 甘肃省中部沿黄灌区连作对马铃薯植株生理生态特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 689-699.
- [10] 余斌, 沈宝云, 王文, 等. 连作障碍对干旱地区不同马铃薯品种的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(4): 43-47.
- [11] 回振龙, 王蒂, 李宗国, 等. 外源水杨酸对连作马铃薯生长发育及抗性生理的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 1-8.
- [12] 刘星, 邱慧珍, 张文明, 等. 连作马铃薯植株库源关系及其对块茎产量的调节机理[J]. 应用生态学报, 2017, 28(5): 1571-1582.
- [13] 刘星, 张书乐, 刘国锋, 等. 连作对甘肃中部沿黄灌区马铃薯干物质积累和分配的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(7): 1274-1285.
- [14] 谭雪莲, 郭天文, 胡新元, 等. 黄土高原旱作区马铃薯连作根际土壤微生物群落变化特征[J]. 作物学报, 2022, 48(3): 682-694.
- [15] 徐雪风, 沈宝云, 回振龙, 等. 钙处理对连作马铃薯生长发育的影响及其机理[J]. 华北农学报, 2016, 31(s1): 289-295.
- [16] 张文明, 邱慧珍, 刘星, 等. 连作对马铃薯根系生物学特征和叶片抗逆生理的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(4): 20-23, 52.
- [17] 张文明, 邱慧珍, 刘星, 等. 连作对马铃薯根系形态及吸收能力的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 34-37, 46.
- [18] 要凯, 赵章平, 康益晨, 等. 沟垄覆膜对连作马铃薯土壤酶活性、理化性状及产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(8): 1286-1292.
- [19] 周华兰, 彭亚丽, 李婷, 等. 马铃薯连作对土壤理化性质和生物学特性的影响[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2019, 45(6): 611-616.
- [20] 白艳茹, 马建华, 樊明寿. 马铃薯连作对土壤酶活性的影响[J]. 作物杂志, 2010(3): 34-36.
- [21] Gonnety J T, Assémien E F L, Guéi A M, *et al.* Effect of land-use types on soil enzymatic activities and chemical properties in semi-deciduous forest areas of Central-West Cte d'Ivoire [J]. Biotechnologie Agronomie Société Et Environnement, 2012, 16(4): 467-474.
- [22] Grün A L, Straskraba S, Schulz S, *et al.* Long-term effects of environmentally relevant concentrations of silver nanoparticles on microbial biomass, enzyme activity, and functional genes involved in the nitrogen cycle of loamy soil [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 30(1): 12-22.
- [23] Qin S, Stephen Y, Xu X, *et al.* Analysis on fungal diversity in rhizosphere soil of continuous cropping potato subjected to different furrow-ridge mulching managements [J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 845.
- [24] Kong F L, Chen F, Zhang H L, *et al.* Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat yield [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(8): 150-155.
- [25] 孙权, 陈茹, 宋乃平, 等. 宁南黄土丘陵区马铃薯连作土壤养分、酶活性和微生物区系的演变[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 208-212.
- [26] 胡宇, 郭天文, 张绪成. 旱地马铃薯连作对土壤养分的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(12): 5436-5439, 5610.
- [27] 陈富, 张小静, 魏玉琴, 等. 定西市全膜双垄沟播马铃薯连作养分补给研究[J]. 中国马铃薯, 2016, 30(1): 20-24.
- [28] Cheynier V, Comte G, Davies K M. Plant phenolics: Recent advances on their biosynthesis, genetics, and ecophysiology [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 72: 1-20.
- [29] 安志刚, 郭凤霞, 陈垣, 等. 连作自毒物质与根际微生物互作研究进展[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 750-756.
- [30] 杨桂丽, 马琨, 卢斐, 等. 马铃薯连作栽培对土壤化感物质及微生物群落的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(5): 711-717.
- [31] 龚静, 马海艳, 郑顺林, 等. 连作对马铃薯酚酸类自毒物质及根际真菌群落的影响[J]. 西北农业学报, 2021, 30(3): 431-438.
- [32] 唐成林, 罗夫来, 赵致, 等. 半夏根系分泌物化感作用研究[J]. 北方园艺, 2017(15): 129-135.
- [33] 李自博, 周如军, 解宇娇, 等. 人参连作根际土壤中酚酸物质对人参锈腐病菌的化感效应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3616-3622.
- [34] 谢奎忠, 胡新元, 张彤彤, 等. 不同杀菌剂对旱地连作马铃薯土壤水分效应、微生物和产量的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(7):

- 103–111.
- [35] Vries F, Hoffland E, Eekeren N V, *et al.* Fungal/bacterial ratios in grasslands with contrasting nitrogen management [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2092–2103.
- [36] 谭雪莲, 郭天文, 刘高远. 马铃薯连作土壤微生物特性与土传病原菌的相互关系 [J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(8): 30–35.
- [37] 马得祯, 郭晓冬, 谭雪莲, 等. 马铃薯连作对根际土壤微生物生理类群的影响 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2016, 51(2): 35–39, 46.
- [38] 马玲, 马琨, 杨桂丽, 等. 马铃薯连作栽培对土壤微生物多样性的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(5): 589–596.
- [39] 谭雪莲, 郭晓冬, 马明生, 等. 连作对马铃薯土壤微生物区系和产量的影响 [J]. *核农学报*, 2012, 26(9): 1322–1325, 1321.
- [40] 窦旭, 史海滨, 李瑞平, 等. 盐渍化土壤剖面盐分与养分分布特征及盐分迁移估算 [J]. *农业机械学报*, 2022, 53(1): 279–330.
- [41] 秦舒浩, 曹莉, 张俊莲, 等. 轮作豆科植物对马铃薯连作田土壤速效养分及理化性质的影响 [J]. *作物学报*, 2014, 40(8): 1452–1458.
- [42] 胡新元, 孙小花, 柳永强, 等. 黄土高原半干旱区马铃薯连作对农田土壤生化性质及产量的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2019, 33(6): 344–351.
- [43] 吴丹丹, 刘星, 邱慧珍, 等. 马铃薯连作对土壤盐分积累及离子组成的影响 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2015, 50(2): 40–45.
- [44] Chauhan R P S, Chauhan C P S, Singh S P. Effect of saline water on okra (*Hibiscus esculentus*) and potato (*Solanum tuberosum*) and properties of soil [J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 1990, 60(5): 350–353.
- [45] 陈鑫, 刘勤, 张刚. 太湖地区不同轮作模式对土壤肥力和水稻产量的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(4): 874–883.
- [46] 张君, 潘志华, 段玉, 等. 长期定位轮作施肥对马铃薯产量和水肥利用效率的影响 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36(4): 36–43.
- [47] 姚姿婷, 杨炎昌, 姚潇, 等. 不同轮作模式对马铃薯根际土壤真菌群落的影响 [J]. *南方农业学报*, 2021, 52(5): 1255–1262.
- [48] 韩芳, 包媛媛, 刘项宇, 等. 不同轮作方式对马铃薯根际土壤真菌群落结构的影响 [J]. *生态环境学报*, 2021, 30(7): 1412–1419.
- [49] 王晓军, 孙玉琴, 杨军学, 等. 长期轮作与施肥对马铃薯土壤养分和产量的影响 [J]. *中国瓜菜*, 2021, 34(3): 42–46.
- [50] 胡洪涛, 朱志刚, 焦忠久, 等. 棉隆土壤消毒对高山甘蓝根肿病土壤细菌群落结构的影响 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36(16): 120–127.
- [51] 李会娜, 刘万学, 万方浩. 土壤灭菌对紫茎泽兰和番茄的反馈作用 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(16): 186–189.
- [52] 张义, 刘云利, 刘子森, 等. 植物生长调节剂的研究及应用进展 [J]. *水生生物学报*, 2021, 45(3): 700–708.
- [53] 项洪涛, 冯乃杰, 王立志, 等. 3种植物生长调节剂对马铃薯产量和营养品质的调控 [J]. *中国马铃薯*, 2015, 29(2): 97–102.
- [54] 余明龙, 郑殿峰, 冯乃杰, 等. 烯效唑对低温胁迫下绿豆初花期碳代谢、抗氧化系统及产量的影响 [J]. *植物生理学报*, 2021, 57(9): 1808–1818.
- [55] 王诗雅, 郑殿峰, 冯乃杰, 等. 鼓粒期淹水胁迫对大豆叶片 AsA–GSH 循环的损伤及烯效唑的缓解效应 [J]. *草业学报*, 2021, 30(7): 157–166.
- [56] 项洪涛, 李琬, 郑殿峰, 等. 幼苗期淹水胁迫及喷施烯效唑对小豆生理和产量的影响 [J]. *作物学报*, 2021, 47(3): 494–506.
- [57] 赵晶晶, 冯乃杰, 郑殿峰, 等. 植物生长调节剂对马铃薯叶片生理代谢及产量品质的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(6): 154–158, 165.
- [58] 孟娜, 徐航, 魏明, 等. 叶面喷施烯效唑对盐胁迫下大豆幼苗生理及解剖结构的影响 [J]. *西北植物学报*, 2017, 37(10): 1988–1995.
- [59] 单莹, 丁凯鑫, 郑殿峰, 等. 花期低温胁迫及喷施烯效唑对绿豆光合特性和保护酶活性的影响 [J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2021, 33(2): 7–16.
- [60] 吴金山, 马晶, 王亚沉, 等. 作物化学调控研究进展 [J]. *中国热带农业*, 2016(4): 77–80.
- [61] 杜霞, 刘霞, 周文武, 等. 马铃薯块茎蛾生物防治研究进展与展望 [J]. *中国生物防治学报*, 2021, 37(1): 60–69.
- [62] 李兴龙, 李彦忠. 土传病害生物防治研究进展 [J]. *草业学报*, 2015, 24(3): 204–212.
- [63] 李彩虹, 杨志辉, 张岱, 等. 马铃薯枯萎病拮抗菌的筛选与鉴定 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(13): 92–95.
- [64] 梁允刚, 孟晶, 谭兰玉, 等. 马铃薯晚疫病生防菌的分离鉴定与防治效果 [J]. *北方农业学报*, 2017, 45(4): 54–57.
- [65] 宋钰, 李统华, 金梦军, 等. 马铃薯耕作方式对土壤微生物数量的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2020, 34(4): 214–219.
- [66] 宋莹, 胡宝贵. 中国农业绿色防控技术推广研究进展 [J]. *中国农学通报*, 2020, 36(35): 150–155.