

间作豆科作物对马铃薯产量及土壤性状影响的研究进展

段雅欣, 禄兴丽*, 刘继虎, 康建宏

(宁夏大学农学院, 银川 750021)

摘要:如何在蓄水保墒的基础上选择合适的间作模式来实现马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)的优质高产已成为农业可持续发展 and 生态健康研究的热点,在众多间作组合里,豆科作物与马铃薯间作体系因生态位互补和种间促进作用显著,在全球范围内被广泛应用。土壤性状的优劣不仅决定养分和水分的有效性和供应量,同时也关系作物生产力及养分、水分利用效率。因此,针对国内外马铃薯间作豆科作物体系对马铃薯产量及土壤性状影响的相关研究,从马铃薯产量、水分利用效率、土壤理化性状、土壤生物学性状、温室效应的角度进行分析阐述,总结出马铃薯通过与豆科作物的合理间作可发挥种间互补和促进作用,对提高马铃薯产量与品质、增强土壤质量及改善生态环境具有重要意义。最后从间作体系对温室效应影响方面对今后研究方向进行了展望,提出了研究马铃薯间作豆科作物体系的进一步方向与思路,在分子水平上从土壤微生物多样性角度探究该间作体系下温室气体的排放机制,以期为马铃薯产业的可持续性发展和构建资源节约型种植模式提供理论依据和科学支撑。

关键词:马铃薯;豆科作物;间作;产量;土壤性质

中图分类号:S532

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2023)03-0096-06

Research Progress on the Effect of Intercropping Legumes on Potato Yield and Soil Properties

DUAN Yaxin, LU Xingli*, LIU Jihu, KANG Jianhong

(College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: The choice of a suitable intercropping model to achieve high quality and high-yield potato (*Solanum tuberosum* L.) crops based on soil water storage and preservation has become an important topic for agriculture and ecological health research. Potato intercropping legumes are commonly used worldwide due to their significant niche complementarity and interspecific facilitation. The quality of soil properties not only determines the availability and supply of soil nutrients and moisture, but also affects crop productivity and water and nutrient-use efficiencies. Therefore, from the perspective of potato yield, water use efficiency, soil properties (physical, chemical, and biological), and greenhouse effects, this paper analyzed domestic and foreign studies regarding the impact of potato intercropping legumes systems. It was concluded that intercropping of potatoes and legumes could play a complementary role between species, which is of great significance for improving potato yield and quality, enhancing soil quality, and improving the ecological environment. Finally, future research directions are proposed in the context of intercropping systems on the greenhouse effect, and outlined further directions and ideas for studying potato intercropping legume systems. The greenhouse gas emission mechanism of potato intercropping legumes systems at the molecular level was assessed from the perspective of soil microbial diversity. This study is expected to provide a theoretical basis and scientific support for the sustainable development of the potato industry and the construction of resource-saving plant cultivation models.

Key words: Potato; Legume; Intercropping; Yield; Soil properties

收稿日期:2020-05-21

基金项目:国家自然科学基金项目(31860361);宁夏自然科学基金项目(2019AAC03055);第四批“宁夏青年科技人才托举工程”项目(宁科协[2019]号)(TJGC2019075)

作者简介:段雅欣(1996-),女,在读硕士,主要从事作物栽培与耕作研究。

通讯作者:禄兴丽,女,博士,副教授,E-mail: lu_xing_li@163.com

间作套种是指按照一定的株距、行距和占地宽窄比例在同一片土地上种植不同农作物,一般把几种作物在同时期播种叫间作,不同时期播种叫套种^[1]。采用间作旨在让作物与土壤的生产潜力被发掘并充分利用^[2]。科学合理的间作使两种不同作物最大程度地发挥互补优势,充分利用自然资源^[3],进而集约利用土壤水分和养分、合理分配资源^[4]、有效提高作物产量^[5]、最终从根本上改善种植系统内的小气候,对农业可持续发展起促进作用^[6]。

作为全球第四大粮食作物的马铃薯有较高的种植优势和增产潜力^[7],不仅气候适应能力强、耐旱、耐寒、产量高^[8-9],而且马铃薯在主粮化发展同时,其营养价值也被发掘利用,比如马铃薯含有大量抗性淀粉,食用后能够缩小脂肪细胞^[10]。随着马铃薯优势的凸显及新形势下的粮食安全战略部署,国家开始把马铃薯作为主粮产品,并进行产业化开发^[11]。但在种植马铃薯的面积急剧增加的同时^[12],随着种植年限的累积、种植模式的单一化、市场需求的加剧等局限^[13],一方面导致马铃薯品质大不如前,产量也有所下降,甚至有病虫害的影响;另一方面由于常年连作轮作、季节和地域气候胁迫^[14]等导致土壤理化性状变差、微生物多样性降低、土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)含量越来越贫瘠、养分含量少且单一^[15]。在此背景下,从扩大种植面积方面考虑显然是不现实的。因此只有改善种植技术,选择能够缓解连作障碍,提高土壤水分及养分利用效率的间作模式^[16],才能从根本上稳定甚至提高马铃薯的产量和品质、优化土壤结构和理化性状。

豆科作物与非豆科作物的间作模式目前已经非常普遍,选择与豆科作物间作的最大优势在于豆科作物的生物固氮作用^[17]:增加土壤中有效氮含量,同时使间作作物对氮肥的需求减弱^[18]。除此之外,豆科作物间作模式不仅可以降低农业成本、提升农业经济效益^[19],还可以改良土壤、增加土壤有机质含量、增加土壤生物多样性^[20],实现土地用养结合的要求^[21]。近几年来,马铃薯间作豆科作物体系成为研究的热点,大量研究表明该间作体系具有较好的经济效益和生态效益^[22]。因此,选择豆科作物与马铃薯间作是解决当下马铃薯品质下降,产量减少的有效途径^[23]。本文综述了间作豆科作物对马铃薯产量、水分利用效率及土壤性状的影响,重点分析了通过改善种植模式、合理利用互补优势、发掘地下部资源,从而优化土壤理化性状,缓解温室效应,维持马铃薯生产力高效性、稳定性,形成

科学化生产、可持续发展的良好循环。

1 间作豆科作物对马铃薯产量和水分利用效率的影响

1.1 间作豆科作物对马铃薯产量的影响

在马铃薯被作为主粮推广,马铃薯种植规模日益增大的趋势下,随之而来的问题是可种植面积减少,单位面积产量下降。在此背景下,马铃薯间作豆科作物体系应运而生,但间作体系对马铃薯产量的影响还没有确切的定论,需要更深入的研究。为了通过间作最大限度地提高单位面积的产值,在中国陕西榆林地区风沙土土壤以马铃薯与绿豆(*Phaseolus radiatus* L.)的间作开展试验研究,结果表明:马铃薯间作绿豆后并没有对马铃薯的产量产生显著的影响,甚至与单作马铃薯相比,产量有所下降^[24],对马铃薯菜豆(*Phaseolus vulgaris* L.)间作体系进行为期三年的试验,研究认为马铃薯与菜豆间作模式中的马铃薯产量高于单作^[25]。在四川雅安同样研究薯豆在不同间作模式下的产量效益,得出在种植两行马铃薯和一行大豆(*Glycine max* (L.)Merr.)时,马铃薯的产量增产明显^[26]。在内罗毕大学农业与兽医学院卡贝特野外站研究了纯马铃薯林(PS)、马铃薯间作扁豆(*Lablab purpureus* (L.) Sweet)(PD)、马铃薯间作豌豆(*Pisum sativum* L.)(PG)和马铃薯间作菜豆(PB)四种间作体系对马铃薯当量产量的影响,结果表明:在间作条件下,鲜薯产量以PS和PD最高,PG最低^[27]。从节本增效目的出发,在山西省朔州市对马铃薯间作红芸豆(*Phaseolus vulgaris* Linn.)模式进行研究,结果表明:马铃薯的产量在不同的间作模式下差异显著,在2:2模式下效益最高^[28]。综上,间作豆科作物对马铃薯产量的影响还不够普遍化、一致化,究其原因在于在间作体系下种植年限不够长,且栽培种植受环境因素影响有差异,因此得出的结论也不够常态化。同时,间作模式也是影响结果的重要因素,只有在科学合理的间作模式下深入研究,才能真正达到提升产量^[29],增加经济效益的目的,从根本上为农户谋福利,为马铃薯的产业化发展做出贡献。

1.2 间作豆科作物对马铃薯水分利用效率的影响

水分参与作物生长发育的各个阶段,很大程度上决定了作物品质和产量的优劣^[30]。但近年来水资源的逐渐短缺,不仅使水分胁迫成为最影响作物生长的环境因子之一,同时严重制约了种植业生产,尤其在种植马铃薯的地区,相对土地而

言,水分成为保证农业生产力的主要制约因子。因此,提高作物对水分的利用率,不仅能有效应对水资源短缺的弊端,更是从根本上对节水农业与可持续农业的落实^[31]。在内蒙古对马铃薯间作毛野豌豆(毛紫云英)(*Astragalus sinicus* L.)对土地生产力的影响做了研究,结果得出:间作条件下,紫云英与马铃薯的水分利用具有互补性,进而使土地生产力以及水分利用效率得到有效提高^[32],在间作系统中,作物对水分的高效利用主要在于不同作物的生态位在时空上的差异以及作物根系的“提水作用”^[33]。在甘肃省农业科学院定西试验站研究了全膜覆盖垄沟种植马铃薯蚕豆(*Vicia faba* L.)间作的产量和水分效应,结果表明间作模式相比于马铃薯单作,会降低马铃薯的水分利用效率,但在水分含量受限时,马铃薯的生产能力较好,能起到改善其水分利用效率的作用^[34]。在内蒙古呼和浩特武川县内蒙古农牧业科学院旱作农业实验站通过水分当量比值来分析评价马铃薯间作苕子(*Vicia sativa* L.)模式下对作物水分利用效率的影响,在马铃薯与苕子间作模式下的水分当量比值为1.59~2.01,明显提高整个间作系统的水分利用效率,但对于两种作物来说,马铃薯的水分利用优势低于苕子^[35]。在肯尼亚开展两年大田试验研究马铃薯与豆科作物间作系统下水分利用效率,试验采用马铃薯单作、马铃薯间作扁豆、马铃薯间作豌豆、马铃薯间作菜豆4种处理,结果表明:马铃薯与扁豆间作体系在土壤保水方面表现最好,在水分利用效率和马铃薯生产力方面扁豆与马铃薯竞争较少^[36]。于2011年4月~6月在青海省湟源县大华乡比较研究了马铃薯间作蚕豆体系与相应单作对水分利用效率的影响,结果表明:马铃薯与蚕豆间作复合群体的水分利用效率高于相应的单作体系^[37]。近几年国内外对马铃薯间作豆科作物的很多研究侧重在栽培种植技术、作物产量和经济效益上,但关于作物水分利用效率的探究较少且更具研究意义^[38],尤其在水分紧缺的干旱地区,提高作物水分利用效率对促进农田的可持续发展及节水增产具有建设性意义。马铃薯间作豆科作物体系提高了水分利用效率和农业用田生产力,因此进一步比较筛选最佳组合模式成为未来的研究重点。

2 马铃薯间作豆科作物对土壤性质的影响

2.1 马铃薯间作豆科作物对土壤理化性状的影响

连作虽在短期内缓解了马铃薯可种植面积减

少与市场需求增加之间的矛盾,但前人研究认为连作会增大土壤容重、降低土壤孔隙度比例、严重破坏土壤结构及造成土壤营养成分比例失衡^[39-43]。因此转变种植方式成为解决矛盾的新突破口,很多研究表明将豆科作物作为非豆科作物的间作对象,可以有效优化土壤理化性状,培肥地力^[44-46],也有研究得出马铃薯间作体系可改善土壤养分条件、削弱水土和养分的流失^[47-48]。

2.1.1 马铃薯间作豆科作物对土壤化学性状的影响

在宁夏农林科学院固原头营科研基地徐河村研究比较了马铃薯间作蚕豆与马铃薯单作、蚕豆单作对土壤的影响,研究得出马铃薯间作蚕豆与马铃薯单作相比,土壤养分含量均有增加,其中全磷、有机质、碱解氮的含量明显增加;与蚕豆单作相比,仅土壤全氮、全磷的含量在间作体系下有所增加,其余养分的含量明显下降^[49]。在宁夏中部干旱带典型地区海原县开展试验比较研究了单作马铃薯、单作蚕豆和马铃薯间作蚕豆三种种植方式对土壤养分的影响,结果表明间作较单作大幅降低土壤速效磷、速效钾含量,明显提高土壤全氮、全磷含量,几乎很小程度影响有机质和土壤碱解氮含量^[50]。在内罗毕大学卡贝特校区野外站研究认为各间作处理下土壤理化性质的富集比均大于单一处理,且马铃薯间作扁豆模式最高^[51]。通过两年连续试验得出,马铃薯与蚕豆间作体系下的土壤有机质、土壤碱解氮及全氮含量明显高于单作马铃薯处理,而与单作马铃薯相比,间作体系下土壤全磷的含量有所降低^[52]。在加拿大南部詹姆斯湾低地对马铃薯间作菜豆后土壤中氮、磷、钾、镁、钙含量进行评估,得出间作后土壤中钙含量丰富,镁、氮含量丰富,磷、钾含量下降^[53]。

2.1.2 马铃薯间作豆科作物对土壤物理性状的影响

在东非马铃薯种植区土壤侵蚀而造成土壤和养分流失十分严重的基础下,以马铃薯间作扁豆、豌豆和攀缘豆三种豆类作物,评价了它们对肯尼亚中部高原土壤和养分流失的影响,结果得出:马铃薯间作扁豆模式下,作物覆盖率最高、缓解土壤流失作用最显著,适合发展^[54]。在肯尼亚卡贝特进行实地研究,以裸土、纯马铃薯、马铃薯+豌豆、马铃薯+菜豆、马铃薯+扁豆五种体系评估了马铃薯-豆科作物间作系统下最易受土壤侵蚀的土壤有机质(Soil organic matter, SOM)组分。研究得出:马铃薯+扁豆体系对稳定SOM组分的贡献最大,在该体系下土壤流失量最低,土壤团

聚体受伤害程度最低^[55]。研究认为马铃薯间作蚕豆后,土壤的相对湿度分别高于马铃薯和蚕豆单作。同时,蚕豆单作时的土壤温度低于间作,马铃薯单作时的土壤温度高于间作^[56]。在中国黄土高原陇中半干旱地区研究三种作物和紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)间作对水土流失的影响,分析结果得出马铃薯与紫花苜蓿间作模式能够明显降低水土流失和地表径流量^[57]。Nyawade等^[58]研究了马铃薯分别与菜豆和扁豆两种豆科作物间作后对土壤温度和土壤水分的影响,结果表明与马铃薯单作相比,土壤含水量在马铃薯间作扁豆体系下更高,两种间作体系的土壤温度均低于马铃薯单作,但马铃薯与扁豆间作对土壤温度的降低效果更显著。

2.2 马铃薯间作豆科作物对土壤生物学性状的影响

微生物种类多样化越高、土壤酶活力越强的土壤滋生病原菌越少^[59],在间作体系中,作物间会产生相应的生物互补效应^[60],从而优化改善土壤生物学性状。李越等^[61]为研究马铃薯与蚕豆间作体系对马铃薯根际土壤微生物的影响,在中国宁夏回族自治区固原市张易镇马场村进行试验,得出蚕豆马铃薯间作体系明显降低马铃薯根际土壤真菌和细菌的数量,而土壤微生物对碳源的利用能力却有所提升。在宁夏固原市隆德县沙塘镇和平村开展试验研究了不同的间作模式对马铃薯根际土壤细菌菌群结构和多样性变化的影响,得出马铃薯间作蚕豆体系能显著改善根际土壤细菌群多样性,有益菌的比例高于连作栽培^[62]。在肯尼亚上中部(海拔1 552米)、下高地(海拔1 854米)和上高地(海拔2 552米)的农业生态系统中进行为期两年的马铃薯与两种豆科作物间作的田间试验,研究马铃薯间作豆科作物体系下微生物活性的短期动态情况,试验得出:与单一马铃薯相比,间作增加了土壤中轻组分有机质、溶解有机质、微生物量,从而提高了微生物呼吸和酶活性^[63]。

2.3 马铃薯间作豆科作物对温室气体排放的影响

土壤呼吸、农田温室气体排放占大气温室气体排放的很大一部分,从改善种植方式、优化种植制度的角度出发达到固碳减排,通过增加SOC进而减少CO₂排放对构建生态友好型农业有一定意义^[64-65]。已有研究表明间作豆科作物的种植体系能够明显影响土壤N₂O的排放^[44]。且已有关于豆科作物间作体系和马铃薯间作体系对SOC影响的研究,Oelbermann等^[66]对比研究了玉米间作大

豆以及玉米、大豆单作三种模式下的SOC动态,结果表明间作与单作相比较SOC增加显著,这与Boddey等^[67]的结论相一致。在中国以黄土高原五年荒地为对照,对马铃薯、玉米、苹果单作和马铃薯间作苹果四种类型的土壤进行研究,研究得出马铃薯与苹果间作体系下的SOC含量最高^[68]。除此之外,目前关于马铃薯间作豆科作物体系对土壤碳、氮库影响的研究也有一定的深入。以单作马铃薯为对照研究了马铃薯与三种不同作物间作对土壤的养分含量的影响以及土壤微生物在间作条件下利用碳水化合物能力,结果表明马铃薯间作蚕豆体系下土壤微生物对碳源的代谢能力显著提高^[69]。在内罗毕大学卡贝特野外站研究马铃薯间作豆科植物系统对土壤和作物的影响,发现土壤中氮和有机碳的含量显著增加,大大减少了因侵蚀造成的碳氮流失^[70]。在宁夏南部山区研究马铃薯与不同的作物间作对作物根际土壤环境的影响,结果表明蚕豆与马铃薯间作使得更多有机物质进入到土壤,从而缩短土壤有机碳库恢复的周期,同时也加快了部分微生物利用碳源的循环^[71]。以马铃薯三年连作为对照,比较马铃薯分别与两种作物间作体系下马铃薯的根际土壤利用碳源的能力,结果却得出当马铃薯与蚕豆间作条件下,马铃薯的根际土壤利用碳源的能力低于对照^[72]。因此,马铃薯与豆科作物间作对土壤碳库的影响结果不一致,对影响机制的研究还不够深入透彻。

3 讨论与展望

马铃薯间作豆科作物作为保障粮食供应和改善土地生产力的重要种植体系,如合理化间作模式可提高马铃薯产量,高效利用生态位互补作用可提高作物水分利用效率,充分发掘作物地下部资源可优化土壤结构、缓解温室效应等。从目前马铃薯间作豆科作物对马铃薯产量及土壤性状影响的相关文献研究来看,以下三个方面的研究在未来应得到更多关注。

第一,量化研究马铃薯与豆科作物间作体系中作物的干物质分配与累积,揭示水分利用效率对间作作物的种间互补竞争响应机制,阐明晚熟作物在收获早熟作物之后的恢复变化效应。

第二,国内外研究大多数侧重该间作体系的地上部,对更为重要的地下部分及地上地下协同反馈作用关注度不高、系统研究甚少,尤其是利用现代分子生物学技术在马铃薯间作豆科作物模

式下从微生物多样性的角度探讨温室气体排放机制方面尤为欠缺。

第三,进一步研究该体系间作作物的种间互作效应,并从生态生理学和群体间作的角度分析土壤养分高效利用的机理机制,阐明合理化间作模式对土壤性状的调控。

4 结 论

综上所述,马铃薯合理间作豆科作物从时间和空间生态位上有效提高温度、水分、土壤的利用率^[73-74],从而达到作物增产增效的目的,同时合理间作能够优化土壤性状^[75-76],进而改善马铃薯根际土壤微生态环境和土壤肥力,为解决马铃薯产量降低、品质下降以及豆科作物在主粮需求增加下种植有限、产量不足找到新的突破口,对解决当前可利用土地资源持续减少与人口不断增长之间的矛盾有很重要的实践意义^[77]。除此以外,为环境友好型农业模式的更好推进与构建,着重关注间作体系中农田土壤温室气体的排放就显得尤为重要,而土壤微生物是驱动土壤温室气体排放的基本原因^[76],基于目前的报道得知关于马铃薯间作蚕豆体系对土壤微生物的影响和对温室气体排放的影响的研究均有了一定成果,但关于间作模式通过对土壤微生物的影响来调控土壤温室气体排放的机制还需深入探讨。

参考文献:

[1] 尤士骏,张 杰,李金玉,等.利用生物多样性控制作物害虫的理论与实践[J].应用昆虫学报,2019,56(6):1125-1147.

[2] Iqbal M A, Hamid A, Ahmad T, et al. Forage sorghum-legumes intercropping: effect on growth, yields, nutritional quality and economic returns [J].Bragantia, 2019, 78(1): 82-95.

[3] 柴 强,殷 文.间作系统的水分竞争互补机理[J].生态学杂志,2017,36(1):233-239.

[4] Chen G, Kong X, Gan Y, et al. Enhancing the systems productivity and water use efficiency through coordinated soil water sharing and compensation in strip-intercropping[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 10494.

[5] Razam A, Feng L Y, Werf W, et al. Narrow-wide-row planting pattern increases the radiation use efficiency and seed yield of intercrop species in relay-intercropping system[J]. Food and Energy Security, 2019: e170.

[6] Fung K M, Tai A P K, Yong T, et al. Co-benefits of intercropping as a sustainable farming method for safeguarding both food security and air quality[J].Environmental Research Letters,2019, 14(4): 44011.

[7] 韩忠才,张胜利,徐 飞,等.雾培马铃薯产量性状相关性分析[J].东北农业科学,2018,43(6):36-39.

[8] 张绪成,王红丽,于显枫,等.半干旱区全膜覆盖垄沟间作种植马铃薯和豆科作物的水热及产量效应[J].中国农业科学,2016,49(3):468-481.

[9] 马心灵,朱启林,耿川雄,等.不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米马铃薯间作产量优势的贡献[J].应用生态学报,2017,28(4):1265-1273.

[10] Eleazu C O, Eleazu K C, Iroaganachi M. In vitro starch digestibility, alpha-amylase and alpha-glucosidase inhibitory capacities of raw and processed forms of three varieties of Livingstone potato (*Plectranthus esculentus*) [J]. Innovative Food Science&Emerging Technologies, 2016, 37(10): 37-43.

[11] 梁 岩.马铃薯主粮化的路径探索[J].中国粮食经济,2015(3):26-29.

[12] 高华援,梁桓赫,王 凤,等.中国马铃薯栽培技术研究进展[J].东北农业科学,2007,32(5):17-19,27.

[13] 厉 浩,余 慧,李 倩,等.不同间作模式对马铃薯光合特性的影响[J].农业科学研究,2019,40(2):6-12.

[14] 张生菊.马铃薯耕作方式对土壤微生物多样性的影响[J].种子科技,2018,36(6):102-103.

[15] 刘亚军,马 琨,李 越,等.马铃薯间作栽培对土壤微生物群落结构与功能的影响[J].核农学报,2018,32(6):1186-1194.

[16] 李 莉.马铃薯间作不同作物的互作效应研究[D].银川:宁夏大学,2018.

[17] 张 芸,李 龙,李 强,等.不同间作方式对蚕豆农艺性状的影响[J].农业科技通讯,2018(9):109-111.

[18] Fu Z, Zhou L, Chen P, et al. Effects of maize-soybean relay intercropping on crop nutrient uptake and soil bacterial community [J].Journal of Integrative Agriculture,2019,18(9): 2006-2018.

[19] 柏文恋,郑 毅,肖靖秀.豆科禾本科间作促进磷高效吸收利用的地下部生物学机制研究进展[J].作物杂志,2018(4):20-27.

[20] Sekaran U, Loya J R, Abagandur A G O, et al. Intercropping of kura clover (*Trifolium ambiguum* M. Bieb) with prairie cordgrass (*Spartina pectinata* Link.) enhanced soil biochemical activities and microbial community structure [J]. Applied Soil Ecology, 2020, 147: 103427.

[21] 王建国,张佳蕾,郭 峰,等.强化豆科作物在北方现代农业结构中的作用[J].中国油料作物学报,2019,41(5):663-669.

[22] 朱 倩.种植模式、作物组合和物种多样性对半干旱区旱地农田生产力的效应[D].兰州:兰州大学,2017.

[23] Gitari H I, Gachene C K K, Aranja N N, et al. Potato-legume intercropping on a sloping terrain and its effects on soil physico-chemical properties [J]. Plant and Soil, 2019, 438(1-2): 447-460.

[24] 王小英,王 孟,王 斌,等.马铃薯与绿豆间作模式研究[J].陕西农业科学,2018,64(8):19-21.

[25] Dua V K, Kumar S, Jatav M K. Effect of nitrogen application to intercrops on yield, competition, nutrient use efficiency and economics in potato (*Solanum tuberosum* L.) plus French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) system in north-western hills of India [J]. Legume Research, 2017,40(4): 698-703.

[26] 胡应锋,王余明,王西瑶.马铃薯大豆间作模式效益分析[J].中国农学通报,2009,25(4)111-114.

- [27] Gitari H I, Gachene C K K, Aranja N N, et al. Optimizing yield and economic returns of rain-fed potato (*Solanum tuberosum* L.) through water conservation under potato-legume intercropping systems[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 208: 59-66.
- [28] 靳建刚. 红芸豆与马铃薯间作模式研究[J]. *内蒙古农业科技*, 2014(6): 15, 55.
- [29] Luo S, Yu L, Liu Y, et al. Effects of reduced nitrogen input on productivity and N₂O emissions in a sugarcane/soybean intercropping system[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 81: 78-85.
- [30] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 不同耕作方式土壤水分动态变化[J]. *东北农业科学*, 2014, 39(4): 1-5, 11.
- [31] Du T, Kang S, Zhang J, et al. Deficit irrigation and sustainable water-resource strategies in agriculture for China's food security[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(8): 2253-2269.
- [32] Ren J H, Zhang L Z, Duan Y, et al. Intercropping potato (*Solanum tuberosum* L.) with hairy vetch (*Vicia villosa*) increases water use efficiency in dry conditions[J]. *Field Crops Research*, 2019, 240: 168-176.
- [33] 赵建华, 孙建好, 李伟琦. 玉米播期对大豆/玉米间作产量及种间竞争力的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(11): 1634-1642.
- [34] 侯慧芝, 张绪成, 汤瑛芳, 等. 半干旱区全膜覆盖垄沟种植马铃薯/蚕豆间作的产量和水分效应[J]. *草业学报*, 2016, 25(6): 71-80.
- [35] 侯建伟, 段玉, 张君, 等. 内蒙古阴山北麓旱农区马铃薯间作模式的生产力与水分利用[J]. *土壤*, 2018, 50(1): 79-85.
- [36] Gitary H, Gachene C, Karanja N, et al. Water use efficiency and yield of potato in potato-legume based intercropping systems in a semi-humid region, Kenya[J]. *European Association for Potato Research*, 2017, 7: 9-14.
- [37] 李萍. 蚕豆/马铃薯最优间作模式探讨及间作群体根系时空分布特征研究[D]. 西宁: 青海大学, 2013.
- [38] 李萍, 张永成, 田丰. 马铃薯蚕豆间套作系统的生理生态研究进展与效益评价[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(27): 13313-13314.
- [39] 王平, 陈娟, 王国宇, 等. 黄土丘陵沟壑区旱作农业轮作模式综合评价[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(1): 229-234.
- [40] 王宗玮, 张鑫生, 闫飞. 大豆连作障碍机理的研究简述[J]. *东北农业科学*, 2009, 34(3): 12-13, 27.
- [41] 刘江汉, 何文寿. 粉垄耕作对土壤性质及马铃薯产量的影响[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(2): 20-25.
- [42] He Z, Chen H, Liang L, et al. Alteration of crop rotation in continuous pinellia ternate cropping soils profiled via fungal ITS amplicon sequencing[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2019, 68(6): 522-529.
- [43] 马海燕, 徐瑾, 郑成淑, 等. 非洲菊连作对土壤理化性状与生物性状的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(18): 3733-3740.
- [44] 黄坚雄, 隋鹏, 高旺盛, 等. 华北平原玉米||大豆间作农田温室气体排放及系统净温室效应评价[J]. *中国农业大学学报*, 2015, 20(4): 66-74.
- [45] Borges S R, Santos R S, Oliveira D M S, et al. Practices for rehabilitating bauxite-mined areas and an integrative approach to monitor soil quality[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(7): 866-877.
- [46] 官香伟, 党科, 李境, 等. 糜子绿豆间作模式下糜子光合物质生产及水分利用效率[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(22): 4139-4153.
- [47] 杨亚亚, 吴娜, 刘吉利, 等. 马铃薯-燕麦间作对马铃薯氮含量和土壤氮素的影响[J]. *浙江农业学报*, 2019, 31(12): 1955-1962.
- [48] 杜静, 范茂攀, 王自林, 等. 玉米-马铃薯间作根系特征及其与坡耕地红壤径流养分流失的关系[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 55-60.
- [49] 刘亚军, 李越, 马琨, 等. 马铃薯与蚕豆、荞麦间作对土壤的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(21): 79-83.
- [50] 顾旭东. 马铃薯间作蚕豆对土壤养分和作物生长的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2017.
- [51] Nyawade O S. Effect of potato (*Solanum tuberosum* L.) cropping systems on soil and nutrient losses through run-off in a humic nitisol[D]. Kenya: The University of Nairobi, 2015.
- [52] Wilton M, Karagatzides J, Tsuji L. Nutrient concentrations of bush bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivated in subarctic soils managed with intercropping and willow (*Salix* spp.) agroforestry[J]. *Sustainability*, 2017, 9(12): 2294.
- [53] 厉浩. 马铃薯间作玉米、蚕豆下生长发育及种间关系研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [54] Nyawade S O, Gachene C K K, Karanja N N, et al. Controlling soil erosion in smallholder potato farming systems using legume intercrops[J]. *Geoderma Regional*, 2019, 17: e225.
- [55] Nyawade S, Karanja N, Gachene C, et al. Susceptibility of soil organic matter fractions to soil erosion under potato-legume intercropping systems in central Kenya[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73(5): 567-576.
- [56] 王海燕, 王晓玲. 马铃薯间作蚕豆的效益评价与栽培研究[J]. *内蒙古农业科技*, 2007(3): 37-40.
- [57] 王立, 黄高宝, 王生鑫, 等. 粮草豆隔带种植保护性耕作水土流失规律[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2): 54-57.
- [58] Nyawade S O, Karanja N N, Gachene C K K, et al. Intercropping optimizes soil temperature and increases crop water productivity and radiation use efficiency of rainfed potato[J]. *American Journal of Potato Research*, 2019, 96(5): 457-471.
- [59] Prommer J, Walker T W N, Wanek W, et al. Increased microbial growth, biomass, and turnover drive soil organic carbon accumulation at higher plant diversity[J]. *Global Change Biology*, 2019, 26(2): 669-681.
- [60] Hu F, Gan Y, Chai Q, et al. Boosting system productivity through the improved coordination of interspecific competition in maize/pea strip intercropping[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198: 50-60.
- [61] 李越, 曹瑾, 汪春明, 等. 蚕豆间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物的影响[J]. *农业科学研究*, 2017, 38(2): 8-13.
- [62] 王娜, 陆姗姗, 马琨, 等. 宁夏南部山区马铃薯不同间作模式对根际土壤细菌多样性的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, 30(12): 193-198.

- 类兽药残留[J]. 色谱, 2019, 37(9): 946-954.
- [2] 黄子敬, 王晓玲, 杨钦沾, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法同时测定畜禽肉中磺胺类、喹诺酮类、硝基咪唑类兽药残留[J]. 分析试验室, 2014, 33(10): 1184-1188.
- [3] 侯建波, 谢文, 陈笑梅, 等. 液相色谱-串联质谱-同位素稀释法同时测定猪肉中54种药物残留[J]. 质谱学报, 2012, 33(1): 42-54.
- [4] 曹慧, 陈小珍, 朱岩, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱技术同时测定乳制品中磺胺类和喹诺酮类抗生素残留[J]. 食品科技, 2013, 38(6): 323-329.
- [5] 刘红, 曾建勇, 梁雪琪, 等. QuEChERS EMR-Lipid 结合 LC-MS/MS 测定鸡蛋中磺胺类和喹诺酮类药物残留[J]. 现代食品科技, 2018, 34(9): 235-243.
- [6] 黄坤, 吴婉琴, 罗彤, 等. QuEChERS-超高效液相色谱-串联质谱法同时测定畜禽肉中11种喹诺酮类兽药残留[J]. 肉类研究, 2019, 33(3): 40-45.
- [7] F Hernández, N Calisto-Ulloa, C Gómez-Fuentes, et al. Occurrence of antibiotics and bacterial resistance in wastewater and sea water from the Antarctic[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 363: 447-456.
- [8] 余海洋, 潘义, 张鹏辉, 等. 碘离子溶液标准物质的研制及不确定度评定[J]. 中国测试, 2016, 42(5): 56-60.
- [9] 马康, 杨亚楠, 邢金京, 等. 诱惑红溶液标准物质的研制及不确定度评定[J]. 分析测试学报, 2012, 31(3): 296-301.
- [10] 肖展, 方正, 左义铭, 等. 甲醇中微量六氯丁二烯溶液标准物质的研制及不确定度评定[J]. 中国测试, 2017, 43(11): 47-50.
- [11] 方正, 张鹏辉, 潘义, 等. 甲醇中氯苯溶液标准物质的制备技术研究及不确定度评定[J]. 中国测试, 2016, 42(8): 48-52.
- [12] 徐志杰. 地下水天然基体无机多元素混合标准物质研制及基体效应研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- [13] 郭国龙, 李晓红, 王春叶. 核燃料分析用多元素混合标准溶液的研制[J]. 化学分析计量, 2019, 28(5): 6-9.
- [14] 孙晓梅, 刘慈玉. 6种有机磷农药标准溶液不确定度分析[J]. 化学试剂, 2011, 33(8): 733-735.
- [15] 梁旭锋, 王岩, 林黎明, 等. 除草剂混合标准溶液中标准物质稳定性研究[J]. 山东农业科学, 2014, 46(4): 106-109.
- [16] 常立伟, 康优, 宋志峰, 等. 一种利用高效液相色谱测定油炸薯条中丙烯酰胺方法的研究[J]. 东北农业科学, 2019, 44(5): 123-128.
- [17] 黄鸾玉, 杨姝丽, 韦信贤, 等. 超高效液相色谱法测定水产品中噻乙醇的残留量[J]. 理化检验(化学分册), 2019, 55(4): 427-431.
- [18] 国家标准物质研究中心. JJF 1006-1994 一级标准物质技术规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 1994.
- [19] 全浩, 韩永志. 标准物质及其应用技术[M]. 北京: 中国标准出版社, 2003: 90-107.
- [20] 中国计量科学研究院. JJF 1343-2012 标准物质定值的通用原则及统计学原理[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.

(责任编辑:王昱)

(上接第101页)

- [63] Nyawade S O, Gachene C K K, Karanja N N, et al. Short-term dynamics of soil organic matter fractions and microbial activity in smallholder potato-legume intercropping systems [J]. Applied Soil Ecology, 2019, 142: 123-135.
- [64] Wang H, Wang S, Yu Q, et al. No tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue-returned farming system [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261: 110261.
- [65] Lu X L, Lu X N, Liao Y C. Conservation tillage increases carbon sequestration of winter wheat-summer maize farmland on loess plateau in china [J]. Plos One, 2018, 13(9): e199846.
- [66] Oelbermann M, Echarte L, Marroquin L, et al. Estimating soil carbon dynamics in intercrop and sole crop agroecosystems using the century model [J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2017, 180(2): 241-251.
- [67] Boddey R M, Jantalia C P, Conceicao P C, et al. Carbon accumulation at depth in ferralsols under zero-till subtropical agriculture [J]. Global Change Biology, 2010, 16(2): 784-795.
- [68] Xiao L, Huang Y, Zeng Q, et al. Soil enzyme activities and microbial biomass response to crop types on the terraces of the loess plateau, china [J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(5): 1971-1980.
- [69] 汪春明, 马琨, 代晓华, 等. 间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物区系的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(6): 711-716.
- [70] Gitari H I. Potato-Legume intercrop effects on water and nutrients use efficiency, crop productivity and soil fertility in a humid nitisol, Kenya[D]. Kenya: The University of Nairobi, 2018.
- [71] 马琨, 杨桂丽, 马玲, 等. 间作栽培对连作马铃薯根际土壤微生物群落的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 2987-2995.
- [72] 魏常慧. 马铃薯间、套作栽培对连作土壤与作物的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2016.
- [73] 董楠. 不同作物组合间作优势和时空稳定性的生态机制[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [74] 杨国, 陈光荣, 王立明, 等. 甘肃沿黄灌区马铃薯/大豆套作效应分析[J]. 甘肃农业科技, 2017(7): 43-49.
- [75] 马一凡, 张绪成, 侯慧芝, 等. 陇中旱地全膜垄沟马铃薯和蚕豆间作栽培技术[J]. 甘肃农业科技, 2018(11): 103-105.
- [76] 唐艺玲, 王建武, 杨文亭. 间作对旱地 CO₂ 和 N₂O 排放影响的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1323-1330.
- [77] Gitari H I, Karanja N N, Gachene C K K, et al. Nitrogen and phosphorous uptake by potato (*Solanum tuberosum* L.) and their use efficiency under potato-legume intercropping systems [J]. Field Crops Research, 2018, 222: 78-84.

(责任编辑:王昱)