

王籽懿,黄修梅,杨玉荣,等.不同轮作模式对东北黑土地影响的研究进展[J].江苏农业科学,2024,52(11):27-34.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.11.004

不同轮作模式对东北黑土地影响的研究进展

王籽懿¹,黄修梅¹,杨玉荣²,惠霖³,张清梅¹,杨忠仁¹,张凤兰¹

(1. 内蒙古农业大学,内蒙古呼和浩特 010019; 2. 兴安盟农牧技术推广中心,内蒙古乌兰浩特 137400;

3. 包头市农村牧区经营管理和信息中心,内蒙古包头 014100)

摘要:我国东北黑土区是世界上四大黑土区之一,是东北农业继续发展的基础,也是国家粮食安全的重要保证。近年来,我国政府逐渐重视对黑土地的保护与利用,但我国东北黑土耕地质量由于连年耕种导致土质严重退化,土壤中的有机质流失,土壤结构也受到严重的破坏,从而影响农作物的生长。轮作作为保障黑土区耕地资源可持续利用的重要手段,对改变经济结构,提高农业经济效益,促进黑土区农村经济可持续发展,实现黑土区耕地修养生息、提升地力和平衡粮食供求结构具有重要意义。保护黑土地,探寻适宜东北黑土区的轮作模式至关重要。本文根据不同轮作模式对黑土地所产生的影响,总结了不同轮作模式对黑土地土壤物理性质、化学性质、土壤微生物、酶活性和作物产量的影响等相关方面的研究现状,在分析总结现有研究的基础上,提出了关于未来黑土地的建议与展望,以期在黑土区农业的永续发展提供参考。

关键词:轮作模式;东北黑土地;土壤养分

中图分类号:S344.1

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2024)11-0027-08

世界上的耕作土壤中最肥沃的当属黑土地^[1]。在我国东北地区,老百姓将富含有机质、常用于耕作的暗色表土层称为黑土^[2],同时,黑土也是东北用于耕作的主要土壤。我国的黑土分布范围较广,主要位于东北平原,辽宁省南部一直延伸至内蒙古东部,北起大兴安岭,南至辽宁省南部,西到内蒙古东部的大兴安岭山地边缘,东至乌苏里江和图们江^[3]。黑土地指表层含暗色腐殖质的土壤类型,以温带及寒温带草原化草甸植被为主^[4],具有性状优

良、肥力较高等特点,适合农耕是其主要特征,因此被认为是最富饶而又极其宝贵的优质土地之一^[5]。美国土壤分类系统称其为“软土”^[6],中国土壤分类系统称其为“均腐土”^[7],这2种不同的土壤分类系统,给我们提供了一种认识土壤的新视角,让我们有机会更好地了解不同土壤的特性,从而更好地改善土壤质量。

黑土地对于保障世界粮食安全具有举足轻重的地位^[8],东北地区是我国重要的粮食基地,在产量、人均谷物和谷物份额方面长期处于全国前列,这里集中了丰富的黑土,是世界上最大的4个黑土区之一,是农业的理想之地^[9]。东北地区拥有 $2.99 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 可耕地,其中黑土区面积约109万 km^2 ^[10],东北地区谷物产量几乎占全国总产量的1/4^[11],占全国商业谷物总产量的1/3,是名副其实的“第一谷物储备区”,对国家的粮食安全至关重要,同时也为

收稿日期:2023-03-20

基金项目:内蒙古科技计划(编号:2022YFDZ0010);内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(编号:BR221048)。

作者简介:王籽懿(1996—),女,河北张家口人,硕士研究生,主要研究方向为黑土地利用与保护。E-mail:1754899519@qq.com。

通信作者:张清梅,硕士,副教授,主要研究方向为园艺植物栽培。E-mail:zqm2002@163.com。

[11]方晓敏,包文斌,徐燕.江苏黑猪种质资源的发展现状与未来[J].江苏农业科学,2023,51(13):1-5.

[12]蔡瑞林,田林.江苏地方农业种质资源保护与利用的现状、问题与对策[J].江苏农村经济,2021(10):35-38.

[13]魏红梅.种业深度报告:发展趋势及主要作物和公司分析[EB/OL].(2021-11-02)[2023-08-20].<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1715297977802556439&wfr=spider&for=pc>.

[14]祖祎祎.推动种质资源利用夯实种业创新基础[N].农民日报,2023-03-25(2).

[15]高翔,侯升林,朱金城,等.对农作物种质资源保护与利用工作的若干思考:以河北省农林科学院为例[J].农业科技管理,2021,40(4):43-46.

[16]段永红,余亚莹,唐潇,等.地方农作物种质资源库建设的建议与思考[J].中国农学通报,2022,38(22):139-144.

[17]朱银,邹淑琼,汪巧玲,等.江苏省乡土特色种质资源保护与开发利用[J].江苏农业科学,2021,49(19):19-23.

缓解全球粮食安全提供支持^[12]。近几年,东北地区的粮食综合生产能力不断提高,但当前作物种植依然以连作为主^[13],这过程中也凸显出一系列科学问题,受到愈来愈多的关注,水土流失、集约化种植体系不仅制约了黑土地的可持续利用,高强度利用导致黑土地发生了严重退化^[14],制约了东北地区农业的发展,也限制着作物持续高产。因此,如何以更低的资源和环境代价确保粮食安全、实现可持续的集约化,这既是国家视角的重大需求,也是国际农业和资源环境科学的重大科学命题^[15]。

现有研究认为,轮作是一种平衡用地养地和协调保护利用耕地的种植模式。轮作比连作对提高黑土土壤有机质含量和作物产量,降低病虫害的影响有明显的作用^[16]。现有学者认为,轮作这种种植方式是指每一个生长或播种周期、每一个季节均要在同一块土地上种不同作物的方式^[17]。可缓解土壤生态失调,土壤养分流失和预防病虫害等问题^[18]。大自然保护协会(TNC)的迈克尔·多恩指出,作物多样化轮作种植有助于保留土壤中的养分、缓解水土流失、增加农田系统的稳定性^[19]。

将同一农田种植区域上根据年度和季节的气候变化,轮流种植不同农作物或复合种植的方式称为轮作^[20]。轮作制度在夏商周至春秋战国时期的连作制度基础上初步形成^[21]。根据《战国策》和《僮约》的记载,战国和汉初时,极有可能已出现了大豆冬麦轮作。到公元 6 世纪,北魏农学家贾思勰所写的《齐民要术》中指出轮作的重要性^[22]。魏晋时期,我国华北地区形成了以冬小麦—小豆—粟为茬口组合的 2 年 3 熟的轮作模式^[23]。这种以地养田的方式,可有效发挥土地的作用,防止病虫害和草害的发生,改善土壤的物理和化学性质^[24-27]。

在轮作技术不断发展的当下,也与其他领域有了诸多联系。朱泽生等基于对卫星遥感影像解译得出,稻棉和棉稻轮作周期的差异十分接近,表明试验建立的棉稻和稻棉轮作评估模型将有重要的应用^[28];古力娜扎尔·艾力等基于农业生产系统建立模拟模型,结果表明,随着苜蓿轮作年限的增加,土壤的水环境和水分利用率会逐渐下降^[29]。

1 不同轮作模式对黑土地理化性质的影响

早期研究有关植物连作障碍的探讨主要从土壤的物理和化学特性出发,发现连作可引起土壤酸碱度下降、土壤固结、通气能力下降、土壤养分失

衡、肥效相关酶活性下降、容重增加、含盐率升高,并出现次生盐渍化倾向^[30-32]。一些研究表明,东北玉米连作由来已久,黑土大粒级团聚体及各密度组分的有机质结构有脂肪化、简单化的倾向,团聚体与矿物质相结合,有机质保护效果减弱,降低了黑土的稳定性^[33]。

1.1 不同轮作模式对黑土地物理性质的影响

土壤物理性质是指土壤的结构与状态,是决定土壤生态环境功能的主要因素^[34]。土壤团聚体为土壤结构中最基本的单元,它的含量从某种角度反映了土壤的供储养分含量、持水性的强度、通透性和其他容量^[35-36],并通过土壤水、通气性的研究,土壤温度及其他因素的作用,对作物生产力产生直接影响,且土壤团聚体稳定性对土壤抗侵蚀性具有决定作用。

彭现宪研究得出,大豆—玉米轮作比连作玉米可有效改善土壤的健康状况,提高土壤的有机质含量,为植物的生长提供良好基础^[37]。张福韬等研究得出,轮作不影响各个粒级团聚体的含量,轮作模式下原土、大团聚体和微团聚体碳、氮含量较高,以微团聚体的含量最高,并且玉米轮作和连作存在显著差异^[38]。轮作对土壤稳定性结构的形成具有促进作用,稳定性物质含量增加,利于碳氮在微团聚体内的固定、稳定和提高土壤有机质等。吴鹏博等通过 3 年连续的田间定位试验得出,相同施肥条件下轮作模式中土壤有机碳(SOC)、易氧化有机碳(ROC)、可溶性有机碳(DOC)、重组有机碳(HFOC)和微生物生物量碳(MBC)高于连作;眉豆—燕麦轮作模式为建立合理轮作模式提供了理论支撑^[39]。杨阳以玉米、大豆为研究对象,通过分析 0~10 cm 土层在不同种植模式下的团聚体和有机碳,表明休耕轮作加秸秆还田条件下,土壤不被翻动,有利于土壤表层中的有机质累积,土壤大团聚体不会被破坏,土壤的团聚程度呈上升趋势,土壤的机械稳定性也在一定程度上呈上升状态^[40]。有研究指出,轮作通过影响土壤结构进而影响土壤孔隙度,最后对有机碳产生直接或间接影响^[41]。郭金瑞等通过长期定位试验发现,相较于玉米连作,玉米—大豆轮作和大豆连作能显著降低土壤容重,增加土壤总孔隙度^[42]。高盼等的研究表明,相较于春玉米连作处理,轮作下土壤固相比降低,气相比比例和液相占比有所上升,土壤孔隙度在 0~10 cm 土层增加^[43]。

综上所述,小麦—玉米轮作作物须根易在土壤

内形成大孔隙,使土壤总孔隙度显著增大,又促使土壤容重下降。轮作下脂肪族、芳香族和含烷氧结构的物质含量高于连作,在微团聚体中表现明显,表明轮作能促进土壤稳定性结构形成,增加稳定性物质含量,有利于碳氮固定于微团聚体中,稳定和增加土壤有机质、增强作物吸收土壤养分、增强土壤蓄水能力及透气性。眉豆—燕麦轮作有机碳含量均高于连作。玉米—大豆轮作中各级团聚体含量未有影响,但机械稳定性升高。大豆根系的根瘤菌具有固氮作用,可将空气中的氮固定在土壤中增加土壤含氮量,达到培肥的作用,为后季种植玉米提供物质保障。

1.2 不同轮作模式对黑土地化学性质的影响

土壤养分作为土壤供给作物生长发育的营养成分是必不可少的。而土壤营养成分是确保土壤肥力的一个主要标志^[44],而作物所需的有机质、氮、磷等常被用来作为印证土壤肥力的指标^[45]。

1.2.1 不同轮作模式对有机质的影响 有研究表明,随着团粒直径的减小各施肥处理团聚体内有机碳含量的表现趋势为先升高再降低,0.25 ~ 2.00 mm 土壤团聚体的有机碳含量最高^[46]。王百慧的研究表明,在大豆生长后进行隔年轮作,有机质含量下降、速效磷含量升高均不明显;脲酶和转化酶活性不变,蛋白酶活性增强,过氧化氢酶、过氧化物酶活性降低。在小麦生长后进行3年轮作,土壤有机质和速效磷含量增加,碱解氮含量不变,脲酶和转化酶活性基本无变化^[47]。张振江认为,在黑河豆麦轮作条件下,实行麦秸隔年还田,对于缓解土壤有机质含量的减少有一定效果^[48]。张树春等认为在东北旱田通过米豆轮作,在增加土壤有机质含量、培肥地力的同时,还能有效地控制玉米的土传病害及养分单一消耗问题,合理解决大豆的重茬问题,实现农作物高产、稳产、提质、节本、增效的目标^[49]。

1.2.2 不同轮作模式对氮的影响 黑土施用氮肥能提高土壤碱解氮含量,但以黑土为例,其供氮潜力略低于磷,因此,农田黑土应特别注意突出氮肥的施用^[50-51]。有研究表明,玉米—大豆轮作较玉米连作显著提高了0~20 cm耕层>2 mm土壤团聚体全氮含量,同时对土壤全氮的贡献率也高于连作;玉米—大豆轮作模式,在发挥大豆固氮作用的同时,也显著扩充了土壤氮库,提高了土壤肥力^[52]。

王聪等通过对黑土地不同种植模式的探究得

出,玉米—大豆不同种植模式对土壤团聚体影响不同,10~20 cm土层轮作处理0.5~2.0 mm粒级土壤机械稳定性团聚体占比高于连作处理,且以引入马铃薯的处理最高;20~30 cm土层0.5~2.0 mm粒级水稳性团聚体以轮作处理较高;马铃薯处理下的水稳性团聚体含量较高,结构破坏率较低,稳定性较好^[53]。不同种植模式对黑土土壤养分的影响也不同,连作土壤的碱解氮、有效磷、速效钾、有机质含量较轮作处理低,且土壤发生酸化。轮作处理中,以马铃薯轮作处理提高土壤养分含量及调节土壤酸度整体效果较好。综上,玉米—大豆—马铃薯轮作处理可提高土壤机械稳定性团聚体和水稳性团聚体,并且粒径<0.25 mm的小团聚体占比较低,结构破坏率低,同时可提高土壤碱解氮、有机质含量,减弱土壤酸化。

1.2.3 不同轮作模式对磷的影响 陈丹等研究表明,轮作可增加土壤氮、磷、钾的含量,其中,有效磷的增幅作用最为明显;大豆也可在一定程度上增加土壤中的有效磷和有效钾含量,提高土壤肥力^[54]。Monaci等对紫花苜蓿轮作的研究及Kanton等对大豆和玉米轮作的研究均表明,轮作可显著提高土壤的有效磷含量^[55-56]。匡恩俊等通过对玉米—大豆轮作条件下,不同耕作方式加有机肥对土壤养分的研究,表明土壤0~10 cm的土层,轮作下的碱解氮含量比连作高21.68%,有效磷含量差异不明;土壤20~40 cm的土层,互作效果明显,有效磷、速效钾含量均有提高,但碱解氮含量无显著变化^[57]。作物生长过程中不仅根系生长会被促进,深层土壤的养分也有所提高。冯雪婉等以大豆、玉米为研究对象,得出轮作中土壤有机质(SOM)、全磷(TP)、有效磷(AP)和有效氮(AN)的含量显著高于连作的结论^[58]。

1.2.4 不同轮作模式对钾的影响 张亦驰采用长期定位试验与室内分析相结合的方法,证明在轮作处理的土壤中,随着土壤深度的增加,土壤的全钾含量和矿物质钾含量趋于增加,土壤缓效钾的含量有所下降,底层土壤略高于上层土壤,轮作处理可使表层土壤速效钾耗损,但玉米连作土壤缓效钾、土壤全钾和土壤速效钾含量仍比轮作土壤缓效钾含量高^[59]。吴鹏博等得出轮作模式的土壤速效钾含量在同一施肥水平下优于连作模式的试验结果^[39]。

综上所述,大豆—玉米轮作模式能够增加土壤

有机质、速效磷、全磷和速效钾含量,有效缓解连作障碍;大豆—小麦轮作模式中 3 年轮作方式比隔年轮作方式增加了脲酶的活性,有机质、速效磷等养分含量也高于隔年轮作方式。玉米—大豆—马铃薯轮作模式的水稳性团聚体含量较高,结构稳定,能够有效提高土壤碱解氮、有机质含量,调节土壤酸度。

2 不同轮作模式对黑土地微生物的影响

2.1 不同轮作模式对细菌的影响

不同的作物轮作对土壤微生物的丰度,土壤微生物的多样性和土壤微生物群落有不同的影响^[60]。研究表明,细菌能够产生特定的指示物,可用来评价土壤质量,因此它们可作为一个潜在的土壤质量监测与评价指标。细菌作为根际环境中最丰富、最广泛的微生物,在维持农田生态系统稳定方面有重要作用^[61]。

提俊阳等研究表明,大豆—玉米—玉米轮作和 大豆—玉米轮作可提高土壤中固氮细菌的丰度和多样性,这种固氮细菌的丰度和多样性可有效促进土壤的生态平衡,从而改善土壤的肥力状况^[62]。高洪军等研究指出,由于玉米和大豆在种植方式上存在差异,它们之间的轮作可更好地保护土壤,从而使土壤固氮酶 *nif B* 基因的相对丰度得到提高。这与连续种植玉米的情况相比有显著的提升。同时,还可以增加细菌群落的多样性,从而有助于增强土壤肥力,促进作物生长发育^[63]。刘株秀基于东北黑土区长期田间定位试验,以大豆和玉米为研究对象,采用高通量测序的方法,证明了种植模式和年限可影响土壤微生物多样性和群落结构,从而影响土壤的质量和生物多样性,大豆和玉米的轮作在一定程度上增加了物种的种类,但它们也限制了土壤中其他物种的发展,使得土壤群落多样性受到一定程度的压制^[64]。冯雪婉等以大豆连作(CS)、玉米连作(CM)、玉米—大豆轮作(MS)、玉米—玉米—大豆轮作(MMS)和玉米—大豆—大豆轮作(MSS)为研究对象,结果表明吉林省西部半干旱区,MSS 与 MMS 更有利于土壤固氮菌繁殖;轮作固氮菌丰度显著高于 CM,显著低于 CS;MMS 与 MSS 固氮菌多样性显著高于 CM;轮作和连作土壤固氮菌群落结构差异明显,全氮(TN)是固氮菌群落结构变化的主要驱动因子,种植制度通过土壤化学性质间接影响固氮菌的丰度和多样性^[58]。

2.2 不同轮作模式对真菌的影响

作为分解者和微生物的主要组成部分,真菌为土壤养分和能量循环作出贡献。王倩利用 PLFA 测序技术研究得出,与玉米连作系统相比,生长季节内玉米—大豆轮作系统以子囊菌富集为主并显著降低了土壤真菌生物量而增加了土壤真菌的多样性^[65]。刘杭在东北黑土区基于田间定位试验开展大豆、玉米、小麦轮作试验,研究表明,大豆、玉米、小麦长期连作显著降低了土壤微生物的代谢活性,大豆和小麦长期连作土壤微生物糖类物质利用率显著低于轮作土壤微生物,长期玉米连作使得真菌群落丰度下降,土壤微生物对多聚物和胺类物质的利用率显著低于玉米轮作^[66]。张梦亭等基于玉米大豆轮作,发现长期免耕能够在各轮作方式下形成较为稳定的土壤线虫群落结构;土壤扰动如深翻、移除秸秆对土壤线虫群落结构在长期免耕条件下的稳定性有损害,但其损害程度在不同轮作方式之间存在差异^[67]。

2.3 不同轮作模式对放线菌的影响

史功赋发现,合理的轮作休耕措施能够改善土壤理化性状,可提高厚壁菌门、放线菌门及其他有益菌的种类及丰度,使得土壤酶活性达到最佳,促使春小麦增加土壤水分、有效利用养分,有利于它的生长发育;同时,春小麦对微生物也有一定的促进作用,使其群落结构保持稳定,使土壤—微生物—春小麦形成良性循环的过程,从而达到农田土壤可持续利用的目的^[68]。陈欢等研究表明,在小麦—玉米轮作条件下,长期施用有机肥可显著增加土壤微生物总数量,尤其是细菌和放线菌的数量有显著增长^[69]。

综上所述,土壤微生物作为土壤生态系统的核心,在参与调节土壤养分循环与能量流动方面具有广泛作用。与连作相比,轮作后的大田,其在微生物种类和数量上,均能得到有效改善。其中,玉米、大豆轮作可以提高黑土微生物多样性,改善土壤微生物结构和功能,细菌中变形菌门、慢生根瘤菌属、酸杆菌属和固氮菌的相对丰度上升,鞘脂单胞菌属的相对丰度下降;真菌中子囊菌旺盛生长,但土壤真菌生物量降低,多样性升高;土壤线虫群落结构在轮作条件下配合免耕更加稳定。大豆、玉米、小麦旱地轮作变形菌门、酸杆菌门、放线菌为优势菌门,拟杆菌门丰富度则与土壤 pH 值有关。春小麦—马铃薯—休耕轮作与连作模式相比微生物 α

多样性上升,物种种类丰富度提高,群落结构比较稳定,厚壁菌属、放线菌属等有益菌属种类和丰度均呈现上升趋势。

3 不同轮作模式对黑土地酶活性的影响

土壤酶指土壤中的生物活性蛋白质,它在土壤新陈代谢中起着重要作用^[70],它对土壤生态系统起着至关重要的作用,土壤的种种生化反应,除了受微生物自身活动影响之外,均由多种对应酶共同参与^[71]。

有机肥的投入不仅增加了土壤养分和能源,且带入了丰富的微生物,还会激发土壤酶活性^[72]。熊湖等发现,通过马铃薯—玉米轮作可提高土壤酶活性,加速土壤中速效养分转化,促进马铃薯植株生长发育,从而缓解长期连作对马铃薯的胁迫作用^[73]。侯乾等研究发现,马铃薯长期连作会导致土壤中酶活性显著下降,降低马铃薯对土壤养分的吸收利用效率^[74]。乌恩等发现,轮作处理较连作处理并未显著提高耕层土壤含水量,但种子期、栽培期和成熟期的土壤表面温度显著上升,与连续播种的玉米相比,玉米、高粱和燕麦轮作的土壤表面温度最高上升了 21.76%;轮作提高了土壤硬度,降低了 0~20 cm 耕层土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶活性;提高了 20~40 cm 耕层土壤蔗糖酶活性,玉米—高粱—燕麦轮作最高增幅为 64.51%;玉米—大豆—甜菜轮作提高了耕层土壤有效磷含量,最高增幅为 172.24%,降低了碱解氮和速效钾含量,最低降幅分别为 20.35% 和 7.37%^[75]。于镇华等研究表明,大豆—玉米轮作中土壤酶的活性随着土层深度的增加而下降,其中蔗糖酶和过氧化氢酶活性下降显著,过氧化氢酶活性随化肥施用量的增加而降低^[76]。戴建军等采用盆栽试验的方法,比较玉米、大豆连作与轮作对根际土壤酶活性的变化,结果表明,轮作玉米、大豆,多酚氧化酶、脲酶活性上升,蔗糖酶活性变化不明显^[77]。张广娜等研究发现,大豆和玉米轮作对土壤酶活性的影响大于大豆轮作,大豆和玉米轮作中总硫含量下降最多,土壤 β -半乳糖苷酶、蛋白酶和 β -葡萄糖苷酶活性明显提高^[78]。赵月等的研究结果表明,在玉米的各个生育期,不同耕层厚度中的土壤脲酶活性差异不显著,但根系土壤的酶活性较强,能够有效提取土壤中的营养物质,从而有利于玉米的生长发育^[79]。因此,通过提高熟土层的厚度,可提高根系土壤的酶活

性,从而更好地促进玉米的生长发育。

综上所述,土壤酶活性体现了土壤所发生的多种生物化学过程的趋势与强弱程度。研究表明,在长期连作条件下,土壤有益菌减少导致脲酶等转化酶的活性降低,使得土壤养分转化效率降低,引起氨化细菌等的数量降低,从而使过氧化氢酶等抗逆性酶活性降低。而玉米—高粱—燕麦和玉米—大豆—甜菜的轮作模式虽未显著提高耕层土壤含水量,但能显著提高苗期、分枝期、成熟期耕层土壤温度,改善耕层土壤硬度,优化土壤物理结构,打破玉米连作障碍,提高深层土壤蔗糖酶活性,改善土壤化学性状。玉米—大豆轮作模式中根际土壤多酚氧化酶、脲酶活性降低,蔗糖酶、过氧化氢酶的活性随着土层深度的增加呈下降趋势,全硫含量下降,但 β -半乳糖苷酶、 β -葡萄糖苷酶、蛋白酶、磷酸单酯酶以及芳基硫酸酯酶活性明显增加。

4 不同轮作模式对产量的影响

长期连续耕种使农田中的植物覆盖物和根系失去了自然的结构,土壤生物多样性降低,土壤水分分布不均,植物根系受到影响,导致水分和养分不足,植物缺乏营养,抵抗力下降,容易受到病虫害侵扰,最终影响植物的生长发育,导致产量降低。研究表明马铃薯长期连作会影响根际土壤中菌群,土传病害加重,严重影响马铃薯品质和产量^[80]。玉米长期连作下导致土壤物理性状恶化、有机质含量降低、土壤养分失衡,与此同时,土壤微生物的群落结构和多样性发生改变,会损害玉米的品质,影响玉米产量和营养价值,从而影响到玉米的市场价格^[81-86]。为缓解连作障碍,人们通常选用其他作物进行轮作处理。

目前,东北仍以玉米—大豆轮作种植模式为主,玉米根系在土壤中扎根较浅;大豆根系在土壤中很深,可从土壤更深的层次上摄取营养,使得不同土层深度养分得到平衡使用,增产作用显著^[87]。王娜等明确指出,在实际农业生产中,长期连续种植大豆和玉米会降低产量,而轮作会增加大豆和玉米的产量,长期种植大豆会显著降低土壤养分含量^[88]。王树起等的研究表明,大豆连作降低了有效养分含量,造成大豆产量下降,因此,合理种植作物就显得尤为重要^[89]。盖志佳等的研究结果表明,玉米—高粱—大豆、玉米—玉米—大豆轮作模式下,大豆籽粒产量分别比连作大豆籽粒产量提高

23.88%、17.55%，收益也有明显增长，轮作对农民的利益比较有利，还有助于构建合理的农业种植结构^[90]。张阳等通过对玉米—大豆轮作的研究表明，大豆的氮肥和磷肥减少 50%、大豆的氮肥增加 50%、玉米的磷肥减少 50% 的控制模式可在同一季节提高大豆和玉米的产量，周年产量可提高 10.05%，在玉米—玉米—大豆轮作模式中，周年产量可提高 13.40%^[91]。姚凡云等基于东北半干旱环境，以玉米—花生轮作为对象结合秸秆还田进行研究，结果表明，与连作相比，播种前玉米区和花生区 0 ~ 40 cm 土层土壤平均含水量分别提高 1.9% ~ 3.9%、11.0% ~ 13.9%，而 2016 年和 2017 年土壤当量比 (LER) 为 1.05 ~ 1.16，2018 年 LER 均 < 1^[92]。

综上所述，合理的轮作模式可有效提高作物产量。玉米—大豆轮作，发挥大豆固氮作用，给下茬作物玉米带来氮素营养；玉米采收后所营造的土壤环境，对促进大豆生物固氮是有利的，因而可互促增产，增加作物的产量，改善作物的质量。但玉米—花生轮作模式结合，秸秆还田虽能有效改善作物播前的土壤水分状况，但对于作物产量的影响差异较大。

5 建议与展望

合理轮作模式，是东北农业发展中所面临的重要课题。东北黑土地充当粮食安全稳压器，有着优越的自然地理条件，对农业生产十分有利，但受全球气候变化及长期开发利用的影响，黑土地“薄、瘦、硬、劣、减”等问题突出，即平均土层降低、水土流失严重、有机质含量下降等。而合理的轮作模式，对改善农田生态环境，提高土壤肥力，均衡利用土壤养分有重要作用。国内外学者从不同角度进行研究，提出了诸多见解，为本研究提供了理论素材，但在这些研究中依然存在不足。因此，探究适合东北黑土地的轮作模式，下一步深入研究的重点应该是选择、培育出适合东北自然地理环境的优质品种，探索其不同轮作模式对土壤理化性质和土壤肥力等方面的作用特点，采取因地制宜的管理方式，不仅有利于改善土壤质量，还能提高土地利用效率。最后，还需要建立多尺度的土壤水文模型，深入研究土壤水分循环的空间—时间变化，及土壤水分运移的机理。此外，研究还要涉及到全球变化、森林生态系统等复杂的学科，加强跨学科间的

交叉研究，发展出能够模拟未来气候下土壤有机质与肥力的人工智能模型，为国家农业的发展提供必要依据。

参考文献：

- [1] 张新荣, 焦洁钰. 黑土形成与演化研究现状[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 553–568.
- [2] 刘宝元, 张甘霖, 谢云, 等. 东北黑土区和东北典型黑土区的范围与划界[J]. 科学通报, 2021, 66(1): 96–106.
- [3] 韩晓增, 邹文秀. 东北黑土地保护利用研究足迹与科技研发展望[J]. 土壤学报, 2021, 58(6): 1341–1358.
- [4] 韩晓增, 邹文秀. 我国东北黑土地保护与肥力提升的成效与建议[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 206–212.
- [5] 刘洪彬, 李顺婷, 吴梦瑶, 等. 耕地数量、质量、生态“三位一体”视角下我国东北黑土地保护现状及其实现路径选择研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 544–552.
- [6] 马常宝, 王慧颖. 国内外黑土地保护利用现状与方向研究[J]. 中国农业综合开发, 2022(11): 7–11.
- [7] 龚子同, 张之一, 张甘霖. 草原土壤: 分布、分类与演化[J]. 土壤, 2009, 41(4): 505–511.
- [8] 尹祥, 袁伟. 我国立法保护东北黑土地[J]. 生态经济, 2022, 38(9): 9–12.
- [9] 李保国, 刘忠, 黄峰, 等. 巩固黑土地粮仓 保障国家粮食安全[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(10): 1184–1193.
- [10] 赵文凯. 吉林省黑土区农户保护性耕作技术采纳影响因素研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [11] 廖晓勇, 姚启星, 万小铭, 等. 黑土粮仓全域定制模式的理论基础与技术路径[J]. 地理学报, 2022, 77(7): 1634–1649.
- [12] 于法稳, 王广梁, 林珊. 粮食主产区农业绿色发展的关键问题及路径选择[J]. 重庆社会科学, 2022(7): 6–18.
- [13] 杜国明, 张瑞, 于凤荣. 基于地学信息图谱的东北黑土区种植模式分析[J]. 应用生态学报, 2022, 33(3): 694–702.
- [14] 谢云, 高燕, 顾治家, 等. 东北黑土区坡耕地水土流失危险程度评价[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2020, 18(6): 105–114.
- [15] Chen X P, Cui Z L, Fan M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486–489.
- [16] 韩天富, 韩晓增. 走粮豆轮作均衡持续丰产的农业发展道路[J]. 大豆科技, 2016(1): 1–3.
- [17] 王维, 侯会, 耿晓月, 等. 甘薯轮作机理研究进展[J]. 农业与技术, 2023, 43(3): 63–65.
- [18] Wang X. Study on continuous cropping obstacle and control strategy of medicinal plants[C]//Research Institute of Management Science and Industrial Engineering. Proceedings of 2017 3rd International Conference on Economics, Social Science, Arts, Education and Management Engineering. Atlantis Press, 2017: 844–847.
- [19] 于台泽, 贾伟, 安晓慧, 等. 轮作种植制度的生态经济效益分析及发展建议[J]. 中国农学通报, 2022, 38(26): 150–157.
- [20] 杨庆媛, 展展图, 信桂新, 等. 中国耕作制度的历史演变及当前轮作休耕制度的思考[J]. 西部论坛, 2018, 28(2): 1–8.

- [21] 韩茂莉. 中国古代农作物种植制度略论[J]. 中国农史, 2000, 19(3): 91–99, 64.
- [22] 宋湛庆. 我国古代的大豆[J]. 中国农史, 1987, 6(3): 50–57.
- [23] 王保宁, 耿雪琰. 华北地区两年三熟制形成问题再讨论[J]. 中国农史, 2019, 38(1): 15–23.
- [24] 刘 铭, 孙金荣. 乡村振兴背景下的农业历史与文化研究: 山东省农业历史学会 2018 年学术年会暨学会创新与服务能力提升研讨会综述[J]. 中国农史, 2019, 38(1): 138–144.
- [25] 郭晓霞, 刘景辉, 田 露, 等. 免耕轮作对内蒙古地区农田贮水特性和作物产量的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(8): 1504–1512.
- [26] 周 岚, 杨 永, 王占海, 等. 玉米—大豆轮作及氮肥施用对土壤细菌群落结构的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(11): 2016–2022.
- [27] 王树宇. 粮豆轮作大豆优质专用品种农艺性状鉴定分析[J]. 现代农业科技, 2018(10): 31–32.
- [28] 朱泽生, 孙 玲. 基于卫星遥感的区域棉稻与稻棉轮作周期估算模型研究[J]. 作物学报, 2006, 32(1): 57–63.
- [29] 古丽娜扎尔·艾 力, 陶海宁, 王自奎, 等. 基于 APSIM 模型的黄土旱塬区苜蓿: 小麦轮作系统深层土壤水分及水分利用效率研究[J]. 草业学报, 2021, 30(7): 22–33.
- [30] 刘建国, 张 伟, 李彦斌, 等. 新疆绿洲棉花长期连作对土壤理化性状与土壤酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 725–733.
- [31] 王 涛, 乔卫花, 李玉奇, 等. 轮作和微生物菌肥对黄瓜连作土壤理化性状及生物活性的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(3): 578–583.
- [32] 张瑞明, 朱建华, 高善民, 等. 沪郊设施菜地连作土壤盐分积累及离子组成变化的研究[J]. 上海农业学报, 2011, 27(4): 76–79.
- [33] 张福韬, 乔云发, 苗淑杰, 等. 长期玉米连作下黑土各组分有机质化学结构特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(10): 1913–1924.
- [34] 宋丽萍, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 陇中黄土高原半干旱区苜蓿—作物轮作对土壤物理性质的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(7): 12–20.
- [35] 蔡立群, 齐 鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦—豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 141–145.
- [36] 陈恩凤, 周礼恺, 武冠云. 微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J]. 土壤学报, 1994, 31(1): 18–25.
- [37] 彭现宪. 长期不同种植模式下东北黑土理化性状和有机碳稳定性的差异研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [38] 张福韬, 乔云发, 苗淑杰, 等. 轮作对黑土团聚体有机质光谱特征的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 208–214.
- [39] 吴鹏博, 李立军, 张艳丽, 等. 轮作结合施肥对土壤有机碳及其组分和土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 416–422.
- [40] 杨 阳. 秸秆还田条件下休耕轮作对玉米农田土壤团聚体及其养分的影响[D]. 哈尔滨: 中国科学院大学(中国科学院东北地
- 理与农业生态研究所), 2019.
- [41] 张维俊, 李双异, 徐英德, 等. 土壤孔隙结构与土壤微环境和有机碳周转关系的研究进展[J]. 水土保持学报, 2019, 33(4): 1–9.
- [42] 郭金瑞, 宋振伟, 朱 平, 等. 长期不同种植模式对东北黑土微生物群落结构与土壤理化性质的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 353–359.
- [43] 高 盼, 刘玉涛, 王宇先, 等. 半干旱区玉米—大豆轮作对土壤物理性质和化学性质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2018(9): 23–26.
- [44] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(2): 211–219.
- [45] Bergström L, Brink N. Effects of differentiated applications of fertilizer N on leaching losses and distribution of inorganic N in the soil[J]. Plant and Soil, 1986, 93(3): 333–345.
- [46] 吕欣欣, 丁雪丽, 张 彬, 等. 长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(1): 1–10.
- [47] 王百慧. 四种不同耕作措施对农田黑土养分和酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2013.
- [48] 张振江. 长期麦秆直接还田对作物产量与土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 1998, 29(4): 154–155.
- [49] 张树春, 刘淑娟, 贾 红, 等. 东北旱田米—豆—米轮作区黑土地保护利用技术模式[J]. 植物医生, 2018, 31(12): 19–20.
- [50] 骆 坤, 胡荣桂, 张文菊, 等. 黑土有机碳、氮及其活性对长期施肥的响应[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 676–684.
- [51] 王 洋, 齐晓宁. 德惠市农田黑土肥力评价及施肥措施研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 26–28.
- [52] 孙 涛, 冯晓敏, 高新昊, 等. 多样化种植对土壤团聚体组成及其有机碳和全氮含量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(15): 2929–2940.
- [53] 王 聪, 李 明, 邱广伟, 等. 不同种植模式对黑龙江黑土理化性状的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(2): 74–83.
- [54] 陈丹梅, 陈晓明, 梁永江, 等. 轮作对土壤养分、微生物活性及细菌群落结构的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(12): 56–65.
- [55] Monaci E, Polverigiani S, Neri D, et al. Effect of contrasting crop rotation systems on soil chemical, biochemical properties and plant root growth in organic farming: first results[J]. Italian Journal of Agronomy, 2017, 11: 364–374.
- [56] Kanton R A L, Buah S S J, Larbi A, et al. Soil amendments and rotation effects on soybean and maize growths and soil chemical changes in Northern Ghana[J]. International Journal of Agronomy, 2017, 2017: 1–9.
- [57] 匡恩俊, 李梓瑄, 迟凤琴, 等. 耕地方式与有机肥配施对大豆产量及土壤养分特征的影响[J]. 大豆科学, 2020, 39(1): 108–115.
- [58] 冯雪婉, 李翠兰, 彭 畅, 等. 玉米—大豆轮作体系对黑土土壤固氮菌群落结构及其质量的影响[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2319–2333.
- [59] 张亦驰. 耕作方式和轮作对黑土钾素形态及分布的影响[D].

- 长春:吉林农业大学,2012.
- [60]范雅琦,王亚南,霍瑞轩,等. 轮作模式下土壤微生物与线虫群落的互作研究现状[J]. 中国农学通报,2022,38(25):108–113.
- [61]宋佳承. 轮作及连作对马铃薯生长发育及根际微环境的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2020.
- [62]提俊阳,张玉芹,杨恒山,等. 豆米轮作对春玉米土壤固氮细菌群落结构及多样性的影响[J]. 中国农学通报,2023,39(2):44–50.
- [63]高洪军,李 强,彭 畅,等. 不同轮作和秸秆还田方式对黑土细菌群落结构的影响[J]. 吉林农业大学学报,2022,44(3):336–344.
- [64]刘洪秀. 东北黑土区大豆连作土壤微生物群落变化的分子解析[D]. 北京:中国科学院大学,2020.
- [65]王 倩. 保护性耕作下土壤微生物群落组成及功能研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2021.
- [66]刘 杭. 黑土区典型作物轮作和连作对土壤微生物群落结构的影响[D]. 哈尔滨:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2019.
- [67]张梦亭,刘 萍,黄丹丹,等. 东北黑土线虫群落对长期免耕后土壤扰动的响应[J]. 中国农业科学,2021,54(22):4840–4851.
- [68]史功赋. 大兴安岭西麓春小麦土壤微生物对不同轮作休耕模式的响应机制[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2021.
- [69]陈 欢,曹承富,张存岭,等. 长期施肥砂姜黑土微生物学特征差异及评价[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(6):1563–1571.
- [70]吴凤芝,王学征,潘 凯. 小麦和大豆茬口对黄爪土壤微生物生态特征的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(4):794–798.
- [71]孙 建,刘 苗,李立军,等. 免耕与留茬对土壤微生物量C、N及酶活性的影响[J]. 生态学报,2009,29(10):5508–5515.
- [72]Dick R P. A review:long-term effects of agricultural systems on soil biochemical and microbial parameters[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment,1992,40(1/2/3/4):25–36.
- [73]熊 湖,郑顺林,张德银,等. 轮作与连作对马铃薯生长及土壤酶活性的影响[J]. 福建农业学报,2022,37(1):25–32.
- [74]侯 乾,王万兴,李广存,等. 马铃薯连作障碍研究进展[J]. 作物杂志,2019(6):1–7.
- [75]乌 恩,孙平立,萨其仍贵,等. 不同轮作模式对东北黑土理化特性及酶活性的影响[J]. 中国农技推广,2021,37(6):70–75,80.
- [76]于镇华,李彦生,金 剑,等. 不同施肥措施对农田黑土剖面土壤酶活性特征的影响[J]. 土壤与作物,2018,7(3):276–283.
- [77]戴建军,宋朋慧,闫暮春,等. 不同种植方式对苗期大豆、玉米根际土壤酶活性及微生物量碳、氮的影响[J]. 东北农业大学学报,2013,44(2):17–22.
- [78]张广娜,陈利军,陈振华,等. 大豆轮作与连作对黑钙土酶活性和动力学特性的影响[J]. 大豆科学,2008,27(5):795–800.
- [79]赵 月,王春雨,隋跃宇,等. 基于玉米大豆轮作的黑土玉米农田酶活性对不同耕层厚度的响应[J]. 玉米科学,2019,27(6):95–103.
- [80]谢奎忠,孙小花,罗爱花,等. 基施锌肥对长期连作马铃薯抗病性相关酶活性、土传病害和产量的影响[J]. 作物杂志,2022(4):154–159.
- [81]张俊伶,张江周,申建波,等. 土壤健康与农业绿色发展:机遇与对策[J]. 土壤学报,2020,57(4):783–796.
- [82]姜宇博,蒋和平,钱春荣,等. 我国玉米生产效率影响因素及提升途径研究进展[J]. 江苏农业科学,2019,47(5):12–15.
- [83]耿 贵,杨瑞瑞,於丽华,等. 作物连作障碍研究进展[J]. 中国农学通报,2019,35(10):36–42.
- [84]翁佩莹,郑红艳. 作物连作障碍的成因与机制及其消减策略[J]. 亚热带植物科学,2020,49(2):157–162.
- [85]王 晶,孙松青,李 雪,等. 秸秆不同还田方式对轮作小麦—玉米产量、土壤养分及蔗糖酶活性的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(4):85–90.
- [86]郑云珠,孙树臣. 单季施用生物炭提高土壤肥力及小麦玉米轮作周年产量[J]. 江苏农业科学,2022,50(20):257–264.
- [87]杨 扬,张 慧,高莉莉,等. 玉米大豆不同轮作方式对水分利用和产量的影响[J]. 安徽农学通报,2019,25(24):38–40.
- [88]王 娜,王 璐,宋昌海,等. 轮作对黑土区作物产量及土壤理化性质的影响[J]. 农业科技通讯,2022(9):71–74.
- [89]王树起,韩晓增,乔云发,等. 寒地黑土大豆轮作与连作不同年限土壤酶活性及相关肥力因子的变化[J]. 大豆科学,2009,28(4):611–615.
- [90]盖志佳,刘婧琦,蔡丽君,等. 秸秆还田条件下玉米—高粱(玉米)—大豆轮作的产量与效益分析[J]. 中国种业,2020(2):51–54.
- [91]张 阳,黄炳林,张明聪,等. 氮磷调控对大豆—玉米轮作周年产量和养分利用效率的影响[J]. 大豆科学,2019,38(5):762–769.
- [92]姚凡云,曹玉军,王虹霏,等. 秸秆还田对东北半干旱区玉米—花生轮作系统土壤水热特性及作物产量的影响[J]. 玉米科学,2020,28(4):86–95.