



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展

沈晓琳, 王丽丽, 汪洋, 王明亮, 杨殿林, 赵建宁, 李刚, 轩清霞, 王亮

引用本文:

沈晓琳, 王丽丽, 汪洋, 等. 保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 361–370.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0496>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响

汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 赵建宁, 刘红梅, 谭炳昌, 王慧, 王明亮, 黄进, 张小福
农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 340–352 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0329>

威廉环毛蚓耕作时间对菜田土壤微生物群落多样性及碳代谢特征的影响

郑宪清, 范晓芬, 张翰林, 李双喜, 王金庆, 张娟琴, 王良军, 陶晓斌, 吕卫光
农业资源与环境学报. 2015(6): 596–602 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0139>

耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势

胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 夏旭, 韦本辉
农业资源与环境学报. 2018, 35(2): 95–103 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0242>

免耕旧膜再利用对玉米产量及灌溉水生产力的影响

苏永中, 张珂, 刘婷娜, 王婷
农业资源与环境学报. 2016, 33(5): 491–498 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0055>

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

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽
农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

沈晓琳, 王丽丽, 汪 洋, 等. 保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 361–370.

SHEN Xiao-lin, WANG Li-li, WANG Yang, et al. Progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates, microbes, and nematode communities[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 361–370.



开放科学 OSID

保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响研究进展

沈晓琳¹, 王丽丽^{1*}, 汪 洋¹, 王明亮², 杨殿林¹, 赵建宁¹, 李 刚¹, 轩清霞³, 王 亮³

(1. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300384; 3. 齐河县农业局, 山东德州 251100)

摘 要: 保护性耕作具有良好的生态效益, 有利于农业生态系统的可持续发展。本文对比分析了国内外有关常规耕作和保护性耕作措施对土壤团聚体、土壤有机碳、土壤微生物及土壤线虫影响的研究进展。结果表明: 保护性耕作减少土壤大团聚体的破坏, 降低团聚体周转速率, 提高土壤结构的稳定性; 保护性耕作提高表层土壤总有机碳及活性有机碳含量; 保护性耕作可以提高耕层微生物生物量, 尤其对真菌生物量影响显著; 保护性耕作不同程度地提高了团聚体中微生物量和微生物多样性, 但并未改变微生物在团聚体中的分布模式; 保护性耕作可提高土壤线虫多度, 提高原状土壤和土壤各粒级团聚体中线虫群落的成熟度指数和结构指数, 但并未改变线虫总数、营养类群、功能团及生态指数在团聚体中的分布模式。针对目前国内外研究现状, 展望了保护性耕作今后的研究重点, 以期因地制宜选取保护性耕作措施提供理论支持, 推进我国农业可持续发展。

关键词: 保护性耕作; 团聚体; 有机碳; 微生物; 线虫

中图分类号: Q145

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)03-0361-10

doi: 10.13254/j.jare.2019.0496

Progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates, microbes, and nematode communities

SHEN Xiao-lin¹, WANG Li-li^{1*}, WANG Yang¹, WANG Ming-liang², YANG Dian-lin¹, ZHAO Jian-ning¹, LI Gang¹, XUAN Qing-xia³, WANG Liang³

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Agronomy & Resources and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 3. Qihe Agricultural Bureau, Dezhou 251100, China)

Abstract: Conservation tillage has numerous ecological benefits. For example, it is conducive to the sustainable development of agricultural ecosystems. This paper compared and analyzed various studies on the effects of conventional and protective tillage measures on soil aggregates, soil organic carbon, soil microorganisms, and soil nematodes at home and abroad. The effects of conservation tillage on soil aggregates and biological characteristics were largely manifested as follows: Conservation tillage reduced the damage of large soil aggregates, reduced aggregate turnover rates, and improved the stability of soil structures. Conservation tillage increased the total surface soil contents of organic carbon and active organic carbon. Conservation tillage could increase the microbial biomass in cultivated layers, with a particularly

收稿日期: 2019-09-30 录用日期: 2020-01-03

作者简介: 沈晓琳 (1996—), 女, 天津人, 硕士研究生, 主要从事农业生物多样性与生态农业研究。E-mail: shenxl0527@163.com

*通信作者: 王丽丽 E-mail: lili0229ok@126.com

基金项目: 国家重点研发计划课题子课题 (2016YFD0201009); 天津市自然科学基金 (18JCYBJC23000); 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务 (CAAS-XTX2016015); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (2018-szjj-wll)

Project supported: Subproject of National Key R&D Plan (2016YFD0201009); The Natural Science Foundation of Tianjin (18JCYBJC23000); Cooperative Innovation Project of Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS (CAAS-XTX2016015); Special Fund for Basic Scientific Research Operation of Central Level Public Welfare Research Institutes (2018-szjj-wll)

significant impact on fungal biomass. Conservation tillage increased the microbial biomass and microbial diversity in aggregates to varying degrees, but did not change the microbial population distribution patterns in aggregates. Conservation tillage increased soil nematode abundance. It also increased the maturity and structure indexes of nematode communities in undisturbed soil and soil aggregates of all sizes, but does not change the total number of nematodes, nutritional groups, functional groups, or ecological distribution patterns of indexes in agglomerates. Based on the current research status at home and abroad, this article looks forward to the future research focus of conservation tillage with the goal of providing theoretical support for selecting conservation tillage measures in accordance with local conditions and promoting the sustainable development of agriculture in China.

Keywords: conservation tillage; soil aggregates; soil organic carbon; soil microbes; nematodes

自然资源部发布的《2017 中国土地矿产海洋资源统计公报》显示,截至 2017 年末,全国耕地面积为 1.35 亿 hm^2 ^[1]。但由于频繁翻耕,肥料施用不当,清除、焚烧作物残余物等低水平的农业生产方式,土壤侵蚀、退化,土壤有机碳大量损失^[2],致使我国的耕地质量总体偏低^[3]。随着人口增加和经济发展,人们愈发重视农业生产的可持续发展,近年来关于保护性耕作的研究得到了广泛关注。保护性耕作是以减少土壤扰动和增加秸秆覆盖为主要特点的耕作方式^[4],其核心技术包括少耕、免耕、缓坡地等高耕作、沟垄耕作、残茬覆盖耕作、秸秆覆盖等^[5]。研究已经证实,保护性耕作有着良好的经济效益和生态效益,不仅可以提高作物产量,而且对土壤理化性质有一定的改善。随着耕作年限增加,土壤有机质、全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾等含量逐渐增加^[6],长期保护性耕作也可以改善表层土壤的微生物学特性^[7]。随着研究的深入,人们更重视耕作方式对土壤有机碳固持的影响机制,以因地制宜制定土壤管理措施^[8-10]。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,是土壤的重要组成部分^[11]。团聚体在土壤中具有“三大作用”,即保证和协调土壤中的水肥气热、影响土壤酶的种类和活性、维持和稳定土壤疏松熟化层^[12]。土壤团聚体的数量和质量不仅影响土壤肥力,而且与土壤抗侵蚀能力和土壤固碳能力有直接关系^[13-15]。土壤还是陆地生态系统最大的有机碳库^[16],土壤有机碳的矿化作用(土壤呼吸)是土壤与大气快速交换二氧化碳的主要形式^[17]。农田土壤有机碳的动态影响土壤结构和养分输送能力,可表征土壤肥力^[18],而且具有固碳减排、应对全球气候变化的重要意义^[19]。土壤团聚体是土壤线虫的重要栖息地,不同粒级团聚体结构和组成的差异影响土壤线虫群落分布和生态功能,最终影响土壤肥力。

土壤团聚体和土壤有机碳、土壤微生物和线虫密切相关,一方面,土壤有机碳是土壤团聚体形成的重

要胶结物质^[20],土壤微生物是土壤团聚体形成的最活跃的生物因素,另一方面,土壤团聚体是土壤有机碳、土壤微生物和线虫存在的场所。土壤微生物和线虫通过对土壤有机碳的直接利用或菌丝物理缠绕、分泌有机物等机制影响土壤有机碳的分布和土壤团聚体的形成和稳定,土壤团聚体的动态变化又反过来影响土壤微生物和线虫活动及土壤有机碳的分布,土壤团聚体、土壤有机碳、土壤微生物和线虫相互影响,密不可分^[21]。因此,从团聚体尺度上阐明耕作方式对土壤微生物和线虫群落的影响机制,有利于探究保护性耕作对土壤肥力及生态状况的影响,以寻求适宜的保护性耕作方式。

1 保护性耕作对土壤团聚体形成的影响

土壤团聚体的形成是一个包括物理、化学、生物作用的综合过程,而且与土壤有机碳和土壤微生物密切相关。目前较为公认的团聚体形成机制是 1998 年 Six 等^[22]提出的以大团聚体周转为核心的模型:新鲜有机物(植物残体)进入土壤后被微生物利用,产生的胞外多糖与土壤颗粒结合形成大团聚体;随着颗粒有机碳的分解,微生物活动减弱,粗颗粒有机质和土壤基质之间的胶结程度降低,大团聚体分解,释放出颗粒有机质和微团聚体。

此后, Six 等^[23]进一步完善了团聚体周转模型,并加入了耕作方式的影响,阐明了常规耕作和免耕系统中大团聚体周转和土壤有机质动态:免耕系统中,新鲜作物源残茬胶结微生物及微生物源有机质等进入大团聚体,大团聚体内的残茬通过微生物等的分解作用形成粗颗粒有机质。随时间推移,大团聚体内的粗颗粒有机质进一步分解和破碎形成细颗粒有机质,细颗粒有机质被土壤黏粒和微生物源胶结物包裹,成为新形成微团聚体的核。在最终阶段,碳被消耗,微生物活性降低,微生物源胶结物减少,导致大团聚体分散并释放出微团聚体、土壤黏粒和颗粒有

机质。当又有新鲜残茬进入时,这些组分又可以参与下一轮的大团聚体循环^[24];而在常规耕作系统中,耕作使大团聚体破碎成微团聚体,大团聚体内包裹的粗颗粒有机质暴露出来,有机质在微生物的作用下矿化作用加速,释放二氧化碳。常规耕作加快了大团聚体周转速率,导致土壤中大团聚体含量少,而游离微团聚体较多^[25]。

频繁耕作的扰动不仅不利于土壤大团聚体形成,而且会直接导致大团聚体的破碎,而保护性耕作措施能在一定程度上减少土壤团聚体在机械扰动下的破坏,秸秆还田措施还能为大团聚体的形成提供物质基础^[26],有利于增加大团聚体含量,改善表层土壤结构^[27]。周虎等^[28]研究了4年内不同耕作方式对华北平原小麦农田土壤团聚体的影响,结果表明,免耕处理下0~10 cm土层中>0.25 mm大团聚体数量显著高于翻耕和旋耕处理,而10~30 cm土层大团聚体数量无显著差异,说明免耕显著提高了表层土壤>0.25 mm大团聚体数量。陈文超等^[29]研究了连续5年免耕对河南省封丘县潮土团聚体组成的影响,发现耦合免耕与秸秆还田两种保护性耕作措施能显著提高>5 mm粒级团聚体的比例,并在一定程度上改善频繁翻耕所带来的土壤结构体破坏的问题。李景等^[30]在河南省孟津县进行了连续13年保护性耕作的试验,结果表明,翻耕处理下表层土壤>2 mm大团聚体含量随耕作年限延长明显下降,0.053~0.25 mm微团聚体含量显著提高;而免耕覆盖和深松覆盖显著提高了表层土壤>2 mm大团聚体的含量,降低了0.053~0.25 mm微团聚体含量,进一步证实了保护性耕作可改善土壤结构。另外,研究结果还表明免耕覆盖和深松覆盖在试验初期可促进大团聚体的形成,这可能是由于秸秆还田后植物残体作为胶结物质,促进了团聚体的形成和稳定。

2 保护性耕作对土壤团聚体稳定性的影响

团聚体的稳定性是指团聚体抵抗外力作用或外部环境变化而保持原有形态的能力^[31]。团聚体的稳定性是土壤重要的物理性质,通过对土壤水、通气性、温度等的影响直接影响作物生产力^[32]。Tisdall^[33]认为,大团聚体主要是与分解较为迅速的瞬时性胶结剂(微生物和植物来源多糖)和暂时性胶结剂(菌根、真菌菌丝、微生物细胞及藻类)黏结在一起的,而微团聚体主要受持久性胶结剂(与多价金属阳离子联系的芳香腐殖类化合物和受黏粒强烈吸附的聚合物)作用,

因此微团聚体更能抵抗耕作产生的机械扰动造成的破坏^[34]。

关于土壤团聚体稳定性的评价,学术界普遍采用筛分法,测得直径>0.25 mm团聚体含量,认为>0.25 mm团聚体含量越高,土壤结构越稳定、抗侵蚀能力越好^[35]。但这一指标更侧重大团聚体的数量,忽视了团聚体直径的影响。平均质量直径(MWD)采用加权求和平方的方法反映团聚体结构,MWD越大,土壤团聚体越稳定^[36]。MWD受大团聚体直径的影响较大,可以用来反映耕作对团聚体的机械破碎情况。在此基础上,几何平均直径(GMD)对团聚体直径取对数后加权求和,使团聚体直径和团聚体含量的影响较为均衡^[37]。近年来有人用分形维数(D)表征土壤团聚体的分布状况,分形维数越小,土壤团聚体越稳定,土壤结构越好^[38]。苏静等^[39]对三种评价方法进行了比较,结果表明分形维数与>0.25 mm团聚体含量呈负相关,MWD与>0.25 mm团聚体含量呈正相关,三种方法都能评价土壤结构。梁爱珍等^[40]研究了5年内不同耕作方式下东北黑土团聚体粒级分布和稳定性的变化,结果表明非线性回归得到的分形维数在短期内对耕作方式未作出迅速响应,分形维数反映土壤团聚体稳定性的准确度和灵敏度还有待探讨。

不同耕作方式对团聚体稳定性的影响已有很多报道。武均等^[41]在黄土高原陇中雨养农田进行了豆麦轮作系统的不同耕作措施长期定位试验,结果表明,相对于常规耕作,免耕+秸秆覆盖、传统耕作+秸秆还田及免耕三种处理不同程度地提高了>0.25 mm团聚体含量和MWD,其中免耕+秸秆覆盖最佳。唐晓红等^[42]进行了16年的紫色水稻土保护性耕作研究发现,相对于传统水旱轮作,保护性耕作土壤>0.25 mm团聚体的含量和有机碳含量均有所提高。刘威等^[43]亦研究发现秸秆还田和免耕处理均会增加0~20 cm土层>0.25 mm团聚体含量、MWD和GMD,降低分形维数,而且秸秆还田处理的效果优于免耕措施。

保护性耕作提高土壤团聚体稳定性的机制可能主要有两个方面:一方面,保护性耕作通过减少耕作对表层土壤造成的机械扰动,降低团聚体周转速率,减少大团聚体的破碎,提高团聚体的稳定性^[44];另一方面,保护性耕作通过增加土壤中的有机胶结物质提高团聚体稳定性,因为免耕处理能减少对植物根系的破坏,从而保护大团聚体^[45],而秸秆还田处理后土壤有机质在土壤表层聚集^[46],使土壤颗粒胶结作用增强,促进土壤的团聚作用,有利于大粒级团聚体的形

成^[47];此外,保护性耕作可显著提高微生物活性,使微生物量、真菌菌丝密度、胞外分泌物等增加,促进微团聚胶结为大团聚体,使团聚体稳定性增加^[48]。

3 保护性耕作对土壤有机碳的影响

表土中约90%的有机碳位于团聚体内^[49],土壤团聚体对有机碳的物理保护是耕层土壤有机碳稳定的重要机制^[50],土壤有机碳不同形式的转化贯穿土壤团聚体的形成、稳定及周转过程的始终^[51]。因此,探讨耕作方式对土壤有机碳的影响,总是与土壤团聚体的研究密不可分。

众多研究结果表明,保护性耕作能显著提高表层土壤有机碳含量。不同粒级团聚体对有机碳保护的贡献不同,张赛等^[52]的试验结果表明微团聚体中的有机碳储量(质量分数)较为稳定且远高于大团聚体,而大团聚体内的有机碳更易受到耕作方式的影响,外源输入的有机碳首先在大团聚体中累积。李景等^[53]进行的黄土坡耕地15年保护性耕作研究表明,与翻耕相比,长期免耕覆盖和深松覆盖可以提高0~10 cm土层各粒级团聚体有机碳含量,尤其对>2 mm团聚体有机碳含量的提升最多,外源碳在大团聚体中的转化较为灵敏,因此可将其作为评价长期不同耕作方式对土壤有机碳影响的指标。殷涛^[54]利用稳定性同位素标记技术对长期保护性耕作条件下外源有机碳的转化以及在不同粒级团聚体中的分配和去向进行研究,结果表明,长期的常规耕作和全量秸秆还田处理下,土壤有机碳呈现向0.25~2 mm土壤团聚体聚集的趋势,而免耕秸秆覆盖和免耕秸秆茬处理下土壤团聚体中的有机碳变化比较缓慢;不同耕作方式下外源有机碳进入土壤团聚体的过程也有所不同,常规耕作中外源有机碳首先进入<0.053 mm团聚体中,全量秸秆还田处理下外源有机碳首先进入>2 mm团聚体中,免耕秸秆覆盖处理下外源有机碳首先进入>2 mm团聚体,随着耕作处理时间的增加,变为首先进入<0.053 mm团聚体中。

研究有机碳不同组分的动态,有助于揭示耕作方式对土壤有机碳的影响机制^[55]。陈鲜妮^[56]借助同位素¹³C标记技术研究了秸秆源碳在土壤不同组分中的转化特征,结果表明秸秆源碳施入土壤后首先进入轻组态(LF)有机碳,随时间推移,轻组中的新碳逐渐向闭蓄态(OPOM)和重组态(HF)转移。土壤活性有机碳对土壤碳库变化的响应比较敏感,虽然占总有机碳的比例较少,但可以更好地反映土壤有机碳的有效

性^[57]。徐尚起等^[58]研究了4种耕作处理对南方双季稻田土壤轻组有机碳(LFOC)和重组有机碳(HFOC)的影响,结果表明,翻耕和旋耕导致LFOC分解损失,而秸秆投入能增加LFOC;耕作方式对LFOC的影响趋势与总有机碳(TOC)一致,且LFOC的响应更加剧烈,可以作为指示土壤碳库变化的灵敏指标。王丹丹等^[59]探究了耕作方式对土壤有机碳活性组分的短期影响,结果表明,免耕相对于翻耕,显著提高了水溶性有机碳(DOC)、微生物生物量碳(MBC)、易氧化有机碳(ROC)含量;秸秆还田处理相对于不还田,显著提高了ROC含量,且ROC随还田量的增加而增加。王新建等^[60]进行了长期保护性耕作田间定位试验,探讨土壤活性有机碳组分对不同耕作措施的响应,并对几个指标的灵敏度进行了比较,结果表明,免耕、秸秆还田、免耕+秸秆覆盖三种保护性耕作措施不同程度地提高了土壤TOC、MBC和ROC的含量,其中MBC对耕作方式的响应更加灵敏。

土壤有机碳矿化(土壤呼吸)是土壤中重要的生物化学过程,直接关系到土壤养分的释放与供应、土壤质量的保持等^[61]。耕作对土壤造成不同程度的扰动,土壤通气性提高,加速团聚体破碎,使原本受团聚体保护的有机碳得以暴露,促进有机碳的矿化,而免耕能减少人为的土壤扰动,从而减少土壤有机碳的矿化。彭娟等^[62]关于耕作制度对紫色水稻土有机碳累积及矿化动态影响的研究表明,各处理的有机碳矿化速率为常规平作>垄作免耕,最大矿化速率出现在培养第一天,随时间延长,矿化速率下降,处理间的差距趋于减小,并逐渐处于稳定状态;各处理的有机碳累积矿化量在培养期内随时间变化的趋势一致,且始终为常规平作>垄作免耕。这一研究证实了常规耕作相较于免耕,促进了残茬降解和有机碳矿化。路丹等^[63]的研究表明稻草还田提高了0~5 cm土层有机碳日矿化量和累积矿化量,张赛等^[64]的研究也发现秸秆覆盖加速了土壤呼吸速率,这可能是因为外源有机物的输入为土壤表层微生物提供了丰富的碳源,微生物代谢活跃,导致矿化作用加快。

4 保护性耕作对土壤微生物群落的影响

微生物是土壤生态系统的重要组成部分,在土壤生物化学循环过程中具有重要的驱动作用^[65]。一方面,土壤微生物通过直接改造、物理缠绕、分泌有机物、改变土壤疏水性等机制影响土壤团聚体的形成和稳定,进而影响土壤结构,另一方面,土壤微生物通过

代谢活动参与土壤有机质的代谢和土壤团聚过程,影响土壤生态系统的能量流动^[66]。

很多研究指出,与常规耕作相比,保护性耕作可以增加耕层土壤微生物的数量,并有助于提高土壤微生物群落多样性^[67]。罗红燕^[68]采用麦角固醇和胞壁酸标记法测定结果表明,不同耕作处理的土壤细菌和真菌的生物量表现为免耕>常规平作。李景等^[69]进行的15年保护性耕作试验表明,免耕和深松结合秸秆覆盖可以提高土壤细菌、真菌和古菌的多样性、丰富度和均匀度指数,尤其对真菌和古菌的影响较大。王梓廷^[70]的研究结果表明,深松和免耕显著提高了非根际土壤细菌群落多样性,增加了芽孢杆菌属的丰度,并且增加了 α 变形菌纲根瘤菌的相对丰度;免耕增加了真菌 α 多样性,但深松与翻耕处理的真菌 α 多样性无显著差异。

不同的微生物类群对耕作方式的响应有所差异,可能是由于不同耕作方式使菌群可利用养分发生变化,进而不同程度改变了不同优势菌群的变化特征^[71]。Kladivko^[72]研究发现免耕条件下土壤表层趋向于真菌占优势,而常规耕作下趋向于细菌占优势。高云超等^[73]通过对不同耕作方式土壤真菌群落结构和生态特征的分析发现,不同耕作方式形成特有的土壤真菌区系,翻耕土壤中存在大量的常见于全球分布的土壤真菌类群,而免耕土壤中存在大量的木霉和一些不常见的真菌;免耕能够增加土壤真菌的k-对策生物,并且免耕土壤中真菌群落的多样性指数和均匀度较高。

保护性耕作对团聚体微生物的影响研究表明,保护性耕作不同程度地提高了各粒级团聚体的微生物量和微生物多样性。李景^[74]通过对15年长期保护性耕作下细菌、真菌和古菌群落多样性变化的研究发现,相对于传统耕作,免耕和深松覆盖分别提高了各粒级团聚体的细菌多样性,尤其对>2 mm和1~0.25 mm粒级的贡献最大;免耕和深松覆盖分别提高了各粒级团聚体的真菌多样性,尤其对1~0.25 mm和<0.25 mm粒级的贡献最大;免耕和深松覆盖分别提高了各粒级团聚体的古菌多样性,尤其对1~0.25 mm粒级的贡献最大。然而,陈智等^[75]和张维等^[76]的研究发现,免耕虽然提高了耕层土壤各粒级团聚体中的微生物数量,但对微生物在团聚体中的分布模式无显著影响。

目前针对土壤微生物群落的研究中,对原状土壤微生物的研究报道较多,而对土壤筛分后团聚体内微

生物的研究较少。关于耕作方式对微生物群落影响的研究,由于试验地土壤本底状况的差异、施肥处理和种植作物的多样性以及研究方法的不同,研究结论存在不同程度的差异,还有待进一步深入研究。

5 保护性耕作对土壤线虫的影响

土壤线虫不仅具有较高的丰富度和多样性,并且在地下腐屑食物网中占有多个生态位^[77],参与土壤有机质的分解和养分的循环^[78]。土壤线虫可以通过直接取食细菌和真菌影响微生物群落^[79],还可以通过其自身的周转及其与植物根系、微生物区系的相互作用,来影响土壤生态系统中养分的周转^[80]。线虫的多度、活性和群落结构受土壤微生境的物理、化学、生物学特性的影响,而耕作方式影响着这些特性,因此耕作措施造成的土壤干扰会影响线虫群落结构。土壤线虫对农业管理措施和环境变化的响应十分敏感,可作为评价耕作方式对土壤生态环境影响的良好指示生物^[81]。

土壤线虫的不同营养类群对耕作方式的响应方向和程度不尽一致。Fu等^[82]通过田间和室内试验发现,免耕相对于常规耕作,可以提高土壤线虫的多度,但土壤线虫在常规耕作处理下能更有效地利用碳;食细菌线虫对于残茬的反应要早于食真菌线虫,食真菌线虫的相对重要性随着残茬分解而增加,在常规耕作处理中更为明显。李慧等^[83]对比了传统犁耕和免耕秸秆覆盖条件下土壤线虫的营养类群,结果表明,保护性耕作使5~15 cm和15~30 cm土层各营养类群线虫多度均显著增加,而0~5 cm土层仅食细菌线虫多度增加,其他营养类群无显著响应,可能是受该土层的pH降低和农药残留等因素的影响。胡宁等^[84]研究了保护性耕作对土壤线虫c-p类群和功能团的影响,结果表明,c-p 3(世代时间较长,对环境压力较为敏感)的食细菌(Ba)线虫、c-p 4(世代时间长,对环境压力敏感)的食真菌(Fu)线虫、c-p 5(世代时间很长,产卵量小,对环境压力特别敏感)的植物寄生(H)线虫多度对免耕秸秆覆盖的正面响应程度相对较高。

不同耕作方式影响了线虫的生活史和群落结构。很多研究表明免耕提高了土壤线虫群落的成熟度指数和结构指数^[85-86]。海棠等^[87]研究了不同耕作制度对甘薯地线虫群落结构的影响,结果表明,轮作玉米相对于甘薯连作,提高了线虫成熟度指数 ΣMI 和食菌线虫与植物寄生线虫之比WI,降低了植物寄生线虫成熟度指数PPI,表明不同耕作制度显著改变了线虫

的群落结构。李慧等^[88]研究了传统犁耕和免耕秸秆覆盖条件下土壤线虫的成熟度指数和区系分析,结果表明,相对于犁耕,免耕秸秆覆盖显著降低了表层土壤自由生活线虫成熟指数MI、总成熟指数MMI,但对PPI和PPI/MI的影响不明显;但在此研究中保护性耕作反而降低了线虫的富集指数EI和结构指数SI,这可能是土壤pH降低和增施农药造成的影响。

目前关于耕作方式对团聚体中线虫群落结构影响的研究较少。蒋瑀霁^[89]研究了长期施用有机肥对红壤团聚体中线虫和微生物群落的影响,结果表明,线虫总数在团聚体中的分布表现为大团聚体(>2 mm)>小团聚体(0.25~2 mm)>微团聚体(<0.25 mm),大团聚体中的线虫结构指数较高,说明大团聚体食物网络中生物群落之间的联系较为复杂。张士秀^[90]对比了常规和保护性耕作(垄作和免耕)对团聚体线虫群落的影响,结果表明,保护性耕作提高了团聚体中线虫总数以及食细菌线虫、捕食/杂食线虫的多度和相对多度,提高了植物寄生线虫的多度,增加了团聚体中线虫多样性指数和结构指数;但并未改变线虫总数、营养类群、功能团和生态指数在团聚体中的分布模式,在三种耕作方式下,线虫总数、四大营养类群以及大多数功能团的多度随着团聚体粒径减小而减小,富集指数和通道指数在各粒级团聚体中均衡分布,结构指数在微团聚体中较低,说明团聚体粒径是影响土壤线虫群落在团聚体中分布模式的重要因素。

6 结论与展望

根据现有研究,保护性耕作对土壤团聚体、微生物及线虫群落的影响主要表现在以下几方面:保护性耕作减少土壤大团聚体的破坏,降低团聚体周转速率,提高土壤结构的稳定性;保护性耕作提高表层土壤总有机碳及活性有机碳含量,免耕能减少土壤有机碳因矿化作用造成的损失,但秸秆覆盖会使矿化作用加快;保护性耕作可以提高耕层微生物生物量,尤其对真菌生物量影响显著;保护性耕作不同程度地提高了团聚体中微生物量和微生物多样性,但并未改变微生物在团聚体中的分布模式;保护性耕作可提高土壤线虫多度,提高原状土壤和土壤各粒级团聚体中线虫群落的成熟度指数和结构指数,但并未改变线虫总数、营养类群、功能团及生态指数在团聚体中的分布模式。

我国资源短缺,保护性耕作对于推进我国农业可持续发展意义重大。国内外研究人员对保护性耕作

的环境效应进行了大量的研究,虽然在结论上存在一定差异,但探索差异背后的原因更有助于深入认识保护性耕作的作用。在国内外相关研究的基础上,本论文对保护性耕作日后的研究重点进行以下展望:

(1)关于保护性耕作对土壤团聚体形成和稳定机制影响的研究,可结合同位素标记法,对外源输入碳进行追踪,探索各粒级团聚体中有机碳的输入、转化与稳定特征及其在团聚体形成和稳定中的作用。

(2)针对不同土壤类型及土壤微生物本底状况,需探究保护性耕作下土壤团聚体中微生物遗传多样性、微生物群落结构和功能多样性,并评价微生物群落在团聚体形成和稳定中的作用。

(3)应更多地研究各粒级团聚体中土壤线虫的群落分布和生态功能,探究保护性耕作下各功能类群线虫在团聚体中的分布状况,为提高土壤肥力和病虫害防治提供新的理论依据。

(4)我国各地区气候条件差异大,土壤类型和种植模式多样,对于保护性耕作的研究还应结合当地土壤状况,探索耕作方式对土壤结构、土壤肥力、土壤生态的影响机制,并结合生态效益与经济效益,建立各地区适宜的保护性耕作技术体系。

参考文献:

- [1] 焦思颖. 2017中国土地矿产海洋资源统计公报发布[J]. 资源导刊, 2018(6):36.
JIAO Si-ying. 2017 China land minerals marine resources statistical bulletin released[J]. *Resources Guide*, 2018(6):36.
- [2] 杨学明, 张晓平, 方华军. 农业土壤固碳对缓解全球变暖的意义[J]. 地理科学, 2003, 23(1):101-106.
YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping, FANG Hua-jun. Importance of agricultural soil sequestering carbon to offsetting global warming[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(1):101-106.
- [3] 尚延超. 中国耕地等别数量和空间分布特征研究[J]. 世界农业, 2018(10):230-235, 242.
SHANG Yan-chao. Study on the quantitative and spatial distribution characteristics of cultivated land in China[J]. *World Agriculture*, 2018(10):230-235, 242.
- [4] 田慎重. 基于长期耕作和秸秆还田的农田土壤碳库演变、固碳减排潜力和碳足迹分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
TIAN Shen-zhong. Responses of soil organic carbon pool, greenhouse gas emission and carbon footprint to a long-term tillage and residue management system[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014.
- [5] 张海林, 高旺盛, 陈 阜, 等. 保护性耕作研究现状、发展趋势及对策[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(1):16-20.
ZHANG Hai-lin, GAO Wang-sheng, CHEN Fu, et al. Prospects and present situation of conservation tillage[J]. *Journal of China Agriculture*

- al University, 2005, 10(1):16-20.
- [6] 严洁, 邓良基, 黄剑. 保护性耕作对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 中国农机化, 2005(2):31-34.
YAN Jie, DENG Liang-ji, HUANG Jian. Effects of conservation tillage on soil physicochemical properties and crop yield[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2005(2):31-34.
- [7] 徐阳春, 沈其荣, 冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(1):83-90.
XU Yang-chun, SHEN Qi-rong, RAN Wei. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1):83-90.
- [8] 吴晓丽, 李林, 史喜林, 等. 土壤有机碳稳定机制及影响因素研究进展[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(3):42-45, 78.
WU Xiao-li, LI Lin, SHI Xi-lin, et al. Progress of studies on influencing factors and stabilization mechanism of soil organic carbon[J]. *Journal of Jilin Agricultural Sciences*, 2014, 39(3):42-45, 78.
- [9] 赵海超. 农作措施对春玉米农田土壤有机碳影响机制研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2013.
ZHAO Hai-chao. Study on the influence mechanism of agricultural measures on soil organic carbon in spring corn fields[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2013.
- [10] 孙冰洁. 不同耕作方式下土壤微生物在黑土有机碳固定中的作用研究[D]. 北京:中国科学院, 2016.
SUN Bing-jie. Effects of soil microorganisms on organic carbon sequestration in black soil under different tillage practices[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [11] 李景. 长期耕作对土壤团聚体有机碳及微生物多样性的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2014.
LI Jing. Long-term tillage impacts on soil aggregate organic carbon and microbial community diversity[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [12] 张家春, 刘盈盈, 贺红早, 等. 土壤团聚体与有机碳固定关系研究进展[J]. 福建农业学报, 2016, 31(3):319-325.
ZHANG Jia-chun, LIU Ying-ying, HE Hong-zao, et al. Research advances on mechanism of organic carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 31(3):319-325.
- [13] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式旱地红壤水稳性团聚体及其碳、氮、磷分布特征[J]. 土壤学报, 2009, 46(2):255-262.
LIU Xiao-li, HE Yuan-qiu, LI Cheng-liang, et al. Distributions of water-stable aggregates and organic C, N and P in upland red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2):255-262.
- [14] 任娇娇, 周运超, 刘兵, 等. 石灰岩发育土壤团聚体形成机制研究[J]. 中国岩溶, 2019, 38(5):722-728.
REN Jiao-jiao, ZHOU Yun-chao, LIU Bing, et al. Study on aggregate formed mechanism of soil developed from limestone[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(5):722-728.
- [15] 陈晓侠, 梁爱珍, 张晓平. 土壤团聚体固碳的研究方法[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7):1999-2006.
CHEN Xiao-xia, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping. Research methods of carbon sequestration by soil aggregates: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(7):1999-2006.
- [16] Shimel D S. Terrestrial ecosystem and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995(1):77-91.
- [17] Trumbore S E, Chadwick O A, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric CO₂ driven by temperature change[J]. *Science*, 1996, 272(5260):393-396.
- [18] Arai H, Tokuchi N. Factors contributing to greater soil organic carbon accumulation after afforestation in a Japanese coniferous plantation as determined by stable and radioactive isotopes[J]. *Geoderma*, 2010, 157(3/4):243-251.
- [19] 潘根兴. 中国土壤有机碳库及其演变与应对气候变化[J]. 气候变化研究进展, 2008(5):282-289.
PAN Gen-xing. Soil organic carbon stock, dynamics and climate change mitigation of China[J]. *Climate Change Research*, 2008(5):282-289.
- [20] 张延, 梁爱珍, 张晓平, 等. 土壤团聚体对有机碳物理保护机制研究[J]. 土壤与作物, 2015, 4(2):85-90.
ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, et al. Progress in soil aggregates physical conservation mechanism for organic carbon[J]. *Soils and Crops*, 2015, 4(2):85-90.
- [21] 李娜, 韩晓增, 尤孟阳, 等. 土壤团聚体与微生物相互作用研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(9):1625-1632.
LI Na, HAN Xiao-zeng, YOU Meng-yang, et al. Research review on soil aggregates and microbes[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(9):1625-1632.
- [22] Six J, Elliott E T, Paustian K, et al. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62:1367-1377.
- [23] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14):2099-2103.
- [24] 刘中良, 宇万太. 土壤团聚体中有机碳研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2):447-455.
LIU Zhong-liang, YU Wan-tai. Review of researches on soil aggregate and soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(2):447-455.
- [25] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50(3):627-633.
- [26] Briar S S, Fonte S J, Park I. The distribution of nematodes and soil microbial communities across soil aggregate fractions and farm management systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43:905-914.
- [27] Carter M R. Influence of reduced tillage systems on organic matter, microbial biomass, macro-aggregate distribution and structural stability of the surface soil in a humid climate[J]. *Soil and Tillage Research*, 1992, 23(4):361-372.
- [28] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9):1973-1979.
ZHOU Hu, LÜ Yi-zhong, YANG Zhi-chen, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9):1973-1979.
- [29] 陈文超, 朱安宁, 张佳宝, 等. 保护性耕作对潮土团聚体组成及其

- 有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(1):35-40.
- CHEN Wen-chao, ZHU An-ning, ZHANG Jia-bao, et al. Effects of conservation tillage on the composition and organic carbon content of soil aggregates in Fluvo-aquic soil[J]. *Soils*, 2014, 46(1):35-40.
- [30] 李 景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2):378-386.
- LI Jing, WU Hui-jun, WU Xue-ping, et al. Impact of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2):378-386.
- [31] 文 倩, 关 欣. 土壤团聚体形成的研究进展[J]. 干旱区研究, 2004(4):434-438.
- WEN Qian, GUAN Xin. Research progress on the formation of soil aggregates[J]. *Arid Zone Research*, 2004(4):434-438.
- [32] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3):415-421.
- WANG Qing-kui, WANG Si-long. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3):415-421.
- [33] Tisdall J M. Possible role of soil microorganisms in aggregation in soils [J]. *Plant and Soil*, 1994, 159(1):115-121.
- [34] 史 奕, 陈 欣, 沈善敏. 土壤团聚体的稳定机制及人类活动的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11):1491-1494.
- SHI Yi, CHEN Xin, SHEN Shan-min. Stable mechanisms of soil aggregate and effects of human activities[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11):1491-1494.
- [35] 罗晓虹, 王子芳, 陆 畅, 等. 土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(8):3816-3824.
- LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, et al. Effects of land use type on the content and stability of organic carbon in soil aggregates [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(8):3816-3824.
- [36] 郑 红. 东北温带土地利用变化对土壤团聚体稳定性及有机碳组分的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- ZHENG Hong. Effect of land uses on soil aggregate stability and organic carbon fractions in northeast temperate area[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [37] Salako F K, Hauser S. Influence of different fallow management systems on stability of soil aggregates in southern Nigeria[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32:1483-1498.
- [38] 丁文峰, 丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J]. 地理研究, 2002, 21(6):700-706.
- DING Wen-feng, DING Deng-shan. The fractal features of soil granule structure before and after vegetation destruction on Loess Plateau [J]. *Geographical Research*, 2002, 21(6):700-706.
- [39] 苏 静, 赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5):114-117.
- SU Jing, ZHAO Shi-wei. Comparison of the analysis methods for soil aggregate stability[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(5):114-117.
- [40] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作对东北黑土团聚体粒级分布及其稳定性的短期影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(1):154-158.
- LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, YANG Xue-ming, et al. Short-term effects of tillage on soil aggregate size distribution and stability in black soil in northeast China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(1):154-158.
- [41] 武 均, 蔡立群, 罗 迪, 等. 不同耕作措施对陇中黄土高原雨养农田土壤团聚体稳定性和C、N、P的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6):234-239.
- WU Jun, CAI Li-qun, LUO Di, et al. Effects of different tillage methods on the content of SOC, TN, TP in soil aggregates of rain-fed field of the Loess Plateau in central of Gansu[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6):234-239.
- [42] 唐晓红, 魏朝富, 吕家格, 等. 保护性耕作对丘陵区水稻土团聚体稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11):49-54.
- TANG Xiao-hong, WEI Chao-fu, LÜ Jia-ke, et al. Effects of conservation tillage on aggregate stability of paddy soil in hilly region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(11):49-54.
- [43] 刘 威, 张国英, 张 静, 等. 2种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):117-122.
- LIU Wei, ZHANG Guo-ying, ZHANG Jing, et al. Effects of two conservation tillage measures on soil aggregate stability[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3):117-122.
- [44] 田慎重, 王 瑜, 李 娜, 等. 耕作方式和秸秆还田对华北地区农田土壤水稳性团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(22):7116-7124.
- TIAN Shen-zhong, WANG Yu, LI Na, et al. Effects of different tillage and straw systems on soil water-stable aggregate distribution and stability in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(22):7116-7124.
- [45] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(3):777-783.
- [46] 田慎重, 宁堂原, 王 瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2):373-378.
- TIAN Shen-zhong, NING Tang-yuan, WANG Yu, et al. Effects of different tillage methods and returning straw on soil organic carbon content in wheat field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(2):373-378.
- [47] 戴 珏, 林先贵, 胡君利, 等. 免耕对潮土不同粒级团聚体中有机碳含量及微生物碳代谢活性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(5):923-930.
- DAI Jue, LIN Xian-gui, HU Jun-li, et al. Effects of non-tillage on content of organic carbon and microbial carbonic metabolism of soil aggregates in a fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(5):923-930.
- [48] Six J, Bossuyt H, Degryze S, et al. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics [J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 79(1):7-31.
- [49] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(4/5):665-676.
- [50] 刘满强, 胡 锋, 陈小云. 土壤有机碳稳定机制研究进展[J]. 生态

- 学报, 2007, 27(6):2642-2649.
- LIU Man-qiang, HU Feng, CHEN Xiao-yun. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(6):2642-2649.
- [51] 陈建国, 田大伦, 闫文德, 等. 土壤团聚体固碳研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5):74-80.
- CHEN Jian-guo, TIAN Da-lun, YAN Wen-de, et al. Progress on study of carbon sequestration in soil aggregates[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2011, 31(5):74-80.
- [52] 张 赛, 王龙昌. 保护性耕作对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4):263-267, 272.
- WANG Sai, WANG Long-chang. Effect of conservation tillage on stability and content of organic carbon in soil aggregates[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4):263-267, 272.
- [53] 李 景, 吴会军, 武雪萍, 等. 15年保护性耕作对黄土坡耕地地区土壤及团聚体固碳效应的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23):4690-4697.
- LI Jing, WU Hui-jun, WU Xue-ping, et al. Effects of 15-year conservation tillage on soil and aggregate organic carbon sequestration in the loess hilly region of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23):4690-4697.
- [54] 殷 涛. 保护性耕作农田土壤团聚体固碳机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- YIN Tao. Carbon sequestration mechanism of soil aggregate in long-term conservation tillage farmland[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [55] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52:345-353.
- [56] 陈鲜妮. 不同土壤有机碳矿化与固定特征及其对耕作和施肥措施的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- CHEN Xian-ni. Carbon mineralization and sequestration response to residue return and nitrogen fertilization in soils with different texture and cropping histories[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014.
- [57] 关振寰. 保护性耕作对陇中黄土高原旱作农田土壤总有机碳及活性碳组分的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- GUAN Zhen-huan. Effects of conservation tillage on soil organic carbon and active carbon fraction on Longzhong Loess Plateau region[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.
- [58] 徐尚起, 崔思远, 陈 阜, 等. 耕作方式对稻田土壤有机碳组分含量及其分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1):127-132.
- XU Shang-qi, CUI Si-yuan, CHEN Fu, et al. Effect of tillage on content of density fractions of paddy soil organic carbon and its spatial distribution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):127-132.
- [59] 王丹丹, 周 亮, 黄胜奇, 等. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4):735-740.
- WANG Dan-dan, ZHOU Liang, HUANG Sheng-qi, et al. Short-term effects of tillage practices and wheat-straw returned to the field on topsoil labile organic carbon fractions and yields in central China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(4):735-740.
- [60] 王新建, 张仁陟, 毕冬梅, 等. 保护性耕作对土壤有机碳组分的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(2):115-121.
- WANG Xin-jian, ZHANG Ren-zhi, BI Dong-mei, et al. Effects of conservation tillage on soil organic carbon fractions[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(2):115-121.
- [61] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4):544-552.
- LI Zhong-pei, ZHANG Tao-lin, CHEN Bi-yun. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4):544-552.
- [62] 彭 娟, 符卓旺, 朱 洁, 等. 耕作制度对紫色水稻土有机碳累积及矿化动态的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4):175-178, 182.
- PENG Juan, FU Zhuo-wang, ZHU Jie, et al. Effects of tillage systems on accumulation and mineralization of organic carbon in purple paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4):175-178, 182.
- [63] 路 丹, 何明菊, 区惠平, 等. 耕作方式对稻田土壤活性有机碳组分、有机碳矿化以及腐殖质特征的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(5):1144-1150.
- LU Dan, HE Ming-ju, OU Hui-ping, et al. Effects of tillage patterns on the labile organic carbon components, organic carbon mineralization and humus characteristics in paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(5):1144-1150.
- [64] 张 赛, 王龙昌, 黄召存, 等. 土壤活性有机碳不同组分对保护性耕作的响应[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):226-231, 252.
- ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, et al. Effects of conservation tillage on active soil organic carbon composition[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2):226-231, 252.
- [65] 章家恩, 刘文高. 微生物资源的开发利用与农业可持续发展[J]. 土壤与环境, 2001, 10(2):154-157.
- ZHANG Jia-en, LIU Wen-gao. Development and utilization of microbial resources and sustainable development of agriculture[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2001, 10(2):154-157.
- [66] Feng Y, Motta A C, Reeves D W, et al. Soil microbial communities under conventional-till and no-till continuous cotton systems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(12):1693-1703.
- [67] 樊晓刚, 金 轲, 李兆君, 等. 不同施肥和耕作制度下土壤微生物多样性研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3):744-751.
- FAN Xiao-gang, JIN Ke, LI Zhao-jun, et al. Soil microbial diversity under different fertilization and tillage practices: A review[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(3):744-751.
- [68] 罗红燕. 土壤团聚体中微生物群落的空间分布及其对耕作的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2009.
- LUO Hong-yan. Distribution patterns of and the effects of different tillage on microorganism within soil water-stable aggregates[D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [69] 李 景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期不同耕作措施对土壤团聚体特征及微生物多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8):2341-2348.
- LI Jing, WU Hui-jun, WU Xue-ping, et al. Effects of long-term till-

- age measurements on soil aggregate characteristic and microbial diversity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2341-2348.
- [70] 王梓廷. 土壤微生物群落分布和多样性对保护性耕作的响应及其机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
WANG Zi-ting. Distribution and diversity of soil microbial community response to conservation tillage and its mechanism[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018.
- [71] Kihara J, Martius C, Bationo A, et al. Soil aggregation and total diversity of bacteria and fungi in various tillage systems of sub-humid and semi-arid Kenya[J]. *Applied Soil Ecology*, 2012, 58: 12-20.
- [72] Kladvik E J. Tillage systems and soil ecology[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 61: 61-67.
- [73] 高云超, 朱文珊, 陈文新. 秸秆覆盖免耕土壤真菌群落结构与生态特征研究[J]. *生态学报*, 2001, 21(10): 1704-1710.
GAO Yun-chao, ZHU Wen-shan, CHEN Wen-xin. Community structures of saprophytic soil microfungi in three differently cultivated field soils in the north of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1704-1710.
- [74] 李 景. 长期耕作对土壤团聚体有机碳及微生物多样性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
LI Jing. Long-term tillage impacts on soil aggregate organic carbon and microbial community diversity[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [75] 陈 智, 蒋先军, 罗红燕, 等. 土壤微生物生物量在团聚体中的分布以及耕作影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 5964-5969.
CHEN Zhi, JIANG Xian-jun, LUO Hong-yan, et al. Distribution of soil microbial biomass within soil water-stable aggregates and the effects of tillage[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 5964-5969.
- [76] 张 维, 蒋先军, 胡 宇, 等. 微生物群落在团聚体中的分布及耕作的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2009, 31(3): 131-135.
ZHANG Wei, JIANG Xian-jun, HU Yu, et al. Distribution of microbial community in aggregates and the effect of tillage[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2009, 31(3): 131-135.
- [77] Freckman D W. Bacterivorous nematodes and organic-matter decomposition[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1988, 24(1): 195-217.
- [78] 邵元虎, 傅声雷. 试论土壤线虫多样性在生态系统中的作用[J]. *生物多样性*, 2007, 15(2): 116-123.
SHAO Yuan-hu, FU Sheng-lei. The diversity and functions of soil nematodes[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 116-123.
- [79] Bonkowski M, Cheng W, Griffiths B S, et al. Microbial-faunal interactions in the rhizosphere and effects on plant growth[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2000, 36(3/4): 135-147.
- [80] 吴纪华, 宋慈玉, 陈家宽. 食微线虫对植物生长及土壤养分循环的影响[J]. *生物多样性*, 2007, 15(2): 124-133.
WU Ji-hua, SONG Ci-yu, CHEN Jia-kuan. Effect of microbivorous nematodes on plant growth and soil nutrient cycling: A review[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 124-133.
- [81] 李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 等. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1541-1546.
LI Yu-juan, WU Ji-hua, CHEN Hui-li, et al. Nematodes as bioindicator of soil health: Methods and applications[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1541-1546.
- [82] Fu S L, Coleman D C, Hendrix P F, et al. Responses of trophic groups of soil nematodes to residue application under conventional tillage and no-till regimes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11): 1731-1741.
- [83] 李 慧, 唐 政, 李继光, 等. 北方旱作农田保护性耕作对土壤线虫物种组成和营养类群的影响[J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1428-1433.
LI Hui, TANG Zheng, LI Ji-guang, et al. Impacts of the conservation tillage on soil nematode genera composition and trophic groups in upland farming systems, north China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1428-1433.
- [84] 胡 宁, 娄翼来, 梁 雷. 保护性耕作对土壤线虫 c-p 类群及功能团的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(6): 2349-2353.
HU Ning, LOU Yi-lai, LIANG Lei. Effects of the conservation tillage on soil nematode c-p groups and functional guilds[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2349-2353.
- [85] Okada H, Harada H. Effects of tillage and fertilizer on nematode communities in a Japanese soybean field[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(3): 582-598.
- [86] Van Capelle C, Schrader S, Brunotte J. Tillage-induced changes in the functional diversity of soil biota: A review with a focus on German data[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2012, 50: 165-181.
- [87] 海 棠, 彭德良, 曾昭海, 等. 耕作制度对甘薯土壤线虫群落结构的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(6): 1851-1857.
HAI Tang, PENG De-liang, ZENG Zhao-hai, et al. Effect of cropping systems on nematode community structure in sweet potato field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(6): 1851-1857.
- [88] 李 慧, 李继光, 王秋彬, 等. 保护性耕作土壤线虫成熟度及区系分析[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(8): 1329-1334.
LI Hui, LI Ji-guang, WANG Qiu-bin, et al. Soil nematode maturity and faunal analysis under conservation tillage[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(8): 1329-1334.
- [89] 蒋瑞霖, 金 辰, 江 春, 等. 红壤团聚体中线虫和微生物群落的协同分布及其对土壤呼吸熵的影响[C]//面向未来的土壤科学(中册). 北京: 中国土壤学会, 2012: 4.
JIANG Yu-ji, JIN Chen, JIANG Chun, et al. Aggregate stratification of soil nematodes and microbial communities and its effect on metabolic quotient with long-term manure application in acid soil[C]//Future-oriented soil science (middle volume). Beijing: Chinese Soil Society, 2012: 4.
- [90] 张士秀. 耕作方式对黑土生物群落及团聚体稳定性的影响[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
ZHANG Shi-xiu. Effects of tillage systems on soil biota and aggregate stability in black soil of northeast China[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.