

赵 懿, 杜建军, 张振华, 等. 秸秆还田方式对土壤有机质积累与转化影响的研究进展[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(6):1614-1622.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2021.06.032

秸秆还田方式对土壤有机质积累与转化影响的研究进展

赵 懿¹, 杜建军¹, 张振华², 陈海斌¹, 郭佳明¹, 范如芹¹, 李晓波¹

(1. 仲恺农业工程学院资源与环境学院/广东省农业产地环境污染防控工程技术中心, 广东 广州 510225; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 土壤有机质(Soil organic matter, SOM)是农田地力的基础,也是评估农田质量的首要参数,对作物产量提升和国家粮食安全都有重大意义。秸秆还田作为秸秆资源化利用的重要方式,在消纳秸秆废弃物和改善土壤板结等问题上具有巨大潜力,尤其是其对 SOM 提升的影响成为海内外研究的热门话题。目前,关于秸秆还田对 SOM 含量的影响已有大量报道,但对不同秸秆还田方式下 SOM 的提升效果缺乏总体概述。本文简要概述了秸秆直接还田、发酵还田、添加生物腐熟剂后还田和炭化还田 4 种应用较广泛的秸秆还田方式,综合评述其提高 SOM 含量的效果及优缺点,聚焦其对 SOM 含量的影响机制,并从秸秆还田的高效性、可持续性角度为今后进一步开展秸秆还田技术研究进行了展望,以期优选秸秆还田方式、提升 SOM 含量提供理论参考。

关键词: 秸秆还田; 秸秆发酵还田; 生物腐熟剂; 秸秆炭化还田; 土壤有机质

中图分类号: S154.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2021)06-1614-09

Research progress on the effects of straw returning on soil organic matter accumulation and transformation

ZHAO Yi¹, DU Jian-jun¹, ZHANG Zhen-hua², CHEN Hai-bin¹, GUO Jia-ming¹, FAN Ru-qin¹, LI Xiao-bo¹

(1. College of Resources and Environment, Zhongkai University of Agriculture and Engineering/Guangdong Engineering and Technology Center for Environmental Pollution Prevention and Control in Agricultural Areas, Guangzhou 510225, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Soil organic matter (SOM) is the foundation and core of soil fertility and the primary parameter for soil quality evaluation. Moreover, it is of great significance to the improvement of crop yield and national food security. As an important way of straw utilization, straw returning has great potential in consuming straw waste, improving soil consolidation and increasing SOM content. In particular, the effect of straw returning on SOM content has become one of the research hotspots. Although a large number of studies at home and abroad have reported the effects of straw returning on SOM content and its role in improving soil fertility, there is a lack of general review on the promotion effects of SOM under different returning methods. In this paper, four widely used straw returning methods including direct straw returning, fermentation returning, returning after adding biological decomposing agent and carbonization returning were summarized. This paper focused on the influence and mechanisms of straw returning on SOM content, and comprehensively reviewed the advantages and disadvantages of different returning methods. The further research on straw returning technology was prospected from the perspective of high efficiency and sustainability, so as to provide theoretical reference for

收稿日期:2021-06-13

基金项目:广东省重点领域研发计划-精准农业项目(2020B0202080002);
国家自然科学基金项目(42177299);广西自然科学基金面上
项目(2021GXNSFAA075039)

作者简介:赵 懿(1997-),女,云南楚雄人,硕士研究生,主要从事秸
秆还田和土壤改良方面的研究。(E-mail)zhaoyi12cwj520@
163.com

通讯作者:李晓波,(E-mail)1984lxb@163.com

returning, returning after adding biological decomposing agent and carbonization returning were summarized. This paper focused on the influence and mechanisms of straw returning on SOM content, and comprehensively reviewed the advantages and disadvantages of different returning methods. The further research on straw returning technology was prospected from the perspective of high efficiency and sustainability, so as to provide theoretical reference for

optimizing straw returning methods and increasing SOM content.

Key words: straw returning; fermentation returning; biological decomposing agent; carbonization returning; soil organic matter

中国农作物废弃资源产量巨大^[1],2014–2018年,中国秸秆年均产量高达 6.5387×10^8 t,其中谷类、麦类和玉米秸秆产量分别占32.3%、22.7%和45.0%^[2]。随着社会经济的发展和农民生活的改变,秸秆利用方法与途径也产生了巨大变革^[3],如用作发电的原料^[4]、生产乙醇^[5]、制造沼气、用作饲料等^[6],但是秸秆利用有限、利用不合理等问题依然严峻,且随意丢弃、堆放、焚烧等现象普遍存在^[7]。大量研究发现,秸秆还田可有效降低土体容重、改善土壤板结情况、增加土体总孔隙度,而且有助于提升土壤有机质(Soil organic matter, SOM)含量与肥力^[8]。因此,秸秆还田成为政府和农业工作者大力倡导的土壤培肥途径之一。

由于长期的秸秆不还田、有机肥施用不足等原因,中国耕地退化严重,使得SOM含量降低^[9]。秸秆还田作为一种重要的农业技术,能改善土壤质量、提升SOM含量、增强肥力^[10],因此受到了极大关注。李敬王^[11]对砂姜黑土的研究发现,秸秆还田能显著增加砂姜黑土耕层SOM含量、保持土壤水分、改善土壤水热条件。Huang等^[12]通过对江西省水稻土的研究,也得出了长期秸秆还田能够显著增加SOM含量的结论。但也有很多研究发现,秸秆还田并不能提升SOM含量,甚至由于新鲜秸秆带来的激发效应会使SOM含量降低^[13]。Liu等^[14]总结了176项经同行评议的试验数据得出,秸秆还田12年后,土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)达到饱和。颜丽等^[15]在北方地区棕壤上的研究发现,春季玉米秸秆还田不但费时费力,且对土壤质量没有显著的提升作用。刘义国等^[16]通过对青岛旱地麦田的研究也指出,过量的秸秆还田不仅会浪费资源,甚至会有相反的效应。

由此可见,秸秆还田对SOM含量提升的效果主要受土壤质地、天气条件、秸秆特性和还田模式等影响,尤其在不同的秸秆还田方式下,对SOM含量的影响不同。近年来,关于不同秸秆还田方式对SOM影响的研究明显增多,但通过秸秆还田提升有机质含量的技术总体上仍处于起步阶段,面临诸多挑战^[17-18],因而有必要及时总结该领域已有的研究结

果以厘清研究现状和未来发展方向。据此,本文总结了不同秸秆还田方式对不同地区、土壤类型下SOM提升的影响效果及其机制,以期筛选合理的秸秆还田方式以及提升SOM含量提供理论参考。

1 不同秸秆还田方式对土壤有机质含量的影响

1.1 直接还田

直接还田不仅能够改善土壤生态环境、保温保墒、降低水土流失,而且快捷、省工,是一种经济高效的还田方式^[19],研究者建议秸秆量大时可采取直接还田方式^[20]。杨旭等^[21]对沈阳旱地棕壤的研究结果显示,与秸秆炭化还田处理相比,直接还田处理对土壤碳库管理指数的提高效果更为显著。但也有许多研究发现,当大量秸秆直接还田时,在短时间内无法腐烂分解成为SOM,而且会带来耕作障碍、有机酸积累、阻碍作物种子发芽及生长、增加病虫害等一系列负面影响^[22]。秸秆直接还田又分成覆盖还田和翻压还田^[23],这2种方式均较为普遍且各有利弊(图1)。

1.1.1 覆盖还田 秸秆覆盖还田后秸秆直接覆于土体表面,有助于提高土壤的蓄水能力,促进秸秆腐解,从而增加SOM含量^[24],且对缓解地表径流和风对农田土壤造成的侵蚀具有很好的效果^[25]。秸秆覆盖能够调节土壤温度和水分,缓解气温突变对作物生长带来的风险^[26]。在东北黑土地地区,免耕下的秸秆覆盖还田可以起到很好的保温、保墒和提升SOM含量的效果,且在东北地区一年一季的种植制度下,秸秆覆盖不会引起次年耕作障碍问题^[27]。除此之外,Chen等^[28]分析了中国黄土高原秸秆覆盖14年的土壤发现,覆盖处理显著增加了土壤含水量、SOC含量、磷酸酶活性和总磷脂脂肪酸含量。Fang等^[29]对太行山山脚壤土的研究发现,冬小麦秸秆覆盖能够提高土壤的蓄水能力和水分利用率,从而提高SOM含量、增加玉米产量。持续3年同等数量的秸秆覆盖和翻压还田处理后,山东盐渍土中的SOM含量分别增长了约30%、19%^[30],可见在该土壤上秸秆覆盖还田对提升SOM含量的成效显著强

于翻压还田。Qu 等^[31]对陕西黄土的研究指出,秸秆覆盖可通过提高 SOC 含量来增加荞麦产量,这与 Cao 等^[32]报道的水稻秸秆覆盖还田处理可以增加

山东省潮土、褐土中 SOC 含量并提高土壤肥力指数的研究结果一致。但是,秸秆覆盖有影响高纬度地区春季地温提升等问题,会造成玉米播期滞后^[33]。

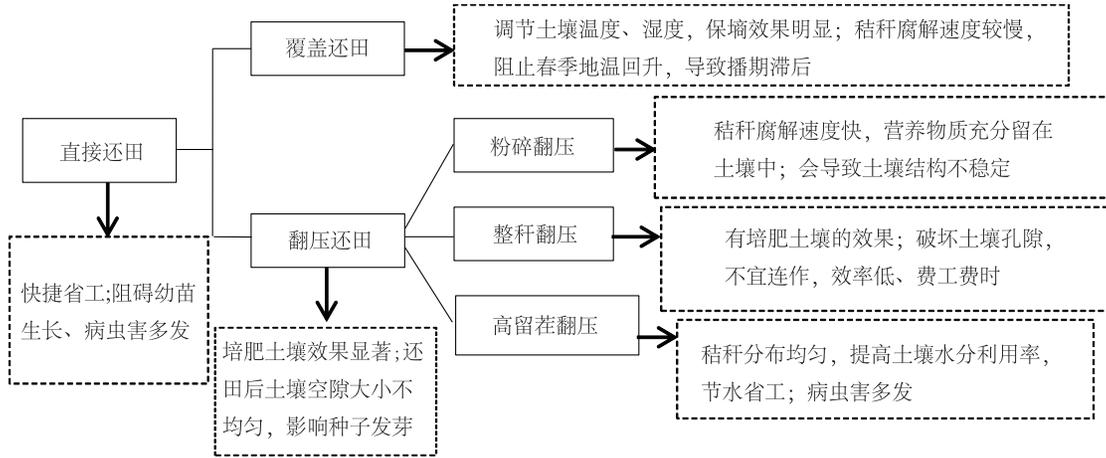


图1 秸秆直接还田类型及优缺点

Fig.1 Types of direct straw returning and its advantages and disadvantages

1.1.2 翻压还田 秸秆翻压还田指将作物秸秆在种植后茬作物前混入土中^[34]。翻压还田有利于秸秆与土壤微生物充分接触,从而加快腐熟过程,稳步提升 SOM 含量^[35]。英国洛桑试验站连续 18 年进行玉米秸秆翻压还田, SOM 含量提高了约 2%^[36],这反映翻压还田对提高 SOM 含量具有有利作用。李秀等^[37]通过对陕西省旱区粉砂质黏壤土的研究指出,翻压还田能够增加耕作层 SOC 含量,且对 0~10 cm 土层的影响最为明显。但是秸秆翻压还田后土壤过于松散,阻碍种子发芽,且易发生病虫害,不适合重茬^[38]。

秸秆翻压还田可分为粉碎翻压、整秆翻压^[39]和高留茬翻压这几类,其中粉碎翻压操作一般在作物收获时将秸秆进行机器粉碎并旋耕入土,翻压深度多在 5~20 cm,粉碎翻压还田的秸秆粉碎长度一般低于 10 cm,有利于耕翻且不影响播种,也有利于秸秆中纤维素等成分快速腐解^[40]。伍佳等^[41]对湖南省红黄泥土的研究发现,秸秆粉碎还田后,水稻成熟期 SOM 含量明显提高。相比之下,秸秆整秆翻压还田效率低、费工费时,秸秆腐解困难,不利于 SOM 含量的提升^[42]。邹清祺等^[43]对陕西省半淋溶土的研究发现,秸秆粉碎还田处理和高留茬还田处理都能显著提高 SOM 含量。对湖北省黄棕壤水稻土的研究发现,水稻秸秆高留茬还田后, SOM 含量显著增加,其中易氧化有机质约占 77%^[44]。Tao 等^[45]认

为,秸秆高留茬还田是增加 SOC 含量最有前景的一种方式,但需明确留茬高度以满足不同作物的要求。由此可见,在不同地区、不同土壤类型、不同气候条件和不同种植制度背景下,秸秆翻压还田如何有效提高 SOM 含量与肥力仍需进一步研究^[46]。

1.2 发酵还田

秸秆发酵还田是为了提高秸秆腐解效率,将其与畜禽粪便、人粪尿等农业废弃物混合发酵后作为有机肥施入土壤,可以有效改善土壤微生物特性,提高 SOM 含量,增强土壤肥力^[47]。马守田^[48]对河南省新乡市黏壤土的研究发现,秸秆发酵还田后, 0~40 cm 土层的 SOC 含量明显高于对照,说明发酵还田对 SOC 含量的提高有明显作用。范如芹等^[8]对比研究了江苏省黄棕壤条件下不同秸秆还田方式对 SOM 含量的影响,发现秸秆发酵还田,特别是加入猪粪发酵还田在增加土壤胡敏酸(Humic acid, HA)含量的同时有效提高了腐殖质质量。值得注意的是,由于发酵原材料在配比、发酵条件和过程等方面存在差异,不同秸秆有机肥的营养和有机物料腐熟程度差异甚大,其对施用土壤的影响也存在很大差异。当前,关于秸秆发酵还田对 SOM 含量影响机制的研究也有待进一步深入。最新的研究发现,不同秸秆因质量和成分存在差异,往往导致发酵过程中物料腐解速率产生差异,从而使有机肥施用后对 SOM 的激发效应产生差异^[49-50]。张叶叶等^[51]发

现,虽然小麦和玉米秸秆间的 SOM 激发效应无显著差异,但是小麦和玉米秸秆还田造成的 SOM 激发效应显著高于豆科作物秸秆和水稻秸秆。由此可见,进一步研究不同作物秸秆还田对有机质或有机碳的激发效应,能够为提升秸秆还田的肥力效应提供科学指导和技术借鉴。

1.2.1 堆沤还田 秸秆堆沤还田指作物秸秆经堆沤腐熟后施用于土壤中,按含水量高低可分沤肥和堆肥^[52]。堆沤还田能为土壤供给充足的养分并提升 SOM 含量,尤其对沙土、黏土和盐渍土有很好的改善效果^[53]。朱方明等^[54]研究蔬菜残体堆沤还田技术指出,该技术成本低、操作简单且长期应用有益于提高 SOM 含量并增强土壤中的脲酶活性。但在堆沤还田过程中,氮素易流失,且费时、占地,使其应用受到一定限制^[55]。

将秸秆用养殖发酵床进行发酵也是生产秸秆有机肥的重要方法之一。20 世纪 70 年代以来,随着畜禽养殖业带来的环境污染问题日趋严峻,发酵床养殖作为一种新型健康的养殖模式应运而生。畜禽排泄物会被预先接种微生物的秸秆等垫料吸收并发酵降解,不仅改善了畜禽生长状况、控制了环境污染,而且为秸秆等农业废弃物发酵腐解提供了环境条件,且垫料出圈后经过简单的二次发酵可作为有机肥还田。研究发现,施用发酵床垫料有机肥对于提升土壤微生物活性和 SOM 含量具有较好的效果^[56]。总体而言,关于堆沤还田的研究还不充分,堆沤发酵过程中有机物料的变化尚不完全明确,为了更好地阐明堆沤还田对 SOM 的影响和机制,有必要进一步开展发酵产物性质和发酵过程中有机物料腐解过程的研究。

1.2.2 过腹还田 秸秆过腹还田指将作物秸秆作为饲料饲养牲畜,而后将牲畜的粪、尿再施入土壤中的方法^[57]。有研究者认为,目前秸秆过腹还田在中国是一项拥有较为娴熟的技术、有益于国家金融和社会生态的秸秆综合利用措施^[58]。秸秆过腹还田措施的应用能够增加 SOM 含量、培肥地力、改善生态环境,落实了资源循环利用的理念,但利用比例较低(仅占 25%~35%)^[59]。唐海龙等^[60]对山东省平邑棕壤土的研究发现,用禽畜粪便作有机肥代替化肥时,在 100% 有机肥处理下, SOM 含量增加得最明显。由于不同秸秆间的养分存在差异,有些秸秆干物质有效降解率低,有一定的粗蛋白含量(如棉花

秸秆等),因此过腹还田不适合降解率低的作物^[61]。针对这个问题,已经有学者提出在秸秆过腹还田中加入发酵剂制成饲料,发酵剂对油菜秸秆有较好的降解作用;此外,可用油菜秸秆培养食用菌,为油菜秸秆的还田利用打开了出路,提升了秸秆资源的利用率^[62]。但截至目前,由于受到饲喂秸秆种类的限制,关于秸秆过腹还田的应用尚不广泛,研究也相对缺乏,尤其是过腹后秸秆的降解程度和组分变化等方面的研究还有待深入。

1.3 添加生物腐熟剂还田

为了解决秸秆还田过程中出现的腐解缓慢、大量未腐解的秸秆残留导致病虫害加剧和影响下茬作物出苗与生长等问题^[63],添加生物腐熟剂是很有必要的选择。有效的秸秆腐熟剂可以在合适的条件下推进秸秆快速腐熟并释放出氮、磷、钾等营养物质^[64]。大量研究发现,通过添加有机物料腐熟剂可以促进秸秆中不易分解的纤维素等成分快速腐解,从而有效提高 SOM 含量,增强植物的抗逆性并提高作物产量^[65-66]。赵伟等^[67]在东北黑土上的试验结果显示,加入微生物菌剂能够显著提升 SOM 含量。陈美淇等^[68]通过对浙江省桐庐红壤土的研究发现,与对照组和单一处理相比,秸秆还田配施木本泥炭和激发剂处理的 SOM 含量及其活性组分含量明显提升,作物增产 9.3%~18.8%,这与农传江等^[69]在云南省文山红壤土上得出的在秸秆中添加有机物料腐熟剂还田处理能够显著增加土壤中活性有机质含量的结论一致。

近年来,有关加快秸秆成分降解的功能菌种和酶类的研究不断加深。Qin 等^[70]研究添加蜡样芽孢杆菌的促腐效果发现,玉米秸秆与菌种共同促进了玉米秸秆的腐解,明显提高了腐殖酸、SOM 含量; Han 等^[71]对上海市闵行区壤土的研究结果显示,应用纤维素酶能够加快秸秆腐解,促进养分释放,提高土壤肥力;赵伟等^[72]研究哈尔滨市壤土上秸秆还田配施低温复合菌剂的结果显示,施用低温复合菌剂显著提高了 SOM 含量,较对照提高 5.61%。虽然多项研究结果表明,添加生物腐熟剂对秸秆腐解有很大促进作用,对 SOM 含量的提升也有较为明显的效果,但是目前市场上腐熟剂产品价格较高,施用后效果参差不齐,使其在农业生产中的推广受到限制,亟待进一步研究^[73]。

1.4 炭化还田

秸秆炭化还田指将农作物秸秆在一定前提下制成秸秆生物炭,并将其返还田间的秸秆利用方式^[74-75]。大量研究发现,秸秆炭化还田能显著提升土壤肥力和作物产量^[76],并可有效增加土壤碳储量^[77-78]。利用秸秆制备生物炭有助于提高秸秆利用率,实现秸秆的充分利用^[79]。已有的田间试验结果表明,秸秆炭化还田提高了稻谷产量、土壤酸碱度、SOC 和全氮含量,降低了土壤容重^[80];施用秸秆生物炭可有效促进土壤的团聚作用,从而提高华北地区集约种植系统中的 SOC 储量^[81]。目前,有大量研究者将秸秆炭化还田与其他秸秆还田方式进行比较以寻找最佳还田方式^[82-83],发现秸秆炭化还田对提高 SOM 含量和土壤固碳能力的效果极显著。杨彩迪等^[84]比较秸秆直接还田与炭化还田对浙江省余姚市红壤土的影响发现,2种还田方式均可以改良土壤酸度,在等量秸秆还田条件下,炭化还田对提高 SOM 含量和阳离子交换能力的效果更为明显。在固碳方面,Liu 等^[85]研究秸秆炭化还田对土壤固碳能力的影响发现,施用由秸秆衍生的生物炭还田比普通秸秆还田具有更高的土壤固碳潜力,这与 Li 等^[86]的研究结果一致。Guan 等^[87]在吉林省黏壤土上经过 5 年的田间试验发现,每年以相同碳量施用未炭化、炭化玉米秸秆时,土壤中的 SOC 固存效率分别为 19.7%、58.2%。对不同地区和土壤类型的研究均证明,秸秆炭化还田可作为一项重要的农田土壤固碳措施^[88],与其他秸秆还田方式相比,秸秆炭化还田在改良土壤、提高 SOM 含量和土壤肥力方面的效果更为显著^[89],但是目前该技术的应用范围还有限,究其原因,主要是大量秸秆离田烧制生物炭费时、费力、成本过高^[90],且秸秆生物炭质量轻、颗粒细小,回田撒施过程中不便操作,还易造成一定的空气污染。

2 不同秸秆还田方式提升土壤有机质含量的机制

2.1 秸秆腐解过程

在不同还田方式下,秸秆腐解速率及腐解过程中物质转化过程的差异是导致 SOM 含量差异的根本原因。相关研究指出,秸秆腐熟可以分成 3 个过程:(1) 秸秆中可溶性物质的快速消耗以及腐殖质的累积;(2) 腐殖质大量积累;(3) 腐殖质的分

解^[91]。张银平等^[92]对山东省棕褐土的研究发现,免耕秸秆覆盖处理和粉碎混土还田处理的秸秆腐解率变化趋势一致,都是早期最快、中间缓慢、后期增快,但与免耕秸秆覆盖方式相比,秸秆粉碎混土还田能缩短秸秆完全腐解所需时间,有利于养分的充分利用。田平等^[93]对东北棕壤土的研究发现,与免耕秸秆覆盖、翻耕秸秆还田方式相比,旋耕秸秆还田在同时间内的腐解率较高,因此在东北棕壤土地区,秸秆旋耕还田更能有效提升 SOM 含量。此外,在不同还田方式下,物料组分的转化也存在差异。对大量水稻土的研究发现,秸秆粉碎还田比秸秆焚烧还田显著增加微生物碳含量,从而有效提升 SOM 含量^[94]。与秸秆发酵还田相比,秸秆直接还田和炭化还田后,更高比例的秸秆物料被矿化为 CO₂,且腐解时间大大延长^[95]。但 Wang 等^[96]对南京沿江冲积土的研究发现,当还田深度为 20 cm 时,秸秆沟埋还田在增加土壤活性组分和总有机碳含量方面的效果更加明显。由此可见,对于不同地区和土壤类型而言,秸秆腐解过程中有机物质组分的变化还需要进一步研究。

2.2 对土壤微生物群落的影响

秸秆等有机物料在土壤中的腐解转化离不开细菌、真菌、放线菌等的作用。有研究发现,微生物会优先利用容易降解的半纤维素,其次是降解纤维素,最后是降解木质素,可见秸秆物料的成分差异会影响土壤微生物的分解过程,从而影响物料转化过程和产物^[73]。不用秸秆还田方式对土壤微生物数量及土壤酶活性的影响显著,进而影响秸秆腐解过程^[97-98]。刘玮斌等^[99]对黑土的研究发现,秸秆深耕还田比覆盖还田在增加过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶等酶活性方面有更明显的效果,进而导致 SOM 含量产生差异。高洪军等^[100]研究发现,秸秆旋耕还田与深翻还田、覆盖还田相比,其链霉菌科 (Streptomyce-taceae) 和伯克氏菌科 (Burkholderiaceae) 微生物的相对丰度更高,且相对丰度与 SOM 含量呈正相关。由此可见,不同秸秆还田方式对微生物群落的影响有差异。也有研究发现,东北地区在免耕覆盖还田、粉碎深耕还田和生物炭还田条件下,土壤微生物数量显著增加,土壤脲酶、磷酸酶和转化酶活性都有不同程度的提升,特别是在土壤微生物群落结构和多样性方面,不同秸秆还田方式均能显著提高土壤细菌的多样性^[101]。Yang 等^[102]通过研究沟埋秸秆

还田对土壤微生物代谢活性的影响指出,沟埋秸秆还田能够显著提高土壤荧光素二乙酸水解酶活性和土壤微生物整体的生长活性。周运来^[56]对江苏省黄棕壤土的研究发现,不同秸秆还田方式能显著影响土壤微生物碳代谢,从而影响碳矿化和积累过程。由此可见,不同秸秆还田方式在很大程度上通过影响不同微生物活性、代谢特征和酶活性等使土壤有机质含量提升效果产生差异。

2.3 对土壤腐殖质的影响

土壤腐殖质主要包括胡敏酸、富里酸和胡敏素,在提升土壤肥力和保持碳平衡方面发挥着关键作用^[103]。Chen 等^[104]在吉林省典型盐碱土上进行研究发现,玉米秸秆粉碎造粒还田使胡敏酸结构脂肪化、年轻化,更有效地提升腐殖质含量和结构表征。近年来,有不少研究者针对东北黑土肥力下降的问题进行了研究,结果均表明,秸秆深耕还田于亚表层1年后显著增加了胡敏酸、富里酸和胡敏素含量,胡敏酸逐渐向简单化发展;但是随着时间延长,胡敏酸成分会趋于复杂化^[105]。宋罗娜等^[106]研究发现,与秸秆覆盖还田相比,秸秆与土壤混合深耕还田能更显著提高胡敏酸含量、富里酸含量、PQ(指可提取腐殖质中胡敏酸所占比例)及 $\Delta\lg K$ 值(色调系数,其中 K 代表吸光度),从而提升土壤腐殖化程度与SOM含量。与此同时,不同还田方式对土壤腐殖质含量的影响显著,特别是在秸秆粉碎混合覆盖处理下,稳结态和紧结态的腐殖质含量最高,因此粉碎混合覆盖还田方式对SOM含量提升的效果较佳^[107]。由此可见,不同秸秆还田方式对腐殖质结构和性质的影响也在一定程度上影响了其对SOM含量提升的效果。

3 展望

综上所述,目前关于秸秆还田对SOM含量的影响尚需进行更加系统和深入的探究,以厘清各种秸秆还田方式对不同地区、土壤类型、种植体系等的适用性,揭示不同秸秆还田方式影响SOM的作用机制,进而为合理利用秸秆资源提供理论指导和科学依据。未来的研究应注重以下几个方面:

(1)不同作物的秸秆成分及不同地区的土壤、气候等存在较大差异,目前的研究多以单一作物秸秆为对象,研究结论往往具有一定局限性。目前国内的研究期限大多为3~10年,缺乏长期定位观测结

果的报道,不同耕作、施肥、水分管理等配套措施下的综合研究尤为不足。今后应加强不同作物秸秆在不同地区特有的气候条件、土壤类型和种植制度等背景下的研究,特别是轮作体系下秸秆还田的生态学研究,从而筛选适宜不同区域条件和作物种类的最佳秸秆还田方式。

(2)作物秸秆在自然情况下分解得较慢,研发有效的秸秆腐熟剂作为添加剂是促进秸秆高效还田利用的重要途径,相关研究亟需进一步加强。目前,市场上秸秆腐熟剂产品的有效性参差不齐,缺乏针对不同大宗作物秸秆的高效腐熟剂产品,应加强秸秆腐解过程中功能微生物的研究,研发易于扩繁且环境适应性强的有效促腐菌剂产品。

(3)通过同位素示踪等手段探索不同还田方式下秸秆物料转化规律与去向,是厘清秸秆还田对有机质含量提升效果与机制的有效手段,目前的相关研究多集中在温室盆栽模拟试验,田间环境下的研究有待加强。同时也应注重与不同秸秆还田方式配套的机械化、轻简化技术研究。

参考文献:

- [1] YIN H J, ZHAO W Q, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: role of straw nutrient resources[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81(2): 2695-2702.
- [2] 李廷亮,王宇峰,王嘉豪,等. 我国主要粮食作物秸秆还田养分资源量及其对小麦化肥减施的启示[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(23): 4835-4854.
- [3] 王亚静,王 飞,石祖梁,等. 基于农业供给侧结构性改革背景的秸秆资源与利用研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2017, 38(6): 13-20.
- [4] 孙金华. 农作物秸秆综合利用技术[J]. *农业工程技术*, 2017, 37(26): 33.
- [5] LU J L, ZHOU P J. Ethanol production from microwave-assisted FeCl_3 pretreated rice straw using free and immobilized cells of *Trichoderma viride* and *Sacharomyces cerevisiae*[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2016, 143(2): 04016043.
- [6] SANDRE G, MARÇAL V, JORDI C, et al. Complete feed versus concentrate and straw fed separately: effect of feeding method on eating and sorting behavior, rumen acidosis, and digestibility in crossbred *Angus* bulls fed high-concentrate diets[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 273: 114820.
- [7] WANG B, SHEN X, CHEN S, et al. Distribution characteristics, resource utilization and popularizing demonstration of crop straw in southwest China: a comprehensive evaluation[J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 998-1004.

- [8] 范如芹,罗佳,李赞,等. 秸秆发酵还田提升土壤腐殖质含量与品质[J]. 江苏农业学报, 2019, 35(5): 1095-1101.
- [9] ZHOU Y, LI X H, LIU Y S. Cultivated land protection and rational use in China[J]. Land Use Policy, 2021, 106:105454.
- [10] 田慎重,郭洪海,董晓霞,等. 耕作方式转变和秸秆还田对土壤活性有机碳的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 39-45.
- [11] 李敬王. 不同耕作方式下秸秆还田对砂姜黑土有机质等养分及物理性质的影响[D]. 重庆:西南大学, 2019.
- [12] HUANG W, WU J F, PAN X H, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon fractions and enzyme activities in a double-cropped rice paddy in South China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2021, 20(1): 236-247.
- [13] SHAHBAZ M, KUZYAKOV Y, HEITKAMP F. Decrease of soil organic matter stabilization with increasing inputs: mechanisms and controls[J]. Science Letter, 2017, 304: 76-82.
- [14] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: a meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [15] 颜丽,宋杨,贺靖,等. 玉米秸秆还田时间和还田方式对土壤肥力和作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2004(2): 143-148.
- [16] 刘义国,林琪,王宁. 秸秆还田与氮供应对旱地麦田土壤养分状况及土壤呼吸的影响[C]//中国作物学会. 中国作物学会2013年学术年会论文摘要集. 郑州:中国作物学会, 2013: 1.
- [17] DHALIWAL S S, NARESH R K, GUPTA R K, et al. Effect of tillage and straw return on carbon footprints, soil organic carbon fractions and soil microbial community in different textured soils under rice - wheat rotation: a review[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2020, 19(1): 103-115.
- [18] BU R Y, REN T, LEI M J, et al. Tillage and straw-returning practices effect on soil dissolved organic matter, aggregate fraction and bacteria community under rice-rice-rapeseed rotation system[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 287: 106681.
- [19] 董祥洲,徐粲然,朱启法,等. 秸秆还田对土壤环境影响的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(13): 1-4.
- [20] ZHAO Y P, LUO J F, CHEN B, et al. Effects of Potash fertilizer alternative on rice growth and soil nutrient under wheat straw returning to the field[J]. Hans Journal of Agricultural Sciences, 2019, 9(12): 1162-1166.
- [21] 杨旭,兰宇,孟军,等. 秸秆不同还田方式对旱地棕壤CO₂排放和土壤碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 805-809.
- [22] 季陆鹰,葛胜,郭静,等. 作物秸秆还田的存在问题及对策[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(6): 342-344.
- [23] 王素娟,孙肖青. 农作物秸秆资源化利用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(9): 4034-4035.
- [24] 杨滨娟,钱海燕,黄国勤,等. 秸秆还田及其研究进展[J]. 农学报, 2012, 2(5): 1-4, 28.
- [25] 贺云锋,沈海鸥,张月,等. 黑土区坡耕地不同秸秆还田方式的水土保持效果分析[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 89-94.
- [26] 卿国林. 稻草覆盖对稻茬免耕秋玉米生理特征及产量的影响[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(11): 38-40, 43.
- [27] SHEN Y, MCLAUGHLIN N, ZHANG X P, et al. Effect of tillage and crop residue on soil temperature following planting for a Black soil in Northeast China[J]. Scientific Reports, 2018, 8(2): 213-224.
- [28] CHEN Q Y, LIU Z J, ZHOU J B, et al. Long-term straw mulching with nitrogen fertilization increases nutrient and microbial determinants of soil quality in a maize-wheat rotation on China's Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2021, 775: 145930.
- [29] FANG Q, WANG Y Z, UWIMPAYE F, et al. Pre-sowing soil water conditions and water conservation measures affecting the yield and water productivity of summer maize[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 1-12.
- [30] 惠珊. 秸秆还田及氮肥施用对土壤性状及水稻生长的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2019.
- [31] QU Y, FENG B L. Straw mulching improved yield of field buckwheat (*Fagopyrum*) by increasing water-temperature use and soil carbon in rain-fed farmland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020(pre-published). <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2020.11.008>.
- [32] CAO H, JIA M F, SONG J F, et al. Rice-straw mat mulching improves the soil integrated fertility index of apple orchards on cinnamon soil and fluvo-aquic soil[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 278:109837.
- [33] 马永财,滕达,衣淑娟,等. 秸秆覆盖还田及其腐解率对土壤温湿度与产量的影响[J/OL]. 农业机械学报[2021-06-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20210826.1704.007.html>.
- [34] 张路. 设施水田土表覆盖小麦秸秆对蔬菜及土壤性质的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2019.
- [35] 牛桂言,邵惠芳,朱金峰,等. 我国植烟土壤修复的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(3): 115-122.
- [36] 张贞奇. 英国农作物秸秆综合利用[J]. 世界农业, 1992(2): 39.
- [37] 李秀,韩佳乐,吴文雪,等. 秸秆还田方式对关中盆地土壤微生物量碳氮和冬小麦产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 170-176.
- [38] 乌兰,马伟杰,义如格勒图,等. 油菜秸秆饲用价值分析及其开发利用[J]. 畜牧与饲料科学, 2010, 31(增刊1): 421-422.
- [39] 安丰华,王志春,杨帆,等. 秸秆还田研究进展[J]. 土壤与作物, 2015, 4(2): 57-63.
- [40] 王伟良,李作远. 推广玉米秸秆翻埋还田耕作模式[J]. 农民致富之友, 2019(4): 83.
- [41] 伍佳,王忍,吕广动,等. 不同秸秆还田方式对水稻产量及土壤养分的影响[J]. 华北农学报, 2019, 34(6): 177-183.
- [42] 董晓霞,陈素英,王学君,等. 小麦玉米轮作秸秆直接还田的效

- 应、存在问题与研发方向[J].山东农业科学, 2014, 46(7): 141-144.
- [43] 邹清祺,郝起礼,陈田庆.不同秸秆还田方式对土壤有机质及速效养分的影响[J].西部大开发(土地开发工程研究), 2017, 2(7): 58-63.
- [44] 徐国伟,常二华,蔡建.秸秆还田的效应及影响因素[J].耕作与栽培, 2005(1): 6-9.
- [45] TAO F, PALOSUO T, VALKAMA E, et al. Cropland soils in China have a large potential for carbon sequestration based on literature survey[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 186: 70-78.
- [46] 王春丽,杨建利,王周礼,等.黄土高原沟壑区果园绿肥油菜翻压对土壤水肥的影响[J].西北农业学报, 2021, 30(2): 287-294.
- [47] 李磊,王晶,朱志明,等.氮肥减施与有机肥/秸秆配施对盐碱地土壤肥力指标及玉米产量的影响[J].土壤通报, 2020, 51(4): 928-935.
- [48] 马守田.秸秆还田下减施氮肥对麦田碳、氮、水利用及生态服务价值的影响[D].新乡:河南师范大学, 2015.
- [49] SCHMATZ R, RECOUS S, AITA C, et al. Crop residue quality and soil type influence the priming effect but not the fate of crop residue C[J]. Plant and Soil, 2017, 414(1/2): 229-245.
- [50] LYU M K, NIE Y Y, GIARDINA C P, et al. Litter quality and site characteristics interact to affect the response of priming effect to temperature in subtropical forests[J]. Functional Ecology, 2019, 33(11): 2226-2238.
- [51] 张叶叶,莫非,韩娟,等.秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J/OL].土壤学报[2021-04-11].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210331.1357.008.html>.
- [52] 杨丽娟.农作物秸秆还田的方式及技术要求[J].现代农业, 2011(5): 165.
- [53] 孙喜霞.标准化设施农业病虫害物理防治技术[J].现代农业, 2014(1): 36.
- [54] 朱方明,杨兴娟,陈新,等.蔬菜残体堆沤制肥还田技术[J].作物研究, 2014, 28(6): 706-707.
- [55] 曾维爱,龙世平,谭琳,等.烟草无公害生产实用技术[M].长沙:中南大学出版社, 2013.
- [56] 周运来.秸秆还田方式对土壤有机碳固定及作物产量的影响[D].扬州:扬州大学, 2017.
- [57] 张立恒,刘宝军,程杰,等.干旱地区不同有机物料还田研究进展[J].安徽农业科学, 2020, 48(19): 18-22,37.
- [58] 史忠良.秸秆养畜过腹还田技术[J].甘肃畜牧兽医, 2012, 42(6): 60-61.
- [59] 潘艳丽.秸秆过腹还田技术概述[J].农业科技与装备, 2015(9): 61-62.
- [60] 唐海龙,徐玉新,蒋高明,等.化肥减施及秸秆过腹还田对土壤理化性质的影响——以弘毅生态农场为例[C]//中国环境科学学会.2011中国环境科学学会学术年会论文集(第二卷).乌鲁木齐:中国环境科学学会, 2011: 6.
- [61] 魏敏,雒秋江,潘榕,等.对棉花秸秆饲用价值的基本评价[J].新疆农业大学学报, 2003(1): 1-4.
- [62] 何云龙,罗平,潘求一,等.安乡县油菜秸秆资源化利用现状及对策[J].作物研究, 2018, 32(增刊1): 69-70.
- [63] 李春杰,孙涛,张兴义.秸秆腐熟剂对寒地玉米秸秆降解率和土壤理化性状影响[J].华北农学报, 2015, 30(增刊1): 507-510.
- [64] 劳德坤,张陇利,李永斌,等.不同接种量的微生物秸秆腐熟剂对蔬菜副产物堆肥效果的影响[J].环境工程学报, 2015, 9(6): 2979-2985.
- [65] 于宗波,杨恒山,萨如拉,等.不同质地土壤玉米秸秆还田配施腐熟剂效应的研究[J].水土保持学报, 2019, 33(4): 234-240.
- [66] 彭廷,张中南,王留行,等.沿黄稻区适宜秸秆腐熟剂的筛选及其腐熟效应研究[J].河南农业大学学报, 2019, 53(2): 168-174.
- [67] 赵伟,郝帅,孙泰朋,等.菌剂降解秸秆直接还田对黑土土壤碳素和氮素的影响[J].安徽农业科学, 2015, 43(36): 182-184,220.
- [68] 陈美洪,马垒,赵炳梓,等.木本泥炭对红黄壤性水田土壤有机质提升和细菌群落组成的影响[J].土壤, 2020, 52(2): 279-286.
- [69] 农传江,王宇蕴,徐智,等.有机物料腐熟剂对玉米和水稻秸秆还田效应的影响[J].西北农业学报, 2016, 25(1): 34-41.
- [70] QIN S J, JIAO K B, LYU D, et al. Effects of maize residue and cellulose decomposing bacteria inocula on soil microbial community, functional diversity, organic fractions, and growth of *Malus hupehensis* Rehd[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, 61(2): 173-184.
- [71] HAN W, HE M. The application of exogenous cellulase to improve soil fertility and plant growth due to acceleration of straw decomposition[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(10): 3724-3731.
- [72] 赵伟,孙泰朋,田宗泽,等.秸秆配施低温菌剂直接还田对黑土土壤碳、氮的影响[J].玉米科学, 2018, 26(3): 147-152.
- [73] 魏蔚,宋时丽,吴昊,等.复合菌剂对玉米秸秆的降解及土壤生态特性的影响[J].土壤通报, 2019, 50(2): 323-332.
- [74] 兰宇,孟军,杨旭,等.秸秆不同还田方式对棕壤N₂O排放和土壤理化性质的影响[J].生态学杂志, 2015, 34(3): 790-796.
- [75] TAN Z X, CAROL L, JI X Y, et al. Returning biochar to fields: a review[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 116:1-11.
- [76] 蒋晨,麻培侠,胡保国,等.生物质炭还田对稻田甲烷的减排效果[J].农业工程学报, 2013, 29(15): 184-191.
- [77] SMITH P. Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies[J]. Global Change Biology, 2016, 22(3): 1315-1324.
- [78] 孟雨田,赵承森,李晓庆,等.生物质炭对黑土有机碳组分的影响[J].江西农业大学学报, 2018, 40(6): 1340-1347.
- [79] WANG H X, XU J L, SHENG L X. Preparation of straw biochar and application of constructed wetland in China: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 273:123131.
- [80] 安宁,李冬,李娜,等.长期不同量秸秆炭化还田下水稻

- 土孔隙结构特征[J].植物营养与肥科学报, 2020, 26(12): 2150-2157.
- [81] XIU L Q, ZHANG W M, SUN Y Y, et al. Effects of biochar and straw returning on the key cultivation limitations of Albic soil and soybean growth over 2 years[J]. *Catena*, 2019, 173: 481-493.
- [82] 郑梅迎, 刘玉堂, 张忠锋, 等. 秸秆还田方式对植烟土壤团聚体特征及烤烟产质量的影响[J].中国烟草科学, 2019, 40(6): 11-18.
- [83] 李敏, 韩上, 武际, 等. 农作物秸秆炭化后养分变化及还田效应[J].中国农学通报, 2019, 35(16): 95-99.
- [84] 杨彩迪, 卢升高. 秸秆直接还田和炭化还田对红壤酸度、养分和交换性能的动态影响[J].环境科学, 2020, 41(9): 4246-4252.
- [85] LIU J, JIANG B S, SHEN J L, et al. Contrasting effects of straw and straw-derived biochar applications on soil carbon accumulation and nitrogen use efficiency in double-rice cropping systems[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2021, 311:107286.
- [86] LI N, WEN S Y, WEI S K, et al. Straw incorporation plus biochar addition improved the soil quality index focused on enhancing crop yield and alleviating global warming potential[J]. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, 21:101316.
- [87] GUAN S, LIU S J, LIU R Y, et al. Soil organic carbon associated with aggregate-size and density fractions in a Mollisol amended with charred and uncharred maize straw[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(7): 1496-1507.
- [88] 刘志伟, 朱孟涛, 郭文杰, 等. 秸秆直接还田与炭化还田下土壤有机碳稳定性和温室气体排放潜力的对比研究[J].土壤通报, 2017, 48(6): 1371-1378.
- [89] 龙泽华, 王晶, 侯振安. 秸秆炭化还田和施氮量对棉田土壤有机氮组分的影响[J].石河子大学学报(自然科学版), 2019, 37(2): 154-161.
- [90] SUPRIYA M, SURAMA N, TANUSHREE D, et al. The impact of biochar on soil carbon sequestration: Meta-analytical approach to evaluating environmental and economic advantages[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 250:109466.
- [91] 韩梦颖, 王雨桐, 高丽, 等. 降解秸秆微生物及秸秆腐熟剂的研究进展[J].南方农业学报, 2017, 48(6): 1024-1030.
- [92] 张银平, 迟岩杰, 王振伟, 等. 秸秆混土还田对两熟区玉米秸秆腐解速度的影响[J].江苏农业科学, 2020, 48(19): 245-249.
- [93] 田平, 姜英, 孙悦, 等. 不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J].中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 100-108.
- [94] HUANG W, WU J F, PAN X H, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon fractions and enzyme activities in a double-cropped rice paddy in South China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(1): 236-247.
- [95] 周运来, 张振华, 范如芹, 等. 秸秆还田方式对水稻田土壤理化性质及水稻产量的影响[J].江苏农业学报, 2016, 32(4): 786-790.
- [96] WANG X H, YANG H S, LIU J, et al. Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice-wheat rotation system[J]. *CATENA*, 2015, 127:56-62.
- [97] 梁卫, 袁静超, 张洪喜, 等. 东北地区玉米秸秆还田培肥机理及相关技术研究进展[J].东北农业科学, 2016, 41(2): 44-49.
- [98] 饶继翔, 陈昊, 吴兴国, 等. 不同秸秆还田方式对土壤线虫群落特征的影响[J].农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2473-2480.
- [99] 刘玮斌, 田文博, 陈龙, 等. 不同秸秆还田方式对土壤酶活性和玉米产量的影响[J].中国土壤与肥料, 2019(5): 25-29.
- [100] 高洪军, 李强, 朱未, 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[2021-06-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1100.S.20210602.1121.004.html>.
- [101] 张海晶, 王少杰, 罗莎莎, 等. 不同秸秆还田方式对土壤微生物影响的研究进展[J].土壤与作物, 2020, 9(2): 150-158.
- [102] YANG H S, FANG C, MENG Y, et al. Long-term ditch-buried straw return increases functionality of soil microbial communities[J]. *CATENA*, 2021, 202:105316.
- [103] 黄莹, 窦森, 高洪军, 等. 不同深还秸秆用量对黑土腐殖质组成的影响[J].吉林农业大学学报, 2020, 42(5): 545-551.
- [104] CHEN X D, WU J G, YAA O K. Effects of returning granular corn straw on soil humus composition and humic acid structure characteristics in saline-alkali soil[J]. *Sustainability*, 2020, 12(3): 1005.
- [105] 董珊珊, 窦森, 邵满娇, 等. 秸秆深还不同年限对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J].土壤学报, 2017, 54(1): 150-159.
- [106] 宋罗娜, 窦森, 黄莹. 秸秆还田不同方式对土壤腐殖质组成的影响[J].吉林农业大学学报[2021-05-24]. <https://doi.org/10.13327/j.jjlau.2020.4445>.
- [107] 岳红丽, 吴景贵, 王蒙. 不同玉米秸秆还田方式对土壤腐殖质结合形态影响[J].安徽农业科学, 2019, 47(18): 56-59.

(责任编辑:徐艳)