



农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究

雷琬莹, 李娜, 滕培基, 郁瑾超, 龙静泓

Decomposition processes of organic materials and their mechanisms of improving soil fertility in cropland ecosystems

LEI Wanying, LI Na, TENG Peiji, YU Jinchao, and LONG Jinghong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20210878>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机培肥与耕作方式对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳组分的影响

Effects of organic fertilization and tillage method on soil aggregates and organic carbon fractions in a wheat–rice system

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(3): 405–412

生物质炭与有机物料配施的土壤培肥效果及对玉米生长的影响

Effects of combined biochar and organic matter on soil fertility and maize growth

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(9): 1287–1297

有机物料还田对冬小麦农田土壤温室气体排放影响的研究

Effects of organic waste application on soil greenhouse gas emissions of a winter wheat field

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(6): 815–824

长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响

Effects of long-term exogenous organic material addition on the organic carbon composition of soil aggregates in farmlands of North China

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(8): 1384–1396

不同培肥方式对土壤有机碳与微生物群落结构的影响

Effect of fertilization managements on soil organic carbon and microbial community structure

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(12): 1866–1875

长期添加外源有机物料对华北平原不同粒级土壤氮素和氨基糖的影响

Effect of long-term addition of organic substances on soil nitrogen and amino sugars in particle-size fractions in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(4): 507–518



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20210878

雷琬莹, 李娜, 滕培基, 郁瑾超, 龙静泓. 农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(9): 1393-1408

LEI W Y, LI N, TENG P J, YU J C, LONG J H. Decomposition processes of organic materials and their mechanisms of improving soil fertility in cropland ecosystems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(9): 1393-1408

农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究*

雷琬莹^{1,2}, 李娜^{1,2**}, 滕培基^{1,2}, 郁瑾超^{1,3}, 龙静泓^{1,2}

(1. 中国科学院黑土区农业生态重点实验室/中国科学院东北地理与农业生态研究所 哈尔滨 150081; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 东北林业大学林学院 哈尔滨 150040)

摘要: 农田生态系统是受人为活动干扰最多的陆地生态系统, 土壤有机质丰富和养分均衡是保证农作物生长需要、土壤生物和谐共生和系统生产力维持稳定的基本要素。农作物秸秆、畜禽粪便是农田生态系统的主要外源有机物料, 也是农田土壤有机质的重要来源。有机物料还田可有效增加土壤有机质积累、培肥土壤、促进作物稳产增产。有机物料还田后经过一系列复杂的物理、化学和生物学腐解过程, 最终转化为土壤有机质。这一复杂的腐解过程受有机物料自身性质、土壤类型及其背景属性、气候因子和农田管理措施等多重作用综合调控, 因此备受科学界关注。本文综述了农田生态系统有机物料的腐解过程及其主要影响因素、还田后腐解产物对土壤养分库及土壤质量影响方面的主要研究进展, 进一步总结了有机物料还田转化为土壤有机质的作用机制。从表征有机物料腐解结构变化的手段和指标着手, 解析有机物料腐解过程中有机物料和土壤的化学结构组成的变化特征, 揭示影响有机物料腐解的主要因素(有机物料的质量、组分和化学结构, 以及环境因素), 综合分析有机物料还田对土壤碳库、活性有机碳、腐殖质组成以及养分库的影响, 从土壤物理、化学和生物学性状以及作物产量角度综合评价有机物料还田培肥土壤的效果, 深入解析有机物料腐解转化为土壤有机质的物理学、化学及生物学调控过程及机制。最后对未来开展农田生态系统有机物料还田腐解过程及作用机制的深入研究进行展望, 以期对农田生态系统有机物料高效还田培肥土壤、优化农田管理措施提供理论依据和数据支持。

关键词: 有机物料还田; 腐解特征; 土壤培肥; 光谱技术; 土壤腐殖质; 活性有机碳

中图分类号: S141.3; S158.5

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Decomposition processes of organic materials and their mechanisms of improving soil fertility in cropland ecosystems*

LEI Wanying^{1,2}, LI Na^{1,2**}, TENG Peiji^{1,2}, YU Jinchao^{1,3}, LONG Jinghong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Chinese Academy of Sciences / Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

* 中国科学院战略性先导科技专项子课题(XDA28010301)、吉林省自然科学基金(YDZJ202201ZYTS517)、中国科学院前沿科学研究重点计划项目(ZDBS-LY-DQC017)和国家重点研发项目(2021YFD1500105-1)资助

** 通信作者: 李娜, 主要研究方向为土壤肥力调控和有机质生物化学循环。E-mail: nal@iga.ac.cn

雷琬莹, 主要研究方向为土壤有机质化学稳定性。E-mail: leiwanying@iga.ac.cn

收稿日期: 2021-12-12 接受日期: 2022-03-07

* This study was supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA28010301), the Natural Science Foundation of Jilin Province (YDZJ202201ZYTS517), the Research Program of Frontier Sciences of Chinese Academy of Sciences (ZDBS-LY-DQC017), and the National Key Research and Development Program of China (2021YFD1500105-1).

** Corresponding author, E-mail: nal@iga.ac.cn

Received Dec. 12, 2021; accepted Mar. 7, 2022

Abstract: Cropland ecosystems are terrestrial ecosystems that are highly disturbed by human activity. Fertile soil, organic matter, and balanced nutrients play fundamental roles in ensuring crop growth, harmonious symbiosis of soil organisms, and stability of ecosystem productivity. In cropland ecosystems, crop straw and livestock manure are two main exogenous organic materials that are incorporated into soils; and are the main sources of soil organic matter. The incorporation of organic materials into soils can increase soil organic carbon accumulation, improve soil fertility, and enhance crop yield. Organic materials are ultimately transformed into soil organic matter (SOM) after undergoing a series of complex physical, chemical, and biological decomposition processes. These complex decomposition processes are controlled by many factors, such as organic materials properties, soil types and their inherent characteristics, environmental conditions, and agricultural management practices. Therefore, these processes and their driving factors are receiving increasing attention worldwide. This article comprehensively reviewed the main research progress in the decomposition characteristics of organic materials and their main influencing factors. The effects of organic amendments on soil nutrient pools and soil quality and the underlying mechanisms regulating the transformation of organic materials to soil organic matter were also discussed. This study first outlined the main methods and indicators for characterizing the decomposition processes of organic materials, analyzed the characteristics of the chemical structure of organic materials and soil during decomposition, and revealed the main factors regulating the decomposition processes of organic materials (environmental factors; the quality, composition, and chemical structure of organic materials). Second, the contributions of organic material incorporation to the soil organic carbon pool, active organic carbon, humus composition, nutrient pools, and soil quality were evaluated. Effects of incorporating organic materials on soil fertility were discussed in terms of crop yield and soil physical, chemical, and biological properties. Third, the underlying physical, chemical, and biological mechanisms regulating the transformation of organic materials to soil organic matter were illustrated. Finally, prospects for future research on the processes and mechanisms of organic material decomposition in the cropland ecosystems were presented, as listed in the following points: to optimize scientific and reasonable measures for organic materials returning to the field by considering local conditions, long-term positioning field experiments and cross-regional network experiments. The optimal ratio between the labile and recalcitrant components of organic materials must be quantified to achieve a highly efficient decomposition degree of the organic materials. More advanced and elaborate techniques are advocated to be applied together to characterize the decomposition products more comprehensively and accurately. This review is expected to provide a theoretical basis and data support for interpreting the decomposition and transformation processes of organic materials and optimizing cropland management practices in cropland ecosystems.

Keywords: Organic materials incorporation; Decomposition characteristics; Soil fertility; Spectroscopy; Soil humus; Labile organic carbon

我国农业废弃物资源丰富,以农作物秸秆、畜禽粪便和菌渣为主,但这些农业废弃物再利用程度不高。国家农业农村部、生态环境部等相关部门多次发布公告,明确指出要加快推进作物秸秆的“五化”利用,同时加大秸秆禁烧力度,以促进改善环境和实现农业可持续发展目标。以东北黑土区为例,作为我国重要的商品粮基地,秸秆资源丰富,可收集资源量约 8.4 亿 t,但该区秸秆综合利用率仅 66.6%,比全国低 13.5 个百分点。低温冷凉的气候使秸秆还田难度加大,多数秸秆被直接露天焚烧或随意堆弃,导致东北成为我国秸秆资源综合利用的重点和难点地区。我国粪肥资源量为 38 亿 t,畜禽粪便含有丰富的有机质和氮磷钾等养分,粪肥资源化利用后培肥土壤效果良好^[1],但是目前仍有大部分的粪肥资源没有得到合理化处理与应用。2017 年国务院办公厅《关于加快推进畜禽养殖废弃物资源化利用的意见》中明确指出,目前我国的畜禽粪便资源化利用率还不足 60%。同时,我国每年的食用菌总产量约为 410 万 t,根据报道每生产 1 kg 食用菌,就会产生约 5 kg 的菌

糠^[2],而这些菌糠除 30% 左右被用作畜禽饲料和有机肥料以外,仍有 70% 的菌糠没有得到合理的资源化利用^[3]。综上所述,农业废弃物不合理的利用,不仅浪费了资源,也给环境带来了巨大的压力。

我国的粮食产量增加速度远不及化肥增施速度,过去 30 年时间里,中国玉米 (*Zea mays*) 产量增加了 85%,然而化肥施用量却增加了 450%^[4]。集约化农业系统长期过量的化肥施用,给土壤带来了诸多问题,如酸化、电导率升高、酶活性降低、生物多样性下降、有机质 (SOM) 含量减少等,这些问题均使土壤肥力降低^[5]。我国政府于 2015 年提出了化肥零增长计划,因此,为了实现既能减少化肥的施用量还可维持以及提高农田土壤肥力的目标,取之于农业系统的有机物料还田势必成为一项长期而有效的措施。如果将秸秆、粪肥和菌糠的含碳量分别按照 40%、26% 和 38% 来估算,那么每年仅因秸秆、畜禽粪便和废弃的菌糠损失的碳量就高达 7.2 亿 t^[6-7]。若能将这些农业废弃的有机物料充分合理地资源化利用,使之还田不仅可以有效培肥土壤,提高土壤有机碳

含量, 积极促进实现作物稳产高产, 还能够减少农田中化肥的使用量, 平衡我国土壤普遍存在的氮磷钾比例失调的矛盾, 同时也能为秸秆焚烧而导致大气污染和动物粪便随意堆积造成的环境污染等问题的解决产生积极促进作用, 将助力我国 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和目标的完成。

农业废弃有机物还田, 已被广泛应用于农田生态系统培肥土壤和增产作物。但农业废弃物培肥土壤的过程中, 不同有机物料的迁移转化过程和机制还不十分清楚, 制约了有机物料还田培肥土壤技术研发和实施。因此本文综述了农田生态系统有机物料的腐解过程及其主要影响因素、还田后腐解产物对土壤养分库及作物产量的影响等方面的主要研究进展, 总结了有机物料还田转化为土壤有机质的作用机制, 并对未来开展农田生态系统有机物料还田腐解过程及作用机制的深入研究进行展望, 以期对农业废弃有机物料还田腐解培肥土壤提供基础理论依据和实践支持。

1 农田生态系统有机物料还田腐解过程及影响因素

1.1 表征有机物料腐解特征的主要技术

1.1.1 傅里叶红外光谱 (FTIR) 技术

有机物料的腐解产物和土壤有机质分子结构均具有高度复杂性, 有机物料腐解和形成土壤有机质的过程中有机物料和土壤的化学结构变化的动态监测是需要解决的关键问题。使用更加先进的技术手段和仪器来解析有机物料腐解产物和土壤有机碳的分子结构特征是克服这一难题的重要突破口。传统的化学方法通常是先通过浸提等过程将有机质提取后再进行研究, 这些前处理过程会破坏原有的土壤有机质结构。红外光谱是后来发展起来的有机质结构测定技术, 该技术具有测定快速、操作简便、微量且高效等优势, 可为有机质的化学组成和分子结构特征等提供重要信息。红外光谱的特征峰所代表官能团主要来源于脂肪族 (2925 cm^{-1} 、 2854 cm^{-1} 和 1420 cm^{-1})、芳香族 (1623 cm^{-1})、糖类 (1163 cm^{-1} 、 1073 cm^{-1} 、 1033 cm^{-1} 和 1007 cm^{-1})。这种分析方法现已成功应用于土壤有机质化学结构的研究^[8-9]。基于傅里叶红外光谱 (FTIR) 分析, Hou 等^[10] 研究发现, 在青藏高原的草甸和灌木林两个生态系统中, rA1635/rA2930 (顽固指数) 均随土壤深度的增加而略有增加, 说明土壤有机质的稳定性随土层深度而增加。盐碱弃耕地在开垦 5 年后各土层 (0~60 cm) 土壤中芳香碳、脂肪碳、游离羟基以及糖类的特征峰的相对吸

收峰面积均出现了较大程度的增加, 并且, 指征芳香族 (C=C) 和糖类 (C—O) 的有机官能团的数量提升更为显著^[11]。张福韬等^[12] 比对玉米连作 24 年前后黑土有机质红外光谱特征变化, 发现长期玉米连作使土壤有机质中脂肪碳、酚醇和多糖类特征峰的相对吸收强度增加, 而使芳香族碳和羧基碳特征峰的相对吸收强度下降, 芳香性/脂肪性指数减小, 说明土壤有机质的结构趋于简单化, 土壤有机质的稳定性降低。同时, 红外光谱分析技术可以直接对腐解过程中有机物料化学组分的变化和有机物质的形成及转化过程中的动态变化进行定性分析。有机物料还田后可使土壤中从有机物料中转化而来的芳香碳、脂肪碳及烷基碳含量显著增加^[13]。

1.1.2 ^{13}C 固态核磁共振波谱技术

^{13}C 固态核磁共振波谱技术 (solid-state ^{13}C -NMR spectroscopy) 可以在更加贴近原始真实状态下对有机物质结构进行解析, 具有同时定性定量分析有机物质化学结构的独特优势, 该技术近年来已在土壤等天然有机化合物的结构特征研究方面取得了一些进展和新的突破, 目前也已经广泛应用于天然有机化合物的结构特征的研究分析。 ^{13}C -NMR 核磁共振波谱通常可以解析 4 大类官能团: 烷基碳区 (alkyl C)、烷氧碳区 (O-alkyl C)、芳香碳区 (aromatic C) 和羰基碳区 (carbonyl C)。这些官能团表征特定种类的生物大分子化合物, 含氧烷基碳代表易分解碳组分, 即易被微生物生长代谢活动消耗的碳水化合物, 而烷基碳和芳香碳等则指代难分解碳组分, 主要是难被利用的长链脂肪族化合物、木质素、单宁等^[8,14]。 ^{13}C 固态核磁共振可以在将有机碳官能团定性的同时, 将其进行量化; 具有测试时对样本无损伤性的特点, 该技术测定得到的数据处理方法简单, 易于掌握。 ^{13}C 固体核磁的这些优点, 使其成功地广泛应用于测定有机物料转化为土壤有机质的过程中有机物质化学组成变化的研究^[15-16]。通过比对世界范围内的 ^{13}C 固态核磁共振波谱图发现, 土壤有机碳的化学结构及其稳定性与输入的外源有机碳的化学结构紧密相关^[17]。有机物料的分解程度可以用芳香率 (aromaticity)、烷基/氧烷基 (alkyl/O-alkyl) 和炔基碳与甲氧基碳比值 (carbonhydrate C/methoxyl C) 表征, 比值越高表明有机物料的腐解程度越大, 腐解效果越好^[18]。Wang 等^[19] 开展了跨区域尺度不同气候条件下 2 年秸秆腐解试验, 发现秸秆的化学结构变化在两年内相似。在有机物料分解过程中, 随施用量提高和施用年限延长, 烷氧碳、双烷氧碳相对含量逐渐降低, 而芳香碳的相对含量显著增加, 疏水碳/亲水碳、芳

香碳/烷氧碳的数值逐渐增大,稳定性有机碳含量增加,有机物料体内的有机碳更加稳定^[20]。

1.1.3 荧光光谱技术

随着研究手段与分析技术的飞速发展,目前对土壤有机质形成和稳定机制的认知发生了巨大变革,逐渐从早期经典腐殖质理论转为综合关注微生物转化和调控土壤有机质形成的新共识,即土壤有机质是组成结构、存在状态与功能关联分布的土壤有机连续体,是一种可以逐渐分解的有机化合物的连续体,这些有机物碎片被微生物不断地腐解,直到变成更小尺寸的有机物分子,同时导致极性和可电离基团的增加,从而增加了在水中的溶解度^[21-23]。在土壤有机质这个连续分解的化合物中,水溶性有机质代表土壤有机质中最活跃的部分,很容易被微生物利用。同时,水溶性有机质在有机物料腐解过程中为微生物提供养分和能量,可指示腐殖质成分的迁移和转化过程,作为有机物料腐殖化和腐解程度的评价指标^[24]。因此从分子角度分析水溶性有机质的结构对了解土壤有机质的形成与周转具有重要意义。

目前光谱学分析技术已广泛应用于水溶性有机质分子结构研究中,与红外光谱和¹³C 固态核磁共振波谱技术相比,荧光光谱分析技术具有更高的灵敏度和更好的选择性,与平行因子分析结合还可以识别传统的荧光图谱中无法呈现的细微差异,这使得荧光光谱技术在土壤学和有机质化学相关研究领域得到更好的发展^[24-25]。通过对腐殖化指数(HIX)、荧光指数(FI)、自生源指数(BIX)等荧光特征指数的解析,可以对不同来源的水溶性有机质的芳香性等基本特性进行有效揭示^[26]。三维荧光结合平行因子分析可以解析出水溶性有机质主要组分——大分子腐殖物质(C₁),包括木质素等芳香物质、低分子量类富里酸(C₂)、类色氨酸(C₃)以及受人为活动因素干扰的腐殖物质(C₄)这4个组分^[27-28]。目前,该种结合分析方法已经在水溶性有机质的荧光特性研究中广泛应用,是腐殖酸类物质结构、组成特性分析的主要评价方法。秸秆和畜禽粪便还田会影响土壤水溶性有机质的浓度、结构和组成。三维荧光光谱特征和荧光区域指数结果表明,水溶性有机质中富里酸和胡敏酸含量丰富,随着有机粪肥腐解发酵的进行,水溶性有机质的组成也发生明显变化,其中类腐殖质峰随堆肥时间的延长,其强度逐渐增强,而类蛋白峰则逐渐减弱^[29-30]。李艳等^[24]在牛粪与玉米秸秆混合发酵堆肥的研究中发现,随着秸秆施用量的增加,各荧光组分所占的相对百分比表现为类蛋白质最高,

其次为类富里酸,类胡敏酸最低。不同有机物料还田对土壤可溶性有机质的结构影响也有所不同,作物秸秆还田后使水溶性有机质的腐殖化程度和复杂性增加,而生物炭的施用则会降低水溶性有机质的腐殖化程度和复杂性^[31]。

1.2 有机物料还田后的腐解特征

理解不同有机物料还田后的腐解过程及其化学结构的动态变化对于有机物料的合理资源化利用,因地制宜地制定农田管理措施培肥土壤和保障国家粮食安全具有重要的现实指导意义。目前,已有学者对有机物料还田后的腐解特征进行了大量的研究和探讨^[14,32]。由于有机物料的来源不同,其化学结构组成、类腐殖质结构组成及其各组分含量均存在明显差异,因此在有机物料腐解的全过程中,不同种类有机物料的分解和残留率的动态变化及腐解特征也存在明显区别^[33]。有研究表明,不同种类有机物料还田腐解1年后的残留率由低到高为绿肥<秸秆<根茬≈有机肥(动物粪便),其中以绿肥类最低,平均残留率为0.27 g·g⁻¹,有机肥类残存最高,达0.41 g·g⁻¹^[34]。一般而言,有机粪肥较作物秸秆更难被腐解,秸秆的腐殖化系数较低,为10%~39%;而有机粪肥的腐殖化系数可达50%以上,腐殖化系数越高,有机物料越耐分解。说明秸秆的腐解速率明显高于有机粪肥,且在我国南方处于亚热带地区的红壤比气候寒冷的北方地区的黑土腐解速率更快^[35]。

作物秸秆的腐解过程总体上按照易矿化碳组分分解,半纤维素、纤维素分解以及木质素分解3个阶段进行^[32]。腐解规律呈现出前期迅速、后期缓慢、最后趋于稳定或先快后慢的变化特征(图1a)。首先,在秸秆还入土壤的腐解初期,秸秆中所富含的多糖和氨基酸等水溶性有机物质通过淋溶作用、土壤微生物和动物活动迅速降低,同时释放出矿质养分,使秸秆质量迅速减少,作物秸秆腐解的残留率也随之快速下降,该阶段为快速分解期;随着腐解进行,秸秆中难分解物质所占比例增大,土壤中动物及微生物活动受限,活性降低,纤维素和木质素成为秸秆中主要化合物并且需要被特定群落的微生物分解,这个阶段与早期相比,秸秆的分解速率下降,腐解过程进展缓慢^[36-37]。通过SEM扫描电镜(图1b、c)观察到随着腐解时间延长,作物秸秆的物理结构遭受到严重破坏,由开始时的表面变得粗糙,逐渐断层增多,空洞不断扩大,纤维束结构变得松散,到最后形成近似网状结构^[38-39]。秸秆腐解过程中,秸秆分解残体的化学结构特征(各有机碳官能团相对丰度)也发生了

明显变化, 总体上呈现出秸秆中含氧烷基碳丰度逐渐降低, 芳香碳和烷基碳的丰度逐渐升高的变化规律^[14]。不同碳组分官能团相对含量差异较大, 含氧烷

基碳在腐解产物的有机碳官能团中相对含量最高, 达47.02%~60.13%, 其次为烷基碳, 占比11.41%~17.38%, 以酚基碳含量最低, 仅占0.75%~2.02%^[38]。

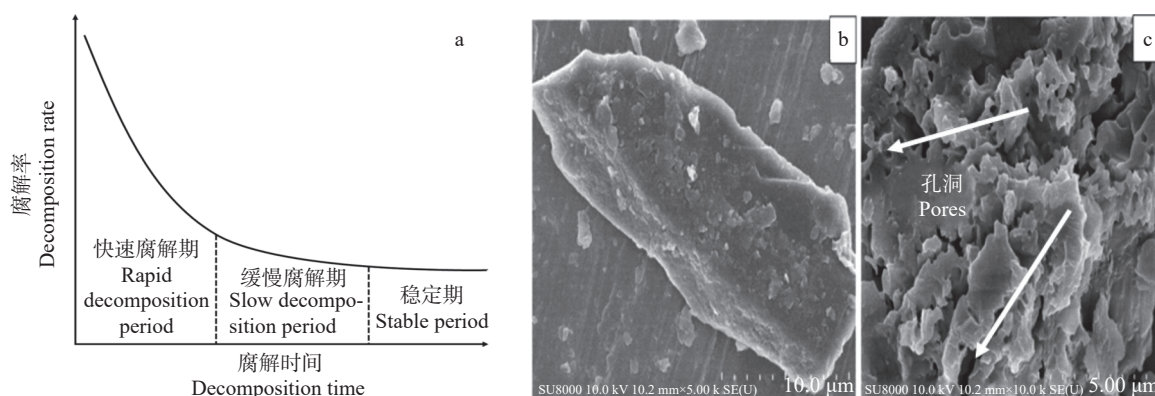


图1 有机物料还田腐解率变化模式(a)和扫描电镜(SEM)下作物秸秆结构腐解前(b)和腐解后(c)对比图(Kubar等^[39])
Fig. 1 Changes of decomposition rate of the organic material incorporated into soils (a) and Scanning Electron Microscopy (SEM) images of undecomposed straw (b) and decomposed straw (c) (Kubar, et al.^[39])

箭头代表秸秆腐解后出现的孔洞状结构。Arrows indicate the pore structure developed after the straw decomposition.

不同种类的作物秸秆之间的腐解特征也有所差别^[40]。在东北黑土的秸秆还田研究中发现, 大豆(*Glycin max*)秸秆在还入土壤的前2个月平均分解速率可达26.4%, 而在后3个月平均分解率仅为1.7%^[41]。玉米秸秆还田后的0~90 d为快速腐解期, 而由于90 d后的腐解产物主要为难降解的有机物, 从而进入缓慢腐解阶段^[42]。在小麦(*Triticum aestivum*)秸秆的腐解过程中, 三大重要有机组分变化的特点为: 腐解初期半纤维素和纤维素的腐解速率相对较大, 随着腐解时间增加, 腐解速率开始出现减小趋势; 与木质素相比, 半纤维素和纤维素虽然腐解开始时间早, 起步快, 在前期发挥主导作用, 但在腐解全过程中其腐解速率衰减幅度较大^[38]。即便在同一环境中不同作物秸秆腐解速率也存在差异。玉米秸秆较大豆秸秆更容易腐解, 这可能与碳氮比过低有关。张红等^[43]研究发现, 与大豆秸秆相比玉米秸秆在腐解过程中更容易出现与土壤“争氮”的现象, 从而加快促进附着在秸秆表面的微生物对秸秆的分解。介晓磊等^[44]通过尼龙网袋田间腐解试验发现, 在相同的土壤环境和同一供氮水平下小麦秸秆的腐解总趋势低于玉米秸秆。

相对于作物秸秆来说, 禽畜粪肥的腐解特征更为复杂。禽畜粪肥还田的目的是通过将物料中有机物质分解归还土壤, 改良地下部土壤环境, 供给地上部植物生长所需养分, 最终可实现高产稳产和种养结合的农业可持续发展。有机粪肥在腐解过程中, 所形成的中间产物结构更复杂, 并且分离困难且过

程烦琐^[44-45]。高伟等^[46]研究发现, 粪肥在腐解过程中, 水溶性碳等易降解有机质和总有机质含量总体呈下降趋势, 而类腐殖质质量及品质均呈上升趋势, 其中胡敏酸含量增加、富里酸含量降低、富里酸向胡敏酸转化比例增大。研究表明畜禽粪肥在土壤中一年的腐解效果也有显著差异, 腐解最快的是鸡粪, 年腐解率达83.4%, 其次是牛粪, 猪粪的腐解率最低, 年腐解率仅为33.4%; 并且不同来源粪肥在不同分解时期的分解规律也有所不同^[44]。由于不同地区的自然气候因素, 加之粪肥中原本就含有大量纤维素和木质素等耐分解的组分, 因此畜禽粪肥单独还田后并非就会快速腐解改善土壤, 施用不当或施用未腐熟的粪肥还会污染环境、滋生细菌产生土传病害、腐解效果不佳, 甚至会影响下季作物正常生长而导致减产。为了避免此类问题发生, 施加微生物菌剂或有机物料腐熟剂等快腐剂可以促进畜禽粪肥的彻底腐解, 培肥土壤。已有大量研究表明施用高效腐熟菌剂后可大大缩短粪肥的腐解时间, 更有利于有机物料中养分的保持。李尚民等^[47]研究发现多种微生物菌剂均可有效促进禽畜粪肥堆体升温, 延长高温期, 加快腐熟进度, 并在堆腐完成后可以更好地保持养分。

菌糠作为栽培食用菌的基质材料, 主要成分是植物被食用菌菌丝利用分解后的残体, 富含大量碳素和氮素等营养成分, 以木质素、纤维素、半纤维素及蛋白质为主, 然而这些大分子化合物中的养分在菌糠还田后通常被作物直接吸收利用困难。大量

研究表明菌糠还田后可改善土壤理化性质和土壤微生物群落结构,降低土壤容重,减少土壤耕层阻力,改善土壤三相,活化及提升土壤养分,从而提升作物产量^[48-49]。但是目前对于菌糠单独还田后的腐解特征及其结构变化的研究还很少见,这使得对于菌糠还田后对土壤有机碳积累及提升肥力的潜力的预测具有局限性。

1.3 有机物料腐解的影响因素

有机物料的腐解是一个通过腐殖化作用由固体废弃物不断分解形成土壤有机质,在矿化作用下释放出植物可吸收利用的养分和以 CO₂ 形式排放到空气中的复杂过程,该过程是在气候、土壤类型、物料自身性质及组成和农田管理措施的共同调控作用下完成的^[45,50]。

1.3.1 气候因素

气候环境被认为是首要主导因素,在促进以及抑制有机物料的腐解进程中的作用最为重要。然而,有机物料的分解过程对不同气候因子的反馈也有所不同。整体上,有机物料的残留率随温度的上升而降低。研究表明有机物料的腐解速率常数随年均气温升高呈现正线性增长趋势,在 0~30 °C 的温度范围内,腐解速率与温度呈正相关^[35,51]。同时水分状况、冻融循环和干湿交替,都会对土壤中有机物料的分解速率有显著影响。Prescott^[52] 认为 60%~75% 是最适合有机物料腐解的土壤含水量,一旦含水量低于 30% 或高于 80%,都会减缓有机物料的腐解过程,对腐解产生抑制作用。冻融循环和干湿交替会导致土壤中水热条件的强烈转换,对有机物料还田后的腐解过程产生作用,进而影响有机物料的腐解速率。信彩云等^[53] 发现与旱作相比,灌溉条件下有机物料还田后的腐解速率更快。

1.3.2 土壤因素

气候作为五大成土因素之一,虽然对土壤的发育形成有所干扰,但是长期的发展演化过程也使不同的土壤具有了自身独特的性质特点,进而影响有机物料的腐解过程。土壤质地作为一个影响有机物料腐解的重要因子^[54],土壤的颗粒组成与有机碳固存的保护作用密切相关。黏粒含量越高,土壤的持水能力越强,有机物料腐解的残留率越高。土壤的颗粒组成中,黏粒可与有机碳紧密结合,导致在黏粒含量低的土壤中有有机物料的残留率明显低于黏粒含量高的土壤^[55]。Zhang 等^[56] 通过建立肥力梯度的耕地土壤的田间原位培养试验,利用¹³C 脉冲标记秸秆,发现有机物料的腐解速率受土壤自身肥力水平的影响显著,土壤中有有机物料的含碳残留率依次为高肥力

土壤>中肥力土壤>低肥力土壤。土壤生物同样也会显著影响有机物料的腐解过程,如大型土壤动物蚯蚓通过进食消解促进有机物料分解,经过消化道排泄后的蚓粪中包含大量的活性酶和微生物,可以使有机物料残体与其他小型生物及微生物(细菌、真菌等)接触更加均匀,加大有机物料的腐解面积,进而加快腐解进程^[57]。土壤微生物是地球化学循环的重要组成部分,也是有机物料腐解及转化为土壤有机质的关键驱动因素。承担分解者、植物共生体或病原体作用的微生物,在有机物料中有机碳转化成为土壤有机碳的过程中发挥着至关重要的作用,从而对周转过程中土壤有机碳的固持产生显著影响^[58-59]。

1.3.3 有机物料自身因素

有机物料的组分及质量(纤维素、木质素含量以及碳氮比)是除气候因素、土壤类型、农田管理措施等外界因素外的自身内在因素,也会直接影响有机物料腐解进程中的特征变化^[14,19]。纤维素、半纤维素、木质素、部分蛋白质及糖类是有机物料的主要组分,通过土壤酶和微生物的作用分解转化成为土壤中重要的功能组分——有机质。纤维素作为一种大分子的多糖化合物,是土壤碳库中的惰性有机碳组分,其周转时间较长且降解难度较大,能够较长时间存留在土壤中。又由于纤维素与土壤接触后结合不紧密,腐解缓慢,导致其腐解率和转化为土壤有机碳的效率均低,因此纤维素含量较高的有机物料还田的土壤中有有机碳积累较少^[60]。木质素是一种复杂的芳香性基质,已被公认为是有机物料组分中最难解聚的化合物^[61]。Carvalho 等^[62] 研究发现,在有机物料的化学组成中,木质素含量较低和具有较少芳香碳结构的有机物料还田腐解后的腐解率相对更高。有机物料的碳氮比是影响有机物料进入土壤后腐解过程以及养分释放的重要内在因素,可调控有机物料体内氮素的释放速率及过程^[63]。一般情况下,有机物料碳氮比为 25 时,最有利于微生物利用分解;碳氮比过高会出现微生物同化土壤氮素的情况,易导致作物早期的生长发育不良;而碳氮比过低,有机物料养分就会快速释放,造成无效损失。有机物料的碳氮比越大,有机物质较难分解,微生物利用困难,有机物料腐解缓慢。

2 有机物料还田对土壤养分库及土壤质量的影响

2.1 对土壤碳库的影响

土壤有机质的积累主要取决于输入土壤中的有机物质的数量及化学组成,土壤生物和微生物活性,

以及调节它们之间相互作用关系的环境因素^[64]。添加外源有机物料是更新土壤有机质的重要措施,也是维持和提升土壤有机质含量的重要手段,对地上作物所需养分供给和地下部土壤微生物及动物的活动具有重要意义。大量研究表明土壤有机质增加与有机物料投入量呈极显著正相关关系,并且无论是有机物料单独还田还是有机物料配施化肥还田都可显著提高土壤有机碳含量和土壤有机碳库储量^[65-66]。在此基础上,本文对比了相同种植制下同一块样地不同试验年限的单施化肥、化肥配施秸秆还田以及化肥配施有机肥还田的增碳率(图2),发现在正常施用化肥的情况下,不论是长期试验还是短期试验,有机物料的施入均可显著提升土壤有机碳含量($P<0.05$),并且施用畜禽粪肥等有机肥的处理土壤增碳效果最佳。

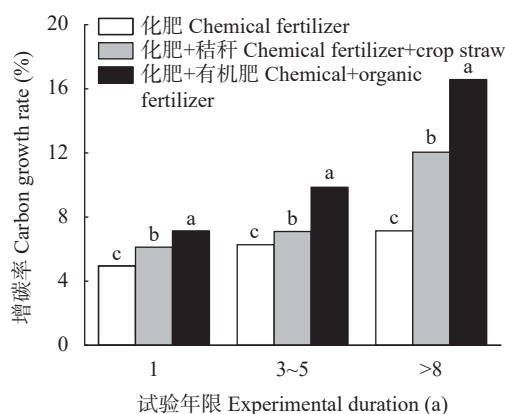


图2 不同施肥措施不同试验年限下的土壤增碳率^[6,67-74]
Fig. 2 Soil carbon growth rate under different fertilization regimes for different years^[6,67-74]

不同小写字母表示同一年份不同施肥处理间土壤增碳率差异显著 ($P<0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$) among different fertilization regimes in the same year.

随着土壤培肥理论的发展,人们开始认识到仅提高有机质含量是不够的,并不能满足对土壤培肥的目的和追求,更为重要的是提高土壤有机质的品质和质量,而有机质中活性组分的增加对提升土壤有机质质量至关重要。通常情况下,活性有机质指可以通过 $0.1\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 滤膜的一类含碳有机化合物,广义上是一切能够在水中溶解的有机化合物的总称^[75]。尽管它通常只占土壤有机质很少的一部分,不足总量的2%,但是土壤中活性有机质含量微小的变动便会引起土壤有机碳库的巨大变化,从而影响土壤碳库的稳定性^[76]。土壤有机碳的活性碳组分主要包括微生物量碳(MBC)、可溶性有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)和易氧化有机碳(EOC)等。以秸秆中总有有机碳转化过程为例,杨艳华等^[77]研究了施入的秸秆碳在土壤不同有机碳库中的转化过程,发现42%~79%

的秸秆碳以 CO_2 形式损失进入空气中,1.9%~13.9%可转化为土壤活性有机碳,其中绝大部分(1.9%~10.6%)进入土壤微生物量碳组分中,0.01%~3.3%通过淋溶等作用转化为土壤可溶性有机碳,另有约10%的秸秆碳可转化为土壤颗粒有机碳。国内外大量文献已报道施加外源有机物料后,土壤中的微生物量碳、可溶性有机碳和颗粒有机碳等活性有机碳组分含量均可显著提升^[65]。李新华等^[78]研究发现,作物秸秆、食用菌菌渣和动物粪肥处理均可使土壤微生物量碳和可溶性有机碳含量明显增加。不同有机物料对有机质活性组分的提升效果由高到低依次为:蚓粪、猪粪、生物黑炭和秸秆^[79]。研究表明,与单施化肥相比,有机物料与化肥配施可明显提高土壤碳库中活性有机碳组分。小麦秸秆和玉米秸秆等作物秸秆与化肥配施还田可促进土壤总有机碳和轻组有机碳积累,化肥与猪粪和牛粪等有机粪便配施还田后可增加土壤微生物量碳和水溶性有机碳含量^[6]。

2.2 对土壤腐殖质的影响

了解有机物料还田后土壤腐殖质组成的变化对农业生态系统实现循环利用与培肥土壤意义重大。土壤腐殖质指的是一类具有特殊的化学和生物性质、结构组成复杂的高分子有机化合物,是土壤有机质中稳定且最重要的组分,其含量在总土壤有机质中的占比达50%~75%^[79-80]。腐殖质的物质组成主要来源于微生物的合成^[22]。有机物料在腐殖化的作用下转化成为土壤腐殖质的过程是一个复杂的物质与能量转化循环的过程,有机物料残体在微生物的作用下一直不断地分解,同时也在微生物的作用下一直不断地合成新的有机质^[81]。

国内外研究者关于有机物料还田后对土壤腐殖质组成及化学结构变化的影响已有所关注。诸多研究已证实秸秆、畜禽粪便等有机物料还田后可以有效改善土壤腐殖质的光学性质,使其结构简单化、脂肪化及年轻化,有利于腐殖质活化和胡敏酸(humic acid, HA)积累^[82-84]。施入有机物料后可提高土壤腐殖酸及其各组分碳含量,胡敏酸分子结构变得更为复杂,而富里酸(fulvic acids, FA)结构变得相对简单,胡敏酸碳含量与富里酸碳含量的比值($C_{\text{HA}}/C_{\text{FA}}$)升高,胡敏酸碱溶液在465 nm和665 nm处吸光度的比值(E_4/E_6)下降,可实现加速富里酸向胡敏酸的转化^[85]。李春阳等^[86]以土壤腐殖质组成为评价依据,采用室内培养法发现施用腐熟羊粪、黄腐酸以及不同形式的玉米秸秆均可使白浆土的水溶性物质碳含量(C_{WSS})和胡敏素碳含量(C_{Hu})有所消耗,并且推动

富里酸向胡敏酸转化,使胡敏酸得以积累,提高胡敏酸分子缩合度,从而使土壤腐殖质质量和品质得以提升。

胡敏酸分子中含有大量甲氧基、羧基、氨基、羟基等有机官能团,具有疏松多孔的网状结构,是土壤腐殖质中发挥重要作用的组分。同时,胡敏酸在改善土壤团聚结构,维持和提升土壤肥力等方面的作用显著^[87]。因此胡敏酸的化学结构性质一直受到国内外学者的广泛关注。不同来源的有机物料对土壤腐殖质中胡敏酸的化学结构影响也有所差异。有研究表明,氨基化合物在饼肥处理的胡敏酸中含量最高,羟基、脂肪烃在绿肥处理中占比最大,醇、酚在作物秸秆处理中含量最大^[3,88]。Zhang 等^[89]研究发现,玉米秸秆长期还田可增加土壤胡敏酸中烷氧碳和芳香碳比例,而降低烷基碳和羧基碳比例。但也有研究表明,有机物料还田后尽管可使总土壤有机碳含量增加,但是腐殖质的官能团结构未发生显著变化^[90]。

2.3 对土壤质量及土壤养分的影响

国内外大量研究表明有机物料以多种方式还田皆可直接或间接影响土壤质量,进而提升作物产量。土壤质量是从物理性状、化学性状和生物及微生物学性状对土壤肥力的综合评价,对实现农田作物稳产高产至关重要。有机质是改善土壤质量和促进土壤养分循环的核心与物质基础,在改善土壤结构和提升土壤供肥性、缓冲性以及保墒性等方面发挥重要作用^[91]。通过长期定位试验发现,有机物料还田后可使土壤有机碳、微生物量碳和总氮含量显著增加^[92-93]。石纹碇等^[94]研究表明有机物料还田后不仅可以增加土壤有机碳水平,还可以快速提升土壤速效养分,土壤有效磷、碱解氮和速效钾含量均随有机肥添加比例的增加而显著提升。同时,土壤中增施有机物料可在一定程度上改善土壤结构特性,提高土壤含水量及饱和含水量、降低土壤容重,最终使土壤的适耕性增强^[76]。李娜等^[95]基于 2 年的田间试验发现,深翻配合牛粪或玉米秸秆还田可快速优化土壤的固、液、气三相比,对土壤物理结构有明显改善作用,相比秸秆还田,短期添加牛粪处理的土壤中 $>0.05\text{ mm}$ 团聚体更多,土壤结构更好,更利于作物增产。Ding 等^[96]连续 10 年施用有机肥的田间长期定位试验证实,在一定施用量范围内,土壤有机碳储量与有机肥的施用量呈正相关,并且化肥与不同量有机肥配施还田均可显著提升玉米和大豆的产量($P<0.05$)。有机物料直接还田或配施微生物菌剂还

田均能改良土壤理化性质,有效降低土壤中可溶性盐含量,缓解改善设施土壤次生盐渍化状况^[97];同时,有机物料中含有一定量的碱性物质,施入后能够中和土壤中的酸,可有效控制农田土壤酸化^[98]。

有机物料还田在改善土壤养分性状和物理性质的同时,也会在一定程度上影响土壤动物群落和微生物群落。土壤动物的生长代谢以及动物之间的捕食网络是农业生态系统循环中关键的环节^[99]。土壤线虫是土壤微生态环境中最丰富且敏感的生物类群之一,可作为生物监测土壤质量的潜在指标^[100]。饶继翔等^[101]通过研究不同秸秆还田方式对农田土壤线虫群落特征的影响,证实有机物料还田可促进土壤养分积累,还可使土壤线虫数量增加,提高线虫群落多样性,从而增强土壤的抗干扰能力。蚯蚓作为“生态系统工程师”是一种最具代表性的大型土壤动物,其个体的行为活动以及代谢特征可作为一种简单的土壤健康评价指标^[102]。研究表明有机物料还田后,可使单位体积土壤中蚯蚓的数量和种群数量增加^[103]。在土壤中,蚯蚓的摄食、挖掘等活动一方面可以通过增强土壤微生物的呼吸作用加快 CO_2 的排放;另一方面还可以促进和刺激输入土壤中的有机物料养分释放和腐殖化过程,同时还可促进土壤大团聚体的形成和提升微团聚体中的碳稳定性,从而增强土壤肥力^[104]。

3 影响有机物料腐解的物理化学和生物机制

有机物料施入土壤后,经过物理、化学和生物的共同作用转化为土壤有机质是一个十分复杂的过程^[105](图 3)。当有机物料进入土壤后,一部分碳通过矿化作用转化成 CO_2 直接释放到大气中,另一部碳通过土壤生物参与的腐殖化作用以及土壤胶体的蓄留固定作用形成土壤有机质^[52]。

3.1 物理化学调控机制

土壤团聚体是土壤固碳的核心,也是有机物料还田腐解过程中有机物质转化为土壤有机质后储存与稳定的重要场所。土壤团聚体对新形成的有机质的分级隔离保护作用以及小粒径团聚体胶结成大团聚体的物理保护作用是有有机物料腐解转化为土壤有机质过程中一项重要的作用机制。在农田土壤研究中发现,外源有机物料还田后,优先在大粒径组分的土壤有机质中积聚,随着腐解的进行,有机物料的腐解程度增加,逐渐转移到小粒径组分的土壤有机质中。土壤中游离态的颗粒有机质将有机物料和作物根系分泌物中有机酸配体与无机矿物形成的有机-无

机复合体胶结形成新的大团聚体^[106]。土壤团聚体是微生物的栖息地和保护土壤有机质不被微生物分解的场所, 不同种类的微生物在土壤结构的形成和稳定方面共同发挥重要的作用^[61]。颗粒有机质将大量脂肪族碳和多糖碳等植物来源的活性碳组分吸附后再次被土壤团聚体包裹, 从而使团聚体内部的孔隙度下降, 氧气含量减少, 土壤微生物活性降低, 进而抑制微生物对土壤有机碳的分解, 增加有机碳的固持^[82]。颗粒有机质中烷基碳、羰基碳组分又是促进 >2 mm 的团聚体形成过程中最为重要的有机碳组分^[107]。同时, 有机物料的输出还可以促进多糖类有

机碳组分在土壤黏粒中积累, 促进大团聚体形成。有机物料中的多糖类有机物质向小粒径的土壤团聚体转移过程中, 矿质结合态有机碳组分增加, 促进土壤中持久性有机碳的形成与稳定。腐解过程中, 易腐解的纤维素和半纤维素含量随着腐解时间增加而减少, 难分解的复杂化合物不断积累^[108]。输入土壤的有机物料中自身难降解的组分又通过一系列的生物化学过程形成结构和形态更为复杂的化学抗性化合物。腐殖质或木质素、多酚等具有芳香环结构和烷基结构的碳是在有机质矿化和腐殖化过程中形成的复杂复合物, 对土壤中微生物的降解和酶的分

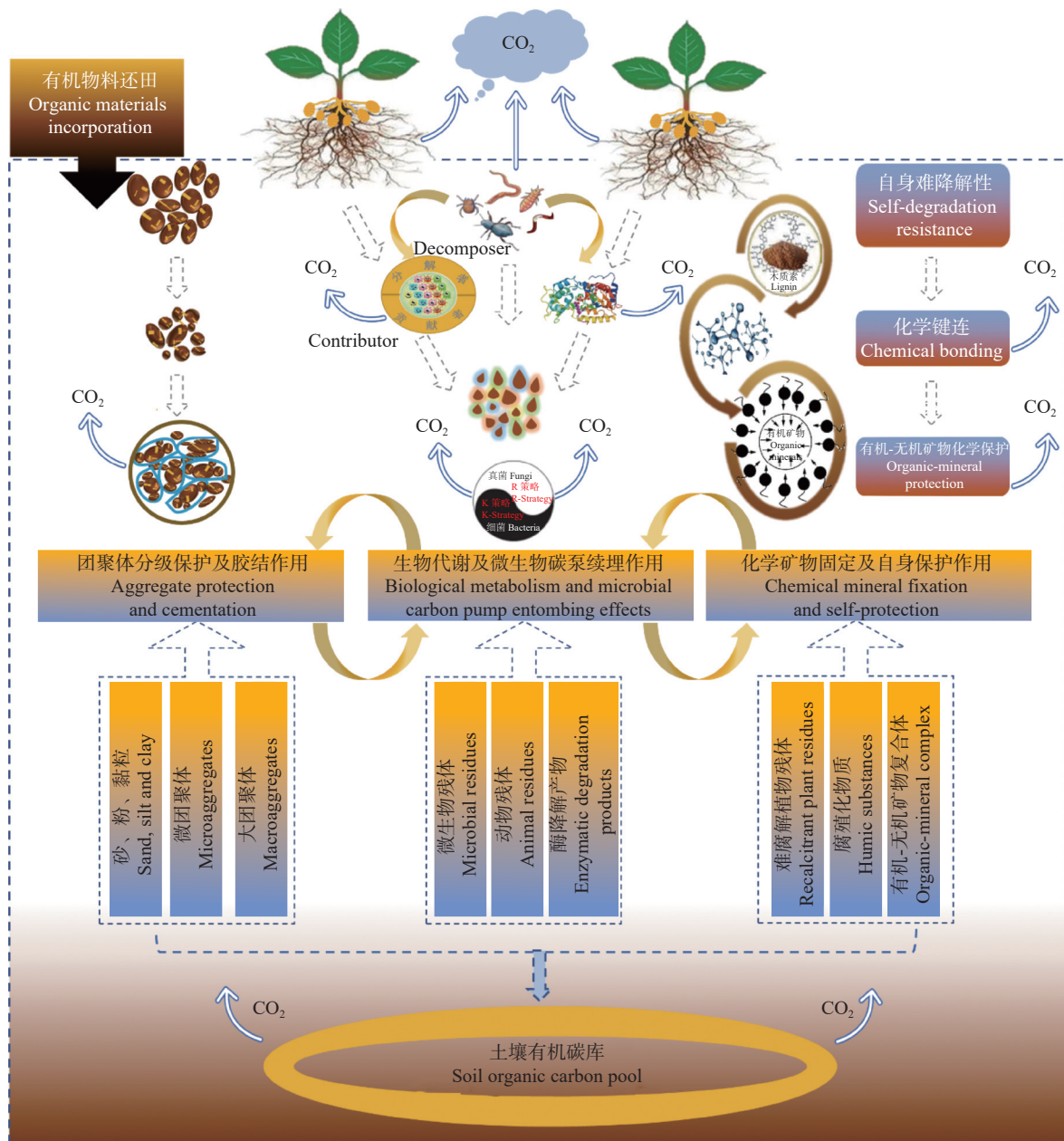


图 3 农田生态系统中有机物料还田腐解转化为土壤有机质的概念图

Fig. 3 Conceptual model of the decomposition and transformation processes of organic materials incorporated into soil in cropland ecosystem

解具有高度抗性^[106],可稳定地存在于土壤中,增加土壤有机碳的固存。

3.2 生物学调控机制

有机物料还田后,土壤中蚯蚓、螨类、线虫等活跃的土壤动物首先取食输入的有机物料,经过体内消化分解后排出体外^[109]。排出体外的有机物料残体经过动物的啃食粉碎和肠道微生物的分解后结构组织分散,比表面积增大;而且动物的排泄物中富含大量营养元素,粘附在排泄物上的物料残体碳氮比会有所降低,促进有机物料的进一步分解^[110]。此外,土壤动物的粪便具有围食膜成分和致密紧凑的外层,可以与土壤中的矿物颗粒发生团聚化作用,参与有机-无机矿物复合团粒的形成过程^[111]。不同大小的土壤动物在转化过程中对有机质形成与转化的调控途径也有所区别。大型土壤动物(体长>2 mm)和中型土壤动物(体长为0.1~2 mm)将输入土壤中的有机物料通过挖掘、搬运等活动快速破碎,促进微生物活性增强,扰动土壤颗粒结构分布,使土壤通气透水性提高,有利于施入的有机物质和微生物群落在土壤中均匀分布,从而促进有机物料腐解转化过程中的腐殖化作用;而小型土壤动物(体长<0.1 mm)主要通过调节真菌和细菌群落结构和数量,并通过与微生物群落的相互作用和动物体的排泄物影响土壤团聚化过程,进而调控有机物料在土壤中的腐解与转化为土壤有机质的动态平衡过程^[42]。

多数研究表明外源有机物料施入土壤后,一方面,它会引起微生物的强烈周转而触发正激发效应,有效促进供给土壤微生物的生长和代谢活动所需的养分含量增加,使微生物对土壤中原有机碳的分解能力增强^[112]。在腐解初期,有机物料中易被分解的一些化学结构和组成简单的碳源首先为土壤微生物的生长代谢提供初始能量,刺激微生物体对参与降解有机物料中较为稳定组分的胞外酶的分泌^[113],在此过程中,同时伴随着与有机物料的结构及组成相似的稳定性较高的土壤中原有的有机质被矿化而产生的激发效应,引发土壤中原有机碳的分解^[114]。另一方面,微生物在有机物料腐解过程中,特别是将有机物料中有机碳转化为土壤有机碳过程中发挥着重要作用。根据微生物对添加有机物料(底物)的适用性可分为r策略的微生物(如细菌)和K策略的微生物(如真菌)^[105]。在有机物料腐解的第一阶段,细菌(变形杆菌、放线菌和酸杆菌)为主导的微生物群落,主要介导糖类类和脂肪化合物等易分解的有机物质分解;而到了后期,则变为由真菌(子囊菌和担

子菌)为主导的微生物群落,主要降解木质素、纤维素等其他难分解的物质^[60]。现有研究还发现,异养固氮微生物和反硝化微生物也是可以同化有机物料中有机质的微生物类群,表明土壤中有些微生物除了在转化有机物料中有机质的过程中发挥作用外,同时还参与了有机物料中氮素向土壤中转化的过程,从而影响土壤氮素水平(以有效氮为主)的变化,而这种变化又将会进一步调控有机物料中有机质的转化^[10]。此外,微生物代谢的部分产物(如主要来源于真菌的黑色素类物质)属于难降解的有机化合物,还会在土壤中积累,转化为土壤中稳定碳库的一部分;而完成分解有机物料后的微生物死亡残体同样也会通过微生物的同化作用在土壤中持续积累,转化为一系列的微生物残留物类的有机物质并稳定在土壤中,转化为土壤碳库的重要组成部分,增加土壤有机碳的固持^[115]。

4 结语与展望

综上所述,有机物料还田是改善土壤结构,提高土壤质量,培肥地力的一项长期而有效的措施,也是增加农业废弃物利用率、实现农业生态系统良性循环和农业可持续发展的重要途径。目前已对有机物料还田腐解过程和土壤培肥效果展开了较为全面的研究,但还存在少许不足,建议今后在以下4个方面开展更加细致深入的研究:

1) 有机物料的腐解是一个长期过程,有机物料中的有机物质向土壤有机质的转化是一个漫长的转移转化过程,而目前现有的研究多数是短期的腐解试验,以作物的生长季有机物料还田腐解的研究偏多,然而在作物非生长季,如季节性冻土区,即使有机物料的质量变化微小,组分以及物理化学结构也会发生巨大变化,有机物料中有机物质向土壤中转化的过程仍在不断进行,因此要开展对有机物料还田腐解全过程的长期定位试验研究。

2) 有机物料的腐解过程受到地域气候因素和土壤类型的影响,因此有机物料还田腐解的措施方案要因地制宜,目前大多数研究多集中于单一田块尺度或不同有机物料腐解特征及其培肥效果,要开展跨区域尺度的多点有机物料还田腐解的联网试验研究,可为筛选和优化因地制宜、科学合理的有机物料还田培肥技术提供重要的数据参数和实践指导。

3) 目前对有机物料还田腐解特征特别是腐解产物化学结构的研究技术方法过于单一,要开展对有机物料腐解过程中的腐解产物的表观特征、物理结

构和化学结构的动态变化进行综合研究。结合扫描电镜技术、光谱学分析技术、热解技术以及色谱质谱等多种技术手段对有机物料的物理化学结构变化进行更加深入、全面、精准的表征。

4) 不同种类有机物料的腐解特性和腐解过程中各组动态变化不同, 有机物料又可分为活性有机物料和惰性有机物料, 活性有机物料腐解快, 而惰性有机物料的腐解缓慢。活性有机物料可促进惰性有机物料的分解, 两者按照一定的比例配合施用, 既可加速惰性有机物料的活化, 还可抑制活性有机物料的快速释放, 使其长期持续地培肥土壤。因此, 在今后的研究中要开展活性、惰性有机物料的最优配比的探索, 以更好地培肥土壤, 促进农业生态系统可持续发展。

参考文献 References

- [1] 季佳鹏, 赵欣宇, 吴景贵, 等. 有机肥替代20%化肥提高黑钙土养分有效性及玉米产量[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(3): 491-499
- [2] 郭远, 宋爽, 高琪, 等. 食用菌菌渣资源化利用进展[J]. *食用菌学报*, 2022, 29(2): 1-12
- [3] 薛伟, 张雪一, 李奇, 等. 黑木耳废弃菌糠的热解及动力学分析[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(6): 2730-2736
- [4] 闫湘, 金继运, 梁鸣早. 我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1067-1077
- [5] OLDFIELD E E, BRADFORD M A, WOOD S A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields[J]. *SOIL*, 2019, 5(1): 15-32
- [6] 梁尧, 韩晓增, 宋春, 等. 不同有机物料还田对东北黑土活性有机碳的影响[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(17): 3565-3574
- [7] 王峰, 王义祥, 翁伯琦, 等. 双胞蘑菇菌渣施用对龙眼园土壤呼吸及可溶性有机碳的影响[J]. *福建农业学报*, 2011, 26(2): 291-297
- [8] 盛明, 龙静泓, 雷琬莹, 等. 秸秆还田对黑土团聚体内有机碳红外光谱特征的影响[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(4): 355-366
- [9] ELLERBROCK R H, GERKE H H, DEUMLICH D. Soil organic matter composition along a slope in an erosion-affected arable landscape in North East Germany[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 209-218
- [10] HOU Y H, HE K Y, CHEN Y, et al. Changes of soil organic matter stability along altitudinal gradients in Tibetan alpine grassland[J]. *Plant and Soil*, 2021, 458(1/2): 21-40
- [11] 常汉达, 王晶, 张凤华. 基于傅里叶红外光谱弃耕地开垦前后土壤有机质结构变化分析[J]. *土壤通报*, 2019, 50(2): 333-340
- [12] 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
- [13] 彭义, 解宏图, 李军, 等. 免耕条件下不同秸秆覆盖量的土壤有机碳红外光谱特征[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(11): 2257-2264
- [14] 李昌明, 王晓玥, 孙波. 基于固态¹³C核磁共振波谱研究植物残体分解和转化机制的进展[J]. *土壤*, 2017, 49(4): 658-664
- [15] LI N, LEI W Y, LONG J H, et al. Restoration of chemical structure of soil organic matter under different agricultural practices from a severely degraded mollisol[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2021, 21(4): 3132-3145
- [16] LI N, LONG J H, HAN X Z, et al. Molecular characterization of soil organic carbon in water-stable aggregate fractions during the early pedogenesis from parent material of Mollisols[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 1869-1880

- [17] 李娜, 盛明, 尤孟阳, 等. 应用¹³C核磁共振技术研究土壤有机质化学结构进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(4): 796–812
LI N, SHENG M, YOU M Y, et al. Advancement in research on application of ¹³C NMR techniques to exploration of chemical structure of soil organic matter[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(4): 796–812
- [18] MATHERS N J, JALOTA R K, DALAL R C, et al. ¹³C-NMR analysis of decomposing litter and fine roots in the semi-arid Mulga Lands of southern Queensland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(5): 993–1006
- [19] WANG X Y, SUN B, MAO J D, et al. Structural convergence of maize and wheat straw during two-year decomposition under different climate conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(13): 7159–7165
- [20] 陶宝先, 张保华, 董杰, 等. 有机碳质量对黄河三角洲芦苇凋落物分解及其温度敏感性的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5564–5572
TAO B X, ZHANG B H, DONG J, et al. Effect of organic carbon quality on the litter decomposition and temperature sensitivity of *Phragmites australis* in the Yellow River Delta, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(15): 5564–5572
- [21] COTRUFO M F, SOONG J L, HORTON A J, et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(10): 776–779
- [22] 潘根兴, 丁元君, 陈硕桐, 等. 从土壤腐殖质分组到分子有机质组学认识土壤有机质本质[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(5): 451–470
PAN G X, DING Y J, CHEN S T, et al. Exploring the nature of soil organic matter from humic substances isolation to SOMics of molecular assemblage[J]. *Advances in Earth Science*, 2019, 34(5): 451–470
- [23] LEHMANN J, KLEBER M. The contentious nature of soil organic matter[J]. *Nature*, 2015, 528(7580): 60–68
- [24] 李艳, 魏丹, 王伟, 等. 秸秆-牛粪发酵过程中溶解性有机质的荧光光谱特征[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(9): 2846–2852
LI Y, WEI D, WANG W, et al. Fluorescence spectroscopy characteristics of dissolved organic matter analysis of straw-cow dung fermentation in different proportion[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(9): 2846–2852
- [25] DING Y, SHI Z Q, YE Q T, et al. Chemodiversity of soil dissolved organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(10): 6174–6184
- [26] 王齐磊, 江韬, 赵铮, 等. 三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(6): 2082–2092
WANG Q L, JIANG T, ZHAO Z, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in waters of typical agricultural watershed of Three Gorges Reservoir areas[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(6): 2082–2092
- [27] 曹佳锐, 龚可杨, 别宇静, 等. 水土保持林恢复土壤可溶性碳氮组分动态与三维荧光特征分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7679–7688
CAO J R, GONG K Y, BIE Y J, et al. Analysis of dynamics of soil dissolved carbon and nitrogen fractions and its three-dimensional fluorescence characteristics during restoration of soil and water conservation forests[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7679–7688
- [28] 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 等. 溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)[J]. *环境科学*, 2019, 40(4): 1751–1759
LI Y, WEI H J, WANG K, et al. Analysis of the relationship between dissolved organic matter (DOM) and watershed land-use based on three-dimensional fluorescence-parallel factor (EEM-PARAFAC) analysis[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1751–1759
- [29] 杨巍, 王东升, 刘满强, 等. 不同有机物料的蚯蚓堆肥及可溶性有机物的三维荧光光谱特征[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 3181–3188
YANG W, WANG D S, LIU M Q, et al. Vermicomposting of different organic materials and three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of their dissolved organic matter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(10): 3181–3188
- [30] 张丰松, 李艳霞, 杨明, 等. 畜禽粪便堆肥溶解态有机质三维荧光光谱特征及Cu络合[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 314–319
ZHANG F S, LI Y X, YANG M, et al. Change of three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopic characterization of manure dissolved organic matter after composting and influence on its complexation with Cu[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 314–319
- [31] 张海晶, 王少杰, 田春杰, 等. 玉米秸秆及其生物炭对东北黑土溶解有机质特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(2): 243–250
ZHANG H J, WANG S J, TIAN C J, et al. Effects of maize straw and its biochar on the dissolved organic matter characteristics of black soil in northeastern China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(2): 243–250
- [32] TVEIT A, SCHWACKE R, SVENNING M M, et al. Organic carbon transformations in high-Arctic peat soils: key functions and microorganisms[J]. *The ISME Journal*, 2013, 7(2): 299–311
- [33] HU J, WU J G, QU X J, et al. Effects of organic wastes on structural characterizations of humic acid in semiarid soil under plastic mulched drip irrigation[J]. *Chemosphere*, 2018, 200: 313–321
- [34] 王金洲, 卢昌艾, 张文菊, 等. 中国农田土壤中有有机物料腐解特征的整合分析[J]. *土壤学报*, 2016, 53(1): 16–27
WANG J Z, LU C A, ZHANG W J, et al. Decomposition of organic materials in cropland soils across China: a meta-analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(1): 16–27
- [35] 马想, 徐明岗, 赵惠丽, 等. 我国典型农田土壤中有有机物料腐解特征及驱动因子[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(9): 1564–1573
MA X, XU M G, ZHAO H L, et al. Decomposition characteristics and driving factors of organic materials in typical farmland soils in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(9): 1564–1573

- [36] PURAHONG W, KAPTURSKA D, PECYNA M J, et al. Effects of forest management practices in temperate beech forests on bacterial and fungal communities involved in leaf litter degradation[J]. *Microbial Ecology*, 2015, 69(4): 905–913
- [37] PRESTON C M, NAULT J R, TROFYMOW J A, et al. Chemical changes during 6 years of decomposition of 11 litters in some Canadian forest sites. part 1. elemental composition, tannins, phenolics, and proximate fractions[J]. *Ecosystems*, 2009, 12(7): 1053–1077
- [38] 曾莉, 张鑫, 张水清, 等. 不同施氮量下潮土中小麦秸秆腐解特性及其养分释放和结构变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(9): 1565–1577
- ZENG L, ZHANG X, ZHANG S Q, et al. Characteristics of decomposition, nutrient release and structure change of wheat straw in a fluvo-aquic soil under different nitrogen application rates[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(9): 1565–1577
- [39] KUBAR KA, HUANG L, XUE B, et al. Straw management stabilizes the chemical composition of soil organic carbon (SOC): the relationship with aggregate-associated C in a rice-rape cropping system[J]. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(2): 851–866
- [40] 代文才, 高明, 兰木羚, 等. 不同作物秸秆在旱地和水田中的腐解特性及养分释放规律[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(2): 188–199
- DAI W C, GAO M, LAN M L, et al. Nutrient release patterns and decomposition characteristics of different crop straws in drylands and paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 188–199
- [41] 匡恩俊, 迟凤琴, 宿庆瑞, 等. 三江平原地区不同有机物料腐解规律的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 736–741
- KUANG E J, CHI F Q, SU Q R, et al. Decomposition regularity of organic materials in Sanjiang Plain region[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 736–741
- [42] 杨茜雯, 吴景贵, 王雪峰, 等. 畜禽粪与玉米秸秆田间原位条带堆腐特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(6): 46–52
- YANG Q W, WU J G, WANG X F, et al. Study on *in situ* strip composting characteristics of livestock manure and corn straw in field[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(6): 46–52
- [43] 张红, 曹莹菲, 徐温新, 等. 植物秸秆腐解特性与微生物群落变化的响应[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6): 1482–1492
- ZHANG H, CAO Y F, XU W X, et al. Decomposition of plant straws and accompanying variation of microbial communities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(6): 1482–1492
- [44] 介晓磊, 寇太记, 刘芳, 等. 有机物料在砂土中不同时期的腐解状况研究[J]. *河南农业大学学报*, 2006, 40(3): 266–269
- JIE X L, KOU T J, LIU F, et al. The study on decomposition law of organic material during different time in sandy soil[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2006, 40(3): 266–269
- [45] CAI A D, LIANG G P, ZHANG X B, et al. Long-term straw decomposition in agro-ecosystems described by a unified three-exponentiation equation with thermal time[J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 636: 699–708
- [46] 高伟, 郑国砥, 高定, 等. 堆肥处理过程中猪粪有机物的动态变化特征[J]. *环境科学*, 2006, 27(5): 986–990
- GAO W, ZHENG G D, GAO D, et al. Transformation of organic matter during thermophilic composting of pig manure[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(5): 986–990
- [47] 李尚民, 范建华, 蒋一秀, 等. 不同微生物菌剂对鸡粪堆肥发酵效果的影响[J]. *中国家禽*, 2018, 40(22): 45–47
- LI S M, FAN J H, JIANG Y X, et al. Effect of different microbial fungi on fermentation of chicken manure compost[J]. *China Poultry*, 2018, 40(22): 45–47
- [48] 赵自超, 赵时锋, 张宏启, 等. 菌渣还田对设施瓜菜产量、品质和土壤肥力的影响[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(19): 112–118
- ZHAO Z C, ZHAO S F, ZHANG H Q, et al. Effect of mushroom residue on cucumber and melon yield and quality and soil fertility in greenhouse[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(19): 112–118
- [49] 胡留杰, 李燕, 田时炳, 等. 菌渣还田对菜地土壤理化性状、微生物及酶活性的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(1): 98–104
- HU L J, LI Y, TIAN S B, et al. Fungi residue returning: effects on soil physicochemical characters, microorganisms and enzyme activity in vegetable field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(1): 98–104
- [50] FRØSETH R B, BLEKEN M A. Effect of low temperature and soil type on the decomposition rate of soil organic carbon and clover leaves, and related priming effect[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80: 156–166
- [51] ZHANG D Q, HUI D F, LUO Y Q, et al. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 1(2): 85–93
- [52] PRESCOTT C E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils?[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 101(1/2/3): 133–149
- [53] 信彩云, 马惠, 王瑜, 等. 水旱轮作条件下稻麦秸秆腐解规律研究[J]. *山东农业科学*, 2019, 51(8): 75–78
- XIN C Y, MA H, WANG Y, et al. Study o decomposition law of rice and wheat straw in paddy-cereal rotation mode[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2019, 51(8): 75–78
- [54] XU X, SHI Z, LI D J, et al. Soil properties control decomposition of soil organic carbon: results from data-assimilation analysis[J]. *Geoderma*, 2016, 262: 235–242
- [55] THOMSEN I K, SCHJØNNING P, OLESEN J E, et al. C and N turnover in structurally intact soils of different texture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6): 765–774
- [56] ZHANG X F, XIN X L, YANG W L, et al. Short-term decomposition, turnover and retention of residue-derived carbon are influenced by the fertility level in a sandy loam soil[J]. *Geoderma*, 2019, 349: 68–78
- [57] BERG B, MCCLAUGHERTY C. Plant Litter: Decomposition,

- Humus Formation, Carbon Sequestration[M]. Cham: Springer, 2020
- [58] BARDGETT R D, VAN DER PUTTEN W H. Belowground biodiversity and ecosystem functioning[J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 505–511
- [59] TRIVEDI P, ANDERSON I C, SINGH B K. Microbial modulators of soil carbon storage: integrating genomic and metabolic knowledge for global prediction[J]. *Trends in Microbiology*, 2013, 21(12): 641–651
- [60] CONG P, WANG J, LI Y Y, et al. Changes in soil organic carbon and microbial community under varying straw incorporation strategies[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 204: 104735
- [61] HAN Y, YAO S H, JIANG H, et al. Effects of mixing maize straw with soil and placement depths on decomposition rates and products at two cold sites in the mollisol region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 197: 104519
- [62] CARVALHO A M, BUSTAMANTE M M C, ALCÂNTARA F A, et al. Characterization by solid-state CP/MAS ¹³C NMR spectroscopy of decomposing plant residues in conventional and no-tillage systems in Central Brazil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 102(1): 144–150
- [63] 李昌明, 王晓玥, 孙波. 不同气候和土壤条件下秸秆腐解过程中养分的释放特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1206–1217
- LI C M, WANG X Y, SUN B. Characteristics of nutrient release and its affecting factors during plant residue decomposition under different climate and soil conditions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(5): 1206–1217
- [64] DEISS L, SALL A, DEMYAN M S, et al. Does crop rotation affect soil organic matter stratification in tillage systems?[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 209: 104932
- [65] GOUGOULIAS C, CLARK J M, SHAW L J. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(12): 2362–2371
- [66] 邢鹏飞, 高圣超, 马鸣超, 等. 有机肥替代部分无机肥对华北农田土壤理化特性、酶活性及作物产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(3): 98–104
- XING P F, GAO S C, MA M C, et al. Impact of organic manure supplement chemical fertilizer partially on soil nutrition, enzyme activity and crop yield in the North China Plain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(3): 98–104
- [67] 乔云发, 韩晓增, 韩秉进, 等. 长期施用化肥对农田黑土有机碳和氮消长规律的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2007, 4: 30–33
- QIAO Y F, HAN X Z, HAN B J, et al. Soil organic carbon and nitrogen of black farmland growth and decline under a long-term experiment chemical fertilizer applications[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007, 4: 30–33
- [68] SONG C, WANG E L, HAN X Z, et al. Crop production, soil carbon and nutrient balances as affected by fertilisation in a Mollisol agroecosystem[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, 89(3): 363–374
- [69] 张迪, 韩晓增, 侯雪莹. 长期不同施肥管理对黑土活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 654–658
- ZHANG D, HAN X Z, HOU X Y. The effects of long-term fertilization on the labile organic carbon and carbon management index in black soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 654–658
- [70] 徐金忠, 高德武, 许靖华, 等. 不同施肥处理对黑土碳素及活性有机质的影响[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(15): 130–133
- XU J Z, GAO D W, XU J H, et al. Effect of different fertilizations on carbon and labile organic matter in black soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(15): 130–133
- [71] YOU M Y, LI N, ZOU W X, et al. Increase in soil organic carbon in a Mollisol following simulated initial development from parent material[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(1): 39–47
- [72] DING X L, YUAN Y R, LIANG Y, et al. Impact of long-term application of manure, crop residue, and mineral fertilizer on organic carbon pools and crop yields in a Mollisol[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(5): 854–859
- [73] DING X L, HAN X Z, ZHANG X D. Long-term impacts of manure, straw, and fertilizer on amino sugars in a silty clay loam soil under temperate conditions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(7): 949–954
- [74] LI L J, HAN X Z. Changes of soil properties and carbon fractions after long-term application of organic amendments in Mollisols[J]. *Catena*, 2016, 143: 140–144
- [75] 何伟, 白泽琳, 李一龙, 等. 溶解性有机质特性分析与来源解析的研究进展[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 359–372
- HE W, BAI Z L, LI Y L, et al. Advances in the characteristics analysis and source identification of the dissolved organic matter[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 359–372
- [76] 李玉梅, 李建兵, 胡颖慧, 等. 有机物料对马铃薯生长与土壤物理特性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 104–108
- LI Y M, LI J B, HU Y H, et al. Effects of organic materials on potato growth and soil physical properties[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4): 104–108
- [77] 杨艳华, 苏瑶, 何振超, 等. 还田秸秆碳在土壤中的转化分配及对土壤有机碳库影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 668–676
- YANG Y H, SU Y, HE Z C, et al. Transformation and distribution of straw-derived carbon in soil and the effects on soil organic carbon pool: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 668–676
- [78] 李新华, 郭洪海, 朱振林, 等. 不同秸秆还田模式对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 130–135
- LI X H, GUO H H, ZHU Z L, et al. Effects of different straw return modes on contents of soil organic carbon and fractions of soil active carbon[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 130–135

- [79] 康国栋, 魏家星, 邬梦成, 等. 有机物料施用对旱地红壤作物产量和有机质活性组分的影响[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1084-1091
KANG G D, WEI J X, WU M C, et al. Effects of organic material application on crop yield and active organic components in upland red soil[J]. *Soils*, 2017, 49(6): 1084-1091
- [80] DIDONATO N, CHEN H M, WAGGONER D, et al. Potential origin and formation for molecular components of humic acids in soils[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 178: 210-222
- [81] KLEBER M, SOLLINS P, SUTTON R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(1): 9-24
- [82] 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
- [83] 褚慧, 宗良纲, 汪张懿, 等. 不同种植模式下菜地土壤腐殖质组分特性的动态变化[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 931-939
CHU H, ZONG L G, WANG Z Y, et al. Dynamic changes in humus composition in vegetable soils different in cultivation mode[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 931-939
- [84] 吴景贵, 任军, 赵欣宇, 等. 不同培肥方式黑土腐殖质形态特征研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(4): 709-717
WU J G, REN J, ZHAO X Y, et al. Morphology of humus in black soil as affected by fertilization method[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 709-717
- [85] 王维, 吴景贵, 李蕴慧, 等. 有机物料对不同作物根系土壤腐殖质组成和结构的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2): 215-220
WANG W, WU J G, LI Y H, et al. Effects of organic materials on the composition and structure of humic substance in the rhizosphere soil of different crops[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 215-220
- [86] 李春阳, 王海江, 蒋秀芝. 不同种类有机物料等碳量输入对白浆土腐殖质组成的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 19-25
LI C Y, WANG H J, JIANG X Z. Effect of different types of organic materials with equivalent C content on humus composition of albic soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4): 19-25
- [87] 孟凡荣, 窦森, 尹显宝, 等. 施用玉米秸秆生物质炭对黑土腐殖质组成和胡敏酸结构特征的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(1): 122-128
MENG F R, DOU S, YIN X B, et al. Effects of maize stalk biochar on humus composition and humic acid structure in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 122-128
- [88] 郑延云, 张佳宝, 谭钧, 等. 不同来源腐殖质的化学组成与结构特征研究[J]. *土壤学报*, 2019, 56(2): 386-397
ZHENG Y Y, ZHANG J B, TAN J, et al. Chemical composition and structure of humus relative to sources[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(2): 386-397
- [89] ZHANG J J, HU F, LI H X, et al. Effects of earthworm activity on humus composition and humic acid characteristics of soil in a maize residue amended rice-wheat rotation agroecosystem[J]. *Applied Soil Ecology*, 2011, 51: 1-8
- [90] XU J S, ZHAO B Z, CHU W Y, et al. Chemical nature of humic substances in two typical Chinese soils (upland vs paddy soil): a comparative advanced solid state NMR study[J]. *The Science of the Total Environment*, 2017, 576: 444-452
- [91] MANDAL A, PATRA A K, SINGH D, et al. Effect of long-term application of manure and fertilizer on biological and biochemical activities in soil during crop development stages[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(18): 3585-3592
- [92] 高菊生, 黄晶, 杨志长, 等. 绿肥和稻草联合还田提高土壤有机质含量并稳定氮素供应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 472-480
GAO J S, HUANG J, YANG Z C, et al. Improving organic matter content and nitrogen supply stability of double cropping rice field through co-incorporation of green manure and rice straw[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3): 472-480
- [93] ZHANG W J, XU M G, WANG B R, et al. Soil organic carbon, total nitrogen and grain yields under long-term fertilizations in the upland red soil of Southern China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, 84(1): 59-69
- [94] 石纹璋, 刘世亮, 赵颖, 等. 猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(5): 431-438
SHI W X, LIU S L, ZHAO Y, et al. Effects of pig manure organic fertilizer application on available nutrient content and soil aggregate distribution in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 431-438
- [95] 李娜, 龙静泓, 韩晓增, 等. 短期翻耕和有机物还田对东北暗棕壤物理性质和玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(12): 99-107
LI N, LONG J H, HAN X Z, et al. Effects of short-term plowing and organic amendments on soil physical properties and maize yield in dark brown soil in Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(12): 99-107
- [96] DING X L, HAN X Z, LIANG Y, et al. Changes in soil organic carbon pools after 10 years of continuous manuring combined with chemical fertilizer in a Mollisol in China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2012, 122: 36-41
- [97] 钱晓雍, 沈根祥, 郭春霞, 等. 不同废弃物对设施菜地次生盐渍化土壤的修复效果[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(4): 737-743
QIAN X Y, SHEN G X, GUO C X, et al. Reclamation of secondary salinized soils in protected vegetable fields using different wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 737-743
- [98] 简红忠, 杨小敏, 王琳, 等. 不同有机物对陕南酸化土壤改良效果研究[J]. *天津农业科学*, 2021, 27(9): 65-68
JIAN H Z, YANG X M, WANG L, et al. Study on the

- improvement effect of different organic matter on acidified soil in southern Shaanxi[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2021, 27(9): 65–68
- [99] 卢焱焱, 王明伟, 陈小云, 等. 生物质炭与氮肥配施对红壤线虫群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(1): 263–274
LU Y Y, WANG M W, CHEN X Y, et al. Influences of biochar and nitrogen fertilizer on soil nematode assemblage of upland red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(1): 263–274
- [100] BONGERS T, BONGERS M. Functional diversity of nematodes[J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3): 239–251
- [101] 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
RAO J X, CHEN H, WU X G, et al. Effects of different straw returning methods on soil nematode community characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2473–2480
- [102] 梁文举, 董元华, 李英滨, 等. 土壤健康的生物学表征与调控[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 719–728
LIANG W J, DONG Y H, LI Y B, et al. Biological characterization and regulation of soil health[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 719–728
- [103] 乔玉辉, 曹志平, 王宝清, 等. 不同培肥措施对低肥力土壤生态系统蚯蚓种群数量的影响[J]. *生态学报*, 2004, 24(4): 700–705
QIAO Y H, CAO Z P, WANG B Q, et al. Impact of soil fertility maintaining practice on earthworm population in low production agro-ecosystem in North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 700–705
- [104] LUBBERS I M, PULLEMAN M M, VAN GROENIGEN J W. Can earthworms simultaneously enhance decomposition and stabilization of plant residue carbon?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105: 12–24
- [105] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 等. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 528–540
WANG J K, XU Y D, DING F, et al. Process of plant residue transforming into soil organic matter and mechanism of its stabilization: a review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3): 528–540
- [106] 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, 6: 2642–2650
LIU M Q, HU F, CHEN X Y. A review on mechanisms of soil organic carbon stabilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 6: 2642–2650
- [107] WEN Y J, WEN J, WANG Q, et al. Organic carbon preservation promoted by aromatic compound-iron complexes through manure fertilization in red soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(1): 295–306
- [108] 王晓玥, 蒋璐霏, 隋跃宇, 等. 田间条件下小麦和玉米秸秆腐解过程中微生物群落的变化——BIOLOG分析[J]. *土壤学报*, 2012, 49(5): 1003–1011
WANG X Y, JIANG Y J, SUI Y Y, et al. Changes of microbial communities during decomposition of wheat and maize straw: analysis by BIOLOG[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 1003–1011
- [109] UROZ S, BUEE M, DEVEAU A, et al. Ecology of the forest microbiome: Highlights of temperate and boreal ecosystems[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 103: 471–488
- [110] KAMPICHLER C, BRUCKNER A. The role of microarthropods in terrestrial decomposition: a meta-analysis of 40 years of litterbag studies[J]. *Biological Reviews*, 2009, 84(3): 375–389
- [111] 朱永恒, 白钰鹏. 土壤腐殖质组型: 土壤生物学和生态学研究的视角[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1486–1495
ZHU Y H, BAI Y P. Humus forms: a new perspective on soil biology and ecology research[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(6): 1486–1495
- [112] KUZYAKOV Y, FRIEDEL J K, STAHR K. Review of mechanisms and quantification of priming effects[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11/12): 1485–1498
- [113] BLAGODATSKAYA E, KUZYAKOV Y. Mechanisms of real and apparent priming effects and their dependence on soil microbial biomass and community structure: Critical review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, 45(2): 115–131
- [114] FANG Y Y, NAZARIE L, SINGH B K, et al. Microbial mechanisms of carbon priming effects revealed during the interaction of crop residue and nutrient inputs in contrasting soils[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(7): 775–779
- [115] 梁超, 朱雪峰. 土壤微生物碳泵储碳机制概论[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(5): 680–695
LIANG C, ZHU X F. An overview of the carbon storage mechanism of soil microbial carbon pump[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(5): 680–695