

马 南,陈智文,张 清. 不同类型秸秆还田对土壤有机碳及酶活性的影响综述[J]. 江苏农业科学,2021,49(3):53-57.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.03.008

不同类型秸秆还田对土壤有机碳及酶活性的影响综述

马 南^{1,2}, 陈智文¹, 张 清¹

(1. 吉林师范大学生态环境研究所,吉林四平 136000; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院,辽宁沈阳 110866)

摘要:土壤有机质的数量和质量关系着土壤肥力和粮食安全,有效提高土壤有机碳含量和稳定性已成为保证农业可持续发展的重要途径。植物残体经分解转化后成为土壤有机碳的重要组成部分,其中含有丰富的养分,还田腐解后可改善土壤结构、培肥地力、提高土壤有机碳总量;土壤中的微生物可利用秸秆还田提供的碳源,激发微生物活性,影响微生物分泌的土壤酶。由于还田秸秆的类型、还田量及其分解环境因素的不同,作物秸秆对土壤有机碳及土壤酶活性的影响存在差异。对此进行深入分析,可为不同环境下不同作物秸秆科学还田提供借鉴。

关键词:秸秆还田;有机碳;土壤酶活性;活性有机碳;土壤结构

中图分类号: S154.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2021)03-0053-05

我国作为农业生产大国,长期以来的农业生产方式及化学肥料的过量施用使土壤功能退化,污染加剧。因此如何有效提高土壤质量、治理土壤污染、保护土壤健康,已经成为当今社会普遍关注和急需解决的问题。我国每年粮食与油料产量巨大,相应的作物秸秆资源也非常丰富,2016 年秸秆理论产量 9.84 亿 t,居世界首位^[1]。作物秸秆中含有植物生长所必需的养分,是重要的生物质资源^[2-3],还田后在改善土壤结构、促进土壤团聚体的形成、提高土壤肥力等方面也发挥着重要作用。秸秆分解主要是通过土壤微生物来完成的,秸秆还田后可激发微生物活性及微生物量,通过不断对秸秆进行分解和转化,促进秸秆光合碳向土壤碳的转化,进而提高土壤质量^[4]。秸秆可就地直接还田,实现对农业废弃物进行科学高效资源化利用,减少环境污染和资源浪费,其优越性是化学肥料不可替代的,这对发展绿色农业、改善土壤环境质量具有重要意义。

1 不同类型秸秆还田对土壤有机碳的影响

1.1 不同类型秸秆还田对土壤有机碳的影响

土壤有机碳库作为土壤碳库的主要组成部分,其含量的变化可直接影响农田土壤物理、化学与生

物学过程^[5]。研究发现,外源秸秆碳的加入有效提高了土壤有机碳含量、碳矿化速率和累计矿化量,提升了土壤地力^[6]。Powlson 等通过模拟试验发现,当试验进行 100 年后,添加秸秆处理的土壤有机碳含量较秸秆不还田处理增加了 20.4 t/hm²^[7]。由于不同外源有机物质的自身特性,如碳氮比(C/N)、全磷含量、全钾含量等存在一定差异,因此,不同植物残体的输入使得土壤有机碳含量也随之不同。

不同时空尺度的试验结果表明,添加秸秆后,秸秆 C/N 与有机碳矿化累积量之间呈负相关^[8-9],并且随着秸秆 C/N 的升高而降低,这主要是由于当 C/N 约为 25 时,最适于土壤微生物利用氮、磷等营养元素进行自身的生长繁殖^[10-11],但由于秸秆之间 C/N 的差异,从而导致矿化累积量也随之不同。张继旭等利用室内培养试验,研究水稻秸秆、水稻秸秆生物炭、玉米秸秆、烟草秸秆与黄棕壤烟田土壤混匀后,比较各处理之间的土壤有机碳矿化累积量,结果发现玉米秸秆的土壤有机碳矿化累积量最高,其次是水稻秸秆和烟草秸秆,最低的是水稻秸秆生物炭,主要是由于水稻和玉米秸秆相较于其他秸秆来说,易分解组分比例较高,因此有机碳矿化累积量也相对较高,表明 C/N 是影响其累积量的因素之一^[12]。而陈丽娟等通过室内培养试验,以覆盖和混匀 2 种添加方式比较油菜、烟草和水稻秸秆在棕壤烟田土壤中有有机碳的矿化强度,发现油菜秸秆的矿化强度最大,其次是烟草秸秆,最后是水稻秸秆,可能是由于不同类型秸秆的易分解组分、木质素含量和 C/N 之间存在差异造成的^[13],所得结论

收稿日期:2020-04-29

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD300604)。

作者简介:马 南(1992—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士研究生,主要从事土壤肥力研究。E-mail:mnjlsd@126.com。

通信作者:陈智文,教授,研究方向为土壤生态与新型肥料。

E-mail:sdczw4489@163.com。

与张继旭等的研究结果^[12]类似。代文才等通过比较小麦、玉米、水稻、油菜和蚕豆秸秆还田后秸秆腐解率发现,油菜秸秆的累积腐解率最大,这进一步说明相较于高 C/N 的作物秸秆来说,低 C/N 的作物秸秆矿化累积量和腐解率均较高,对土壤有机碳的贡献更大,与此同时,研究还发现 2 种处理方式下,土壤有机碳矿化强度不同,表现为表层覆盖处理大于混匀处理,可能是由于培养试验的水分补给主要集中于表层土壤,频繁的干湿交替环境和良好的通气状况,有利于秸秆的矿化和分解,因此在秸秆矿化过程中除了秸秆本身的 C/N 和物质组分的差异外,水分、通气状况也是重要的影响因素^[14]。还有研究表明,在秸秆分解过程中,对土壤微生物种群具有选择性差异^[15-16]。

研究表明,作物秸秆的分解转化总体上呈现先快后慢的趋势^[17-18]。在添加玉米秸秆 12 ~ 14 d 后,秸秆碳的分解转化率和 CO₂ 的累积释放碳量达到最高值,之后逐渐降低;小麦秸秆则在施入后的 14 ~ 21 d 快速分解转化,50% 以上的秸秆碳以 CO₂ 的形式损失掉^[19];与玉米和小麦秸秆分解环境不同,淹水环境下分解的水稻秸秆,其快速分解期略有延迟,但其分解转化率更高^[20]。说明虽然作物秸秆的分解转化趋势在总体上相似,但由于作物秸秆的种类及分解转化的外部环境不同,其分解速率也存在差异。

综上所述,植物残体的输入引起土壤有机碳的不断变化,外源碳的输入不仅可以改善土壤质量,而且有助于土壤有机碳和养分物质的积累^[21-22]。油菜秸秆比其他秸秆 C/N 低,易分解组分高,其矿化强度和腐解率都明显高于其他秸秆,说明不同类型的作物秸秆,其 C/N 和易分解组分不同,从而导致秸秆的矿化强度和腐解率有差异;对于水稻秸秆来说,虽然其 C/N 较高,但如果处于淹水条件下,其分解转化率则显著高于其他秸秆,这说明还田方式、田间管理措施和气候等外部环境是影响秸秆分解转化的重要因素。

1.2 不同类型秸秆还田对土壤活性有机碳的影响

土壤活性有机碳占土壤总有机碳(SOC)的 1% ~ 5%^[23],其周转时间短,周转率大,对加入的外源有机碳反应十分敏感,可直接参与土壤中一系列的分解转化过程^[24]。研究显示,土壤活性有机碳组分[微生物生物量碳(SMBC)、易氧化有机碳(LDC)、可溶性有机碳(DOC)、轻组有机碳(LFC)]对外源

碳输入的响应比较敏感,但不同组分之间具有一定的差异。李增强等在研究紫云英秸秆配施化肥还田试验时发现,当还田量为 45 t/hm² 的紫云英配施不同比例化学肥料时,不同处理间土壤活性有机碳含量差异显著,表现为随着配施化学肥料比例的增加而降低^[25],这与常单娜得出的随着绿肥 C/N 的降低,土壤活性有机碳的含量明显提高的结论^[26]不一致,原因可能是由于化肥用量的增加使得紫云英的 C/N 降低,造成土壤养分有效性增加,并且土壤活性有机碳作为一种重要的碳源^[27],微生物利用后可将其转化为 CO₂ 释放到空气中。说明秸秆配施化肥还田除了受秸秆本身 C/N 的影响外,化肥施入量也是重要的影响因素。

东北黑土作为我国最肥沃和高生产力的土壤,同样也面临着土壤有机质含量下降的问题,玉米和大豆是东北地区的主要农作物,每年秸秆产量丰富,其秸秆中含有的营养元素,在腐解后不仅可以转化为土壤有机碳长期固存在土壤中,还可在后续作物需要时提供部分养分。有研究显示,玉米秸秆添加量与可溶性有机碳、易氧化有机碳、微生物量碳和颗粒有机碳的含量呈正相关关系,其中土壤 DOC 的含量在玉米秸秆半量和全量还田处理中显著提高^[28]。马昱萱等通过利用大豆秸秆进行培养发现,大豆秸秆配施红糖和氮肥处理下,土壤微生物量碳含量明显提高^[29],这与李增强等的研究结果^[25]相似,说明秸秆还田配施氮肥是提高土壤活性有机碳组分含量的重要措施。

由于土壤活性有机碳具有不稳定、易分解、周转速度快的特点,因此外界环境的改变(管理措施和地表植被等)会对其产生剧烈影响^[30],土壤活性有机碳的含量与农田管理措施、土壤基本理化性质及有效养分等具有明显的相关性,因此对土壤质量变化的响应更为敏感,对评估土壤质量具有重要意义^[31]。土壤活性有机碳含量可在外源有机碳施入后的短时间内发生明显变化,另外在配施氮肥条件下,土壤活性有机碳含量可显著提高,虽然土壤活性有机碳含量在不同类型秸秆还田条件下有所差异,但整体变化趋势相似。

2 不同类型秸秆还田对土壤酶活性的影响

微生物作为土壤中最活跃的部分,始终不断地参与土壤生态系统循环过程^[32-33],微生物可通过分泌土壤酶来分解动植物残体。土壤酶是一种具有

特殊催化能力的生物催化剂,作用于土壤中的各种生物化学反应过程,因此土壤肥力状况以及土壤中发生的各种循环过程都可以通过土壤酶活性的高低来反映,因此土壤酶活性可以作为评价土壤质量的重要生物学指标^[34-35]。目前,通常使用脲酶、过氧化酶、磷酸酶和水解酶等土壤酶活性来反映土壤质量^[36]。秸秆的分解主要是通过微生物来完成的,秸秆施入后,带来了丰富的矿质养分和有机碳,促进微生物活动,刺激微生物生长繁殖^[37-38],为调控酶活性提供了重要的物质条件。不同酶的催化反应类型和功能存在差异,其中水解酶和氧化酶可促进有机物质分解,释放营养物质,对有机质的降解具有重要影响,同时影响土壤总有机碳的损耗和储存^[39],纤维素酶可分解植物残渣中难分解的纤维素和木质素^[40],锰过氧化物酶则能氧化分解芳香多聚体,以此来降解木质素^[41]。Zhao 等的研究结果表明,秸秆还田 4 年后土壤酶活性显著增加,尤其是与土壤总有机碳含量相关的土壤脲酶和蔗糖酶活性^[42],同时有研究发现,对于同一类土壤来说,脲酶活性对土壤有机质含量的响应较为敏感,两者之间呈明显的正相关关系^[43]。因此,土壤酶活性的变化,是研究土壤微生物群落对秸秆还田的响应以及土壤总有机碳变化的重要途径,对了解和分析土壤中发生的一系列分解和转化过程具有重要意义。

刘艳慧等在分析棉花秸秆还田后的土壤酶活性时发现,还田后 0~60 cm 土层的土壤脲酶活性均显著提高,与未还田处理相比,0~20、20~40、40~60 cm 土层土壤脲酶活性分别提高 4.27%、13.43%、24.03%,同时在一定时期内土壤蔗糖酶活性和过氧化氢酶活性都显著提高,但由于田间管理方式不同,棉花秸秆对土壤酶活性的影响存在一定的差异^[44]。张伟等研究发现,随着试验的进行土壤酶活性发生波动变化,呈降低—升高的趋势;蔗糖酶活性在连作 10 年后显著增强,土壤质量明显提高;过氧化氢酶活性与脲酶活性规律相似,与未连作相比,在连作 5、10、15、20 年后分别提高了 4.8%、7.9%、19.0%、29.6%,说明棉花秸秆在连作处理下提高了过氧化氢酶、蔗糖酶及脲酶活性,有助于保持和改良土壤生物学特性^[45]。

玉米秸秆还田结果与棉花秸秆相似。刘芳等研究发现,随着还田的玉米秸秆不断分解,土壤过氧化氢酶活性呈现出增加—降低—增加的趋势,但受还田量的影响不显著^[46]。陈强龙研究发现,过氧

化氢酶和多酚氧化酶活性变化不显著,但对过氧化酶与脱氢酶活性影响较大,均有显著提高^[47]。陈士更等的研究表明,与玉米秸秆不还田相比,配施腐熟剂有助于土壤中磷酸酶、脲酶活性的提高,同时增加了土壤有效养分含量,并且土壤微生物群落数量、丰富度和多样性也明显改善,为作物生长提供了良好的生存环境^[48]。刘龙等采用尼龙袋进行田间原位模拟试验,结果发现试验 1 年后,随着玉米秸秆还田量的增加,纤维素酶活性和过氧化氢酶活性也随之增加,但在还田第 2 年,土壤纤维素酶活性降低了 6.18%~31.72%,过氧化氢酶活性的变化趋势则与之相反^[49],这与刘艳慧等的研究结果^[44]相似,但增长幅度不同,与张伟等利用棉花秸秆在连作条件下的过氧化酶活性规律^[45]不同。

大豆秸秆还田后土壤酶活性的变化趋势与玉米和棉花秸秆相似。马昱萱等通过培养试验发现各处理的过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性在培养期间均呈现增加—降低的趋势,其中在培养 5 d 时各处理的蔗糖酶活性较 0 d 相比提高了 29.39%~71.84%,脲酶活性增加了 64.10%~102.22%,过氧化氢酶活性增加了 14.56%~114.92%,并且当施入红糖与氮肥时,这 3 种酶活性明显提高,其中脲酶活性的响应最为敏感^[29]。还有研究表明,氮素的施入量对土壤脲酶活性影响显著,虽然大豆秸秆可提供部分氮源,但含量较低,因此配施氮肥,保证充足的氮源供应,可有效避免秸秆分解过程中,发生氮素供应不足的现象,从而影响地上植物的正常生长需要^[50]。陶波等研究发现,相较于秸秆不还田来说,大豆秸秆还田显著提高了蔗糖酶、脱氢酶及脲酶活性,并且各种酶活性与还田量之间存在明显的正相关关系,其中在培养的 30 d 里,脲酶和蔗糖酶活性变化趋势相似,均是从增加到降低的过程,脱氢酶活性略有升高,但变化幅度小于脲酶活性^[51]。以上研究表明,大豆秸秆还田对土壤酶活性影响显著,呈现先升高后降低的趋势,不同土壤酶活性之间变化幅度不同,同时外源氮素的输入对土壤酶活性的增加具有促进作用。

战厚强通过试验发现,水稻秸秆还田后,土壤脲酶活性呈现波动变化,表现为先降低再升高,最后降低的趋势,与此同时还发现相较于秸秆不还田来说,秸秆还田并没有对脲酶活性产生显著影响^[52],这与他人的研究结果^[44,49]不一致,这进一步说明土壤脲酶活性对还田秸秆类型响应存在明显

的差异性。但在研究中同样发现,土壤蔗糖酶活性在秸秆还田后呈现出降低—上升的波动变化趋势,并且受秸秆还田量影响较大,这与棉花、玉米和大豆秸秆还田的研究结果相似,但是水稻秸秆还田后土壤脲酶活性的变化规律与其他 3 种秸秆还田有所不同,由于土壤脲酶活性对氮素水平响应比较敏感,因此水稻秸秆还田后土壤脲酶活性降低可能是由于秸秆 C/N 相对较高,分解时消耗过多的氮素造成的。

受还田秸秆类型的影响,土壤酶活性也存在一定差异。赵哲权等研究发现,小麦秸秆还田的脲酶活性高于玉米秸秆;对于土壤磷酸酶活性来说,玉米和小麦秸秆还田后分别提高了 34.1%、14.6%,说明对磷酸酶活性的促进作用玉米秸秆高于小麦秸秆;施入秸秆后,玉米和小麦过氧化氢酶活性则分别提高了 3%、9%,进一步说明由于秸秆的物质组分不同,土壤酶活性也随之不同^[53],这在其他有机物料还田中也有所体现。

通过以上分析发现,还田秸秆及还田量与土壤酶活性关系密切,呈显著正相关关系,但随着时间的延长,其变化趋势有所不同。通过比较分析棉花、玉米、水稻和大豆秸秆还田后土壤酶活性的差异,发现水稻秸秆还田没有显著增加土壤脲酶活性,变化趋势为先降低后升高,玉米、大豆和棉花秸秆与之相反,其他酶活性变化规律相似,但变化幅度不同,这可能是由于各类型秸秆的物质组分、还田量及外部环境因素的影响造成的。

3 结论

通过阐述棉花、玉米、水稻和大豆等秸秆还田后对土壤有机碳及土壤酶活性的影响。结果表明,秸秆还田对提高土壤有机碳含量具有促进作用,尤其是对外源有机碳反应敏感的活性有机碳;与此同时低 C/N 的作物秸秆(油菜秸秆)相较于高 C/N 的作物秸秆(水稻秸秆)来说,矿化累积量和腐解率均较高,对土壤有机碳的贡献更大,但易受分解环境的影响。各类型秸秆还田后土壤酶活性均有所增加,其中土壤蔗糖酶、过氧化物酶活性波动趋势相似,对于土壤脲酶活性来说,水稻秸秆与其他秸秆不同。目前,大多数研究仅针对 1 种类型秸秆,2 种或多种类型秸秆还田对比的研究较少,由于可用于还田的秸秆类型多样,秸秆本身的物质组成和属性也有所不同,所以秸秆还田后对土壤有机碳及土壤

酶活性的影响有所差异,同时秸秆还田量、还田方式、田间管理方式、土壤类型以及自然环境条件等都是影响土壤有机碳和土壤酶活性的重要因素。

参考文献:

- [1] 石祖梁,李 想,王久臣,等. 中国秸秆资源空间分布特征及利用模式[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(7):202–205.
- [2] 闫 超. 水稻秸秆还田腐解规律及土壤养分特性的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015:101–102.
- [3] 石祖梁,贾 涛,王亚静,等. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. 中国农业资源与区划,2017,38(9):32–37.
- [4] 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.
- [5] He Y T, Zhang W J, Xu M G, et al. Long-term combined chemical and manure fertilizations increase soil organic carbon and total nitrogen in aggregate fractions at three typical cropland soils in China [J]. The Science of the Total Environment, 2015, 532: 635–644.
- [6] 张 鹏,李 涵,贾志宽,等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. 农业环境科学学报,2011,30(12):2518–2525.
- [7] Powlson D S, Riche A B, Coleman K, et al. Carbon sequestration in European soils through straw incorporation: limitations and alternatives[J]. Waste Management, 2008, 28(4):741–746.
- [8] 张 薇,王子芳,王 辉,等. 土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2007,13(6):1013–1019.
- [9] 李雪峰,张 岩,牛丽君,等. 长白山白桦(*Betula platyphlla*)纯林和白桦山杨(*Populus davidiana*)混交林凋落物的分解[J]. 生态学报,2007,27(5):1782–1790.
- [10] 邓小华,罗 伟,周米良,等. 绿肥在湘西烟田中的腐解和养分释放动态[J]. 烟草科技,2015,48(6):13–18.
- [11] 柳 敏,张 璐,宇万太,等. 有机物料中有机碳和有机氮的分解进程及分解残留率[J]. 应用生态学报,2007,18(11):2503–2506.
- [12] 张继旭,张继光,申国明,等. 不同类型秸秆还田对烟田土壤碳氮矿化的影响[J]. 烟草科技,2016,49(3):10–16.
- [13] 陈丽鹃,周冀衡,柳 立,等. 不同秸秆对植烟土壤有机碳矿化和腐殖质组成的影响[J]. 中国烟草科学,2019,40(5):8–14.
- [14] 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.
- [15] An T T, Schaeffer S, Zhuang J, et al. Dynamics and distribution of ¹³C-labeled straw carbon by microorganisms as affected by soil fertility levels in the black soil region of Northeast China [J]. Biology and Fertility of Soils, 2015, 51(5):605–613.
- [16] Beyaert R, Paul V R. Estimation of decay constants for crop residues measured over 15 years in conventional and reduced tillage systems in a coarse-textured soil in southern Ontario [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2011, 91(6):785–995.

- [17] 暴春平, 郭岩彬, 孟凡乔, 等. ^{13}C 标记玉米秸秆分解过程中有机碳变化规律研究[J]. 中国农业大学资源与环境学院十五农业环境研究回顾与展望第四届全国农业资源科学学术讨论会论文集. 北京: 农业环境科学学报, 2011: 651–660.
- [18] Kristiansen S M, Brandt M, Hansen E M. ^{13}C signature of CO_2 evolved from incubated maize residues and maize derived sheep faces[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36: 99–105.
- [19] 关桂红. ^{14}C 标记冬小麦秸秆分解过程中碳周转规律的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006: 14–20.
- [20] 王志明, 朱培立, 黄东迈. ^{14}C 标记秸秆碳素在淹水土壤中的转化与平衡[J]. 江苏农业学报, 1998, 14(2): 112–117.
- [21] Gentile R, Vanlauwe B, Chivenge P, et al. Trade-offs between the short- and long-term effects of residue quality on soil C and N dynamics[J]. Plant and Soil, 2011, 338(1/2): 159–169.
- [22] 王虎, 王旭东, 田霄鸿. 秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(12): 3491–3498.
- [23] Jenkinson D S, Ladd J N. Microbial biomass in soil: measurement and turnover[J]. Soil Biochemistry, 1981, 5: 415–471.
- [24] Post W M, Kwon K C. Soil Carbon sequestration and land use change: processes and potential[J]. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317–327.
- [25] 李增强, 张贤, 王建红, 等. 化肥减施对紫云英还田土壤活性有机碳和碳转化酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(4): 525–534.
- [26] 常单娜. 我国主要绿肥种植体系中土壤可溶性有机物特性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015: 7–10.
- [27] Haynes R J. Labile organic matter fractions as central components of the quality of agricultural soils: an overview[J]. Advances in Agronomy, 2005, 85: 221–268.
- [28] 贺美, 王立刚, 王迎春, 等. 黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1942–1951.
- [29] 马昱萱, 刘立志, 张宇飞, 等. 添加氮碳对大豆秸秆还田土壤酶活性及微生物量碳的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(10): 75–80.
- [30] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1412–1417.
- [31] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 等. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤碳库与肥力的变化[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2536–2545.
- [32] 时鹏, 高强, 王淑平, 等. 玉米连作及其施肥对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(22): 6173–6182.
- [33] 王超, 陈刘军, 田伟, 等. 高通量测序解析微生物肥料对红壤有机农田土壤微生物群落的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 272–277.
- [34] Namaghi H H, Karami G H, Saadat S. A study on chemical properties of groundwater and soil in ophiolitic rocks in Firuzabad, East of Shahrood, Iran; with emphasis to heavy metal contamination[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 174(1): 573–583.
- [35] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 116–206.
- [36] Raiesi F, Beheshti A. Microbiological indicators of soil quality and degradation following conversion of native forests to continuous croplands[J]. Ecological Indicators, 2015, 50: 173–185.
- [37] Zhang B, He H, Ding X L, et al. Soil microbial community dynamics over a maize (*Zea mays* L.) growing season under conventional- and no-tillage practices in a rainfed agroecosystem[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 124(4): 153–160.
- [38] 黄剑. 生物炭对土壤微生物量及土壤酶的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- [39] Fansler S J, Smith J L, Jr Bolton H, et al. Distribution of two C cycle enzymes in soil aggregates of a prairie chrono sequence[J]. Biology and Fertility of Soils, 2005, 42(1): 17–23.
- [40] Dilly O, Nannipieri P. Response of ATP content, respiration rate and enzyme activities in an arable and a forest soil to nutrient additions[J]. Biology and Fertility of Soils, 2001, 34(1): 64–72.
- [41] Sinsabaugh R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(3): 391–404.
- [42] Zhao S, Li K, Zhou W, et al. Changes in soil microbial community, enzyme activities and organic matter fractions under long-term straw return in north-central China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2016, 216: 82–88.
- [43] 关松荫. 土壤酶与土壤肥力的关系[J]. 土壤肥料, 1980(2): 19–21.
- [44] 刘艳慧, 王双磊, 李金埔, 等. 棉花秸秆还田对土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(6): 151–156.
- [45] 张伟, 龚久平, 刘建国. 秸秆还田对连作棉田土壤酶活性的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(5): 881–885.
- [46] 刘芳, 王明娣, 刘世亮, 等. 玉米秸秆腐解对石灰性褐土酶活性和有机质质量分数动态变化的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(4): 149–153.
- [47] 陈强龙. 秸秆还田与肥料配施对土壤氧化还原酶活性影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009: 40–41.
- [48] 陈士更, 宋以玲, 于建, 等. 玉米秸秆还田及腐熟剂对小麦产量、土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 山东科学, 2018, 31(2): 25–31.
- [49] 刘龙, 李志洪, 赵小军, 等. 种还分离玉米秸秆还田对土壤微生物量碳及酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(4): 259–263.
- [50] 徐欣, 王晓军, 谢洪宝, 等. 秸秆腐解对不同氮肥水平土壤脲酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(34): 99–102.
- [51] 陶波, 王小琴, 李相全, 等. 转基因大豆秸秆还田对土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(7): 503–505.
- [52] 战厚强. 水稻秸秆还田对土壤酶活性及土壤养分的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 19–21.
- [53] 赵哲权, 王明九, 邢建民. 施用作物秸秆对土壤酶活性的影响[J]. 土壤肥料, 1990(3): 28–29.