

秸秆还田对土壤微生态环境影响的研究进展

王美琦, 刘银双, 黄亚丽*, 赵阳阳, 李再兴, 韩永辉

河北科技大学环境科学与工程学院, 河北 石家庄 050018

王美琦, 刘银双, 黄亚丽, 赵阳阳, 李再兴, 韩永辉. 秸秆还田对土壤微生态环境影响的研究进展[J]. 微生物学通报, 2022, 49(2): 807-816

Wang Meiqi, Liu Yinshuang, Huang Yali, Zhao Yangyang, Li Zaixing, Han Yonghui. Research progress on effects of straw incorporation on soil micro-ecological environment[J]. Microbiology China, 2022, 49(2): 807-816

摘要: 秸秆是世界上最丰富的生物质资源之一, 秸秆还田作为秸秆利用的主要方式, 与农业可持续发展密切相关。微生物是土壤微生态系统中最活跃的生物因子, 是土壤质量的重要生物学评价指标, 也是受秸秆还田影响最为敏感的土壤因子。为了解秸秆还田所带来的土壤微生态效应, 本文从土壤酶活性、微生物生物量、可培养微生物种群及微生物多样性等 4 个方面进行综述, 分析了不同还田条件下土壤微生态指标的差异, 讨论了现阶段秸秆还田研究的局限性, 并对今后的研究方向进行了展望, 以期能为秸秆安全还田提供依据。

关键词: 秸秆还田; 土壤酶活性; 微生物生物量; 可培养微生物; 微生物多样性

Research progress on effects of straw incorporation on soil micro-ecological environment

WANG Meiqi, LIU Yinshuang, HUANG Yali*, ZHAO Yangyang, LI Zaixing, HAN Yonghui

School of Environmental Sciences and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei, China

Abstract: Straw is one of the most abundant biomass resources in the world. As the main utilization way of straw, straw incorporation is associated with the sustainable development of agriculture. Microorganisms are the most active bio-factors in the soil ecosystem, which are closely related to straw degradation, nutrient circulation, and soil health. To understand the micro-ecological effects of straw incorporation, we analyzed the soil enzyme activity, microbial biomass, culturable microbial populations,

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0300905); 河北省重点研发计划(20327507D)

Supported by: National Key Research and Development Program of China (2017YFD0300905); Key Research and Development Program of Hebei Province (20327507D)

*Corresponding author: E-mail: huangyali2291@163.com

Received: 2021-05-03; Accepted: 2021-10-03; Published online: 2021-12-05

and diversity after straw incorporation. Furthermore, we compared the soil micro-ecological indicators under different conditions of straw incorporation, and discussed the limitations of the related studies. Finally, we put forward an outlook on the future research directions in this field. This study can provide a basis for safe straw incorporation.

Keywords: straw incorporation; soil enzyme activity; microbial biomass; culturable microorganisms; microbial diversity

秸秆是一种数量巨大且普遍存在的生物质资源, 其有效利用与农业可持续发展和环境安全直接相关。秸秆还田由于其对土壤肥力和作物产量的积极作用, 是世界上应用最为广泛的秸秆利用方式^[1]。目前, 我国秸秆直接还田量占秸秆总量的46%, 平均还田量达4 611 kg/hm²^[2]。秸秆还田的广泛应用使秸秆还田效果评价成为学者们研究的热点。秸秆还田所引起的土壤理化性质变化及对农作物产量的影响多有报道, 研究发现秸秆还田具有降低土壤容重、改良土壤团粒结构、增加土壤孔隙度^[3-4]以及提升土壤有机质、氮、磷含量和降低土壤交换性酸^[5-6]、增加农作物产量^[7]等多重功效。微生物是土壤微生态系统的重要组成部分, 是土壤养分的源和库, 也是土壤有机质和养分循环转化的动力^[8]。微生物是土壤中对外界因素反应最为敏感的部分, 也常用于评价土壤质量的生物学特征, 已经成为土壤学界研究的焦点。近年来, 秸秆还田对土壤微生态环境的影响也受到广泛的关注, 微生物对秸秆的降解作用以及秸秆中养分物质对土壤微生物生长的促进和富集效应研究也逐渐深入, 这些研究为明确秸秆还田微生态效应提供了理论基础^[9-10]。

本文以近年来秸秆还田对土壤微生物的影响研究为基础, 对秸秆还田所引起的土壤酶活性、微生物生物量、可培养微生物种群及微生物多样性等土壤微生态效应进行综述, 并分析不同土壤类型、秸秆还田数量、还田方式等因

素对秸秆还田微生物效应的影响, 以期为指导秸秆安全还田提供依据。

1 秸秆还田对土壤酶活性的影响

土壤中的物质循环和生化反应是由土壤酶直接催化进行的, 土壤酶活性决定着土壤中营养物质的转化和植物吸收的速率。目前, 土壤酶活性作为表征土壤微生物性质的重要指标被广泛使用。酶包括氧化还原酶、水解酶、转移酶和裂解酶四大类, 而蔗糖酶、脲酶、纤维素酶、磷酸酶等水解酶类和过氧化氢酶、漆酶等氧化还原酶类在秸秆还田效应中的研究较多。多数研究表明, 秸秆进入土壤能够为微生物生长提供能量和营养, 从而使土壤中微生物数量增加, 分泌更多的酶。与无秸秆还田的对照相比, 秸秆还田具有增加多种土壤酶活性的作用。靳玉婷等^[11]对安徽省潜育型水稻土进行研究, 发现秸秆还田使脲酶、磷酸酶及纤维素酶等酶活性增加。Ni 等^[12]的研究也显示秸秆还田有效提高了土壤酶活性, 其中蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶和纤维素酶分别较无秸秆还田对照提高了36.40%、58.57%、27.53%和98.22%。然而部分研究发现秸秆还田对不同酶活性的影响不同, 例如 Zhang 等^[13]研究发现, 在淮河地区黑土中秸秆还田后葡糖苷酶、木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶的活性分别较对照提高了14%、14%、22%, 但是土壤漆酶活性则降低了38%, 这可能是由于氮肥的施用引起了酚过氧化物酶类的降低。由此可知, 秸

秸秆还田的酶活性效应存在酶种类的差异。

秸秆还田的酶活性效应还受诸多因素的影响。(1) 秸秆还田的酶活性具有时间效应, 在早稻田中进行秸秆还田, 秸秆还田后蔗糖酶、淀粉酶、纤维素酶和 β -葡萄糖苷酶的活性显著升高, 但是在后茬晚稻中酶活性效应则呈现相反趋势, 这可能是由于早期秸秆碳的输入刺激了微生物快速生长和酶的分泌, 从而使秸秆养分迅速转化; 而后期土壤养分由于前期转化吸收而降低, 从而导致晚稻土壤碳循环相关的酶活性降低^[14]。(2) 秸秆还田的酶活性效应受秸秆还田方式的影响。钱海燕等^[15]的研究表明, 秸秆还田配施氮、磷、钾肥与单独秸秆还田相比, 过氧化氢酶活性提高了 72.3%, 蔗糖酶活性提高了 61.5%, 脲酶活性提高了 102.3%, 而秸秆还田配施钙、镁肥与单独秸秆还田相比, 酶活性之间不存在显著差异。(3) 不同化学氮肥基追比秸秆还田处理的土壤酶活也存在差异。江西水稻秸秆还田处理下, 氮肥基追比 6:4 对 β -葡萄糖苷酶、纤维二糖苷酶、 α -葡萄糖苷酶、氨基基酶、酚氧化酶和过氧化物酶活性的增加作用最为显著, 在河南玉米秸秆还田处理下氮肥基追比 1:1 对酶活性促进效果最优^[16]。这些研究表明, 秸秆作为一种重要的土壤碳源, 其进入土壤后为微生物生长提供丰富的碳素营养, 势必促进微生物对氮、磷等养分的吸收, 合理调节化学肥料的施用比例能够更有效地发挥秸秆微生物效应。然而不同地区、不同土壤类型的土壤养分差异及作物对养分的需求差异, 造成适宜的肥料配比也不同, 因此需要根据不同的秸秆还田对象进行研究并建立相应的秸秆与化肥配施还田策略。

2 秸秆还田对土壤微生物数量的影响

2.1 秸秆还田对土壤微生物生物量的影响

土壤微生物量碳(soil microbial biomass

carbon, SMBC)、土壤微生物量氮(soil microbial biomass nitrogen, SMBN)、土壤微生物量磷(soil microbial biomass phosphorus, SMBP)是固定在土壤微生物中的碳、氮、磷元素, 是植物可利用养分的重要来源, 其含量取决于土壤中微生物的数量^[17], 是反映土壤中微生物活性的重要指标。与上述土壤酶活性变化规律一致, 秸秆还田同时添加氮肥能够比仅秸秆还田处理提高土壤根际和非根际土壤 SMBC、SMBN 的含量, 而且在高砂土和黄泥土 2 种土壤中均呈现相同的趋势^[18]。进一步研究表明, 高碳氮比的秸秆大量还田会造成土壤氮素的固定, 此时配施氮素能够为微生物生长提供较理想的养分环境, 从而进一步提高土壤微生物生物量。因此, 秸秆还田时配施氮肥是改良土壤微生物环境的关键。

秸秆还田方式也会给土壤微生物生物量造成一定的影响。赵雪淞等^[19]在科尔沁风沙地探究了适合辽西风沙半干旱条件下花生高产的耕作方式, 结果表明, 相同耕作条件下, 秸秆还田处理组土壤 SMBC、SMBN、SMBP 含量均高于无秸秆还田处理组; 在相同秸秆还田条件下, 免耕处理的 SMBC、SMBN、SMBP 含量较常规翻耕和垄耕处理显著提高, 分析认为垄耕和翻耕对耕层的翻动破坏了土壤结构, 加速了土壤有机质的损失和土壤肥力的衰退; 而免耕耕作对土层结构扰动小, 有利于土壤养分含量的存储和积累, 为土壤微生物的生长繁殖提供了良好的生态环境。另外, 土壤类型不同, 秸秆还田后土壤微生物碳的含量变化也存在差异。Rottmann 等^[20]以沙土和壤土为试验土壤, 分析了秸秆 0-5 cm 土层还田 2 种土壤中的 SMBC 变化, 发现沙土中的 SMBC 显著降低, 而壤土中的 SMBC 显著提高。这可能是由于壤土的土壤孔隙度利于土壤碳的固定, 从而提升了土壤中 SMBC 的含量。由上述研究结果可知, 为了达到较好的秸秆还田效

果,不同土壤类型应该采用不同的秸秆还田方式,沙质土壤以减少土壤扰动的秸秆还田方式为宜,而壤土可以采用翻耕还田的方式。

2.2 秸秆还田对可培养微生物数量的影响

可培养微生物数量是土壤中可培养真菌、细菌及放线菌的总和,测定秸秆还田土壤中可培养微生物的数量能够较直观地分析秸秆还田的土壤生态效应。另外,通过可培养微生物的分析还能够明确病原微生物的种类和数量,从而建立土壤微生物数量与病害发生的关系,为秸秆安全和高效还田提供技术指导。较多研究表明,秸秆还田为微生物生长提供了丰富的营养物质和较好的土壤理化条件,从而显著增加了可培养微生物的数量,但是土壤中可培养微生物数量还受秸秆还田数量、方式和还田时间等因素的影响。高日平等^[21]研究了不同秸秆还田量对可培养微生物数量的影响,其中50%的秸秆还田量对细菌、真菌、放线菌的促进效果最显著,其次为100%的秸秆还田量,而25%的秸秆还田量处理的促进效果最差;分析不同秸秆还田量的作物产量发现,同样以50%的秸秆还田量处理的产量效果最佳,可培养微生物数量与产量呈正相关,该研究指出适量秸秆还田能够实现土壤微生物数量优化、作物产量的同步提升。不同的还田方式也会对土壤微生物数量的影响产生差异,梅沛沛等研究了秸秆焚烧后还田、秸秆粉碎翻耕还田和秸秆粉碎覆盖还田对碱性土壤中微生物数量的影响,结果表明3种秸秆还田方式对微生物数量的影响不同;3种秸秆还田处理的真菌数量均呈现下降趋势,而放线菌的数量均呈现上升趋势,对细菌而言,秸秆粉碎翻耕还田和秸秆粉碎覆盖还田时细菌数量上升,但秸秆焚烧后还田时细菌数量则下降;同样的秸秆还田方式,在酸性土壤中可培养微生物的变化则与碱性土壤中呈现不同的趋势^[22]。

总体而言,在秸秆还田的情况下,土壤微生物

数量总体呈现增加的现象,其中对细菌菌群的促进效果在不同研究中具有较为一致的结果,农作物产量与土壤细菌数量具有正相关关系。然而秸秆还田不仅能够促进细菌数量的提升,还能够为病原真菌的繁殖提供较有利的环境,造成下茬作物病害的增加。陆宁海等^[23]分析了秸秆还田对小麦土壤中细菌、真菌、放线菌的影响,以小麦返青期为例,秸秆还田处理中3种菌的数量分别较未还田处理增加119.59%、591.32%、47.00%,其中对真菌的数量促进作用最大,由于真菌中存在大量的病原菌,这也是导致小麦根腐病发生率上升的主要原因。分析秸秆直接还田、过腹还田和炭化还田对土壤微生物数量的影响发现,与对照相比,3种秸秆还田处理中只有秸秆直接还田处理的真菌数量上升、病害发生率增加^[24]。土壤真菌数量的增加主要是由于秸秆带菌直接还田,增加了土壤中病原真菌的数量,从而使秸秆还田处理小麦根腐病、叶斑病等病害发病率增加^[23]。因此,合适的还田量及合适的还田方式是实现秸秆安全还田的关键,为解决秸秆直接还田造成的病原真菌增加的问题,应在有条件的地区采用过腹还田、炭化还田和间歇还田等方式,既能够有效利用资源,又能够降低土传病害大流行的危害。虽然可培养微生物能够在一定程度上反映土壤微生物环境的变化趋势,但是,由于可培养微生物种类只占土壤中微生物种类总数的0.1%–1.0%,可培养微生物并不能准确反映土壤微生物的总体情况,还有待采取更先进的技术手段进行土壤微生物菌群的研究。

2.3 秸秆还田对土壤微生物功能菌群数量的影响

不同种群的微生物在土壤物质循环和能量转化过程中发挥着不同的功能,采用特殊培养基和分子生物学方法可以明确不同功能微生物菌群数量的变化,从而能够探明秸秆还田对功能微

生物种群的影响,建立秸秆还田与土壤养分循环之间的关系。顾美英等^[24]研究了秸秆直接还田、炭化还田对风沙土壤功能菌群数量的影响,发现氨化细菌、亚硝化细菌、反硝化细菌及纤维素降解菌数量都有不同程度的增加,其中秸秆直接还田显著增加了土壤氨化细菌和纤维素分解菌的数量,增加幅度分别为 566.67%和 450.00%。

采用 qPCR 可以明确土壤系统中功能基因的丰度,从另一个侧面反映功能微生物的变化。陈娜等^[25]发现,与单施化肥相比,秸秆还田显著提升了土壤中反硝化细菌的数量。Yang 等^[26]研究发现,长期秸秆还田配施化肥能够使土壤中 *nirK*、*nirS*、*narG* 基因丰度分别增加 1.57–3.02、0.53–3.81、0.75–7.18 倍,表明土壤中氮素循环微生物数量增加,从而使基因表达水平升高,对促进土壤氮素循环、增强土壤肥力具有良好的作用。Perge 等的研究发现,秸秆还田处理的土壤中微生物 DNA 总量显著高于无机肥处理,表明秸秆还田处理的土壤中有更多的微生物群体,其中 *nifH*、*nosZ*、*nirS* 和 *nirK* 等基因的表达量均显著提高,说明反硝化细菌菌群、固氮菌群数量增加,促进了土壤自身固氮能力的提高^[27–28]。上述研究表明,秸秆还田后由于在土壤中添加了大量的碳素营养,造成土壤中碳氮比失衡,为了实现秸秆中碳素营养的快速降解转化,土壤微生物会通过氮素循环相关微生物及功能基因的调控实现土壤养分的迅速转化,这也是研究者发现秸秆还田后氮素循环菌增加和相关基因上调表达的原因。进一步说明与氮素营养配施是保障秸秆快速还田的技术途径。

3 秸秆还田对土壤微生物多样性的影响

3.1 基于碳源利用的秸秆还田土壤微生物多样性分析

平均颜色变化率 (average well color

development, AWCD)是用来表征微生物群落的碳源利用率,通常 AWCD 值越大表明微生物活性越高,基于碳源利用的微生物多样性分析使基于碳素利用分析的土壤微生物多样性研究更为明确。唐海明等^[29]研究发现,作物秸秆还田为微生物生长提供了丰富的碳源和营养物质,土壤微生物的 AWCD 增加,表明秸秆还田提升了土壤根际微生物的碳源利用能力,增加了微生物多样性。顾美英等^[24]通过对比秸秆还田后不同时间 AWCD 的变化,发现秸秆还田 24 h 时碳源基本未被利用,而 24–96 h 呈现快速增长的趋势,随后缓慢增长并趋于稳定,这为明确秸秆还田时间的微生物效应提供了基础数据。另外,还有研究表明,秸秆腐解微生物群落碳源代谢活性、丰富度指数、优势度指数和均匀度指数随秸秆还田量、长度、埋深的变化趋势,其中,微生物多样性指数随秸秆还田长度增加而降低,但随秸秆还田量增加则呈现先增加后降低的趋势,而埋深对微生物多样性的影响则未得到相同的结论^[30]。总而言之,AWCD 方法从碳源利用方面进一步体现了秸秆还田对土壤微生物多样性的影响,秸秆还田处理后土壤聚合物类、糖类、氨基酸碳源的 AWCD 值均高于秸秆不还田处理^[31],为明确秸秆还田对土壤碳素循环提供了理论依据。由上述研究可知,秸秆还田具有明显的时效性,其中 24–96 h 反应最为迅速,属于快速降解阶段,随后进入缓慢降解期;通过增加秸秆长度可以延缓秸秆还田对微生物的促进作用,以此为依据进行秸秆还田指导能够提升秸秆还田释放养分与植物所需养分的吻合度,从而进一步提升秸秆还田效果。

3.2 基于变性梯度凝胶电泳的秸秆还田土壤微生物多样性分析

土壤微生物多样性是指微生物群落种内和种间差异,主要包括物种多样性、遗传多样性及

生态多样性。其中土壤微生物多样性最直观的表现形式是物种多样性,主要为土壤微生物丰富度和均一性。变性梯度凝胶电泳法(denaturing gradient gel electrophoresis, DGGE)作为一种分子生物学技术在土壤微生物种群多样性研究领域起着非常重要的作用,使秸秆还田土壤微生物的研究精确到种属水平。薄国栋等^[32]采用 DGGE 方法研究了不同玉米秸秆还田量对土壤微生物多样性的影响,在明确秸秆还田提高土壤微生物多样性的同时,指出秸秆还田量为 7 500 kg/km²能够有效促进烟草土壤优势菌种硝化螺菌的生长繁殖,硝化螺菌是促进土壤亚硝酸盐向硝酸盐转化的细菌,明确了秸秆还田后氮循环改善的主要微生物种。刘骁蓓等^[33]的研究也显示,秸秆还田有利于氮素循环菌群丰度上升,使固氮菌的丰度和多样性指数显著增加。李鹏等^[34]的研究从时间的角度分析了秸秆还田对真菌多样性的影响,秸秆还田前期不会对土壤真菌群落结构造成明显影响,但随着秸秆还田时间的增加,真菌多样性呈现升高的趋势,并在 360 d 达到最高。秸秆还田对细菌多样性的影响以拔节期变化最为明显,而且秸秆还田 2 年的细菌种群数量和多样性较秸秆还田 1 年更高,其中土壤中有机污染物降解菌群和纤维素分解菌的增加最显著^[35]。总之,通过 DGGE 在土壤微生物多样性研究上的应用,使人们更加明确了秸秆还田后特异上升的功能菌群,明确了秸秆还田后土壤养分循环转化的微生物机理。该研究使以标志性菌群为靶标优化的秸秆还田方式成为可能,也为秸秆还田后土壤微生物菌群的定向调控提供了理论支撑。

3.3 基于高通量测序技术的秸秆还田土壤微生物多样性分析

近年来微生物高通量测序技术快速发展并在秸秆还田微生物效应研究中广泛应用,更加明确了土壤微生物群落的演化规律及其环境功能。

Yang 等^[26]以黄淮海小麦-大豆轮作土壤为研究对象,发现秸秆还田后土壤氮循环相关的微生物群落丰度增加。Navarro-Noya 等^[36]发现秸秆还田后拟杆菌门(*Bacteroidetes*)显著增加,蓝细菌门(*Cyanobacteria*)显著降低,拟杆菌门中的部分微生物能够利用简易碳源,蓝细菌门的微生物则主要为自养型微生物,说明秸秆还田后刺激了部分微生物丰度的特异性增加。此外, Wang 等^[37]也发现秸秆还田增加了土壤碳、铁循环微生物的丰度,表明秸秆还田促进了土壤养分循环,有利于增强土壤肥力。对华北地区连续 6 年秸秆还田土壤细菌多样性研究发现,秸秆还田处理细菌丰富度和多样性均与对照无显著差异,但是 *Candidatus Latescibacteria* 的丰度显著上升^[38]。*Candidatus Latescibacteria* 具有较强的植物多糖降解能力,以该菌为秸秆还田后土壤健康评价的微生物指标可以较为简便地进行秸秆降解过程的评价^[39]。尽管秸秆还田对土壤微生态环境多为正面影响,但是也有研究表明秸秆还田后 *Xanthomonadales*、*Mycosphaerella*、*Leptosphaeria*、*Oidiodendron* 等土壤病原菌的丰度会有不同程度的增加^[26,40]。因此,秸秆还田对病原菌的影响还需进一步研究。总之,随着高通量测序技术的突破和生物信息学的发展,使秸秆还田对土壤生态影响评价上升到一个新阶段,使建立秸秆还田土壤环境的标志菌群成为可能,为秸秆还田的土壤微生态影响评价、土壤微生物靶向调控提供了有力的工具,可有效指导“测土配菌”工作的进行,最终实现土壤健康和作物增产。

4 展望

近年来,土壤健康成为人们关注的焦点,微生态环境是土壤健康的核心。秸秆还田作为一种重要的耕作方式,其对土壤微生态环境产生多重效应。明确秸秆还田的土壤微生物效应是探明秸

秸秆还田微生物降解过程、解决秸秆还田技术瓶颈的核心。秸秆还田对土壤微生物的正效应和负效应共存,以目前的研究和应用为基础进行适时、适地、适量、适法的秸秆还田,发挥秸秆还田的正效应、消减其负效应是实现秸秆安全还田的关键,在此过程中还需加强三方面的研究。

(1) 人们对秸秆还田所带来的土壤微生物效应了解得尚不全面,关于不同秸秆还田方式、还田量、还田土壤类型对土壤酶活、微生物数量以及土壤微生物群落和功能多样性的影响尚未形成共识,短期和长期秸秆还田对土壤微生物多样性群落和功能菌群的对比研究还鲜见报道;而随着我国秸秆还田年限的延长,在不同土壤类型和气候区域进行10年、20年以上秸秆还田后土壤中病原微生物的积累效应研究与病害发生的相关性分析,将成为指导秸秆还田措施的关键。

(2) 随着高通量测序技术在土壤微生物组研究中的应用,应针对不同的气候类型区、土壤类型区进行短期和长期秸秆还田的土壤微生态环境效应评价,建立秸秆还田土壤的标志微生物菌群。以此为依据,针对不同的气候类型区和作物种类进行适域性强的秸秆降解微生物菌剂的研发,使秸秆配菌还田切实可行。这也将是实现秸秆还田降解过程的可控性、降低病原微生物危害的关键。

(3) 随着微生物菌剂的推广应用,微生物菌剂施用后对秸秆降解过程和土壤微生态的调控作用方面的研究也需进一步加强。

REFERENCES

- [1] Wang YL, Wu PN, Mei FJ, Ling Y, Qiao YB, Liu CS, Leghari SJ, Guan XK, Wang TC. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288: 112391
- [2] Jiang D, Zhuang DF, Fu JY, Huang YH, Wen KG. Bioenergy potential from crop residues in China: availability and distribution[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(3): 1377-1382
- [3] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 田冬, 黄容, 刘江, 黎嘉成. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 355-362
- Xu GX, Wang ZF, Gao M, Tian D, Huang R, Liu J, Li JC. Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 355-362 (in Chinese)
- [4] 吴鹏年, 王艳丽, 李培富, 王西娜, 侯贤清. 滴灌条件下秸秆还田配施氮肥对宁夏扬黄灌区春玉米产量和土壤理化性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4177-4185
- Wu PN, Wang YL, Li PF, Wang XN, Hou XQ. Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on spring maize yield and soil physicochemical properties under drip irrigation condition in Yellow River pumping irrigation area, Ningxia, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4177-4185 (in Chinese)
- [5] 刘玲玲, 刘婷, 狄霖, 吴文祥, 盛海君, 余彬彬, 杨艳菊, 钱晓晴, 王娟娟. 秸秆全量还田对水稻生长及土壤理化性质的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2018, 39(3): 81-85
- Liu LL, Liu T, Di L, Wu WX, Sheng HJ, Yu BB, Yang YJ, Qian XQ, Wang JJ. Influences of total straw returning on rice growth and soil physicochemical properties[J]. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2018, 39(3): 81-85 (in Chinese)
- [6] 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
- Yang CD, Lu SG. Dynamic effects of direct returning of straw and corresponding biochar on acidity, nutrients, and exchangeable properties of red soil[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 4246-4252 (in Chinese)
- [7] 栾天浩, 刘云强, 高阳, 孙孟琪, 王楠, 梁烜赫, 赵鑫, 刘浩然, 陈宝玉, 王洪君. 不同秸秆还田方式对玉米产量及土壤理化性质的影响[J]. *东北农业科学*, 2020, 45(6): 64-67, 77
- Luan TH, Liu YQ, Gao Y, Sun MQ, Wang N, Liang XH, Zhao X, Liu HR, Chen BY, Wang HJ. Effects of different straw returning methods on maize yield and soil physical and chemical properties[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(6): 64-67, 77 (in Chinese)
- [8] 朱永官, 彭静静, 韦中, 沈其荣, 张福锁. 土壤微生物

- 组与土壤健康[J]. 中国科学(生命科学), 2021, 51(1): 1-11
- Zhu YG, Peng JJ, Wei Z, Shen QR, Zhang FS. Linking the soil microbiome to soil health[J]. *Scientia Sinica: Vitae*, 2021, 51(1): 1-11 (in Chinese)
- [9] 邢慧珍, 宋水山, 黄媛媛, 黄亚丽. 一株低温玉米秸秆降解真菌的筛选、鉴定及降解特性[J]. 微生物学通报, 2020, 47(9): 2923-2933
- Xing HZ, Song SS, Huang YY, Huang YL. Screening, identification and characterization of a low-temperature maize straw degradation fungus[J]. *Microbiology China*, 2020, 47(9): 2923-2933 (in Chinese)
- [10] 黄亚丽, 黄媛媛, 马慧媛, 徐炳雪, 贾振华, 宋水山, 李再兴, 贾素巧. 低温秸秆降解真菌的筛选及在秸秆还田中的应用[J]. 中国农学通报, 2020, 36(21): 53-60
- Huang YL, Huang YY, Ma HY, Xu BX, Jia ZH, Song SS, Li ZX, Jia SQ. Fungi with corn straw decomposing characterization at low-temperature: screening and application in straw returning field[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(21): 53-60 (in Chinese)
- [11] 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿. 秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(8): 3985-3996
- Jin YT, Li XF, Cai Y, Hu HX, Liu YF, Fu SW, Zhang BR. Effects of straw returning with chemical fertilizer on soil enzyme activities and microbial community structure in rice-rape rotation[J]. *Environmental Science*, 2021, 42(8): 3985-3996 (in Chinese)
- [12] Ni GR, Tu GQ, Wei SJ, Wu JF, Shi QH, Zhou CH, Pan XH. Effects of combination of straw returning and a microbial agent on microorganisms and enzyme activity in rhizosphere soil and yield of late rice[J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2017, 8(6): 78-82
- [13] Zhang LG, Chen X, Xu YJ, Jin MC, Ye XX, Gao HJ, Chu WY, Mao JD, Thompson ML. Soil labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after 10 years of continuous fertilization and wheat residue incorporation[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 11318
- [14] Huang W, Wu JF, Pan XH, Tan XM, Zeng YJ, Shi QH, Liu TJ, Zeng YH. 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
- [15] 钱海燕, 杨滨娟, 黄国勤, 严玉平, 樊哲文, 方豫. 秸秆还田配施化肥及微生物菌剂对水田土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(3): 440-445
- Qian HY, Yang BJ, Huang GQ, Yan YP, Fan ZW, FANG Y. Effects of returning rice straw to fields with fertilizers and microorganism liquids on soil enzyme activities and microorganisms in paddy fields[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(3): 440-445 (in Chinese)
- [16] 张鑫. 秸秆还田下氮肥管理对土壤微生物学特性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2019
- Zhang X. Effect of straw incorporation with nitrogen management on soil microbiological characteristics[D]. Beijing: Master's Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019 (in Chinese)
- [17] 詹雨珊, 冯有智. 秸秆还田对水稻土微生物影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2017, 48(6): 1530-1536
- Zhan YS, Feng YZ. Advances on impact of straw returning on microorganisms in paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2017, 48(6): 1530-1536 (in Chinese)
- [18] 罗佳琳, 赵亚慧, 于建光, 王宁, 薛利红, 杨林章. 麦秸与氮肥配施对水稻根际区土壤微生物量碳氮的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(9): 1582-1591
- Luo JL, Zhao YH, Yu JG, Wang N, Xue LH, Yang LZ. Effects of wheat straw and nitrogen fertilizer application on the soil microbial biomass carbon and nitrogen in the rhizosphere of rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(9): 1582-1591 (in Chinese)
- [19] 赵雪淞, 宋王芳, 高欣, 杨晨曦, 于洪波, 王冬旭. 秸秆还田和耕作方式对花生土壤微生物量、酶活性和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3): 126-132
- Zhao XS, Song WF, Gao X, Yang CX, Yu HB, Wang DX. Effects of straw returning and tillage methods on soil microbial biomass, enzyme activity and yield of peanut[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(3): 126-132 (in Chinese)
- [20] Rottmann N, Dyckmans J, Joergensen RG. Microbial use and decomposition of maize leaf straw incubated in packed soil columns at different depths[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(1): 27-33
- [21] 高日平, 赵思华, 刁生鹏, 高宇, 任永峰, 赵沛义, 袁伟, 高学峰. 秸秆还田对黄土风沙区土壤微生物、酶活性及作物产量的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(6): 1370-1377
- Gao RP, Zhao SH, Diao SP, Gao Y, Ren YF, Zhao PY, Yuan W, Gao XF. Effects of straw mulching on soil microorganism, enzyme activity and crop yield in loess desert[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(6):

- 1370-1377 (in Chinese)
- [22] 梅沛沛, 余常兵, 吴言凤, 李银水, 胡喜巧, 黄玲. 秸秆还田方式对酸性和碱性土壤养分含量、微生物数量及油菜生长的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 365-371
Mei PP, Yu CB, Wu YF, Li YS, Hu XQ, Huang L. Effects of rice straw returning on soil properties, microbial number and rape growth in acid and alkaline soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(2): 365-371 (in Chinese)
- [23] 陆宁海, 杨蕊, 郎剑锋, 吴利民, 张强, 霍云凤, 石明旺, 陈锡岭. 秸秆还田对土壤微生物种群数量及小麦茎基腐病的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(34): 102-108
Lu NH, Yang R, Lang JF, Wu LM, Zhang Q, Huo YF, Shi MW, Chen XL. Straw returning affects soil microbial population and wheat crown rot[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(34): 102-108 (in Chinese)
- [24] 顾美英, 唐光木, 葛春辉, 马海刚, 张志东, 徐万里. 不同秸秆还田方式对和田风沙土壤微生物多样性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(4): 489-498
Gu MY, Tang GM, Ge CH, Ma HG, Zhang ZD, Xu WL. Effects of straw incorporation modes on microbial activity and functional diversity in sandy soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(4): 489-498 (in Chinese)
- [25] 陈娜, 刘毅, 黎娟, 袁婧, 葛体达, 吴金水, 孙志龙, 徐华勤. 长期施肥对稻田不同土层反硝化细菌丰度的影响[J]. 中国环境科学, 2019, 39(5): 2154-2160
Chen N, Liu Y, Li J, Yuan J, Ge TD, Wu JS, Sun ZL, Xu HQ. Effects of long-term fertilization on the abundance of the key denitrifiers in profile of paddy soil profiles[J]. China Environmental Science, 2019, 39(5): 2154-2160 (in Chinese)
- [26] Yang HJ, Ma JX, Rong ZY, Zeng DD, Wang YC, Hu SJ, Ye WW, Zheng XB. Wheat straw return influences nitrogen-cycling and pathogen associated soil microbiota in a wheat-soybean rotation system[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 1811
- [27] Tang YF, Zhang MM, Chen AL, Zhang WZ, Wei WX, Sheng R. Impact of fertilization regimes on diazotroph community compositions and N₂-fixation activity in paddy soil[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2017, 247: 1-8
- [28] Pereg L, Morugán-Coronado A, McMillan M, García-Orenes F. Restoration of nitrogen cycling community in grapevine soil by a decade of organic fertilization[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 179: 11-19
- [29] 唐海明, 肖小平, 李超, 汤文光, 郭立君, 汪柯, 孙玉桃, 程凯凯, 孙耿, 潘孝晨. 冬季覆盖作物秸秆还田对双季稻田根际土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6559-6569
Tang HM, Xiao XP, Li C, Tang WG, Guo LJ, Wang K, Sun YT, Cheng KK, Sun G, Pan XC. Effects of recycling straw of different winter covering crops on rhizospheric microbial community functional diversity in a double-cropped paddy field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(18): 6559-6569 (in Chinese)
- [30] 王广栋. 秸秆还田方式对腐解特征及微生物群落功能多样性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2018
Wang GD. Study on characteristics of soil decomposition and functional diversity of microbial communities using straw returning method[D]. Harbin: Master's Thesis of Northeast Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [31] 韦安培, 丁文超, 胡恒宇, 隋业伟, 刘少梅, 陈子明, 李静. 耕作方式及秸秆还田对土壤性质、微生物碳源代谢及小麦产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 145-152
Wei AP, Ding WC, Hu HY, Sui YW, Liu SM, Chen ZM, Li J. Effects of tillage methods and straw return on soil properties, metabolism of microbial carbon source and wheat yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 145-152 (in Chinese)
- [32] 薄国栋, 申国明, 陈旭, 张忠锋, 许家来, 高林, 王毅, 管恩森, 王树键, 张继光. 秸秆还田对植烟土壤酶活性及细菌群落多样性的影响[J]. 中国烟草科学, 2017, 38(1): 53-58
Bo GD, Shen GM, Chen X, Zhang ZF, Xu JL, Gao L, Wang Y, Guan ES, Wang SJ, Zhang JG. Effect of straw returning on soil enzyme activities and diversity of bacterial communities in tobacco planting fields[J]. Chinese Tobacco Science, 2017, 38(1): 53-58 (in Chinese)
- [33] 刘骁蒨, 涂仕华, 孙锡发, 辜运富, 张先琴, 张小平. 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5210-5218
Liu XQ, Tu SH, Sun XF, Gu YF, Zhang XQ, Zhang XP. Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5210-5218 (in Chinese)
- [34] 李鹏, 李永春, 史加亮, 郑清涛, 武国干, 蒋玮, 赵凯, 明凤, 潘爱虎, 吕卫光, 等. 水稻秸秆还田时间对土壤真菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2017, 37(13):

- 4309-4317
Li P, Li YC, Shi JL, Zheng XQ, Wu GG, Jiang W, Zhao K, Ming F, Pan AH, Lü WG, et al. Rice straw return of different decomposition days altered soil fungal community structure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4309-4317 (in Chinese)
- [35] 萨如拉, 杨恒山, 高聚林, 宋桂云, 李媛媛. 内蒙古玉米秸秆还田土壤细菌多样性特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(4): 31-38
Sa RL, Yang HS, Gao JL, Song GY, Li YY. Characteristics of soil bacterial diversity of maize straw returning field in Inner Mongolia[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(4): 31-38 (in Chinese)
- [36] Navarro-Noya YE, Gómez-Acata S, Montoya-Ciriaco N, Rojas-Valdez A, Suárez-Arriaga MC, Valenzuela-Encinas C, Jiménez-Bueno N, Verhulst N, Govaerts B, Dendooven L. Relative impacts of tillage, residue management and crop-rotation on soil bacterial communities in a semi-arid agroecosystem[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 65: 86-95
- [37] Wang EZ, Lin XL, Tian L, Wang XG, Ji L, Jin F, Tian CJ. Effects of short-term rice straw return on the soil microbial community[J]. *Agriculture*, 2021, 11(6): 561
- [38] Yu DL, Wen ZG, Li XM, Song XJ, Wu HJ, Yang PL. Effects of straw return on bacterial communities in a wheat-maize rotation system in the North China Plain[J]. *PLoS One*, 2018, 13(6): e0198087
- [39] Farag IF, Youssef NH, Elshahed MS. Global distribution patterns and pangenomic diversity of the candidate Phylum “*Latescibacteria*” (WS3)[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2017. DOI: 10.1128/aem.00521-17
- [40] Su Y, Yu M, Xi H, Lü J, Ma ZH, Kou CL, Shen A. Soil microbial community shifts with long-term of different straw return in wheat-corn rotation system[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 6360