

Research Progress of Effect of Direct Straw Returning on Soil Microorganism, Physical and Chemical Characteristics and Enzyme Activities

Haijun Sheng^{1,2}, Dong Niu¹, Guangyou Sun¹, Kaiwen Sun², Xinkai Zhu^{1,3*}

¹Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

²College of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

³Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Email: hjsheng@yzu.edu.cn, xkzhu@yzu.edu.cn

Received: May. 4th, 2016; accepted: May. 18th, 2016; published: May. 26th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The straw resources are very abundant in China and direct straw burning is popular in some areas, leading to the ineffective utilization of straw. In this review, the harm of straw burning, and the effects of straw direct returning on soil microorganism, physical and chemical characteristics and enzyme activities were reviewed. Short-term straw returning contributed less to soil properties as compared with long-term straw returning. Long-term straw returning increased the content of soil organic matter, optimized the composition of soil microbial populations, coordinated soil physical and chemical properties, and improved soil structure. Overuse of straw returning had short-term negative impacts on soil structure.

Keywords

Direct Straw Returning, Physical and Chemical Characteristics, Soil Microorganism, Soil Enzyme Activity

*通讯作者。

秸秆直接还田对土壤微生物、理化特性和酶活性的影响研究进展

盛海君^{1,2}, 牛东¹, 孙光佑¹, 孙凯文², 朱新开^{1,3*}

¹扬州大学江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州

²扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州

³粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州

Email: hjsheng@yzu.edu.cn, *xkzhu@yzu.edu.cn

收稿日期: 2016年5月4日; 录用日期: 2016年5月18日; 发布日期: 2016年5月26日

摘要

我国的秸秆资源丰富, 秸秆田间直接焚烧现象比较普遍, 被有效利用的则较少, 没有充分发挥出秸秆的利用价值。该文综述了秸秆直接焚烧的危害, 探讨秸秆直接还田对农田土壤理化特性、土壤微生物和酶活性的影响, 认为短期还田对土壤性能改变的贡献相对较小; 长期适量秸秆还田能够增加土壤有机质含量, 改善土壤中微生物种群的组成, 协调土壤理化性质, 利于构建良好的土壤结构; 过量还田对土壤结构会产生短期的不利效应。

关键词

秸秆直接还田, 土壤理化特性, 土壤微生物, 土壤酶活性

1. 引言

我国的传统农业主要依靠秸秆、河泥等有机肥料直接或间接还田来维持相对稳定的土壤肥力。新中国成立后, 随着化肥工业的蓬勃发展, 农田化肥施用量不断增加, 许多农户的秸秆不再作为主要有机肥料施入土壤, 取而代之的是在田地上直接焚烧, 导致土壤养分失调及肥力质量下降, 严重制约了土壤生产力的稳定性和农业生产的可持续发展[1]。从20世纪80年代开始, 秸秆直接焚烧所带来的一系列环境问题受到人们的普遍关注, 秸秆农用研究一直是农业生态学研究的热点之一。我国每年的秸秆资源量大约有 7.6×10^8 t, 若将这些秸秆归还给农田, 贮肥、存碳于土壤, 不仅可以提高土壤有机碳含量、改善土壤肥力, 而且可以有效防止秸秆田间直接焚烧带来的环境问题[2]。除此之外, 秸秆还田还对土壤中微生物菌落的形成、发生产生巨大影响。因此, 研究秸秆还田后土壤各项指标的变化, 对加强土壤质量和保持农田生态平衡具有重要指导意义。

2. 秸秆田间直接焚烧的危害

2.1. 对空气质量和人体健康的影响

农作物秸秆含有大量的有机质、氮、磷、钾、碳、氢及硫元素等, 曾是我国广大农村地区重要的生活燃料之一。然而近年来, 各地都出现了大规模露天焚烧秸秆的现象。大量农作物秸秆的露天焚烧, 大气中二氧化硫、二氧化氮、可吸入颗粒物三项污染指数达到峰值, 其中二氧化硫的浓度比平时高出 1

倍, 二氧化氮、可吸入颗粒物的浓度比平时高出 3 倍, 造成大气污染。张予燕等[3]根据近 3 年南京市的气象数据和环境监测结果统计表明, 由于秸秆焚烧所造成的霾天气占全年霾天气总数的 7.7%, 由此带来的空气污染天数占全年空气污染总天数的 15.6%; 灰霾日 Al、K、Na、Fe、Cu、Zn、Mg、Ba、Rb、Ce 的浓度明显偏高, 特别是 Al、K、Na 元素的浓度, 比正常日高。伍德侠等[4]提出, 作为检测大气污染有效污染指标之一的碳黑气溶胶, 其浓度在秸秆燃烧期间高出平时 1 倍。空气颗粒中大量的有毒物质的积累对人的健康造成极大的危害, 当可吸入颗粒物浓度达到一定程度时, 对人的眼睛、鼻子和咽喉含有黏膜的部分刺激较大, 轻则造成咳嗽、胸闷、流泪, 严重时可能导致支气管炎发生。因此, 有效的遏制秸秆田间直接焚烧, 减少其对于空气的污染和人类的伤害, 成为当前急需解决的问题。

2.2. 对土壤基础地力的负面影响

土壤是作物生长的重要载体, 并且还是微生物的栖息地与载体, 它由无机矿物质、有机质、微生物、水分等组成。秸秆焚烧在影响着大气质量的同时, 对土壤地力也产生影响。有研究表明[5], 秸秆直接焚烧导致土壤中过氧化氢酶、磷酸酶、脲酶和多酚氧化酶活性不同程度降低, 其中在耕层 0~2 cm 和 2~5 cm 降幅较大, 5~13 cm 耕层酶活性变化较小。在影响酶活性的同时, 对于土壤中微生物也产生着不利影响。焚烧秸秆使地面温度急剧升高, 能直接烧死、烫死土壤中的有益微生物, 微生物(细菌, 放线菌, 真菌)在 0~2 cm 土层中减少量近 20%, 而在 2~5 cm 耕层减少 50%左右。在土壤有机质方面, 燃烧秸秆使土壤有机质、全氮及碱解氮含量分别下降 15.3%~18.6%, 8%~13%和 4%~8.8%, 使土壤速效磷和速效钾含量平均增加了 7.5%和 18.9% [6]。由此可以看出, 秸秆在田间直接焚烧, 除了对速效磷、钾的含量有微量的提高以外, 更多的起到了破坏土壤结构、降低基础地力的作用。

3. 秸秆直接还田对土壤基础地力的补偿效应

作物秸秆存在多种营养元素, 其中氮 0.51%~0.64%、磷 0.12%~0.29%、钾 1.07%~2.28% [4]、钙 0.16%~0.44%、硫 0.112%~0.189%, 且还含有大量的有机质, 含有机碳 42.2%左右, 腐殖化系数为 30% (即每千克秸秆可提供 0.126 kg 腐殖质), 因此常是农业生产的主要有机肥料来源[7]。直接还田的秸秆在土壤微生物作用下分解、转化为土壤的重要组成成分——有机质, 它为作物生长提供必要的养分。研究表明, 每 100 kg 麦秸腐解后能为土壤提供氮 0.64 kg、磷 0.20 kg、钾 1.07 kg、有机质 81.2 kg 和丰富的微量元素 [8], 每 100 kg 稻草还田所带入土壤的钾相当于 3.8 kg KCl 的肥效[9], 还田玉米秸秆 500 kg, 则相当于施用土杂肥 2500 kg, 碳铵 11.7 kg, 过磷酸钙 6.2 kg, 硫酸钾 4.75 kg [10]。微生物在进行同化作用分解秸秆的同时, 分解产生的腐殖酸与土壤中的钙、镁离子结合形成稳性团粒, 从而改善了土壤理化性质与微生物的群落结构。不仅如此, 秸秆还田在防治土壤侵蚀、增加透水性和提高水分利用率等方面有着重要的作用[11]。有研究表明, 不同作物秸秆还田均可培肥地力, 土壤的容重减少, 透水性、透气性、蓄水保墒能力增加, 并调节土壤酸碱度, 可使土壤的团粒结构发生变化, 保持疏松状态, 改善土壤结构, 有效缓解土壤易板结的问题[12]。同时秸秆还田后贮留的矿质营养还起到对基础地力的补偿效果, 一段时间后土壤有机质含量、速效养分含量均会有所上升。还田一年后土壤有机质含量相对提高 0.05%~0.23%, 全磷平均提高 0.03%, 速效钾增加 31.2 mg/kg。而土壤容重下降 0.03~0.16 g/cm³, 土壤孔隙度提高 2%~4% [13]; 还田 3 年后, 土壤全氮、速效磷、速效钾含量均有不同程度的提高, 碱解氮含量变化不大[14]; 秸秆还田 6 年后全氮含量增加 69.2%, 有机质、速效钾、速效氮含量均显著升高, 而速效磷含量变化幅度较小[15]。同时, 秸秆覆盖和翻压对土壤有良好的保墒作用和抑制杂草生长的作用。

3.1. 秸秆还田对土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤生态系统的重要成分, 通过它们的代谢活动, 转化土壤中各种物质的形态, 是影响土

壤肥力的重要因素。土壤微生物控制着土壤生态系统的许多过程，行使的功能包括有机物料的分解、土壤化学循环、土壤结构的形成、污染物的脱毒等，土壤微生物群体的改变可以作为预示土壤肥力变化的指标，同时也是衡量耕地质量的重要指标[10]。同时，土壤微生物在土壤生态系统中具有促进养分循环转化、改善土壤结构[16]、抑制或拮抗植物病害等作用，其数量及活性大小直接影响着土壤有机物质的周转及作物养分的保蓄和供应[17]，因此，提高土壤微生物的数量是保持土壤肥力供应和维持农业生态系统良性循环的重要前提。土壤微生物参与土壤中有机质和各种养分的分解与转化，与土壤质量或肥力高低密切相关，是反映土壤肥力的灵敏生物指标，土壤微生物群落遭到破坏时，作物的生长也会受到一定程度的影响。

秸秆还田可显著增加耕层土壤中细菌、霉菌、放线菌、解磷解钾菌、硝化细菌和反硝化细菌等数量，改善土壤微生物的群落结构和功能多样性[18] [19]，刘骅等[20]通过 15 年施秸秆还田表明，土壤细菌、固氮菌、氨化细菌等类群数量比对照平均提高 15%，土壤放线菌、反硝化细菌、纤维分解菌等类群数量比对照平均增加 44%。但土壤微生物数量及生物量受土壤质地、耕作方式、还田方式、还田量和作物生育时期等因素的影响[21] [22]。秸秆还田后，土壤细菌数量明显增加，且耕作方式影响较大，翻耕有利于秸秆腐解，提高土壤养分而增加细菌的数量[23]；土壤中真菌的数量也有一定程度的增加，由于真菌的生物量较大，其在秸秆矿化和腐殖化过程中的作用也是不可忽视的。小麦整个生育期中，不同采样时期土壤的真菌数量呈现“低-高-低”的变化趋势，在秸秆还田初期，细菌、真菌大量繁殖加速秸秆矿化分解；分蘖期土壤真菌数量略有降低[24]。

由于秸秆富含有机物质，其降解过程涉及多种微生物的参与，微生物降解秸秆不是简单地将秸秆“燃烧”成 CO_2 和 H_2O ，而是同化利用秸秆分解的中间产物，扩大自身群体。因此，秸秆还田处理后必将对土壤微生物的群体结构和土壤生态系统的生物缓冲性和稳定性产生影响。秸秆还田后土壤微生物的群体变的更加丰富同时也增加了土壤微生物系统的稳定性和生物缓冲性。

3.2. 对土壤酶活性的影响

土壤酶是土壤生态系统的重要组成部分，它是一种生物催化剂，参与土壤中的各种生物化学过程。它不仅能反映土壤生物活性的高低，而且能表征土壤养分转化的快慢，在一定程度上能反映土壤肥力状况。土壤酶活性对作物的生长有重要作用，而秸秆还田对土壤酶活性具有不同程度的影响。

秸秆的主要成分是纤维素和半纤维素，还田秸秆的总体腐解进程在很大程度上受制于纤维素和木质素的降解[25]，不同作物秸秆的组成成分存在差异，就会导致其腐解进程发生变化。纤维分解菌群分泌出的多种酶在秸秆的降解过程中起重要作用。纤维素酶的活性反映单位时间内将羧甲基纤维素(CMC)转化成葡萄糖等小分子还原糖能力的强弱，因此，提高纤维素酶的活性可以有效提高土壤中有机质的含量。而秸秆直接还田后土壤纤维素酶活性增强，利用养分的能力提高[26]，使秸秆分解成为土壤生物肥力的养分库。

秸秆还田提高了土壤的有机质，为微生物的生长和繁殖提供了碳源，增加了脱氢酶的来源，能有效减小土壤脱氢酶的变幅，并显著提高土壤脱氢酶活性[27]。同时改善了土壤的微环境，所以秸秆还田在提高土壤脱氢酶活性的同时，减小了因外部环境变化引起土壤脱氢酶活性的波动幅度。

不论翻耕、常耕、免耕等不同耕作条件下，秸秆还田可提高土壤过氧化氢酶、蛋白酶、葡萄糖酶和碱性磷酸酶等多种酶活性[25] [28] [29]，且土壤中脲酶、磷酸酶、过氧化氢酶、蔗糖酶等活性均随土层的加深而减少，随秸秆还田量增加而增加[30]。研究证实，长期秸秆还田使土壤蔗糖酶和脲酶活性分别比对照增加 28%、25% [20]。

3.3. 对土壤有机碳库及养分含量的影响

秸秆富含有机物质,在秸秆直接或间接还田后,通过微生物分解还田有机物质及其腐解物并转化成活性有机碳[31],均可以显著提高土壤有机碳的含量和储量,土壤有机碳含量明显提高,而且可以增加土壤中的微生物碳量。王丹丹等[32]研究表明,秸秆还田后水溶性有机碳可显著提高37%~74%,而易氧化态碳含量与碳库管理指数均随秸秆还田量增加而增加。但这个过程与还田年限密切相关,Jar [33]认为短期(<3 a)秸秆还田并未提高土壤有机碳含量。陈尚洪等[24]通过4年7季作物研究发现,秸秆还田土壤活性碳、微生物碳、矿化碳和碳库管理指数分别提高4.33%~52.88%、8.69%~86.62%、20.64%~60.79%和18.41%~57.12%。同时还与耕作方式关联,陈尚洪等[24]认为秸秆还田下旋耕比免耕更能改善土壤有效碳库质量,区惠平等[34]认为免耕与稻草还田相结合更有利于土壤碳的积累。

土壤有机质尤其是腐殖物质是长期腐殖化作用的产物,具有一定的稳定性,是全球碳循环的重要环节。作物秸秆富含纤维素、木质素等富碳的物质,是土壤有机质的主要来源,秸秆分解释放CO₂,促进土壤微生物固持或矿化无机碳,最终形成土壤有机质[35]。长期秸秆还田条件下,0~40 cm土层的有机质含量明显增加,其中0~10 cm的土层秸秆与化肥配施增加幅度较大。长期秸秆还田不仅有效地增加了耕层土壤有机质含量,而且也增加了土壤剖面有机质含量[36]。因此,长期的秸秆还田更有利于土壤有机质的积累及稳定。因此,秸秆还田对耕层土壤腐殖酸的总碳含量有显著影响,长期秸秆还田不仅有利于土壤腐殖质组分含量增加,而且更有利于土壤腐殖质品质改善[37]。

秸秆还田不仅增加了土壤的全量养分,也增加了速效养分,意味着作物当季可利用的有效养分比例提高,改善了土壤肥力质量,更有利于作物产量的提高。前人研究表明,秸秆还田土壤的高C/N可诱导微生物氮的固定,提高土壤的含氮量,腐殖化系数也相应较高,可增加全氮积累[38]-[40],起到了暂时保存氮素的作用,当微生物死亡后,这部分氮又可分解释放,因此,长期施用秸秆能增加微生物氮的固定[41]。土壤全磷含量均随土层深度增加而下降,土壤腐殖质能与难溶性的磷反应,增加磷的溶解度,尤其在石灰性土壤中,磷常与钙结合成不溶性的磷酸钙,而当与腐殖质作用后,生成可溶性磷酸氢钙,增加了磷有效性,易被作物吸收利用而移走[42]。长期秸秆还田能够有效增加土壤中磷素生物有效性,提高土壤磷素利用率。秸秆施用增加了磷有效性,且随植物被移走。

3.4. 对土壤团聚体形成的影响

秸秆转化形成的腐殖质在团聚体形成过程中作为重要的胶结物质有利于大团聚体的形成[43],能够显著增加土壤中大团聚体的含量及其稳定性[44]。同时秸秆腐解过程中释放养分,促进了作物根系的生长,从而通过根系增加了新鲜有机物质的输入,作物根系代谢产物使得土壤中较小的颗粒胶结成大的水稳性团聚体[45]。不同粉碎程度及C/N的秸秆还田后对土壤结构影响差异显著,长秸秆加入土壤对土壤团聚结构影响较小[46]。

不同秸秆还田模式下,土壤有机碳的增加主要体现在大团聚体碳上,这可能是有机质作为团聚体形成的主要胶结物质,通过其胶结作用将土壤颗粒和小级别团聚体胶结成大团聚体[47],因而大团聚体有机碳含量相对较多。研究表明[48] [49],长期化肥配施有机肥可增加各级团聚体有机碳的含量,特别是显著增加了水稳性大团聚体(>2 mm和0.25~2 mm)有机碳的含量;250~2000 μm级别团聚体有机碳氧化稳定性较低,这与植物枯枝落叶的新鲜有机碳先在大团聚体中固持有关[50];<53 μm级别团聚体有机碳氧化稳定性较高,这一方面与有机碳与土壤矿物质复合后提高了有机碳的稳定有关,另一方面也说明与土壤小颗粒结合的有机质主要是比较稳定的大分子腐殖物质[51]。秸秆还田对大团聚体(>250 μm)氧化稳定性有提高的作用,而对较小级别团聚体有机质氧化稳定性有降低作用[52]。

4. 展望

秸秆还田作为秸秆有效利用的一种途径，它不仅可以提高土壤中微生物量，还提高土壤中微生物的活性，并在一定程度上也使得土壤中酶活性有了一定程度的提高，利于形成一定的团粒结构，引起土壤中有有机碳，全碳、磷钾，以及速效碳、磷、钾的增加。杜绝秸秆直接焚烧、实施秸秆直接还田是增肥土壤、增强基础地力、提高土壤综合生产能力的有效措施，应大力推广，为作物高产、稳产、降耗、高效、优质、生态创造良好的条件，实现作物生产的持续稳定增长，为保证粮食安全做出贡献。但如果还田数量过大、土壤含水量不足、粉碎程度不够、翻压质量不佳等，则秸秆不能充分腐解，会影响播种质量、出苗和苗期生长。另外，秸秆中 C/N 比值较高，一般在(60~80:1)，使秸秆在土壤中分解缓慢，微生物与作物争氮，影响苗期生长，进而影响后期产量。同时，秸秆还田后土壤湿度增大，地温升高，在为作物生长提供良好条件的同时，也为某些病虫害的发生和流行创造了适宜的环境条件。加之秸秆直接还田后，秸秆中某些病菌难以移出大田而未被消灭，从而增加了病菌的数量，使病害率增加。因此，要求在秸秆直接还田时，使用无严重病虫害的秸秆，并进行合理的规划后进行适量的秸秆还田，相关机制尚需要进一步探讨。

同时生产中还应积极探索其它秸秆还田的有效技术，如秸秆有机肥化技术、秸秆生物反应技术、秸秆堆沤还田技术、秸秆沼泥化利用技术、秸秆快速腐熟还田技术等[53]，已有研究证实，应用秸秆快熟菌剂能有效提高秸秆腐熟的速率，减轻对作物幼苗生长发育的影响[54]。这些均需要进一步配套相关技术，提高秸秆转化利用的效率。

参考文献 (References)

- [1] 刘巽浩, 王爱玲, 高旺盛. 实行作物秸秆还田促进农业可持续发展[J]. 作物杂志, 1998 (5): 1-5.
- [2] 高利伟, 马林, 张卫峰, 王方浩, 马文奇, 张富锁. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173-179.
- [3] 张予燕, 陆晓波, 任兰, 孙娟. 秸秆焚烧期间空气中细颗粒的组分特征[J]. 环境监控与预警, 2011, 3(5): 38-41.
- [4] 伍德侠, 魏庆农, 魏健俐, 刘世胜, 冯巍巍. 秸秆焚烧期的碳黑气溶胶观测及研究[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3304-3309.
- [5] 陈亮, 赵兰坡, 赵兴敏. 秸秆焚烧对不同耕层土壤酶活性、微生物数量以及土壤理化性状的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 118-122.
- [6] 董水丽, 王海仓. 焚烧秸秆对土壤养分及水分的影响[J]. 陕西农业科学, 2011(3): 90-92.
- [7] 王宝山, 周景宇. 对农作物秸秆综合利用发展方向的探索[J]. 农业机械, 2009(98): 75-76.
- [8] 赵凤霞, 温晓霞, 杜世平, 王虎全, 付增光. 渭北地区残茬秸秆覆盖农田生态效应及应用技术实例[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(3): 90-95.
- [9] 陈兰详, 夏淑芬, 许松林. 小麦-玉米轮作覆盖稻草对土壤肥力及产量的影响[J]. 土壤, 1996, 28(3): 156-159.
- [10] 张崇邦, 金则新, 施时迪. 天台山不同林型土壤微生物区系及其商值(qMB,qCO₂) [J]. 生态学杂志, 2003, 22(2): 28-31.
- [11] 石磊, 赵由才, 柴晓利. 我国农作物秸秆的综合利用技术进展[J]. 中国沼气, 2005, 23(2): 11-15.
- [12] 韩晓君, 张先政. 不同作物秸秆腐熟还田对土壤理化性质及作物产量的影响分析[J]. 安徽农学通报, 2013, 19(16): 80-82.
- [13] 任仲杰, 顾孟迪. 我国农作物秸秆综合利用与经济循环[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(11): 2105-2106.
- [14] 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 48-51.
- [15] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 方永丰. 不同年限全量玉米秸秆还田对玉米生长发育及土壤理化性状的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012(3): 291-296.

- [16] Wei, S., Miller, B.E. and Stark, J.M. (2004) Microbial Nitrogen Transformations in Response to Treated Dairy Waste in Agricultural Soils. *Soil Science Society of America Journal*, **68**, 1867-1874.
- [17] 李云玲, 谢英荷, 洪坚平. 生物菌肥在不同水分条件下对土壤微生物生物量碳、氮的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(6): 790-793.
- [18] 沙涛, 程立忠, 王国华, 张之伟, 张晓林, 樊永言. 秸秆还田对植烟土壤中微生物结构和数量的影响[J]. 中国烟草科学, 2000, 21(3): 40-42.
- [19] 周文新, 陈冬林, 卜毓坚, 屠乃美. 稻草还田对土壤微生物群落功能多样性的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 326-330.
- [20] 尹睿, 张华勇, 黄锦法, 林先贵, 王俊华, 曹志洪. 保护地菜田与稻麦轮作田土壤微生物学特征的比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 57-62.
- [21] 刘骅, 林英华, 王西和, 谭新霞, 张云舒. 长期配施秸秆对灰漠土质量的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1492-1497.
- [22] 蔡晓布, 钱成, 张元, 普琼. 西藏中部地区退化土壤秸秆还田的微生物变化特征及其影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 463-468.
- [23] 刘定辉, 舒丽, 陈强, 陈尚洪, 陈红琳, 朱钟麟. 秸秆还田少免耕对冲积土微生物多样性及微生物碳氮的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(2): 158-161.
- [24] 陈尚洪, 朱钟麟, 刘定辉, 舒丽, 王昌全. 秸秆还田和免耕对土壤养分及碳库管理指数的影响研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 806-809.
- [25] 陈亚斯, 应晓成, 沈鹏飞, 徐一然, 作文刚, 单玉华. 小麦秸秆中纤维素和木质素腐解进程的差异[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2015, 36(3): 68-72.
- [26] 金海洋, 姚政, 徐四新, 杨建军. 秸秆还田对土壤生物特性的影响研究[J]. 上海农业学报, 2006, 22(1): 39-41.
- [27] 陈强龙, 谷洁, 高华, 秦清军, 甄丽莎, 陈胜男, 孙利宁. 秸秆还田对土壤脱氢酶和多酚氧化酶活性动态变化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 146-151.
- [28] Madejon, E., Moreno, F. and Murillo, J.M. (2007) Soil Biochemical Response to Long-Term Conservation Tillage under Semiarid Mediterranean Conditions. *Soil & Tillage Research*, **94**, 346-352. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2006.08.010>
- [29] 路怡青, 朱安宁, 张佳宝, 陈效民, 舒馨. 免耕和秸秆还田对小麦生长期土壤酶活性的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(3): 329-334.
- [30] 路文涛, 贾志宽, 张鹏, 王维, 侯贤清, 杨宝平, 李永平. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522-528.
- [31] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 王维, 陆文涛, 张惠, 杨宝平. 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.
- [32] 王丹丹, 周亮, 黄胜奇, 李成芳, 曹凑贵. 耕作方式与秸秆还田对表层土壤活性有机碳组分与产量的短期影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(4): 735-740.
- [33] Jar, M.L., Gathala, M.K., Ladha, J.K., et al. (2009) Evaluation of Precision Land Leveling and Double Zero-Tillage Systems in the Rice-Wheat Rotation: Water Use, Productivity, Profitability and Soil Physical Properties. *Soil Tillage Research*, **10**, 112-121.
- [34] 区惠平, 何明菊, 黄景, 朱桂玉, 顾明华, 黎晓峰, 沈方科. 稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6812-6820.
- [35] 周卫军, 王凯荣, 刘鑫. 有机物循环对红壤稻田土壤 N 矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 39-43.
- [36] 赖庆旺, 黄庆海, 李茶苟, 熊春桂. 无机肥连施对红壤性水稻土有机质消长的影响[J]. 中国土壤与肥料, 1991(1): 4-7.
- [37] 崔新卫, 张杨珠, 吴金水, 彭福元. 秸秆还田对土壤质量与作物生长的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1527-1532.
- [38] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 潘庆民. 土壤有机质对农田管理措施动态响应的[J]. 生态学报, 2003, 23(4): 787-796.
- [39] Gaunt, J.L., Neue, H.U., Cassman, K.G., et al. (1995) Microbial Biomass and Organic Matter Turn over in Wetland Rice Soils. *Biology and Fertility of Soils*, **19**, 333-342. <http://dx.doi.org/10.1007/BF00336104>
- [40] Shibahara, F. and Inubushi, K. (1995) Measurement of Microbial Bio-Mass C and N in Paddy Soils by the Fumigation-Extraction Method. *Soil Science and Plant Nutrition*, **46**, 681-689. <http://dx.doi.org/10.1080/00380768.1995.10417018>

- [41] 巨晓棠, 李生秀. 培养条件对土壤氮素矿化的影响[J]. 西北农业学报, 1997, 6(2): 64-67.
- [42] Thomsen, I.K. (1993) Turnover of ^{15}N -Straw and NH_4NO_3 in a Sandy Loam Soil: Effects of Straw Disposal and N Fertilization. *Soil Biology and Biochemistry*, **25**, 1561-1566. [http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90011-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0038-0717(93)90011-Y)
- [43] 蔡立群, 齐鹏, 张仁陟. 保护性耕作对麦-豆轮作条件下土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 141-145.
- [44] 霍琳, 武天云, 蔺海明, 曹诗瑜, 唐文雪. 长期施肥对黄土高原旱地黑垆土水稳性团聚体的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(3): 545-550.
- [45] 周萍, 潘根兴. 长期不同施肥对黄泥土水稳性团聚体颗粒态有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 256-261.
- [46] 王珍, 冯浩. 秸秆不同还田方式对土壤结构及土壤蒸发特性的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(6): 224-228.
- [47] Six, J., Elliott, E.T. and Paustian, K. (2000) Soil Macro Aggregate Turnover and Micro Aggregate Formation: A Mechanism for C Sequestration under No-Tillage Agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**, 2099-2103. [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00179-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00179-6)
- [48] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴. 不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(3): 422-429.
- [49] Bronick, C.J. and Lal, R. (2005) Manuring and Rotation Effects on Soil Organic Carbon Concentration for Different Aggregate Size Fractions on Two Soil Sin Northeastern Ohio, USA. *Soil and Tillage Research*, **81**, 239-252. <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2004.09.011>
- [50] Bravo-Garza, M.R., Voroney, P. and Bryan, R.B. (2010) Particulate Organic Matter in Water Stable Aggregates Formed after the Addition of ^{14}C -Labeled Maize Residues and Wetting and Drying Cycles in Vertisols. *Soil Biology and Biochemistry*, **42**, 953-959. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.02.012>
- [51] Liao, J.D., Boutton, T.W. and Jastrow, J.D. (2006) Organic Matter Turnover in Soil Physical Fractions Following Woody Plant Invasion of Grassland: Evidence from Natural ^{13}C and ^{15}N . *Soil Biology and Biochemistry*, **38**, 3197-3210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.04.004>
- [52] 孙汉印, 姬强, 王勇, 王旭东. 不同秸秆还田模式下水稳性团聚体有机碳的分布及其氧化稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 369-376.
- [53] 田雁飞, 马友华, 胡园园, 江云, 王桂苓. 秸秆肥料化生产的现状、问题及发展前景[J]. 中国农学通报, 2010, 26(16): 158-163.
- [54] 施凯峰, 孙光佑, 李超, 朱新开, 盛海君. 秸秆速腐还田条件下氮肥用量对小麦幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 94-96.