

秸秆还田对土壤环境影响的研究进展

董祥洲¹, 徐璨然², 朱启法¹, 陈亚奎², 高琴¹, 王学瑛¹

(1. 安徽皖南烟叶有限责任公司, 安徽宣城 242000; 2. 清华大学化学工程系, 北京 100084)

摘要 随着粮食生产技术和农村生活水平的提高, 农作物秸秆的产量和利用方式也发生了巨大的变化。秸秆直接还田是秸秆综合利用的一种有效途径, 近几年受到了广泛关注。简述了我国秸秆产量和综合利用现状, 重点分析了秸秆直接还田对土壤理化性质、营养元素、有机质、微生态以及农作物产量的积极影响, 同时讨论了秸秆还田可能给环境带来的负面影响, 并指出添加生物腐熟剂是促进秸秆快速还田的有效措施, 旨在为合理高效地利用秸秆资源提供参考。

关键词 秸秆还田; 综合利用; 土壤

中图分类号 S19 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2020)13-0001-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2020.13.001



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Research Progress on the Effects of Straw Returning to the Field on Soil Environment

DONG Xiang-zhou¹, XU Can-ran², ZHU Qi-fa¹ et al (1. Anhui Southern Tobacco Co., Ltd., Xuancheng, Anhui 242000; 2. Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract With the development of grain production technologies and the improvement of rural living standards, the yields and utilization of crop straw have also undergone great changes. Straw returning to the field is an effective way for straw comprehensive utilization which has attracted much attention in recent years. This paper described the current situation of straw yields and comprehensive utilization in China. The positive effects of straw returning to the field on soil physical and chemical properties, nutrient elements, organic matter, microecology and crop yields were analyzed. The possible negative effects of straw returning on the environment were also discussed. Adding biological-decomposition inoculant is an effective measure to promote straw rapid returning to field was pointed out, aiming to provide a reference for the rational and efficient utilization of straw resources.

Key words Straw returning; Comprehensive utilization; Soil

农作物秸秆是作物收割后留在田间的茎叶总称^[1], 一般能够占作物生物量的 50% 以上^[2], 是我国农业废弃物的重要组成部分。我国秸秆产量位居世界前列, 每年有大量秸秆未经有效利用而被丢弃, 导致各种环境问题和社会影响。20 世纪 90 年代以来, 秸秆收获后普遍在农田中被直接焚烧, 导致大量温室气体排放, 造成了严重的空气污染。同时秸秆焚烧产生的高温会杀死土壤中大量的微生物, 对土壤的生态系统造成破坏。我国早在 2000 年的《大气污染防治法》中便提出了秸秆禁烧的相关法规^[3], 目前已经全面禁止秸秆露天焚烧, 鼓励秸秆资源的综合利用, 包括秸秆的肥料化、燃料化、饲料化等。其中, 秸秆直接还田是一种节本增效的综合利用方式, 能够改善土壤生态环境, 从根本上解决秸秆焚烧带来的污染问题。

该研究拟通过我国秸秆产量的统计和秸秆综合利用方式的介绍, 重点分析秸秆还田对土壤理化性质、土壤营养、土壤有机质、土壤微生态、农作物产量以及温室气体排放的影响, 对秸秆有效还田的发展方向提出具体建议。

1 我国秸秆的产量

到目前为止, 我国还没有直接的官方统计农作物秸秆产量的数据, 基本上通过各种科学方法来进行估算, 如田间调查^[4]、收获指数(HI)^[5]、作物残茬指数(CRI)^[6]、地理信息系统(GIS)^[7]、模型计算^[8]等。目前的统计结果显示, 我国现阶段

每年的秸秆产量为 7 亿~10 亿 t。评价方法和作物生产数据的不同使得农作物秸秆总产量差异较大。以我国 2010 年的秸秆产量研究为例, Qiu 等^[9]对作物残茬量进行了计算, 并对数据进行了地理和经济分析, 评估结果显示, 2010 年全国作物秸秆总产量为 7.29 亿 t; Li 等^[10]采用区域作物特定残留指数(CRI)方法, 计算出我国主要粮食作物 2010 年的秸秆产量约为 5.06 亿 t; 郭冬生等^[11]通过《中国统计年鉴》统计出的 2010 年粮食作物秸秆产量为 7.11 亿 t。

2 秸秆的综合利用方式

秸秆作为一种可再生能源, 是我国生物质资源中最重要的组成部分, 目前秸秆的综合利用方式主要有: ①直接燃烧发电, 该技术将秸秆在锅炉中直接进行燃烧处理, 利用产生的蒸汽驱动发电机发电^[12], 对于缓解能源短缺, 促进经济循环具有重要意义。②生产乙醇, 农作物秸秆是生产生物燃料乙醇的重要来源^[13], 随着化石燃料的减少, 生物燃料的开发能够减少对化石燃料的依赖, 对缓解能源危机和环境污染具有积极作用。③制造沼气, 秸秆或秸秆与禽畜粪便经过厌氧发酵后可产生沼气, 能量利用率较高。发酵产生的沼液、沼渣等副产物是良好的有机肥料和土壤改良剂。目前也有很多研究关注与利用生物强化的方法提升沼气的发酵效率^[14-15]。④用作饲料, 农作物秸秆粗纤维含量较高, 很难被动物消化吸收。目前秸秆通常经过微生物发酵或青贮技术进行处理后作为动物的饲料使用^[16]。⑤用作肥料, 秸秆中富含有机质、氮、磷、钾等营养元素, 将秸秆与禽畜粪便收集后, 进行堆沤生产有机肥, 是改良土壤、培肥地力的有效方式。⑥直接还田, 该技术是在农作物收割时, 将秸秆进行原

基金项目 安徽皖南烟叶有限责任公司项目“秸秆原位还田与化肥减量生物技术研究与示范应用”(20170563001)。

作者简介 董祥洲(1982—), 男, 湖北荆州人, 农艺师, 硕士, 从事烟叶生产技术研发与推广工作。

收稿日期 2019-12-03

位粉碎处理,通过翻耕的方式将秸秆直接返还至土壤中。秸秆直接还田能够增加土壤有机质含量,改善土壤容重和通透性,提高土壤含水量,是一种经济高效,促进农业可持续发展的重要手段。

虽然秸秆综合利用的方式较多,促进秸秆作为工业用品的主要措施利润也较低,但秸秆在收集和运输过程中的成本较高,难以大量的推广应用。因此,在目前众多的秸秆利用方式中,秸秆直接还田是最为经济可行的技术手段。

3 秸秆还田的影响

3.1 土壤理化性质 农作物秸秆还田对土壤结构的稳定性具有积极的影响。大量研究表明,秸秆还田能够显著降低土壤容重,提高土壤总孔隙度,增加通气孔隙和毛管孔隙,减少土壤团聚体的破坏和分散,改善土壤通气状况,增加土壤保水能力,有利于形成良好的土壤团粒结构,减少土壤板结现象的产生^[17-19]。Shaver等^[20]研究表明,秸秆还田不仅能够降低土壤容重,提升土壤有效孔隙度,还能够提高水的利用率,土壤大团聚体的比例也随着秸秆还田量的增加而增加;芦伟龙等^[21]通过烟稻轮作土壤的秸秆还田试验发现,秸秆还田能够显著降低表层土壤容重,增加土壤孔隙度,与武均等^[17]的研究结果相同。

秸秆还田对土壤 pH、阳离子交换量和电导率等化学性质方面影响较小^[22]。薛斌等^[23]探讨了水稻-油菜轮作土壤中秸秆还田对土壤肥力的影响,结果表明秸秆还田对土壤 pH 影响较小,各耕作层 pH 最大变化量为 0.33。Zhao等^[24]研究表明,与有机肥相比,秸秆对土壤的 pH 和阳离子交换量无太大影响;Shaw等^[25]研究发现,在玉米-小麦-大豆轮作的土壤中,秸秆还田仅使土壤电导率增加了 5%。

3.2 土壤营养 土壤养分循环是农业可持续发展的重要途径,然而为了最大限度地提高作物产量,长期施用化肥,这导致我国土壤肥力下降,并造成严重的农业面源污染^[26]。秸秆作为农产品的天然伴生产物,其腐化后将释放大量的氮、磷、钾等营养元素。氮是作物生长所必需的营养元素,不当的耕作方法、施肥、水分管理等因素都可能会影响作物对氮元素的吸收,甚至可能造成周围水体硝酸盐污染^[27]。然而,与传统的施用化肥相比,秸秆还田能够使土壤全氮含量增加 3.2%~11.2%^[28]。在秸秆全部还田的条件下,秸秆中几乎所有的钾、大部分磷和作物所需的部分氮都可以提供给土壤。薄国栋等^[29]研究发现,秸秆能够通过释放自身养分,增加土壤中氮、磷、钾等营养元素的含量,且土壤养分指标与秸秆还田量呈正相关;徐蒋来等^[30]进行了 3 年的稻麦秸秆还田试验,在 75% 的秸秆还田量下,土壤有机质和养分的含量提高最为显著,土壤氮、磷、钾以及有机质的含量分别比对照组高 2.61%、4.05%、18.25% 和 5.90%。

3.3 土壤有机质 土壤有机质含量是衡量土壤肥力的重要指标,而 2017 年的研究数据显示,我国目前农业土壤耕作层有机质含量平均为 24.65 g/kg^[31],属中下等水平。肥料管理、保护性耕作和秸秆还田是土壤固碳最常用的措施,其中秸秆还田是最有效、最经济的方法^[32],秸秆还田的理论固碳

潜力可达 $48.2 \times 10^{12} \sim 56.2 \times 10^{12}$ g/a^[33]。Lu 等^[34]对稻田秸秆固碳潜力进行了研究,结果表明秸秆全量化还田后,可回收约 10.48×10^{12} g/a 的碳;一个 2 年期研究表明,秸秆直接还田使土壤有机碳的含量提高了 23.9%^[35];杨帆等^[36]在多地定位试验表明,正常施肥+秸秆还田使土壤有机质 1 年增加了 6.34%。有学者指出,秸秆还田对土壤有机碳含量的影响可能在短期或中期 (<3 年)较小,而连续还田 3~15 年可显著提高土壤有机碳含量,但长期秸秆还田会使土壤有机碳饱和^[37-38]。虽然种植制度、气候条件、土壤质地、地理条件和作物品种等都会对土壤有机质表现出较大的影响^[38-40],但从总体上看,秸秆还田仍是目前我国最可持续、经济可行的固碳方式。

3.4 土壤微生态 土壤生态系统的功能和稳定性取决于土壤微生物群落对养分的循环作用。土壤微生物主要包括细菌、真菌、放线菌等,是土壤生态系统中养分转化和能量循环的动力,能够促进土壤有机质的分解和腐殖质的形成,对土壤微生态的良性循环具有至关重要的作用^[41]。土壤微生物也是土壤质量最敏感的指标,土壤营养状况、环境条件以及耕作模式等均对土壤微生物的生物量和多样性影响较大。目前,化肥的过度施用是导致耕作土壤微生物群落结构和多样性遭到破坏的主要原因^[42-44]。秸秆还田能够增加土壤的能量和养分,在秸秆腐解过程中,有机质和营养元素的释放能够促进土壤微生物的生长,从而提高土壤微生物的数量和多样性。

土壤微生态功能常用的评价指标包括土壤酶活性、微生物生物量以及生物多样性等^[45]。刘艳慧等^[41]对秸秆还田后 0~60 cm 的土壤微生物量和土壤酶活性进行了连续 4 年的研究,结果表明土壤微生物总数量相比于未还田土壤增加了 19.87%~56.15%,土壤脲酶活性、蔗糖酶活性、过氧化氢酶活性均得到显著提高,说明持续的秸秆还田对土壤微生态的保持和改善作用;薄国栋等^[29]的 PCR-DGGE 检测结果显示,玉米秸秆还田量在 $7\ 500\ \text{kg}/\text{hm}^2$ 时能够显著提升烟田土壤的真菌多样性。

3.5 农作物产量 秸秆还田能够有效改善土壤结构,增加土壤有机质和养分的含量,同时为作物提供充足的碳源,达到作物增产的效果。但农作物的产量因还田秸秆种类、作物类型等的不同具有较大差异,目前关于秸秆还田是否能在短期内提高作物产量的结论并不一致。研究表明,短期的秸秆还田不会对作物产量产生显著影响^[46-47],作物产量将随秸秆还田时间的增长而得到逐步提高。Bai 等^[48]通过对小麦-玉米轮作土壤 6 年 12 季的秸秆还田定位试验发现,长期的秸秆还田使冬小麦和夏玉米的产量分别增加了 16.5% 和 13.2%,同时秸秆还田还显著增加作物对钾的吸收。另外,也有研究发现,秸秆还田短期内即可使作物增产。高天平等^[49]研究表明,在水分充足的条件下,秸秆还田当季就能够使玉米产量得到显著提高;李昊昱等^[50]研究表明,双季秸秆还田使小麦-玉米 2 个周年的平均产量增加了 14.3%。

3.6 温室气体排放 二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄) 和一氧化

二氮(N_2O)是温室气体的重要组成部分,人们普遍认为,秸秆还田为微生物提供了更有效的C和N,从而刺激土壤产生更多的 CH_4 和 N_2O ,其产生的环境效应是负面的^[51-53]。有研究指出,秸秆还田对全球变暖潜势和温室气体强度的增加作用大于传统的施肥方式^[28]。自20世纪80年代后期以来,国内外利用实地测量和模型计算等方式对秸秆还田产生的温室气体排放量进行了大量调查。从表1可以看出,不同土壤类型、秸秆类型以及还田量,温室气体排放量增加速率差

异也较大。有许多研究关注于添加硝化抑制剂使秸秆还田过程中温室气体排放量最小化。Ma等^[54]利用双氰胺(DCD)和氯化十六烷吡啶(CP)作为硝化抑制剂,对小麦生长季稻田 N_2O 的排放和作物产量进行了测定,硝化抑制剂使 N_2O 的排放量减少了67.7%,小麦平均增产9.7%。Liu等^[55]在小麦-玉米轮作土壤上施用双氰胺(DCD)和3,4-二甲基吡啶磷酸盐(DMPP)作为硝化抑制剂,分别使 N_2O 的年排放量降低35%和38%。

表1 秸秆还田对温室气体排放的影响

Table 1 Effect of straw returning on the emission of greenhouse gases

序号 No.	土壤类型 Soil type	秸秆类型 Straw type	还田量 Amount of land returned	温室气体 Greenhouse gases	增加速率 Increase rate/%	参考文献 Reference
1	稻田	水稻	12 t/hm ²	CH ₄	200.00	[56]
2	稻田	水稻	3 t/hm ²	CH ₄	59.00	[57]
3	稻田	水稻	50%还田量	CH ₄	57.25	[34]
4	稻田	水稻	6 t/hm ²	CH ₄	210.00	[58]
5	冷浸田	水稻	6 t/hm ²	CH ₄	139.00	[28]
6	小麦-玉米轮作田	玉米	—	N ₂ O	27.90	[59]
7	冷浸田	水稻	6 t/hm ²	N ₂ O	22.20	[28]
8	玉米田	玉米	4 t/hm ²	N ₂ O	37.53	[60]
9	玉米田	玉米	8 t/hm ²	N ₂ O	73.89	[60]

4 结语

秸秆直接还田是秸秆还田方式中应用最为广泛的一种,在我国已得到大力推广,但由于我国对粮食的需求量巨大,在目前的种植模式下,秸秆降解时间短,在土壤中不能完全腐化,影响下茬作物播种,不利于作物根系对营养物质的吸收,严重时甚至导致作物减产。针对秸秆还田的现状,可通过加入生物腐熟剂的方式增加秸秆在土壤中的降解速率和秸秆还田量。Qin等^[61]在玉米秸秆还田的过程中添加了蜡芽孢杆菌,二者的协同作用促进了秸秆的腐解,显著增加了土壤腐殖酸和有机质的含量;Han等^[62]研究了外源纤维素酶对秸秆分解、土壤肥力和作物生长的影响,结果显示应用纤维素酶能够使水稻秸秆和小麦秸秆的分解速度分别提高6.3%~26.0%和6.8%~28.0%,盆栽试验中土壤速效氮和速效磷含量以及水稻幼苗的生长均有提高,并且土壤的呼吸速率和微生物菌群没有受到影响。我国的气候条件、土壤类型、耕作方式和耕作制度等都很多样化,有必要对秸秆还田量和还田方式进行长期的实地综合调查和评价,从而在提升土壤环境质量的同时增加农作物产量,实现农业的绿色可持续发展。

参考文献

[1] 周江明,徐大连,薛才余. 稻草还田综合效益研究[J]. 中国农学通报, 2002, 18(4): 7-10.
 [2] 伍玉鹏,彭其安, MUHAMMAD SHAABAN, 等. 秸秆还田对土壤微生物影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(29): 175-183.
 [3] 毕于运,高春雨,王红彦, 等. 农作物秸秆综合利用和禁烧管理国家法规综述与立法建议[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(8): 1-10.
 [4] 毕于运,王亚静,高春雨. 中国主要秸秆资源数量及其区域分布[J]. 农机化研究, 2010(3): 1-7.
 [5] DAI J, BEAN B, BROWN B, et al. Harvest index and straw yield of five classes of wheat[J]. Biomass & bioenergy, 2016, 85: 223-227.
 [6] 朱建春,李荣华,杨香云, 等. 近30年来中国农作物秸秆资源量的时空

分布[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 139-145.
 [7] JIANG D, ZHUANG D F, FU J Y, et al. Bioenergy potential from crop residues in China: Availability and distribution[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2012, 16(3): 1377-1382.
 [8] YOU L Z, WOOD S, WOOD-SICHRA U, et al. Generating global crop distribution maps: From census to grid[J]. Agricultural systems, 2014, 127: 53-60.
 [9] QIU H G, SUN L X, XU X L, et al. Potentials of crop residues for commercial energy production in China: A geographic and economic analysis[J]. Biomass & bioenergy, 2014, 64: 110-123.
 [10] LI H, CAO Y, WANG X M, et al. Evaluation on the production of food crop straw in China from 2006 to 2014[J]. Bioenergy research, 2017, 10(3): 949-957.
 [11] 郭冬生,黄春红. 近10年来中国农作物秸秆资源量的时空分布与利用模式[J]. 西南农业学报, 2016, 29(4): 948-954.
 [12] 孙金华. 农作物秸秆综合利用技术[J]. 农业工程技术, 2017(9): 33.
 [13] SOLOMON B D, BARNES J R, HALVORSEN K E. Grain and cellulosic ethanol: History, economics, and energy policy[J]. Biomass & bioenergy, 2007, 31(6): 416-425.
 [14] 祝其丽,王彦伟,谭芙蓉, 等. 复合菌系预处理和强化对玉米秸秆沼气发酵效率的影响[J]. 中国沼气, 2019, 37(4): 11-17.
 [15] 赵凯,刘悦,倪振松, 等. 小球藻与小麦秸秆联合厌氧消化产沼气研究[J]. 中国沼气, 2019, 37(4): 67-71.
 [16] 陈璐,帅正彬,姚雅韦, 等. 秸秆原料综合利用的研究进展[J]. 四川农业科技, 2015(12): 37-43.
 [17] 武均,蔡立群,罗珠珠, 等. 保护性耕作对陇中黄土高原雨养农田土壤物理性状的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 112-117.
 [18] 吴婕,朱钟麟,郑家国, 等. 秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响[J]. 西南农业学报, 2006, 31(2): 192-195.
 [19] 李小刚,崔志军,王玲英. 施用秸秆对土壤有机碳组成和结构稳定性的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(3): 421-428.
 [20] SHAVER T M, PETERSON G A, AHUJA L R, et al. Surface soil physical properties after twelve years of dryland no-till management[J]. Soil science society of america journal, 2002, 66(4): 1296-1303.
 [21] 芦伟龙,董建新,宋文静, 等. 土壤深耕与秸秆还田对土壤物理性状及烟叶产质量的影响[J]. 中国烟草科学, 2019, 40(1): 25-32.
 [22] BLANCO-CANQUI H, LAL R. Crop residue removal impacts on soil productivity and environmental quality[J]. Critical reviews in plant sciences, 2009, 28(3): 139-163.
 [23] 薛斌,殷志遥,肖琼, 等. 稻-油轮作条件下长期秸秆还田对土壤肥力

- 的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(7): 134-141.
- [24] ZHAO Y C, WANG P, LI J L, et al. The effects of two organic manures on soil properties and crop yields on a temperate calcareous soil under a wheat-maize cropping system[J]. European journal of agronomy, 2009, 31(1): 36-42.
- [25] SHAW J N, MASK P L. Crop residue effects on electrical conductivity of Tennessee Valley soils[J]. Communications in soil science and plant analysis, 2003, 34(5/6): 747-763.
- [26] YIN H J, ZHAO W Q, LI T, et al. Balancing straw returning and chemical fertilizers in China: Role of straw nutrient resources[J]. Renewable & sustainable energy reviews, 2018, 81: 2695-2702.
- [27] FOWLER D, PYLE J A, RAVEN J A, et al. The global nitrogen cycle in the twenty-first century: Introduction[J/OL]. Philosophical transactions of the royal society B-Biological sciences, 2013, 368(1621) [2019-05-25]. https://www.researchgate.net/publication/236949437_The_global_nitrogen_cycle_in_the_twenty-first_century_Introduction. DOI: 10.1098/rstb.2013.0165.
- [28] CUI Y F, MENG J, WANG Q X, et al. Effects of straw and biochar addition on soil nitrogen, carbon, and super rice yield in cold waterlogged paddy soils of North China[J]. Journal of integrative agriculture, 2017, 16(5): 1064-1074.
- [29] 薄国栋, 申国明, 张继光, 等. 秸秆还田对植烟土壤养分及真菌群落多样性的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 137-142.
- [30] 徐蒋来, 胡乃娟, 朱利群. 周年秸秆还田量对麦田土壤养分及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(2): 215-222.
- [31] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近30年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1047-1056.
- [32] LU F, WANG X K, HAN B, et al. Net mitigation potential of straw return to Chinese cropland: Estimation with a full greenhouse gas budget model[J]. Ecological applications, 2010, 20(3): 634-647.
- [33] LU F. How can straw incorporation management impact on soil carbon storage? A meta-analysis[J]. Mitigation and adaptation strategies for global change, 2015, 20(8): 1545-1568.
- [34] LU F, WANG X K, HAN B, et al. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. Chinese journal of applied ecology, 2010, 21(1): 99-108.
- [35] 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.
- [36] 杨帆, 李荣, 崔勇, 等. 我国南方秸秆还田的培肥增产效应[J]. 中国土壤与肥料, 2011(1): 10-14.
- [37] LIU C, LU M, CUI J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. Global change biology, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [38] LU F, WANG X K, HAN B, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland[J]. Global change biology, 2009, 15(2): 281-305.
- [39] SUN W J, HUANG Y, ZHANG W, et al. Carbon sequestration and its potential in agricultural soils of China[J]. Global biogeochemical cycles, 2010, 24(3): 1-12.
- [40] PAN G X, XU X W, SMITH P, et al. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring[J]. Agriculture ecosystems & environment, 2010, 136(1/2): 133-138.
- [41] 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.
- [42] GE Y, ZHANG J B, ZHANG L M, et al. Long-term fertilization regimes affect bacterial community structure and diversity of an agricultural soil in Northern China[J]. Journal of soils and sediments, 2008, 8(1): 43-50.
- [43] SHU Y H, ZHANG Y Y, ZENG H L, et al. Effects of Cry1Ab Bt maize straw return on bacterial community of earthworm *Eisenia fetida* [J]. Chemosphere, 2017, 173: 1-13.
- [44] ZHAO J, NI T, XUN W B, et al. Influence of straw incorporation with and without straw decomposer on soil bacterial community structure and function in a rice-wheat cropping system[J]. Applied microbiology and biotechnology, 2017, 101(11): 4761-4773.
- [45] ROGERS B F, TATE R L. Temporal analysis of the soil microbial community along a toposequence in Pineland soils[J]. Soil biology & biochemistry, 2001, 33(10): 1389-1401.
- [46] 顾克军, 张传辉, 顾东洋, 等. 短期不同秸秆还田与耕作方式对土壤养分与稻麦周年产量的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(6): 1408-1413.
- [47] 乔玉强, 曹承富, 赵竹, 等. 秸秆还田与肥料运筹对冬小麦 皖麦 52 产量性状的调控效应[J]. 中国农学通报, 2013, 29(24): 101-104.
- [48] BAI Y L, WANG L, LU Y L, et al. Effects of long-term full straw return on yield and potassium response in wheat-maize rotation[J]. Journal of integrative agriculture, 2015, 14(12): 2467-2476.
- [49] 高天平, 张春, 刘文涛, 等. 秸秆还田方式与灌溉量对土壤碳环境和玉米产量的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(6): 108-112.
- [50] 李昊昱, 孟兆良, 庞党伟, 等. 周年秸秆还田对农田土壤固碳及冬小麦-夏玉米产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(6): 893-903.
- [51] 邹国元, 张福锁, 陈新平, 等. 秸秆还田对旱地土壤反硝化的影响[J]. 中国农业科技导报, 2001, 3(6): 47-50.
- [52] WANG N, YU J G, ZHAO Y H, et al. Straw enhanced CO₂ and CH₄ but decreased N₂O emissions from flooded paddy soils: Changes in microbial community compositions[J]. Atmospheric environment, 2018, 174: 171-179.
- [53] THANGARAJAN R, BOLAN N S, TIAN G, et al. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil[J]. Science of the total environment, 2013, 465: 72-96.
- [54] MA Y C, SUN L Y, ZHANG X X, et al. Mitigation of nitrous oxide emissions from paddy soil under conventional and no-till practices using nitrification inhibitors during the winter wheat-growing season[J]. Biology and fertility of soils, 2013, 49(6): 627-635.
- [55] LIU C Y, WANG K, ZHENG X H. Effects of nitrification inhibitors (DCD and DMPP) on nitrous oxide emission, crop yield and nitrogen uptake in a wheat-maize cropping system[J]. Biogeosciences, 2013, 10(4): 2427-2437.
- [56] SCHUTZ H, HOLZAPFELPSCHORN A, CONRAD R, et al. A 3-year continuous record on the influence of daytime, season, and fertilizer treatment on methane emission rates from an Italian rice paddy[J]. Journal of geophysical research-atmospheres, 1989, 94(D13): 16405-16416.
- [57] WANG J Y, ZHANG X L, XIONG Z Q, et al. Methane emissions from a rice agroecosystem in South China: Effects of water regime, straw incorporation and nitrogen fertilizer[J]. Nutrient cycling in agroecosystems, 2012, 93(1): 103-112.
- [58] YAN X Y, YAGI K, AKIYAMA H, et al. Statistical analysis of the major variables controlling methane emission from rice fields[J]. Global change biology, 2005, 11(7): 1131-1141.
- [59] HUANG T, GAO B, CHRISTIE P, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in a double-cropping cereal rotation as affected by nitrogen and straw management[J]. Biogeosciences, 2013, 10(12): 7897-7911.
- [60] JIANG C M, YU W T, MA Q, et al. Alleviating global warming potential by soil carbon sequestration: A multi-level straw incorporation experiment from a maize cropping system in Northeast China[J]. Soil & tillage research, 2017, 170: 77-84.
- [61] QIN S J, JIAO K B, LYU D, et al. Effects of maize residue and cellulose-decomposing bacteria inocula on soil microbial community, functional diversity, organic fractions, and growth of *Malus hupehensis* Rehd. [J]. Archives of agronomy and soil science, 2015, 61(2): 173-184.
- [62] HAN W, HE M. The application of exogenous cellulase to improve soil fertility and plant growth due to acceleration of straw decomposition[J]. Bioresource technology, 2010, 101(10): 3724-3731.