

曾宪楠, 高斯侗, 冯延江, 等. 水稻秸秆还田对土壤培肥及水稻产量的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 13–16.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.18.004

# 水稻秸秆还田对土壤培肥及水稻产量的影响研究进展

曾宪楠<sup>1</sup>, 高斯侗<sup>2</sup>, 冯延江<sup>1</sup>, 孙羽<sup>1</sup>, 宋秋来<sup>1</sup>, 王麒<sup>1</sup>

(1. 黑龙江省农业科学院耕作栽培研究所/农业部东北地区作物栽培科学观测试验站, 黑龙江哈尔滨 150086;

2. 东北农业大学农学院, 黑龙江哈尔滨 150030)

**摘要:**黑龙江省是我国的农业大省, 具有丰富的水稻秸秆资源, 但目前仍有大部分水稻秸秆被焚烧或废弃, 不但没有充分发挥出水稻秸秆的利用价值, 还会造成环境污染, 不利于农业的可持续发展。目前, 黑龙江省耕地土壤退化, 致使作物产量下降, 因此, 借助水稻秸秆还田来修复土壤、培肥地力是当前的首要任务。从水稻秸秆还田技术、水稻秸秆还田对培肥土壤的作用及产量的影响等方面综合叙述了水稻秸秆还田的研究进展, 为今后黑龙江省水稻秸秆还田技术发展提供一定的理论依据。

**关键词:** 秸秆还田; 土壤肥力; 产量; 水稻; 研究进展

**中图分类号:** S141.4; S511.06

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-1302(2018)18-0013-04

秸秆含有大量的有机物质, 是农业生产过程中重要的环保资源之一, 也是现在我国大力倡导的肥源。我国是农业大国, 秸秆产量居世界前列, 约占全球的 1/5, 但我国对秸秆的综合利用率较低, 大部分秸秆依然采用传统的焚烧处理方式, 不仅没有使秸秆资源得到有效利用, 还造成了环境污染, 破坏了农业生态系统平衡。改革开放以来, 我国的粮食产量不断提高, 随之带来的作物秸秆产量也相应提高, 大量剩余秸秆无法得到有效处理。近几年来, 秸秆资源的利用已经越来越受到人们的重视。一般认为, 秸秆还田处理可以使秸秆资源得到充分利用, 可以适当减少因焚烧秸秆带来的环境问题。目前, 秸秆还田是我国乃至全世界都在研究的重要方向。本研究针对水稻秸秆还田对稻田土壤理化性质、土壤微生物含量、酶活性和水稻产量的影响进行了综述, 旨在为合理、高效地利用水稻秸秆资源、实现水稻高产的目标提供参考。

## 1 水稻秸秆还田技术

收稿日期: 2017-12-28

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2016YFD0300204); 哈尔滨市科技创新人才项目(编号: 2017RAQYJ038); 黑龙江省农委体系项目(编号: [2017]1 号)。

作者简介: 曾宪楠(1985—), 女, 黑龙江绥化人, 硕士, 助理研究员, 从事水稻耕作栽培研究。E-mail: zengxiannanxzn@163.com。

通信作者: 王麒, 博士, 副研究员, 从事水稻耕作栽培研究。E-mail: neauwq@163.com。

性[J]. 干旱区研究, 2001, 18(1): 46–48.

[47] 李永明, 孙玉新, 刘德辉. 施硒对药用菊花主要有效成分和花中硒含量的影响[J]. 土壤, 2010, 42(4): 618–623.

[48] 刘玉新, 于德花, 常尚连. 黄河三角洲盐渍土罗布麻栽培技术[J]. 湖北农业科学, 2010, 49(9): 2175–2176.

[49] 陈莉艳, 魏晓敏, 张秀双, 等. 滨海盐碱地区罗布麻栽培技术研究[J]. 现代农业科技, 2012(2): 63–64.

[50] 韩喜财. 罗布麻在大庆苏打盐碱地的人工引种及综合利用展望

## 1.1 水稻秸秆还田量

水稻产量、土壤性状会受到秸秆还田量的影响, 因还田量的大小而不同, 但秸秆的还田量并不是越多越好, 应该在一个适宜的范围内。秸秆还田量过多会导致秸秆不能充分腐烂, 作物难以吸收养分, 影响作物的生长发育甚至造成减产, 还田量过少会影响土壤的改良效果。适宜还田量的确定, 不仅要考虑作物品种, 还要考虑土壤条件、耕作方式和稻田环境等。已有试验发现, 土壤微生物的含量受到不同秸秆还田量的影响<sup>[1]</sup>, 无论秸秆半量还是全量还田处理, 土壤微生物量与秸秆不还田相比均会提高, 并且全量还田处理大于半量还田处理, 在连续三季秸秆还田后, 微生物含量仍会提高。

## 1.2 秸秆还田方式

我国常见的秸秆还田方式有粉碎翻压、覆盖、留高茬等。作物收获后, 秸秆通过收割机等机械粉碎后直接翻耕入土, 在微生物和酶的共同作用下腐烂分解, 使土壤有机质含量提高, 这种还田方式称为秸秆粉碎翻压还田, 此方式秸秆处理量大且成本低、效率高, 适合大面积推广。秸秆覆盖还田是将粉碎或未粉碎的秸秆直接覆盖在土表, 并配套相应的农业措施, 可以保护土壤, 减少水分和养分流失。留高茬还田是指在水稻收割时, 基部留下一定长度的茎秆, 通过翻耕灭茬, 让秸秆自然腐解, 以达到疏松土壤、提高土壤有机质含量目的的一项综合配套技术。作为保护性耕作措施, 留高茬还田可以提高秸秆还田利用率, 改良土壤理化性质<sup>[2]</sup>。

## 1.3 秸秆还田机械

随着我国城市化进程的加速, 农村劳动力不断流失, 农业

[J]. 黑龙江科学, 2014, 5(8): 17–18.

[51] 田秀英, 王正银. 硒对苦荞硒、总黄酮和芦丁含量、分布与累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 721–727.

[52] 汤璐, 林江辉, 闫广轩, 等. 铜、锌、硒对药用菊花主要有效成分和花中硒含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1475–1480.

[53] 吕海洋, 田长彦, 王梓宇, 等. 外源硒对罗布麻幼苗生长及光合作用的影响[J]. 干旱区地理(汉文版), 2015, 38(1): 83–89.

机械化已经是大势所趋,推广机械化秸秆还田,可以减少人工、提高效率、省时省力,并且粉碎后的秸秆与土壤接触面积增大,使腐解速度加快,营养成分得到充分的利用。要实施水稻秸秆还田,首先要采用联合收割机进行作物秸秆的收割,联合收割机可以使作物收获和秸秆还田过程同时进行,降低了作业成本。秸秆粉碎后,一般使用旋耕整地机作业,其中反转灭茬旋耕机覆盖率高并且耕深作业后的田面平整,易于播种,可以进行大面积推广。同时,还有旋耕播种施肥复式作业机,一次作业可完成多种工序。在秸秆机械化还田的过程中,除了必要的还田机械,通常还会应用中大型的拖拉机与之相配,以实现还田、耕地和整地一次性完成的目标<sup>[3]</sup>。

## 2 秸秆还田对稻田土壤理化性质的影响

### 2.1 土壤物理性状

在稻田土壤中,土壤形态结构、腐殖质含量和土壤的松紧状况影响着土壤颗粒的凝结,体现了土壤中水、肥、气、热等因素的变化和供应情况,一般以土壤容重、孔隙度和团聚体等物理性状来表示,体现了土壤的肥力。研究表明,土壤微生物的活动、土壤养分的转化与供应乃至作物的生长都离不开良好的通气透水条件<sup>[4]</sup>。其中,土壤养分转移和作物根系生长受土壤容重和孔隙度的影响。土壤水分和养分的储存由土壤团聚体提供场所。大多数研究表明,秸秆覆盖还田会降低土壤容重、增加孔隙度和通气状况,有利于形成良好的土壤团粒结构。秸秆覆盖还田后,因为秸秆的密度小于土壤,所以土壤密度和容重会降低,同时地表裸露减少,土壤结构不易受到外界影响,还会降低土壤容重,使土壤总孔隙度提高,减少土壤“板结”现象<sup>[5]</sup>。还有研究表明,秸秆还田可以使土壤中水稳性大团聚体( $>0.25\text{ mm}$ )增加、土壤 MWD (mean weight diameter,平均质量直径)和 GMD (geometric mean diameter,几何平均直径)提高<sup>[6]</sup>。

### 2.2 土壤有机质含量

土壤中的大量营养元素来自于土壤中的有机质,有机质含量可以体现土壤的肥力大小。在一定范围内,土壤肥力随有机质含量增加而提高。秸秆还田能够促进土壤有机质的形成。王志民等提出,免耕秸秆覆盖还田、翻耕秸秆还田能提高土壤有机质含量<sup>[7]</sup>。根茬和秸秆所形成的土壤有机碳含量高于矿化量时,土壤有机质含量将会提高,与秸秆不还田相比,全量还田和半量还田处理的有机质含量更高<sup>[8]</sup>。土壤有机质与土壤的结构性、通气性、渗透性、吸附性、缓冲性有密切的关系。土壤中的有机质分解时可以提供作物生长所需的养分,产生多种有机酸,有利于某些养分的有效化,最终提高作物的产量和品质。在农业生产中,提高作物产量是首要任务,因此应该提高土壤有机质含量。

### 2.3 土壤氮、磷、钾含量

秸秆还田可以提供植物生长所必需的氮、磷、钾等大量元素,是土壤养分的重要来源之一。土壤氮含量是衡量土壤肥力的重要指标之一。已有研究显示,秸秆有机物料的还田,使稻田土壤中的氮和生物量碳含量显著提高<sup>[9]</sup>。李凤博等研究表明,秸秆还田使土壤全氮含量显著提高<sup>[10]</sup>。李月华等提出,秸秆直接还田处理后,随着还田年限增加,土壤碱解氮含量也相应提高<sup>[11]</sup>。土壤中的磷与氮相比含量较低,秸秆还田

也可以提高土壤磷的含量。洪春来等研究表明,秸秆还田使土壤速效磷的含量显著提高,但不随还田年限的增长而对速效磷含量有显著影响<sup>[12]</sup>。徐国伟等研究表明,秸秆还田可以提高土壤全磷的含量<sup>[13]</sup>。土壤中的钾一般随作物的收获而流失,秸秆还田可以缓解土壤中钾的流失。已有研究表明,秸秆还田可以使土壤可溶性钾的含量提高<sup>[13]</sup>;同时也有研究显示,秸秆还田使土壤速效钾含量显著提高<sup>[14]</sup>。

### 2.4 土壤微量元素含量

已有相关研究表明,秸秆中富含大量的微量元素,可以促进作物的生长发育,解决目前农业生产上缺乏相应微量元素的问题。李本银等提出,秸秆还田处理使土壤 Cu、Zn 的含量显著提高,对土壤 Fe、Mg 的含量影响相对不显著<sup>[15]</sup>。徐国伟等则提出,秸秆还田使土壤  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的含量降低<sup>[13]</sup>。已有研究表明,秸秆直接还田可以显著提高土壤有效铁含量,对有效镁、有效铜和有效锌影响不显著<sup>[11]</sup>。但也有研究认为,秸秆粉碎还田配施化肥可以使砂浆黑土 Mn、Zn 和 Cu 的生物有效性显著提高<sup>[16]</sup>。同时,水稻中含有大量的 Si,作为秸秆还田后可促进后茬水稻植株对 Si 的吸收。

### 2.5 土壤碳氮比

前人研究表明,当 C/N 为 25 : 1 时比较有利于土壤微生物分解,但是 C/N 过高的作物例如小麦(60 : 1),还田后一段时间内会减少土壤的 N 含量<sup>[17]</sup>。无论是何种作物秸秆,还田后均会导致作物减产,这是因为秸秆中 C/N 高(大麦)或者是秸秆本身生物量氮含量低(油菜),也可能是秸秆与作物吸氮量缺乏同步<sup>[18]</sup>。农作物秸秆还田会影响土壤氮素的含量,氮素容易在高 C/N 的作物秸秆还田处理下被固定在土壤中。已有研究显示,单施 C/N 高的有机物料会造成土壤氮的缺乏<sup>[19]</sup>。因此,在秸秆直接还田时,通常配施一定量无机氮肥,用以补充土壤。当氮肥料以及低质量(C/N 比  $>42 : 1$ )的秸秆残渣还田时,氮素损失降低<sup>[20]</sup>。过高的施氮量容易造成土壤氮磷比(N/P)失调,抑制秸秆的腐烂<sup>[21]</sup>。同时,其他的有机材料和化学肥料也利于土壤碳含量的补充和理化性质的改善。

### 2.6 土壤微生物含量

土壤微生物的多样性和群落结构可以体现出一个农田生态系统的基本情况,是反映土壤肥力的有效生物学指标。土壤微生物可以在根际中连接作物与土壤,参与土壤中的能量和物质循环,提高土壤中营养元素的转化速率。秸秆还田可以促进微生物生长繁殖,使土壤微生物的活性提高,尤其是真菌和细菌比例的提高<sup>[22]</sup>,导致土壤微生物群落结构的改变<sup>[23]</sup>。已有研究显示,秸秆还田会显著影响土壤细菌结构及其多样性<sup>[24]</sup>。

李鹏等通过试验表明,水稻秸秆还田可以使土壤真菌群体数量和多样性指数提高,土壤有机碳含量、pH 值和速效磷含量是影响土壤真菌群落结构及多样性变化的主要原因<sup>[25]</sup>。刘建国等发现,随着秸秆还田年限的增加,土壤微生物总数呈先减少后增加的趋势,与短期相比,长期连作与秸秆还田条件下,土壤生物性状趋于好转,生物多样性指数增加,细菌、放线菌数量增加,而真菌所占比例下降<sup>[26]</sup>。大多数研究认为,土壤中有效氮含量与微生物数量有关,一定含量的有效氮有利于微生物的繁殖,提高秸秆腐解速率<sup>[27]</sup>,原因是微生物合成

新的细胞体需要一定量的碳素和氮素,这些都可以从秸秆腐烂分解后获得<sup>[28]</sup>。钱海燕等研究表明,秸秆还田与微生物菌剂配施、平衡施肥可以促进土壤微生物群落物种个体数增加、分布更均匀<sup>[29]</sup>。微生物菌剂可以使秸秆腐解速度加快,提高土壤有效氮含量<sup>[30]</sup>。

### 2.7 土壤酶活性

土壤中的生物化学反应之所以能够持续进行,是因为有土壤酶这种生物催化剂参与其中。土壤酶是存在于土壤中各酶类的总称,是土壤的组成成分之一。大多数土壤酶来自土壤中的动植物和微生物的活体或残体,有利于土壤生态系统的物质循环和能量流动。土壤酶活性是土壤的本质属性,土壤酶活性大小是土壤肥力的重要指标<sup>[30]</sup>。土壤酶活性受到土壤理化性质、土壤养分、微生物含量、人为因素等多种因素的影响。目前,在土壤中已经发现 50 ~ 60 种酶,其中研究较多的有氧化还原酶、转化酶和水解酶等。

大多数研究表明,不同秸秆还田量处理后,土壤酶活性均高于对照处理<sup>[31]</sup>。王倩倩等发现,秸秆还田配施氮肥可以影响土壤酶活性,但配施氮肥的比例不同对其影响并不显著<sup>[32]</sup>。杨滨娟等试验结果显示,秸秆还田配施不同比例化肥,各处理的转化酶活性均显著高于对照,提高了 15.41% ~ 98.69%<sup>[33]</sup>。马春梅等研究表明,从水稻插秧到收获期,秸秆还田配合施肥处理土壤脲酶活性呈先降再升最后降低的趋势,这可能是受到分蘖肥的影响<sup>[34]</sup>。土壤中的微生物、有机质和氮素的含量都会影响土壤脲酶的活性<sup>[35]</sup>,尤其是氮肥施用能够显著提高土壤脲酶活性<sup>[36]</sup>。与秸秆不还田相比,秸秆还田处理脲酶活性显著下降,高量还田处理比低量还田处理脲酶活性降低,但没有显著差异。汪成忠等发现,土壤脲酶与过氧化氢酶活性极显著相关,这显示出土壤脲酶和过氧化氢酶两者之间存在一些共性<sup>[37]</sup>。闫超等的研究表明,秸秆还田处理降低了土壤脲酶的活性,提高了蔗糖酶活性,对酸性磷酸酶和过氧化氢酶无明显影响<sup>[38]</sup>。但同时战厚强等的试验结果显示,无论是酸、碱还是中性磷酸酶活性,秸秆还田处理均显著高于不还田处理<sup>[39]</sup>,这可能与土壤的 pH 有关,土壤磷酸酶活性极易受到土壤 pH 的影响。

### 3 秸秆还田对水稻产量的影响

秸秆还田后经腐烂分解可以为土壤提供大量的氮、磷、钾等营养元素,同时土壤的微生物数量也随之提高,理化性质得到改善,有利于作物的生长<sup>[40]</sup>,最直接的作用体现在水稻产量的提高。王会斌等研究表明,无论是秸秆半量还是全量还田,水稻籽粒产量均显著提高<sup>[41]</sup>。刘晓霞等连续 4 年秸秆还田试验表明,秸秆还田是提高土壤肥力和增加作物产量的有效途径,并且秸秆还田对作物增产和耕地质量的提升效应随着实施年限的增加而越发突出<sup>[42]</sup>。王飞军等通过秸秆快速腐熟技术试验提出,相比传统秸秆还田,早稻秸秆还田加施腐熟剂的产量平均增加 13.8%;同时,与不还田对照相比,秸秆还田使土壤有机质含量显著提高,其增幅为 0.2% ~ 7.0%<sup>[43]</sup>。杨滨娟等试验结果表明,秸秆还田配施不同比例的化肥可以加快作物植株干物质积累的速度,提高作物群体生物量,使土壤养分得到显著改善,提高水稻的增产潜力<sup>[44]</sup>。韩新忠等研究分析表明,水稻的产量受土壤酶含量和微生物

的碳、氮含量的影响显著,土壤酶活性和微生物量碳可以在一定程度上反映土壤的肥力,是衡量优良土壤质量的指标,同时体现了水稻的生长离不开氮素<sup>[31]</sup>。

### 4 展望

秸秆作为有机肥料的来源之一,具有大量的营养物质。秸秆焚烧处理不仅会造成资源浪费,还会污染空气,危害人们的健康,进行秸秆还田相关的研究刻不容缓。近几年来,关于秸秆还田对作物产量与土壤的影响方面已有大量的学者进行了相应的研究。大多数研究结果表明,秸秆还田有利于促进农业生态系统的稳定,改良土壤的理化性质,使土壤的养分和有机质含量提高,土壤微生物和酶的活性提高等。但是,相应的问题也随之出现,例如秸秆还田增大了土壤的孔隙度,有时会造成跑风现象;土壤微生物的增加与作物争夺营养,影响作物生长;秸秆还田促进 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 等温室气体的排放等问题。

今后,应加强以下几个方面的工作:(1)不同的栽培和秸秆还田方式对土壤理化性质的影响还不明确,目前的农业生产大部分以传统的耕作方式为主,这直接或间接地影响了秸秆还田后的成效,因此,须要加强秸秆还田与相应配套栽培措施的研究。(2)秸秆还田后,土壤微生物的种类和数量发生了一定的变化,目前大多数研究集中在优势土壤微生物,由于土壤生态系统是一个复杂的由多种因素影响的系统,因此对秸秆还田下土壤微生物学效应研究有待深入。(3)已有大量研究表明,秸秆还田会增加温室气体的排放<sup>[45-46]</sup>,但稻田温室气体的排放是多种因素综合作用的结果,因此,可以将研究重点放在减量施肥和提高养分利用率等方面,有利于促进农业的可持续发展。

### 参考文献:

- [1] 强学彩,袁红莉,高旺盛. 秸秆还田量对土壤 CO<sub>2</sub> 释放和土壤微生物量的影响[J]. 应用生态学报,2004,15(3):469-472.
- [2] 葛宜元,魏天路,李亚芹,等. 黑龙江省秸秆还田技术模式及可行性分析[J]. 农机使用与维修,2012(6):33-35.
- [3] 蔡井田. 水稻秸秆机械化全量快腐还田技术[J]. 吉林农业,2014(9):38.
- [4] 徐永刚,马强,周桦,等. 秸秆还田与深松对土壤理化性状和玉米产量的影响[J]. 土壤通报,2015,46(2):428-432.
- [5] 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.
- [6] 杨如萍,郭贤仕,吕军峰,等. 不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持学报,2010,24(1):252-256.
- [7] 王志民,薛国祥,陈岗,等. 长期定位试验免耕覆盖对稻田土壤性状及作物产量的影响研究[J]. 西昌学院学报(自然科学版),2010,24(1):1-4.
- [8] 钟杭,张勇勇,林潮澜,等. 麦稻秸秆全量整草免耕还田方法和效果[J]. 土壤肥料,2003(3):34-37.
- [9] 吴景贵,王明辉,任成礼,等. 非腐解有机物培肥对水田土壤水解酶活性动态变化的影响[J]. 土壤通报,1998,29(6):253-256.
- [10] 李凤博,牛永志,高文玲,等. 耕作方式和秸秆还田对直播稻田土壤理化性质及其产量的影响[J]. 土壤通报,2008,39(3):

- 549–552.
- [11] 李月华,郝月皎,李娟娟,等. 秸秆直接还田对土壤养分及物理性状的影响[J]. 河北农业科学,2005,9(4):25–27.
  - [12] 洪春来,魏幼章,黄锦法,等. 秸秆全量直接还田对土壤肥力及农田生态环境的影响研究[J]. 浙江农业大学学报(农业与生命科学版),2003,29(6):627–633.
  - [13] 徐国伟,段 骅,王志琴,等. 麦秸还田对土壤理化性质及酶活性的影响[J]. 中国农业科学,2009,42(3):934–942.
  - [14] 孙伟红,劳秀荣,董玉良,等. 小麦-玉米轮作体系中秸秆还田对产量及土壤钾素肥力的影响[J]. 作物杂志,2004(4):14–16.
  - [15] 李本银,黄绍敏,张玉亭,等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010,16(1):129–135.
  - [16] 汪金舫,刘月娟,李本银. 秸秆还田对砂浆黑土理化性与锰、锌、铜有效性的影响[J]. 中国生态学报,2006,14(3):49–51.
  - [17] 葛立立,王康君,范苗苗,等. 秸秆还田对土壤培肥与水稻产量和米质的影响[J]. 中国农学通报,2012,28(12):1–6.
  - [18] Salmerón M, Isla R, Caverro J. Effect of winter cover crop species and planting methods on maize yield and N availability under irrigated Mediterranean conditions [J]. Field Crops Research, 2011, 123(2):89–99.
  - [19] 邱孝煊,蔡元呈,林 勇,等. 稻草还田对红壤性水稻土肥力的影响[J]. 中国农学通报,2006,22(1):188–190.
  - [20] Gentile R, Vanlauwe B, Kessel C V, et al. Managing N availability and losses by combining fertilizer-N with different quality residues in Kenya [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 131(3/4):308–314.
  - [21] 郑立臣,解宏图,张 威,等. 秸秆不同还田方式对土壤中溶解性有机碳的影响[J]. 生态环境,2006,15(1):80–83.
  - [22] Frey S D, Six J, Elliott E T. Reciprocal transfer of carbon and nitrogen by decomposer fungi at the soil-litter interface [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(7):1001–1004.
  - [23] Baumann K, Marschner P, Smerik R J, et al. Residue chemistry and microbial community structure during decomposition of eucalypt, wheat and vetch residues [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(9):1966–1975.
  - [24] Sun B, Wang X Y, Wang F, et al. Assessing the relative effects of geographic location and soil type on microbial communities associated with straw decomposition [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(11):3327–3335.
  - [25] 李 鹏,李永春,史加亮,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.
  - [26] 刘建国,卞新民,李彦斌,等. 长期连作和秸秆还田对棉田土壤生物活性的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(5):1027–1032.
  - [27] 许仁良,王建峰,张国良,等. 秸秆、有机肥及氮肥配合使用对水稻土微生物和有机质含量的影响[J]. 生态学报,2010,30(13):3584–3590.
  - [28] Witt C, Cassman K G, Olk D C, et al. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems [J]. Plant and Soil, 2000, 225(1/2):263–278.
  - [29] 钱海燕,杨滨娟,黄国勤,等. 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.
  - [30] 解媛媛,谷 洁,高 华,等. 微生物菌剂酶制剂化肥不同配比对秸秆还田后土壤酶活性的影响[J]. 水土保持研究,2010,17(2):233–238.
  - [31] 韩新忠,朱利群,杨敏芳,等. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11):2192–2199.
  - [32] 王倩倩,尧水红,张 斌,等. 秸秆配施氮肥还田对水稻土酶活性的影响[J]. 土壤,2017,49(1):19–26.
  - [33] 杨滨娟,黄国勤,钱海燕,等. 秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J]. 土壤学报,2014,51(1):150–157.
  - [34] 马春梅,王家睿,战厚强,等. 稻草还田对土壤脲酶活性及土壤溶液无机氮含量影响[J]. 东北农业大学学报,2016,47(3):38–43.
  - [35] 刘建新. 不同农田土壤酶活性与土壤养分相关关系研究[J]. 土壤通报,2004,35(4):523–525.
  - [36] 唐巧玲,阳 剑,黄光福,等. 栽培模式对水稻土脲酶活性及土壤碱解氮含量的影响[J]. 作物研究,2013,27(2):113–116.
  - [37] 汪成忠,胡永红,周翔宇,等. 水稻秸秆还田对崇明盐碱地土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(8):132–138.
  - [38] 闫 超,刁晓林,葛慧玲,等. 水稻秸秆还田对土壤溶液养分与酶活性的影响[J]. 土壤通报,2012,43(5):1232–1236.
  - [39] 战厚强,颜双双,王家睿,等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响[J]. 作物杂志,2015(2):78–83.
  - [40] 杨滨娟,黄国勤,钱海燕,等. 秸秆还田对稻田生态系统环境质量影响的初步研究[J]. 中国农学通报,2010,28(2):200–208.
  - [41] 王会斌,杨滨齐,刘 越,等. 秸秆还田对引黄灌区水稻产量和土壤肥力影响的研究[J]. 宁夏农林科技,2014,55(4):26–27.
  - [42] 刘晓霞,陶云彬,章日亮,等. 秸秆还田对作物产量和土壤肥力的短期效应[J]. 浙江农业科学,2017,58(3):508–510,513.
  - [43] 王飞军,庄亚其,黄 涛,等. 秸秆快速腐熟还田对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 上海农业科技,2012(1):93,96.
  - [44] 杨滨娟,黄国勤,徐 宁,等. 秸秆还田配施不同比例化肥对晚稻产量及土壤养分的影响[J]. 生态学报,2014,34(13):3779–3787.
  - [45] Shan Y H, Cai Z C, Han Y, et al. Organic acid accumulation under flooded soil conditions in relation to the incorporation of wheat and rice straws with different C:N ratios [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2008, 54(1):46–56.
  - [46] Johnson – Beebout S E, Angeles O R, Alberto M C R, et al. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soil is improbable due to redox potential changes with depth in a greenhouse experiment without plants [J]. Geoderma, 2009, 149(1/2):45–53.