

龚静静, 胡宏祥, 朱昌雄, 等. 秸秆还田对农田生态环境的影响综述[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(23): 36–40.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.23.009

# 秸秆还田对农田生态环境的影响综述

龚静静<sup>1,2</sup>, 胡宏祥<sup>1</sup>, 朱昌雄<sup>2</sup>, 汤咪咪<sup>1</sup>, 夏 星<sup>1</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽合肥 230036; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究秸秆还田在农田土壤中的影响, 本文综述了不同秸秆还田方式对土壤理化性质、土壤微生物和农田径流的影响, 讨论了秸秆还田后农田径流养分流失情况和农作物产量情况。结果表明, 腐解后的秸秆有利于增加土壤孔隙度, 降低土壤容重, 改善土壤通气性和水分状况, 增强土壤微生物数量和活性, 促进土壤养分循环; 秸秆还田可显著降低农田径流氮磷养分流失; 适宜的秸秆还田量配施化肥可以提高农作物产量。但是, 不同的秸秆还田量、不同的耕作方式和施肥量影响不一。因此, 要依据农田土壤具体条件选择适宜的还田方式; 加强秸秆还田对农田径流化学需氧量影响的研究; 研究轮作条件下不同秸秆还田方式的选择; 真正普遍推广秸秆还田技术。

**关键词:** 秸秆还田; 农田; 生态环境; 土壤肥力; 土壤微生物; 农田径流; 农作物产量; 影响

**中图分类号:** S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)23-0036-05

中国作为农业大国, 每年产生大量秸秆, 秸秆资源总量达 8 亿 t, 约占全世界秸秆总量的 30%, 含有丰富的 N、P、K 等营养成分, 相当于全国化肥用量的 2/5<sup>[1-2]</sup>。在现代农业生产过程中, 秸秆还田作为一项重要的技术措施, 可改善和提高土壤质量、减少化肥施用量, 为农作物提供良好的生长环境<sup>[3]</sup>, 减少作物对外界条件的依赖, 促进农田生态系统内部的良性循环, 使农田形成一个自循环程度高的稳定生产系统<sup>[4]</sup>。

近年来, 国内外学者为了充分发挥秸秆还田的积极作用, 不断地深入研究。然而在秸秆还田过程中, 不同的秸秆、不同的还田方式对土壤性质、土壤微生物、农田径流等影响不同。因此, 本文综述了国内外有关不同秸秆还田方式影响的研究结果, 从土壤性质、土壤微生物、农田径流等几个方面探讨研究, 以期今后综合利用秸秆还田调控方法提供参考依据。

## 1 秸秆还田的概念

秸秆是指农作物成熟并脱粒后的茎叶总称。秸秆还田通常是指在农作物收获后, 将秸秆以不同的方式返还到田里。秸秆资源最主要的利用方式是用作肥料<sup>[1]</sup>。因此, 水稻、小麦和其他一些作物的秸秆以各种方式还到田中。目前主要是秸秆直接还田和间接还田。

### 1.1 直接还田

秸秆直接还田是比较普遍的一种还田方式, 省时省力, 减少化肥投入, 并增加农民收入<sup>[5]</sup>, 包括(1)高茬还田, 指用机械等将作物留茬秸秆翻入土中;(2)覆盖还田, 作物收割后, 将秸秆直接或粉碎覆盖在土壤表层, 起抗旱保墒保水作用;(3)粉碎翻耕还田, 指用旋耕机将粉碎秸秆均匀翻耕入土;

(4)焚烧还田, 虽然农作物可以吸收焚烧后秸秆中所含的微量元素, 且在焚烧过程中可杀死病原体、虫卵和草籽等, 但易造成环境污染和资源浪费等问题。

### 1.2 间接还田

秸秆间接还田是指将秸秆处理后再还田的一种方式<sup>[6]</sup>, 分为:(1)堆肥还田, 将作物秸秆与畜禽粪便、辅料等混合, 加入适宜的微生物菌剂进行高温发酵腐熟, 作为有机肥料还田;(2)过圈还田, 将秸秆与畜禽粪便堆沤发酵后还田;(3)过腹还田, 牲畜食用秸秆消化后, 将排泄物简单堆沤处理用作肥料还田。

## 2 秸秆还田对土壤肥力的影响

### 2.1 秸秆的养分状况

农作物秸秆不仅含有丰富的氮、磷、钾等营养元素, 还有木质素、纤维素等富含碳元素的物质。陈尚洪等发现, 在小麦秸秆、水稻秸秆和油菜秸秆中, 麦秸全碳含量最高, 稻秸全氮含量最高, 油菜秸全磷含量最高, 稻秸和麦秸富含钾素, 油菜秸秆中全硼、全钼含量最高, 稻秸中全铁、全锰、全锌含量最高<sup>[7]</sup>。

### 2.2 秸秆的分解速率和养分释放特点

秸秆腐解受到自身碳氮比、水分、温度和农田管理措施等的影响<sup>[8-11]</sup>。大量研究认为, 秸秆的腐解速率与秸秆还田到土壤后的 C/N 密切相关, C/N 越小, 秸秆的腐解速率越快<sup>[12-14]</sup>。分解 1 kg 秸秆约需 8 g 氮, 一般认为, C/N 在 15~30 的范围内最适宜土壤微生物分解有机物质<sup>[15-16]</sup>。适量的秸秆还田量可将土壤 C/N 控制在合适的范围, 提高土壤微生物活性, 加快秸秆腐解, 向土壤释放养分<sup>[17]</sup>。秸秆在矿化分解过程中, C 的损失比 N 的损失大, 若还田量太大将提高土壤 C/N, 导致土壤中因缺少足够的氮素影响土壤微生物的数量和活性, 从而使秸秆腐解速率降低<sup>[18]</sup>。秸秆与土壤接触面积越多, 腐解速率越快, 因而翻埋方式有利于秸秆腐解, 并且受高温高湿的气候环境和稻季水层影响的秸秆腐解速率更快<sup>[9]</sup>。

王增丽等研究认为, 由于还到土壤中的秸秆中易分解的成分分解较快, 如单糖、多糖及蛋白质等, 待易分解的物质分解殆尽, 秸秆的粉碎程度将影响秸秆中不易分解成分的分解

收稿日期: 2017-08-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(编号: 2013ZX07103006、2017ZX07603-002)。

作者简介: 龚静静(1992—), 女, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要从事农田生态环境保护。E-mail: 965441525@qq.com。

通信作者: 朱昌雄, 研究员, 主要从事农业面源污染控制及污染环境生物修复等研究。E-mail: zhucx120@163.com。

速率,如木质素、纤维素等;从长时间来看,粉碎秸秆分解速率显著高于长秸秆,粉碎秸秆提高了微生物活性,通过微生物呼吸,释放有机碳,使土壤有机碳含量降低,土壤 C/N 降低,提高秸秆腐解速率<sup>[19]</sup>。陈尚洪等也认为秸秆分解速率与秸秆的木质素和纤维素的含量呈负相关关系,在还田初期分解较快,之后趋于稳定,分解较为缓慢,其中氮磷钾元素的释放速度是钾>磷>氮,从耕作方式对秸秆的分解率的影响来看,表现为深耕>旋耕>免耕<sup>[17,20-21]</sup>。

### 2.3 秸秆还田对土壤物理性质的影响

国内外学者关于秸秆还田对土壤物理性质的影响做了较多的研究,认为秸秆还田可以增加土壤孔隙度,降低土壤紧实度<sup>[22-25]</sup>,降低土壤容重<sup>[26]</sup>,改善土壤通气状况和水分状况,为作物生长提供良好的土壤环境<sup>[27-29]</sup>。

土壤容重是判断土壤肥力状况的重要指标,影响到土壤水肥气热的变化<sup>[30]</sup>,适宜的土壤容重及孔隙度直接影响到微生物的代谢活动、作物根系养分运输情况和根系生长状况<sup>[31]</sup>。秸秆分解的有机物质与表层土壤颗粒充分结合,有利于增加大孔隙数量,降低表层土壤紧实度,使土壤团粒更具水稳性和力稳性,维持土壤结构的稳定<sup>[25]</sup>。土壤团粒表面与外界大气接触,促进好气性土壤微生物活动,迅速分解有机质,而在团粒内部,毛管水的贮存使厌气微生物活动频繁,有效储藏养分。庞虎伟等研究认为,秸秆还田并增施氮肥可以加快秸秆腐解,降低土壤容重,增加孔隙度,改善土壤性质<sup>[20]</sup>。汤文光等经过 9 年的长期定位试验得出,秸秆还田条件下,长期翻耕和旋耕比长期免耕都显著提高了表层土壤活性有机碳含量,显著增大了土壤气相,降低了土壤容重,改善了土壤通气性,增加了耕层厚度,扩充了土壤养分库容量<sup>[32]</sup>。但是,连续旋耕作业深度浅及机械碾压等因素易造成土壤耕层变浅,而深耕可以改善这种情况<sup>[21,33]</sup>。C/N 低的秸秆还田土壤结构更稳定<sup>[12,34]</sup>。

秸秆还田有效减少土壤水分蒸发,形成的团粒结构中大量毛管孔隙为植物根系提供水分,提高土壤蓄水保墒的能力。舒馨等研究发现,秸秆翻耕还田处理较秸秆不还田处理含水量增加了 5.97%,而传统的翻耕方式使土壤孔隙变大,深层土壤水分向表层转移,在炎热干燥的气候环境影响下,使土壤表层水蒸发,反而降低了土壤保水的能力<sup>[26,35]</sup>。周怀平等研究发现,长期秸秆还田可以减轻土壤深层缺水问题,增加深层贮水及对表层土壤贮水的利用,其中秸秆覆盖还田处理效果最显著<sup>[36]</sup>。王增丽等研究发现,秸秆还田处理较秸秆不还田处理土壤持水能力强,分析认为可能是因为秸秆截断了大量毛管,阻碍了土壤水分向外运移<sup>[19]</sup>。

### 2.4 秸秆还田对土壤养分的影响

大量研究表明,秸秆还田腐解后释放大量营养元素,有利于增加土壤养分,改善土壤肥力和质量<sup>[37-40]</sup>。徐蒋来等认为,随着秸秆还田的年限增加,75% 的周年秸秆还田量对土壤肥力的影响最大,土壤全氮含量、有效磷含量和速效钾含量较对照分别提高了 3.54%、3.97% 和 10.28%<sup>[2]</sup>。若秸秆还田量太少,对土壤养分的影响效果不明显,过多,则容易导致土壤因高温缺氧,秸秆腐解速率慢,而影响营养元素的释放,不利于土壤养分的循环。陈冬林等对土壤耕作方式与秸秆还田量的研究认为,在免耕条件配合 2/3 的秸秆还田量条件下,土

壤碱解氮和有效磷的含量更高,深耕和少耕条件下秸秆全量还田对土壤有效磷和速效钾影响更显著<sup>[33]</sup>。冯晓赟等研究得出,在秸秆还田配施氮肥条件下,土壤有机质含量较单施氮肥提高了 9.2%~11.2%,提高了稻田土壤固碳能力<sup>[41]</sup>。袁嫋嫋等研究发现,秸秆配施化肥处理可显著增加土壤总有机碳含量,增幅为 13.99%,与农民常规施肥相比,胡敏酸与富里酸的比值显著增加,增幅达 12.92%,胡敏酸和富里酸的比值越大,土壤有机质越稳定<sup>[42]</sup>。谢佳贵等研究发现,在东北地区,秸秆不能完全腐解,秸秆中的钾不能全部代替作物所需的钾素,秸秆还田效果低于直接施用钾肥,因此,在东北地区,秸秆还田配施肥料效果更好<sup>[43]</sup>。

土壤有机质含量在一定程度上反映了土壤理化性质和保墒保肥能力,是评价土壤肥力的重要指标<sup>[44]</sup>。秸秆还田通过降低土壤有机碳的矿化分解,增加土壤有机碳含量,从而增加土壤有机质含量<sup>[45]</sup>。同时,还田到土壤的秸秆腐解后释放大氮素,土壤微生物氮和有机质的提高有利于吸附和固持更多的  $\text{NH}_4^+$ ,降低农田氮的损失,提高土壤氮的矿化和供氮能力<sup>[45-47]</sup>。秸秆还田显著增加土壤有效磷和速效钾的含量,一方面是因为秸秆富含磷素和钾素,但在短期内效果不明显,因为秸秆分解较慢的有机态养分较多,矿质态养分较少<sup>[18]</sup>;另一方面是因为秸秆在腐解过程中产生有机酸对某些固磷化合物有一定的溶解作用,有利于土壤中磷的释放,削弱对钾的固定,提高土壤磷和钾的有效性<sup>[13,48]</sup>。

总体而言,适量的秸秆还田量配施化肥可以显著提高土壤养分含量,并减少化肥施用量,减轻化肥养分的流失浪费,同时提高了经济效益。但不同的耕作方式对土壤养分的影响也不同。因此,针对不同的地区、不同的农田耕作条件,要因地制宜地综合考虑采取不同的秸秆还田方式,充分发挥秸秆资源的作用,提高土壤肥力和土壤质量。

## 3 秸秆还田对土壤微生物的影响

土壤微生物是土壤农田生态系统中重要的一部分,在土壤养分循环、生物化学过程和土壤矿化过程中发挥着重要的作用,推动土壤有机质转化,提高土壤肥力,促进农作物对营养元素的吸收<sup>[49]</sup>。

秸秆还田通过增加农田茎叶残茬和植物根系分泌物向土壤提供了充足的碳素和氮素,影响了土壤微生物群落结构,提高各种土壤微生物活性和数量,增强对土壤氨基酸、胺类化合物和碳水化合物等碳源的利用能力<sup>[50-51]</sup>。土壤细菌、放线菌的数量和土壤纤维素的降解强度与土壤肥力水平呈显著正相关关系<sup>[52]</sup>,土壤微生物分解有机物质产生的腐殖酸类物质和菌丝对土壤颗粒的缠绕有黏结作用,土壤微生物对土壤颗粒有吸附作用,有利于形成土壤团聚体。周文新等研究发现,2/3 的秸秆还田量可显著增加土壤细菌数量<sup>[53]</sup>;陈冬林等研究发现,秸秆还田可使土壤嫌气性细菌和真菌的数量减少,好气性细菌和放线菌数量增加,在深耕条件下,2/3 的秸秆还田量对土壤微生物活性的影响最大,而在少耕或免耕条件下,1/3 的秸秆还田量达到最大<sup>[33]</sup>。若秸秆还田量太大,土壤和大气环境物质交换不畅,土壤微生物数量和活性受到影响,秸秆腐解速率减缓,限制土壤养分的释放和循环<sup>[54]</sup>。

土壤微生物生物量可有效调控土壤能量和养分的循环。

土壤微生物生物量碳反映了土壤微生物数量、活性和土壤肥力的情况。土壤微生物生物量氮向土壤提供大量氮素,反映了土壤养分的生物释放和固持本质。土壤有机碳与土壤微生物生物量呈显著正相关关系。韩新忠等研究表明,25%的秸秆还田量更有利于提高土壤微生物生物量碳、氮含量<sup>[18]</sup>。李晓莎等研究认为,在相同的耕作方式下,由于表层土壤中的秸秆增加了表层土有机碳含量,增强了土壤微生物呼吸,有机碳转化为土壤微生物生物量碳,而在深层土壤中,由于土层温度较低,秸秆含量较少,在表层土壤秸秆覆盖的影响下隔绝了与大气环境的接触,碳释放量较少,土壤微生物活性较低,因而秸秆还田显著提高了表层土壤微生物生物量碳和微生物活性<sup>[55]</sup>。张静等研究发现,秸秆还田处理可以显著提高土壤微生物生物量 C/N,促进土壤矿化碳的分解和有机质的转化,增强土壤肥力<sup>[54]</sup>。

综上所述,秸秆还田可显著提高土壤微生物数量、活性和土壤微生物生物量 C/N。然而不同的还田方式对土壤微生物的影响不同,这可能与不同地区的土壤质地、气候条件等相关,因此,在秸秆还田实施过程中,须要因地制宜地综合考虑土壤环境、耕作方式、土壤微生物群落结构和功能等,选择适宜的还田方式,充分提高土壤微生物活性,促进秸秆的腐解速率和养分释放与循环,提高土壤肥力,促进农田生态系统良好循环。

#### 4 秸秆还田对农田径流的影响

Isormann 等研究发现,通过各种途径施入到土壤中的 N 素当季利用率为 30%~40%,37%~82%的 N 素通过表层水流失到水体中<sup>[56]</sup>。大量研究表明,秸秆还田可减少农田径流氮磷养分的流失。朱丽群等研究发现,秸秆还田处理可显著减少稻田氮磷养分径流流失总量,且翻耕条件下氮磷流失量最低,总氮浓度基本随着时间的推进而逐渐下降,总磷浓度呈现出先升后降的趋势,秸秆还田处理平均总氮浓度和总磷浓度较秸秆不还田分别低 24.48%、17.00%<sup>[57]</sup>。刘红江等同样认为秸秆还田能够明显降低农田地表径流水体氮磷钾流失量,提高农田速效养分含量,但是由于受到施肥和强降雨的冲刷效应,总氮流失量会出现一些峰值<sup>[58-59]</sup>。徐泰平等对暴雨条件下川中丘陵区坡耕地径流养分流失研究认为,秸秆还田能够显著降低氮磷地表径流流失量达 60%~76%<sup>[60]</sup>。朱坚等通过对秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失研究发现,秸秆还田处理可以降低稻田径流液中氮、磷养分含量,使总氮和总磷流失量分别减少 12.6%、9.7%<sup>[60]</sup>。郭智等研究认为,秸秆还田处理可减少总氮和总磷径流流失量分别达 15.95%、13.98%<sup>[62]</sup>。与常规耕作相比,秸秆还田加常规耕作氮损失减少了 14%~25%,磷损失降低了 20%~32%<sup>[63]</sup>。但杨志敏等研究发现,秸秆覆盖还田处理的总氮、总磷和化学需氧量面源污染物浓度要大于秸秆翻埋处理,且浓度与还田量呈正相关关系<sup>[64]</sup>。李凤博等也认为,秸秆深埋入土更有利于土壤对氮素吸收,减少氮素的损失,施肥后 1 周内是控制表层水氮素流失的关键时期<sup>[65]</sup>。

秸秆在还田腐解过程中,因不同成分降解程度不同,使秸秆疏松多孔,提高了土壤通气性和饱和导水率<sup>[66]</sup>,易渗入水分,吸附田面水中的部分营养元素<sup>[67]</sup>,使得一部分氮、磷养分

随水迁移到土壤深层。在土壤微生物的作用下,固持氮素,吸收磷素,降低了稻田田间水在施肥期间的氮磷浓度,减少了氨挥发、反硝化作用、淋溶等对氮素的流失<sup>[68-69]</sup>,且耕作土层越深,越有利于土壤微生物的硝化作用,使土壤吸收更多的氮素,减少  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  向水中排放<sup>[70]</sup>。秸秆可以吸持水分,增加地表粗糙度,翻耕到表土可有效降低降雨冲刷,减弱农田径流流失<sup>[71]</sup>。

综上所述,作物生长前期易造成农田养分流失,因此,要加强这一时期防控措施研究,减轻农业面源污染。在水稻生长前期,强降雨发生时,要做好农田防护措施,避免在强降雨前施肥,减少因强降雨造成的径流流失,施肥后要严格控制稻田水的排放。而秸秆翻耕还田是减少农田径流水中氮磷的浓度和流失量的最适宜还田方式。

#### 5 秸秆还田对农作物产量的影响

周怀平等经过连续 19 年的不同秸秆还田方式的长期定位试验得出,秸秆还田较秸秆不还田增产幅度为 11.57%~20.92%<sup>[36]</sup>。徐将来等通过连续 5 季的秸秆还田发现,75%的还田量对周年粮食产量影响最为显著,增幅为 10.01%<sup>[2]</sup>。韩新忠等研究认为,50% 秸秆还田量的增产效果最为显著<sup>[18]</sup>,适量的秸秆还田量可以通过调控土壤微生物和作物根系代谢产物中的 C/N,提高土壤中碳的含量,改善土壤质量<sup>[2]</sup>。秸秆还田前期,因有机质在矿化过程中造成氮素缺乏现象,土壤中矿质态氮素被土壤微生物同化吸收,影响作物产量。张刚等研究发现,秸秆还田配施适量氮肥与单施氮肥相比增产 6.3%,显著提高了氮肥的利用率<sup>[72]</sup>。刘秋霞等研究结果表明,秸秆还田配施肥料可显著提高油菜作物对养分的吸收积累,提高成株率,保障收获密度,提高油菜产量<sup>[73]</sup>。曾研华等研究发现,稻草还田处理可提高水稻穗粒结构,增加有效穗和结实率,增大后期的干物质积累量<sup>[74]</sup>。朱冰莹等通过 Meta 分析发现,在秸秆还田过程中,须要将肥料用量控制在一定范围内,若施肥过多,反而导致产量显著降低;在速效钾含量较高的农田,还田效果不明显,甚至出现负效应,在有机质含量较高的农田,秸秆还田显著降低了小麦产量<sup>[75]</sup>。

秸秆还田通过增加土壤含水量,在小麦生长旺盛时期促进穗分化和花器官的形成,从而增加小麦穗粒数,提高籽粒产量<sup>[76]</sup>。但大量还田秸秆在腐解过程中,短期内会产生有机酸、酚类等化感物质积累,抑制秧苗根伸长、苗高度,影响作物幼苗生长,须加入尿素减少有机酸积累<sup>[77]</sup>。若还田量太大,使有机质矿化分解延缓,影响土壤理化性质,进而作物产量受到影响<sup>[78]</sup>。

综上所述,作物产量高低受到秸秆还田量、配施肥料量和土壤本底条件等影响。因此,耕作时要充分考虑当地农田土壤条件,选择适宜的秸秆还田量和肥料施用量,提高作物产量。

#### 6 展望

我国每年产生大量秸秆,秸秆还田不仅避免了焚烧秸秆引起的资源浪费和生态环境问题,同时对农业的可持续发展产生了重要的作用。通过秸秆还田,可增加土壤养分含量,提高土壤微生物活性,减少农田径流养分流失,改善土壤肥力和质量,从而提高作物产量。秸秆还田方式在农业的应用也减

少了化肥的施用量,提高了生态效益和经济效益。

在秸秆还田过程中,要注意根据具体的土壤性质、气候、耕作制度等条件综合选择具体的还田方式,同时须要进一步研究秸秆还田对农田径流水化学需氧量的影响,探讨在轮作条件下还田方式的配合,加强秸秆还田技术的实用性,使其真正普遍推广到农业生产中。

#### 参考文献:

- [1] 高祥照, 马文奇, 马常宝, 等. 中国作物秸秆资源利用现状分析[J]. 华中农业大学学报, 2002, 21(3): 242–247.
- [2] 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.
- [3] 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 & Soil, 2000, 225(2): 263–278.
- [4] 孙 星, 刘 勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 782–786.
- [5] 邹吉亮. 浅析秸秆还田的方式及影响[J]. 吉林农业, 2012(6): 96.
- [6] 崔新卫, 张杨珠, 吴金水, 等. 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.
- [7] 陈尚洪, 朱钟麟, 吴 婕, 等. 紫色土丘陵区秸秆还田的腐解特征及对土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 141–144.
- [8] Varela M F, Scianca C M, Taboada M A, et al. Cover crop effects on soybean residue decomposition and P release in no-tillage systems of Argentina[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 143: 59–66.
- [9] 刘世平, 陈文林, 聂新涛, 等. 麦稻两熟地区不同埋深对还田秸秆腐解进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1049–1053.
- [10] Curtin D, Francis G S, Mcallum F M. Decomposition rate of cereal straw as affected by soil placement[J]. Soil Research, 2008, 46(2): 152–160.
- [11] 潘剑玲, 代万安, 尚占环, 等. 秸秆还田对土壤有机质和氮素有效性影响及机制研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(5): 526–535.
- [12] Adesodun J K, Mbagwu J S C, Oti N. Structural stability and carbohydrate contents of an ultisol under different management systems[J]. Soil & Tillage Research, 2001, 60(3): 135–142.
- [13] Cabiles D M S, Angeles O R, Johnson-Beebout S E, et al. Faster residue decomposition of brittle stem rice mutant due to finer breakage during threshing[J]. Soil & Tillage Research, 2008, 98(2): 211–216.
- [14] Goh K M. Nitrogen release from crop residues and organic amendments as affected by biochemical composition[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 2003, 34(17/18): 2441–2460.
- [15] 杨志谦, 王维敏. 秸秆还田后碳、氮在土壤中的积累与释放[J]. 中国土壤与肥料, 1991(5): 43–46.
- [16] 刘臧珍, 王淑敏, 杨丽琳. 秸秆还田添加氮素调节碳氮比的研究[J]. 河北农业大学学报, 1995(3): 31–35.
- [17] 陈长青, 胡清宇, 孙 波, 等. 长期施肥下石灰性潮土有机碳变化的 DNDC 模型预测[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1410–1417.
- [18] 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(11): 2192–2199.
- [19] 王增丽, 王 珍, 冯 浩. 秸秆粉碎氮化还田对土壤体积质量及持水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 211–215.
- [20] 庞党伟, 陈 金, 唐玉海, 等. 玉米秸秆还田方式和氮肥处理对土壤理化性质及冬小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(11): 1689–1699.
- [21] 张 宇, 陈 阜, 张海林, 等. 耕作方式对玉米秸秆腐解影响的研究[J]. 玉米科学, 2009, 17(6): 68–73.
- [22] Tangyuan N, Bin H, Nianyuan J, et al. Effects of conservation tillage on soil porosity in maize-wheat cropping system[J]. Plant Soil & Environment, 2009, 55(8): 327–333.
- [23] Zhang P, Wei T, Jia Z, et al. Soil aggregate and crop yield changes with different rates of straw incorporation in semiarid areas of northwest China[J]. Geoderma, 2014, 230–231: 41–49.
- [24] 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.
- [25] 慕 平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 81–85.
- [26] 舒 馨, 朱安宁, 张佳宝, 等. 保护性耕作对潮土物理性质的影响[J]. 中国农学通报, 2014, 30(6): 175–181.
- [27] 宫 亮, 孙文涛, 王聪翔, 等. 玉米秸秆还田对土壤肥力的影响[J]. 玉米科学, 2008, 16(2): 122–124.
- [28] 武志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5): 539–542.
- [29] 陈金海, 李艳丽, 王 磊, 等. 两种基于芦苇秸秆还田的改良措施对崇明东滩国垦土壤理化性质和微生物呼吸的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 307–315.
- [30] 马祥华, 焦菊英, 温仲明, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中土壤物理特性变化研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 17–21.
- [31] Peterson D E. Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006, 70(2): 434–438.
- [32] 汤文光, 肖小平, 唐海明, 等. 长期不同耕作与秸秆还田对土壤养分库容及重金属 Cd 的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 168–176.
- [33] 陈冬林, 易镇邪, 周文新, 等. 不同土壤耕作方式下秸秆还田量对晚稻土壤养分与微生物的影响[J]. 环境科学学报, 2010, 30(8): 1722–1728.
- [34] Tejada M, Hernandez M T, Garcia C. Soil restoration using composted plant residues: effects on soil properties[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 102(1): 109–117.
- [35] Blancocanqui H, Lal R. Impacts of long-term wheat straw management on soil hydraulic properties under no-tillage[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(4): 446–449.
- [36] 周怀平, 解文艳, 关春林, 等. 长期秸秆还田对旱地玉米产量、效益及水分利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 321–330.
- [37] 冀保毅, 赵亚丽, 郭海斌, 等. 深耕条件下秸秆还田对不同质地土壤肥力的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(4): 104–109.

- [38] 王伟, 朱利群, 王文博, 等. 秸秆还田地不同水氮条件对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 43–48.
- [39] 高丽秀, 李俊华, 张宏, 等. 秸秆还田对滴灌春小麦产量和土壤肥力的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(5): 1155–1160.
- [40] 赵士诚, 曹彩云, 李科江, 等. 长期秸秆还田对华北潮土肥力、氮库组分及作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6): 1441–1449.
- [41] 冯晓赞, 万鹏, 李洁, 等. 秸秆还田与氮肥配施对中南地区稻田土壤固碳和温室气体排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016(6): 508–517.
- [42] 袁姗姗, 邬刚, 胡润, 等. 秸秆还田配施化肥对稻油轮作土壤有机碳组分及产量影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 27–35.
- [43] 谢桂贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014(5): 1110–1118.
- [44] 邵云, 马守田, 李学梅, 等. 秸秆还田方式对麦田土壤碳、氮、水动态及小麦产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(11): 1545–1551.
- [45] 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.
- [46] Akkalcornfini N, Morvan T, Menasseriaubry S, et al. Nitrogen mineralization, plant uptake and nitrate leaching following the incorporation of (<sup>15</sup>N)-labeled cauliflower crop residues (*Brassica oleracea*) into the soil: a 3-year lysimeter study[J]. Plant & Soil, 2010, 328(1/2): 17–26.
- [47] Shan J, Yan X. Effects of crop residue returning on nitrous oxide emissions in agricultural soils[J]. Atmospheric Environment, 2013, 71(3): 170–175.
- [48] 莫淑勋, 钱菊芳. 稻草还田对补充水稻钾素养分的作用[J]. 土壤通报, 1981(1): 20–21.
- [49] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 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(1): 150–157.
- [50] 蒋向, 任洪志, 贺德先. 玉米秸秆还田对土壤理化性状与小麦生长发育和产量的影响研究进展[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(3): 569–574.
- [51] 杨金娟, 马琨, 丁东, 等. 不同培肥方式对旱作区耕地土壤的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(12): 75–81.
- [52] Ren W J, Liu D Y, Wu J X, et al. Effects of returning straw to soil and different tillage methods on paddy field soil fertility and microbial population[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(4): 817–822.
- [53] 周文新, 陈冬林, 卜毓坚, 等. 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.
- [54] 张静, 温晓霞, 廖允成, 等. 不同玉米秸秆还田量对土壤肥力及冬小麦产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 612–619.
- [55] 李晓莎, 武宁, 刘玲, 等. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1765–1771.
- [56] Isormann K. Share of agriculture in nitrogen and phosphorus emissions into the surface waters of Western Europe against the background of their eutrophication[J]. Fertilizer Research, 1990, 26(1/2/3): 253–269.
- [57] 朱利群, 夏小江, 胡清宇, 等. 不同耕作方式与秸秆还田对稻田氮磷养分径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 6–10.
- [58] 刘红江, 陈留根, 周炜, 等. 麦秸还田对水稻产量及地表径流 NPK 流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1337–1343.
- [59] 刘红江, 陈留根, 朱普平, 等. 稻草还田对小麦产量、地表径流 NPK 流失量及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 6–10.
- [60] 徐泰平, 朱波, 汪涛, 等. 秸秆还田对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(1): 30–36.
- [61] 朱坚, 纪雄辉, 田发祥, 等. 秸秆还田对双季稻产量及氮磷径流损失的影响[J]. 环境科学研究, 2016, 29(11): 1626–1634.
- [62] 郭智, 肖敏, 陈留根, 等. 稻麦两熟农田季季养分径流流失特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1622–1627.
- [63] Wang J, Lü G, Guo X, et al. Conservation tillage and optimized fertilization reduce winter runoff losses of nitrogen and phosphorus from farmland in the Chaohu Lake region, China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 101(1): 93–106.
- [64] 杨志敏, 陈玉成, 张赞, 等. 淹水条件下秸秆还田的面源污染物释放特征[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1854–1860.
- [65] 李凤博, 牛永志, 刘金根, 等. 秸秆填埋对水稻土表层水三氮动态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 513–517.
- [66] Fusi A, Bacenetti J, González-García S, et al. Environmental profile of paddy rice cultivation with different straw management[J]. Science of the Total Environment, 2014, 494(10): 119–128.
- [67] Watanabe T, Man L H, Vien D M, et al. Effects of continuous rice straw compost application on rice yield and soil properties in the Mekong Delta[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2009, 55(6): 754–763.
- [68] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 保护性耕作与平衡施肥对巢湖流域稻田氮素径流损失及水稻产量的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1164–1171.
- [69] Peng C, Lai S, Luo X, et al. Effects of long term rice straw application on the microbial communities of rapeseed rhizosphere in a paddy-upland rotation system[J]. Science of the Total Environment, 2016, 557–558: 231–239.
- [70] 冯国禄, 杨仁斌. 耕作模式和滞水时间对稻田中氮磷动态变化的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 917–924.
- [71] 王晓燕, 高焕文, 李洪文, 等. 保护性耕作对农田地表径流与土壤水蚀影响研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 66–69.
- [72] 张刚, 王德建, 俞元春, 等. 秸秆全量还田与氮肥用量对水稻产量、氮肥利用率及氮素损失的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(4): 877–885.
- [73] 刘秋霞, 任涛, 张萌, 等. 秸秆还田与氮磷钾化肥配施对直播冬油菜产量及其构成因子的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2016(6): 68–73.
- [74] 曾研华, 吴建富, 潘晓华, 等. 稻草不同还田方式对双季水稻产量及稻米品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013(3): 534–542.
- [75] 朱冰莹, 马娜娜, 余德贵. 稻麦两熟系统产量对秸秆还田的响应: 基于 Meta 分析[J]. 南京农业大学学报, 2017(3): 376–385.
- [76] 张忠学, 温金祥, 吴文良. 华北平原冬小麦夏玉米不同培肥措施的节水增产效应研究[J]. 应用生态学报, 2000(2): 219–222.
- [77] 单玉华, 蔡祖聪, 韩勇, 等. 淹水土壤有机酸积累与秸秆碳氮比及氮供应的关系[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 941–947.
- [78] 刘义国, 刘永红, 刘洪军, 等. 秸秆还田量对土壤理化性状及小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 131–135.