

稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控*

王德建¹ 常志州² 王 灿¹ 张 刚¹ 张斯梅²

(1. 中国科学院南京土壤研究所 南京 210008; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所 南京 210014)

摘要 秸秆还田是一项土壤培肥、实现农业可持续发展的重要措施,但秸秆还田经济效益低、增产效应不显著以及一些环境负效应,影响了该措施的推广。本文结合本课题组研究工作,综述了国内外近期的相关研究进展,就稻麦秸秆全量还田的产量效应、秸秆腐解特性与环境效应及其调控进行了分析。研究表明,秸秆还田能提高土壤肥力,增加稻麦产量,且增产效应随还田时间延长而增加;稻季麦秸/油菜秸的腐解率在50%~66%,其N、P、K养分释放率分别为42%~58%、55%~68%和92%~98%;秸秆还田能显著提高农田碳固定、减少径流损失,但也增加了稻田甲烷排放、氨挥发以及渗漏的养分损失。提高秸秆还田效益的调控措施有:增加稻麦前期氮肥施用比例,适当减少总的氮肥、磷肥用量,大幅减少钾肥用量;秸秆尽量在麦季还田、稻季采用湿润灌溉可减少甲烷排放。

关键词 稻麦 秸秆还田 增产机制 秸秆腐解 环境效应

中图分类号: S141.4 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2015)09-1073-10

Regulation and effect of 100% straw return on crop yield and environment

WANG Dejian¹, CHANG Zhizhou², WANG Can¹, ZHANG Gang¹, ZHANG Simei²

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract Incorporation of crop straw into the soil is an major soil management practice that improves soil fertility for sustainable agriculture. However, its application is severely hindered by low economic efficiency, low yield and negative environmental effects. This paper reviewed the effects of returning 100% of crop straw into the soil on crop yield, the mechanism and characteristics of straw decomposition, and environmental effects and regulation of straw return. For this purpose, the paper reviewed a huge number of published scientific research papers on the progresses of the effects of crop straw return into the soil. The results showed that 100% straw return improved soil fertility and increased yield of wheat and rice, which increased with increasing time of straw return. The decomposition rates of wheat and rape straws were 50%~66% during rice growing season, respectively releasing 42%~58%, 55%~68% and 92%~98% of total straw nitrogen (N), phosphorous (P) and potassium (K) into the soil. Straw return significantly increased soil organic carbon storage and reduced runoff loss. However, it enhanced CH₄ emission, ammonia volatilization and nutrient loss through leaching. In order to mitigate the negative effects of straw return on economic growth and the environment, it was necessary to increase the proportion of N fertilization at the early stage of rice and wheat growth, properly reduce the N fertilization dose during whole growing season, and reduce P fertilization and especially K fertilization rates. In order to reduce CH₄ emission, it was recommended to apply straw return during dry periods and use intermittent flood/moist irrigation during rice growing season.

Keywords Rice and wheat; Straw incorporation; Yield increase mechanism; Straw decomposition; Environmental effect

(Received Feb. 25, 2015; accepted May 8, 2015)

秸秆还田是一项具有悠久历史的土壤培肥、提高作物产量的农业措施,对农田生态系统中养分循环利用,实现农业可持续发展具有重要意义。据作者多年农田养分循环研究结果(待刊资料),以苏南

* 国家科技支撑计划项目(2012BAJ24B06)和江苏省农业科技自主创新基金项目(CX(12)1002)资助
王德建,主要从事农田生态系统养分循环及其环境效应方面的研究。E-mail: djwang@issas.ac.cn
收稿日期: 2015-02-25 接受日期: 2015-05-08

地区中等产量水平的农田为例,小麦秸秆携带的N、P、K养分占地上部分总量分别为19.1%、12.7%、82.6%,水稻秸秆分别为38.9%、31.8%、84.5%。据江苏省农作物秸秆综合利用规划(2010—2015)统计,江苏省近年水稻、小麦秸秆年平均产量为1 836.8万t、1 015.6万t,则全省稻麦秸秆携带的N、P、K养分量分别为23.0万t、3.62万t、50.0万t,是一笔宝贵的养分资源。据报道,美国秸秆还田量占秸秆产量的68%,英国占其秸秆产量的73%^[1-2]。为促进秸秆综合利用,国务院办公厅颁发了《关于作物秸秆综合利用的意见》(国办发[2008]105号)、江苏省政府办公厅也颁发了《关于加快农作物秸秆综合利用规划》(苏政办发[2009]133号),均把秸秆机械化还田列为秸秆综合利用的首选技术措施。

稻-麦(油菜)两熟轮作制是我国长江中下游流域及淮河流域的一种主体轮作制度,其高产、稳产与提供优质食粮的功能具有不可替代性。虽然秸秆还田作为一项秸秆禁烧与土壤培肥的重要措施,但在稻麦一年两熟轮作中,由于农时季节紧,稻作秸秆还田往往来不及腐解就要插秧,这样不仅影响水稻插秧质量,而且大量秸秆淹水分解使土壤呈强还原状态,导致硫化氢、有机酸、酚类等物质积累,伤害秧苗根系^[3-5];同时前期秸秆分解导致土壤速效氮急剧下降^[4,6],这些都影响稻麦有效分蘖的发生,有可能导致稻麦减产。再者,稻季秸秆还田导致甲烷(CH₄)排放增加^[7],可溶性有机碳、养分与重金属活化迁移^[8-9],增加了温室气体排放与面源污染的风险。此外,在生产上秸秆还田仍然存在着经济效益低、增产效应不显著的问题,这些都影响秸秆还田措施的有效推广。因此,如何全面评价秸秆还田培肥增产效应与环境弊端、趋利除弊,对秸秆还田农艺技术的进一步推广应用具有重要的指导意义。

近年来,关于秸秆还田对作物产量^[10-11]、土壤肥力^[12-14]、固碳减排效应^[15-17]等研究进展均有过综述,但缺乏稻-麦轮作下秸秆还田综合效应的深入分析。本文在综述近年来国内外稻麦秸秆还田研究的基础上,结合本课题组部分阶段性研究成果,重点就稻麦秸秆全量还田的产量与环境效应及其调控技术进行分析,即:对秸秆还田如何“还得好”的问题进行探讨,旨在为稻麦秸秆还田的实践提供技术支持,同时也为后续研究提供思路。

1 秸秆还田对稻麦产量的影响及其机制

1.1 秸秆还田的产量效应

有关稻麦秸秆还田对作物产量的影响有大量报

道,其增产效应不一,有增产的,也有减产的。在稻麦两熟区,曾洪玉等^[18]在江苏江都连续3年的试验表明,稻草还田免耕套种小麦增产4.8%~9.2%,麦套稻秸秆免耕还田增产2.1%~4.2%。李继福等^[19]在江汉平原的研究显示,麦秸全量还田能提高水稻产量5.0%。刘红江等^[20]在无锡的试验表明,麦秸还田水稻增产3.0%左右,但没有显著差异。杨卫国等^[21]在上海的试验也表明,麦秸还田能提高直播水稻产量,但效果不显著。而朱利群等^[22]3年试验报道,麦秸还田水稻产量减产约7.7%。我们在江苏常熟连续7年秸秆全量还田试验表明(待刊资料),在推荐NPK施肥量下,秸秆还田对水稻产量没有显著影响,小麦在第7年才有显著增产效应,但当NPK三要素中有一元素亏缺时,秸秆还田增产效应显著。印度的试验也表明,在推荐NPK肥用量下,稻草还田使小麦产量降低^[23]。

在双季稻区,湖南桃江18年稻草还田试验表明,化肥+稻草处理的水稻产量与等量的NPK化肥处理差异不显著^[24]。泰国的研究显示,稻草还田对每季水稻产量与氮肥吸收没有显著影响^[25]。印度的研究表明,秸秆还田对产量的影响在2季秸秆还田后更明显^[26]。

总体上,秸秆还田以增产效应的具多,通常前1~2年增产效应不大,但随着还田季数的增加,增产效应逐渐显现,其对产量的影响与还田方式、还田质量、配施化肥水平及土壤类型有关。

1.2 秸秆还田对产量的影响机制

秸秆还田提高了土壤肥力,从而提高了作物产量。大量研究报道显示,秸秆还田能显著提高土壤有机质、改善有机质品质,提高土壤养分含量,而且后效十分明显^[18,26]。Surekha等^[27]报道,秸秆还田或焚烧均能显著提高土壤有效钾与有机碳含量,而土壤总氮只有秸秆还田的增加。Nie等^[28]试验表明,秸秆还田土壤的有机质和全氮含量分别比对照增加8.9%与14.8%,土壤微生物量碳、氮分别比对照增加12.7%与15.1%。作者在常熟连续7年秸秆全量还田试验表明,秸秆还田土壤有机质、有效磷与速效钾均比对照有显著提高,提高量分别为10.5%~13.6%、2.5~10.5 mg·kg⁻¹与18~43 mg·kg⁻¹。秸秆还田能改善土壤物理性质,降低土壤容重2.5%~9.2%,增加土壤毛管孔隙度,提高土壤含水量8.2%~28.5%^[29]。Acharya等^[30]研究显示,秸秆覆盖有助于维持土壤结构,利于小麦生长,其根系密度可达传统耕作模式的1.27~1.40倍。Takahashi等^[31]报道,长期施用稻

草的处理, 其水稻与玉米氮素吸收量、土壤培养90 d的矿化氮量均提高, 而短期施用对作物产量与氮素吸收量影响很小。可见, 秸秆还田能有效提高土壤肥力, 进而提高了作物产量。

秸秆还田对稻麦产量影响的过程是: 生长前期抑制稻麦生长, 中后期促进稻麦生长^[3,32]。在产量要素构成上表现为, 单位面积有效穗数减少, 但每穗粒数、结实率与粒重提高^[33-35], 产量的增减是这两方面综合平衡的结果。而影响这一过程的主要机制是: (1) 秸秆还田前期, 高C/N比秸秆的分解导致土壤速效氮含量下降, 使作物苗期缺N, 减少有效分蘖的发生。Azam等^[36]用¹⁵N标记氮肥研究证实, 麦秸还田导致水稻产量下降的主要原因是减少了水稻对土壤N的吸收。杨思存等^[6]研究显示, 小麦秸秆还田前2个月, 土壤速效氮含量比对照降低19.3%~23.9%。(2) 稻季大量秸秆淹水分解使土壤处于强还原状态, 产生的有机酸、亚铁、硫化氢等有害物质伤害水稻根系^[3-4,37], 影响水稻早期分蘖发生。研究报道, 麦秸全量还田的土壤Eh和根系活力分别下降3.6%~22.4%和13.5%~21.1%^[5]; 有效分蘖期内, 秧苗新发白根的条数下降10.2%~24.5%^[38]; 水稻成穗数下降4.9%~11.9%^[33]。(3) 而中后期, 随着秸秆腐解速率变慢与土壤通气状况的改善, 土壤有害物质影响减轻, 秸秆养分释放大于固定, 促进了稻麦生长, 提高了每穗粒数与粒重^[39-41]。研究表明, 水稻抽穗后, 秸秆还田处理的光合势、叶面积指数、高效叶面积比例和干物质积累均高于对照^[33]。水稻叶片中有机酸含量与ATP酶活性提高, 提高了结实期叶片的光合速率以及根系的活力, 从而有利于水稻产量的提高^[42]。许轲等^[43]土培池研究表明, 两种土壤麦秸全量还田水稻平均有效穗数减少8.1%~8.7%, 每穗粒数、结实率、千粒重分别增加6.6%~8.9%、1.1%~1.7%、3.2%~4.6%, 最终产量增加2.3%~3.9%, 但差异不显著。(4) 秸秆还田质量与还田时间对稻麦产量也有较大的影响, 秸秆还田质量差时, 水稻不宜插秧与活棵, 麦季易导致土壤架空失墒, 影响小麦出苗, 冬季易受冻害。秸秆提早还田腐解也有利于水稻增产, 在湖南双季稻区, 早稻季稻草还田由于腐解时间长, 其增产效应明显大于晚稻^[44]。

针对稻麦秸秆全量还田, 特别是稻作麦秸全量还田带来的播种/插秧质量不高, 秸秆淹水分解产生的有害物质伤害秧苗根系, 以及秸秆分解初期微生物与作物竞争吸N, 进而影响稻麦早期有效分蘖发生的问题, 目前采用的主要调控措施有: (1) 稻麦机

械收割、切碎、匀铺一体化作业, 提高秸秆还田质量; (2) 通过水肥措施进行调控, 稻季采用湿润灌溉, 麦季及时抗旱灌溉; (3) 减少稻季秸秆还田量, 近年来, 采用麦秸机械收捡打捆, 移出田块; (4) 选择适当生长期的稻麦品种搭配, 采用稻田免耕套种小麦^[18], 水稻适当晚种晚收, 增加水稻插秧前秸秆的好气腐解时间。但通过缩短生育期的品种搭配来延长麦、稻茬口交接期, 在生产上还有一定难度, 一是麦稻的育种与栽培上都想用足有效生长期, 每季都能获得高产; 二是长期习惯的栽培方法, 还没有充分考虑秸秆腐解的问题。

2 秸秆腐解特性与调控

2.1 秸秆腐解与养分释放

了解秸秆的腐解与养分释放特性, 对改进秸秆还田下作物养分调控具有重要意义。水稻、小麦与油菜秸秆在淹水条件下, 均表现前期腐解较快, 后期逐渐变慢的趋势。武际等^[45]研究表明, 小麦与油菜秸秆还田后0~30 d腐解较快, 后期腐解速率逐渐变慢, 小麦秸秆还田90 d时N、P、K养分释放率分别为48.4%~52.8%、54.8%~67.5%与92.0%~96.0%, 而秸秆中的K在30 d时有超过90%被释放。戴志刚等^[46]报道, 水稻、小麦与油菜秸秆经过124 d的腐解, 累计腐解率分别为49.2%、52.2%和49.8%, 3种秸秆中N、P、K养分平均释放率分别为42.1%~57.8%、59.9%~68.3%与98.0%。李逢雨等^[47]研究显示, 麦秆与油菜秆施入稻田后100 d的累计腐解率分别为66.2%和55.6%, 养分释放率均为K>P>N。3种秸秆在不同区域的养分释放速率均表现为K>P>C~N。而Takahashi等^[31]用¹⁵N标记稻草的研究表明, 在90 d好气与厌气培养下, 稻草中氮有23%~24%被矿化, 在盆栽试验中有13%~14%的¹⁵N被玉米与水稻吸收。

2.2 秸秆腐解与有害物质释放

还田秸秆分解在提供作物养分的同时, 大量秸秆在短期内分解会产生有机酸、酚类等化感物质积累, 从而影响作物幼苗生长^[48-50]。早期的研究表明^[51], 秸秆分解的有机酸能抑制秧苗根伸长、苗高度与重量, 抑制程度随着有机酸浓度升高与pH的下降而增加, 不同有机酸的影响程度是: 丁酸>丙酸>乙酸。单玉华等^[48]报道, 在不施用氮肥的情况下, 随着秸秆用量的增加, 有机酸积累显著增多, 麦秸处理的有机酸积累显著高于稻秸, 加入尿素能显著减少有机酸积累。于建光等^[52]研究显示, 小麦秸秆浸提液/腐解液均显著降低水稻的发芽指数、生物量、叶绿素含量以及根系活力, 麦秸浸提液/腐解液

稀释后均减轻了化感效应,认为酚酸是麦秸腐解的主要化感物质。顾元等^[53]通过添加外源酚酸的研究证实,10种酚酸均对水稻种子发芽产生低浓度促进、高浓度抑制作用。但魏云霞等^[54]研究显示,不同秸秆及绿肥的化感作用对水稻种子发芽率均无显著影响,只是不同程度地延迟了种子的发芽进度,不同浓度秸秆浸提液对水稻幼苗鲜重有显著的促进作用。

2.3 秸秆还田的有害效应调控

秸秆还田对土壤 N 的固定。由于稻麦秸秆 C/N 比高达 60~100,而微生物分解秸秆的适宜 C/N 比为 28 左右,微生物分解 C/N 比高的秸秆时固定土壤速效氮。边秀举等^[55]报道,好气培养下尿素与麦秸混施后发生强烈的矿质氮固持作用,土壤 NO_3^- -N 含量甚至低于未施肥处理。Bijay-Singh 等^[56]试验表明,高 C/N 比作物秸秆分解能加速土壤速效氮的固定,导致下茬作物氮素缺乏。Shindo 等^[57] ^{15}N 标记麦秸试验显示,在秸秆施入土壤第 1 周内,土壤中 NO_3^- -N 含量迅速下降,微生物量碳氮迅速增加。Buresh 等^[58]认为,虽然稻草还田能给下季作物提供养分,但也由于前期 N 固定效应而影响水稻产量。

为了缓解秸秆分解产生的土壤 N 固定,导致作物苗期缺 N 问题,许多研究采用增加前期氮肥施用量的方法。在稻麦两熟区,江苏金坛的试验表明,水稻氮肥前期(基肥与蘖肥)与后期(穗肥)比例为 6.5 : 3.5 比常规施肥的 5 : 5 增产幅度更大^[39]。无锡的试验显示,机插水稻氮肥的前后期比例以 6 : 4 为宜^[59]。我们在常熟的研究表明,水稻与小麦的氮肥适宜用量分别为 180~225 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$ 、200 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$,氮肥的前后期比例为 6 : 4^[60]。在双季稻区,湖南桃源年施稻草 7.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的红壤稻田,适宜氮肥用量为 180 $\text{kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$,氮肥前后期适宜比例也为 6 : 4^[24]。为了调节秸秆分解过程中 N 素平衡,泰国研究者把稻草与花生秸秆混合还田,以改善 N 素供应与需求的同步性^[61]。Becker 等^[62]报道,在麦-稻季节转换期间,施用麦秸 3 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 或种植填闲作物,均能显著降低土壤 NO_3^- 累积与损失。

秸秆腐解速率调控技术。为了加快秸秆的田间分解速度,秸秆腐熟剂在生产上有一定面积的应用,但其田间应用效果评价不一。赵明文等^[63]报道,麦季稻草接种分解菌还田,可以加速稻草的软化和分解,34 d 后秸秆分解率提高 13.6%。李继福等^[19]比较了 3 种秸秆腐熟剂对稻田麦秸的腐解效率,秸秆翻压 15 d 时,3 种腐熟剂仅有 1 种腐解效果好(腐解率

30.3%),另外两种基本上没有效果。朱国勤等^[64]试验表明,秸秆腐熟剂对小麦秸秆腐解有一定的加速作用,但效果不显著。而张珍等^[65]研究认为,秸秆腐熟剂促进秸秆过快腐解,产生的丁酸、阿魏酸等化感物质较多且集中,对水稻生长有一定的抑制作用。总的看来,秸秆腐熟剂在旱地上应用的效果优于水田。此外,土壤水分与通气状况也影响微生物对秸秆的分解。武际等^[45]秸秆还田方式与水分状况对秸秆腐解影响的研究表明,在淹水灌溉模式下,覆盖还田>秸秆土埋;在湿润灌溉模式下,秸秆土埋>秸秆覆盖。王允青等^[66]报道,秸秆还田方式对小麦秸秆腐解率的影响是:土埋处理>露天处理>水泡处理。

综上所述,对于秸秆还田下 N、P、K 养分的调控,由于秸秆中 K 绝大部分是水溶性的速效钾,在推荐施肥中可扣除所用秸秆中 K 的量,并适当延后施用;而秸秆中 N、P 含量较低,可适当减少氮肥、磷肥的总用量,在还田初期应增加氮肥的用量^[39,46-47]。而对于淹水下大量秸秆分解产生化感物质的毒害作用,可采用通气、增施氮肥、调节 pH 等措施以减轻危害。

3 秸秆还田的环境效应

3.1 秸秆还田对农田面源污染的影响

秸秆还田改变了农田环境的物理与化学性状,对农田面源污染产生了不同程度的影响。农田面源污染产生的主要途径有地表径流、渗漏与氨挥发。秸秆还田对氨挥发的影响:在秸秆淹水还田初期,出现土壤 Eh 急剧下降(-96~-151 mV)与 pH 迅速上升(-0.11~0.60)的情况,显著增加了施入稻田尿素的氨挥发损失^[37]。

秸秆还田对地表径流的影响。对于稻田,郭智等^[67]研究表明,麦秸全量还田(7.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)降低了稻田径流水的总氮(TN)、总磷(TP)和速效钾(AK)浓度,稻季 TN、TP 和 AK 径流流失量分别比不施秸秆的对照减少 13.5%、25.0%和 22.7%。刘红江等^[20]研究显示,麦秸全量还田降低了稻季地表径流的 TN、TP 和 TK 浓度,流失量分别比对照减少 9.2%、10.6%和 7.8%。朱利群等^[68]研究了麦秸全量还田(6 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$)下不同耕作方式对稻田地表径流的影响,结果显示秸秆还田处理的地表径流 N、P 量分别比对照减少 20.0%~28.9%和 10.3%~20.0%。王静等^[69-70]研究表明,麦秸还田 3 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 能显著降低水稻移栽前期田面水中 TN、可溶性性氮和 NH_4^+ -N 浓度, TN 浓度平均下降 37.0%~38.9%;水稻生长前期径流水中 TP 浓度也显著降低,径流流失量减少 5.1%~19.0%。但秸

秆淹水模拟试验均提高了上覆水(田面水)TP、TK、COD及TN的浓度,杨志敏等^[71]模拟试验显示,小麦秸秆覆盖与深埋均能提高上覆水TN、TP、COD等面源污染物浓度,且其浓度随着秸秆用量的增加而增加;戴志刚等^[81]的淹水培养试验也证实,水稻秸秆添加显著提高了上覆水TP、TK浓度,但对TN的影响较小;而汪军等^[37]栽种水稻的原装土柱试验显示,麦秸全量还田处理稻季田面水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度比对照高11.5%~22.5%。究其原因固然与田间试验与模拟试验环境条件有一定差异有关,一般模拟培养试验秸秆施用量大、不栽种作物、不施或少施肥料、没有渗漏输出等。但出现两者对田面水(径流水)养分影响截然相反的结果,仍需进一步研究。

对于旱地,刘红江等^[72-73]研究了秸秆全量还田对稻麦两熟农田周年地表径流养分损失的影响,麦季稻草旋耕还田的地表径流N、P和K损失量比对照分别减少5.4%、5.9%和4.1%,稻麦两季全年N、P和K流失量分别下降7.7%、8.0%和6.8%。王静等^[74]研究了麦秸覆盖还田对玉米田地表径流量的影响,在玉米生长季,秸秆覆盖小区径流产流量与产沙量比不覆盖的对照分别减少30.5%和22.9%,随地表径流的N、P流失量分别降低27.4%和32.3%。

秸秆还田对渗漏淋失的影响。Wang等^[75]田间试验研究显示,麦秸全量还田降低了稻田渗漏水中N浓度,提高了P浓度。崔思远等^[76]研究表明,在双季稻区,秸秆还田使早稻耕作覆水初期渗漏水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度显著高于不还田处理。柏彦超等^[9]模拟试验显示,秸秆添加显著提高了稻季渗漏水中DOC与土壤中Cd的活度,增加了土壤中DOC与Cd的渗漏流失。

秸秆还田降低了稻麦季径流水N、P、K养分浓度,减少了地表径流损失,但在模拟试验中提高了田面水中N、P浓度;提高了渗漏水中的P、DOC、Cd及N的浓度,增加了渗漏损失;增加了稻田淹水初期的氨挥发。综合本课题及其他研究^[37,70,75],从面源污染控制角度来看,面源污染的N在每次施肥后的7~10 d, P在淹水后20~30 d内是控制养分损失的最佳时期。

3.2 秸秆还田的农田固碳与温室气体减排效应

秸秆还田对农田固碳的影响。英国洛桑试验站始于1986年的秸秆还田试验表明,秸秆还田显著提高土壤有机碳的积累速率^[77]。印度的双季稻试验表明,稻草与无机氮肥配合施用对土壤固碳最有效,年固碳量 $0.35 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[78]。金琳等^[79]用Meta分析法估算了中国不同农田管理的土壤固碳,各种措施表现

为化肥与有机肥配施的固碳作用最大($0.889 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$),其次为秸秆还田($0.597 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$)。我们对苏南5县市1980年与2000年234个对应点稻田土壤养分变化研究显示,20年来土壤有机碳平均增幅21.9%~26.6%,分析认为土壤有机碳增加原因与秸秆还田及化肥用量增加密切相关^[80]。

农业源温室气体是全球人为温室气体排放的主要组成部分。Smith等^[81]研究认为,农业源温室气体占全球人为温室气体排放的10%~12%,其中 CH_4 与 N_2O 分别占其总排放的50%与60%,而来自土壤的 CO_2 由于被净初级生产力与作物所固定,对农业源温室气体百年尺度全球增温潜势(GWP)贡献不足1%。Linguist等^[82]报道,农田的温室气体排放主要发生在稻田,稻田温室气体排放的GWP比旱地(麦田与玉米田)高约4倍,而稻田 CH_4 排放的GWP占稻季总GWP的89%。

关于秸秆还田对农田温室气体排放的影响有大量研究报道。Yao等^[7]研究表明,在稻-麦轮作周期中,麦秸还田 $4.7 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 可增加74%的 CH_4 排放,减少38%的 N_2O 排放,年累计 CH_4 与 N_2O 排放比不施秸秆的对照增加 $3.1 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ (CO_2 当量)。李成芳等^[83]研究显示,油菜秸秆覆盖还田显著提高稻田 CO_2 、 N_2O 排放,降低 CH_4 排放,增加了土壤的碳固定。Hou等^[84]研究指出,麦季稻草还田能提高下茬水稻产量,而 CH_4 排放增加不显著(14%~43%)。泰国的研究表明,采用稻草与花生秸秆混合还田能调节矿化氮释放与温室气体排放, N_2O 损失量随着稻草的添加而下降^[85]。Yao等^[7]计算出,稻季由秸秆还田诱导的 $\text{CH}_4\text{-C}$ 排放增加系数平均为6%。土壤水分状况对稻田温室气体排放也有较大的影响。蒋静艳等^[86]研究表明,在麦秸还田 $4.5 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,常规灌溉(中间有烤田)稻季 CH_4 、 N_2O 排放的GWP只占淹水灌溉的60%。Zou等^[87]研究显示,与持续淹水相比,稻季中间烤田能引起 CH_4 排放一定程度的下降, N_2O 排放显著增加,但在淹水-湿润灌溉模式下,施用麦秸 $2.25 \text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的稻田 CH_4 排放增加252%, N_2O 排放减少19%。

秸秆还田的净GWP效应。如上所述,秸秆还田在增加农田固碳的同时,也增加了稻田 CH_4 排放,减少了 N_2O 排放,但两者的净GWP效应如何呢?然而,以往的研究往往只关注秸秆还田条件下稻田固碳或者温室气体增排的一个方面,因此不能对稻田秸秆还田的净GWP效应做出全面评价^[15]。而已有的估算农田净GWP的研究,通常是借助于长期定位试验中土壤有机碳含量的动态并结合模型来计算年度的土

壤固碳量,并进一步通过 CH_4 和 N_2O 排放量估算或监测结果来计算 CH_4 、 N_2O 与 CO_2 3种温室气体的净GWP效应^[88-89]。如逯非等^[90]采用模型对我国秸秆还田下稻田土壤固碳与 CH_4 增排进行了估算,发现我国稻田秸秆还田增排的 CH_4 所导致的GWP平均为土壤固碳减排潜势的2.158倍。而这些结果大多不是来自于一个系统的测定,而是把不同的试验结果综合到一起,不同估算之间相差很大,并且这些模拟结果却很少有实地监测结果的验证。

总体上,秸秆还田能显著增加农田土壤碳固定,减少 N_2O 排放,但显著增加了稻田 CH_4 的排放,稻田秸秆还田增加了温室气体泄漏。目前减少 CH_4 排放的主要措施有:增加稻田排水次数,选用低分泌 CH_4 的水稻品种,非稻季减少土壤淹水,秸秆尽量在旱季还田等,但减少 CH_4 排放的措施往往可能导致 N_2O 排放的增加。

4 结语

秸秆还田作为一项农田生态系统养分再循环,实现农业可持续发展的重要农业措施,已被国内外研究实践所证实。但是稻-麦轮作制下秸秆还田、特别是秸秆全量机械化还田中还存在一些亟需解决的问题:(1)如何构建一个有利于稻-麦轮作下秸秆全量还田的栽培模式,适当延长麦-稻茬口交接时间,以利于麦秸有氧腐解;(2)筛选加快秸秆腐熟的有效菌剂,提高秸秆腐熟剂在稻田上的施用效果;(3)构建减轻秸秆还田有害因子消减的综合调控技术体系,实现秸秆还田配套养分调控的精准化,明确稻季秸秆还田对径流养分的影响程度与机理;(4)研究减少秸秆全量还田下稻田 CH_4 排放的可行技术,应通过典型轮作制下1~2个稻-麦轮作周期秸秆还田下土壤固碳与温室气体排放的同步测定、结合模型计算等方法,较准确地评估秸秆还田的总体GWP效应;(5)以及长期稻麦秸秆全量旋耕还田带来的秸秆在耕层表聚,分解不完全,影响作物生长的问题。

参考文献

- [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
Liu X H, Wang A L, Gao W S. To promote agricultural sustainable development by implementing crop straw return[J]. Crops, 1998(5): 1-5
- [2] 李万良,刘武仁. 玉米秸秆还田技术研究现状及发展趋势[J]. 吉林农业科学, 2007, 32(3): 32-34
Li W L, Liu W R. Research status and development trends of giving the straws back to the field technique on maize[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2007, 32(3): 32-34
- [3] 马宗国,卢绪奎,万丽,等. 小麦秸秆还田对水稻生长及土壤肥力的影响[J]. 作物杂志, 2003(5): 37-38
Ma Z G, Lu X K, Wan L, et al. Effects of wheat straw returning on rice growth and soil nutrients[J]. Crops, 2003(5): 37-38
- [4] 郝建华,丁艳锋,王强盛,等. 麦秸还田对水稻群体质量和土壤特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2010, 33(3): 13-18
Hao J H, Ding Y F, Wang Q S, et al. Effect of wheat crop straw application on the quality of rice population and soil properties[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2010, 33(3): 13-18
- [5] 金鑫,蔡林运,李刚华,等. 小麦秸秆全量还田对水稻生长及稻田氧化还原物质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2013(5): 80-85
Jin X, Cai L Y, Li G H, et al. Effects of all wheat crop straw application on rice growth and redox substance in rice fields[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2013(5): 80-85
- [6] 杨思存,霍琳,王建成. 秸秆还田的生化他感效应研究初报[J]. 西北农业学报, 2005, 14(1): 52-56
Yang S C, Huo L, Wang J C. Allelopathic effect of straw returning[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2005, 14(1): 52-56
- [7] Yao Z S, Zheng X H, Wang R, et al. Nitrous oxide and methane fluxes from a rice-wheat crop rotation under wheat residue incorporation and no-tillage practices[J]. Atmospheric Environment, 2013, 79: 641-649
- [8] 戴志刚,鲁剑巍,鲁明星,等. 水稻秸秆用量对淹水培养土壤表层溶液理化性质的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 20-24
Dai Z G, Lu J W, Lu M X, et al. Effect of rice straw on the physicochemical properties of field surface solution under waterlogged incubation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 20-24
- [9] 柏彦超,陈国华,路平,等. 秸秆还田对稻田渗漏水 DOC含量及土壤Cd活度的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(12): 2491-2495
Bai Y C, Chen G H, Lu P, et al. Effect of wheat straw return on DOC in percolating water and Cd activity in rice soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(12): 2491-2495
- [10] 吴家旺,朱小梅,薛良鹏,等. 秸秆还田对稻麦产量的影响研究进展[J]. 现代农业科技, 2011(23): 92
Wu J W, Zhu X M, Xue L P, et al. Research progress on the influence of crop straw incorporation on yield of rice & wheat[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2011(23): 92
- [11] 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
Cui X W, Zhang Y Z, Wu J S, et al. Research progress on the effects of returning straw to fields on soil quality and crop growth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1527-1532
- [12] 申源源,陈宏. 秸秆还田对土壤改良的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(19): 291-294

- Shen Y Y, Chen H. The progress of study on soil improvement research with straw stalk[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(19): 291–294
- [13] 叶丽丽, 王翠红, 彭新华, 等. 秸秆还田对土壤质量影响研究进展[J]. 湖南农业科学, 2010(19): 52–55
Ye L L, Wang C H, Peng X H, et al. Effect of straw returning on soil quality[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2010(19): 52–55
- [14] 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
Pan J L, Dai W A, Shang Z H, et al. Review of research progress on the influence and mechanism of field straw residue incorporation on soil organic matter and nitrogen availability[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(5): 526–535
- [15] 史然, 陈晓娟, 沈建林, 等. 稻田秸秆还田的土壤增碳及温室气体排放效应和机理研究进展[J]. 土壤, 2013, 45(2): 193–198
Shi R, Chen X J, Shen J L, et al. A review on application of rice straw in soil carbon sequestration and greenhouse gases emission in paddy ecosystems[J]. Soils, 2013, 45(2): 193–198
- [16] 汤宏, 吴金水, 张杨珠, 等. 水分管理和秸秆还田对稻田甲烷排放及固碳的影响研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(32): 264–270
Tang H, Wu J S, Zhang Y Z, et al. Advances on methane emission from rice paddy fields and carbon sequestration as affected by water management and rice straw incorporation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(32): 264–270
- [17] 罗龙皂, 李渝, 蒋太明. 秸秆还田固碳增汇效果研究进展[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(10): 2238–2241
Luo L Z, Li Y, Jiang T M. Research on the carbon-sink effect of straw returning[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(10): 2238–2241
- [18] 曾洪玉, 唐宝国, 蔡建华, 等. 秸秆还田对耕地质量及稻麦产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(4): 499–501
Zeng H Y, Tang B G, Cai J H, et al. Effect of straw incorporation on quality of cultivated land and yield of rice and wheat[J]. Jiangsu Agricultural Science, 2011, 39(4): 499–501
- [19] 李继福, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 麦秆还田配施不同腐秆剂对水稻产量、秸秆腐解和土壤养分的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(35): 270–276
Li J F, Lu J W, Li X K, et al. Effect of wheat straw returning with different organic matter-decomposing inoculants (OMIs) on the yield of rice, the decomposition of straw and soil nutrients[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(35): 270–276
- [20] 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
Liu H J, Chen L G, Zhou W, et al. Effects of wheat straw return on rice yield and the N P K loss with overland runoff[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(7): 1337–1343
- [21] 杨卫国, 马超, 梅亚林, 等. 麦茬秸秆还田对直播稻产量影响的初步研究[J]. 上海农业科技, 2010(4): 44–46
Yang W G, Ma C, Mei Y L, et al. Study on effect of wheat straw return on yield of direct seeding rice[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2010(4): 44–46
- [22] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 81–85
Zhu L Q, Zhang D W, Bian X M. Effects of continuous returning straws to field and shifting different tillage methods on changes of physical-chemical properties of soil and yield components of rice[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(1): 81–85
- [23] Pathak H, Singh R, Bhatia A, et al. Recycling of rice straw to improve wheat yield and soil fertility and reduce atmospheric pollution[J]. Paddy and Water Environment, 2006, 4(2): 111–117
- [24] 余冬立, 王凯荣, 谢小立, 等. 施 N 模式与稻草还田对土壤供 N 量和水稻产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(2): 16–20
She D L, Wang K R, Xie X L, et al. Effects of application of N fertilizer and incorporation of rice straw on soil nitrogen supply and rice yield[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2006, 22(2): 16–20
- [25] Phongpan S, Mosier A R. Effect of crop residue management on nitrogen dynamics and balance in a lowland rice cropping system[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 66(2): 133–142
- [26] Kumar K, Goh K M. Crop residues and management practices: Effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery[J]. Advances in Agronomy, 1999, 68: 197–319
- [27] Surekha K, Padma Kumari A P, Narayana Reddy M, et al. Crop residue management to sustain soil fertility and irrigated rice yields[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 67(2): 145–154
- [28] Nie J, Zhou J M, Wang H Y, et al. Effect of long-term rice straw return on soil glomalin, carbon and nitrogen[J]. Pedosphere, 2007, 17(3): 295–302
- [29] 李玮, 乔玉强, 陈欢, 等. 砂姜黑土秸秆还田配施氮肥的固碳效应分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(5): 756–761
Li W, Qiao Y Q, Chen H, et al. Carbon storages lime concretion black soils as affected by straw incorporation and fertilization[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(5): 756–761
- [30] Acharya C L, Kapur O C, Dixit S P. Moisture conservation for rainfed wheat production with alternative mulches and conservation tillage in the hills of north-west India[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 46(3/4): 153–163
- [31] Takahashi S, Uenosono S, Ono S. Short- and long-term effects of rice straw application on nitrogen uptake by crops and nitrogen mineralization under flooded and upland conditions[J]. Plant and Soil, 2003, 251(2): 291–301
- [32] 李朝苏, 谢瑞芝, 黄钢, 等. 稻麦轮作区保护性耕作条件下氮肥对水稻生长发育和产量的调控效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 528–535

- Li C S, Xie R Z, Huang G, et al. Effects of nitrogen management on rice growth and grain yield under conservation tillage in rice-wheat cropping system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 528-535
- [33] 张洪熙, 赵步洪, 杜永林, 等. 小麦秸秆还田条件下轻简栽培水稻的生长特性[J]. *中国水稻科学*, 2008, 22(6): 603-609
Zhang H X, Zhao B H, Du Y L, et al. Growth characteristics of rice under simplified cultivation with wheat residue return[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22(6): 603-609
- [34] 徐国伟, 谈桂露, 王志琴, 等. 秸秆还田与实地氮肥管理对直播水稻产量、品质及氮肥利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(8): 2736-2746
Xu G W, Tan G L, Wang Z Q, et al. Effects of wheat-residue application and site-specific nitrogen management on grain yield and quality and nitrogen use efficiency in direct-seeding rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(8): 2736-2746
- [35] 陈新红, 叶玉秀, 许仁良, 等. 小麦秸秆还田量对水稻产量和品质的影响[J]. *作物杂志*, 2009(1): 54-57
Chen X H, Ye Y X, Xu R L, et al. Effects of wheat straw residue amount on grain yield and quality in rice[J]. *Crops*, 2009(1): 54-57
- [36] Azam F, Lodhi A, Ashraf M. Availability of soil and fertilizer nitrogen to wetland rice following wheat straw amendment[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1991, 11(2): 97-100
- [37] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氨挥发特性比较[J]. *环境科学*, 2013, 34(1): 27-33
Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Comparing the ammonia volatilization characteristic of two typical paddy soil with total wheat straw returning in Taihu Lake region[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(1): 27-33
- [38] 曹俊, 谢仁康. 秸秆全量机械还田对水稻生育特性及产量的影响[J]. *江苏农机化*, 2010(2): 19-20
Cao J, Xie R K. Effects of all harvested straw return on rice growth characteristic and yield[J]. *Jiangsu Agricultural Mechanization*, 2010(2): 19-20
- [39] 李勇, 曹红娣, 储亚云, 等. 麦秆还田氮肥运筹对水稻产量及土壤氮素供应的影响[J]. *土壤*, 2010, 42(4): 569-573
Li Y, Cao H D, Chu Y Y, et al. Effects of wheat straw returning and nitrogen application model on rice yield and soil nitrogen supply[J]. *Soils*, 2010, 42(4): 569-573
- [40] 徐德金, 潘静, 耿义高. 秸秆全量还田与未还田对机插秧发苗动态及产量的影响[J]. *现代农业科技*, 2011(9): 44-45
Xu D J, Pan J, Geng Y G. Effect of whole and none straw returning on seedling dynamic and yield of mechanized transplanting rice[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(9): 44-45
- [41] 张传辉, 杨四军, 顾克军, 等. 秸秆还田对小麦碳氮转运和产量形成的影响[J]. *华北农学报*, 2013, 28(6): 214-219
Zhang C H, Yang S J, Gu K J, et al. Effect of straw-returning on carbon and nitrogen assimilate translocation and yield formation in wheat[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(6): 214-219
- [42] 徐国伟, 谈桂露, 王志琴, 等. 麦秸还田与实地氮肥管理对直播水稻生长的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35(4): 685-694
Xu G W, Tan G L, Wang Z Q, et al. Effects of wheat residue application and site-specific nitrogen management on growth and development in direct-seeding rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(4): 685-694
- [43] 许轲, 刘萌, 陈京都, 等. 麦秸秆全量还田对稻田土壤溶解有机碳含量和水稻产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(2): 430-436
Xu K, Liu M, Chen J D, et al. Effects of wheat-straw returning into paddy soil on dissolved organic carbon contents and rice grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(2): 430-436
- [44] 叶文培, 谢小立, 王凯荣, 等. 不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J]. *中国水稻科学*, 2008, 22(1): 65-70
Ye W P, Xie X L, Wang K R, et al. Effects of rice straw manuring in different periods on growth and yield of rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22(1): 65-70
- [45] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 不同水稻栽培模式和秸秆还田方式下的油菜、小麦秸秆腐解特征[J]. *中国农业科学*, 2011, 44(16): 3351-3360
Wu J, Guo X S, Wang Y Q, et al. Decomposition characteristics of rapeseed and wheat straws under different rice cultivations and straw mulching models[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(16): 3351-3360
- [46] 戴志刚, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 272-276
Dai Z G, Lu J W, Li X K, et al. Nutrient release characteristic of different crop straws manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(6): 272-276
- [47] 李逢雨, 孙锡发, 冯文强, 等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 374-380
Li F Y, Sun X F, Feng W Q, et al. Nutrient release patterns and decomposing rates of wheat and rapeseed straw[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(2): 374-380
- [48] 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
Shan Y H, Cai Z C, Han Y, et al. Accumulation of organic acids in relation to C/N ratios of straws and N application in flooded soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 941-947
- [49] Hick S K, Wendt C W, Gannaway J R, et al. Allelopathic effects of wheat straw on cotton germination, emergence, and yield[J]. *Crop Science*, 1989, 29(4): 1057-1061
- [50] 马瑞露, 刘秀芬, 袁光林, 等. 小麦根区微生物分解小麦残体产生的化感物质及其生物活性的研究[J]. *生态学报*, 1996, 16(6): 632-639
Ma R X, Liu X F, Yuan G L, et al. Study on allelochemicals in the process of decomposition of wheat straw by microorganisms and their bioactivity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(6): 632-639
- [51] Niranjana Rao D, Mikkelsen D S. Effect of acetic, propionic, and butyric acids on young rice seedlings' growth[J]. *Agronomy Journal*, 1977, 69(6): 923-928
- [52] 于建光, 顾元, 常志州, 等. 小麦秸秆浸提液和腐解液对水

- 稻的化感效应[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 349-356
- Yu J G, Gu Y, Chang Z Z, et al. Allelopathic effects of wheat straw extract and decomposition liquid on rice[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 349-356
- [53] 顾元, 常志州, 于建光, 等. 外源酚酸对水稻种子和幼苗的化感效应[J]. 江苏农业学报, 2013, 29(2): 240-246
- Gu Y, Chang Z Z, Yu J G, et al. Allelopathic effects of exogenous phenolic acids composted by wheat straw on seed germination and seedling growth of rice[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2013, 29(2): 240-246
- [54] 魏云霞, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 不同秸秆及绿肥浸提液对水稻的化感作用研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(30): 18-22
- Wei Y X, Lu J W, Li X K, et al. Study on allelopathic effects of extracts of different kinds of straw and green manure on rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(30): 18-22
- [55] 边秀举, 巨晓棠, 张福锁. 尿素与有机物料在土壤中的分解转化特征研究[J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(2): 29-32
- Bian X J, Ju X T, Zhang F S. The effect of organic materials applied with urea into cinnamon soil on soil nitrogen transformation characteristics[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2000, 23(2): 29-32
- [56] Bijay-Singh, Bronson K F, Yadvinder-Singh, et al. Nitrogen-15 balance as affected by rice straw management in a rice-wheat rotation in northwest India[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 59(3): 227-237
- [57] Shindo H, Nishio T. Immobilization and remineralization of N following addition of wheat straw into soil: Determination of gross N transformation rates by ¹⁵N-ammonium isotope dilution technique[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2005, 37(3): 425-432
- [58] Buresh R J, Sayre K. Implications of straw removal on soil fertility and sustainability[C]//IRRI: Expert Consultation on Biofuels. IRRI, Los Banos, Philippines, 2007: 34
- [59] 李育娟, 龚克成, 刘红江, 等. 小麦秸秆全量还田后机插水稻肥料运筹技术研究[J]. 中国稻米, 2010, 16(3): 47-49
- Li Y J, Gong K C, Liu H J, et al. Research on fertilizer application techniques of machine-transplanted rice after returning wheat straw to field[J]. China Rice, 2010, 16(3): 47-49
- [60] 汪军, 王德建, 张刚. 秸秆还田下氮肥用量对水稻产量及养分吸收的影响[J]. 土壤, 2009, 41(6): 1004-1008
- Wang J, Wang D J, Zhang G. Effects of different nitrogen fertilizer rate with straw incorporated on rice yield and nutrient uptake[J]. Soils, 2009, 41(6): 1004-1008
- [61] Kaewpradit W, Toomsan B, Cadisch G, et al. Mixing groundnut residues and rice straw to improve rice yield and N use efficiency[J]. Field Crops Research, 2009, 110(2): 130-138
- [62] Becker M, Asch F, Maskey S L, et al. Effects of transition season management on soil N dynamics and system N balances in rice-wheat rotations of Nepal[J]. Field Crops Research, 2007, 103(2): 98-108
- [63] 赵明文, 史玉英, 李玉祥, 等. 纤维分解菌群对水稻秸秆田间腐熟效果的研究[J]. 江苏农业科学, 2000, 16(1): 51-53
- Zhao M W, Shi Y Y, Li Y X, et al. Effect of cellulose decomposing bacteria population on decomposition of rice straw in fields[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2000, 16(1): 51-53
- [64] 朱国勤, 施秀燕, 杨宝仙, 等. 奉贤区不同腐熟剂处理小麦秸秆全量还田试验[J]. 上海农业科技, 2011(4): 105-106
- Zhu G Q, Shi X Y, Yang B X, et al. Comparison experiment for different decomposition agents under all wheat straw retained in field[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2011(4): 105-106
- [65] 张珍, 王依明, 陆建忠, 等. 秸秆全量还田模式下不同秸秆催腐剂的筛选研究[J]. 上海农业科技, 2011(5): 119-121
- Zhang Z, Wang Y M, Lu J Z, et al. Screening study of different decomposition agents under all straw-returning pattern in field[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2011(5): 119-121
- [66] 王允青, 郭熙盛. 不同还田方式作物秸秆腐解特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 607-610
- Wang Y Q, Guo X S. Decomposition characteristics of crop-stalk under different incorporation methods[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2008, 16(3): 607-610
- [67] 郭智, 肖敏, 陈留根, 等. 稻麦两熟农田稻季养分径流流失特征[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1622-1627
- Guo Z, Xiao M, Chen L G, et al. The characteristics of surface runoff losses of soil nitrogen and phosphorus during rice season in intensive rice-wheat rotation field[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1622-1627
- [68] 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
- Zhu L Q, Xia X J, Hu Q Y, et al. Effects of different tillage and straw return on nitrogen and phosphorus runoff loss from paddy fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 6-10
- [69] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 秸秆还田条件下稻田田面水不同形态氮动态变化特征研究[J]. 水利学报, 2014, 45(4): 410-418
- Wang J, Guo X S, Wang Y Q, et al. Study on dynamics of nitrogen in different forms in surface water of paddy field under straw return[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(4): 410-418
- [70] 王静, 郭熙盛, 王允青, 等. 秸秆还田对稻田磷素径流损失的影响[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(13): 5761-5763
- Wang J, Guo X S, Wang Y Q, et al. Effects of straw return on phosphorous losses via surface runoff from paddy field[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(13): 5761-5763
- [71] 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
- Yang Z M, Chen Y C, Zhang Y, et al. Releasing characteristics of nonpoint source pollutants from straws under submerging condition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(6): 1854-1860
- [72] 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

- Liu H J, Chen L G, Zhu P P, et al. Effects of rice straw return on wheat yield, overland runoff NPK loss and soil fertility[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(6): 6–10
- [73] 刘红江, 郑建初, 陈留根, 等. 秸秆还田对农田周年地表径流氮、磷、钾流失的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(6): 1031–1036
- Liu H J, Zheng J C, Chen L G, et al. Effects of straw-returning on annual overland runoff NPK loss in farmland[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6): 1031–1036
- [74] 王静, 郭熙盛, 王允青. 自然降雨条件下秸秆还田对巢湖流域旱地氮磷流失的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(3): 492–495
- Wang J, Guo X S, Wang Y Q. Effect of straw mulch on nitrogen and phosphorus loss from farmlands in Chaohu Lake Region under natural rainfall condition[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(3): 492–495
- [75] Wang J, Wang D J, Zhang G, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from intensively managed paddy fields with straw retention[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 141: 66–73
- [76] 崔思远, 尹小刚, 陈阜, 等. 耕作措施和秸秆还田对双季稻田土壤氮渗漏的影响[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(10): 174–179
- Cui S Y, Yin X G, Chen F, et al. Effects of tillage and straw returning on nitrogen leakage in double rice cropping field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10): 174–179
- [77] Blair N, Faulkner R D, Till A R, et al. Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility: Part I: Broadbalk experiment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 91(1/2): 30–38
- [78] Bhattacharyya P, Roy K S, Neogi S, et al. Effects of rice straw and nitrogen fertilization on greenhouse gas emissions and carbon storage in tropical flooded soil planted with rice[J]. *Soil and Tillage Research*, 2012, 124: 119–130
- [79] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农田管理土壤碳汇估算[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(3): 734–743
- Jin L, Li Y E, Gao Q Z, et al. Estimate of carbon sequestration under cropland management in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(3): 734–743
- [80] 孙瑞娟, 王德建, 林静慧. 太湖流域土壤肥力演变及原因分析[J]. *土壤*, 2006, 38(1): 106–109
- Sun R J, Wang D J, Lin J H. Evolution of soil fertility in Taihu region and its causes[J]. *Soils*, 2006, 38(1): 106–109
- [81] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Agriculture[M]//Metz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007: 497–540
- [82] Linquist B, Groenigen K J, Adviento-Borbe M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 194–209
- [83] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 秸秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(11): 2362–2367
- Li C F, Kou Z K, Zhang Z S, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2362–2367
- [84] Hou P F, Li G H, Wang S H, et al. Methane emissions from rice fields under continuous straw return in the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(9): 1874–1881
- [85] Kaewpradit W, Toomamsan B, Vityakon P, et al. Regulating mineral N release and greenhouse gas emissions by mixing groundnut residues and rice straw under field conditions[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(4): 640–652
- [86] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(5): 552–556
- Jiang J Y, Huang Y, Zong L G. Influence of water controlling and straw application on CH₄ and N₂O emissions from rice field[J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 552–556
- [87] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): GB2021, doi: 10.1029/2004GB002401
- [88] Qiu J J, Li C S, Wang L G, et al. Modeling impacts of carbon sequestration on net greenhouse gas emissions from agricultural soils in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(1): GB1007, doi: 10.1029/2008GB003180
- [89] Shang Q Y, Yang X X, Gao C M, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2196–2210
- [90] 逮非, 王效科, 韩冰, 等. 稻田秸秆还田: 土壤固碳与甲烷增排[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(1): 99–108
- 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