

稻麦两熟制下秸秆还田模式的产量和经济效益分析

张刚^{1,2,3} 张世洁^{1,3} 王德建^{1,3} 俞元春²

(¹ 中国科学院南京土壤研究所, 210008, 江苏南京; ² 南京林业大学生物与环境学院, 210037, 江苏南京; ³ 中国科学院常熟农业生态实验站, 215555, 江苏常熟)

摘要 明确不同秸秆还田模式对小麦、水稻产量和经济效益的影响, 对推广秸秆还田具有重要意义。利用稻麦复种长期田间定位试验 2012–2018 年的数据, 分析了秸秆不还田 (S0)、麦秸还田 (WS)、稻秸还田 (RS) 和稻麦秸均还田 (WRS) 4 种秸秆还田模式对作物产量、氮肥利用率、秸秆增产率、秸秆边际产量和秸秆农学利用率的影响。结果表明: 秸秆还田均增加水稻产量, 其中 RS 和 WRS 模式增产效果均显著大于 WS 模式; 小麦产量随秸秆还田年限呈“减产—稳产—增产”的变化趋势。秸秆的周年增产率和农学利用率分别为 5.65%~13.60% 和 0.11~0.17 kg/kg。与 RS 模式相比, WRS 模式属于秸秆过量还田, 其秸秆增产效率降低。秸秆还田提高稻麦氮肥周年利用率 1.67~4.01 kg/kg, 其中 RS 和 WRS 模式较 WS 模式更利于作物的氮吸收。WS、RS 和 WRS 模式的稻田周年净收益较不还田模式分别增加 1 690、4 875 和 4 177 元/(hm²·年), 其中 RS 和 WRS 模式均显著高于 WS 模式。综合以上结果, 麦季稻秸还田模式 (RS) 既可提高还田秸秆利用率, 又可增加稻田净收益, 推荐在稻麦两熟农田采用。

关键词 秸秆还田; 秸秆利用率; 氮肥利用率; 产量; 净收益

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



秸秆还田是全球有机农业的重要组成部分, 许多发达国家已将秸秆还田作为一种基本耕作制度。如英国每年秸秆还田量约占其秸秆总产量的 73%, 加拿大为 67%, 美国为 68%, 并已取得了良好的经济效益和社会效益^[1]。近年来, 随着农机的发展和作业水平的提高, 我国秸秆还田面积迅速增长, 到 2016 年, 我国秸秆机械化直接还田面积已达 4.80×10⁷ hm²^[2], 江苏省 2019 年稻秸麦秸秆机械化还田面积达到 2.86×10⁶ hm²^[3], 部分地区已达 100%^[4]。秸秆还田可增加土壤有机碳^[5], 改善土壤结构^[6], 培肥土壤^[7], 从而提高作物产量与品质^[8-11], 陈新红等^[9] 研究表明, 麦秸还田量为 9.0 t/hm² 时水稻增产 6.5%~11.7%, 水稻垩白粒率和垩白度分别降低 7.50 和 1.63 个百分点, 水稻籽粒蛋白质含量和胶稠度增加; 但也有研究认为, 秸秆还田影响水稻和小麦的出苗率和存活率^[12-15], 病虫害发生的风险增加^[16-18], 在一定程度上抵消了秸秆还田的增产效果, 甚至造成水稻和小麦减产。朱利群等^[19] 研究表明, 连续 2 年秸秆还田导致水稻减产约 7.68%,

刘世平等^[20] 研究表明, 免耕稻秸覆盖还田较翻耕秸秆不还田小麦减产约 7.27%。总体来讲, 秸秆还田对水稻和小麦的产量效应还不够明确, 缺少秸秆还田对稻麦两熟农田周年产量效应的定量评价。

因此, 本研究通过对江苏省常熟市的长期秸秆还田田间定位试验的分析, 并结合不同秸秆还田模式的生产成本, 评价太湖地区稻麦两熟农田在不同秸秆还田模式下的产量效应和经济效益, 以期为增加当地农民收益和制定秸秆还田措施提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于江苏常熟农田生态系统国家野外科学观测研究站 (123°38' E, 31°33' N), 该地属于亚热带北部湿润季风气候区, 年均气温 15.5℃, 最高气温 39.1℃, 年降水量 1 038 mm。站区地形属阳澄湖低洼平原, 海拔 3.12 m, 地下水深 80 cm 左右。供试土壤类型为乌桧土 (普通简育水耕人为土), 潜

作者简介: 张刚, 主要从事土壤、农业生态环境方面的研究, E-mail: gzhang@issas.ac.cn

王德建为通信作者, 主要从事农业面源污染研究, E-mail: djwang@issas.ac.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0801101; 2017YFD0800105); 江苏省普通高校研究生科研创新计划 (KYLX15_09)

收稿日期: 2020-02-26; 修回日期: 2020-05-26; 网络出版日期: 2020-11-16

在肥力较高，0~15cm 耕层土壤含有机质 39.3g/kg、总氮 2.30g/kg、速效磷 26.7mg/kg、速效钾 156.2mg/kg，pH 值为 7.19。种植制度为稻麦一年两熟，农田灌排方便，稻季采用间歇灌溉方式，麦季一般不需灌溉。

1.2 试验设计

试验始于 2012 年 6 月稻季，终于 2018 年麦季。设置 4 种秸秆还田模式：秸秆不还田（S0）、稻季麦秸还田（WS）、麦季稻秸还田（RS）和稻麦秸两季均还田（WRS），每个处理 3 次重复，共计 12 个试验小区、随机区组排列。小区面积 43.7m²，

小区之间以土埂分隔，田埂均用塑料薄膜包覆，以减少灌溉水的串流和侧渗。水稻品种为南粳 46 号，小麦品种为扬麦 16 号。

当地稻麦轮作农田的麦秸和稻秸的平均产量分别为 3.90~5.80 和 9.33~12.40t/hm²^[21]。因此，本试验中麦秸与稻秸还田量分别设为 5.5 和 10.0t/hm²，稻秸和麦秸两季还田量为 15.5t/hm²，不同还田模式的具体还田量见表 1。稻秸和麦秸在作物收获时同步切碎，分别于小麦播种和水稻移栽前旋耕还田，还田深度约 12cm，不还田处理的秸秆在作物收获后及时清运出农田。

表 1 不同秸秆还田模式的秸秆还田量

Table 1 Amount of straw incorporation under different modes in rice-wheat rotation system			t/hm ²
模式 Mode	稻季麦秸还田量 Amount of wheat straw incorporation in rice season	麦季稻秸还田量 Amount of rice straw incorporation in wheat season	周年还田量 Total amount of straw incorporation in rice-wheat rotation system
秸秆不还田 No straw incorporation (S0)	0.0	0.0	0.0
麦秸还田 Wheat straw incorporation (WS)	5.5	0.0	5.5
稻秸还田 Rice straw incorporation (RS)	0.0	10.0	10.0
稻麦秸均还田 Rice and wheat straw incorporation (WRS)	5.5	10.0	15.5

不同秸秆还田模式下稻田的化肥施用量均为当地推荐施肥量^[22]，稻季施肥量为 240kg N/hm²、15kg P/hm²、60kg K/hm²，麦季施肥量为 200kg N/hm²、30kg P/hm²、30kg K/hm²（化肥施用量均以 N、P、K 元素态计量）。稻季和麦季的化肥运筹一致，氮肥（尿素）为基肥 40%、分蘖肥 20%、穗肥 40%；钾肥（氯化钾）为基肥 50%、穗肥 50%；磷肥（过磷酸钙）作为基肥一次性施入。不同秸秆还田模式的田间管理措施一致。

1.3 产量测定

水稻和小麦成熟后，于每个试验小区内随机选取 3 个 1m² 的样方进行测产。水稻（粳稻）和小麦（硬质红小麦）籽粒产量分别按含水量 14.5%^[23] 和 12.5%^[24] 计算。

1.4 评价指标的计算方法

为明确还田秸秆对水稻和小麦产量的贡献度，参照氮肥利用率的计算方法，将秸秆作为一种外源添加剂整体考虑，计算还田秸秆的增产率、边际产量和农学利用率，以及作物氮肥利用率变化值和秸秆还田模式的产量收益^[8,25]。

秸秆增产率=[(秸秆还田处理单位面积籽粒产量-秸秆不还田处理单位面积籽粒产量)/秸秆不还田处理单位面积籽粒产量]×100%；秸秆农学利用率(kg/kg)=(秸秆还田处理单位面积籽粒产量-秸

秆不还田处理单位面积籽粒产量)/单位面积秸秆还田量；秸秆边际产量(kg/kg)=单位面积籽粒增产率/单位面积秸秆还田量的增量；氮肥农学利用率变化值(kg/kg)=(秸秆还田处理单位面积籽粒产量-秸秆不还田处理单位面积籽粒产量)/单位面积氮肥施用量；净收益(元/hm²)=单位面积籽粒产量×粮食价格-单位面积生产成本+单位面积种粮补贴；新增纯收益率=[(秸秆还田处理单位面积净收益-秸秆不还田处理单位面积净收益)/秸秆不还田处理单位面积净收益]×100%。

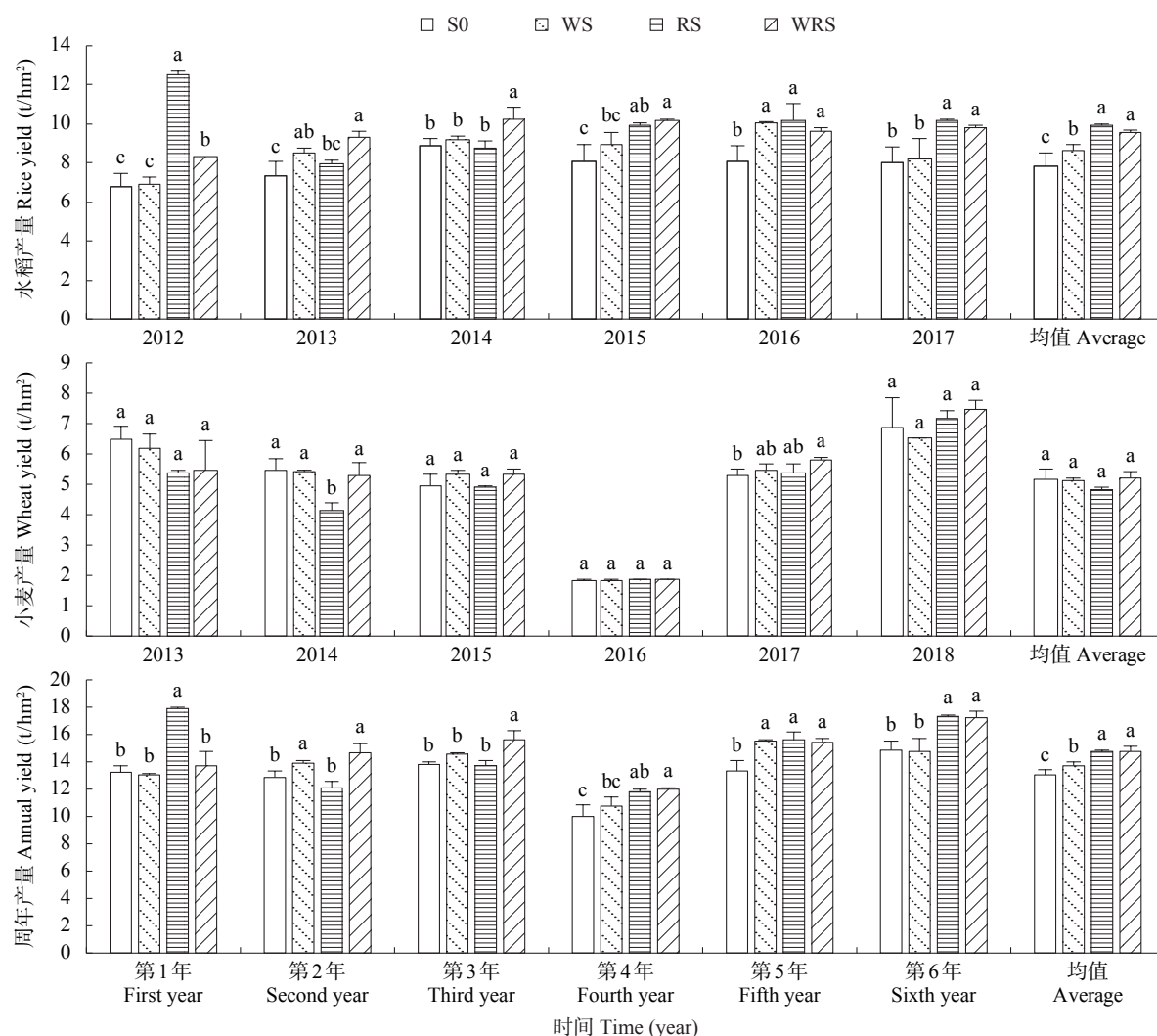
1.5 数据统计与分析

采用 Microsoft Excel 2019 整理数据，用 Origin 2020 作图；用 SPSS 18.0 单因素 ANOVA 分析不同处理间产量、秸秆增产率、秸秆边际产量、秸秆农学利用率、氮肥利用率和净收益等指标的差异，采用 LSD 测验比较，显著性水平设定为 P<0.05。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田模式对水稻和小麦产量的影响

如图 1 所示，不同秸秆还田模式的水稻产量均高于不还田模式。在还田初期（2012–2014 年），WS 和 WRS 模式对水稻的增产效果均优于 RS 模式，从第 4 年开始 RS 模式对水稻的增产效果优于 WS 模式，接近 WRS 模式。6 季水稻的平均产量表明，



柱形图上方不同字母表示模式间差异显著 (LSD 法检验)

Values followed by different letters are significant between the modes at the 5% level according to LSD test

图 1 秸秆还田模式对小麦、水稻及周年产量的影响 (2012–2018)

Fig.1 Effects of straw incorporation modes on yields of wheat, rice and annual yield (2012-2018)

3 种秸秆还田模式均显著增加水稻产量, WS、RS 和 WRS 模式较 S0 模式分别增产 9.77%、26.2% 和 21.9%。

在还田初期 (2013–2014 年), WS、RS 和 WRS 模式下小麦产量均低于 S0 模式, 秸秆还田下小麦减产。在秸秆还田的第 3 年至第 4 年, 不同模式间产量差异不显著, 第 5 年 (2017 年) 开始秸秆还田模式下的产量高于不还田模式, 秸秆还田对小麦表现出增产效果。6 季小麦的平均产量表明, 不同处理间小麦产量没有显著差异。与不还田模式相比, RS 模式减产 6.60%, WS 和 WRS 模式产量变幅分别为 -0.58% 和 0.97%, 表明稻秸当季还田模式 (RS) 对小麦产量的负效应大于麦秸上季还田模式 (WS), 并且这种减产效应随还田年限的增加逐渐

减弱。本试验中 2016 年小麦产量较其他年度大幅度减产, 原因是 2015 年太湖地区在小麦播种期间连续下雨导致小麦播种延期, 发芽率大幅降低, 而造成大幅度减产。

不同秸秆还田模式下作物的周年产量变化规律与水稻产量变化规律基本一致。6 年均值表明, 秸秆还田均显著增加稻田的周年产量, WS、RS 和 WRS 模式分别较不还田模式增产 5.65%、13.2% 和 13.6%, 其中 RS 和 WRS 模式显著高于 WS 模式。

2.2 不同秸秆还田模式的秸秆利用率分析

以 6 个稻麦复种周期的平均产量为标准, 计算不同还田模式下秸秆对水稻和小麦产量的贡献率。秸秆增产率、秸秆边际产量和秸秆农学利用率结果见表 2。

表 2 秸秆还田模式对秸秆利用率的影响 (2012–2018)
Table 2 Effects of straw incorporation modes on straw use efficiency (2012-2018)

模式 Mode	增产率 Rate of yield (%)			边际产量 Marginal yield (kg/kg)			农学利用率 Agronomic use efficiency (kg/kg)		
	稻季 Rice season	麦季 Wheat season	周年 Annual	稻季 Rice season	麦季 Wheat season	周年 Annual	稻季 Rice season	麦季 Wheat season	周年 Annual
S0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WS	9.77b	−0.65ab	5.65b	0.14b	−0.01b	0.13a	0.14ab	−0.006ab	0.13a
RS	26.20a	−6.70b	13.20a	0.29a	−0.07c	0.22a	0.21a	−0.035b	0.17a
WRS	21.90a	0.88a	13.60a	−0.06c	0.07a	0.01b	0.11b	0.003a	0.11a

注：同列数据后不同字母表示模式间差异显著（LSD 法检验），下同
Note: Values followed by different letters are significant among the modes at the 5% level according to LSD test, the same below

不同还田模式下秸秆对作物产量的增产率差异显著。对水稻产量而言，秸秆还田均增加水稻籽粒产量，其中 RS 和 WRS 模式下水稻增产率显著高于 WS 模式，分别增加 16.5 和 12.1 个百分点；对小麦产量而言，不同模式下的秸秆增产率表现为 $RS \leq WS < S0 < WRS$ ，表明稻秸还田和麦秸还田模式均造成小麦减产，稻秸还田模式小麦减产率最大。不同还田模式下的秸秆周年增产率表现为 $WRS \geq RS > WS$ ，其中 WRS 和 RS 模式间没有显著差异，较 WS 模式分别增加 7.90 和 7.55 个百分点。

秸秆边际产量指增加单位秸秆还田量时作物增加的籽粒产量。对水稻而言，WS 和 RS 模式的边际产量为正值，且 RS 模式下秸秆边际产量较高，表明麦秸还田和稻秸还田均能增加水稻产量，以稻秸还田的增产效果较好；WRS 模式下边际产量为负值，表示相对于 RS 模式，稻秸麦秸均还田时水稻开始减产。秸秆边际产量表现为 $RS < WS < S0 < WRS$ ，表明稻秸还田和麦秸还田模式均造成小麦减产，其中稻秸还田模式小麦减产幅度最大。秸秆周年边际产量均为正值，表示不同秸秆还田模式均增加作物的周年产量，其中 RS 模式的秸秆边际产量最高。

不同还田模式下的秸秆农学利用率不尽相同。对水稻而言，秸秆农学利用率为 0.11~0.21kg/kg，表现为 $RS \geq WS \geq WRS > S0$ ；对小麦而言，RS 和 WS 模式下秸秆农学利用率均为负值，表示 2 种还田模式均会造成小麦产量降低。不同还田模式下秸秆的周年农学利用率为 0.11~0.17kg/kg，其中 RS 模式最高，较 WS 和 WRS 模式分别增加 0.04 和 0.06kg/kg。

2.3 秸秆还田模式对氮肥农学利用率的影响

本试验中不同秸秆还田模式下的氮肥施用量一致，每年施氮量为 440kg N/hm²，水稻和小麦的氮肥农学利用率均以年度施氮量为基准进行计算。

如表 3 所示，对水稻而言，不同还田模式下氮

肥农学利用率变化值均为正值，说明秸秆还田促进了水稻对氮肥的利用。秸秆还田模式下的水稻氮肥农学效率较不还田模式提高 1.75~4.69kg/kg，平均提高 3.45kg/kg，RS 和 WRS 模式间均无显著差异，但均显著高于 WS 模式，分别提高 2.94 和 2.16kg/kg；对小麦而言，RS 和 WS 模式下氮肥农学利用率降低，分别降低了 0.78 和 0.08kg/kg。秸秆还田下氮肥的周年农学利用率与稻季的氮肥农学利用率变化趋势基本一致，秸秆还田下氮肥周年农学利用率较不还田模式提高 1.67~4.01kg/kg，RS 和 WRS 模式间均无显著差异，但均显著高于 WS 模式，分别提高 2.23 和 2.34kg/kg。综上，稻秸还田虽然降低了当季小麦对氮肥的利用率，但可有效增加下季水稻对氮肥的利用率，秸秆还田主要通过增强水稻对氮肥的吸收利用，提高氮肥的周年农学利用率。

表 3 秸秆还田模式对氮肥农学利用率的影响 (2012–2018)
Table 3 Effects of straw incorporation modes on agronomic nitrogen use efficiency (2012-2018) kg/kg

模式 Mode	变化值 Change value		
	稻季 Rice season	麦季 Wheat season	周年 Annual
S0	—	—	—
WS	1.75b	−0.08a	1.67b
RS	4.69a	−0.78b	3.90a
WRS	3.91a	0.10a	4.01a

2.4 秸秆还田的收益分析

水稻和小麦生产的经济效益是指水稻和小麦收获出售后，除去粮食生产总成本之后获得的收益。粮食生产总成本主要包含生产成本和土地成本^[26]。本试验生产成本参考张耀春等^[27]关于江苏省水稻和小麦生产成本的调查分析，稻季和麦季秸秆机械化还田模式的生产成本分别为 13 890 和 8 160 元/hm²。水稻和小麦的种粮补贴分别为 1 587 和 1 164 元/hm²^[26]。相较于不还田模式，WS 和 RS 的生产成本增幅均以 540 元/hm² 计^[28]。水稻（粳稻）价格按照 3.00 元/kg，小麦价格按照 2.24 元/kg^[27]，试验用地

土地成本按 0.00 元/hm² 计。采用 6 年水稻和小麦产量的平均值进行统计分析, 得到在自有土地上实施不同还田模式下的水稻和小麦生产的净收益和新增纯收益率 (表 4)。

表 4 不同秸秆还田模式下水稻小麦
生产效益分析 (2012–2018)
Table 4 Benefit analysis of rice and wheat production
under different straw incorporation modes (2012–2018)

模式 Mode	净收益 (元/hm ²) Net benefit (Yuan/hm ²)			新增纯收益率 New net (%)		
	水稻 Rice	小麦 Wheat	合计 Total	水稻 Rice	小麦 Wheat	合计 Total
S0	11 824c	5 086a	16 910b	—	—	—
WS	14 129b	4 471a	18 600b	19.5	-12.1	10.0
RS	17 471a	4 313a	21 785a	47.8	-15.2	28.8
WRS	16 440a	4 648a	21 087a	39.0	-8.6	24.7

由表 4 可知, 秸秆还田显著增加了水稻生产净收益, 秸秆还田模式较不还田模式净效益平均增加 4 189 元/hm², 其中 RS 和 WRS 模式的净效益均显著高于 WS 模式, 以 RS 模式的净收益最高, 新增纯收益率达 47.8%。对小麦而言, 不同秸秆还田模式间小麦净收益没有显著差异, 但秸秆还田模式均在一定程度上降低了小麦的收益, 秸秆还田下小麦的新增纯收益率均为负值, 说明秸秆还田降低了小麦生产的净效益。从稻麦复种周期来看, 周年净收益以水稻净收益为主, 水稻生产净收益占周年净收益的 69.9%~80.2%, WS、RS 和 WRS 模式较不还田模式周年净收益分别增加 1 690、4 875 和 4 177 元/hm², 新增纯收益率分别为 10.0%、28.8% 和 24.7%。WRS 和 RS 模式的周年净收益最高, 且显著高于 WS 和 S0 模式。WRS 和 RS 模式的周年生产净效益较 WS 模式分别增加 2 487 和 3 185 元/hm², 新增纯收益率分别增加 14.7% 和 18.8%。综上, 稻秸还田和稻麦秸均还田的经济效益较好, 麦秸还田次之。

3 讨论

秸秆还田是合理利用作物秸秆和促进农业可持续发展的一种有效耕作方式, 秸秆还田配施氮肥可促进土壤有机质积累, 改良土壤结构, 改善作物的生育环境^[10]。对于水稻而言, 秸秆还田配施氮肥能有效增加水稻产量, 裴鹏刚等^[12]研究表明, 秸秆还田配施氮肥下水稻产量较单施化肥处理产量显著增加 9.59%~23.00%。本研究中秸秆还田配施氮肥对水稻产量的影响也取得了相似的结论。与秸

秆不还田相比, 麦秸还田、稻秸还田和稻秸麦秸均还田均对水稻表现出了增产作用, 增幅分别为 9.8%、26.2% 和 21.9%, 稻秸还田和稻秸麦秸均还田模式的增产效果显著, 这主要是因为秸秆还田配施氮肥可有效增加水稻单位面积的有效穗数和穗粒数^[9, 12]。对于小麦而言, 秸秆还田对小麦的产量效应不一^[11, 20, 29-30], 本研究中在秸秆还田初期 (2013–2014 年), 不同还田模式小麦产量均降低, 长期秸秆还田后 (从 2017 年开始), 小麦产量均增加。秸秆还田对小麦产量的效应随还田年限呈“减产 – 稳产 – 增产”的趋势, 本试验中自第 5 年始, 秸秆还田对小麦表现出增产效果。总体来看, 秸秆还田能较快地有效增加水稻产量, 但小麦需要多年连续秸秆还田才能表现出增产效果, 这与孙小祥等^[31]在太湖地区的秸秆还田试验的结论基本一致。

关于还田秸秆的利用率问题, 本研究参考氮肥利用率的计算思路, 统计分析了不同还田模式下的秸秆增产率、秸秆边际产量和秸秆农学利用率。本试验中秸秆还田对水稻的增产率和农学利用率分别为 9.77%~26.20% 和 0.11~0.21kg/kg, 而还田秸秆对小麦增产率和农学利用率除稻麦秸均还田处理 (0.88%、0.003kg/kg) 外均为负值, 同样表明, 秸秆还田对水稻具有增产作用, 但对小麦有不同程度的减产效应。秸秆还田增加水稻产量的原因是, 秸秆还田可增加水稻的有效分蘖数, 增强叶片中硝酸还原酶活性, 可维持水稻抽穗期后剑叶的高效光合作用, 增加光合同化物和氮素的积累, 从而提高水稻产量^[12]。本研究中稻秸还田模式的产量高于麦秸还田模式, 是因为稻秸腐解主要发生在麦季^[32], 其秸秆腐解产物对水稻根系的毒害作用小于麦秸还田模式, 有利于水稻分蘖发生。秸秆还田造成小麦减产的原因是, 秸秆还田导致农田土壤孔隙度增大影响小麦的出苗和立苗, 导致小麦苗体较弱^[33]; 同时秸秆腐解释放的化感物质抑制小麦发苗和分蘖^[34]。从稻麦复种周期来看, 本试验中不同还田模式的秸秆增产率和秸秆农学利用率均为正值, 是因为秸秆还田虽然降低了小麦产量, 但对水稻的增产效果更加显著。因此, 不同秸秆还田模式均能增加水稻和小麦的周年产量。本试验中稻麦秸均还田模式的秸秆边际产量仅为 0.01kg/kg, 远低于稻秸还田模式 (0.22kg/kg) 和麦秸还田模式 (0.13kg/kg), 表明秸秆双季还田模式的秸秆利用率呈降低趋势, 秸秆的周年利用率较稻秸还田模式降低 0.06kg/kg, 因此,

稻麦秸两季均还田模式的秸秆还田量较单季稻秸还田模式属于过量施用。孙小祥等^[31]研究也表明,稻麦秸均还田模式和稻秸还田模式下水稻和小麦周年产量无显著差异,稻麦秸均还田模式下秸秆利用率降低。因此,综合考虑还田秸秆的增产率、边际产量和农学利用率,本试验中稻秸还田模式的秸秆利用率最高。

从秸秆还田对氮肥利用率的影响来看,本试验中稻秸还田虽然降低了当季小麦对氮肥的利用率,但有效增加了下季水稻对氮肥的利用率。顾克军等^[14]研究也取得了相同的结论,稻秸还田后小麦减产4.87%,小麦的氮肥利用率呈降低趋势;高茂盛^[35]研究表明,适量秸秆还田虽然造成当季作物有所减产,但可明显增加隔茬冬小麦产量,提高了隔茬作物的氮肥利用率。从水稻和小麦对氮肥的周年利用率来看,秸秆还田增加了小麦和水稻对氮肥的周年利用率,陆强等^[36]研究表明,秸秆还田能提高水稻和小麦氮肥生理利用率。本试验中稻秸还田和稻麦秸均还田模式氮肥的周年利用率较高,这两种秸秆还田模式有利于获得更高的周年产量。

秸秆还田模式能否推广的关键取决于其经济效益。虽然秸秆还田增加了农业生产的成本^[28],但秸秆还田增加了小麦和水稻的周年产量和经济效益。本研究中稻秸还田模式和稻麦秸均还田模式周年净收益分别增收约4 875和4 177元/hm²。结合秸秆还田年限对稻麦产量的影响效应,实行多年连续稻秸还田或者稻麦秸均还田措施,农民的收益会更加稳定,更加显著。然而,前文讨论表明,稻麦秸两季均还田模式中的秸秆还田量相对于稻秸还田模式已属于过量还田,秸秆利用率降低。因此,在稻麦两熟农田中推荐采用麦季稻秸还田模式,同时可采用播后镇压等农艺措施以减轻稻秸还田对小麦生育的不利影响,增加小麦产量^[14]。对于不还田的麦秸,应及时利用秸秆打包机等机械收集、转运到相关企业进行合理化利用,如秸秆发电^[37]和秸秆饲料化^[38]等,保护环境同时可增加农民的收益。

4 结论

麦秸还田、稻秸还田和稻麦秸两季还田模式均增加水稻产量,小麦产量随还田年限的延续呈“减产-稳产-增产”的趋势,小麦需多年连续还田才能稳定增产。秸秆还田对水稻和小麦周年产量的增产率和农学利用率分别为5.65%~13.60%和

0.11~0.17kg/kg,其中稻麦秸均还田模式的秸秆利用率低于稻秸还田模式。秸秆还田主要通过增强水稻对氮肥的吸收提高氮肥的周年农学利用率。秸秆还田增加水稻和小麦的周年净收益,且以水稻增收为主,其中稻秸还田、稻麦秸均还田和麦秸还田模式较不还田模式分别增收4 875、4 177和1 690元/(hm²·年)。在稻-麦两熟地区推荐采用麦季稻秸还田模式,既有利于提高还田秸秆的利用率,又利于增加农民收入。

参考文献

- [1]常志州,陈新华,杨四军,等.稻麦秸秆直接还田技术发展现状及展望.江苏农业学报,2014,30(4):909-914.
- [2]王晓宇.全国秸秆机械化还田离田暨东北地区秸秆处理行动现场会在吉林召开.农业部副部长张桃林要求发挥农机化在秸秆综合利用中的主力军作用.中国农机监理,2017(10):13-14.
- [3]吴琼.4300万亩!江苏秸秆机械化还田面积创历史新高.[2020-03-14] http://k.sina.com.cn/article_5675440730_152485a5a02000s5xv.html.
- [4]Zhang G, Wang D J, Yu Y C. Investigation into the effects of straw retention and nitrogen reduction on CH₄ and N₂O emissions from paddy fields in the lower Yangtze River region, China. Sustainability, 2020, 12(4): 1683.
- [5]王海候,金梅娟,陆长婴,等.秸秆还田模式对农田土壤碳库特性及产量的影响.自然资源学报,2017,32(5):755-764.
- [6]张志国,徐琪, Blevins R L.长期秸秆覆盖免耕对土壤某些理化性质及玉米产量的影响.土壤学报,1998,35(3):384-391.
- [7]张刚,王德建,王灿.不同农田施肥方式下土壤碳氮变化特征及其环境意义.中国农学通报,2013,29(32):303-308.
- [8]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.植物营养与肥料学报,2016,22(4):877-885.
- [9]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.作物杂志,2009(1):54-57.
- [10]赵鹏,陈阜.秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响.作物学报,2008,34(6):1014-1018.
- [11]缪辰,黄卉,宋亚,等.周年秸秆还田对耕地质量和稻麦产量的影响.耕作与栽培,2015(6):9-12.
- [12]裴鹏刚,张均华,朱练峰,等.秸秆还田耦合施氮水平对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响.中国水稻科学,2015,29(3):282-290.
- [13]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.土壤学报,2013,50(2):349-356.
- [14]顾克军,张斯梅,顾东祥,等.稻秸还田与播后镇压对稻茬小麦产量与品质的影响.核农学报,2015,29(11):2192-2197.
- [15]李波,魏亚凤,季桦,等.稻草还田与不同耕作方式对小麦出苗以及产量的影响.中国农学通报,2012,28(24):122-126.
- [16]谢中卫.秸秆还田对玉米病虫害草害的影响及防治对策.现代农业科技,2015(21):140-141.
- [17]李洪林,刘凤艳,龚振平,等.秸秆还田对水稻主要病害发生的影响.作物研究,2012,26(1):7-10.
- [18]赵永强,徐振,张成玲,等.稻麦秸秆全量还田对小麦纹枯病发生的影响.西南农业学报,2017,30(5):1063-1067.
- [19]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.土壤通报,

- 2011, 42(1):81-85.
- [20]刘世平, 陈后庆, 陈文林, 等. 稻麦两熟制不同耕作方式与秸秆还田对小麦产量和品质的影响. 麦类作物学报, 2007, 27(5): 859-863.
- [21]苏州市统计局. 苏州统计年鉴2019. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [22]王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响. 土壤学报, 2003, 40(3):426-432.
- [23]中华人民共和国国家标准. GB 1350-2009, 稻谷. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [24]中华人民共和国国家标准. GB 1351-2008, 小麦. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [25]奚振邦. 关于化肥对作物产量贡献的评估问题. 磷肥与复肥, 2004, 19(3):68-71.
- [26]蒋小忠, 纪从亮, 李杰. 浅析江苏粮食生产降低成本的途径. 中国稻米, 2017, 23(3):18-21.
- [27]张耀春, 孟德富, 杨国树. 2013年江苏省小麦、水稻生产成本及经营收益调查分析. 江苏农机化, 2014(5):1, 4-5.
- [28]平英华, 彭卓敏, 夏春华. 江苏秸秆机械化还田经济效益分析与财政补贴政策研究. 中国农机化学报, 2013, 34(6):50-64, 61.
- [29]薛亚光, 魏亚凤, 李波, 等. 不同稻秸还田方式对冬小麦产量及冻害的影响. 中国农学通报, 2017, 33(32):58-63.
- [30]Pathak H, Singh R, Bhatia A, et al. Recycling of rice straw to improve wheat yield and soil fertility and reduce atmospheric pollution. Paddy and Water Environment, 2006, 4(2): 111-117.
- [31]孙小祥, 常志州, 靳红梅, 等. 太湖地区不同秸秆还田方式对作物产量与经济效益的影响. 江苏农业学报, 2017, 33(1):94-99.
- [32]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. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6):1049-1053.
- [33]石正平, 张珍, 陆建忠, 等. 上海地区水稻秸秆全量还田后种植小麦减产原因及对策分析. 上海农业科技, 2017(4):147-148.
- [34]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. 华北农学报, 2013, 28(6):214-219.
- [35]高茂盛. 秸秆还田对隔茬冬小麦抗性生理及土壤肥力的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [36]陆强, 王继琛, 李静, 等. 秸秆还田与有机无机肥配施在稻麦轮作体系下对籽粒产量及氮素利用的影响. 南京农业大学学报, 2014, 37(6):66-74.
- [37]薛朝改, 王新凤. 公平偏好对秸秆发电供应链决策的影响分析. 江苏农业科学, 2018, 46(10):307-312.
- [38]张建强, 任昌文, 张春旺. 不同小麦秸秆切碎长度及加工程度对奶牛干物质采食量、产奶量及消化率的影响. 中国饲料, 2019(6):17-21.

Analysis of Yield and Economic Benefit of Straw Incorporation under Rice-Wheat Double Cropping System

Zhang Gang^{1,2,3}, Zhang Shijie^{1,3}, Wang Dejian^{1,3}, Yu Yuanchun²

(¹Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, Jiangsu, China; ²College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; ³Changshu Agroecological Experimental Station of the Chinese Academy of Sciences, Changshu 215555, Jiangsu, China)

Abstract Exploration of the effects of straw incorporation mode on yield benefits of wheat and rice has great significance for popularizing straw incorporation. In this work, we conducted a long-term field experiment from 2012 to 2018 to study the effects of straw incorporation modes on crop yield, agronomic nitrogen use efficiency, and the rate of yield increase, marginal yield and agronomic use efficiency of straw returned. The experiment included four straw incorporation modes: no straw incorporation (S0), wheat straw incorporation (WS), rice straw incorporation (RS) and both rice and wheat straw incorporation (WRS). The results showed that: rice yield was increased under different straw incorporation modes, of which the output of the RS and WRS modes were significantly higher than that of the WS mode, while wheat yield showed a trend of "decrease-stabilization-increase" with the times of straw incorporation. The annual yield increase rate and agronomic use efficiency of straw were 5.65%-13.60% and 0.11-0.17kg/kg, respectively. Compared with the RS mode, the amount of straw returned of the WRS mode was excessive, and the straw utilization rate was decreased. Straw incorporation improved the annual nitrogen use efficiency by about 1.67-4.01kg/kg, and the RS and WRS modes were more conducive to crop utilization of nitrogen than the WS mode. Compared with the S0 mode, the annual net incomes of WS, RS and WRS modes increased by 1 690, 4 875, and 4 177 yuan/(ha·a) respectively. Among of the three straw incorporation modes, the annual net benefits of the RS and WRS modes were significantly higher than that of the WS mode. In conclusion, the rice straw incorporation mode (RS) was recommended to adopt in rice-wheat double cropping system, which can improve the straw utilization efficiency and increase the paddy field's net benefit.

Key words Straw incorporation; Straw use efficiency; Nitrogen use efficiency; Yield; Net benefit