

秸秆还田与化肥减施对水稻生长指标及光合参数的影响

李思平, 丁效东, 曾路生, 吴立鹏, 张玉晓, 解军蕊, 李 栋

(青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109)

摘要: 针对水稻生产中存在秸秆处理不当以及化肥用量增多等问题, 以山东省济宁市稻麦轮作体系下水稻“圣稻 18 号”为研究对象, 通过田间试验设置 3 个处理: 常规施肥, 小麦秸秆不还田(CK); 常规施肥+小麦秸秆全量还田(T1); 常规施肥量的 85%+小麦秸秆全量还田(T2), 深入探究秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻生长、光合参数和产量的影响, 为制定合理的水稻种植措施提供理论依据。结果表明, 稻麦轮作体系下秸秆还田不利水稻前期生长, 但能显著提高水稻生长中、后期的生长指标, 并增强水稻生长中、后期对氮、磷、钾等养分的吸收。水稻生长中后期 T2 处理的叶绿素含量、净光合速率以及光谱反射率均为最高, 其中灌浆期 SPAD 值与净光合速率分别较 CK 处理升高 4.4% 和 37.5%; 另外, T2 处理生长后期的 F_v/F_m 、 PI_{abs} 均较前期所升高。试验还表明, T2 处理水稻产量最高, 比 CK 处理增产 13.1%, 增产的直接原因是单位面积有效穗数的增加。综上所述, 秸秆还田配合化肥减施有助于水稻栽培生产中实现高产增效, 在实际生产中值得推广应用。

关键词: 水稻; 秸秆还田; 化肥减施; 生长指标; 光合参数; 产量

中图分类号: S141.4; S314; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)02-0208-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.02.030

Effects of Straw Returning and Chemical Fertilizer Reduction on Growth Index and Photosynthetic Parameters of Rice

LI Siping, DING Xiaodong, ZENG Lusheng, WU Lipeng, ZHANG Yuxiao, XIE Junrui, LI Dong

(College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109)

Abstract: In view of the problems of improper straw treatment and increased fertilizer application in rice production, taking Saint Rice 18 under the rice-wheat rotation system in Jining City, Shandong Province as the research object, three treatments were set up through field experiments: conventional fertilization, wheat straw non-return (CK); conventional fertilization + wheat straw full return (T1); 85% of the conventional fertilization + wheat straw full return (T2). The rice growth, photosynthetic parameters and yield at different growth stages were studied to provide theoretical basis for working out the reasonable rice planting measures. The results indicated that straw returning to field under rice-wheat rotation system was adverse to the early growth of rice, however, it could significantly improve rice growth in the middle and late growth stages, and enhance the absorption of nitrogen, phosphorus, potassium and other nutrients in the middle and late growth stages. The chlorophyll content, net photosynthetic rate and spectral reflectance of T2 were the highest in the middle and late growth stages, and the SPAD value and net photosynthetic rate increased by 4.4% and 37.5%, respectively, compared with CK. During the filling stage, both F_v/F_m and PI_{abs} were higher than the previous periods. The experiment also showed that T2 had the highest yield, which increased by 13.1% compared with CK. The direct reason for yield increasing was the increase of effective panicle per unit area. In summary, straw returning to the field combined with fertilizer reduction is helpful to achieve high yield and efficiency in rice cultivation production, which is worth popularizing and applying.

Keywords: rice; straw returning; fertilizer application reduction; growth index; photosynthetic index; yield

收稿日期: 2019-08-14

资助项目: 山东省现代农业产业体系水稻岗位创新团队建设项目(SDAIT-17-05); 国家重点研究计划项目(2018YFD0200204-06)

第一作者: 李思平(1996—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事农业资源与环境研究。E-mail: lisiping911@163.com

通信作者: 曾路生(1966—), 男, 副教授, 博士, 主要从事土壤与肥料科学教学与研究。E-mail: zenglsh@163.com

水稻作为我国单产最高的粮食作物,总产量占全国粮食产量的 50%,全国约有 65%的人口以稻米为食^[1-2]。上世纪 80 年代以来,我国农业生产中开始大规模使用化肥,大量的化肥投入显著提高了我国粮食产量,为我国农业生产的快速发展起到重要作用^[3]。当前水稻生产中农民仍以增施化肥作为提高产量的主要手段,但长期过量施肥不仅会降低肥料利用率,还会造成土壤质量下降和环境污染^[4]。许多研究^[5-6]表明,农业面源污染是导致生态环境破坏的主要原因之一,严重威胁农业的可持续发展。在当前我国大力倡导节肥增效的新形势下,如何将化肥减施与保持土壤肥力相平衡已成为农业生产的重要问题。近年来,秸秆还田作为一种培肥地力的增产措施被普遍接受和应用。秸秆还田不仅能保证生物质资源的合理利用,还可以减少因秸秆焚烧造成的环境污染和资源浪费,优化农田生态环境,提高作物产量^[7-9]。秸秆还田后被土壤微生物分解,还能改良土壤的理化性质,有效提高土壤养分含量^[10]。许多学者通过研究秸秆还田取得了一些成效,白和平等^[11]研究发现,秸秆还田后土壤有机质含量平均提高 0.29 g/kg,且秸秆在分解过程中缓慢释放有效养分,对提高土壤肥力具有重要意义;白伟等^[12]研究发现,相同施氮条件下秸秆还田 2 年的春玉米最高增产 11.5%,氮肥农学利用率明显提高;谢佳贵等^[13]研究表明,秸秆还田能提高玉米产量的稳定性,使玉米子粒中氮、磷、钾的吸收量分别提高 10.7%,4.5%和 25.5%。秸秆还田对作物产量和土壤养分的影响前人已研究较多,而将秸秆还田与化肥减施相配合,对其条件下水稻不同生育期的生长指标的探究相对较少。本文通过田间试验深入探究秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻生长、养分吸收和产量的影响,为山东济宁地区制定合理的水稻种植措施,实现水稻高产优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究以山东省济宁市任城区水稻试验基地(35°33'N,116°47'E)为研究区域,试验时间为 2017 年 6—10 月。土壤类型为肥力中等的砂姜黑土,试验前 0—20 cm 土层土壤基本理化性质为:pH 8.1,有机质含量 11.7 g/kg,全氮含量 1.19 g/kg,全磷含量 0.85 g/kg,全钾含量 1.31 g/kg,速效磷含量 24.6 mg/kg,速效钾含量 212.0 mg/kg。试验对象是第二季水稻,品种为“圣稻 18 号”,于 2017 年 6 月 17 日插秧,10 月 15 日收割。供试肥料包括尿素(含 N 46%)、复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15)。种植模式为水稻—小麦轮作,还田秸秆为稻麦轮作体系中上季小麦的秸秆。

1.2 试验设计

试验共设 3 个处理,分别为:常规施肥,小麦秸秆不还田(CK);常规施肥+小麦秸秆全量还田(T1);常规施肥量的 85%+小麦秸秆全量还田(T2)。3 次重复,小区面积为 222 m²(22.2 m×10 m),区组随机排列,各小区之间用塑料薄膜隔开,区组之间设置 60 cm 宽的排灌沟,全部小区实行单排单灌。常规施肥按照复合肥(N:P₂O₅:K₂O 为 15:15:15)600 kg/hm²作基肥施用;尿素(含 N 46%)600 kg/hm²分别按基肥、返青肥、分蘖肥、穗肥施用量各占总施氮量的 30%,25%,35%,10%,小麦秸秆粉碎后翻压还田,作基肥施用。T2 处理施用化肥时,基肥与各时期追肥均按 T1 处理常规施肥量的 85%施用。水稻种植期间保持田面水位 1~6 cm,拔节和抽穗之前各喷施一次防病虫害农药,其他田间管理均按当地常规方法进行。

1.3 测定项目与方法

分别于水稻分蘖期、拔节期、抽穗期、灌浆期、以及成熟期时采集水稻样品,每个处理随机采集 12 株水稻,用以分析测定生长指标。

1.3.1 水稻生长指标的测定 株高、根长:采用直尺直接进行测量;根体积用排水法测量;叶面积用打孔计重法测定;分蘖数直接数出;鲜质量由电子天平称量。

1.3.2 水稻养分吸收的测定 水稻样品采用浓 H₂SO₄—H₂O₂ 消煮,全氮含量采用凯氏定氮法测定;全磷含量采用钒钼黄比色法测定;全钾含量采用火焰光度计法测定。

1.3.3 水稻光合参数及叶绿素的测定 水稻光合作用指标利用汉莎公司 CIRAD—3 光合仪,选择晴天测定;叶绿素使用 SPAD—502 叶绿素测定仪在试验田直接测定;水稻冠层光谱采用 Auaspel-ULS2048 光纤光谱仪,选择晴朗、无风天气,收集不同处理的水稻冠层光谱反射率。

1.3.4 叶绿素荧光参数的测定 采用美国汉莎公司生产的 M—PEA 叶绿素荧光仪。测定时,选取不同处理水稻同一高度的叶片,选在晴天,进行暗适应 20 min 后进行测定。

1.3.5 水稻产量的测定 每小区选择 1 m²有代表性的样点计算水稻产量,并测量穗数、穗粒数、千粒重与结实率。

1.4 统计分析

采用 SPSS 20.0 和 Microsoft Office Excel 软件对各指标数据进行统计分析,并绘制图表。方差分析比较处理间的效应差异,LSD 法比较平均数之间的差异显著性,并进行逐步回归分析与通径分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田与化肥减施对水稻生长指标的影响

由表 1 可知,在水稻分蘖期,CK 水稻株高、根长、分蘖数均为最高,而 T1 处理下水稻鲜质量、根体积均为最高,且差异显著。T1 处理的叶面积最高,较 CK 处理高出 41.3%。在水稻拔节期,CK 根长最长为 22.2 cm,T2 处理根长最短为 15.1 cm,且各处理之间差异显著。T2 处理根体积最大,T1 处理的水稻叶面积与分蘖数最高,分别比 CK 高出 8.6%和 37.9%。在水稻分蘖期 CK 生长指标较好,而到拔节期 T1 处理的生长指标相对较好。

在水稻抽穗期,除株高和根长外,T2 处理各项生长指标均为最高,其中叶面积和分蘖数分别比 T1 处

理高出 110.2%和 100.0%。在水稻灌浆期,除株高外各生长指标均比抽穗期略有减少,说明水稻开始衰老。比较发现,T1 处理的株高、根长和叶面积指标均为最高,其中根长比 CK 高出 10.2%。T2 处理的根体积、鲜重和分蘖数指标均为最高,其中根体积较其他处理差异显著。T2 处理在水稻抽穗期有较好的生长指标,而在水稻灌浆期 T1 与 T2 处理均表现较好。在水稻成熟期,T2 处理的鲜质量、根体积均为最高,且较其他处理差异显著。T2 处理水稻分蘖数也最高,但较 T1 处理差异不显著。T1 处理下根长最长为 12.9 cm,比 CK 高出 20.6%,差异不显著。常规施肥 CK 下,株高和叶面积均为最高。成熟期 T2 处理的生长指标相对较好。

表 1 秸秆还田与化肥减施处理下水稻不同生育期生长指标的变化

生育期	处理	株高/cm	根长/cm	单株鲜质量/g	单株根体积/cm ³	单株叶面积/cm ²	单株分蘖数/个
分蘖期	CK	35.7±1.1a	16.4±0.6a	5.3±0.4a	1.7±0.2a	62.2±4.3b	2.6±0.3a
	T1	34.9±0.8ab	15.6±1.1a	5.6±0.3a	2.1±0.3a	87.9±8.1a	2.2±0.3a
	T2	33.0±1.2b	11.1±1.3b	4.3±0.2b	0.9±0.1b	70.7±10.2ab	1.5±0.1b
拔节期	CK	73.1±1.3a	22.2±2.0a	36.2±2.8a	2.5±0.3b	355.7±8.7b	2.9±0.2b
	T1	74.8±2.2a	17.8±1.6b	38.9±3.1a	2.9±0.2b	386.3±11.4a	4.0±0.2a
	T2	73.1±1.6a	15.1±0.9c	34.0±1.8a	3.6±0.3a	355.3±13.5b	2.7±0.1b
抽穗期	CK	89.6±2.2a	13.0±0.6b	18.1±2.4b	1.2±0.1b	149.9±22.1b	1.5±0.3b
	T1	90.2±1.6a	14.3±0.8ab	15.0±1.0b	1.5±0.1b	113.2±18.5b	1.4±0.2b
	T2	92.2±3.6a	15.1±1.2a	30.5±2.3a	2.1±0.1a	237.9±18.8a	2.8±0.4a
灌浆期	CK	87.5±1.1a	14.7±0.5b	25.8±1.2a	1.1±0.1b	154.6±12.1ab	1.6±0.2a
	T1	88.5±2.6a	16.2±0.8a	28.2±2.0a	1.0±0.1b	168.8±7.8a	1.7±0.1a
	T2	88.3±1.7a	15.2±1.3ab	28.6±3.3a	2.7±0.2a	147.5±9.7b	1.9±0.2a
成熟期	CK	93.3±4.2a	10.7±1.8ab	32.7±1.8ab	1.1±0.1b	347.8±19.2a	2.3±0.2b
	T1	81.7±5.1b	12.9±0.7a	30.7±2.4b	1.1±0.1b	323.3±20.7ab	2.7±0.3ab
	T2	85.1±4.3ab	9.8±1.5b	37.0±3.5a	1.6±0.2a	296.9±15.7b	2.8±0.2a

注:同行数据后不同字母表示相同生长时期不同处理间在差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 秸秆还田与化肥减施对水稻养分吸收的影响

从图 1 可以看出,各处理的水稻全氮含量均从分蘖期开始降低,至抽穗期出现回升,灌浆期再次降低。且水稻整个生育期内,T1 处理的全氮含量均高于 T2 处理,其中在分蘖期和灌浆期分别高出 51.6%和 10.5%。拔节期各处理间全氮含量差异不大,而从抽穗期到成熟期均为 T1 处理最高,T2 处理次之,CK 最低。对于水稻整个生育期而言,T1 处理的全氮含量指标较好,说明秸秆还田促进了水稻对土壤氮素的吸收。

从图 2 可以看出,各处理间水稻全磷含量均从分蘖期开始大幅度降低,其中下降程度最大的是 T2 处理,降低 86.8%;至拔节期各处理全磷含量下降幅度变小;到抽穗期各处理间已无明显差异,而后开始回升;至灌浆期再次降低。水稻在分蘖期 T2 处理的全磷含量最高,T1 处理含量最低,而其他时期各处理间全磷含量差异不大。总体来说,秸秆还田与化肥减施对水稻全磷含量影响不大。

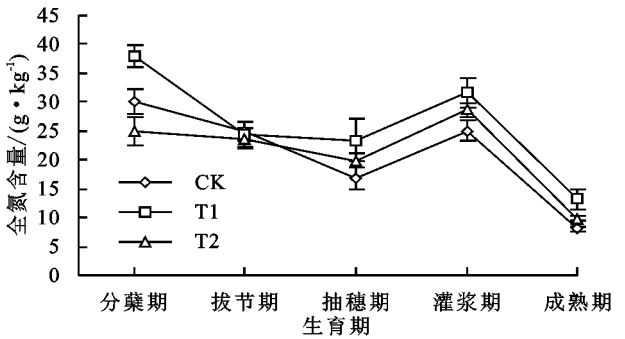


图 1 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻全氮含量的影响

由图 3 可知,随着水稻生长发育,所有处理的全钾含量总体呈现下降趋势,其中 T1 和 T2 处理自分蘖期至成熟期分别下降 67.5%和 70.6%。且水稻整个生育期内,T1 和 T2 处理的全钾含量均高于 CK,说明秸秆还田可促进水稻对土壤钾素的吸收。在分蘖期 T1 处理全钾含量最高为 41.5 g/kg,比 CK 高出 17.2%;在灌浆期 T2 处理全钾含量最高为 18.6 g/kg。总体来说,秸秆还田与全量化肥配施的 T1 处理

水稻全钾含量最高。

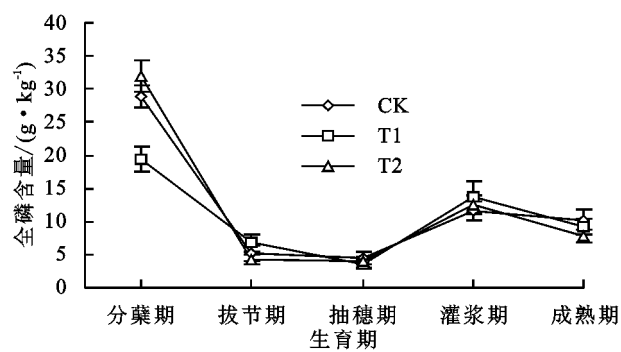


图2 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻全磷含量的影响

2.3 秸秆还田与化肥减施对水稻叶绿素 SPAD 的影响

从图4可以看出,随着水稻生长发育,水稻叶绿素含量从分蘖期至灌浆期呈逐渐上升的趋势。在水稻分蘖期,各处理间叶绿素含量差异不明显;到拔节期和抽穗期,T2处理的叶绿素含量最高,分别比CK高出8.2%和8.4%,且差异显著;灌浆期叶绿素含量最高的仍是T2处理,比CK高出4.4%。对水稻整个生育期来说,T2处理的叶绿素含量较好。

2.4 秸秆还田与化肥减施对水稻光合参数的影响

从图5可以看出,在拔节期CK的净光合速率(P_n)最高,胞间 CO_2 浓度(C_i)最低,说明拔节期CK光合作用最强。到了抽穗期和灌浆期CK净光合速率(P_n)略低于其他处理,说明CK在水稻生长中后期光合作用减幅较大。到了灌浆期T2处理的净光合速率(P_n)最高,较CK高出37.5%,说明水稻灌浆期T2处理的光合作用相

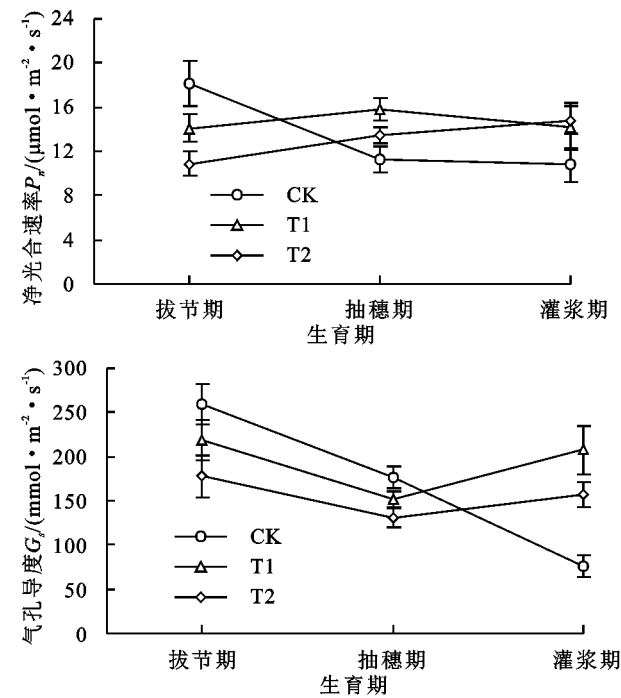


图5 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻光合参数的影响

2.5 秸秆还田与化肥减施对水稻光谱特征的影响

从图6可以看出,不同生育期不同处理的水稻冠层光谱反射率的变化趋势大致相同,均在550 nm左

对较好。各处理的气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)均从拔节期开始下降,而T1、T2处理在抽穗期到灌浆期之间有所升高,CK继续下降,在水稻生长后期CK的蒸腾作用弱于其他处理。

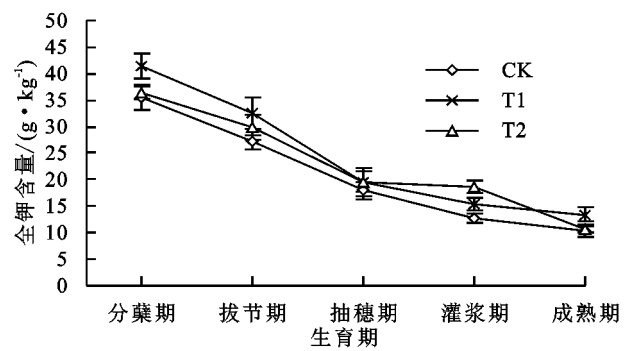
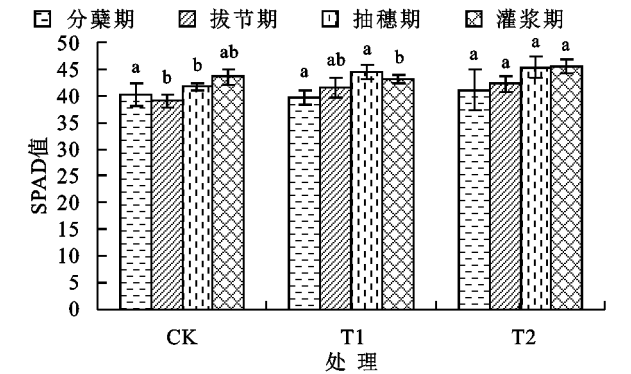
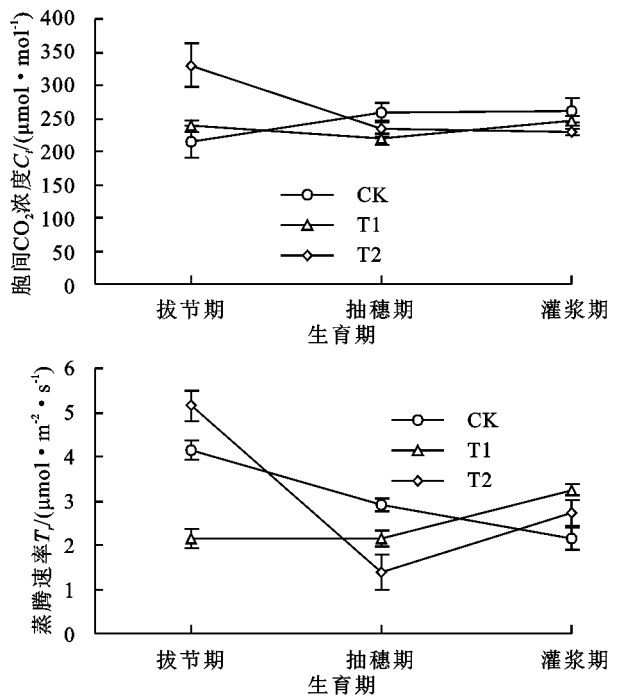


图3 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻全钾含量的影响



注:图中不同字母表示相同生长时期不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图4 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻叶绿素 SPAD 的影响



右形成反射峰“绿峰”,于680 nm左右形成反射谷“红谷”。均在近红外光段(760~900 nm)反射率升高,形成“近红外反射平台”,在此波段反射率越高,

叶片组织越完好。在拔节期与灌浆期,水稻冠层光谱可见光(350~760 nm)反射率大小为 T2>T1>CK;而在近红外光(760~900 nm)下,水稻拔节期与灌浆期冠层反射率大小为 T2>CK>T1,分蘖期为 T1>CK>T2,抽穗期为 T1>T2>CK,均差异显著。尤其是在灌浆期,T2 处理反射率是其他处理的 1.5 倍以上,说明在水稻灌浆期 T2 处理叶片组织更完好。

2.6 秸秆还田与化肥减施对水稻荧光参数的影响

在水稻分蘖期,T1 处理的最大光化学效率(F_v/F_m)和反应中心的性能指数(PI_{abs})最高,T2 处理最低,而从单位反应中心的吸收光能(ABS/RC)来看,T1 处理比 CK 处理下降了 16.0%。各处理间电子传递能量占总

吸收光能的比例(ET_o/ABS)无显著差异。常规施肥处理单位叶面积吸收的光能(ABS/CS_m)最高,对比 CK,T1 处理下降 6.7%,T2 处理下降 22.1%,均差异显著。

在水稻拔节期,各处理 F_v/F_m 与 ET_o/ABS 均无显著差异,T1 处理 ABS/RC 最高,对比 CK 处理提高 28.8%;T2 处理的 ABS/CS_m 与 PI_{abs} 均最高,分别比 CK 提高 17.8%和 47.3%。到水稻抽穗期,T2 处理的 F_v/F_m 、 ET_o/ABS 、 ABS/CS_m 与 PI_{abs} 均变为最低,分别比 T1 处理降低 9.6%,26.2%,13.6%和 63.9%,但 T2 处理的 ABS/RC 最高。在水稻灌浆期,T2 处理的 ABS/CS_m 仍为最低,比 T1 处理降低 10.7%,其余各荧光指标均无显著差异(表 2)。

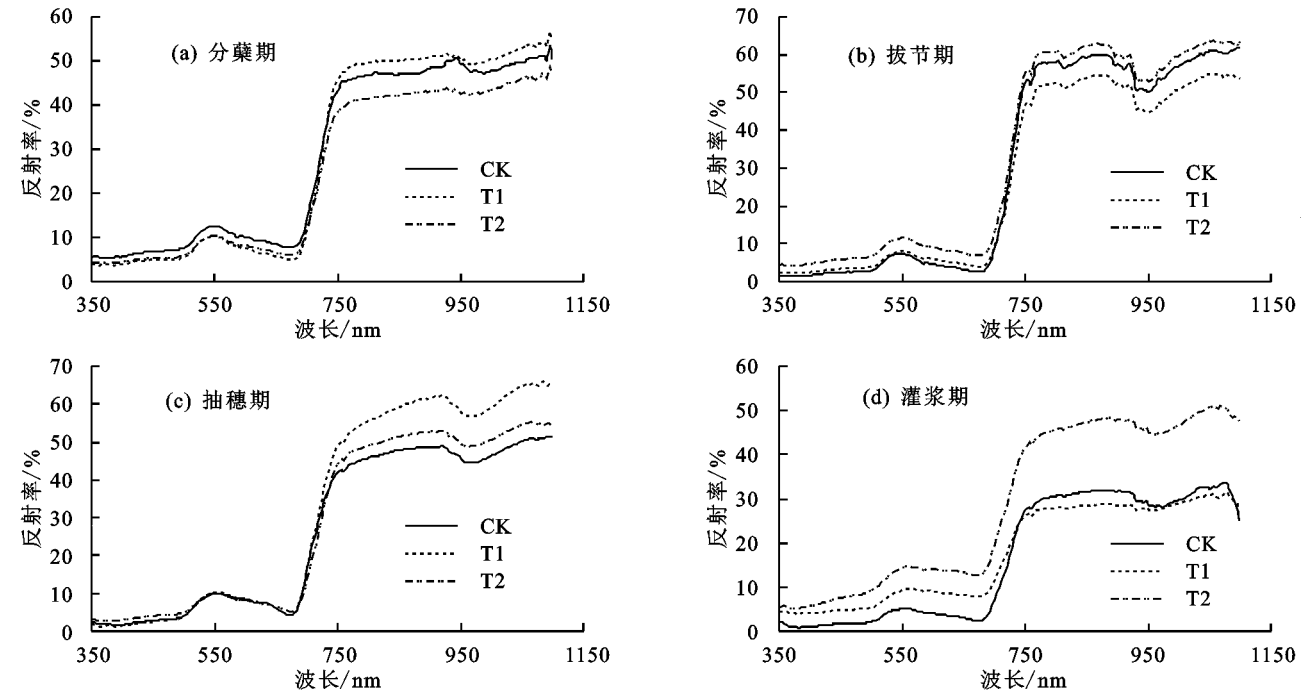


图 6 秸秆还田与化肥减施对不同生育期水稻冠层光谱反射率的影响

表 2 秸秆还田与化肥减施对水稻不同生育期荧光参数的影响

时期	处理	F_v/F_m	ABS/RC	ET_o/ABS	ABS/CS_m	PI_{abs}
分蘖期	CK	0.76±0.04ab	1.19±0.08a	0.48±0.14a	22453.5±710.6a	5.48±2.67ab
	T1	0.79±0.01a	1.00±0.06b	0.58±0.04a	20945.5±89.8b	10.39±3.86a
	T2	0.71±0.05b	1.20±0.02a	0.42±0.16a	17482.0±1331.6c	3.25±0.47b
拔节期	CK	0.76±0.02a	1.11±0.04b	0.51±0.09a	18133.5±1134.3b	6.42±1.06a
	T1	0.71±0.05a	1.43±0.15a	0.49±0.08a	17849.5±1824.5b	4.35±0.49b
	T2	0.78±0.03a	1.12±0.11b	0.57±0.07a	21354.5±1402.2a	9.46±2.77a
抽穗期	CK	0.82±0.02a	0.88±0.14ab	0.58±0.04ab	23811.4±2076.1a	13.51±2.58a
	T1	0.81±0.01a	0.90±0.01b	0.61±0.02a	21560.6±547.3a	14.28±3.22a
	T2	0.74±0.05b	1.05±0.10a	0.45±0.13b	18623.5±2115.4b	5.14±2.17b
灌浆期	CK	0.79±0.02a	1.18±0.12a	0.53±0.04a	23343.2±1176.3a	6.31±1.87a
	T1	0.81±0.04a	1.12±0.07a	0.49±0.02a	23808.8±655.6a	5.62±1.11a
	T2	0.78±0.03a	1.23±0.11a	0.49±0.07a	21258.6±987.4b	4.98±0.36a

2.7 秸秆还田与化肥减施对水稻产量构成的影响

从表 3 可以看出,T2 处理的水稻产量最高为 12 174.9 kg/hm²,比 CK 处理高出 13.1%,差异显著;T1 处理次之,产量为 11 355.6 kg/hm²,比 CK 处理高出 5.5%;

CK 处理产量最低,为 10 763.2 kg/hm²。从产量构成要素来看,T1 处理的穗数最高,比 CK 处理高出 27.9%。CK 处理穗数最低,但千粒重最高,且较其他处理差异显著,可以看出穗数与千粒重之间存在一定的负补偿

效应。各处理间的穗粒数与结实率无明显差异,说明秸秆还田对水稻穗粒数影响不大。

2.8 水稻产量与灌浆期生长指标及光合指标间的回归分析与通径分析

以水稻灌浆期的株高(X_1)、根体积(X_2)、叶面积(X_3)、分蘖数(X_4)、SPAD 值(X_5)、 F_v/F_m (X_6)、净光合速率 P_n (X_7)为自变量,水稻产量为因变量(Y)进行逐步回归分析,水稻灌浆期的回归关系为 $Y = -59860.825 + 88.490X_1 + 697.608X_2 + 9.237X_3 +$

$2542.982X_4 + 333.921X_5 + 54551.019X_6 + 366.074X_7$ ($R=0.991, F=7.508, P=0.274$),由此说明各观测指标是影响水稻产量的主要因素。为进一步明确逐步回归确定的各项指标对产量的调控效应,本研究进行了通径分析(表 4)。结果表明,在水稻灌浆期,分蘖数和 F_v/F_m 对产量的直接作用系数最大,根体积、叶面积、株高和 SPAD 值次之。说明在水稻生长后期,有效分蘖与最大光化学效率对产量形成起主导作用。

表 3 秸秆还田与化肥减施对水稻产量及其构成的影响

处理	产量/(kg·hm ⁻²)	穗数/(万穗·hm ⁻²)	穗粒数/(个·穗 ⁻¹)	千粒重/g	结实率/%
CK	10763.3±141.3b	208.9±26.2b	179.3±22.3a	25.5±0.7a	88.7±0.7a
T1	11355.6±353.6a	267.1±22.4a	171.4±13.9a	21.9±1.3b	88.3±1.1a
T2	12174.9±747.7a	245.5±18.2ab	189.8±21.0a	22.7±0.5b	86.9±1.3a

注:同列不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。

表 4 秸秆还田与化肥减施处理下水稻灌浆期生长、光合指标对产量作用的通径系数

作用因子	直接效应	间接效应						
		株高	根体积	叶面积	分蘖数	SPAD	F_v/F_m	净光合速率 P_n
株高	1.086		-0.814	-0.336	-2.169	0.777	1.402	-0.078
根体积	1.102	-0.802		0.515	1.583	-0.347	-1.478	-0.079
叶面积	1.173	0.311	-0.484		0.649	0.247	0.378	-0.023
分蘖数	3.082	-0.764	0.566	-0.247		-0.485	-2.115	0.052
SPAD	1.080	0.781	-0.354	-0.268	-1.385		1.059	-0.391
F_v/F_m	2.552	0.596	-0.638	-0.174	-2.554	0.448		-0.173
净光合速率 P_n	0.573	0.147	0.153	-0.048	-0.281	0.737	0.771	

3 讨论

3.1 秸秆还田与化肥减施与不同生育期水稻生长指标及光合参数的关系

秸秆还田能够在水稻生长中后期显著提高水稻生长指标。叶文培等^[14]发现,秸秆还田显著提高了水稻分蘖数,并在水稻生育中后期显著提高了叶面积指数;金鑫等^[15]认为,小麦秸秆全量还田降低了水稻分蘖期的根系活力,导致水稻前期生长缓慢,但到抽穗期后却能增加干物质的生产与积累。本试验结果与之相似,在水稻分蘖期,CK 的株高、根长、分蘖数均为最高,分别比 T1 处理高出 2.3%,5.1%和 18.1%。而在水稻分蘖期的秸秆还田条件下,T1 处理的水稻鲜质量、根体积比 T2 处理分别高出 30.2%和 133.3%。究其原因:其一,秸秆还田后土壤温度会降低 2~6℃,不利于水稻生长发育和干物质的积累^[16-17];其二,秸秆还田后的腐解过程会与作物争夺氮源,影响水稻的养分吸收^[18],从而不利于水稻前期的生长发育,且在化肥减施处理下尤为明显。而抽穗期之后,T2 处理的水稻生长指标逐渐上升为最佳,而常规施肥处理的水稻生长指标逐渐变差。究其原因,可能由于秸秆覆盖为水稻生长中后期提供了良好的土壤水温环境,秸秆养分逐渐腐解释放并被作物吸收,促进了水稻中后期的生长发育^[19]。

光合作用是作物生长和产量形成的重要代谢过程,是植物生长发育的物质和能量的主要来源^[20]。唐志敏等^[21]认为,秸秆还田可以促进植物叶片气孔开放,加强蒸腾作用,改善叶肉细胞 CO₂ 的供应能力,提高叶片的光合速率。本试验结果与之相似,常规施肥处理在水稻拔节期的光合能力最强,而到灌浆期 T2 处理的叶绿素、净光合速率(P_n)和光谱反射率均变为最高,叶片气孔开放程度加大,蒸腾作用增强。另外,水稻叶绿素含量与光合能力呈正相关,水稻拔节期之后,T2 处理的叶绿素含量最高,其中拔节期和抽穗期分别比 CK 处理高出 8.2%和 8.4%。

叶绿素荧光动力学参数能准确反映水稻叶片光能吸收的分配去向^[22],其中 F_v/F_m 等参数能表征原初反应中心的光能利用率和转化率,反应中心性能指数(PI_{abs})反映了光系统 II 的整体性能^[23]。本试验条件下,各处理 F_v/F_m 差异不大,T1 处理该指标较好,说明秸秆还田能提高水稻的光能利用率,而 T2 处理略低,表明化肥减施条件下水稻可能受到一定的光抑制。有研究^[24]表明,非胁迫条件下 F_v/F_m 的变化程度极小,显然本试验化肥减施条件下并未造成胁迫。对于 PI_{abs} 而言,秸秆还田处理在整个生育期内该指标较好,化肥减施的 T2 处理除在拔节期较高外,其余时期均为最

低。说明秸秆还田有利于提高水稻光系统Ⅱ的性能,而化肥减施一定程度上起了负面作用。

3.2 秸秆还田与化肥减施与不同生育期水稻养分吸收及产量的关系

秸秆还田能增强水稻生长中后期对氮、磷、钾等养分的吸收。张媛媛等^[25]研究表明,秸秆还田与化肥配施提高了土壤中矿质氮的含量,水稻吸收氮素的能力相对提高,从而增加了水稻植株的含氮率;徐国伟等^[26]认为,秸秆还田后,植株生育前期的氮、磷、钾养分含量较单施化肥处理略低,但会随着生育进程而增加,后期显著高于单施化肥处理。本试验结果与之相似,本试验条件下,拔节期之前秸秆还田化肥减施处理的水稻全氮含量最低,但拔节期之后该处理全氮含量超过常规施肥处理;全磷、全钾含量也有相似之处。究其原因:一方面,秸秆还田后需要土壤微生物的分解利用,而分蘖期还田的秸秆还未分解,土壤中养分含量较低;另一方面,秸秆还田后土壤 C/N 较高,土壤微生物分解秸秆需要消耗大量氮素营养,造成早期的“夺氮”,影响了水稻前期的养分吸收^[27]。而随着秸秆分解加快,养分逐渐释放并被水稻吸收,同时也为土壤微生物提供了能源物质,土壤微生物活性上升,加速土壤有机质矿质化并释放速效养分,有利于水稻后期的养分吸收^[28-29]。秸秆还田后可以通过调控土壤碳氮比促进水稻对氮素的吸收,究其原因,土壤 C/N 升高可以促进有机氮的矿化与固定氮的转化,从而提高土壤的供氮能力^[30]。

秸秆还田有利于提高水稻产量,且配合化肥减施效果更明显,达到高产增效的目的。袁玲等^[31]研究发现,常规水作下秸秆还田较不还田处理,水稻增产 113.6 kg/hm²,且稻米中铁、锌含量有所提高;许轲等^[32]研究表明,秸秆还田能有效增加水稻的穗粒数和结实率,在黏土和沙土 2 种土壤条件下均能显著提高水稻产量;黄容等^[33]研究发现,秸秆还田与化肥减量配施处理下,水稻产量比常规施肥处理增产 3.0%~17.9%。本试验结果与之相似,本试验条件下 85%常规施肥量配合秸秆全量还田处理的水稻产量达到最高,为 12 174.9 kg/hm²,比常规施肥产量高出 13.1%,增产效果明显。究其原因:首先,秸秆还田能补偿土壤潜在的肥力消耗,代替减量的化肥为水稻生长提供养分^[34];其次,秸秆还田能够降低土壤容重,提高水稻田耕层土壤孔隙度,提高土壤团聚体和微团聚体的含量,增强土壤保水保肥能力,有利于水稻生长发育^[35];此外,秸秆还田提高了叶片的气孔导度,改善了对 CO₂ 的吸收能力,从而提高光合速率,有利于干物质的形成。另外,Slafer 等^[36]认为,单位面积的穗数主要取决于环境因素,而穗粒数则主要由作物的基因型决定。这在本试验中得到证实,秸秆还田显著增加了

单位面积内水稻的有效穗数,而对穗粒数影响不大。所以从产量构成来看,水稻增产的直接原因是单位面积有效穗数的增加。

4 结论

(1)秸秆还田前期并不能有效提高水稻生长水平,但在水稻生长中后期能显著提高水稻的株高、根长、鲜质量、根体积等生长指标,并在生长中后期增强对氮、磷、钾等养分的吸收能力。

(2)秸秆还田能显著提高水稻生长中后期的叶绿素含量、净光合速率和光谱反射率,并有利于提高水稻光能利用率和光系统Ⅱ的整体性能。

(3)结合高产高效,秸秆粉碎还田配合常规化肥用量 85% 的处理实现了产量最大化,值得在实践中推荐应用。

参考文献:

- [1] 方福平,程式华.论中国水稻生产能力[J].中国水稻科学,2009,23(6):559-566.
- [2] Lv Z F, Zhu Y, Liu X J, et al. Climate change impacts on regional rice production in China [J]. Climatic Change, 2018, 147(2): 1-15.
- [3] 吕家珑,张一平,王旭东,等.长期单施化肥对土壤性状及作物产量的影响[J].应用生态学报,2001,12(4):569-572.
- [4] 鲁艳红,廖育林,聂军,等.长期施用氮磷钾肥和石灰对红壤性水稻土酸性特征的影响[J].土壤学报,2016,53(1):202-212.
- [5] Kou X R, Coventry D R. Soil acidification as influenced by some agricultural practices [J]. Agro-environmental Protection, 2002, 21(5): 385-388.
- [6] 李玉庆,张存,张文贤.水稻灌区农业面源污染物迁移转化规律模拟研究[J].灌溉排水学报,2017,36(11):31-37.
- [7] 劳秀荣,吴子一,高燕春.长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J].农业工程学报,2002,18(2):49-52.
- [8] Chen Z M, Wang H Y, Liu X W, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system [J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 121-127.
- [9] 余延丰,熊桂云,张继铭,等.秸秆还田对作物产量和土壤肥力的影响[J].湖北农业科学,2008,47(2):169-171.
- [10] 顾美英,唐光木,葛春辉,等.不同秸秆还田方式对和田风沙土壤微生物多样性的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(4):489-498.
- [11] 白和平,胡喜巧,朱俊涛,等.玉米秸秆还田对麦田土壤养分的影响[J].科技信息,2011(11):43-44.
- [12] 白伟,张立祯,逢焕成,等.秸秆还田配施氮肥对春玉米水氮利用效率的影响[J].华北农学报,2018,33(2): 224-231.
- [13] 谢佳贵,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,2014,20(5):1110-1118.

[14] 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.

[15] 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.

[16] Wang X B, Wu H J, Dai K, et al. Tillage and crop residue effects on rainfed wheat and maize production in northern China[J].Field Crops Research,2012,132(3):106-116.

[17] 李潮海,赵霞,刘天学,等.麦茬处理方式对机播夏玉米的生态生理效应[J].农业工程学报,2008,24(1):162-166.

[18] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R, et al. Rice yield and nitrogen utilization efficiency under alternative straw management practices[J].Agronomy Journal,2000,92(6):1096-1103.

[19] 武际,郭熙盛,鲁剑巍,等.不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响[J].生态学报,2013,33(2):565-575.

[20] 王军,陈帆,温明霞,等.6-BA 处理对烤烟耐旱性的影响[J].作物研究,2017(2):44-47,82.

[21] 唐志敏,刘军,刘建国.秸秆还田对长期连作棉花光合速率及叶绿素荧光的影响[J].石河子大学学报(自然科学版),2012,30(3):302-307.

[22] Li P M, Cai R G, Gao H Y, et al. Partitioning of excitation energy in two wheat cultivars with different grain protein contents grown under three nitrogen applications in the field[J].Physiologia Plantarum,2007,129(4):822-829.

[23] 张善平,冯海娟,马存金,等.光质对玉米叶片光合及光系统性能的影响[J].中国农业科学,2014,47(20):3973-3981.

[24] 李强,王国祥,潘国权,等.水体浊度对菹草萌发及萌发苗光合荧光特性的影响[J].生态学报,2006,26(11):3594-3601.

[25] 张媛媛,李建林,王春宏,等.氮素和生物腐解剂调控下稻草还田对水稻氮素积累及产量的影响[J].土壤通报,2012,43(2):435-438.

[26] 徐国伟,杨立年,王志琴,等.麦秸还田与实地氮肥管理对水稻氮磷钾吸收利用的影响[J].作物学报,2008,34(8):1424-1434.

[27] 曾研华,吴建富,曾勇军,等.机收稻草全量还田减施化肥对双季晚稻养分吸收利用及产量的影响[J].作物学报,2018,44(3):454-462.

[28] 刘立军,桑大志,刘翠莲,等.实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响[J].中国农业科学,2003,36(12):1456-1461.

[29] Chaves B, Neve S D, Boeckx P, et al. Manipulating the N release from ¹⁵N labelled celery residues by using straw and vinasses[J].Soil Biology and Biochemistry,2006,38(8):2244-2254.

[30] 鲁彩艳,陈欣.不同施肥处理土壤及不同 C/N 比有机物料中有机 N 的矿化进程[J].土壤通报,2003,34(4):267-270.

[31] 袁玲,张宣,杨静,等.不同栽培方式和秸秆还田对水稻产量和营养品质的影响[J].作物学报,2013,39(2):350-359.

[32] 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.

[33] 黄容,高明,万毅林,等.秸秆还田与化肥减量配施对稻—菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J].环境科学,2016,37(11):4446-4456.

[34] 张亚丽,吕家珑,金继运,等.施肥和秸秆还田对土壤肥力质量及春小麦品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):307-314.

[35] 马永良,师宏奎,张书奎,等.玉米秸秆整株全量还田土壤理化性状的变化及其对后茬小麦生长的影响[J].中国农业大学学报,2003,8(增刊 1):42-46.

[36] Slafer G A, Savin R, Sadras V O. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment[J].Field Crops Research,2014,157(2):71-83.

(上接第 92 页)

[20] Hu J F, Gao P, Mu X M, et al. Runoff-sediment dynamics under different flood patterns in a Loess Plateau catchment, China[J].Catena,2019,173:234-245.

[21] 穆兴民,张秀勤,高鹏,等.双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J].水文,2010,30(4):47-51.

[22] 慕星,张晓明.皇甫川流域水沙变化及驱动因素分析[J].干旱区研究,2013,30(5):933-939.

[23] 王志勇,李晓宇,钱星平.基于临界雨强方法的孤山川水土保持效益评估[J].人民黄河,2012,34(6):98-100.

[24] 赵爱军,高忠咏,冯天梅,等.孤山川流域水文特征变化及驱动因素[J].水资源与水工程学报,2014,25(1):182-186.

[25] Wang Y, Liu W Z, Li Z, et al. Effect of comprehensive management on runoff and sediment reduction in Yanwachuan Watershed, Loess Tableland, China[J].Nature Environment and Pollution Technology,2014,13(3):465-472.

[26] 郑明国,蔡强国,王彩峰,等.黄土丘陵沟壑区坡面水保措施及植被对流域尺度水沙关系的影响[J].水利学报,2007,38(1):47-53.