

化肥减施有机肥施用及秸秆还田下双季稻 产量变化及光合特征研究

胡柯鑫^{1,2}, 罗尊长^{1,2}, 董春华², 洪曦², 孙梅²,
谢宜^{1,2}, 周旋², 刘杰², 孙耿²

(1. 湖南大学研究生院 隆平分院, 湖南长沙 410125; 2. 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙 410125)

摘要:为探索有机肥施用协同晚稻秸秆还田下双季稻产量变化及光合特征。设置田间小区试验, 研究早晚稻均减施 20%、30% 及 40% 化肥氮、早稻减施 40% 化肥钾对双季稻产量、幼穗分化期倒三叶叶片净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)、叶绿素含量(SPAD)及土壤理化性质的影响。结果表明, 早晚稻减施化肥氮、早稻减施化肥钾均可提升幼穗分化期叶片光合性能, 改善土壤理化性质, 促进双季稻增产。以早晚稻减施 30% 化肥氮、早稻减施 40% 钾(T4)的效果最佳, 与常规施肥处理相比, 双季稻周年稻谷产量提高 6.0%; 其早稻稻谷产量提高 7.5%, 倒三叶叶片 Pn、Gs、Tr 及 SPAD 降低 6.8%、22.4%、14.6%、11.0%, Ci 提高 17.6%; 晚稻稻谷产量提高 4.4%, 倒三叶叶片 Pn、Gs、Tr 及 SPAD 提高 18.5%、31.9%、8.6%、22.4%, Ci 降低 5.8%, 双季稻收获期土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量与有机质含量均有提高。研究结果对指导双季稻田有机肥协同晚稻秸秆还田下化肥氮、钾减施有重要的指导意义。

关键词: 双季稻; 化肥减施; 商品有机肥; 晚稻秸秆还田; 水稻产量; 光合特征

中图分类号: S143; S141 文献标识码: A 文章编号: 1000-7091(2020)05-0107-08

doi: 10.7668/hbxb.20190392



Study on Yield Change and Photosynthetic Characteristics of Double-cropping Rice under Organic Fertilizer Application and Straw Returning under Reduced Fertilizer Application

HU Kexin^{1,2}, LUO Zunchang^{1,2}, DONG Chunhua², HONG Xi², SUN Mei²,
XIE Yi^{1,2}, ZHOU Xuan², LIU Jie², SUN Geng²

(1. Long Ping Branch, Graduate School of Hunan University, Changsha 410125, China;

2. Hunan Institute of Soil and Fertilizer, Changsha 410125, China)

Abstract: In order to explore the yield change and photosynthetic characteristics of double cropping rice under the application of organic fertilizer and late rice straw. Field experiments were conducted to study the effects about reduction of 20%, 30% and 40% N fertilizer and 40% K fertilizer on the yield, Pn, Gs, Ci, Tr, SPAD and soil physical and chemical properties of double cropping rice. The results showed that reducing fertilizer nitrogen and fertilizer potassium in early and late rice could improve photosynthetic performance, soil physical and chemical properties and yield of double-cropping rice at the stage of young panicle differentiation. Compared with conventional fertilization, the annual yield of double-cropping rice increased by 6.0%, the yield of early rice increased by 7.5%, the Pn, Gs, Tr and SPAD of the first three leaves decreased by 6.8%, 22.4%, 14.6%, 11.0%, Ci increased by 17.6%, the yield of late rice increased by 4.4%, and the Pn, Gs, Tr and SPAD of the first three leaves increased by 18.5%, 31.9%, 8.6%, 22.4%, respectively, Ci decreased by 5.8%. Soil alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, available potassium and organic matter contents increased during double cropping

收稿日期: 2020-05-29

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划(2016YFD0200809; 2017YFD0200808); 湖南省农业科技创新资金项目(2018ZD02-2); 国家“十二五”科技支撑计划课题(2015BAD23B03)

作者简介: 胡柯鑫(1994-), 男, 安徽安庆人, 硕士, 主要从事植物营养与施肥研究。

通讯作者: 董春华(1976-), 男, 湖南祁阳人, 副研究员, 博士, 博士后, 主要从事新型肥料研发与植物营养研究。

rice harvest. The results have important guiding significance for guiding the reduction of nitrogen and potassium fertilizer application in double cropping paddy field combined with late rice straw returning.

Key words: Double cropping rice; Fertilizer reduction; Commercial organic fertilizer; Late rice straw returning to field; Rice yield; Photosynthetic characteristics

粮食的大幅增产,与我国化学氮肥的大量施入农田有着密不可分的关系^[1],同时氮肥利用效率低下依然是我们面临的重大问题^[2],亟须解决。化学氮肥大量施入农田后,在农田生态系统中发生一系列物理、化学与生物转化和迁移,这其中必然存在氮素养分的损失^[3],由此产生一系列的环境问题,例如土壤板结、酸化^[4],湖泊水体富营养化^[5],大气温室效应^[6]等。钾素与氮素一样,都是作物生长所需的重要元素,土壤是作物钾素的主要来源^[7],优化氮、钾肥施用,提高氮、钾肥利用率,降低农业面源污染,都是目前急需解决的重大课题。

有机肥是一种含碳有机物料,经动植物发酵腐熟而成,具有改善土壤肥力、提供植物营养以及提高作物品质的能力,含有大量生理活性物质与有机、无机养分、微量元素,具有广阔的应用前景^[8-9]。刘秀梅等^[10]研究表明,商品有机肥施用可以达到培肥地力,改善土壤理化性质与减少环境污染的目的。温延臣等^[11]同样发现,商品有机肥部分替代化肥能够保证作物稳产、高产,还能培肥地力,有利于土壤可持续利用。袁颖红等^[12]研究发现,化肥配施有机肥可以促进水稻增产,提高水稻生育期叶片 Pn、Gs、Tr 与 SPAD 值,降低叶片 Ci。研究表明,秸秆还田不仅是对秸秆资源的有效利用,还是作物对钾素的需求来源,在抑制叶片光合速率下降,提高钾素利用效率、化肥减施以及保障粮食产量方面都有着巨大潜力^[13-15]。

前人对秸秆还田与有机无机配施对水稻产量的影响研究颇多^[16-18],但涉及对双季稻叶片光合特征的研究鲜有报道。本试验研究有机肥施用与晚稻秸秆还田早晚稻减施 20%、30% 及 40% 化肥氮、早稻减施 40% 化肥钾对双季稻产量、水稻叶片光合特性以及土壤养分含量的影响,结合水稻叶片光合特征,为双季稻化肥减施提供理论与数据支撑。

1 材料和方法

1.1 供试地点

于湖南省益阳市赫山区兰溪镇(N 28°34'33", E 112°25'43")进行试验。该区属于亚热带季风性湿润气候,季节分明,雨量充沛,分配较为均匀,热量

资源丰富,年平均气温介于 14~21℃,年平均降水量一般处于 800~1 600 mm。试验地为红黄泥地块,质地为黏壤,其土壤耕层(0~20 cm)基本理化性质:pH 值 5.43,有机质 22.1 g/kg,全氮 2.18 g/kg,全磷 0.86 g/kg,全钾 14.8 g/kg;碱解氮 181.0 mg/kg,有效磷 26.0 mg/kg,速效钾 99.8 mg/kg,缓效钾 190.6 mg/kg。

1.2 供试材料

供试水稻品种:早稻-湘早籼 45 号,晚稻-玉针香。

供试肥料品种:尿素(含 N 46.00%),过磷酸钙(含 P 12.00%),氯化钾(含 K 60.00%),有机肥(含 N 2.06%、P 0.64%、K 2.40%)由湖南泰谷生物科技有限公司生产。

1.3 试验设计

本试验采用随机区组设计,设 6 个处理,共设 18 个小区,小区面积 40 m²(4 m×10 m),小区用田埂分开,田埂上覆膜,防止肥水串流。水稻晚稻插植规格统一为长 32 株×宽 25 株。

早稻施肥:T1 处理不施肥;T2 处理施尿素(施用量:326.1 kg/hm²),按基肥:分蘖期:穗肥=6:2:2,施入氯化钾(以 K₂O 计)量:150 kg/hm²,过磷酸钙(以 P₂O₅ 计)量:500.0 kg/hm²;T3、T4、T5 分别按 T2 处理尿素量减施 20%、30% 和 40%,钾肥量均减施 40%,按基肥:分蘖期:穗肥=3:4:3 施入;T3、T4、T5 施用商品有机肥,施用量分别为 1 500、2 250、3 000 kg/hm²。T2、T3、T4、T5 处理磷肥、钾肥及商品有机肥作基肥一次性施入。

晚稻施肥:T1 处理不施肥;T2 处理施尿素(施用量:391.3 kg/hm²),T3、T4、T5 分别按 T2 处理尿素量减施 20%、30% 和 40%,均按基肥:分蘖期:穗肥=6:2:2 施入。T3、T4、T5 施用商品有机肥,施用量分别为 1 800、2 700、3 600 kg/hm²。T2、T3、T4、T5 处理磷肥(以 P₂O₅ 计,施用量:375.0 kg/hm²)、钾肥(以 K₂O 计,施用量:200 kg/hm²)以及商品有机肥均作基肥一次性施入。T3、T4、T5 处理晚稻秸秆留高茬,秸秆全部还田(具体施肥见表 1)。

于水稻植株移栽前施入基肥,移栽后 7~10 d 施入分蘖肥,在移栽后 40~50 d 施入穗肥。早稻季:2018 年 4-7 月,总历时 94 d;晚稻季:2018 年 7-10 月,总历时 105 d。

表 1 双季稻试验施肥情况

Tab. 1 Fertilization of double-season rice test

处理 Treatment	早稻施肥 Fertilization of early rice	晚稻试验设置 Fertilization of late rice
T1	CK	CK
T2	N + P + K	N + P + K
T3	80% N + 20% BF + 60% K + P	80% N + 20% BF + K + P
T4	70% N + 30% BF + 60% K + P	70% N + 30% BF + K + P
T5	60% N + 40% BF + 60% K + P	60% N + 40% BF + K + P

注: N、P、K 分别表示施用尿素、过磷酸钙、氯化钾, 早晚稻用量不同; BF. 商品有机肥。

Note: N, P and K respectively indicate the application of urea, calcium superphosphate and potassium chloride, the dosage is different; BF. Commercial organic fertilizer.

1.4 测定项目与方法

1.4.1 测定指标 试验开始前采取 0~20 cm 耕层土壤, 测定土壤 pH、有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷、速效钾和缓效钾含量; 早晚稻收获期取耕层土壤测定土壤碱解氮、有效磷、速效钾和有机质含量; 早晚稻水稻幼穗分化期测定叶片叶绿素含量 (SPAD) 与叶片光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 和蒸腾速率 (Tr); 收获时每个小区单打单收单晒, 测定其稻谷和稻草重量。

1.4.2 测定方法 土壤 pH 值采用水: 土 = 2.5:1 (V/V) 电位计法测定; 土壤有机质含量、全氮、全磷和全钾、碱解氮、有效磷和速效钾含量均采用常规分析方法测定^[19]。

于水稻幼穗分化期选取倒三叶, 使用 SPAD 502 叶绿素含量测定仪测定叶片叶绿素含量 (SPAD), 使用 LI-6400 (Portable Photosynthesis System) 测定叶片光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 及蒸腾速率 (Tr); 水稻稻草质量与稻谷质量均采用磅秤称量。

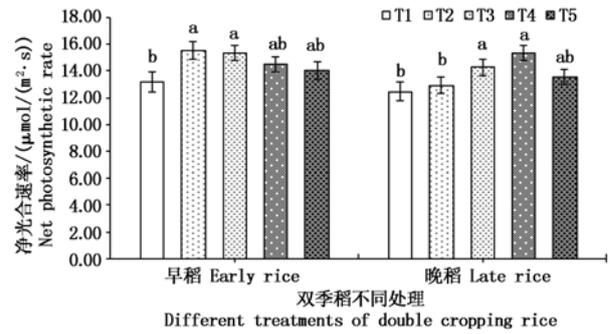
1.5 数据处理

分别用 Microsoft Office 2016 和 IBM SPSS Statistics 20.0 进行作图和数据的统计分析。

2 结果与分析

2.1 对双季稻幼穗分化期叶片净光合速率 (Pn) 的影响

双季稻幼穗分化期倒三叶净光合速率如图 1 所示, 早稻 Pn 以 T2 处理最高, 较 T1 处理显著 ($P < 0.05$) 高 17.7%; 其他处理表现为 T3 > T4 > T5, 其中 T4 处理较 T2 处理低 6.8%, 处理间无显著差异。晚稻以 T4 处理水稻 Pn 最高, T1 处理最低; T4 处理较 T1、T2、T3 和 T5 处理高 22.9%、18.5%、7.4% 和 13.0%, 与 T1、T2 处理存在显著 ($P < 0.05$) 差异。



Different lowercase letters indicate that there is a significant difference of 5% between early rice and late rice treatments.

The same as Fig. 2-6.

图 1 双季稻水稻叶片净光合速率

Fig. 1 NET photosynthetic rate of rice leaves in double-season rice

2.2 对双季稻幼穗分化期叶片气孔导度 (Gs) 的影响

图 2 为双季稻不同处理水稻幼穗分化期倒三叶气孔导度, 由图可知, 早晚稻不同处理倒三叶 Gs 均以 T1 处理最低。早稻以 T2 处理水稻倒三叶 Gs 最高, T4 和 T5 处理较其低 22.4% 与 25.4%, 差异显著 ($P < 0.05$); 晚稻处理中以 T4 处理倒三叶 Gs 最高, 较 T2、T3 和 T5 处理高 31.9%、6.9% 与 12.7%, 与 T1、T2 处理存在显著 ($P < 0.05$) 差异。早稻倒三叶 Gs 表现为 T2 > T3 > T4 > T5 > T1; 晚稻倒三叶 Gs 表现为 T4 > T3 > T5 > T2 > T1。

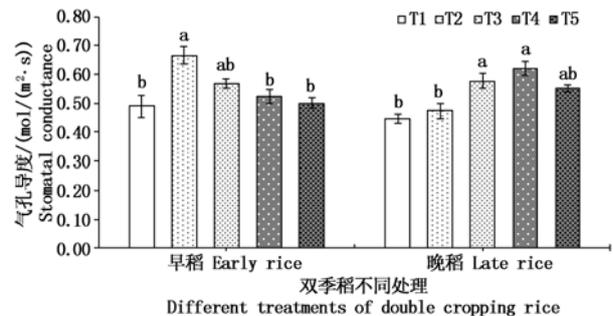


图 2 双季稻水稻叶片气孔导度

Fig. 2 Stomatal conductivity of rice leaves in double-season rice

2.3 对双季稻幼穗分化期叶片胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 的影响

双季稻不同处理幼穗分化期倒三叶胞间 CO₂ 浓度如图 3 所示, 早稻不同处理间水稻倒三叶 Ci 存在显著 ($P < 0.05$) 差异; 晚稻不同处理水稻倒三叶 Ci 均显著 ($P < 0.05$) 低于 T1 处理。早稻各处理水稻 Ci 表现为 T5 > T4 > T3 > T1 > T2, T5 处理最高, 达到 368.58 μmol/L, T3、T4 与 T5 处理较 T2 处理高 6.0%、17.6% 以及 18.8%, T4 与 T5 处理间无显著差异; 晚稻 T2、T3、T4 与 T5 处理较 T1 处理低 12.5%、14.1%、

17.6%与11.9%,T4处理较T2处理低5.8%。

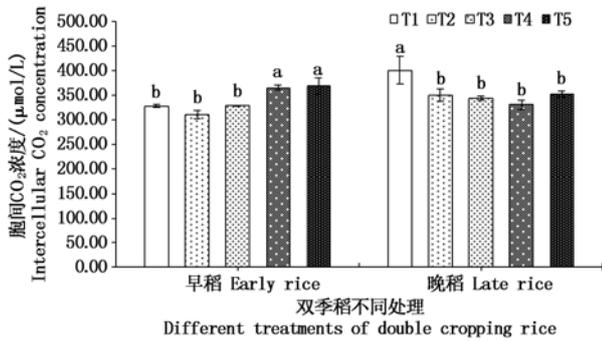


图3 双季稻水稻叶片胞间CO₂浓度

Fig. 3 Intercellular CO₂ concentration of rice leaves in double-season rice

2.4 对双季稻幼穗分化期叶片蒸腾速率(Tr)的影响

双季稻不同处理幼穗分化期倒三叶蒸腾速率如图4所示,早稻与晚稻不同处理间均存在差异。早稻以T2处理倒三叶叶片Tr最高,较T1处理高18.2%,差异显著(P<0.05);不同施肥处理叶片蒸腾速率表现为T2>T3>T4>T5,T2与T3、T4及T5均存在显著(P<0.05)差异,其中T4处理较T2处理低14.6%。晚稻处理中以T4处理叶片Tr最高,达到7.69 mmol/(m²·s),较T2处理高8.6%,差异

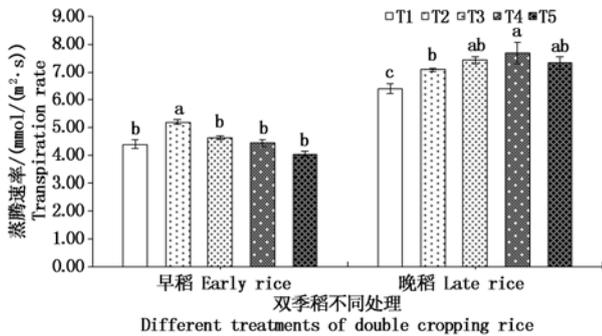


图4 双季稻水稻叶片蒸腾速率

Fig. 4 Transpiration rate of rice leaves in double-season rice

显著(P<0.05)。晚稻季叶片蒸腾速率均高于早稻季,较早稻季平均高61.6%。

2.5 对双季稻幼穗分化期叶片叶绿素含量(SPAD)的影响

图5为双季稻不同处理幼穗分化期倒三叶叶片叶绿素含量。早稻以T2处理倒三叶叶片叶绿素含量最高,较T1处理高34.3%,存在显著(P<0.05)差异;其他处理表现为T2>T3>T5>T4,处理间无显著差异,T4处理较T2处理低11.0%。晚稻不同处理水稻倒三叶叶片叶绿素含量表现为T4>T5>T3>T2>T1,其中T4、T5处理较T2处理高22.4%及15.1%。

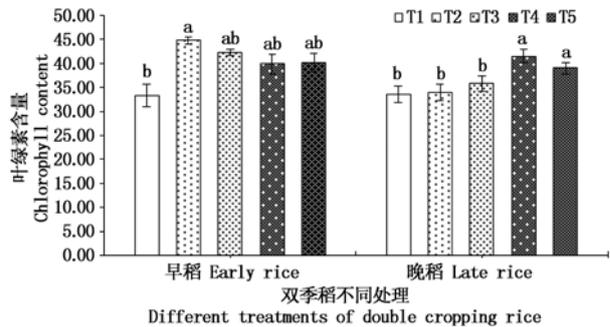


图5 双季稻幼穗分化期叶片叶绿素含量

Fig. 5 Chlorophyll content of leaves in double-season rice panicle stage

2.6 对双季稻收获期土壤理化性质的影响

双季稻收获期土壤速效养分与有机质含量如表2所示。早稻土壤碱解氮含量以T3处理最高,较T1处理高8.5%;晚稻土壤碱解氮含量以T4处理最高,较T2处理高2.2%。早晚稻土壤有效磷含量均以T4最高,较T2处理分别高28.2%与48.0%,均未达到显著差异。早稻土壤速效钾含量表现为T1>T5>T4>T3>T2,晚稻表现为T4>T5>T3>T2>T1。早晚稻土壤有机质含量较T2处理均有提高,分别提高4.3%与2.7%。

表2 双季稻收获期土壤理化性质

Tab. 2 Soil physicochemical properties of double-season rice harvest period

处理 Treatment	碱解氮/(mg/kg) Hydrolysable nitrogen		有效磷/(mg/kg) Available phosphorus		速效钾/(mg/kg) Available potassium		有机质/(g/kg) Organic matter	
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
T1	165.0±3.0a	155.0±6.6a	3.3±0.7a	2.1±1.0a	95.0±14.8a	94.0±4.6a	35.8±2.2a	35.2±1.1a
T2	166.0±20.7a	179.3±13.7a	3.9±0.6a	2.5±0.6a	69.7±8.1a	98.0±16.0a	34.8±2.8a	37.3±1.5a
T3	179.0±13.1a	180.3±20.4a	3.3±1.0a	3.4±1.4a	87.3±11.2a	122.7±7.1a	36.3±1.3a	37.2±2.6a
T4	170.0±15.5a	183.3±11.1a	5.0±2.8a	3.7±0.5a	90.3±10.3a	130.7±57.6a	36.3±2.1a	38.3±1.6a
T5	172.0±17.1a	182.0±19.2a	3.9±1.1a	2.2±0.6a	94.0±35.9a	125.0±18.7a	36.8±3.3a	38.5±3.5a

注:表中不同小写字母表示早稻或晚稻处理间差异达到5%显著水平。

Note: Different lowercase letters in the table indicate that the difference between early rice and late rice treatments reaches 5% significant level.

2.7 对双季稻产量的影响

图 6 为双季稻不同处理稻谷与稻草产量,早、晚稻稻谷产量均高于 T1 处理,且差异显著($P < 0.05$)。早稻稻谷产量以 T4 处理最高,较 T1 处理显著($P < 0.05$)高 23.3%,较 T2 处理高 7.5%;晚稻以同样

T4 处理最高,较 T2 处理高 4.4%,无显著差异。早稻与晚稻稻谷产量不同处理均表现为 $T4 > T5 > T3 > T2 > T1$ 。稻草产量早稻均以 T3 处理最高,显著($P < 0.05$)高于 T1 处理;晚稻以 T4 处理较高,显著($P < 0.05$)高于 T2 与 T3 处理。

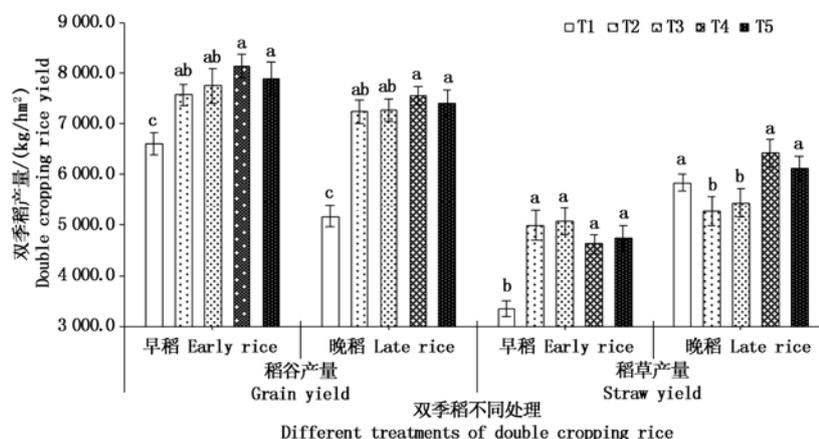


图 6 双季稻稻谷与稻草产量

Fig. 6 Yield of rice and straw in double-season rice

表 3 为双季稻不同处理早晚稻总生物量与周年总产量。由表可知,不同处理早晚稻总生物量、稻谷与稻草周年产量均高于 T1 处理,存在显著差异($P < 0.05$)。早稻总生物量以 T3 处理最高,较 T2 处理高 2.1%;晚稻总生物量以 T4 处理最高,较 T2

处理增产 465 kg/hm²。稻谷与稻草周年总产量均以 T4 处理最高,分别较 T2 处理高 6.0% 与 7.6%,差异不显著。稻谷与稻草周年总产量均表现为 $T4 > T5 > T3 > T2 > T1$ 。

表 3 双季稻总生物量与周年总产量

Tab. 3 Total biomass and annual production of double-season rice

kg/hm²

处理 Treatment	早稻总生物量 Total biomass of early rice	晚稻总生物量 Total biomass of late rice	稻谷周年总产量 Annual total yield of rice	稻草周年总产量 Annual total yield of rice straw
T1	9 960.8 ± 554.0b	11 012.4 ± 1 106.8b	11 782.1 ± 345.1b	9 191.0 ± 1 057.7b
T2	12 575.1 ± 1 478.6a	12 522.1 ± 1 109.1a	14 824.8 ± 417.7a	10 272.4 ± 759.2ab
T3	12 835.0 ± 1 044.9a	12 708.4 ± 890.0a	15 022.7 ± 674.2a	10 520.4 ± 747.2ab
T4	12 776.5 ± 838.3a	12 987.1 ± 954.4a	15 715.2 ± 844.9a	11 048.5 ± 827.3a
T5	12 630.7 ± 856.9a	12 533.0 ± 860.8a	15 313.7 ± 779.1a	10 850.0 ± 963.5a

注:表中不同小写字母表示相同指标不同处理间差异达到 5% 显著水平。

Note: Different lowercase letters in the table indicate that the difference between different treatments under the same index reaches a significant level of 5%.

2.8 相关性分析

表 4 为叶片生理指标与双季稻产量间以及其他生理指标间的相关性。除叶片 C_i 外, P_n 、 G_s 以及 SPAD 值均与双季稻产量呈正相关关系,叶片 C_i 与其他生理指标均呈负相关。早稻稻草产量与叶片 P_n 及 SPAD 的正相关关系均达到显著水平。早稻叶片 P_n 与 SPAD、 G_s 与 Tr 间均存在显著正相关。晚稻稻谷产量与叶片 C_i 间负相关关系达到极显著水平,与叶片 Tr 有显著正相关关系;叶片 P_n 与 G_s 、 Tr 与 C_i 分别呈极显著正相关与负相关关系,叶片 P_n 与 Tr 呈显著正相关。

3 讨论与结论

氮肥的合理施用保证水稻能实现稳产、高产^[20],本试验中,T4(早晚稻减施 30% 化肥氮,早稻减施 40% 化肥钾)处理早稻稻谷产量、晚稻稻谷产量、周年稻谷总产量分别较常规施肥处理提高 7.5%、4.4% 及 6.0%,与陆强等^[21]研究结果一致。双季稻稻谷产量均表现为 $T4 > T5 > T3$,幼穗分化期水稻生理指标除叶片 C_i 外均表现为 $T3 > T4 > T5$,这种差异可能是由于幼穗分化期有机肥养分释放与秸秆腐解缓慢,且秸秆腐解时微生物与水稻可能存

表 4 双季稻产量与叶片光合特性间相关性

Tab. 4 Correlation between yield of double-season rice and photosynthetic characteristics of leaves

时期 Time	指标 Index	Pn	Gs	Ci	Tr	SPAD
早稻 Early rice	稻谷产量	0.553	0.164	0.554	-0.063	0.676
	稻草产量	0.887 [*]	0.603	0.039	0.344	0.952 [*]
	Pn	1.000	0.857	-0.384	0.717	0.946 [*]
	Gs		1.000	-0.694	0.937 [*]	0.809
	Ci			1.000	-0.819	-0.196
	Tr				1.000	0.587
	SPAD					1.000
晚稻 Late rice	稻谷产量	0.689	0.715	-0.964 ^{**}	0.936 [*]	0.629
	稻草产量	0.522	0.529	-0.160	0.310	0.829
	Pn	1.000	0.970 ^{**}	-0.827	0.897 [*]	0.841
	Gs		1.000	-0.808	0.911 [*]	0.860
	Ci			1.000	-0.975 ^{**}	-0.676
	Tr				1.000	0.786
	SPAD					1.000

注: * . $P < 0.05$, ** . $P < 0.01$ 。

在争“氮”现象,养分供应不足引起;双季稻产量以 T4 处理最高,可能由于减施 30% 化肥氮、40% 化肥钾下施用有机肥配合秸秆还田养分的释放更加契合双季稻的需求^[22-23]。

早稻季,不同减施处理 Pn、Gs、Tr 与 SPAD 值均表现为 T2 > T3 > T4 > T5,可能与有机肥肥效迟缓,秸秆腐解缓慢,养分供应较速效化肥(常规施肥)慢有关。晚稻季,水稻倒三叶叶片 Pn、Gs 与 Tr 均以 T4 处理最高,T5 处理次之,表明有机肥施用秸秆还田下早晚稻减施 30% 化肥氮和早稻 40% 化肥钾处理能有效促进晚稻幼穗分化期叶片的光合作用,增加干物质累积,从而促进水稻增产。叶片 Ci 受叶片周围 CO₂ 浓度、气孔导度、叶肉导度与叶肉细胞的光合活性等因素决定^[24],早稻季叶片 Ci 表现为 T5 > T4 > T3 > T2,晚稻季叶片 Ci 以不施肥处理最高,显著高于其他处理,可能是由于水稻 Pn 越弱,细胞中 CO₂ 被用来进行光合作用的量降低,进而促进叶片胞间的 CO₂ 浓度(Ci)增高^[25],与相关性吻合。Gs 受叶片蒸腾速率、光照强度以及土壤湿度等因素影响^[26],本研究早晚季水稻倒三叶叶片 Gs 均与 Tr 呈显著正相关,结果一致。晚稻季叶片 Tr 以 T3 与 T4 处理最高,且各处理明显高于早稻季,可能与晚稻季光照强度高、蒸腾作用加强有关。叶片 SPAD 与氮素含量联系密切^[27],早稻季幼穗分化期叶片 SPAD 以常规施肥处理最高,均可能与有机肥的肥效迟缓,常规化肥氮素施入农田后迅速反应有关^[28];晚稻季以秸秆还田处理较高,可能与早稻秸秆腐解,一部分氮素被微生物消耗,到晚稻释放出来有关。

与常规施肥相比,T4 处理双季稻收获期土壤速效养分与有机质含量均有所提高,差异不显著。研

究表明,施用有机肥不仅可以增加土壤有机质含量,还可使土壤中碱解氮、有效磷与速效钾含量趋于协调,促进养分平衡,与本研究基本相符^[29-30]。与常规施肥相比,早晚稻收获期土壤养分含量均以化肥氮钾减施处理较高,且获得较高产量,表明双季稻有机肥施用与秸秆还田下减施化肥氮、化肥钾可以提高肥料利用效率。早晚稻收获期相比,土壤碱解氮含量降低,速效钾含量升高,与试验结论吻合。

有机肥施用与秸秆还田下减施化肥氮钾均可使双季稻产量增加,叶片光合作用增强,土壤理化性质改善。其中,以早晚稻减施 30% 化肥氮、早稻减施 40% 钾的效果最佳,与常规施肥处理相比,双季稻周年稻谷产量提高 6.0%;其早稻稻谷产量提高 7.5%,倒三叶叶片 Pn、Gs、Tr 及 SPAD 降低,Ci 提高;晚稻稻谷产量提高 4.4%,倒三叶叶片 Pn、Gs、Tr 及 SPAD 提高,Ci 降低,双季稻收获期土壤速效养分与有机质含量均有提高。

参考文献:

- [1] 武良, 张卫峰, 陈新平, 崔振岭, 范明生, 陈清, 张福锁. 中国农田氮肥投入和生产效率[J]. 中国土壤与肥料, 2016(4):76-83. doi:10.11838/sfsc.20160413. Wu L, Zhang W F, Chen X P, Cui Z L, Fan M S, Chen Q, Zhang F S. Nitrogen fertilizer input and nitrogen use efficiency in Chinese farmland[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(4):76-83.
- [2] 李方敏, 樊小林, 陈文东. 控释肥对水稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(4):494-500. doi:10.11674/zwjy.2005.0411. Li F M, Fan X L, Chen W D. Effects of controlled release fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2005, 11(4):494-500.
- [3] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 周兴, 王宇, 汤文光. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影

- 响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 95 - 104. doi:10.11674/zwyf.17072.
- Lu Y H, Nie J, Liao Y L, Zhou X, Wang Y, Tang W G. Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(1): 95 - 104.
- [4] 余砾. 施氮对可变电荷土壤中硝酸根离子和盐基离子耦合迁移的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2012. doi:10.7666/d.y2086568.
- Yu L. Effect of nitrogen application on coupling leaching of nitrate nitrogen and base cations in variable charge soil [D]. Chongqing: Southwest University, 2012.
- [5] 郑春风, 任伟, 车军, 杨攀, 徐福新, 吴政卿. 氮肥减量施用对冬小麦产量及经济效益的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(1): 56 - 60. doi:10.3969/j.issn.1002-2481.2019.01.14.
- Zheng C F, Ren W, Che J, Yang P, Xu F X, Wu Z Q. Effects of nitrogen reduction application on yield and economic benefit in winter wheat[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(1): 56 - 60.
- [6] 杨波. 不同氮肥管理模式对稻麦轮作系统净温室效应的观测研究[D]. 江苏: 南京农业大学, 2015.
- Yang B. Observation and Study on net greenhouse effect of rice-wheat rotation system under different nitrogen fertilizer management modes [D]. Jiangsu: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [7] 李继福. 秸秆还田供钾效果与调控土壤供钾的机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015. doi:10.7666/d.Y2803152.
- Li J F. Mechanisms of returning straw management on soil potassium supply capacity [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2015.
- [8] 黄鸿翔, 李书田, 李向林, 姚杰, 曹卫东, 王敏, 刘荣乐. 我国有机肥的现状与发展前景分析[J]. 土壤肥料, 2006(1): 3 - 8. doi:10.3969/j.issn.1673-6257.2006.01.001.
- Huang H X, Li S T, Li X L, Yao J, Cao W D, Wang M, Liu R L. Analysis on the status of organic fertilizer and its development strategies in China[J]. *Soils and Fertilizers*, 2006(1): 3 - 8.
- [9] 刘睿, 王正银, 朱洪霞. 中国有机肥料研究进展[J]. 中国农学通报, 2007, 23(1): 310 - 313. doi:10.3969/j.issn.1000-6850.2007.01.074.
- Liu R, Wang Z Y, Zhu H X. Research progress of organic fertilizer in China [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(1): 310 - 313.
- [10] 刘秀梅, 罗奇祥, 冯兆滨, 邹绍文, 刘光荣, 刘益仁. 我国商品有机肥的现状与发展趋势调研报告[J]. 江西农业学报, 2007, 19(4): 49 - 52. doi:10.3969/j.issn.1001-8581.2007.04.018.
- Liu X M, Luo Q X, Feng Z B, Zou S W, Liu G R, Liu Y R. Investigation report on current situation and development trend of commercial organic fertilizer in China[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2007, 19(4): 49 - 52.
- [11] 温延臣, 张曰东, 袁亮, 李伟, 李燕青, 林治安, 赵秉强. 商品有机肥替代化肥对作物产量和土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2136 - 2142. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2018.11.011.
- Wen Y C, Zhang Y D, Yuan L, Li W, Li Y Q, Lin Z A, Zhao B Q. Crop yield and soil fertility response to commercial organic fertilizer substituting chemical fertilizer [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11): 2136 - 2142.
- [12] 袁颖红, 樊后保, 黄欠如, 廖迎春, 黄荣珍. 长期施肥对水稻光合特性及水分利用效率的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(11): 2239 - 2244.
- Yuan Y H, Fan H B, Huang Q R, Liao Y C, Huang R Z. Effects of long-term fertilization on rice photosynthetic traits and water use efficiency [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(11): 2239 - 2244.
- [13] 唐保国, 陶诗顺, 张荣萍, 段转宁. 油菜秸秆全量还田减钾栽培对杂交稻分蘖及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(3): 29 - 33. doi:10.15933/j.cnki.1004-3268.2017.03.006.
- Tang B G, Tao S S, Zhang R P, Duan Z N. Effect of total rape straw returning with reduced potassium fertilizer on tiller and yield of hybrid rice [J]. *Journal Henan Agricultural Sciences*, 2017, 46(3): 29 - 33.
- [14] 白伟, 张立祯, 逢焕成, 牛世伟, 蔡倩, 孙占祥, 安景文. 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. doi:10.7668/hbxb.2018.02.031.
- Bai W, Zhang L Z, Pang H C, Niu S W, Cai Q, Sun Z X, An J W. Effects of straw returning plus nitrogen fertilizer on water use efficiency and nitrogen use efficiency of spring maize in Northeast China [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(2): 224 - 231.
- [15] 姚如男, 陶卫, 李成业, 周琦, 邓有能, 唐利忠, 王霏, 雷干农. 玉米秸秆全量还田条件下氮肥运筹对晚稻产量和土壤化学及微生物特性的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(1): 53 - 57. doi:10.3969/j.issn.1006-8082.2019.01.013.
- Yao R N, Tao W, Li C Y, Zhou Q, Deng Y N, Tang L Z, Wang P, Lei G N. Effects of nitrogen application on yield of late rice, soil chemical and microbial characteristics under the condition of full corn straw returning [J]. *China Rice*, 2019, 25(1): 53 - 57.
- [16] Tang H M, Xu Y L, Sun J M, Xiao X P, Wang K, Li W Y, Tang W G, Yang G L. Soil enzyme activities and soil microbe population as influenced by long-term fertilizer management under an intensive cropping system [J]. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2014, 8(2): 15 - 23.
- [17] Yadav R L, Dvivedi B S, Prasad K, Tomar O K, Shurpali N J, Pandey P S. Yield trends, and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice wheat system under integrated use of manures and fertilizers [J]. *Field Crops Research*, 2000, 68(3): 219 - 246. doi:10.1016/s0378-4290(00)00126-x.
- [18] 廖萍, 汤军, 黄山, 曾勇军, 石庆华. 等养分条件下生物有机肥与化肥配施对双季稻产量和土壤性状的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(2): 16 - 20.
- Liao P, Tang J, Huang S, Zeng Y J, Shi Q H. Combined fertilization of bio-organic fertilizer and chemical fertilizer: the effect on double-cropping rice and soil properties under equivalent nutrient rate [J]. *China Agronomic Science Bulletin*, 2017, 33(2): 16 - 20.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2004: 430 - 472.

- Lu R K. The analytical methods for soil and agrochemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004:430-472.
- [20] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 周兴, 谢坚, 汤文光, 杨曾平. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2):155-161, 174. doi:10.13870/j.cnki.stbxb.2016.02.028.
- Lu Y H, Nie J, Liao Y L, Zhou X, Xie J, Tang W G, Yang Z P. Effect of application reduction of controlled release nitrogen fertilizer on yield of double cropping rice and nitrogen nutrient uptake[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2):155-161.
- [21] 陆强, 王继琛, 李静, 王磊, 张丽, 哈丽哈什·依巴提, 王秋君, 张坚超, 黄启为, 沈其荣. 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[J]. 南京农业大学学报, 2014, 37(6):66-74. doi:10.7685/j.issn.1000-2030.2014.06.010.
- Lu Q, Wang J C, Li J, Wang L, Zhang L, Halihashi Y B T, Wang Q J, Zhang J C, Huang Q W, Shen Q R. Effect of straw returning and combined applications of organic fertilizer and inorganic fertilizer on grain yield and nitrogen utilization under rice-wheat rotation system[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2014, 37(6):66-74.
- [22] 徐一兰, 唐海明, 程爱武, 李益锋, 李永, 何伟, 胡赛晶, 王跃平. 长期不同施肥模式对双季稻田土壤养分及水稻产量的影响[J]. 华北农学报, 2017, 32(6):192-197. doi:10.7668/hbxb.2017.06.028.
- Xu Y L, Tang H M, Cheng A W, Li Y F, Li Y, He W, Hu S J, Wang Y P. Effects of different long-term fertilizer managements on soil nutrients and rice yield in double cropping paddy field[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2017, 32(6):192-197.
- [23] 王志荣, 梁新强, 隆云鹏, 何霜, 鲁长根. 化肥减量与秸秆还田对油菜地氮素地表径流的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(2):193-200. doi:10.16178/j.issn.0528-9017.20190206.
- Wang Z R, Liang X Q, Long Y P, He S, Lu C G. Effects of fertilizer loss and straw returning on surface runoff of rape field[J]. *Zhejiang Agricultural Science*, 2019, 60(2):193-200.
- [24] 陈根云, 陈娟, 许大全. 关于净光合速率和胞间 CO₂ 浓度关系的思考[J]. 植物生理学通讯, 2010, 46(1):64-66.
- Chen G Y, Chen J, Xu D Q. Thinking about the relationship between net photosynthetic rate and intercellular CO₂ concentration[J]. *Plant Physiol Comm*, 2010, 46(1):64-66.
- [25] 杨亮, 赵宏伟, 宋谨同, 魏淑红, 张亚芝, 王强, 孟宪欣. 氮肥用量对芸豆叶绿素含量和子粒营养品质影响的研究[J]. 作物杂志, 2013(1):81-87. doi:10.16035/j.issn.1001-7283.2013.01.041.
- Yang L, Zhao H W, Song J T, Wei S H, Zhang Y Z, Wang Q, Meng X X. Effects of fertilizer rate on the chlorophyll content and quality of kidney bean[J]. *Crops*, 2013(1):81-87.
- [26] 蒋跃林, 张庆国, 张仕定, 王公明, 岳伟, 姚玉刚. 小麦光合特性、气孔导度和蒸腾速率对大气 CO₂ 浓度升高的响应[J]. 安徽农业大学学报, 2005, 32(2):169-173. doi:10.3969/j.issn.1672-352X.2005.02.010.
- Jiang Y L, Zhang G Q, Zhang S D, Wang G M, Yue W, Yao Y G. Responses of photosynthetic characteristics, stomatal conductance and transpiration of wheat to the increase of atmospheric CO₂ concentration[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2005, 32(2):169-173.
- [27] 杨永辉, 吴普特, 武继承, 赵世伟, 黄占斌, 何方. 冬小麦光合特征及叶绿素含量对保水剂和氮肥的响应[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1):79-85. doi:10.13287/j.1001-9332.2011.0024.
- Yang Y H, Wu P T, Wu J C, Zhao S W, Huang Z B, He F. Responses of winter wheat photosynthetic characteristics and chlorophyll content to water-retaining agent and N fertilizer[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1):79-85.
- [28] 蔡威威, 艾天成, 李然, 金紫缘, 徐金刚, 曹坤坤. 控释肥及尿素添加剂对双季稻光合特性及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(3):54-60. doi:10.11838/sfsc.20180309.
- Cai W W, Ai T C, Li R, Jin Z Y, Xu J G, Cao K K. Effects of controlled release fertilizer and urea additives on photosynthetic characteristics and yield of double-cropping rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(3):54-60.
- [29] 茹淑华, 张国印, 李虎群, 孙世友, 王凌, 耿暖, 陈贵今. 禽粪有机肥对土壤主要养分和微量元素锌累积的影响[J]. 华北农学报, 2011, 26(S2):157-162. doi:10.7668/hbxb.2011.S2.034.
- Ru S H, Zhang G Y, Li H Q, Sun S Y, Wang L, Geng N, Chen G J. Effects of poultry manure on the main soil nutrients and zinc accumulation[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(S2):157-162.
- [30] 刘旋, 乔天长, 赵先龙, 张丽芳, 魏湜, 顾万荣, 焦健, 李晶. 玉米秸秆腐解液对幼苗根际土壤理化性质的影响[J]. 西北农业学报, 2017, 26(3):376-383. doi:10.7606/j.issn.1004-1389.2017.03.008.
- Liu X, Qiao T C, Zhao X L, Zhang L F, Wei S, Gu W R, Jiao J, Li J. Effects of maize stalk decomposing liquid on soil physical and chemical properties of seedlings rhizosphere[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(3):376-383.