李丽娜,闫淋淋,曹凑贵,等.稻虾共作系统中水稻生长及养分吸收对秸秆还田与投食的响应[J]. 华中农业大学学报,2020,39(2):8-16.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.02.002

稻虾共作系统中水稻生长及养分吸收对秸秆还田与投食的响应

李丽娜[1],闫淋淋[1],曹凑贵[1,2],江洋[1],汪金平[1]

1.华中农业大学植物科学技术学院/双水双绿研究院,武汉 430070;
2.主要粮食作物产业化湖北省协同创新中心,荆州 434025

摘要　为探究稻虾共作系统中不同秸秆还田与投食处理下水稻生长发育特征、光合变化规律及氮素养分吸收状况,以秸秆不还田不投食(NS+NF)为对照,研究秸秆还田(S:秸秆还田量为 12 200 kg/hm^2;NS:秸秆残茬 7 200 kg/hm^2)和投食(F:投食量为 1 600 kg/hm^2;NF:投食量为 0)不同处理在水稻生育中后期生长发育特征、叶片光合特征、群体冠层结构、氮素利用效率与产量的变化。结果显示:S+F 能显著增加水稻的产量、有效穗数、结实率和每穗粒数,显著提高成熟期水稻植株氮含量;NS+F 处理实际产量最高,为 9.34 t/hm^2,分别高出其他处理 3.43%～11.72%;S 处理主要在水稻生育后期起作用,可延缓水稻叶片衰老,降低成熟期根系伤流强度降幅;F 处理可增加水稻的分蘖数,促进分蘖稳定,显著降低了水稻的蒸腾速率,增加了水稻成熟期干物质的积累量;NS 处理能够显著增加水稻光合速率和蒸腾速率。秸秆还田和投食处理各有千秋,实际农事操作中,当秸秆还田量比较大时,可以适当投喂小龙虾饲料以补充氮素供微生物分解秸秆和植株生长所用。

关键词　稻虾共作;稻田种养;生态农业;秸秆还田;投食;光合特性;氮素吸收;绿色种养;绿色生产技术

中图分类号　S 511:S 966.1　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1000-2421(2020)02-0008-09

研究表明,稻田综合种养具有较好的经济和生态效益[1-3],利用水稻与水产生物的互利共生的特性,有利于实现物质的循环利用和能量多级流动[4],达到稳粮增收的目的。近年来,我国稻田养殖面积不断扩大,向规模化、集约化的方向发展,对稻田综合种养技术提出了新的要求。农作物秸秆含丰富的碳、氮、磷、钾和微量元素等成分[5]。秸秆还田不仅可以缓解秸秆污染环境的问题,还能使养分资源得以循环利用[6-7]。水生生物和水稻共生可提高肥料和饲料的利用率,为减少氮素投入提供了契机[8-10]。由于缺乏统一规范的种养技术,不合理的人工投食往往造成水体富营养化,导致农田面源污染加剧[11],影响稻田土壤营养及水稻生长[12]。本研究以稻虾共作系统中水稻为研究对象,将秸秆还田和投食农艺措施结合,探究秸秆还田与投食对水稻生长发育的影响,旨在为稻虾共作技术提供理论支持和参考,以便更好地服务于生产实践。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试水稻品种为泰优 390,三系杂交迟熟晚稻,全生育期 118.5 d,株型适中,生长势强。试验虾为克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)。

1.2　试验设计

试验于 2016 年在湖北省潜江市后湖农场进行。采用二因素随机区组设计,设置秸秆还田量和投食量两因素。秸秆还田(S):秸秆全部还田,还田量为 12 200 kg/hm^2;秸秆不还田(NS):秸秆残茬 7 200 kg/hm^2。秸秆还田时间为 2015 年 10 月,联合机收获水稻后,将秸秆全部还田,然后向田中注水,至水面高于田面 30 cm 左右。投食(F):投食量为 1 600 kg/hm^2,于 2016 年 4 月 13 日至 2016 年 5 月 25 日投食;不投食(NF):在所有时间都不投食。饲料类型为正大小龙虾专养配合饲料,粗蛋白含量≥

收稿日期:2019-07-05
基金项目:国家重点研发计划专项(2018YFD0301304);中央高校基本科研业务费专项(2662019QD049);湖北省农业科技创新中心创新团队项目
李丽娜,硕士. 研究方向:作物栽培学与耕作学. E-mail:lilina@webmail.hzau.edu.cn
通信作者:汪金平,博士,副教授. 研究方向:稻田生态. E-mail:wangjp@mail.hzau.edu.cn

28.0%。试验设置秸秆还田不投食(S ＋NF)、秸秆还田投食(S ＋F)、秸秆不还田不投食(NS＋NF)、秸秆不还田投食(NS＋F)处理，每个处理重复 3 次，其中 NS ＋ NF 为对照处理。每个小区面积 1 000 m^2，四周开挖环形沟，沟宽 2 m，沟深 1.2 m，田埂高 0.5 m，沟内养殖克氏原螯虾。各处理的每穴基本苗数相同(2 苗/穴)，移植株行距 24 cm×31 cm。基肥于移栽前 1 d 施入，每 667 m^2 施复合肥 37.5 kg(N-P_2O_5-K_2O 含量为 26-10-16)作底肥，分蘖期每 667 m^2 追施尿素 10 kg、氯化钾 10 kg。水分比常规管理稻田高出 10 cm 水层，晒田将水位缓慢降低，使虾回到环形沟内。虫草害喷洒生物制剂农药。

1.3　生长发育指标的测定

分别在孕穗期、齐穗期、成熟期取样，每个小区取代表性水稻植株 5 蔸，进行分蘖计数。去除植株茎秆根系，剩余部分分为叶、茎鞘、穗。将各部分植株样品置于 105 ℃杀青 30 min，后转入 80 ℃恒温烘箱烘干至恒质量并称量。

于水稻关键生育期，在各小区选取 3 株长势、长相均匀一致的稻株，在离泥面 5 cm 处剪去地上部分，套上装有脱脂棉并已称质量的塑料袋，12 h 后收集塑料袋称质量，测定根系伤流强度。

1.4　叶片生理指标的测定

于抽穗期每隔 6 d 测定 1 次 SPAD 值，共测定 5 次。选取 10 株健康主茎，测定植株从上往下第 1 片全展开叶的 SPAD 值，测定位置为上部 1/3 处，中部和下部 1/3 处，三者的平均值作为每片叶的 SPAD 值。每小区选取标记 10 片剑叶，每片叶测定 3 次，最终 SPAD 值取 3 次所测值的平均数。测定仪器使用日本 SPAD-502 叶绿素快速测定仪。

叶片光合特征的测定参照文献[13]进行，采用 LI6400XT(LI-6400，LICOR，USA)便携式光合作用测定仪，设定为开放气路、人工红蓝光源，光强 1 500 μmol/(m^2 · s)，叶室内气流速率设为 500 μmol/s，于晴天上午 09:00－11:30 测定。

1.5　群体冠层空间结构

各处理于抽穗后 20 d 取有代表性稻株 4 穴，去根清洗后利用层切法[14]自下向上将自然状态的稻株按每 20 cm 截为一段，直至穗部，将各段中绿叶、黄叶、茎鞘、穗依次分袋包装，烘干后称质量[14]。

1.6　植株氮含量的测定

各处理于齐穗期、成熟期取样分茎、鞘、叶、穗等器官后烘干，经粉碎后采用 H_2SO_4-$HClO_4$ 混合液法消煮，用半微量凯氏定氮法测定全氮含量。

1.7　产量及产量构成因子

成熟期于每个小区中心选取 5 m^2 正方形区域作为测产区进行人工收割，稻穗经脱粒、自然晒干，风选、称量后，使用谷物水分仪(LSD-1H)测定含水量，并换算成含水量为 14.0%时的产量。

成熟期每小区取 12 蔸植株稻穗，经脱粒、晒干，用水选法(自来水)分开饱满粒和空瘪粒，自然风干后每个小区分别取饱满粒 5 份，每份 30 g；空瘪粒 5 份，每份 5 g，分别计数每份粒数。样品烘干后称量，用于计算产量构成因子。

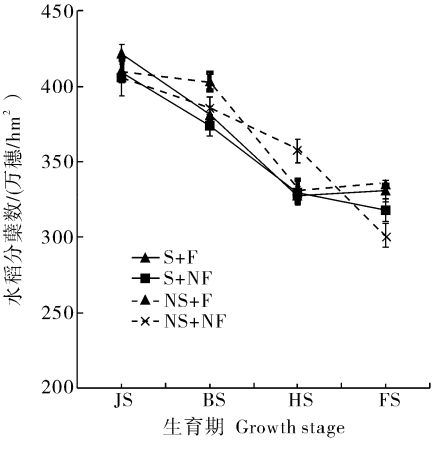
1.8　数据分析

采用 Excel 2010 进行数据的整理与作图，同时采用 SPSS 22.0 进行数据的方差分析。

2　结果与分析

2.1　不同处理对水稻生长发育动态的影响

1)不同处理对水稻不同生长时期茎蘖动态的影响。由图 1 可知，在整个生育期水稻分蘖数呈下降趋势，F 处理的分蘖数高于 NF 处理。NS＋F 处理的水稻拔节至孕穗期分蘖数降低最少，孕穗之后分蘖数快速降低，抽穗后开始趋于平稳，而 NS＋NF 处理的分蘖数在抽穗之后开始急剧下降，这可能是 NF 处理的无效分蘖枯死较其他处理晚所致。水稻抽穗后，F处理的水稻分蘖数趋于稳定，显著高于NF



S：秸秆还田；NS：秸秆不还田；F：投食；NF：不投食；JS：拔节期；BS：孕穗期；HS：抽穗开花期；MS：灌浆期。下同。S：Straw returnin；NS：Straw not returning；F：Feeding；NF：No feeding；JS：Jointing stage；BS：Booting stage；HS：Heading flowering stage；FS：Filling stage.The same as follows.

图 1　秸秆还田与投食对水稻茎蘖动态的影响

Fig.1　Effects of straw returning and crayfish feeding on rice tiller numbers

处理，且投食条件下2个处理的分蘖数差异不显著，说明F处理对增加水抽穗后，F处理的水稻分蘖数趋于稳定，显著高于水稻后期分蘖数和促进水稻分蘖稳定有显著作用。

2)不同处理对水稻关键时期根系伤流的影响。由图2可知，各处理根系伤流强度在水稻抽穗后呈降低趋势，抽穗期，S+F、NS+NF处理的根系伤流显著高于S+NF、NS+F处理，NS+F处理显著降低了水稻的根系伤流强度。乳熟期，各处理间根系伤流强度差异不显著。NS+F处理根系伤流强度最大，降低幅度最小。成熟期，S处理的根系伤流强度显著高于NS处理，相对于S处理，NS处理根系伤流强度下降幅度较小。表明NS+F处理的根系活力较强，有利于灌浆结实，为高产打下基础。

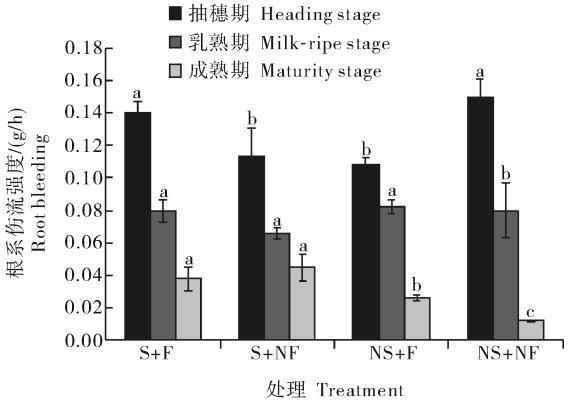
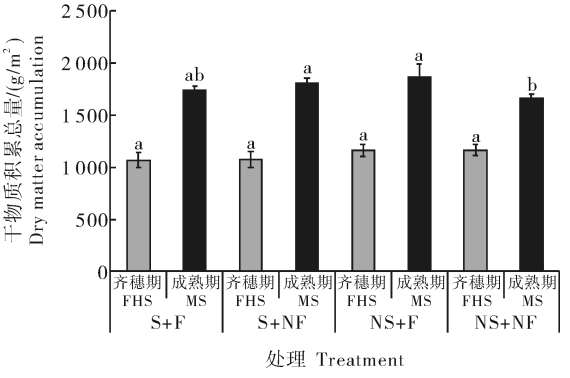


图2 秸秆还田与投食对水稻根系伤流强度的影响

Fig.2 Effects of straw returning and crayfish feeding on rice root bleeding

3)不同处理对水稻干物质量积累动态的影响。植株叶片是水稻进行光合作用的重要器官，是水稻有机物和营养物质的主要供给者。由图3可知，从齐穗期至成熟期植株干物质总量增加，成熟期，S+NF积累量显著高于NS+NF处理；NS+F能显著增加水稻干物质量。说明投食在一定程度上可以弥补秸秆还田量的不足。

由表1可知，齐穗期至成熟期，各处理之间茎、叶、穗干物质量积累存在差异。齐穗期，NS+F处理叶干物质量显著高出其他处理(S+F、S+NF、NS+NF)6.79%、8.08%、9.97%；NS处理的穗干物质量显著高出还田处理16.44%。成熟期，F处理的叶干物质量显著高于不投食处理，平均高出10.18%，穗干物质量积累增幅达到11.88%；S+NF、NS+F处理的茎干物质量显著高于S+F、NS+NF处理，平均高出12.02%。可以看出，齐穗期F处理对增加叶的干物质积累效果显著，NS处理对增加穗的干物质积累效果显著；成熟期NS+F能显著增加水稻茎、叶、穗的干物质量积累，而S+F只对叶干物质量积累有显著影响，对茎、穗干物质量积累反而有降低的作用。



FHS:齐穗期 Full-heading stage; MS:成熟期 Maturity stage.

图3 秸秆还田与投食对水稻干物质积累总量的影响

Fig.3 Effects of straw returning and crayfish feeding on rice dry matter accumulation

表1 秸秆还田与投食对水稻茎叶穗干物质积累的影响

Table 1 Effects of straw returning and feeding on dry matter accumulation of rice stem leaf and panicles

处理 Treatmets	齐穗期干物质量/(g/m²) Dry matter of full-heading stage			成熟期干物质量/(g/m²) Dry matter of maturity stage		
	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle
S+F	528.1a	266.6b	275.0b	517.7b	316.2a	903.2ab
S+NF	526.6a	262.8b	278.0b	574.0a	289.9b	943.2a
NS+F	554.1a	286.0a	332.3a	588.3a	322.0a	949.3a
NS+NF	579.0a	252.5b	320.6a	520.0b	289.3b	848.4b

2.2 不同处理对水稻光合特性的影响

1)不同处理对水稻SPAD值的影响。SPAD值是评估水稻植株叶片叶绿素含量的重要生理指标。由图4可得，自移栽后62～83 d，除NS+NF处理外，其他处理水稻叶片SPAD值呈先降低后升高再下降的趋势，在移栽后67 d水稻叶片SPAD值出现低谷，而NS+NF处理的水稻叶片SPAD值持续升高，但均在移栽后72 d达到最大。移栽62 d和72 d，秸秆还田处理的SPAD值高于不还田处理，到移栽83 d达到显著水平。说明在水稻的生育后期S较NS可延缓叶片的衰老。相同投食处理下，除移栽后77 d S处理与NS处理差异显著外，其他阶段差异极显著。等量秸秆还田条件下，F处理对水稻SPAD值的影响在移栽后67、72 d差异极显著；二者的交互作用在62、72 d产生显著差异，77～83 d差异极显著，即随时间的推移交互作用影响越来越大。

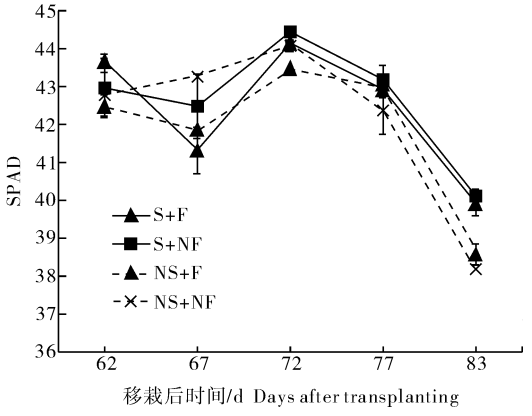


图 4　秸秆还田与投食对水稻生育后期 SPAD 值的影响

Fig.4　Change of SPAD values of straw returning and crayfish feeding during late reproductive period

2)不同处理对水稻光合作用的影响。由图 5 可知，不同处理对水稻齐穗期光合速率及蒸腾速率的影响显著。不同处理下光合速率表现为 NS 处理显著高于 S，平均高出 14.17%。等量秸秆还田(S/NS)条件下，F 处理差异不显著。蒸腾速率表现为 NS 处理大于 S 处理，蒸腾速率最高的是 NS＋NF 处理，达到 7.32 mmol/(m^2 · s)，显著高于 S＋F、S＋NF、NS＋F 处理，依次高出 22.82%、21.80%和 46.11%。说明 NS 能促进水稻光合作用，NF 对水稻蒸腾速率的提高具有正向作用。

2.3　不同处理对水稻群体冠层空间结构的影响

合理的冠层结构是提高作物产量的生理基础。本试验采用层切法对各处理冠层叶片空间分布状况进行分析，由图 6 可知，不同处理对水稻空间结构的

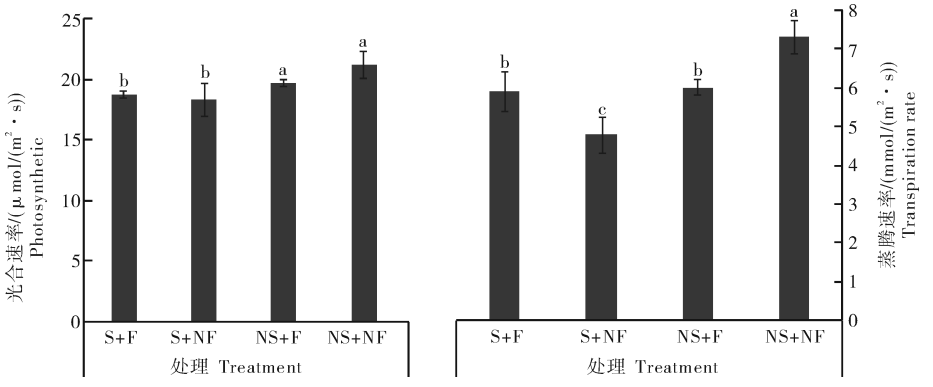


图 5　秸秆还田与投食对水稻齐穗期光合速率及蒸腾速率的影响

Fig.5　Effects of straw returning and crayfish feeding on rice photosynthetic rate and transpiration rate during full-heading stage

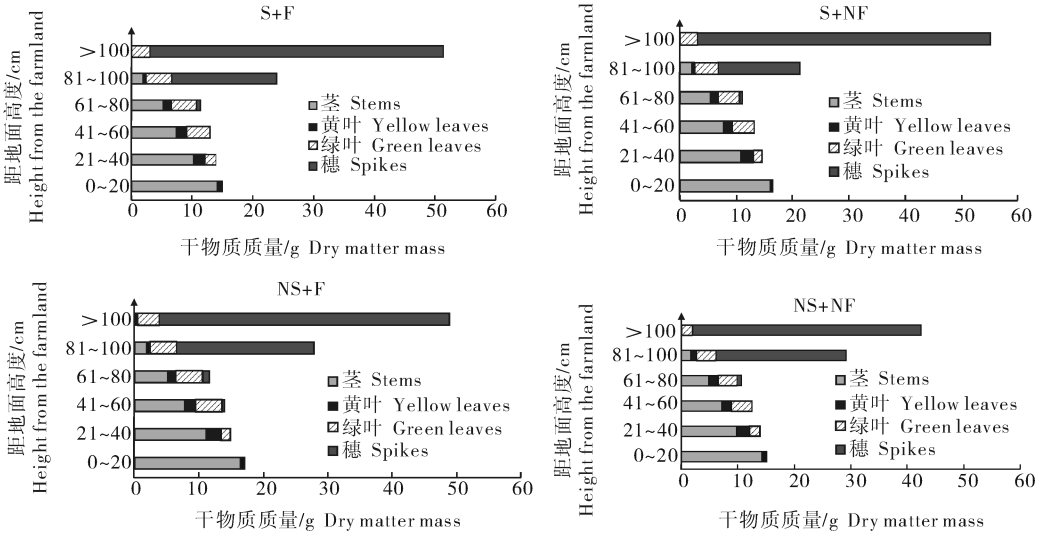


图 6　秸秆还田与投食对水稻群体空间结构的影响

Fig.6　Effects of straw returning and crayfish feeding on rice population spatial structure

影响不同。在离地面20～40 cm和41～60 cm处，NS＋F处理绿叶干物质量积累显著高于其他处理，在离地面61～80 cm处，S＋NF处理茎干物质积累量最大，显著高于其他处理。在离地面81～100 cm处，黄叶和穗干物质积累量从大到小依次为NS＋NF、NS＋F、S＋F、S＋NF。在离地面100 cm以上的部位，穗的干物质积累在空间结构上差异显著，干物质积累量排序为(S＋NF)＞(S＋F)＞(NS＋F)＞(NS＋NF)。

综上，S处理下，在离地面80～100 cm和大于100 cm处的穗干物质积累量呈现出相反的特征，大于100 cm处穗干物质积累量更大，这种情况容易造成头重脚轻，在后期易发生倒伏。

2.4 不同处理对水稻氮含量的影响

由图7可见，随着水稻的生长发育，水稻植株氮含量不断降低，不同处理对水稻植株茎、叶、穗氮含量的影响差异显著。齐穗期NS＋F水稻各器官氮含量显著增加，成熟期差异不显著，而S＋F植株氮含量显著高于S＋NF，说明成熟期S＋F处理对水稻的各器官氮含量的减少有抑制作用。

齐穗期至成熟期，茎含氮量增加的是NS＋F处理，增加了23.24%，降低幅度最大的是S＋NF处理，降低了95.58%；叶含氮量降低幅度最小的是NS＋NF处理，仅0.59%，降低幅度最大的是S＋NF处理，达280.5%；穗含氮量降低幅度最小的是S＋F处理，最大的是NS＋F处理，分别降低1.66%、144.64%。

进行双因素方差分析发现，S在齐穗期穗氮含量差异达到显著水平，成熟期叶、穗氮含量差异极显著。F在齐穗期水稻植株茎、叶氮含量差异显著，穗部差异达到极显著水平，成熟期叶的氮含量差异达显著，茎和穗部差异达到极显著水平。S×F水稻齐穗期茎的氮含量差异极显著，叶氮含量差异显著，成熟期叶、穗氮含量差异达极显著水平。

2.5 不同处理对水稻产量的影响

由表2可知，秸秆全部还田＋投食处理(S＋F)下的产量、结实率、有效穗数显著高出不投食8.01%、4.50%、5.56%；千粒重和每穗粒数差异不显著。NS＋F处理的每穗粒数和有效穗数显著高出不投食处理(NS＋NF)5.60%和11.50%，而结实率显著低于NF。F＋S处理的千粒重显著低于NS，降幅为1.47%，每穗粒数显著高于秸秆不还田处理，高出2.53%。NF条件下，秸秆还田处理的产量、千粒重、结实率显著低于秸秆不还田处理，分别减少6.94%、1.05%、10.29%。

对各处理的水稻产量及其构成因子的方差分析结果(表2)显示，S处理下，水稻有效穗数和产量差异显著，千粒重、结实率和每穗粒数差异达到极显著水平。F处理下水稻产量和有效穗数差异达极显著水平，千粒重、结实率和每穗粒数的差异不显著。S×F处理下，水稻的有效穗数差异显著，结实率和每穗粒数差异达到极显著水平，水稻的千粒重和产量差异不显著。

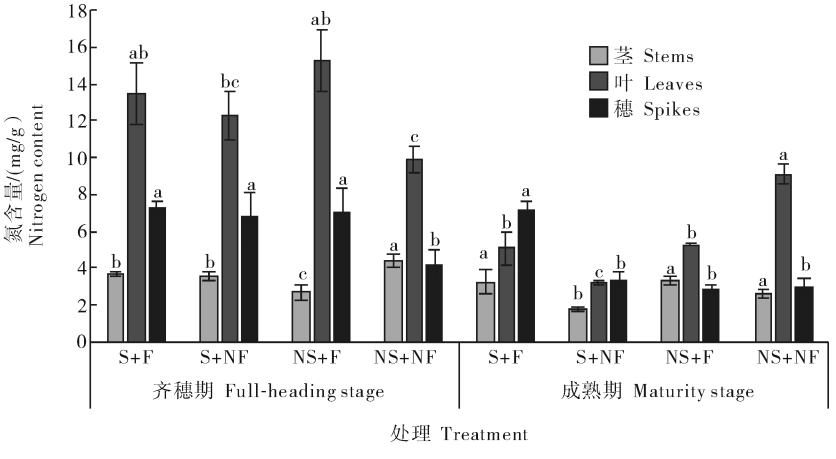


图7 秸秆还田与投食对水稻植株茎、叶、穗氮含量的影响

Fig.7 Effects of nitrogen content of straw returning and crayfish feeding on stem, leaf and spike of rice plant

表 2　秸秆还田与投食对水稻产量及其构成因子的影响

Table 2　The straw returning and crayfish feeding effects on rice yield and its components

处理 Treatments	千粒重/g 1000-grain weight	结实率/% Filled grains rate	每穗粒数 Grain number per spike	有效穗数/(万穗/hm²) Valid panicles	实际产量/(t/hm²) Actual yield
S+F	23.76b	63.85b	186.21a	332.67a	9.03a
S+NF	23.75b	61.10c	189.82a	315.16b	8.36b
NS+F	24.11a	64.48b	181.61b	339.67a	9.34a
NS+NF	24.00a	67.39a	171.98c	304.65b	8.94a
秸秆还田 Straw returning	* *	* *	* *	ns	*
投食 Srayfish feeding	ns	ns	ns	* *	* *
秸秆还田×投食(S×F)	ns	* *	* *	*	ns

注：ns 表示差异不显著。Note："ns" means non-significant.

3　讨　论

本试验中秸秆不还田处理下投食与不投食产量分别高出秸秆还田处理 3.43%和 6.94%，在不投食情况下效果尤为显著；秸秆不还田处理中有 7 200 kg/hm² 的秸秆量，还田量适中。由于秸秆还田处理的秸秆量达 12 200 kg/hm²，还田量大，腐解时需要更长时间才能将养分释放，同时还会产生较多的有毒物质包括有机酸、CO_2 和一些还原性物质，抑制水稻的生长[15]，这与陆斌等[16]研究秸秆还田量达到 11 250 kg/hm² 时水稻产量下降、稻草还田量 5 250～9 750 kg/hm² 比较适宜的结果一致。说明适量秸秆还田对水稻的增产有积极影响。同时，本研究中投食处理下，秸秆还田对水稻产量影响不显著，但不投食条件下，相比秸秆不还田，秸秆还田处理的产量显著降低。程励励等[17]的研究表明，单一秸秆还田会产生危害作物生长的物质，不利于作物生产。大量秸秆还田时由于其腐解消耗氮素，易造成土壤供氮不足、秧苗的返青和生长受抑制；投喂小龙虾饲料后，未被小龙虾食用的部分归于土壤，缓解了微生物的争氮作用，水稻产量变化差异不显著。在实际生产中可以适当减少秸秆还田量或者配施肥料，以减少秸秆腐解对水稻生长的抑制作用。从产量构成因素来看，NS+F 处理产量较高得力于千粒重和有效穗数的增加。李军等[18]对 0～11 250 kg/hm²的秸秆还田量对水稻产量的影响进行研究发现，随着秸秆还田量的增加，水稻的结实率在降低，而每穗粒数先升高后降低。本试验与李军等[18]研究结果基本一致，秸秆还田的每穗实粒数显著高于秸秆不还田，但结实率、千粒重显著低于秸秆不还田处理；秸秆还田对提高有效穗数的影响不显著，但等量秸秆还田条件下，投喂饲料能显著增加水稻的有效穗数。

研究表明秸秆还田对水稻群体质量的影响多发生在水稻生育中后期[19]。本试验中，水稻抽穗后，投食条件下，秸秆还田量对分蘖数影响不明显，且分蘖数显著高于不投食；不投食条件下，秸秆还田处理的分蘖数要比秸秆不还田处理高。在水稻灌浆期，秸秆还田的分蘖数要高于秸秆不还田；等量秸秆还田(还田或不还田)条件下，投食能增加灌浆期的分蘖数。韩新忠等[19]的研究结果也表明秸秆还田处理的水稻分蘖数、株高、SPAD 及干物质积累量在孕穗期之后均高于秸秆不还田处理，前期对其增加不明显；且本试验结果显示投食对增加水稻后期分蘖数和促进水稻分蘖稳定有显著作用。

本研究结果显示，从齐穗期至成熟期，水稻植株各器官的氮含量呈下降的趋势。不还田处理的叶片 SPAD 值在移栽后 77～83 d 下降速度大于还田处理，这可能是与后期秸秆不还田处理的水稻缺少氮素有关[20]。秸秆还田后经过腐解，增加了土壤氮素、可矿化氮含量，增加了土壤的供氮能力，提高了作物氮素含量[21]。本试验中，秸秆还田对生育前期植株氮素积累没有显著影响，但显著增加了成熟期的氮素积累；整体来讲，各器官对氮的吸收量增加，其中叶片吸收效果最为显著；且成熟期叶、茎鞘氮素籽粒转移，与前人研究一致[22-23]。

合理的秸秆还田量可以提高作物的光合作用[24]。本研究中,相比秸秆还田处理,秸秆不还田处理在齐穗期光合速率和蒸腾速率高,可能是因为合理的秸秆还田量对土壤水肥的保持有增加作用,还能对作物根生长有促进作用,进而抑制了生育后期叶绿素的分解。淹水灌溉下秸秆腐解时会形成大量的有机酸,还原性有毒物质累积会阻碍根系生长[25],本研究在抽穗期,秸秆还田的根系伤流强度小于秸秆不还田处理,水稻生育末期、后期秸秆还田根系伤流强度大于秸秆不还田,可能与此相关。研究人员为解决或减少秸秆还田对作物的负面影响、将秸秆还田的养分价值发挥到最大而进行了大量的研究,结果表明实际生产中可以适当减少秸秆还田量或配施肥料,适当施用有机肥[22,26],以加速秸秆腐解或减少秸秆腐解对水稻的抑制作用[18,27],稻虾共作系统中有机肥中的小生物还能作为小龙虾的食物。使用腐解剂[28]、无水层灌溉栽培方式[29]控制留茬高度、配套相应水肥管理[25]等也有一定的积极效果。

本研究结果表明:等量秸秆还田(秸秆还田或秸秆不还田)条件下,投食处理优于不投食处理,对水稻产量及产量构成因子都有积极影响。因此,在农事操作过程中当秸秆还田量比较大时,可以适当投喂小龙虾饲料以补充氮素供微生物分解秸秆和植株生长。另外,稻虾共作系统中水稻的高产高效栽培措施还需更深入的研究,可以从适合稻虾共作系统中水稻的播种方法、品种选择、栽培密度、最宜施肥量、水分管理及小龙虾最适密度等农事措施入手,结合秸秆还田与投食进行研究,以达到稻虾共作系统中水稻与小龙虾的双高产、增加土地的复种指数、保障粮食安全、节约资源、保护环境、实现农业可持续发展等多赢的效果。

参考文献 References

[1] XIE J,HU L L,TANG J J,et al. Ecological mechanisms underlying the sustainability of the agricultural heritage rice-fish coculture system[J]. P Natl Acad Sci USA,2011,108(50):1381-1387.

[2] ZHAN M,CAO C G,WANG J P,et al. Dynamics of methane emission,active soil organic carbon and their relationships in wetland integrated rice-duck systems in Southern China[J]. Nutrt Cycl Agroecos,2011,89(1):1-13.

[3] HUANG S,WANG L,LIU L,et al. Nonchemical pest control in China rice:a review[J]. Agron sustain dev, 2014,34(2):275-291.

[4] 陈欣,唐建军.农业系统中生物多样性利用的研究现状与未来思考[J].中国生态农业学报,2013,21(1):54-60. CHEN X, TANG J J. Utilization of biodiversity in agriculture:today and tomorrow[J]. Chinese journal of eco-agriculture,2013,21(1):54-60(in Chinese with English abstract).

[5] 李国学,张福锁.固体废物堆肥化与有机复混肥生产[M].北京:化学工业出版社,2000. LI G X,ZHANG F S. Solid waste composting and organic compound fertilizer production[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2000(in Chinese).

[6] 王振忠,吴敬民.太湖稻麦地区秸秆还田增产及培肥效果[J].安徽农业科学,2002,30(2):269-271. Effect of the straw returned into soil in rice and wheat planting area of Taihu Region [J]. Journal of Anhui agricultral sciences,2002,30(2):269-271(in Chinese with English abstract).

[7] 徐国伟.种植方式、秸秆还田与实地氮肥管理对水稻产量与品质的影响及其生理的研究[D]. 扬州:扬州大学,2007. XU G W. Effect of planting patterns,straw application and site-specific nitrogen managemnet on grain yield and quality of rice and their physoilogical mechanism[D]. Yangzhou ;Yangzhou University,2007(in Chinese with English abstract).

[8] 吴敏芳,郭梁,王晨,等.不同施肥方式对稻鱼系统水稻产量和养分动态的影响[J].浙江农业科学, 2016,57(8):1170-1173. WU M F,GUO L,WANG C,et al. Effects of different fertilizer modes on rice yield and nutrient dynamics in rice and fish system[J]. Zhejiang agricultural science,2016,57 (8):1170-1173(in Chinese).

[9] XIE J,WU X,TANG J J,et al. Conservation of traditional rice varieties in a globally important agricultural heritage system (GIAHS):rice-fish co-culture[J]. Agr Sci China,2011,10(5):754-761.

[10] ZHANG J,HU L,REN W,et al. Rice-soft shell turtle coculture effects on yield and its environment[J]. Agric Ecosyst Environ,2016,224:116-122.

[11] BATEMAN A S,KELLY S D,JICKELLS T D. Nitrogen isotope relationships between crops and fertilizer:implications for using nitrogen isotope analysis as an indicator of agricultural regime[J]. J Agr Food Chem,2005,53(14):5760-5765.

[12] 杨勇.稻渔共作生态特征与安全优质高效生产技术研究[D]. 扬州:扬州大学,2004. YANG Y. Study on ecological charactristic and technique for safe,good quality and high benifit of rice-fish culture[D]. Yangzhou:Yangzhou University,2004(in Chinese with English abstract).

[13] 宋维周，刘仁旺，江颂颂，等.节水抗旱稻与高产水稻不同叶位光合特征对土壤水分变化的响应[J].华中农业大学学报，2019，38(2)：45-54. SONG W Z，LIU R W，JIANG S S，et al. Responses of photosynthetic characteristics of different leaf positions in water-saving drought-tolerant rice and high-yield rice to soil moisture change[J]. Journal of Huazhong Agricultural University，2019，38(2)：45-54 (in Chinese with English abstract).

[14] FENG J，LI F，ZHOU X，et al. Nutrient removal ability and economical benefit of a rice-fish co-culture system in aquaculture pond[J]. Ecol Eng，2016，94：315-319.

[15] 陈永杰，郑立魁，杨小根.旱地小麦麦秸覆盖量试验[J].山西农业科学，1992 (2)：16-17.CHEN Y J，ZHENG L K，YANG X G. Study on the coverage of wheat straw in dry land[J]. Shanxi agricultural science，1992(2)：16-17 (in Chinese).

[16] 陆斌，李涛，丁兆禄，等.稻草还田技术[J].垦殖与稻作，2004 (S1)：74-76. LU B，LI T，DING Z L，et al. Straw-to-field technology[J]. Reclamation and rice，2004 (S1)：74-76 (in Chinese).

[17] 程励励，文启孝，李洪.稻草还田对土壤氮素和水稻产量的影响[J].土壤，1992，24(5)：234-238. CHENG L L，WEN Q X，LI H. Effects of straw returning to soil nitrogen and the yield of rice[J]. Soil，1992，24 (5)：234-238(in Chinese).

[18] 李军，郭贵东，何敏，等.不同秸秆还田量对水稻产量的影响[J].现代农业科技，2013 (2)：27. LI J，GUO G D，HE M，et al. The effect of different straw-returning amount on the yield of rice [J]. Modern agriculture science and technology，2013 (2)：27 (in Chinese).

[19] 韩新忠，朱利群，杨敏芳，等.不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J].农业环境科学学报，2012，31(11)：2192-2199. HAN X Z，ZHU L Q，YANG M F，et al. Effects of different amount of wheat straw returning on rice growth，soil microbial biomass and enzyme activity[J]. Journal of agro-environment science，2012，31(11)：2192-2199 (in Chinese with English abstract).

[20] 孙旭生，林琪，赵长星，等.施氮量对超高产冬小麦灌浆期旗叶光响应曲线的影响[J].生态学报，2009，29(3)：1428-1437. SUN X S，LIN Q，ZHAO C X，et al. Effects of nitrogen application rate on light-response curves of flag leaves in super-high yielding winter wheat at grain filling stage[J]. Acta ecologica sinica，2009，29(3)：1428-1437(in Chinese with English abstract).

[21] 彭英湘，王凯荣，彭娜，等.不同灌溉条件下稻草还田对土壤供氮特征及水稻产量的影响[J].中国生态农业学报，2007，15(5)：30-33. PENG Y X，WANG K R，PENG N，et al. Effects of incorporating rice straw into the soil on soil nitrogen supply and rice yield under different irrigation systems[J]. Chinese journal of eco-agriculture，2007，15(5)：30-33(in Chinese with English abstract).

[22] 许有尊.秸秆还田及有机肥对水稻生长和氮肥利用率影响的研究[D].武汉：华中农业大学，2009. XU Y Z. Studies on effects of residue retain and organic fertilizer on rice growth and nitrogen use efficency[D].Wuhan：Huazhong Agricutural University，2009(in Chinese with English abstract).

[23] 徐国伟，吴长付，刘辉，等.麦秸还田及氮肥管理技术对水稻产量的影响[J].作物学报，2007，33(2)：284-291.XU G W，WU C F，LIU H，et al. Effects of wheat residue incorporation and nitrogen management techniques on formation of the grain yield of rice[J]. Acta agronomica sinica，2007，33(2)：284-291(in Chinese with English abstract).

[24] 刘迎新，王凯荣，谢小立，等.稻草覆盖对亚热带红壤旱坡地玉米旱期生长的生理调节作用及其产量效应[J].生态与农村环境学报，2007，23(4)：18-23. LIU Y X，WANG K R，XIE X L，et al. Effect of straw m ulching on physiological adjustm ent and output of maize grow ing on subtropical red soil slope land in dry season[J]. Journal of ecology and rural environment，2007，23(4)：18-23(in Chinese with English abstract).

[25] 张武益，朱利群，王伟，等.不同灌溉方式和秸秆还田对水稻生长的影响[J].作物杂志，2014(2)：113-118. ZHANG W Y，ZHU L Q，WANG W，et al. Effect of wheat straw returning under different irrigation methods on rice growth[J]. Crops，2014 (2)：113-118(in Chinese with English abstract).

[26] 宇万太，张璐，殷秀岩，等.下辽河平原农业生态系统不同施肥制度的土壤养分收支[J].应用生态学报，2002，13(12)：1571-1574. YU W T，ZHANG L，YIN X Y，et al. Effect of different fertilization system on soil nutrient budget[J].Chinese journal of applied ecology，2002，13(12)：1571-1574(in Chinese with English abstract).

[27] 张珍，王依明.秸秆还田量对水稻产量的影响初报[J].上海农业科技，2013(1)：101. ZHANG Z，WANG Y M. A preliminary report on the effect of straw returning to field on rice yield [J]. Shanghai agricultural science and technology，2013 (1)：101(in Chinese).

[28] 罗德明.水稻田施用合缘秸秆腐熟剂的效果[J].农技服务，2012 (3)：287-288. LUO D M. Effects of applying straw-decomposing inoculant in paddy field [J].Agricultural technology service，2012 (3)：287-288(in Chinese).

[29] 王允青，王静，郭熙盛，等.不同水分条件下连续多年秸秆还田对水稻、油菜产量的影响[J].安徽农业科学，2009，37(24)：11464-11465. WANG Y Q，WANG J，GUO X S，et al. Effects of straw returning for successive years on yields of rice and rapeunder different water condition[J]. Journal of Anhui agricultral sciences，2009，37(24)：11464-11465(in Chinese with English abstract).

Effects of straw returning and crayfish feeding on rice growth and nutrient uptake in rice-crayfish ecosystem

LI Lina[1], YAN Linlin[1], CAO Cougui[1,2], JIANG Yang[1], WANG Jinping[1]

1. *Shuangshui Shuanglü Institute/College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*;

2. *Hubei Collaborative Innovation Center for Grain Industry, Jingzhou* 434025, *China*

Abstract In order to explore characteristics of rice growth and development, photosynthetic change rules and nitrogen nutrient absorption in the rice-crayfish system under different straw returning and feeding treatment, 7 200 kg/hm^2 straw returning amount and no feeding (NS+NF, CK) and treatments of 12 200 kg/hm^2 straw returning amount (S) and 1 600 kg/hm^2 feeding amount (F) was used to study changes of characteristics of rice growth and development, leaf photosynthetic, population canopy structure, nitrogen utilization efficiency and yield at middle and late growth stage of rice. The results showed that S+F significantly increased the yield, and the number of effective panicle, the seed-setting rate and the number of grains per tassel. The nitrogen content in rice mature plants was also significantly increased. The actual yield of NS+F treatment was 9.34 t/hm^2, being the highest and 3.43%-11.72% higher than that of other treatment. S treatment was mainly effective in the late growth stage of rice, which delayed the senescence of rice leaves and reduced the decrease of the intensity of root wound flow in the mature stage. F treatment increased the tiller number of rice, promoted tiller stability, significantly reduced the transpiration rate of rice, and increased the accumulation of dry matter in the mature stage of rice. NS treatment significantly increased the photosynthetic rate and transpiration rate of rice. Straw returning to the field and feeding treatment has its own advantages. In farming practice, when the amount of straw returned to the field is relatively large, appropriate feeding can supplement nitrogen for microbial decomposition of straw and plant growth.

Keywords rice-crayfish co-culture; intergated farming of planting and breeding in paddy field; ecological agriculture; straw returning; feeding; photosynthetic characteristics; nitrogen nutrient absorption; green planting and breeding; green production techniques

(责任编辑:张志钰)