

才硕,时红,潘晓华,等.绿肥与稻草联合还田对机插双季稻生长和产量的影响[J].江西农业大学学报,2019,41(4):631-640.



绿肥与稻草联合还田对机插双季稻 生长和产量的影响

才 硕^{1,2},时 红^{1,3*},潘晓华^{2*},徐 涛¹,谢亨旺¹,刘方平¹,曹 娜¹

(1.江西省灌溉试验中心站 江西省高效节水与面源污染防治重点实验室,江西 南昌 330201;2.江西农业大学 双季稻现代化生产协同创新中心/作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室/江西省作物生理生态与遗传育种重点实验室,江西 南昌 330045;3.东华理工大学,江西 南昌 330013)

摘要:为明确绿肥与稻草联合还田对机插双季稻生长发育和产量的影响及其机理,以中嘉早17和H优518为试验品种,于2013—2014年进行了不施肥(CK)、不施肥+绿肥还田+稻草还田(CK+GM+RS)、单施化肥(NPK)、化肥+绿肥还田+稻草还田(NPK+GM+RS)机插双季稻大田试验。结果表明,不论CK还是NPK模式下,GM+RS处理均能够促进水稻生长,显著提高机插双季稻的产量;与NPK相比,NPK+GM+RS处理显著增加了早、晚稻的有效穗(增幅1.75%和1.51%)、每穗粒数(增幅1.82%和1.46%)和产量(增幅5.39%和2.56%),显著增加了成穗率(增幅10.44%和2.07%)、总干物质质量(增幅5.69%和7.01%)、成熟期叶面积指数(增幅5.10%和7.10%)以及抽穗至成熟期群体生长率(增幅5.21%和4.51%)。综上所述,绿肥与稻草联合还田能够促进机插水稻生长前期分蘖早发,改善生长中后期群体质量,最终显著提高机插双季稻产量。

关键词:绿肥;稻草;机插双季稻;生长特性;产量

中图分类号:S511.4+20.62 文献标志码:A 文章编号:1000-2286(2019)04-0631-10

Influence of the Combination of Returning Green Manure Cultivation and Rice Straw on The Growth and Yield Formation of Machine-transplanted Early-late Season Double-cropping Rice

CAI Shuo^{1,2}, SHI Hong^{1,3*}, PAN Xiao-hua^{2*}, XU Tao¹,
XIE Heng-wang¹, LIU Fangping¹, CAO Na¹

(1.Jiangxi Key Laboratory of Agricultural Efficient Water-Saving and Non-Point Source Pollution Preventing, Jiangxi Central Station of Irrigation Experiment, Nanchang 330201, China; 2.Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice, Jiangxi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education/Jiangxi Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Nanchang 330045, China; 3.East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

收稿日期:2019-03-14 修回日期:2019-04-11

基金项目:国家“十二五”科技支撑计划(2013BAD07B12)、长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2016400/KY)和江西水利科技项目(KT201430,KT201502,KT201630)

Project supported by “Twelfth Five-Year” National Science and Technology Support Plan (2013BAD07B12), CRSRI Open Research Program (CKWV2016400/KY) and Projects of Water Science and Technology of Jiangxi Province (KT201430,KT201502,KT201630)

作者简介:才硕(1982—),男,副研究员,博士生,主要从事作物高产理论与节水灌溉技术研究,orcid.org/0000-0001-8384-998X,caishuo0911@163.com;*通信作者:时红,女,高级工程师,orcid.org/0000-0001-8412-4825,8659979@163.com;潘晓华,教授,博导,xhuapan@163.com。

Abstract: In order to clarify the combined application of green manure cultivation and rice straw on the growth and yield formation of machine-transplanted double-season rice taking Zhongjiazao 17 and Hyou 518 as the experimental materials, an experiment was carried out during 2013—2014 with 4 treatments of different cultivation practices namely, (i) CK, no fertilizer; (ii) CK+GM+RS, no fertilizer with green manure cultivation and rice straw return; (iii) NPK, single fertilizer, (iv) NPK+GM+RS, fertilizer with green manure cultivation and rice straw return. The results showed that compared with CK and NPK, the treatment of GM+RS could promote rice growth and significantly increase yield of machine-transplanted double-season rice. Compared to NPK, the treatment of NPK+GM+RS also significantly increased paniclees number, grains per panicle, yield, ratio of productive tillers to total tillers, total of dry matter accumulation, *LAI* and *CGR* of MS in early and late rice by 1.75% and 1.51%, 1.82% and 1.46%, 5.39% and 2.56%, 10.38% and 2.08%, 5.69% and 7.01%, 5.10% and 7.10%, 5.21% and 4.51%, respectively. Therefore, the combined application of green manure cultivation and rice straw return could promote the early tillers during the early growth stage, and improve population quality in the middle and late growth stages of rice and so that the yield of machine-transplanted double-season rice could be significantly increased.

Keywords: green manure; rice straw; machine-transplanted double-season rice; growth characteristics; yield

双季稻是我国南方地区主要的农业生产模式,其种植面积和产量在促进国民经济发展和保障粮食安全中具有重要地位。近年来,随着社会经济发展,大量农村劳动力向城市转移,农业种植人口老龄化日趋严重,致使双季稻种植面积逐年减少,水稻水肥管理愈加粗放,稻田土壤生产力持续下降,土壤养分流失和环境污染日渐加重。冬种绿肥和稻草还田是我国南方稻田维持地力和减少无机化肥投入的有效措施。研究表明,绿肥和稻草还田均能够增加作物产量、改善土壤质量、提高土壤肥力^[1-2]。绿肥通过固氮根瘤菌及根系分泌酸性物质提高土壤矿质养分活性^[3-4],稻草则通过还田腐解方式归还养分和减少土壤吸附来提高矿质养分的生物有效性^[5-6]。绿肥和稻草联合还田则具有互补作用,能够产生更好的培肥效果和栽培效应^[7-8]。

当前,水稻全程机械化生产是应对劳动力紧缺、稳定双季稻种植的有效途径^[9]。水稻全程机械化的关键在于机械化插秧,机插水稻高产栽培配套技术已成为水稻栽培研究的热点,前人在机插水稻秧育秧技术^[10-11]、群体生长发育^[12-13]、养分吸收^[14]等方面做了大量研究,但以绿肥还田或稻草还田为研究基础的相对较少,特别是二者联合还田对机插双季稻影响的研究鲜有报道。因此,通过田间大区试验,探究绿肥与稻草联合还田对机插双季稻生长发育和产量的影响,以期绿肥、稻草的合理利用与机插水稻生产的可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2013—2014年在江西省灌溉试验中心站试验研究基地(东经115°58',北纬28°26')进行。该地区位于鄱阳湖流域,属于典型的亚热带湿润季风性气候,气候温和,雨量充沛,多年(1978—2016年)平均气温为17.7℃,平均降雨量为1528.1mm。试验地土壤为冲积性黄泥土,试验前供试土壤(0~20cm)的基本理化性状为土壤容重1.213g/cm³,pH5.47,有机质23.61g/kg,全氮1.41g/kg,全磷0.36g/kg,碱解氮92.28mg/kg,速效磷3.47mg/kg,速效钾167.48mg/kg。

1.2 试验设计

试验设置4个处理:①对照(CK):冬闲,机械收获后稻草秸秆全部移出田间不还田,不施化肥;②不施化肥+绿肥还田+稻草还田(CK+GM+RS):冬种紫云英,早、晚稻收获后稻草秸秆粉碎全量还田,不施化肥;③单施化肥(NPK):冬闲,机械收获后稻草秸秆全部移出田间不还田,化肥氮磷钾配施;④化肥+绿肥还田+稻草还田(NPK+GM+RS):冬种紫云英,早、晚稻收获后稻草秸秆粉碎全量还田,化肥氮磷钾用量及

其运筹方式与处理③相同。试验采用大区试验,小区面积200 m²,不设重复,但设3次取样重复。化肥氮磷钾用量和施用方式采用双季稻优化施肥模式^[15],即单季施纯氮180 kg/hm²,按*m*(基肥):*m*(分蘖肥):*m*(穗肥)=5:3:2施用;磷肥(P₂O₅)用量为67.5 kg/hm²,做基肥一次性施用;钾肥(K₂O)用量为150 kg/hm²,按*m*(基肥):*m*(穗肥)=9:11施用。

处理②和④种植紫云英品种为“余江大叶”,于2013年9月30日按照30 kg/hm²的播种量均匀撒于稻田,2014年4月2日将紫云英鲜草翻耕入田,翻耕时实测2处理的紫云英鲜草产量分别为(32.25±1.77) t/hm²和(33.80±2.83) t/hm²,鲜草中平均干物质含量为9.50%,平均养分含量为氮3.33%、磷0.20%、钾3.78%;处理②和④的稻草还田量基本保持一致,于早、晚稻机械收获的同时将稻草切碎还田,人工将其播撒均匀,待后季耕作时用拖拉机旋耕入土。收割时实测2处理早、晚稻稻草干物重分别为5.92 t/hm²和6.19 t/hm²,平均养分含量为碳38.75%和39.91%、氮0.72%和0.75%、磷0.09%和0.11%、钾2.02%和2.05%。

早、晚稻均使用富来威2Z-455型水稻插秧机插秧,栽插密度为30 cm和23.8 cm宽窄行距,株距控制在13.3 cm。早、晚稻供试品种分别为中嘉早17和H优518,早稻于3月24日播种,4月17日机械插秧,7月11日收割测产;晚稻于6月28日播种,7月20日机械插秧,10月20日收割测产。各处理除还田方式和施肥不同外,其他管理措施保持一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生育期 记载主要生育时期:移栽期(transplanting stage, TS)、分蘖初期(early tillering stage, ETS)、幼穗分化期(panicle initiation stage, PIS)、抽穗期(heading stage, HS)和成熟期(mature stage, MS)。其中,移栽期-幼穗分化期为生育前期,幼穗分化期-抽穗期为生育中期,抽穗期-成熟期为生育后期。

1.3.2 茎蘖动态 在各试验小区中,定点20蔸作为1个观察点,每个小区选取3个观察点作为重复。机插秧后每5~7 d调查1次茎蘖数,至茎蘖数稳定为止。

1.3.3 干物质、群体生长率及叶面积指数 分别于移栽期、分蘖初期、幼穗分化期、抽穗期和成熟期各处理分别取样5蔸,将根剪除后按茎、叶、穗分开包扎,在105 ℃下杀青30 min,80 ℃烘至恒质量,冷却后称量干物质重。根据干物质积累量计算群体生长率(crop growth rate, CGR),同时按照小叶干重法计算叶面积指数(leaf area index, LAI)。

1.3.4 产量及其构成因素 成熟期采用五点法每小区考查120蔸,计算有效穗数;并根据平均有效穗数取5蔸进行考种,考察穗粒数、结实率、千粒质量;另外每个处理随机选取3点,每点割6 m²测定实际产量。

1.3.5 有关指标的计算方法 成穗率=有效穗数/高峰茎蘖数×100% (1)

$$CGR = \frac{W_2 - W_1}{T_2 - T_1} \quad (2)$$

式(2)中,CGR为作物生长率(g/m²·d);W₁和W₂为前后2次测定的干物质量(t/hm²);T₁和T₂为前后2次测定的时间(d)。

1.4 统计分析

采用Excel软件处理数据与制图,运用SPSS 17.0软件对数据进行统计检验和方差分析。同一年份不同处理之间的多重比较采用最小显著性检验(Duncan)法,以不同小写字母表示达到P<0.05显著差异水平。表中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 绿肥与稻草联合还田对双季机插稻分蘖成穗的影响

水稻分蘖消长动态是水稻群体与个体发育的一个重要指标。双季机插稻茎蘖动态调查结果(图1)表明,机插早、晚稻各处理的茎蘖数总体呈现先上升后下降的变化趋势。机插早、晚稻各处理的单蔸茎蘖数在不同生育时期内的变化一致,由多到少均表现为NPK+GM+RS、NPK、CK+GM+RS和CK。早稻NPK、CK+GM+RS、CK处理的茎蘖数在机插后第15天开始出现差异,并在第43天达到最大,而NPK+

GM+RS处理分蘖明显增加和达到高峰的时间提前分别5 d,即插秧后第10天和38天;晚稻分蘖明显增加和达到高峰的时间分别为栽后第10天和42天。早、晚稻NPK+GM+RS处理的高峰茎蘖数较NPK处理分别增加1.08个/蔸和2.53个/蔸,CK+GM+RS处理较CK处理平分别增加1.32个/蔸和1.72个/蔸。可见,绿肥与稻草联合还田能够增加机插早、晚稻的高峰茎蘖数,配施常规化肥则有利于促进机插早稻分蘖早发。

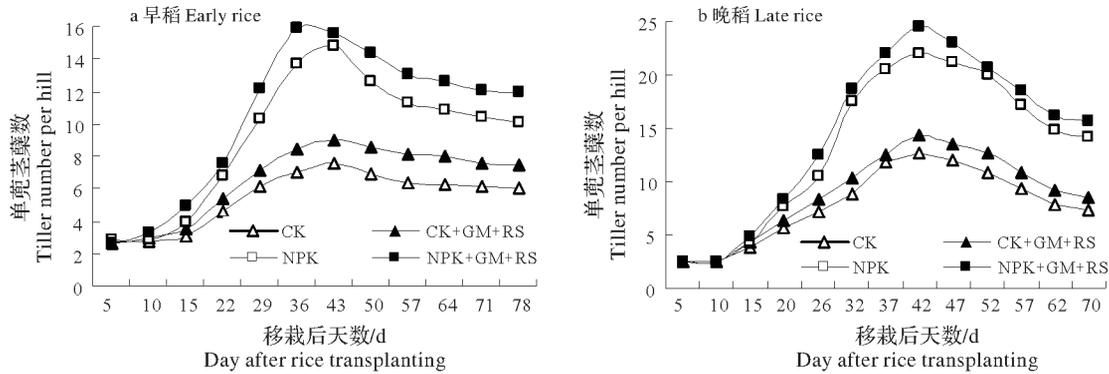


图1 绿肥与稻草还田对双季稻茎蘖动态的影响

Fig.1 Dynamics of double rice tillers number under green manure cultivation and rice straw retention treatments

绿肥与稻草联合还田促进了机插早、晚稻分蘖与成穗(表1),相比CK处理,早稻CK+GM+RS处理的高峰茎蘖数、有效茎蘖数、分蘖增长率、成穗率分别增加17.35%、24.04%、21.43%、5.70%,晚稻分别增加13.70%、18.13%、17.24%、3.90%,且处理间差异均达到显著水平;与NPK处理相比,早、晚稻NPK+GM+RS处理的高峰茎蘖数、有效茎蘖数、分蘖增长率、成穗率均显著提高,早稻分别增加7.18%、18.37%、11.76%、10.44%,晚稻分别增加11.62%、13.92%、12.50%、2.07%。与CK处理和NPK处理相比,早稻CK+GM+RS处理和NPK+GM+RS的分蘖下降率均有所降低,晚稻则显著提高。

表1 绿肥与稻草还田对双季稻分蘖成穗的影响

Tab.1 Effects of green manure cultivation and rice straw retention on tiller-earring of double rice

季别 Year	处理 Treatment	单株高峰茎蘖数 Number of peak tillers per plant	单株有效茎蘖数 Number of effective tillers per plant	分蘖增长率 Increase rate of tillering per day	分蘖下降率 Decrease rate of tillering per day	成穗率/% Ratio of productive tillers to total tillers
早稻 Early rice	CK	7.61 ± 0.05 ^d	5.99 ± 0.16 ^d	0.14 ± 0 ^d	0.05 ± 0.01 ^c	78.71 ± 1.54 ^b
	CK+GM+RS	8.93 ± 0.23 ^c	7.43 ± 0.06 ^c	0.17 ± 0.01 ^c	0.04 ± 0.01 ^c	83.20 ± 2.51 ^a
	NPK	14.77 ± 0.25 ^b	10.07 ± 0.12 ^b	0.34 ± 0.01 ^b	0.13 ± 0.01 ^a	68.18 ± 1.31 ^d
	NPK+GM+RS	15.83 ± 0.29 ^a	11.92 ± 0.14 ^a	0.38 ± 0.01 ^a	0.11 ± 0 ^b	75.30 ± 0.47 ^c
晚稻 Late rice	CK	12.63 ± 0.22 ^d	7.28 ± 0.19 ^d	0.29 ± 0.01 ^d	0.13 ± 0.01 ^d	57.64 ± 1.75 ^d
	CK+GM+RS	14.36 ± 0.06 ^c	8.60 ± 0.10 ^c	0.34 ± 0 ^c	0.14 ± 0.01 ^c	59.89 ± 3.91 ^c
	NPK	22.04 ± 0.23 ^b	13.86 ± 0.12 ^b	0.56 ± 0.01 ^b	0.21 ± 0.01 ^b	62.89 ± 2.21 ^b
	NPK+GM+RS	24.60 ± 0.19 ^a	15.79 ± 0.21 ^a	0.63 ± 0.01 ^a	0.22 ± 0 ^a	64.19 ± 3.08 ^a

2.2 绿肥与稻草联合还田对双季机插稻叶面积指数(LAI)的影响

叶面积指数(LAI)是研究水稻群体产量形成的一个重要指标,能够表征个体和群体的生长状况以及光能利用率情况。从图2可以看出,早、晚稻各处理叶面积指数动态变化趋势基本一致,均随生育进程的推进而呈现出先上升后下降的变化趋势,在抽穗期达到最大值时,早、晚稻CK+GM+RS处理(最大LAI为2.53和3.91)较CK处理分别增加8.48%和7.76%,NPK+GM+RS处理(最大LAI为5.88和6.67)较NPK处理分别增加7.20%和8.58%。早、晚稻各处理的叶面积指数在各个生育时期均表现为NPK+GM+RS>NPK>CK+GM+RS>CK,在成熟期,早、晚稻CK+GM+RS处理的LAI分别为1.27和2.90,较CK处理分别增加9.25%和7.54%;NPK+GM+RS处理的LAI为3.92和4.07,较NPK处理分别增加5.10%和7.10%。

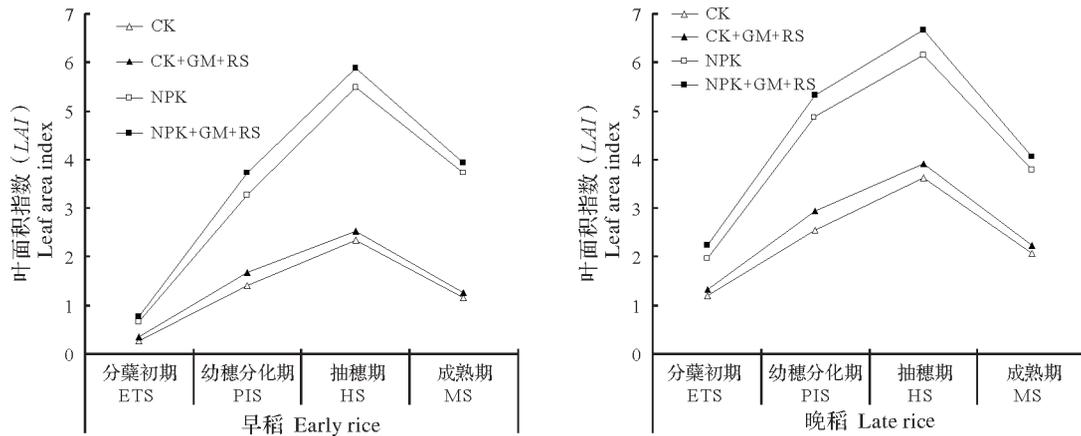


图2 绿肥与稻草还田对双季稻叶面积指数(LAI)的影响

Fig.2 Effects of green manure cultivation and rice straw retention on leaf area index(LAI)of double rice

2.3 绿肥与稻草联合还田对双季机插稻干物质积累的影响

绿肥与稻草联合还田对机插双季稻干物质积累产生一定影响(表2),早、晚稻各处理总干物质量由大到小均表现为NPK+GM+RS、NPK、CK+GM+RS和CK,且不同处理间差异均达到显著水平。较CK处理相比,早、晚稻CK+GM+RS处理的总干物质量分别增加0.64 t/hm²和0.82 t/hm²,增幅分别为10.05%和10.83%;较NPK处理相比,早、晚稻NPK+GM+RS处理的总干物质量分别增加0.79 t/hm²和1.01 t/hm²,增幅分别为5.69%和7.01%。

绿肥与稻草联合还田能够显著提高早、晚稻各生育阶段的干物质积累量,不同处理由大到小顺序依次为NPK+GM+RS、NPK、CK+GM+RS和CK。早、晚稻生长前期(移栽-幼穗分化期)和中期(幼穗分化期-抽穗期)干物质积累量占总干物质量的比例均表现为CK+GM+RS>CK、NPK+GM+RS>NPK,而生育后期(抽穗期-成熟期)则表现为CK>CK+GM+RS、NPK>NPK+GM+RS。早、晚稻各生育阶段干物质积累量主要集中在生育后期,其积累量占总干物质量的比例分别为44.37%~48.45%和34.52%~39.37%。

表2 双季机插稻不同时期干物质积累量与比例

Tab.2 The amount and proportion of dry matter accumulation in different periods of double cropping rice under machine-transplanted

季别 Year	处理 Treatment	总干物质量/ (t·hm ⁻²) Total weight	移栽-幼穗分化期 TS-PIS		幼穗分化期-抽穗期 PIS-HS		抽穗期-成熟期 HS-MS	
			积累量/ (t·hm ⁻²) Biomass	比例/% Ratio	积累量/ (t·hm ⁻²) Biomass	比例/% Ratio	积累量/ (t·hm ⁻²) Biomass	比例/% Ratio
早稻 Early rice	CK	6.37 ± 1.05 ^d	1.69 ± 0.02 ^d	26.53	1.75 ± 0.02 ^d	27.47	2.92 ± 0.02 ^d	45.84
	CK+GM+RS	7.01 ± 0.93 ^c	1.89 ± 0.03 ^c	26.96	2.01 ± 0.03 ^c	28.67	3.11 ± 0.06 ^c	44.37
	NPK	13.89 ± 1.06 ^b	3.29 ± 0.01 ^b	23.69	3.87 ± 0.02 ^b	27.86	6.73 ± 0.42 ^b	48.45
	NPK+GM+RS	14.68 ± 0.16 ^a	3.49 ± 0.04 ^a	23.77	4.11 ± 0.05 ^a	28.00	7.08 ± 0.98 ^a	48.23
晚稻 Late rice	CK	7.57 ± 0.27 ^d	1.87 ± 0.07 ^d	24.70	2.73 ± 0.09 ^d	36.06	2.98 ± 0.11 ^d	39.37
	CK+GM+RS	8.39 ± 0.85 ^c	2.09 ± 0.04 ^c	24.91	3.09 ± 0.06 ^c	36.83	3.21 ± 0.06 ^c	38.26
	NPK	14.40 ± 1.41 ^b	3.99 ± 0.11 ^b	27.71	5.32 ± 0.15 ^b	36.94	5.09 ± 0.14 ^b	35.35
	NPK+GM+RS	15.41 ± 1.14 ^a	4.31 ± 0.04 ^a	27.97	5.78 ± 0.05 ^a	37.51	5.32 ± 0.35 ^a	34.52

2.4 绿肥与稻草联合还田对机插双季稻群体生长率(CGR)的影响

群体生长率(CGR)体现了水稻干物质质量的累积速率,是衡量水稻群体质量的重要指标^[16]。由图3进一步分析可知,机插早稻生育前期由于低温影响而生长较慢,生育中、后期生长明显加快,并在生育后期达到最大,且不同处理最大群体生长率分别为23.61 g/(m²·d)(NPK+GM+RS)、22.44 g/(m²·d)(NPK)、

10.37 g/(m²·d)(CK+GM+RS)、9.74 g/(m²·d)(CK);机插晚稻则以生育中期生长最快,不同处理群体生长率分别为 22.25 g/(m²·d)(NPK+GM+RS)、20.49 g/(m²·d)(NPK)、11.89 g/(m²·d)(CK+GM+RS)、10.49 g/(m²·d)(CK)。机插早、晚稻各生育阶段不同处理的群体生长率由大到小均表现为 NPK+GM+RS、NPK、CK+GM+RS 和 CK,且不同处理间差异均达到显著水平。在无肥条件下,机插早、晚稻 GM+RS 处理前、中、后期群体生长率分别增加 0.56, 1.28, 0.63 g/(m²·d) 和 0.73, 1.40, 0.61 g/(m²·d),增幅分别为 11.57%、14.60%、6.47% 和 11.72%、13.35%、7.57%;在单施化肥条件下,机插早、晚稻 GM+RS 处理前、中、后期群体生长率分别增加 0.55, 1.25, 1.17 g/(m²·d) 和 1.06, 1.76, 0.62 g/(m²·d),增幅分别为 5.84%、6.46%、5.21% 和 7.96%、8.59%、4.51%。

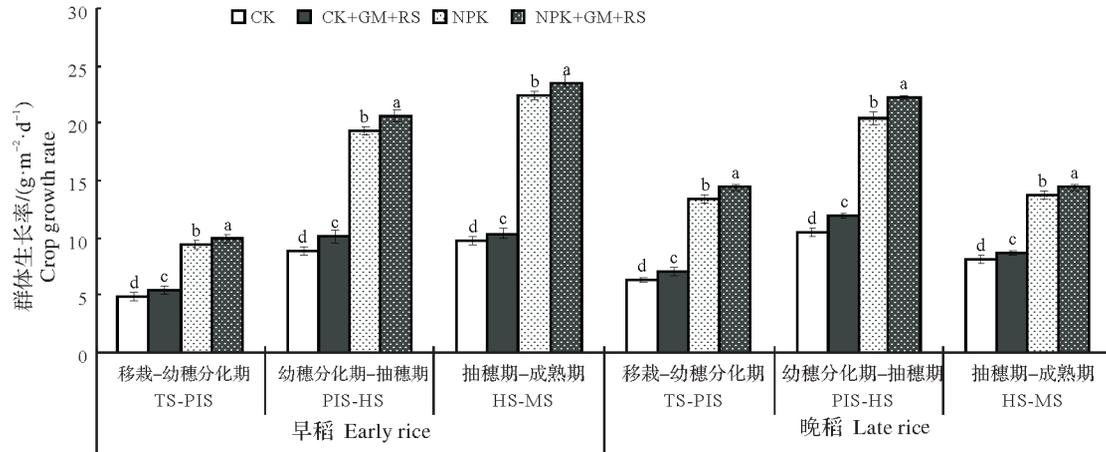


图3 绿肥与稻草还田对双季稻群体生长率的影响

Fig.3 Effects of green manure cultivation and rice straw retention on crop growth rate (CGR) of double rice

2.5 绿肥与稻草联合还田对双季机插稻产量及构成因子的影响

绿肥与稻草联合还田可以增加双季机插稻产量(表3),在不施用化肥条件下,早、晚稻 CK+GM+RS 处理较 CK 处理的产量分别增加 0.24 kg/hm² 和 0.29 kg/hm²,分别提高 8.57% 和 6.71%;在单施化肥条件下,早、晚稻 NPK+GM+RS 处理较 NPK 处理的产量分别增加 0.44 kg/hm² 和 0.22 kg/hm²,分别提高 5.39% 和 2.56%;方差分析表明,早、晚稻各处理间产量差异均达到显著水平。

表3 绿肥与稻草联合还田对机插双季稻产量及产量构成因素的影响

Tab.3 Effects of combination of green manure cultivation and rice straw retention on grain yield and components of double rice under machine-transplanted

季别 Year	处理 Treatment	有效穗/(10 ⁴ ·hm ⁻²) Paniclees number	每穗粒数 Grains per panicle	结实率/% Seed-setting rate	千粒质量/g 1 000-grain weight	产量/(t·hm ⁻²) Yield
早稻 Early rice	CK	128.32 ± 7.99 ^d	93.33 ± 4.33 ^c	93.57 ± 0.91 ^b	28.07 ± 0.19 ^{ab}	2.80 ± 0.24 ^d
	CK+GM+RS	139.63 ± 2.42 ^c	102.33 ± 4.26 ^b	94.52 ± 0.32 ^a	28.30 ± 0.42 ^a	3.04 ± 0.13 ^c
	NPK	232.43 ± 4.02 ^b	139.72 ± 1.85 ^a	91.51 ± 0.38 ^d	27.71 ± 0.17 ^b	8.17 ± 0.04 ^b
	NPK+GM+RS	236.50 ± 2.59 ^a	142.26 ± 3.30 ^a	92.45 ± 0.66 ^c	27.91 ± 0.12 ^{ab}	8.61 ± 0.15 ^a
晚稻 Late rice	CK	185.64 ± 5.74 ^d	99.25 ± 3.65 ^c	92.44 ± 0.92 ^a	27.42 ± 0.82 ^{ab}	4.32 ± 0.15 ^d
	CK+GM+RS	193.62 ± 1.14 ^c	103.38 ± 4.86 ^b	93.45 ± 0.73 ^a	27.46 ± 0.15 ^a	4.61 ± 0.15 ^c
	NPK	311.42 ± 6.70 ^b	115.17 ± 1.62 ^a	88.08 ± 1.46 ^c	27.24 ± 0.96 ^c	8.61 ± 0.56 ^b
	NPK+GM+RS	316.12 ± 8.75 ^a	116.85 ± 3.11 ^a	90.71 ± 1.31 ^b	27.38 ± 0.64 ^b	8.83 ± 0.11 ^a

产量构成因素分析结果(表3)表明,双季机插稻各处理单位面积有效穗数和每穗粒数由多到少均表现为 NPK+GM+RS、NPK、CK+GM+RS 和 CK,而结实率和千粒质量由大到小则表现为 CK+GM+RS、CK、NPK+GM+RS 和 NPK。与 CK 处理相比,CK+GM+RS 处理显著增加了早、晚稻有效穗数(增幅 8.81% 和 4.30%)、每穗粒数(增幅 9.64% 和 4.16%)和结实率(增幅 1.03% 和 1.09%),但千粒质量增加效果不显著(增幅 0.82% 和 0.15%);与 NPK 处理相比,早稻 NPK+GM+RS 处理的有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒

质量分别增加1.75%、1.82%、1.03%和0.72%,晚稻分别增加1.51%、1.46%、2.99%和0.51%,其中有效穗数、每穗粒数、结实率增加效果达到显著水平,千粒质量增加效果不显著。综合分析来看,CK+GM+RS处理和NPK+GM+RS处理显著增产的主要原因在于提高了有效穗和每穗粒数。

3 讨论

3.1 绿肥与稻草联合还田对双季机插稻分蘖早发的影响

促进分蘖成穗是水稻高产群体形成的基础。机插水稻采用密生生态条件下培育的中小苗移栽,秧苗期缩短,秧苗素质较差,根系严重缠绕,机械栽植植伤较重,导致移栽初期分蘖迟发、缓苗期延长,制约了机插水稻的生长发育。谢成林等^[17]研究认为,机插稻的缓苗期要比抛秧稻和手栽稻延长5 d,张洪程等^[9]研究认为机插稻栽后至恢复正常生长所经历得“滞长期”达7~10 d,必须通过合理有效的肥水管理手段来实现早发。另有研究表明,稻草还田也会增加水稻生育前期的抑制作用,这是由于具有较高C/N比的稻草还田易降低土壤氮的有效性,不利于作物吸氮^[18],同时,厌氧条件下秸秆可分解产生有机酸类物质抑制水稻幼苗生长^[18-19],导致水稻栽后发根迟,缓苗期长,影响前期分蘖的发生,这对机插水稻生育前期的抑制作用就更为突出。进一步的研究发现,在稻草还田的基础上配合紫云英还田能够提高了水稻生育前期土壤供氮能力,原因在于紫云英C/N比和木质素含量低,还田后腐解和养分释放较快,增加了土壤矿质氮含量^[4]和土壤微生物及酶的活性^[20],促进了稻草的分解及其养分的释放,有利于水稻生长前期养分吸收利用和分蘖早发,确保后期也能维持较高的供肥能力,为水稻后期的生长打好了丰产基础^[21]。本研究表明,绿肥与稻草联合还田提高了双季机插稻的茎蘖数和成穗率,在单施化肥的基础上,采用绿肥与稻草联合还田后早、晚稻成穗率分别提高10.38%和2.08%,早稻分蘖发生和达到高峰时间分别提前5 d。可见,绿肥和稻草联合还田配合施用常规化肥有利于双季机插稻分蘖成穗,尤其对促进机插早稻分蘖早发作用更为明显,说明绿肥和稻草联合还田不但可以改善单独稻草还田下水稻生长前期氮素供应,还能够推进机插水稻生长前期的生育进程。

3.2 绿肥与稻草联合还田对双季机插稻群体质量的影响

作物群体一直是农学家们注重研究的对象,提高作物群体质量是获取高产的首要前提。干物质积累、群体生长率、叶面积指数等均是评价水稻群体质量的主要指标。干物质积累是水稻产量形成的物质基础,合理的干物质积累与分配是形成水稻优质群体的重要保障。张洪程等^[9,22]认为,机插水稻超高产群体的物质生产应以前期稳定的生长量为基础,合理增加中期物质积累为重点,从而有效增强后期群体的物质生产。本研究表明,在早、晚稻各生育阶段,绿肥与稻草联合还田模式下的干物质积累量均显著高于无肥处理和单施化肥处理,且生育前期和中期的干物质分配比例明显提高,为生育后期向籽粒转运营养物质奠定了基础。其原因可能是,绿肥与稻草联合还田改善了土壤氮素供应过程,养分释放动态与作物营养特性一致,促进了养分的吸收利用,防止了水稻生长后期早衰,保证了后期光合产物的有效供给,从而提高了群体干物质积累量^[23-24]。水稻群体生长与叶面积指数密切相关,控制群体适宜叶面积指数及其到达的适宜时间,是水稻优质群体最重要的生理基础。张洪程等^[22]认为机插水稻超高产群体在抽穗期的有效叶面积指数和高效叶面积指数应达到7.22~7.43和5.86~6.06。在本研究中,早、晚稻不同生育时期的叶面积指数较高的处理均为绿肥和稻草联合还田配合常规施肥,其抽穗期LAI分别为5.88和6.67,成熟期LAI分别为3.92和4.07,这说明绿肥与稻草联合还田能够促进机插水稻在抽穗期形成高产水稻群体特征,并保证在成熟期仍具有较高的叶面积指数,有利于水稻后期光合产物的积累以及向籽粒的运输,成为机插双季稻增产的重要保证。大量研究表明^[9,22,25-26],高产水稻的物质生产优势表现在生育中期和后期具有较高的群体生长速率。本研究结果与上述研究报道不尽一致,机插早稻的群体生长速率在生育后期达到最大,而机插晚稻以生育中期的生长速率最大。在各生育时期,与无肥和单施化肥处理相比,绿肥与稻草联合还田均能显著提高双季机插稻的群体生长速率,且绿肥与稻草联合还田配施化肥处理较单施化肥处理分别增加5.84%、6.46%、5.21%和7.96%、8.59%、4.51%。因此,绿肥与稻草联合还田能够促进机插双季稻干物质积累与运输,增加叶面积指数,提高群体生长率,有利于机插水稻形成优质群体。

3.3 绿肥与稻草联合还田对双季机插稻产量的影响

已有研究表明,绿肥和稻草单独还田均可以有效提高水稻产量^[2,4,27],两者联合还田的增产效果更佳^[7-8],但对机插水稻产量的影响报道较少。本研究表明,绿肥与稻草联合还田配施化肥比单施化肥显著提高了机插早、晚稻产量,其中早稻和晚稻分别增加 5.39% 和 2.56%。产量与产量构成因素之间的相关分析表明,机插早、晚稻产量与有效穗数($r=0.998^{**}$ 和 $r=0.999^{**}$)和每穗粒数($r=0.993^{**}$ 和 $r=0.988^{*}$)呈显著或极显著正相关,说明绿肥与稻草联合还田增产的直接原因是单位面积的穗数和穗粒数的增加,而单位面积穗数的增加主要取决于机插水稻成穗率的提高。前人研究认为水稻产量与群体生长质量密切相关。张洪程等^[28]和郭长春等^[29]研究认为,高产水稻在于抽穗期构建优化的群体结构,并与抽穗后叶面积指数和群体生长率密切相关。凌启鸿等^[30]研究认为,水稻产量与成熟期干物质质量和抽穗至成熟期干物质积累量呈线性相关。本研究结果与以上研究报道不尽一致,在绿肥与稻草联合还田下,机插早、晚稻抽穗期叶面积指数($r=0.999^{**}$ 、 $r=0.994^{**}$)、成穗期叶面积指数($r=1.000^{**}$ 、 $r=0.997^{**}$)、生育中期干物质积累量($r=0.998^{**}$ 、 $r=0.995^{**}$)和群体生长速率($r=0.998^{**}$ 、 $r=0.995^{**}$)、生育后期干物质积累量($r=1.000^{**}$ 、 $r=0.997^{**}$)和群体生长速率($r=1.000^{**}$ 、 $r=0.999^{**}$)均与产量呈极显著正相关。因此,绿肥与稻草联合还田显著提高了机插水稻产量,其增产原因在于水稻群体质量的改善同时增加了单位面积的有效穗数和穗粒数。

4 结 论

绿肥与稻草联合还田对双季机插稻的群体生长发育和产量产生显著影响,主要表现在 3 个方面:1) 绿肥与稻草联合还田推进了机插水稻生长前期的生育进程,早稻分蘖发生和达到高峰时间可分别提前 5 d,这对解决机插水稻分蘖迟发、缓苗期延长的技术难点具有指导意义;2) 绿肥与稻草联合还田优化了机插双季稻群体质量,机插早、晚稻的群体茎蘖数、分蘖成穗率、叶面积指数、干物质积累以及群体生长率等群体质量指标均显著提高,这有利于机插水稻在生育中后期形成优质群体,为机插水稻获得高产奠定了基础;3) 绿肥与稻草联合还田显著提高了机插水稻产量,与单施化肥相比,机插早、晚稻产量分别增加 5.39% 和 2.56%,其增产的原因在于提高了单位面积的有效穗数和穗粒数。本研究结果是在无肥和常规施用化肥基础上得到的,而减量施肥条件下绿肥与稻草联合还田对双季机插稻生长发育、产量品质、水肥利用等方面的影响还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 兰延,黄国勤,杨滨娟,等.稻田绿肥轮作提高土壤养分增加有机碳库[J].农业工程学报,2014,30(13):146-152.
Lan Y, Huang G Q, Yang B J, et al. Effect of green manure rotation on soil fertility and organic carbon pool[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(13): 146-152.
- [2] 吴建富,曾研华,潘晓华,等.稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响[J].应用生态学报,2013,24(6):1572-1578.
Wu J F, Zeng Y H, Pan X H, et al. Effects of rice straw returning mode on rice grain yield and soil carbon pool management index in double rice-cropping system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(6): 1572-1578.
- [3] 兰忠明,林新坚,张伟光,等.缺磷对紫云英根系分泌物产生及难溶性磷活化的影响[J].中国农业科学,2012,45(8):1521-1531.
Lan Z M, Lin X J, Zhang W G, et al. Effect of P deficiency on the emergence of *Astragalus* L. root exudates and mobilization of sparingly soluble phosphorus[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1521-1531.
- [4] 高菊生,徐明岗,董春华,等.长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J].作物学报,2013,39(2):343-349.
Gao J S, Xu M G, Dong C H, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility [J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 343-349.
- [5] Li X Y, Wang Q F, Xu F L. Effect of returning application of straw on soil K, P, Zn adsorption-desorption and their availability[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2000, 19(3): 227-232.
- [6] Wu M N, Qin H L, Chen Z, et al. Effect of long-term fertilization on bacterial composition in rice paddy soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2011, 47(4): 397-405.

- [7] 田卡,张丽,钟旭华,等.稻草还田和冬种绿肥对华南双季稻产量及稻田CH₄排放的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(3):592-598.
Tian K,Zhang L,Zhong X H, et al.Effects of rice straw and winter green manure incorporations on grain yields and methane emissions of double-season rice(*Oryza sativa*) field in South China[J].Journal of Agro-Environment Science,2015,34(3):592-598.
- [8] 黄山,汤军,廖萍,等.冬种紫云英与稻草还田对双季水稻产量和土壤性状的互作效应[J].江西农业大学学报,2016,38(2):215-222.
Huang S,Tang J,Liao P, et al.Interaction of winter legume manure covering (*Astragalus sinicus* L.) and atraw retention on yield and soil properties in a double rice cropping system[J].Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2016,38(2):215-222.
- [9] 张洪程,龚金龙.中国水稻种植机械化高产农艺研究现状及发展探讨[J].中国农业科学,2014,47(7):1273-1289.
Zhang H C,Gong J L.Research status and development discussion on high-yielding agronomy of mechanized planting rice in China[J].Scientia Agricultura Sinica,2014,47(7):1273-1289.
- [10] 李旭毅,池忠志,姜心禄,等.农艺措施对成都平原两熟区机插超级稻长龄秧苗生长的影响[J].作物学报,2012,38(8):1544-1550.
Li X Y,Chi Z Z,Jiang X L, et al.Effects of agronomic measures on mechanical transplanting long-age seedlings of super rice in rapeseed (wheat)-rice planting area of Chengdu Basin[J].Acta Agron Sin,2012,38(8):1544-1550.
- [11] 张结刚,张美良,王璠,等.双季稻机插育秧床土选择试验[J].农业工程学报,2016,32(1):167-173.
Zhang J G,Zhang M L,Wang F, et al.Experiment on screening seedbed soils for mechanical transplanted double-cropping rice[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),2016,32(1):167-173.
- [12] 张军,王兴龙,石广跃,等.不同机栽方式下杂交稻产量及其形成特征比较[J].农业工程学报,2015,31(10):84-91.
Zhang J,Wang X L,Shi G Y, et al.Yield and its formation of hybrid rice under different mechanical transplanted methods [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),2015,31(10):84-91.
- [13] 于林惠,李刚华,徐晶晶,等.基于高产示范方的机插水稻群体特征研究[J].中国水稻科学,2012,26:451-456.
Yu L H,Li G H,Xu J J, et al.Population characteristics of machine-transplanted japonica rice based on high-yield demonstration fields[J].Chin J Rice Sci,2012,26:451-456.
- [14] 孙永健,郑洪帆,杨志远,等.机械旱直播方式对水稻氮磷钾吸收转运及分配的影响[J].农业工程学报,2017,33(3):73-80.
Sun Y J,Zheng H Z,Yang Z Y, et al.Effects of mechanical dry direct-sowing modes on absorption,translocation and distribution of nitrogen,phosphorus,and potassium in rice [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),2017,33(3):73-80.
- [15] Cai S,Shi H,Pan X H, et al.Integrating ecological restoration of agricultural non-point source pollution in Poyang Lake Basin in China[J].Water,2017,9,311.
- [16] 朱德泉,储婷婷,武立权,等.宽窄行配置对机插中晚稻生长特性及产量的影响[J].农业工程学报,2018,34(18):102-112.
Zhu D Q,Chu T T,Wu L Q, et al.Effects of spacing-adjustable wide-narrow row on growth characteristics and yield of machine-transplanted mid- and late- season rice[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE),2018,34(18):102-112.
- [17] 谢成林,张菊芳.不同稻作方式对淮稻13号生长发育及产量的影响[J].江苏农业科学,2011,39(4):64-67.
Xie C L,Zhang J F.The effect of different cultivation methods on growth and yield of Huaidao 13[J].Jiangsu Agricultural Sciences,2011,39(4):64-67.
- [18] Kumar K,Goh K M.Biological nitrogen fixation,accumulation of soil nitrogen and nitrogen balance for white clover (*Trifolium repens* L.) and field pea (*Pisum sativum* L.) grown for seed[J].Field Crops Research,2000,68(1):49-59.
- [19] 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 application in flooded soil[J].Acta Pedologica Sinica,2006,43(6):941-947.
- [20] Wang Y F,Liu X M,Butterly C, et al.pH change,carbon and nitrogen mineralization in paddy soils as affected by Chinese milk vetch addition and soil water regime[J].Journal of Soils and Sediments,2013,13(4):654-663.

- [21] 卢萍,杨林章,单玉华,等.绿肥和秸秆还田对稻田土壤供氮能力及产量的影响[J].土壤通报,2007,38(1):39-42.
Lu P, Yang L Z, Shan Y H, et al. Influence of returning green manure and wheat straw to paddy soils on soil available N content and rice yield[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(1): 39-42.
- [22] 张洪程,赵品恒,孙菊英,等.机插杂交粳稻超高产形成群体特征[J].农业工程学报,2012,28(2):39-44.
Zhang H C, Zhao P H, Sun J Y, et al. Population characteristics of super high yield formation of mechanical transplanted japonica hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(2): 39-44.
- [23] 陈丽楠,彭显龙,刘元英,等.养分管理对寒地水稻干物质积累及运转的影响[J].东北农业大学学报,2010,41(5):52-55.
Chen L N, Peng X L, Liu Y Y, et al. Effect of nutrient management on dry matter accumulation and translocation of rice in cold area[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(5): 52-55.
- [24] 董春华,高菊生,曾希柏,等.长期有机无机肥配施下红壤性稻田水稻产量及土壤有机碳变化特征[J].植物营养与肥料学报,2014,20(2):336-345.
Dong C H, Gao J S, Zeng X B, et al. Effects of long-term organic manure and inorganic fertilizer combined application on rice yield and soil organic carbon content in reddish paddy fields [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(2): 336-345.
- [25] 范淑秀,陈温福,王嘉宇.高产水稻品种干物质生产特性研究[J].辽宁农业科学,2005(3):6-8.
Fan S X, Chen W F, Wang J Y. Studies on production characters of dry matter in high-yield rice [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2005(3): 6-8.
- [26] 马群,杨雄,李敏,等.不同氮肥群体最高生产力水稻品种的物质生产积累[J].中国农业科学,2011,44(20):4159-4169.
Ma Q, Yang X, Li M, et al. Studies on the characteristics of dry matter production and accumulation of rice varieties with different productivity levels [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4159-4169.
- [27] 马艳芹,钱晨晨,邓丽萍,等.紫云英配施氮肥对双季稻产量、干物质量及氮素吸收利用的影响[J].核农学报,2017,31(12):2399-2407.
Ma Y Q, Qian C C, Deng L P, et al. Effects of combining chinese milk vetch with nitrogen fertilizer on grain and dry matter yield, nitrogen absorption and utilization of double-cropping rice [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2017, 31(12): 2399-2407.
- [28] 张洪程,李杰,戴其根,等.机插水稻“标秧、精插、稳发、早搁、优中、强后”高产栽培精确定量关键技术[J].中国稻米,2010,16(5):1-6.
Zhang H C, Li J, Dai Q G, et al. Key techniques of the model for precise quantitative high-yielding cultivation of machine-transplanting rice “standardizing seedlings, precisely transplanting, steadily growing, earlier drainage, optimizing middle-stage, strengthening Later-stage” [J]. China Rice, 2010, 16(5): 1-6.
- [29] 郭长春,孙知白,孙永健,等.优质丰产杂交籼稻品种机直播产量构成及其群体质量研究[J].中国水稻科学,2018,32(5):462-474.
Guo C C, Sun Z B, Sun Y J, et al. Study on yield formation and population quality of indica hybrid rice with good quality and high yield under mechanical direct seeding [J]. Chin J Rice Sci, 2018, 32(5): 462-474.
- [30] 凌启鸿,张洪程,丁艳峰.水稻丰产高效技术及理论[M].北京:中国农业出版社,2005:9-15.
Lin Q H, Zhang H C, Ding Y F. The technique and theory of high production and high benefit for rice [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 9-15.