

文章编号:1000-8551(2019)09-1856-09

秸秆还田与施氮量对喀斯特地区杂交籼稻干物质积累和产量的影响

苏卫¹ 冯跃华^{1,2,*} 许桂玲¹ 管正策¹ 欧达¹ 张佳凤¹ 王玲莉¹¹贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025; ²贵州大学 山地植物资源保护与种植创新教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要:为探明秸秆还田和施氮量对贵州省喀斯特地区杂交籼稻干物质积累和产量的影响,以内5优5399为试验材料,在不同秸秆处理和施氮量条件下,研究杂交籼稻的产量和干物质积累特性。结果表明,随着施氮量的增加,水稻的产量和总生物量呈先增加后缓慢下降的趋势;株高、最高分蘖数、叶面积指数、关键生育期干物质积累、主要生育阶段干物质积累、穗后比例和每穗总粒数均随着施氮量的增加总体呈增加的趋势,而成穗率和千粒重与之相反。生育后期,秸秆还田处理的干物质积累量、每穗总粒数较秸秆离田处理分别增加10.9%、2.4%,而秸秆离田处理的茎鞘物质输出率、茎鞘物质转化率、茎叶物质的表现输出量和结实率较秸秆还田处理分别增加45.3%、60.3%、41%、1.4%。综上,本试验条件下,水稻最优组合为秸秆还田和施用N 150 kg·hm⁻²,最高实际产量可达到9 758.02 kg·hm⁻²,较秸秆离田和不施氮组合增产18.9%。本研究结果为贵州省喀斯特地区杂交籼稻的可持续发展提供了技术支持。

关键词:秸秆还田; 施氮量; 杂交籼稻; 干物质; 产量

DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2019.09.1856

中国是农业大国,农作物秸秆资源丰富^[1-2]。近年来农村秸秆焚烧问题严重影响了人们的正常生活^[3-5]。为了减少秸秆资源浪费及不合理利用,秸秆还田已成为一项维持农业资源可持续发展的重要措施。前人就秸秆还田对土壤理化性质、土壤肥力、稻田生态环境、作物生长及其产量等方面开展了一系列研究^[6-10]。长期以来,氮肥是保证我国水稻高产稳产的重要方式,但过量投入氮肥会使水稻易发生病虫害^[11]、农田土壤肥力下降、农业污染加重^[12]、氮肥综合效益降低^[13],严重影响我国水稻的可持续发展^[14]。前人研究表明,秸秆还田配施氮肥对作物产量有促进作用^[15-16],减少化肥的施用并提高其利用率,可提高土壤养分的持续供给潜力^[17-19],但有关贵州喀斯特地区秸秆还田与施氮量对水稻干物质特性影响的相关研究较少。本试验拟研究秸秆还田与施氮量对水稻干物质生产特性的影响,以期通过秸秆还田与施氮量的最

优组合,为贵州省喀斯特地区杂交籼稻绿色丰产栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况及试验材料

试验于2018年在贵州省三穗县长吉镇(108°45'12.1"E、26°56'33.2"N)进行。该地区属于北亚热带温和湿润季风气候,具有冬无严寒、夏无酷暑、雨热同季的特点,年平均气温14.9℃,最高气温38.4℃,最低气温-7.6℃,全年无霜期290~300 d,平均降水量1 147 mm。试验田土壤主要理化性状为有机质19.06 g·kg⁻¹、速效钾63.73 mg·kg⁻¹、碱解氮131.91 mg·kg⁻¹、有效磷45.99 mg·kg⁻¹、全氮2.05 g·kg⁻¹、全磷0.85 g·kg⁻¹、全钾21.87 g·kg⁻¹。

供试水稻品种:内5优5399,购自四川省内江杂

收稿日期:2019-02-19 接受日期:2019-05-16

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目子项(201503118-03),贵州省农业科技攻关项目(黔科合支撑[2016]2563号),贵州省特色粮油作物栽培与生理生态研究科技创新人才团队(黔科合平台人才[2019]5613号),贵州省高层次创新型人才项目(黔科合平台人才[2018]5632),贵州省生物学一流学科建设项目(GNYL[2017]009)

作者简介:苏卫,男,主要从事作物优质、高效、高产栽培技术研究。E-mail:1398806682@qq.com

* 通讯作者:冯跃华,男,教授,主要从事作物栽培学研究。E-mail:fengyuehua2006@126.com

交水稻科技开发中心。

供试肥料:磷肥为 $\text{CaP}_2\text{H}_4\text{O}_8$ (含 P_2O_5 16%, 贵州省贵定县农化化肥有限责任公司), 钾肥为 KCl (含 K_2O 60%, 俄罗斯产, 中化肥控股有限公司), 氮肥为 CON_2H_4 (含 N 46.4%, 贵州赤天化股份有限公司)。

1.2 试验设计

本试验为油菜-水稻两熟制下水稻季试验。试验设计秸秆还田(H)、施氮量(N)2个因素。采用裂区设计,其中,主区为秸秆还田(H),设2种还田方式,分别为前茬油菜秸秆离田(H1)和前茬油菜秸秆还田(H2);副区处理为施氮量(N),设4个施氮量水平,分别为0(N1)、75(N2)、150(N3)和225 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (N4)。每个处理3次重复,小区面积为22 m^2 。氮肥采用分次施肥法,基肥、分蘖肥、穗肥、粒肥施氮量分别占35%、20%、30%、15%;磷肥和钾肥的用量分别为 P_2O_5 96 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 K_2O 135 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,磷肥作基肥一次施入,钾肥基施50%,幼穗分化期施50%,氮、磷、钾肥分别采用尿素、过磷酸钙、氯化钾。每小区四周作高30 cm、宽20 cm田埂包膜,包膜压深至地下30 cm,以防水肥渗透,重复间留70 cm空降以便田间操作和调查。水稻于4月8日育秧,5月27日移栽,行株距为30 cm×20 cm,田间管理与当地一般大田管理方法相同,于9月20日收获并测产。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 株高和最高茎蘖数 分别于水稻拔节期、孕穗期、抽穗期、成熟期取代表性植株4株(成熟期6株),测量其株高。选长势较一致连续10穴,采用定点观察法,从返青期开始每隔7 d进行一次茎蘖动态调查,测定其最高茎蘖数并按照公式计算成穗率(%):

$$\text{成穗率} = \text{有效穗数} / \text{最高茎蘖数} \times 100\% \quad (1)$$

1.3.2 叶面积指数 根据每小区田间调查的平均茎蘖数,分别在拔节期、孕穗期、抽穗期取代表性植株4株,采用长宽法,测定其中1株叶片的长(cm)和宽(cm),按照公式计算叶面积(cm^2):

$$\text{叶面积} = \text{长} \times \text{宽} \times 0.75 \quad (2)$$

然后采用称重法求出总叶面积,并按照公式计算叶面积指数:

$$\text{叶面积指数} = \text{叶片总面积} / \text{土地面积} \quad (3)$$

1.3.3 干物质积累量、分配和转运 按每小区田间调查平均茎蘖数,分别于水稻关键生育期(拔节期、孕穗期、抽穗期),取代表性植株4穴,拔节期、孕穗期将样品分成茎、叶、死叶三部分,抽穗期将样品分成茎、叶、穗、死叶四部分;在成熟期按每小区田间调查平均茎蘖

数取植株6穴,将样品分成茎、叶、实粒、秕粒、枝梗五个部分,分别测定其干物质重并计算各生育期干物质。测定时将各部位水稻样品各自装袋,于105℃杀青30 min,80℃烘干到恒重,称干物质重。按照公式分别计算主要生育阶段(拔节期-抽穗期、抽穗期-成熟期)地上部分(叶、茎、穗)分配率(%)、干物质表观输出量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、干物质表观输出率(%)、茎鞘物质转化率(%)、茎鞘物质输出率(%)和穗后比例(%):

$$\text{各器官分配率} = (\text{后一时期地上部分干物质重} - \text{前一时期地上部分干物质重}) / (\text{后一时期干物质总重} - \text{前一时期干物质总重}) \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{茎叶物质表观输出量} = \text{抽穗期地上部分干重} - \text{成熟期地上部分干量} \quad (5)$$

$$\text{茎叶物质表观输出率} = (\text{抽穗期地上部分干重} - \text{成熟期地上部分干量}) / \text{抽穗期地上部分干重} \times 100\% \quad (6)$$

$$\text{茎鞘物质转化率} = (\text{抽穗期茎鞘干重} - \text{成熟期茎鞘干重}) / \text{籽粒干重} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{茎鞘物质输出率} = (\text{抽穗期茎鞘干重} - \text{成熟期茎鞘干重}) / \text{抽穗期茎鞘干重} \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{穗后比例} = [(\text{成熟期干物质积累量} - \text{抽穗期干物质积累量}) / \text{籽粒干重}] \times 100\% \quad (9)$$

1.3.4 产量和产量构成 于成熟期每小区割取具有代表性区域99穴作为测产区,取样脱粒晒干风选后称其风干重。称取30 g,采用烘干法测定实际含水量,按水分13.5%折算水稻实际产量。根据田间调查的平均茎蘖数,每小区取代表性植株6穴,作为考种样,并考察水稻的产量构成因素。

1.3.5 数据处理 利用SAS 9.0软件进行统计分析;Microsoft Office Excel 2003进行数据整理和计算。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田与施氮量对水稻株高和最高分蘖数及成穗率的影响

由表1可知,施氮量对水稻关键生育期株高和最高分蘖数及成穗率均有极显著影响,秸秆处理主要影响孕穗期株高,施氮量与秸秆处理的交互作用对孕穗期株高、最高分蘖数均有极显著影响,对抽穗期株高、成穗率均有显著影响。随着施氮量的增加,不同生育时期的株高大体均呈增高的趋势,在孕穗期、抽穗期和成熟期,N3与N4处理间均无显著差异,但均显著高于N1、N2,且N1与N2之间差异显著;在拔节期,N3显著高于N1、N2,但与N4间无显著差异。最高分蘖数随着施氮量的增加而增加,且各处理间差异显著,其中N4最高。成穗

率随着施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,其中 N1、N2 均显著高于 N3、N4,但 N1 与 N2 间无显著差异,N3 显著高于 N4。在拔节期、抽穗期和成熟期,秸秆处理对

株高、最高分蘖数和成穗率的影响较小,但在孕穗期秸秆还田处理的株高显著高于秸秆离田。

表 1 秸秆还田与施氮量对水稻株高和最高分蘖数及成穗率的影响

Table 1 Effects of straw returning and nitrogen application on plant height, maximum tillering number and earing rate of rice

处理 Treatments	拔节期 Jointing stage /cm	孕穗期 Booting stage /cm	抽穗期 Heading stage /cm	成熟期 Mature stage /cm	最高分蘖数 Maximum tillers/个	成穗率 Percentage of productive tillers/%	
H1	N1	69.87cA	101.75cA	121.61bA	115.65bA	224.44cA	74.33aA
	N2	70.62bcA	106.88cA	123.45bA	118.60bA	247.08bA	72.06abB
	N3	76.29aA	106.88bB	128.28aA	123.54aA	255.00bB	69.98bA
	N4	74.37abA	112.50aA	127.95aB	122.60aA	322.92aA	64.49cA
H2	N1	70.34aA	93.86dB	120.22dA	116.24cA	204.17dB	72.56bA
	N2	72.54aA	103.50cA	122.80cA	120.24bA	234.17cB	77.82aA
	N3	74.17aA	113.00aA	128.55bA	127.63aA	272.5bA	70.28bA
	N4	74.13aA	109.13bB	131.55aA	123.54bA	325.83aA	61.81cA
H1		72.79a	106.16b	125.52a	120.10a	262.36a	70.21a
H2		72.79a	104.88a	125.78a	121.91a	259.17a	70.62a
N1		70.10c	97.81c	120.92c	115.95c	214.31d	73.44a
N2		71.58bc	103.50b	123.13b	119.42b	240.63c	74.94a
N3		75.23a	109.94a	128.42a	125.58a	263.75b	70.13b
N4		74.25ab	110.81a	129.75a	123.07a	324.38a	63.15c
H	0	6.09*	0.67	1.38	1.72	0.17	
N	5.96**	155.51**	58.85**	24.57**	372.12**	28.12**	
H×N	0.75	36.55**	4.03*	0.86	11.97**	3.65*	

注:同列不同小写字母表示不同秸秆处理间或不同施氮量处理间在 5% 水平上差异显著,或相同秸秆处理不同施氮量处理间在 5% 水平上差异显著;不同大写字母表示不同秸秆处理条件下,相同施氮量处理间在 5% 水平上差异显著;**表示在 0.01 水平上差异显著,*表示 0.05 水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate that there is significant difference at 5% level between different straw treatments or different nitrogen application treatments, or there is significant difference at 5% level between different nitrogen application treatments of the same straw treatment. Different capital letters significant difference at 5% level between the same nitrogen application treatments of different straw treatments. ** means significant difference at 0.01 level. * means significant difference at 0.05 level. Same as below.

2.2 秸秆还田与施氮量对水稻叶面积指数的影响

由表 2 可知,施氮量对各生育期水稻叶面积指数均有极显著影响,秸秆处理主要影响孕穗期的叶面积指数,施氮量和秸秆处理的交互作用对各生育期叶面积指数均有极显著影响。随着施氮量的增加,各生育期的叶面积指数均呈逐渐增加的趋势,在拔节期和孕穗期 N3 和 N4 均显著高于 N1 和 N2,且 N3 与 N4 间差异显著,但 N1 与 N2 间无显著差异;在抽穗期各施氮处理间均差异显著,其中 N4 显著高于其他处理。对施氮量和三个时期的平均叶面积指数建立回归方程: $y = 2.7425e^{0.00263x}$ (x : 施氮量; y : 叶面积指数)。孕穗期

秸秆还田的叶面积指数显著高于秸秆离田,而秸秆处理对拔节期和抽穗期叶面积指数的影响均较小。

2.3 秸秆还田与施氮量对水稻干物质积累的影响

由表 3 可知,施氮量对各生育期干物质的积累均有极显著影响,秸秆处理主要影响抽穗期干物质的积累。随着施氮量的增加,各生育期除抽穗期和成熟期 N4 略低于 N3 外,干物质均呈增加的趋势,其中 N3 和 N4 除在抽穗期外,均显著高于 N1 和 N2,且 N3 与 N4 间无显著差异,N1 和 N2 处理除在孕穗期差异显著外,在其他时期均无显著差异。抽穗期秸秆离田的干物质积累量显著高于秸秆还田,但在其他生育期差异不显著。

表 2 秸秆还田与施氮量对水稻叶面积指数的影响

Table 2 Effect of straw returning and nitrogen application on leaf area index of rice

处理 Treatments	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	
H1	N1	1.71cA	4.21cA	2.95dA
	N2	1.76cA	4.50bcA	3.64cA
	N3	2.08bA	4.73bB	4.27bA
	N4	2.45aB	7.24aA	5.00aB
H2	N1	1.7bA	4.53cA	2.69dA
	N2	1.76bA	4.27cA	3.28cA
	N3	1.71bB	6.61bA	3.69bB
	N4	2.97aA	7.53aA	5.51aA
H1	2.00a	5.17b	3.97a	
H2	2.04a	5.74a	3.8a	
N1	1.70c	4.37c	2.82d	
N2	1.76c	4.39c	3.46c	
N3	1.90b	5.67b	3.98b	
N4	2.7a	7.38a	5.25a	
H	0.66	21.63**	3.42	
N	140.24**	136.57**	126.62**	
H×N	20.84**	13.93**	6.73**	

表 3 秸秆还田与施氮量对水稻关键生育期干物质积累的影响

Table 3 Effect of straw returning and nitrogen application on dry matter accumulation during key growth stages of rice / (kg·hm⁻²)

处理 Treatments	拔节期 Jointing stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Mature stage	
H1	N1	1471.85cA	5716.72cA	8976.88bA	13335.00bA
	N2	1504.76bcA	6819.08bA	9109.37bA	13318.00bA
	N3	1701.64abA	7485.23abA	10759.00aA	15421.00aA
	N4	1836.85bA	7605.89aA	10411.00aB	13946.00abB
H2	N1	1263.01bA	5992.22bA	8492.78bA	13002.00bA
	N2	1453.64abA	6670.77bA	8858.33abA	14199.00bA
	N3	1594.82aA	7520.97aA	9772.92aA	16707aA
	N4	1616.76aA	7609.31aA	8604.79abA	16568.00aA
H1	1628.77a	6906.73a	9814.27a	14005.00a	
H2	1482.06a	6948.32a	8932.20b	15119.00a	
N1	1367.43b	5854.47c	8734.83b	13168.00b	
N2	1479.20b	6744.92b	8983.85b	13758.00b	
N3	1648.23a	7503.10a	10266.00a	16064.00a	
N4	1726.80a	7607.60a	9508.12ab	15257.00a	
H	5.52	0.04	9.53**	5.77	
N	12.05**	20.6**	5.62**	10.19**	
H×N	0.76	0.24	1.45	2.13	

2.4 秸秆还田与施氮量对水稻不同生育期干物质积累及总生物量的影响

由表 4 可知,施氮量对不同水稻生育阶段干物质和生物量有显著或极显著影响,秸秆处理主要影响水稻的移栽-拔节(生育前期)和抽穗-成熟(后期),而施氮量与秸秆处理的交互作用对水稻不同生育阶段干物质积累和总生物量均有极显著影响。随着施氮量的增加,不同生育阶段干物质积累量大体上均呈增加的趋势,在生育前期(移栽-拔节)干物质积累在各处理间达到显著水平,N4 显著高于其他处理;在生育中期(拔节-抽穗)施氮处理高于未施氮处理(N1),且各施氮处理间差异不显著;在生育后期(抽穗-成熟)N3 和 N4 显著高于 N1 和 N2。总生物量随施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,且各处理间达到显著水平,N3 显著高于其他处理。随着水稻的生长,秸秆还田对水稻生育前期干物质积累量有抑制作用,但促进水稻生育后期干物质的积累,对生育中期干物质的积累和总生物量的影响不大。在生育前期,同一施氮水平(N1)下,秸秆还田的干物质积累显著低于秸秆离田,而在生育后期则相反。

表 4 秸秆还田与施氮量对水稻生育期干物质积累量及生物量的影响

Table 4 Effects of straw returning and nitrogen application on dry matter accumulation and biomass during growth stage of rice / (kg·hm⁻²)

处理 Treatments	移栽-拔节 Transplanting-jointing	拔节-抽穗 Jointing-heading	抽穗-成熟 Heading-mature	总生物量 Total dry matter	
H1	N1	1336.80cA	7664.79bA	3601.77bB	12681.00dA
	N2	1289.16cA	7683.33bA	5163.72aA	12312.00cA
	N3	1566.60bA	7168.98bB	5489.78aA	16159.00aA
	N4	1759.16aB	8500.21aA	5384.84aB	15013.00bB
H2	N1	1114.30cB	6735.42bB	5497.68bA	12848.00cA
	N2	1304.93bA	8071.39aA	4467.45cB	13753.00bA
	N3	1262.64bB	8189.03aA	5602.83bA	16450.00aA
	N4	2057.84aA	7751.53aA	6216.40aA	16413.00aA
H1	1487.93a	7754.33a	4910.03b	1426.00a	
H2	1434.93b	7686.84a	5446.09a	14866.00a	
N1	1225.55d	7200.10b	4549.73b	12764.00d	
N2	1297.05c	7877.36a	4815.58b	13482.00c	
N3	1414.62b	7679.00ab	5546.31a	16304.00a	
N4	1908.50a	8125.87a	5800.62a	15713.00b	
H	7.21*	0.14	35.20**	8.92	
N	243.53**	4.64*	42.85**	272.82**	
H×N	47.07**	6.53**	37.09**	7.22**	

2.5 秸秆还田与施氮量对水稻关键生育期地上部分器官分配率

由表 5 可知,施氮量对水稻中后期地上部各器官分配率的影响极显著,秸秆处理对水稻后期地上部各器官分配率的影响极显著,对中期穗分配率影响显著,施氮量和秸秆处理的交互作用对水稻中后期地上部各器官分配率的影响与秸秆处理相似。在生育中期,随着施氮量的增加茎分配率大体上呈减少的趋势,N1、N2、N3 显

著高于 N4;叶的分配率呈先增加后减少的趋势,其中以 N3 处理为最高,显著高于 N1、N2,穗的分配率正相反,N1、N4 显著高于 N2、N3。秸秆处理对茎叶的分配率影响不大,秸秆离田的穗分配率显著高于秸秆还田。在生育后期,茎叶的分配率均为负值,而穗的分配率为正值。随施氮量的增加,穗的分配率呈先增加后减少的趋势,其中 N1、N2 显著高于 N3、N4,以 N2 最高,且秸秆离田显著高于秸秆还田。

表 5 秸秆还田与施氮量对水稻关键生育期地上部分器官分配率

Table 5 Distribution rate of above-ground organs in key growth stages of rice by straw returning and nitrogen application/%

处理 Treatments	生育中期 Middle stage of growth			生育后期 Late growth stage			
	茎	叶	穗	茎	叶	穗	
H1	N1	55.79aA	13.46cA	31.27bA	-55.38dB	-17.75cB	167.67aA
	N2	51.10bcB	15.53bcA	32.09bA	-31.23cA	-8.47bA	132.26bB
	N3	53.57abA	19.33aA	29.59bA	-24.56bB	-19.33cB	129.45bA
	N4	50.51cA	17.26abA	35.76aA	-14.80aB	-4.61aA	110.15cA
H2	N1	55.11aA	13.31bA	33.6aA	-16.16bA	-2.17aA	109.39cB
	N2	55.72aA	16.43abA	26.57bB	-42.38cB	-12.21cB	150.35aA
	N3	54.02abA	19.67aA	27.23bA	-16.22bA	-9.73bcA	119.39bB
	N4	51.10bA	18.19aA	33.60aA	-7.67aA	-7.70bA	109.39cA
H1		52.74a	16.39a	32.17a	-31.49b	-12.54b	134.88a
H2		53.99a	16.90a	30.00b	-20.61a	-7.95a	122.14b
N1		55.45a	13.39c	32.43a	-35.77c	-9.96b	138.53a
N2		53.41a	15.96b	29.33b	-36.80c	-10.34b	141.31a
N3		53.79a	19.50a	28.39b	-20.39b	-14.53c	124.45b
N4		50.81b	17.72ab	34.16a	-11.23a	-6.15a	109.77c
H		3.07	0.40	7.12*	313.80**	34.17**	68.31**
N		7.30**	10.68**	10.84**	407.80**	19.07**	88.61**
H×N		2.66	0.10	4.08*	288.99**	37.09**	111.32**

2.6 秸秆还田与施氮量对水稻茎鞘和叶的物质转运特点及其比例

由表 6 可知,除秸秆处理对茎叶物质表观输出量的影响较小外,施氮量、秸秆处理和两者的交互作用对水稻茎鞘和叶的物质转运特点及其比例均有极显著影响。施氮量对水稻茎鞘和叶的物质转运影响极显著,其中茎鞘物质输出率、茎鞘物质转化率和茎叶物质表观输出率变化规律相似,均表现为 N2 显著高于其他处理;施氮量对茎叶物质表观输出量的影响表现为 N2 和 N4 显著高于 N1 和 N3,但 N2 与 N4 间无显著差异;施氮量对穗后比例的影响表现为 N3 和 N4 显著高于 N1 和 N2。秸秆处理对茎叶物质表观输出量的影响较小,但对茎鞘物质输出率、茎鞘物质转化率、茎叶物质

的表观输出率和穗后比例的影响达到显著水平,其中秸秆离田的茎鞘物质输出率、茎鞘物质转化率和茎叶物质的表观输出率均显著高于秸秆还田,而秸秆还田的穗后比例显著高于秸秆离田。

2.7 秸秆还田与施氮量对水稻产量及构成因素的影响

由表 7 可知,施氮量对产量及其构成因素有显著或极显著影响,秸秆处理主要影响每穗总粒数和结实率,施氮量与秸秆处理的交互作用对每穗总粒数、结实率和产量有极显著影响。随着施氮量的增加,产量呈先增加后降低的趋势,N3 显著高于其他处理。在产量构成方面,每穗总粒数先增加后减小再增加,有效穗随着施氮量的增加而增加,每穗总粒数各处理间差异显

表 6 秸秆还田与施氮量对水稻茎鞘和叶的物质转运特点及其比例的影响

Table 6 Effects of straw returning and nitrogen application on material transport characteristics and proportion of rice stem sheath and leaf

处理 Treatments		茎鞘物质输出率 Matter delivery rate of stems and sheaths/%	茎鞘物质转化率 Matter conversion rate of stems and sheaths/%	茎叶物质表观输出率 Apparent output rate of stems and leaves matter/%	茎叶物质表观输出量 Apparent output of stems and leaves matter/(kg·hm ⁻²)	穗后比例 Proportion/%
H1	N1	33.79bA	21.45bA	29.92bA	1984.44bA	50.50bB
	N2	33.66bB	17.34cB	28.12bcB	2291.94bA	55.84aA
	N3	24.37cA	13.96dA	26.45cA	1856.75bA	55.59aB
	N4	42.81aA	28.29aA	42.42aA	3630.00aA	57.31aB
H2	N1	19.57bB	10.35bB	16.04c B	1007.89c B	63.75aA
	N2	38.90aA	23.78aA	35.44aA	2586.01aA	56.16bA
	N3	21.50bA	10.89bB	22.25bB	1922.21bA	66.83aA
	N4	12.68cB	5.55cB	16.26cB	1067.40cB	64.82aA
H1		33.65a	20.26a	31.73a	1648.88a	54.80b
H2		23.16b	12.64b	22.50b	2440.78a	62.90a
N1		26.68b	15.90c	23.00c	1496.16c	57.12b
N2		36.28a	20.56a	31.78a	2438.98a	56.00b
N3		22.94c	12.42d	24.35c	1889.48b	61.21a
N4		27.74b	16.92b	29.34b	2348.70a	61.09a
H		104.02**	546.92**	274.23**	40.36	96.29**
N		32.19**	105.54**	58.69**	14.49**	11.83**
H×N		59.51**	360.62**	173.32**	32.14**	13.26**

表 7 秸秆还田与施氮量对水稻产量及构成因素的影响

Table 7 Effects of straw returning and nitrogen application on rice yield and components

处理 Treatments		每穗总粒数 Grains per spike/grain	有效穗 Effective spikes /(10 ⁴ ·hm ⁻²)	千粒重 1000-grain weight/g	结实率 Seed-setting rate/%	产量 Yield /(kg·hm ⁻²)
H1	N1	194.48cA	164.24bA	31.31aA	74.67bB	8203.74dA
	N2	219.02aA	187.85aA	31.45aA	81.81aA	8688.1cB
	N3	195.88cB	187.85aA	31.40aA	79.38aA	9514.65aB
	N4	215.68bB	205.9aA	30.54bA	75.43bA	9148.66bA
H2	N1	193.43dA	177.57bA	31.57aA	78.77aA	7999.75cA
	N2	202.88cB	187.29abA	31.20abA	77.55aB	8930.63bA
	N3	219.78bA	202.57aA	31.101bcA	72.01bB	9758.02aA
	N4	228.41aA	201.64aA	30.65cA	74.51bA	8947.4bA
H1		206.27b	186.46a	31.18a	77.82a	8888.79a
H2		211.12a	192.27a	31.12a	75.71b	8908.95a
N1		193.95d	170.9c	31.44a	76.72b	8101.75d
N2		210.95b	187.57b	31.32a	79.68a	8809.37c
N3		207.83c	195.21ab	31.23a	75.70b	9636.34a
N4		222.05a	203.77a	30.60b	74.97b	9048.03b
H		56.39*	1.26	0.33	9.76**	0.13
N		411.33**	8.22*	14.27**	10.09**	129.46**
H×N		230.55**	0.97	2.06	14.18**	5.31**

著,其中 N4 显著高于其他处理;有效穗表现为 N3 和 N4 显著高于 N1 和 N2,且 N3 与 N4 间无显著差异;结实率随着施氮量的增加呈先增加后降低的趋势,N2 显著高于其他处理,但 N1、N3 和 N4 三者间无显著差异;千粒重随着施氮量的增加呈下降的趋势,N4 显著低于其他处理。秸秆还田的每穗总粒数显著高于秸秆离田,秸秆离田的结实率显著高于秸秆还田。进一步分析产量发现,在 N1 和 N4 条件下,秸秆还田与秸秆离田处理间无显著差异,但在 N2、N3 条件下,秸秆还田产量显著高于秸秆离田,其中 H2N3 产量最高,达到 $9\ 758.02\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,较 H1N3 和 H1N1 分别增产 2.6%、18.9%。

3 讨论

本研究结果表明,随着施氮量的增加,水稻的产量和总生物量呈先增加后降低的趋势,说明随着施氮量增加水稻的有效穗和每穗总粒数增加,进而使水稻增产,但过量的氮肥会使水稻的千粒重和成穗率降低,从而使水稻的产量呈先增加后降低的趋势,这与前人研究^[20-24]结果相同,表明适宜的施氮量可以促进水稻的生长,而过量施用氮肥则会导致水稻减产。因此,在实际生产中,应合理施用氮肥,使其满足生产需要的同时不造成资源浪费。本研究中,水稻株高、最高分蘖数、叶面积指数、关键生育期干物质积累、主要生育阶段干物质积累、有效穗、每穗总粒数和穗后比例总体呈增加的趋势。这与武彪等^[25]的研究结果一致,而千粒重、总生物量、成穗率和产量等方面变化不一致,这可能与试验地、品种特性和栽培措施等因素有关。

采用秸秆还田能够减少化肥的施用,提高经济效益,还可以减少秸秆燃烧或秸秆不合理利用所引发的负面效应。本研究发现,秸秆还田降低了茎鞘物质输出率、茎鞘物质转化率、茎叶物质的表观率和结实率,影响了生育前期水稻干物质的积累,但秸秆还田增加了叶面积指数和每穗总粒数,促进了生育后期干物质的积累,说明秸秆还田对水稻生长发育的影响表现为前期抑制后期促进。这可能是由于生育前期土壤微生物在分解秸秆过程中,需要与水稻争氮,导致土壤供氮减少,而使生育前期水稻的干物质积累减少;在生育后期,秸秆分解基本完成,土壤供氮充足,导致生育后期水稻的干物质积累增多,这与前人研究结果^[26-29]一致。本研究中,秸秆还田对产量的影响不明显,可能是秸秆还田的还田年限较短,秸秆未充分分解,也可能与前茬作物秸秆的还田量有关,但在配施等量氮肥后,秸

秆还田的产量高于秸秆离田,说明秸秆还田配施氮肥能提高氮肥的利用率,从而使水稻的产量增加,这与汪军等^[20]和袁玲等^[30]的研究结果一致。秸秆还田配施氮肥能够改善土壤特性,提高土壤肥力和改善稻田生态环境。但秸秆还田配氮施肥如何改善土壤特性,提高土壤肥力和改善稻田生态环境,以及秸秆还田配氮施肥对水稻光合生理特性的影响还有待进一步深入研究。

4 结论

本研究结果表明,在油菜秸秆还田和施用 $150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ N 组合(H_2N_3)下杂交籼稻每穗总粒数、千粒重、结实率、有效穗、总生物量、叶面积指数等各项指标均较优,从而使水稻产量达到最高,为 $9\ 758.02\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。综合考虑油菜秸秆还田与施氮量对水稻生长发育、产量及其构成因素等的影响,贵州省喀斯特地区杂交籼稻最优组合为秸秆还田和施用氮肥量 $150\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

参考文献:

- [1] 顾道健,薛朋,陆希婕,张耗,刘立军,王志琴,杨建昌. 秸秆还田对水稻生长发育和稻田温室气体排放的影响[J]. 中国稻米, 2014, 20(3): 1-5
- [2] 隋阳辉,高继平,刘彩虹,徐正进,王延波,赵海岩. 东北冷凉地区秸秆还田方式对水稻光合、干物质积累及氮素吸收的影响[J]. 作物杂志, 2018(5): 137-143
- [3] Lal R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel[J]. Environment International, 2005, 31(4): 575-584
- [4] 张宁. 山东地区农作物秸秆生态化综合利用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013: 1-15
- [5] 刘卉,周清明,黎娟. 秸秆还田对土壤改良及作物生长影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(32): 53-57
- [6] 曾宪楠,高斯倜,冯延江,孙羽,宋秋来,王麒. 水稻秸秆还田对土壤培肥及水稻产量的影响研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 13-16
- [7] 安丰华,王志春,杨帆,杨洪涛. 秸秆还田研究进展[J]. 土壤与作物, 2015, 4(2): 57-63
- [8] 曾研华,吴建富,潘晓华,石庆华,朱德峰. 稻草原位还田对双季稻田土壤理化与生物学性状的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 150-155
- [9] Ling Y, Zhang Z C, Cao X C, Zhua S C, Zhang X, Wu L H. Responses of rice production, milled rice quality and soil properties to various nitrogen inputs and rice straw incorporation under continuous plastic film mulching cultivation [J]. Field Crops Research, 2014, 155: 164-171
- [10] Albuquerque M B, Santos R C, Lima L M, Albuquerque P, Mansur R J, Camara C A, Rezende Ramos A. Allelopathy, an alternative tool to

- improve cropping systems. A review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(2): 379-395
- [11] 顾俊荣,董明辉,赵步洪,陈培峰,季红娟,韩立宇. 不同水氮管理对水稻干物质积累和茎鞘物质运转及产量的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(2): 347-354
- [12] 俞映惊,薛利红,杨林章. 不同氮肥管理模式对太湖流域稻田土壤氮素渗漏的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(5): 988-995
- [13] 王秀斌,徐新朋,孙刚,孙静文,梁国庆,刘光荣,周卫. 氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 12(6): 1279-1286
- [14] 高菊生,曹卫东,李冬初,徐明岗,曾希柏,聂荣,张文菊. 长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响[J]. *生态学报*, 2011, 13(16): 4542-4548
- [15] 叶文培,谢小立,王凯荣,李志国. 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
- [16] Usman K, Khan E A, Khan N, Rashid A, Fazal Y D, Din S U. Response of wheat to tillage plus rice residue and nitrogen management in rice-wheat system [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(11): 2389-2398
- [17] 马义虎,顾道健,刘立军,王志琴,张耗,杨建昌. 玉米秸秆源有机肥对水稻产量与温室气体排放的影响[J]. *中国水稻科学*, 2013, 27(5): 520-528
- [18] Soon Y K, Lupwayi N Z. Straw management in a cold semi-arid region: Impact on soil quality and crop productivity [J]. *Field Crops Reserach*, 2012, 139: 39-46
- [19] 裴鹏刚,张均华,朱练峰,胡志华,金千瑜. 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[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(3): 282-290
- [20] 汪军,王德建,张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2): 265-270
- [21] 刘禹池,曾祥忠,冯文强,秦鱼生,王昌全,涂仕华,陈道全. 稻-油轮作下长期秸秆还田与施肥对作物产量和土壤理化性状的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1450-1459
- [22] 王麒. 秸秆还田与施氮量对寒地水稻生长及土壤养分的影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2015: 56-57
- [23] 郭保卫,胡雅杰,钱海军,曹伟伟,邢志鹏,张洪程,戴其根,霍中洋,许轲,魏海燕. 秸秆还田下适宜施氮量提高机插稻南粳 9108 产量和群体质量[J]. *中国水稻科学*, 2015, 29(5): 511-518
- [24] Aslam M M, Zeeshan M, Irum A. Influence of seedling age and nitrogen rates on productivity of rice (*Oryza sativa* L.): A review [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2015, 6(9): 1361-1369
- [25] 武彪,冯跃华,刘翔,刘永国,李云,王小艳,纪洪亭. 机插密度与施氮量对超级杂交水稻准两优 527 群体质量及产量形成的影响[J]. *杂交水稻*, 2013, 28(5): 75-80
- [26] 游来勇,李冰,王昌全,杨娟,白根川,黄春. 秸秆还田量对麦-稻轮作体系作物产量、氮素吸收利用效率的影响[J]. *核农学报*, 2015, 29(12): 2394-2401
- [27] 季红娟,赵步洪,陈刚,郑青松,张小祥,李育红,肖宁,潘存红,李爱宏. 扬梗 805 产量和品质对麦秸还田与施氮量的响应[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2016, 37(4): 60-64
- [28] 裴鹏刚. 秸秆还田耦合施氮水平对稻田土壤生化特征及水稻生育特性的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2014: 1-29
- [29] 马春梅,王永吉,于舒函,王家睿. 稻草还田与施氮量对水稻氮素吸收及产量影响[J]. *东北农业大学学报*, 2017, 48(6): 9-16
- [30] 袁玲,张宣,杨静,杨春蕾,曹小闯,吴良欢. 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

Effects of Straw Returning and Nitrogen Application Rate on Dry Matter Accumulation and Yield of Indica Hybrid Rice in Karst Region

SU Wei¹ FENG Yuehua^{1,2,*} XU Guiling¹ GUAN Zhengce¹ OU Da¹ ZHANG Jiafeng¹ WANG Lingli¹

(¹College of Agronomy, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025; ²Key laboratory of Plant Resource Conservation and Germplasm Innovation in Mountainous Region (Ministry of Education), Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025)

Abstract: In order to investigate effects of straw returning and nitrogen application on dry matter accumulation and yield of indica hybrid rice in karst region of Guizhou province. The dry matter production characteristics of indica hybrid rice Nei5You5399 were studied as under different straw treatments and nitrogen application rates. The results showed that the yield and total biomass of rice first increased and subsequently decreased slowly with the increase of nitrogen application. Meanwhile, plant height, maximum tiller number, leaf area index, dry matter accumulation at key growth stages, dry matter accumulation at main growth stages, post-panicle ratio and total grain number per panicle increased with the increase of nitrogen application. In contrast, panicle rate and 1000-grain weight showed the opposite trends. Compared with straw leaving treatment at late growth stage, the dry matter accumulation and total grains per panicle of straw returning treatment increased by 10.9% and 2.4%, respectively, while the dry matter output rate, dry matter conversion rate, apparent dry matter output and seed setting rate of straw leaving treatment increased by 45.3%, 60.3%, 41% and 1.4%, respectively. In summary, under the experimental conditions, the optimum combination of rice straw treatment and nitrogen application rate in this area was straw returning and N 150 kg·hm⁻² application. The maximum actual yield could reach 9 758.02 kg·hm⁻², which increased by 18.9% compared with the combination of straw leaving the field and no N application. This study provid technical support for the sustainable development of indica hybrid rice in the karst region of Guizhou Province.

Keywords: straw returning, nitrogen application, indica hybrid rice, dry matter accumulation, yield