植物营养与肥料学报 2015,21(1):23-55
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2015.0103

秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长及氮素利用的影响

严奉君,孙永健*,马 均*,徐 徽,李 玥,杨志远,蒋明金,吕腾飞
(四川农业大学水稻研究所,农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室,四川温江 611130)

摘要:【目的】在我国稻-麦、稻-油等多熟制区域,富含氮素的小麦、油菜等水稻前茬作物秸秆被大量弃置、焚烧,造成极大浪费和环境污染,与此同时,稻季氮肥投入量却在逐年增加,因此在水稻生产中研究秸秆覆盖与氮肥配合施用的理论与技术,对实现秸秆还田与减少氮肥用量具有重要意义。本试验研究油菜、小麦 2 种秸秆覆盖方式下,3 种不同的氮肥运筹方式对杂交稻主要生育时期根系生长、氮素吸收利用特征及产量的影响,并探讨其根系生长与氮素利用及产量间的关系,以期寻求最佳的秸秆还田与氮肥运筹搭配模式。**【方法】**本试验以杂交稻 F 优 498 为材料,采用两因素裂区试验设计,主区为小麦秸秆覆盖(S_1)、油菜秸秆覆盖(S_2)和无秸秆覆盖(S_0);副区为氮肥运筹模式,在 135 kg/hm^2 总施氮量条件下,设置基肥:蘖肥:穗肥为 5:3:2 (N_1);基肥:蘖肥:穗肥为 3:3:4(N_2);基肥:蘖肥:穗肥为 3:1:6(N_3)3 种氮肥运筹模式,以不施氮肥(N_0)为对照。研究各处理杂交稻在移栽后 20 d、移栽后 30 d、齐穗期和成熟期根系生长及形态、各生育期的干物质与氮素积累,水稻茎鞘的干物质转运、产量及其构成因子以及各时期氮素积累及利用效率,同时对各生育时期根系生长与氮素利用及产量间的关系进行分析。**【结果】**结果表明,小麦秸秆覆盖均可有效促进杂交稻各生育时期的根系生长、改善根系形态、增加各时期的干物质与氮素积累,提高氮肥的利用效率及稻米产量。在不同种类秸秆覆盖下,基肥:蘖肥:穗肥(倒 4 叶龄期施入)为 3:3:4(N_2)时,可及时地对杂交水稻主要生育时期的根系生长进行调控,有效促进抽穗至成熟期的干物质积累与转运率,提高水稻主要生育时期的氮素积累及氮肥利用效率,显著增加稻谷产量,为本试验中最优的氮肥管理模式;而氮肥后移比例过高(基肥:分蘖肥:穗肥运筹比例为 3:1:6),会限制齐穗期根系的生长,导致稻谷产量及氮肥利用效率降低。相关性分析表明,秸秆覆盖与氮肥运筹下主要生育时期根干重、根体积、总根长与产量及氮素吸收利用均存在显著或极显著的正相关($r=0.38^{*}$～0.78^{**}),尤其以齐穗期的根体积与总根长、根干重与氮素累积、产量及氮素回收利用率的相关性最好。**【结论】**小麦秸秆、油菜秸秆覆盖能够有效促进杂交稻根系的生长,增加干物质与氮素积累,提高氮肥利用效率,且小麦秸秆覆盖效果更显著。秸秆覆盖条件下,氮肥运筹以基肥:蘖肥:穗肥为 3:3:4 时的水稻根系生长旺盛,物质生产能力强,氮肥利用效率最高。因此,小麦秸秆覆盖与基肥:蘖肥:穗肥以 3:3:4 的比例配合的水稻的产量最高,为最优组合。

关键词: 秸秆覆盖还田;水稻;根系;氮素利用;产量
中图分类号: S511.062.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)01-0023-13

Effects of straw mulch and nitrogen management on root growth and nitrogen utilization characteristics of hybrid rice

YAN Feng-jun, SUN Yong-jian*, MA Jun*, XU Hui, LI Yue, YANG Zhi-yuan, JIANG Ming-jin, LÜ Teng-fei
(*Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Wenjiang, Sichuan 611130, China*)

Abstract:【Objectives】 In rice-wheat rotation, rice-rape rotation and other multi-cropping regions in China, large amounts of wheat or rape straw or other straws of rice fore-rotation crop were discarded or burned, which caused

收稿日期: 2013-12-18 **接受日期:** 2014-06-06
基金项目: 国家自然科学基金(31101117);农业部作物生理生态与耕作重点实验室开放课题(201303);国家"十二五"科技支撑计划项目(2011BAd16B05, 2012BAd04B13, 2013BAd07B13);四川省育种攻关专项(2011NZ0098-15)资助。
作者简介: 严奉君(1989—),男,重庆丰都人,硕士研究生,主要从事水稻栽培生理研究。E-mail: yfjun1989@126.com
* 通信作者 E-mail: yongjians1980@163.com; majunp2002@163.com

serious environmental pollution and resource waste. Hence, it has significant meaning to investigate a win-win mode between straw mulch and nitrogen (N) management. To explore the optimal straw mulch and N management mode, effects of the straw mulch and N management on root growth, N uptake and utilization and dry matter accumulation in main growth stages of hybrid rice (Fyou 498) were evaluated in this research. 【**Methods**】The experiment was conducted in the experimental field of Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University in 2013. A split-plot design was used, with the main plots under wheat straw mulch (S_1), rape straw mulch (S_2) and no straw mulch (S_0), N management as sub-plots combined with three N management practices under N 135 kg/ha rate in this study. Three N application ratios were applied on different splits: a) 3 splits: 50% basal, 30% 7 d after transplanting (7 DAT), and 20% panicle N-fertilizer according to different leaf ages at 4th leaves emerged from the top (N_1), b) 3 splits: 30% basal, 30% 7 DAT, 40% panicle N-fertilizer at 4th leaves emerged from the top (N_2), c) 4 splits: 30% basal, 10% 7 DAT, 60% panicle N-fertilizer equally at 4th and 2nd leaves emerged from the top (N_3), in addition, no N application (N_0) was set as control. Root growth, morphological characteristics, dry matter and N accumulation, dry matter transportation in stems and sheaths, and N utilization on 20 DAT and 30 DAT and at the filling stage and ripping stage were studied. At the same time, the correlation coefficients among root growth, N uptake and utilization, and grain yield were also analyzed in this research. 【**Results**】The results showed that the wheat straw mulch generally improves the dry matter accumulation and N uptake of rice, promotes the root growth and N utilization efficiency, and increases the grain yield significantly. The rape straw mulch could also increase the grain yield remarkably, but not as much as the wheat straw mulch. As for the N management practice, the N 30% basal, 30% 7 DAT and 40% panicle N management practice (N_2) is the optimal N-fertilizer management practice in all straw mulch treatments. The optimal N-fertilizer management practice regulates the root growth at the main growth stage efficiently, improves dry matter transportation in stems and sheaths, promotes the N utilization efficiency, and increases the grain yield significantly. When the panicle N-fertilizer ratio increases to 60%, the root growth is poor, especially at the heading stage, the grain yield and N utilization decrease. The correlation coefficients among the root growth, N uptake and utilization and grain yield are as follows: under the straw mulch and N-fertilizer management, the root dry weight, total root volume and total root length generally have significant or extremely significant and positive correlations with the grain yield and N uptake and utilization at the main growing stage of rice ($r = 0.38^{*} - 0.78^{**}$). 【**Conclusions**】Compared with the no straw mulch treatment, the straw mulch could promote the root growth, N utilization efficiency, dry matter and nitrogen accumulation and grain yield, especially for the treatments with the wheat straw mulch. The combination of the straw mulch and 30% basal, 30% 7 DAT and 40% panicle N management practice (N_2) could regulate the root growth, promote N utilization efficiency, and increase the dry matter and N accumulation and grain yield more efficiently. Among all the treatments, the wheat straw mulch with 30% basal, 30% 7 DAT and 40% panicle N management practice (N_2) is the optimal mode in this research.

Key words: straw mulch; rice; root; nitrogen utilization; grain yield

农作物秸秆中富含大量的矿质营养元素,秸秆还田对保持土壤水分和提高土壤肥力及农业的可持续发展有重要作用。目前,我国是世界秸秆总产量最大的国家,仅2011年秸秆总产量就达到了8.63亿吨,约占世界总产量的30%[1-3]。而随着农村劳动力的转移,农民为了抢农时、节约人力,对秸秆的处理方式通常是以私自焚烧为主,不仅污染环境,同时也浪费了资源。Pathak等[4]和Kumar等[5]研究表明,秸秆焚烧后,有机质与氮素几乎没有残留,磷、钾的残留也仅为70%左右。同时,随着化肥的广泛使用,秸秆堆沤制有机肥迅速减少,且人们为追求作物高产而盲目地增加化肥用量(尤其是氮肥),据FAO的资料,1961～1999年,全球氮肥用量(以纯N计),从11.6×10^6 t增加到111.9×10^6 t,增加了9.6倍[6]。目前,我国苏南地区的施氮量已达到300 kg/hm^2,而我国化肥氮的利用效率却一直只有30%左右[7]。为此在作物秸秆还田、氮肥运筹、提高秸秆资源化利用与氮肥利用效率,减少环境污染的理

论和技术方面已有大量的研究。有研究结果表明,秸秆还田和合理的氮肥运筹能均衡土壤养分、改善土壤理化性质和稻米品质、提高稻谷产量和氮肥利用效率[8-10]。特别是在秸秆还田配合合理的氮肥运筹模式下,更能显著提高稻谷产量与水稻的氮肥利用率,改善稻田土壤理化性质及稻米品质[11-12]。

然而,秸秆还田的研究多集中于秸秆翻耕还田模式,对秸秆覆盖还田的研究较少,并且在秸秆翻耕还田与秸秆覆盖还田过程中,由于秸秆所处的环境不同,导致其腐熟及养分释放规律也具有较大的差异,但秸秆覆盖还田对水稻生长以及氮肥利用效率的影响与秸秆翻耕还田是否一致,且在油—稻、麦—稻耕作制度下,油菜秸秆与小麦秸秆覆盖对比的研究均报道较少,尤其缺乏不同作物秸秆覆盖与氮肥运筹下水稻根系生长与产量形成及氮素利用效率关系的研究,且秸秆覆盖与氮肥运筹间是否存在互作效应,均鲜见报道。为此,本试验在前期研究的基础上,选用应用广泛且适宜在本地区种植的杂交中稻 F 优 498 为供试材料,研究不同作物秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻根系生长、氮肥利用及产量的影响,并探讨秸秆覆盖与氮肥运筹下杂交稻各生育时期根系生长与氮素利用效率及产量间的关系,以期进一步丰富和补充秸秆还田与氮肥运筹的水肥调控机理,达到保水节肥又高产高效的目的,为油—稻、麦—稻两熟制地区秸秆还田技术体系提供理论和实践依据。

1　材料与方法

1.1　试验设计

试验于 2013 年在成都温江四川农业大学水稻所八角村试验田进行,试验区域常年平均气温 15.9℃,降雨量 972 mm,日照时间 1168h,相对湿度 84%。供试品种为 F 优 498(中籼迟熟型杂交稻,生育期 145～152 d)。试验田耕层(0—20 cm)土壤质地为砂壤土,含有机质 23.65 g/kg,速效氮 126.11 mg/kg,速效磷 20.01 mg/kg,速效钾 122.86 mg/kg,pH 5.8。4 月 3 日播种,旱育秧,5 月 19 日移栽,采用前期研究[13-14]提出的宽窄行高产栽培方式(宽行 40 cm、窄行 26.7 cm、株距 16.7 cm),单株栽插,并在宽行进行作物秸秆覆盖处理,便于秸秆覆盖还田操作。试验采用 2 因素裂区设计,秸秆覆盖还田为主区,氮肥运筹为副区。

主区设小麦秸秆覆盖(S_1)和油菜秸秆覆盖(S_2),并设无秸秆覆盖为对照(S_0),两种作物秸秆均为异地秸秆全部还田。秸秆全部还田量均为研究区域内小麦秸秆与油菜秸秆的平均产量[1-2](全田小麦秸秆 5000 kg/hm^2,全田油菜秸秆 7000 kg/hm^2)。将小麦、油菜秸秆收获后切成 5～10 cm 小段,于水稻移栽后均匀覆盖于宽行间。

副区为在施氮 N 135 kg/hm^2(尿素,含 N 46%)(研究区域内常规施氮量为 150 kg/hm^2,作物秸秆含氮量为 20～30 kg/hm^2)的水平下,设基肥∶蘖肥∶穗肥比例分别为 5∶3∶2(N_1)、3∶3∶4(N_2)、3∶1∶6(N_3)3 种氮肥运筹模式,并设不施氮对照(N_0)。蘖肥于移栽后 7 d 施用。N_1 与 N_2 处理的穗肥于倒 4 叶期一次性施用,N_3 穗肥分别于倒 4、倒 2 叶期分两次等量施入(前期研究[13-14]表明,在穗肥比例超过 40% 以上一次性施入时,其水稻产量及氮肥利用率均大幅下降)。磷肥(过磷酸钙)施用量为 P_2O_5 90 kg/hm^2,钾肥(氯化钾)施用量为 K_2O 150 kg/hm^2,磷、钾肥全部作基肥一次施入。每个处理 3 次重复,小区面积为 15.4 m^2,小区间筑埂(宽 40 cm),并用塑料薄膜包裹,以防串水串肥。按干湿交替灌溉、中期"够苗晒田"方式进行水分管理,并准确记载每次灌水量,确保灌水量一致,整个水稻生育期灌溉水量为 4150 m^3/hm^2,其他田间管理按大面积生产田进行。

1.2　测定项目和方法

1.2.1 干物质积累　分别于移栽后 20 d 及 30 d、拔节期、齐穗期与成熟期,按各小区平均茎蘖数取 3 株具有代表性的稻株,分根、茎、叶、穗(齐穗及成熟期),105℃杀青 30 min,在 80℃下烘干直至恒重。

1.2.2 根系形态指标　分别于移栽后 20 d 及 30 d、拔节期、齐穗期与成熟期,按各小区平均茎蘖数取 3 株具有代表性的稻株(以稻株为中心,按 26.7 cm × 16.7 cm、深 30 cm 土柱取根),分别置于 0.4 mm 孔径尼龙网袋中用流水冲净,获得完整根系,用 Epson Expression 10000XL 扫描仪及 WinRHIZO Pro v. 2009c 分析软件,测定总根长、根尖数、根直径、根表面积与根体积等根系形态指标。

1.2.3 氮素积累　将 1.2.1 中各时期烘干并称重后的植株茎、叶、穗磨碎成粉,过 0.2 mm 孔径筛,用浓 H_2SO_4 和定氮催化剂消煮,用 FOSS-8400 凯氏定氮仪测定氮含量。

1.2.4 考种与计产　成熟期各小区取 5 株(每株茎蘖数为各小区的平均茎蘖数)为一个样本,室内考种,测定穗粒数、实粒数、千粒重,计算结实率等性状。各小区按实收株数计产。

1.3 参数计算

氮肥回收利用率(%) = (施氮区植株总吸氮量 - 无氮区植株总吸氮量)/施氮量 ×100

氮肥农学利用率(kg/kg) = (施氮区稻谷产量 - 无氮区稻谷产量)/施氮量

氮肥生理利用率(kg/kg) = (施氮区产量 - 无氮区产量)/(施氮区植株总吸氮量 - 无氮区植株总吸氮量)

结实期茎鞘干物质转运率(%) = [(齐穗期茎鞘干重 - 成熟期茎鞘干重)/成熟期穗干重] ×100

灌溉水生产力(kg/m^3) = 稻谷产量/灌溉用水量。

试验数据用 Microsoft Excel 2007、DPS 6.5 与 SPSS 17.0 软件进行处理和分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆覆盖与氮肥运筹对根系生长的影响

2.1.1 根系干重及根冠比 由表1可见,秸秆覆盖与氮肥运筹对水稻各时期根干重与根冠比有一定影响,且秸秆覆盖、氮肥运筹在移栽后30 d至成熟期对根干重有极显著的影响并具有显著或极显著的互作效应。随生育进程,秸秆覆盖下各处理根冠比呈

表1 秸秆覆盖与氮肥运筹对根干重、根冠比的影响

Table 1 Effects of the straw mulch and N-fertilizer management on root dry weight and root to shoot ratio

处理 Treatment		根干重 Root dry weight(g/plant)				根冠比 Root to shoot ratio			
		移栽20 d 20 DAT	移栽30 d 30 DAT	齐穗期 Heading stage	成熟期 Ripening stage	移栽20 d 20 DAT	移栽30 d 30 DAT	齐穗期 Heading stage	成熟期 Ripening stage
S0	N0	0.45 d	1.38 d	4.19 f	3.03 cd	0.180 abc	0.146 abc	0.099 c	0.046 cd
	N1	0.75 a	1.44 bcd	5.29 cd	3.26 bc	0.183 abc	0.120 d	0.102 bc	0.040 ef
	N2	0.63 b	1.39 cd	5.05 de	3.44 b	0.166 abc	0.132 cd	0.099 c	0.042 e
	N3	0.46 d	1.41 cd	4.75 e	3.46 b	0.150 bc	0.139 bcd	0.095 c	0.043 de
均值 Average		0.57	1.40	4.82	3.30	0.170	0.134	0.099	0.043
S1	N0	0.46 d	1.44 bcd	4.07 f	2.24 e	0.184 abc	0.159 ab	0.091 c	0.032 g
	N1	0.60 bc	1.75 a	5.55 bc	3.37 b	0.161 abc	0.134 cd	0.098 c	0.038 f
	N2	0.65 ab	1.53 b	5.16 cde	4.22 a	0.205 ab	0.123 d	0.102 bc	0.047 bc
	N3	0.55 bcd	1.81 a	4.99 de	3.44 b	0.183 abc	0.162 a	0.094 c	0.041 ef
均值 Average		0.56	1.63	4.94	3.32	0.183	0.145	0.096	0.039
S2	N0	0.45 d	1.42 cd	4.21 f	2.79 d	0.207 a	0.157 ab	0.101 c	0.042 e
	N1	0.56 bcd	1.72 a	5.93 ab	4.08 a	0.129 c	0.133 cd	0.114 ab	0.048 abc
	N2	0.62 bc	1.49 bc	6.23 a	4.24 a	0.174 abc	0.124 d	0.120 a	0.051 a
	N3	0.51 cd	1.53 b	5.20 cd	4.23 a	0.160 abc	0.135 cd	0.095 c	0.050 ab
均值 Average		0.54	1.54	5.39	3.84	0.168	0.137	0.107	0.048
				F 值 *F* value					
	S	1.00	45.79**	14.92**	37.04**	0.77	2.33	11.64**	37.88**
	N	15.74**	26.36**	52.70**	91.69**	1.85	10.77**	4.06*	14.32**
	S×N	2.45	7.28**	3.03*	13.38**	1.22	1.50	1.93	10.00**

注(Note): S_0—无秸秆覆盖 No straw mulch; S_1—小麦秸秆覆盖 Wheat straw mulch; S_2—油菜秸秆覆盖 Rape straw mulch. DAT— Days after the transplanting. 同列数据后不同字母表示处理间在5%水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level. *, ** 分别表示在0.05和0.01水平上差异显著 Indicate significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

现逐渐减小的趋势,而根干重有所波动,在生育前期,秸秆覆盖下各氮肥处理根干重较无秸秆覆盖(S_0)均有所降低,但在生育中后期,其对水稻根系的生长却起到了显著的促进作用,各处理根干重均高于或显著高于 S_0 下的各处理,根冠比则随各时期氮肥运筹的不同有所差异,其中 S_2 下成熟期根干重与根冠比均显著高于 S_0 对应的氮肥运筹处理。从不同氮肥运筹模式来看,各秸秆覆盖处理下,施氮处理相对不施氮处理在不同生育时期根干重均呈不同程度的增加趋势。秸秆覆盖下各氮肥运筹处理根干重在生育前期随氮肥前移量的增加而有所波动,表现为,在移栽 20 d 时,秸秆覆盖下 N_1 的根干重较 N_2 减少 8.3%～10.7%,但在移栽后 30 d 及齐穗期时,N_2 的根干重则小于 N_1 处理;但在其他生育时期 N_2 处理的根干重均高于 N_1 和 N_3 处理。

2.1.2 根系的构型参数　从表 2 可以看出,秸秆覆盖方式与氮肥运筹对各时期水稻根系生长的影响均达到显著或极显著水平,且存在显著或极显著的互作效应。在水稻全生育期,秸秆覆盖下的各处理,各项根系指标均表现为先增加后减小的趋势。从不同生育期来看,与 S_0 相比,秸秆覆盖对中后期根系各项指标均有明显或显著的促进作用;但在水稻生育前期,由于受秸秆腐熟规律差异的影响,S_1、S_2 对根系各项指标的影响均有所差异。

在不同氮肥运筹模式下,两种秸秆覆盖均表现为在水稻生育前期其根表面积、根直径均随氮肥的后移而逐渐减小($N_1 > N_2 > N_3$),但总根长、根体积则随不同秸秆覆盖而有所不同,在齐穗期、成熟期总根长与根直径均以 N_2 处理最高,其中在成熟期 N_2 处理的各根系指标均显著高于其他氮肥处理。

表 2　秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻各时期根系构型参数的影响

Table 2　Effects of the straw mulch and N management on root morphology of rice

处理 Treatment		移栽后 20 d 20 days after the transplanting				移栽后 30 d 30 days after the transplanting			
		总根长 TRL (m)	根直径 RD (mm)	根表面积 TRSA (cm^2)	根体积 TRV (cm^3)	总根长 TRL (m)	根直径 RD (mm)	根表面积 TRSA (cm^2)	根体积 TRV (cm^3)
S_0	N_0	5.35 h	1.22 bcd	227.6 c	7.38 e	23.67 e	0.99 f	712.3 g	23.92 f
	N_1	14.77 abc	1.15 bcd	498.0 a	13.37 b	29.95 b	1.04 ef	906.1 ef	23.72 f
	N_2	12.51 cde	1.30 bc	491.3 a	15.36 b	23.52 e	1.02 ef	695.2 gh	15.36 i
	N_3	13.10 cd	1.14 bcd	471.0 a	13.51 b	23.69 e	1.21 c	905.6 ef	28.72 e
均值 Average		11.43	1.20	422.00	12.41	25.21	1.07	804.8	22.92
S_1	N_0	7.30 gh	1.00 de	257.8 c	7.26 e	26.17 cd	1.14 d	872.2 f	19.94 g
	N_1	9.60 fg	1.62 a	478.8 a	19.03 a	29.57 b	1.40 a	1002.7 c	55.92 a
	N_2	13.54 bcd	1.11 cde	486.2 a	13.90 b	27.07 c	1.21 c	964.5 cd	27.56 e
	N_3	10.45 ef	0.89 e	357.7 b	10.04 de	25.39 d	1.36 ab	1102.1 b	39.64 b
均值 Average		10.22	1.16	395.1	12.56	27.05	1.28	985.4	35.76
S_2	N_0	6.84 h	1.08 cde	223.6 c	10.57 cd	20.24 f	1.06 e	656.4 h	17.17 h
	N_1	15.91 a	1.06 cde	552.3 a	15.57 b	31.41 a	1.32 b	1245.9 a	54.92 a
	N_2	15.82 ab	1.06 cde	510.6 a	13.11 bc	30.79 ab	1.07 e	975.4 cd	33.04 d
	N_3	12.44 de	1.36b	537.5 a	19.93 a	26.34 cd	1.23 c	930.6 de	37.49 c
均值 Average		12.75	1.14	456.00	14.79	27.20	1.17	952.1	32.32
					F 值 *F* value				
	S	10.56**	0.63	4.15*	7.65**	24.91**	117.71**	159.75**	803.01**
	N	57.71**	2.52	54.40**	36.63	134.77**	86.45**	226.49**	1307.16**
	S×N	5.87**	7.94**	2.42	11.01**	33.59**	11.07**	61.83**	299.62**

续表 2 Table 2 continuous

处理 Treatment		齐穗期 Heading stage 总根长 TRL (m)	根直径 RD (mm)	根表面积 TRSA (cm^2)	根体积 TRV (cm^3)	成熟期 Ripening stage 总根长 TRL (m)	根直径 RD (mm)	根表面积 TRSA (cm^2)	根体积 TRV (cm^3)
S_0	N_0	95.43 f	0.75 d	2188.8 e	40.44 ef	60.05 f	0.67 e	1657.2 fg	29.25 ef
	N_1	76.94 g	1.53 a	1908.5 f	37.81 f	74.91 de	0.95 a	1736.2 fg	40.65 c
	N_2	117.52 cd	1.55 a	2951.3 bc	59.50 bc	104.63 b	0.75 cd	2527.8 c	49.05 b
	N_3	111.22 de	1.47 ab	2646.4 d	50.45 d	88.60 c	0.70 de	2076.5 de	38.79 c
均值 Average		100.28	1.33	2423.8	47.05	47.05	0.76	1999.4	39.44
S_1	N_0	82.74 g	0.80 d	2049.1 ef	40.41 ef	59.99 f	0.59 f	1576.0 g	33.46 de
	N_1	139.34 a	1.50 ab	3394.4 a	66.10 a	77.86 d	0.71 de	1889.8 ef	36.51 cd
	N_2	118.27 cd	1.49 ab	2939.1 bc	58.94 c	116.84 a	0.86 b	2920.5 b	58.35 a
	N_3	114.22 d	1.48 ab	2783.9 cd	54.18 d	68.01 ef	0.70 de	1556.0 g	28.34 f
均值 Average		113.64	1.39	2791.6	54.91	54.91	0.71	1985.6	39.17
S_2	N_0	95.43 f	0.75 d	2188.8 e	40.44 ef	60.05 f	0.67 e	1657.2 fg	29.25 ef
	N_1	76.94 g	1.53 a	1908.5 f	37.81 f	74.91 de	0.95 a	1736.2 fg	40.65 c
	N_2	117.52 cd	1.55 a	2951.3 bc	59.50 bc	104.63 b	0.75 cd	2527.8 c	49.05 b
	N_3	111.22 de	1.47 ab	2646.4 d	50.45 d	88.60 c	0.70 de	2076.5 de	38.79 c
均值 Average		111.42	1.37	2756.8	62.86	54.60	0.78	2767.00	46.98
					F 值 *F* value				
	S	28.23**	12.40**	35.72**	41.98**	28.33**	6.69**	109.16**	25.08**
	N	72.42**	330.20**	80.47**	91.42**	116.73**	41.16**	199.26**	103.81**
	S×N	43.12**	1.70	34.29**	34.13**	6.33**	19.06**	22.86**	14.07**

注(Note): S_0—无秸秆覆盖 No straw mulch; S_1—小麦秸秆覆盖 Wheat straw mulch; S_2—油菜秸秆覆盖 Rape straw mulch. TRL—Total root length; RD—Root diameter; TRSA—Total root surface area; TRV—Total root volume. 同列数据后不同字母表示处理间在5%水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level. *, ** 分别表示在0.05和0.01水平上差异显著 Indicate significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

表明秸秆覆盖下 N_2 的氮肥运筹模式可促进杂交稻各生育时期根系的平稳生长,从而保障了各时期杂交稻地上部的生长以及产量的形成。其中以 S_1N_2 和 S_2N_2 对杂交稻各时期根系形态指标的促进作用最为明显。

2.2 秸秆还田与氮肥运筹对干物质积累及茎鞘物质转运的影响

秸秆覆盖、氮肥运筹对杂交稻各时期干物质积累均具有显著或极显著影响(表3)。秸秆覆盖显著提高了各氮肥运筹模式下花后期干物质的积累量,提高幅度达0.5%～13.5%。而在各时期的干物质积累由于受秸秆覆盖的影响而有所差异,与 S_0 相比,S_1 下各处理各时期的干物质积累均显著提高;而在 S_2 下,在移栽后30 d到齐穗期其干物质积累量与 S_0 各处理差异不大,但在其他生育阶段干物质积累量均显著高于 S_0 下的对应处理。秸秆覆盖下各氮肥运筹模式的干物质积累量为:在 S_1 下,各氮肥运筹模式在生育前期的干物质积累量差异不大,但在齐穗期到成熟期 N_1、N_2 处理的干物质积累量均显著高于 N_3 处理;S_2 下,各氮肥运筹模式在移栽后20～30 d、齐穗期～成熟期的干物质积累量均随氮肥后移量的增加逐渐减少。

而在茎鞘干物质转运方面,秸秆覆盖下茎鞘干物质输出率与无秸秆覆盖(S_0)相比,差异较小,但

茎鞘干物质的输出率与转运率均较 S_0 有所降低。而秸秆覆盖下各氮肥运筹模式的茎鞘干物质输出率则随不同的秸秆覆盖而有所差异,在 S_1 下,茎鞘干物质输出量与输出率均为 $N_2 > N_3 > N_1$,茎鞘干物质转运率则是 N_1 高于 N_2、N_3 处理。S_2 下,茎鞘干物质输出量、输出率与转运率均以 N_2 处理最高,茎鞘干物质输出量与输出率分别比 N_1 提高了 18.9%、12.8%,比 N_3 提高了 13.0%、12.7%。

表 3　秸秆还田与氮肥运筹对杂交稻各生育阶段干物质积累与结实期茎鞘干物质转运的影响

Table 3　Effects of the straw mulch and N management on dry matter accumulation at each growing stage and dry matter transportation in stems and sheaths at the filling stage

处理 Treatment		各时期干物质积累量(t/hm^2) Dry matter accumulation at each growing stage			结实期茎鞘物质转运 Dry matter transportation in stems and sheaths		
		移栽后 20～30 d 20-30 DAT	移栽后 30 d～齐穗期 30 DAT-HS	齐穗～成熟期 HS-RS	输出量 Out-put weight (t/hm^2)	转运率 Transp. perc. (%)	输出率 Out-put perc. (%)
S_0	N_0	1.24 de	5.95 d	4.13 f	2.86 ab	38.11 a	48.11 a
	N_1	1.37 bcde	7.24 ab	5.37 d	2.70 bc	31.42 bc	40.73 bcd
	N_2	1.29 cde	7.26 ab	5.41 d	2.75 abc	31.28 bc	41.65 bc
	N_3	1.27 cde	7.20 ab	5.51 d	2.84 abc	32.40 b	42.43 b
均值 Average		1.29	6.91	5.10	2.79	33.30	43.23
S_1	N_0	1.19 e	6.41 cd	4.59 e	3.10 a	38.95 a	49.87 a
	N_1	1.68 a	7.71 ab	6.09 ab	2.74 abc	28.55 cd	38.55 d
	N_2	1.66 a	7.85 a	6.14 a	2.89 ab	29.40 bcd	40.61 bcd
	N_3	1.48 abc	7.51 ab	5.55 cd	2.79 abc	30.77 bcd	42.20 bc
均值 Average		1.50	7.37	5.59	2.88	31.92	42.81
S_2	N_0	1.24 de	5.85 d	4.30 ef	2.83 abc	37.78 a	48.55 a
	N_1	1.55 ab	7.02 bc	5.97 abc	2.49 c	27.62 d	37.95 d
	N_2	1.52 ab	7.25 ab	5.66 bcd	2.96 ab	32.24 b	43.10 b
	N_3	1.45 bcd	7.61 ab	5.54 cd	2.62 bc	29.58 bcd	39.44 cd
均值 Average		1.44	6.93	5.37	2.72	31.81	42.26
				F 值 *F* value			
	S	9.54**	3.69*	8.76**	1.28	1.44	0.90
	N	11.64**	18.35**	51.67**	2.63	25.35**	50.73**
	S×N	1.81	0.50	1.26	0.71	0.97	2.01

注(Note): S_0—无秸秆覆盖 No straw mulch; S_1—小麦秸秆覆盖 Wheat straw mulch; S_2—油菜秸秆覆盖 Rape straw mulch. 20-30 DAT—20 to 30 days after the transplanting. 30 DAT-HS—30 days after the transplanting to the heading stage. HS-RS—The heading stage to the ripening stage. 同列数据后不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level. *, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Indicate significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

2.3　秸秆覆盖与氮肥运筹对水稻主要生育期氮素吸收及氮肥利用率的影响

表 4 显示,秸秆覆盖、氮肥运筹对水稻各生育阶段氮素积累与氮素利用率均有一定的影响。与 S_0 相比,秸秆覆盖均在一定程度上提高了各氮肥运筹模式在各时期的氮素累积量、氮素农学利用率与氮素回收利用率,其中氮素总积累量增幅为 2.0%～11.8%,但氮素生理利用率下降了 5.9%～13.5%。

比较 S_1 和 S_2 处理，S_1 下各氮肥运筹模式在齐穗期前的氮素累积量均高于 S_2 下的相应各处理，但齐穗至成熟期氮素累积量均低于 S_2；而在总氮素积累量与氮肥利用率方面，S_1 下的各氮肥运筹模式除氮肥生理利用率以及齐穗至成熟期氮素积累量有所降低外，S_1 各处理的总氮素积累量、氮肥农学利用率均高于 S_2 的相应各处理。

不同秸秆覆盖下，随着氮肥比例后移量的增加，齐穗至成熟期氮积累、氮素生理利用率、总吸氮量、氮肥回收利用率以及农学利用率均先增加后减小；而移栽后 20～30 d 氮积累量与移栽后 30 d～齐穗期氮积累量分别表现为逐渐减小与逐渐增加的趋势。表明秸秆覆盖能够有效地增加水稻各时期的氮积累量及氮肥利用率。同时秸秆覆盖与合理的氮肥运筹模式相配合，更能够显著地提高各生育时期的氮素积累及氮肥利用率。小麦秸秆、油菜秸秆覆

表 4 秸秆覆盖与氮肥运筹对水稻氮素累积及利用的影响

Table 4 Effects of the straw mulch and N management on N uptake and utilization efficiency of rice

处理 Treatment		各生育阶段氮积累量(kg/hm²) N uptake at various growing stage				氮肥利用效率(%) N utilization efficiency		
		移栽后 20～30 d 20-30 DAT	移栽后 30 d～齐穗期 30 DAT-HS	齐穗～成熟期 HS-RS	总吸氮量 Total N uptake	氮素生理利用率 NPE	氮肥回收利用率 NRE	氮肥农学利用率 NAE
S_0	N_0	23.44 cd	63.76 e	10.65 e	107.06 e			
	N_1	33.27 ab	104.60 cd	11.62 de	174.32 d	19.17 ab	49.82 c	9.54 d
	N_2	24.95 c	115.20 abc	15.98 bcde	178.57 d	18.78 ab	52.97 c	9.94 cd
	N_3	25.45 c	125.20 a	20.90 abcd	187.96 c	18.47 abc	59.93 b	11.04 b
均值 Average		26.78	102.19	14.79	161.97	18.81	54.24	10.17
S_1	N_0	19.72 de	66.38 e	12.86 cde	110.05 e			
	N_1	38.33 a	110.74 bcd	21.45 abc	194.50 ab	17.01 ade	63.04 ab	10.71 bc
	N_2	32.51 b	119.97 ab	25.21 ab	197.83 a	17.73 bcd	65.52 a	11.56 ab
	N_3	31.61 b	125.98 a	17.11 bcde	191.66 bc	16.27 de	60.95 ab	9.91 cd
均值 Average		30.54	105.77	19.16	173.51	17.00	63.17	10.73
S_2	N_0	16.51 e	65.07 e	17.07 bcde	109.66 e			
	N_1	32.40 b	102.76 d	24.30 ab	191.45 bc	17.95 bc	60.59 ab	10.86 b
	N_2	30.96 b	113.81 bc	26.99 a	193.49 abc	19.58 a	62.10 ab	12.15 a
	N_3	22.65 cd	120.64 ab	26.66 a	191.56 bc	16.15 e	60.67 ab	9.77 d
均值 Average		25.63	100.57	23.75	171.54	17.89	61.12	10.93
					F 值 *F* value			
	S	7.63**	1.74	6.76**	34.36**	9.23**	22.08**	4.87*
	N	32.89**	127.42**	4.22*	1087.67**	8.68**	2.19	8.96**
	S×N	3.16*	0.20	0.90	5.66**	2.47	4.41*	3.79*

注(Note)：S_0—无秸秆覆盖 No straw mulch；S_1—小麦秸秆覆盖 Wheat straw mulch；S_2—油菜秸秆覆盖 Rape straw mulch. 20-30 DAT—20 to 30 days after the transplanting；30 DAT-HS—30 days after the transplanting to the heading stage；HS-RS—The heading stage to the ripening stage. NPE—Nitrogen physiological efficiency；NRE—Nitrogen recovery efficiency；NAE—Nitrogen agronomy efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间在5%水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level. *，** 分别表示在0.05和0.01水平上差异显著 Indicate significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels，respectively.

盖在 N_2 氮肥运筹模式下,其各时期氮素积累及氮肥利用率均具有显著的优势。

2.4　秸秆覆盖与氮肥运筹对稻谷产量及其构成因素的影响

表 5 结果表明,秸秆覆盖、氮肥运筹对稻谷产量均有极显著的影响。不同氮肥运筹模式下,与 S_0 相比,秸秆覆盖均表现为增产效应,且小麦秸秆覆盖平均增产效应高于油菜秸秆覆盖,其中小麦秸秆覆盖的增产幅度为 4.7%～9.4%,油菜秸秆覆盖的增产幅度为 0.6%～6.5%。而同种秸秆覆盖下,随氮肥穗肥后移量的增加其增产幅度均表现为 $N_2 > N_1 > N_3$(N_2 显著高于 N_3)。表明秸秆覆盖下,氮肥穗肥比例的适当提高能够起到一定的增产作用,以 N_2 运筹模式最佳(与 S_0N_2 相比,S_1N_2 与 S_2N_2 分别增产 9.4%、6.5%),尤以 S_1N_2 的增产效应最好。

表 5　秸秆覆盖与氮肥运筹对稻谷产量及灌溉水生产力的影响

Table 5　Effects of straw mulch and N fertilizer management on grain yield and water use efficiency of rice

处理 Treatment		有效穗 Effective panicles ($\times 10^4/hm^2$)	穗粒数 Spikelets (No./panicle)	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain wt. (g)	实际产量 Grain yield (kg/hm^2)	灌溉水生产力 Water use efficiency (kg/m^3)
S_0	N_0	131.90 f	170.63 d	96.53 a	31.71 b	6718.67 i	1.62 i
	N_1	158.60 bcd	172.58 cd	94.89 ab	31.72 b	8005.97 f	1.93 f
	N_2	155.60 cd	172.65 cd	94.15 b	32.69 a	8061.16 ef	1.94 ef
	N_3	151.80 de	179.51 abc	94.09 b	32.42 a	8209.04 def	1.98 def
	平均 Average	149.47	173.84	95.12	32.14	7748.71	1.87
S_1	N_0	138.30 f	177.87 bcd	94.78 ab	31.32 bc	7259.33 g	1.75 g
	N_1	168.20 ab	181.34 ab	91.32 d	31.55 bc	8705.34 ab	2.10 ab
	N_2	170.00 a	178.57 bcd	93.57 bc	32.26 a	8820.04 a	2.13 a
	N_3	155.80 cd	183.07 ab	93.67 b	32.29 a	8597.54 bc	2.07 bc
	平均 Average	158.08	180.21	92.84	31.86	8345.56	2.01
S_2	N_0	141.20 ef	177.09 bcd	94.02 b	31.19 c	6941.54 h	1.67 h
	N_1	168.00 ab	182.45 ab	88.96 e	31.21 c	8408.09 cd	2.03 cd
	N_2	164.20 abc	182.68 ab	94.08 b	31.73 b	8582.30 bc	2.07 bc
	N_3	156.20 cd	187.06 a	91.58 cd	31.57 bc	8260.97 de	1.99 de
	平均 Average	157.4	182.32	92.66	31.43	8048.23	1.94
				F 值 *F* value			
	S	4.54*	4.57*	2.92	2.41	6.56**	4.53*
	N	24.16**	1.94	2.32	3.25*	28.51**	19.31**
	S×N	0.33	0.13	0.61	0.62	0.22	0.43

注(Note): S_0—无秸秆覆盖 No straw mulch; S_1—小麦秸秆覆盖 Wheat straw mulch; S_2—油菜秸秆覆盖 Rape straw mulch. 同列数据后不同字母表示处理间在 5% 水平差异显著 Values followed by different letters in a column are significant among the treatments at the 5% level. *, ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著 Indicate significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

由表 5 还可看出,秸秆覆盖、氮肥运筹对水稻各产量构成因子及灌溉水生产力也均有一定的影响。不同秸秆覆盖之间,其有效穗数、穗粒数及灌溉水生产力均为 $S_1 > S_2 > S_0$,而结实率与千粒重除在 N_1 处理下 $S_0 > S_1 > S_2$ 外,其他处理均为 $S_0 > S_2 > S_1$。而在不同氮肥运筹模式下,两种秸秆对各产量因子与灌溉水生产力的影响有所差异。在 S_1 处理下,随氮肥后移比例的增加其有效穗与灌溉水生

产力先增加后减小;穗粒数先减少后增加;结实率与千粒重则呈逐渐增加的趋势。而 S_2 处理表现为除有效穗数随氮肥后移比例的增加而有所减少外,其他各因子均呈先增加后减少的趋势。表明秸秆覆盖与氮肥运筹均能够对水稻各产量构成因子(特别是有效穗、穗粒数与千粒重)有一定程度的调节作用,从而最终达到水稻高产与灌溉水高效利用的目的。

2.5 根系生长与氮肥吸收利用以及产量的关系

由表6可以看出,产量与各生育时期根干重、总根长以及根体积均呈极显著的正相关关系,而与各时期的根冠比除在移栽后30 d有显著的负相关外($r=-0.43^{*}$),与其他各时期均无显著相关性。总氮素积累量与各生育时期根干重、根体积与总根长呈显著或极显著的正相关,与成熟期根冠比呈显著正相关($r=0.38^{*}$),与移栽后30 d根冠比呈极显著负相关($r=-0.50^{**}$),而与其他各时期根冠比无显著相关性。

表6 根系生长与氮肥吸收利用以及产量的相关性分析

Table 6 Correlation coefficients between the root growth and nitrogen uptake and utilization and grain yield of rice

生育期 Growth Stage	指标 Index	各时期氮素积累量 Nitrogen uptake at each stage			总氮积累量 Total N accumulation	产量 Grain yield	氮素回收利用率 NUE
		移栽后20～30 d 20-30 DAT	移栽后30 d～齐穗期 30 DAT-HS	齐穗～成熟期 HS-RS			
移栽后20 d 20 DAT	根干重 TDW	0.46*	0.37	0.19	0.47*	0.49**	-0.42*
	根冠比 RSR	-0.21	-0.22	0.06	-0.29	-0.20	-0.08
	总根长 TRL	0.46*	0.67**	0.53**	0.77**	0.71**	-0.20
	根体积 TRV	0.36	0.62**	0.52**	0.68**	0.62**	-0.02
移栽后30 d 30 DAT	根干重 TDW	0.54**	0.37	0.30	0.48**	0.58**	0.35
	根冠比 RSR	-0.53**	-0.39*	-0.17	-0.50**	-0.43*	0.11
	总根长 TRL	0.68**	0.34	0.28	0.55**	0.60**	0.12
	根体积 TRV	0.63**	0.39*	0.39*	0.58**	0.60**	0.49**
齐穗期 Heading stage	根干重 TDW	0.74**	0.61**	0.39*	0.78**	0.75**	0.23
	根冠比 RSR	0.31	0.04	0.08	0.20	0.15	0.03
	总根长 TRL	0.55**	0.55**	0.48**	0.67**	0.70**	0.63**
	根体积 TRV	0.48**	0.65**	0.60**	0.74**	0.75**	0.53**
成熟期 Ripening stage	根干重 TDW	0.44*	0.67**	0.70**	0.77**	0.72**	0.48**
	根冠比 RSR	0.10	0.33	0.59**	0.38*	0.29	0.32
	总根长 TRL	0.28	0.63**	0.54**	0.68**	0.64**	0.30
	根体积 TRV	0.21	0.49**	0.59**	0.56**	0.55**	0.15

注(Note): DAT—Days after the transplanting; TDW—Root dry weight; RSR—Root to shoot ratio; TRL—Total root length; TRV—Total root volume. 20-30 DAT—20 to 30 days after the transplanting; 30 DAT-HS—30 days after the transplanting to the heading stage. HS-RS—The heading stage to the ripening stage; NUE—N recovery efficiency. *, ** 分别表示在0.05和0.01水平上差异显著 Indicate significantly different at the 0.05 and 0.01 probability levels, respectively.

各生育期水稻根系生长与氮素积累量的相关性为:移栽后20～30 d氮素积累量与移栽后20 d的根干重、总根长均呈显著正相关(均为 $r=0.46^{*}$);移栽后20 d的根体积与总根长、移栽后30 d的根体积、齐穗期和成熟期的总根长、根体积和根干重与各时期的氮素积累均呈显著或极显著的正相关关系。而移栽后30 d根冠比与移栽后20～30 d、移栽后30 d～齐穗期氮素积累量呈极显著与显著负相关(分别为 $r=-0.53^{**}$ 与 -0.39^{*})。在根系生长与氮素回收利用率的关系方面,氮素回收利用率与移栽后20 d的根干重呈显著负相关($r=-0.42^{*}$),而与根冠比、根体积与总根长均有一定

的负相关关系,但均不显著;与移栽后 30 d 根体积、齐穗期总根长与根体积以及成熟期根干重均具有极显著的正相关(r 分别为 0.49**、0.63**、0.53** 与 0.48**)。

3 讨论

3.1 秸秆还田与氮肥运筹对水稻根系生长的影响

前人研究结果表明,还田秸秆(特别是在秸秆快速腐熟阶段)分解过程中分离出大量的丁酸等化感化合物对水稻根系具有毒害和抑制作用[15-16]。本试验研究显示,在移栽后 20 d 时,秸秆覆盖下各处理的根干重等均低于 S_0,但从移栽后 30 d 开始水稻根干重等根系各项指标开始逐渐高于 S_0,进一步证明秸秆覆盖在水稻生育前期对根系生长有一定的抑制作用。但在水稻整个生育时期中,秸秆覆盖对水稻根系生长具有显著促进的作用[15],并且在水稻生育后期起到了营养补充以及较厚的覆盖层起到保水保温作用,进而促进了水稻后期的根系生长。

本研究还发现,秸秆覆盖下不同氮肥运筹对水稻根系生长也存在显著影响,前期施肥量大的 N_1 处理虽然能够有效地降低在水稻生育前期由于秸秆腐熟引起的对根系生长的抑制作用,并增加了水稻根干重、总根长、根表面积以及根体积等,但其却导致了生育中后期的营养供应不足,从而引起根系的早衰;而重施穗肥的 N_3 处理虽然前期由于秸秆腐熟引起的对水稻根系的生长抑制作用较轻,而后期氮肥的大量施用可以促进水稻根系的快速生长,但由于前期氮肥施用不足以及秸秆腐熟引起的“争肥现象”,导致根冠比失衡,最终影响了产量的形成;而 N_2 处理,在水稻生育前期,虽然也存在秸秆腐熟对水稻根系产生的抑制作用,在生长的中后期,由秸秆腐熟释放的养分以及无机氮肥的适量补充,促进了水稻根系的生长,有利于水稻穗部的发育和籽粒灌浆结实,从而提高了籽粒产量。

3.2 秸秆还田与氮肥运筹对水稻干物质积累及转移的影响

前人在秸秆还田与氮肥运筹对水稻干物质积累影响方面的研究较多,但结论不一。有研究表明,在秸秆腐熟过程中,大量微生物的繁殖与对秸秆的分解会消耗土壤中大量的氮素[16],引起与作物生长对氮素的竞争,造成对作物的氮素供应不足,从而影响作物生长,同时作物秸秆的腐熟速率均为“前快后慢”的趋势[17],因此,常会在水稻生育前期造成对干物质积累等的抑制[18],本试验结果显示,与 S_0 相比,秸秆覆盖下各氮肥处理的干物质积累强度随着水稻生育进程均呈现出由弱到强的特点,即对水稻前期的干物质积累均有一定的抑制作用,但对水稻中后期的干物质积累等方面均具有显著的促进作用[19-20]。而从氮肥运筹来看,有研究表明,通过增加基蘖肥的施用比例能够有效地降低或消除秸秆覆盖后的抑制效应[21-22]。本研究结果发现,在水稻生长前期,秸秆覆盖下虽然氮肥运筹比例的前移显著增加了干物质的累积量,并且随氮肥前移比例的增加而增加,但相对无秸秆覆盖而言还是有所减少,且氮肥的过度前移也会影响后期的氮素供应;而在重施穗肥情况下,由于前期施肥量低,加之秸秆覆盖的“争肥”,容易出现“缺肥”现象,造成地上部群体过小,故而减少了各生育时期干物质的积累量;N_2 处理(基肥∶蘖肥∶穗肥为 3∶3∶4),能有效地平衡前期与后期群体的发育,提高水稻中后期的干物质积累量,增加了茎鞘的干物质转运量。

3.3 不同种类秸秆还田与氮肥运筹对水稻各时期氮素吸收及氮肥利用率的影响

秸秆还田能否代替一定的化肥施用量与养分利用效率一直为许多学者所关心的问题[23-24],Van Asten 等[24]认为秸秆还田能够通过自身的氮素分解固氮与增加外源氮素的固定量,从而增加了氮肥的利用率。本试验结果也显示,秸秆覆盖下水稻总氮素积累、氮素农学利用率与氮素生理利用率均比无秸秆覆盖处理高,这与上述结论是一致的。然而小麦秸秆覆盖与油菜秸秆覆盖相比,小麦秸秆覆盖还田下的水稻各生育时期的氮素积累量以及总吸氮量都显著高于油菜秸秆覆盖还田,而且各个生育阶段的氮素积累速率也有显著差异。其主要原因在于秸秆覆盖于宽行中,而油菜秸秆较高的质量与体积,导致在实施水稻干湿交替灌溉模式时油菜秸秆较小麦秸秆更难获得较好的腐熟所需环境,影响了油菜秸秆腐熟进展与氮释放;与此同时,大量油菜杆的腐熟也导致有害物质的聚集影响了水稻生育前期根系的生长,进而减小了水稻氮素的吸收,但由于其较好的保水保湿的作用能够有效地保证生育中后期的根系生长,从而促进了氮素的后期积累。而不同氮肥运筹条件下,N_3 较 N_1、N_2 的氮素吸收利用率均有所减少[19,21]。同时,秸秆覆盖能够有效地减少水稻田间水分蒸发,增加了灌溉水生产力(0.5%～9.7%)。与水稻各时期干物质积累规律相关性表明,各时期干物质积累量与氮素积累量、产量均呈极显著正相关关系(r = 0.47**～0.93**),同时各

时期氮素积累与根系相关性分析结果也表明,水稻各时期根干重、根体积以及总根长与总氮积累均呈显著或极显著的正相关($r=0.38^{*}\sim0.78^{**}$),因而促进各时期的根系生长能显著地增加产量与总的氮素积累,进一步表明了小麦、油菜秆覆盖与合理的氮肥运筹配合能够有效地促进水稻根系生长,改善水稻关键生育时期根干重、总根长等根系形态特征,从而保证水稻地上、地下部的协调生长,促进水稻生育期的干物质快速积累及氮素吸收,最终实现水稻各生育时期的氮素积累及总氮积累、产量及灌溉水生产力的同步增加。然而,增加移栽后20 d根系干重能够显著增加氮素的积累,但也导致氮肥回收利用率显著降低($r=-0.42^{*}$),而增加齐穗期根体积与总根长、成熟期的根干重能够对氮素回收利用率起到极显著的促进作用,这是否由于生育前期秸秆的腐熟,导致氮素的大量消耗以及产生的有害物质对水稻根系生长的抑制作用,但前期的快速腐熟能够加快秸秆的养分释放,从而促进后期的氮素积累与利用效率的增加有待于进一步研究。

3.4 秸秆覆盖与氮肥运筹对杂交稻产量的影响

有研究表明,秸秆还田能够显著提高水稻产量,陈培峰等[25]与李勇等[26]的研究表明,小麦秸秆翻耕还田较不还田处理,显著增加了水稻的有效穗数且增产幅度达6.1%～14.5%;同时,麦秆还田处理下氮肥穗肥比例前移(基蘖肥:穗肥分别为6.5:3.5与7:3)时与穗肥不前移运筹模式(基蘖肥:穗肥为5:5)相比能够更显著地提高水稻的有效穗数、千粒重以及产量。本试验研究表明,小麦与油菜秸秆覆盖均显著提高了水稻产量,增产幅度分别达到了4.7%～9.4%与0.6%～6.5%。而从秸秆还田下不同氮肥运筹模式对水稻产量构成因素的影响来看,小麦秸秆与油菜秸秆覆盖处理下均表现为N_2(基肥:蘖肥:穗肥为3:3:4)较N_3处理(基肥:蘖肥:穗肥为3:1:6)的有效穗数、千粒重与结实率以及产量均显著提高。较氮肥后移模式,虽然N_1(基肥:蘖肥:穗肥为5:3:2)在有效穗、产量等方面有所提高,但与N_2运筹模式相比在结实率、千粒重与产量方面均有所下降,最终导致产量相对N_2处理有所降低。比较油菜、小麦两种秸秆覆盖对产量的影响,其结果显示,麦秆覆盖较油菜秆覆盖增产效果更佳(增产幅度为2.8%～4.1%)。同时,秸秆覆盖能够有效地减少水稻田间水分蒸发,增加了灌溉水生产力(0.5%～9.7%)。与根系相关性的分析表明,产量与水稻各生育时期根干重、根冠比、总根长等根系形态特征均呈显著或极显著的正相关关系,表明秸秆覆盖对水稻根系生长的有效促进,也是提高水稻产量的重要因素[16,27]。

4 结论

本研究结果表明,油菜、小麦秸秆覆盖均能够有效的提高杂交稻各生育时期根系生长、干物质与氮素积累,提高氮肥的利用效率,其中,小麦秸秆覆盖优于油菜秸秆覆盖。不同秸秆覆盖下,以基肥:分蘖肥:穗肥为3:3:4的氮肥运筹模式能及时对主要生育时期的根系生长进行调控,增加有效穗数,提高抽穗至成熟期的物质转运率与氮肥利用率,增加稻谷产量;同时,从不同生育时期根系指标与氮素吸收利用及产量的相关性分析结果可以看出,促进水稻各生育时期(尤其是齐穗期)根系的生长能够显著地促进氮素的利用以及产量的提高。

参 考 文 献:

[1] 谢光辉, 王晓玉, 韩东倩, 等. 中国非禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 9-17.
Xie G H, Wang X Y, Han D Q *et al*. Harvest index and residue factor of noncereal crop in China [J]. Journal of China Agricultural University, 2011,16(1): 9-17.

[2] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 173-179.
Gao L W, Ma L, Zhang W F *et al*. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. Transations of Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 173-179.

[3] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴-2012 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2012. 13-16.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook-2012 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012. 13-16.

[4] Pathak H, Singh R, Bhatia A *et al*. Recycling of rice straw to improve wheat yield and soil fertility and reduce atmospheric pollution[J]. Paddy Water Environment, 2006, 4 (2): 111-117.

[5] Kumar K, Goh K M, Scott W R *et al*. Effects of ^{15}N-labelled crop residues and management practices on subsequent winter wheat yields[J]. The Journal of Agricultural Science, 2001,136 (1): 35-53.

[6] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用效率的策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H *et al*. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095-1103.

[7] 江立庚, 曹卫星. 水稻高效利用氮素的生理机制及有效途径[J]. 中国水稻科学, 2002, 16 (3): 261-264.
Jiang L G, Cao W X. Physiological mechanism and approaches for efficient nitrogen utilization in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2002, 16(3): 261-264.

[8] Blaud A, Lerch T Z, Chevallier T *et al*. Dynamics of bacterial communities in relation to soil aggregate formation during the

decomposition of ^{13}C-labeled rice straw[J]. Applied Soil Ecology, 2012 (53): 1-9.

[9] 葛立立, 王康君, 范苗苗, 等. 秸秆还田对土壤培肥与水稻产量和米质的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(12): 1-6.
Ge L L, Wang K J, Fan M M *et al*. Effect of straw returning on soil fertility, grain yield and quality of rice [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(12): 1-6.

[10] 吴文革, 张四海, 赵决建, 等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 757-764.
Wu W G, Zhang S H, Zhao J J *et al*. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north edge of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(5): 757-764.

[11] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 水旱轮作制度下连续秸秆覆盖对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 植物营养与肥料科学, 2012, 18(3): 587-594.
Wu J, Guo X S, Lu J W *et al*. Effects of continuous straw mulching on soil physical and chemical properties and crop yield in paddy-upland rotation system [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(3): 587-594.

[12] Takahashi S, Uenosono S, Ono S. Short and long-term effects of rice straw application on nitrogen uptake by crops and nitrogen mineralization under flooded and upland conditions [J]. Plant and Soil, 2003, 251 (2): 291-301.

[13] 李旭毅, 孙永健, 程洪彪, 等. 两种生态条件下氮素调控对不同栽培方式对水稻干物质积累和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17 (4): 773-781.
Li X Y, Sun Y J, Chen H B *et al*. Effects of nitrogen regulation on dry matter accumulation and grain yield of rice under different cultivation models and two kinds of ecological conditions [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 773-781.

[14] 李旭毅, 孙永健, 程宏彪, 等. 氮肥运筹和栽培方式对杂交籼稻Ⅱ498 结实期群体光合特性的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(9): 1650-1659.
Li X Y, Sun Y J, Chen H B *et al*. Effects of nitrogen application strategy and cultivation model on the performances of canopy apparent photosynthesis of indica hybrid rice er you 498 during filling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(9): 1650-1659.

[15] 陈新红, 叶玉秀, 许仁良, 等. 小麦秸秆还田量对水稻产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2009, (1): 54-56.
Chen X H, Ye Y X, Xu R L *et al*. Effects of wheat straw residue amount on grain yield and quality in rice[J]. Crops, 2009(1): 54-56.

[16] Jawson M D, Elliott L F. Carbon and nitrogen transformations during wheat straw and root decomposition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1986, 18(1): 15-22.

[17] 刘世平, 陈文林, 聂兴涛, 等. 麦稻两熟地区不同埋深对还田秸秆腐解进程的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1049-1053.
Liu S P, Chen W L, Nie X T *et al*. Effect of embedding depth on decomposition course of crop residues in rice-wheat system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13 (6): 1049-1053.

[18] 马宗国, 卢绪奎, 万丽, 等. 小麦秸秆还田对水稻生长及土壤肥力的影响[J]. 作物杂志, 2003, (5): 37-38.
Ma Z G, Lu X K, Wan L *et al*. Effects of wheat straw returning on rice growth and soil nutrients[J]. Crops, 2003, (5): 37-38.

[19] 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.

[20] 叶文培, 谢小立, 王凯荣, 等. 不同时期秸秆还田对水稻生长发育及产量的影响[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(1): 65-70.
Ye W P, Xie X L, Wang K R *et al*. Effects of rice straw maturing in different periods on growth and yield of rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2008, 22(1): 65-70.

[21] 赵锋, 程建平, 张国忠, 等. 氮肥运筹和秸秆还田对直播稻氮素利用和产量的影响[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(18): 3701-3704.
Zhao F, Cheng J P, Zhang G Z *et al*. Effect of nitrogen fertilizer regimes and returning straw on N availability and yield of direct-sowing rice[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2011, 50(18): 3701-3704.

[22] 董明辉, 陈培峰, 顾俊荣, 等. 麦杆还田与氮肥运筹对超级杂交稻茎鞘物质转运与籽粒灌浆特性的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(4): 673-681.
Dong M H, Chen P F, Gu J R *et al*. Effects of wheat straw-residue applied to field and nitrogen management on photosynthetic transportation of stem and sheath and grain-filling characteristics in super hybrid rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(4): 673-681.

[23] Saigusa M, Hanaki M, Ito T. Decomposition pattern of rice straw in poorly drain paddy soil and recovery rate of straw nitrogen by rice plant in no-tillage transplanting cultivation [J]. Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 1999, 70(2): 157-163.

[24] Van Asten P J A, Van Bodegom P M, Mulder L M, Kropff M J. Effect of straw application on rice yields and nutrient availability on an alkaline and a pH-neutral soil in a Sahelian irrigation scheme[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, 72(3): 255-266.

[25] 陈培峰. 董明辉, 顾俊荣, 等. 麦秸还田与氮肥运筹对超级稻强弱势粒粒重与品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2012, 26(6): 715-722.
Chen P F, Dong M H, Gu J R *et al*. Effects of returning wheat residue to field and nitrogen management on grain weight and quality of superior and inferior grain in super rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2012, 26(6): 715-722.

[26] 李勇, 曹红娣, 邓九胜, 等. 小麦秸秆全量还田对土壤速效氮及水稻产量的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009, 25 (4): 46-51.
Li Y, Cao H D, Deng J S *et al*. Effects of return total wheat straw on soil mineral nitrogen dynamics and rice yield [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2009, 25 (4): 46-51.

[27] 蔡昆争, 骆世明, 段舜山. 水稻群体根系特征与地上部生长发育与产量的关系[J]. 华南农业大学学报(自然科学版), 2005, 26(2): 1-4.
Cai K Z, Luo S M, Duan S S. The relationship between root system of rice and aboveground characteristics and yield [J]. Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition), 2005, 26(2): 1-4.