

# 稻油轮作下油菜秸秆还田与水氮管理对杂交稻群体质量和产量的影响

殷尧翥 郭长春 孙永健\* 武云霞 余华清 孙知白 张桥 王海月 杨志远 马均  
(四川农业大学 水稻研究所/作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 四川 温江 611130; \*通讯联系人, E-mail: yongjians1980@163.com)

## Effects of Rape Straw Retention and Water and Nitrogen Management on Population Quality and Yield of Hybrid Rice Under Rice-rape Rotation

YIN Yaozhu, GUO Changchun, SUN Yongjian\*, WU Yunxia, YU Huaqing, SUN Zhibai, ZHANG Qiao, WANG Haiyue, YANG Zhiyuan, MA Jun

(Rice Research Institute of Sichuan Agricultural University/Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Wenjiang 611130, China; \*Corresponding author, E-mail: yongjians1980@163.com)

**Abstract:** **【Objective】** It has great significance to investigate the interaction mode between straw returning and water-nitrogen (N) management on rice population quality and yield. **【Method】** Hybrid rice (Yixiangyou 2115) was used as experimental materials with two straw retention ways as main plot (crop straw composting and direct straw returning) and conventional irrigation and alternate irrigation as split plot and four N rates as split-split plot. The relationship between population quality and yield of hybrid rice were also analyzed. **【Results】** Straw returning and water-nitrogen (N) management exert significant or extremely significant effects on biomass accumulation of hybrid rice, LAI and grain yield. Correlation analysis indicated that there existed significantly or highly significantly positive correlations between population quality index and yield. The straw composting had a highly significant effect on population growth rate and grain yield compared with direct straw returning, the high valid leaf area index at the full heading stage increased by 4.71%–6.50%, Dry matter weight of population during maturity increased by 9.22%–13.30%, and the effective panicle number increased by 5.9%–9.8%, the spikelet number by 1.5%–5.2%, the yield by 9.5%–13.4%. Compared with conventional irrigation, controlled alternative irrigation could ensure sufficient panicle number, increase dry matter accumulation, slow down leaf area attenuation rate from jointing stage to full heading stage, accelerate population growth rate at seed-setting stage, and increase grain number per panicle and yield significantly. With the increase of nitrogen rate, the number of tillers, dry matter accumulation, effective leaf area ratio and effective leaf area rate all increased at first and then decreased. **【Conclusion】** From the perspective of the effect of the three factors, straw composting, alternative irrigation, 150 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen level were the optimum treatment of water saving and N reduction in this experiment. It can significantly improve efficient LAI of full heading (4.80–5.32), enhance the high dry matter accumulation rate during filling stage (6.94–7.36 t/hm<sup>2</sup>), notably increase effective panicle number (181.6×10<sup>4</sup>–220.9×10<sup>4</sup>/hm<sup>2</sup>) and grain number per panicle(180–200), achieving grain yield of hybrid rice of 10328.1–12464.1 kg/hm<sup>2</sup>.

**Key words:** hybrid rice; straw returning; irrigation regimes; N rate; population quality; yield

**摘要:** **【目的】** 研究秸秆还田与水氮配施的理论与技术, 探讨对水稻群体质量和产量形成的影响。 **【方法】** 选用宜香优 2115 为试验材料, 三因素裂区设计, 主区为油菜秸秆堆腐还田和直接还田两种秸秆还田方式, 裂区为淹水灌溉和控制性交替灌溉两种水分管理方式, 裂区为 4 种施氮量, 分析对水稻群体质量及产量的影响, 并探讨秸秆还田与水氮管理模式下群体质量和产量形成的关系。 **【结果】** 秸秆还田与水氮管理对主要生育时期水稻干物质积累量、叶面积指数(LAI)及产量均存在显著或极显著的调控效应, 互作效应显著; 且群体质量指标与产量呈显著或极显著正相关。秸秆堆腐还田对水稻群体质量指标的调控显著高于秸秆直接还田, 齐穗期高效叶面积指数提高了 4.71%~6.50%, 群体干物质显著增加了 9.22%~13.30%; 并对水稻产量及其构成因素影响显著, 有效穗数

收稿日期: 2018-09-13; 修改稿收到日期: 2019-02-26。

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2018YFD0301202, 2017YFD0301701, 2016YFD0300506); 四川省教育厅重点项目(16ZA0044); 四川省学术和技术带头人培养支持经费资助项目(2016-183); 四川省育种攻关专项(2016NYZ0051)。

及每穗粒数分别提高了 5.9%~9.8% 和 1.5%~5.2%，从而使产量提高了 9.5%~13.4%。控制性交替灌溉相对于淹灌能保证足够的穗数，提高干物质积累量，减缓拔节至齐穗期叶面积衰减，加快结实期群体生长率，利于穗粒数及产量的提高；且随着氮肥用量的增加，分蘖数、干物质积累量、有效叶面积率和高效叶面积率均呈先增后降的趋势。

【结论】从三因素间的互作效应来看，秸秆堆腐还田处理下，控制性交替灌溉与施氮量 150 kg/hm<sup>2</sup>，可有效提高齐穗期高效叶面积指数(4.80~5.32)，具有较高的结实期干物质积累量(6.94~7.36 t/hm<sup>2</sup>)，显著提高了有效穗(181.6 万~220.9 万/hm<sup>2</sup>)及每穗粒数(180~200 粒)，从而显著提高产量达到 10328.1~12464.1 kg/hm<sup>2</sup>，为本研究节水减氮增效最佳的处理。

关键词：杂交水稻；秸秆还田；灌水方式；施氮量；群体质量；产量

中图分类号：S143.1；S511.048

文献标识码：A

文章编号：1001-7216(2019)03-0257-12

农作物秸秆含有丰富的碳、氮元素，是重要的绿色环保有机源之一，可以提高微生物数量及酶活性，对改善土壤理化性状具有积极作用。近年来，油菜种植面积不断扩大，2011—2015 年全国油料油菜的年种植面积达 1385.5 万 hm<sup>2</sup>，其中油菜种植面积占油料作物的 53.56%，产量占 41.37%<sup>[1]</sup>。稻油轮作是四川稻区的主要种植模式之一，经过多年研究、示范与推广，油菜秸秆机械翻埋还田技术在油稻两熟区得到了有效的推广。有研究表明油菜秸秆还田可以提高土壤肥力<sup>[2-3]</sup>，但油菜秸秆还田后，秸秆的快速腐解期与水稻分蘖期重合，发生“争氮”现象，推迟水稻返青期与分蘖期，影响水稻前期正常生长<sup>[4-5]</sup>。同时，水资源日益短缺及氮肥的过量施用，对农业环境造成了一系列环境问题。然而水稻生产对水、氮依赖程度较高；合理的水氮管理，可提高水、氮的利用效率<sup>[6-9]</sup>。已有研究表明，干湿交替灌溉可增加有效穗数和结实率<sup>[6,10]</sup>，且能提高分蘖成穗率及剑叶光合速率，增加花后干物质积累量<sup>[7,11]</sup>。另外，氮肥对干物质积累、叶面积指数、群体茎蘖数和产量构成均有显著影响<sup>[12-13]</sup>。张军等<sup>[14]</sup>认为，高地力田施氮量 240~270 kg/hm<sup>2</sup>，中地力田 285~315 kg/hm<sup>2</sup>，低地力田 330~360 kg/hm<sup>2</sup> 较为合适；魏海燕等<sup>[15]</sup>认为，超级粳稻产量随着施氮量增加呈先增后减的趋势，以 300 kg/hm<sup>2</sup> 最高。稻-油轮作是四川主要的耕作制度，如何合理有效地利用油菜秸秆，以及不同油菜秸秆还田处理下水、氮耦合对水稻产量及群体生长发育的影响鲜见报道。为此，本研究采用大田试验，探究两种秸秆还田方式下水、氮配施对水稻产量形成和群体生长的影响，以实现在水稻生产中节水节肥、高产优质环保的可

持续性发展目标，为集成水稻栽培技术提供理论和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

在前期水氮互作<sup>[6]</sup>、灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式<sup>[7]</sup>等研究的基础上，于 2017 年和 2018 年分别在四川省成都市温江区四川农业大学水稻所试验农场、眉山市东坡区四川农业大学核心试验基地开展进一步试验。品种均选用优质高产适用性广的超级杂交籼稻宜香优 2115。试验田前茬均油菜，耕层土壤质地为砂壤土，理化性状见表 1。

两年试验均于 4 月 23 日播种，早育秧，5 月 30 日移栽，单株栽植，行、株距为 33.3 cm×16.7 cm。本研究在前期研究确定灌溉方式及施肥方式<sup>[4-5]</sup>的基础上，采用秸秆处理还田方式×灌水方式×氮肥运筹 3 因素裂区试验，主区设 2 种秸秆还田方式：1) 秸秆堆腐还田(A<sub>1</sub>)。将粉碎成 10 cm 的油菜秆铺堆 20 cm 厚，均匀泼洒秸秆腐熟剂(爱益康生物菌肥发酵剂)水液，用量为每 1000 kg 秸秆泼洒 2 kg 腐熟剂水液；然后堆第 2 层，以此类推，共堆铺 10 层后，覆膜密封，控制温度不高于 60℃，相对湿度保持在 60%~70%，在腐熟过程中每 24 h 对堆体不同部位的温度和湿度进行测定，当温度超过 60℃时采用通风降温，湿度小于 60%采用喷水增湿、降温，堆腐 8 d 秸秆呈深褐色腐烂状态还田。2) 秸秆粉碎直接还田(A<sub>2</sub>)。油菜机械化收割同时秸秆切碎还田，留茬高度及切碎秸秆均不超过 10 cm，田间及时上水泡 24 h 软化秸秆，然后用旋耕灭茬机械旋埋秸秆，

表1 试验田耕层土壤(0-20 cm)理化性状及秸秆还田量

Table 1. Physicochemical properties of soil (0-20 cm) in the experiments.

年份 Year	全氮 Total N/(g kg <sup>-1</sup> )	有机质 Organic matter/(g kg <sup>-1</sup> )	速效养分 Available nutrient/(mg kg <sup>-1</sup> )			pH	秸秆量 Rape straw amount/(t hm <sup>-2</sup> )
			N	P	K		
2017	1.17	19.3	91.3	31.3	86.3	6.4	10.34
2018	1.81	24.8	112.5	22.8	107.1	5.9	11.18

5 d 后再次旋耕平田。

裂区设两种灌水方式: 1) 淹灌(W<sub>1</sub>)。水稻移栽后田面一直保持 1~3 cm 水层, 收获前 1 周自然落干。2) 控制性交替灌溉(W<sub>2</sub>)。浅水(1~1.5 cm)栽秧, 移栽后 5~7 d 田间保持 2 cm 水层确保秧苗返青, 无效分蘖期晒田; 其他各生育阶段均采用灌浅水(2~2.5 cm), 自然落干至土壤水势为-25 kPa 时(用中国科学院南京土壤研究所生产的真空表式土壤负压计测定)再灌水的交替灌溉。

准确记载每次灌水量, 确保相同灌溉方式的小区每次灌水量一致, 除去泡田用水, W<sub>1</sub>和W<sub>2</sub>各处理全生育期灌溉用水量分别为8510.0 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>和4490.0 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>。

裂区为4种施氮(尿素, 含N 46%)水平: 1) N<sub>0</sub>, 不施氮; 2) N<sub>1</sub>, 75 kg/hm<sup>2</sup>; 3) N<sub>2</sub>, 150 kg/hm<sup>2</sup>; 4) N<sub>3</sub>, 225 kg/hm<sup>2</sup>。按 m<sub>基肥</sub>: m<sub>蘖肥</sub>(移栽后 7d 施用): m<sub>穗肥</sub>(倒 4 叶、2 叶分 2 次等量施入)=4: 3: 3 施用。

各处理均施磷肥(过磷酸钙), 施用量(折合 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 90 kg/hm<sup>2</sup>, 钾肥(氯化钾)施用量(折合 K<sub>2</sub>O)150 kg/hm<sup>2</sup>, 全部作基肥施用, 3 次重复, 小区面积为 15.60 m<sup>2</sup>, 小区间筑埂(宽 40 cm), 并用塑料薄膜包裹, 以防串水串肥。其他田间管理按大面积生产田进行。

## 1.2 测定项目与方法

### 1.2.1 分蘖动态

各小区定点 20 穴, 从移栽后至齐穗期每隔 7 d 调查分蘖动态。

### 1.2.2 干物质积累

于分蘖盛期、拔节期、齐穗及成熟期各小区按平均茎蘖数取代表性稻株 5 穴, 分叶、茎鞘、穗(结实期), 置于烘箱 105℃ 下杀青 30 min, 80℃ 烘至恒

重后, 测定地上部干物质量, 并计算群体生长率。

### 1.2.3 叶面积及叶面积指数(LAI)

拔节及齐穗期用 CID-203 叶面积仪(美国)测定绿叶面积, 并计算 LAI 及叶面积衰减率, 其中高效叶面积为有效茎蘖上 3 叶总叶面积。

### 1.2.4 考种与计产

收获时各小区调查具代表性稻株 60 穴, 计数有效穗数并计算平均值, 并随机取 10 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, 测定每穗粒数、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 数据分析

用 Microsoft Excel、Origin 9.0 及 DPS 6.5 处理系统分析数据及绘图。两年试验土壤肥力存在一定差异, 但不同年份各处理下水稻产量及各测定指标变化趋势及重演性一致, 且 2017 年测定指标较为系统, 因此本研究主要以 2017 年数据结果进行分析。

1) 叶面积衰减率(LAI/d)=(LAI<sub>2</sub>-LAI<sub>1</sub>)/(t<sub>2</sub>-t<sub>1</sub>)式中; LAI<sub>1</sub> 和 LAI<sub>2</sub> 分别为前后两个生育时期测定的 LAI, t<sub>1</sub> 和 t<sub>2</sub> 分别为前后两个生育时期测定的时间。

2) 群体生长率[g/(m<sup>2</sup> d)]=(w<sub>2</sub>-w<sub>1</sub>)/(t<sub>2</sub>-t<sub>1</sub>)。式中, w<sub>1</sub> 和 w<sub>2</sub> 分别为前后两个生育时期测定的干物质量, t<sub>1</sub> 和 t<sub>2</sub> 分别为前后两个生育时期测定的时间。

## 2 结果与分析

### 2.1 秸秆还田方式与水氮管理下产量及主要群体指标的方差分析

由表 2 可见, 除千粒重外, 秸秆还田处理、灌水方式及施氮量对产量及其构成因素均存在显著

表 2 秸秆还田与水氮管理下稻谷产量及其构成因子影响的方差分析 (F 值)

Table 2. Analysis of variance for yield index of rice between straw returning and water and N management patterns (F values).

处理 Treatment	籽粒产量 Grain yield	有效穗数 Effective panicle number	每穗粒数 Number of grains per panicle	结实率 Seed-setting rate	千粒重 1000-grain weight
秸秆还田 Straw returning (A)	153.42**	379.85**	49.41*	28.89*	35.12*
灌水方式 Irrigation method (W)	66.16**	52.91**	30.51**	34.13**	0.95
施氮量 N rate(N)	520.95**	227.84**	2153.67**	43.10**	25.02**
A×W	0.34	3.55	20.21*	1.12	1.77
A×N	19.38**	13.90**	176.09**	2.46	9.29**
W×N	6.70*	0.57	17.81**	2.47	3.29*
A×W×N	9.70*	1.94	15.90**	1.42	7.17**

\*, \*\* 分别表示在0.05和0.01水平上差异显著。下同。

\*, \*\* Significantly different at 0.05 and 0.01 probability levels, respectively. The same as below.

表3 秸秆还田与水氮管理下群体质量指标影响的方差分析 (*F*值)Table 3. Analysis of variance for population quality index of rice between straw returning and water and N management patterns (*F* values).

处理 Treatment	结实期干物质积累量 Dry matter accumulation during filling stage	结实期群体生长率 Population growth rate during filling stage	成熟期单茎干物质量 Total weight per stem at maturity	拔节期总叶面积 Total LAI during jointing	齐穗期总叶面积 Total LAI at full heading	齐穗期高效叶面积 Efficient LAI at full heading	拔节至齐穗叶面积衰减率 Decreasing rate of leaf area at jointing-full heading
秸秆还田 Straw returning (A)	611.60**	608.96**	627.66**	42.58*	35.48*	96.09*	28.16*
灌水方式 Irrigation method (W)	9.56*	9.65*	118.58**	0.58	0.04	46.83**	8.56*
施氮量 N rate(N)	305.48**	305.41**	480.07**	255.04**	346.73**	868.59**	1185.76**
A×W	0.67	0.68	7.03*	8.73*	0.78	0.17	5.30
A×N	11.31**	11.32**	0.99	9.31**	4.60*	3.94*	4.29*
W×N	7.43*	7.39**	1.07	0.43	0.67	2.47	7.58**
A×W×N	2.73	2.75*	0.80	0.66	0.17	1.84	3.95*

表4 秸秆直接还田下水氮管理处理对产量及其构成因素的影响(2017年)

Table 4. Effects of water and N management on yield and its components in hybrid rice under direct straw returning(2017).

处理 Treatment	有效穗数 Effective panicles (×10 <sup>4</sup> /hm <sup>2</sup> )	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed-setting rate /%	千粒重 1000-grain weight /g	实际产量 Grain yield /(kg hm <sup>-2</sup> )		
A <sub>1</sub> W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	144.30 d	149.20 d	92.00 a	37.37 a	7057.2 d	
	N <sub>1</sub>	162.53 c	180.34 c	91.52 a	35.55 b	8472.1 c	
	N <sub>2</sub>	177.06 a	195.27 a	90.81 a	37.71 a	9855.9 a	
	N <sub>3</sub>	166.18 b	186.07 b	86.78 b	37.63 a	9312.1 b	
	平均 Average	162.52	177.72	90.28	37.07	8674.3	
	W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	148.37 d	157.38 d	93.68 a	36.93 bd	7275.9 d
		N <sub>1</sub>	163.91 c	183.48 c	92.35 a	37.53 ab	8603.4 c
		N <sub>2</sub>	181.60 a	200.45 a	93.53 a	37.52 abc	10328.1 a
		N <sub>3</sub>	170.71 b	189.05 b	88.33 b	37.86 a	9444.1 b
		平均 Average	166.15	182.59	91.97	37.46	8912.9
A <sub>2</sub> W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	137.48 c	154.16 d	90.17 a	36.29 c	6697.5 c	
	N <sub>1</sub>	142.38 b	167.84 c	89.63 a	37.07 a	7797.7 b	
	N <sub>2</sub>	155.18 a	207.93 a	89.22 a	36.54 bc	8680.3 a	
	N <sub>3</sub>	151.30 a	179.29 b	85.64 b	36.61 b	8542.4 a	
	平均 Average	146.58	177.31	88.67	36.63	7929.48	
	W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	140.99 c	159.29 d	92.24 a	36.13 c	6937.8 c
		N <sub>1</sub>	151.77 b	168.92 c	88.75 c	36.87 b	8059.3 b
		N <sub>2</sub>	163.09 a	199.24 a	90.09 b	37.25 a	8855.3 a
		N <sub>3</sub>	155.18 b	183.77 b	88.29 c	36.02 c	8692.8 a
		平均 Average	152.76	177.81	89.84	36.57	8136.3

A<sub>1</sub>-秸秆堆腐还田; A<sub>2</sub>-秸秆直接还田; W<sub>1</sub>-淹水灌溉; W<sub>2</sub>-干湿交替灌溉; N<sub>0</sub>, N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub> 分别表示施氮量为 0 kg/hm<sup>2</sup>, 75 kg/hm<sup>2</sup>, 150 kg/hm<sup>2</sup>, 225 kg/hm<sup>2</sup>。同列数据后不同小写字母表示同一秸秆还田下水氮处理数据在 5% 水平上差异显著。下同。

A<sub>1</sub>, Straw composting; A<sub>2</sub>, Direct straw returning; W<sub>1</sub>, Submerged irrigation; W<sub>2</sub>, Alternate irrigation; N<sub>0</sub>, N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>, N application levels of 0, 75, 150, 225 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. The values within a column followed by different lowercase letters are significantly different at *P*<0.05. The same as below.

或极显著的影响; 从三因素间的交互效应来看, 秸秆还田处理、灌水方式和施氮量对稻谷产量、每穗粒数以及千粒重均存在显著或极显著的影响, 间接表明, 秸秆还田方式与水氮管理通过影响每穗粒数及千粒重指标, 进而影响产量。由表 3 可见, 除灌水方式对拔节期和齐穗期总叶面积影响不显著外, 秸秆还田处理、灌水方式及施氮量对其他群体质量指标均存显著或极显著的影响; 从三因素间的交互效应来看, 秸秆还田处理、灌水方式和施氮量对结实期群体生长率和拔节至齐穗叶面积衰减率存在显著或极显著的调控作用。

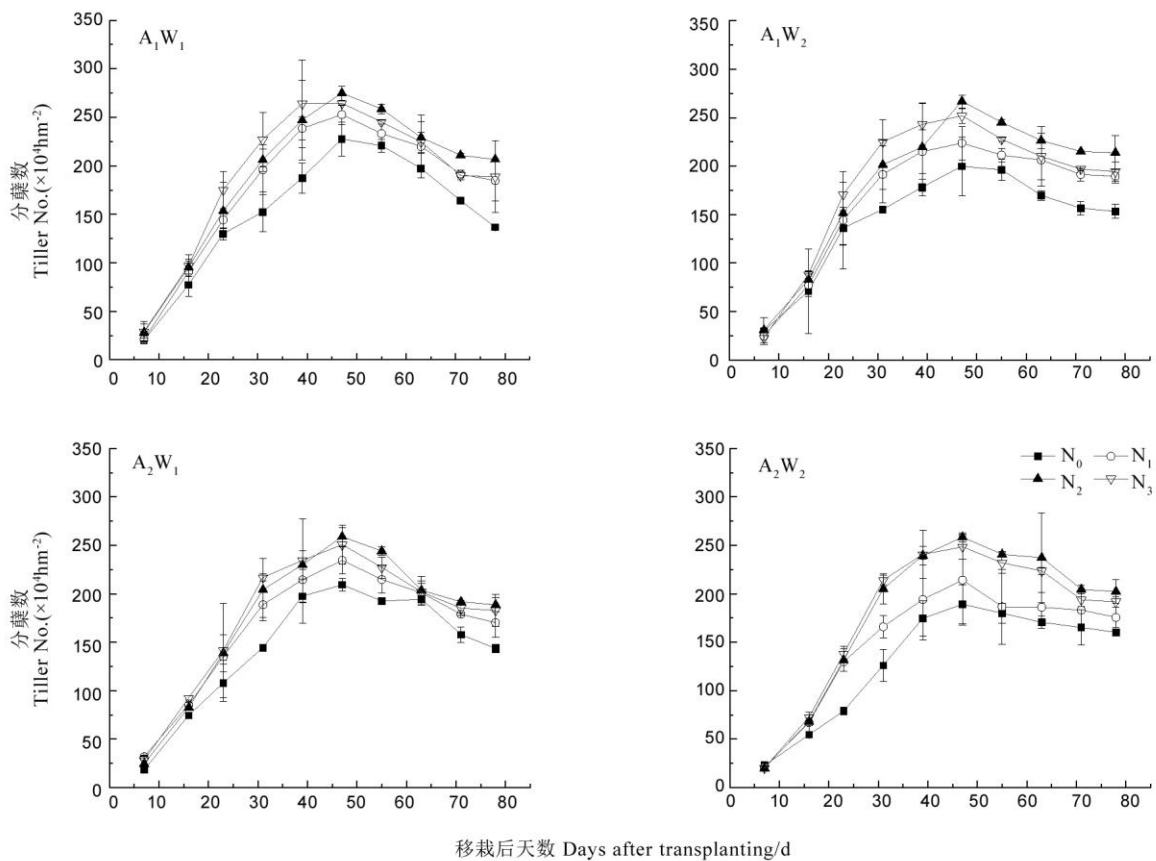
## 2.2 秸秆还田方式与水氮管理对产量及其构成的影响

秸秆堆腐还田处理下, 稻谷实际产量及其构成因素均较秸秆直接还田处理显著提高(表 2, 表 4 和表 5)。由表 4 和表 5 还可以看出, 两年试验中在秸秆还田方式与水氮管理对产量及其构成因素的影响趋势一致, 相同秸秆还田处理下, 除千粒重外, 水稻有效穗、每穗粒数、结实率和实际产量均表现为 W<sub>2</sub>>W<sub>1</sub>; 就施氮量来看, 各处理下有效穗数、每穗粒数及实际产量均随施氮量的增加呈先增后减的趋势, 以 N<sub>2</sub> 处理下最高, 且过高的施氮量(N<sub>3</sub> 处

表 5 秸秆直接还田下水氮管理处理对杂交稻产量及其构成因素的影响(2018 年)

Table 5. Effects of water and N management on yield and its components in hybrid rice under direct straw returning(2018).

处理 Treatment			有效穗 Effective panicles ( $\times 10^4/\text{hm}^2$ )	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed-setting rate /%	千粒重 1000-grain weight /g	实际产量 Grain yield ( $\text{kg hm}^{-2}$ )
A <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	163.90 c	153.61 d	93.02 b	36.36 b	8473.9 d
		N <sub>1</sub>	177.78 b	163.27 c	94.85 a	36.42 b	9501.4 c
		N <sub>2</sub>	212.11 a	178.36 a	88.60 c	37.08 a	11876.3 a
		N <sub>3</sub>	206.34 a	170.72 b	86.32 d	36.51 b	10547.1 b
		平均 Average	190.03	166.49	90.70	36.59	10099.7
	W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	167.67 d	156.82 d	93.73 a	36.10 b	8819.4 d
		N <sub>1</sub>	180.21 c	165.80 c	95.97 a	37.12 a	10142.2 c
		N <sub>2</sub>	220.88 a	180.82 a	89.78 b	36.06 b	12464.1 a
		N <sub>3</sub>	209.42 b	175.65 b	86.70 c	36.42 b	11026.9 b
		平均 Average	194.54	169.77	91.55	36.42	10613.1
A <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	159.76 c	148.48 c	92.20 b	37.39 a	7783.1 d
		N <sub>1</sub>	167.49 b	157.32 b	94.35 a	36.44 ab	8581.6 c
		N <sub>2</sub>	198.66 a	164.80 a	89.13 c	36.41 ab	10063.7 a
		N <sub>3</sub>	192.91 a	162.24 a	86.04 d	36.28 b	9534.4 b
		平均 Average	179.71	158.21	90.43	36.63	8990.7
	W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	161.19 d	151.76 d	93.51 a	37.29 a	8038.6 d
		N <sub>1</sub>	171.19 c	159.11 c	95.28 a	36.48 ab	8868.4 c
		N <sub>2</sub>	204.56 a	169.32 a	89.24 b	36.19 b	10380.5 a
		N <sub>3</sub>	196.12 b	165.08 b	85.68 c	36.36 ab	9782.0 b
		平均 Average	183.27	161.32	90.93	36.58	9267.4



A<sub>1</sub>-秸秆堆腐还田; A<sub>2</sub>-秸秆直接还田; W<sub>1</sub>-淹水灌溉; W<sub>2</sub>-干湿交替灌溉。

A<sub>1</sub>, Straw composting; A<sub>2</sub>, Direct straw returning; W<sub>1</sub>, Submerged irrigation; W<sub>2</sub>, Alternate irrigation.

图 1 不同秸秆还田方式下水氮管理对水稻分蘖动态的影响(2017)

Fig. 1. Effects of water and N management on dynamic changes of stem and tiller in hybrid rice under different straw returning modes(2017).

表6 秸秆还田和水氮管理对杂交稻叶片、茎鞘和单茎干物质质量的影响(2017年)

Table 6. Effects of water and N management on leaves, culm and sheath per shoot and dry matter weight of stem under straw returning(2017).

处理 Treatment	单茎叶片干质量 Dry weight of leaves per stem/g				单茎茎鞘干质量 Dry weight of Culm and sheath per stem/g				单茎干物质质量 Dry matter weight per stem/g					
	分蘖盛期 Tillering	拔节期 Jointing	齐穗期 Full heading	成熟期 Maturity	分蘖盛期 Tillering	拔节期 Jointing	齐穗期 Full heading	成熟期 Maturity	分蘖盛期 Tillering	拔节期 Jointing	齐穗期 Full heading	成熟期 Maturity		
A <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	0.12 c	0.40 c	1.17 d	0.87 d	0.14 d	0.53 c	3.19 b	2.07 d	0.26 d	0.93 c	5.10 d	8.11 d
		N <sub>1</sub>	0.14 b	0.49 b	1.22 c	1.06 c	0.16 c	0.58 b	3.31 a	2.26 c	0.30 c	1.07 b	5.33 c	9.14 c
		N <sub>2</sub>	0.19 a	0.55 a	1.39 a	1.23 a	0.22 a	0.64 a	3.35 a	2.41 a	0.40 a	1.19 a	5.59 a	10.15 a
		N <sub>3</sub>	0.18 a	0.49 b	1.33 b	1.11 b	0.20 b	0.59 b	3.34 a	2.35 b	0.38 b	1.07 b	5.51 b	9.82 b
	平均 Average	0.16	0.48	1.28	1.07	0.18	0.59	3.3	2.27	0.34	1.07	5.38	9.31	
	W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	0.14 c	0.43 d	1.13 c	0.91 d	0.17 c	0.55 d	3.15 c	2.10 d	0.31 c	0.98 d	5.02 c	8.32 d
		N <sub>1</sub>	0.16 b	0.45 c	1.26 b	1.07 c	0.19 b	0.57 c	3.31 b	2.30 c	0.35 b	1.02 c	5.38 b	9.39 c
		N <sub>2</sub>	0.18 a	0.57 a	1.39 a	1.24 a	0.21 a	0.67 a	3.43 a	2.45 a	0.39 a	1.24 a	5.68 a	10.35 a
		N <sub>3</sub>	0.17 ab	0.51 b	1.38 a	1.13 b	0.19 b	0.62 b	3.40 a	2.35 b	0.36 b	1.13 b	5.63 a	9.95 b
	平均 Average	0.16	0.49	1.29	1.09	0.19	0.61	3.32	2.3	0.35	1.09	5.43	9.5	
A <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	0.12 d	0.39 d	1.12 d	0.81 c	0.13 d	0.52 c	3.15 c	2.02 d	0.25 d	0.91 d	4.99 c	7.83 d
		N <sub>1</sub>	0.13 c	0.42 c	1.18 c	1.04 b	0.14 c	0.56 bc	3.24 b	2.20 c	0.27 c	0.99 c	5.20 b	8.85 c
		N <sub>2</sub>	0.16 a	0.52 a	1.36 a	1.17 a	0.19 a	0.63 a	3.31 a	2.35 a	0.36 a	1.16 a	5.51 a	9.78 a
		N <sub>3</sub>	0.14 b	0.48 b	1.32 b	1.04 b	0.17 b	0.58 ab	3.29 a	2.30 b	0.31 b	1.06 b	5.45 a	9.43 b
	平均 Average	0.14	0.45	1.25	1.02	0.16	0.57	3.25	2.22	0.29	1.03	5.29	8.97	
	W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	0.10 c	0.40 d	1.12 c	0.84 c	0.12 c	0.53 c	3.12 c	2.05 d	0.23 c	0.94 d	4.97 c	8.01 c
		N <sub>1</sub>	0.14 b	0.45 c	1.26 b	1.13 b	0.15 b	0.59 b	3.29 b	2.23 c	0.29 b	1.04 c	5.33 b	9.35 b
		N <sub>2</sub>	0.16 a	0.55 a	1.37 a	1.21 a	0.17 a	0.65 a	3.36 a	2.33 a	0.33 a	1.20 a	5.59 a	10.01 a
		N <sub>3</sub>	0.15 a	0.49 b	1.34 a	1.14 b	0.17 a	0.61 ab	3.32 a	2.29 b	0.32 a	1.10 b	5.51 a	9.80 a
	平均 Average	0.14	0.47	1.27	1.08	0.15	0.59	3.27	2.22	0.3	1.07	5.35	9.29	

理)会导致结实率显著降低,进而减产。表明秸秆堆腐还田可以显著提高稻谷产量,且适宜的水氮配施能进一步促产。

### 2.3 秸秆还田方式和水氮管理对分蘖动态的影响

由图1可见,与秸秆直接还田相比,秸秆堆腐还田下茎蘖数优势明显。随水稻生育进程,不同处理间水稻群体茎蘖变化趋势基本一致,干湿交替灌溉均高于淹灌处理,施氮量是影响水稻分蘖多寡的主要因素,均表现为 $N_3 > N_2 > N_1 > N_0$ ,且 $N_3$ 、 $N_2$ 、 $N_1$ 与 $N_0$ 差异显著。各处理均在移栽后25d到达分蘖盛期,且均在移栽后47d左右达到最大。拔节期后茎蘖数减小趋势趋于平缓,且表现为 $N_2 > N_3 > N_1 > N_0$ ;与 $N_3$ 相比,虽然 $N_2$ 下最高茎蘖数较 $N_3$ 低,但成穗率提高。

### 2.4 秸秆还田方式和水氮管理对单茎叶片、茎鞘和单茎干物质积累的影响

秸秆堆腐还田处理下,单茎干物质积累均较秸秆直接还田处理显著提高(表3,表6)。由表6还可以看出,在相同秸秆还田处理下,除 $W_2$ 下分蘖盛期单茎茎鞘干质量外,各生育时期单茎叶片、茎鞘干质量和单茎干质量均表现为 $W_2 > W_1$ ;施氮处理各

生育时期单茎叶片、单茎茎鞘干质量和单茎干质量均显著高于 $N_0$ 处理;就施氮量来看,各生育时期单茎叶片、单茎茎鞘干质量和单茎干质量均随施氮量的增加呈先增后减的趋势,以 $N_2$ 处理下单茎生长优势最高。间接表明,虽然高施氮量( $N_3$ 处理)齐穗前保持较高的分蘖数(图1),但单茎干物质积累无显著优势,甚至较 $N_2$ 处理显著降低(表6)。

### 2.5 秸秆还田方式和水氮管理对群体干物质积累特性的影响

秸秆堆腐还田下,群体干物质积累特性较秸秆直接还田显著提高,且两年结果趋势一致(表3,表7和表8)。由表7和表8还可以看出,同一秸秆还田下,各生育时期群体干物质、阶段干物质累积量和群体生长率均表现为 $W_2 > W_1$ ;施氮处理各生育时期群体干物质、阶段干物质累积量和群体生长率均显著高于 $N_0$ 处理;就不同施氮量来看,分蘖盛期群体干物质随着施氮量的增加而增加,其他各生育时期群体干物质、阶段干物质累积量和群体生长率均随施氮量的增加呈先增后减的趋势,且均在 $N_2$ 处理下最高。间接表明虽然高施氮量( $N_3$ 处理)在分蘖盛期具有较高的群体干物质,但拔节至

表 7 秸秆直接还田下水氮管理对水稻群体干物质积累特性的影响(2017 年)

Table 7. Effects of water and N management on dry matter accumulation characteristics of population under straw returning(2017).

处理 Treatment	群体干物质质量 Dry matter weight of population/(t hm <sup>-2</sup> )				不同生育阶段干物质积累量 Phase accumulation/(t hm <sup>-2</sup> )			群体生长率 Population growth rate/(g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )					
	分蘖盛期	拔节期	齐穗期	成熟期	分蘖盛期- 拔节期	拔节期- 齐穗期	齐穗期- 成熟期	分蘖盛期- 拔节期	拔节期- 齐穗期	齐穗期- 成熟期			
	Tillering	Jointing	Full heading	Maturity	Tillering- jointing	Jointing- full heading	Full heading- maturity	Tillering- jointing	Jointing- full heading	Full heading- maturity			
A <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	0.62 c	2.41 c	7.22 d	11.71 d	1.79 c	4.84 c	4.49 d	13.78 c	13.84 c	10.68 d	
		N <sub>1</sub>	1.00 b	3.50 b	9.83 c	14.85 c	2.50 b	6.33 b	5.02 c	19.27 b	18.07 b	11.95 c	
		N <sub>2</sub>	1.19 a	3.97 a	11.42 a	17.98 a	2.78 a	7.46 a	6.56 a	21.36 a	21.30 a	15.61 a	
		N <sub>3</sub>	1.21 a	3.93 a	10.32 b	16.35 b	2.72 a	6.40 b	6.03 b	20.95 a	18.30 b	14.35 b	
	平均 Average	1.00	3.81	9.70	15.22	2.45	6.26	5.52	18.84	17.88	13.15		
	W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	0.79 c	2.99 c	7.86 d	12.34 d	2.20 c	4.87 d	4.48 d	16.93 c	13.92 d	10.67 d	
		N <sub>1</sub>	1.04 b	3.78 b	10.17 c	15.39 c	2.74 b	6.39 c	5.22 c	21.08 b	18.26 c	12.42 c	
		N <sub>2</sub>	1.26 a	4.28 a	11.85 a	18.79 a	3.02 a	7.57 a	6.94 a	23.24 a	21.62 a	16.53 a	
		N <sub>3</sub>	1.31 a	4.20 a	11.03 b	16.98 b	2.89 ab	6.86 b	5.95 b	22.24 ab	19.60 b	14.17 b	
	平均 Average	1.10	3.81	10.23	15.87	2.71	6.42	5.65	20.87	18.35	13.45		
	A <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	0.51 c	2.31 c	7.54 d	10.77 d	1.80 c	5.23 c	3.23 c	13.80 c	14.95 c	7.69 c
			N <sub>1</sub>	0.95 b	3.18 b	8.76 c	12.59 c	2.23 b	5.58 c	3.80 b	17.12 b	15.95 c	9.05 b
N <sub>2</sub>			1.10 a	3.71 a	10.49 a	15.18 a	2.61 a	6.78 a	4.68 a	20.11 a	19.37 a	11.16 a	
N <sub>3</sub>			1.14 a	3.62 a	9.82 b	14.27 b	2.48 a	6.20 b	4.45 a	19.11 a	17.71 b	10.60 a	
平均 Average		0.93	3.21	9.15	13.20	2.28	5.95	4.04	17.54	17.00	9.63		
W <sub>2</sub>		N <sub>0</sub>	0.56 c	2.65 c	8.42 d	11.29 d	2.09 c	5.77 c	2.87 c	16.10 c	16.48 c	6.84 c	
		N <sub>1</sub>	0.96 b	3.43 b	9.80 c	14.19 c	2.47 b	6.37 b	4.38 b	19.01 b	18.21 b	10.44 b	
		N <sub>2</sub>	1.13 a	3.85 a	11.23 a	16.33 a	2.72 a	7.39 a	5.09 a	20.91 a	21.10 a	12.12 a	
		N <sub>3</sub>	1.15 a	3.80 a	10.51 b	15.20 b	2.65 ab	6.71 b	4.69 b	20.39 ab	19.17 b	11.16 b	
平均 Average		0.95	3.43	9.99	14.25	2.48	6.56	4.26	19.10	18.74	10.14		

表 8 秸秆直接还田下水氮管理对水稻群体干物质积累特性(2018 年)

Table 8. Effects of water and N management on dry matter accumulation characteristics of population under straw returning(2018).

处理 Treatment	群体干物质质量 Dry matter weight of population/(t hm <sup>-2</sup> )				不同生育阶段干物质积累量 Phase accumulation/(t hm <sup>-2</sup> )			群体生长率 Population growth rate/(g m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )					
	分蘖盛期	拔节期	齐穗期	成熟期	分蘖盛期- 拔节期	拔节期- 齐穗期	齐穗期- 成熟期 Full	分蘖盛期- 拔节期	拔节期- 齐穗期	齐穗期- 成熟期 Full			
	Tillering	Jointing	Full heading	Maturity	Tillering- jointing	Jointing- full heading	heading- maturity	Tillering- jointing	Jointing- full heading	heading- maturity			
A <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	1.10 b	2.95 c	8.10 d	13.30 d	1.85 c	5.15 d	5.20 c	12.34 c	14.71 d	9.99 c	
		N <sub>1</sub>	1.33 b	3.88 b	10.23 c	16.24 c	2.55 b	6.79 c	6.01 b	17.01 b	19.40 c	11.56 b	
		N <sub>2</sub>	2.16 a	6.03 a	14.53 a	21.54 a	3.86 a	8.50 a	7.01 a	25.77 a	24.28 a	13.48 a	
		N <sub>3</sub>	2.39 a	5.84 a	13.53 b	20.26 b	3.44 a	7.69 b	6.73 a	22.96 a	21.97 b	12.94 a	
	平均 Average	1.75	4.67	11.60	17.83	2.93	7.03	6.24	19.52	20.09	11.99		
	W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	1.16 c	3.16 c	8.46 d	13.95 d	2.00 b	5.31 d	5.48 d	16.59 b	15.16 d	10.54 d	
		N <sub>1</sub>	1.68 b	4.17 b	10.67 c	16.92 c	2.49 b	6.18 c	6.25 c	13.31 b	17.66 c	12.02 c	
		N <sub>2</sub>	2.31 a	6.62 a	15.49 a	22.85 a	4.31 a	8.87 a	7.36 a	24.29 a	25.35 a	14.15 a	
		N <sub>3</sub>	2.58 a	6.22 a	14.00 b	20.83 b	3.64 a	7.78 b	6.83 b	28.72 a	22.23 b	13.13 b	
	平均 Average	1.93	5.04	12.16	18.64	3.11	7.04	6.48	20.73	20.10	12.46		
	A <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	0.91 b	2.50 c	7.50 d	12.51 d	1.60 c	4.99 d	5.02 b	10.64 c	14.26 d	9.65 b
			N <sub>1</sub>	1.27 b	3.77 b	9.56 c	14.82 c	2.50 b	6.46 c	5.26 b	16.70 b	18.45 c	10.11 b
N <sub>2</sub>			2.20 a	6.05 a	13.48 a	19.43 a	3.85 a	7.44 a	5.95 a	25.66 a	21.25 a	11.44 a	
N <sub>3</sub>			2.33 a	5.67 a	12.41 b	18.20 b	3.34 a	6.75 b	5.79 a	22.26 a	19.27 b	11.13 a	
平均 Average		1.68	4.50	10.74	16.24	2.82	6.41	5.50	18.81	18.31	10.58		
W <sub>2</sub>		N <sub>0</sub>	1.14 c	2.81 c	7.90 d	12.91 d	1.66 c	5.09 d	5.01 c	14.88 b	14.55 d	9.64 c	
		N <sub>1</sub>	1.61 b	3.84 b	10.35 c	16.01 c	2.23 b	5.72 c	5.66 b	11.08 c	16.34 c	10.88 b	
		N <sub>2</sub>	2.23 a	6.13 a	14.01 a	20.48 a	3.90 a	7.88 a	6.47 a	23.89 a	22.52 a	12.44 a	
		N <sub>3</sub>	2.41 a	5.99 a	13.15 b	19.21 b	3.58 a	7.16 b	6.06 a	25.99 a	20.45 b	11.66 a	
平均 Average		1.85	4.69	11.35	17.15	2.84	6.46	5.80	18.96	18.46	11.16		

表9 秸秆直接还田下水氮管理对杂交稻 LAI 的影响

Table 9. Effects of water and N management on LAI in hybrid rice under straw returning.

处理 Treatment	分蘖盛期 Tillering	拔节期 Jointing	齐穗期 Full heading	高效叶面积指数 H-LAI		叶面积衰减率 R-LAI/(LAI d <sup>-1</sup> )		
				2017	2018			
A <sub>1</sub>	W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	1.74 d	2.49 c	4.53 c	3.11 c	3.58 c	0.0585 d
		N <sub>1</sub>	2.31 c	3.06 b	5.97 b	4.25 b	4.78 b	0.0832 b
		N <sub>2</sub>	2.67 b	3.99 a	6.98 a	4.61 a	5.18 a	0.0855 a
		N <sub>3</sub>	2.92 a	4.01 a	6.86 a	4.50 a	5.09 a	0.0814 c
		平均 Average	2.41	3.39	6.09	4.12	4.66	0.0772
	W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	1.44 d	2.40 c	4.45 c	3.26 c	3.70 c	0.0586 c
		N <sub>1</sub>	2.13 c	3.24 b	6.15 b	4.49 b	5.00 b	0.0830 b
		N <sub>2</sub>	2.52 b	4.04 a	7.16 a	4.80 a	5.35 a	0.0891 a
		N <sub>3</sub>	2.77 a	4.02 a	6.97 a	4.74 a	5.32 a	0.0845 b
		平均 Average	2.22	3.43	6.18	4.32	4.84	0.0788
A <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	N <sub>0</sub>	1.30 d	2.10 c	4.08 c	2.85 c	3.28 c	0.0567 c
		N <sub>1</sub>	2.09 c	3.46 b	6.22 b	4.10 b	4.27 b	0.0787 b
		N <sub>2</sub>	2.33 b	3.77 a	6.70 a	4.41 a	4.93 a	0.0839 a
		N <sub>3</sub>	2.52a	3.83 a	6.74 a	4.38 a	4.61 a	0.0830 a
		平均 Average	2.06	3.29	5.94	3.94	4.27	0.0756
	W <sub>2</sub>	N <sub>0</sub>	1.44 d	2.12 c	3.95 c	2.88 c	3.32 c	0.0525 c
		N <sub>1</sub>	2.15 c	3.41 b	6.25 b	4.18 b	4.73 b	0.0813 b
		N <sub>2</sub>	2.52 b	3.72 a	6.75 a	4.72 a	5.27 a	0.0867 a
		N <sub>3</sub>	2.74 a	3.65 a	6.55 ab	4.68 a	5.25 a	0.0827 b
		平均 Average	2.21	3.23	5.88	4.12	4.65	0.0758

H-LAI, 齐穗期高效叶面积指数; R-LAI, 拔节至齐穗叶面积衰减率。

H-LAI, High valid leaf area index at the full heading stage; R-LAI, Leaf area decreasing rate from jointing to full heading stage.

成熟期干物质积累量及群体生长率均无显著优势, 甚至较 N<sub>2</sub> 处理显著降低。

## 2.6 秸秆还田方式和水氮管理对叶面积指数(LAI)的影响

对比两种秸秆还田方式下, 堆腐还田处理下各时期 LAI 及衰减率均显著高于秸秆直接还田(表 3, 表 9)。由表 9 还可以看出, 在相同秸秆还田处理下, 灌溉方式仅对高效叶面积及叶面积衰减率的影响达极显著水平, 且表现为 W<sub>2</sub>>W<sub>1</sub>; 就施氮量来看, LAI 在分蘖盛期均随施氮量的增加而增加, 至拔节期, W<sub>2</sub> 处理下 LAI 衰减率先呈现出先增后减的趋势, 以 N<sub>2</sub> 处理下 LAI 最高, 叶面积衰减率也呈现先增后减的趋势, 且施氮较 N<sub>0</sub> 处理差异显著。间接表明, 最高施氮量在前期可以提升 LAI, 但对高效 LAI 无显著优势, 甚至较 N<sub>2</sub> 处理显著降低, 且干湿交替与 N<sub>2</sub> 组合可以较早的提高 LAI。

## 2.7 叶面积和群体生长率与干物质积累、产量的关系

由表 9 可见, 各时期 LAI、叶面积衰减率和群体生长率与单茎干物质质量、总干物质质量、有效穗、产量整体上呈极显著正相关。表明秸秆还田与水氮管理处理下有利于提高水稻叶面积, 尤其齐穗期群体生长率, 以及齐穗至成熟期群体生长率分别与产量正相关达 0.95<sup>\*\*</sup> 和 0.92<sup>\*\*</sup>, 进而提高产量。

## 3 讨论

### 3.1 不同秸秆还田方式和水氮管理对杂交籼稻产量及其构成的影响

群体库容(穗数和每穗粒数)和籽粒充实度(结实率和千粒重)是决定水稻产量的关键因素, 而提高水稻群体库容是提高水稻产量的前提<sup>[16-17]</sup>。在秸秆还田方面, 严奉君等<sup>[18]</sup>与陈培峰等<sup>[19]</sup>的研究表明, 秸秆翻耕还田较不还田处理, 水稻有效穗数显著增加, 进而增产。而在秸秆腐熟还田方面, 朱萍等<sup>[20]</sup>研究表明, 秸秆腐熟后还田能明显改善土壤肥力, 从而使稻谷产量提高; 怀燕等<sup>[21]</sup>研究表明, 使用腐熟剂的油菜秸秆还田与油菜秸秆直接还田相比, 在油菜秸秆腐烂速度、改善土壤理化性状、稻田养分含量及稻谷产量上差异均不显著。但本研究表明, 秸秆还田和灌溉方式与氮肥互作对水稻产量及其构成因素的影响均达显著水平。秸秆与水互作对每穗粒数影响显著; 其中, 两种秸秆还田处理下, 秸秆堆腐还田处理有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重显著高于秸秆直接还田处理, 利于增产; 尤其氮肥的施入(N<sub>1</sub> 处理)相对于不施氮处理, 秸秆堆腐还田处理有效穗数和每穗粒数较秸秆直接还田处理增幅显著提高, 分别为 7.97%~11.55% 和 5.52%~



表 10 水稻 LAI、群体生长率与干物质累积及产量的相关性

Table 10. Correlation coefficients of LAI and population rate with dry matter amount and grain yield.

指标 Index	生育期 Growth stage	单茎干物质 Single stem dry weight	总干物质质量 Dry matter amount	有效穗 Effective panicles	每穗粒数 Spikelet no. per panicle	产量 Grain yield
LAI	JS	0.89**	0.82**	0.72*	0.90**	0.75*
	FHS	0.95**	0.88**	0.75*	0.89**	0.80**
	MS	0.94**	0.89**	0.77*	0.85**	0.80**
H-LAI	FHS	0.94**	0.86**	0.75*	0.74*	0.78*
PGR	FHS	0.93**	0.93**	0.90**	0.65*	0.95**
	JS-FHS	0.92**	0.91**	0.83**	0.59*	0.81**
	FHS-MS	0.82**	0.93**	0.94**	0.49*	0.92**

H-LAI-齐穗期高效叶面积指数; PGR-群体生长率; JS-拔节期; FHS-齐穗期; MS-成熟期。\*, \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著相关。

H-LAI, High valid leaf area index at the full heading stage; PGR, Population growth rate; JS, Jointing stage; FHS, Full heading stage; MS, Maturity stage.

\*, \*\* Mean significant correlation at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

7.46%(2017 年和 2018 年); 存在显著的秸秆还田和氮肥管理互作效应(表 2), 且随着施氮量的增加, 增幅呈先增加后降低的趋势, 间接表明在秸秆腐熟处理下, 可以适当的减少前期的氮肥施用量, 提高肥效; 这可能的原因为油菜秸秆的提前腐熟处理, 使秸秆“争氮”现象减缓, 释放养分更充足, 并与前期基肥氮的施用耦合, 促进了分蘖的发生, 提高了有效穗数, 并保证协调水稻各生育时期的养分供给, 从而使水稻茎秆强壮, 于结实期为穗部输送充足养分, 提高了每穗粒数及产量。此外, 本研究两年产量数据存在一定差异, 2018 年产量要明显高于 2017 年, 可能是因为两年试验地点基础肥力差异所致, 但不同年份各处理下稻谷产量及各测定指标变化趋势及重演性较好, 进一步验证了在不同肥力水平下, 两年不同优化处理结果的一致性。总之, 秸秆腐熟过程中消耗大量的氮素, 而秸秆经过腐熟后还田较秸秆直接还田, 缓解了与稻株生育前期的争氮过程, 促进了水稻群体茎蘖数的增加, 有利于有效穗数的提高, 进而增加群体干物质质量; 而水稻生育后期对土壤中氮素及秸秆腐熟释放养分的综合利用, 促进了水稻的灌浆结实, 进而使籽粒饱满, 提高了稻谷结实率, 形成了“穗足、粒多及饱满型”的稻谷, 从而显著提高产量。

水分管理与施氮量互作对杂交稻产量及其生理机制的研究较多, 但结论不一致。Cabangon 等<sup>[22]</sup>认为水分管理和施氮量对稻谷产量及生物量无显著的交互作用, 而杨建昌等<sup>[23]</sup>和 Sun 等<sup>[24]</sup>认为, 水分管理、施氮量对水稻产量有显著的互作效应。本研究表明, 两种不同秸秆处理还田下, 灌溉方式和施氮量互作对水稻产量、每穗粒数和千粒重的影响均达显著水平, 干湿交替灌溉有助于提高水稻有效穗数和结实率; 而在适宜的施氮量范围内, 随着施

氮量的增加产量表现为正效应, 增加至  $N_2$  时产量最大, 且效应表现为  $N_2 > N_1 > N_0$ , 当施氮量增加至  $N_3$  水平时, 产量反而下降, 主要原因是过高的施氮量使水稻生育前期营养生长过于旺盛, 分蘖过多, 无效分蘖多(图 1), 导致大量的氮素随无效分蘖损失, 在抽穗后形成的有效穗占比反而较  $N_2$  少, 生育后期氮素不足, 虽然形成了穗大及每穗实粒数多的有效穗, 但结实率和千粒重显著降低, 从而导致产量显著降低。从相关性来看, 秸秆还田下水氮管理对水稻 LAI、H-LAI 及群体生长率与干物质积累量、有效穗数、每穗粒数及产量呈极显著正相关(表 10), 说明秸秆直接还田下水氮管理, 有效改善了水稻生育期田间的生长条件, 个体生长潜力得到充分发挥, LAI、单茎茎叶干质量等个体性状指标表现出较大的优越性, 杂交稻的群体生长显著增强, 干物质积累增多, 促使齐穗后籽粒灌浆充实, 形成高质量的群体; 促进了齐穗后 LAI 和群体生长率的提高, 有利于后期叶片和茎鞘中养分向穗部的转运, 使穗部充分灌浆, 进而达到高产。

### 3.2 不同秸秆还田方式和水氮管理对杂交水稻干物质积累的影响

秸秆还田对水稻生长的影响研究较多, 但结果尚未达到一致。有研究表明, 在水稻生育前期, 秸秆还田对水稻生长发育有一定促进作用<sup>[25-26]</sup>。叶文培等<sup>[27]</sup>研究表明, 秸秆还田对水稻前期生长无抑制作用, 且可以提高水稻生育期的叶面积扩张速率, 促进水稻分蘖发生, 从而加强水稻生育前期的光合能力。也有研究表明, 秸秆还田对水稻生长的影响表现为“先抑后扬”的影响规律, 即在水稻生育前期抑制根的生长<sup>[28]</sup>, 使水稻前期形成僵苗, 减少水稻的分蘖, 但可以促进水稻根系生长, 进而提高地上部分的干物质积累, 增加水稻有效穗数、提升水

稻产量<sup>[29-30]</sup>。而本研究表明, 秸秆堆腐还田较秸秆直接还田可以显著提高水稻单茎茎叶干物质质量、群体干物质质量及 LAI, 说明秸秆堆腐还田有效改善了田间土壤环境, 提供更多的营养成分, 使水稻群体生长显著增强, 干物质和光合产物积累增多, 向穗部转运充足的营养物质, 使水稻籽粒灌浆饱满, 从而有利于群体干物质的累积, 这进一步补充和丰富了前人研究<sup>[23-28]</sup>。

水氮管理对水稻群体的影响也有较多的研究。张自常等<sup>[31]</sup>研究指出, 不同水分条件下干物质的积累存在明显差异, 干湿交替灌溉有助于增加花后干物质积累量占总质量的比例。孙永健等<sup>[32]</sup>研究表明, 水、氮管理对杂交籼稻主要生育时期干物质积累、LAI、茎蘖成穗率、齐穗期粒叶比、净光合速率、群体透光率及产量均存在显著的互作效应, 且各群体质量指标与产量呈显著正相关。本研究表明在秸秆还田下, 干湿交替灌溉较淹灌明显提高水稻干物质积累量, 原因可能为秸秆还田和晒田相结合的干湿交替灌溉可以控制无效分蘖发生, 避免对养分的浪费, 使水稻个体生长潜力得到充分发挥, 叶面积、单茎茎叶干质量等个体性状表现出较大的优越性, 可能利于后期干物质积累和茎鞘、叶片中养分向穗部的转运, 稳定结实率和千粒重; 有利于干物质在后期的积累, 继而促进茎鞘和叶片向穗部转运充足的养分, 有利于水稻生殖生长期的灌浆结实, 保证了高产群体的形成, 在一定程度上起到了扩“库”增“源”的作用。而淹水灌溉下无效分蘖较多, 形成的有效穗明显减少, 单茎茎叶干质量表现较差, 群体干物质积累量小, 可能因淹灌处理下根系生长较干湿交替处理下弱, 不利于干物质积累。Ishii<sup>[33]</sup>研究表明, LAI 是作物光合和提升籽粒产量的关键因素; 而本研究表明, LAI 受水与氮的调控, LAI 是决定光合产物的关键因素; 两种秸秆处理还田下, W<sub>2</sub> 较 W<sub>1</sub> 在分蘖盛期和拔节期 LAI 较低, 主要是因为生育前期茎蘖数差异所致, 但在齐穗期高效 LAI 整体上表现为 W<sub>2</sub> 优于 W<sub>1</sub>, 确保了群体生长率, 促进了产量的增加。本研究仅表明秸秆堆腐还田及水氮配施可显著改善群体质量, 进而提高稻谷产量; 但稻油轮作制度中, 秸秆还田与水氮管理下秸秆腐熟后水稻养分利用、水稻根系生长及氮素利用等如何进一步明确丰富增产机理, 尚有待于进一步研究。

#### 4 结论

秸秆还田与水氮管理对主要生育时期水稻干

物质积累量、叶面积指数、群体生长率及产量均存在显著或极显著的调控效应, 且互作效应显著; 秸秆堆腐还田可以显著提高稻谷产量, 且适宜的水氮配施能进一步促产。本研究中, 秸秆堆腐还田处理下, 控制性交替灌溉与施氮量为 150 kg/hm<sup>2</sup> 时, 可有效提高齐穗期高效叶面积指数、单茎茎鞘与叶片干物重, 具有较高群体生长率, 促进干物质积累, 显著提高了有效穗数及每穗粒数, 并保持了稳定的结实率, 从而显著提高水稻产量。

#### 参考文献:

- [1] 廖伯寿, 殷艳, 马霓. 中国油料作物产业发展回顾与展望. *农学学报*, 2018, 8(1): 107-112.  
Liao B S, Yin Y, Ma N. Review and future prospects of oil crops industry development in China. *J Agric*, 2018, 8(1): 107-112.
- [2] Kousterna E. The effect of covering and mulching on the temperature and moisture of soil and broccoli yield. *Acta Agrophys*, 2014, 21(2): 165-178.
- [3] Su W, Lu J W, Wang W N, Li X K, Ren T, Cong R H. Influence of rice straw mulching on seed yield and nitrogen use efficiency of winter oilseed rape in intensive rice oilseed rape cropping system. *Field Crop Res*, 2014, 159: 53-61.
- [4] Jawson M D, Elliott L F. Carbon and nitrogen transformations during wheat straw and root decomposition. *Soil Bio Chem*, 1986, 18: 15-22.
- [5] 马宗国, 卢绪奎, 万丽, 陈祖光, 左辉. 小麦秸秆还田对水稻生长及土壤肥力的影响. *作物杂志*, 2003(5): 37-38.  
Ma Z G, Lu X K, Wan L, Chen Z G, Zuo H. Effects of wheat straw returning on rice growth and soil fertility. *Crops*, 2003(5): 37-38. (in Chinese with English abstract)
- [6] 孙永健, 马均, 孙园园, 徐徽, 严奉君, 代邹, 蒋明金, 李玥. 水氮管理模式对杂交籼稻冈优527群体质量和产量的影响. *中国农业科学*, 2014, 47(10): 2047-2061.  
Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, Xu H, Yan F J, Dai Z, Jiang M J, Li Y. Effects of water and nitrogen management patterns on population quality and yield of hybrid rice Gangyou 527. *Sci Agric Sin*, 2014, 47(10): 2047-2061. (in Chinese with English abstract)
- [7] 严奉君, 孙永健, 马均, 徐徽, 李玥, 代邹, 杨志远, 蒋明金, 孙园园. 灌溉方式与秸秆覆盖优化施氮模式对秸秆腐熟特征及水稻氮素利用的影响. *中国生态农业学报*, 2016, 24(11): 1435-1444.  
Yan F J, Sun Y J, Ma J, Xu H, Li Y, Dai Z, Yang Z Y, Jiang M J, Sun Y Y. Effects of irrigation method and straw mulch-nitrogen management pattern on straw decomposition characteristics and nitrogen utilization of

- hybrid rice. *Chin J Eco-Agric*, 2016, 24(11): 1435-1444. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵建红, 李玥, 孙永健, 李应洪, 孙加威, 代邹, 谢华英, 徐徽, 马均. 灌溉方式和氮肥运筹对免耕厢沟栽培杂交稻氮素利用及产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(3): 609-617.  
Zhao J H, Li Y, Sun Y J, Li Y H, Sun J W, Dai Z, Xie H Y, Xu H, Ma J. Effects of irrigation and nitrogen management on nitrogen use efficiency and yield of hybrid rice cultivated in ditches under no-tillage. *Plant Nutr Fert Sci*, 2016, 22(3): 609-617. (in Chinese with English abstract)
- [9] Wang Z Q, Zhang W Y, Beebout S S, Hao Z, Liu L. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates. *Field Crops Res*, 2016: 193, 54-69.
- [10] 常勇, 黄忠勤, 周兴根, 孙克新, 周润楠, 丁震乾, 王波, 李小珊. 不同麦秸还田量对水稻生长发育、产量及品质的影响. *江苏农业科学*, 2018, 46(20): 47-51.  
Chang Y, Huang Z Q, Zhou X G, Sun K X, Zhou J N, Ding Z Q, Wang B, Li X S. Different amount of wheat straw counters-field impact on rice growth, yield and quality. *Jiangsu Agric Sci*, 2018, 46(20): 47-51. (in Chinese with English abstract)
- [11] 刘玲玲, 刘婷, 狄霖, 吴文祥, 盛海君, 余彬彬, 杨艳菊, 钱晓晴, 王娟娟. 秸秆全量还田对水稻生长及土壤理化性质的影响. *扬州大学学报*, 2018, 39(3): 81-85.  
Liu L L, Liu T, Di L, Wu W X, Sheng H J, Yu B B, Yang Y J, Qian X Q, Wang J J. Influences of total straw returning on rice growth and soil physiochemical properties. *J Yangzhou Univ*, 2018, 39(3): 81-85. (in Chinese with English abstract)
- [12] Zeng X M, Han B J, Xu F S, Huang J L, Cai H M, Shi L. Effects of modified fertilization technology of on the grain yield and nitrogen use efficiency of midseason rice. *Field Crop Res*, 2012, 137: 203-212.
- [13] 李旭毅, 孙永健, 程洪彪, 郑宏祯, 刘树金, 胡蓉, 马均. 两种生态条件下氮素调控对不同栽培方式水稻干物质积累和产量的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 773-781.  
Li X Y, Sun Y J, Cheng H B, Zhen H Z, Liu S J, Hu R, Ma Jet al. Effects of nitrogen application strategy and cultivation model on the performances of canopy apparent photosynthesis of Indica hybrid rice Eryou 498 during filling stage. *Plant Nutr Fert Sci*, 2011, 17(4): 773-781. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张军, 张洪程, 段祥茂. 地力与施氮量对超级稻产量、品质及氮素利用率的影响. *作物学报*, 2011, 37(11): 2020-2029.  
Zhang T, Zhang H C, Duan X M. Effects of soil fertility and nitrogen application rates on super rice yield quality, and nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(11): 2020-2029. (in Chinese with English abstract)
- [15] 魏海燕, 工亚江, 孟天瑶, 徐宗进, 杨波, 郭保卫, 杜斌, 戴其根, 许轲, 霍中洋, 魏海燕. 机插超级粳稻产量、品质及氮肥利用率对氮肥的响应. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 488-496.  
Wei H Y, Wang Y J, Meng T Y, Xu Z J, Yang B, Guo B W, Du B, Dai Q G, Xu K, Huo Z Y, Wei H Y. Response of yield, quality and nitrogen use efficiency to nitrogen fertilizer from mechanical transplanting super japonica rice. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25(2): 488-496. (in Chinese with English abstract)
- [16] 于林惠, 李刚华, 徐晶晶, 凌启鸿, 丁艳锋. 基于高产示范方的机插水稻群体特征研究. *中国水稻科学*, 2011, 26(4): 451-456.  
Yu L H, Li G H, Xu J J, Ling Q H, Ding Y F. Population characteristics of machine-transplanted japonica rice based on high-yield demonstration fields. *Chin J Rice Sci*, 2011, 26(4): 451-456. (in Chinese with English abstract)
- [17] Zhang H, Chen T T, Liu L J, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J. Performance in grain yield and physiological traits of rice in the Yangtze River basin of China during the last 60 yr. *J Integr Agric*, 2013, 12(1):57-66.
- [18] 严奉君, 孙永健, 马均, 徐徽, 李玥, 杨志远, 蒋明金, 吕腾飞等. 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. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 23-55.  
Yan F J, Sun Y J, Ma J, Xu H, Li Y, Yang Z Y, Jiang M J, LÜ T F. Effects of straw mulch and nitrogen management on root growth and nitrogen utilization characteristics of hybrid rice. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21(1): 23-55. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈培峰, 董明辉, 顾俊荣, 惠锋, 乔中英, 杨代凤, 刘腾飞. 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. *中国水稻科学*, 2012, 26(6): 715-722.  
Chen P F, Dong M H, Gu J R, Hui F, Qiao Z Y, Yang D F, Liu T F. Effects of returning wheat residue to field and nitrogen management on grain weight and quality of superior and inferior grain in super rice. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26(6): 715-722. (in Chinese with English abstract)
- [20] 朱萍, 顾艾节, 王华, 顾建芹. 稻麦秸秆连续还田配施腐熟剂对土壤性状和水稻产量的影响. *上海农业学报*, 2018, 34(2): 60-64.  
Zhu P, Gu A J, Wang H, Gu J Q, Gu J Q. Effects of continuous rice and wheat straw returning to field with decomposing agent on soil properties and rice yield. *Acta Agric Shanghai*, 2018, 34(2):60-64. (in Chinese with English abstract)
- [21] 怀燕, 潘建清, 陈一定, 陆若辉, 朱伟锋. 腐熟剂作用下油菜秸秆还田对土壤性状与单季稻产量的影响. *浙江农业科学*, 2014(5): 636-638.  
Huan Y, Pan J Q, Chen Y D, Lu R H, Zhu W F. Rotten agent under the action of rape straw returned to soil

- properties and the effect of single harvesting yield. *Zhejiang Agric Sci*, 2014(5): 636-638. (in Chinese with English abstract)
- [22] Cabangon R J, Tuong T P, Castillo E G, Bao L X, Lu G A, Wang G H, Cui Y L, Bouman B A M, Li Y H, Chen C D, Wang J Z. Effect of irrigation method and N-fertilizer management on rice yield, water productivity and nutrient-use efficiencies in typical lowland rice conditions in China. *Paddy Water Environ*, 2004, 2: 195-206.
- [23] 杨建昌, 王志琴, 朱庆森. 不同土壤水分状况下氮素营养对水稻产量的影响及其生理机制的研究. *中国农业科学*, 1996, 29(4): 58-66.  
Yang J C, Wang Z Q, Zhu Q S. Effect of nitrogen nutrition on rice yield and its physiological mechanism under different status of soil moisture. *Sci Agric Sin*, 1996, 29(4): 58-66. (in Chinese with English abstract)
- [24] Sun Y J, Ma J, Sun Y Y, Xu H, Yang Z Y, Liu S J, Jia X W, Zheng H Z. The effects of different water and nitrogen managements on yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice of China. *Field Crops Res*, 2012, 127(27): 85-98.
- [25] 吴登, 黄世初, 李明灌, 谢毅栋, 梁玉祥, 陈智慧. 稻草还田免耕抛秧的增产效果及节水效应. *杂交水稻*, 2006(S1): 109-112.  
Wu D, Huang S R, Li M G, Xie Y D, Liang Y X, Chen Z H. Straw counters-field increase yield and some water-saving effect. *Hybrid Rice*, 2006(S1): 109-112. (in Chinese with English abstract)
- [26] 任万军, 刘代银, 伍菊仙, 杨文钰, 樊高琼. 免耕高留茬抛秧稻的产量及若干生理特性研究. *作物学报*, 2008, 34(11): 1994-2002.  
Ren W J, Liu D Y, Wu J X, Yang W Y, Fan G Q. Effect of broadcasting rice seedlings in the field with high standing-stubbles under no-tillage condition on yield and some physiological characteristics. *Acta Agron Sin*, 2008, 34(11): 1994-2002. (in Chinese with English abstract)
- [27] 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. *中国水稻科学*, 2008, 22(1): 65-70.  
Ye W P, Xie X L, Wang K R, Li Z G. Effects of rice straw maturing in different periods on growth and yield of rice. *Chin J Rice Sci*, 2008, 22(1): 65-70. (in Chinese with English abstract)
- [28] Jawson M D, Elliott L F. Carbon and nitrogen transformations during wheat straw and root decomposition. *Soil Biol Chem*, 1986, 18: 15-22.
- [29] 张杰, 刘正柱, 将井军, 陈凤英. 小麦留茬还田的效果. *土壤通报*, 2001(4): 34-36.  
Zhang J, Liu Z Z, Jiang J J, Chen F Y. The Effect and methods of returning the high stubble of wheat stubble into field. *Chin J Soil Sci*, 2001(4): 34-36. (in Chinese with English abstract)
- [30] 钱洪兵, 韩春贵, 钱存进, 严桂珠. 稻麦秸秆直接还田技术研究. *土壤通报*, 1998(2): 26-29.  
Qian H B, Han C G, Qian C J, Yan G Z. Rice and wheat straw counters-field technology research. *Chin J Soil Sci*, 1998(2): 26-29. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张自常, 李鸿伟, 曹转勤, 王志琴, 杨建昌. 施氮量和灌溉方式的交互作用对水稻产量和品质影响. *作物学报*, 2013, 39(1): 84-92.  
Zhang Z C, Li H W, Cao Z Q, Wang Z Q, Yang J C. Effect of interaction between nitrogen rate and irrigation regime on grain yield and quality of rice. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(1): 84-92. (in Chinese with English abstract)
- [32] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 杨志远, 程洪彪, 贾现文, 马均. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响. *作物学报*, 2011, 37(12): 2221-2232.  
Sun Y J, Sun Y Y, Liu S J, Yang Z Y, Cheng H B, Jia X W, Ma J. Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(12): 2221-2232. (in Chinese with English abstract)
- [33] Ishii R. Leaf photosynthesis in rice in relation to grain yields//Abrol Y P, Govindjee M P. Photosynthesis -Photoreactions to Plant Productivity. Kluwer, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993: 561-569.