

引用格式:

张小毅, 刘文露, 向焱赟, 肖峰, 田伟, 张玉盛, 敖和军. 混合绿肥还田对双季稻干物质积累及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(6): 609–615.

ZHANG X Y, LIU W L, XIANG Y Y, XIAO F, TIAN W, ZHANG Y S, AO H J. Effects of returning mixed green manure on dry matter accumulation and yield of double cropping rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(6): 609–615.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 混合绿肥还田对双季稻干物质积累及产量的影响

张小毅<sup>1,2</sup>, 刘文露<sup>1,2</sup>, 向焱赟<sup>1,2</sup>, 肖峰<sup>1,2</sup>, 田伟<sup>1,2</sup>, 张玉盛<sup>1,2</sup>, 敖和军<sup>1,2\*</sup>

(1.湖南农业大学农学院, 湖南长沙 410128; 2.南方粮油作物协同创新中心, 湖南长沙 410128)

**摘要:** 2018年4月至2019年11月, 以早稻品种中早39、晚稻品种玉针香为材料, 设计6个处理, 分别为不施用绿肥还田(CK)、施用紫云英还田(T1)、施用紫云英及黑麦草还田(T2)、施用紫云英及油菜还田(T3)、施用箭舌豌豆及黑麦草还田(T4)、施用箭舌豌豆及油菜还田(T5), 研究豆科与非豆科绿肥混合还田对双季稻叶片光合特性、干物质积累与分配规律及产量的影响。结果表明: 与CK相比, 绿肥还田明显降低早稻生育前期叶片净光合速率和群体干物质积累, 显著促进早、晚稻生育后期干物质积累, 提高剑叶净光合速率, 2年双季稻平均增产2.88%~14.74%; 与T1相比, T3、T5处理有利于早、晚稻高光效群体形成, 早、晚稻成熟期干物质积累量显著增加, 剑叶净光合速率维持在较高水平; 豆科与非豆科绿肥混合还田对双季稻有效穗数、结实率和产量有显著影响, 双季稻有效穗数、结实率与产量呈显著正相关( $P < 0.05$ ); 与CK相比, T3处理的产量最高, 达17.13 t/hm<sup>2</sup>, 2年双季稻产量平均增加14.74%。紫云英与油菜混合还田能有效提高双季稻生育后期叶片叶绿素含量, 延缓剑叶净光合速率下降, 促进双季稻干物质积累与分配, 显著提高成熟期干物质积累量和稻谷产量, 是比较适宜的绿肥混合还田模式。

**关键词:** 双季稻; 豆科绿肥; 还田; 光合特性; 干物质; 产量

中图分类号: S511.4<sup>+</sup>20.62

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)06-0609-07

## Effects of returning mixed green manure on dry matter accumulation and yield of double cropping rice

ZHANG Xiaoyi<sup>1,2</sup>, LIU Wenlu<sup>1,2</sup>, XIANG Yanyun<sup>1,2</sup>, XIAO Feng<sup>1,2</sup>,  
TIAN Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Yusheng<sup>1,2</sup>, AO Hejun<sup>1,2\*</sup>

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.South Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil in China, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** In order to comprehensively evaluate the effects of incorporating into soil the mixture of leguminous and non-leguminous green manure on the dry matter accumulation, the leaf photosynthetic characteristics, distribution rules and yield of double cropping rice, from April 2018 to November 2019, six treatments were designed with early rice variety Zhongzao 39 and late rice variety Yuzhenxiang as materials, including no green fertilizer(CK), milk vetch(T1), milk vetch and ryegrass(T2), milk vetch and oil rape(T3), arrow tongue pea and ryegrass(T4), arrow tongue pea and rape(T5). The results showed that compared with CK, returning green fertilizer to the field significantly reduced the net photosynthetic rate of leaves and population dry matter accumulation in the early growth stage of early rice, and

收稿日期: 2020-10-29

修回日期: 2020-12-11

基金项目: 国家水稻产业技术体系栽培与土肥岗位专家项目(CARS-01)

作者简介: 张小毅(1996—), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 从事农艺措施治理水稻重金属污染研究, 672565682@qq.com; \*通信作者, 敖和军, 博士, 副教授, 主要从事水稻重金属污染控制研究, aohejun@126.com

significantly promoted the dry matter accumulation in the late growth stage of early and late rice, and increased the net photosynthetic rate of flag leaves. The average yield of two-year double cropping rice increased by 2.88%-14.74%. Compared with T1, T3 and T5 treatments were conducive to the formation of high light efficiency population in early and late rice, the dry matter accumulation in mature stage of early and late rice increased significantly, and the net photosynthetic rate of flag leaf maintained at a high level. The effective panicles, seed setting rate and yield of double cropping rice were significantly affected by the mixed return of leguminous and non-leguminous green fertilizers, and there was a significant positive correlation between the effective panicles, seed setting rate and yield of double cropping rice ( $P < 0.05$ ). Compared with CK, the yield of T3 treatment was the highest, which was 17.13 t/hm<sup>2</sup>, and the yield of two-year double cropping rice of T3 treatment increased by 14.74%. The mixed returning of milk vetch and rape could effectively improve the chlorophyll content of leaves in the later growth stage of double cropping rice, delay the decline of net photosynthetic rate of flag leaves, promote the dry matter accumulation and distribution of double cropping rice, and significantly improve the dry matter accumulation and rice yield at maturity, which indicate the mixed returning of milk vetch and rape is a more suitable green fertilizer mixed returning model.

**Keywords:** double cropping rice; leguminous green manure; returning to the field; photosynthetic characteristics; dry matter; yield

长期施用大量氮、磷、钾等化肥会造成养分大量流失, 土壤重金属和有毒物质含量增加, 土壤微生物活性下降, 土壤理化性质变劣, 进而导致一系列的生态环境问题, 如土壤退化、水土流失严重、水土富营养化等<sup>[1]</sup>; 因此, 急需具备生态、可持续、肥效好等特性的产品代替化肥。研究<sup>[2-7]</sup>表明, 豆科与非豆科绿肥混合还田, 可以利用其在腐解速率和养分释放速率上形成的时间差, 最大限度地发挥绿肥肥效, 满足水稻对养分的需求, 提高水稻产量, 改善土壤肥力。前人研究多是侧重豆科与非豆科绿肥混合还田对土壤肥力和作物产量的影响, 有关长江中下游稻区连续豆科与非豆科绿肥混合还田对双季稻干物质积累与产量的研究报道较少, 且具体的混合模式也值得研究和明确。本研究中, 通过田间小区试验, 以豆科绿肥紫云英、箭舌豌豆及非豆科绿肥黑麦草、油菜为材料, 研究豆科与非豆科绿肥混合还田对双季稻叶片光合特性、干物质积累、分配规律及产量的影响, 筛选出适合长江中下游双季稻地区最佳混合还田模式, 以期为合理利用绿肥以及水稻高产、高效栽培提供依据。

## 1 试验区基本概况

试验田所在区域为双季稻主产区, 种植制度为紫云英-双季稻。稻田土壤类型为河流冲击物发育而成的紫潮泥, 土壤肥力中等, 试验前耕作层

(0~20 cm)有机质含量 13.68 g/kg, 全氮含量 0.77 g/kg, 碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 133.86、19.60、133.66 mg/kg, 土壤 pH 5.73。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料

供试豆科绿肥为紫云英和箭舌豌豆, 非豆科绿肥为黑麦草和油菜。早稻品种为中早 39; 晚稻品种为玉针香。水稻种子和绿肥均由湘阴县农业农村局提供。

### 2.2 试验设计

试验于 2018 年 4 月至 2019 年 11 月在湖南省岳阳市湘阴县白泥湖乡里湖村(N28°22', E112°52')进行。共设置 6 种还田处理: 不施用绿肥, 早、晚稻稻草还田(CK); 施用紫云英(22.5 t/hm<sup>2</sup>)及早、晚稻稻草还田(T1); 施用紫云英(11.25 t/hm<sup>2</sup>)、黑麦草(11.25 t/hm<sup>2</sup>)及早、晚稻稻草还田(T2); 施用紫云英(11.25 t/hm<sup>2</sup>)、油菜(3.75 t/hm<sup>2</sup>)及早、晚稻稻草还田(T3); 施用箭舌豌豆(11.25 t/hm<sup>2</sup>)、黑麦草(11.25 t/hm<sup>2</sup>)及早、晚稻稻草还田(T4); 施用箭舌豌豆(11.25 t/hm<sup>2</sup>)、油菜 3.75(t/hm<sup>2</sup>)及早、晚稻稻草还田(T5)。其中 T1 处理为单一绿肥还田处理, T2、T3、T4、T5 处理为绿肥混合还田处理。试验采用单因素随机区组设计。3 次重复。小区面积 40 m<sup>2</sup>。小区间用田埂分离, 防止水肥串流。

早、晚两季在同一试验田进行。保持小区排列不变,即在早稻收获时采用人工收获与整地,避免破坏小区田埂,按照原试验设计继续开展晚稻试验。为不影响晚稻的生长,早稻秸秆粉碎(5 cm)后翻压还田,还田量为  $7.5 \text{ t/hm}^2$ 。晚稻秸秆也全部翻盖还田。

早、晚稻均采用水育秧,人工移栽,移栽密度为  $19.98 \text{ cm} \times 19.98 \text{ cm}$ 。早稻 4 月中旬移栽,7 月中旬收获;晚稻 7 月中下旬移栽,11 月上旬收获。绿肥 10 月下旬(晚稻收获前)套播。紫云英单独还田处理播种量为  $35 \text{ kg/hm}^2$ ,豆科与非豆科绿肥混合还田处理各绿肥播种量均为  $17.5 \text{ kg/hm}^2$ ,且豆科绿肥与非豆科绿肥播种面积各占小区面积一半。绿肥于早稻移栽前 5 d 翻压还田。如果绿肥过多,则带根移除;不够,则从其他田块带根施入。本试验总施肥量在当地施肥量的基础上减少 20%,基肥施用水稻专用复合肥(N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  质量比为 20 : 8 : 12)  $450 \text{ kg/hm}^2$ ,分蘖期追施尿素(含 N 46.4%)  $75 \text{ kg/hm}^2$  和氯化钾(含  $\text{K}_2\text{O}$  60%)  $112.5 \text{ kg/hm}^2$ 。早、晚稻全生育期内不施用化学除草剂,采用人工除草,其他田间管理措施均与常规大田生产一致。

## 2.3 测定项目与方法

### 2.3.1 叶片 SPAD 值的测定

测定前各小区挂牌标记长势基本一致的 10 株水稻,分别在早、晚稻分蘖中期、孕穗始期、抽穗期用便携式叶绿素仪(Chlorophyll meter, SPAD-502)测定水稻主茎倒一展开叶的 SPAD 值,以每片叶的上部 1/3 处、中部、下部 1/3 处 SPAD 读数的平均值作为该叶片的 SPAD 值,取 10 株水稻的平均值作为该小区叶片的 SPAD 值。

### 2.3.2 叶片净光合速率的测定

测定前各小区挂牌标记长势基本一致的 3 株水稻,分别在早、晚稻分蘖中期、孕穗始期、抽穗期、成熟期用 Li-6400 光合仪(LI-COR, 美国)于晴天 09:00—11:00 测定水稻植株的净光合速率,选取水稻主茎倒一展开叶进行测定,结果取其平均值。

### 2.3.3 干物质积累量的测定

于早、晚稻分蘖中期、孕穗始期、抽穗期、成熟期各小区按平均茎蘖数取代表性植株 5 穴,将水稻植株分为根、茎、叶、穗(齐穗期、成熟期)4 个部位,分别装袋后于烘箱中  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  杀青 30 min,  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干至恒重,用 1/100 电子天平称量各部位干质量,计算各生育期干物质群体积累量。

### 2.3.4 产量及产量构成指标的测定

早、晚稻成熟收割前,按小区对角线选取有代表性的 12 株水稻,调查有效穗数、穗粒数、千粒质量、结实率。收获时按小区全收、全打测产,晒干后测定稻谷质量和含水量,按标准含水量(13.5%)折算水稻的实际产量。

## 2.4 数据分析

采用 Excel 2010 进行数据处理和绘图;运用 SPSS 25.0 进行方差分析和相关性分析;采用 LSD 法进行处理间的多重比较。

## 3 结果与分析

### 3.1 豆科与非豆科绿肥混合还田对双季稻产量及产量构成的影响

由表 1 可知,与 CK 相比,2 年双季稻平均增产 2.88%~14.74%。2018 年, T1、T2、T3、T4、T5 处理双季稻产量显著高于 CK, T2、T3、T4、T5 双季稻产量显著高于 T1, T3、T5、T4、T2、T1、CK 处理的产量依次降低; T3 处理双季稻产量最高,为  $17.13 \text{ t/hm}^2$ ,分别较 CK、T1 增产 14.74%、11.52%; T5 处理的产量次之,为  $16.98 \text{ t/hm}^2$ ,分别较 CK、T1 增产 13.73%、10.55%, T3、T5 处理间双季稻产量差异不显著。2019 年,各绿肥还田处理 T1、T2、T3、T4、T5 产量也显著高于 CK, T3、T4、T5 处理产量均高于 T1, T3、T5 处理产量显著高于 T2、T4 处理, T3、T5、T4、T2、T1、CK 处理的产量依次降低; T3 处理双季稻产量最高,为  $17.75 \text{ t/hm}^2$ ,分别较 CK、T1 增产 14.74%、7.12%, T5 处理的产量次之,为  $17.23 \text{ t/hm}^2$ ,分别较 CK、T1 增产 11.38%、3.98%。

豆科与非豆科绿肥混合还田后对双季稻产量构成因素有影响, 2 年的变化趋势基本一致(表 1)。2018 和 2019 年早稻产量差异主要来源于有效穗数和结实率, 其中 T2、T3、T4、T5 的有效穗数和结实率均高于 T1 与 CK 的, 以 T3 处理的最高, T5 处理的次之。2019 年早稻成熟期受天气影响, 导致结实率低于 2018 年的。进一步分析显示, 早稻产量与有效穗数( $R^2=0.4864$ ,  $P < 0.01$ )和结实率( $R^2=0.3948$ ,  $P < 0.05$ )呈正相关; 2 年早稻各处理间穗粒数差异不显著, 均以 CK 和 T1 处理的最高; T1、T2、T3、T4、T5 处理的千粒质量均高于 CK 的, 其中, 2018 年早稻 T5 处理的显著高于 CK, 其余各处理间的差异未达到显著水平。

2019 年早稻各处理间的千粒质量的差异不显著, 2 年早稻千粒质量均以 T5 处理的最高。2018 年和 2019 年晚稻产量构成因素的表现与早稻基本一致, 晚稻产量主要受有效穗数和结实率的影响, 其中 T3、T5 处理有效穗数显著高于其余各处理, 两者之间差异不显著; 而 T3 处理的结实率显著高于 T5 处理的, 并显著高于其他各处理。进一步分析表明, 晚稻产量与有效穗数( $R^2=0.6578$ ,  $P < 0.01$ )和结实率( $R^2=0.2980$ ,  $P < 0.05$ )呈正相关。2 年晚稻各处理间的穗粒数差异不显著; 与 CK 相比, 连续 2 年绿肥还田处理 T1、T2、T3、T4、T5 能够提高晚稻的千粒质量, 其中 T1 处理的千粒质量显著高于 CK 的。

表 1 豆科与非豆科绿肥混合还田处理双季稻产量及其构成因素

年份	处理	有效穗数/( $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$ )		每穗粒数		结实率/%		千粒质量/g		产量/( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )		年产量/ ( $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ )	增产率/%	
		早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻		与CK比	与T1比
2018	CK	403.91d	531.95d	95.32	64.95	75.88d	73.18d	24.32b	29.20b	8.62d	6.31d	14.93d		
	T1	415.91c	543.59c	94.74	64.01	75.95d	74.41c	24.74ab	29.61a	8.79c	6.57c	15.36c	2.88	
	T2	424.15b	553.64bc	92.62	65.73	76.82bc	74.54bc	24.62ab	29.25b	9.48b	7.06b	16.54b	10.78	7.68
	T3	449.42a	581.92a	94.17	64.50	78.60a	75.15a	24.54ab	29.64a	9.71a	7.42a	17.13a	14.74	11.52
	T4	426.53b	556.94b	92.94	65.75	76.44cd	74.45c	24.66ab	29.33b	9.60ab	7.31a	16.91a	13.26	10.09
	T5	429.44b	568.60a	92.83	64.31	77.34b	74.79b	24.94a	29.35b	9.63a	7.35a	16.98a	13.73	10.55
2019	CK	406.87d	538.34d	96.04	65.05	67.99d	76.68d	24.37	28.71b	7.99d	7.48d	15.47d		
	T1	434.01c	544.44c	96.11	64.82	68.05d	78.23c	24.57	29.67a	8.47c	8.10c	16.57c	7.11	
	T2	437.95bc	547.22c	95.37	64.48	68.57c	78.49c	24.53	29.38ab	8.52c	8.10bc	16.62bc	7.43	0.30
	T3	447.95a	582.12a	95.75	64.52	71.18a	80.29a	24.63	29.17ab	9.25a	8.50a	17.75a	14.74	7.12
	T4	438.57bc	561.67b	95.19	63.93	69.50b	78.53c	24.51	29.52ab	8.58c	8.23b	16.81b	8.66	1.45
	T5	444.01ab	580.56a	95.81	64.07	70.81a	79.20b	24.92	29.09ab	8.80b	8.43a	17.23a	11.38	3.98

同列数据不同小写字母表示同一年份处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

### 3.2 豆科与非豆科绿肥混合还田对双季稻干物质积累的影响

从表 2 可以看出, 各生育时期早、晚稻群体干物质积累量随生育进程的推进不断增加。除早稻分蘖中期外, 其他 3 个生育期 T3、T5、T4、T2、T1、CK 处理的早稻群体干物质积累量依次降低, 与早稻产量表现出相同的趋势。在早稻分蘖中期, CK 处理的群体干物质积累量高于其余绿肥还田处理, 但差异不显著。早稻群体干物质积累

量于成熟期达到最大值, 以 T3 处理的最高, 为  $16441.03 \text{ kg}/\text{hm}^2$ , 分别比 CK、T1 的增加 18.12%、11.75%。各处理晚稻群体干物质积累量与早稻表现一致。晚稻群体干物质积累量于成熟期达到最大值, 以 T3 处理的最高, 分别比 CK、T1 增加 11.40%、7.93%。从早、晚稻各生育时期群体干物质积累量来看, 豆科与非豆科绿肥混合还田处理 T3、T5 在增加群体干物质质量上要优于单一豆科绿肥还田处理 T1。

表 2 2019 年豆科与非豆科绿肥混合还田处理双季稻群体干物质积累量

Table 2 Dry matter accumulation of double cropping rice population treated with legume and non-legume green incorporation in 2019

季别	处理	群体干物质积累量/(kg·hm <sup>-2</sup> )			
		分蘖中期	孕穗始期	齐穗期	成熟期
早稻	CK	940.72	2340.06c	8163.19e	13 919.36e
	T1	918.79	2389.53b	8403.42d	14 711.85d
	T2	919.63	2398.98b	8521.59cd	15 334.10c
	T3	936.30	2453.17a	9033.01a	16 441.03a
	T4	927.13	2410.09ab	8645.04bc	15 592.20bc
	T5	931.30	2450.95a	8724.08b	15 783.20b
晚稻	CK	935.47c	4571.53d	8085.19d	13 711.93d
	T1	980.04b	4718.78c	8490.52c	14 152.45c
	T2	987.63bc	5104.65b	8785.74c	14 490.28bc
	T3	1046.66a	5470.43a	9491.14a	15 275.02a
	T4	1010.96bc	5252.28b	9036.09b	14 757.90b
	T5	1018.61ab	5348.40ab	9225.54b	14 948.16b

同列数据不同小写字母表示同一季别各处理间的差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 3.3 豆科与非豆科绿肥混合还田对双季稻叶片 SPAD 值的影响

由表 3 可知,早稻各处理水稻叶片 SPAD 值在孕穗始期和齐穗期高于晚稻的,在齐穗期表现最明显;分蘖中期 CK 叶片 SPAD 值显著高于 T1、T2 处理,比 T1、T2 处理分别增加 7.68%、7.51%;孕穗始期, T3 处理的叶片 SPAD 值最高,

表 3 2019 年豆科与非豆科绿肥混合还田处理双季稻叶片 SPAD 值

Table 3 Leaf SPAD value of double cropping rice treated with legume and non-legume green incorporation in 2019

季别	处理	SPAD 值		
		分蘖中期	孕穗始期	齐穗期
早稻	CK	40.94a	41.06b	45.40
	T1	38.02b	42.12ab	45.39
	T2	38.08b	41.27ab	45.50
	T3	39.74ab	42.73a	46.21
	T4	39.17ab	42.44ab	46.19
	T5	39.37ab	41.67ab	46.23
晚稻	CK	38.34b	38.82c	41.10b
	T1	38.73b	40.57b	41.44ab
	T2	39.13b	39.46c	41.73ab
	T3	40.18a	42.66a	41.98a
	T4	38.89b	39.26c	41.46ab
	T5	38.99b	40.58b	41.93a

同列数据不同小写字母表示同一季别各处理间的差异显著 ( $P<0.05$ )。

显著高于 CK,较 CK 增加 4.07%;齐穗期各处理间叶片 SPAD 值差异不显著。晚稻分蘖中期叶片 SPAD 值 T3 处理显著高于 CK、T1 处理,比 CK、T1 处理分别增加 4.80%、3.74%;孕穗始期 T3 处理叶片 SPAD 值显著高于其余各处理, T1、T5 处理显著高于 CK、T2 和 T4 处理;齐穗期 T3、T5、T2、T4、T1、CK 处理水稻叶片 SPAD 值依次降低,其中 T3、T5 处理的显著高于 CK 的,分别比 CK 增加 2.14%、2.02%。水稻叶片 SPAD 值与叶片叶绿素含量呈显著正相关,豆科与非豆科绿肥混合还田处理 T3、T5 在提高早、晚稻各生育时期叶片叶绿素含量上表现出较好的优势。

### 3.4 豆科与非豆科绿肥混合还田对双季稻叶片净光合速率的影响

由表 4 可知,在早稻各生育期,各处理分蘖中期的叶片净光合速率最高,成熟期的最低;在分蘖中期,CK 叶片净光合速率显著高于 T1、T4 处理, T2、T3 和 T5 处理之间差异不显著;在孕穗期、齐穗期和成熟期, T3、T5 处理叶片净光合速率显著高于 CK、T1 处理; T3、T5 处理成熟期叶片净光合速率差异不显著,较 CK 分别提高 10.27%、9.68%,较 T1 处理分别提高 4.34%、3.78%。晚稻中,与 CK、T1 处理相比, T3、T5 处理能显著提高各生育时期叶片净光合速率;在

表 4 2019 年豆科与非豆科绿肥混合还田处理双季稻叶片净光合速率

Table 4 Leaf net photosynthesis of double cropping rice treated with legume and non-legume green incorporation in 2019

季别	处理	叶片净光合速率/( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )			
		分蘖中期	孕穗期	齐穗期	成熟期
早稻	CK	24.97a	18.72d	20.63c	13.53d
	T1	24.10b	19.33cd	21.15bc	14.30c
	T2	24.22ab	19.65bc	22.31a	14.46bc
	T3	24.62ab	21.02a	22.49a	14.92a
	T4	24.17b	20.18abc	21.80ab	14.74ab
	T5	24.63ab	20.41ab	22.38a	14.84a
晚稻	CK	24.41c	17.70d	17.83d	7.90b
	T1	24.68c	18.18c	19.65c	8.03b
	T2	25.27b	18.31c	20.08bc	8.10b
	T3	25.73a	21.24a	21.29a	8.89a
	T4	25.30b	18.10cd	20.18bc	8.69a
	T5	25.41ab	19.98b	20.38b	8.84a

同列数据不同小写字母表示同一季别各处理间的差异显著 ( $P<0.05$ )。

成熟期, T3 处理叶片净光合速率较 CK、T1 处理的分别提高 12.53%、10.71%, T5 处理较 CK、T1 处理分别提高 11.90%、10.09%。可知, 豆科与非豆科绿肥混合还田处理 T3、T5 能够有效延缓成熟期剑叶净光合速率下降, 使剑叶保持较强的光合能力。

#### 4 结论与讨论

光合作用是作物生长发育和产量形成的重要因素。光合速率是衡量叶片光合作用强度的重要指标, 叶片光合速率与叶绿素含量具有密切的关系<sup>[8]</sup>。本研究结果表明, 豆科与非豆科绿肥混合还田处理均能提高早、晚稻孕穗期至成熟期叶片的叶绿素含量, 延缓齐穗后剑叶净光合速率的下降, 使“源”保持在较好的水平, 这与汤军<sup>[9]</sup>的研究结果一致。绿肥还田后会产生微生物“争氮”现象, 从而影响水稻前期生长发育<sup>[10]</sup>。本研究发现, 在早稻分蘖中期产生了微生物“争氮”现象, 各绿肥还田处理叶片净光合速率均低于 CK。而豆科与非豆科绿肥混合还田与单一豆科绿肥还田相比, 可以缓解微生物“争氮”现象, 其原因有可能是豆科与非豆科绿肥腐解过程具有协同作用, 还田后快速腐解并释放养分, 增加土壤矿质氮含量, 从而有利于缓解水稻生育前期氮素供应不足的问题<sup>[11]</sup>。

作物产量的形成过程实质上是干物质积累与分配的过程<sup>[12]</sup>。本研究结果表明, 绿肥还田对早稻分蘖中期群体干物质积累产生了抑制作用, 这与裴鹏刚等<sup>[13]</sup>的研究结果一致。豆科与非豆科绿肥混合还田较豆科绿肥单一还田可以提高早、晚稻各生育时期群体干物质积累量, 说明豆科与非豆科绿肥混合还田具有协同促进作用, 有利于群体干物质的积累, 在一定程度上起到了增“源”、扩“库”的作用, 这与李萍等<sup>[7]</sup>的研究结果一致。

水稻产量的高低与植株干物质生产和分配的关系密切。本研究结果表明, 豆科与非豆科绿肥混合还田与豆科绿肥单独还田、绿肥不还田相比, 均有利于提高早、晚稻有效穗数和结实率, 从而提高早、晚稻产量。其中, 以 T3 处理(紫云英及油菜还田)和 T5 处理(箭舌豌豆及油菜还田)增产较明显, 2 年平均增产 14.74%、12.56%。这与陶云彬等<sup>[6]</sup>的研究结果一致。究其原因, 可能是所采

用的豆科绿肥紫云英或箭舌豌豆腐解释放 N 元素较多, 但 P、K 元素供应不足, 搭配油菜还田后能提供足够的 P、K 元素, 养分供应达到平衡, 实现水稻增产。

豆科与非豆科绿肥混合还田可促进双季稻生育后期叶片叶绿素含量的提高, 有利于剑叶净光合速率在生育后期维持较高水平, 有效延缓生育后期剑叶净光合速率的下降, 增加双季稻植株干物质积累量, 从而提高双季稻稻谷产量。紫云英与油菜混合还田有利于双季稻形成高光效群体, 促进干物质积累与分配, 显著提高双季稻有效穗数和结实率, 增产效果最明显。在长江中下游双季稻稻区, 紫云英及油菜混合还田模式在化肥减量 20%的情况下能提高双季稻产量, 具有较好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 张子璐, 刘峰, 侯庭钰. 我国稻田氮磷流失现状及影响因素研究进展[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3292-3302.  
ZHANG Z L, LIU F, HOU T Y. Current status of nitrogen and phosphorus losses and related factors in Chinese paddy fields: a review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(10): 3292-3302.
- [2] JEON W T, CHOI B, ABD EL-AZEEM S A M, et al. Effect of different seeding methods on green manure biomass, soil properties and rice yield in rice-based cropping systems[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(11): 2024-2031.
- [3] 周兴, 廖育林, 鲁艳红, 等. 减量施肥下紫云英与稻草协同利用对双季稻产量和经济效益的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(5): 469-474.  
ZHOU X, LIAO Y L, LU Y H, et al. Effects of Chinese milk vetch and rice straw synergistic dispatching on grain yield and economic benefit of double cropping rice system under fertilizer reduction[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2017, 43(5): 469-474.
- [4] 熊迎, 翟国栋, 马海青. 稻田紫云英与油菜混播不同配比效应研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(23): 5677-5679.  
XIONG Y, ZHAI G D, MA H Q. The effects of mixed milk vetch and rape with different ratios in rice field[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(23): 5677-5679.
- [5] 宋莉, 韩上, 鲁剑巍, 等. 油菜秸秆、紫云英绿肥及

- 其不同比例配施还田的腐解及养分释放规律研究[J]. 中国土壤与肥料, 2015(3): 100–104.
- SONG L, HAN S, LU J W, et al. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of different proportional mixture of rape straw and Chinese milk vetch in rice field[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2015(3): 100–104.
- [6] 陶云彬, 刘晓霞. 紫云英、油菜长期混播还田的作物增产和土壤培肥效应[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(12): 2206–2208.
- TAO Y B, LIU X X. Effects of long-term *Astragalus sinicus* and *Brassica napus* L. mixtures returning on yield-increasing and soil fertilization[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, 60(12): 2206–2208.
- [7] 李萍, 杨滨娟, 张鹏, 等. 紫云英与油菜混播对双季稻产量、植株干物质及氮素吸收利用的影响[J]. 江西农业大学学报, 2020, 42(2): 219–228.
- LI P, YANG B J, ZHANG P, et al. Effects of the mixture of Chinese milk vetch and rape on the yield, dry matter and nitrogen uptake and utilization of double cropping rice[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(2): 219–228.
- [8] 程建峰, 陈根云, 沈允钢. 植物叶片特征与光合性能的关系[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 466–473.
- CHENG J F, CHEN G Y, SHEN Y G. Relational analysis of leaf characteristics and photosynthetic capacities of plants[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 466–473.
- [9] 汤军. 紫云英和稻草联合还田下氮钾肥减量施用对双季水稻和土壤性状的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- TANG J. Effects of combined *Astragalus sinicus* L. and rice straw incorporation with reduced inorganic nitrogen and potassium fertilizer application on double-rice yield and soil properties[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2015.
- [10] 才硕, 时红, 潘晓华, 等. 绿肥与稻草联合还田对机插双季稻生长和产量的影响[J]. 江西农业大学学报, 2019, 41(4): 631–640.
- CAI S, SHI H, PAN X H, et al. Influence of the combination of returning green manure cultivation and rice straw on the growth and yield formation of machine-transplanted early-late season double-cropping rice[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2019, 41(4): 631–640.
- [11] 周国朋, 谢志坚, 曹卫东, 等. 稻草高茬-紫云英联合还田改善土壤肥力提高作物产量[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 157–163.
- ZHOU G P, XIE Z J, CAO W D, et al. Co-incorporation of high rice stubble and Chinese milk vetch improving soil fertility and yield of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 157–163.
- [12] 董桂春, 李进前, 于小凤, 等. 不同库容量常规籼稻品种物质生产与分配的基本特征[J]. 中国水稻科学, 2009, 23(6): 639–644.
- DONG G C, LI J Q, YU X F, et al. Characteristics of dry matter accumulation and distribution in conventional indica rice cultivars with different sink potentials[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2009, 23(6): 639–644.
- [13] 裴鹏刚, 张均华, 朱练峰, 等. 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.
- PEI P G, ZHANG J H, ZHU L F, et al. Effects of straw returning coupled with N application on rice photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield formation[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2015, 29(3): 282–290.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正