

# 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响

张璐<sup>1,2</sup>, 黄晶<sup>1,2</sup>, 高菊生<sup>1,2\*</sup>, 曹卫东<sup>1</sup>, 高鹏<sup>3</sup>, 杨志长<sup>2</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院衡阳红壤实验站/祁阳农田生态系统国家野外试验站, 祁阳 426182; 3. 湖南省农业科学院农业环境生态研究所, 长沙 410125)

**摘要:**为探明湘南双季稻区绿肥还田下的氮肥适宜用量, 设计了始于2008年冬季开展的长期田间定位试验(2009—2017), 研究绿肥与氮肥减量配施对双季稻的产量、氮肥农学效率、氮肥偏生产力以及2017年稻田耕层土壤养分含量的影响。共设计6个施肥处理: 不施氮肥空白对照、仅紫云英、习惯施肥、紫云英与100%无机氮配施、紫云英与80%无机氮配施、紫云英与60%无机氮配施。结果表明: 与习惯施氮量相比, 绿肥结合习惯施肥以及绿肥与化肥氮减量20%~40%配施均能保持甚至提高2009—2017年稻谷周年产量, 显著提高早、晚稻氮肥偏生产力和氮肥农学效率。绿肥与化肥氮减40%时, 产量变异系数最低和产量可持续指数最高。试验9a后, 与2008年相比, 稻田土壤有机质和全氮含量呈上升趋势。与习惯施肥相比, 绿肥与化肥氮减量20%~40%能维持土壤磷素与钾素的供给。综合考虑, 紫云英还田下, 化肥氮减施40%仍能获得高产稳产, 且氮肥利用率最高, 产量稳定性最好, 并可缓慢提高土壤肥力, 是湘南双季稻种植区较好的施肥模式。

**关键词:** 氮; 肥料; 绿肥; 湘南; 水稻产量; 氮肥利用率; 土壤养分

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.012

中图分类号: S142;S143.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-05-0106-07

张璐, 黄晶, 高菊生, 曹卫东, 高鹏, 杨志长. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 106—112. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.012 http://www.tcsae.org

Zhang Lu, Huang Jing, Gao Jusheng, Cao Weidong, Gao Peng, Yang Zhichang. Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(5): 106—112. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.05.012 http://www.tcsae.org

## 0 引言

中国是世界上最大的稻米生产和消费国<sup>[1]</sup>, 水稻播种面积和总产量均居国内粮食作物之首, 其中, 长江中下游、西南及华南等南方地区是中国水稻主产区<sup>[2]</sup>, 种植面积和总产分别占全国81.6%和79.4%, 因此, 南方地区水稻的高产稳产对中国粮食安全至关重要。氮是植物体内必需营养元素之一, 施氮对提高作物产量和改善果实品质有极其重要的作用。但施氮过多, 不仅浪费资源, 降低氮肥利用效率, 而且还会造成环境的污染和生态的破坏, 最终危害人类健康。另外, 长期单施化肥, 缺乏有机物料的投入, 易造成土壤理化性质变差和肥力水平下降。中国目前农业生产中普遍存在氮肥过量施用和氮肥利用率偏低的情况, 特别是在水稻的生产之中, 严重影响中国稻田生态系统的稳定性和可持续性, 不利于农业的可持续发展。如何兼顾水稻高产稳产与氮肥高效利用, 并维持甚至提高土壤肥力, 是当今农业科学的研究热点之一。

绿肥是一种纯天然的清洁有机肥源, 没有抗生素、重金属、激素等次生环境威胁<sup>[3]</sup>。绿肥可以固氮活磷、改土培肥, 能够调节稻田土壤pH值、改善土壤微生态环境质量和土壤物理性状<sup>[4]</sup>, 有利于后茬作物的生长, 还可通过增加地表冬季覆盖度而阻控水土流失, 降低农业生产成本和面源污染风险<sup>[5-10]</sup>。据不完全统计, 中国南方稻田约有0.2亿hm<sup>2</sup>冬季闲田可以用来发展冬季绿肥, 实现稻-绿肥两(三)熟制轮作, 这样不仅可以充分利用光、温、水、土等自然资源, 对当地生态环境也是一种保护<sup>[5]</sup>。紫云英(*Astragalus sinicus* L.)属于豆科黄芪属, 是中国稻区最主要种植和利用的冬季绿肥作物, 同时也是很好的蜜源植物与重要的青贮饲料原料来源, 是中国传统农业的精华<sup>[3]</sup>。在紫云英-水稻种植体系中, 水稻季施用氮、磷、钾肥不仅能促进后茬作物紫云英生长发育, 而且能显著增加其鲜草产量和养分累积量, 从而提高系统化肥的累积利用率<sup>[11-13]</sup>, 有利于肥料的高效利用和环境风险的降低。因此, 将绿肥(紫云英)纳入水稻轮作体系是实现南方稻区水稻高产、稳产和可持续发展的重要措施。

目前, 有关南方稻田冬种紫云英与氮肥减量配施的研究结果主要集中在短期田间试验上, 廖育林等<sup>[14]</sup>试验结果表明, 在减氮20%和40%条件下, 尿素配施紫云英均能促进早稻稻谷的增产和氮肥利用率的提高, 其中80%尿素配施紫云英处理的稻谷产量较100%尿素处理增产7.5%, 60%尿素配施紫云英处理提升水稻氮素利用率

收稿日期: 2019-10-07 修订日期: 2019-12-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0300902); 国家绿肥产业技术体系资助项目(CARS-22)

作者简介: 张璐, 助理研究员, 主要从事土壤培肥与改良研究。

Email: zhanglu01@caas.cn

\*通信作者: 高菊生, 高级农艺师, 主要从事绿肥生产和水稻长期定位试验的研究。Email: gaojusheng@caas.cn

效果最显著。钱晨晨等<sup>[13]</sup>研究表明,以冬闲常规施氮(150 kg/hm<sup>2</sup>)为对照,紫云英配施氮肥处理提高了水稻干物质积累量和氮素利用率,其中以配施纯氮 90 和 120 kg/hm<sup>2</sup>效果较优。马艳琴等<sup>[15-16]</sup>进行 2 a 试验表明,紫云英与减量氮肥配施可促进水稻生长、提高氮肥利用率。周国朋等<sup>[17]</sup>经过 5 a 试验研究表明,稻草-绿肥联合还田能够改善绿肥生长、提高水稻产量和土壤肥力。在红壤性水稻土地地区,有关更长时间试验条件下冬种紫云英与氮肥减量配施对水稻产量和氮肥利用率以及土壤养分含量影响的研究鲜见报道。本研究通过连续 9 a 紫云英-早稻-晚稻定位试验,研究冬种紫云英下减施化肥氮 20% 和 40% 对双季稻产量、氮肥农学效率、氮肥偏生产力以及土壤养分含量的影响,以期为南方双季稻田紫云英翻压还田后科学施用氮肥提供技术支撑和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况和试验材料

试验设在湖南省祁阳县官山坪村中国农业科学院衡阳红壤实验站(111°52'32"E, 26°45'42"N),海拔 150 m,年平均温度 17.8℃, >10℃积温为 5 648℃,多年平均降雨量 1 290 mm,无霜期约 293 d,年日照 1 610~1 620 h,年平均总辐射 4 549.38 MJ/m<sup>2</sup>,灾害性天气主要是发生在 4—6 月的暴雨和 8—10 月的季节性干旱。试验田位于红壤丘岗中部,于 2008 年冬季开始种植紫云英,供试土壤为第四纪红色黏土发育的水稻土,为壤质黏土,试验开始时 0~20 cm 土壤基础养分包括有机质 20.1 g/kg、全氮 0.90 g/kg、碱解氮 120 mg/kg、全磷 0.66 g/kg、有效磷 24.3 mg/kg、全钾 8.9 g/kg、速效钾 42.6 mg/kg、pH 值 6.55。

供试品种早稻为金优 974,晚稻为金优 207,种子购自当地农资部门。紫云英为湘紫 1 号,全氮、全磷、全钾质量分数分别为 0.62%、0.18%、0.70%,种子由湖南省土壤肥料研究所提供。

### 1.2 试验设计

稻田每年施肥,试验共设 6 个处理,不同处理施肥量见表 1。处理中农民习惯施肥模式早稻和晚稻化肥用量纯 N 分别为 150 和 172.5 kg/hm<sup>2</sup>,其中 80%作底肥,20%苗期追施;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 分别为 90 和 45 kg/hm<sup>2</sup>,全部用作底肥;K<sub>2</sub>O 分别为 90 和 112.5 kg/hm<sup>2</sup>,全部用作底肥;绿肥为盛花期收割的紫云英。其中,氮、磷、钾肥品种分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)、氯化钾(K<sub>2</sub>O 60%),冬种紫云英不施肥。

表 1 不同处理施肥量  
Table 1 Different fertilization treatments

处理 Treatments	施肥情况 Fertilization	(kg·hm <sup>-2</sup> )					
		早稻 Early rice			晚稻 Late rice		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
CK	不施氮肥空白对照	0	90	90	0	45	112.5
MV	紫云英	0	90	90	0	45	112.5
FFP100%	习惯施肥	150	90	90	172.5	45	112.5
MV+FFP100%	紫云英+100%无机 N	150	90	90	172.5	45	112.5
MV+FFP80%	紫云英+80%无机 N	120	90	90	138	45	112.5
MV+FFP60%	紫云英+60%无机 N	90	90	90	103.5	45	112.5

稻谷和紫云英的播种和收获时间每年大致相同:早稻于 3 月中旬播种,4 月底移栽,7 月下旬收割;晚稻于 6 月下旬播种,7 月下旬移栽,10 月下旬收割。人工插秧,栽插密度早稻为 255 000 茺/hm<sup>2</sup>,晚稻为 250 000 茺/hm<sup>2</sup>。紫云英种子于 10 月上旬撒播,播种量为 37.5 kg/hm<sup>2</sup>,次年早稻移栽前 10~15 d 翻压,鲜紫云英最高翻压量为 22 500 kg/hm<sup>2</sup>,如果紫云英过多,刈割移出,但记录移出量并留样测定。每个处理重复 3 次,共 18 个小区,随机区组排列,小区间筑 60 cm×25 cm 水泥埂,小区面积 21 m<sup>2</sup>(3 m×7 m)。其他管理措施按当地常规操作进行,早、晚稻生长期,采用间歇灌溉方式,田面灌溉水保持 4~7 cm,适时排水晒田,收割前 15 d 断水,冬季不进行灌溉。

### 1.3 测定项目及方法

#### 1.3.1 产量及氮肥利用指标

早晚稻成熟后以小区为单位进行收割,晒干后称质量,折算成稻谷产量,kg/hm<sup>2</sup>。计算 2009—2017 年产量变异系数和产量可持续指数。其中,产量变异系数(coefficient of variation, CV)采用常规方法计算,产量可持续指数(sustainable yield index, SYI)由式(1)<sup>[18]</sup>计算:

$$SYI=(Y-\sigma_{n-1})/Y_{\max} \quad (1)$$

式中 SYI 为产量可持续指数, Y 为 2009—2017 年水稻产量平均值, kg/hm<sup>2</sup>;  $\sigma_{n-1}$  为多年产量的标准差;  $Y_{\max}$  为 2009—2017 年水稻最高产量, kg/hm<sup>2</sup>。

氮肥农学效率(nitrogen agronomic efficiency, NAE)和氮肥偏生产力(nitrogen partial factor productivity, NPFP)分别由式(2)和(3)计算:

$$NAE=(Y_N-Y_{N0})/N \quad (2)$$

$$NPFP=Y_N/N \quad (3)$$

式中 NAE 为氮肥农学效率, kg/kg;  $Y_N$  为施氮区产量, kg/hm<sup>2</sup>;  $Y_{N0}$  为不施氮区产量, kg/hm<sup>2</sup>; N 为施氮量, kg/hm<sup>2</sup>。NPFP 为氮肥偏生产力, kg/kg。

#### 1.3.2 土壤基本理化性质

2017 年 10 月晚稻收获后采集耕层 0~20 cm 土壤,每小区分别采 5 个点。按照鲁如坤方法<sup>[19]</sup>,土壤 pH 测定采用酸度计法(水:土=2.5 mL:1 g);土壤有机质测定采用浓硫酸-重铬酸钾消煮-硫酸亚铁滴定法;土壤全氮测定采用半微量凯式定氮法;土壤全磷测定采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法;土壤全钾测定采用氢氧化钠熔融-火焰光度法;土壤碱解氮测定采用碱解扩散-稀硫酸滴定法;土壤有效磷测定采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;土壤速效钾测定采用乙酸铵-火焰光度法。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据处理与制图,用 DPSv15.10 软件进行数据分析,采用最小显著性差异法(least significance difference, LSD)进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 绿肥与氮肥减施对水稻产量的影响

#### 2.1.1 2009—2017 年历年水稻产量动态变化

绿肥与氮肥减量配施对水稻产量影响显著(图 1)。

CK 处理早稻稻谷产量显著低于 FFP100%、MV+FFP100%、MV+FFP80%、MV+FFP60%和 MV 处理 ( $P<0.05$ ), CK 和 MV 处理晚稻稻谷产量显著低于 FFP100%、MV+FFP100%、MV+FFP80%和 MV+FFP60%处理 ( $P<0.05$ )。FFP100%处理早稻和晚稻稻谷产量均低于 MV+FFP100%、MV+FFP80%和 MV+FFP60%处理, 说明紫云英与氮肥配施有利于水稻增产。除 2012 年和 2015 年早稻产量外, MV+FFP60%处理早、晚稻产量均低于 MV+FFP100%和 MV+FFP80%处理, 而 MV+FFP100%和 MV+FFP80%处理下历年早晚稻产量差异均不显著。

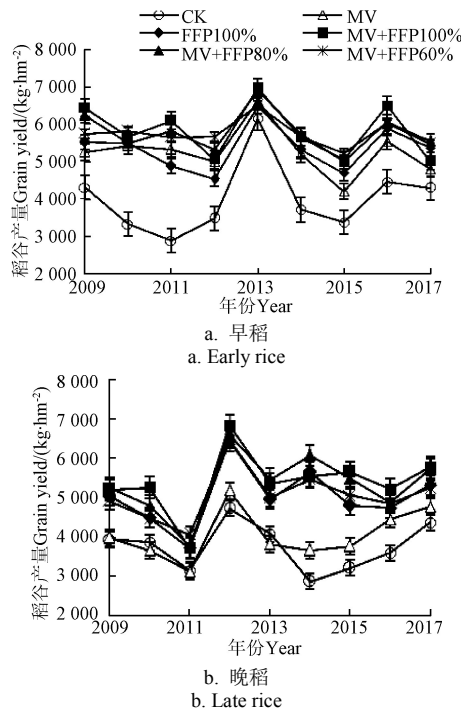


图 1 连续 9 年绿肥与氮肥减施对稻谷产量的影响

Fig.1 Effect of continuous 9-year of green manure and reducing nitrogen application on grain yield of rice

### 2.1.2 不同年份水稻周年平均产量

各处理早、晚稻产量年际变化趋势相近 (图 1), 因此, 将水稻周年产量试验年限分为 3 个时间段 (2009—2011 年、2012—2014 年和 2015—2017 年) 进行分析比较 (表 2)。2009—2011 年、2012—2014 年和 2015—2017 年, MV、FFP100%、MV+FFP100%、MV+FFP80%和 MV+FFP60%处理下水稻周年平均产量均显著高于 CK 处理, 增幅分别为 24.41%~50.63%、17.84%~44.19%和 18.12%~42.42% ( $P<0.05$ )。同时, FFP100%、MV+FFP100%、MV+FFP80%和 MV+FFP60%处理下 2009—2011 年、2012—2014 年和 2015—2017 年水稻周年平均产量均显著高于 MV 处理, 增幅分别为 8.85%~20.94%、13.31%~22.26%和 11.97%~20.57% ( $P<0.05$ )。与 FFP100%相比, MV+FFP100%、MV+FFP80%处理下 2009—2011 年水稻周年平均产量均有所提高, 分别显著增加 11.11%和 9.72% ( $P<0.05$ )。3 个时段 MV+FFP100%、MV+FFP80%和 MV+FFP60%处理水稻周年均无显著差异 ( $P>0.05$ )。可见, 与农民习惯施肥相比, 绿肥结合常规施肥或绿肥与化肥氮减量 20%~40%配施均能保持甚

至提高水稻产量。

表 2 3 个时段不同处理下早、晚稻周年产量

Table 2 Annual yields of early and late rice under different treatments during three periods

处理 Treatments	2009—2011	2012—2014	2015—2017
CK	7.17 ± 1.11 d	8.35 ± 1.83 c	7.78 ± 1.07 c
MV	8.93 ± 0.41 c	9.84 ± 0.84 b	9.19 ± 1.06 b
FFP100%	9.72 ± 1.00 b	11.15 ± 0.27 a	10.29 ± 0.67 a
MV+FFP100%	10.80 ± 0.92 a	11.81 ± 0.58 a	11.08 ± 0.56 a
MV+FFP80%	10.46 ± 0.96 a	12.04 ± 0.30 a	10.91 ± 0.40 a
MV+FFP60%	10.23 ± 10.23 ab	11.61 ± 0.51 a	10.63 ± 0.31 a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different letters at same column indicate significant difference ( $P<0.05$ ). Same as below.

### 2.2 绿肥与氮肥减施对水稻氮素利用率的影响

各处理早、晚稻氮肥偏生产力和农学效率年际变化趋势相近 (图 2)。

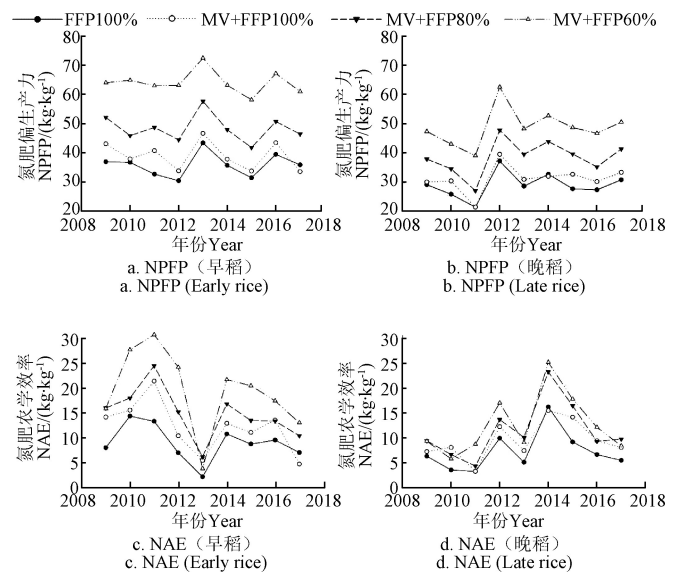


图 2 不同处理下稻谷氮肥农学效率和氮肥偏生产力

Fig.2 Nitrogen agronomic efficiency (NAE) and nitrogen partial factor productivity (NFP) of rice under different treatments

绿肥与氮肥减量配施对早、晚稻氮肥农学效率和氮肥偏生产力影响显著, 早、晚稻氮肥农学效率和氮肥偏生产力均以 MV+FFP60%处理最高。与 FFP100%处理相比, MV+FFP100%、MV+FFP80%、MV+FFP60%处理下早、晚稻平均氮肥农学效率均显著提高 ( $P<0.05$ ): 2009—2017 年, 早稻平均氮肥农学效率分别增加 34.63%、64.91%、115.26%, 晚稻分别增加 29.69%、56.23%、72.09%。与 FFP100%处理相比, MV+FFP100%、MV+FFP80%、MV+FFP60%处理下早稻和晚稻平均氮肥偏生产力显著提高 ( $P<0.05$ ): 2009—2017 年早稻分别提高 8.73%、35.06%、78.92%, 晚稻分别提高 7.51%、32.90%、68.06%。可见, 绿肥与化肥氮减量 20%~40%能够显著提高水稻氮肥偏生产力和氮肥农学效率。

### 2.3 产量变异系数和产量可持续指数

产量变异系数可反映作物产量的稳定性, 变异数值

越大，说明产量历年波动幅度越高。2009—2017 年早稻和晚稻产量变异系数均以 MV+FFP60%处理最低（表 3）。与 CK 相比，MV、FFP100%、MV+FFP100%、MV+FFP80%和 MV+FFP60%处理下早稻产量变异系数下降 13.25~19.35 个百分点、晚稻下降 0.33~2.78 个百分点。与 FFP100%相比，MV+FFP80%和 MV+FFP60%处理早稻产量变异系数分别下降 1.61 和 5.03 个百分点，而 FFP100%+MV 处理提高 1.07 个百分点；晚稻产量变异系数则表现为 MV+FFP100%和 MV+FFP60%处理分别下降 0.21 和 1.76 个百分点，MV+FFP80%处理提高 0.25 个百分点。

表 3 不同处理下双季稻产量的变异系数和可持续指数  
Table 3 Coefficient of variation and sustainable index of double cropping rice under different treatments

处理 Treatments	变异系数 Coefficient of variation/%		可持续指数 Sustainable index	
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
CK	25.59	16.17	0.50	0.67
MV	12.24	15.84	0.70	0.66
FFP100%	11.27	15.15	0.73	0.66
MV+FFP100%	12.34	14.94	0.73	0.67
MV+FFP80%	9.66	15.40	0.76	0.68
MV+FFP60%	6.24	13.39	0.83	0.68

产量可持续指数可反映某个作物系统生产力的可持续性，可持续指数越高，说明该系统生产力的持续性越

好。早稻、晚稻产量可持续指数均以 MV+FFP80%和 MV+FFP60%处理较高。与 CK 处理相比，MV、FFP100%、MV+FFP100%、MV+FFP80%和 MV+FFP60%处理下早稻产量可持续指数分别提高 0.20、0.23、0.23、0.26 和 0.33，而各处理晚稻可持续指数相差较小，均在 0.66~0.68 之间。可见，与农民习惯施肥相比，绿肥与化肥氮减量 20%~40%配施下，作物产量的稳定性更好。

#### 2.4 绿肥与氮肥减施对稻田土壤养分含量的影响

连续 9 a 试验后，各处理土壤有机质、全氮、全磷、全钾含量以及土壤 pH 值均无显著差异（表 4）。但与 2008 年初始相比，除 CK 处理外，其余处理土壤有机质含量均有小幅度提高，增幅为 2.49%~7.06%。所有处理土壤全氮、全磷、全钾含量均较 2008 年有所提高，增幅分别为 2.22%~24.44%、133.33%~207.58%、28.76%~41.35%。各处理土壤 pH 值也较 2018 年提高 0.27~0.50 个单位。连续 9 a 试验后，各处理土壤碱解氮、有效磷、速效钾含量存在一定的差异，土壤碱解氮含量以 CK 和 MV 处理较高，显著高于 MV+FFP80%处理。土壤有效磷含量以 MV+FFP100%处理较高，MV+FFP60%处理较低，前者高于后者 47.12%（ $P<0.05$ ）。土壤速效钾含量以 CK 处理最高，较其他处理提高 32.33%~61.74%，差异显著。与农民习惯施肥（FFP100%）相比，绿肥结合常规施肥或绿肥与化肥氮减量 20%~40%配施，可以维持土壤有机质、氮、磷、钾素的供应。

表 4 试验开展 9 a 后各处理土壤养分含量  
Table 4 Soil nutrient content of different treatments after 9 years experiment

处理 Treatment	有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Available N/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P/ (g·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Available P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	全钾 Total K/ (g·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH 值 pH value
初始 Initial	20.1	0.9	120	0.66	24.3	8.9	42.6	6.55
CK	19.8±2.53 a	0.9±0.03 a	130.59±10.89 a	1.72±0.91 a	17.14±3.37 ab	11.64±3.35 a	43.67±7.25 a	7.00±0.15 a
MV	21.1±3.57 a	1.1±0.12 a	127.76±14.29 a	2.03±0.23 a	17.67±5.27 ab	12.39±3.27 a	33.00±6.50 b	7.05±0.19 a
FFP100%	20.6±2.93 a	1.1±0.15 a	111.68±11.82 ab	1.78±0.81 a	18.72±3.39 ab	12.16±1.38 a	30.50±3.51 b	6.96±1.16 a
MV+FFP100%	20.8±1.57 a	1.1±0.07 a	111.33±6.85 ab	1.62±0.70 a	22.98±1.36 a	12.34±2.30 a	29.00±7.50 b	6.86±1.25 a
MV+FFP80%	21.5±5.58 a	1.0±0.09 a	103.17±7.63 b	1.77±0.51 a	19.82±2.57 ab	12.42±5.25 a	30.00±3.10 b	6.83±1.18 a
MV+FFP60%	20.6±3.13 a	1.1±0.13 a	113.10±8.21 ab	1.46±0.38 a	15.62±6.38 b	12.58±2.39 a	33.00±3.70 b	7.02±0.17 a

### 3 讨 论

#### 3.1 绿肥与氮肥减量配施对水稻产量的影响

周兴等<sup>[20-21]</sup>研究指出，在南方双季稻田中翻压紫云英可以替代部分化肥氮，并可提高水稻产量和养分利用效率。本研究发现，仅紫云英还田而不施氮肥，与习惯施肥相比，晚稻和双季稻周年平均产量均显著下降，说明紫云英替代化肥氮能力有限，并不能完全替代氮肥。紫云英需要与化肥配施才能满足作物对氮肥的需求。本研究发现，与习惯施肥相比，绿肥替代化肥氮 20%~40%时，水稻仍可稳产甚至提高产量。这个结果与刘思超等<sup>[22]</sup>通过比较 2 a 不同绿肥混作方式的田间试验结果类似，他们指出，绿肥与化肥氮减量 28.98%~39.68%配施仍能使水稻稳产高产。这是由于紫云英可通过根系-根瘤菌共生固氮系统固定大气中的 N<sub>2</sub>，翻压还田后可释放出其体内

积累的大量氮素，供早稻吸收利用，而且紫云英与化肥配合施用，化肥满足了水稻生育早期对速效养分的需求，而紫云英的腐解相对较慢，可持续不断地释放并提供水稻所需养分，从而促进水稻生长发育<sup>[22-23]</sup>。另外，紫云英较低的碳氮比<sup>[24]</sup>，能够促进土壤微生物的繁殖和有机质分解过程中的养分释放<sup>[25]</sup>，提高土壤中有效养分含量<sup>[26]</sup>，也能促进水稻的生长发育。因此，紫云英可替代部分化肥氮。本研究发现，紫云英还田与农民习惯施肥处理下早稻、晚稻及双季稻周年平均产量与紫云英还田搭配化肥氮减施 20%~40%处理差异不显著，说明紫云英还田前提下，可适当降低氮肥施用比例，避免浪费和环境污染。

#### 3.2 绿肥与氮肥减量配施对水稻氮肥利用率的影响

氮肥偏生产力等于施氮区稻谷产量与施氮量的比值，氮肥农学效率等于施氮区稻谷产量与不施氮区稻谷产量之差与施氮量的比值，两者都是反映作物氮肥吸收

利用率的常用指标。前人从氮密调控<sup>[27-28]</sup>、氮肥运筹<sup>[29]</sup>、应用氮肥抑制剂<sup>[30]</sup>、开发新型肥料<sup>[31]</sup>等角度探索兼顾水稻高产与提高氮肥利用率的方法,而本研究从绿肥与氮肥减量配施的角度探索。本研究中,与习惯施肥相比,紫云英还田与化肥氮减量配施并未导致早、晚稻产量的下降,甚至有所提高,绿肥与化学氮减量 20%~40%均显著提高了早、晚稻氮肥偏生产力和氮肥农学效率。这与马艳芹等<sup>[15]</sup>研究结果一致。这是由于一方面紫云英翻压入田后本身含有的氮素经微生物矿解后进入田间土壤,另一方面紫云英能够固氮,因此提高了土壤氮素供应能力,在氮肥投入量减少 20%~40%情况下仍能保证水稻生长发育对氮素的需求,且相对于化学氮肥尿素,紫云英还田携带的氮素更不易流失。因此,结果表现为水稻获得高产,进而提高了氮肥偏生产力和氮肥农学效率。

### 3.3 绿肥与氮肥减量配施对土壤养分含量的影响

连续 9 a 试验后,各处理土壤有机质含量差异较小,且与 2008 年相比,有缓慢增加的趋势。其原因可能是持续地耕作,留在稻田土壤的水稻残渣和根系分泌物也随之增加,而另一方面,水稻稻谷和秸秆的收获带走了大部分的生物量,产量不同,则带走量不同,紫云英还田能促进有机质积累,也提高了产量,从而增加了输出量。一边补入,一边输出,达到了某种动态的平衡。本研究中,与常规施肥相比,绿肥与化肥氮减量 20%~40%配施处理下土壤全磷、全钾、有效磷和速效钾含量均无显著变化,说明绿肥与氮肥减量配施能维持土壤养分的供应。

## 4 结 论

与农民习惯施肥相比,绿肥结合常规施肥或绿肥与化肥氮减量 20%~40%配施均能维持甚至提高水稻产量,显著提高水稻氮肥偏生产力和氮肥农学效率,维持土壤有机质、氮、磷、钾的供应,但绿肥与化肥氮减量 40%能保持高的产量可持续性和低的产量变异性。综合考虑,冬种紫云英下,化肥氮减量 40%是湘南双季稻种植区相对较好的耕作措施,可兼顾水稻的高产和氮肥利用率的提高,并维持地力,缓慢提高土壤肥力。

### 参 考 文 献

- [1] Pimentel D, Hepperly R, Hanson J, et al. Environmental, energetic, and economic comparisons of organic and conventional farming systems[J]. Bioscience, 2005, 55(7): 573—582.
- [2] 徐春春, 孙丽娟, 周锡跃, 等. 我国南方水稻生产变化和特点及稳定发展的政策建议[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(2): 129—132.  
Xu Chunqun, Sun Lijuan, Zhou Xiyue, et al. Characteristics of rice production in south China and policy proposals for its steady development[J]. Research Agricultural Modernization, 2013, 34(2): 129—132. (in Chinese with English abstract)
- [3] 谢志坚, 周春火, 贺亚琴, 等. 21 世纪我国稻区种植紫云英的研究现状及展望[J]. 草业学报, 2018, 27(8): 185—196.  
Xie Zhijian, Zhou Chunhuo, He Yaqin, et al. A review of *Astragalus smicus* in paddy fields in south China since 2000s[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(8): 185—196. (in Chinese with English abstract)
- [4] MacRae R J, Mehuys G R. The effect of green manure on the physical properties of temperate-area soils[J]. Advances Soil Science, 1985, 3: 71—94.
- [5] 曹卫东, 黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J]. 中国土壤与肥料, 2009(4): 1—3.  
Cao Weidong, Huang Hongxiang. Ideas on restoration and development of green manures in China[J]. Soils and Fertilizers Science in China, 2009(4): 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [6] Piotrowska Anna, Wilczewski Edward. Effects of catch crops cultivated for green manure and mineral nitrogen fertilization on soil enzyme activities and chemical properties[J]. Geoderma, 2012(189/190): 72—80.
- [7] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 343—349.  
Gao Jusheng, Xu Minggang, Dong Chunhua, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 343—349. (in Chinese with English abstract)
- [8] 万水霞, 朱宏斌, 唐杉, 等. 紫云英与化肥配施对安徽沿江双季稻区土壤生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 387—395.  
Wan Shuixia, Zhu Hongbin, Tang Shan, et al. Effects of *Astragalus smicus* manure and fertilizer combined application on biological properties of soil in Anhui double cropping rice areas along the Yangtze river[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(2): 387—395. (in Chinese with English abstract)
- [9] Gao Songjuan, Zhang Rengang, Cao Weidong, et al. Long-term rice-rice-green manure rotation changing the microbial communities in typical red paddy soil in South China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(12): 2512—2520.
- [10] Xie Zhijian, Tu Shuxin, Shah Farooq, et al. Substitution of fertilizer-N by green manure improves the sustainability of yield in double-rice cropping system in South China[J]. Field Crops Research, 2016, 188: 142—149.
- [11] 潘福霞, 鲁剑巍, 李小坤, 等. 水稻季施肥对后季绿肥物质养分积累的影响[J]. 土壤, 2012, 44(5): 762—768.  
Pan Fuxia, Lu Jianwei, Li Xiaokun, et al. Effect of fertilizer application of rice season on yield and nutrition accumulation of green manure[J]. Soil, 2012, 44(5): 762—768. (in Chinese with English abstract)
- [12] Xie Zhijian, He Yaqin, Tu Shuxin, et al. Chinese milk vetch improves plant growth, development and <sup>15</sup>N recovery in the rice-based rotation system of south China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3577.
- [13] 钱晨晨, 王淑彬, 杨滨娟, 等. 紫云英与氮肥配施对早稻干物质生产及氮素吸收利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(4): 563—571.  
Qian Chenchen, Wang Shubin, Yang Binjuan, et al. Effect of combined application of Chinese milk vetch and nitrogen

- fertilizer on nitrogen uptake, utilization and dry matter accumulation in early rice[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(4): 563–571. (in Chinese with English abstract)
- [14] 廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 190–196.
- Liao Yulin, Lu Yanhong, Xie Jian, et al. Effects of combined application of controlled release nitrogen fertilizer and Chinese milk vetch on yield and nitrogen nutrient uptake of early rice[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3): 190–196. (in Chinese with English abstract)
- [15] 马艳芹, 钱晨晨, 邓丽萍, 等. 紫云英配施氮肥对双季稻产量、干物质量及氮素吸收利用的影响[J]. *核农学报*, 2017, 31(12): 2399–2407.
- Ma Yanqin, Qian Chenchen, Deng Liping, et al. Effects of combining Chinese milk vetch with nitrogen fertilizer on grain and dry matter yield, nitrogen absorption and utilization of double-cropping rice[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(12): 2399–2407. (in Chinese with English abstract)
- [16] 赵娜, 郭熙盛, 曹卫东, 等. 绿肥紫云英与化肥配施对双季稻区水稻生长及产量的影响[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(36): 20668–20670.
- Zhao Na, Guo Xisheng, Cao Weidong, et al. Effects of green manure milk vetch and fertilizer combined application on the growth and yield of rice in double-cropping rice areas[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, 38(36): 20668–20670. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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 Guopeng, Xie Zhijian, Cao Weidong, 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 (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(23): 157–163. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李忠芳, 徐明岗, 张会民, 等. 长期施肥和不同生态条件下我国作物产量可持续特征[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(5): 1264–1269.
- Li Zhongfang, Xu Minggang, Zhang Huimin, et al. Sustainability of crop yields in China under long-term fertilization and different ecological conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(5): 1264–1269. (in Chinese with English abstract)
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [20] 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 Xing, Liao Yulin, Lu Yanhong, et al. Effect 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 Science*, 2017, 43(5): 469–474. (in Chinese with English abstract)
- [21] 周兴, 李再明, 谢坚, 等. 紫云英利用后减施化肥对水稻产量和产值及土壤碳氮含量的影响[J]. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2014, 40(3): 225–230.
- Zhou Xing, Li Zaiming, Xie Jian, et al. Effect of reducing chemical fertilizer on rice yield, output value, content of soil carbon and nitrogen after utilizing the milk vetch[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Science*, 2014, 40(3): 225–230. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘思超, 唐利忠, 李超, 等. 不同混作方式绿肥替代部分基施化学氮肥对双季稻产量形成特性的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(5): 218–225.
- Liu Sichao, Tang Lizhong, Li Chao, et al. Impact of substitution of green manure under different mixed cropping modes to chemical N fertilizer on yield formation characters of double cropping rice[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(5): 218–225. (in Chinese with English abstract)
- [23] 吕玉虎, 潘兹亮, 王琴. 翻压紫云英后化肥用量对稻田养分动态变化及产量效应的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(3): 174–178.
- Lü Yuhu, Pan Ziliang, Wang Qin. Effects of different amount of chemical fertilizer usage under ploughing down milk vetch on the yield and the dynamics of soil nutrients in rice field[J]. *China Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(3): 174–178. (in Chinese with English abstract)
- [24] 邱佳颖, 刘小粉, 杜章留, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体稳定性及固碳特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(10): 1129–1138.
- Di Jiaying, Liu Xiaofen, Du Zhangliu, et al. Influences of long-term organic and chemical fertilization on soil aggregation and associated organic carbon fractions in a red paddy soil[J]. *China Journal Eco-Agriculture*, 2014, 22(10): 1129–1138. (in Chinese with English abstract)
- [25] Tang Haiming, Xu Yilan, Sun Jimin, et al. Soil enzyme activities and soil microbe population as influenced by long-term fertilizer management under an intensive cropping system[J]. *Journal of Pure and Applied Microbiology*, 2014, 8(2): 15–23.
- [26] Cherr C M, Scholberg J M S, McSorley R. Green manure approaches to crop production: A synthesis[J]. *Agronomy Journal*, 2006, 98(2): 302–319.
- [27] 朱相成, 张振平, 张俊, 等. 增密减氮对东北水稻产量、氮肥利用效率及温室效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(2): 453–461.
- Zhu Xiangcheng, Zhang Zhenping, Zhang Jun, et al. Effects of increased planting density with reduced nitrogen fertilizer application on rice yield, N use efficiency and greenhouse gas emission in Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(2): 453–461. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杨志长, 沈涛, 胡宇倩, 等. 低氮密植对机插晚稻产量形成和光合特性的影响[J]. *南方农业学报*, 2019, 50(3): 546–533.
- Yang Zhichang, Shen Tao, Hu Yuqian, et al. Effects of low

- nitrogen rate combined with high plant density on yield components and photosynthetic characteristics of machine-transplanted late rice[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(3): 546—533. (in Chinese with English abstract)
- [29] 潘圣刚, 黄胜奇, 翟晶, 等. 氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响[J]. *土壤*, 2012, 44(1): 23—29.  
Pan Shenggang, Huang Shengqi, Zhai Jing, et al. Effects of nitrogen rate and its basal to dressing ratio on uptake, translocation of nitrogen and yield in rice[J]. *Soil*, 2012, 44(1): 23—29. (in Chinese with English abstract)
- [30] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 等. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(6): 1027—1033.  
Sun Haijun, Min Ju, Shi Weiming, et al. Effects of nitrification inhibitor on rice production and ammonia volatilization in paddy rice field[J]. *Soil*, 2015, 47(6): 1027—1033. (in Chinese with English abstract)
- [31] 吴萍萍, 李录久, 耿言安, 等. 不同新型肥料对江淮地区水稻生长及氮素吸收利用的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2019(3): 149—153.  
Wu Pingping, Li Lujiu, Geng Yanan, et al. Effects of new-type fertilizers on rice growth, nitrogen uptake and utilization in Jianghuai region[J]. *Soils and Fertilizers Science in China*, 2019(3): 149—153. (in Chinese with English abstract)

## Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient content

Zhang Lu<sup>1,2</sup>, Huang Jing<sup>1,2</sup>, Gao Jusheng<sup>1,2\*</sup>, Cao Weidong<sup>1</sup>, Gao Peng<sup>3</sup>, Yang Zhichang<sup>2</sup>

(1. *Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China*; 2. *Hengyang Red Soil Experimental Station, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, Qiyang 426182, China*; 3. *Hunan Institute of Agricultural Environment and Ecology, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China*)

**Abstract:** Green manure is a natural clean organic source of fertilizer. Chinese milk vetch is the most popular winter green manure crop in rice-growing regions of China. In this study, a long-term field experiment was conducted at an experimental station managed by National Observation and Research Station of Farmland Ecosystem in Qiyang, China to explore suitable application amount of nitrogen fertilizer when returning green manure (Chinese milk vetch, *Astragalus sinicus* L.) to the field in the double-season rice area of southern Hunan. The double cropping rice experiment began from the winter of 2008. It lasted 9 years. A total of six treatments with different fertilization practices were included: 1) CK, without fertilization; 2) MV, Chinese milk vetch only; 3) FFP100%, conventional application rate of chemical nitrogen fertilizer; 4) MV+FFP100%, Chinese milk vetch combined with 100% conventional application rate of chemical nitrogen fertilizer; 5) MV+FFP80%, Chinese milk vetch combined with 80% conventional application rate of chemical nitrogen fertilizer; 6) MV+FFP60%, Chinese milk vetch combined with 60% conventional application rate of chemical nitrogen fertilizer. The yield of rice and soil nutrient content were measured. The nitrogen agronomic efficiency and nitrogen partial factor productivity, coefficient of variation and sustainable index of yield were calculated. The results showed that the treatments of green manure combined with different chemical nitrogen fertilizer application rate kept and even increased annual rice yield. The treatments of MV combined with reducing nitrogen application also increased the nitrogen agronomic efficiency and nitrogen partial factor productivity. Compared to FFP100%, the treatments MV+FFP100%, MV+FFP80% and MV+FFP60% resulted in the increase of long-term average of nitrogen agronomic efficiency by 34.63%, 64.91% and 115.26% in early rice, respectively, and by 29.69%, 56.23% and 72.09% in late rice, respectively ( $P < 0.05$ ). Compared to that of FFP100%, the long-term averages of nitrogen partial factor productivity of MV+FFP100%, MV+FFP80%, MV+FFP60% increased by 8.73%, 35.06% and 78.92% in early rice, respectively, and 7.51%, 32.90% and 68.06% in late rice, respectively. Among all the treatments, regardless of early and late rice, the treatment of MV+FFP60% had the smallest coefficient of variation of yield and the highest sustainable index. Soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus and total potassium were not significantly different among the treatments of FFP100%, MV, MV+FFP100%, MV+FFP80%, MV+FFP60% ( $P > 0.05$ ). But, they were higher than the initial values in 2018. The treatment of Chinese milk vetch combined with 60% conventional application rate of chemical nitrogen fertilizer could achieve high and stable yield, and improve the nitrogen use efficiency and slowly improve soil fertility. Therefore, Chinese milk vetch combined with 60% conventional application rate of chemical nitrogen fertilizer was suggested as the best fertilization mode for double-cropping rice planting area in southern Hunan. In this case, the chemical fertilizer application rate could be decreased by 40% compared to the conventional fertilizer practice.

**Keywords:** nitrogen; fertilizers; green manure; southern Hunan; rice yield; nitrogen use efficiency; soil nutrient