

王 慧, 唐 杉, 武 际, 等. 紫云英翻压条件下氮肥运筹对双季稻产量和肥料利用率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 327-333.

WANG Hui, TANG Shan, WU Ji, et al. Effects of nitrogen managements with incorporation of Chinese milk vetch on the yield of double cropping rice and fertilizer use efficiency[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(4): 327-333.

紫云英翻压条件下氮肥运筹对双季稻产量和肥料利用率的影响

王 慧^{1,2}, 唐 杉^{1,2}, 武 际^{1,2}, 胡 润³, 韩 上^{1,2}, 刘 英^{1,2}, 朱 勤³, 李 敏^{1,2}, 王允青^{1,2*}, 石祖梁⁴

(1.安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2.养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 合肥 230031; 3.安徽省贵池区农技推广中心, 安徽 池州 247102; 4.农业部农业生态与资源保护总站, 北京 100125)

摘 要:在早稻-晚稻-紫云英轮作模式下,研究连续3年(2011—2013年)紫云英翻压还田下氮肥运筹对水稻增产效果、肥料利用率及经济效益的影响。本研究通过田间小区试验分析比较了紫云英翻压(G)下5种不同施氮模式(氮肥按照基肥/蘖肥/穗肥比例100/0/0、70/30/0、70/0/30、50/50/0、50/30/20分别设置G₁、G₂、G₃、G₄、G₅处理)及单施化肥配合氮肥运筹50/30/20比例(F₁)和不施肥处理(CK)共7种处理,对早、晚稻产量、产量稳定性及肥料利用率的影响。试验结果表明,在早稻施肥处理中,相同氮肥运筹G₅的早稻产量、产量稳定性和可持续性比F₁分别提高7.77%、33.47%和3.89%。在不同氮肥运筹之间,G₅和G₃均具有较高的早稻产量及产量稳定性。在晚稻中,G₅晚稻产量显著高于F₁,但产量稳定性和可持续性较差;对比5个氮肥运筹,G₅具有较高的晚稻产量和产量稳定性。相同氮肥运筹下,G₅的化肥偏生产力及化肥农学效率均高于F₁,整个轮作周期里分别提高9.35%和22.60%。折算经济效益,早稻各个处理之间经济收益相差不大,晚稻在G₅的施肥方式下经济效益最高。综合水稻产量、产量稳定性以及肥料利用率,在紫云英翻压条件下G₃和G₅分别是早稻和晚稻的最佳施肥方式。

关键词:产量变异系数;产量可持续性指数;偏生产力;农学效率;经济效益

中图分类号:S147

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)04-0327-07

doi: 10.13254/j.jare.2017.0321

Effects of nitrogen managements with incorporation of Chinese milk vetch on the yield of double cropping rice and fertilizer use efficiency

WANG Hui^{1,2}, TANG Shan^{1,2}, WU Ji^{1,2}, HU Run³, HAN Shang^{1,2}, LIU Ying^{1,2}, ZHU Qin³, LI Min^{1,2}, WANG Yun-qing^{1,2*}, SHI Zu-liang⁴

(1. Soil and Fertilizer Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Cycling, Resources & Environment of Anhui, Hefei 230031, China; 3. Agro-Technique Extension Centre in Guichi District, Chizhou 247102, China; 4. Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture, Beijing 100125, China)

Abstract: This three-year study was aimed to investigate the effects of nitrogen managements with the incorporation of Chinese milk vetch on rice yield of double cropping rice, fertilizer use efficiency and economic benefits. There were seven treatments including five modes of nitrogen managements combined with the Chinese milk vetch (G), the chemical fertilizer only with one mode of nitrogen management (F₁), and the control (CK, no fertilizer applied). Five modes of nitrogen managements were designed with N fertilizer applied percentages in basal/tillering/heading stages, namely G₁, G₂, G₃, G₄, G₅. The results showed that the yield of early season rice, the coefficient of variation of the yield (CV) and sustainable yield index (SYI) of G₅ were higher than that of F₁, which increased by 7.77%, 33.47%, and 3.89% respectively. For early season rice, the yield of rice and the stability of rice yield of G₅ and G₃ were both higher among all the treatments with nitrogen

收稿日期: 2017-12-12 录用日期: 2018-02-26

基金项目: 国家绿肥产业技术体系(CARS-22); 公益性行业(农业)科研专项(201503123-02); 安徽省农业科学院院立项目(16B1020, 17E1016)

作者简介: 王 慧(1987—), 女, 河南南阳人, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤培肥与土壤环境研究。E-mail: kangxi20052009@163.com

* 通信作者: 王允青 E-mail: yunqingwang@sohu.com

managements. For late season rice, the yield of rice in G_5 was significantly higher than that of F_1 , yet the SYI value and the stability of rice yield of G_5 were both lower among the five different treatments of nitrogen management. For the whole rotation cycle, the partial factor productivity (PF) and the agronomic efficiency (AE) of fertilizer of G_5 were higher than that of F_1 , which increased by 9.35% and 22.60%, respectively. For the economic benefit, there was no significant difference among all the treatments for early season rice, whereas the economic benefit of G_5 was the highest for late season rice. Took the yield of rice, the stability of yield and the fertilizer use efficiency into account, G_3 and G_5 was the best fertilizing mode for early and late season rice, respectively.

Keywords: coefficient of variation of the yield; sustainable yield index; partial factor productivity; agronomic efficiency; economic benefits

紫云英是我国南方稻区冬季重要的绿肥作物,在水稻种植区利用冬季休闲空间种植绿肥紫云英,来年进行翻压还田可为后茬水稻提供一定量的速效养分,甚至可以替代部分化肥,在化肥减施 30% 情况下完全可以提供水稻所需的速效养分并显著提高水稻产量^[1-3]。同时绿肥翻压还可以提高养分吸收利用率,提高水稻干物质积累量、氮素利用效率,提高氮磷钾肥的表观利用率和养分农学利用效率^[4-5]。紫云英翻压还田还能提高土壤肥力,更新土壤腐殖质,改善土壤理化性质和生物学性状,提高土壤的速效养分^[2]。同时紫云英翻压还能增加水稻种植的净收益,提高水稻生产的产投比^[4,6-8]。

目前我国水稻的氮肥农学效率只有 $10.4 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$,氮肥利用率只有 28.3%^[9],氮肥的合理施用和氮肥肥效的充分发挥是近些年来研究化肥减施的热点和重点。合理施用氮肥是水稻高产栽培的重要措施,但在部分双季稻区较多采用“重视基肥、早施分蘖肥”的氮肥运筹方式来增加穗数以提高水稻产量,这种方式会导致无效分蘖较多,中期群体过大,成穗率大幅下降,从而影响产量;而将氮肥集中施于生殖生长期,会因为施肥过多造成贪青晚熟,引起减产,同时氮肥不恰当施用还会导致氮素生产力下降,增加生产成本,且会引起环境污染和水稻品质下降,不利于水稻生产的可持续发展^[10]。研究表明,在氮肥运筹中,减少基、蘖肥,适当提高穗肥比例可以增加抽穗-成熟期的叶片含氮量,有利于促进干物质积累而提高产量和氮素吸收;前氮后移提高穗肥比例能为水稻整个生育期提供比较平衡的氮素供应,保证土壤综合肥力的可持续性,提高氮肥当季利用效率和水稻持续稳产^[11-12]。而在秸秆还田条件下进行氮肥运筹时,适当减氮并加大追肥比例,随着穗肥施氮比例的增加,既能稳定双季稻产量,又能促进稻株氮素吸收,提高氮肥利用率;在等量施氮下,基肥/分蘖肥/穗肥施肥比例为 5/2/3 的水稻产量及氮肥利用率最高,可作为稻草还田后推荐氮肥运筹方式^[10,13]。

因此紫云英翻压条件下结合氮肥运筹将对水稻生长、水稻产量以及肥料利用率具有重要的作用,但是关于这方面研究较少,目前大部分报道集中在秸秆还田条件下氮肥运筹对水稻产量以及肥料利用率等方面^[10,13-14]。紫云英作为优质的绿肥资源,与秸秆等其他有机肥源差异很大,含氮量高达 2.11%,碳氮比 13~16:1,将紫云英翻压向土壤带入大量的氮素,形成较低的碳氮比则不利于其植株的腐解,因此平衡土壤碳氮比和调控氮素运筹^[3,15],成为绿肥翻压还田中所需要的关键技术。本试验以此为研究切入点通过绿肥紫云英翻压配合化学肥料施用的情况下,采用氮肥运筹的措施,探明沿江双季稻区适宜的紫云英翻压还田量和化肥施用量下水稻优质高产氮肥运筹技术。本试验通过连续 3 年(2011—2013)田间试验研究紫云英全量还田配施化肥,结合氮肥运筹对双季稻产量、肥料利用率以及经济效益的影响,为水稻高产、氮肥的合理利用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

试验采用田间定位试验研究方法。试验于 2011—2013 年连续 3 年在安徽省池州市进行。供试土壤属于洪积物发育的青石灰泥田土,土壤质地为黏土。试验前采集耕层土壤并分析其理化性质:有机质 $31.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $1.98 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $152.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $17.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $95.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 5.7。轮作方式:紫云英-早稻-晚稻轮作。

1.2 试验设计

本试验设 7 个处理,见表 1。

紫云英翻压入田泡水,15 d 后进行早稻移栽,晚稻是在原早稻试验小区继续栽插。早稻和晚稻的化肥施用量和施肥方法一致,其中处理中常规化肥施用量分别为:纯氮用量 $165 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 用量 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O 用量 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。紫云英翻压量为 $15\ 000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验中磷肥、钾肥全部基施。肥料施用中氮肥选

表 1 紫云英翻压下不同氮肥运筹的试验处理
Table 1 The treatments of nitrogen management with incorporation of Chinese milk vetch

处理	氮肥施用比例/%			紫云英翻压
	基肥	分蘖肥	穗肥	
CK	0	0	0	无
F ₁	50	30	20	无
G ₁	100	0	0	有
G ₂	70	30	0	有
G ₃	70	0	30	有
G ₄	50	50	0	有
G ₅	50	30	20	有

用尿素,磷肥选用过磷酸钙,钾肥选用氯化钾。小区面积 21 m²,设 3 次重复,随机排列。其他栽培管理措施一致。在每季水稻成熟后实收每小区产量,同时取样进行常规室内考种。

1.3 数据处理与分析

(1)产量稳定性用统计学中变异系数(CV)表示,来衡量早、晚稻在不同年份不同处理的平均产量间的变异程度,其值越小,说明产量稳定性越高。

变异系数 $CV=\sigma\bar{Y}^{-1}$

式中: $\bar{Y}$ 为水稻平均产量,kg·hm⁻²;σ 为标准差。

(2)产量可持续性指数(SYI)是衡量系统是否能持续稳定生产的一个可靠参数,SYI 值越大,系统的可持续性越好。

产量可持续性指数 $SYI=(\bar{Y}-\sigma)\times Y_{\max}^{-1}$

式中:Y_{max} 为水稻最高产量,kg·hm⁻²。

(3)化肥偏生产力(PFP_N),是指单位投入的肥料所能生产的作物籽粒产量。

化学偏生产力 $PFP_N=\bar{Y}\times F^{-1}$

式中:F 代表化肥的投入量,kg·hm⁻²。

(4)化肥农学效率(AE_N),是指单位施肥量所增加的水稻产量。

化肥农学效率 $AE_N=(\bar{Y}-Y_0)\times F^{-1}$

式中:Y₀ 为不施肥条件下水稻产量,kg·hm⁻²。

(5)经济效益=水稻产量(kg)×稻谷单价-单次用工费×用工次数,水稻价格 2.56 元·kg⁻¹,一次施肥用工费 585 元·hm⁻²(按照当地用工费用计)。

本文数据均采用 Excel 2010 软件和 SPSS 20.0 软件进行统计分析。采用 Duncan 法对试验数据进行方差分析和显著性检验。

2 结果与分析

2.1 紫云英翻压下氮肥运筹对水稻产量的影响

2.1.1 紫云英翻压下氮肥运筹对早稻产量的影响

紫云英翻压条件下氮肥运筹对早稻产量的影响见表 2。在不同施肥处理之间,对照的产量均是最低,与其他施肥处理相比均达到显著差异(P<0.05)。相同氮肥运筹下,连续 3 年 G₅ 处理的早稻产量均高于 F₁,其中 2011 年和 2012 年均达到显著性差异(P<0.05),G₅ 早稻均产比 F₁ 提高了 7.77%,且所有紫云英翻压处理的早稻平均产量都高于单化肥处理,这表明紫云英的翻压有利于早稻产量的提升。在 5 种氮肥运筹方式处理中,G₅ 早稻平均产量最高,其次是 G₃ 处理,且二者之间差异不显著。同时随着种植年限的增加,G₃ 处理对早稻增产的效果逐渐提高,表明了追施穗肥有利于早稻增产。早稻平均产量最低的是 G₁ 处理,即化肥作为基肥一次性施入的方式下早稻产量最低,比 G₅ 降低 5.97%。

表 2 紫云英翻压下不同氮肥运筹的早稻产量、变异系数和可持续性指数

Table 2 The yield,CV and SYI values of early rice under nitrogen management with incorporation of Chinese milk vetch

处理	产量/kg·hm ⁻²			均产/kg·hm ⁻²	变异系数/% CV	可持续性指数 SYI
	2011	2012	2013			
CK	3613d	3548c	4403d	3854c	10.84	0.765
F ₁	6698c	6635b	7171a	6835b	4.93	0.873
G ₁	7159ab	7111a	6584c	6951b	4.69	0.892
G ₂	7333ab	7189a	6787bc	7103ab	4.38	0.914
G ₃	7095b	7292a	7067ab	7151ab	2.98	0.938
G ₄	7365ab	7222a	6775bc	7121ab	4.22	0.924
G ₅	7556a	7238a	7303a	7366a	3.28	0.907

注:同列数值后不同字母表示不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Values followed by different letters in the same column are significantly different among treatments(P<0.05). The same below.

从不同处理的产量变异性和产量可持续性来看,对照不施肥处理的产量变异系数最高,可持续指数最低,表明不施肥处理产量稳定性和可持续性都较差。相同氮肥运筹的 G_5 和 F_1 之间, G_5 的变异系数低于 F_1 ,而可持续性指数则高于 F_1 ,说明紫云英翻压提高了早稻产量的稳定性和产量可持续性。对比 5 种氮肥运筹, G_5 和 G_3 处理的变异系数均较低,可持续指数较高,说明这两个处理产量具有较高的产量稳定性和高产可持续性。

2.1.2 紫云英翻压下氮肥运筹对晚稻产量的影响

表 3 显示的是氮肥运筹结合紫云英翻压对晚稻产量的影响。不施肥处理晚稻产量最低,与其他处理达到显著性差异($P<0.05$)。相同氮肥运筹条件下,单施化肥处理和紫云英翻压相比,连续 3 年 G_5 处理晚稻产量均高于 F_1 ,且都达到显著水平($P<0.05$),平均产量比 F_1 提高了 10.88%。相同紫云英翻压下 5 种氮肥运筹处理相比, G_1 处理晚稻产量最低,其晚稻平均产量比 G_5 处理低 13.84%,这反映了在晚稻种植中紫云英翻压条件下氮肥作基肥一次性施入不利于晚稻产量的提升。 G_5 处理连续 3 年的晚稻平均产量最高, G_4 产量次之,且二者呈现出显著性差异($P<0.05$)。

对于晚稻产量变异性和可持续性指数(表 3), G_4 和 G_3 的产量变异系数较低,可持续性指数较高,表明这两个施肥方式下的产量稳定性和可持续性都是较高,有利于晚稻产量持续性稳产。而 G_5 与 F_1 相比, G_5 产量变异系数较高,可持续性最低,表明紫云英翻压下晚稻产量的稳定性和产量可持续性都较差,这可能因为紫云英翻压的后效对晚稻稳定性和可持续性不明显。

2.2 紫云英翻压下氮肥运筹对肥料利用率的影响

连续 3 年的早、晚稻以及整个轮作周期的化肥偏生产力和化肥农学效率见表 4。早稻中,紫云英翻压

处理的化肥偏生产力和肥料农学效率均高于单施化肥的处理。因此在早稻中,紫云英翻压有利于化肥偏生产力和化肥农学利用效率的提高。不同氮肥运筹之间, G_5 肥料利用率最高, G_3 次之,而 G_1 最低。在晚稻中相同氮肥运筹 G_5 处理的肥料利用率也高于 F_1 。不同氮肥运筹之间, G_2 和 G_1 的偏生产力和化肥农学效率偏低,甚至还低于单施化肥处理;而 G_5 和 G_4 的偏生产力和农学效率均较高,这反映了在晚稻种植时适当减少基肥的投入量则更有利于提高肥料利用率。对于整个轮作周期,相同氮肥运筹条件下, G_5 的化肥偏生产力和农学效率明显高于 F_1 ,这表明早稻紫云英还田有利于提高双季稻的肥料利用率。对比不同氮肥运筹, G_5 和 G_4 具有较高的化肥偏生产力和化肥农学效率,而 G_1 最低,甚至低于 F_1 处理。

2.3 紫云英翻压下氮肥运筹对水稻经济效益的影响

若不考虑灌溉、种子、化肥和农药成本,仅从稻谷收入和劳动力投入来分析紫云英翻压下,不同氮肥运筹方式对早稻、晚稻及轮作周期水稻的经济效益,结果见表 5。在早稻中, G_1 的经济效益最高, G_3 次之, G_2 最低。但各个处理之间差异不大, G_1 的经济收益仅比 G_3 提高 0.48%。而晚稻的不同氮肥运筹间经济效益差

表 4 紫云英翻压下不同氮肥运筹的肥料平均利用率($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

Table 4 The fertilizer using efficiency with the incorporation of Chinese milk vetch($\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理	早稻		晚稻		一个轮作周期	
	PFP_N	AE_N	PFP_N	AE_N	PFP_N	AE_N
F_1	18.99	8.28	19.72	7.74	19.35	8.01
G_1	19.31	8.60	19.20	7.23	19.26	7.91
G_2	19.73	9.02	19.10	7.13	19.42	8.08
G_3	19.86	9.16	20.00	8.02	19.93	8.59
G_4	19.78	9.07	20.42	8.44	20.10	8.76
G_5	20.46	9.75	21.86	9.88	21.16	9.82

表 3 紫云英翻压下不同氮肥运筹的晚稻产量、变异系数和可持续性指数

Table 3 The yield, CV and SYI values of late rice under nitrogen management with incorporation of Chinese milk vetch

处理	产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$			均产/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	变异系数/% CV	可持续指数 SYI
	2011	2012	2013			
CK	4286d	4048e	4603d	4312d	6.36	0.860
F_1	7222bc	7222b	6849c	7098bc	3.38	0.923
G_1	7016c	6619d	7105b	6913c	3.38	0.930
G_2	7206bc	6762cd	6665c	6878c	4.37	0.909
G_3	7254bc	7032bc	7316ab	7201b	2.69	0.937
G_4	7460b	7222b	7373a	7352b	1.96	0.946
G_5	8508a	7571a	7530a	7870a	6.21	0.856

表 5 紫云英翻压下不同氮肥运筹 3 年平均水稻经济收益
(元·hm⁻²)

Table 5 The average economic efficiency of rice under nitrogen management with incorporation of Chinese milk vetch
(Yuan·hm⁻²)

处理	早稻	晚稻	共计
G ₁	15 403	15 305	30 708
G ₂	15 207	14 630	29 836
G ₃	15 330	15 456	30 786
G ₄	15 251	15 843	31 095
G ₅	15 293	16 584	31 878

异比较明显,G₅经济效益最高,G₄的经济效益次之。在一个轮作周期中,G₅经济效益最高,G₄次之;效益最低的是 G₂,比同样施两次肥 G₄ 处理低 4.20%。

3 讨论

本试验中,在相同氮肥运筹下,紫云英翻压条件下配施化肥比单施化肥显著提高了早、晚稻的产量,其中早稻和晚稻均产分别增加 7.77%和 10.88%,这与之之前大量研究结果一致^[3-4]。这可能是由于紫云英翻压能显著增加土壤 NH₄⁺-N 含量,而土壤 NH₄⁺-N 含量与水稻产量关系最为密切;同时紫云英本身含氮量高达 2.11%,其翻压向土壤带入较多的氮素营养,同时紫云英本身具有固氮功能,提高土壤全氮含量;另外紫云英翻压促进有机物的固定,增加有机碳的积累和活性有机碳氮以及优化活性有机碳氮比例^[4,15-16]。另外紫云英作为有机肥源,与化肥配施可以促进化学肥料与有机肥之间的螯合能力,提高土壤速效养分含量;二者配施还可以相互补充,改善有机肥释放养分速度慢、化肥后劲不足的缺点,进而提高作物产量^[10,17-19]。

紫云英翻压配施氮肥与单施化肥相比显著提高了早稻产量稳定性和可持续性,但对晚稻的影响较小。这可能是由于紫云英翻压还田后紧接着进行早稻种植,紫云英腐解为早稻生长带来较多的速效养分,这些速效养分是影响早稻产量稳定性的主要因素;而在晚稻生长期间,紫云英腐解提供养分量逐渐降低,对晚稻产量的影响也随之减弱^[3]。同时与单施化肥相比,紫云英翻压配施化肥显著提高了氮肥农学效率和氮肥偏生产力。本试验中紫云英翻压的早稻的化肥偏生产力和农学效率比单施化肥分别提高了 7.74%和 17.75%。在一个轮作周期里紫云英翻压的化肥偏生产力和农学效率分别比单施化肥提高 9.35%和 10.11%,这可能是由于翻压绿肥能够改善土壤物理、

化学和生物学性状,改善土壤的团聚体结构和通透性,有利于土壤养分运移和提高肥料利用率^[4,20-21]。

氮肥运筹对水稻产量及肥料利用率具有重要的作用,合理改变氮肥运筹能够有效提高氮素的利用率^[11]。氮肥是影响水稻高产的一个重要因素,氮素养分供应与作物吸收同步是促进作物高产和氮素养分高效利用的基本途径。在本试验中,紫云英翻压能够提高水稻产量和肥料利用率,且紫云英翻压配合氮肥运筹提高化肥的利用效率。在相同氮肥用量和紫云英翻压下,一个轮作周期内氮肥按照基肥/分蘖肥/穗肥比例 50/30/20(G₅)处理比氮肥一次性施入(G₁)化肥的偏生产力和化肥利用效率分别提高 9.87%和 24.15%,产量提高了 9.89%。而秸秆还田配合氮肥运筹时,氮肥按照基蘖穗比为 60/20/20 是较好的施肥方式;同时在施氮量相同情况下,氮肥适当后移有利于早稻及晚稻对氮素的吸收,提高早晚稻的氮肥利用效率^[9,22]。常用的速效氮肥如尿素,氮素养分释放率快,养分多,肥效短。作物秸秆还田时,秸秆具有较高的碳氮比,秸秆翻压向土壤带来较多的碳源,为加快秸秆腐解和养分释放,应该在前期施入较多的氮肥来平衡土壤的碳氮比,以达到较佳的碳氮比。而紫云英与作物秸秆不同,其含氮量较高,碳氮比较低,大约在 13~16:1,在紫云英翻压时,不利于紫云英植株的腐解,因此在紫云英翻压时要控制化学氮肥作为基肥的投入量,提高土壤的碳氮比^[14]。本试验中早稻种植氮肥运筹 G₅ 和 G₃ 是较好的施肥方式。可能由于本试验中紫云英是在早稻种植之前翻压,紫云英含氮量也很丰富,紫云英翻压 30 d 内大部分有机物矿化成无机物,可以向土壤提供较多的速效氮肥,因此在前期要减少氮肥作为基肥的施入量;而在早稻生长后期特别是抽穗期,追施穗肥可显著提高水稻灌浆期叶片和籽粒的全氮、铵态氮和硝态氮含量,后期氮肥显著提高早稻生育后期干物质积累量、植株氮素含量、氮素积累量、氮素收获指数、穗粒数和千粒重,进而提高肥料的利用率和早稻的产量^[23-24]。而在晚稻种植中 G₅ 和 G₄ 是较好的施肥方式,此时紫云英翻压提供速效养分减少,施入部分基肥只够水稻生长初期的营养需求,但在分蘖期土壤速效养分不足以维持晚稻生长所需的氮素营养,此时需要及时补充氮肥,保证晚稻生长和晚稻的产量。因此紫云英翻压结合氮肥运筹可以协调养分提供时间,达到养分释放和作物需求的同步,因而使氮肥利用率大幅度增加,进一步提高了肥料的利用效率。无论是早稻还是晚稻,氮肥一次性施

入(G_1)的水稻产量和肥料利用率偏低,造成氮素养分流失,肥料前期损失大,肥效短,后期养分供应不足。从经济效益来看,氮肥一次性施入的早稻经济收益较高,这可能是由于早稻整体产量不如晚稻产量,且一次性施入化肥只用一次工,投入的成本较低,但与其他氮肥运筹的经济效益差异较小。

综上,结合水稻产量、氮肥农学效率和氮肥偏生产力以及经济效益等方面考虑,认为早稻 G_3 、晚稻 G_5 的施肥方式是双季稻种植中最佳的施肥方式,可以保证水稻产量、肥料利用率和水稻经济效益。

4 结论

(1)与不施肥处理比,紫云英翻压配施氮肥和单施化肥显著提高了早、晚稻产量。相同氮肥运筹下,紫云英翻压 G_5 的早稻和晚稻产量显著高于单施化肥 F_1 ,分别增产7.77%和10.88%,且 G_5 早稻的产量稳定性和可持续性指数明显高于 F_1 。紫云英翻压条件下, G_5 和 G_3 氮肥运筹的早稻产量及产量稳定性较高; G_5 处理晚稻产量最高,但其产量稳定性和可持续性指数较低。

(2)紫云英翻压有利于提高早、晚稻的化肥偏生产力和化肥农学效率,比单施化肥处理分别提高9.35%和22.60%。折算经济效益,早稻种植时各个处理之间的经济收益差异不明显,而在晚稻中 G_5 的经济效益最高。综合水稻产量、肥料利用率以及经济效益,在紫云英翻压条件下 G_3 和 G_5 分别是早稻和晚稻种植的最佳施肥方式,可以实现水稻产量、肥料利用率和经济效益最大化。

参考文献:

- [1] Lee C H, Park K D, Jung K Y, et al. Effect of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) as a green manure on rice productivity and methane emission in paddy soil[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 138(3/4):343-347.
- [2] 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 Ju-sheng, XU Ming-gang, DONG Chun-hua, 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.
- [3] 唐 杉, 王允青, 赵决建, 等. 紫云英还田对双季稻产量及稳定性的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(11):3086-3093.
TANG Shan, WANG Yun-qing, ZHAO Jue-jian, et al. Effects of milk vetch application on double cropping rice yield and yield stability[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(11):3086-3093.
- [4] 刘春增, 常单娜, 李本银, 等. 种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤活性有机碳氮的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54(3):657-669.
LIU Chun-zeng, CHANG Dan-na, LI Ben-yin, et al. Effects of planting and incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on active organic carbon and nitrogen in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(3):657-669.
- [5] 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 Chen-chen, WANG Shu-bin, YANG Bin-juan, 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.
- [6] 刘春增, 李本银, 吕玉虎, 等. 紫云英还田对土壤肥力、水稻产量及其经济效益的影响[J]. *河南农业科学*, 2011, 40(5):96-99.
LIU Chun-zeng, LI Ben-yin, LÜ Yu-hu, et al. Effect of incorporation of *Astragalus sinicus* on soil fertility, rice yield and economic efficiency[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2011, 40(5):96-99.
- [7] 周 兴, 廖育林, 鲁艳红, 等. 减量施肥下紫云英与稻草协同还田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 Yu-lin, LU Yan-hong, 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.
- [8] 刘 威, 王晓雨, 朱德雄, 等. 紫云英与化肥配比施用对早稻养分吸收及产量的影响[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(8):1438-1444.
LIU Wei, WANG Xiao-yu, ZHU De-xiong, et al. Effects of combining application of *Astragalus sinicus* and chemical fertilizer on nutrient absorption and yield of early rice[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(8):1438-1444.
- [9] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5):915-924.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5):915-924.
- [10] 左文刚, 黄顾林, 陈亚斯, 等. 氮肥运筹对秸秆全量还田双季稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 38(2):75-81.
ZUO Wen-gang, HUANG Gu-lin, CHEN Ya-si, et al. Effects of nitrogen management on grain yield and nitrogen use of double cropping rice system with all rice straw returned to the field[J]. *Journal of Yangzhou University(Agricultural and Life Science Edition)*, 2017, 38(2):75-81.
- [11] 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 Wen-ge, ZHANG Si-hai, ZHAO Jue-jian, et al. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(5):757-764.

- [12] 张雪凌,姜慧敏,刘 晓,等.优化氮肥用量和基追比例提高红壤性水稻土肥力和双季稻氮素的农学效应[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):351-359.
ZHANG Xue-ling, JIANG Hui-min, LIU Xiao, et al. Optimization of nitrogen rate and base and topdressing ratio to improve agronomic soil fertility and use efficiency of nitrogen in rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2):351-359.
- [13] 何 虎,吴建富,曾研华,等.稻草全量还田下氮肥运筹对双季晚稻产量及其氮素吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):811-820.
HE Hu, WU Jian-fu, ZENG Yan-hua, et al. Effects of nitrogen management on yield and nitrogen utilization of double cropping late rice under total rice straw incorporation[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(4):811-820.
- [14] 严奉君,孙永健,马 均,等.不同土壤肥力条件下麦秆还田与氮肥运筹对杂交稻氮素利用、产量及米质的影响[J].中国水稻科学,2015,29(1):56-64.
YAN Feng-jun, SUN Yong-jian, MA Jun, et al. Effects of wheat straw mulching and nitrogen management on grain yield, rice quality and nitrogen utilization in hybrid rice under different soil fertility conditions [J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(1):56-64.
- [15] 王丹英,彭 建,徐春梅,等.油菜作绿肥还田的培肥效应及对水稻生长的影响[J].中国水稻科学,2011,26(1):85-91.
WANG Dan-ying, PENG Jian, XU Chun-mei, et al. Effects of rape straw manuring on soil fertility and rice growth[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2011, 26(1):85-91.
- [16] 万水霞,唐 杉,蒋光月,等.紫云英与化肥配施对土壤微生物特征和作物产量的影响[J].草业学报,2016,25(6):109-117.
WAN Shui-xia, TANG Shan, JIANG Guang-yue, et al. Effects of Chinese milk vetch manure and fertilizer on soil microbial characteristics and yield of rice[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(6):109-117.
- [17] Monaco S, Sacco D, Pelissetti S, et al. Laboratory assessment of ammonia emission after soil application of treated and untreated manures[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2012, 150(1):65-73.
- [18] 胡 润,王允青,唐 杉,等.有机肥与无机肥配合施用及氮肥运筹对晚稻产量农艺性状的影响[J].安徽农业科学,2011,39(36):22397-22398.
HU Run, WANG Yun-qing, TANG Shan, et al. Effects of combining application of different organic fertilizer and inorganic fertilizer and N-fertilizer operation method on late rice yield and agronomic traits[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2011, 39(36):22397-22398.
- [19] 刘 威,秦自果,耿明建,等.冬种绿肥和稻草全量还田对单季稻田土壤理化性质的影响[J].中国土壤与肥料,2017(4):52-58.
LIU Wei, QIN Zi-guo, GENG Ming-jian, et al. Effects of winter green manure planting and rice straw retention on soil physical and chemical properties from a mono-rice cultivation system[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(4):52-58.
- [20] Karami A, Homae M, Afzalnia S, et al. Organic resource management impacts on soil aggregate stability and other soil physico-chemical properties[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 148(4):22-28.
- [21] Yang Z P, Xu M G, Zheng S X, et al. Effects of long-term winter planted green manure on physical properties of reddish paddy soil under a double-rice cropping system[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(4):655-664.
- [22] 李录久,王家嘉,吴萍萍,等.秸秆还田下氮肥运筹对白土田水稻产量和氮吸收利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):254-262.
LI Lu-jiu, WANG Jia-jia, WU Ping-ping, et al. Effect of different nitrogen application on rice yield and N uptake of white soil under wheat straw turnover[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(1):254-262.
- [23] 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):190-201.
LIAO Yu-lin, LU Yan-hong, 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):190-201.
- [24] 朱方旭,郭雪冬,同拉嘎,等.蘖穗氮肥追施比例对水稻灌浆成熟期 Rubisco 和 GS 同工型基因表达量的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):324-332.
ZHU Fang-xu, GUO Xue-dong, TONG La-ga, et al. Expression response of rubisco and GS isoform gene to the ratio of tillering and heading nitrogen fertilization at rice filling stage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2):324-332.