

紫云英配施减量化肥对水稻产量稳定性的影响

张成兰¹, 吕玉虎², 刘春增¹, 李本银¹, 郭晓彦², 聂良鹏², 张琳², 曹卫东³

(1. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所, 河南 郑州 450002; 2. 信阳市农业科学院, 河南 信阳 464000;
3. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:为明确豫南稻区减肥、高产、稳产的最佳施肥方式,以11 a长期定位试验为平台,设不施肥(CK)、单施化肥(100% F)、22 500 kg/hm²紫云英+80%化肥(G+80% F)、22 500 kg/hm²紫云英+60%化肥(G+60% F)、22 500 kg/hm²紫云英+40%化肥(G+40% F)共5个处理,分析水稻产量年际变化趋势、变异系数(CV)、可持续性指数(SYI)及基于AMMI模型的施肥处理、环境及二者交互作用的特征,综合评价长期紫云英配施减量化肥对水稻产量稳定性的影响。结果表明:施肥显著增加水稻年均产量,单施化肥较不施肥增产21.26%,紫云英配施减量化肥较不施肥增产19.55%~23.25%,以G+60% F处理水稻年均产量最高;施肥降低水稻产量变异系数,以G+40% F处理变异系数最小,其次为G+60% F处理;紫云英配施减量化肥处理可持续性指数高于单施化肥和不施肥。AMMI模型能较好地解释施肥处理与环境的互作效应,是评价长期定位施肥条件下水稻产量稳定性的有效方法,其稳定性参数(D_i)大小为:CK>G+80% F>100% F>G+60% F>G+40% F。综合考虑水稻高产、稳产及减肥效益,以22 500 kg/hm²紫云英配施60%化肥处理效果最佳。

关键词:水稻;化肥减施;紫云英;产量稳定性;变异系数;可持续性指数;AMMI模型

中图分类号:S143;S511 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-7091(2020)03-0136-07

doi:10.7668/hbxb.20190795



Effects of Chinese Milk Vetch Coupled with Application of Reduced Chemical Fertilizer on Stability of Rice Yield

ZHANG Chenglan¹, LÜ Yuhu², LIU Chunzeng¹, LI Benyin¹, GUO Xiaoyan²,
NIE Liangpeng², ZHANG Lin², CAO Weidong³

(1. Institute of Plant Nutrition, Agriculture Resources and Environment Sciences, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. Xinyang City Academy of Agricultural Sciences, Xinyang 464000, China; 3. Institute of Agriculture Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to clarify the best fertilization method for reducing application of chemical fertilizer, high yield and stable yield of rice, a study based on an 11-year long-term experiment in the rice-growing area of South Henan Province was established. The experiment including five treatments no fertilization(CK), chemical fertilizer (100% F), 22 500 kg/ha Chinese milk vetch +80% chemical fertilizer (G+80% F), 22 500 kg/ha Chinese milk vetch +60% chemical fertilizer (G+60% F) and 22 500 kg/ha Chinese milk vetch +40% chemical fertilizer (G+40% F). The inter-annual variability, coefficient of variation (CV), sustainable yield index (SYI) of rice yield and the characteristics of fertilization treatment, environment and the interaction between them based on the additive main effects and multiplicative (AMMI) model, were analyzed to comprehensively evaluate the effects of long-term application of Chinese milk vetch combined with reduced chemical fertilizer on rice yield stability. Results showed that fertilization significantly increased the annual average yield of rice. Compared with no fertilization, the rice yield of chemical fertilizer and Chinese milk vetch combined with reduced chemical fertilizer treatments increased by 21.26% and 19.55%~23.25%, respectively. The highest average yield of rice was from the treatment of G+60% F. Ferti-

收稿日期:2019-11-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0200200);国家绿肥产业技术体系项目(CARS-22)

作者简介:张成兰(1990-),女,河南项城人,助理研究员,硕士,主要从事植物营养与施肥研究。

通讯作者:刘春增(1967-),男,河南平顶山人,研究员,主要从事绿肥利用评价与循环农业研究。

zation reduced the CV of rice yield, and the CV of G + 40% F treatment was the lowest, followed by G + 60% F treatment. The SYI of Chinese milk vetch combined with reduced chemical fertilizer treatments was higher than that of chemical fertilizer and no fertilization treatments. The AMMI model clearly explained the interactive effects of fertilization treatments across environment and it was a good method to evaluate stability of rice yield under long-term fertilization. The stability parameter was CK > G + 80% F > 100% F > G + 60% F > G + 40% F. Considering the benefits of high yield, stable yield of rice and reducing the usage of chemical fertilizer, we determined that the effect of applying 60% chemical fertilizer combined with 22 500 kg/ha Chinese milk vetch was the best.

Key words: Rice; Chemical fertilizer reduction; Chinese milk vetch; Yield stability; Coefficient of variation; Sustainability index; AMMI model

施肥是作物高产和稳产的主要措施之一。然而实际生产中,因为盲目追求产量,长期存在许多不合理的施肥现象,不仅造成作物产量稳定性差、肥料利用率低,还引起养分流失、面源污染等一系列问题。目前,国内外关于施肥对作物产量稳定性的影响已做了大量研究。Manna 等^[1]研究表明,长期有机肥与化肥配施可有效提高大豆-小麦轮作系统作物产量稳定性;Macholdt 等^[2]和魏猛等^[3]研究表明,长期有机无机配施可提高冬小麦产量及产量稳定性;唐杉等^[4]研究表明,长期紫云英还田显著提高水稻产量稳定性;冀建华等^[5]基于 AMMI 模型研究了 25 a 长期定位试验双季稻的产量稳定性,结果发现,有机无机配施是促进水稻高产和稳产的最佳措施。因此研究长期不同施肥处理对作物产量稳定性的影响具有重要意义。

紫云英(*Astragalus sinicus* L.)为豆科黄芪属,是豫南稻区主要的冬季绿肥。豫南稻区有大量冬闲田,利用冬闲茬口合理种植翻压紫云英,不仅能充分利用水、光、热和土地资源,还能改善稻田土壤理化性状,培肥土壤^[6]。研究表明^[7-9],长期紫云英与化肥配施可提高水稻产量,减少化肥用量。然而,目前关于翻压紫云英对水稻产量影响的研究主要集中在如何增产上,而对于水稻稳产的研究还较少。为此,

依托于信阳试验园区长期定位试验,利用产量变异系数、可持续性指数及 AMMI 模型,研究长期种植翻压 22 500 kg/hm² 紫云英配施减量 20% ~ 60% 化肥对水稻产量稳定性的影响,旨在为豫南稻区优选出减肥、高产、稳产的施肥方式提供技术支撑和理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地区概况

试验地位于信阳市农业科学院试验园区(32°07'31"N,114°05'18"E),该地区属亚热带向暖温带过渡区,日照充足,年均日照 1 900 ~ 2 100 h,无霜期 220 d 左右;年均气温 15.1 ~ 15.3 °C;降雨丰沛,年降雨量 900 ~ 1 400 mm,空气湿润,相对湿度年均 77%。试验期内主要气象数据来源于中国气象数据网(<https://data.cma.cn>),收集试验地所在区域 2008 - 2018 年逐日基本气象数据,并统计生育期内日均温、降雨量、日照时数、有效积温(表 1)。田间定位试验始于 2008 年,供试土壤为黄棕壤性潜育型水稻土,试验前土壤基本理化性质为:有机质 12.96 g/kg,全氮 1.30 g/kg,碱解氮 71.5 mg/kg,有效磷 16.5 mg/kg,速效钾 78.2 mg/kg,pH 值 6.67。

表 1 水稻生育期内主要气象数据

Tab. 1 Major meteorological data during rice growth period

项目 Item	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
日均温/°C Daily mean temperature	23.29	22.94	22.87	23.06	24.17	24.60	22.94	23.03	24.11	24.22	24.54
降雨量/mm Precipitation	1 071.90	645.60	859.70	492.40	738.00	832.10	903.80	709.10	903.00	967.80	637.50
日照时数/h Sunshine hours	735.20	805.50	821.40	882.30	853.60	1 064.30	806.10	920.50	967.20	946.30	991.00
有效积温/°C Effective accumulated temperature	2 439.10	2 378.80	2 373.50	2 404.10	2 598.20	2 687.30	2 374.20	2 397.00	2 586.30	2 610.30	2 656.30

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,共设 5 个处理:①不施肥(CK);②单施化肥(100% F);③22 500 kg/hm² 紫云英 + 80% 化肥(G + 80% F);④22 500 kg/hm² 紫云

英 + 60% 化肥(G + 60% F);⑤22 500 kg/hm² 紫云英 + 40% 化肥(G + 40% F)。每个处理 4 次重复。紫云英原地种植,供试品种为信紫 1 号,于每年 9 月中下旬均匀撒播于稻田,播种量为 22.5 ~ 30.0 kg/hm²,盛花期

按照各处理进行翻压,多余的移出小区,量不足时从别的小区移入。盛花期紫云英年均干基养分含量为 3.49% N、0.42% P₂O₅、3.29% K₂O,含水量为 89.32%。其中所施化肥,氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾。100% 化肥指当地常规施肥量(N 225 kg/hm²、P₂O₅ 135 kg/hm²、K₂O 135 kg/hm²)。试验中磷肥、钾肥均作基肥一次施用,氮肥按基肥、分蘖肥、孕穗肥各占 50%、30%、20% 分次施用。小区面积 6.67 m²,长 3.33 m,宽 2.0 m,小区间筑埂,上覆塑料薄膜防止串水串肥。区组间留 0.3 m 宽的沟,便于上水和排水。水稻供试品种为扬两优 013,于每年 5 月底划行移栽,小区栽插株行距为 16.7 cm × 20.0 cm,每穴 2~3 棵。移栽后灌浅水使秧苗返青,分蘖肥在移栽后 7 d 施用,孕穗肥在晒田复水后施用,其他田间管理与大田一致。每年水稻成熟后按小区进行人工收割,单打单晒,晾干后测定各小区稻谷产量。

1.3 数据处理和分析

采用 Excel 2010 和 SPSS 18.0 软件对数据进行统计分析,采用 Duncan's 法进行方差分析和多重比较(α=0.05),利用 Origin 8.5 软件作图,DPS V7.5 统计软件进行联合方差分析、线性回归分析及 AMMI 模型分析。AMMI 模型稳定性参数 D_i 的计算公式^[5]:

$$D_i = \sqrt{\sum_{s=1}^c w_s r_{is}^2} \quad (1)$$

表 2 不同施肥处理下水稻年均产量

Tab. 2 Average annual yield of rice in different fertilizer treatments

处理 Treatment	水稻年均产量/(kg/hm ²) Average annual rice yield	较 CK 增产率/% Increasing yield compared with CK	较 100% F 增产率/% Increasing yield compared with 100% F
CK	8 098.78 ± 326.31b	-	-17.53
100% F	9 820.29 ± 230.10a	21.26	-
G + 80% F	9 972.00 ± 268.79a	23.13	1.54
G + 60% F	9 981.52 ± 233.48a	23.25	1.64
G + 40% F	9 682.33 ± 195.46a	19.55	-1.40

注:同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。

Note: The different letters in the table indicate that the data in different treatments are significantly different at the 5% level.

2.2 紫云英配施减量化肥对水稻产量变化趋势的影响

由图 1 可知,各施肥处理水稻年产量随时间变化呈波动趋势,不同年份间波动较大,相同年份不同处理间波动趋势大致相似,除 2013 年外,CK 处理在较低水平波动,这与土壤养分得不到补充有关。2013 年 CK 及 100% F 处理水稻产量高于减量化肥配施紫云英处理,主要是 2013 年水稻生育期内日均温、有效积温及日照时数均高于其他年份(表 1),导致紫云英配施化肥处理水稻旺长,结实率低,从而降

低水稻产量。根据年产量波动曲线拟合各处理产量趋势线,其斜率 k 表示产量的年变化量(kg/(hm²·a))。其中以 G + 60% F 和 G + 80% F 处理产量趋势线位于最上方,且 G + 80% F 处理以 19.22 kg/(hm²·a) 的增速于 2013-2014 年赶超 G + 60% F 处理,说明 2014 年后 G + 80% F 处理的增产潜力优于 G + 60% F 处理;100% F 和 G + 40% F 处理产量趋势线居于中间,CK 处理产量趋势线位于最下方。各处理拟合方程 k 值为正,说明虽然各处理产量存在年际波动,但整体趋势是增长的。

式中:s 为显著的 IPCA 个数;r_{is} 为第 i 施肥处理在第 s 个 IPCA 上的得分;w_s 为权重系数,它表示每个 IPCA 所解释的平方和占全部 IPCA 所解释的平方和的比例。

水稻产量的变异系数用 CV 表示,可持续性指数用 SYI 表示,计算公式如下:

$$CV = \sigma/Y \times 100\% \quad (2)$$

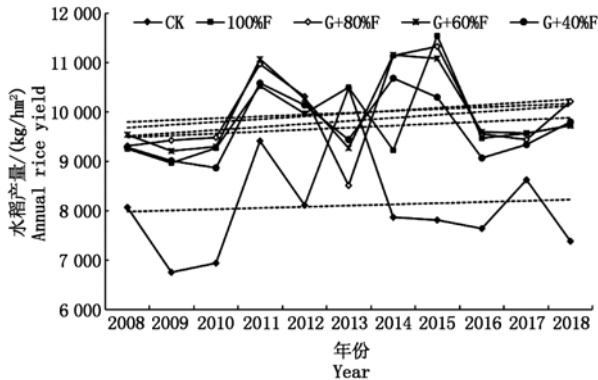
$$SYI = (Y - \sigma)/Y_{\max} \quad (3)$$

式中:σ 为标准差(kg/hm²),Y 为平均产量(kg/hm²),Y_{max} 为该处理年份中最高产量(kg/hm²)。

2 结果与分析

2.1 紫云英配施减量化肥对水稻年均产量的影响

由表 2 可知,与对照不施肥相比,施肥显著增加水稻年均产量,其中单施化肥较不施肥增产 21.26%,紫云英配施减量化肥较不施肥增产 19.55%~23.25%,以 G + 60% F 处理水稻年均产量最高,其次为 G + 80% F 处理。紫云英配施 80% 和 60% 化肥处理水稻产量均高于单施化肥,说明减施 20%~40% 化肥条件下,配施适量紫云英仍能提高水稻产量;而化肥减施 60% 时,水稻产量较单施化肥减少 1.40%,说明化肥减施过多会影响水稻生长发育,导致减产。



图中虚线表示各处理产量趋势线,其拟合方程为: $y_{CK} = 24.53x + 7951.62 (R^2 = 0.006)$ 、 $y_{100\%F} = 60.36x + 9458.11 (R^2 = 0.069)$ 、 $y_{G+80\%F} = 57.02x + 9629.90 (R^2 = 0.045)$ 、 $y_{G+60\%F} = 37.80x + 9754.72 (R^2 = 0.026)$ 、 $y_{G+40\%F} = 40.34x + 9440.31 (R^2 = 0.043)$,式中 x 表示试验开始年数, y 表示试验第 x 年水稻年产量的拟合值。The dotted lines in the figure represent the trend lines of rice yield, the fitting equations are as follows: $y_{CK} = 24.53x + 7951.62 (R^2 = 0.006)$, $y_{100\%F} = 60.36x + 9458.11 (R^2 = 0.069)$, $y_{G+80\%F} = 57.02x + 9629.90 (R^2 = 0.045)$, $y_{G+60\%F} = 37.80x + 9754.72 (R^2 = 0.026)$, $y_{G+40\%F} = 40.34x + 9440.31 (R^2 = 0.043)$. x denotes the number of years from the start of the experiment, y represents the fitting value of annual yield of rice in the x th year of the experiment.

图 1 不同施肥处理下水稻年产量变化趋势

Fig. 1 Trend of annual rice yield in different fertilizer treatments

2.3 紫云英配施减量化肥对水稻产量变异系数及可持续性指数的影响

水稻产量稳定性和系统可持续性可用水稻产量变异系数(CV)和可持续性指数(SYI)表示,由表3可知,CK处理标准差较大,达到1031.87 kg/hm²,说明不施肥处理年际产量波动较大,施肥提高了水

稻产量稳定性。施肥降低了水稻产量变异系数,以G+40%F处理变异系数最低,其次为G+60%F处理;施肥可提高水稻产量可持续性指数,以G+40%F处理可持续性指数最高,其次为G+60%F处理,紫云英配施减量化肥处理可持续性指数高于单施化肥处理,说明化肥配施紫云英可提高水稻产量的可持续性。综合考虑水稻产量、产量变异系数及可持续性指数,以G+60%F处理效果最好。

表 3 不同施肥处理下水稻产量变异系数及可持续性指数

Tab.3 Variation coefficient and sustainability index of rice yield in different fertilizer treatments

处理 Treatment	标准差/(kg/hm ²) <i>s</i>	变异系数/% CV	可持续性指数 SYI
CK	1 031.87	12.74	0.67
100% F	727.64	7.41	0.79
G + 80% F	849.98	8.52	0.81
G + 60% F	738.32	7.40	0.83
G + 40% F	618.10	6.38	0.85

2.4 紫云英配施减量化肥与环境交互作用对水稻产量稳定性的影响

长期不同施肥处理导致土壤肥力水平不同,而各施肥处理在相同年份所对应的气候、管理条件等相同,因此可将各施肥处理对应的土壤肥力水平作为AMMI模型的一个维度,即“施肥处理”,而每年气候及其他环境条件作为另一个维度即“环境”,利用DPS软件对11a长期定位试验水稻产量进行联合方差、线性回归及AMMI模型分析(表4)。结果

表 4 不同施肥处理下水稻产量的联合方差、线性回归和 AMMI 模型分析

Tab.4 ANOVA, liner regression and AMMI model analyses of rice yield in different fertilizer treatments

方法 Method	变异来源 Source of variation	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
联合方差分析 Analysis of variance	总和	54	63 768 275.62		
	施肥	4	28 086 189.96	16.98	0.000 1
	环境	10	19 138 189.15	4.63	0.000 2
	误差	40	16 543 896.51		
线性回归分析 Analysis of linear regression	总和	54	63 768 275.62		
	施肥	4	28 086 189.96	38.52	0.000 1
	环境	10	19 138 189.15	10.50	0.000 1
	交互作用	40	16 543 896.51	2.27	0.013 9
	联合回归	1	60 490.77	0.33	0.569 4
	施肥回归	3	54 913.78	0.10	0.959 1
	环境回归	9	11 506 447.17	7.01	0.000 1
	误差	27	4 922 044.79		
AMMI 模型分析 Analysis of AMMI model	总和	54	63 768 275.62		
	施肥	4	28 086 189.96	200.85	0.000 1
	环境	10	19 138 189.15	54.74	0.000 1
	交互作用	40	16 543 896.51	11.83	0.001 1
	IPCA1	13	13 558 275.22	29.83	0.000 1
	IPCA2	11	2 678 922.74	6.97	0.008 3
	IPCA3	9	61 981.81	0.20	0.986 1
	残差	7	244 716.74		

显示,方差分析及线性回归分析均不能很好地解释施肥处理与环境的交互作用,AMMI 模型中 IPCA1、IPCA2 达到了极显著差异 ($P < 0.01$),将剩余不显著的 IPCA3 合并为残差,IPCA1 和 IPCA2 的平方和解释了施肥与环境交互作用的 98.15%,而残差仅占 1.85%,充分说明 AMMI 模型能透彻分析施肥处理与环境的交互作用,可有效弥补方差分析及线性回归分析在评价水稻产量稳定性上的局限性。

以水稻平均产量为横坐标,以施肥处理和环境互作效应值 IPCA1 为纵坐标绘制双标图(图 2),该图可揭示施肥处理与环境间的互作关系。图 2 中 f1、f2、f3、f4、f5 分别代表施肥处理 CK、100% F、G + 80% F、G + 60% F、G + 40% F, e1、e2、e3...e11 分别代表 2008,2009,2010...2018 年的环境。在垂直方向上,如果以 IPCA1 = 0 作一条水平线,施肥处理(f)与环境(e)在水平线同侧,表示施肥处理与环境的交互作用为正,相反表示交互作用为负。由图 2 可知,f1、f2 与 f3、f4、f5 分别位于水平线两侧,f1、f2、与 2018,2011,2013,2017 年的环境互作为正,即表示 2008,2011,2013,2017 年环境对 f1、f2 处理水稻产量提高有积极作用,与其他年份的环境互作为负。f3、f4、f5 与 2008,2011,2013,2017 年环境互作为负,表示该时间的环境对 f3、f4、f5 处理水稻产量的提高有消极作用,与其他年份的环境互作为正。图标越接近 IPCA1 轴上 0 值,表示该施肥处理互作越小,产量稳定性越好,图标越靠近右边,表示施肥处理对水稻产量的增产效果越好。由图 2 可知,f5、f2、f4 施肥处理稳定性较好,f3、f1 施肥处理稳定性较差,f4、f3、f2、f5 施肥处理对水稻增产效果较好,f1 施肥处理对水稻产量增产效果较差,综合考虑水稻增产和稳产,以 f4(G + 60% F)处理效果最好。

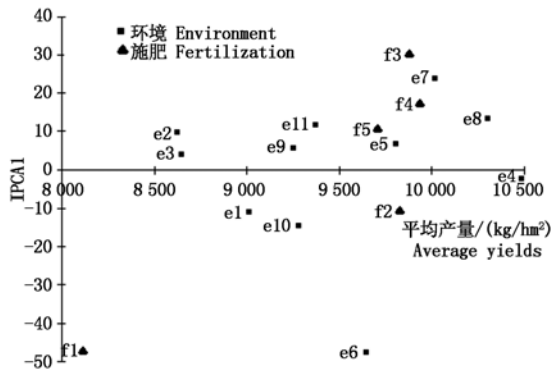


图 2 AMMI 主成分交互作用与产量双标图

Fig. 2 Biplot of AMMI between yields and IPCA1

为定量描述施肥处理对水稻产量稳定性的影响,利用 2 个主成分的 IPCA 值分别计算各施肥处理的稳定性参数 D_i 值(表 5)。该结果与图 2 所示

的产量稳定性结果基本一致,按 D_i 值的大小排序: $CK > G + 80\% F > 100\% F > G + 60\% F > G + 40\% F$, D_i 值越小,表示施肥处理的稳定性越高。说明施肥可提高水稻产量稳定性,以 G + 40% F 处理产量稳定性最好,其次为 G + 60% F 处理。

表 5 不同施肥处理下水稻产量稳定性参数

Tab. 5 Stability parameter of rice yield in different fertilizer treatments

处理 Treatment	IPCA1	IPCA2	D_i
CK	-47.63	12.79	43.75
100% F	-8.88	-35.28	16.46
G + 80% F	31.33	1.68	28.58
G + 60% F	16.85	8.23	15.73
G + 40% F	8.33	12.58	9.16

3 结论与讨论

紫云英配施减量化肥提高水稻年均产量、产量可持续性指数,降低产量变异系数。AMMI 模型互作效应分析结果表明,不同施肥处理在不同试验年份对环境响应不一致。综合考虑产量年际变化特征、变异系数、可持续性指数及采用 AMMI 模型评价产量稳定性等结果,22 500 kg/hm² 紫云英配施 60% 化肥处理为该区域水稻高产、稳产及减肥的最佳施肥措施。

众多研究表明^[8-9],化肥减施 20% ~ 40% 情况下,翻压 15 000 ~ 30 000 kg/hm² 紫云英仍能保证水稻不减产,本研究也得出相似结论。11 a 长期定位试验结果显示,翻压 22 500 kg/hm² 紫云英,减量 20% 和 40% 化肥分别较单施化肥增产 1.54%、1.64%,主要因为紫云英翻压后释放出的养分能满足水稻对速效养分的需求,且紫云英养分释放缓慢,可持续为水稻生长提供所需养分,从而维持和提高水稻产量。而当化肥减施 60% 时,水稻年均产量低于单施化肥处理,说明当化肥减施过多时,土壤中速效养分较少,不能满足水稻生长发育,因此种植翻压紫云英情况下,化肥应适量减施,既能保证水稻高产,又能实现国家“减肥增效”的政策要求。

综合比较各处理水稻产量的变异系数(CV)和可持续性指数(SYI),CK 处理的水稻产量 CV 值最大,SYI 最小,而施肥可降低 CV,提高 SYI 的大小,说明不施肥条件下水稻的抗逆性较差,易造成产量大幅度波动,施肥则有利于降低环境、生物等因素对产量的影响,维持稻田生态系统的稳定性。本研究中,G + 60% F 和 G + 40% F 处理 CV 值低于单施化肥和不施肥,SYI 值高于单施化肥和不施肥,说明减量化肥配施紫云英有利于维持水稻产量稳定性和可

持续性,主要是一方面紫云英翻压腐解后养分释放呈前期快后期缓慢趋势,肥效较长,养分不易流失^[10],且翻压的紫云英能促进土壤有机质矿化分解和土壤养分的循环与转化^[11],为土壤提供大量的碳源和养分;另一方面紫云英翻压后可有效改善稻田土壤结构^[12],提高土壤酶和微生物活性^[11,13],抑制杂草生长^[14]及病虫害发生^[15],为稻田生态系统的稳定和可持续发展提供保障。

对于长期定位试验水稻产量的稳定性,在管理条件、品种、大气沉降等相同情况下,其变异主要来源于施肥处理、环境及二者的交互作用^[16-17]。变异系数和可持续性指数是评价作物产量稳定性及可持续性的常用方法^[18-19],而利用变异系数来评价产量稳定性,仅仅是环境效应和交互作用之和与施肥处理产量均值的比较,并未分离出交互作用,AMMI模型可以把方差分析和主成分分析结合在一起^[20],利用施肥与环境互作效应进行评价,较为精确^[21]。本研究中水稻产量稳定性参数(D_i)大小为:CK > G + 80% F > 100% F > G + 60% F > G + 40% F, D_i 值越小,稳定性越高,该结果与变异系数评价产量稳定性得到的结果一致,而与可持续性指数评价产量可持续性的结果并不完全相同,其差异主要表现在 G + 80% F 和 100% F 处理上,其可能原因是 2013 年气候变化导致 G + 80% F 处理水稻旺长严重,产量过低,从而使产量年际波动较大,稳定性低于 100% F 处理。

CK、100% F 处理与 G + 80% F、G + 60% F 和 G + 40% F 处理与环境互作的效应相反,从历年气象因子看,2008、2011、2013、2017 年与其他年份的环境差异主要体现在日均温、降雨量、日照时数及有效积温上,2008 年及 2017 年降雨量高于其他年份,2011 年降雨量低于其他年份,2013 年日均温、日照时数及有效积温均高于其他年份,说明经过长期不同施肥后,各处理之间水稻产量对环境变化的响应也表现出差异。黄晶等^[21]也指出,气候变化对水稻生产潜力及产量的影响较为复杂,不同施肥处理在不同试验年份对环境响应并不一致。本研究显示,G + 80% F、G + 60% F、G + 40% F 处理随气温升高、有效积温升高、日照时数增加,表现出环境对水稻产量具有一定消极作用。也有研究提出^[22-23],水稻生育期内温度升高、降雨量增加及日照时数增加对水稻产量的影响是负面的。

豫南稻区紫云英鲜草产量一般在 30 000 kg/hm² 左右,受稻田土壤地力、栽培措施等影响,紫云英实际鲜草产量会存在差异,因此还需要进一步研究翻

压不同量紫云英与化肥最佳配比问题,以便根据当地实际鲜草产量确定化肥减施量,充分挖掘种植翻压紫云英的减肥潜力。本试验仅研究了 22 500 kg/hm² 紫云英配施减量 20% ~ 60% 化肥对水稻产量稳定性的影响,而紫云英翻压量的多少是否会影响水稻产量稳定性仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, Mishra B, Shahi D K. Long-term fertilization, manure and liming effects on soil organic matter and crop yields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(2):397-409. doi:10.1016/j.still.2006.08.013.
- [2] Macholdt J, Piepho H P, Honermeier B. Mineral NPK and manure fertilization affecting the yield stability of winter wheat: Results from a long-term field experiment [J]. *European Journal of Agronomy*, 2019, 102:14-22. doi:10.1016/j.eja.2018.10.007.
- [3] 魏猛,张爱君,诸葛玉平,李洪民,唐忠厚,陈晓光. 长期不同施肥对黄潮土区冬小麦产量及土壤养分的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(2):304-312. doi:10.11674/zwyf.16275.
- [4] Wei M, Zhang A J, Zhuge Y P, Li H M, Tang Z H, Chen X G. Effect of different long-term fertilization on winter wheat yield and soil nutrient contents in yellow fluvo-aquic soil area[J]. *Journal of Plant Nutrient and Fertilizer*, 2017, 23(2):304-312.
- [4] 唐杉,王允青,赵决建,张智,吴立蒙,曹卫东. 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. doi:10.13292/j.1000-4890.20151023.005.
- [5] Tang S, Wang Y Q, Zhao J J, Zhang Z, Wu L M, Cao W D. Effects of milk vetch application on double cropping rice yield and yield stability[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(11):3086-3093.
- [5] 冀建华,刘光荣,李祖章,刘益仁,侯红乾,刘秀梅,李絮花,罗奇祥. 基于 AMMI 模型评价长期定位施肥对双季稻总产量稳定性的影响[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(4):685-696. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2012.04.009.
- [6] Ji J H, Liu G R, Li Z Z, Liu Y R, Hou H Q, Liu X M, Li X H, Luo Q X. Effects of long-term fertilization on stability of double cropping rice yield based on AMMI model [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(4):685-696.
- [6] 刘春增,常单娜,李本银,曹卫东,吕玉虎,潘兹亮. 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):656-668. doi:10.11766/trxb201607050273.
- [7] Liu C Z, Chang D N, Li B Y, Cao W D, Lü Y H, Pan Z L. 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):656-668.
- [7] 吕玉虎,郭晓彦,李本银,刘春增,张丽霞,曹卫东,潘兹亮. 翻压不同量紫云英配施减量化肥对土壤肥力和水稻产量的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017(5):94-98. doi:10.11838/sfsc.20170516.
- [8] Lü Y H, Guo X Y, Li B Y, Liu C Z, Zhang L X, Cao W D, Pan Z L. Effects of the incorporation of various amounts of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and reducing chemical fertilizer on soil fertility and rice yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5):94-98.
- [8] 王琴,郭晓彦,张丽霞,吕玉虎,潘兹亮,刘春增. 紫云英配施不同量化肥对水稻产量及经济效益的影响

- [J]. 河南农业科学, 2013, 42(5): 77 - 81. doi:10.15933/j.cnki.1004-3268.2013.05.030.
- Wang Q, Guo X Y, Zhang L X, Lü Y H, Pan Z L, Liu C Z. Effects of combined application of *Astragalus sinicus* with different amount of chemical fertilizer on rice yield and economic efficiency[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2013, 42(5): 77 - 81.
- [9] 王建红, 曹凯, 张贤. 紫云英还田配施化肥对单季晚稻养分利用和产量的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(4): 888 - 896. doi:10.11766/trxb201307010309.
- Wang J H, Cao K, Zhang X. Effects of incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on nutrient use efficiency and yield of single-cropping late rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(4): 888 - 896.
- [10] 黄晶, 高菊生, 张杨珠, 曹卫东, 刘淑军. 紫云英还田后不同施肥下的腐解及土壤供钾特征[J]. 中国土壤与肥料, 2016(1): 83 - 88. doi: 10.11838/sfsc.20160114.
- Huang J, Gao J S, Zhang Y Z, Cao W D, Liu S J. Dynamics of Chinese milk vetch decomposition in paddy field under different fertilization and the supply ability of soil potassium[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2016(1): 83 - 88.
- [11] 杨曾平, 高菊生, 郑圣先, 聂军, 徐明岗, 谢坚, 廖育林. 长期冬种绿肥对红壤性水稻土微生物特性及酶活性的影响[J]. 土壤, 2011, 43(4): 576 - 583.
- Yang Z P, Gao J S, Zheng S X, Nie J, Xu M G, Xie J, Liao Y L. Effects of long-term winter planting-green manure on microbial properties and enzyme activities in reddish paddy soil[J]. *Soil*, 2011, 43(4): 576 - 583.
- [12] 何春梅, 钟少杰, 李清华, 王飞, 林诚, 李昱. 种植翻压紫云英对耕层土壤结构性能及有机碳含量的影响[J]. 江西农业学报, 2014, 26(12): 32 - 34, 37. doi: 10.19386/j.cnki.jxnyxb.2014.12.008.
- He C M, Zhong S J, Li Q H, Wang F, Lin C, Li Y. Effects of planting and overturning milk vetch on properties of surface soil structure and content of organic carbon[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2014, 26(12): 32 - 34, 37.
- [13] 颜志雷, 方宇, 陈济琛, 王飞, 何春梅, 林新坚. 连年翻压紫云英对稻田土壤养分和微生物学特性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1151 - 1160. doi:10.11674/zwyf.2014.0511.
- Yan Z L, Fang Y, Chen J C, Wang F, He C M, Lin X J. Effect of turning over Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on soil nutrients and microbial properties in paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrient and Fertilizers*, 2014, 20(5): 1151 - 1160.
- [14] 高菊生, 徐明岗, 曹卫东, 聂军, 董春华, 文石林. 长期稻-稻-紫云英轮作 28 年对水稻产量及田间杂草多样性影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17): 155 - 159.
- Gao J S, Xu M G, Cao W D, Nie J, Dong C H, Wen S L. Effects of long-term rice-rice-milk vetch rotation for 28 years to rice yield and weed species diversity[J]. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2010, 26(17): 155 - 159.
- [15] 谭景艾, 李保同, 潘晓华, 石庆华. 冬种绿肥对早稻病虫害发生及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(4): 179 - 184. doi: 10.11294/j.issn.1000-6850.2014-2361.
- Tan J A, Li B T, Pan X H, Shi Q H. Effects of different winter-green manure on occurrence of diseases, insect pests, weeds of early rice and its yield[J]. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 2015, 31(4): 179 - 184.
- [16] 胡建利, 王德建, 王灿, 孙瑞娟. 不同施肥方式对水稻产量构成及其稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 48 - 53. doi:10.3724/sp.j.1011.2009.00048.
- Hu J L, Wang D J, Wang C, Sun R J. Effect of different fertilization systems on rice yield components and their stability[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(1): 48 - 53.
- [17] 黄欠如, 胡锋, 李辉信, 赖涛, 袁颖红. 红壤性水稻土施肥的产量效应及与气候、地力的关系[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 926 - 933.
- Huang Q R, Hu F, Li H X, Lai T, Yuan Y H. Crop yield response to fertilization and its relations with climate and soil fertility in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6): 926 - 933.
- [18] 高洪军, 彭畅, 张秀芝, 李强, 朱平. 长期不同施肥对东北黑土区玉米产量稳定性的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4790 - 4799. doi:10.3864/j.issn.0578-1752.2015.23.020.
- Gao H J, Peng C, Zhang X Z, Li Q, Zhu P. Effects of long-term different fertilization on maize yield stability in the northeast black soil region[J]. *Scientia Agriculture Sinica*, 2015, 48(23): 4790 - 4799.
- [19] 魏猛, 张爱君, 诸葛玉平, 李洪民, 唐忠厚, 陈晓光. 长期不同施肥对黄潮土区玉米产量稳定性的影响[J]. 华北农学报, 2016, 31(6): 171 - 176. doi: 10.7668/hbxb.2016.06.027.
- Wei M, Zhang A J, Zhuge Y P, Li H M, Tang Z H, Chen X G. Effect of long-term different fertilization on maize yield stability in yellow fluvo-aquic soil region[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(6): 171 - 176.
- [20] 李辛村, 张恩和, 董孔军, 何继红, 杨天育. 用 AMMI 双标图分析糜子品种的产量稳定性及试点代表性[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 422 - 426. doi:10.3724/sp.j.1011.2012.00422.
- Li X C, Zhang E H, Dong K J, He J H, Yang T Y. AMMI-Biplot analysis of yield stability and test-site representativeness of proso-millet cultivars[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(4): 422 - 426.
- [21] 黄晶, 张杨珠, 刘淑军, 高菊生. 水稻产量对长期不同施肥和环境的响应[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1367 - 1376. doi: 10.13930/j.cnki.cjea.150409.
- Huang J, Zhang Y Z, Liu S J, Gao J S. Response of rice yield to different long-term fertilization regimes and the environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(11): 1367 - 1376.
- [22] 周文魁. 气候变化对中国粮食生产的影响及应对策略[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- Zhou W K. Impact of climate change impact on Chinese food production and its countermeasures[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [23] 王丹. 气候变化对中国粮食安全的影响与对策研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- Wang D. Impact of climate change on Chinese grain security and countermeasures[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.