

化肥减量配合紫云英还田对双季稻产量及氮肥利用率的影响

陈静蕊¹, 秦文婧¹, 王少先¹, 夏文建¹,
刘光荣¹, 曹卫东², 吕伟³, 徐昌旭¹, 刘佳¹

(1.江西省农业科学院土壤肥料与资源环境研究所,
农业部长江中下游作物生理生态与耕作重点实验室,国家红壤改良工程技术研究中心,
南昌 330200;2.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;3.江西生物科技职业学院,南昌 330200)

摘要: 旨在明确化肥减量条件下不同紫云英还田量对亚热带双季稻区早、晚稻产量及氮肥利用率的影响。以双季稻种植模式为研究对象,设置 2 个不同的减肥量处理配施不同的紫云英还田量,观察紫云英连续还田下不同处理对双季稻产量和养分利用率的影响。结果表明:与常规施肥处理(100%F)相比,20%减肥量各处理的早稻产量均得到显著提高,增产幅度为 5.0%~13.2%;40%减肥量条件下,配施 15 000~22 500 kg/hm²紫云英早稻产量不减产,而配施 30 000~37 500 kg/hm²紫云英后早稻产量有显著提高,增产幅度为 5.4%~8.5%。各减肥配施紫云英处理的晚稻产量均随紫云英还田量的增加而升高($P>0.05$)。各减肥配施紫云英处理早稻化学氮肥的农学利用率、偏生产力及回收率均较常规施肥处理显著提高,但晚稻的氮肥利用率无显著差异。将紫云英还田输入的氮纳入总氮素投入后,早稻总氮素的农学利用率和回收率均随紫云英还田量的增加而降低;与 100%F 相比,各减肥配施紫云英处理的农学利用率未显著降低,但紫云英还田量达到 37 500 kg/hm²及以上时会导致早稻的氮素回收率显著降低。各紫云英还田处理土壤全氮含量均高于 100%F($P>0.05$),且土壤速效氮含量均显著高于 100%F 处理($P<0.05$)。亚热带双季稻种植模式下,长期紫云英还田配合减量施肥对早、晚稻产量和氮肥利用率均产生正面效应,且能提高土壤有机质含量和全氮含量,土壤速效氮含量显著高于常规施肥处理。因此,适量紫云英还田配施化肥除可减少化肥用量外,也是亚热带双季稻区兼顾提升稻米产量和培肥土壤的有效技术。本试验条件下,化肥减量 40%配合 22 500~30 000 kg/hm²紫云英的配比综合效果较好。

关键词: 化肥减量;紫云英还田;双季稻;产量;氮肥利用率

中图分类号:S142;S511 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2019)06-0280-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.06.039

Effects of Reduced Chemical Fertilizer Combined with Chinese Milk Vetch
(*Astragalus sinicus* L.) Incorporation on Rice Yield and
Nitrogen Use Efficiency in Double—rice Cropping System

CHEN Jingrui¹, QIN Wenjing¹, WANG Shaoxian¹, XIA Wenjian¹, LIU Guangrong¹,

CAO Weidong², LÜ Wei³, XU Changxu¹, LIU Jia¹

(1.Soil and Fertilizer & Resources and Environmental Institute, Jiangxi Academy of

Agricultural Sciences, Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System for the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, Ministry of Agriculture, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330200;2.Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;3.Jiangxi Biotech Vocational College, Nanchang 330200)

Abstract: The effects of incorporatation of reduced chemical fertilizer combined with Chinese Milk Vetch (*Astragalus sinicus* L.) on rice yield and nitrogen use efficiency was studied in subtropical double-rice cropping system. The experiment was carried out in a double-rice cropping system, and ten different treatments (two levels of reduced chemical fertilizer combined with four different amounts of Chinese milk vetch) were set to investigate the effects of different combination on the yields and nutrient use efficiencies of

收稿日期:2019-05-10
资助项目:科技部重点研发项目(2016YFD0800500,2016YFD0200800);国家自然科学基金项目(31860592);绿肥产业体系项目(CARS-22-Z-06);公益性行业(农业)科研专项(201503123-07-01)
第一作者:陈静蕊(1982—),女,河南洛阳人,博士,主要从事绿肥及农业环境保护研究。E-mail:chenjr5526@163.com
通信作者:徐昌旭(1965—),男,江西新建人,研究员,主要从事绿肥种植研究。E-mail:changxux@sina.com
刘佳(1984—),男,安徽六安人,助理研究员,主要从事绿肥利用及土壤环境研究。E-mail:liujia422@126.com

early- and late-rice. The results indicated that early-rice yields of all treatments which applied with 15 000~37 500 kg/hm² Chinese milk vetch and 80% recommend chemical fertilizer showed significant increasing, and was 5.0%~13.2% higher than that of recommended fertilizer treatment (100%F). The early-rice yields of treatments which applied with 15 000~22 500 kg/hm² Chinese milk vetch and 60% recommend chemical fertilizer showed no significant differences with that of the 100%F treatment, while the early-rice yields of treatments applied with 30 000~37 500 kg/hm² Chinese milk vetch and 60% recommend chemical fertilizer were 5.4%~8.5% higher than that of 100%F ($P<0.05$). Agronomic efficiency, partial factor productivity and recovery efficiency of applied chemical fertilizer N of all treatments with Chinese milk vetch applied were all significantly higher than that of 100%F in early-rice season, but no significant differences were found in late-rice season. When nitrogen derived from Chinese milk vetch application was counted into the total nitrogen input, agronomic efficiency of applied N of all treatments with Chinese milk vetch application showed declining trends as the Chinese milk vetch increasing in early-rice season. Compared with 100%F, agronomic efficiency of applied N of all treatments with Chinese milk vetch application showed no significant differences, but N recovery efficiency was significantly decreased when the Chinese milk vetch application was 37 500 kg/hm² and above. Soil total nitrogen content of all treatments with Chinese milk vetch application was higher than that of 100%F, but the differences were not significant ($P>0.05$). However, the differences of soil available nitrogen content between 100%F and all treatments with Chinese milk vetch application were significant ($P<0.05$). Long-term application of Chinese milk vetch combined with chemical fertilizer showed positive effects on yields and nitrogen use efficiency in both early- and late-rice seasons in subtropical double-rice cropping system. Continuous application of Chinese milk vetch was conducive for soil organic matter and total nitrogen content, and its impact on soil available nitrogen content improvement was significant. Therefore, the combination ratio of Chinese milk vetch and chemical fertilizer not only can reduce chemical fertilizer application, but also is an effective technique to improve rice yield and soil fertility in double-cropping paddy field. Based on the experiment results and experimental area condition, 60% recommend chemical fertilizer +22 500~30 000 kg/hm² Chinese milk vetch is appropriate.

Keywords: reduced chemical fertilizer; Chinese milk vetch application; double-rice cropping system; yield; nitrogen use efficiency

水稻是我国主要的粮食作物之一, 占我国粮食总产量的 1/3 以上^[1]。为了追求高产稳产, 部分稻田年均化学氮肥用量已达 500 kg/hm² 以上^[2], 而过量的化肥使用在保障产量的同时也带来了一系列的负面影响, 如肥料利用率低造成资源浪费^[2], 大量养分损失污染环境^[3], 严重时甚至会降低稻田土壤质量、不利于土壤可持续生产^[4-6]。而采用缓控释氮肥和有机无机肥的合理配施都是提高作物产量和减少化肥施用的良好途径。但是, 由于缓控释肥的成本相对较高, 而以廉价易得的畜禽粪便为原料的有机肥还田又会存在重金属和抗生素超标的二次污染的风险^[7]。因此, 绿肥作为一种优质清洁且成本相对低廉的有机肥资源得到越来越多的关注。种植利用紫云英(*Astragalus sinicus* L.) 还田在我国南方稻田有悠久的历史, 其在提高稻米产量与品质^[8-9]、培肥土壤^[10-11]、改善农田生态环境^[12] 等方面效果显著。同时, 紫云英部分替代化肥还能实现水稻的高产稳产^[13]。在单季稻种植模式下, 60~120 t/hm² 紫云英还田可完全替

代化肥的施用并实现水稻的稳产^[14]; 紫云英还田量为 22.5 t/hm² 时, 可减少 20%~40% 的化肥施用量, 且保证水稻产量较常规施肥无显著降低^[15]。

紫云英还田配合减量施肥除了能提高水稻的产量, 还有利于提高化肥氮素利用效率。廖育林等^[16] 研究表明, 与常规施肥相比, 适量紫云英还田配合减量施肥能显著提高早稻季化肥氮的利用率、农学效率、偏生产力和氮收获指数; 张颖睿等^[17] 研究也表明, 紫云英还田配合减量施肥能提高早稻季氮肥的表现利用率和真实利用率。单季稻种植模式下, 紫云英还田配合减量施肥可显著提高化肥氮的农学效率和偏生产力^[18]。

虽然前人^[16-17, 19-20] 关于紫云英还田对水稻产量及养分利用率的研究较多, 但无论是单季稻还是双季稻种植模式, 田间试验多集中于定量(如 22.5, 18 t/hm²) 紫云英还田配施不同化肥用量对水稻产量及养分利用率的影响, 而对不同紫云英还田量配施化肥的适宜配比的筛选研究则相对较少。此外, 紫云英还田后的前 90 天虽可释放 75% 左右的养分^[21], 对提升早稻产量和养分利用

效果显著,但早稻季释放的养分并非全部被作物吸收利用,晚稻季仍有部分养分在缓慢释放。因此,开展不同紫云英还田量与化肥的配比对早、晚稻产量和养分利用的研究更能充分了解紫云英养分在稻田的周转和利用效率,充分挖掘紫云英在化肥减施、提升水稻产量中的潜力。本研究以在余江布置的紫云英还田定位试验为平台,研究双季稻种植模式下紫云英替代化肥的潜力,以及不同紫云英还田量与化肥配施对双季稻产量及氮肥利用率的影响,为我国南方双季稻区的粮食高产稳产、化肥减施增效提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验点位于江西省余江县邓家埠水稻原种场(28°12'N,116°47'E),属亚热带湿润性季风气候区,年均温为 17.6℃,年均降水量 1 788.8 mm。土壤类型为河流冲积物形成的水稻土。所选样地在试验布置前的种植模式为冬闲—双季稻模式,试验布置前耕层土壤(0—20 cm)的主要肥力状况为:pH 5.07,有机质含量 27.4 g/kg,全氮含量 1.85 g/kg,全磷含量 0.36 g/kg,全钾含量 35.2 g/kg,碱解氮含量 123.1 mg/kg,有效磷含量 4.4 mg/kg,速效钾含量 56 mg/kg。试验于 2008 年 10 月份开始种植紫云英(余江大叶籽),每年 4 月下旬早稻“中早 39”移栽前 1 周翻压紫云英,7 月上旬收获;晚稻“农香 98”于早稻收获后 7~10 天移栽,10 月底至 11 月初收获。

1.2 研究方案

1.2.1 试验设计 试验设计为 2 种化肥减量水平(20%和 40%减肥量)下分别配施 4 个梯度的紫云英还田量:鲜草 15 000,22 500,30 000,37 500 kg/hm²,另设不施肥对照和常规施用化肥处理,共 10 个处理,3 次重复,小区面积 20 m²,随机排列。具体试验处理及简称分别为:(1)不施肥对照(CK);(2)不翻压紫云英,常规施肥处理(100%F);(3)15 000 kg/hm²紫云英+80%F(80A);(4)22 500 kg/hm²紫云英+80%F(80B);(5)30 000 kg/hm²紫云英+80%F(80C);(6)37 500 kg/hm²紫云英+80%F(80D);(7)15 000 kg/hm²紫云英+60%F(60A);(8)22 500 kg/hm²紫云英+60%F(60B);(9)30 000 kg/hm²紫云英+60%F(60C);(10)37 500 kg/hm²紫云英+60%F(60D)。各小区秸秆均不还田。每年早稻移栽前 1 周将紫云英按对应处理设计用量进行还田,不足部分补齐,多余部分移出田块。4 个不同梯度紫云英还田处理中,15 000,22 500 kg/hm² 2 个还田量处理的紫云英试验期间紫云英都有盈余,需要部分移出田块,30 000 kg/hm² 处理基本能够自足或需少量补充,

37 500 kg/hm²处理每年均需从其他田块移来紫云英进行补充。紫云英鲜草平均 N 养分含量为 2.6 g/kg,15 000,22 500,30 000,37 500 kg/hm²紫云英分别折合投入氮素 39.1,58.7,78.2,97.8 kg/hm²。

早稻季 100%F 处理化肥用量为 N 150 kg/hm²,P₂O₅ 75 kg/hm²,K₂O 120 kg/hm²,80%F 和 60%F 的各处理中的氮磷钾化肥用量均在 100%F 的基础上分别减少 20%和 40%,即 80%F 各处理的化肥用量为 N 120 kg/hm²,P₂O₅ 60 kg/hm²,K₂O 96 kg/hm²,60%F 各处理的化肥用量为 N 90 kg/hm²,P₂O₅ 45 kg/hm²,K₂O 72 kg/hm²。化肥减量的处理在 100%化肥用量基础上分别减少 20%或 40%;晚稻季各施肥处理的化肥用量一致,为 N 180 kg/hm²,P₂O₅ 75 kg/hm²,K₂O 150 kg/hm²。各处理所用化肥分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。施肥方式为撒施,早晚稻季化学磷肥作为基肥一次性施入,早稻季化学氮肥和钾肥的基追比为基肥:分蘖肥:穗肥=4:3:3,晚稻季基追比为基肥:分蘖肥:穗肥=3:4:3。

1.2.2 样品采集、测定及方法 采样时间为 2011—2015 年。在每季早、晚稻成熟后,各小区单独收割、脱粒后测定水稻产量。水稻收割前,各小区采集有代表性的 3 蔸水稻进行考种,考种后的籽粒和秸秆烘干粉碎后用凯氏定氮法进行含氮量的测定^[22]。2015 年晚稻结束后采集耕层 0—20 cm 土壤,对土壤有机质、全氮、速效氮的含量进行测定。土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定,全氮含量采用凯氏法测定,土壤速效氮含量采用碱解扩散法测定^[22]。

氮肥利用率的计算方法:

氮素农学利用率(agronomic efficiency of applied N, AEN)=(施氮区产量-空白区产量)/施氮量;氮素偏生产力(partial factor productivity of applied N, PFPN)=施氮区产量/施氮量;氮素回收利用率(N recovery efficiency, REN)=(施氮区植株地上部氮累积量-空白区地上部植株氮累积量)/施氮量×100%;氮素生理利用率(physiological efficiency of applied N, PEN)=(施氮区产量-空白区产量)/(施氮区地上部氮累积量-空白区地上部氮累积量)。

化学氮肥养分利用率计算公式中的“施氮量”=化肥氮的投入量,总投入氮的养分利用率计算公式中“施氮量”=化肥氮投入量+紫云英氮投入量。

1.2.3 数据处理 数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析、作图。采用 SPSS 13.0 软件进行单因素分析(one-way ANOVA),Duncan 法进行不同处理的差异显著性检验,显著水平设置为 α=0.05。对早晚稻 5 年的产量、养分累积量及养分利用率进行的方差分析以每年产量、养

分累积量和养分利用率的均值在一次重复来分析不同处理之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对早、晚稻生物量的影响

施肥是提高水稻产量的关键措施,5 年的试验结果(表 1)表明,各施肥处理的早稻产量相对于 CK 的增幅在 136.3%~173.9%。相对于 100%F 处理,20%减肥量配合各种紫云英还田均显著提高早稻产量,其增幅在 5.0%~13.2%;40%减肥量配合 15 000~22 500 kg/hm²紫云英还田(60A、60B),早稻产量与 100%F 相比无显著差异,而配合 30 000~37 500 kg/hm²紫云英还田(60C、60D)与 100%F 相比产量增幅在 5.4%~8.5%(*P*<0.05)。在化肥施用量相等的条件下,早稻的产量均随紫云英还田量的增加而增大。在紫云英还田量一致的情况下,减肥 20%处理的早稻产量均显著高于相对应的减肥 40%处理,其增幅在 4.3%~7.5%。早稻处理之间秸秆产量差异趋势与籽粒类似。

晚稻季,各紫云英还田处理的晚稻产量也表现出随紫云英还田量增加而增加的趋势,但化肥施用量相等的各处理之间,晚稻产量差异均不显著。100%F 处理晚稻产量与其它各施肥处理之间差异也未达到显著水平。晚稻季秸秆处理之间差异变化与籽粒相似。

2.2 不同施肥处理对早、晚稻氮素吸收的影响

无论是早稻季还是晚稻季,虽然各施肥处理籽粒和秸秆的氮含量都略高于 CK 处理,但就 5 年的均值

来看,处理之间籽粒和秸秆氮含量的差异均未达到显著水平(*P*>0.05)(表 2)。早稻季各施肥处理籽粒氮累积量均显著高于 CK,增加幅度为 155.0%~192.2%。与 100%F 处理相比,20%减肥量各处理早稻季氮累积量均有显著提高,提高幅度为 13.5%~16.0%;40%减肥量处理籽粒氮累积量与 100%F 之间差异不显著。早稻季各施肥处理秸秆氮累积量除 80C 和 80D 处理显著高于 100%F 外,其他各处理秸秆累积量与 100%F 处理之间均无显著差异。晚稻季,除 80B 和 80C 处理的籽粒氮累积量显著高于 100%F 处理外,其余各施肥处理之间籽粒氮累积量差异均不显著。各施肥处理秸秆的氮累积量无显著差异,但均显著高于 CK 处理。

表 1 5 年不同处理对早、晚稻生物量的影响

处理	单位:kg/hm ²			
	早稻		晚稻	
	籽粒	秸秆	籽粒	秸秆
CK	2512.9e	2091.4f	2970.6c	2338.6c
100%F	6079.8d	3887.5d	6213.6ab	4749.3b
80A	6382.0c	4116.3c	6258.5ab	4823.6ab
80B	6520.8b	4216.3c	6337.8ab	4916.6ab
80C	6723.0ab	4548.4ab	6396.0a	5031.5a
80D	6883.4a	4677.6a	6431.7a	5074.0a
60A	5937.2d	3573.8e	6163.0b	4755.3b
60B	6090.1d	3834.6d	6228.1ab	4775.2b
60C	6408.0c	4172.1c	6285.9ab	4766.0b
60D	6599.3b	4455.8b	6313.6ab	4901.5ab

注:同列数值后不同字母表示处理间差异达 5%显著水平。下同。

表 2 5 年不同处理对早、晚稻植株氮含量及氮累积量的影响

处理	氮含量 (g · kg ⁻¹)				氮累积量 (kg · hm ⁻²)			
	早稻		晚稻		早稻		晚稻	
	籽粒	秸秆	籽粒	秸秆	籽粒	秸秆	籽粒	秸秆
CK	12.8	7.6	12.1	7.6	32.2c	15.9c	35.9c	17.8b
100%F	13.5	7.7	12.8	7.6	82.1b	29.9b	79.5b	36.1a
80A	14.6	8.0	13.5	7.7	93.2a	32.9ab	84.5b	37.1a
80B	14.6	7.8	14.6	8.0	95.2a	32.9ab	92.5a	39.3a
80C	14.0	8.0	14.6	7.8	94.1a	36.4a	93.4a	39.2a
80D	13.6	7.6	14.0	8.0	93.6a	35.5a	90.0ab	40.6a
60A	14.1	7.9	13.6	7.3	83.7b	28.2b	83.8b	34.7a
60B	13.9	7.8	14.1	7.9	84.7b	29.9b	87.8ab	37.7a
60C	13.2	7.6	13.9	7.8	84.6b	31.7ab	87.4ab	37.2a
60D	12.8	7.8	13.2	7.6	84.5b	34.8ab	83.3b	37.3a

2.3 不同施肥处理对早、晚稻化学氮肥利用率的影响

早稻季,化肥氮的农学利用率及偏生产力处理间差异表现一致,均表现为各紫云英还田处理化肥氮农学利用率显著高于 100%F 处理(*P*<0.05);20%减肥量各处理化肥氮的偏生产力差异均不显著;40%减肥量处理之间,配施 30 000~37 500 kg/hm²紫云英

还田量 2 个处理(60C 和 60D)化肥氮的农学利用率及偏生产力显著高于配施 15 000~22 500 kg/hm²紫云英还田量的 2 个处理(60A 和 60B)(表 3)。与 100%F 相比,20%减肥量各处理化肥氮回收率提高了 22.4%~26.1%;40%减肥量各处理化肥氮回收率提高了 28.3%~36.5%。无论是 20%减肥量各处理还是 40%减肥量各处理,其生理利用率与 100%F 之

间均差异不显著。整体而言,在紫云英还田量相等的条件下,40%减肥量各处理的农学利用率、偏生产力及回收率高于对应的 20%减肥量处理($P<0.05$)。在紫云英还田量相等的条件下,各处理晚稻季 4 个不同的氮肥养分利用率之间均无显著差异。

表 3 5 年不同处理对早、晚稻季化肥氮的养分利用率的影响

种植季	处理	农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	回收率/ %	生理利用率/ (kg·kg ⁻¹)
早稻	CK	—	—	—	—
	100%F	23.8e	40.5d	42.6e	55.8ab
	80A	32.2d	53.2c	65.0d	49.6b
	80B	33.4cd	54.3c	66.7cd	50.1b
	80C	35.1cd	56.0c	68.7c	51.1b
	80D	36.4c	57.4c	67.5c	54.0ab
	60A	38.0bc	66.0b	70.9bc	53.7ab
	60B	39.7b	67.7b	73.9b	53.8ab
	60C	43.3a	71.2a	75.8a	57.1a
	60D	45.4a	73.3a	79.1a	57.4a
晚稻	CK	—	—	—	—
	100%F	18.0a	34.5a	14.3b	52.4a
	80A	18.3a	34.8a	17.1b	48.4ab
	80B	18.7a	35.2a	21.6a	43.1b
	80C	19.0a	35.5a	22.1a	43.4b
	80D	19.2a	35.7a	20.2a	45.0b
	60A	17.7a	34.2a	16.7b	49.3ab
	60B	18.1a	34.6a	18.9ab	45.4b
	60C	18.4a	34.9a	18.7ab	46.8b
	60D	18.6a	35.1a	16.4b	50.0a

2.4 不同施肥处理对早稻总投入氮养分利用率的影响

早稻季,在等量施用化肥的前提下,总投入氮素的农学利用率随着紫云英还田量的增加而降低(表 4),但无论是 20%减肥量的 4 个处理还是 40%减肥量的 4 个处理,其总投入氮素的农学效率与 100%F 处理相比均无显著差异。在等量施用化肥的前提下,总投入氮肥的偏生产力也随紫云英还田量的增加而减小。20%减肥量 4 个处理中,除 80A 处理的氮肥偏生产力与 100%F 之间差异不显著外,其他 3 个处理的氮肥偏生产力均显著低于 100%F,降低幅度为 4.0~8.9 kg/kg;40%减肥量 4 个处理中,60A 和 60D 处理的氮肥偏生产力分别显著高于和低于 100%F 处理($P<0.05$),而 60B 和 60C 处理与 100%F 之间无显著差异。与 100%F 处理相比,20%减肥量 4 个处理中除 80A 和 80D 的氮肥回收率分别显著高于和低于 100%F 外,其他 2 个处理的回收率均与 100%F 无显著差异;40%减肥量的各处理与 100%F 之间的差异与 20%减肥量处理之间表现一致。与表 3 中早稻季化肥氮的养分利用率表现一致的是,在紫云英还田量相等的条件下,20%减肥量各处理的养分利用率

略低于与之对应的 40%减肥量处理($P>0.05$)。

表 4 5 年不同处理对早稻季总投入氮素养分利用率的影响

处理	农学利用率/ (kg·kg ⁻¹)	偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)	回收率/ %
CK	—	—	—
100%F	23.8ab	40.5b	42.6b
80A	24.3ab	40.1b	49.0a
80B	22.4b	36.5cd	44.8b
80C	21.2b	33.9d	41.6b
80D	20.1b	31.6d	37.2c
60A	26.5a	46.0a	49.4a
60B	24.1ab	41.0b	44.7b
60C	23.2ab	38.1bc	40.5b
60D	21.8b	35.1cd	37.9c

2.5 不同施肥处理对土壤养分含量的影响

从表 5 可以看出,5 年连续紫云英还田后,各紫云英还田处理的土壤有机质含量较基础值(27.4 g/kg)均有提升,且在等量施用化肥的前提下呈现出随紫云英还田量的增加提升幅度增大的趋势。20%减肥量的 4 个处理的提升幅度为 6.8%~16.0%;40%减肥量的 4 个处理的提升幅度为 6.9%~13.5%。土壤全氮含量各施肥处理间差异不显著,但均高于 CK 处理($P>0.05$),且 20%减肥量各处理和 40%减肥量各处理的全氮含量均较基础值有所提高。土壤速效氮含量各紫云英还田处理均显著高于 CK 和 100%F 处理。

表 5 不同处理对土壤养分含量的影响

处理	有机质/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	速效氮/ (mg·kg ⁻¹)
CK	28.43b	1.76b	142.04b
100%F	30.89ab	1.84ab	147.69b
80A	29.25ab	1.87ab	170.03a
80B	31.45ab	1.89ab	164.13a
80C	31.79ab	1.97ab	180.07a
80D	31.70ab	1.95ab	178.21a
60A	29.30ab	1.91ab	178.63a
60B	30.72ab	1.94ab	171.65a
60C	30.94ab	1.95ab	178.00a
60D	31.11ab	2.04a	176.66a

3 讨论

3.1 不同紫云英与化肥配比对江西双季稻产量的影响

紫云英是南方稻田最主要的绿肥作物,具有良好的替代化肥潜力^[13]。适量紫云英还田可在一定程度上减少化肥施用,并能保证水稻产量不降低甚至有显著提高^[14-15]。福建单季稻种植模式下,紫云英还田量达 18 t/hm² 可减施 40% 的化肥且保证稻米不减产^[19]。浙江单季稻区,当紫云英还田量达到 45 t/hm² 时,即便化肥减施 60% 仍能实现单季稻的增产^[23]。本研究结果也表明,江西双季稻区在 20%减

肥量的条件下, 配施 15 000~37 500 kg/hm² 紫云英还田对早稻均有显著增产效果; 在 40% 减肥量条件下, 配合 15 000~22 500 kg/hm² 紫云英还田则能保证早稻产量无显著降低, 当紫云英还田量达 30 000 kg/hm² 时, 早稻产量则显著提高(表 1)。紫云英可有效替代化肥的主要原因首先是其含氮量较高, 以本研究为例, 紫云英还田量为 15 000 kg/hm² 时相当于每公顷还田纯氮 39.1 kg; 其次, 与化肥相比, 紫云英的养分释放相对较缓、肥效较长, 有利于对早稻养分的长久供应; 此外,¹⁵N 同位素示踪技术研究发现, 相比单施化肥处理土壤 N, 植物水稻更倾向于吸收紫云英矿化释放的 N。因此, 紫云英还田有效改善了土壤的 N 素营养状况^[19]。

在实际大田生产中, 相对于早稻, 农民往往更关心晚稻的产量与收益。本研究发现, 尽管差异尚未达到显著水平, 20% 减肥量和 40% 减肥量的各处理晚稻产量也有随紫云英还田量增加而提高的趋势($P > 0.05$)。其原因可能是绿肥还田后归还了数量可观的有机碳, 其在土壤中的周转期远长于 N、P、K 养分^[24]。这些绿肥碳显著提高了稻田土壤中细菌、真菌的数量、微生物量碳含量及土壤碳氮代谢相关酶的活性^[25], 并在微生物作用下形成新的团聚体^[26], 进而对土壤新输入碳加以固定^[27]。同时, 绿肥可以激活土壤中相关的生理生化过程对新固定的有机碳形成保护机制^[28], 最终提升土壤有机质的含量。本研究中, 在连续 5 年紫云英还田后, 土壤有机质的提升幅度呈现出随紫云英还田量增加而增大的趋势。而土壤有机质作为土壤肥力的核心, 可通过改善土壤微环境^[19]、提升稻田的养分供应能力^[29], 最终实现对水稻产量的提升。当然, 土壤有机碳的累积及土壤培肥是一个长期的过程, 而本试验的持续时间还相对较短。因此, 目前紫云英还田对晚稻季产量的影响只是表现出一种变化趋势, 而紫云英还田后对晚稻季产量造成显著影响的“质变”过程可能需要更长的时间才能体现。另外, 紫云英替代化肥的增产性和稳产性是否能够长期延续、在江西双季稻区是否有更高的紫云英替代化肥潜力也有待进一步研究探讨。

在江西省肥一稻一稻种植区, 紫云英每公顷的播种量一般在 22.5 kg/hm², 种子按照 20 元/kg 计算, 成本投入为 450 元/hm²。早稻季减少 20% 和 40% 的氮磷钾化肥计算, 成本投入可分别减少 577, 1 154 元/hm²。本研究中, 无论是减肥量 20% 还是减肥量 40%, 配施 22 500~30 000 kg/hm² 紫云英均能维持正常的早晚稻产量, 甚至略有提高。在当地肥力条件下, 紫云

英在正常年份的产量维持在 30 000 kg/hm² 左右。因此, 40% 减肥量配施 22 500~30 000 kg/hm² 紫云英是江西双季稻区综合性价比较为合理的配比。

3.2 不同紫云英与化肥配比对江西双季稻氮肥利用率的影响

据统计, 中国稻田氮肥用量约占世界稻田氮肥总消费量的 37%, 稻田单位面积氮肥施用量比世界平均水平高出约 75%^[30], 然而, 稻田的氮肥利用率仅有 30% 左右^[31], 个别区域甚至只有 19.9%^[32], 这意味着超过 50% 以上的氮素会通过地表径流、大气挥发、渗漏流失等途径进入周边环境, 进而造成一系列的环境污染问题^[31]。针对稻田氮肥利用率提升的问题, 我国的科研工作者开展了一系列的研究工作, 如缓控释肥技术^[33]、有机无机肥配施^[10]、肥料增效剂^[34]、合理氮肥运筹^[35]等。而其中的紫云英还田配施化肥技术除了能提高化肥利用率外^[10], 因其土壤培肥效果好、不存在二次污染的风险、成本相对较低等特性得到广泛的认可。

本研究也发现, 与常规施肥处理相比, 紫云英还田减施化肥能显著提高化学氮肥养分利用率(表 3), 因而有降低化学氮素损失及降低环境污染风险的能力。但是, 以往很多研究^[36-37] 中紫云英只是被作为稻田施肥的额外补充, 而并未将其计算在对稻田的养分投入之列。实际上紫云英本身含氮量较高, 其还田所投入的氮素量也不容忽视。有研究^[14] 表明, 在考虑了紫云英氮投入的情况下, 大量的紫云英还田并未显著提高甚至降低了总氮投入的养分利用率。本研究结果也表明, 随着紫云英还田量的增加, 早稻季总投入氮素的农学利用率、氮肥偏生产力、氮肥回收率均呈现逐步降低的趋势(表 4), 其原因可能是由于紫云英残体的 C/N 较低(< 30), 因此紫云英还田能有效提高土壤微生物的数量和活性^[25]。紫云英还田量越多, 经微生物分解矿化而释放到土壤中的无机氮也越多, 进而促进水稻对氮素的吸收, 最终提高稻米的产量。Zhu 等^[38] 利用¹⁵N 同位素标记技术研究表明, 紫云英氮完全替代化肥氮作为水稻氮源时, 紫云英氮的吸收效率(39.2%~51.3%)显著高于化肥氮(29.9%), 水稻总氮累积量及收获指数也表现出相同规律。这表明在等氮投入的情况下, 紫云英还田替代化肥氮是能够显著提高氮肥养分利用率的。虽然在本研究中紫云英还田处理较常规施肥处理的总投入氮肥利用率的有所降低, 其原因可能是紫云英还田处理总氮素的投入量较常规施肥量高所致。

虽然氮肥利用率的降低可能意味着增施的氮素

有流失的风险,对生态环境可能产生潜在危害,但也可能未被作物利用的氮素并未流失,而是被土壤所固定,改善了土壤氮素营养。袁嫚嫚等^[39]研究发现,紫云英还田可显著降低土壤中可溶性氮的浓度,进而降低稻田氮素流失风险;王飞等^[19]研究发现,化肥减施 40% 配合紫云英还田更有利于氮素在土壤耕层的残留和保存,进而成为土壤氮库组分。同位素标记结果^[38]也表明,紫云英完全替代氮肥的条件下,双季稻收获后土壤氮的残留率是单施化肥的 2 倍以上。本研究中,与 100%F 处理相比,连续 5 年紫云英还田后的土壤无论是总氮还是速效氮的含量均有提高,且速效氮含量显著高于 100%F 处理(表 5)。因此,本研究中紫云英还田后对晚稻产量的提升也可能是由于未被早稻季作物利用的绿肥氮素并未流失,进而提升土壤供肥水平,为后茬作物进一步利用所致。当然,过量增施紫云英后总氮肥利用率趋于降低,紫云英 N 的归趋究竟如何,需要通过同位素示踪技术充分揭示;紫云英还田带来的环境风险与土壤培肥获得的良好效益之间的平衡点也需要深入研究确定。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国统计局.2015 年中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.
- [2] 宋勇生,范晓晖.太湖地区稻田氮肥吸收及其利用的研究[J].应用生态学报,2003,14(11):2081-2083.
- [3] Kourgialas N N, Karatzas G P, Koubouris G C. A GIS policy approach for assessing the effect of fertilizers on the quality of drinking and irrigation water and wellhead protection zones (Crete, Greece)[J].Journal Environmental Management,2017,189:150-159.
- [4] Malik R S, Ramkala, Dahiya R R, et al. Assessment of fertilizer use impact on soil and water pollution in Haryana[J].Environmental and Ecology,2009:1426-1429.
- [5] 吴道铭,傅友强,于智卫,等.我国南方红壤酸化和铝毒现状及防治[J].土壤,2013,45(4):577-584.
- [6] 周晓阳,徐明岗,周世伟,等.长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1615-1621.
- [7] Zhang F S, Li Y X, Yang M, et al. Content of heavy metals in animal feeds and manures from farms of different scales in northeast China[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2012,9(8):2658-2668.
- [8] 高菊生,曹卫东,李冬初,等.长期双季稻绿肥轮作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响[J].生态学报,2011,31(16):4542-4548.
- [9] 刘春增,刘小粉,李本银,等.紫云英还田对水稻产量、土壤团聚性及其有机碳和全氮分布的影响[J].华北农学报,2012,27(6):224-228.
- [10] 李继明,黄庆海,袁天佑,等.长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):563-570.
- [11] 杨滨娟,黄国勤,兰延,等.施氮和冬种绿肥对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J].应用生态学报,2014,25(10):2907-2913.
- [12] 徐阳春,沈其荣,雷宝坤,等.水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J].应用生态学报,2000,11(4):549-552.
- [13] 曹卫东,包兴国,徐昌旭,等.中国绿肥科研 60 年回顾与未来展望[J].植物营养与肥料学报,2017,23(6):1450-1461.
- [14] 王建红,曹凯,张贤.紫云英翻压量对单季晚稻养分吸收和产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(1):156-163.
- [15] 王琴,张丽霞,吕玉虎,等.紫云英与化肥配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J].草业学报,2012,29(1):92-96.
- [16] 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):190-195.
- [17] 张颖睿,杨滨娟,黄国勤.紫云英翻压量与不同施氮量对水稻生长和氮素吸收利用的影响[J].生态学杂志,2018,37(2):430-437.
- [18] 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.
- [19] 王飞,林诚,林新坚,等.连续翻压紫云英对福建单季稻产量与化肥氮素吸收、分配及残留的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(4):896-904.
- [20] 徐昌旭,谢志坚,曹卫东,等.翻压绿肥后不同施肥方法对水稻养分吸收及产量的影响[J].中国土壤与肥料,2011(3):35-39.
- [21] 王飞,林诚,李清华,等.亚热带单季稻区紫云英不同翻压量下有机碳和养分释放特征[J].草业学报,2012,21(4):319-324.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [23] 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.
- [24] 刘佳,张杰,秦文婧,等.红壤旱地毛叶苕子不同翻压量下腐解及养分释放特征[J].草业学报,2016,25(10):66-76.
- [25] 颜志雷,方宇,陈济琛,等.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.

[26] Yang Z P, Zheng S X, Nie J, et al. Effects of long-term winter planted green manure on distribution and storage of organic carbon and nitrogen in water-stable aggregates of reddish paddy soil under a double-rice cropping system[J]. Journal Integrative Agriculture, 2014,13(8):1772-1781.

[27] 周萍,宋国茵,潘根兴,等.南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 I.团聚体物理保护作用[J].土壤学报,2008,45(6):1063-1071.

[28] Garcia-Franco N, Albaladejo J, Almagro M, et al. Beneficial effects of reduced tillage and green manure on soil aggregation and stabilization of organic carbon in a Mediterranean agroecosystem[J]. Soil and Tillage Research, 2015,153:66-75.

[29] 霍莲杰,纪雄辉,吴家梅,等.不同外源有机碳对稻田甲烷排放和易氧化有机碳的影响[J].农业现代化研究,2013,34(4):496-501.

[30] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J].中国农业科学,2002,35(9):1095-1103.

[31] 朱兆良.农田中氮肥的损失与对策[J].土壤与环境,2000,9(1):1-6.

[32] 李荣刚,夏源陵,吴安之,等.太湖地区水稻节水灌溉与氮素淋失[J].河海大学学报,2001,29(2):21-25.

[33] 廖育林,鲁艳红,聂军,等.长期施肥稻田土壤基础地力和养分利用效率变化特征[J].植物营养与肥料学报,2016,22(5):1249-1258.

[34] 王玲玲,董春华,罗尊长,等.湘东稻—油轮作区氮磷利用效率对化肥减施的响应[J].核农学报,2018,32(2):353-361.

[35] 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.

[36] 高菊生,曹卫东,董春华,等.长期稻—稻—绿肥轮作对水稻产量的影响[J].中国水稻科学,2010,24(6):672-676.

[37] 高嵩涓,曹卫东,白金顺,等.长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性[J].土壤学报,2015,52(4):902-910.

[38] Zhu B, Yi L X, Hu Y G, et al. Nitrogen release from incorporated ¹⁵N-labelled Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue and its dynamics in a double rice cropping system[J]. Plant and Soil, 2014,374(1/2):331-344.

[39] 袁嫚嫚,刘勤,张少磊,等.太湖地区稻田绿肥固氮量及绿肥还田对水稻产量和稻田土壤氮素特征的影响[J].土壤学报,2011,48(4):797-803.

(上接第 279 页)

[16] Fan J W, Du Y L, Turner N C, et al. Changes in root morphology and physiology to limited phosphorus and moisture in a locally-selected cultivar and an introduced cultivar of *Medicago sativa* L. growing in alkaline soil [J]. Plant and Soil, 2015,392(1/2):215-226.

[17] Liu Y, Li P, Xu G C, et al. Growth, morphological, and physiological responses to drought stress in *Bothriochloa ischaemum* [J]. Frontiers in Plant Science, 2017,8:230-243.

[18] He J, Jin Y, Du Y L, et al. Genotypic variation in yield, yield components, root morphology and architecture, in soybean in relation to water and phosphorus supply[J]. Frontiers in Plant Science, 2017,8(5):1499-1509.

[19] Abid M, Tian Z W, Ata-u-l-karim S T, et al. Adaption to and recovery from drought stress at vegetative stages in wheat (*Triticum aestivum*) cultivars[J]. Functional Plant Biology, 2016,43(12):1159-1169.

[20] Xu B, Gao Z, Wang J, et al. Morphological changes in roots of *Bothriochloa ischaemum* intercropped with *Lespedeza davurica* following phosphorus application and water stress[J]. Plant Biosystems, 2015,149(2):298-306.

[21] Liu C G, Wang Y J, Pan K W, et al. Effects of phosphorus application on photosynthetic carbon and nitrogen metabolism, water use efficiency and growth of dwarf bamboo (*Fargesia rufa*) subjected to water deficit[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2015,96:20-28.

[22] Yang X, Tang Z Y, Ji C J, et al. Scaling of nitrogen and phosphorus across plant organs in shrub land biomes across Northern China[J]. Science Reports, 2014,4:5448-5455.

[23] 汤宏,曾掌权,李向阳,等.水磷耦合烤烟养分吸收分配规律研究[J].水土保持学报,2019,33(2):294-302.

[24] Hong J T, Wang X D, Wu J B. Effects of soil fertility on the N : P stoichiometry of herbaceous plants on a nutrient-limited alpine steppe on the northern Tibetan Plateau[J]. Plant and Soil, 2015,391(1/2):179-194.