

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.24108

## 稻秸还田配施氮肥对紫云英生长及土壤肥力的影响

高原<sup>1,2</sup>, 卜容燕<sup>2</sup>, 韩上<sup>2</sup>, 程文龙<sup>2</sup>, 唐杉<sup>2</sup>,  
朱睿<sup>2</sup>, 李敏<sup>2</sup>, 王慧<sup>2</sup>, 朱林<sup>1\*</sup>, 武际<sup>2\*</sup>

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 安徽省农业科学院土壤与肥料研究所 / 养分循环与耕地保育安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 为优化稻田紫云英高产栽培和解决稻秸资源化利用难题, 研究了稻秸还田和氮肥配施对紫云英生长、养分吸收以及土壤肥力的影响, 以明确稻秸和化学氮肥适宜用量配比, 为稻田肥料运筹提供科学依据。设置稻秸和氮肥双因素试验, 稻秸还田 3 个处理, 分别为不还田、半量还田 (3000 kg·hm<sup>-2</sup>)、高量还田 (6000 kg·hm<sup>-2</sup>); 氮肥用量 4 个处理, 为 0 kg·hm<sup>-2</sup> (N0)、45 kg·hm<sup>-2</sup> (N1)、90 kg·hm<sup>-2</sup> (N2)、135 kg·hm<sup>-2</sup> (N3)。测定了盛花期的紫云英鲜草产量及植株氮、磷、钾吸收量, 分析了土壤总有机质和活性有机质 (微生物量和颗粒态有机质) 中碳和氮的含量。结果表明, 稻秸还田和施用氮肥有利于提高紫云英的鲜草产量。无氮肥投入时, 高量稻秸还田紫云英鲜草产量降低 8.6%, 随着氮肥用量的增加, 稻秸还田处理紫云英鲜草产量增加幅度逐渐增加, 且在 N2 处理时, 高量稻秸还田处理增幅最大, 为 21.3%。在稻秸半量还田条件下, 紫云英鲜草产量随着氮肥用量增加而增加, 且在 N3 处理紫云英鲜草产量最大, 显著高于其他处理; 在稻秸高量还田条件下, N2、N3 处理的紫云英鲜草产量差异不显著。稻秸还田提高了紫云英地上部氮和钾积累量, 施用氮肥提高了紫云英地上部氮、磷和钾养分积累量。施用氮肥配施稻秸还田有利于提高土壤全氮、无机氮、微生物量氮和颗粒态氮的含量, 在 N2 处理下, 稻秸高量还田处理土壤全氮、无机氮、微生物量氮和颗粒态氮的含量显著高于 N1 和 N0 处理, 与 N3 处理差异不显著。方差分析表明, 稻秸还田和施用氮肥对紫云英鲜草产量、地上部氮和钾积累量及土壤微生物量碳和颗粒态碳的含量具有显著的交互作用 ( $P < 0.05$ )。综上所述, 在本试验条件下, 稻秸还田量为 6000 kg·hm<sup>-2</sup>、氮肥用量为 90 kg·hm<sup>-2</sup> 是较适合的配比, 不仅有利于提高紫云英鲜草产量和养分吸收量, 也能有效培肥土壤。

**关键词:** 豆科绿肥; 稻秸; 碳氮互济; 鲜草产量

紫云英 (*Astragalus sinicus* L.) 是豆科黄芪属的越年生植物, 也是稻田重要的冬季豆科绿肥, 富含氮、磷和钾等营养元素<sup>[1]</sup>。利用冬闲田种植紫云英不仅能够提升地力<sup>[2]</sup>、减施化肥<sup>[3]</sup>、增加水稻产量和经济效益<sup>[4-5]</sup>, 还可以提供绿色覆盖、减少面源污染、保护生态环境等作用。将紫云英纳入稻田种植系统是实现农业节本增效、绿色发展的有效途径<sup>[6]</sup>。

在紫云英-水稻轮作系统中, 紫云英的高产种植是充分发挥其肥田的关键所在<sup>[7]</sup>。越来越多

的研究指出在紫云英种植过程中, 合理地进行外源养分投入是增加其养分含量和鲜草产量的重要措施<sup>[8-9]</sup>, 其中肥料种类是重要的影响因素。苏伟等<sup>[10]</sup>研究发现, 化学氮肥通过改善紫云英的分枝数量、养分含量和株高等生长指标提高其鲜草产量。Yang 等<sup>[11]</sup>的研究指出, 有机物料可以通过改善土壤微生物活性提高养分供应能力, 达到促进紫云英的生长效果。周国朋等<sup>[12]</sup>研究表明, 稻秸与紫云英联合还田有利于提高紫云英的鲜草产量和养分积累量, 其中稻秸留高茬效果更佳。因此, 紫云英等绿肥种植要打破不施肥料的传统思想, 通过施用少量的肥料促进其生长, 积累更多的养分, 可以实现“以小肥换大肥”的战略目标<sup>[13]</sup>。

水稻收获后残留的大量稻秸含有丰富的养分, 科学地原位还田后可改善土壤孔隙结构, 增加土壤有机碳含量, 促进作物根系发育<sup>[14-15]</sup>。近年来

收稿日期: 2024-03-02; 录用日期: 2024-05-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFD1700200); 国家绿肥产业技术体系 (CARS-22)。

作者简介: 高原 (1998-), 硕士研究生, 研究方向为资源利用与植物保护。E-mail: gaoyuan0637@163.com。

通讯作者: 朱林, E-mail: zhulin@ahau.edu.cn; 武际, E-mail: wujiahtfs@126.com。

有研究发现稻秸配施氮肥有利于提高豆科绿肥的生物量和养分含量<sup>[11]</sup>。但是也有研究表明,大量的稻秸一次性还田易造成土壤泡沫化,不利于作物根系下扎,并且产生毒害物质,不利于作物生长<sup>[16]</sup>。产生不同的结果主要是和稻秸还田数量有关。稻秸碳氮比高,含有丰富的半纤维素和木质素等难以分解的物质,增加氮肥投入可以调节碳氮比,促进稻秸腐解<sup>[17]</sup>。尽管稻秸配施氮肥有利于提高豆科绿肥的生物量和养分含量,但是要进行合理的配置才能充分地发挥肥效,促进紫云英的生长,创造更大的经济效益和生态效益<sup>[18]</sup>。因此,本研究以紫云英为研究对象,探讨稻秸与氮肥的不同配施比例对紫云英的鲜草产量、养分积累量及土壤肥力的影响,为优化稻田紫云英高产栽培技术,同时为解决稻秸难以科学利用的技术难题提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

试验在安徽省农业科学院试验基地进行。盆钵试验的供试土壤为水稻土,采自安徽省六安市,土壤基本化学性质:有机碳  $17.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮  $1.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷  $19.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $138.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,pH 5.6。

### 1.2 试验设计

试验设置稻秸和氮肥用量两个因素,稻秸投入量设置3个处理,分别为不还田(S0)、半量还田( $3000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,S1)、高量还田( $6000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,S2),氮肥用量设置4个处理,分别为  $0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N0)、 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N1)、 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N2)、 $135 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N3),每个处理3次重复,共12个处理。试验每盆装风干土  $10 \text{ kg}$ ,所有的处理基肥施相同量的磷肥和钾肥,施用量为  $\text{P}_2\text{O}_5$   $0.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$   $0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同处理具体添加量及碳氮比如表1所示。

试验中所用的氮肥、磷肥、钾肥品种分别为尿素(N 46%)、过磷酸钙( $\text{P}_2\text{O}_5$  12%)和氯化钾( $\text{K}_2\text{O}$  60%)。在稻秸还田处理中,首先将稻秸剪碎至  $2 \sim 4 \text{ cm}$ ,在紫云英播种前一天与肥料一起拌入土壤(10月15日)。紫云英播种量为  $30 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,按盆钵面积换算与田间保持一致。紫云英生长期间,按称重法保持土壤含水量为田间最大有效持水量的60%。紫云英栽培以及病、虫、害及杂草的防治与治理同当地农田生产实践保持一致。

表1 各处理外源碳、氮投入量 ( $\text{g} \cdot \text{盆}^{-1}$ )

处理	稻秸碳	稻秸氮	肥料氮
S0	N0	0	0
	N1	0	0.16
	N2	0	0.32
	N3	0	0.48
S1	N0	4.27	0.07
	N1	4.27	0.07
	N2	4.27	0.07
	N3	4.27	0.07
S2	N0	8.53	0.15
	N1	8.53	0.15
	N2	8.53	0.15
	N3	8.53	0.15

### 1.3 样品测定项目及方法

在紫云英盛花期(次年4月14日),贴地表刈割,称重记录紫云英鲜草重,随后充分混合后选择部分样品,带回实验室进行植株含水量和氮、磷、钾养分测定<sup>[19]</sup>。

地上部植株采集后,挑出土壤中的根系,然后将整盆土混匀,采集紫云英收获后土壤,一部分的土样室内自然风干后过筛,用于全氮(TN)、有机碳(SOC)、颗粒态有机碳(POMC)和颗粒态有机氮(POMN)的测定,另一部分土样在  $4^\circ\text{C}$  冰箱里保存,用于土壤微生物量碳(MBC)、微生物量氮(MBN)、铵态氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )和硝态氮( $\text{NO}_3^--\text{N}$ )的测定。测试方法:新鲜的土壤过  $2\text{mm}$  筛后采用  $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$  氯化钾浸提,过滤后采用靛酚蓝比色法测定  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ <sup>[19]</sup>,采用酚二磺酸比色法测定  $\text{NO}_3^--\text{N}$ <sup>[19]</sup>;TN采用浓  $\text{H}_2\text{SO}_4$  消化-凯氏定氮法测定<sup>[19]</sup>;SOC采用重铬酸钾外加热法测定<sup>[19]</sup>;土壤MBC和MBN的含量采用氯仿熏蒸-硫酸钾浸提,过滤后采用TOC分析仪测定MBC和MBN的含量<sup>[20]</sup>;POMC和POMN采用超声波破碎的方法分离出土壤中颗粒有机物,然后测定其中碳和氮的含量<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据分析

试验数据采用Excel 2013和SPSS 19.0进行整理和统计分析,并采用最小显著差数法进行差异显著性检验( $P < 0.05$ ),用Origin 2019作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 稻秸与氮肥配施对紫云英鲜草产量的影响

由图 1 可知, 与对照 (N0S0) 处理相比, 稻秸和氮肥配施还田有利于提高紫云英的鲜草产量。与 N0 处理相比, N1、N2、N3 处理紫云英鲜草产量分别增加了 20.7%、52.4%、74.2%, 施用氮肥增产效果显著 ( $P<0.05$ )。在没有氮肥投入情况下, 与 S0 处理相比, S1 处理鲜草产量增加 5.7%, 但是 S2 处理鲜草产量降低 8.6%。施用氮肥后, 紫云英鲜草产量随稻秸投入量的增加而增加。在相同施氮量下, 与 S0 处理相比, N2S2 处理增幅最大, 达到 21.3%; 其次是 N1S2 处理, 增幅为 10.2%。在 N3 施肥处理下, 稻秸不同还田量处理间差异不显著。方差分析结果表明在稻秸高量还田情况下, N2 与 N3 处理间紫云英鲜草产量差异不显著。双因素方差分析结果表明, 稻秸还田与氮肥用量均对紫云英鲜草产量产生显著影响 ( $P<0.05$ ), 且具有显著的交互作用 ( $P<0.05$ )。见表 2。

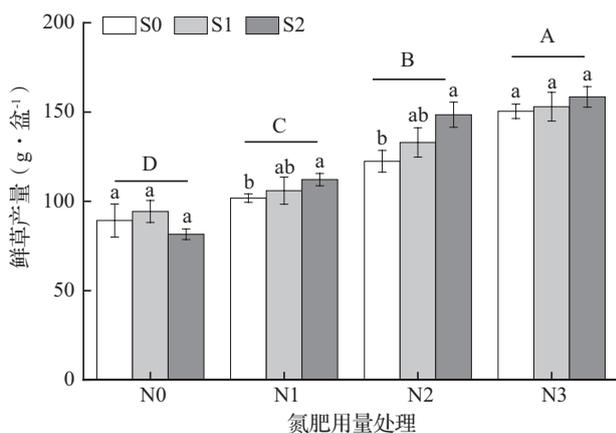


图 1 不同处理下紫云英鲜草产量

注: 柱上不同小写字母表示同等氮肥施用量下不同稻秸处理间差异性显著 ( $P<0.05$ ), 不同大写字母表示不同氮肥处理间 (每组平均值) 差异性显著 ( $P<0.05$ ), 下同。

表 2 稻秸与氮肥配施对不同处理下紫云英鲜草产量方差分析

处理	鲜草产量
S	<0.001***
N	0.005**
S×N	0.004**

注: \*、\*\*、\*\*\* 分别为 0.05、0.01、0.001 水平上的显著性差异。下同。

### 2.2 稻秸与氮肥配施对紫云英地上部养分积累量的影响

由图 2 结果可知, 紫云英的养分积累量与鲜草产量变化规律相同, 稻秸与氮肥配施有利于提高紫云英地上部氮、磷和钾养分的积累量。与 N0 处理相比, N1、N2 和 N3 处理下紫云英地上部氮积累量分别增加了 54.1%、96.8% 和 123.7%; 磷积累量分别增加了 25.9%、43.0% 和 56.2%; 钾积累量分别增加了 7.6%、32.5% 和 43.7%, 均随着氮肥用量的增加表现为增加趋势。在没有氮肥投入情况下, 与 S0 处理相比, S1 处理氮、磷和钾养分积累量分别增加了 5.7%、2.6% 和 48.2%; S2 处理氮和磷养分积累量分别降低了 0.3% 和 1.7%, 而钾养分积累量增加了 72.7%。在相同施氮条件下, 与 S0 处理相比, S1 和 S2 处理平均氮积累量分别增加了 6.3% 和 8.2%; 平均磷积累量分别增加了 2.2% 和 3.1%; 平均钾积累量分别增加了 42.8% 和 64.3%。在相同的氮肥处理下, 稻秸还田量显著影响紫云英氮和钾养分积累量 ( $P<0.05$ ), 但是对磷养分积累量的影响不显著。总的来说, 稻秸还田显著影响了紫云英地上部氮和钾养分积累量 ( $P<0.05$ ), 但是对磷养分积累量影响不显著; 施用氮肥显著增加了紫云英地上部氮、磷和钾积累量 ( $P<0.05$ )。双因素方差分析表明, 稻秸和氮肥配施对紫云英地上部氮和钾积累量具有显著的交互作用 ( $P<0.05$ )。见表 3。

### 2.3 稻秸与氮肥配施对土壤性质的影响

#### 2.3.1 土壤有机碳、全氮、无机氮含量

由表 4 可知, 随着稻秸和氮肥用量的增加, 土壤 SOC 含量表现为增加的趋势。其中 N3S2 处理土壤 SOC 含量最高, 为  $17.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。与 N0 处理相比, N1、N2、N3 处理下土壤 SOC 含量分别平均增加了 0.1%、0.2%、0.8%, 与 S0 处理相比, S1 和 S2 处理下土壤 SOC 含量分别平均增加了 6.2% 和 8.1%。与土壤 SOC 含量变化趋势不同, 氮肥施用显著影响土壤 TN 含量。与 N0 处理相比, N1、N2 和 N3 处理土壤 TN 含量分别平均增加了 4.0%、9.9% 和 15.6%; 与 S0 处理相比, S1 和 S2 处理下土壤 TN 含量分别平均增加了 0.9% 和 1.9%。在相同施氮水平下, 稻秸还田在一定程度上增加土壤 TN 含量, 其中在 N2 水平下稻秸高量还田增幅最大, 为 3.1%。与 TN 变化趋势相同, 土壤  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  的含量均随着氮肥用量的增加表现为增加趋势。其中  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  的含量增加幅度大于  $\text{NO}_3^--\text{N}$

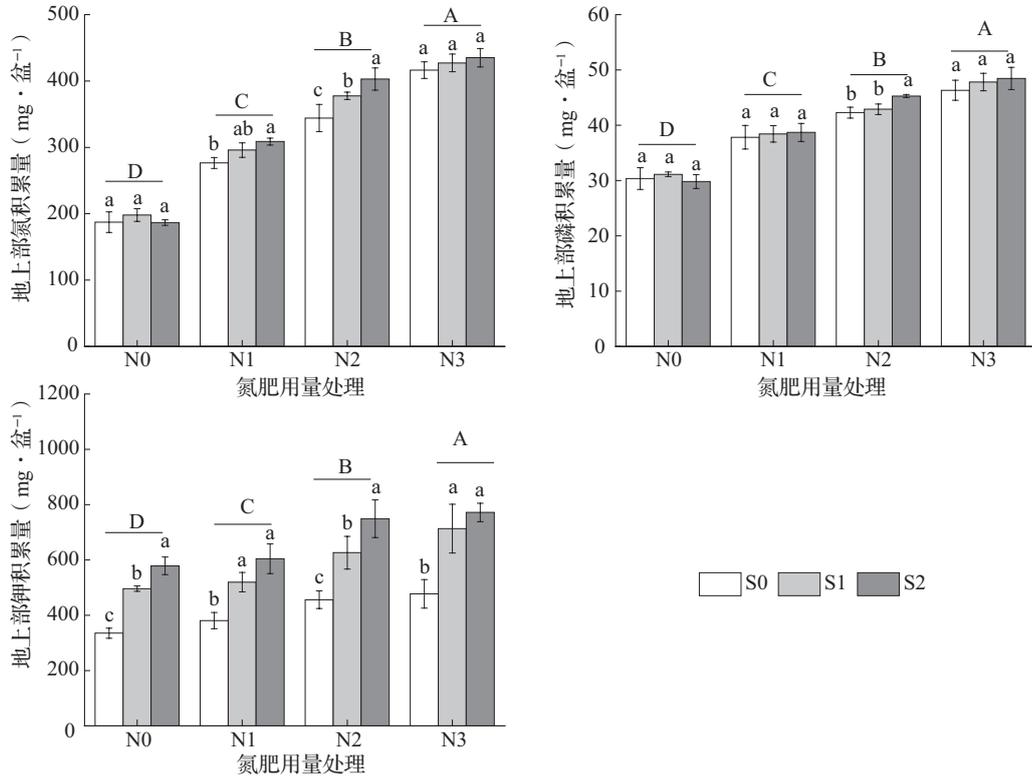


图2 不同处理下紫云英地上部氮、磷和钾养分积累量

表3 稻秸与氮肥配施对紫云英地上部氮、磷和钾养分积累量方差分析

处理	氮积累量	磷积累量	钾积累量
S	<0.001***	<0.001***	<0.001***
N	<0.001***	0.143	<0.001***
S×N	0.019*	0.518	0.047*

表4 不同处理对土壤养分含量的影响

处理	有机碳 (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮 (g·kg <sup>-1</sup> )	铵态氮 (mg·kg <sup>-1</sup> )	硝态氮 (mg·kg <sup>-1</sup> )	无机氮 (mg·kg <sup>-1</sup> )	
N0	S0	16.57 ± 0.61a	1.15 ± 0.01a	1.88 ± 0.27a	1.34 ± 0.20b	3.23 ± 0.19a
	S1	17.23 ± 0.79a	1.16 ± 0.01a	1.84 ± 0.02a	1.54 ± 0.17a	3.39 ± 0.17a
	S2	17.47 ± 0.98a	1.17 ± 0.02a	1.78 ± 0.03a	1.31 ± 0.11b	3.08 ± 0.11a
	平均	17.09 ± 0.79A	1.16 ± 0.02C	1.83 ± 0.11C	1.40 ± 0.16B	3.23 ± 0.16D
N1	S0	16.52 ± 0.28a	1.20 ± 0.01a	2.04 ± 0.14b	1.41 ± 0.06a	3.44 ± 0.12b
	S1	17.22 ± 0.89a	1.21 ± 0.02a	2.19 ± 0.09b	1.45 ± 0.06a	3.64 ± 0.12ab
	S2	17.56 ± 1.22a	1.22 ± 0.03a	2.41 ± 0.08a	1.46 ± 0.17a	3.87 ± 0.18a
	平均	17.10 ± 0.79A	1.21 ± 0.02C	2.21 ± 0.10B	1.44 ± 0.10B	3.65 ± 0.14C
N2	S0	16.22 ± 0.68b	1.26 ± 0.01a	3.00 ± 0.25b	1.47 ± 0.01a	4.47 ± 0.25b
	S1	17.34 ± 0.71ab	1.27 ± 0.02a	3.18 ± 0.08b	1.47 ± 0.06a	4.66 ± 0.11ab
	S2	17.80 ± 0.55a	1.30 ± 0.02a	3.44 ± 0.34a	1.53 ± 0.11a	4.97 ± 0.24a
	平均	17.12 ± 0.65A	1.28 ± 0.02B	3.21 ± 0.22A	1.49 ± 0.06B	4.70 ± 0.20B
N3	S0	16.22 ± 0.67b	1.34 ± 0.02a	3.29 ± 0.24a	1.87 ± 0.16a	5.16 ± 0.24a
	S1	17.61 ± 0.81ab	1.35 ± 0.02a	3.40 ± 0.29a	1.87 ± 0.06a	5.27 ± 0.24a
	S2	17.83 ± 0.70a	1.35 ± 0.01a	3.39 ± 0.08a	1.93 ± 0.07a	5.32 ± 0.08a
	平均	17.22 ± 0.73A	1.35 ± 0.02A	3.36 ± 0.20A	1.89 ± 0.10A	5.25 ± 0.19A
双因素方差分析						
S	0.540	0.124	0.056	0.438	0.013*	
N	0.969	<0.001***	<0.001***	<0.001***	<0.001***	
S×N	0.978	0.083	0.281	0.364	0.05*	

注：同列数据后不同小写字母表示稻秸处理间差异显著 (n=3, P<0.05)，不同大写字母表示每组平均值在氮肥处理间差异显著 (n=12, P<0.05)。

的含量。虽然稻秸用量对土壤  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  的含量影响不显著,但是显著影响土壤无机氮的含量 ( $P<0.05$ )。在所有处理中, N3S0、N3S1 和 N3S2 处理土壤无机氮含量差异不显著,但其平均值显著高于其他氮用量处理 ( $P<0.05$ )。双因素方差分析表明, 稻秸和氮肥用量对土壤无机氮含量具有显著交互作用 ( $P<0.05$ )。

### 2.3.2 土壤颗粒态有机碳、颗粒态有机氮的含量

由表 5 可知, 土壤 POMC 含量占 SOC 含量的 18.2% ~ 23.9%。施用氮肥有利于增加土壤 POMC 含量, 与 N0 处理相比, N1、N2 和 N3 处理土壤 POMC 含量分别平均增加了 5.0%、5.4% 和 5.1%; 与 S0 处理相比, S1、S2 处理土壤 POMC 含量分别平均增加了 24.0%、32.3%。双因素方差分析表明, 稻秸和氮肥用量对土壤 POMC 含量具有显著交互作用 ( $P<0.05$ ), 主要表现在随着氮肥与稻秸用量增加, 土壤 POMC 含量的增幅显著增加 ( $P<0.05$ )。

表 5 不同处理对土壤颗粒态有机碳、颗粒态有机氮含量的影响 ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

处理	颗粒态有机碳	颗粒态有机氮	
N0	S0	3.15 ± 0.05a	0.21 ± 0.01a
	S1	3.64 ± 0.19a	0.23 ± 0.02a
	S2	3.84 ± 0.04a	0.23 ± 0.02a
	平均	3.54 ± 0.09A	0.22 ± 0.02D
N1	S0	3.23 ± 0.13b	0.26 ± 0.01b
	S1	3.85 ± 0.14ab	0.28 ± 0.01a
	S2	4.08 ± 0.06a	0.30 ± 0.01a
	平均	3.72 ± 0.11A	0.28 ± 0.01C
N2	S0	3.06 ± 0.09b	0.29 ± 0.02b
	S1	3.92 ± 0.12ab	0.33 ± 0.02a
	S2	4.23 ± 0.07a	0.35 ± 0.02a
	平均	3.74 ± 0.09A	0.32 ± 0.02B
N3	S0	2.96 ± 0.15c	0.35 ± 0.02a
	S1	3.96 ± 0.12b	0.38 ± 0.03a
	S2	4.26 ± 0.05a	0.39 ± 0.02a
	平均	3.70 ± 0.11A	0.37 ± 0.02A
双因素方差分析			
S	<0.001***	<0.001***	
N	<0.001***	<0.001***	
S × N	0.048*	0.280	

土壤 POMN 含量占 TN 含量的 18.5% ~ 28.7%。施用氮肥有利于增加土壤 POMN 含量, 与 N0 处理相比, N1、N2 和 N3 处理土壤 POMN 含量分别平均增加了 24.4%、44.7% 和 66.5%; 与 S0 处理相比,

S1 和 S2 处理下土壤 POMN 含量分别平均增加了 10.3% 和 14.7%。在本试验条件下, N3S0、N3S1、N3S2 处理土壤 POMN 含量差异不显著, 但其平均值显著高于其他处理 ( $P<0.05$ )。

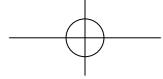
### 2.3.3 土壤微生物量碳、微生物量氮的含量

由表 6 可知, 土壤 MBC 含量占 SOC 含量的 4.0% ~ 5.5%, 施氮肥有利于增加土壤 MBC 含量, 与 N0 处理相比, N1、N2 和 N3 处理土壤 MBC 含量分别平均增加了 5.3%、14.6% 和 21.0%; 与 S0 处理相比, 增施稻秸, 土壤 MBC 含量分别平均增加了 22.4% 和 28.1%。双因素方差分析表明, 稻秸和氮肥用量对土壤 MBC 含量具有显著交互作用 ( $P<0.05$ ), 主要表现在随着氮肥用量增加, 增施稻秸对提高土壤 MBC 含量的增幅显著增加 ( $P<0.05$ )。

表 6 不同处理对土壤微生物量碳、微生物量氮含量的影响 ( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

处理	微生物量碳	微生物量氮	
N0	S0	659 ± 53a	37.33 ± 1.79b
	S1	755 ± 50a	46.47 ± 3.55a
	S2	764 ± 33a	43.34 ± 3.15a
	平均	726 ± 45A	42.38 ± 2.83D
N1	S0	674 ± 64b	45.73 ± 1.55b
	S1	794 ± 33a	48.73 ± 2.78ab
	S2	826 ± 40a	51.59 ± 0.96a
平均	765 ± 46A	48.68 ± 1.76C	
N2	S0	697 ± 28b	52.55 ± 2.20b
	S1	867 ± 45a	57.55 ± 0.90a
	S2	934 ± 49a	58.74 ± 1.98a
平均	833 ± 41A	56.28 ± 1.69B	
N3	S0	711 ± 43b	63.04 ± 3.97a
	S1	939 ± 42a	63.03 ± 2.88a
	S2	986 ± 54a	63.86 ± 2.08a
平均	879 ± 46A	63.31 ± 2.98A	
双因素方差分析			
S	0.036*	<0.001***	
N	<0.01**	<0.001***	
S × N	0.01**	0.074	

土壤 MBN 含量占土壤 TN 含量的 3.2% ~ 4.7%, 与 N0 处理相比, N1、N2 和 N3 处理土壤 MBN 含量分别平均增加了 14.9%、32.8% 和 49.4%; 与 S0 处理相比, 增施稻秸, 土壤 MBN 含量分别平均增加了 8.6% 和 9.5%。



### 3 讨论

#### 3.1 稻秸和氮肥配施对紫云英生物量和养分吸收的影响

合理的养分投入可以促进作物生长,提高生物量和养分积累量<sup>[18, 22-23]</sup>。前人研究表明,有机物料与氮肥配施能有效提高紫云英的鲜草产量<sup>[11]</sup>,这与本研究结果一致。在本试验条件下,在不施氮情况下,稻秸半量还田( $3000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )对紫云英的鲜草产量以及养分积累量有一定的促进作用,但是稻秸高量还田( $6000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )时会产生一定的抑制作用<sup>[24-25]</sup>。在施用氮肥后,随着氮肥投入的增加,紫云英的鲜草产量显著增加,且配施稻秸增产幅度大于化学氮肥单独施用,这可能与稻秸碳氮比较高有关。稻秸大量还田后易在短期内引起土壤有效氮含量快速下降,进而影响紫云英对氮素的吸收与利用<sup>[26-27]</sup>。Pramanik 等<sup>[28]</sup>研究认为稻秸与紫云英联合还田增加了土壤有机质的矿化速率,从而促进了氮养分的释放。麦逸辰等<sup>[29]</sup>通过外源氮调节稻秸碳氮比有利于促进稻秸腐解,不仅减少大量稻秸一次还田后造成的毒害,还有利于释放养分供作物吸收利用。王飞等<sup>[30]</sup>研究认为,增加有机物料还田可提高肥力,有利于作物根系生长和养分吸收,从而提高其生物量和养分吸收量。这也说明在紫云英生长过程中,通过调控稻秸还田比例和化学氮肥投入量可以促进紫云英的生长。因此通过外源氮投入调节稻秸碳氮比有利于促进其腐解和养分释放,为紫云英的生长提供适宜条件,从而保证作物的氮素供应<sup>[31]</sup>。不可忽视的是,化学氮肥作为一种可以快速释放养分的速效肥料,在促进作物生长中具有极显著的作用,因此在本研究中,当氮肥用量为 N3 水平时,稻秸还田增加效果已经不明显,但是在氮肥用量为 N2 水平、稻秸还田量为 S2 水平时,紫云英氮、磷和钾养分吸收量与 N3 水平下差异不显著。这说明在施氮量为 N2 水平时,稻秸高量还田可以充分地利用稻秸资源,并且替代约  $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  的化学氮肥。因此,合理的氮肥调控不仅可以促进稻秸资源的利用,还可以实现紫云英高产栽培的重要措施<sup>[26]</sup>。

#### 3.2 稻秸和氮肥配施对土壤有机碳和氮组分的影响

有机无机配施对紫云英鲜草产量影响的因素有很多。一方面可能与化学氮肥调控稻秸腐解并促进

稻秸中的养分释放有关,另一方面也与土壤肥力提升密切相关<sup>[32]</sup>。国内外相关研究表明,长期单施化肥会导致土壤质量的下降<sup>[33-34]</sup>。在我国南方稻田,长期单施化肥、缺乏有机投入情况下,随着水稻产量的不断提升,土壤有机质养分归还效率较低,导致土壤养分库被过度消耗,造成土壤板结、氮的有效性下降、物理性状退化等<sup>[35]</sup>。现有研究表明,为了克服单施化肥导致的问题,有机物料的投入是提高土壤肥力和作物生产力的重要路径之一<sup>[36]</sup>。

土壤肥力指标是一个综合性指标,其中 SOC 的数量和质量是土壤肥力重要的评价指标之一<sup>[37]</sup>。在本试验条件下,稻秸和氮肥配施对 SOC 含量影响不显著,但是显著影响土壤微生物量和颗粒态有机质。土壤有机质的分解和养分循环是以微生物为媒介进行的,虽然土壤 MBC 含量占 SOC 含量的比例较低,但是其含量的多少反映着土壤肥力的高低<sup>[38]</sup>。因此 MBC 含量直接影响土壤有机质的矿化能力。在本试验条件下,氮肥施用后土壤 MBC 含量增幅最高可达 21.0%;增施稻秸土壤 MBC 含量增幅可达 28.1%。MBC 的变化幅度明显高于土壤总有机质,这说明土壤 MBC 对于外界环境的感应更加灵敏。这与 Bu 等<sup>[39]</sup>的结果一致,Bu 等研究结果表明 MBC 和 MBN 的含量变化与土壤氮素供应密切相关。除了 MBC 是土壤肥力变化的重要指标以外,在有机物还田情况下,土壤 POMC 的贡献不可忽视。土壤颗粒态有机质是指土壤中重要的活性有机质组分,主要来源于部分动物植物残体的分解,因此有机物投入后对颗粒态有机质的影响较大<sup>[40]</sup>。究其原因可能是稻秸与氮肥配施后,通过外源氮投入调节稻秸碳氮比,有利于促进其腐解和养分释放。因此在本试验条件下,施氮后土壤 POMC 含量增幅为 5.0% ~ 5.4%,稻秸还田后增幅为 24.0% ~ 32.3%。这说明氮肥投入对土壤 MBC 的影响较大<sup>[41]</sup>,且稻秸还田对于 MBC 和 POMC 影响均显著,稻秸和氮肥用量对土壤 POMC 含量具有显著交互作用<sup>[42]</sup>。这也证实了合理的稻秸和氮肥配比有利于促进有机物料的腐解和养分释放。

土壤活性有机氮组分被用作土壤氮素供应能力的评价指标及对农艺措施的响应指示指标<sup>[43]</sup>。因此探讨土壤活性有机氮组分,如 MBN 能灵敏地反映土壤的质量与生产能力的变化,还能较好地

评估因农艺措施改变而引起的氮素矿化产生的变化<sup>[44]</sup>。POMN被认为是处于活性和慢性氮组分之间的中间体物质,会随着管理措施的变动而做出快速的响应<sup>[45]</sup>。宋震震等<sup>[46]</sup>研究表明长期施用有机肥显著提高了黄淮海潮土土壤TN、MBN、可溶性有机氮和POMN含量,且土壤TN及其活性氮组分随着化肥或有机肥的施用其含量也随之增加。施肥措施不同,对土壤有机氮组分含量影响以及肥料在有机氮组分中的分配也不同。本研究中,MBN和POMN的趋势表现一致,随着稻秸还田量增加而增加<sup>[47]</sup>。有机氮积累过程中,稻秸主要进入土壤颗粒态氮库,而化肥可提高土壤MBN在土壤氮库中的百分比<sup>[48]</sup>。综上所述,不同用量的稻秸和氮肥配施,通过调节投入有机物料的碳氮比调控稻秸腐解速率和养分释放,可影响土壤碳和氮的分组,从而影响土壤养分供应及紫云英生长。

#### 4 结论

稻秸和氮肥合理配施能有效提高紫云英鲜草产量和地上部氮、磷和钾养分积累量,且相对于单独稻秸还田和单独氮肥施用,两者配施对增产效果影响更为显著。稻秸和氮肥合理配施显著增加土壤TN、无机氮、POMC、POMN、MBC和MBN的含量,对土壤总有机质影响不显著。且稻秸和氮肥合理配施对无机氮、POMN、POMC和MBC交互作用显著。总的来说,在本试验条件下,推荐稻草用量为 $6000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、氮肥用量为 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 是为较合适的施肥配比。

#### 参考文献:

- [1] 卜容燕, 韩上, 李敏, 等. 安徽单季稻区紫云英翻压的氮肥替代效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1219-1227.
- [2] Bu R, Cheng W, Han S, et al. Continuous co-incorporation of Chinese milk vetch and rice straw with reduced chemical fertilizer maintains rice yield as a consequence of increased carbon and nitrogen storage in soil aggregates [J]. Journal Soil Science and Plant Nutrition, 2023, 23: 3361-3372.
- [3] 杨骏, 卜容燕, 韩上, 等. 安徽单季稻田绿肥优化配置与稻季氮肥减施效果研究[J]. 安徽农业大学学报, 2023, 50(6): 1030-1035.
- [4] 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: 469-474.
- [5] 卜容燕, 韩上, 唐杉, 等. 稻田种植利用紫云英的经济和生态效益分析[J]. 安徽农业大学学报, 2020, 47(6): 1007-1011.
- [6] 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.
- [7] 刘英, 王允青, 张祥明, 等. 种植紫云英对土壤肥力和水稻产量的影响[J]. 安徽农学通报, 2007, 13(1): 98-99.
- [8] 朱德雄, 刘威, 刘学军, 等. 紫云英氮磷钾肥最佳施用量研究[J]. 河北农业科学, 2010, 14(2): 39-42.
- [9] 赵决建. 外源硒对紫云英硒含量和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 334-336.
- [10] 苏伟, 鲁剑巍, 刘威, 等. 氮磷钾肥用量对紫云英产量效应的研究[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(6): 1094-1098.
- [11] Yang L, Zhou X, Liao Y, et al. Co-incorporation of rice straw and green manure benefits rice yield and nutrient uptake [J]. Crop Science, 2019, 59(2): 749-759.
- [12] 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.
- [13] 焦彬. 中国绿肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [14] 杨竣皓, 骆永丽, 陈金, 等. 秸秆还田对我国主要粮食作物产量效应的整合(Meta)分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(21): 4415-4429.
- [15] Singh G, Jalota S K, Singh Y, et al. Manuring and residue management effects on physical properties of a soil under the rice-wheat system in Punjab, India [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(1): 229-238.
- [16] 田平, 姜英, 孙悦, 等. 不同还田方式对玉米秸秆腐解及土壤养分含量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 100-108.
- [17] Schwendener C M, Lehmann J, de Camargo P B, et al. Nitrogen transfer between high- and low-quality leaves on a nutrient-poor soil determined by <sup>15</sup>N enrichment [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(4): 787-794.
- [18] 叶静, 邹平, 张贤, 等. 不同施肥方式对红壤生地紫云英产量及养分累积的影响[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(11): 2121-2123.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S, et al. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. Soil Biology & Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [21] Mendham D S, Heagney E C, Corbeels M, et al. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus* [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004, 36: 1067-1074.
- [22] 杨园园, 高志岭, 王雪君, 等. 有机、无机氮肥施用对苜蓿产量、土壤硝态氮和温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 822-828.

- [23] 宋秀丽, 王冰雪, 陆杰, 等. 化肥与秸秆配施对大豆生长及产量的影响 [J]. 黑龙江农业科学, 2015 (7): 35-39.
- [24] Yang L, Zhang L, Yu C, et al. Nitrogen fertilizer and straw applications affect uptake of  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ -glycine by soil microorganisms in wheat growth stages [J]. Plos One, 2017, 12 (1): e0169016.
- [25] Kumar K, Goh K M. Management practices of antecedent leguminous and non-leguminous crop residues in relation to winterwheat yields, nitrogen uptake, soil nitrogen mineralization and simple nitrogen balance [J]. European Journal of Agronomy, 2002, 16 (4): 295-308.
- [26] Ntanos D A, Koutroubas S D. Dry matter and N accumulation and translocation for Indica and japonica rice under Mediterranean conditions [J]. Field Crops Research, 2002, 74 (1): 93-101.
- [27] Conde E, Cardenas M, Ponce-Mendoza A, et al. The impacts of inorganic nitrogen application on mineralization of  $^{14}\text{C}$ -labelled maize and glucose, and on priming effect in saline alkaline soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37 (4): 681-691.
- [28] Pramanik P, Haque M M, Kim S Y, et al. C and N accumulations in soil aggregates determine nitrous oxide emissions from cover crop treated rice paddy soils during fallow season [J]. Science of the Total Environment, 2014, 490: 622-628.
- [29] 麦逸辰, 卜容燕, 韩上, 等. 添加不同外源氮对水稻秸秆腐解和养分释放的影响 [J]. 农业工程学报, 2021, 37 (22): 210-219.
- [30] 王飞, 王利民, 何春梅, 等. 紫云英与有机物料连续还田在黄泥田水稻稳产提质增产中的作用 [J]. 土壤, 2022, 54 (3): 455-463.
- [31] 吴立鹏, 张士荣, 娄金华, 等. 秸秆还田与优化施氮对稻田土壤碳氮含量及产量的影响 [J]. 华北农学报, 2019, 34 (4): 158-166.
- [32] 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.
- [33] Roelcke M, Yong H, Schleaf H, et al. Recent trends and recommendations for nitrogen fertilization in intensive agriculture in eastern China [J]. Pedosphere, 2004, 14 (4): 449-460.
- [34] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (2): 259-273.
- [35] 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.
- [36] Singh G, Jalota S K, Singh Y, et al. Manuring and residue management effects on physical properties of a soil under the rice-wheat system in Punjab, India [J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94 (1): 229-238.
- [37] Bu R, Han S, Cheng W, et al. Deciphering the role of particulate organic matter in soil nitrogen transformation in rice-rapeseed and rice-wheat rotation systems [J]. Applied Soil Ecology, 2024, 193: 105146.
- [38] 宋长青, 吴金水, 陆雅海, 等. 中国土壤微生物学研究 10 年回顾 [J]. 地球科学进展, 2013, 28 (10): 1087-1105.
- [39] Bu R, Lu J, Ren T, et al. Particulate organic matter affects soil nitrogen mineralization under two crop rotation systems [J]. Plos One, 2015, 10 (12): e0143835.
- [40] 韩晓日, 王玲莉, 杨劲峰, 等. 长期施肥对土壤颗粒有机碳和酶活性的影响 [J]. 土壤通报, 2008, 39 (2): 266-269.
- [41] 李世清, 李生秀. 有机物料和氮肥相互作用对微生物体氮的影响 [J]. 微生物学通报, 2000, 27 (3): 157-163.
- [42] 郭亚军, 邱慧珍, 张玉娇, 等. 不同施肥方式对马铃薯农田土壤有机碳组分和碳库管理指数的影响 [J]. 土壤通报, 2021, 52 (4): 912-919.
- [43] Mandal N, Dwivedi B S, Meena M C, et al. Effect of induced defoliation in pigeonpea, farmyard manure and sulphitation press mud on soil organic carbon fractions, mineral nitrogen and crop yields in a pigeonpea-wheat cropping system [J]. Field Crops Research, 2013, 154 (6): 178-187.
- [44] Balota E L, Colozzi F A, Andrade D S, et al. Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol [J]. Soil Tillage Research, 2004, 77 (2): 137-145.
- [45] 戚瑞敏, 温延臣, 赵秉强, 等. 长期不同施肥潮土活性有机氮库组分与酶活性对外源牛粪的响应 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25 (8): 1265-1276.
- [46] 宋震震, 李絮花, 李娟, 等. 有机肥和化肥长期施用对土壤活性有机氮组分及酶活性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20 (3): 525-533.
- [47] Yan D Z, Wang D J, Yang L Z, et al. Long-term effect of chemical fertilizer, straw, and manure on labile organic matter fractions in a paddy soil [J]. Biology and Fertility of Soils, 2007, 44: 93-101.
- [48] 韩晓日, 郑国砥, 刘晓燕, 等. 有机肥与化肥配合施用土壤微生物量氮动态、来源和供氮特征 [J]. 中国农业科学, 2007, 40 (4): 765-772.

### The effect of straw returning with nitrogen fertilizer on the growth of Chinese milk vetch and soil fertility

GAO Yuan<sup>1, 2</sup>, BU Rong-yan<sup>2</sup>, HAN Shang<sup>2</sup>, CHENG Wen-long<sup>2</sup>, TANG Shan<sup>2</sup>, ZHU Rui<sup>2</sup>, LI Min<sup>2</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>, ZHU Lin<sup>1\*</sup>, WU Ji<sup>2\*</sup> (1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei Anhui 230036; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Anhui Academy of Agricultural Sciences/Anhui Provincial Key Laboratory of Nutrient Cycling and Cultivated Land Conservation, Hefei Anhui 230031)

**Abstract:** To optimize the high-yield cultivation of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus*) in paddy fields and address the challenge of utilizing rice straw resources, a study was conducted to investigate the effects of rice straw returning and nitrogen

fertilizer application on the growth, nutrient uptake of Chinese milk vetch, and soil fertility. The objective was to determine the appropriate ratio of rice straw and chemical nitrogen fertilizer application to provide a scientific basis. A double-factor experiment was conducted with varying levels of rice straw dosage 0 (S0), 3000 kg · hm<sup>-2</sup> (half returned to field, S1), and 6000 kg · hm<sup>-2</sup> (full returned to field, S2) combined with different nitrogen fertilizer dosages 0 kg · hm<sup>-2</sup> (N0), 45 kg · hm<sup>-2</sup> (N1), 90 kg · hm<sup>-2</sup> (N2), and 135 kg · hm<sup>-2</sup> (N3). At the peak flowering stage of Chinese milk vetch, the yield of fresh grass, and nitrogen, phosphorus, potassium of plant were measured. The soil content of carbon, nitrogen in total organic matter and active organic matter including microbial biomass and granular organic matter in soil were analyzed. The results showed that the application of nitrogen fertilizer and rice straw incorporation was beneficial for increasing the fresh yield of Chinese milk vetch. Without nitrogen fertilizer input, the fresh yield of Chinese milk vetch decreased by 8.6% with high-rate rice straw incorporation. As the amount of nitrogen fertilizer increased, the increment in fresh yield of Chinese milk vetch with rice straw incorporation treatments gradually increased, with the largest increase of 21.3% observed in the N2 treatment with high-rate rice straw incorporation. Under the condition of half-rate rice straw incorporation, the fresh yield of Chinese milk vetch increased with the increment of nitrogen fertilizer, with the highest yield observed in the N3 treatment, which was significantly higher than other treatments. With high-rate rice straw incorporation, there was no significant difference in the fresh yield of Chinese milk vetch between the N2 and N3 treatments. Addition of straw of rice to the field significantly enhanced accumulation levels for nitrogen and potassium in the aboveground part of Chinese milk vetch, the application of nitrogen fertilizer increased the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium in the aboveground part of Chinese milk vetch. The combined application of nitrogen fertilizer with rice straw incorporation was beneficial for increasing the total nitrogen, inorganic nitrogen, microbial biomass nitrogen and particulate nitrogen in soil. Under the N2 treatment, with high-rate rice straw incorporation, the contents of total nitrogen, inorganic nitrogen, microbial biomass nitrogen and particulate nitrogen in the soil were significantly higher than those in the N1 and N0 treatments, with no significant difference from the N3 treatment. Overall, the interaction between rice straw incorporation and nitrogen fertilizer application had a significant effect on the fresh yield of Chinese milk vetch, the accumulation of nitrogen and potassium in the aboveground part, and the contents of microbial biomass carbon and particulate organic carbon in the soil ( $P < 0.05$ ). In conclusion, under the conditions of this experiment, a fertilization ratio with a rice straw returning amount of 6000 kg · hm<sup>-2</sup> and nitrogen fertilizer usage of 90 kg · hm<sup>-2</sup> was relatively suitable. This ratio was beneficial for increasing fresh grass yield, effectively utilizing rice straw resources, and improving soil fertility.

**Key words:** leguminous green manure; rice straw; carbon and nitrogen interactions; fresh yield