植物营养与肥料学报 2014,20(5):1151-1160
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer doi: 10.11674/zwyf.2014.0511

连年翻压紫云英对稻田土壤养分和微生物学特性的影响

颜志雷[1,2], 方 宇[1], 陈济琛[1], 王 飞[1], 何春梅[1], 林新坚[1,2*]
(1 福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建福州 350003; 2 福建农林大学生命科学学院, 福建福州 350002)

摘要:【目的】紫云英(*Astragalus sinicus* L.)是南方稻区主要的冬种绿肥作物。本研究通过紫云英-化肥配施比例不同对水稻产量、土壤养分和微生物学特性的影响探讨化肥的合理施用量,以期最大限度地减少化肥投入。**【方法】**紫云英—水稻长期轮作定位试验始于2009年,试验设5个处理,对照(不施紫云英和化肥,CK),全量化肥(100%F),紫云英18000 kg/hm^2+全量化肥(MV+100%F),紫云英18000 kg/hm^2+60%化肥(MV+60%F),单施紫云英18000 kg/hm^2(MV)。每个处理3次重复,小区面积15 m^2。2012年10月份于水稻收获后采集土壤样品,测定水稻产量、土壤养分、微生物量碳氮、可培养微生物数量和土壤酶活性。**【结果】**1)与单施化肥相比,在翻压紫云英的条件下,化肥减量40%,对水稻产量没有影响,紫云英可替代部分化肥,达到减少化肥用量,保持产量的目的。2)不同施肥制度对土壤养分含量有一定的影响。与100%F处理相比,化肥结合翻压紫云英和单施紫云英处理能够提高土壤有机质和全氮含量;施肥模式对土壤全磷和全钾含量无显著影响。与100%F处理相比,MV+100%F处理土壤的有效氮含量显著提高;与100%F处理相比,MV和MV+60%F处理的速效磷含量显著减少;100%F处理的土壤速效钾含量最高。不同施肥模式对土壤pH无显著影响。3)100%F、MV+100%F处理的细菌数量较CK分别增加了102.3%、138.8%,而MV+60%F和MV处理与CK无显著差异,说明细菌对土壤养分有很强的依赖性。单施化肥或单施紫云英都不利于真菌和放线菌的生长,而化肥与翻压紫云英配合能显著提高其数量。4)相关性分析可以看出,细菌数量与土壤有效氮、速效钾、速效磷含量呈显著或极显著正相关;真菌和放线菌的数量与铵态氮含量呈显著或极显著正相关,说明氮、磷、钾养分对土壤细菌数量的影响较大,而真菌和放线菌的数量主要受NH_4^+-N的影响。5)与100%F处理相比,化肥配施紫云英可以显著提高微生物生物碳量(SMBC)和微生物生物氮量(SMBN)的含量。6)除了过氧化氢酶,转化酶、脲酶和酸性磷酸酶总体表现为紫云英与化肥混施大于单施化肥或紫云英。7)土壤酶活性、微生物生物量与土壤氮素的相关性最强。土壤转化酶、脲酶和酸性磷酸酶与水稻产量呈显著或极显著正相关,说明转化酶、脲酶和酸性磷酸酶活性的大小可作为衡量水稻产量多少的依据之一。**【结论】**MV+60%F处理在保证水稻产量的同时能够减少40%的化肥用量,是一种高效节能的培肥模式。单施化肥不利于土壤有机质、全氮和有效氮的积累,同时不利于微生物的生长和酶活的提高。MV+60%F培肥模式有利于改良土壤的生物学性状,值得推广并有待今后进一步观察验证。

关键词: 紫云英; 水稻; 养分; 微生物学特性; 土壤酶
中图分类号: S551$^+$.9; S154.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2014)05-1151-10

Effect of turning over Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on soil nutrients and microbial properties in paddy fields

YAN Zhi-lei[1,2], FANG Yu[1], CHEN Ji-chen, WANG Fei[1], HE Chun-mei[1], LIN Xin-jian[1,2*]
(*1 Soil and Fertilizer Institute, Fjujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou, Fujian 350003, China;*
2 College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract:【Objectives】 Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) is a major green manure planting in southern paddy fields. In this study, the effects of turning over Chinese milk vetch on crop yield, soil nutrients and

收稿日期: 2013-08-13 **接受日期:** 2014-01-24
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103005); 福建省财政专项社会公益项目(2060302); 福建省自然科学基金(2012J01158)资助。
作者简介: 颜志雷(1987—), 男, 福建莆田人, 硕士, 主要从事应用微生物学研究。E-mail: yzlfjnl@163.com
* 通信作者 E-mail: xinjianlin@163.net

microbial properties were investigated to determine the appropriate application rates of chemical fertilizers. **【Methods】** Rice-Chinese milk vetch (MV) rotation Experiment Station was established in 2009. Five fertilization treatments with three replicates (each replicate plot was 15 m^2) were designed as control (CK), 100% chemical fertilizer (100% F), 18000 kg/ha milk vetch + 100% chemical fertilizer (MV + 100% F), 18000 kg/ha milk vetch + 60% chemical fertilizer (MV + 60% F), 18000 kg/ha milk vetch alone (MV). Soil samples were collected after rice harvest in October, 2012, and crop yield, soil nutrients, soil microbial biomass carbon (SMBC) and soil microbial biomass nitrogen (SMBN), number of culturable microorganisms and soil enzyme activities were determined. **【Results】** 1) There was no significant difference in the crop yields between the 100% F and MV + 60% F treatments which demonstrated MV could substitute 40% of chemical fertilizer. 2) Compared to the 100% F treatment, the MV + F treatments could increase the contents of soil organic matter and total nitrogen, but not those of total phosphorus and total potassium; the MV + 100% F treatment could increase the content of available nitrogen; MV and MV + 60% F treatments could decrease the content of available phosphorus. The 100% F treatment had the highest content of available potassium. There were no significant differences in pH values from all treatments. 3) The number of bacteria in the 100% F and MV + 100% F treatments were significantly higher than that in the CK treatment, but there were no significant differences between the MV + 60% F, MV and CK treatments. These results imply that bacteria were obviously dependent on the soil nutrients. Chemical fertilizer with MV could increase the number of fungi and actinomyces. 4) Correlation analysis showed that the contents of available nitrogen, available phosphorus and available potassium in soils were significantly correlated with the number of bacteria, and NH_4^+N content was significantly correlated with the number of fungi and actinomyces. 5) In comparison with 100% F treatment, chemical fertilizer with MV treatments could increase the contents of soil microbial biomass carbon and nitrogen. 6) Soil enzyme activities in chemical fertilizer with MV treatments were significantly higher than those in the 100% F or MV treatments. 7) Soil enzyme activities and microbial biomass were significantly correlated with the soil nitrogen content. Invertase, urease and acidic phosphatase activities were significantly correlated with the rice yield. **【Conclusions】** Compared to the 100% F, the MV + 60% F treatment could achieve equivalent rice yield, indicating that application of 60% fertilizer could be considered as the best fertilization model in our study. Contents of soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, microbial properties and enzyme activities in 100% F treatment were lower than those in chemical fertilizer with MV treatmetns.

Key words: milk vetch (*Astragalus sinicus* L.); rice; nutrient; microbial properties; soil enzyme

紫云英(*Astragalus sinicus* L.)属于豆科黄芪属传统的绿肥作物,是南方稻区主要的冬种绿肥作物。它能改良土壤,提高土壤肥力,对提高水稻产量以及维持水稻生产可持续发展具有重要意义。前人研究多集中于种植紫云英对水稻产量、土壤质量、微生物学特性等的影响[1-4],同时研究了翻压等量紫云英不同施肥量对水稻产量、稻田养分的影响[5-6],而对于翻压紫云英不同施肥量定位试验条件下对土壤生物学特性的影响的研究甚少。土壤生物学特性能够快速响应施肥对土壤质量的影响,土壤酶活性、微生物生物量、微生物呼吸、微生物多样性等生物学特性均是较好的评估参数,在评价土壤质量方面有着无可比拟的优越性[7-8]。本研究旨在探讨稻田在翻压紫云英情况下化肥的合理施用量,以期最大限度地减少化肥投入,同时保证水稻产量和较高的土壤生产力水平。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

长期定位试验田位于福州市闽侯县白沙镇,东经119°04′10″,北纬26°13′31″;海拔高度15.4 m,年均降水量1350.9 mm,年日照时数1812.5 h,年平均温度19.5℃,无霜期311 d;土壤类型为黄泥田。紫云英—水稻长期轮作定位试验始于2009年,土壤基础理化性状为有机质含量24.4 g/kg、全氮1.23 g/kg、全磷0.60 g/kg、全钾13.3 g/kg、碱解氮171.6 mg/kg、速效磷13.5 mg/kg、速效钾83.4 mg/kg、pH 4.78;耕层土壤容重1.41 g/cm^3。

1.2　试验设计

定位试验共设 5 个处理: 1)对照(不施紫云英和化肥,CK); 2)不翻压紫云英,施 100% 化肥(100% F); 3)紫云英 18000 kg/hm^2 + 100% 化肥(MV +100% F); 4)紫云英 18000 kg/hm^2 + 60% 化肥(MV +60% F); 5)紫云英 18000 kg/hm^2(MV)。每个处理 3 次重复,小区面积 15 m^2,完全随机排列。紫云英均在盛花期翻压(3 ~ 4 月份),前两年为异地翻压(品种分别为"弋江籽"与"闽紫 7 号"),后两年为原田种植翻压(品种为"闽紫 7 号"),原田种植时多余的紫云英移出。紫云英鲜草的主要成分 4 年的平均值分别为 N 0.37%、P_2O_5 0.11%、K_2O 0.28%、有机质 10.1%,水分含量 86.2%。水稻品种 2009 ~ 2011 年为"宜香优 2292",2012 年为"中浙优 1 号"。

1.3　样品采集及处理

于水稻收获后 2012 年 10 月份采集土壤样品。各试验小区内按"S"形取样,随机布点采集耕作层(0 —15 cm)土层样品,剔除石块和作物残体,混匀后置于无菌自封袋迅速带回实验室。部分土样风干后测定土壤养分,其中水溶性有机碳含量测定用新鲜土样; 部分土样带回实验室后立即进行微生物量碳、氮含量的测定; 部分土样短期内置于 4℃ 冰箱保存用于土壤可培养微生物数量和土壤酶活性的测定。

1.4　测定项目和方法

1.4.1 土壤化学指标的测定　土壤 pH 值用蒸馏水浸提(水土比 1∶2.5)pH 计测定; 有机质用 $K_2Cr_2O_7$ - H_2SO_4 外加热法; 全氮用半微量凯氏定氮法; 全磷用碱熔—钼锑抗比色法; 全钾用 NaOH 熔融—火焰光度法; 有效氮用碱解扩散法; 速效磷用 0.5 mol/L $NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法; 速效钾用 1.0 mol/L NH_4OAc 浸提—火焰光度法; NH_4^+-N 用 2 mol/L KCl 溶液浸提—靛酚蓝比色法; NO_3^--N 用双波长分光光度法[9]; 水溶性有机碳用水提,抽滤后经日本岛津 Shimadzu 500 有机碳分析仪测定[10]。

1.4.2 土壤可培养微生物的测定　土壤可培养微生物数量采用稀释平板法,细菌、真菌、放线菌分别用牛肉膏蛋白胨、孟加拉红和高氏 1 号培养基。

1.4.3 土壤微生物生物量碳、氮的测定　土壤微生物生物量碳、氮用氯仿熏蒸—K_2SO_4 浸提法测定。将盛有 20 g 新鲜土样的培养皿置于真空干燥器中,底部放一只小烧杯,倒入 30 ~ 50 mL 氯仿并放置数粒玻璃珠。真空泵抽真空至氯仿沸腾 3 ~ 5 min,关闭活塞,25℃下暗室培养 24 h,同时做无氯仿熏蒸空白对照。培养结束后,打开阀门抽气至无氯仿残留。土样用 75 mL 0.5 mol/L K_2SO_4 溶液振荡浸提 30 min,5000 r/min 离心 5 min,抽滤,滤液用日本岛津 Shimadzu 500 有机碳分析仪测定。土壤微生物生物量碳提取系数取 0.38,微生物生物量氮提取系数取 0.45[11]。

1.4.4 土壤酶活性的测定　土壤转化酶用 3,5 - 二硝基水杨酸比色法测定,酶活性以每克干土单位时间内生成葡萄糖的量表示; 脲酶用靛酚蓝比色法测定,酶活性以每克干土单位时间内释放 NH_3-N 的量表示; 酸性磷酸酶用磷酸苯二钠比色法测定,酶活性以单位时间内每克干土释放酚的毫克数表示[12]; 过氧化氢酶用高锰酸钾滴定法测定,酶活性以 30 min 后每克干土消耗 0.1 mol/L $KMnO_4$ 的毫升数表示。

试验数据用 SPSS 16.0 统计软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)和相关分析,不同处理间的多重比较用最小显著性差异(LSD)法。

2　结果与分析

2.1　翻压紫云英对水稻产量的影响

为减少气候因素对统计结果造成的偏差,选取 2009 年至 2012 年 4 年水稻产量的平均值进行显著性差异分析。由图 1 可以看出,同 CK 相比,各施肥处理水稻产量增幅为 10.7% ~ 25.1%,其中以 MV +100% F 处理最高。与 100% F 处理相比, MV + 100% F 处理的水稻产量仅增加 6.5%; MV +60% F

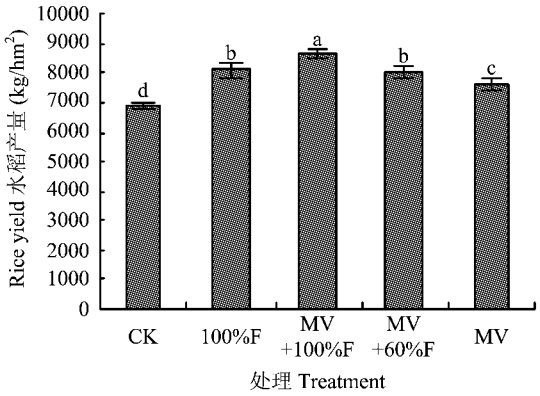

图 1　翻压紫云英对水稻产量的影响

Fig. 1　Effect of the turning over milk vetch on rice yield

[注(Note): 水稻产量为 2009 年至 2012 年的平均值 Rice yield is the average yield from 2009 to 2012. 柱上不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant differences at 5% level.]

处理的水稻产量与100%F处理没有显著差异。可见在翻压紫云英的条件下,化肥减量40%,对水稻产量没有影响,紫云英可替代部分化肥,达到减少化肥用量,增加产量的目的。

2.2 翻压紫云英对土壤养分含量的影响

由表1可以看出,不同施肥制度对土壤全量养分含量有一定的影响。与CK和100%F处理相比,化肥结合翻压紫云英和单施紫云英处理的土壤有机质含量的增幅为6.2%～12.8%,以MV处理增幅最大;与CK相比,施肥处理土壤全氮增幅为4.5%～17.6%,化肥结合翻压紫云英或单施紫云英能显著提高全氮含量;施肥模式对土壤全磷和全钾含量无显著影响。

翻压紫云英对土壤速效养分的影响表现不一,表1显示,MV处理土壤的速效钾、速效磷的含量比较低。与CK相比,各施肥处理的有效氮增幅为38.3%～66.3%,以MV+100%F处理增幅最大。与CK相比,MV和MV+60%F处理的速效磷含量显著减少,100%F和MV+100%F处理与其无显著差异。速效钾含量以100%F处理最大,MV处理最小。

表1 翻压紫云英对土壤养分含量的影响

Table 1 Effect of the turning over milk vetch on nutrients contents in soils

处理 Treatment	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	全磷 Total P (g/kg)	全钾 Total K (g/kg)
CK	24.69±1.44 b	1.40±0.13 c	0.53±0.03 a	13.44±0.52 ab
100%F	24.94±1.73 b	1.47±0.04 bc	0.58±0.05 a	13.42±0.58 ab
MV+100%F	26.40±1.43 ab	1.60±0.15 ab	0.56±0.09 a	13.75±0.22 a
MV+60%F	26.22±1.19 ab	1.58±0.04 ab	0.63±0.01 a	13.31±0.56 ab
MV	27.85±4.42 a	1.65±0.06 a	0.59±0.10 a	12.70±0.71 b

处理 Treatment	有效氮 Available N (mg/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)	pH
CK	97.00±5.29 c	11.57±0.36 a	37.76±0.00 bc	5.16±0.03 a
100%F	139.22±8.30 b	11.12±0.88 a	43.91±3.08 a	5.13±0.02 ab
MV+100%F	161.33±15.13 a	11.76±0.55 a	40.83±0.00 ab	5.10±0.03 b
MV+60%F	134.19±10.87 b	9.68±0.54 b	37.76±0.00 bc	5.10±0.05 ab
MV	147.76±3.99 ab	9.87±0.53 b	36.73±3.55 c	5.11±0.03 ab

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters in a column indicate significant difference between the treatments at 5% level.

与CK相比,除MV+100%F处理外,施肥对pH无显著影响;各施肥处理之间pH也无显著差异。然而,与试验前的土壤相比,各处理土壤的pH值都略有提升,较试验前土壤增加0.32～0.38个单位,说明在本研究中施化肥、绿肥或两者配施并未造成土壤酸化。

铵态氮(NH_4^+-N)和硝态氮(NO_3^--N)是土壤无机态氮的重要组成部分,可为植物的生长发育提供充足的氮素。由图2可见,与CK相比,各处理土壤NH_4^+-N含量增幅为0.6%～28.5%,其中MV+100%F处理增幅最大;与100%F处理相比,MV+100%F和MV+60%F处理分别增加了22.4%、4.7%。各处理土壤NO_3^--N含量较CK增加了22.8%～76.1%,MV+100%F处理增幅最大;与100%F处理相比,翻压紫云英后土壤NO_3^--N含量增幅为4.8%～43.3%。

2.3 翻压紫云英对土壤可培养微生物数量的影响

土壤微生物是土壤的重要组成部分,其数量直接影响土壤的生物化学活性及土壤养分的组成与转化,是土壤肥力的重要指标之一[13]。

从表2可以看出,100%F、MV+100%F处理的细菌数量较CK分别增加了102.3%、138.8%,而

MV +60% F 和 MV 处理与 CK 无显著差异,说明细菌对土壤养分有很强的依赖性。真菌拥有强大的酶系统,直接参与纤维素、木质素等植物残体和土壤有机质的分解。研究发现,丝状真菌数量的多少可反映土壤肥力及通气状况[14]。表 2 还显示,单施化肥或单施紫云英都不利于真菌的生长,而化肥与翻压紫云英配合能显著提高真菌数量,其中 MV + 100% F 和 MV + 60% F 处理的真菌的数量分别为 8.16×10^4 cfu/g 和 6.94×10^4 cfu/g,与 100% F 相比增加了 40.2% 和 19.4%。

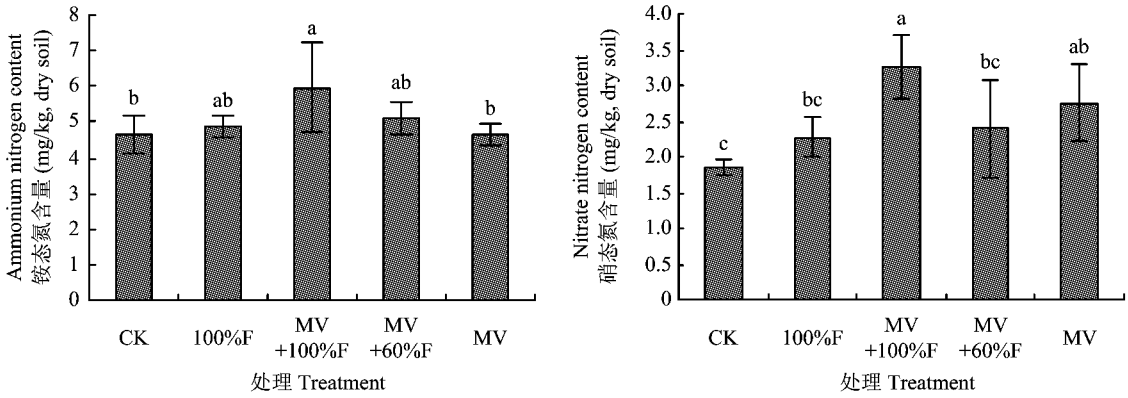

图 2　翻压紫云英对土壤铵态氮和硝态碳含量的影响

Fig. 2　Effect of the turning over milk vetch on the contents of NH_4^+-N and NO_3^--N in soils

[注(Note): 柱上不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 Different letters above the bars mean significant difference among different treatments at 5% level.]

表 2　翻压紫云英对土壤可培养微生物数量的影响

Table 2　Effect of the turning over milk vetch on cultural microorganisms in soils

处理 Treatment	细菌 Bacteria ($\times 10^6$ cfu/g, dry soil)	真菌 Fungi ($\times 10^4$ cfu/g, dry soil)	放线菌 Actinomyces ($\times 10^5$ cfu/g, dry soil)
CK	5.66 ±1.20 b	5.75 ±0.45bc	4.76 ±0.72 b
100% F	11.44 ±1.83 a	5.82 ±0.91 bc	5.26 ±0.80 b
MV +100% F	13.50 ±1.47a	8.16 ±0.63 a	6.32 ±1.52 ab
MV +60% F	5.42 ±0.55 b	6.94 ±0.74 ab	7.56 ±0.40 a
MV	6.16 ±0.95 b	4.65 ±0.68 c	2.84 ±0.27c

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters in a column indicate significant difference between the treatments at 5% level.

放线菌在土壤中分布较广,积极参与土壤有机质的分解转化,且能产生多种抗生素物质,在土壤肥力和植物病害防治方面有着不可忽视的作用[15]。与 CK 相比,化肥与翻压紫云英配合能显著提高土壤中放线菌的数量,以 MV +60% F 处理最为明显;单施化肥与 CK 无显著差异;单施紫云英的土壤中放线菌的数量明显减少。

稻田中三大类微生物的数量表现为细菌 > 放线菌 > 真菌,且相差一个数量级,与之前的多数研究报道较为一致[16-17]。综合细菌、真菌、放线菌的数量变化,可以看出化肥配施紫云英能明显增加土壤中可培养微生物的数量,单施紫云英则降低了其数量。

2.4　可培养微生物数量与土壤养分间的相关性分析

由土壤可培养微生物数量与土壤养分之间的相关性分析(表 3),可以看出,细菌数量与土壤有效氮、速效钾、速效磷含量呈显著或极显著正相关;真菌和放线菌的数量与铵态氮含量呈显著或极显著正相关,说明氮、磷养分对土壤细菌数量的影响较大,而真菌和放线菌的数量主要受 NH_4^+-N 的影响。

表3 可培养微生物数量与土壤养分间的相关系数

Table 3 Correlation of cultural microbial populations with soil nutrients

项目 Item	有效氮 Available N	速效钾 Available K	速效磷 Available P	水溶性有机碳 Water soluble org. carbon	铵态氮 NH_4^+-N
细菌 Bacteria	0.56*	0.65**	0.58*	0.23	0.37
真菌 Fungi	0.20	0.20	0.32	0.46	0.68**
放线菌 Actinomycetes	0.01	0.21	0.05	0.77**	0.60*

注(Note): $n=18$, * 和 ** 分别表示显著相关和极显著相关 Mean significant difference at 5% and 1% levels, respectively.

2.5 翻压紫云英对土壤微生物生物量碳、氮的影响

土壤微生物生物量是土壤有机库的活性组分,参与土壤动植物残体的分解和矿化,由于这部分微生物有强的生命活动,比土壤有机质对土壤条件变化的响应更快,是评价土壤肥力和质量的重要生物学指标之一。表4可以看出,不同处理对土壤微生物生物量有明显的影响。与CK相比,MV+100%F和MV+60%F处理的土壤微生物量碳(SMBC)增幅分别为13.9%、13.4%,100%F处理的SMBC下降了7.0%;与100%F处理相比,配施紫云英可以显著提高SMBC。土壤微生物生物量氮(SMBN)与SMBC的变化趋势相同,单施化肥降低了SMBN,化肥配施紫云英可以提高SMBN。土壤SMBC/SMBN在一定程度上可以反映微生物群落结构的差异[18],通常认为真菌的SMBC:SMBN为10:1左右,细菌为5:1,放线菌为6:1[19]。本试验中所有处理的SMBC/SMBN接近10,说明南方黄泥田土壤微生态环境更适宜真菌生存。

表4 翻压紫云英对土壤微生物生物量碳、氮的影响

Table 4 Effect of the turning over milk vetch on soil microbial biomass

处理 Treatment	微生物量碳 SMBC (mg/kg)	微生物量氮 SMBN (mg/kg)	SMBC/TOC (*qMB*) (%)	SMBC/SMBN
CK	546.84±81.00 ab	57.54±6.94 b	3.83±0.23 ab	9.52±0.19 a
100%F	508.63±60.51 b	52.93±4.72 b	3.53±0.24 bc	9.61±0.20 a
MV+100%F	622.58±108.12 a	66.31±7.41 a	4.07±0.19 a	9.36±0.26 a
MV+60%F	620.08±39.42 a	66.78±5.31 a	4.08±0.10 a	9.31±0.24 a
MV	547.90±18.50 ab	56.91±3.68 b	3.39±0.12 c	9.64±0.17 a

注(Note): SMBC—Soil microbial biomass C; SMBN—Soil microbial biomass N; TOC—Total organic carbon; qMB— Microbial quotient. 同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters in a column indicate significant difference between the treatments at 5% level.

土壤微生物生物量碳占总有机碳含量的百分比(SMBC/TOC)称为微生物熵(*qMB*),充分反映了土壤中活性有机碳所占的比例,一般土壤中的微生物熵值为1%~4%[20]。已有研究证明微生物熵可作为土壤碳动态和土壤质量研究的有效指标[21]。与100%F处理相比,紫云英配施化肥能够显著提高土壤微生物熵,主要原因可能是有机无机肥料混合施用改善了土壤环境,提高了土壤微生物活性,有利于土壤碳的"源"和"汇"。尽管单施紫云英(MV)可以显著提高土壤有机质含量,但是过多的有机物质并不一定适合微生物的生长繁殖,土壤微生物活性较低,造成微生物熵较低。

2.6 翻压紫云英对土壤酶活性的影响

2.6.1 土壤转化酶活性 在一定程度上,转化酶活性的改变可以反映土壤有机碳积累与分解转化的规律。从表5可以看出,与CK相比,施肥可以提高土壤转化酶活性,化肥与紫云英翻压结合对土壤转化酶活性的增加最为明显,增幅达36.4%~40.2%,100%F处理增幅为10.7%,差异不显著;MV+100%F和MV+60%F处理的土壤转化酶活性较100%F处理增加了23.3%~26.7%,增幅最大的为MV+60%F处理,这是由于长期翻压C/N比适中的

紫云英可为转化酶提供更多的酶促基质,提高了酶活性,从而加快了有机质的转化。

2.6.2 土壤脲酶活性　脲酶是一种酰胺酶,主要参与土壤中尿素的分解和有机分子中肽键的水解,其活性的改变与土壤的有机质和氮素水平有着密切的关系。表 5 显示,各施肥处理的土壤脲酶活性均高于 CK 处理,其中 MV +100% F 和 MV +60% F 处理的增幅最大,分别为 20.1%、16.5%,差异显著;100% F 处理的脲酶活性增幅仅为 7.5%,差异不显著,说明增施紫云英外源有机物质比单施化肥更有利于提高土壤脲酶活性。

2.6.3 土壤酸性磷酸酶活性　土壤磷酸酶包括酸性、中性和碱性三种类型,其酶活性的高低主要取决于土壤的性质,同土壤 pH 值有直接关系[12],通常认为稻田、茶园等酸性土壤中以酸性磷酸酶为主。磷是一种植物生长所必需的矿质营养元素,酸性土壤中普遍缺磷,因为磷在酸性土壤中容易固定不易分解[22],而磷酸酶可以将土壤中的有机磷转化为无机磷供植物吸收利用。因此,磷酸酶活性是反映土壤供磷能力的重要指标之一。化肥配施紫云英处理可明显提高土壤酸性磷酸酶活性,与 CK 相比,增幅为 15.3%～22.0%(表 5)。

2.6.4 土壤过氧化氢酶活性　过氧化氢酶是一种重要的氧化还原酶,在土壤生物氧化过程中发挥积极作用,土壤微生物或植物根系都会分泌过氧化氢酶用于清除土壤生物呼吸过程所产生的过氧化氢,防止土壤生物或植物受到毒害。表 5 显示,MV 处理的过氧化氢酶活性最强,较 CK 处理提高 11.1%,100% F、MV +100% F 以及 MV +60% F 处理的过氧化氢酶活性大小与 CK 无显著差异,说明化肥的施入并不能增加土壤过氧化氢酶活性,而紫云英对于土壤过氧化氢酶活性的提高有着显著的效果。

综上所述,土壤酶活性大小受施肥制度的影响更为突出,总体表现为紫云英与化肥混施大于单施化肥或紫云英。

表 5　翻压紫云英对土壤酶活性的影响

Table 5　Effect of the turning over milk vetch on soil enzyme activities

处理 Treatment	转化酶 Invertase [glucose mg/(g·d)]	脲酶 Urease [NH_3-N μg/(g·d)]	酸性磷酸酶 Acid phosphatase [phenol mg/(g·d)]	过氧化氢酶 Catalase [0.1 mol/L $KMnO_4$ mL/(g·30 min)]
CK	10.99 ±0.31 b	329.76 ±13.21 d	4.77 ±0.35 b	0.44 ±0.01 b
100% F	12.16 ±0.59 b	354.35 ±6.86 cd	5.04 ±0.37 b	0.45 ±0.01 b
MV +100% F	14.99 ±1.59 a	396.11 ±11.05 a	5.82 ±0.14 a	0.45 ±0.02 b
MV +60% F	15.40 ±1.11 a	384.11 ±11.28 ab	5.50 ±0.68 ab	0.46 ±0.01 b
MV	12.06 ±0.48 b	360.05 ±29.15 bc	5.02 ±0.27 b	0.49 ±0.00 a

注(Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters in a column indicate significant difference between the treatments at 5% level.

2.7　土壤酶活性、微生物生物量与土壤养分间的相关性分析

土壤酶活性、微生物生物量与土壤养分含量的相关性分析(表 6)表明,转化酶与全氮、有效氮的含量呈显著正相关,与 pH 值呈显著负相关;脲酶活性与有效氮、NO_3^--N 呈极显著或显著正相关;酸性磷酸酶与 NO_3^--N 呈极显著正相关;微生物量碳(SMBC)与全氮呈显著正相关。从中可以看出,土壤酶活性、微生物生物量与土壤氮素的相关性最强。土壤转化酶、脲酶和酸性磷酸酶与水稻产量呈显著或极显著正相关,说明转化酶、脲酶和酸性磷酸酶活性的大小可作为衡量水稻产量多少的依据之一。

表6 土壤酶活性、微生物生物量与土壤养分、水稻产量间的相关系数

Table 6 Correlations analyisis on soil enzyme activities and microbial biomass with soil nutrients and rice yield

项目 Item	转化酶 Invertase	脲酶 Urease	酸性磷酸酶 Acid phosphatase	过氧化氢酶 Catalase	微生物量碳 SMBC	微生物量氮 SMBN
有机质 Organic matter	0.28	0.14	0.21	0.52*	0.39	0.37
全氮 Total N	0.50*	0.47	0.30	0.37	0.60*	0.48
全磷 Total P	0.34	0.26	0.21	0.31	-0.09	0.99
全钾 Total K	0.21	0.23	0.16	-0.47	0.12	0.05
有效氮 Available N	0.56*	0.74**	0.37	0.24	0.33	0.29
速效钾 Available K	0.02	0.20	0.17	-0.35	-0.20	-0.30
速效磷 Available P	-0.16	-0.13	-0.03	-0.44	-0.15	-0.17
水溶性有机碳 WSOC	0.30	0.16	0.37	-0.49	0.20	0.19
铵态氮 NH_4^+-N	0.31	0.39	0.36	0.18	0.04	0.21
硝态氮 NO_3^--N	0.43	0.50*	0.72**	0.17	0.31	0.33
pH	-0.55*	-0.58*	-0.30	-0.10	-0.24	-0.34
水稻产量 Rice yield	0.68**	0.71**	0.56*	-0.10	0.34	0.35

注(Note): WSOC—Water soluble organic carbon; SMBC—Soil microbial biomass C; SMBN—Soil microbial biomass N. *和**分别表示在0.05和0.01水平显著 Indicate significance at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论

土壤有机质含量是衡量土壤肥力的重要指标之一,它在提供作物生长所需的养分、改善土壤结构、增加土壤保水保肥等方面发挥着重要作用[23]。施用有机肥是加速土壤有机质积累的有效方法。绿肥在微生物作用下逐渐分解释放营养元素供作物吸收利用,并逐渐转化为腐殖质,参与土壤有机质循环。本试验中翻压紫云英配施化肥或单施紫云英都可提高土壤有机质含量。化肥与紫云英翻压结合可同时增加土壤全氮含量,单施化肥不利于土壤有机质和全氮的积累,与高菊生[24]和李继明[25]的研究结果相一致。化肥与紫云英翻压结合能显著增加土壤有效氮的含量,这是由于豆科绿肥根部聚集大量的根瘤菌,具有很强的生物固氮作用,绿肥还田后经微生物分解能够增加土壤中氮含量,供作物吸收利用。

本研究表明,与CK相比,单施化肥处理的土壤细菌数量明显增加,而真菌和放线菌数量均无明显差异,说明细菌对土壤养分有很强的依赖性,这一现象可从微生物数量与土壤养分间的相关性分析(表3)中得到验证。单施化肥或单施紫云英不利于土壤真菌和放线菌的生长繁殖,而化肥与紫云英翻压结合可显著增加真菌和放线菌的数量。除MV+60%F处理外,细菌基本也呈现此规律。冬种绿肥翻压入土能提高土壤微生物种群数量,这与杨曾平等[16]对红壤性水稻土的研究结果一致,他们的结论是冬种绿肥可提高土壤细菌、真菌和放线菌的数量。长期冬种绿肥不仅直接增加地上部和根系生物量及根系分泌物,促进微生物生长,同时绿肥翻压入土后不但增加了土壤养分,同时也为微生物提供了充足的碳源,土壤微生物种群数量高于冬闲处理。

不同培肥模式对土壤微生物生物量碳、氮的影响存在着明显差异,与CK相比,化肥与紫云英翻压结合的处理具有明显的促进效应,而单施化肥降低了微生物生物量。这主要是因为豆科绿肥能增加土壤活性有机质组分,为微生物活动提供了丰富的碳源和氮源[26]。翻压等量紫云英下化肥减量处理(MV+60%F)对土壤微生物生物量没有显著影响,并且微生物生物量与土壤养分的相关分析(表6)表明,微生物生物量与全氮之间呈显著相关,可见种植绿肥能提高土壤微生物生物量碳、氮的含量,并减少氮的损失,从而降低因过量施用氮肥造成的环境污染。

土壤酶主要来自土壤微生物代谢过程和土壤动物、根系产生或残体分解。土壤酶活性的高低能反映出土壤生物活性和土壤生化反应强度[27],土壤酶

活性常被作为土壤质量的重要指标[19]。与 CK、100%F 处理相比，化肥与紫云英翻压结合可显著增加转化酶、脲酶和酸性磷酸酶的活性。杨曾平等[16]研究表明，翻压紫云英能明显提高土壤脲酶、转化酶等酶活性。张珺穜等[4]的研究结果显示，紫云英与化肥配施对提升土壤酶活性的效果最佳。翻压等量紫云英情况下减施化肥并未减少转化酶、脲酶和酸性磷酸酶的活性。由相关性分析可知，这三种酶与水稻产量呈显著或极显著的正相关，说明转化酶、脲酶和酸性磷酸酶的酶活性大小可作为衡量水稻产量多少的一个依据。

4 结论

在水稻土壤的不同培肥模式下，土壤养分、可培养微生物数量、微生物量碳氮以及土壤酶活性发生了很大的变化。MV + 100% F 处理可以明显提高水稻产量，然而考虑到化肥用量对环境的影响，MV + 60% F 处理在保证水稻产量的同时能够减少 40% 的化肥用量，是一种高效节能的培肥模式。单施化肥不利于土壤有机质、全氮和有效氮的积累，同时不利于微生物的生长和酶活的提高。MV + 60% F 培肥模式有利于改良土壤的生物学性状，值得推广并有待今后进一步观察验证。

参 考 文 献：

[1] 周春火，潘晓华，吴建富，石庆华. 不同复种方式对水稻产量和土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2013，19 (2)：304-311.
Zhou C H, Pan X H, Wu J F, Shi Q H. Effects of cropping patterns on rice yield and soil fertility [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19 (2): 304-311.

[2] 朱波，胡跃高，曾昭海，等. 双季稻区冬种覆盖作物对土壤微生物量的影响[J]. 生态环境，2008，17(5)：2074-2077.
Zhu B, Hu Y G, Zeng Z H *et al*. Cover crop effects on the soil microbial biomass in double-rice cropping system[J]. Ecology and Environment, 2008, 17 (5): 2074-2077.

[3] 杨曾平，徐明岗，聂军，等. 长期冬种绿肥对双季稻种植下红壤性水稻土质量的影响及其评价[J]. 水土保持学报，2011，25 (3)：92-102.
Yang Z P, Xu M G, Nie J *et al*. Effect of long-term winter planting-green manure on reddish paddy soil quality and its comprehensive evaluation under double-rice cropping system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25 (3): 92-102.

[4] 张珺穜，曹卫东，徐昌旭，刘佳. 种植利用紫云英对稻田土壤微生物及酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料，2012，(1)：19-25.
Zhang J T, Cao W D, Xu C X, Liu J. Effects of incorporation of milk vetch (*Astragalus sinicus*) on microbial populations and enzyme activities of paddy soil in Jiangxi[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2012, (1): 19-25.

[5] 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.
Xu C X, Xie Z J, Cao W D *et al*. Effects of different fertilizing methods on absorption and utilization of nutrient of rice plants under reducing the amount of mineral fertilizer after turning under Chinese milk vetch[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2011, (3): 35-39.

[6] 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 Y H, Pan Z L, Wang Q. 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]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27 (3): 174-178.

[7] Finkenbein P, Kretschmer K, Kuka K *et al*. Soil enzyme activities as bioindicators for substrate quality in revegetation of a subtropical coal mining dump[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 56: 87-89.

[8] Niemeyer J C, Lolata G B, de Carvalho G M *et al*. Microbial indicators of soil health as tools for ecological risk assessment of a metal contaminated site in Brazil [J]. Applied Soil Ecology, 2012, 59: 96-105.

[9] 黄玉芳，叶优良，杨素勤. 双波长分光光度法测定土壤硝态氮的可行性研究[J]. 中国农学通报，2009，25(2)：43-45.
Huang Y F, Ye Y L, Yang S Q. Feasibility of NO_3^- - N determination by dual wavelength spectrophotometric method[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(2): 43-45.

[10] Zhang J C, Zeng G M, Chen Y N *et al*. Impact of *Phanerochaete chrysosporium* inoculation on indigenous bacterial communities during agricultural waste composting[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97 (7): 3159-3169.

[11] Wang Y, Tu C, Cheng L *et al*. Long-term impact of farming practices on soil organic carbon and nitrogen pools and microbial biomass and activity[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 117: 8-16.

[12] 赵兰坡，姜岩. 土壤磷酸酶活性测定方法的探讨[J]. 土壤通报，1986，(3)：138-141.
Zhao L P, Jiang Y. Exploration of assay method for soil phosphatase activity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1986, (3): 138-141.

[13] 孙波，赵其国，张桃林，俞慎. 土壤质量与持续环境Ⅲ：土壤质量评价的生物学指标[J]. 土壤，1997，29 (5)：225-234.
Sun B, Zhao Q G, Zhang T L, Yu S. Soil quality and sustainable environment Ⅲ: Biological indices of soil quality evaluation[J]. Soils, 1997, 29 (5): 225-234.

[14] Barea J M, Azcón R, Azcón-Aguilar C. Mycorrhizosphere interactions to improve plant fitness and soil quality[J]. Antonie

Van Leeuwenhoek. 2002, 81 (1-4): 343-351.

[15] Chander Y, Kumar K, Goyal S M, Gupta S C.. Antibacterial activity of soil-bound antibiotics[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(6): 1952-1957.

[16] 杨曾平，高菊生，郑圣先，等. 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 *et al*. Effects of long-term winter planting-green manure on microbial properties and enzyme activities in reddish paddy soil[J]. Soils, 2011, 43 (4): 576-583.

[17] 刘定辉，舒丽，陈强，等. 秸秆还田少免耕对冲积土微生物多样性及微生物碳氮的影响[J]. 应用与环境生物学报，2011，17 (2): 158-161.
Liu D H, Shu L, Chen Q *et al*. Effects of straw mulching and litter-or zero-tillage on microbial diversity and biomass C and N of alluvial soil in Chengdu Plain, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17 (2): 158-161.

[18] 陈国潮，何振立. 红壤不同利用方式下的微生物量研究[J]. 土壤通报，1998，29(6): 276-278.
Chen G C, He Z L. Study on the microbial biomass in reddish soil under different land use [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1998, 29 (6): 276-278.

[19] 李娟，赵秉强，李秀英，Hwat Bing So. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学，2008，41 (1): 144-152.
Li J, Zhao B Q, Li X Y, Hwat B S. Effects of long-term combined application of organic and mineral fertilizers on soil microbiological properties and soil fertility [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41 (1): 144-152.

[20] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21 (4): 471-479.

[21] 刘守龙，苏以荣，黄道友，等. 微生物商对亚热带地区土利用及施肥制度的响应[J]. 中国农业科学，2006，39(7): 1411-1418.
Liu S L, Su Y R, Huang D Y *et al*. Response of C_{mic} to C_{org} to land use and fertilization in subtropical region of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39 (7): 1411-1418.

[22] Li H G, Shen J B, Zhang F S *et al*. Phosphorus uptake and rhizosphere properties of intercropped and monocropped maize, faba bean, and white lupin in acidic soil[J]. Biology and Fertility of Soils. 2010, 46 (2): 79-91.

[23] 徐玲，张杨珠，周卫军，等. 不同施肥结构下稻田产量及土壤有机质和氮素营养的变化[J]. 农业现代化研究，2006，27 (2): 153-156.
Xu L, Zhang Y Z, Zhou W J *et al*. Effect of different fertilizer application systems on soil fertility quality and rice yield[J]. Research of Agricultural Modernization, 2006, 27 (2): 153-156.

[24] 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 J S, Xu M G, Dong C H *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.

[25] 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.
Li J M, Huang Q H, Yuan T Y *et al*. Effects of long-term green manure application on rice yield and soil nutrients in paddy soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17 (3): 563-570.

[26] 倪进治，徐建民，谢正苗，唐才贤. 不同有机肥料对土壤生物活性有机质组分的动态影响[J]. 植物营养与肥料学报，2001，7 (4): 374-378.
Ni J Z, Xu J M, Xie Z M, Tang C X. Effects of different organic manure on biologically active organic fractions of soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7 (4): 374-378.

[27] von Mersi W, Schinner F. An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodonitrotetrazolium chloride[J]. Biology and Fertility of Soils, 1991, 11: 216-220.