

减量化肥配施紫云英对稻田土壤碳、氮的影响

程会丹, 鲁艳红, 聂军, 朱启东, 聂鑫, 曹卫东, 高雅洁, 廖育林

引用本文:

程会丹, 鲁艳红, 聂军, 等. 减量化肥配施紫云英对稻田土壤碳、氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1259–1270.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1356>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

绿肥配施减量化肥对土壤固氮菌群落的影响

方宇, 王飞, 贾宪波, 林陈强, 张慧, 陈龙军, 陈济琛

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1933–1941 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0509>

翻压紫云英条件下化肥配施生物炭基肥对水稻Cu吸收转运的影响

喻成龙, 汤建, 喻惟, 倪国荣, 谢志坚, 康丽春, 荣勤雷, 周春火

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2095–2102 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0549>

紫云英还田对早稻直播稻田温室气体排放的影响

聂江文, 王幼娟, 吴邦魁, 刘章勇, 朱波

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2334–2341 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0195>

稻草还田和冬种绿肥对华南双季稻产量及稻田CH₄排放的影响

田卡, 张丽, 钟旭华, 黄农荣, 张卫建, 潘俊峰

农业环境科学学报. 2015(3): 592–598 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.03.024>

化肥减量配施有机肥对早稻田温室气体排放的影响

杨丹, 叶祝弘, 肖珣, 闫颖, 刘鸣达, 谢桂先

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2443–2450 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0416>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程会丹, 鲁艳红, 聂 军, 等. 减量化肥配施紫云英对稻田土壤碳、氮的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(6): 1259–1270.

CHENG Hui-dan, LU Yan-hong, NIE Jun, et al. Effects of reducing chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch on soil carbon and nitrogen in paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(6): 1259–1270.



开放科学 OSID

减量化肥配施紫云英对稻田土壤碳、氮的影响

程会丹^{1,2}, 鲁艳红^{1,3}, 聂 军^{1,3}, 朱启东^{1,3}, 聂 鑫^{1,2}, 曹卫东⁴, 高雅洁^{1,3}, 廖育林^{1,2,3*}

(1. 湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; 2. 湖南大学研究生院隆平分院, 长沙 410125; 3. 农业农村部湖南耕地保育科学观测实验站, 长沙 410125; 4. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要:以 11 a(2008—2018 年)长期定位试验为对象,研究了减施 40% 化肥下紫云英不同翻压量对双季稻产量及土壤活性有机碳、氮(DOC+MBC、DON+MBN)的影响,以探讨紫云英替代化肥的可行性和适宜翻压量。试验设置 CK(不施紫云英和化肥)、GM_{22.5}(单施紫云英 22.5 t·hm⁻²)、100%CF(常规施肥)和减施 40% 化肥(60%CF)条件下将紫云英翻压量设为 15、22.5、30、37.5 t·hm⁻² 4 个水平,共 7 个处理。于 2018 年晚稻收获后采集土壤样品,分析土壤微生物量碳、氮(MBC、MBN)和可溶性有机碳、氮(DOC、DON)。结果表明:与常规施肥相比,减施 40% 化肥下各紫云英不同翻压量处理早稻及全年两季稻谷产量持平或略有增加,且均随紫云英翻压量增多而提高。紫云英翻压量为 15~30 t·hm⁻² 时,晚稻稻谷产量随紫云英翻压量的增多而提高,当紫云英翻压量多于 30 t·hm⁻² 时,则呈下降趋势。除翻压紫云英 15 t·hm⁻² 外,其他紫云英与化肥配施处理晚稻稻谷产量与常规施肥相比无显著差异;与常规施肥相比,紫云英与化肥配施均不同程度地提高了土壤 MBC、MBN、DOC、DON 含量。紫云英翻压量为 15~22.5 t·hm⁻² 时,土壤 MBC、MBN、DOC、DON 均随紫云英翻压量增加而增加,当翻压量多于 22.5 t·hm⁻² 时呈下降趋势;MBC/SOC 和 MBN/TN 均随紫云英翻压量的增加呈先增加后降低的趋势,MBC/SOC 在 60%CF+GM_{22.5} 处理最高,MBN/TN 以 60%CF+GM₃₀ 处理最高。DOC/SOC 和 DON/TN 均在 60%CF+GM₁₅ 处理最高;相关分析结果表明,土壤 MBC、MBN、DOC、DON、DOC+MBC、DON+MBN 与土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)呈极显著正相关($P<0.01$)。土壤各活性有机碳、氮与早、晚稻及全年两季稻谷产量均呈极显著正相关($P<0.01$)。综合考虑双季稻的产量效应及土壤培肥效果,在本试验条件下或与该试验区域气候特点和种植制度类似的南方水稻主产区,在减少 40% 化肥条件下,紫云英翻压 22.5~30 t·hm⁻² 较为适宜。

关键词:紫云英;双季稻;产量;活性有机碳;活性有机氮

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2020)06-1259-12 doi:10.11654/jaes.2019-1356

Effects of reducing chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch on soil carbon and nitrogen in paddy fields

CHENG Hui-dan^{1,2}, LU Yan-hong^{1,3}, NIE Jun^{1,3}, ZHU Qi-dong^{1,3}, NIE Xin^{1,2}, CAO Wei-dong⁴, GAO Ya-jie^{1,3}, LIAO Yu-lin^{1,2,3*}

(1. Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 2. Long Ping Branch, Graduate School of Hunan University, Changsha 410125, China; 3. Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation(Hunan), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha 410125, China; 4. Agricultural Resource and Agricultural Division Institute of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: An eleven-year field experiment was conducted to investigate the effects of different incorporation rates of Chinese milk vetch on grain yields, active organic carbon(DOC+MBC), and nitrogen(DON+MBN) under a chemical fertilizer application saving rate. Another aim was to explore a suitable application rate and the effect of the substitution of chemical fertilizer by Chinese milk vetch. The field experi-

收稿日期:2019-12-10 录用日期:2020-02-27

作者简介:程会丹(1992—),女,河南西华人,硕士研究生,主要从事绿肥生产与利用研究。E-mail:chenghuidan910@163.com

*通信作者:廖育林 E-mail:ylliao2006@126.com

基金项目:国家绿肥产业技术体系(CARS-22-G-11);国家重点研发计划项目(2017YFD030150401, 2018YFD03006);湖南省农业科技创新资金项目(2018ZD02-2, 2019LS03-1)

Project supported: The National Green Manure Industrial Technology System of China(CARS-22-G-11); National Key R&D Program of China(2017YFD030150401, 2018YFD03006); Agricultural Science-Technology Innovation Fund of Hunan Province, China(2018ZD02-2; 2019LS03-1)

ments included seven treatments: CK (no application of Chinese milk vetch and chemical fertilizer), GM_{22.5} (only Chinese milk vetch application 22.5 t·hm⁻²), 100%CF (conventional fertilizer), and Chinese milk vetch application of 15, 22.5, 30 t·hm⁻², and 37.5 t·hm⁻² under a 40% reduced chemical fertilizer (60%CF) application. Soil samples were collected after a harvest of late rice in 2018 to analyze soil microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN), dissolved organic carbon (DOC), and dissolved organic nitrogen (DON). The following results were obtained: The incorporation of Chinese milk vetch with a 40% reduction of chemical fertilizer either maintained or increased the grain yields of early rice and double-rice compared with conventional fertilizer application. The grain yields of early rice and double-rice system increased by increasing the amount of Chinese milk vetch incorporation. The grain yield of late rice increased by increasing the amount of Chinese milk vetch incorporation when the amount was within 15~30 t·hm⁻². However, the incorporation of Chinese milk vetch over 30 t·hm⁻² showed negative effects on crop production. Except for the Chinese milk vetch application of 15 t·hm⁻², there were no significant differences in the grain yield of late rice between conventional fertilization and the treatments that were combined with Chinese milk vetch. Compared to conventional fertilization, the incorporation of Chinese milk vetch with chemical fertilizer increased the concentrations of soil MBC, MBN, DOC, and DON; these were increased with the increasing amount of Chinese milk vetch incorporation within 15~22.5 t·hm⁻². However, they showed a decreasing trend when the incorporation amount was over 22.5 t·hm⁻². The ratio of MBC to SOC and MBN to TN increased first and then decreased with the increased amount of Chinese milk vetch. The ratio of MBC to SOC and MBN to TN was highest under 60%CF+GM_{22.5} and 60%CF+GM₃₀ treatments, respectively. Both the ratios of DOC to SOC and DON to TN were highest under a 60%CF+GM₁₅ treatment. The concentrations of MBC, MBN, DOC, DON, DOC+MBC, and DON+MBN, were positively correlated with SOC and TN ($P<0.01$). The grain yields of early rice, late rice, and double-rice had significantly positive correlations with the active organic carbon and nitrogen concentrations ($P<0.01$). In southern rice-producing areas with similar climate conditions, soil types, and planting systems with this experiment, the optimal application rate of Chinese milk vetch was 22.5~30 t·hm⁻² with a 40% reduced chemical fertilization due to its beneficial effect in maintaining grain yield and soil fertility.

Keywords: Chinese milk vetch; double cropping rice; yield; active organic carbon; active organic nitrogen

土壤碳、氮是土壤肥力重要的物质基础,反映土壤的肥力状况和生产水平^[1]。土壤微生物量是土壤有机质矿化和养分循环的动力,虽然土壤微生物量碳、氮(MBC、MBN)和可溶性有机碳、氮(DOC、DON)占土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)的比例仅为1%~5%^[2],但却是土壤碳氮库中最为重要和活跃的成分^[3],反映土壤同化和矿化能力,是土壤活性大小的标志。土壤MBC、MBN、DOC、DON对外界条件变化响应敏感^[4],尤其是外源有机物料的添加能够显著影响其含量的变化^[5]。

紫云英作为一种养分丰富的有机物料还田,具有替代部分化肥,培肥土壤、改善生态环境等作用^[6],且对土壤MBC和MBN的影响明显。大量研究表明,翻压绿肥能够提高土壤MBC、MBN、DOC、DON含量。如:Yu等^[7]研究表明施用绿肥紫云英有助于提高土壤MBC、MBN、DOC、DON含量。高嵩涓等^[8]和杨曾平等^[9]认为长期冬种绿肥能够提高土壤MBC、MBN含量,其中紫云英效果最显著。黄威等^[10]研究表明化肥与紫云英长期配合施用提高了土壤MBC、MBN、DOC、DON含量。

目前,关于种植紫云英及翻压等量紫云英下不同化肥施用量对稻田土壤MBC、MBN影响的研究报道

较多^[7-11],减量化肥与不同量紫云英配施对土壤微生物量特性影响的研究也有一些报道^[12],但是,不同紫云英翻压量对土壤活性有机碳、氮(DOC+MBC、DON+MBN)及土壤各形态活性碳、氮占SOC和TN的比例的研究较少。因此,本研究利用11 a田间定位试验(2008—2018年),研究了长期化肥减施下,紫云英不同翻压量对双季稻产量及活性有机碳、氮的影响,及土壤各形态活性有机碳、氮占SOC、TN的比例与相关关系,为南方双季稻田合理施用紫云英,提高土壤质量、保证水稻增产稳产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

试验于2008—2018年在湖南省南县三仙湖乡万元桥村(112°18'20"E、29°11'29"N)进行。该地处于洞庭湖双季稻区,属亚热带季风湿润气候,海拔30 m,年均气温约16.6℃,年日照时数约1 775 h,年降水量约1 238 mm。土壤类型为河湖沉积物发育的紫潮泥。供试土壤的基本理化性质如表1所示。

1.2 试验设计

定位试验共设7个处理:(1)CK(稻-稻-冬闲,不施紫云英和化肥);(2)GM_{22.5}(稻-稻-紫云英,单施紫

云英,紫云英还田量为 $22.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$);(3)100%CF(稻-稻-冬闲,常规施肥,不施紫云英);(4)60%CF+GM₁₅(稻-稻-紫云英,紫云英还田量为 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮、钾肥均减量40%);(5)60%CF+GM_{22.5}(稻-稻-紫云英,紫云英还田量为 $22.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮、钾肥均减量40%);(6)60%CF+GM₃₀(稻-稻-紫云英,紫云英还田量为 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮、钾肥均减量40%);(7)60%CF+GM_{37.5}(稻-稻-紫云英,紫云英还田量为 $37.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,氮、钾肥均减量40%)。100%CF指当地的常规施肥量,早、晚稻均为 $\text{N } 150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5 \text{ } 75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $\text{K}_2\text{O } 120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施用的氮、磷、钾肥的种类分别为尿素(N含量46%)、过磷酸钙(P_2O_5 含量12%)、氯化钾(K_2O 含量60%)。由于紫云英中氮、钾含量丰富,磷含量较少,本试验紫云英与化肥配施处理的磷肥施用量与常规施肥一致,氮、钾肥减施40%。早、晚稻不同处理养分投入量见表2。磷肥和钾肥均在移栽前作基肥施入;氮肥50%作基肥施入,50%追肥在分蘖盛期施入;基肥于早、晚稻移栽前1 d施入,施入后立即用铁耙耙入5 cm深的土层中。小区面积 20 m^2 ($4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$),3次重

复,随机区组排列。小区之间用泥埂隔开,泥埂宽30 cm、高20 cm,小区的四周和泥埂上用塑料薄膜覆盖,至地表下20 cm深,防止小区间串水串肥,区组之间设30 cm宽排水沟,每小区在排灌沟一端设灌排水口。

于每年晚稻收获后,设置翻压紫云英处理的各小区按 $22.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 撒播紫云英种子(品种为“湘紫1号”)。每年早稻移栽前10 d(4月中旬),割取各小区紫云英地上部,将其全部混匀后按照各小区设置的翻压量还田,用小型旋耕机耕地后,堵住排水口,各小区单独灌水。翻压紫云英鲜草含水量为88.9%,紫云英干基养分含量为 $\text{N } 37.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{P } 3.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{K } 37.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,紫云英鲜草含水量和干基养分含量均为多年平均值。早稻品种为湘早籼45号,晚稻品种为黄华占。

1.3 样品采集及测定方法

定位试验各小区于每年早、晚稻成熟期单打单晒,分别称质量计产。土壤样品于2018年晚稻收获后从每个小区按“S”形取7点小样(0~20 cm),组成一个混合样,剔除石砾和植物残体,分成2份,一份立即装入塑料袋,带回实验室保存于4℃冰箱,用于测定

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

pH	有机质 Organic matter/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮 Total N/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷 Total P/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾 Total K/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮 Available N/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有效磷 Available P/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 Available K/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
7.7	47.4	3.3	1.3	21.7	251.0	15.6	98.0

表2 不同处理早晚稻氮、磷、钾养分投入量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

Table 2 Nutrient input rates of N, P and K for different treatments($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)

处理 Treatments	化肥 Chemical fertilizer			紫云英 Chinese milk vetch			合计 Total		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
早稻 Early rice									
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—
GM _{22.5}	—	—	—	101.9	9.5	101.1	101.9	9.5	101.1
100%CF	150.0	32.7	99.6	—	—	—	150.0	32.7	99.6
60%CF+GM ₁₅	90.0	32.7	59.8	67.9	6.3	67.4	157.9	39.1	127.2
60%CF+GM _{22.5}	90.0	32.7	59.8	101.9	9.5	101.1	191.9	42.2	160.8
60%CF+GM ₃₀	90.0	32.7	59.8	135.9	12.7	134.8	225.9	45.4	194.5
60%CF+GM _{37.5}	90.0	32.7	59.8	169.8	15.8	168.5	259.8	48.6	228.2
晚稻 Late rice									
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—
GM _{22.5}	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100%CF	150.0	32.7	99.6	—	—	—	150.0	32.7	99.6
60%CF+GM ₁₅	90.0	32.7	59.8	—	—	—	90.0	32.7	59.8
60%CF+GM _{22.5}	90.0	32.7	59.8	—	—	—	90.0	32.7	59.8
60%CF+GM ₃₀	90.0	32.7	59.8	—	—	—	90.0	32.7	59.8
60%CF+GM _{37.5}	90.0	32.7	59.8	—	—	—	90.0	32.7	59.8

土壤 MBC、MBN、DOC、DON。另一份土壤经风干磨碎过筛,用于测定 SOC 和 TN。

土壤 MBC、MBN 采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定^[13],土壤浸提液 TN 采用开氏法测定^[14]。称取经前处理的土样 6 份,每份土壤 10 g(烘干基),其中 3 份置于真空干燥器内用氯仿熏蒸 24 h,熏蒸后的土样反复抽真空去除残存氯仿,另 3 份做未熏蒸空白试验,熏蒸和未熏蒸土样用 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄ 浸提(180 r·min⁻¹,振荡 1 h)。过滤后取 15 mL 提取液,加入 15 mL 2% 六偏磷酸钠后用碳自动分析仪(岛津 Vwp,日本)测定。熏蒸与未熏蒸土样提取的有机碳差值除以转换系数 K_c(0.45)得到 MBC,未熏蒸土样提取的有机碳即为 DOC。另取 3 mL 提取液,加硫酸铜和浓硫酸消化,消化后使用流动注射仪(Fiastar5000,瑞典福斯)测定样品,熏蒸与未熏蒸土样浸提液 TN 的差值除以转换系数 K_N(0.45)得到 MBN。同时未熏蒸土样浸提液测定 NH₄⁺-N 的含量,DON 为未熏蒸土样浸提液中的 TN 与 NH₄⁺-N 含量的差值。

SOC 测定采用重铬酸钾容量法外加热法,TN 采用浓硫酸消煮-凯氏定氮法测定^[15]。

1.4 数据处理

数据处理及统计分析采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件数据处理系统。

2 结果与分析

2.1 紫云英不同翻压量对双季稻产量的影响

从图 1 可以看出,连续 11 a 不同处理早、晚稻及全年产量呈锯齿状波动。不施肥处理随耕种年限推移,地力消耗,产量呈下降的趋势。不同年份各施肥处理早、晚稻及全年产量均显著高于不施肥处理,表明本试验中各施肥处理均能增加水稻产量,且相同年份不同施肥处理之间的变化趋势基本一致,但同一处理不同年度间稻谷产量均有较大波动,这可能与年度间自然因素差异有关。

2008—2018 年不同处理早、晚稻及全年两季稻谷平均产量如表 3 所示。可以看出,施肥能增加水稻产量,施肥处理早、晚稻及全年两季稻谷产量均显著高于 CK 和 GM_{22.5} 处理($P<0.05$)。与 CK 相比,施肥处理早、晚稻及全年两季稻谷产量增长幅度分别为 69.9%~84.9%、36.3%~42.3% 和 49.2%~57.6%。与 GM_{22.5} 相比,施肥处理早、晚稻及全年两季稻谷产量增长幅度分别为 36.2%~48.3%、23.6%~29.1% 和 28.8%~36.1%。单施紫云英可显著增加水稻产量($P<0.05$),

GM_{22.5} 处理早、晚稻及全年两季稻谷产量分别比 CK 处理增产 24.7%、10.3% 和 15.8%。化肥减施 40% 条件下各紫云英不同翻压量处理早稻和全年两季稻谷产量较 100%CF 差异不显著。由图 2 可知,早稻及全年稻谷产量在本试验 4 个翻压量水平下随着紫云英翻压量增加而增加,均在 60%CF+GM_{37.5} 处理达到最高;晚稻稻谷产量在一定范围内随紫云英翻压量增多而提高,超过一定量时产量呈下降趋势,拟合方程表明,其最高点为 30.4 t·hm⁻²。除翻压紫云英 15 t·hm⁻² 外,其他紫云英与化肥配施处理晚稻稻谷产量与常规施肥相比无显著差异。可见,在化肥减量 40% 条件下,

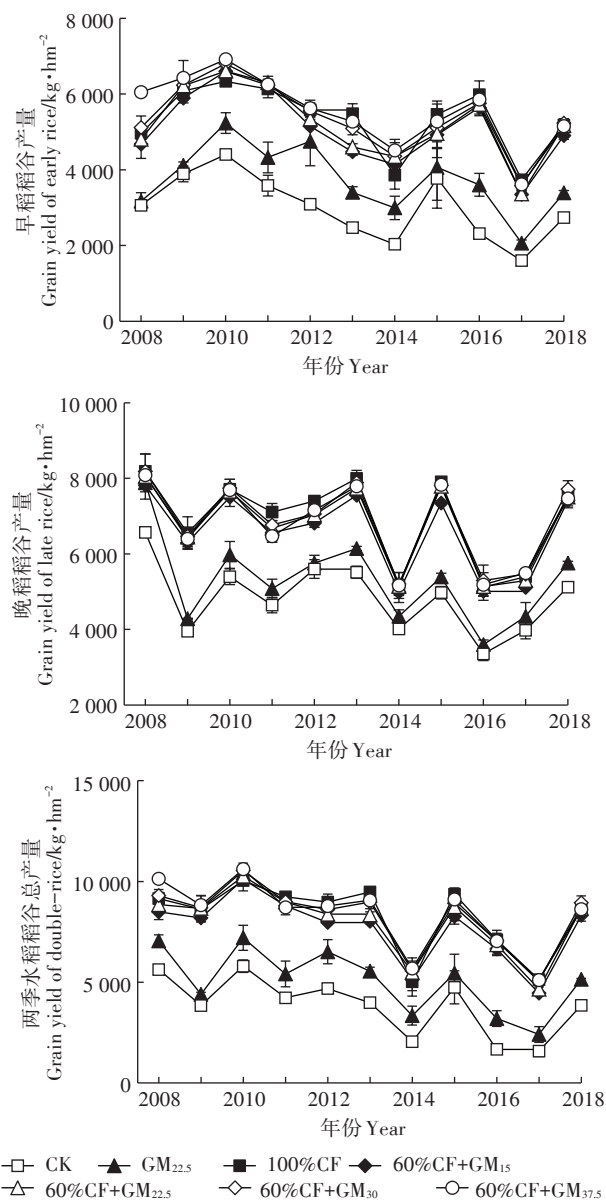


图1 不同施肥处理早稻、晚稻及全年产量动态变化

Figure 1 Dynamic change of early rice yield, late rice yield and annual rice yield under different treatments

表3 不同施肥处理11 a早、晚稻平均产量及增长率

Table 3 The average rice yields and yield increment of different fertilizer treatments in 11 years

处理 Treatments	早稻 Early rice		晚稻 Late rice		两季 Total	
	产量 Yield/kg·hm ⁻²	增长率 Increment/%	产量 Yield/kg·hm ⁻²	增长率 Increment/%	产量 Yield/kg·hm ⁻²	增长率 Increment/%
CK	2 996±248c	—	4 829±53d	—	7 825±272c	—
GM _{22.5}	3 737±356b	24.7	5 325±180c	10.3	9 062±536b	15.8
100%CF	5 345±293a	78.4	6 917±164a	43.2	12 262±371a	56.7
60%CF+GM ₁₅	5 089±265a	69.9	6 583±188b	36.3	11 673±438a	49.2
60%CF+GM _{22.5}	5 221±220a	74.2	6 771±159ab	40.2	11 992±345a	53.3
60%CF+GM ₃₀	5 369±224a	79.2	6 873±170a	42.3	12 242±378a	56.4
60%CF+GM _{37.5}	5 541±155a	84.9	6 794±57ab	40.7	12 335±172a	57.6

注:同列数据后不同字母表示在0.05水平上差异显著。下同。

Note: Values followed by different letters in the same column are significantly different among treatments at the 0.05 level. The same below.

除60%CF+GM₁₅处理外,其他紫云英与化肥配施处理对早、晚稻及全年两季稻谷产量均无显著影响,原因主要由于双季稻是一个连续生产的过程,同时本试验为连续11 a长期定位试验,紫云英与化肥的长期配合施用既能满足水稻对速效养分的吸收利用,又利用了紫云英氮、磷、钾和有机质等养分缓慢释放的特点,能够长效提供水稻所需的养分。

2.2 紫云英不同翻压量对土壤肥力的影响

由表4可知,100%CF处理和化肥减施40%下各紫云英不同翻压量处理SOC、TN、碱解氮、有效磷及速效钾含量均显著高于CK($P<0.05$),且高于GM_{22.5}处理。与CK相比,GM_{22.5}处理显著增加SOC、TN及有效磷含量($P<0.05$),且土壤TN含量与100%CF处理基本持平。化肥减量下各紫云英还田处理SOC含量均高于100%CF处理,除60%CF+GM₁₅处理外,其他3个处理与100%CF相比差异显著($P<0.05$),其中以紫云英翻压量30 t·hm⁻²最高。与100%CF相比,除60%CF+GM₁₅处理外,其他紫云英还田量显著增加碱解氮和TN含量,其中均以紫云英还田量为22.5 t·hm⁻²时最高。化肥减量并翻压紫云英处理土壤有效磷含量均显著高于100%CF处理,增幅为16.3%~39.1%,同样以紫云英翻压22.5 t·hm⁻²最高。60%CF+GM₃₀处理土壤有效磷含量较其他紫云英还田量显著降低。紫云英翻压37.5 t·hm⁻²时土壤速效钾含量最高,翻压15 t·hm⁻²紫云英土壤速效钾含量与100%CF相比差异不显著,而翻压22.5 t·hm⁻²和30 t·hm⁻²紫云英时,土壤速效钾含量与100%CF相比显著降低($P<0.05$)。

2.3 紫云英不同翻压量对土壤活性有机碳、氮的影响

图3表明,各处理土壤MBC、MBN、DOC、DON含量分别为662~1187、68~143、76~115、11.8~17.5 mg·

kg⁻¹。各施肥处理均不同程度地提高了土壤MBC、MBN、DOC、DON含量。100%CF处理和化肥减施40%下各紫云英不同翻压量处理土壤MBC、MBN、DOC、DON含量较CK提高幅度分别为48.3%~79.3%、73.9%~111.8%、30.0%~51.5%、29.6%~47.9%。与CK相比,GM_{22.5}处理显著增加了土壤MBC、MBN含量($P<0.05$),增长幅度分别为37.0%、44.8%。GM_{22.5}处理土壤DOC、DON含量较CK显著增加,且均高于100%CF处理。在减施40%化肥下各紫云英不同翻压量处理土壤MBC、MBN、DOC、DON含量均高于100%CF处理。

土壤MBC、MBN与DOC、DON密切相关,且存在一定消长动态关系。本研究以DOC+MBC、DON+MBN作为土壤活性有机碳、氮成分进行分析。土壤MBC、MBN占土壤活性有机碳、氮的比例较大,分别达到90.6%、87.7%,而土壤DOC、DON占土壤活性有机碳、氮的比例较低,仅为9.4%、12.3%。说明土壤MBC、MBN是土壤活性有机碳、氮的主要成分,与土壤活性有机碳、氮的总量更为密切。

由图4可知,在减施40%化肥下各紫云英不同翻压量处理土壤MBC、MBN、DOC、DON、DOC+MBC、DON+MBN含量随紫云英翻压量增加的变化趋势基本一致,在一定范围内均随紫云英翻压量的增加而升高,超过一定量后呈下降趋势。MBC、MBN、DOC、DON、DOC+MBC、DON+MBN随紫云英翻压量的变化趋势及拟合方程表明,翻压量最高点不同,变化范围为21.1~28.5 t·hm⁻²。

2.4 紫云英不同翻压量对土壤碳氮比的影响

图5表明,MBC/SOC、DOC/SOC和(MBC+DOC)/SOC分别为2.62%~3.83%、0.30%~0.40%和2.91%~4.21%。与CK相比,紫云英与化肥配施处理显著提

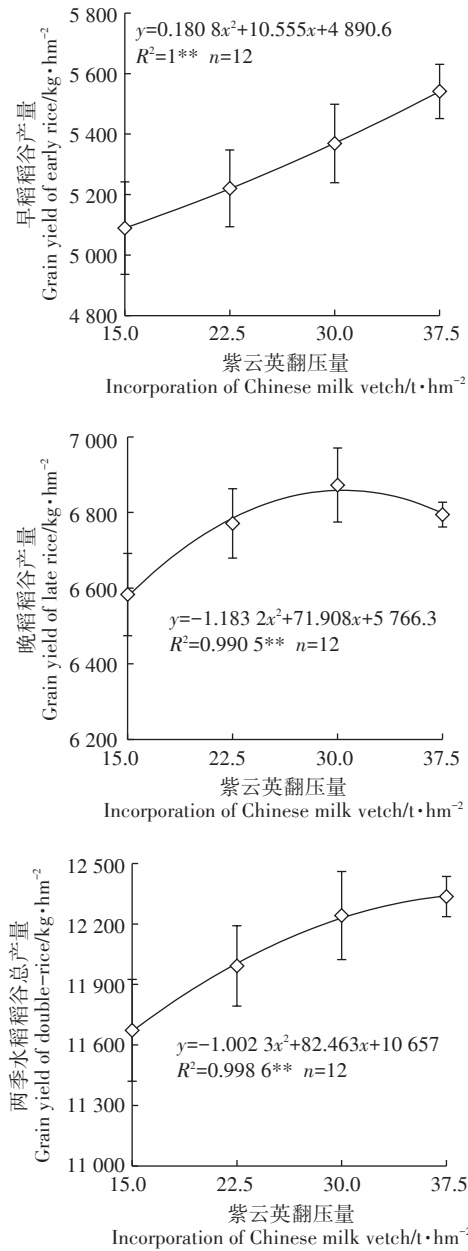
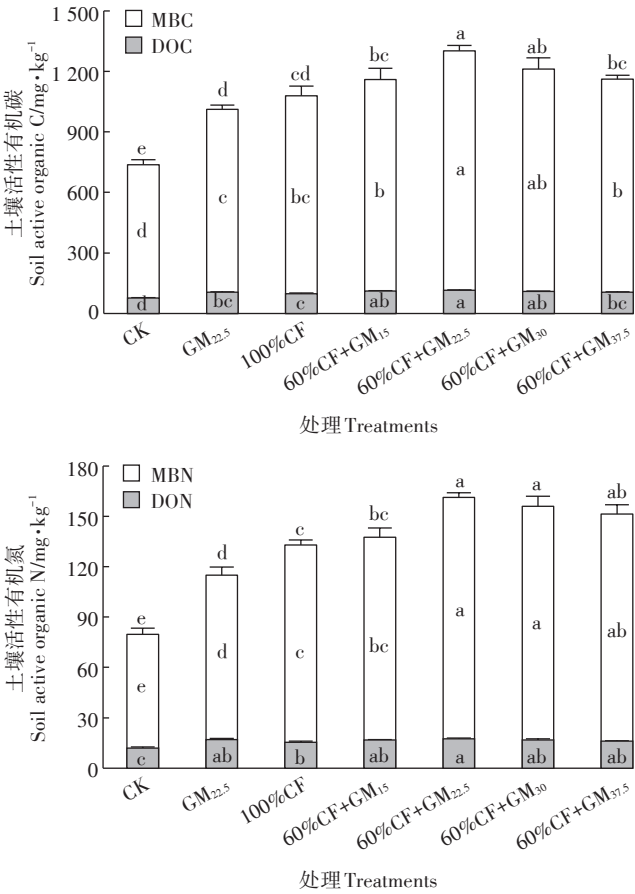


图2 紫云英翻压量与早、晚稻及全年两季稻谷产量的关系
Figure 2 Relationship between incorporation of Chinese milk vetch with early rice, late rice and double-rice

高了 MBC/SOC、DOC/SOC 和 (MBC+DOC)/SOC ($P<0.05$)。减施 40% 化肥下各紫云英翻压量处理 MBC/SOC 与 100%CF 相比差异不显著,随着紫云英翻压量增加先增加至 3.83% 后降低为 3.48%,以 60%CF+GM_{22.5} 处理为最高。紫云英翻压量为 15~22.5 t·hm⁻² 时,DOC/SOC 显著高于 100%CF 处理,当翻压量为



不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同
The different lowercase letters indicate significant differences among treatments($P<0.05$). The same below

图3 紫云英不同翻压量对土壤活性有机碳、氮的影响
Figure 3 Effect of different incorporation rates of Chinese milk vetch on soil active organic carbon and nitrogen

表4 2018年晚稻后不同施肥处理土壤养分含量

Table 4 Soil nutrient content in different treatments after later rice harvesting in 2018

处理 Treatments	有机碳 SOC/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	碱解氮 Avail N/mg·kg ⁻¹	有效磷 Avail P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Avail K/mg·kg ⁻¹
CK	25.3±0.15f	3.02±0.04e	225±6.7d	5.6±0.3g	87.3±1.7d
GM _{22.5}	27.4±0.17e	3.20±0.02d	232±8.6cd	8.7±0.6f	87.8±1.4d
100%CF	28.1±0.09d	3.19±0.07d	241±7.8bc	21.5±0.5e	98.6±2.0ab
60%CF+GM ₁₅	28.3±0.12d	3.22±0.06d	230±5.0cd	28.0±0.4b	95.9±1.8bc
60%CF+GM _{22.5}	30.9±0.19b	3.68±0.03a	261±5.9a	29.9±0.3a	93.0±1.1c
60%CF+GM ₃₀	31.5±0.18a	3.37±0.07c	254±6.1a	25.0±0.8d	93.2±1.9c
60%CF+GM _{37.5}	30.4±0.22c	3.59±0.06b	250±4.9ab	26.2±0.3c	100.2±2.2a

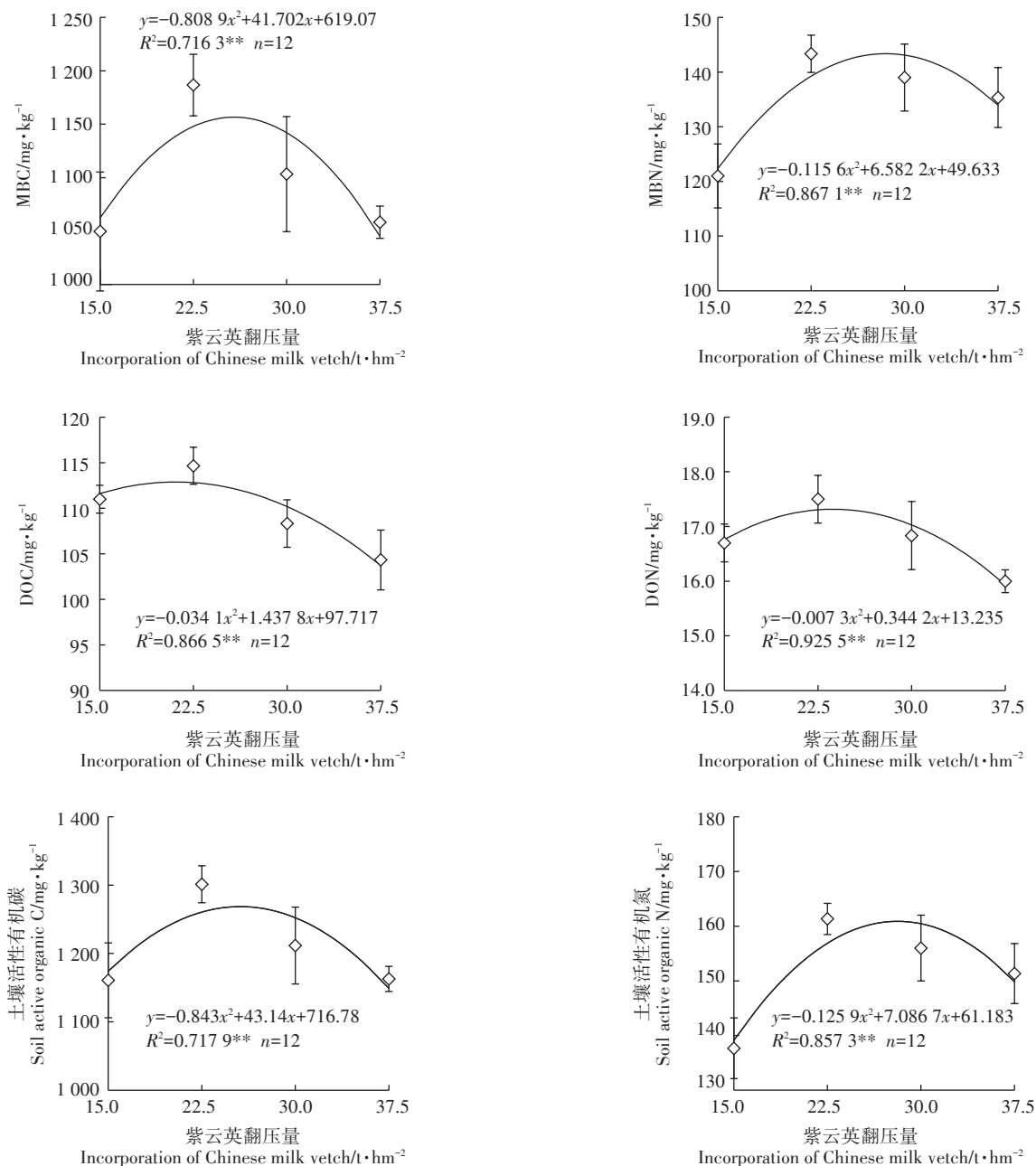


图4 紫云英翻压量与土壤各形态活性有机碳、氮的关系

Figure 4 Relationship between incorporation of Chinese milk vetch with different active organic carbon and nitrogen

37.5 t·hm⁻²时,则下降至0.34%,以60%CF+GM₁₅处理为最高(0.40%)。(MBC+DOC)/SOC随着紫云英翻压量增加的变化趋势与MBC/SOC相一致。

图5表明,MBN/TN、DON/TN和(MBN+DON)/TN分别为2.24%~4.12%、0.39%~0.53%和2.64%~4.61%。与CK相比,紫云英与化肥配施处理显著提高了MBN/TN、DON/TN和(MBN+DON)/TN ($P < 0.05$)。减施40%化肥下各紫云英翻压量处理MBN/TN与MBC/SOC的变化趋势类似,同样与100%CF处理相比差异不显

著,但最高点不同,MBN/TN以60%CF+GM₃₀处理为最高(4.12%)。DON/TN与DOC/SOC的变化趋势类似,均以60%CF+GM₁₅处理最高(0.52%)。(MBN+DON)/TN随紫云英翻压量增加的变化趋势与MBN/TN相一致。

土壤微生物量碳氮比(MBC/MBN)可用于表征微生物群落结构特征。据研究报道^[2],土壤中细菌的碳氮比为3~5,放线菌为5~7,真菌为4.5~15。从图5可以看出,与CK相比,施肥处理的MBC/MBN普遍降

低。各处理土壤 MBC/MBN 均在 7 以上,表明土壤中细菌、真菌以及放线菌均占有一定的比例,而冬闲无肥区以真菌为主。

2.5 土壤不同形态碳、氮及双季稻产量间的相关性分析

由表 5 可以看出, MBC、MBN、DOC、DON、DOC+MBC、DON+MBN 之间均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。MBC、MBN、DOC、DON 与 SOC、TN 均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$),从相关程度看, MBC、MBN 与 SOC、TN 的相关程度较高,相关系数分别为 0.86、0.75、0.92、0.81。DOC+MBC、DON+MBN 与土壤中其他形态碳、氮的相关程度最高,说明 DOC+MBC、DON+MBN 比 DOC、DON 更能准确反映土壤活性有机碳、氮的变化,是表征土壤活性有机碳、氮变化的稳定指标。因此,DOC+MBC、DON+MBN 可作为评价土壤肥力及质量的预测指标。

土壤碳、氮与多年早、晚稻及两季平均产量间的相关性分析(表 5)表明,土壤 MBC、MBN、DOC、DON、DOC+MBC、DON+MBN 与早、晚稻及全年两季稻谷产

量均呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。可以看出,与 DOC 和 DON 相比, MBC 和 MBN 与早、晚稻及全年两季稻谷产量的相关性更强。另外,除了土壤 MBC 和 MBN 可以作为水稻产量的灵敏性指标外,从相关系数来看, SOC 对产量的影响也较大,说明本研究中 SOC 也可作为水稻产量的灵敏性指标。

3 讨论

3.1 紫云英不同翻压量对 SOC 和 TN 的影响

SOC 是表征土壤地力和衡量土壤质量的重要指标,它在提供作物生长所需养分、改善土壤结构、提高土壤保水保肥能力等方面具有重要作用^[11]。绿肥中有机物的含量占 15%~20%^[9],其翻压后由于直接向土壤中输入了外源有机质,为微生物活动提供了丰富的碳源和氮源,在促进土壤有机质分解矿化、土壤养分循环和难溶性养分转化方面有积极作用,从而增加 SOC 含量。然而不同种类的绿肥还田对 SOC 的贡献不同。Thomsen 等^[16]研究结果表明,每年向土壤中分

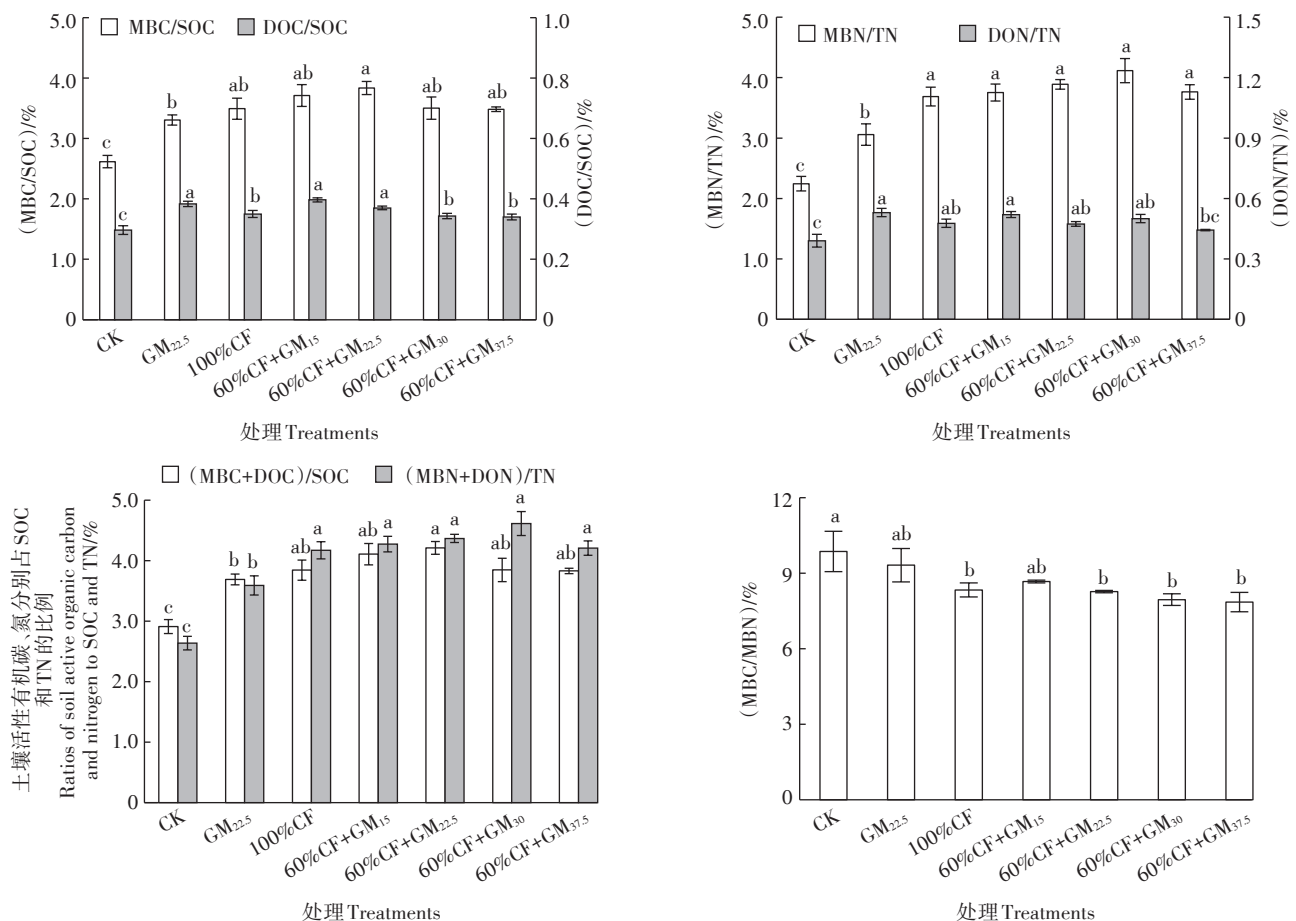


图5 紫云英不同翻压量对土壤碳氮比的影响

Figure 5 Effect of different incorporation rates of Chinese milk vetch on soil C and N

表5 土壤不同形态碳、氮及双季稻产量间的相关系数

Table 5 Correlation between different forms C, N and rice yield

指标 Indexs	SOC	TN	DOC	DON	MBC	MBN	DOC+MBC	DON+MBN
SOC	1							
TN	0.84**	1						
DOC	0.72**	0.62**	1					
DON	0.64**	0.56**	0.90**	1				
MBC	0.86**	0.75**	0.85**	0.72**	1			
MBN	0.92**	0.81**	0.76**	0.63**	0.94**	1		
DOC+MBC	0.86**	0.75**	0.87**	0.74**	0.99**	0.93**	1	
DON+MBN	0.92**	0.81**	0.80**	0.67**	0.95**	0.99**	0.94**	1
早稻产量	0.80**	0.66**	0.65**	0.62**	0.78**	0.85**	0.78**	0.86**
晚稻产量	0.80**	0.63**	0.64**	0.58**	0.82**	0.86**	0.82**	0.86**
全年产量	0.80**	0.65**	0.65**	0.60**	0.81**	0.86**	0.80**	0.86**

注:**表示0.01的显著水平。

Note:**indicate significant difference at the 0.01 level.

别施入8、12 t·hm⁻²的黑麦草时,SOC含量分别提高了21%、30%。Yu等^[7]研究表明,施用紫云英绿肥SOC提高了24.5%。高菊生等^[17]对连续26 a翻压3种绿肥的研究表明,不同种类的绿肥还田均有利于SOC含量的积累,尤其是种植紫云英效果最显著,年增加0.31 g·kg⁻¹,高于双季稻与油菜及双季稻与黑麦草轮作。本研究中化肥减施40%条件下紫云英各翻压量处理均不同程度地提高了SOC含量,提高幅度为11.6%~24.4%,同时由于紫云英氮含量丰富,翻压后增加了土壤TN含量,增幅为6.7%~22.2%。紫云英与化肥配施能增加土壤有效氮含量,这可能是由于紫云英是豆科绿肥,其根部聚集大量的根瘤菌,具有很强的生物固氮作用,翻压还田后在微生物的作用下释放大量的有机无机养分,进而增加了土壤中氮含量。

吕玉虎等^[18]研究显示,翻压不同量紫云英配施减量化肥均显著提高了SOC含量,在一定范围内随紫云英翻压量增加而增加,当超过一定量时增加幅度显著降低。Ghimire等^[19]长期研究结果表明,有机物料碳投入量与SOC呈正相关关系。在本研究中,在化肥减量40%条件下,紫云英翻压15~30 t·hm⁻²时SOC含量随着紫云英翻压量增加而增加,当紫云英翻压量增加至37.5 t·hm⁻²时SOC含量增加幅度却显著降低,这与上述吕玉虎等^[18]研究结果类似,但与Ghimire等^[19]研究结果有差异,这可能是由于紫云英是C/N较低的有机物料,投入量较大时更有利于土壤微生物的利用并建成较大的微生物群落^[8],进而引起“起爆效应”,从而加速了土壤中原有机碳的损失所致^[20]。

3.2 紫云英与化肥配施提高土壤MBC、MBN和DOC、DON含量

土壤MBC、MBN、DOC、DON是土壤有机质中最活跃的组分,其对环境因子的变化非常敏感,是揭示土壤肥力和质量变化的重要指标^[21]。有研究表明,与单施化肥相比,施用有机肥能有效提高土壤MBC、MBN、DOC、DON、DOC+MBC、DON+MBN含量^[9,22]。

Sekhon等^[23]研究表明,稻麦轮作制度下化肥与有机肥配合施用均能提高土壤中MBC和DOC含量,其中配施绿肥处理土壤中MBC和DOC含量分别提高了30.2%和56.5%。陈春兰等^[5]研究表明,长期化肥与绿肥及秸秆配施土壤活性碳、氮含量较单施化肥显著提高,单施化肥未能显著提高土壤中活性碳、氮含量。本研究中减施40%化肥下各紫云英翻压量处理土壤MBC、MBN、DOC、DON、DOC+MBC、DON+MBN含量均高于常规施肥处理,这与上述前人的研究结果一致,但本研究中土壤MBC和MBN含量显著高于上述陈春兰等^[5]研究结果,可能主要是由于本研究的土壤肥力较高所致。紫云英与化肥配施能提高土壤活性碳、氮含量,这一方面可能与长期紫云英与化肥配合施用向土壤输入的大量活性有机物质显著提高SOC和TN含量有关^[7],并且相关分析表明土壤MBC、MBN、DOC、DON含量与SOC、TN呈显著正相关关系(表5)。另一方面,有机物料的大量输入,既补充了碳源,将紫云英中的碳同化为微生物体碳^[24],提高了土壤中微生物的数量和活性^[25],同时又改善了土壤理化性状,促进了无机氮转化为MBN和其他有机氮形式^[26]。

万水霞等^[12]研究表明,化肥减施30%条件下翻压紫云英 $7.5\sim 30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时土壤MBC和MBN含量显著高于单施化肥处理,且随紫云英施用量的增加而提高。在本研究中,紫云英翻压量超过 $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,土壤MBC、MBN、DOC、DON含量有降低的趋势,原因一方面可能是由于过量的紫云英翻压,其腐解过程会产生较多的还原性气体,同时还会积累一些有害离子,使微生物数量下降^[22];另一方面可能是由于高量紫云英的添加加剧作物根系与土壤微生物对养分吸收竞争,这与周凤等^[27]研究的不同生物炭用量对土壤微生物量影响的试验结果类似,但与万水霞等^[12]研究的MBC和MBN对紫云英翻压量的响应程度及陈安强等^[21]研究的土壤DOC与有机肥使用量呈正相关关系有差异,可能与施用有机物料的种类、有机无机肥配比比例不同有关。常规施肥处理的土壤MBC、MBN、DOC、DON含量较不施肥处理显著提高,这是因为施用无机肥后,作物产量增加,归还土壤的作物残体量也相应增多,提供了土壤中微生物可利用的碳源,进而增强了微生物活性^[28]。

单施紫云英处理显著增加土壤DOC和DON含量,且略高于常规施肥处理。DOC与土壤含水量密切相关,稻田淹水的状态更有利于土壤有机质分解过程中溶出大量的DOC,且稻田淹水条件下施入紫云英对DOC溶出的影响时间更长^[2]。DON含量增加一方面可能是由于紫云英绿肥参与土壤养分循环及固氮作用,大量的氮素通过紫云英还田回到土壤中,导致土壤DON含量增加;另一方面可能是由于翻压新鲜绿肥增加了土壤活性有机碳、氮,进而改变土壤微生物特征,促进了紫云英有机物质的转化和利用,引起微生物量、作物凋落物和根系分泌物增加,利于DON含量提升^[9]。周国朋等^[29]研究表明,紫云英与化肥配施处理较单施紫云英处理显著增加土壤DOC含量。本研究中,单施紫云英处理土壤DOC和DON含量和紫云英与化肥配施处理均无明显差异,这与上述周国朋等^[29]研究结果有差异,可能与土壤类型、施肥量以及田间管理措施等不同有关。

3.3 MBC、MBN和DOC、DON与SOC和TN的比值关系

土壤微生物熵(MBC/SOC)是反映土壤碳动态的灵敏指标,能有效指示有机物输入后土壤MBC转化的效率和碳素损失^[30]。而土壤中DOC与SOC的比值可反映土壤微生物量的活性^[31]。有研究表明,施用绿肥可提高MBC/SOC和DOC/SOC^[30]。本研究中,紫云英与化肥配施提高了MBC/SOC,主要可能是由于有机无机

配施改善了土壤化学和生物环境,增强了土壤微生物活性,有利于土壤碳的“源”和“汇”^[11]。土壤中MBC/SOC一般为1%~4%^[30],本研究中各处理MBC/SOC平均值为3.42%。杨曾平等^[9]研究的稻-稻-绿肥耕作制度中土壤MBC/SOC介于3.67%~4.55%,与本研究结果基本一致,表明长期施用绿肥加快了双季稻田SOC周转速率。徐阳春等^[32]研究的稻麦轮作下麦季土壤微生物熵为0.22%~0.33%,远低于本研究结果,这可能与麦季土壤微生物群落结构发生改变有关。DOC/SOC比值随着紫云英翻压量增加而减小,说明紫云英翻压量增加能显著增加SOC的含量,但微生物量活性却可能会降低^[1]。这可能是因为虽然施用有机物料增加了DOC的溶出,但其增加幅度却低于SOC的增加幅度,从而导致DOC/SOC有所降低。

土壤MBN和DON与TN的比值(MBN/TN、DON/TN)是反映土壤氮素可利用性的指标^[33]。汪文霞等^[34]研究了黄土区不同土壤类型土壤MBC、MBN和DOC、DON的含量及其关系,结果表明MBN/TN大于DON/TN。陈安强等^[2]报道了施用有机物料可提高土壤MBC、MBN和DOC、DON含量,MBN/TN小于DON/TN。本研究中MBN/TN大于DON/TN,与上述的研究结果有差异,可能与气候条件、供试土壤类型及种植制度不同有关。韩晓日等^[35]研究发现,有机无机肥配施比单施有机肥可提高MBN/TN,较常规施肥可降低MBN/TN。在本研究中,紫云英与化肥配施处理MBN/TN显著高于单施紫云英,也高于常规施肥,这与上述韩晓日等^[35]研究结果有差异,可能是由于本研究中紫云英与化肥配施处理施氮总量高于单施化肥(表1),且紫云英C/N低,较易分解和被固定。石思博等^[1]研究表明,高量菌渣化肥配施降低了MBN/TN和DON/TN。本研究发现,减施40%化肥下紫云英翻压 $15\sim 30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 提高了MBN/TN和DON/TN,当紫云英翻压量超过 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时呈降低趋势,这与上述石思博等^[1]研究结果类似。说明过量施用紫云英虽然增加土壤TN的含量,但土壤氮素的可利用性可能会降低。这可能是由于施用绿肥紫云英提高了微生物的数量及活性,进而抑制土壤氮素的矿化,增加对氮素的同化,使更多的铵态氮进入土壤活性有机氮库中^[36-37]。可见,适量的翻压紫云英对提高氮素可利用性具有重要意义。

4 结论

(1)在减施40%化肥条件下,早稻及全年两季稻

谷产量随紫云英翻压量的增加而增加,紫云英翻压量为 $15\sim 30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,晚稻稻谷产量随紫云英翻压量的增加而增加,当翻压量多于 $30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时呈下降趋势。紫云英翻压量为 $22.5\sim 37.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,早、晚稻及全年两季稻谷产量较常规施肥相比基本持平。

(2)长期化肥减施条件下,翻压适量紫云英不仅能提高土壤MBC、MBN和DOC、DON含量,同时有利于提高土壤MBC的转化效率、微生物量活性及氮素可利用性。

(3)综合考虑双季稻的产量效应及土壤肥力的维持和提高,在本试验条件下或与该试验区域生态条件类似的双季稻种植区,在减施40%化肥条件下,紫云英施用量以 $22.5\sim 30\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的效果较好。

参考文献:

- [1] 石思博,王旭东,叶正钱,等.菌渣化肥配施对稻田土壤微生物量碳氮和可溶性碳氮的影响[J].生态学报,2018,38(23):8612-8620.
SHI Si-bo, WANG Xu-dong, YE Zheng-qian, et al. Effects of the combination of fungal residue and chemical fertilizer on soil microbial biomass carbon and nitrogen and dissolved organic carbon and nitrogen in paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(23):8612-8620.
- [2] 陈安强,付斌,鲁耀,等.有机物料输入稻田提高土壤微生物碳氮及可溶性有机碳氮[J].农业工程学报,2015,31(21):160-167.
CHEN An-qiang, FU Bin, LU Yao, et al. Exogenous organic materials applied to paddy field improving soil microbial biomass C, N and dissolved organic C, N[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(21):160-167.
- [3] Taylor J P, Wilson B, Mills M S, et al. Comparison of microbial numbers and enzymatic activities in surface soils and subsoils using various techniques[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(3):387-401.
- [4] Wang S F, Wang X K, Ouyang Z Y. Effects of land use, climate, topography and soil properties on regional soil organic carbon and total nitrogen in the Upstream watershed of Miyun reservoir, north China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(3):387-395.
- [5] 陈春兰,涂成,陈安磊,等.红壤双季稻田土壤活性碳、氮周年变化及影响因素[J].植物营养与肥料学报,2018,24(2):335-345.
CHEN Chun-lan, TU Cheng, CHEN An-lei, et al. Annual variation of active carbon and nitrogen contents and the related factors in red paddy soils of subtropical China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(2):335-345.
- [6] 曹卫东,黄鸿翔.关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J].中国土壤与肥料,2009(4):1-3.
CAO Wei-dong, HUANG Hong-xiang. Ideas on restoration and development of green manures in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009(4):1-3.
- [7] Yu Q G, Hu X, Ma J W, et al. Effects of long-term organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196:1-7.
- [8] 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.
GAO Song-juan, CAO Wei-dong, BAI Jin-shun, et al. Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4):902-910.
- [9] 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 Zeng-ping, GAO Ju-sheng, ZHENG Sheng-xian, 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.
- [10] 黄威,陈安磊,王卫,等.长期施肥对稻田土壤活性有机碳和氮的影响[J].农业环境科学学报,2012,31(9):1854-1861.
HUANG Wei, CHEN An-lei, WANG Wei, et al. Effect of long-term fertilization on active organic carbon and nitrogen in paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 31(9):1854-1861.
- [11] 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.
YAN Zhi-lei, FANG Yu, CHEN Ji-chen, et al. Effect of turning over Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on soil nutrients and microbial properties in paddy fields[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(5):1151-1160.
- [12] 万水霞,朱宏斌,唐杉,等.紫云英与化肥配施对安徽沿江双季稻区土壤生物学特性的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):387-395.
WAN Shui-xia, ZHU Hong-bin, TANG Shan, et al. Effect of *Astragalus sinicus* manure and fertilizer combined application on biological properties of soil in Anhui double cropping rice areas along the Yangtze River[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2):387-395.
- [13] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
WU Jin-shui, LIN Qi-mei, HUANG Qiao-yun, et al. Soil microbial biomass methods and application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [14] Yu Z S, Northup R R, Dahlgren R A. Determination of dissolved organic nitrogen using persulfate oxidation and conductimetric quantification of nitrate-nitrogen[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analyses*, 1994, 25(19):3161-3169.
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
LU Ru-kun. Analysis methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [16] Thomsen I K, Christensen B T. Yields of wheat and soil carbon and nitrogen contents following long-term incorporation of barley straw and ryegrass catch crops[J]. *Soil Use and Management*, 2004, 20(4):432-438.
- [17] 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.
GAO Ju-sheng, CAO Wei-dong, LI Dong-chu, et al. Effects of long-

- term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4542-4548.
- [18] 吕玉虎, 郭晓彦, 李本银, 等. 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. LÜ Yu-hu, GUO Xiao-yan, LI Ben-yin, et al. Effects of the incorporation of various amounts of Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) and reducing chemical fertilizer on soil fertility rice yield[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2017(5): 94-98.
- [19] Ghimire R, Machado S, Bista P. Decline in soil organic carbon and nitrogen limits yield in wheat-follow systems[J]. *Plant Soils*, 2018, 422: 423-435.
- [20] 朱祖祥. 从绿肥的起爆效应探讨它的肥效机制及其在施用上的若干问题[J]. *浙江农业科学*, 1963(3): 104-109. ZHU Zu-xiang. Discussions on the mechanisms of green manure application effect and problems on green manure application practice focus on the priming effect[J]. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 1963(3): 104-109.
- [21] Chu H Y, Hosen Y, Yagi K, et al. Soil microbial biomass and activities in a Japanese andisol as affected by controlled release and application depth of urea[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2005, 42(2): 89-96.
- [22] Li J, Wen Y, Li X, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 175: 281-290.
- [23] Sekhon K S, Singh J P, Mehla D S. Soil organic carbon pools after seven years of manures and mineral fertilizers application in a rice-wheat rotation[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2009, 55(2): 197-206.
- [24] Ocio J A, Martinez J, Brookes P C. Contribution of straw-derived N to total microbial biomass N following incorporation of cereal straw to soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, 23(7): 655-659.
- [25] Bittman S, Forge T A, Kowalenko C G. Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(4): 613-623.
- [26] Fan J L, Xiao J, Liu D Y, et al. Effect of application of dairy manure, effluent and inorganic fertilizer on nitrogen leaching in clayey fluvo-aquic soil: A lysimeter study[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 206-214.
- [27] 周 凤, 耿增超, 许晨阳, 等. 生物炭用量对壤土微生物量及碳源代谢活性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(8): 1277-1289. ZHOU Feng, GENG Zeng-chao, XU Chen-yang, et al. Effects of bio-char addition on soil microbial biomass and metabolic activities of carbon sources in Lou soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(8): 1277-1289.
- [28] Böhme L, Langer U, Böhme F. Microbial biomass enzyme activities and microbial community structure in two European long-term field experiments[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 109(1/2): 141-152.
- [29] 周国朋, 曹卫东, 白金顺, 等. 多年紫云英-双季稻下不同施肥水平对两类水稻土有机质及可溶性有机质的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(21): 4096-4106. ZHOU Guo-peng, CAO Wei-dong, BAI Jin-shun, et al. Effects of different fertilization levels on soil organic matter and dissolved organic matter in two paddy soils after multi-years' rotation of Chinese milk vetch and double-cropping rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(21): 4096-4106.
- [30] 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.
- [31] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土活性碳的影响[J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 554-559. YUAN Ying-hong, LI Hui-xin, HUANG Qian-ru, et al. Effects of long-term different fertilization on labile organic carbon in red paddy soil[J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 554-559.
- [32] 徐阳春, 沈其荣, 冉 炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89-96. XU Yang-chun, SHEN Qi-rong, RAN Wei. Effect of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N, and P after sixteen years of cropping[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89-96.
- [33] 陈 哲, 杨世琦, 张晴雯, 等. 冻融对土壤氮素损失及有效性的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(4): 1083-1094. CHEN Zhe, YANG Shi-qi, ZHANG Qing-wen, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil nitrogen loss and availability[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4): 1083-1094.
- [34] 汪文霞, 周建斌, 严德翼, 等. 黄土区不同类型土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮的含量及其关系[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(6): 103-106. WANG Wen-xia, ZHOU Jian-bin, YAN De-yi, et al. Contents of soil microbial biomass C, N and K₂SO₄-extractable organic C, N and their relations in different soil types on Loess Plateau of China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(6): 103-106.
- [35] 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. HAN Xiao-ri, ZHENG Guo-di, LIU Xiao-yan, et al. Dynamics, sources and supply characteristic of microbial biomass nitrogen in soil applied with manure and fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(4): 765-772.
- [36] Zhang J B, Zhu T B, Cai Z C, et al. Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil nitrogen transformations[J]. *European Journal of Soil Science*, 2012, 63(1): 75-85.
- [37] Bittman S, Forge T A, Kowalenko C G. Responses of the bacterial and fungal biomass in a grassland soil to multi-year applications of dairy manure slurry and fertilizer[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2005, 37(4): 613-623.