



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

土壤活性氮动态变化及氮素可利用性对紫云英翻压量的响应

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. 土壤活性氮动态变化及氮素可利用性对紫云英翻压量的响应[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 448–456.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0250>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

紫云英翻压条件下氮肥运筹对双季稻产量和肥料利用率的影响

王慧, 唐杉, 武际, 胡润, 韩上, 刘英, 朱勤, 李敏, 王允青, 石祖梁

农业资源与环境学报. 2018, 35(4): 327–333 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0321>

冬季作物-双季稻轮作模式资源利用效率及经济效益比较研究

张帆

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 87–95 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0013>

施氮水平对稻-稻-紫云英稻田土壤细菌数量及群落结构的影响

周艳飞, 聂江文, 王幼娟, 刘章勇, 朱波

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 508–517 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0021>

减肥条件下生物炭施用方式对土壤肥力及酶活性的影响

刘遵奇, 兰宇, 杨铁鑫, 张艺潇, 孟军

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 544–551 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0143>

油菜绿肥翻压还田对新疆盐碱土壤的改良效果研究

刘慧, 李子玉, 白志贵, 刘建国

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 914–923 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0566>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

程会丹, 鲁艳红, 聂军, 等. 土壤活性氮动态变化及氮素可利用性对紫云英翻压量的响应[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 448–456.

CHENG Hui-dan, LU Yan-hong, NIE Jun, et al. Effect of application rate of Chinese milk vetch on soil active nitrogen dynamics and nitrogen availability[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 448–456.



开放科学 OSID

土壤活性氮动态变化及氮素可利用性 对紫云英翻压量的响应

程会丹^{1,2}, 鲁艳红^{1,3}, 聂军^{1,2,3}, 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:通过田间定位试验,研究了减量化肥紫云英不同翻压量下土壤活性氮的含量、动态变化及氮素可利用性,探讨了紫云英鲜草的适宜翻压量和土壤氮素利用效率,为双季稻合理施用氮肥提供理论依据。在稻-稻-紫云英轮作体系典型时期紫云英翻压前、早稻分蘖盛期、早稻成熟期、晚稻分蘖盛期、晚稻成熟期分别采集土壤样品,监测稻田土壤微生物量氮(MBN)、可溶性有机氮(DON)含量动态变化及氮素可利用性,并分析晚稻成熟期土壤铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^+\text{-N}$)含量。结果表明:与对照(CK)处理相比,各施肥处理均提高了土壤全氮(TN)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量,增幅分别为10.4%~21.2%、10.3%~44.1%和14.7%~52.9%。在翻压紫云英15.0~22.5 t·hm⁻²时,土壤TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 含量均随紫云英还田量增多而提高,之后则随还田量的增多而降低。与常规施肥处理相比,化肥减施下紫云英各翻压量处理均提高了土壤MBN、DON及活性氮含量,增幅分别为7.0%~28.7%、8.5%~22.5%和5.8%~26.6%,且随紫云英翻压量的增加呈先增加后降低的变化趋势,MBN和活性氮含量均在翻压量22.5 t·hm⁻²时最高,DON含量在翻压量30.0 t·hm⁻²时最高。MBN/TN在翻压量22.5 t·hm⁻²时最高,DON/TN在翻压量30.0 t·hm⁻²时最高。各处理不同时期土壤MBN、DON含量及MBN/TN、DON/TN有明显波动,总体来看,土壤MBN含量及MBN/TN在早稻分蘖盛期明显降低,早稻成熟期有所回升,至晚稻成熟期又逐渐降低;土壤DON含量及DON/TN在早稻成熟期降至最低,至晚稻成熟期再次上升。研究表明,减施40%化肥条件下长期翻压紫云英不仅能增加土壤活性氮含量,同时有利于提高土壤氮素可利用性,紫云英翻压量22.5~30.0 t·hm⁻²时效果最好。

关键词:紫云英;无机氮;微生物量氮;可溶性有机氮;氮素利用性

中图分类号:S153.6;S142 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)03-0448-09 doi: 10.13254/j.jare.2020.0250

Effect of application rate of Chinese milk vetch on soil active nitrogen dynamics and nitrogen availability

CHENG Hui-dan^{1,2}, LU Yan-hong^{1,3}, NIE Jun^{1,2,3}, 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. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: A located field experiment was conducted to investigate, dynamic change of the soil active nitrogen concentration, and nitrogen availability under application of reduced chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch. Another aim was to explore the optimal

收稿日期:2020-05-14 录用日期:2020-07-24

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:国家重点研发计划(2017YFD0301504,2018YFD03006);国家绿肥产业技术体系(CARS-22-G-11);湖南省农业科技创新资金项目(2018ZD02-2,2019LS03-1)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2017YFD0301504, 2018YFD03006); The National Green Manure Industrial Technology System of China (CARS-22-G-11); Agricultural Science-Technology Innovation Fund of Hunan Province, China (2018ZD02-2, 2019LS03-1)

application rate of Chinese milk vetch fresh grass and nitrogen utilization efficiency, thus providing theoretical basis for the rational application of nitrogen fertilizer in double cropping paddy soil. Soil samples were collected in the typical period of rice-rice-Chinese milk vetch rotation, i.e., before the incorporation of Chinese milk vetch (S1), tillering stage of early rice (S2), mature stage of early rice (S3), tillering stage of late rice (S4), and mature stage of late rice (S5). The samples were analyzed for the dynamic changes in soil microbial biomass nitrogen (MBN), dissolved organic nitrogen (DON), and nitrogen availability. The concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ in the soil at the mature stage of late rice were also analyzed. The results showed that compared with CK treatment, each fertilization treatment led to an increase in the concentration of soil total nitrogen (TN), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), with an increase of 10.4%~21.2%, 10.3%~44.1%, and 14.7%~52.9%, respectively. The concentrations increased with the amount of Chinese milk vetch applied ($15.0\sim 22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$), but showed a decreasing trend when the applied amount was over $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$. Compared with the conventional fertilization, the application of reduced chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch led to an increase in the contents of soil MBN, DON, and active nitrogen, with an increase of 7.0%~28.7%, 8.5%~22.5%, and 5.8%~26.6%, respectively. The concentrations of MBN, DON, and active nitrogen increased first and then decreased with the increase in the amount of Chinese milk vetch. The content of both MBN and active nitrogen was highest at $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ of Chinese milk vetch, while that of DON was highest at $30.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ of Chinese milk vetch. The ratio of MBN to TN was highest at $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ of Chinese milk vetch, whereas that of DON to TN was highest at $30.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ of Chinese milk vetch. The concentrations of MBN and DON in soil and the ratios of MBN to TN and DON to TN fluctuated significantly between different periods of the same treatment. In general, the soil MBN concentration and the ratio of MBN to TN decreased significantly in the tillering stage of early rice, rebounded in the mature stage of early rice, and gradually decreased in the mature stage of late rice. The soil DON concentration and the ratio of DON to TN decreased to the lowest level in the mature stage of early rice, and then increased again in the mature stage of late rice stage. Comprehensively, the long-term cultivation of Chinese milk vetch under 40% reduced chemical fertilization can not only increase the soil active nitrogen concentration, but also improve the soil nitrogen availability. Moreover, the optimal application rate of Chinese milk vetch is recommended as $22.5\sim 30.0\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$.

Keywords: Chinese milk vetch; inorganic nitrogen; microbial biomass nitrogen; dissolved organic nitrogen; nitrogen availability

肥料施用在维持粮食作物生产力方面发挥了重要作用,为保障国家粮食安全提供了重要支撑,然而大量施用化肥而忽视有机肥的施用是我国粮食生产中的突出问题。我国目前的化肥施用强度约为世界平均水平的3.9倍^[1],但化肥对粮食增长的贡献率从20世纪80年代的30%~40%下降到目前的10%左右^[2]。化肥的大量施用不仅使农业生产成本增加,而且造成了肥料养分利用率偏低、环境负荷增大等问题日趋突出。绿肥是我国传统农业的精华,已有3 000多年的种植历史,然而在过去30年间我国绿肥的种植却严重缩减。近年来政府、社会和广大种植户对绿肥重视度不断提高,推动了绿肥的恢复发展,这也提升了绿肥在农业可持续发展中的作用。

紫云英作为绿肥还田具有替代部分化肥、培肥土壤、改善生态环境等作用^[3]。紫云英通过生物固氮可以减少化肥氮的施用和氮素损失,对提高土壤氮素利用效率具有重要意义^[4]。

国内外研究表明,紫云英翻压还田由于直接向土壤中输入了大量的氮素养分,能明显提高土壤活性氮含量^[5]。张帆等^[6]比较了3种绿肥对土壤微生物量氮(MBN)的影响,结果表明紫云英能明显提高土壤MBN含量。Yu等^[7]研究表明施用绿肥紫云英有利于

提高MBN和可溶性有机氮(DON)的含量。陈春兰等^[8]也发现紫云英与化肥配施能明显增加土壤活性氮含量。万水霞等^[9]研究表明减量化肥与不同量紫云英配施均提高了土壤MBN含量,其中紫云英翻压量为 $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时效果最好。然而,这些研究主要集中在土壤MBN、DON含量方面,而对土壤氮素可利用性研究较少。另外,不同的耕作、施肥模式以及水稻不同生育时期的土壤温度和土壤含水量均有很大差异,对土壤活性氮周年变化具有一定的影响^[10]。然而目前对减量化肥紫云英不同翻压量下土壤活性氮的动态变化研究较少。因此,本研究利用田间定位试验,研究了紫云英不同翻压量下土壤活性氮含量的动态变化及氮素可利用性,探讨了紫云英替代化肥的生态效应和适宜翻压量,为双季稻田合理施用紫云英和氮肥提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于湖南省南县三仙湖乡万元桥村($29^{\circ}11'29''\text{N}$, $112^{\circ}18'20''\text{E}$),海拔30 m,属亚热带季风性湿润气候,成土母质为河湖沉积物发育的紫潮泥。该地区年降水量约1 238 mm,年平均气温约16.6 $^{\circ}\text{C}$,年

日照时数约 1 775 h。

1.2 试验设计

试验按随机区组排列,共设 7 个处理,如表 1 所示。各处理紫云英翻压前(2018 年 4 月 10 日)土壤基本理化性质见表 2。小区面积 20 m²,宽 4 m,长 5 m,每个处理设 3 次重复。紫云英于每年晚稻收获后播种,供试品种为湘紫 1 号,播种量为 22.5 kg·hm⁻²,盛花期测定各小区鲜草产量,并将其全部混匀后按照各处理用量进行翻压。紫云英年均干基养分含量为 N 37.5 g·kg⁻¹、P 3.50 g·kg⁻¹、K 37.2 g·kg⁻¹,含水量为 88.9%。施用化肥为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 12%)、氯化钾(K₂O 60%)。全量化肥用量早晚稻均为 N 150 kg·hm⁻²、P₂O₅ 75 kg·hm⁻²、K₂O 120 kg·hm⁻²。减施化肥的处理中仅氮、钾肥减施 40%。磷肥、钾肥均作基肥施入,氮肥按基肥和追肥 1:1 施入。早稻品种为“湘早籼 45 号”,晚稻品种为“黄华占”。

1.3 样品的采集与测定

土壤样品于 2018 年共采集 5 次,分别是紫云英翻压前 10 d(S1,紫云英盛花期)、早稻分蘖盛期(S2)、早稻成熟期(S3)、晚稻分蘖盛期(S4)及晚稻成熟期(S5)。按“S”形采集 0~20 cm 的耕层土壤,在每个小区中取 7 点,混匀后分取一半保存于 4 ℃冰箱中以测

定土壤 MBN 和 DON,剩余的土样通风阴干,用于测定土壤全氮(TN)含量。另外,晚稻成熟期土壤样品用于测定土壤铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-N)含量。早晚稻成熟后每小区单打单晒,分别测质量计产。

利用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法测定土壤 MBN,其计算方法为熏蒸与未熏蒸土壤 TN 含量之差除以转换系数 K_N(0.45)^[11]。土壤 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 用 0.5 mol·L⁻¹ K₂SO₄浸提,过滤后使用 FIAstar 5000(瑞典福斯)流动注射仪测定。土壤 DON 为未熏蒸土样浸提液中的 TN 与 NH₄⁺-N 含量的差值,未熏蒸土样浸提液 TN 与 NO₃⁻-N 含量的总和即为土壤可溶性全氮(TDN)。土壤 TN 测定采用浓硫酸消煮-凯氏定氮法^[12]。

1.4 土壤活性氮及氮素有效性的计算方法

土壤活性氮包括 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、MBN、DON^[8],本研究中,土壤活性氮含量为 TDN 和 MBN 含量之和;用 MBN/TN(%)和 DON/TN 表征氮素可利用性^[13-14]。

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件进行数据的处理和统计分析,对土壤 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、MBN、DON、TDN+MBN 含量及 MBN/TN、DON/TN 通过 Duncan 新复极差法进行方差多重比较,在 α=0.05 水平下检验差异显著性;利用 Pearson 相关分析检验水稻产量、氮素有效性及土壤活性氮之间的相关性。绘图用 Microsoft Excel 2010 完成。

2 结果与分析

2.1 紫云英不同翻压量下土壤全氮周年变化特征

不同时期各处理土壤 TN 含量如图 1 所示。从各个时期分析,与 CK 处理相比,除 S2、S3 阶段差异未达到显著水平外,其他时期各施肥处理土壤 TN 含量较 CK 显著提高,与 100%CF 处理相比,不同时期紫云英与化肥配施处理均提高了土壤 TN 含量,且随紫云英

表 1 试验设计
Table 1 Trial design

处理 Treatment	施肥 Fertilization
CK	冬闲且不施化肥
GM _{22.5}	施紫云英 22.5 t·hm ⁻²
100%CF	常规施化肥
60%CF+GM _{15.0}	60% 化肥,翻压紫云英 15.0 t·hm ⁻²
60%CF+GM _{22.5}	60% 化肥,翻压紫云英 22.5 t·hm ⁻²
60%CF+GM _{30.0}	60% 化肥,翻压紫云英 30.0 t·hm ⁻²
60%CF+GM _{37.5}	60% 化肥,翻压紫云英 37.5 t·hm ⁻²

表 2 紫云英翻压前土壤基本理化性质
Table 2 The basic soil properties before the Chinese milk vetch application

处理 Treatment	pH	有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)
CK	7.7	38.1	2.6	177.0	7.8	81.0
GM _{22.5}	7.8	47.9	3.1	222.3	10.3	83.0
100%CF	7.7	51.8	3.1	245.3	26.5	99.0
60%CF+GM _{15.0}	7.7	49.5	3.2	238.7	23.6	86.0
60%CF+GM _{22.5}	7.7	52.0	3.4	271.7	28.1	91.0
60%CF+GM _{30.0}	7.7	51.1	3.3	240.0	26.0	91.0
60%CF+GM _{37.5}	7.7	50.1	3.2	249.7	25.2	89.0

翻压量增加呈先增加后降低的变化趋势,除S5阶段,其他时期紫云不同翻压量处理间差异均不显著。

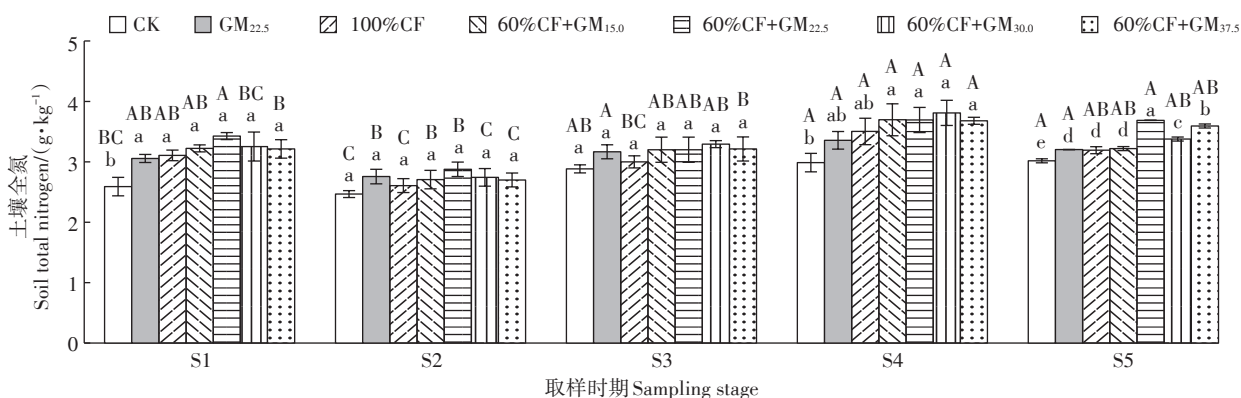
同一处理不同时期土壤TN含量有明显波动,除CK处理外,其他各处理不同时期土壤TN含量均呈先降低后升高再降低的变化趋势。即S1至S2时期各处理土壤TN含量均有所降低,其中100%CF处理及减量化肥配施紫云英22.5、37.5 t·hm⁻²处理差异达显著水平;S2至S4时期各处理土壤TN含量均显著增加;S4至S5时期除60%CF+GM_{22.5}处理外,其他各处理土壤TN含量均呈下降的趋势。

2.2 紫云英不同翻压量下土壤微生物量氮周年变化特征

图2所示为稻-稻-紫云英轮作体系典型时期土壤MBN含量。从各个时期来看,与CK处理相比,各

施肥处理不同程度地提高了土壤MBN含量。与100%CF处理相比,除S1时期紫云英翻压量15.0 t·hm⁻²和S3时期紫云英翻压量37.5 t·hm⁻²处理外,其他各时期紫云英不同翻压量处理均提高了土壤MBN含量。S3、S4及S5阶段土壤MBN含量均随紫云英翻压量增加呈先增加后降低的趋势,但最高值处理不同, S3、S5阶段以60%CF+GM_{22.5}处理为最高, S4阶段以60%CF+GM_{30.0}处理为最高。

各处理不同时期土壤MBN含量均有明显变化,除100%CF处理外,其他各处理不同时期土壤MBN含量呈先降低后升高再降低的变化趋势。即S1至S2时期各施肥处理土壤MBN含量均显著降低;S2至S3时期除60%CF+GM_{37.5}处理外,其他处理均有所增加,其中CK、GM_{22.5}、100%CF处理差异达显著水平;S3至



不同小写字母表示同一取样时期不同处理差异显著($P<0.05$);不同大写字母表示同一处理不同取样时期差异显著($P<0.05$)。S1为紫云英翻压前;S2为早稻分蘖盛期;S3为早稻成熟期;S4为晚稻分蘖盛期;S5为晚稻成熟期。下同

Different small letters indicate significant differences ($P<0.05$) among treatments; Different capital letters indicate significant differences ($P<0.05$) among stages. S1: before the incorporation of Chinese milk vetch; S2: tillering stage of early rice; S3: mature stage of early rice; S4: tillering stage of late rice; S5: mature stage of late rice. The same below

图1 不同施肥处理土壤全氮(TN)的动态变化

Figure 1 Dynamic of soil total nitrogen(TN) under different fertilizer treatments

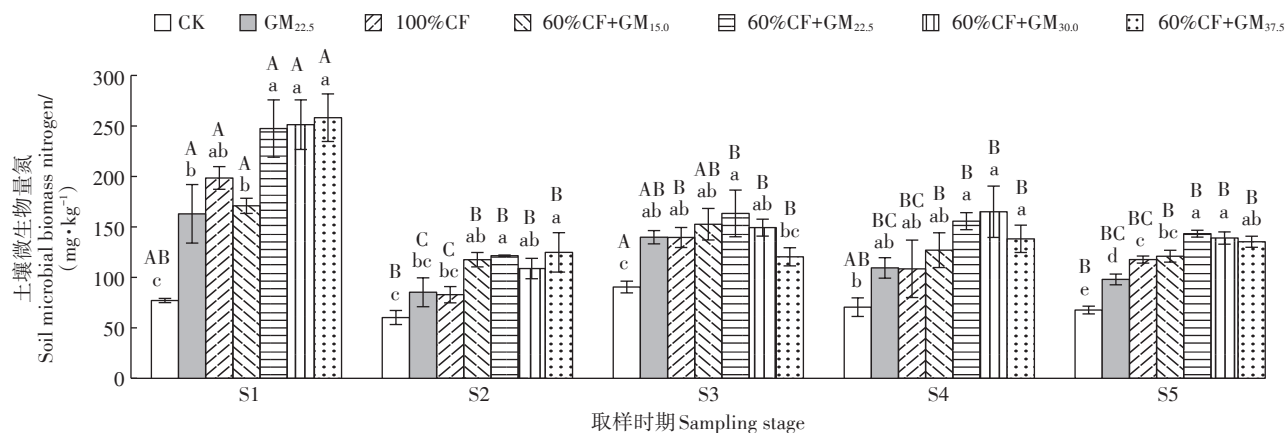


图2 不同施肥处理土壤微生物量氮(MBN)的动态变化

Figure 2 Dynamic of soil microbial biomass nitrogen(MBN) under different fertilizer treatments

S4时期60%CF+GM_{30.0}和60%CF+GM_{37.5}处理呈上升趋势,其他处理土壤MBN含量均呈下降趋势;至S5时期除100%CF处理外,其他各处理土壤MBN含量持续降低。

2.3 紫云英不同翻压量下土壤可溶性有机氮周年变化特征

图3所示为不同时期各处理土壤DON含量。从各个时期来看,与CK处理相比,不同时期紫云英各翻压量处理均显著提高了土壤DON含量($P<0.05$),但S1、S2和S5时期各紫云英翻压量处理间差异不显著。S3、S4及S5时期各紫云英翻压量处理土壤DON含量与100%CF相比有所提高,S3时期土壤DON含量随紫云英翻压量增加而增加,以60%CF+GM_{37.5}处理为最高;S4、S5时期土壤DON含量随紫云英翻压量增加呈先增加后降低的趋势,但最高值处理不同,S4阶段以翻压量30.0 t·hm⁻²为最高,S5阶段以翻压量22.5 t·hm⁻²为最高。

各处理不同时期土壤DON含量有明显波动,除60%CF+GM_{30.0}和60%CF+GM_{37.5}处理呈先降低后升高

再降低的变化趋势外,其他各处理不同时期土壤DON含量均呈先降低后升高的变化趋势。即S1至S3时期各处理土壤DON含量均呈下降趋势,除60%CF+GM_{22.5}和60%CF+GM_{37.5}处理差异不显著外,其他各施肥处理均显著降低;S3至S4时期除GM_{22.5}处理外,其他各处理均增加了土壤DON含量,其中紫云英与化肥配施各处理差异显著;至S5时期除60%CF+GM_{30.0}和60%CF+GM_{37.5}处理呈下降的趋势外,其他各处理均有所增加,其中CK、GM_{22.5}处理差异显著。

2.4 土壤全氮和活性氮对紫云英翻压量的响应

由表3可知,与CK处理相比,各施肥处理不同程度地提高了土壤TN、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N含量,增幅分别为10.4%~21.2%、10.3%~44.1%和14.7%~52.9%。与100%CF相比,减施40%化肥下各紫云英不同翻压量处理均提高土壤TN、NO₃⁻-N含量,且随紫云英翻压量增加呈先增加后降低的变化趋势,均以60%CF+GM_{22.5}处理为最高。与100%CF处理相比,紫云英与化肥配施处理提高了土壤MBN、DON、TDN+MBN含量,增幅分别为7.0%~28.7%、8.5%~22.5%和5.8%~26.6%。

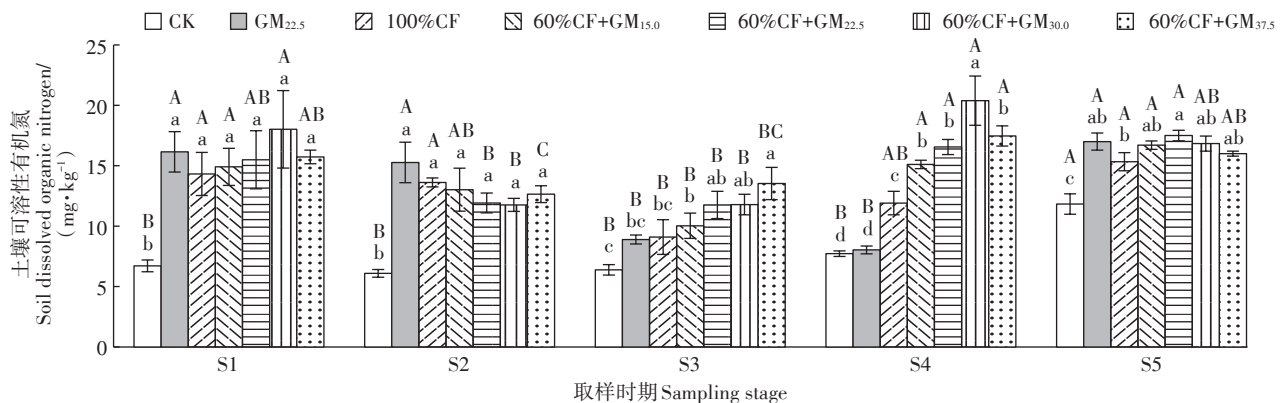


图3 不同施肥处理土壤可溶性有机氮(DON)的动态变化

Figure 3 Dynamic of soil dissolved organic nitrogen (DON) under different fertilizer treatments

表3 不同施肥处理土壤各形态氮含量

Table 3 Soil nitrogen contents of various forms under different fertilizer treatments

处理 Treatments	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(mg·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	微生物量氮 MBN/(mg·kg ⁻¹)	可溶性有机氮 DON/(mg·kg ⁻¹)	活性氮 TDN+MBN/(mg·kg ⁻¹)
CK	2.79c	9.16b	0.34b	73.20d	7.75e	90.40e
GM _{22.5}	3.11b	9.17b	0.35b	119.00c	13.10cd	142.00d
100%CF	3.08b	11.30ab	0.39ab	129.00bc	12.90d	154.00cd
60%CF+GM _{15.0}	3.21ab	10.80ab	0.43ab	138.00b	14.00bcd	163.00bc
60%CF+GM _{22.5}	3.38a	13.20a	0.52a	166.00a	14.70abc	195.00a
60%CF+GM _{30.0}	3.30ab	12.00ab	0.42ab	163.00a	15.80a	191.00a
60%CF+GM _{37.5}	3.28ab	10.10ab	0.46ab	156.00a	15.10ab	181.00ab

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters indicate significant differences ($P<0.05$) among treatment. The same below.

MBN和TDN+MBN含量以60%CF+GM_{22.5}处理为最高, DON含量在60%CF+GM_{30.0}处理最高。

2.5 土壤微生物量氮和可溶性有机氮占全氮的比例

由表4可以看出,土壤微生物量氮与全氮比值(MBN/TN)在各个时期的变化与土壤MBN类似,即S1至S2阶段各处理MBN/TN急剧下降,至S3阶段除60%CF+GM_{37.5}处理外,其他各处理均有所回升,S4阶段又逐渐降低,至S5阶段除100%CF、60%CF+GM_{15.0}及60%CF+GM_{37.5}处理,其他各处理持续下降。本试验中MBN/TN在2.24%~8.00%之间变化。从全年各处理均值来看,与CK相比,各施肥处理显著提高了MBN/TN ($P<0.05$),增加1.19~2.30个百分点。除60%CF+GM_{15.0}处理,其他紫云英翻压量处理MBN/TN均显著高于100%CF的全年平均水平(4.20%),以60%CF+GM_{22.5}处理为最高。

由表5可以看出,土壤可溶性有机氮与土壤全氮比值(DON/TN)各个时期的变化与土壤DON类似,即S1至S3阶段降至最低,S4阶段除GM_{22.5}处理外,其他各处理均有所回升,至S5阶段除60%CF+GM_{30.0}、60%CF+GM_{37.5}处理外,其他处理持续上升。本试验中DON/TN在0.22%~0.56%之间变化。从全年各处理均值来看,与CK相比,各施肥处理显著提高了DON/TN ($P<0.05$),增加了0.15~0.19个百分点。紫云英各翻

压量处理DON/TN均高于100%CF的全年平均水平(0.42%),其中60%CF+GM_{30.0}处理差异达显著水平($P<0.05$),但紫云英各翻压量处理间差异不显著。

2.6 水稻产量、氮素有效性与土壤活性氮的相关性

图4表明土壤MBN和DON均随着土壤TN的增加呈线性增加趋势,两者呈极显著正相关($P<0.01$)。从表6可以看出,NH₄⁺-N和NO₃⁻-N与土壤TN显著相关($P<0.05$),MBN、DON、TDN+MBN、MBN/TN、DON/TN之间均极显著正相关($P<0.01$)。早、晚稻及全年两季稻谷产量与土壤TN、MBN、DON、TDN+MBN含量及氮素有效性均极显著相关($P<0.01$),从相关系数来看,土壤TDN+MBN与产量相关程度最高,说明土壤活性氮含量变化与产量的关系更为密切。

3 讨论

刘春增等^[15]研究表明,与单施化肥相比,单施紫云英及紫云英与化肥配施均提高了土壤TN含量,且紫云英中氮素养分较化肥氮对土壤TN的提升效果更明显。本研究亦表明,减施40%化肥下各紫云英翻压量处理土壤TN含量均高于100%CF处理。单施紫云英也提高土壤TN年度平均值,且略高于100%CF处理,但单施紫云英处理全年氮的投入量(101.9 kg·hm⁻²)远低于100%CF处理(300 kg·hm⁻²),也证明了施

表4 不同时期各处理土壤微生物量氮占全氮的比例(MBN/TN,%)

Table 4 Seasonal variation of the ratio of soil microbial biomass nitrogen to total nitrogen under different treatments (MBN/TN, %)

处理 Treatments	S1	S2	S3	S4	S5	全年平均 Average
CK	2.99c	2.46d	3.13c	2.35b	2.24c	2.64d
GM _{22.5}	5.35b	3.06cd	4.43ab	3.25ab	3.06b	3.83c
100%CF	6.39ab	3.17bcd	4.65ab	3.09ab	3.69a	4.20bc
60%CF+GM _{15.0}	5.31b	4.36a	4.75ab	3.43ab	3.75a	4.32b
60%CF+GM _{22.5}	7.20ab	4.25ab	5.11a	4.24a	3.89a	4.94a
60%CF+GM _{30.0}	7.75a	3.95abc	4.54ab	4.28a	4.12a	4.93a
60%CF+GM _{37.5}	8.00a	4.59a	3.76bc	3.75a	3.76a	4.77a

表5 不同时期各处理土壤可溶性有机氮占全氮的比例(DON/TN,%)

Table 5 Seasonal variation of the ratio of soil dissolved organic nitrogen to total nitrogen under different treatments (DON/TN, %)

处理 Treatments	S1	S2	S3	S4	S5	全年平均 Average
CK	0.26b	0.25c	0.22d	0.26d	0.39c	0.28c
GM _{22.5}	0.53a	0.56a	0.28cd	0.24d	0.53a	0.43ab
100%CF	0.47a	0.52ab	0.30bcd	0.34c	0.48ab	0.42b
60%CF+GM _{15.0}	0.46a	0.48ab	0.31bc	0.41bc	0.52a	0.44ab
60%CF+GM _{22.5}	0.45a	0.41b	0.37ab	0.45b	0.47ab	0.43ab
60%CF+GM _{30.0}	0.55a	0.43b	0.36abc	0.53a	0.50ab	0.47a
60%CF+GM _{37.5}	0.49a	0.47ab	0.42a	0.48ab	0.44bc	0.46ab

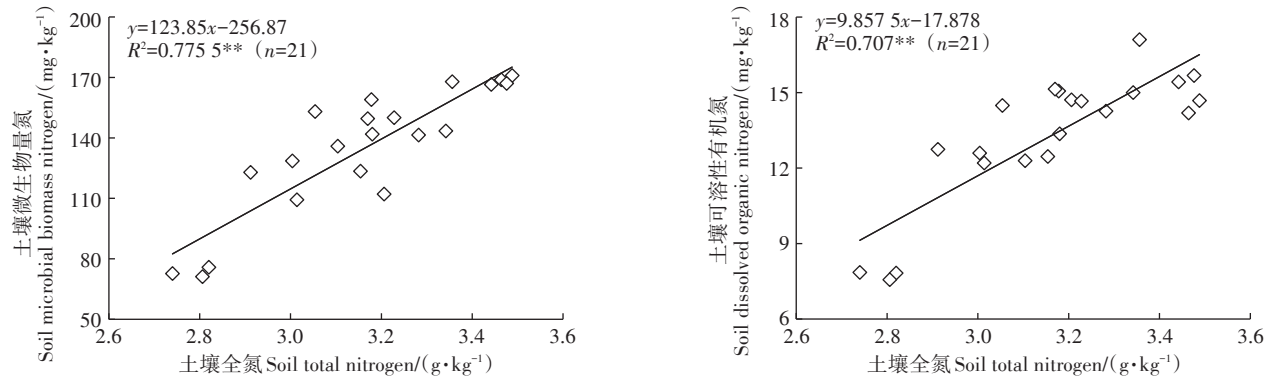


图4 土壤微生物量氮(MBN)、可溶性有机氮(DON)与全氮(TN)的关系

Figure 4 Relationships between soil microbial biomass nitrogen(MBN), dissolved organic nitrogen(DON) and total nitrogen(TN)

表6 水稻产量、氮素有效性及土壤各形态氮的相关性

Table 6 Correlation between rice yield, nitrogen availability and soil nitrogen of various forms

指标 Index	TN	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	MBN	DON	TDN+MBN	MBN/TN	DON/TN
TN	1							
NH ₄ ⁺ -N	0.496*	1						
NO ₃ ⁻ -N	0.544*	0.636**	1					
MBN	0.879**	0.477*	0.576**	1				
DON	0.841**	0.412	0.556**	0.914**	1			
TDN+MBN	0.720**	0.428	0.497*	0.872**	0.819**	1		
MBN/TN	0.761**	0.398	0.527*	0.976**	0.889**	0.875**	1	
DON/TN	0.667**	0.289	0.476*	0.815**	0.960**	0.772**	0.840**	1
早稻产量	0.676**	0.400	0.496*	0.857**	0.809**	0.993**	0.874**	0.779**
晚稻产量	0.745**	0.445	0.487*	0.866**	0.810**	0.993**	0.857**	0.749**
全年产量	0.716**	0.426	0.495*	0.868**	0.815**	1.000**	0.872**	0.769**

用紫云英较化肥氮更有利于增加土壤TN含量这一结论。前人研究表明,与单施化肥相比,长期化肥配施紫云英能显著提高土壤MBN和DON含量^[8,16]。杨曾平等^[17]研究表明长期冬种绿肥能有效提高土壤MBN含量。本研究亦表明,与100%CF处理相比,减量化肥紫云英各翻压量处理提高了土壤MBN和DON含量,这一方面可能是由于紫云英是豆科绿肥,与根瘤菌共生形成根瘤,能够从空气中固定氮素,翻压还田后增加了土壤全氮含量,且相关性分析表明土壤MBN和DON含量与土壤TN呈极显著正相关关系;另一方面,紫云英与化肥配施增强了土壤微生物固定无机氮的能力,从而促进了无机氮转化为MBN和其他形式有机氮^[18]。

在本研究中,紫云英翻压量从15.0 t·hm⁻²增加至22.5 t·hm⁻²时显著提高了土壤MBN含量,但翻压量超过22.5 t·hm⁻²时MBN含量有降低的趋势,原因可能是翻压量增加的同时作物对养分的需求也提高了,从

而会与土壤微生物争夺养分。万水霞等^[9]研究发现,除70%化肥配施7.5 t·hm⁻²紫云英外,其他紫云英翻压量处理土壤MBN含量均显著高于单施化肥处理,且随紫云英翻压量的增加而提高。本研究结果与前人研究结果的差异可能与气候条件、土壤基础肥力及化肥用量等不同有关。单施紫云英也显著增加土壤DON含量,且略高于100%CF处理。这一方面是由于紫云英具有固氮作用,生长期可吸收休闲季土壤中残留氮素,翻压还田后可释放大量的DON,同时紫云英C/N较低,还田后导致的“激发效应”也有利于提高土壤DON含量;另一方面可能是由于外源有机物料的添加增加了土壤养分的投入,提高了微生物数量,促进作物生长,增加了根茬和凋落物,从而提高DON含量^[17]。

张帆等^[6]研究了紫云英还田后水稻不同生育期土壤MBN动态变化,结果表明,土壤MBN含量6月中旬降至最低,8月中旬达到峰值,8月中旬至9月中旬

逐渐减少,至晚稻成熟期(10月中旬)又开始逐渐增加。本研究中土壤MBN含量变化趋势为早稻分蘖盛期最低、早稻成熟期有所回升、晚稻成熟期又逐渐降低,这与张帆等^[6]研究结果有差异,可能与土壤类型、紫云英与化肥的施用量及取样时期等不同有关。陈春兰等^[8]研究表明紫云英与化肥配施处理土壤DON含量从水稻生育期初期(4月)至7月显著降低,7月至8月逐渐上升,随后又逐渐降低。与上述研究结果^[8]类似,在本研究中土壤DON含量变化趋势为早稻成熟期(7月中旬)最低、晚稻分蘖盛期有所回升、晚稻成熟期又逐渐降低。

本研究中土壤MBN含量从紫云英翻压前至早稻分蘖盛期明显降低,主要由于分蘖盛期是水稻氮素营养需求量较大的时期,肥料释放的可供水稻吸收的氮素不能满足水稻生长的需求,需从土壤中吸收更多的氮素,而土壤MBN成为植物有效氮的重要储备库^[19]。另一方面可能是由于随着紫云英腐解速率的降低,微生物可利用的碳源和氮源减少,导致微生物固氮量减少^[20]。随后早稻成熟期有所回升,主要是由于早稻成熟后,地下根系逐渐衰老死亡,水稻根系分泌物和残体增加了土壤微生物可利用的碳源和氮源,促进微生物生长^[21]。而晚稻分蘖盛期水稻与微生物争夺养分,导致MBN含量降低。但60%CF+GM_{30.0}和60%CF+GM_{37.5}处理土壤MBN含量却有所增加,这一方面可能是由于早稻生物量大,凋落物及根茬的腐解为微生物繁殖提供了新的碳源和氮源,进而提高了微生物活性;另一方面可能是由于养分供应量不同造成水稻生育期略有差异,进而对养分的需求也不同,从土壤氮素养分来看,紫云英翻压30.0~37.5 t·hm⁻²时,土壤供氮量仍能够满足水稻对氮素的需求。至晚稻成熟期虽然有凋落物还田,但是受气温的影响,微生物活性较低,从而导致MBN的含量持续降低。从紫云英盛花期至早稻分蘖盛期土壤DON含量明显降低,至早稻成熟期持续降低,这与MBN的变化趋势有所不同,可能是由于DON含量与土壤含水量有关^[8],且MBN和DON之间存在一定的消长动态关系^[22]。至晚稻成熟期有所回升,主要是由于早稻收获后根茬的逐渐腐解增加了DON的溶出,温度的升高也降低了土壤对DON的吸附。

在本研究中,减量化肥紫云英各翻压量处理MBN/TN、DON/TN年度平均值均高于100%CF处理,这与刘春增等^[15]研究得到的紫云英与化肥配施更有利于提高土壤氮素可利用性的结论一致。土壤

MBN/TN和DON/TN在一定范围内随紫云英翻压量的增加而提高,超过一定量时呈降低趋势,可能是由于绿肥紫云英翻压还田提高了微生物的数量和活性,通过同化作用使较多的氮素进入土壤活性有机氮库中^[23-24]。说明过量施用紫云英可能会降低土壤氮素的可利用性,而适量的紫云英与化肥配施更有利于提高土壤氮素可利用性。

4 结论

(1)各处理不同时期土壤TN、MBN、DON含量及MBN/TN、DON/TN均有明显的季节变化,但变化趋势有所不同。土壤TN、MBN含量及MBN/TN在早稻分蘖盛期明显降低,随后早稻成熟期有所回升,至晚稻成熟期又下降;土壤DON含量及DON/TN在早稻成熟期降至最低,至晚稻成熟期再次上升。

(2)不同紫云英翻压量对土壤TN、MBN、DON及MBN/TN、DON/TN的影响趋势一致,均呈先上升后下降的变化趋势,但最高值处理不同。从全年平均来看,土壤TN、MBN及MBN/TN以60%CF+GM_{22.5}处理为最高,DON及DON/TN以60%CF+GM_{30.0}处理为最高。

(3)在本试验减量40%化肥基础上,建议施用紫云英22.5~30.0 t·hm⁻²,可提高土壤活性氮含量和氮素可利用性。

长期稻-稻-紫云英轮作能提高氮素利用效率可能是由于增加了土壤及根际微生物的数量,改善土壤微生物群落结构,从而减少氮素养分的损失。今后还需要进一步研究长期施用紫云英对土壤及根际微生物的影响,将研究层面推向土壤-植物-微生物互作水平。

参考文献:

- [1] 麻坤,刁钢. 化肥对中国粮食产量变化贡献率的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 1113-1120. MA Kun, DIAO Gang. Research on the contribution rate of fertilizer to grain yield in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(4): 1113-1120.
- [2] 张福锁,张卫峰,陈新平. 对我国肥料利用率的分析[C]//第二届全国测土配方施肥技术研讨会论文集. 北京:中国农业出版社, 2007. ZHANG Fu-suo, ZHANG Wei-feng, CHEN Xin-ping. Analysis of fertilizer utilization rate in China[C]//Proceedings of the 2nd national soil testing and formula fertilization technology seminar. Beijing: China Agricultural University Press, 2007.
- [3] 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. CAO Wei-dong, BAO Xing-guo, XU Chang-xu, et al. Reviews and prospects on science and technology of green manure in China[J]. *Journal of Plant*

- Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6):1450-1461.
- [4] Gao S J, Chang D N, Zhou C Q, et al. Archaea are the predominant and responsive ammonia oxidizing prokaryotes in a red paddy soil receiving green manures[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2018, 88:27-35.
 - [5] 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.
 - [6] 张帆, 黄凤球, 肖小平, 等. 冬季作物对稻田土壤微生物量碳、氮和微生物熵的短期影响[J]. 生态学报, 2009, 29(2):734-739. ZHANG Fan, HUANG Feng-qiu, XIAO Xiao-ping, et al. Short-term influences of winter crops on microbial biomass carbon, microbial biomass nitrogen and C_{mic} -to- C_{org} in a paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2):734-739.
 - [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] 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.
 - [9] 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.
 - [10] 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.
 - [11] 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.
 - [12] 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.
 - [13] 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.
 - [14] 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.
 - [15] 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. LIU Chun-zeng, CHANG Dan-na, LI Ben-yin, et al. Effects of planting and incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on active organic carbon and nitrogen in paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(3):657-669.
 - [16] 孙凤霞, 张伟华, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤微生物生物量碳氮和微生物碳源利用的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11):2792-2798. SUN Feng-xia, ZHANG Wei-hua, XU Ming-gang, et al. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11):2792-2798.
 - [17] 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.
 - [18] 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.
 - [19] He Z L. Soil microbial biomass and its significance in soil nutrition cycling and soil environment quality assessment[J]. *Soils*, 1997(2):61-69.
 - [20] 林诚, 王飞, 林新坚, 等. 不同紫云英翻压量对土壤酶活性及微生物生物量碳氮的影响[J]. 热带作物学报, 2011, 32(6):1020-1023. LIN Cheng, WANG Fei, LIN Xin-jian, et al. The effect of *Astragalus sinicus* manure application on soil enzyme activities and level of microbial biomass C and N[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2011, 32(6):1020-1023.
 - [21] Goyal S, Chander K, Mundra M C, et al. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29:196-200.
 - [22] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review[J]. *Soil Science*, 2000, 165(4):277-304.
 - [23] 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.
 - [24] 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.