植物营养与肥料学报 2017, 23(5): 1168–1174 doi: 10.11674/zwyf.17039
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

长期施用有机肥增加黄壤稻田土壤微生物量碳氮

郭 振[1]，王小利[1*]，徐 虎[1]，段建军[2*]，张雅蓉[3]，李 渝[3]，蒋太明[3]
（1 贵州大学农学院，贵州贵阳 550025；2 贵州大学烟草学院/贵州烟草品质研究重点实验室，贵州贵阳 550025；
3 农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站，贵州贵阳 550006）

摘要:【**目的**】微生物量碳、氮是土壤中易于利用的养分库及有机物分解和矿化的动力，与土壤养分循环密切相关，其变化可反映土壤耕作制度和土壤肥力的变化。本研究旨在揭示长期施肥对贵州黄壤稻田土壤微生物生物量碳 (SMBC) 和土壤微生物生物量氮 (SMBN) 的影响，并探讨其合理培肥模式。【**方法**】以贵州黄壤肥力与肥效长期定位监测基地为依托，采用氯仿熏蒸—K_2SO_4 提取法，重点研究不同施肥条件下土壤微生物生物量碳氮的变化及其与全量有机碳氮的关系。试验处理包括不施肥 (CK)、单施化肥 (NPK)、单施有机肥 (M)、低量有机无机肥配施 (0.5MNPK) 和高量有机无机肥配施 (MNPK)。【**结果**】长期不同施肥处理下，SMBC 的变化范围在 423.87～695.04 mg/kg 之间，SMBN 的变化范围在 44.36～91.65 mg/kg 之间。施用化肥 (NPK) 和施用有机肥及两者配施 (M、0.5MNPK 和 MNPK) 能增加 SMBC 和 SMBN 含量，其中 MNPK 处理较 CK 处理 SMBC 含量增幅最高，达 64.0%，显著高于 NPK 和 0.5MNPK 处理，但与 M 处理差异不明显；M 处理较 CK 处理 SMBN 含量增幅最高，达 106.6%，显著高于 NPK 和 0.5MNPK 处理，但与 MNPK 处理差异不明显；长期单施化肥 (NPK) 仅对 SMBN 含量有显著提高作用 (44.1%)，对 SMBC 作用不明显。SOC、TN 和微生物熵 (qMB) 的变化与 SMBC 一致，均表现为 MNPK 处理最高，其次为 M 和 0.5MNPK 处理，NPK 处理最低；所有施肥处理下的 SMBC/SMBN 无显著性差异且均低于 CK 处理。【**结论**】土壤微生物碳、氮量和微生物熵的显著提高均与土壤有机质和全氮的含量变化呈正相关，单施有机肥和高量有机无机肥配施是提高土壤微生物生物量的有效途径。

关键词: 长期施肥；黄壤稻田；土壤微生物量；微生物熵

A large number of long-term application of organic fertilizer can effectively increase microbial biomass carbon and nitrogen in yellow paddy soil

GUO Zhen[1], WANG Xiao-li[1*], XU Hu[1], DUAN Jian-jun[2*], ZHANG Ya-rong[3], LI Yu[3], JIANG Tai-ming[3]
(*1 College of Agronomy, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2 College of Tobacco Science, Guizhou University/Guizhou Key Laboratory for Tobacco Quality, Guiyang 550025, China; 3 Field Monitoring Experimental Station for Cultivated Land Preservation and Agro-environment in Guizhou, Ministry of Agriculture, Guiyang 550006, China*)

Abstract:【**Objectives**】Soil microbial biomass carbon(C) and nitrogen(N) are the easy-to-use nutrient pool and the driving forces of decomposition and mineralization of organic matter in soil, and are closely related to soil nutrient cycling. Changes of soil microbial biomass C and N can reflect the changes of soil tillage system and soil fertility. In this study, effects of a long-term fertilization on soil microbial biomass carbon (SMBC) and soil microbial biomass nitrogen (SMBN) were studied in yellow paddy fields, Guizhou Province, and a rational fertilization model was also discussed.【**Methods**】Based on the long-term located monitoring base of yellow soil fertility and fertilizer efficiency, the changes of soil microbial biomass C and N and their relationships with soil organic carbon and total nitrogen under different fertilization conditions were studied using the method of chloroform fumigation-K_2SO_4 extraction. The treatments were: no fertilizer (CK), chemical fertilizer (NPK),

收稿日期：2017–02–17 **接受日期**：2017–03–21 **网络出版日期**：2017–05–25
基金项目：国家自然科学基金项目（31360503，41361064）；贵州大学研究生创新基金（研农 2017017）；贵州省农业科学院自主创新专项（黔农科院自主创新专项 2014007 号）；贵州省科技计划项目（黔科合 NY 字〔2012〕3082 号，黔科平台〔2013〕4002 号）；贵州省联合基金（黔科合 LH 字〔2015〕7079 号）资助。
作者简介：郭振（1992—），男，陕西大荔人，硕士研究生，主要从事土壤有机碳矿化方面的研究。E-mail：675334047@qq.com
* 通信作者 E-mail：xlwang@gzu.edu.cn；djjwxl@126.com

organic manure (M), low application rate of manure combined with chemical fertilizer (0.5MNPK) and high application rate of manure combined with chemical fertilizer (MNPK).【**Results**】The results showed that SMBC varied in the range of 423.87–695.04 mg/kg and SMBN was in the range of 44.36–91.65 mg/kg under different fertilization treatments. The application of chemical fertilizers (NPK) and organic manure (M, 0.5MNPK and MNPK) could increase the SMBC and SMBN contents, and compared with the CK treatment, the MNPK treatment had the highest SMBC increase rate of 64.0%, which was significantly higher than those of the NPK and 0.5MNPK treatments, but had no significant difference with the M treatment. Compared with the CK treatment, the SMBN content of the M treatment was increased by 106.6%, which was significantly higher than those of the NPK and 0.5MNPK treatments, but the difference between M and MNPK was not significant. The long-term application of the chemical fertilizers (NPK) only significantly increased the content of SMBN (44.1%), and its effect on SMBC was not obvious. The effects of long-term fertilization on SOC, total NL and microbial quotient (qMB) were consistent with SMBC, and their contents were increased with the increase of organic fertilizer application amount, and were highest under the MNPK treatment, followed by the M and 0.5MNPK treatments, and the lowest contents were in the NPK treatment. The ratios of SMBC and SMBN had no significant differences in the fertilization treatments, and were all lower than that of the CK treatment. SMBC and SMBN had a significant positive correlation with SOC, qMB and TN, and also had a significant positive correlation with each other.【**Conclusions**】Soil microbial biomass carbon, nitrogen and microbial entropy were significantly correlated with soil organic matter and total nitrogen content. The data from the experiment indicated that the application rate of single organic manure or the high application rate of manure combined with chemical is an effective way to improve soil microbial biomass.

Key words: long-term fertilization; yellow paddy soil; soil microbial biomass; qMB

土壤微生物生物量 (SMB) 是指土壤中除活的植物体外 (如活的植物根系) 体积小于 5×10^3～10×10^3 μm^3 活的微生物总量，是土壤有机质中最活跃和最易变化的部分[1]，土壤微生物碳 (SMBC) 和土壤微生物氮 (SMBN) 分别只占耕层土壤总有机碳和全氮含量的 3% 和 5% 左右[2]。土壤微生物参与了物质转化过程中的许多生化反应，是土壤中有机质利用转化与养分循环的动力, 也是土壤有效养分的重要来源[2–4]。

SMB 含量主要受土壤温度、水分、pH 值以及施肥等耕作管理措施的影响[5–6]。由于施肥是农田增产的最主要措施之一，因此施肥对 SMB 的影响研究一直是国内外土壤科学研究的焦点之一。刘守龙等[6]研究了长期施肥对亚热带红壤稻田土壤微生物生物量碳氮磷的影响，结果表明秸秆还田和施有机肥是提高土壤微生物生物量碳、氮、磷和固持土壤养分的主要途径；Chu 等[7]认为增施有机肥能显著影响 SMBC，平衡施肥处理较养分缺乏的施肥处理 SMBC 有显著的提高；徐一兰等[8]通过 29 年长期试验的研究表明，有机无机肥配施较单施化肥 SMBC 和 SMBN 均有显著提高，而且微生物熵（qMB）也有显著提高，同时单施化肥较不施肥处理 SMBC 和 SMBN 也有显著提高；Singh 等[9]在热带森林和草原上的研究表明，在土壤养分贫瘠的情况下，伴随植物迅速生长过程氮的矿化作用加强，SMBN 含量显著降低；孙凤霞等[10]研究表明长期单施化肥下红壤 SMBC 和 SMBN 最低，可能是由于红壤本身 pH 较低，单施化肥使土壤酸化从而影响土壤微生物的活性；梁斌等[11]研究了长期施肥对褐土微生物生物量的影响，结果表明在玉米和小麦生长期间化肥加秸秆还田处理 SMBC 和 SMBN 含量均高于不施肥对照和单施化肥处理。

以往的许多研究均表明施用有机肥能显著提高土壤微生物生物量碳氮，但对于单施化肥是否能增加土壤微生物量碳、氮还存在分歧。土壤类型和施肥措施的差异也能使研究结果有所差异。因此，本研究以贵州省黄壤性水稻土长期定位试验为依托，研究不同施肥处理对黄壤稻田 SMBC 和 SMBN 的影响，为提高黄壤稻田土壤生产力，建立因地制宜的科学施肥制度和实现可持续发展提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

长期试验地位于贵州省贵阳市小河区贵州省农业科学院内 (106°07′E、26°11′N)，地处黔中丘陵区，属亚热带季风气候，平均海拔 1071 m，年均气

温 15.3℃，年均日照 1354 h 左右，相对湿度 75.5%，全年无霜期 270 d 左右，年降雨量 1100～1200 mm。试验地为黄壤性水稻土，成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物。该长期定位试验始于 1995 年 (2002 年开始水改旱一直到 2006 年，自 2007 年开始旱改水田)，初始耕层 (0—20 cm) 土壤基本性质为土壤有机质 31.15 g/kg、全氮 1.76 g/kg、全磷 2.30 g/kg、全钾 13.84 g/kg、碱解氮 134.44 mg/kg、有效磷 21.05 mg/kg、速效钾 157.89 mg/kg、pH 值 6.60。

1.2 试验设计

本研究选取该长期试验点 5 个不同施肥处理：对照 (CK)、单施化肥 (NPK)、单施有机肥 (M)、低量有机无机肥配施 (0.5MNPK) 和高量有机无机肥配施 (MNPK) 处理。试验小区面积为 201 m^2，采用大区对比试验，不设重复。所施化肥类型为尿素、普钙、氯化钾，有机肥为牛厩肥 (年平均养分含量为 C 413.8 g/kg、N 2.7 g/kg、P_2O_5 1.3 g/kg、K_2O 6.0 g/kg)。各处理每年施肥量见表 1。每年根据有机肥的养分含量来调节化学氮肥的施用量。所有肥料全部作基肥在春播之前一次性施入，水稻于每年 4 月份插秧，10 月中下旬收获。各处理具体施肥方案如表 1。

1.3 分析测定方法

在 2015 年水稻收获后进行采样，将大区分为 3 个小区，采 3 个土样作为 3 次重复，用“S”形采样法随机采集水田表层 0—20 cm 土壤，5 点组成一个土样。将采集的土样除去动、植物残体混匀分成两份，一份土样过孔径 2 mm 筛，置于冰箱 (4℃ 左右) 内用于测定微生物量碳氮；另一份土样风干后过 0.25 mm 筛，用于测定土壤总有机碳和全氮。土壤有机碳采用外加热重铬酸钾氧化法，全氮采用凯氏定氮法[12]，土壤微生物生物量碳氮采用氯仿熏蒸—0.5 mol/L K_2SO_4 浸提法测定[11, 13–14]，微生物量碳氮的换算系数分别为 0.45 和 0.54。

表 1 各处理每年施肥量

Table 1 Fertilizer application rates in the treatments

处理 Treatment	牛厩肥 (t/hm²) Cow manure	N (kg/hm²)	P_2O_5 (kg/hm²)	K_2O (kg/hm²)
CK	0	0	0	0
NPK	0	99.0	49.5	49.5
0.5MNPK	18.4	99.1	48.6	134.9
M	36.7	99.1	47.7	220.2
MNPK	36.7	198.1	97.2	269.7

1.4 数据分析

数据采用 Excel 2016 整理后，用 SPSS 17.0 软件进行 ANOVA 分析，不同处理之间采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 长期施肥对黄壤稻田 SMBC 的影响

长期施肥试验结果表明，SMBC 的变化范围在 423.87～695.04 mg/kg 之间 (图 1)。方差分析结果表明，不同施肥处理之间 SMBC 存在显著差异 ($P < 0.05$)。CK 处理的 SMBC 为 423.87 mg/kg。与 CK 处理相比，NPK 处理的 SMBC 含量增加不显著 ($P > 0.05$)。施用有机肥处理 (M、0.5MNPK 和 MNPK) 的 SMBC 含量显著高于 CK 处理和 NPK 处理 ($P < 0.05$)，增幅分别为 35.7%～64.0% 和 25.0%～51.0%。其中，M 和 MNPK 处理的 SMBC 含量显著高于 0.5 MNPK 处理 ($P < 0.05$)。以上结果表明，长期施用化肥或者有机肥均能提高 SMBC 含量，但是施用化肥的提升效果并不明显，SMBC 随有机肥施入量的增加而增加，以高量有机无机肥配合施用的效果最好。

2.2 长期施肥对黄壤稻田 SMBN 的影响

长期施肥试验结果表明，SMBN 的变化范围在 44.35～91.65 mg/kg 之间 (图 1)。方差分析结果表明，不同施肥处理之间 SMBN 存在显著差异 ($P < 0.05$)。CK 处理的 SMBN 为 44.35 mg/kg。与 CK 处理相比，NPK 处理的 SMBN 含量显著增加了 44.1% ($P < 0.05$)。施用有机肥处理 (M、0.5MNPK 和 MNPK) 的 SMBN 含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)，依次增加了 106.6%、69.2% 和 98.4%。其中，M 处理的 SMBN 含量显著高于 NPK 和 0.5MNPK 处理 ($P < 0.05$)，增幅分别为 43.4% 和 22.1%，但较 MNPK 处理增加不明显 ($P > 0.05$)；MNPK 处理的 SMBN 含量达 88.02 mg/kg，较 NPK 处理显著提高了 37.7%，较 0.5MNPK 处理的提升效果不明显。以上结果表明，长期施用化肥或者有机肥均能显著提高 SMBN 含量，以单施有机肥的效果最好。

2.3 长期施肥对黄壤稻田 SOC、TN、SMBC/SOC、SMBN/TN 和 SMBC/SMBN 的影响

长期不同施肥处理下，黄壤的 SOC、TN、SMBC/SOC、SMBN/TN 的比值和 SMBC/SMBN 的比值均发生了显著的变化 (表 2)。CK 处理的 SOC 和 TN 含量分别为 23.87 g/kg 和 1.94 g/kg。与 CK 处理相比，有机肥 (M、0.5MNPK 和 MNPK) 处理均显

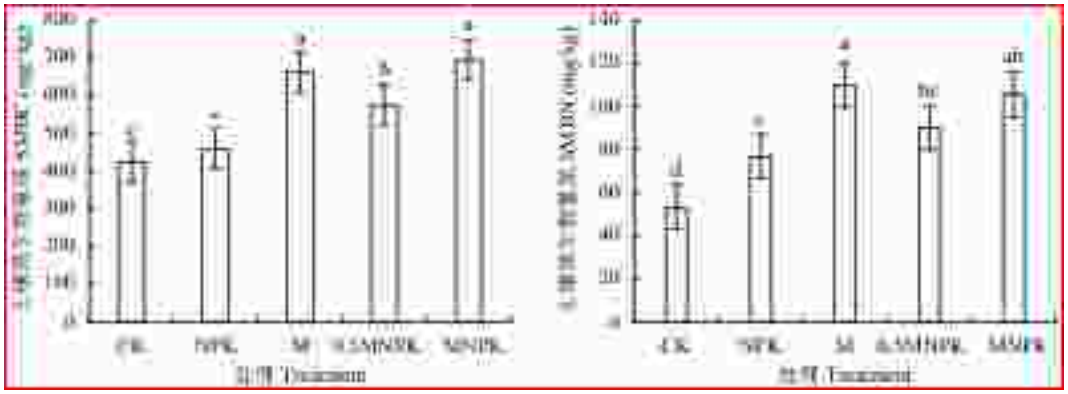

图 1　长期不同施肥处理下土壤微生物生物量碳、氮含量

Fig. 1　The contents of SMBC and SMBN under different long-term fertilizations

[注（Note）：柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P < 0.05$）

Different small letters above bars mean significant differences among the treatments at the 0.05 level.]

表 2　长期施肥土壤微生物量碳氮比及其在有机碳和全氮中的比例

Table 2　SMBC and SMBN ratios and their percentages in SOC and TN under long-term fertilizations

处理 Treatments	SOC (g/kg)	TN (g/kg)	SMBC/SOC (qMB, %)	SMBN/TN (%)	SMBC/SMBN
CK	23.87 ± 1.01 c	1.94 ± 0.02 d	1.78 ± 0.01 c	2.28 ± 0.09 b	9.57 ± 0.32 a
NPK	24.63 ± 0.13 c	1.94 ± 0.03 d	1.87 ± 0.05 bc	3.28 ± 0.14 a	7.23 ± 0.30 b
M	32.45 ± 1.37 a	2.68 ± 0.04 b	2.04 ± 0.08 ab	3.42 ± 0.27 a	7.29 ± 0.49 b
0.5MNPK	28.30 ± 1.16 b	2.38 ± 0.03 c	2.03 ± 0.18 ab	3.14 ± 0.27 a	7.70 ± 0.24 b
MNPK	33.17 ± 0.51 a	2.73 ± 0.01 a	2.10 ± 0.05 a	3.22 ± 0.15 a	7.93 ± 0.36 b

注（Note）：SOC—土壤有机碳 Soil organic C；TN—土壤全氮 Total N；SMBC—土壤微生物生物量碳 Soil microbial biomass C; SMBN—土壤微生物生物量氮 Soil microbial biomass N; 同列数值后不同小写字母表示不同处理间差异显著（$P < 0.05$）Values followed by different small letters in the same column mean significant differences among the treatments at the 0.05 level.

著提高了黄壤稻田的 SOC 和 TN 含量 ($P < 0.05$)，NPK 处理下 SOC 和 TN 的含量提高不明显 ($P > 0.05$)。SOC 含量随有机肥施用量的增加而增加，其中 MNPK 处理最高达 33.17 g/kg，显著高于 0.5MNPK 处理，与 M 处理差异不显著。全氮含量随有机肥施用量的增加而显著增加 ($P < 0.05$)，表现为 MNPK 处理的全氮含量最大 (2.73 g/kg)，其次是 M 处理 (2.68 g/kg)，0.5MNPK 处理 (2.38 g/kg) 最小。

土壤微生物熵 (qMB) 是指土壤微生物生物量碳占土壤总有机碳的百分比 (SMBC/SOC)，一般范围在 1%～4%[15]。SMBN/TN 表示 SMBN 对土壤氮库的贡献率，可用作土壤氮素供应能力和有效性的评价指示，一般范围在 2%～6% 之间[5]。本研究所测定的 qMB 范围在 1.8%～2.1% 之间，SMBN/TN 范围在 2.3%～3.4% 之间，虽然 SMB 所占比例较小，但对土壤养分的生物有效性和合理利用起到至关重要的作用。qMB 的变化反映了土壤中输入的 SOC 向 SMBC 的转化效率、土壤中碳的损失和土壤矿物对有机质的固定[16]。在长期不同施肥处理下，CK 处理的 qMB 为 1.8%，NPK 处理的 qMB 较 CK 处理的提升效果并不明显 ($P > 0.05$)。有机肥 (M、0.5MNPK 和 MNPK) 处理较 CK 处理 qMB 均有显著提高，且随着有机肥施用量的增加 qMB 也逐渐增大。所有施肥处理下的 SMBN/TN 较 CK 处理均有显著提高 ($P < 0.05$)，其中以 M 处理的 SMBN/TN 最高且各施肥处理间无显著性差异 ($P > 0.05$)。可能是因为施用化肥或有机肥改善了土壤理化性质，继而增强了土壤微生物活性，加快了有机碳和全氮的周转速率。

土壤微生物量碳氮比 (SMBC/SMBN) 可以反映土壤微生物群落结构信息，其显著变化表明土壤微生物的群落结构可以直接影响微生物量的高低[17]。细菌 SMBC/SMBN 一般情况下在 5∶1 左右，放线菌在 6∶1 左右，而真菌在 10∶1 左右[3, 18]。表 2 中 CK 处理的 SMBC/SMBN 为 10∶1 左右，显著高于其他施肥处理，而不同施肥处理间 SMBC/SMBN 无显著差异，在 7.5∶1 左右；NPK 处理下的 SMBC/SMBN 小于有机肥处理 (M、0.5MNPK 和 MNPK)；M、0.5MNPK 和 MNPK 3 个处理间均无显著性差异，表

现为施用高量有机肥的 SMBC/SMBN 最大。长期施肥均可使 SMBC/SMBN 下降，其中以单施化肥下降得最快，高量有机无机肥配施下降得最慢。说明在长期施肥下的黄壤稻田中，土壤微生物群落可能以放线菌为主，细菌和真菌也占有一定的比重。

2.4 土壤微生物生物量碳氮与土壤有机碳和全氮的相关性

土壤有机物质在微生物的作用下分解成植物可利用的有效养分，同时土壤微生物对无机营养元素也起到一定的固持作用，SMB 越大土壤养分积累得越多[19]。本研究表明，SMBC 与 SMBN 除相互间呈极显著正相关外，与 SOC、qMB、TN 也呈极显著正相关关系 (表 3)。SMBC/SMBN 仅与 SMBN/TN 呈极显著负相关。SOC 与 qMB、TN 呈极显著正相关关系，与 SMBN/TN 之间无显著相关性，同时 qMB 与 TN 之间也呈极显著正相关关系。说明 SMBC 和 SMBN 的显著提高均与 SOC 和 TN 的含量变化相关，通过施肥可以显著提高 SOC 和 TN 的含量，而微生物又以碳氮为营养来源，从而促进微生物量碳氮有显著性变化，因此 SMBC 与 SMBN 或许可作为评价土壤质量的生物学指标。

表 3 土壤微生物生物量碳、氮与土壤有机碳和全氮的相关性

Table 3 The correlationships between SMBC, SMBN, SOC and TN

项目 Item	SMBC	SMBN	SMBC/SMBN	SOC	qMB	TN	SMBN/TN
SMBC	1.00						
SMBN	0.95**	1.00					
SMBC/SMBN	–0.49	–0.72	1.00				
SOC	1.00**	0.94**	–0.45	1.00			
qMB	0.96**	0.95**	–0.59	0.93**	1.00		
TN	0.99**	0.93**	–0.42	0.99**	0.94**	1.00	
SMBN/TN	0.66	0.85*	–0.97**	0.63	0.73	0.60	1.00

注（Note）：**—$P < 0.01$; *—$P < 0.05$.

3 讨论

土壤微生物作为土壤养分循环的推动力，对土壤有机化合物的转化和养分的释放起着调控作用，且土壤微生物所进行的一系列活动均以碳、氮循环为中心。SMB 的高低反映了土壤微生物新陈代谢的强弱，是表征土壤碳库和氮库的重要指标[5]。本试验中 CK 处理长年不施肥且秸秆不还田，仅通过根系及地上部分残茬归还到土壤中，因此 SOC 和 TN 含量最低，土壤微生物生物量碳氮也处在最低水平。施用有机肥 (M、0.5MNPK 和 MNPK)，黄壤微生物生物量碳氮均有显著性提高，其中以 MNPK 处理下 SMBC 增幅最大，达到 64.0%，以 M 处理下 SMBN 增幅最大，达到 106.6%。此结果与芦思佳等[20]研究结果类似，其结果表明有机无机肥配施对黑土微生物生物量碳以及土壤有机质含量的提高有一定的促进作用。吴海燕等[21]对黑土长期定位施肥试验也表明，与 CK 处理相比，有机肥配施化肥处理黑土中 SMBC、SMBN 和微生物数量均有明显提高。另外，与长期施肥下潮土 (猪粪 22.5 t/hm^2)[4]和褐土 (猪粪 22.5 t/hm^2)[22]施用有机肥处理的试验相比，本试验中牛厩肥施用量为 36.7 t/hm^2 的处理 (M 和 MNPK)SMBC 和 SMBN 增幅最大。说明高量有机肥的施用不仅为微生物提供了外来碳源，促进其新陈代谢，而且还能改善土壤的理化性状，加强对微生物的保护。

长期单施有机肥及有机无机肥合理配施对 SMBC 和 SMBN 的促进作用较 NPK 处理更明显[3]。本试验中，施用有机肥 (M、0.5MNPK 和 MNPK) 处理与单施化肥 (NPK) 处理相比，SMBC 和 SMBN 均有较大幅度提升，增幅依次为 25.0%～51.0% 和 17.4%～43.4%。这是因为施用化肥能够增加植物的生物量[23]，其中地上部生物量的增加能够促进植物的光合作用，使得从地上部转入地下的营养物质增加，而地下部生物量的增加不仅能够促进根系分泌物的释放，还能增加根系残茬的还田量，创造了有利于微生物生存的环境。Jackson 等[24]研究结果也表明，有机肥与化肥配合施用很大程度上提高了土壤微生物的活性，土壤有机碳源得到补充的同时也提高了土壤有效养分和保水能力，所以单施有机肥和有机肥

化肥配施的土壤微生物生物量碳氮较高。与 CK 处理相比，NPK 处理的 SMBC 含量小幅增加，但未达到显著差异水平 ($P > 0.05$)，NPK 处理的 SMBN 显著增加 ($P < 0.05$)。这是因为长期施用化肥使土壤的 C/N 比降低，加速了土壤中原有有机碳的分解，导致土壤中积累的有机碳总量较少[25]。而孙凤霞等[10]对 19 年长期定位施肥的红壤样品分析表明，单施化肥显著降低了红壤微生物生物量碳含量，同时红壤微生物生物量氮含量也呈下降趋势，但未达到显著水平，这是因为长期施用化肥会使红壤逐渐酸化，从而对大多数土壤微生物的生存繁殖造成一定的影响，所以土壤酸化也是影响红壤微生物生物量碳氮的一个重要因素，因此今后应进一步加强对土壤 pH 的研究。

土壤微生物熵 (qMB) 能够反映土壤中输入的 SOC 向 SMBC 的转化效率，qMB 值越大，SOC 分解越快，活性有机碳转化得越快，土壤微生物越活跃[16]。由于 qMB 受土壤类型、耕作措施、土壤理化性质等影响，所以 qMB 的取值范围由 1%～4% 调整到 0.27%～7%[26]，本试验中 qMB 变化范围在 1.8%～2.1% 之间，与何瑞清等[15]报道的数值相符，说明不同施肥措施对土壤有机碳总量和微生物生物量的影响程度不一致。本试验不同施肥处理中，有机肥 (M、0.5MNPK 和 MNPK) 处理较 CK 处理 qMB 均有显著提高，较 NPK 处理增加不显著，而且随着有机肥施用量的增加 qMB 也逐渐增大，其中以 MNPK 处理的 qMB 最高，其原因可能是高量有机无机肥配合施用有利于改善部分土壤理化性质和生态环境，有利于土壤微生物活性的提高；同时，长期施用有机肥使 SMBC 发生变化，提高了土壤有机碳累积量和土壤微生物生物量[8]。

土壤微生物生物量碳氮是土壤碳素和氮素的重要来源，同时也具有较高的生物活性，其消长水平反映土壤微生物利用土壤碳氮源合成自身物质并大量繁殖的程度，微生物细胞解体使有机碳氮矿化的过程也与土壤微生物生物量碳氮密切相关[27]。本研究表明，NPK 处理下 SMBC/SMBN 最低，施用有机肥 (M、0.5MNPK 和 MNPK) 较 NPK 处理均有一定程度的提高。这是因为施用有机肥为土壤微生物的活动提供了碳源，同时，有机肥的降解也消耗了土壤氮素，导致黄壤稻田处于“碳源富余、氮源缺乏”的状态，最终产生较高的 SMBC/SMBN 比值，长期施用化肥加速了土壤中原有有机碳的分解，导致土壤中积累的有机碳总量减少，最终引起 SMBC/SMBN 比值较低，而且 SMBC 和 SMBN 分别与 SOC 和 TN 含量呈极显著的正相关关系。徐一兰等[8]研究结果表明，有机无机肥处理的 SMBC/SMBN 值明显高于单施化肥处理，与本研究结果相似。张奇春等[28]研究认为，NK 和 NPK 处理的 SMBC/SMBN 值小于不施肥处理。本研究结果也表明 NPK 处理下的 SMBC/SMBN 值小于 CK 处理。

4　结论

1) qMB 值和 SMBC/SMBN 比值在不同施肥处理下均有显著的变化，高量有机无机肥配施处理较不施肥处理的增幅最大，且 SMBC、SMBN、qMB 均与 SOC 和 TN 呈极显著正相关关系，说明 SMBC、SMBN 和 qMB 的显著提高均与 SOC 和 TN 的含量变化正相关。

2) 长期不同施肥处理较不施肥处理均能使 SMBC 和 SMBN 有一定程度的提高，其中以单施有机肥和高量有机无机肥配施处理增幅最为明显，单施化肥处理增幅最少，表明单施有机肥和高量有机无机肥配施是提高土壤微生物生物量的有效途径。

参 考 文 献：

[1] McGill W B, Cannon K R, Robertson J A, Cook F D. Dynamics of soil microbial biomass and water-soluble organic C in Breton L after 50 years of cropping to two rotations[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1986, 66(1): 1–19.

[2] Van Veen J A, Ladd J H, Frissel M J. Modeling C and N turnover through the microbial biomass in soil[J]. Plant and Soil, 1984, 76: 257–274.

[3] 臧逸飞, 郝明德, 张丽琼, 张昊青. 26年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1445–1451.
Zang Y F, Hao M D, Zhang L Q, Zhang H Q. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1445–1451.

[4] 刘恩科, 梅旭荣, 赵秉强, 等. 长期不同施肥制度对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 中国农业大学学报, 2009, 14(3): 63–68.
Liu E K, Mei X R, Zhao B Q, *et al*. Long-term effects of different fertilizer management on microbial biomass C, N and P in a fluvo-aquic soil[J]. Journal of China Agricultural University, 2009, 14(3): 63–68.

[5] 张洋, 倪九派, 周川, 等. 三峡库区紫色土旱坡地桑树配置模式对土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(7): 766–773.
Zhang Y, Ni J P, Zhou C, *et al*. Effects of configuration mode of crop-mulberry system in purple arid hillside field on SMBC and SMBN in the Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(7): 766–773.

[6] 刘守龙, 肖和艾, 童成立, 吴金水. 亚热带稻田土壤微生物生物量碳、氮、磷状况及其对施肥的反应特点[J]. 农业现代化研究, 2003, 24(4): 278–284.

Liu S L, Xiao H A, Tong C L, Wu J S. Microbial biomass C, N and P and their responses to application of inorganic and organic fertilizers in subtropical paddy soils[J]. Research of Agricultural Modernization, 2003, 24(4): 278–284.

[7] Chu H Y, Lin X, Fu J T, *et al*. Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(11): 2971–2976.

[8] 徐一兰, 唐海明, 肖小平, 等. 长期施肥对双季稻田土壤微生物学特性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 1–9.
Xu Y L, Tang H M, Xiao X P, *et al*. Effects of different long-term fertilization regimes on the soil microbiological properties of a paddy field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): 1–9.

[9] Singh J S, Raghubanshi A S, Singh R S, *et al*. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna[J]. Nature, 1989, 338(6215): 499–500.

[10] 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 F X, Zhang W H, Xu M G, *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.

[11] 梁斌, 周建斌, 杨学云. 长期施肥对土壤微生物生物量碳、氮及矿质态氮含量动态变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 321–326.
Liang B, Zhou J B, Yang X Y. Changes of soil microbial biomass carbon and nitrogen, and mineral nitrogen after a long-term different fertilization[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 321–326.

[12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999.
Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.

[13] Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, *et al*. Determination of soil microbial biomass and its application[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.

[14] Brookes P C, Landman A, Pruden G, *et al*. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, 17(6): 837–842.

[15] 何瑞清, 王百群, 张燕. 耕作与施肥对甘蔗地土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 118–122.
He R Q, Wang B Q, Zhang Y. Effects of tillage and fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen in sugarcane field[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(5): 118–122.

[16] 姬景红, 李杰, 李玉影, 等. 优化施肥对设施土壤微生物生物量碳氮的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2013, (9): 31–35.
Ji J H, Li J, Li Y Y, *et al*. Effects of optimized fertilization on microbial biomass C, N of greenhouse soil[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2013, (9): 31–35.

[17] Lovell R D, Jarvis S C, Bardgett R D. Soil microbial biomass and activity in long-term grassland: effects of management changes[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(7): 969–975.

[18] 刘骁蒨, 涂仕华, 孙锡发, 等. 秸秆还田与施肥对稻田土壤微生物生物量及固氮菌群落结构的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5210–5218.
Liu X Q, Tu S H, Sun X F, *et al*. Effect of different fertilizer combinations and straw return on microbial biomass and nitrogen-fixing bacteria community in a paddy soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5210–5218.

[19] 高明霞, 孙瑞, 崔全红, 等. 长期施用化肥对塿土微生物多样性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1572–1580.
Gao M X, Sun R, Cui Q H, *et al*. Effect of long-term chemical fertilizer application on soil microbial diversity in anthropogenic loess soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(6): 1572–1580.

[20] 芦思佳, 韩晓增. 长期施肥对微生物量碳的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(6): 1355–1358.
Lu S J, Han X Z. Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(6): 1355–1358.

[21] 吴海燕, 范作伟, 孙甜田, 等. 长期定位施肥玉米生育期内微生物量碳、氮和微生物数量的动态变化[J]. 玉米科学, 2016, 24(2): 147–154.
Wu H Y, Fan Z W, Sun T T, *et al*. Dynamic changes of microbial biomass carbon, nitrogen and microbial quantity in maize growth period under long-term fertilization[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(2): 147–154.

[22] 贾伟, 周怀平, 解文艳, 等. 长期有机无机肥配施对褐土微生物生物量碳、氮及酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4): 700–705.
Jia W, Zhou H P, Xie W Y, *et al*. Effects of long-term inorganic fertilizer combined with organic manure on microbial biomass C, N and enzyme activity in cinnamon soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(4): 700–705.

[23] 胡诚, 曹志平, 罗艳蕊, 马永良. 长期施用生物有机肥对土壤肥力及微生物生物量碳的影响[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(3): 48–51.
Hu C, Cao Z P, Luo Y R, Ma Y L. Effect of long-term application of microorganismic compost or vermicompost on soil fertility and microbial biomass carbon[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(3): 48–51.

[24] Jackson L E, Calderon F J, Steenwerth K L, *et al*. Responses of soil microbial processes and community structure to tillage events and implications for soil quality[J]. Geoderma, 2003, 114: 305–317.

[25] 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 Y C, Shen Q R, Ran W. Effects 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.

[26] Omay A B, Rice C W, Maddux L D, *et al*. Changes in soil microbial and chemical properties under long-term crop rotation and fertilization[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(6): 1672–1678.

[27] Álvaro-Fuentes J, Morell F J, Madejón E, *et al*. Soil biochemical properties in a semiarid Mediterranean agroecosystem as affected by long-term tillage and N fertilization[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 129: 69–74.

[28] 张奇春, 王光火, 方斌. 不同施肥处理对水稻养分吸收和稻田土壤微生物生态特性的影响[J]. 土壤学报, 2005, 42(1): 116–121.
Zhang Q C, Wang G H, Fang B. Influence of fertilization treatment on nutrients uptake by rice and soil ecological characteristics of soil microorganism in paddy field[J]. Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 116–121.