

长期施肥对红壤性水稻土微生物生物量与活性的影响^①

吴晓晨^{1,2}, 李忠佩^{1,2*}, 张桃林¹, 车玉萍¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 土壤微生物及其活性是指示土壤增肥过程和土壤环境变化的灵敏指标。本文研究了红壤荒地开垦为水田后不同施肥制度定位施肥 16 年后水稻土的微生物生物量与活性特征, 结果表明: 经 16 年水稻耕植, 不同施肥措施下土壤的微生物生物量和活性还处于较低水平。施肥制度显著影响了水稻土的微生物生物量 C 和基质诱导呼吸, 但对基础呼吸的影响还不明显。只施用 N、K 肥对提高土壤微生物生物量和活性没有显著效果, 在不施肥或施用化肥的基础上配合有机循环可以显著提高土壤微生物的生物量、代谢活性和微生物呼吸的温度敏感性, N、P、K 肥配合有机循环的施肥制度对提高土壤微生物生物量和代谢活性的作用最好。

关键词: 红壤性水稻土; 微生物生物量碳; 基质诱导呼吸; 温度敏感性

中图分类号: S154.3

土壤微生物是土壤形成和营养元素循环的主体^[1], 土壤微生物及其活性是反映土壤供肥能力和土壤健康状况变化的敏感性指标之一^[2]。不同用量的肥料施入土壤后, 会对土壤的结构、物质组成和营养平衡等产生一系列的作用, 势必会影响到土壤中微生物的组成、数量和活性^[3], 进而对土壤中物质和能量的转化、土壤和肥料中营养物质的有效性产生影响。

红壤是我国南方主要的地带性土壤, 水稻是红壤地区主要的粮食作物之一。不同施肥措施对红壤水稻土微生物生化特征的影响已经进行过很多研究^[1, 4-5], 一般均认为施用有机肥能够增加土壤微生物的生物量, 提高其活性和生物多样性, 但化肥对土壤微生物的作用不同研究者的报道却不相一致。此外大部分红壤稻田长期试验都是建立在初始肥力水平较高的水稻土上, 而有关在低肥力红壤稻田进行长期不同定位施肥对土壤微生物生物量和代谢活性的影响的报道很少。1990 年中国科学院红壤生态试验站建立了稻田施肥制度长期试验, 主要观测不同施肥制度下垦自红壤荒地的稻田生产力和土壤性状变化过程。本文研究了该长期试验定位施肥 16 年后不同施肥措施对土壤微生物生物量、代谢活性和温度敏感性的影响, 揭示了低肥力红壤性水稻土中微生物生化指标对长期不同施

肥制度的适应特征。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验建立在中国科学院红壤生态试验站, 位于江西省余江县(116°55'E, 28°15'N)。该区属亚热带季风气候区, 水热资源丰富, 年降雨量 1795 mm, 平均温度 17.6℃, 年蒸发量 1318 mm, 降雨集中于每年的 3—6 月, 无霜期 261 天。

试验于 1990 年开始, 将发育自第四纪红黏土的荒地平整后, 设计 9 个试验处理, 每个处理 3 个重复, 共 27 个试验小区。每个小区面积为 30 m², 各小区用砖水泥隔开(地面高 15 cm, 地下部分深 50 cm), 且各小区具有良好的排水功能。作物轮作制度为水稻-水稻(*Oryza sativa* L.), 早稻每年 4 月底 5 月初移栽, 7 月底收获, 晚稻 7 月底 8 月初移栽, 11 月初收获。试验前土壤基本性质为: 有机质含量 5.7 g/kg, 全 N 0.43 g/kg, 全 P(P₂O₅) 0.65 g/kg, 全 K (K₂O) 13.4 g/kg。

^①基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2007CB109301)资助。

* 通讯作者(zhpli@mail.issas.ac.cn)。

作者简介: 吴晓晨(1981—), 男, 江苏丹徒人, 博士研究生, 主要从事土壤生物化学研究。

^①基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB109301)资助。

* 通讯作者(zhpli@mail.issas.ac.cn)

作者简介: 吴晓晨(1981—), 男, 江苏丹徒人, 博士研究生, 主要从事土壤生物化学研究。E-mail: graywoo@hotmail.com

g/kg, 有效 P 5.6 mg/kg, 速效 K 105.9 mg/kg, 碱解 N 90.2 mg/kg, pH 4.5, 黏粒(<1 μm) 含量 38%^[6]。2006 年 3 月各小区采集 0~15 cm 土壤样品测定了 pH、有机 C 和养分含量等土壤基本化学性质^[7] (表 1)。

性质^[7] (表 1)。

表 1 不同施肥处理土壤基本化学性质
Table 1 Chemical properties of red paddy soils under different fertilization treatments

处理	pH	有机 C (g/kg)	全 N (g/kg)	全 P (g/kg)	有效 P (mg/kg)
CK	5.58	8.19	0.89	0.26	2.89
C	5.67	9.88	1.10	0.32	4.72
N	5.54	8.66	0.96	0.26	2.65
NC	5.41	10.13	1.20	0.36	4.54
NP	5.50	9.46	1.01	0.47	10.64
NPK	5.48	9.74	1.00	0.46	10.52
NPKC	5.46	10.12	1.20	0.60	20.90
NK	5.52	9.29	0.98	0.25	2.21
NPKS	5.59	10.11	1.01	0.46	11.22

注: 表中处理请见试验设计。

1.2 试验设计

不同施肥处理为: ①无肥区 (CK); ②有机质循环 (C); ③化学 N 肥 (N); ④化学 N 肥+有机质循环 (NC); ⑤化学 N、P 肥 (NP); ⑥化学 N、P、K 肥 (NPK); ⑦化学 N、P、K 肥+有机质循环 (NPKC); ⑧化学 N、K 肥 (NK); ⑨化学 N、P、K 肥+1/2 秸秆回田 (NPKS)。肥料施用量按各处理内容要求, 1998 年前每季每公顷 N 230 kg, P₂O₅ 68 kg, K₂O 84 kg; 1998 年开始每季每公顷 N 115 kg, P₂O₅ 68 kg, K₂O 42 kg。其中 N 肥为尿素, P 肥为钙镁磷肥, K 肥为氯化钾。P 肥和 K 肥以基肥形式施入, 尿素分基肥和追肥按 8:7 的比例两次施入。循环处理中秸秆全部还田, 另

每季施入 833.3 kg/hm² (干重计) 猪粪以补充收获籽粒所移出的养分, 秸秆和猪粪的养分含量及不同施肥处理的养分投入状况见本文作者的其他相关文章^[8]。

1.3 样品采集与分析方法

2006 年晚稻收获后每个小区多点混合采集 0~15 cm 新鲜土样, 视土壤含水量大小鲜土直接或稍风干后过 2 mm 筛, 同时去除肉眼可见的植物根系和土壤动物, 然后将土样含水量调至 50% 饱和持水量, 4℃ 避光冷藏保存。在测定之前, 冷藏土样首先在 25℃ 下预培养 24 h。

土壤微生物生物量 C (microbial biomass carbon, MBC) 采用熏蒸浸提法测定^[9]; 基础呼吸 (basal respiration, BR) 采用碱液吸收法测定^[10]; 另外测定了不同温度 (5℃, 15℃, 25℃, 35℃) 下, 水稻土在好气 (50% 饱和持水量) 和厌氧 (2:1 水土比) 条件下的微生物呼吸强度, 测定方法同基础呼吸; 基质诱导呼吸 (substrate-induced respiration, SIR) 测定参考 Lin 和 Brookes^[11]的方法。

试验数据用 SPSS 13.0 软件进行相关性分析和 One-Way ANOVA 分析, 相关性大小采用 pearson 指数表示, 差异显著性分析用 Duncan 法。

2 结果与分析

2.1 微生物生物量 C 和微生物商

不同施肥处理水稻土的 MBC 在 186.4 ~ 326.3 mg/kg 之间, 微生物商 (microbial quotient, MQ) 在 2.16%~3.22% 之间 (表 2)。红壤荒地开垦为稻田 16 年, 不同施肥措施下的土壤微生物生物量仍然远低于陈安磊等^[4]、刘守龙等^[12]及周卫军等^[13]报道的红壤地区水稻土的微生物生物量水平, 微生物商也低于沈宏和曹志洪^[14]报道的亚热带水田的土壤微生物商, 表明本长期试验水稻土的熟化程度还较低, 土壤微生物生物量还未达到一般红壤水稻土的水平。

表 2 土壤微生物生物量 C 和微生物呼吸

Table 2 Microbial biomass carbon and microbial respiration of red paddy soils under different fertilization treatments

处理	MBC (mg/kg)	MQ (%)	BR (mg/(kg · d))	qCO ₂ (g/(kg · d))	SIR (mg/(kg · d))	SIR/BR	SIR/MBC (g/(kg · d))
CK	195.3 ± 9.7 d	2.41 ± 0.8 cd	5.93 ± 0.4 a	30.08 ± 2.0 ab	18.48 ± 0.8 c	3.14 ± 0.11 c	94.0 ± 3.5 b
C	274.5 ± 16.2 bc	2.78 ± 0.6 b	7.01 ± 0.6 a	25.50 ± 4.0 abc	33.02 ± 2.1 b	4.85 ± 0.49 bc	120.3 ± 9.1 ab

N	186.4 ± 15.0 d	2.16 ± 0.8 d	6.31 ± 0.6 a	33.50 ± 4.9 a	21.08 ± 2.1 c	3.37 ± 0.09 c	112.1 ± 13.9 ab
NC	326.3 ± 11.2 a	3.22 ± 1.2 a	6.87 ± 0.4 a	21.01 ± 0.6 c	41.65 ± 3.6 ab	5.88 ± 0.42 ab	127.5 ± 11.5 a
NP	283.1 ± 13.4 bc	2.99 ± 2.5 ab	6.29 ± 0.5 a	22.02 ± 1.2 bc	38.09 ± 2.9 b	6.1 ± 0.24 ab	134.3 ± 2.7 a
NPK	254.5 ± 14.4 c	2.61 ± 0.7 bc	6.77 ± 0.4 a	26.64 ± 0.7 abc	35.69 ± 2.5 b	5.28 ± 0.43 b	141.2 ± 14.7 a
NPKC	325.5 ± 13.3 a	3.22 ± 1.2 a	6.60 ± 0.4 a	20.20 ± 1.7 c	45.27 ± 2.1 a	7.11 ± 1.2 6 a	139.5 ± 11.8 a
NK	246.1 ± 14.6 c	2.64 ± 0.7 bc	7.17 ± 0.5 a	29.38 ± 3.0 ab	23.02 ± 1.9 c	3.22 ± 0.31 c	93.1 ± 5.1 b
NPKS	296.7 ± 9.1 ab	2.94 ± 1.5 ab	6.03 ± 0.3 a	20.34 ± 0.6 c	36.08 ± 1.9 b	6.00 ± 0.35 ab	121.6 ± 4.9 ab

注：同一列中字母不同表示 $p < 0.05$ 水平上的差异显著。

长期不同施肥处理显著影响了红壤性水稻土的微生物生物量，与不施肥处理相比，除只施 N 肥外的各种有机或无机施肥措施都提高了土壤的 MBC，其中以有机无机肥配施的效果最好。陈安磊等^[4]研究指出单独施用化肥对红壤水稻土 MBC 没有影响，而在本长期试验中，除只施用 N 肥处理外，其他单施化肥处理都显著提高了土壤 MBC 含量。这可能与水稻土的肥力状况有关，陈安磊等^[4]的研究对象为高肥力水稻土，而本长期试验开垦自红壤荒地，经十几年水稻耕作和施肥后土壤肥力水平仍然较低，施用化肥尤其是 P 肥对土壤养分供应和水稻生长的影响与高肥力水稻土相比较为明显。

长期施用有机肥将使土壤微生物生物量提高，这已被许多研究所证实^[15-16]，国外很多长期定位试验结果也认为长期施用有机肥与施用化肥相比能够显著提高土壤微生物商^[17]。本长期试验的结果表明，在不施肥或施用化肥（CK、N、NPK）的基础上配合有机养分循环（C、NC、NPKC），能显著提高红壤性水稻土的 MBC 和微生物商。

刘守龙等^[12]研究认为随有机 C 投入量的增加，土壤微生物商也增加。本研究的结果显示，长期不同施肥措施对红壤性水稻土有机 C 和 MBC 含量均影响显著，但 MBC 作为土壤有机 C 库中的活性成分，与 SOC 相比对不同施肥措施更为敏感，其反应幅度大于 SOC，从而使不同施肥处理的土壤微生物商表现出显著性差异。

2.2 微生物基础呼吸和代谢商

基础呼吸反映了土壤微生物群落的异养活性和土壤 C 的微生物有效性^[18]，而微生物代谢商（metabolic quotient, qCO_2 ）即基础呼吸与微生物生物量 C 的比值则反映了微生物群落的维持能大小和对基质的利用效率，是较好反映土壤环境质量变化的生物指标^[19]。本长期试验不同施肥处理水稻土的微生物基础呼吸在 5.93 ~ 7.17 mg/(kg · d) 之间，代谢商在 20.2 ~ 33.5 g/(kg · d) 之间。所有处理土壤的基础呼吸都无显著差异；代谢商 CK、N 和 NK 处理最高，有机养分循环和

NP、NPK 处理其次，NPKC 和 NPKS 处理最低（表 2）。↖

不同施肥处理水稻土的基础呼吸没有显著性差异，表明在低肥力水平水稻土中，基础呼吸与微生物生物量 C 相比对施肥的敏感度要低，同时证明了土壤中的微生物有相当比例是非活性的^[20]。一般来说，土壤熟化程度越高，代谢商越小^[21]，本研究的结果显示，在不施肥或只施化肥的基础上配合有机养分循环可以降低水稻土的代谢商，表明有机养分循环可以加快红壤性水稻土的熟化过程，其中以有机无机肥配施的效果最好。施化肥和不施肥对照处理土壤的微生物代谢商显著高于有机无机肥配施处理，可能是因为施化肥和不施肥对照处理的有机 C 投入量低^[8]，土壤中微生物可利用的 C 源少，不良的环境条件导致微生物数量和利用 C 源的效率下降，单位微生物量的呼吸率升高，证明代谢商可作为土壤肥力缺乏、土壤微生物受到食物胁迫的指标之一^[22]。

2.3 基质诱导呼吸

基质诱导呼吸也是一种被广泛应用的土壤微生物生物量 C 测定方法。向土壤中加入微生物易于利用的葡萄糖等基质，对具有潜在代谢活性的微生物会产生激发效应，因而基质诱导呼吸被认为可以指示土壤中代谢活性微生物生物量的大小^[23-26]，基质诱导呼吸与微生物基础呼吸的比值（SIR/BR）、基质诱导呼吸与微生物生物量 C 的比值（SIR/MBC）大小可以反映土壤中代谢活性微生物比例的高低。本研究中长期不同施肥措施下水稻土微生物的基质诱导呼吸在 18.48 ~ 45.27 mg/(kg · d) 之间，CK、N 和 NK 处理最低，NPKC 处理最高，其余处理之间没有显著差异；SIR/BR 比值在 3.14 ~ 7.11 之间，CK、N、NK 处理最低，NPKC 处理最高；SIR/MBC 比值在 93.1 ~ 141.2 g/(kg · d) 之间，CK 和 NK 处理显著低于 NC、NP、NPK 和 NPKC 处理（表 2）。

一般认为施用有机肥能提高土壤的 SIR^[23-24]，Enwalla 等^[25-26]指出施肥对土壤基础呼吸和基质诱导呼吸的促进作用为有机肥 > 无机肥 > 不施肥，Kautz 等^[26-27]的研究结果显示与不施肥对照相比，有机无机肥配施

处理能显著提高基质诱导呼吸,而只施用化学 N 肥没有明显差异。本研究中,与不施肥处理相比,施用 N 或 N、K 肥并没有能提高水稻土的基质诱导呼吸,且微生物商和代谢商也没有显著差异,表明对于低肥力红壤水田,在没有配施 P 肥的条件下只施用 N、K 肥对土壤微生物生物量及其活性的影响较小。除 NPKC 处理和 NPK 处理的 SIR/MBC 值外,C、NC 和 NPKC 处理的 SIR、SIR/BR 和 SIR/MBC 值均分别显著高于 CK、N 和 NPK 处理,说明在不施肥或只施用化肥的基础上配合有机养分循环可以显著提高红壤水稻土中代谢活性微生物的生物量及比例。这可能与只施用 N、K 肥对水稻生长没有促进作用,而有机养分循环增加了对土壤的养分和有机质输入有关。

很多研究结果都表明长期不同施肥的红壤水稻土有机 C 和微生物生物量 C 之间相关性显著^[267-287],Michelsen 等^[289]研究认为基质诱导呼吸和微生物生物量 C 有较好的相关性,也有文献指出土壤基础呼吸、基质诱导呼吸和土壤 C、N 含量显著正相关^[245]。在本研究中,不同施肥处理水稻土的微生物生物量 C、基质诱导呼吸均与土壤有机 C 含量极显著正相关,相关系数分别为 0.922 和 0.826,但基础呼吸与 SOC、MBC 及 SIR 间均无显著相关性。虽然土壤有机质含量是影响微生物生物量及活性的重要因素,但在开垦不久的红壤性水稻土中,由于其肥力水平较低,土壤微生物受到很大的抑制,不同有机 C 水平的水稻土中微生物生物量及其潜在代谢活性虽然不同,但都表现出相同水平的维持代谢水平。

2.4 微生物呼吸的温度敏感性

红壤性水稻土的微生物呼吸强度在不同水分条件下均随着培养温度的升高而增大(图 1)。水稻土的微生物活性在温度较低时受到明显抑制,不同施肥处理土壤的好气呼吸强度在 5℃ 和 15℃ 时均无差异,厌氧呼吸强度在 5℃ 时也没有显著差异;随着温度升高,由施肥导致的土壤微生物的活性差异增大,CK、N 和 NK 处理在 35℃ 时的好气呼吸强度显著低于其他处理,厌氧呼吸强度则显著低于 C、NC、NPKC、

NPKS 等施用有机肥的处理,说明 CK、N 和 NK 处理水稻土的微生物活性较低,再次表明对于低肥力红壤性水稻土,在没有配施无机 P 肥或有机肥的条件下施用 N、K 肥,对土壤微生物活性没有显著影响;同时也反映出 CK、N 和 NK 处理的土壤有机 C 库较为稳定,活性有机 C 的比例较低。

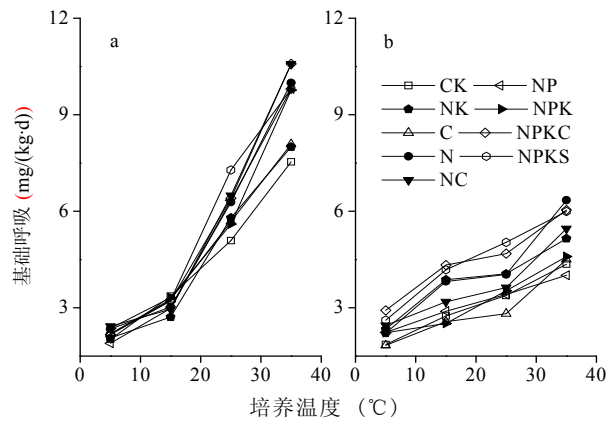


图 1 不同温度和水分条件下土壤微生物呼吸强度

(a: 好气; b: 厌氧)

Fig. 1 Microbial respiration of red paddy soils under different incubation temperatures and moistures, a: aerobic condition; b: anaerobic condition.

通常用温度每升高 10℃ 土壤呼吸的变化比率 Q_{10} 反映呼吸对温度的敏感性。土壤微生物呼吸强度与温度之间的关系可采用指数模型模拟^[3029]:

$$R = a e^{bT}$$

$$Q_{10} = e^{10b}$$

式中, R 为土壤呼吸强度, T 为气温, a 为温度为 0℃ 时的呼吸强度, b 为温度反应系数, 根据上述公式计算了不同施肥处理水稻土微生物呼吸的 Q_{10} 值(表 3)。

表 3 土壤微生物呼吸的 Q_{10} 值

Table 3 Q_{10} of microbial respiration of red paddy soils under different fertilization treatments

处理	好氧呼吸				厌氧呼吸			
	a	b	R^2	Q_{10}	a	b	R^2	Q_{10}
CK	140.6	0.0430	0.807	1.54	148.3	0.0257	0.850	1.29
C	135.4	0.0519	0.790	1.68	170.7	0.0317	0.765	1.37

N	145.9	0.0442	0.787	1.56	174.3	0.0255	0.655	1.29
NC	126.1	0.0558	0.925	1.75	117.8	0.0323	0.554	1.38
NP	108.9	0.0577	0.828	1.78	242.5	0.0199	0.637	1.22
NPK	126.5	0.0519	0.913	1.68	134.4	0.0265	0.636	1.30
NPKC	117.5	0.0567	0.915	1.76	159.7	0.0282	0.574	1.33
NK	164.0	0.0427	0.729	1.53	181.6	0.0166	0.467	1.18
NPKS	117.2	0.0533	0.940	1.70	233.1	0.0238	0.651	1.27

不同施肥措施下红壤性水稻土厌氧呼吸的 Q_{10} 值在 1.18 ~ 1.38 之间, 好气呼吸的 Q_{10} 值在 1.53 ~ 1.78 之间, 微生物厌氧呼吸的温度敏感性低于好气呼吸。CK、N、NK 处理的好气呼吸 Q_{10} 值明显低于其他处理, 表明这 3 种施肥处理降低了土壤微生物好气呼吸的温度敏感性; 而不同施肥处理水稻土的厌氧呼吸温度敏感性未表现出明显规律, 这可能与本长期试验土壤微生物生物量和活性还较低, 不同施肥处理间微生物厌氧呼吸强度差异较小有关。在不施肥或只施用化肥 (CK、N、NPK) 的基础上配合有机养分循环 (C、NC、NPKC), 微生物厌氧呼吸和好气呼吸的 Q_{10} 值分别提高了 0.8、0.9、0.3 及 1.4、1.9、0.8, 表明有机养分循环能够提高水稻土微生物呼吸的温度敏感性, 且对好气呼吸温度敏感性的作用大于厌氧呼吸。

3 结论

红壤荒地开垦为水稻田, 不同施肥措施下种植双季稻 16 年, 土壤肥力明显增加, 但仍然处于较低水平^[7], 相应的土壤微生物生物量和活性也远低于红壤地区水稻土的一般水平。不同施肥措施下红壤性水稻土的微生物生物量 C、基质诱导呼吸均与土壤有机 C 含量呈极显著的相关性, 相应的微生物商、代谢商、SIR/BR 及 SIR/MBC 等指标与 SOC 之间也表现出显著或极显著的正相关或负相关关系。但是水稻土基础呼吸不同施肥处理间没有明显差异, 与 SOC 也没有显著相关性, 这可能与土壤肥力水平较低有关, 在没有新鲜 C 源输入的情况下, 土壤微生物食物匮乏, 大部分处于休眠状态, 只能维持较低的代谢水平。

P 是新垦红壤性水稻土肥力的主要限制因子, 在不配合施用化学 P 肥或有机肥的情况下施用 N、K 肥对水稻生长没有促进作用^[8], 限制了土壤中有机 C 和养分的积累, 因而抑制了土壤微生物的生物量、代谢活性和温度敏感性。有机养分循环增加了对稻田生态系统的有机物料和养分的投入量, 提高了水稻根系分泌物和根茬的生物量, 增加了土壤肥力, 从而提高了土壤总体微生物的生物量、代谢活性微生物的生物

量和比例及微生物呼吸的温度敏感性。不同的施肥制度中, 以 N、P、K 肥配合有机养分循环的施肥方式最佳, 不仅在维持高水平生产力的同时土壤培肥效果最好, 而且对提高土壤微生物生物量和代谢活性的作用也高于其他的施肥方式。

参考文献:

- [1] 陈国潮, 何振立, 黄昌勇. 红壤微生物生物量碳周转及其研究. 土壤学报, 2002, 39(1): 89-96
- [2] 任天志, Grego S. 持续农业中的土壤生物指标研究. 中国农业科学, 2000, 33(1): 68-75
- [3] 任祖淦, 陈玉水, 唐福钦, 王东海, 张逸清. 有机、无机肥配施对土壤微生物和酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 1996, 2(3): 279-283
- [4] 陈安磊, 王凯荣, 谢小立. 施肥制度与养分循环对稻田土壤微生物生物量碳氮磷的影响. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1094-1099
- [5] 颜慧, 钟文辉, 李忠佩, 蔡祖聪. 长期施肥对红壤水稻土磷脂脂肪酸特性和酶活性的影响. 应用生态学报, 2008, 19(1): 71-75
- [6] 李忠佩, 唐永良, 石华, 高坤林. 不同施肥制度下红壤稻田的养分循环与平衡规律. 中国农业科学, 1998, 31(1): 46-54
- [7] 吴晓晨, 李忠佩, 张桃林. 长期不同施肥措施对红壤水稻土有机碳和养分含量的影响. 生态环境, 2008, 17(6): 2019-2023
- [8] 吴晓晨, 李忠佩, 张桃林. 长期不同施肥措施下红壤稻田的养分循环与平衡. 土壤, 待刊
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 1 版. 北京: 中国农业科技出版社, 1999
- [10] öhlinger R. Soil respiration by titration // Schinner F, öhlinger R., Kandeler E, Margesin R. Methods in Soil Biology. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 95-98
- [11] Lin Q, Brookes PC. An evaluation of the substrate-induced respiration method. Soil Biol. Biochem., 1999, 31: 1969-1983
- [12] 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. 农业现代化研究,

- 2003, 24(4): 278–283
- [13] 周卫军, 曾希柏, 张杨珠, 周清, 郭海彦, 颜雄, 陈建国. 施肥措施对不同母质发育的稻田生态系统土壤微生物生物量碳、氮的影响. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1043–1048
- [14] 沈宏, 曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7(1): 1–5
- [15] 胡诚, 曹志平, 胡婵娟, 王金凯. 不同施肥管理措施对土壤碳含量及基础呼吸的影响. 中国生态农业学报, 2007, 15(5): 63–66
- [16] Marika T, Jaak T, Mari I. Soil microbiological and biochemical properties for assessing the effect of agricultural management practices in Estonian cultivated soils. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44: 231–237
- [17] Kaur K, Kapoor KK, Gupta AP. Impact of organic manures with and without mineral fertilizers on soil chemical and biological properties under tropical conditions. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 2005, 168: 117–122
- [18] Ananyeva ND, Susyan EA, Chernova OV, Wirth S. Microbial respiration activities of soils from different climatic regions of European Russia. *European Journal of Soil Biology*, 2008, 44: 147–157
- [19] Gil-Sotres F, Trasar-Cepeda C, Leirós MC, Seoane S. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.*, 2005, 37(5): 877–887
- [20] Ebhin MR, Chhonkar PK, Dhyana S, Patra AK. Changes in soil biological and biochemical characteristics in a long-term field trial on a sub-tropical inceptisol. *Soil Biol. Biochem.*, 2006, 38(7): 1577–1582
- [21] 易志刚, 蚁伟民, 周丽霞, 王新明. 鼎湖山主要植被类型土壤微生物生物量研究. 生态环境, 2005, 14(5): 727–729
- [22] Böhme L, Langer U, Böhme F. Microbial biomass, enzyme activities and microbial community structure in two European long-term field experiments. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2005, 109(112): 141–152
- [23] Marika T, Jaak T, Mari I. Soil microbiological and biochemical properties for assessing the effect of agricultural management practices in Estonian cultivated soils. *European journal of soil biology*, 2008, 44: 231–237
- [24][23] Mijangos I, P'erez R, Albizu I, Garbisu C. Effects of fertilization and tillage on soil biological parameters. *Enzyme and Microbial Technology*, 2006, 40: 100–106
- [25][24] Enwalla K, Nyberg K, Bertilsson S, Cederlunda H, Stenström J, Hallina S. Long-term impact of fertilization on activity and composition of bacterial communities and metabolic guilds in agricultural soil. *Soil Biol. Biochem.*, 2007, 39: 106–115
- [26][25] Kautz T, Wirth S, Ellmer F. Microbial activity in a sandy arable soil is governed by the fertilization regime. *European Journal of Soil Biology*, 2004, 40: 87–94
- [27][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. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 374–378
- [28][27] 袁颖红, 李辉信, 黄欠如, 胡锋, 潘根兴, 樊后保. 长期施肥对红壤性水稻土活性碳的影响. 生态环境, 2007, 16(2): 554–559
- [29][28] Michelsen A, Andersson M, Jensen M, Kjeller A, Gashew M. Carbon stocks, soil respiration and microbial biomass in fire-prone tropical grassland, woodland and forest ecosystems. *Soil Biol. Biochem.*, 2004, 36: 1707–1717
- [30][29] Luo Y, Wan S, Hui D, Wallace LL. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie. *Nature*, 2001, 413: 622–625

Long-Term Effects of Fertilization on Microbial Biomass and Activities of Red Paddy Soils

WU Xiao-chen^{1, 2, 3}, LI Zhong-pei^{1, 3}, ZHANG Tao-lin¹, CHE Yu-ping¹

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China;

2 Hainan Provincial Academy of Environmental Science, Haikou 570206, China; 3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,

China)

Abstract: Soil microbial biomass and activity are sensitive indices to soil fertility promotion and soil environmental changes. In this paper, the responses of microbial biomass and respiration to the different fertilization managements in paddy soils cultivated from wasteland in red soil region were studied. The results showed that, after 16 years of rice cropping, the microbial biomass of activity of red paddy soils under all fertilizations were still in low level. The fertilization managements affected microbial biomass carbon (MBC) and substrate-induced respiration (SIR)

significantly, with the exception of basal respiration (BR). Compared with the no fertilizer treatment (CK), nitrogen and potassium fertilizers did not affect microbial biomass and activity evidently. The microbial biomass, metabolizing activity and temperature sensitivity of microbial respiration were promoted by the application with organic cycling. Among of all fertilization treatments, composed application of chemical fertilizer and organic cycling promoted the soil microbial biomass and metabolize activity most.

Key words: Red paddy soil, Microbial biomass carbon, Substrate-induced respiration, Temperature sensitivity