

施肥措施对不同母质发育的稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响*

周卫军¹ 曾希柏^{2*} 张杨珠¹ 周清¹ 郭海彦¹ 颜雄¹ 陈建国¹

(¹ 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; ² 中国农业科学院农业环境与可持续研究所, 北京 100081)

摘要 以湖南省稻田土壤肥力监测点为基础,研究了稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的特性.结果表明,不同施肥措施对不同地域和母质发育的稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响程度不同.经过18年的不同施肥处理,不同母质发育的稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的变化趋势基本一致,变化顺序为湖积物发育的水稻土>河流冲积物和第四纪红土发育的水稻土>石灰岩发育的水稻土>板页岩发育的水稻土.土壤微生物量碳为259.5~864.4 mg·kg⁻¹,土壤微生物量氮为8.7~70.7 mg·kg⁻¹.施肥可以明显提高稻田生态系统土壤微生物量碳、氮含量;有机肥是改善土壤微生物量碳、氮的主要基础物质,但以有机无机配合施用效果最好.与对照相比,施化肥和有机无机配施处理土壤微生物量碳、氮最大增量分别为407.6和59.2 mg·kg⁻¹,最大增长率分别为102.8%和514.8%.

关键词 稻田生态系统 施肥措施 微生物量碳、氮 土壤肥力

文章编号 1001-9332(2007)05-1043-06 **中图分类号** S152.2 **文献标识码** A

Effects of fertilization on microbial biomass C and N in paddy soils derived from different parent materials. ZHOU Wei-jun¹, ZENG Xi-bai², ZHNAG Yang-zhu¹, ZHOU Qing¹, GUO Hai-yan¹, YAN Xiong¹, CHEN Jian-guo¹(¹College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; ²Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, 18(5): 1043-1048.

Abstract: Based on the monitoring of soil fertility, this paper studied the characteristics of microbial biomass C (MBC) and N (MBN) in paddy soils derived from different parent materials in Hunan Province. The results showed different fertilization systems had different effects on soil MBC and MBN. After 18 years fertilization, the MBC and MBN in different paddy soils had similar variation trend, with the sequence of paddy soil derived from lake sediment > from river alluvium and quaternary red earth > from limestone > from shale. Soil MBC content ranged from 259.5 to 864.4 mg·kg⁻¹, while MBN ranged from 8.7 to 70.7 mg·kg⁻¹. Fertilization could increase soil MBC and MBN markedly. Organic fertilizer was the main element for the promotion of soil MBC and MBN, and combined application of organic and inorganic fertilizers could obtain the greatest effect. The increment of soil MBC and MBN after applying inorganic fertilizer and its combination with organic fertilizer was 407.6 and 59.2 mg·kg⁻¹, in maximum, and the maximum increasing rate was 102.8% and 514.8%, respectively, compared with no fertilization.

Key words: paddy soil; fertilization system; microbial biomass C and N; soil fertility.

1 引言

在陆地生态系统中起重要作用的土壤是一个具

有生物多样性的复杂体系.土壤生态系统的功能主要由土壤微生物机制所控制^[3,8,12].土壤中的细菌、真菌、放线菌和藻类等不仅参与土壤有机质的分解过程和矿化作用,促进土壤养分循环,提高土壤养分的生物有效性,而且其代谢物也是植物的营养成分.因此,土壤微生物不仅是土壤有机物质转化的执行者,又是植物营养元素的活性库^[15,26,30,34].由于土壤

* 国家“十五”科技攻关计划项目(2001BA507A17)和“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAD05B01).

* * 通讯作者. E-mail: zengxb@cjac.org.cn

2006-03-27 收稿,2007-02-15 接受.

微生物的活动能直接影响土壤的物理、化学和生物学性质^[16,21],所以土壤微生物参数的变化成为土壤生态系统变化的敏感指标^[27-28].土壤微生物量对土壤养分,特别是氮和磷的循环和植物有效性的作用表现在两个方面:1)土壤微生物量中所含的氮(微生物量氮)和磷(微生物量磷)是植物养料的储备库,且与土壤有效氮和磷之间存在一定的平衡关系,对土壤氮、磷和植物有效性在一定程度上起着支配作用^[14,19-20,22-23];2)土壤微生物对土壤有机质的矿化和转化作用是土壤有效氮和磷的重要来源^[4,10,14,33].研究表明,农田(主要是旱地)土壤表层土壤微生物量碳含量一般为100~500 mg·kg⁻¹,占土壤有机碳总量的0.5%~4%;土壤微生物量氮占土壤全氮的2%~6%;土壤微生物量磷占土壤全磷的1%~5%^[2,14].土壤微生物量间的差异主要是由不同的地理条件、气候、土地利用方式等因素造成的^[2,7,13,15,24].施肥作为提高作物产量、改善土壤肥力的重要手段,对土壤有机质和微生物量具有很大的影响.已有研究表明,施肥处理土壤微生物量显著高于不施肥处理;有机肥和秸秆还田(特别是施绿肥和禾本科作物秸秆还田)提高土壤微生物量的效果最为显著^[11,17-18,25,31].目前国内外对旱地和草地土壤微生物量已有大量的研究,但针对水稻土的研究则较少,而针对稻田生态系统在不同施肥措施下土壤微生物量变化特性的研究则更少^[9,32,35].鉴于此,本文选择湖南省7个稻田土壤肥力长期定位监测点,研究了不同施肥措施对稻田生态系统土壤微生物量碳、氮变化特性的影响,以探讨红壤地区稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的演变规律及其调控机理.

2 材料与方法

2.1 供试土壤

供试土壤为湖南临澧、汉寿、桃江、新化、武冈、宁乡、南县7个国家级稻田肥力长期定位监测点土壤.各监测点的土壤类型、气候、主要性质、利用和管理状况见表1.试验均于1986年开始,设计方案一致.其6个处理设置如下:1)对照(CK),不施肥料.2)NPK,采用测土施肥技术,根据监测点土壤养分供应状况和作物营养预期需求量,确定施用无机NPK肥料的量;氮肥用尿素,施氮量为300~375 kg·hm⁻²;磷肥用过磷酸钙,施磷量为24~54 kg·hm⁻²;钾肥用氯化钾,施钾量为136~268 kg·hm⁻²之间.3)习惯施肥法(CD),依当地农民所用的NPK化肥及有机肥的施用量和方法进行,氮肥用尿素,施氮量为225~350 kg·hm⁻²;磷肥用过磷酸钙,施磷量为20~40 kg·hm⁻²之间;钾肥用氯化钾,施钾量为75~150 kg·hm⁻².有机肥包括部分水稻秸秆还田和农家肥(下同);有机肥氮低于总量的30%.4)秸秆还田(RS),施用与NPK处理等量氮的晚稻秸秆.5)中量有机肥(OM₃₀),以NPK处理施氮量为标准,有机肥氮占总量的30%.6)高量有机肥(OM₆₀),以NPK处理施氮量为标准,有机肥氮占总量的60%.

2004年11月晚稻收获后,在各试验点采集土壤表层(0~20 cm)的混合样品.在室温条件下风干,除去土壤中可见的动、植物残体,磨碎,过2 mm筛,装入玻璃瓶中备用.用四分法取少量土壤过100目筛,备用.

表1 试验点气候条件、种植制度、土壤类型及试验前的土壤性状

Tab.1 Climate condition, cropping systems, soil types and soil properties before experiment in all experimental sites

地点 Site	母质 Parent material	土壤类型 Soil type	种植制度 Cropping system	年均气温 Annual mean temperature (°C)	降水量 Precipitation (mm)	pH	有机碳 Organic C (g· kg ⁻¹)	全氮 Total N (g· kg ⁻¹)	全磷 Total P (g· kg ⁻¹)
临澧 Linli	第四纪红土 Quaternary red earth	红黄泥 Yellow red earth	稻-稻 Rice-rice	16.6	1674	5.80	17.58	2.01	0.58
汉寿 Hanshou		白鳢泥 White eel soil	稻-稻 Rice-rice	16.6	1678	5.21	19.26	2.19	0.51
新化 Xinhua	河流冲积物 River alluvium	河沙泥 River sand earth	稻-稻-肥 Rice-rice-green manure	17.0	1568	5.20	11.33	0.92	0.60
宁乡 Ningxiang			稻-稻-油 Rice-rice-rape	17.2	1553	5.20	17.10	1.76	0.56
南县 Nanxian	湖积物 Lake sediment	紫泥田 Purple soil	稻-稻 Rice-rice	17.1	1586	7.49	19.26	2.74	1.13
武冈 Wugang	石灰岩 Limestone	青泥田 Blue soil	稻-稻-肥 Rice-rice-green manure	16.7	1419	7.78	23.20	2.51	0.59
桃江 Taojiang	板页岩 Shale	黄泥田 Yellow soil	稻-稻 Rice-rice	16.7	1681	6.10	19.40	1.91	0.65

2.2 分析方法

土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸- K_2SO_4 提取方法测定^[5,29]。称取 6 份风干过 2 mm 筛的土壤样品,每份 25 g(烘干),加水混匀,在室温下调节风干土至 40% 的土壤饱和持水量,在标准条件下(25 °C、100% 空气湿度的容器内)预培养 7 d。取其中 3 份在真空干燥器内用氯仿熏蒸(24 h),熏蒸的土壤除去氯仿后立即用 K_2SO_4 提取(300 r·min⁻¹ 振荡 30 min),另 3 份直接用 K_2SO_4 提取。吸取 10.0 ml 上述土壤提取液,用 $K_2Cr_2O_7$ - H_2SO_4 容量法测定提取的碳。另取 15 ml 提取液,用开氏法测定提取的氮。以熏蒸土样与未熏蒸土样提取的有机碳、氮的差值分别乘以转换系数 K_C (2.94)或 K_N (2.22),计算土壤微生物量碳、氮。土壤有机碳、全氮和全磷分别采用 $K_2Cr_2O_7$ - H_2SO_4 容量法、开氏法和碳酸钠熔融法测定。

3 结果与分析

3.1 不同母质及地域稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的差异

湖南省 7 个土壤肥力监测点的土壤微生物量碳含量见表 2。从表 2 可以看出,不同母质发育的稻田土壤微生物量碳含量有明显差异,其含量高低顺序为:湖积物发育的水稻土 > 河流冲积物和第四纪红土发育的水稻土 > 石灰岩发育的水稻土 > 板页岩发育的水稻土。土壤微生物量碳含量变化范围为

259.5 ~ 864.4 mg·kg⁻¹,这主要是由不同母质发育的稻田土壤理化性质差异所致。同一母质发育的水稻土由于地域的差异以及管理措施的不同,其土壤微生物量碳的含量亦不同,特别是河流冲积物母质发育的水稻土。宁乡和新化均为资江冲积物,只是新化在资江的中游,宁乡在资江的下游,其土壤微生物量碳差异主要是由土壤质地的差异所致;临澧与汉寿均在常德地区,其土壤性质与气候条件比较相似,因而其稻田土壤微生物量碳虽有差异,但并不明显。

从表 3 可以看出,不同母质发育的水稻土土壤微生物量氮含量有明显差异,变化趋势基本与土壤微生物量碳一致,其含量变化范围为 8.7 ~ 70.7 mg·kg⁻¹。不同地域同一母质发育的水稻土土壤微生物量氮也有明显差异,与土壤微生物量碳的变化顺序基本一致。土壤微生物量氮含量还因施肥措施及其管理模式不同而有所差异。例如,河流冲积物发育的水稻土 CK 与 NPK 处理土壤微生物量氮含量:新化 > 宁乡;而有机无机配合(CD、OM₃₀、OM₆₀)及秸秆还田处理土壤微生物量氮含量:宁乡 > 新化。

3.2 不同施肥措施对稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响

微生物量碳在土壤全碳中所占比例很小,但它是土壤有机质中最为活跃的部分,可反映土壤养分有效状况和生物活性,能在很大程度上反映土壤微生物数量,是评价微生物量和活性的重要指标。微生物反映土壤有机质的变化,是更具敏感性的土壤质

表 2 稻田土壤微生物生物碳的含量

Tab.2 Content of soil microbial biomass C in paddy (mg·kg⁻¹)

母质 Parent material	地点 Site	CK	NPK	CD	RS	OM ₃₀	OM ₆₀
第四纪红土	临澧 Linli	337.8	389.2	436.0		636.7	685.2
Quaternary red earth	汉寿 Hanshou	350.0	393.9	496.5		567.3	549.4
河流冲积物	宁乡 Ningxiang	456.8	537.6	631.3	593.0	740.6	864.4
River alluvium	新化 Xinhua	268.3	310.3	320.4	344.0	352.5	412.2
湖积物 Lake sediment	南县 Nanxian	352.9	515.0	503.0		635.0	649.7
石灰岩 Limestone	武冈 Wugang	273.7	331.5	367.3		435.7	481.3
板页岩 Shale	桃江 Taojiang	259.5	304.5	315.8	310.5	336.6	360.7

表 3 稻田土壤微生物生物量氮的含量

Tab.3 Content of soil microbial biomass N in paddy (mg·kg⁻¹)

母质 Parent material	地点 Site	CK	NPK	CD	RS	OM ₃₀	OM ₆₀
第四纪红土	临澧 Linli	23.7	31.6	37.2		34.2	43.0
Quaternary red earth	汉寿 Hanshou	10.6	15.7	16.8		37.0	40.7
河流冲积物	宁乡 Ningxiang	11.5	18.1	30.8	29.6	60.0	70.7
River alluvium	新化 Xinhua	17.6	22.1	24.4	24.0	32.4	35.1
湖积物 Lake sediment	南县 Nanxian	11.8	33.8	38.9		51.6	62.7
石灰岩 Limestone	武冈 Wugang	20.2	24.5	25.0		44.0	45.8
板页岩 Shale	桃江 Taojiang	8.7	19.6	25.2	22.5	27.1	29.3

量指标^[30]. 微生物量碳对不同土壤施肥措施非常敏感,这是微生物量碳用作土壤生物学评价指标的一大优势^[7]. 从表2可以看出,经18年的不同施肥处理,稻田生态系统土壤微生物量碳发生了明显的变化. 土壤微生物量碳含量CK最低;长期施用化肥(NPK)可以明显提高土壤微生物量碳含量,与CK相比,微生物量碳增量最大的达 $162.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (南县),最小的为 $42.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (新化);习惯施肥(CD)除南县的比NPK处理土壤微生物量碳含量低外,其它试验点的均高于NPK处理,增量最大的达到 $102.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (汉寿),最小的为 $10.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (新化),但均明显高于长期不施肥处理;在所有处理中,有机无机配合施用(OM_{30} 、 OM_{60})处理土壤微生物量碳含量最高,比CD处理增加 $200.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 有机无机肥配合施用,一方面可补充土壤有机碳源,提高土壤有机质含量;另一方面可以改善土壤理化性状,刺激土壤微生物活性,促进土壤微生物生长,改良土壤肥力状况.

微生物量氮是土壤氮素的重要储备库^[19-20],在土壤氮素循环与转化过程中起着重要的调节作用. 虽然土壤微生物量氮在数量上低于或接近于作物的吸氮量,但由于微生物量氮的周转率比土壤有机氮快5倍之多,因此大部分矿化氮来自于土壤微生物量氮^[14,19-20]. 从表2可以看出,试验开始18年后,不同施肥处理土壤微生物量氮含量差异明显,以CK处理最低;不同母质发育的水稻土亦有一定的差异,最高达到 $23.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最低的仅为 $8.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,这主要是由土壤的基础理化性状差异造成的;施NPK可以有效提高土壤微生物量氮含量,与不施肥处理比较,土壤微生物量氮含量最高的增加了 $22.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (南县),提高1.86倍,最少的增加了 $4.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (武冈),提高21.3%;化肥与有机肥配合施用,既补充了有机碳源,又改善了土壤的物理性状,大大刺激了土壤微生物的活性^[1,6,32]. 习惯施肥法虽然化肥的施用量比NPK处理低,由于每年都

有部分秸秆还田和施用少量的农家肥,因而其微生物量氮均比NPK处理高. OM_{30} 和 OM_{60} 处理由于每年都按适当比例施入有机肥和化肥,有利于土壤培肥,在所有施肥处理中土壤微生物量氮最高. 在等量施氮条件下,化肥与有机肥长期配合施用土壤微生物量氮明显高于长期单施化肥,说明配合施用下有较多的氮素通过同化作用转入到微生物体内,而被暂时固定,相应地减少了通过 NH_3 挥发和 NO_3^- 淋失以及反硝化脱氮等途径造成的氮素损失,这对调节土壤氮素供应,提高土壤氮素利用率,保护大气环境,防止水资源污染,保证农业可持续发展都具有积极意义.

3.3 有机肥对稻田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响

土壤微生物量碳是土壤有机质中活性较高的部分,是土壤养分的重要来源. 一般而言,在没有较多的有机物施入土壤时,土壤微生物量碳、氮含量是相对稳定的,二者能较好地反映特定土壤的氮素肥力状况^[4]. 但如果给土壤施以较多的有机物质或前茬在土壤中留有较多的植物残体,则当季土壤微生物量会明显增加,所增加的微生物量在土壤中的维持时间则主要取决于有机物料的质和量^[6,20,29]以及土壤环境条件的变化^[8].

从表2和表3可以看出,稻田系统内的有机物质(秸秆)循环再利用(RS)处理土壤微生物量碳、氮含量与CK和施化肥相比均有一定的提高,但均低于CD和有机无机肥配合施肥(OM_{30} 和 OM_{60})处理. 可见,有机肥是稻田生态系统土壤微生物量碳和氮的重要来源和基础性物质,而其量的高低还受矿质氮的影响^[6].

从表4可以看出,与CK相比,RS处理土壤微生物量碳增加19.7%~29.8%,微生物量氮增加36.4%~158.6%;有机无机肥配合(OM_{60})处理土壤微生物量碳增加31.4%~102.8%,微生物量氮

表4 施用有机肥处理与不施肥处理微生物生物量碳、氮的增长率

Tab.4 Increase rate of microbial biomass C, N between the treatments of organic manure and non-fertilization (%)

母质 Parent material	地点 Site	微生物生物量 C Microbial biomass C				微生物生物量氮 Microbial biomass N			
		CD	RS	OM_{30}	OM_{60}	CD	RS	OM_{30}	OM_{60}
第四纪红土	临澧 Linli	29.1		88.5	102.8	57.0		44.3	81.4
Quaternary red earth	汉寿 Hanshou	41.9		62.1	57.0	58.5		249.1	284.0
河流冲积物	宁乡 Ningxiang	38.2	29.8	62.1	89.2	167.8	157.4	421.7	514.8
River alluvium	新化 Xinhua	19.4	28.2	31.4	53.6	38.6	36.4	84.1	99.4
湖积物 Lake sediment	南县 Nanxian	42.5		79.9	84.1	229.7		337.3	431.4
石灰岩 Limestone	武冈 Wugang	34.2		59.2	75.8	23.8		117.8	126.7
板页岩 Shale	桃江 Taojiang	21.7	19.7	29.7	39.0	189.7	158.6	211.5	236.8

增加 81.4% ~ 514.8%, 这进一步表明有机无机肥配合施用是提高土壤活性养分的重要措施^[4]。单施有机肥、有机无机配合施用处理, 以及不同母质或不同地域同一种母质发育的水稻土的土壤微生物量碳、氮的增长率均有明显差异。临澧与汉寿同为第四纪红土母质、宁乡与新化同为河流沉积物, 其土壤微生物量碳、氮的增长率相差较大, 这可能是由不同母质发育土壤的性质差异以及同一种母质在不同地域的养分特征和培肥效果不同造成的。因此, 在稻田土壤的培肥过程中要依据不同土壤的肥力特征与土壤特性, 选择合理的培肥措施及适宜的有机无机肥配合比例。

4 结 论

1) 不同地域和不同母质发育的土壤微生物量碳、氮对施肥措施的反应程度各异。微生物量碳含量变化顺序为: 湖积物发育的水稻土 > 河流冲积物和第四纪红土发育的水稻土 > 石灰岩发育的水稻土 > 板页岩发育的水稻土。

2) 长期不施肥土壤微生物量碳、氮维持在较低的水平, 不利于土壤养分的转化与活化。长期施用 NPK 化肥, 可提高土壤的肥力, 促进土壤微生物量碳、氮的增加, 增强土壤养分的活性。

3) 有机肥是提高稻田土壤微生物量碳、氮的基础物质。有机无机肥配合施用是提高稻田土壤微生物量碳、氮的有效途径。不同母质发育的土壤对有机肥的响应程度各异。

参考文献

- [1] Ananyeva ND, Demkina TS, Jones WJ, *et al.* 1999. Microbial biomass in soils of Russia under long-term management practices. *Biology and Fertility of Soils*, **29**: 291-299
- [2] Anderson TH, Domsch KH. 1989. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, **21**(1): 471-479
- [3] Bai Q-Y (白清云). 1997. Chemical evaluation of soil-microbial communities and structures. *Agro-Environment Protection* (农业环境保护), **16**(6): 252-256 (in Chinese)
- [4] Bonde AT, Schniurer J, Rosswall T. 1988. Microbial biomass as a fraction of potentially mineralizable nitrogen in soils from long-term field experiments. *Soil Biology and Biochemistry*, **20**(4): 447-452
- [5] Brookes PC, Landman A, Pruden G, *et al.* 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen, a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **17**: 837-842
- [6] Chilima J, Huang GY, Wu CF. 2002. Microbial biomass carbon trends in black and red soils under single straw application: Effect of straw placement, mineral N addition and tillage. *Pedosphere*, **12**(1): 59-72
- [7] Fan J (樊 军), Hao M-D (郝明德). 2003. Effects of long term rotations and fertilizations on soil microbial biomass carbon and nitrogen. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), **10**(1): 85-87 (in Chinese)
- [8] Fyles IH, Juma NG, Robertson JA. 1988. Dynamics of microbial biomass and faunal populations in long-term plots on a Gray Luvisol. *Canadian Journal of Soil Science*, **68**: 91-100
- [9] Gao M (高 明), Zhou B-T (周保同), Wei C-F (魏朝富), *et al.* 2004. Effect of tillage system on soil animal, microorganism and enzyme activity in paddy field. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **15**(7): 1177-1181 (in Chinese)
- [10] Gao Y-C (高云超), Zhu W-S (朱文珊), Chen W-X (陈文新). 1993. Estimation for biomass and turnover of soil microorganisms. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), **12**(6): 6-10 (in Chinese)
- [11] Goyal S, Chander K, Mundra MC, *et al.* 1999. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions. *Biology and Fertility of Soils*, **29**: 196-200
- [12] He Z-L (何振立), Zhou Q-X (周启星), Xie Z-M (谢正苗). 1998. Soil-Chemical Balances of Pollution and Beneficial Elements. Beijing: China Environmental Science Press. (in Chinese)
- [13] Insam H, Parkinson D, Domsch KH. 1989. Influence of macroclimate on soil microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, **21**(2): 211-221
- [14] Jenkinson DS. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, **329**: 361-367
- [15] Jenkinson DS, Ladd JN. 1981. Microbial biomass in soil, measurement and turnover// Paul EA, Ladd JN, eds. *Soil Biochemistry*. New York: Marcd Dekker Inc: 415-471
- [16] Kennday AC, Papendiek RI. 1995. Microbial characteristics of soil quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, **50**: 243-248
- [17] Li D-P (李东坡), Wu Z-J (武志杰), Chen L-J (陈利军), *et al.* 2004. Dynamics of microbial biomass P and its affecting factors in a long-term fertilized black soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **15**(10): 1897-1902 (in Chinese)
- [18] Liu S-L (刘守龙), Xiao H-A (肖和艾), Tong C-L (童成立), *et al.* 2003. Microbial biomass C, N and P and their responses to application of inorganic and organic fertilizers in subtropical paddy soils. *Research of Agricultural Modernization*, **24**(4): 278-282 (in Chinese)
- [19] Part G, Ashman MR. 1992. Relationship between soil

- microbial biomass and gross N mineralization. *Soil Biology and Biochemistry*, **30**: 251–256
- [20] Schnner J, Russwall T. 1987. Mineralization of nitrogen from ¹⁵N labelled fungi, soil microbial biomass and roots and its uptake by barley plant. *Plant and Soil*, **102**: 71–78
- [21] Sheng Q-R (沈其荣), Shi R-H (史瑞和). 1991. The effect of soil pretreatment on the mineralization of nitrogen deprived from different forms. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), **14**(1): 54–58 (in Chinese)
- [22] Shi J-P (史吉平), Zhang D-F (张道夫), Lin B (林葆). 1998. Influences of long-term fertilizer application on soil organic matter and biological characters. *Soils and Fertilizers* (土壤肥料), (3): 7–11 (in Chinese)
- [23] Smith JL, Paul EA. 1991. The significance of soil microbial biomass estimations// Bonag JM, Stotzlw G, eds. *Soil Biochemistry*. Vol. 6. New York: Marced Dekker Inc: 359–396
- [24] Song Q-H (宋秋华), Li F-M (李凤民), Liu H-S (刘洪升), et al. 2003. Effect of plastic film mulching on soil microbial biomass in spring wheat field in semi-arid loess area. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **14**(9): 1512–1516 (in Chinese)
- [25] Song R (宋日), Wu C-S (吴春胜), Mou J-M (牟金明), et al. 2002. Effects of maize stubble remaining in field on dynamics of soil microbial biomass C and soil enzyme activities. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **13**(3): 303–306 (in Chinese)
- [26] Srivastava SC, Singh JS. 1991. Microbial C, N and p in dry tropical forest soils: Effects of alternate land-uses and nutrient flux. *Soil Biology and Biochemistry*, **23**(2): 117–124
- [27] Sun R-L (孙瑞莲), Zhu L-S (朱鲁生), Zhao B-Q (赵秉强), et al. 2004. Effects of long-term fertilization on soil microorganism and its role in adjusting and controlling soil fertility. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), **15**(10): 1907–1911 (in Chinese)
- [28] Sun T-H (孙铁珩), Zhou Q-X (周启星), Li P-J (李培军). 2001. *Pollution Ecology*. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- [29] Wu JS, Brookes PC, Jenkinson DS. 1993. Formation and destruction of microbial biomass during the decomposition of glucose and ryegrass in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, **25**(10): 1435–1441
- [30] Wu JS, Joergensen RG, Pommerening B, et al. 1990. Measurement of soil microbial biomass by fumigation-extraction: An automated procedure. *Soil Biology and Biochemistry*, **22**: 1167–1169
- [31] Xu Y-C (徐阳春), Shen Q-R (沈其荣), Ran W (冉炜). 2002. Effects of zero-tillage and application of manure on soil microbial biomass C, N and P after sixteen years of cropping. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), **39**(1): 90–96 (in Chinese)
- [32] Zhang P-J (张平究), Li L-Q (李恋卿), Pan G-X (潘根兴), et al. 2004. Influence of long-term fertilizer management on topsoil microbial biomass and genetic diversity of a paddy soil from the Taihu Lake region, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), **24**(12): 2818–2824 (in Chinese)
- [33] Zhang WJ, Feng JX, Wu J, et al. 2004. Differences in soil microbial biomass and activity for six agroecosystems with a management disturbance gradient. *Pedosphere*, **14**(4): 441–447
- [34] Zhou JB, Li SX, Chen ZJ. 2002. Soil microbial biomass nitrogen and its relationship to uptake of nitrogen by plants. *Pedosphere*, **12**(3): 251–256
- [35] Zhou Q-X (周启星). 1995. Biogeochemistry of nutrient elements// Zhang F-S (张福锁), ed. *New Trends in Soil and Plant Research*. Beijing: China Agricultural Press: 213–233 (in Chinese)

作者简介 周卫军,男,1966年生,博士,教授。主要从事农业生态系统物质循环转化与模拟以及信息技术的农业应用研究,发表论文40余篇。E-mail: wjzh0108@163.com

责任编辑 梁仁禄
