

# 蚯蚓活动对稻麦轮作系统中土壤微生物量碳的影响\*

胡 锋<sup>1</sup> 王 霞 李辉信 于建光 王丹丹

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘 要** 在建立 6 a 的稻麦轮作田间小区试验中, 研究了 2001 年稻季至 2004 年麦季(共 6 季)蚯蚓活动对土壤微生物量碳(MBC)的影响。本研究设计了秸秆施用方式(混施或表施)×蚯蚓(接种或剔除)以及对对照共 5 个处理, 各 3 个重复。实验结果表明: 在该生态系统中, 无论采用何种秸秆施用方式, 蚯蚓活动均能显著提高土壤 MBC( $p < 0.05$ )。秸秆的施用会减弱同年内土壤 MBC 在麦季成熟期高于稻季的趋势, 而蚯蚓的作用使该差异变得更显著( $p < 0.05$ )。在 0~5 cm 土层中, 蚯蚓对 MBC 的积极作用在秸秆混施时比表施更明显, 在 5~10 cm 土层中则相反, 而在 10~20 cm 土层中的作用效果基本一致。

**关键词** 蚯蚓; 土壤微生物量; 秸秆; 稻麦轮作系统

中图分类号 S154.1 文献标识码 A

蚯蚓以其分布广, 生物量大, 适应能力强被人们所关注, 并由于它们对土壤以及作物的积极贡献成为极其重要的大型土壤动物。近 40 a 的研究表明: 蚯蚓在土体中的运动、取食和排泄等生命活动能改善土壤结构<sup>[1~3]</sup>, 加速物料分解, 促进养分循环<sup>[4,5]</sup>和刺激植物生长<sup>[6,7]</sup>。由此产生的土壤环境的扰动和变化, 必然强烈地影响着土壤栖居者——土壤微生物的生存。

土壤微生物生物量碳, 一般占土壤有机碳的 1%~4%<sup>[8]</sup>, 是土壤养分转化的活性库或源, 是碳素循环和周转的媒介, 因此研究蚯蚓活动对土壤微生物生物量碳的影响有重要意义。国内外很多研究者已经关注该问题, 但结论却不尽相同。如张宝贵等认为蚯蚓(*Pheretima guillelmi*)活动在短期培养实验中显著降低了土壤微生物量<sup>[9]</sup>; 通过微区实验, Fraser 等研究发现蚯蚓(*Aporrectodea caliginosa*)活动对于微生物生物量碳的影响在退化土壤不同土层中(0~10 cm 和 10~20 cm)差异很大<sup>[10]</sup>; 而对蚯蚓穴壁土壤和蚓粪的分析发现微生物量却显著提高<sup>[11,12]</sup>。但在探讨蚯蚓活动对土壤

微生物活性及养分转化影响研究上, 过去的结论多来自短期或微环境(如蚓粪、穴道壁等)的实验, 缺乏自然条件下或长期的定位实验研究, 影响了结论的可靠性或说服力。本研究试图通过田间长期定位观测, 研究和阐述蚯蚓活动对稻麦轮作系统耕层土壤微生物量碳的影响, 旨在为了解土壤动物对土壤养分循环和转化的作用及机理打下基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验在南京农业大学网室进行(118°47' E, 32°03' N)。年平均气温和平均降水分别为 16℃和 1106 mm。供试土壤为江苏省如皋县的高砂土(Orthic aquisols)。土壤性质见表 1。威廉腔环蚓(*Metaphire guillelmi*)为土壤采样地的优势种。所施玉米秸秆(< 2 cm)基本性质如下: N 7.96 g kg<sup>-1</sup>, P 2.85 g kg<sup>-1</sup>, K 10.67 g kg<sup>-1</sup>, C/N 65.8。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the soil tested

pH <sup>1)</sup>	有机碳 Organic C (g kg <sup>-1</sup> )	全氮 Total N (g kg <sup>-1</sup> )	全磷 Total P (g kg <sup>-1</sup> )	速效磷 Available P (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K (mg kg <sup>-1</sup> )	质地 Texture
8.25	5.86	0.70	0.66	6.0	47.1	砂壤土 Sandy loam

1) 水土比 2.5:1  $W_{\text{water}}:W_{\text{soil}} = 2.5:1$

\* 国家自然科学基金项目(30370286)资助

- 通讯作者, E-mail: fenghu@njau.edu.cn

作者简介: 胡 锋(1963~), 男, 山东济南市人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤生态学

收稿日期: 2004-11-01; 收到修改稿日期: 2005-04-18

## 1.2 试验设计

每小区(2.8 m × 1 m × 0.6 m)皆用混凝土砌成,填入深 50 cm 的供试土壤,并使其接近田间容重(1.31 g cm<sup>-3</sup>)。作物种植制度为稻-麦轮作。水稻采用早育早栽,灌水保持土壤含水量在 80% 田间持水量附近。水稻品种为武育粳 3 号;小麦品种为宁麦 9 号。肥料品种为尿素(N 210 kg hm<sup>-2</sup>)、过磷酸钙(P 46 kg hm<sup>-2</sup>)和氯化钾(K 87 kg hm<sup>-2</sup>)。秸秆用量为 7500 kg hm<sup>-2</sup>。

1999 年稻季到 2001 年麦季期间,主要设计了 3 个处理:(1) 秸秆混施,不接种蚯蚓(I);(2) 秸秆混施,接种蚯蚓(IE);(3) 对照(不施秸秆,不接种蚯蚓,CK)。2001 稻季开始增设 2 个副处理,即:(4) 秸秆表施,不接种蚯蚓(M);(5) 秸秆表施,接种蚯蚓(ME),共计 5 个处理。每处理 3 个重复。实验开始时蚯蚓的初始接种量为 10 条 m<sup>-2</sup>[7],为保证处理效果,之后每年重新接种蚯蚓一次。蚯蚓接种量为每 132 gm<sup>-2</sup>,大约 370 g 每小区,接近土壤采集地的蚯蚓自然密度,不接种小区中的蚯蚓每季去除一次,接种或去除均在作物收获后进行。

## 1.3 样品采集及测定

在水稻和小麦成熟期,用小型土钻在各小区内用多点采集土壤样品(包括行间和株间),取样深度为 20 cm。为研究不同土层中蚯蚓活动对 MBC 的影响,于 2002 年至 2004 年每年麦季又分层采集土样

(0~5 cm、5~10 cm 和 10~20 cm)。用氯仿熏蒸-0.5 mol L<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提法尽快测定新鲜土样的微生物量碳(MBC)<sup>[13]</sup>。

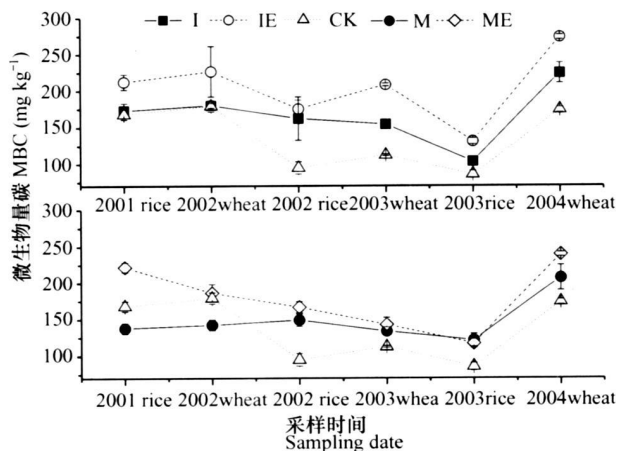
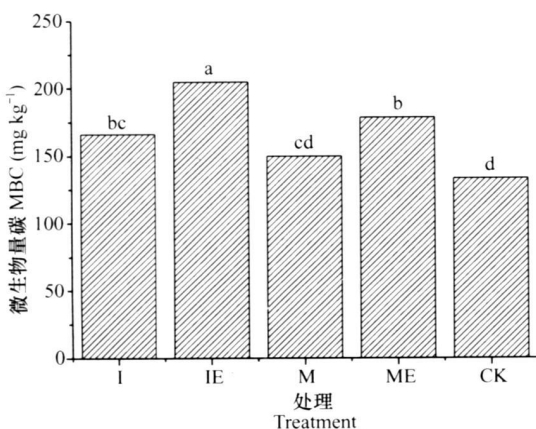
## 1.4 数据分析

由于 1999 年稻季到 2001 年麦季有关土壤微生物量碳的结果已有报道,本文主要分析 2001 年稻季至 2004 年麦季 3a 的各处理 0~20 cm 土壤和不同土层土壤(0~5 cm、5~10 cm 和 10~20 cm)微生物碳的结果。利用 General Linear Model (GLM) 分析蚯蚓、秸秆施用方式以及不同土层之间的交互作用,但是并没表现出彼此之间的交互作用,因此以下不再赘述。用 Duncan 法分析不同处理间的差异。显著性定义为  $p < 0.05$ 。所用软件为 SPSS 11.0。

## 2 结果分析

### 2.1 蚯蚓活动对 0~20 cm 土层 MBC 的总体影响

将 2001 年稻季至 2004 年麦季共 6 季土样的 MBC 结果求均值,可以发现 3 年来蚯蚓活动对 MBC 的总体影响(图 1 左)。在秸秆混施及秸秆表施处理下,蚯蚓活动均显著提高了土壤 MBC ( $p < 0.05$ )。但在两种秸秆施用方式之间,未接种蚯蚓的土壤 MBC 差异不显著,当接种蚯蚓后,差异显著,即 IE > ME ( $p < 0.05$ )。微生物量的高低基本遵循 IE > ME > I > M > CK 的规律。



I: 秸秆混施 Corn residues incorporated into soil with no earthworms; IE: 秸秆混施+ 蚯蚓 Corn residues incorporated into soil with earthworms added; M: 秸秆表施 Com residues mulched on soil with no earthworms; ME: 秸秆表施+ 蚯蚓 Com residues mulched on soil with earthworms added; CK: 对照 Control; Rice: 稻季; Wheat: 麦季

注: 不同小写字母表示差异达 5% 显著水平(Duncan 检验) Note: Different letters indicate significant differences ( $p \leq 0.05$ ) between treatments

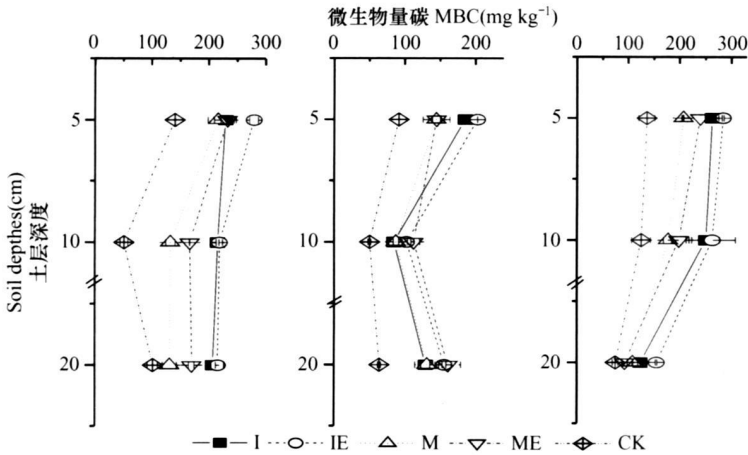
图 1 2001 年稻季至 2004 年麦季土壤微生物量的平均值(左)和 3 年内的变化动态(右)

Fig. 1 Average soil microbial biomass carbon (MBC) (left) and the dynamics of MBC from rice season in 2001 to wheat season in 2004 (right)

图 1(右) 显示了各处理的土壤 MBC 的动态变化情况。土壤 MBC 由于受季节、气候、降水以及采样误差等多因素的影响, 波动较大。但是蚯蚓对土壤 MBC 的提高显而易见, 除个别季度外均达到显著水平( $p < 0.05$ )。此外, 我们发现对照处理(CK)中, 同年度内 MBC 在稻季成熟期低于麦季成熟期, 且达到显著水平( $p < 0.05$ )。而秸秆的施入使该差异变小, 甚至消失。当蚯蚓的加入后, 该差异又变大。如 2002 年, 由于秸秆的投入, 稻麦两季差异显著降低, MBC 含量几乎持平; 而接种蚯蚓后, 又呈现出显著差异。

## 2.2 蚯蚓活动对不同土层 MBC 的影响

图 2 显示不同土层中土壤 MBC 受蚯蚓和秸秆施用方式的影响情况。在 0~5 cm 土层中, 蚯蚓对 MBC 的作用在秸秆表施时并不明显; 而当秸秆混施时, 却显著促进了 MBC 的提高( $p < 0.05$ )。而在 5~10 cm 土层中, 结果与 0~5 cm 土层相反。在 10~20 cm 土层中, 无论何种秸秆施用方式, 总体上体现了蚯蚓活动对土壤 MBC 的积极作用。此外, 0~5 cm 土层的土壤 MBC 要显著高于 5~10 cm 和 10~20 cm 土层( $p < 0.05$ ), 而后两层之间没有一致的规律。



I: 秸秆混施 Corn residues incorporated into soil with no earthworms; IE: 秸秆混施+ 蚯蚓 Corn residues incorporated into soil with earthworms added; M: 秸秆表施 Corn residues mulched on soil with no earthworms; ME: 秸秆表施+ 蚯蚓 Corn residues mulched on soil with earthworms added; CK: 对照 Control

图 2 2002(左), 2003(中)和 2004(右)年麦季不同土层(0~5 cm, 5~10 cm 和 10~20 cm)MBC

Fig 2 MBC ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) at different soil depth (0~5 cm, 5~10 cm and 10~20 cm) in wheat season of 2002 (left), 2003 (center) and 2004 (right)

## 3 讨论与结论

蚯蚓活动对微生物量的影响是非常复杂的, 它与蚯蚓品种、土壤类型以及所施有机物料的性质都有着极大的联系<sup>[14]</sup>。正如先前提到的, 过去的结论多来自于短期的实验室培养和观测, 对于较大型的土壤动物而言, 这种研究结果必然含有局限。而本研究通过延续 6a 的田间实验以及近 3a 观测所得到的结果将更可能地接近实际。上述研究结果显示: 蚯蚓活动对 MBC 的影响虽然与季节、秸秆施入方式和土层深度有相应的联系, 但总体趋势是一致的, 皆促进了土壤 MBC 库的增大。这是蚯蚓在田间长期作用而产生累积效果的体现。Tian 也从田间试验中发现蚯蚓可以提高 MBC 在有机碳中的比例<sup>[15]</sup>。而该结果与部分资料有所差别<sup>[9,10,16]</sup>。他们认为蚯蚓降低微生物量的主要原因为两方面: 一是蚯蚓对

微生物的吞噬和消化, 二是满足植物迅速生长对养分的需求。而当将蚯蚓对微生物量的影响置于较大范围和较长时期的实验中来考虑时, 以上原因将不再是主要原因。众多资料表明: 蚓穴内部及蚓粪的微生物量显著高于对照土壤<sup>[11,17]</sup>, 且过腹的土壤及有机物料更利于微生物侵染和繁殖<sup>[18]</sup>。这是蚯蚓能提高土壤 MBC 的前提条件。在这个前提下, 由于田间实验接近自然条件, 蚯蚓生命活性得以充分体现。而威廉腔环蚓又具有上食下居的特点, 因此它的生命活动决定着穴道和蚓粪将不断地产生, 从而为微生物量的增大提供了必要条件。此外, 蚯蚓加速秸秆的分解矿化, 降低了秸秆 C/N 比, 使得土壤养分不但能够迅速释放和转化<sup>[19]</sup>, 而且也为微生物提供了更好的生存环境。虽然真菌是蚯蚓的一个主要食物来源, 但我们用稀释平板法研究 2004 年麦季土样发现: 接种蚯蚓的处理, 真菌数量提高了 59%~68%。该结果表明, 在田间长期实验中, 土壤

真菌量并不因为蚯蚓的取食而降低。同时蚯蚓活动提高了土壤中活性微生物的比例也为大家所公认<sup>[9, 20, 21]</sup>, 因此当生存环境对微生物生长有利的时候, 活性微生物的增加幅度可能远远超过部分微生物的减少量, 必然造成该库的增大。所以, 尽管蚯蚓吞噬微生物, 植物也在大力吸收微生物体释放的养分, 但在养分迅速而大量的转化中, 并不影响微生物量碳库的增大趋势。

种植不同作物时的 MBC 变化, 主要归结于作物的性质差异和生长环境的差异。可能小麦的根系分泌物或作物脱落物比水稻更利于被微生物所侵染和利用; 也可能是收获小麦的时节具有利于微生物生长繁殖的气候和水分条件。秸秆所造成的 MBC 季节差异变小的原因可以用“稀释原理”来解释。施用的大量秸秆成为微生物的又一主要侵染源, 使土壤肥力提高, 从而大大降低了作物和气候等因素造成的土壤 MBC 的差异。而当接种蚯蚓后, 蚯蚓的破碎和吞噬等作用, 促进了秸秆的分解矿化, 秸秆的“稀释作用”在大量而频繁的土壤动物作用下处于弱势, 使得作物和环境因素又成为土壤 MBC 差异的主要影响因素, 因而差异又变得显著。在不同土层中, 蚯蚓对土壤微生物量碳的作用主要受到秸秆施用方式的影响。当秸秆表施时, 经过整个生长季的分解和矿化, 养分在表层大量富积, 蚯蚓作用自然没有秸秆混施时明显。当到达 5~ 10 cm 土层时, 秸秆表施处理的土壤养分相对秸秆混施处理较少, 所以在该层出现相反的结果。当到 10~ 20 cm 的土层时, 作物成熟而密集根系也影响土壤养分的因素, 所以蚯蚓对 MBC 的影响就变得更加复杂。

总之, 蚯蚓活动促进了稻麦轮作土壤微生物量碳库的增大, 这对于增强土壤生物活性、调节库内养分释放与积聚的生物周转过程, 进而提高养分的生物有效性可能有着积极的意义。今后有必要进一步探明蚯蚓活动对土壤微生物量及其周转的影响与调控途径, 以明确土壤动物对土壤养分生物有效性及植物生长的实际作用和贡献, 更好地利用土壤生物资源服务于农业生产。

## 参 考 文 献

[ 1 ] Hallaire V, Cumia P, Dubois A. Soil structure changes induced by the tropical earthworm *Pontoscolex corethrurus* and organic inputs in a Peruvian ultisol. *Eur. J. Soil Biol.*, 2000, 36: 35~ 44

[ 2 ] Ketterings Q M, Blair J M, Marinissen J C Y. Effects of earthworms on soil aggregate stability and carbon and nitrogen storage in a legume cover crop agroecosystem. *Soil Biol. Biochem.*, 1997, 29: 401~

408

[ 3 ] Lachniet S L, Pamelee R W, McCartney D, *et al.* Characteristics of macroporosity in a reduced tillage agroecosystem with manipulated earthworm populations: implications for infiltration and nutrient transport. *Soil Biol. Biochem.*, 1997, 29: 493~ 498

[ 4 ] Cortez J, Billes G, Bouch M B. Effect of climate, soil type and earthworm activity on nitrogen transfer from a nitrogen-15-labelled decomposing material under field conditions. *Biol. Fertil. Soils*, 2000, 30: 318~ 327

[ 5 ] Blair J M, Pamelee R W, Allen M F, *et al.* Changes in soil N pools in response to earthworm population manipulation in agroecosystems with different N sources. *Soil Biol. Biochem.*, 1997, 29: 361~ 367

[ 6 ] Tomi V, Grappelli, Galli E. The hormone-like effect of earthworm casts on plant growth. *Biol. Fertil. Soils*, 1988, 5(4): 42~ 44

[ 7 ] 李辉信, 胡锋, 沈其荣, 等. 接种蚯蚓对秸秆还田土壤碳、氮动态和作物产量的影响. *应用生态学报*, 2002, 13(12): 1637~ 1642. Li H X, Hu F, Shen Q R, *et al.* Effect of earthworm inoculation on the dynamics of soil carbon and nitrogen and on crop yield with application of com residues (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(12): 1637~ 1642

[ 8 ] Brookes P C, Landman A, Pruden G, *et al.* Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure MBN in soil. *Soil Biol. Biochem.*, 1985, 12: 837~ 842

[ 9 ] 张宝贵, 李贵桐, 申天寿. 威廉环毛蚯蚓对土壤微生物量及活性的影响. *生态学报*, 2000, 20(1): 168~ 172. Zhang B G, Li G T, Shen T S. Influence of the earthworm *Pheretima guillelmii* on soil microbial biomass and activity (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 168~ 172

[ 10 ] Fraser P M, Beare M H, Butler R C, *et al.* Interactions between earthworms (*Aporrectodea caliginosa*), plants and crop residues for restoring properties of a degraded arable soil. *Pedobiologia*, 2002, 47: 870~ 876

[ 11 ] Tiunov A V, Scheu S. Microbial respiration, biomass, biovolume and nutrient status in burrow walls of *Lumbricus terrestris* L. (Lumbricidae). *Soil Biol. Biochem.*, 1999, 31: 2039~ 2048

[ 12 ] Sable S, Kirsch A S. Spring dynamics of soil carbon, nitrogen, and microbial activity in earthworm middens in a no-till corn field. *Biol. Fertil. Soils*, 1998, 26: 243~ 249

[ 13 ] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 1999. 146~ 259. Lu R K. Method of Soil and Agrochemical Analysis (In Chinese). Beijing: Chinese Agricultural Science & Technology Press, 1999

[ 14 ] Burtelow A E, Bohlen P J, Groffman P M. Influence of exotic earthworm invasion on soil organic matter, microbial biomass and denitrification potential in forest soils of the northeastern United States. *Appl. Soil Ecol.*, 1998, 9: 197~ 202

[ 15 ] Tian G, Kang B T, Brussaard L. Effect of mulch quality on earthworm activity and nutrient supply in the humid tropics. *Soil Biol. Biochem.*, 1997, 29: 369~ 373

[ 16 ] Devliegher W, Verstraete W. The effect of *Lumbricus terrestris* on soil in relation to plant growth: Effect of nutrient-enrichment process-

- es (NEP) and gut-associated processes (GAP). *Soil Biol. Biochem.*, 1997, 29: 341~ 346
- [17] Gress J H, Savin M C, Amador J A. Soil micropore structure and carbon mineralization in burrows and casts of an anecic earthworm (*Lumbricus terrestris*). *Soil Biol. Biochem.*, 2001, 33: 1881~ 1887
- [18] Brown G G, Barois I, Lavelle P. Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity in the drilosphere and the role of interactions with other edaphic functional domains. *Eur. J. Soil Biol.*, 2000, 36: 177~ 198
- [19] Cortez J, Billes G, Bouch M B. Effect of climate, soil type and earthworm activity on nitrogen transfer from a nitrogen-15-labelled decomposing material under field conditions. *Biol. Fertil. Soils*, 2000, 30: 318~ 327
- [20] J gou D, Schrader S, Diestel H, *et al.* Morphological, physical and biochemical characteristics of burrow walls formed by earthworms. *Appl. Soil Ecol.*, 2001, 17: 165~ 174
- [21] Savin M C, Gress J H, Amador J A. Microbial and microfaunal community dynamics in artificial and *Lumbricus terrestris* (L.) burrows. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68: 116~ 121

## EFFECTS OF EARTHWORMS ON SOIL MICROBIAL BIOMASS CARBON IN RICE-WHEAT ROTATION AGRO-ECOSYSTEM

Hu Feng Wang Xia Li Huixin Yu Jianguang Wang Dandan

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract** An experiment has been conducted in the Experimental Station of the Nanjing Agricultural University since 1999, with the experimental fields separated into plots (2.8 m × 1.0 m × 0.6 m) by concrete frames. The soil in the plots was sandy loam soil (Orthic aquisols) collected from Rugao County, Jiangsu Province. The experiment was designed to be rice and wheat rotation with five treatments, i. e. application of corn residues (incorporating or mulching) with or without earthworms and control, and 3 replicates for each treatment. The responses of soil microbial biomass carbon (MBC) to earthworm activity had been investigated from the rice season of 2001 to the wheat season of 2004. It was found that MBC significantly increased ( $p < 0.05$ ) in the treatments with earthworms. Generally, the MBC was higher at the maturing stage of wheat than that in the rice season in the same year, however, the difference was notably enhanced ( $p < 0.05$ ) by earthworm and weakened by input of corn straw. Positive effect of earthworms on MBC was more distinct in the 0~ 5 cm soil layer with corn residues incorporated and in the 5~ 10 cm soil layer with corn residues mulched. The enhancement of MBC by earthworms was similar in the 10~ 20 cm soil layer whether corn residue was incorporated or mulched.

**Key words** Earthworms; Soil microbial biomass; Crop residues; Rice-wheat rotation system