

不同的土壤培肥措施对低肥力农田 土壤微生物生物量碳的影响

胡 诚, 曹志平*, 叶钟年, 吴文良

(中国农业大学资源与环境学院生态系, 北京 100094)

摘要:为了研究华北农田生态系统化肥、秸秆还田和有机肥等培肥措施对土壤微生物生物量碳的影响,在山东省桓台县冬小麦套种夏玉米种植模式下的低肥力生产系统中设置了田间试验。田间试验设 7 个处理,依序为:①全还+化肥(小麦秸秆+玉米秸秆还田+600kgN/(hm²·a)),②全还+化肥+有机肥(小麦秸秆+玉米秸秆还田+有机肥),③麦还+化肥(小麦秸秆还田+600kgN/(hm²·a)),④麦还+化肥+有机肥(小麦秸秆还田+600kgN/(hm²·a)+有机肥),⑤化肥(600kgN/(hm²·a)),⑥麦还双倍+化肥(加倍小麦秸秆还田+600kgN/(hm²·a)),⑦不施肥(对照)。1998 年 4 月至 1998 年 11 月田间取样测定了土壤的微生物生物量碳。试验结果显示:在整个试验阶段提高施肥水平微生物生物量碳都明显增加。单施化肥可以增加土壤的微生物生物量碳,有机物配合施用化肥作用更加明显。不同秸秆还田方式(全还、双倍麦还和麦还)对微生物生物量碳影响的季节变化较大。有机肥对提高土壤微生物生物量碳的作用是很明显的。从微生物生物量碳的全年平均值来看,全还+化肥+有机肥处理>麦还+化肥+有机肥处理>全还+化肥处理>双倍麦还+化肥处理>麦还+化肥处理>化肥处理>对照。因此,低肥力的农田生态系统中最好的培肥措施是化肥配施有机物。

关键词:农田土壤;培肥措施;微生物生物量碳

文章编号:1000-0933(2006)03-0808-07 中图分类号:S153 文献标识码:A

Impact of soil fertility maintaining practice on soil microbial biomass carbon in low production agro-ecosystem in northern China

HU Cheng, CAO Zhi-Ping*, YE Zhong-Nian, WU Wen-Liang (Department of Ecology, College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100094, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 808 ~ 814.

Abstract: The experiment was carried out on cultivation patterns of winter wheat and summer corn in Huantai County, Shandong Province, China. The purpose of the study was to understand how soil fertility maintaining practices, such as chemical fertilizer application, the use of organic manure and the return of crop straw to the field affected soil microbial biomass carbon (MBC) dynamics in a low production agro-ecosystem of northern China. Seven treatments of fertility maintaining practices in the field were carried out (where the symbol "+" means combination application): ① wheat straw + corn straw + chemical fertilizer, ② wheat straw + corn straw + chemical fertilizer + organic manure, ③ wheat straw + chemical fertilizer, ④ wheat straw + chemical fertilizer + organic manure, ⑤ chemical fertilizer, ⑥ double wheat straw + chemical fertilizer, ⑦ control randomly designed and applied in the experimental plots. The content of soil MBC was measured in laboratory for different crop growth stages. The experimental results showed that: manure application enhanced the content of MBC throughout the experimental stage; a single chemical fertilizer application could elevate the content of MBC, but chemical fertilizer cooperating organic material could more increase the

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(39630070)

收稿日期:2005-08-04; **修订日期:**2006-01-20

作者简介:胡 诚(1972~),男,湖北安陆人,博士生,主要从事土壤生态学研究. E-mail: hucheng@webmail.hzau.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: zhiping@cau.edu.cn

Foundation Item: The project was supported by National Natural Science Key Project Foundation (No. 39630070)

Received date: 2005-08-01; **Accepted date:** 2006-01-20

Biography: HU Cheng, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil ecology, E-mail: hucheng@webmail.hzau.cn

content of MBC; and that different compositions of straw (wheat straw + corn straw, double wheat straw and wheat straw) returned to the field produced distinct variations in different seasons. Organic manure showed an obvious increase in the content of MBC. The content of MBC had the following ascending trend with regard to annual average the content of MBC: Wheat Straw + Corn Straw + Chemical Fertilizer + Organic Fertilizer > Wheat Straw + Chemical Fertilizer + Organic Manure > Wheat Straw + Corn Straw + Chemical Fertilizer > Double Wheat Straw + Chemical Fertilizer > Wheat Straw + Chemical Fertilizer > Chemical Fertilizer > Control. Therefore, manure applications heighten soil microbial activity and improve soil fertility. The best soil fertility maintaining practice was a combination of chemical fertilizer incorporating organic material in low fertility agro-ecosystem.

Key words: agriculture soil; soil fertility management practice; microbial biomass carbon

土壤微生物是土壤有机质和土壤养分转化和循环的动力,它参与土壤中有机的分解、腐殖质的形成、土壤养分转化和循环等过程。土壤微生物量是土壤养分的储存库和植物生长养分的重要来源^[1,2]。微生物量受农业管理措施的影响很大,是灵敏的反映土壤干扰的生物学指标^[3-5]。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的活性部分,可反映土壤有效养分状况和生物活性,能在很大程度上反应土壤微生物数量,是评价土壤微生物数量和活性及土壤肥力的重要指标^[6-8]。因此,研究不同的农业管理措施对微生物生物量碳的影响具有重要的意义。

山东省桓台县长期实施秸秆还田以及有机无机肥配施等土壤培肥措施,1982年全县实现吨粮田,但是玉米、小麦秸秆还田、有机肥及无机肥如何配合施用,对土壤微生物有何影响还不清楚。本实验通过在弃耕农田上进行不同的培肥试验,旨在探讨土壤肥力的演变规律和培肥措施对土壤微生物量碳的影响,寻找提高土壤微生物数量的有效方法,为实现农业生态系统高产、高效、优质和农业可持续发展提供理论和技术上的支撑。

1 材料与方 法

试验点选在华北高产粮区——山东省桓台县,以冬小麦套种夏玉米一年两熟轮作制吨粮田为主的高产农田生态系统中。本试验为了揭示高产粮区土壤肥力形成起始阶段土壤生物的变化规律,在弃耕 30a 无人为秸秆还田历史和没有施任何肥料肥力很低的田块上设置试验,代表集约化农业和秸秆还田措施起始阶段的肥力状况,试验地土壤基础理化性质见表 1。在其上设置不同培肥与施肥处理(表 2),代表当地不同的施肥模式。处理小区随机排列,其间均设保护行。试验中田间管理措施如灌溉、使用机械、喷洒农药等均一致。

表 1 土壤的理化性质

Table 1 Physicochemical properties of experiment field soil

| 有机质 (%) Organic matter | 全氮 (%) Total N | 碱解氮 (mg/kg) Alkali-hydrolyzable N | 全磷 (%) Total P | 有效磷 (mg/kg) Available P | 有效钾 (mg/kg) Available K | pH 值 pH |
|---------------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|------------|
| 1.43 | 0.09 | 55.39 | 0.08 | 11.30 | 125.50 | 8.35 |

表 2 试验处理

Table 2 Treatments of experiment in the field

| 处理 Treatment | 代号 Code | 玉米秸秆 Corn straw | 小麦秸秆 Wheat straw | 化肥 Chemical fertilizer | 厩肥 Organic fertilizer |
|-----------------|-------------------|-----------------|------------------|------------------------|-----------------------|
| 1 全还 + 化肥 | WS + CS + CF | + | + | + | - |
| 2 全还 + 化肥 + 有机肥 | WS + CS + CF + OF | + | + | + | + |
| 3 麦还 + 化肥 | WS + CF | - | + | + | - |
| 4 麦还 + 化肥 + 有机肥 | WS + CF + OF | - | + | + | + |
| 5 化肥 | CF | - | - | + | - |
| 6 麦还双倍 + 化肥 | 2WS + CF | - | ++ | + | - |
| 7 不施肥(对照) | CK | - | - | - | - |

+ 有 with; - 无 without; WS wheat straw, CS corn straw, CF chemical fertilizer, OF organic fertilizer

每年的麦秸施用量为 7.5t/hm²,麦秸加倍施用量为 15t/hm²,1997 年 6 月小麦收获后开始将小麦秸秆打碎后铺在玉米茬口上;玉米秸秆施用量为 8t/hm²,从 1997 年 9 月开始玉米秸秆还田,将玉米秸秆粉碎后翻入

耕层;化肥用量为常规施肥水平 $600\text{kgN}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $166.5\text{kgP}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, $148.5\text{kgK}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; 施肥品种为尿素(N22%), 普通过磷酸钙(P_2O_5 12%), 磷酸二铵(N 22%, P_2O_5 46%), KCl(K_2O 63%)。化肥施用分配在小麦季节和玉米季节中, 在 10 月初种植小麦时施基肥 $150\text{kgN}/\text{hm}^2$ 、 $99\text{kgP}/\text{hm}^2$ 、 $81\text{kgK}/\text{hm}^2$ 和在 4 月初施拔节肥 $150\text{kgN}/\text{hm}^2$, P、K 肥均作基肥施入; 在 5 月底种植玉米时施基肥 $100\text{kgN}/\text{hm}^2$ 、 $67.5\text{kgP}/\text{hm}^2$ 、 $67.5\text{kgK}/\text{hm}^2$ 和在 7 月初施拔节肥及 7 月底施孕穗肥各 $100\text{kgN}/\text{hm}^2$, P、K 肥均作基肥施入。有机肥是厩肥, 施用量为 $30\text{m}^3/\text{hm}^2$, 其鲜重全氮量为 0.24%, $\text{NH}_4\text{-N}$ 为 $860\text{mg}/\text{kg}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 为 $10\text{mg}/\text{kg}$, pH 为 7.3; 10 月初玉米秸秆还田时施用有机肥和复合化肥并一起翻入耕层。冬小麦品种: 鲁麦 23, 种植密度为 120 万基本苗/ hm^2 ; 夏玉米品种: 鲁玉 10, 种植密度为 $80\ 000$ 株/ hm^2 。

试验取样时间为 1998 年 4 月至 1998 年 11 月, 共取土样 7 次。使用 $3\text{cm} \times 20\text{cm}$ 土钻在试验处理小区随机采集 0~20cm 耕层土壤 15 钻, 迅速装入塑料袋中带回, 置实验室冰箱中冷藏待测。土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸- $0.5\text{mol}/\text{L}$ K_2SO_4 浸提法测定, 熏蒸提取采用 Vance 等^[9] 人的步骤, 浸提液中可溶性碳采用重铬酸钾氧化外热源法测定, 转换系数为 2.64。其它土壤理化性质采用常规土壤农化分析方法测定^[10]。

所得试验数据采用 EXCEL 和 SPSS 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 化肥对土壤微生物生物量碳的影响

单施化肥对土壤微生物量碳的影响由图 1 所示。将处理 5(化肥)和处理 7(对照)比较发现, 土壤微生物生物量碳值除了 11 月份之外, 处理 5(化肥)都比对照的要高一些, 而且在 4 月和 5 月份差异达到显著水平 (*, $p < 0.05$, t -test)。4、5 月份由于天气回暖, 微生物活性增强, 因此化肥处理的微生物量碳值在 4、5 月份比对照显著的高一些, 而且在 4 月份达到全年最高值。从全年平均值来看, 处理 5(化肥)的土壤微生物量碳要比对照的高 23.29%, 差异也达到显著水平 (*, $p < 0.05$, t -test)。因为化肥能够促进作物和其它生物的生长, 促进了微生物的繁殖。因此, 在低肥力的农业生态系统中, 化肥能够显著提高土壤的微生物活性, 从而提高土壤的肥力。

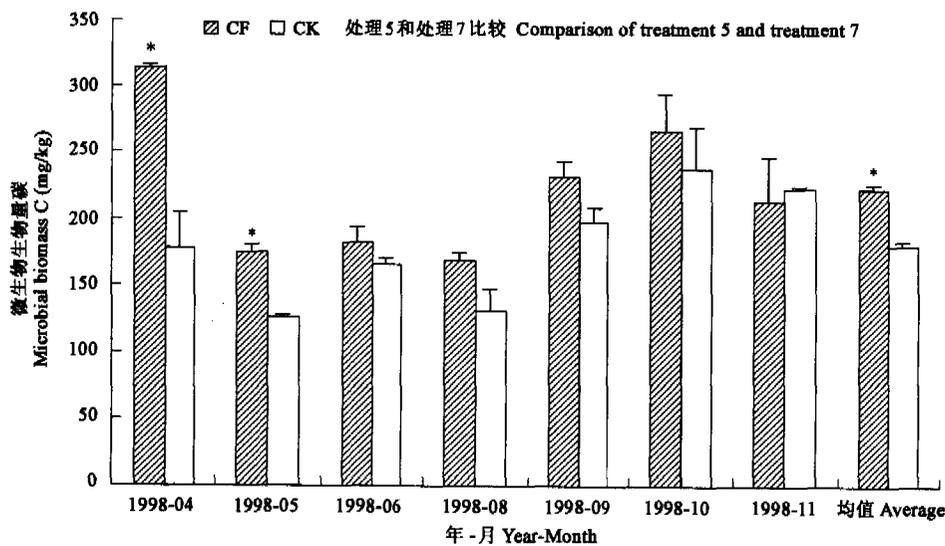


图 1 施用化肥对土壤微生物生物量碳的影响

Fig. 1 Impact of applied chemical fertilizer on microbial biomass carbon

2.2 秸秆还田对土壤微生物生物量碳的影响

处理 1(全还+化肥)和处理 5(化肥)比较发现(图 2), 除了 9 月异常外, 全还+化肥处理在其它月份比化肥处理的微生物量碳高一些, 而且在 5 月份、6 月份和 8 月份差异达到显著水平(Duncan's 多重比较, 不同的字母表示差异显著, $p < 0.05$), 主要是这 3 个月气温较高秸秆大量分解, 而且在 6 月份小麦秸秆也开始还田, 因

此在5月份、6月份和8月份处理1比处理5的微生物量碳显著的高。从全年平均值来看,处理1(全还+化肥)比处理5(化肥)高一些,为19.64%,差异也达到显著水平(Duncan's多重比较,不同的字母表示差异显著, $p < 0.05$)。

同理处理3(麦还+化肥)和处理5(化肥)比较发现(图2),除了4月份和8月份异常之外,麦还+化肥处理在其它月份比化肥处理的微生物量碳高一些,而且在6月份差异达到显著水平(Duncan's多重比较,不同的字母表示差异显著, $p < 0.05$),主要是在6月份小麦秸秆也开始还田,因此6月份处理3比处理5的微生物量碳显著的高。从全年平均值来看,处理3(麦还+化肥)比处理5(化肥)高9.77%。因此,无论是全还还是麦还,总趋势是秸秆配合化肥施用都能够土壤微生物的数量,从而提高提高土壤的微生物量碳,主要是秸秆在改善土壤理化性质的同时,提供了微生物大量繁殖的能源。

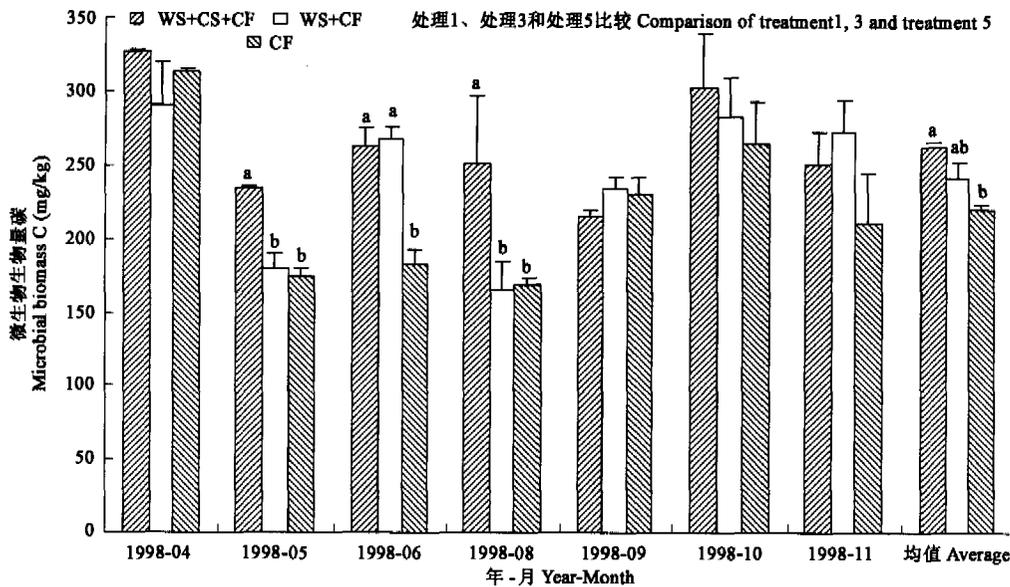


图2 秸秆还田对土壤微生物生物量碳的影响

Fig. 2 Impact of straw return to the field on soil microbial biomass carbon

将处理1(全还+化肥)和处理3(麦还+化肥)比较发现(图3),全还+化肥处理在4月、5月、8月和10月比麦还+化肥处理的微生物量碳高一些,而且在5月差异达到显著水平(Duncan's多重比较,不同的字母表示差异显著, $p < 0.05$),但在6月、9月和11月麦还+化肥处理比全还+化肥处理要高一些。从全年平均值来看,处理1(全还+化肥)比处理3(麦还+化肥)高8.98%。不同季节不同的秸秆种类和用量还田后对土壤微生物数量的影响较大,但是由于处理1是秸秆覆盖与翻埋相结合,而处理3是小麦秸秆覆盖,前者对土壤微生物数量的影响高于后者。

在秸秆还田量相同的条件下,通过处理1(全还+化肥)和处理6(双倍麦还+化肥)比较发现(图3),处理1(全还+化肥)在4、8、9月份和11月份比处理6(双倍麦还+化肥)的微生物量碳要高一些,8月份达到显著水平(Duncan's多重比较,不同的字母表示差异显著, $p < 0.05$),这主要是6月份开始小麦秸秆覆盖,8月份高温高湿分解达到最高水平所致;但在5、6月份和10月份处理6(双倍麦还+化肥)比处理1(全还+化肥)的微生物量碳值要高一些,5月份达到显著水平(Duncan's多重比较,不同的字母表示差异显著, $p < 0.05$)。从全年平均值来看处理1(全还+化肥)比处理6(双倍麦还+化肥)高8.37%。由于处理1是秸秆覆盖与翻埋相结合,而处理6是小麦秸秆覆盖,从不同的秸秆还田方式的角度分析,对土壤微生物数量的影响前者优于后者。

在秸秆种类相同的还田方式下,秸秆还田量不同对土壤微生物量碳的影响,通过处理3(麦还+化肥)和处理6(双倍麦还+化肥)比较发现(图3),处理3(麦还+化肥)在4、8、9月份和11月份比处理6(双倍麦还+化肥)的微生物量碳值要高一些,9月份达到显著水平(Duncan's多重比较,不同的字母表示差异显著,

$p < 0.05$), 6 月份几乎没有差异。但是处理 6(双倍麦还 + 化肥)在 5 月份和 10 月份比处理 3(麦还 + 化肥)的微生物量碳值要高一些, 5 月份达到显著水平(Duncan's 多重比较, 不同的字母表示差异显著, $p < 0.05$)。从全年平均值来看差异很小, 处理 6(双倍麦还 + 化肥)仅比处理 3(麦还 + 化肥)高 0.42%。上述结果表明, 麦还与双倍麦还配合化肥施用对土壤微生物量碳影响的差异是很小的, 即小麦秸秆还田量对土壤微生物数量的影响很小。

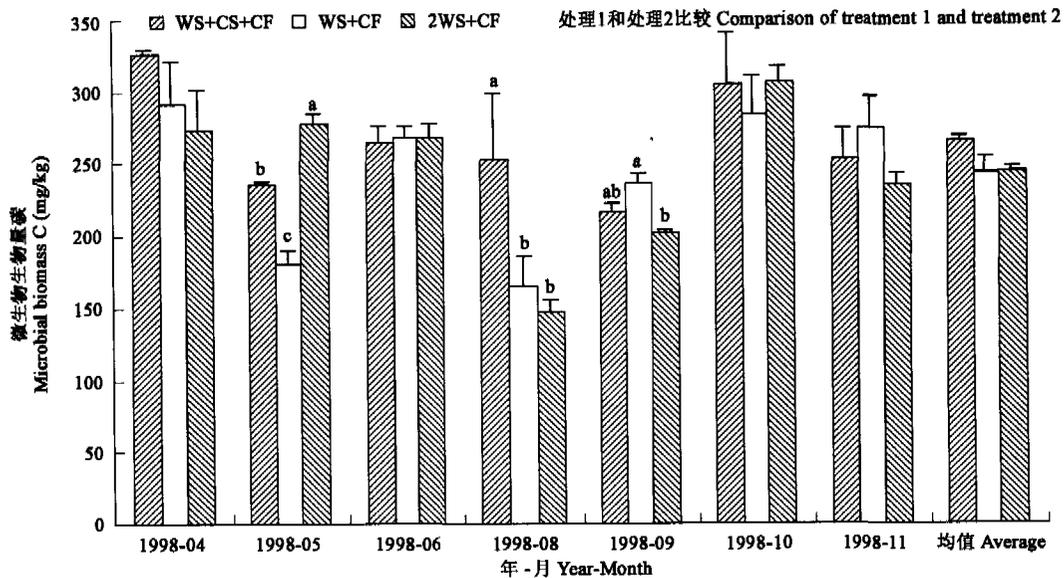


图 3 不同秸秆还田方式对土壤微生物生物量碳的影响

Fig. 3 Impact of different straw return to the field on soil microbial biomass carbon

2.3 有机肥对土壤微生物生物量碳的影响

将处理 1(全还 + 化肥)和处理 2(全还 + 化肥 + 有机肥)比较可以看出(图 4), 除了 8 月份之外, 其余月份都是处理 2(全还 + 化肥 + 有机肥)土壤微生物量碳高于处理 1(全还 + 化肥), 而且在 4, 5 月份和 11 月份差异达到显著水平 (*, $p < 0.05$, t -test)。从全年平均值来看处理 2(全还 + 化肥 + 有机肥)比处理 1(全还 + 化肥)高 25.83%, 差异也达到显著水平 (*, $p < 0.05$, t -test)。这说明秸秆还田在与化肥配合施用的同时, 增施有机肥可以显著提高土壤的微生物生物量碳, 因为有机肥是一种腐熟的肥料, 施入之后提供了微生物大量繁殖的能源。

同样, 从图 5 可以看出, 除了 4 月份之外, 其它月份都是处理 4(麦还 + 化肥 + 有机肥)土壤微生物生物量碳高于处理 3(麦还 + 化肥), 而且在 5 月达到显著水平 (*, $p < 0.05$, t -test)。从全年平均值来看, 处理 4(麦还 + 化肥 + 有机肥)比处理 3(麦还 + 化肥)高 15.63%。因此, 有机肥可以显著提高土壤微生物的数量。

3 结论与讨论

研究结果显示, 集约化程度增强(提高施肥水平)提高了土壤微生物生物量碳。在整个实验阶段微生物生物量都明显增加(除了 11 月份的化肥处理), 说明低肥力的土壤系统中施肥可以提高土壤微生物的数量和活性, 明显改善土壤的肥力。但各种施肥方式和施肥量对微生物生物量碳的影响是不同的。

单施化肥也可以增加土壤的微生物生物量, 这是因为在低肥力的农业生态系统中施用化肥可以促进植物和其它生物的生长, 增加了作物的根系和根系分泌物, 因而促进了土壤微生物的繁殖, 提高了微生物生物量^[11, 12]。这也证明化肥在投入的初期可以大大提高土地生产力。但是有机物和化肥配合施用, 可以提高氮肥的效率, 可以更大程度地增加土壤的微生物数量和活性, 从而提高土壤肥力^[13, 14]。

不同秸秆还田方式对微生物生物量碳的影响是不同的, 季节变异较大。秸秆还田在整个试验阶段微生物生物量都有增加。但总的来看, 全还处理的微生物量碳高于麦还处理, 全还处理的微生物量碳高于双倍麦还

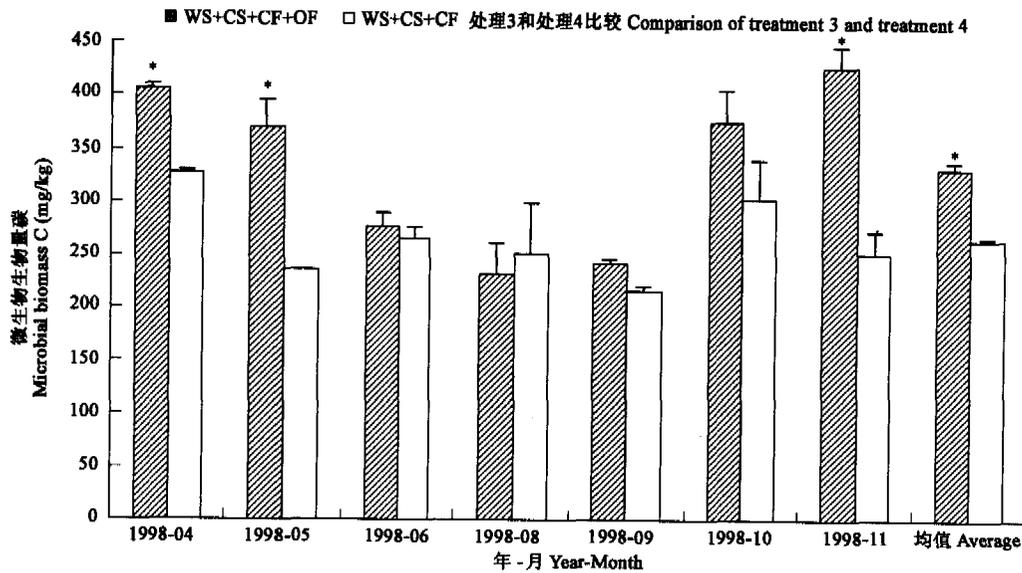


图4 施用有机肥对土壤微生物生物量碳的影响

Fig.4 Impact of applied organic fertilizer on soil microbial biomass carbon

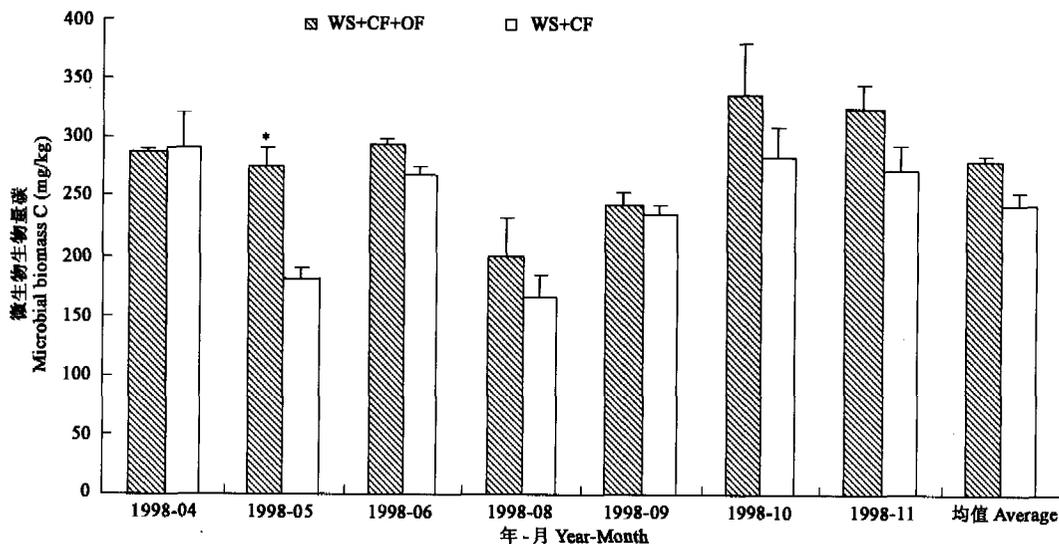


图5 施用有机肥对土壤微生物生物量碳的影响

Fig.5 Impact of applied organic fertilizer on soil microbial biomass carbon

处理,双倍麦还处理的微生物量碳略高于麦还处理。秸秆全还处理对土壤微生物量碳的影响高于麦还处理,原因是全还是小麦秸秆在玉米生长期田间覆盖,在小麦播种期间和玉米秸秆翻埋在土中与土壤充分接触,对土壤微生物的影响时间长,强度大一些;而小麦秸秆是在玉米生长期覆盖,种植玉米时才翻入土中,对土壤微生物的影响小一些。无论是玉米秸秆还是小麦秸秆还田后都可以提高土壤的微生物生物量碳,因为秸秆提高了土壤的有机质,改善了土壤的理化性质,为微生物的生长繁殖提供了良好的环境^[15, 16]。

有机肥对微生物生物量碳的促进作用是很明显的(图4和图5)^[17]。主要是因为有机肥施入之后在改善土壤理化性状的同时也为微生物的生长提供了良好的环境条件和能源^[18]。秸秆还田增施有机肥在秸秆分解的过程中,为土壤微生物生长提供了丰富的碳源和氮源,极大地刺激了微生物的活性,促进了微生物的生长^[19]。

总之,高水平的肥料投入都导致低肥力的农业生态系统土壤微生物生物量增加,从而提高了土壤肥

力^[20]。不同的肥料种类和不同培肥投入方式对土壤微生物生物量的影响又有很大的差异。作物秸秆还田和施用有机肥极大地增加了土壤的微生物生物量碳。化肥虽然能够增加土壤微生物生物量,但和有机物配合施用效果更好。

References:

- [1] 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. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89 ~ 96.
- [2] Spedding T A, Hamel C, Mehuys G R, Madramootoo C A. Soil microbial dynamics in maize-growing soil under different tillage and residue management systems. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36: 499 ~ 512.
- [3] Ren T Z, Grego S. Soil bioindicators in sustainable agriculture. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(1): 68 ~ 75.
- [4] Yu S, Li Y, Wang J H, *et al.* Study on the soil microbial biomass as a bio-indicator of soil quality in the red earth ecosystem. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(3): 413 ~ 421.
- [5] Zhang H, Zhang G L. Microbial biomass carbon and total organic carbon of soils as affected by rubber cultivation. *Pedosphere*, 2003, 13(4): 353 ~ 357.
- [6] Li D P, Wu Z J, Chen L J, *et al.* Dynamics of microbial biomass C in a black soil under long-term fertilization and related affecting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 14(8): 1334 ~ 1338.
- [7] Powlson D S, Brookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19: 159 ~ 164.
- [8] Nsabimana D, Haynes R J, Wallis F M. Size, activity and catabolic diversity of the soil microbial biomass as affected by land use. *Applied Soil Ecology*, 2004, 26: 81 ~ 92.
- [9] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial C. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19: 703 ~ 707.
- [10] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences: *Physical-Chemical Analysis of Soil*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Publishing Press, 1980. 1 ~ 490.
- [11] Angers D A, Pesant A, Vigneux J. Early cropping induced changes in soil aggregation, organic matter, and microbial biomass. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 115 ~ 119.
- [12] He Z L, Wu J, O'Donnell A G, *et al.* Seasonal responses in microbial biomass carbon, phosphorus and sulphur in soils under pasture. *Biology & Fertility of Soils*, 1997, 24: 421 ~ 428.
- [13] Lao X R, Sun W H, Wang Z, *et al.* Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 618 ~ 623.
- [14] Pan Z Y, Wu W L, Liu G D, *et al.* Effect of straw return and nitrogen fertilizer application on the N₂O emission of soil. *Soils and Fertilizers*, 2004, (5): 6 ~ 8.
- [15] Gupta V V S R, Roper M M, Kirkegaard J A, *et al.* Changes in microbial biomass and organic matter levels during the first year of modified tillage and stubble management practices on a red earth. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32: 1339 ~ 1354.
- [16] Meng F Q, Wu W L, Xin D H. Changes of soil organic matter and nutrients and their relationship with crop yield in high yield farmland. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(4): 370 ~ 374.
- [17] Deboz K, Rasmussen P H, Pedersen A R. Temporal variations in microbial biomass C and cellulolytic enzyme activity in arable soils: effect of organic matter input. *Applied Soil Ecology*, 1999, 13: 209 ~ 218.
- [18] Zhang X M, Wu W L, Li J, *et al.* Rational N regulation in wheat/corn high-yield farm ecosystem-taking winter wheat-summer corn system in Huantai county of Shandong Province as an example. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(3): 297 ~ 300.
- [19] Powlson D S, Brookes P C, Christensen B T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19: 159 ~ 164.
- [20] Chen G C, He Z L, Huang C Y. Turnover of microbial biomass C in red soils and its significance in soil fertility evaluation. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(1): 89 ~ 96.

参考文献:

- [1] 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. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89 ~ 96.
- [3] 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.
- [4] 俞慎,李勇,王俊华,等. 土壤微生物作为红壤质量生物指标的探讨. *土壤学报*, 1999, 36(3): 413 ~ 421.
- [6] 李东坡,武志杰,陈利军,等. 长期培肥黑土微生物量碳动态变化及影响因素. *应用生态学报*, 2004, 14(8): 1334 ~ 1338.
- [10] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化性质分析*. 上海:上海科技出版社, 1980. 1 ~ 490.
- [13] 劳秀荣,孙伟红,王真,等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响. *土壤学报*, 2003, 40(4): 618 ~ 623.
- [14] 潘志勇,吴文良,刘光栋,高秀文. 不同秸秆还田模式与氮肥施用量对土壤 N₂O 排放的影响. *土壤肥料*, 2004, (5): 6 ~ 8.
- [16] 孟凡乔,吴文良,辛德惠. 高产农田土壤有机质、养分的变化规律与作物产量的关系. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(4): 370 ~ 374.
- [18] 张新明,吴文良,李季,等. 麦玉两熟高产农田生态系统氮素的合理调控——以山东省桓台县冬小麦套种夏玉米系统为例. *应用生态学报*, 1999, 10(3): 297 ~ 300.
- [20] 陈国潮,何振立,黄昌勇. 红壤微生物生物量 C 周转及其研究. *土壤学报*, 2002, 39(1): 89 ~ 96.