

保护性耕作对土壤微生物量及活性的影响

王 芸 ,李增嘉* ,韩 宾 ,史忠强 ,宁堂原 ,江晓东 ,郑延海 ,白 美 ,赵建波

(山东农业大学农学院 ,山东省作物生物学重点实验室 ,山东 泰安 271018)

摘要 :研究保护性耕作对土壤微生物特性的影响对于土壤管理具有重要意义。试验研究了保护性耕作对麦田土壤微生物量碳、活跃微生物量、土壤呼吸、呼吸商的影响。前 3 项采用的方法分别是 :基质诱导呼吸法、呼吸曲线数学分析法和 CO₂ 释放量法。结果表明 ,保护性耕作土壤微生物量碳 0 ~ 10 cm 土层大于 10 ~ 20 cm 土层 ,而常规耕作两土层间无明显差异。秸秆还田在播种前、越冬期和起身期能显著提高土壤微生物量碳 ,而开花期和收获期则降低土壤微生物量碳。少耕还田 10 ~ 20 cm 土层微生物具有较强的养分调控作用。保护性耕作利于 0 ~ 10 cm 土层活跃微生物量的提高。秸秆还田和保护性耕作在耕作作业初期 (越冬期和起身期)能增强土壤呼吸速率 ,在耕作作业后期 (开花期和收获期)能显著降低土壤呼吸速率。免耕秸秆覆盖在 10 ~ 20 cm 土层呼吸商较高 ,而常规耕作无秸秆还田在 0 ~ 10 cm 土层呼吸商较高。土壤微生物量碳和呼吸商是衡量土壤微生物特性的重要指标。

关键词 :保护性耕作 ,微生物量碳 ,活跃微生物量 ,土壤呼吸 ,呼吸商

文章编号 :1000-0933 (2007)08-3384-07 中图分类号 :S341 文献标识码 :A

Effects of conservation tillage on soil microbial biomass and activity

WANG Yun ,LI Zeng-Jia* ,HAN Bin ,SHI Zhong-Qiang ,NING Tang-Yuan ,JIANG Xiao-Dong ,ZHENG Yan-Hai ,BAI Mei ,ZHAO Jian-Bo

Agronomy College of Shandong Agricultural University ,State Key Lab of Crop Biology of Shandong Province ,Taian ,Shandong 271018 ,China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (8) 3384 ~ 3390.

Abstract :Conservation tillage can play an important role in minimizing soil erosion and improving soil quality. The function of soil ecology system is mainly controlled by soil microorganism which is one of the most sensitive indicators. But the main difficulty of the utilization of microbial indicators was the lack of knowledge about the relationships between soil management and characteristics of soil microorganism. Further ,the baseline and threshold value for each indicator were still unclear. It is critical for soil management to study the effects of conservation tillage on soil microbial characters. This experiment was carried out at different time after tillage in order to elucidate the effects of conservation tillage on soil microorganism from the aspects of time and space.

Six treatments were exposed as conventional tillage with no straw returning (CN) , conventional tillage with straw returning (CS) , subsoiling tillage with straw returning (PS) , harrow tillage with straw returning (HS) , rotary tillage with straw returning (RS) , no tillage with straw covered (NS) . Soil microbial biomass C , active microbial biomass and soil respiration rate were studied with methods of substrate induced respiration , respiration curve mathematics analysis and CO₂ emission amount respectively.

基金项目 :国家粮食丰产工程资助项目 (2004BA520A14C10)
收稿日期 :2006-07-13 ;修订日期 :2006-12-11
作者简介 :王芸 (1982 ~) ,女 ,山东莒南人 ,硕士 ,主要从事农业生态研究. E-mail :wang123@sdau.edu.cn
* 通讯作者 :Corresponding author. E-mail :lizj@sdau.edu.cn

Foundation item :The project was supported by national engineering of increasing crop yield , China (No. 2004BA520A14C10)

Received date 2006-07-13 ;Accepted date 2006-12-11

Biography :WANG Yun , Master candidate , mainly engaged in agroecology. E-mail : wang123@sdau.edu.cn

The results showed that conservation tillage had higher soil microbial biomass C in 0 — 10 cm soil layer than in 10 — 20 cm soil layer , while soil microbial biomass C of conventional tillage in both soil layers were almost the same. Straw returning significantly increased soil microbial biomass C at seeding stage , over-wintering stage and erecting stage but reduced soil microbial biomass C at anthesis , harvesting stage. The microorganism in 10 — 20 cm soil layer of minimum tillage with straw returning could regulate the supply of soil nutrition. Conservation tillage enhanced active microbial biomass in 0 — 10 cm soil layer. Straw returning and conservation tillage increased soil respiration rate at over-wintering stage and erecting stage but reduced soil respiration rate at anthesis and harvesting stage. NS had higher respiratory quotient (qCO_2) in 10 — 20 cm soil layer and CN had higher qCO_2 in 0 — 10 cm soil layer. Microbial biomass C and soil respiration rate were important indicators of soil microbial characters. But further research is necessary in time effects of tillage treatments on soil respiration rate and microbial characters.

Key Words conservation tillage ; microbial biomass C ; active microbial biomass ; soil respiration ; respiratory quotient

保护性耕作技术对于改善土壤环境具有多种独特的生态经济作用^[1]。微生物生物量的大小可以表明微生物新陈代谢活动的强弱,而微生物生长与死亡的交替过程也就是养分的固定与释放过程^[2]。但目前应用微生物指标的主要困难是 缺乏对一般土壤过程与土壤生物群落结构或特性间的关系的了解,对具体指标好与坏的基线与阈值也并不十分清楚^[3]。不同耕作处理对土壤扰动程度不同,形成了不同的土壤环境,可能会造成微生物量和土壤呼吸的差异。本试验以两种常规耕作处理为对照,对 4 种保护性耕作处理实施后不同时间的微生物量及土壤呼吸进行了研究,以期从时间和空间两个角度阐明保护性耕作对土壤微生物特性的调控作用。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验始于 2004 年 10 月,在山东农业大学农学实验站进行 种植制度为冬小麦-夏玉米。试验设 6 个耕作处理,常规耕作无秸秆还田(简称常无,CN)、常规耕作秸秆还田(简称常还,CS)、深松耕秸秆还田(简称深还,PS)、耙耕秸秆还田(简称耙还,HS)、旋耕秸秆还田(简称旋还,RS)、免耕秸秆覆盖(简称免覆,NS)。

五种还田措施是在秋季秸秆还田粉碎基础上实施的。其中旋还作业深度约为 10 cm,耙还作业深度约为 20 cm,深还作业深度约为 40 cm,常规耕作作业深度约为 25 cm。小区面积 15 m × 8 m = 120 m²,3 次重复。供试小麦品种为济麦 20,2005 年 10 月 16 日播种播量 90 kg/hm²。基施纯氮 160 kg/hm²,P₂O₅ 150 kg/hm²,K₂O 105 kg/hm²,各处理统一浇拔节水 80 mm,配合浇水追施纯氮 120 kg/hm²,其它管理同高产田。试验地基础肥力状况如表 1。

表 1 试验地基础肥力状况

Table 1 Soil nutrients content of the experimental field 有机质			
有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total nitrogen (g/kg)	全磷 Total phosphorus (g/kg)	速效磷 Available phosphorus (mg/kg)
11.02	0.8138	1.760	81.95

1.2 取样方法

于 2005 ~ 2006 年冬小麦播种前、越冬期、起身期、开花期、收获期进行田间取样,土样分为 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 两个层次。土样 4 ℃ 冰箱保存 4 d 之内测完。每次测定之前均于 25 ℃ 条件下预培养 24 h。其中小麦播种前和收获期由于土壤含水量太高和太低,将土样调节土壤含水量为田间持水量的 50% 左右,置于 25 ℃ 预培养 7 d,以消除土壤湿度对微生物的影响。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤微生物量碳的测定应用基质诱导呼吸法

取 5 g 鲜土 ,加入 5 ml 10 mmol/g 土葡萄糖溶液和 0.025 g 滑石粉 22 ℃ 培养 2 h ,测 CO₂呼吸量^[4]。

1.3.2 土壤活跃微生物的测定用呼吸曲线数学分析法

取 1 g 鲜土加入 0.4 ml 葡萄糖培养基在 20 ℃ 培养 24 h 后 CO₂呼吸量^[4]。

1.3.3 土壤呼吸的测定采用 CO₂释放量法

取 5 g 鲜土于试剂瓶中 28 ℃ 培养 24 h 后测 CO₂呼吸量^[5]。(以上 CO₂的产生量均用北京分析仪器厂的 GXH-305 便携式红外线分析器测定 ,土壤均以干土重计算)。

1.3.4 呼吸商的计算

呼吸商是基础呼吸与微生物量碳间比率 ,即每单位微生物生物量碳的具体呼吸速率^[6]。

2 结果与分析

2.1 保护性耕作对土壤微生物量碳的影响

表 2 不同耕作处理下的土壤微生物量碳

Table 2 Soil microbial biomass C under different tillage treatments (mg/100g)							
土层 Layer cm	处理 Treatment	播种前 Seeding stage	越冬期 Over-wintering stage	起身期 Erecting stage	开花期 Anthesis	收获期 Harvesting stage	均值 Mean
0 ~ 10	CN	14.90c	12.76d	18.07e	26.19e	24.29d	19.24
	CS	31.51a	21.08b	28.20d	34.26d	22.54d	27.52
	PS	16.80bc	26.99a	27.35d	73.21b	40.84c	37.04
	HS	13.59c	17.49c	32.55c	106.37a	58.71a	45.74
	RS	30.84a	26.02a	39.32b	60.84c	52.43b	41.89
	NS	20.41b	15.79c	50.79a	58.63c	40.15c	37.15
10 ~ 20	CN	17.18a	26.30b	14.10b	45.97a	25.26b	25.76
	CS	18.91a	32.15a	22.15a	41.09b	24.20b	27.70
	PS	10.16b	17.66c	13.10b	33.04c	23.56b	19.50
	HS	19.49a	10.98d	9.57c	38.72b	22.14b	20.18
	RS	21.04a	6.96e	15.80b	19.91d	31.25a	18.99
	NS	8.52b	8.62de	5.26d	23.19d	15.20c	12.16

同一列同一土层不同字母代表 $P < 0.05$ 水平上的差异显著 The value with different letters in the same row and same soil layer meant significant difference at $P < 0.05$ level

微生物量碳可反映土壤养分有效状况和生物活性 ,能在很大程度上反应土壤微生物数量 ,对土壤扰动非常敏感 ,但不受无机氮的直接影响 ,常作为土壤对环境响应的指示指标^[7]。从表 2 可以看出 ,各处理的微生物量碳在小麦整个生育期呈单峰曲线 ,在开花期达到最大值。保护性耕作土壤微生物量碳 0 ~ 10 cm 土层大于 10 ~ 20 cm 土层 ,常无则在 10 ~ 20 cm 土层微生物量碳较高。秸秆还田在播种前、越冬期和起身期能显著提高土壤微生物量碳 ,而随着生育期的推进 ,则降低土壤微生物量碳。

小麦播种前在 0 ~ 10 cm 土层 ,常还、旋还微生物量碳显著高于常无 ;在 10 ~ 20 cm 土层免覆最低。小麦越冬期 0 ~ 10 cm 土层深还和旋还显著高于常还高于耙还高于常无。在起身期 0 ~ 10 cm 土层免覆高于常无 181.05% ,达到显著水平。在开花期 10 ~ 20 cm 土层 ,常无的微生物量碳显著高于少耕还田 (深还、旋还、耙还) ,常无高于免覆 98.25% ,差异达到显著水平 ,常无在收获期则较低。而少耕在开花期 10 ~ 20cm 显著低于常无 ,收获期较高。这说明相对于常无来说 ,少耕还田 10 ~ 20 cm 土层微生物具有较强的养分调控作用。微生物量碳与活跃微生物量、呼吸商相关系数分别为 0.706 0.608 ,达到极显著水平。

2.2 保护性耕作对土壤活跃微生物量的影响

土壤中存在着一少部分生理功能活跃的微生物 ,这部分微生物一般不到总量的 1/3。从图 1 可以看出活

跃微生物量总体趋势是保护性耕作 > 常还 > 常无 , 秸秆还田利于提高土壤活跃生物量。生育后期大于前期 , 特别是开花期明显高于起身期和越冬期。可能是随着小麦根系活动的增强 , 土壤活跃微生物量也随之增加。保护性耕作 0 ~ 10 cm 土层的活跃微生物量高于 10 ~ 20 cm 土层 , 而常规耕作土层间差别不大。

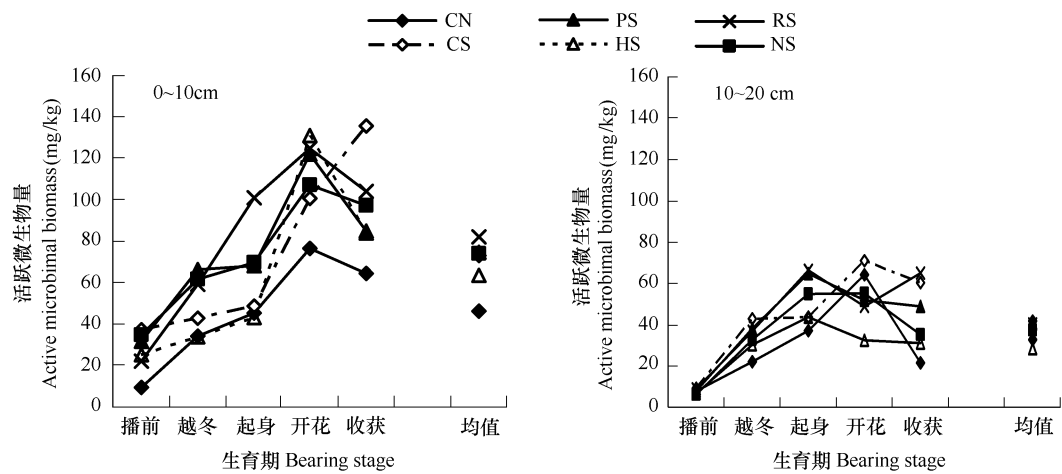


图 1 不同耕作处理的土壤活跃微生物量

Fig. 1 Soil active microbial biomass under different tillage treatments

播前 Seeding stage ;越冬 Over-wintering stage ;起身 Erecting stage ;开花 Anthesis ;收获 Harvesting stage ;均值 Mean ;下同 the same below

小麦播种前活跃微生物量 0 ~ 10 cm 土层常还最高 , 常无最低 ; 小麦起身期 , 旋还 0 ~ 10 cm 土层为 100.82 mg 生物量/kg 土 , 显著高于其它处理。免覆、旋还、深还在 10 ~ 20 cm 土层活跃微生物量相比其它处理要高。随着生育期的推进保护性耕作与常无差异变大。开花期在 0 ~ 10 cm 土层保护性耕作的活跃微生物量高于常规耕作的活跃微生物量 , 而在 10 ~ 20 cm 土层则呈相反趋势 , 说明保护性耕作利于土壤 0 ~ 10 cm 活跃微生物量的提高。

2.3 保护性耕作对土壤呼吸速率的影响

土壤呼吸是土壤中出现生命活动的标志之一 , 是陆地生态系统碳素循环的主要环节 , 也是大气 CO₂ 浓度升高的关键。由图 2 可看出土壤呼吸速率总趋势是 0 ~ 10 cm 土层大于 10 ~ 20 cm 土层。有研究采用静态箱/气相色谱法测定华北平原麦田土壤呼吸认为 , 冬小麦生长季土壤呼吸速率在冬季平均较低 , 夏季较高^[8] , 而本试验采用许光辉等的方法认为土壤呼吸在小麦越冬期开始上升 , 到起身期达到高峰 , 收获期降到最低^[9]。在一定程度上表明微生物对养分具有调控与补偿机制^[9]。

秸秆还田在耕作作业初期能显著提高土壤呼吸速率 , 在耕作作业后期能显著降低土壤速率。保护性耕作在小麦越冬期、起身期能增强土壤呼吸速率 , 随着耕作作业时间的推迟 , 在小麦收获期和播种前 , 则能降低土壤呼吸速率。从整个生育期的平均值来看 , 保护性耕作并没有因减少耕作而减少土壤呼吸速率 , 这可能与保护性耕作实施时间较短有关。

2.4 保护性耕作对土壤呼吸商的影响

呼吸商 (q_{CO_2}) 将微生物量的大小与微生物的生物活性与功能有机的联系起来。研究表明 q_{CO_2} 值大 , 意味着微生物呼吸消耗的碳比例较大 , 建造微生物细胞的碳比例小^[10]。土壤呼吸商在小麦生育期呈单峰曲线 , 在起身期达到最大值。

在 10 ~ 20 cm 土层免覆的呼吸商一直较高 , 尤其是在起身期显著高于其它处理 , 其中 , 免覆比常无高 163.93% , 差异达到显著水平 , 而常无在 0 ~ 10 cm 土层呼吸商相对较高。这说明免覆在 10 ~ 20 cm 土层微生物物年轻化 , 常无在 0 ~ 10 cm 土层微生物年轻化 , 对维持土壤的优良性状和可持续利用潜力有益^[11, 12]。呼吸商与土壤呼吸速率极显著正相关 , 与微生物量碳极显著负相关。

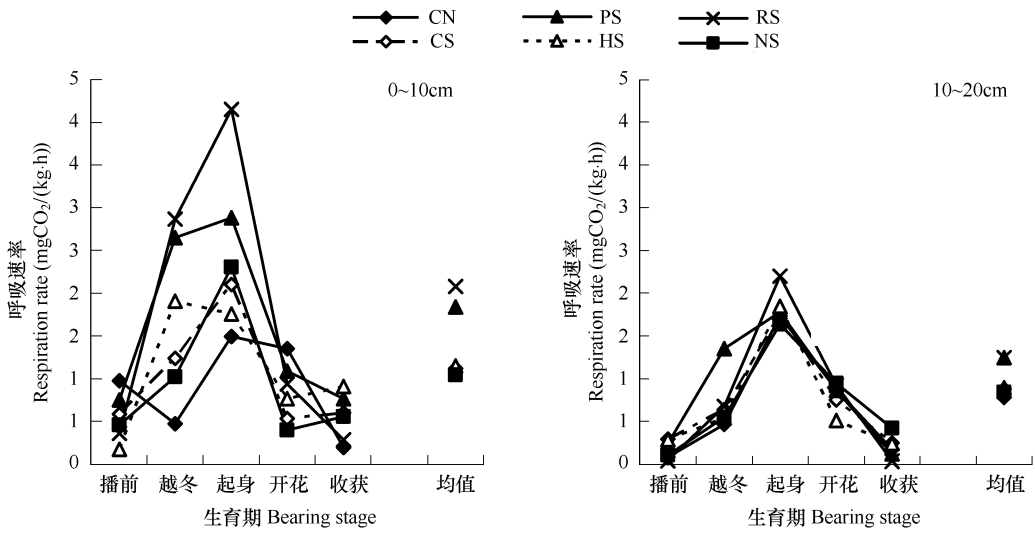


图2 不同耕作处理的土壤呼吸速率

Fig. 2 Soil respiration rate under different tillage treatments

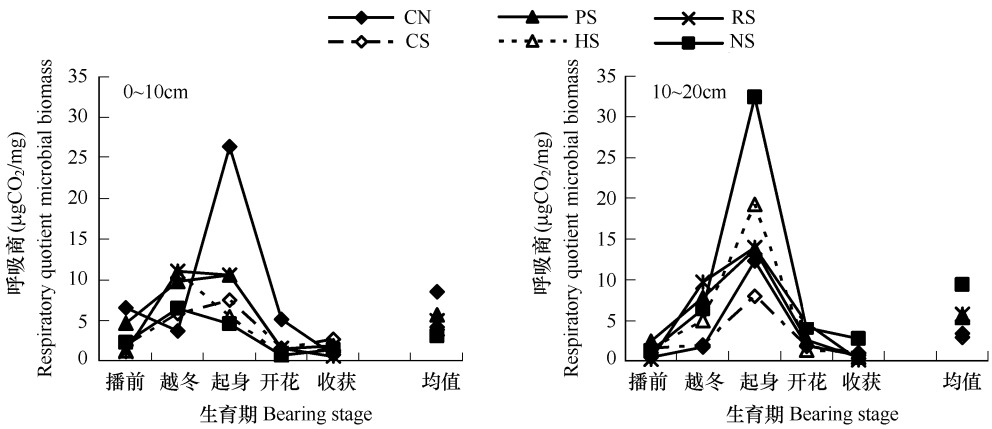


图3 不同耕作处理的土壤呼吸商

Fig. 3 Soil respiratory quotient under different tillage treatments

3 讨论

3.1 保护性耕作对土壤微生物量碳的影响

与胡诚等关于秸秆还田能提高土壤微生物量碳的研究不同^[3],本试验认为秸秆还田在在播种前、越冬期和起身期能显著提高土壤微生物量碳,之后则降低土壤微生物量碳,说明秸秆还田有利于土壤养分调控,即在小麦生长需要养分较少的生育时期能固结较多养分,而在小麦生长需要养分较多的生育时期能释放养分供小麦利用。并且法秸秆还田引起的土壤微生物量碳的变化与土壤温度的变化有一定程度的一致性。有研究也得出了类似的结论 Q_{10} 值与微生物量碳含量呈线性关系^[4],秸秆覆盖在低温时具有“增温效应”,高温时具有“降温效应”^[15]。

Franzluëbbers 于 2001 年阐述了他对土壤有机质层化比率的研究^[6],指出“土壤碳、氮储量的较高层化比率可能是土壤动态质量优秀的评价指标,这个指标独立于土壤类型和气候区域以外”,并指出“如果此比率大于 2,则一般不会发生退化现象”。李涛等在此基础上提出了土壤微生物层化比率的概念,即指耕作层的表层土壤微生物数量与底层土壤微生物数量的比值^[7],由之进一步推广到土壤微生物量碳的层化比率。保护性耕作尤其是免覆和旋还具有较高层化比率因而具有较强的抵抗退化的作用。少耕还田 10~20 cm 土层微生

物具有较强的养分调控作用。常规耕作的作业深度更深,具有一定的土层均匀性,其微生物量碳呈现出下层的现象,并且这种“下富上贫”的现象随耕作作业时间的推移(除开花期之外),而逐渐减弱。这可能与耕作作业深度、扰动程度、农田化肥的投入和上季作物(玉米)对土壤养分的吸收有关。但保护性耕作引起土壤微生物量碳变化的时间效应有待于进一步研究。

3.2 保护性耕作对土壤活跃微生物量的影响

有研究表明,土壤微生物活性受有机质转化和土壤结构的影响^[8]。高云超等于免耕实施的不同年份发现影响土壤活跃微生物量的主要因素或是土壤通透性或是营养因素^[4]。本研究表明在耕作作业后不同的时间里土壤活跃微生物量呈现不同的规律,说明影响土壤微生物活跃生物量的主要因素在不同时期不同,其更深的机理仍有待于进一步研究。

3.3 保护性耕作对土壤呼吸的影响

有研究认为,土壤温度与土壤呼吸呈指数关系,尤其表层 0~5 cm 处地温与呼吸相关性最好^[8]。也有研究认为土壤有机碳的数量与结构是影响土壤呼吸温度敏感性的重要因素^[4]。但从本试验结果看,土壤呼吸与土壤温度关系并非如此,这可能是在小麦生育前期,地温较低,小麦根系生物量较低,秸秆大量分解,土壤呼吸以土壤微生物呼吸为主。而小麦生育后期,根系生物量变大,根系呼吸比重加大,微生物活动相对减弱,温度不再是呼吸的主要影响因子。

有研究认为,减少中国农田 CO₂ 排放的最有效措施是提高地面秸秆还田的比例^[9]。也有研究认为,秸秆还田可以明显提高土壤呼吸作用,会造成土壤碳素亏损^[8]。本试验认为秸秆还田在作业后期(小麦开花期、收获期和播种期)才表现出减少土壤速率的效应。有研究认为,减少土壤呼吸的途径之一是减少耕作^[20]。本试验认为保护性耕作在作业后期才表现出降低土壤呼吸速率的效应。因此秸秆还田和保护性耕作引起的土壤呼吸变化的时间效应仍有待于进一步研究,同时关于土壤呼吸的影响因素也有待于进一步研究。

4 结论

秸秆还田在播种前、越冬期和起身期能显著提高土壤微生物量碳,之后则降低土壤微生物量碳。保护性耕作只进行土壤表层耕作造成了土层的“上富下贫”,其土壤微生物量碳 0~10 cm 土层大于 10~20 cm 土层;常规耕作的作业深度更深,具有一定的土层均匀性。少耕还田 10~20 cm 土层微生物具有较强的养分调控作用。保护性耕作利于土壤 0~10 cm 活跃微生物量的提高。秸秆还田和保护性耕作在耕作作业初期能增强土壤呼吸强度,在作业后期能显著降低土壤呼吸。免覆在 10~20 cm 土层呼吸商较高,而常无在 0~10 cm 土层呼吸商较高。土壤微生物量碳和呼吸商是衡量土壤微生物特性的重要指标。

References :

[1] Arshad M A. Tillage and soil quality , Tillage practices for sustainable agriculture and environmental quality in different agroecosystems. *Soil and Tillage Research* , 1999 , 53 (1) : 1 - 2.

[2] Wang Z M , Zhu P L , Huang D L , *et al.* Straw carbon decomposition in situ field and characteristics of soil biomass carbon turnover. *Acta Pedologica Sinica* , 2003 , 40 (3) : 446 - 453.

[3] Ren T Z , Stefano G. Soil Bioindicators in Sustainable Agriculture. *Scientia Agricultural Sinica* , 2000 , 33 (1) : 68 - 75.

[4] Gao Y C , Zhu W S , Chen W X. Bacterial and fungal biomass and activities in straw mulch no-tillage soils. *Chinese Journal of Ecology* , 2001 (2) : 30 - 36.

[5] Xu G H , Zheng H Y ed. *Manual of analyzing methods of soil microorganism*. Beijing : Agricultural Press , 1986. 226 - 227.

[6] Werf V D , Verstrate H W , Estimation of active soil microbiomass by mathematical analysis of respiration curves : Calibration of the test procedure. *Soil Biology and Biochemistry* , 1987 , 19 (2) : 261 - 265.

[7] Song Q H , Li F M , Liu H S. Effect of plastic film mulching on soil microbial biomass in spring wheat field in semi-arid loess area. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2003 , 14 (9) : 1512 - 1516 .

[8] Chen S Y , Li J , Lu P L , *et al.* Soil respiration characteristics in winter wheat field in North China Plain , *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2004 , 15 (9) B : 1552 - 1560.

[9] Gao Y C , Zhu W S , Chen W X. The relationship between soil microbial biomass and the transformation of plant nutrients in straw mulched no-tillage soils , *Scientia Agricultura Sinica* , 1994 , 21 (6) : 41 — 49.

[10] Jiang P A , Luo M , Jiang Y H , *et al.* Soil microbial floras and their qMB and qCO_2 values in the fields of different-year-aged *Medicago sativa* , *Arid Land Geography* , 2006 , 29 (1) : 115 — 119.

[11] Zhang B G , Li G T , Shen T S. Influence of the earthworm *Pheretima guillelmi* on soil microbial biomass and activity. *Acta Ecologica Sinica* , 2000 , 20 (1) : 168 — 172.

[12] Vance E D , Brookes P C , Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* , 1987 , 19 : 703 — 703.

[13] Hu C , Cao Z P , Ye Z N , *et al.* Impact of soil fertility maintaining practice on soil microbial biomass carbon in low production agro-ecosystem in northern China. *Acta Ecologica Sinica* , 2006 , 26 (3) : 808 — 814.

[14] Zhang J B , Song C C , Yang W Y. Temperature sensitivity of soil respiration and its effecting factors in the different land use. *Acta Scientiae Circumstantiae* 2005 25 (11) : 1537 — 1542.

[15] Zhou L Y. Effects of straw mulch on soil physical conditions in field. *Research of Agricultural Modernization* , 1997 , 18 (5) : 311 — 314.

[16] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* , 2002 , 66 (2) : 95 — 106.

[17] Li T , Pan Z H , An L L , *et al.* Distribution Character of soil microbial numbers and soil microbial stratification ratio at crossing belt (Wuchuan County) of agriculture and animal husbandry. *Journal of Soil and Water Conservation* , 2006 , 20 (1) : 99 — 102.

[18] Garcia C , Hernandez T , Costa F. Microbial activity in soil under Mediterranean environmental conditions. *Soil Biology and Biochemistry* , 1994 , 26 : 1185 — 1191.

[19] Li C S , Xiao X M , Frolking S , *et al.* Greenhouse gas emission from crop lands of China , *Quaternary Sciences* , 2003 , 23 (5) : 493 — 503.

[20] Li Y N , Wang G Y , Li W. Soil respiration and carbon cycle , *Earth Science Frontiers* , 2002 , 9 (2) : 351 — 357.

参考文献：

[2] 王志明 , 朱培立 , 黄东迈 , 等. 秸秆碳的田间原位分解和微生物量碳的周转特征. *土壤学报* 2003 40 (3) : 446 ~ 453.

[3] 任天志 , Stefano G. 持续农业中的土壤微生物指标. *中国农业科学* 2000 33 (1) : 68 ~ 75.

[4] 高云超 , 朱文珊 , 陈文新. 秸秆覆盖免覆耕土壤细菌和真菌生物量与活性的研究. *生态学杂志* 2001 (2) : 30 ~ 36.

[5] 许光辉 , 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册. 北京 : 农业出版社 , 1986. 226 ~ 227.

[7] 宋秋华 , 李凤民 , 刘洪升. 黄土地区地膜覆盖对麦田微生物体碳的影响. *应用生态学报* , 2003 , 14 (9) : 1512 ~ 1516.

[8] 陈述悦 , 李俊 , 陆佩玲 , 等. 华北平原麦田土壤呼吸特征. *应用生态学报* 2004 , 15 (9) B : 1552 ~ 1560.

[9] 高云超 , 朱文珊 , 陈文新. 秸秆覆盖免耕土壤微生物量与养分转化的研究. *中国农业科学* , 1994 21 (6) : 41 ~ 49.

[10] 蒋平安 , 罗明 , 蒋永衡 , 等. 不同种植年限苜蓿地土壤微生物区系及商值 (qMB qCO_2). *干旱区地理* 2006 29 (1) : 115 ~ 119.

[11] 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.

[13] 胡诚 , 曹志平 , 叶钟年 , 等. 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. *生态学报* 2006 26 (3) : 808 ~ 814.

[14] 张金波 , 宋长春 , 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析. *环境科学学报* , 2005 25 (11) : 1537 ~ 1542.

[15] 周凌云. 秸秆覆盖对农田土壤物理条件影响的研究. *农业现代化研究* , 1997 , 18 (5) : 311 ~ 314.

[17] 李涛 , 潘志华 , 安莉莉 , 等. 北方农牧交错带 (武川县) 土壤微生物数量分布及层化比率研究. *水土保持学报* 2006 20 (1) : 99 ~ 102.

[19] 李长生 , 肖向明 , Frolking S , 等. 中国农田的温室气体排放. *第四纪研究* 2003 23 (5) : 493 ~ 503.

[20] 李玉宁 , 王关玉 , 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. *地学前缘* 2002 9 (2) : 351 ~ 357.