

DOI: 10.5846/stxb201305070967

臧逸飞,郝明德,张丽琼,张昊青.26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响.生态学报,2015,35(5):1445-1451.

Zang Y F, Hao M D, Zhang L Q, Zhang H Q. Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1445-1451.

26 年长期施肥对土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸的影响

臧逸飞¹, 郝明德^{1,2,*}, 张丽琼^{1,3}, 张昊青¹

1 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

3 安康学院农学与生命科学学院, 安康 725000

摘要:研究长期小麦连作施肥条件下土壤微生物量碳、氮, 土壤呼吸的变化及其与土壤养分的相关性。以陕西长武长期定位试验为平台, 应用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取法、碱液吸收法和化学分析法分析了长达 26a 不同施肥处理农田土壤微生物量碳、微生物量氮和土壤呼吸之间的差异及其调控土壤肥力的作用。长期施肥及种植作物, 均能提高土壤微生物量碳、氮含量, 尤其是施用有机肥, 土壤微生物量碳、氮含量高于单施无机肥的处理, 土壤呼吸量也提高 15.91%—75.73%, 而施用无机肥对于土壤呼吸无促进作用。土壤微生物量碳氮、土壤呼吸与土壤有机质、全氮呈极显著相关。长期有机无机肥配施可以提高土壤微生物量碳氮、土壤呼吸, 氮磷肥与厩肥配施对提高土壤肥力效果最好。微生物量碳氮及土壤呼吸可以反映土壤质量的变化, 作为评价土壤肥力的生物学指标。

关键词:长期连作施肥; 土壤微生物量碳; 土壤微生物量氮; 土壤呼吸

Effects of wheat cultivation and fertilization on soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration in 26 years

ZANG Yifei¹, HAO Mingde^{1,2,*}, ZHANG Liqiong^{1,3}, ZHANG Haoqing¹

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 College of Agriculture and Life Sciences, Ankang University, Ankang 725000, China

Abstract: Soil microbial properties play important roles in soil quality changes and nutrition cycling. The relationship between soil microbial properties and soil quality changes as a result of climate conditions, soil types, tillage and fertilizer. Lots of studies had been done; however, there are not too many reports on loessial soil. Loessial soil is one of the main types of soil on loess plateau. The study about loessial soil plays an important role in getting better soil environment and increasing productivity of dryland on loess plateau. In this paper, the relationship between soil quality and soil microbial properties such as soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration was studied in order to illustrate the function of soil microbial properties as bio-indicators of soil health. The long-term experiment was set up in 1984 in Changwu county, Shaanxi province, China. We collected samples from the 0—20 cm soil zone of the long-term wheat cultivation and fertilization system. Nine treatments were carried out in this study: 1) fallow (F); 2) no fertilization as control (CK); 3) nitrogen (N); 4) phosphorus (P); 5) manure (M); 6) nitrogen + phosphorus (NP); 7)

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2009CB118604); 国家科技支撑计划重大项目(2011BAD31B01); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-JC408)

收稿日期:2013-05-07; 网络出版日期:2014-04-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mdhao@ms.iswc.ac.cn

phosphorus + manure (PM); 8) nitrogen + manure (NM); 9) nitrogen + phosphorus + manure (NPM). The chemical properties such as pH, organic matter, total nitrogen, and total phosphorus content were analyzed in order to determine the effects of long-term wheat cultivation and fertilization on soil nutrients. The soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen, basal respiration and the derivative indices of the arable soil in different long-term fertilization systems were also analyzed. The results showed that different fertilization on loessial soil in 26 years significantly affected soil chemical and microbial properties. Long-time combined application of organic and mineral fertilizers had more effect on soil organic matter, total nitrogen and total phosphorus content than mineral fertilizers alone. All these properties in treatment with fertilizers input NPM were the highest. In different fertilization treatments, the contents of soil microbial biomass carbon changed between 254.65 mg/kg and 745.26 mg/kg, and the contents of soil microbial biomass nitrogen changed from 31.70 mg/kg to 120.54 mg/kg. Long-term fertilization and planting increased the content of soil microbial biomass carbon and soil microbial biomass nitrogen. Especially, organic fertilizers can significantly enhance soil microbial biomass content. Compared with CK, the treatments with organic fertilizers input increased soil microbial biomass carbon, soil microbial biomass nitrogen and soil basal respiration. The soil basal respiration of treatments with organic fertilizer was increased by 15.91% to 75.73%. In the meantime chemical fertilizer had no promotion on the soil basal respiration, and decreased the metabolic quotient. Some of soil microbial properties (Soil microbial biomass carbon, Soil microbial biomass nitrogen, Soil basal respiration) were significantly correlated with soil organic matter and soil total nitrogen contents. Soil basal respiration was also significantly correlated with soil total phosphorus content. The correlations between microbial quotient and soil nutrients, metabolic quotient and soil nutrients were not obvious. These results indicate that soil microbial properties reflect the changes of soil quality and thus can be used as biological indices in the evaluation of soil fertility.

Key Words: long-term cultivation and fertilization; soil microbial biomass carbon; soil microbial biomass nitrogen; soil basal respiration

土壤微生物量是植物营养物质的源和库,并积极参加养分循环^[1],代表土壤养分的活性部分,因此常被用于评价土壤质量的生物学性状。土壤呼吸和微生物代谢商综合了微生物量的大小和活性,可以较好地反映土壤环境质量的变化。Doran 和 Parkin^[2]认为,基本的土壤质量或健康生物指标应当包括微生物碳、氮,潜在矿化氮,土壤呼吸,微生物商等。Pankhurst^[3]也认为,微生物量,土壤呼吸及其衍生指数,一些土壤功能微生物、土壤酶等均可看做目前具有潜力的生物学指标。许多研究表明,土壤微生物量、土壤呼吸及其衍生指数较其他土壤性质能够迅速地响应施肥管理(有机肥和无机肥)、作物体系、耕作和休闲以及土地利用方式的差异^[4-7]。在施肥管理方面的研究表明,施用有机肥可以显著提高土壤微生物量碳、氮的含量及基础呼吸强度,其中随着有机肥施用量的增加,土壤微生物量碳、氮的增加越明显^[4,8]。施用无机肥对于土壤呼吸没有显著影响^[8-9],但是由于气候条件、土壤类型以及耕作施肥的复杂多样性,其对土壤微生物量的影响不尽相同。李娟等^[10]报道,灌溉褐潮土上配合施用氮、磷、钾肥较不施肥土壤显著增加土壤微生物量碳、氮,而旱作褐潮土上适量施用氮磷无机肥与不施肥相比,土壤微生物量碳、氮没有显著差异^[4]。虽然近年来我国学者对土壤微生物学特性开展了大量研究,但是由于我国幅员辽阔,气候条件、土壤类型以及耕作制度复杂多样,目前关于长期施肥对黑垆土生物学特性影响的深入系统研究还较少。本文以陕西长武长期定位试验为平台,探索 26a 不同养分管理模式黑垆土微生物量碳、氮以及基础呼吸的响应,以了解黑垆土的长期培肥效应,为提高土地生产力提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黄土高原中南部陕西省长武县十里铺村无灌溉条件的塬面旱地上。海拔 1200 m,年均气温

9.1 ℃,无霜期 171 d,年均降水量为 580.1 mm,属典型的旱作农业区。供试土壤为中壤质黑垆土。当地主要作物为小麦,种植面积占粮食作物的 50% 以上。实验开始时耕层土壤有机质含量为 10.50 g/kg,全氮含量 0.80 g/kg,碱解氮含量 37.00 mg/kg,全磷含量 1.26 g/kg,速效钾含量 129.00 mg/kg,pH 值 8.10。

1.2 试验设计

长期轮作培肥试验始于 1984 年,36 个处理,3 次重复,共 108 个小区,采用顺序排列法进行排列,小区面积 66.67 m²。本研究选择其中 9 个处理:休闲地处理 1 个(F),小麦连作施肥处理 8 个(CK、N、P、M、NP、PM、NM、NPM)。供试小麦品种为长武 134,播种期 9 月中下旬,次年 6 月下旬收获,一年一熟。施肥量:N(尿素) 120 kg hm⁻² a⁻¹,P₂O₅(过磷酸钙)60 kg hm⁻² a⁻¹,M(厩肥)75 t hm⁻² a⁻¹。所有肥料在播种前一次性施入,各处理进行定期除草和松土,田间管理同大田。

1.3 分析测定方法

试验于 2010 年 9 月小麦播种前采集各处理 0—20 cm 土壤新鲜样品,一部分过 2 mm 筛后 4 ℃ 保存,用于测定土壤微生物量碳、氮及土壤呼吸。另一部分风干过筛,用于测定土壤 pH 值、有机质、全氮以及全磷含量。

微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸-K₂SO₄提取法(FE)测定^[11]。微生物量碳、氮的换算系数均为 0.45。土壤呼吸采用碱液吸收滴定法测定^[12]。

pH 值采用 pH 计测定,有机质采用重铬酸钾容量法-外加热法测定,全氮采用半微量凯氏法测定,全磷采用高氯酸-硫酸-钼锑抗比色法测定^[13]。

1.4 数据处理

数据经 Excel 2003 整理后,采用 DPS v7.05 软件进行单因素方差分析及相关分析,不同处理之间采用 Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤化学性质

与长期连作不施肥处理(CK)相比,施用有机肥及氮磷肥配合施用可以明显提高土壤有机质、全氮、全磷含量(表 1)。其中氮磷有机肥配施土壤有机质、全氮、全磷含量最高,分别比 CK 增加 39.51%、60.92% 和 51.47%。氮磷肥配合施用较对照提高了土壤的养分含量,但有机质及全氮含量均低于各施用有机肥的处理。单施氮肥处理土壤各化学性质均与 CK 无显著差异,其中全氮含量略有增加但差异不显著是由于小麦施入氮肥后生长较 CK 好,消耗了一定量的氮素。单施磷肥显著增加全磷含量,其他各养分指标与对照差异不显著。

表 1 长期不同施肥对土壤化学性质的影响(0—20 cm)

Table 1 Effects of continuous fertilization on soil chemical properties

处理 Treatments	pH	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen	全磷/(g/kg) Total phosphorus	C/N Organic matter/ Total nitrogen
F	7.90±0.04 a	12.40±1.24 c	0.85±0.06 e	0.73±0.03 d	8.43±0.53 ab
CK	7.88±0.04 ab	12.69±0.58 c	0.87±0.09 e	0.68±0.02 d	8.45±0.55 ab
N	7.85±0.04 ab	12.76±0.27 c	0.94±0.06 cde	0.68±0.01 d	7.87±0.50 b
P	7.89±0.03 ab	12.45±0.37 c	0.89±0.03 de	0.92±0.04 b	8.13±0.41 ab
NP	7.85±0.05 ab	15.21±0.76 bc	1.06±0.03 bcd	0.88±0.03 bc	8.29±0.25 ab
M	7.89±0.06 ab	18.52±0.85 ab	1.24±0.07 ab	0.83±0.04 bc	8.69±0.35 ab
NM	7.83±0.04 ab	20.37±0.42 a	1.31±0.04 a	0.87±0.03 bc	9.04±0.09 ab
PM	7.88±0.03 ab	17.29±5.85 ab	1.07±0.23 bc	0.92±0.11 b	9.21±1.14 a
NPM	7.82±0.04 b	20.98±0.98 a	1.40±0.14 a	1.03±0.05 a	8.72±0.79 ab

平均值±标准差,P<0.05;F:休闲地处理 Fallow;CK:对照 Control Check;N:氮肥 Nitrogen;P:磷肥 Phosphorus;NP:氮肥+磷肥 Nitrogen + Phosphorus;M:有机肥 Manure;NM:氮肥+有机肥 Nitrogen + Manure;PM:磷肥+有机肥 Phosphorus + Manure;NPM:氮肥+磷肥+有机肥 Nitrogen + Phosphorus + Manure

单施氮肥、氮有机肥配施土壤有机质、全氮含量分别高于单施磷肥及磷有机肥配施处理,说明氮肥对于提高土壤碳氮养分效果更佳。对照处理各养分含量与休闲地无显著差异。施用化肥使有机碳与全氮的比值(C/N)较CK降低了1.89%—6.86%,其中单施氮肥C/N降低最多。各处理间土壤pH值差异不大,但较实验开始时均略有降低,可能是因为植物残茬及肥料施入的影响。

2.2 土壤微生物生物量碳、氮

长期不同施肥条件下土壤微生物量碳、氮含量变幅很大,微生物量碳为254.65—745.26 mg/kg,微生物量氮为31.70—120.54 mg/kg(表2)。施肥处理及CK处理微生物量碳、氮含量均比休闲地高,最高的分别是休闲地的2.93和3.80倍。CK处理虽然连年不施肥,但是因为小麦残留物的影响,其微生物量碳、氮含量仍然显著高于休闲地。单施氮肥、磷肥土壤微生物量碳、氮与CK差异不显著。氮磷肥配施显著提高微生物量氮,微生物量碳含量虽与CK差异不显著,但氮磷肥配施较单施无机肥仍略有增加。有机肥施入极大的提高了土壤微生物量碳、氮含量,最大分别较氮磷肥配施提高了62.15%和48.12%。

土壤微生物量碳占土壤有机碳含量的百分比称为微生物商^[14]。表2中各处理土壤微生物商值在3.47%—6.72%之间。长期施肥处理及CK处理微生物商显著高于休闲地,最高增长93.66%。

土壤微生物量碳、氮比可以反映微生物群落结构信息,其显著变化预示着微生物群落结构变化可能是微生物生物量较高的首要原因^[15-17]。休闲地碳氮比最高,施肥处理与CK没有显著差异。一般情况下细菌的碳氮比在5:1左右,放线菌在6:1左右,真菌的则在10:1左右。表2中各处理碳氮比均在5以上,且休闲地处理碳氮比最大,说明土壤中细菌不是唯一的优势菌,真菌和放线菌也占有相当大的比重,且在休闲地中比重最大。

表2 长期不同施肥对土壤微生物生物量碳、氮的影响(0—20 cm)

Table 2 Effects of continuous fertilization on microbial biomass C and microbial biomass N

处理 Treatments	微生物生物量碳/(mg/kg) Microbial biomass C	微生物生物量氮/(mg/kg) Microbial biomass N	微生物商 Microbial quotient/%	微生物生物量碳、氮比 Microbial biomass C/N
F	254.65±38.09 e	31.70±4.08 f	3.47±0.07 d	8.18±2.25 a
CK	478.29±46.23 d	67.75±2.04 e	6.33±0.55 ab	7.07±0.90 ab
N	427.34±1.58 d	71.93±1.99 e	5.78±0.19 bc	5.94±0.14 ab
P	415.77±5.93 d	74.19±0.00 e	5.69±0.24 bc	5.60±0.08 b
NP	459.60±7.47 d	81.38±2.02 d	5.10±0.15 c	5.65±0.23 b
M	690.73±71.73 ab	120.54±4.26 a	6.29±0.81 ab	5.74±0.80 b
NM	574.58±24.52 c	107.52±2.08 b	5.16±0.62 c	5.34±0.13 b
PM	649.07±27.50 b	86.94±2.09 d	6.72±0.03 a	7.46±0.13 ab
NPM	745.26±18.40 a	99.45±4.14 c	6.21±0.21 ab	7.50±0.50 ab

平均值±标准差, $P < 0.05$

2.3 土壤基础呼吸及代谢商

土壤呼吸作用主要来源于微生物的呼吸作用,可作为衡量土壤微生物总活性或评价土壤肥力的指标。有机肥的施用对于提高土壤呼吸有很大的作用,增长幅度在15.91%—75.73%。其中,氮磷有机肥配施土壤呼吸强度最高,单施有机肥次之。无机肥对于土壤呼吸无促进作用。单施磷肥及氮磷肥配施土壤呼吸强度与对照处理无显著差异,单施氮肥甚至对土壤呼吸起到抑制作用(图1)。

微生物代谢商是指微生物基础呼吸强度与微生物生物量碳的比值^[8]。本实验中(图2)对照土壤代谢商最高,施用无机肥、有机肥或配施处理土壤代谢商均低于对照处理,说明施肥处理微生物呼吸消耗的碳比较少,能更有效的利用有机碳转化为生物量碳。休闲地处理土壤代谢商最低。

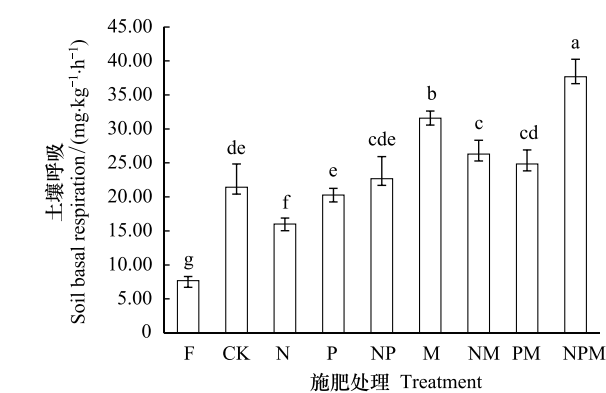


图 1 不同施肥处理土壤基础呼吸

Fig.1 Soil basal respiration in different fertilization treatments
图中字母表示处理间差异达到 5% 显著水平; F 休闲地处理 Fallow; CK: 对照 Control Check; N: 氮肥 Nitrogen; P: 磷肥 Phosphorus; NP: 氮肥+磷肥 Nitrogen +Phosphorus; M: 有机肥 Manure; NM: 氮肥+有机肥 Nitrogen + Manure; PM: 磷肥+有机肥 Phosphorus + Manure; NPM: 氮肥+磷肥+有机肥 Nitrogen + Phosphorus + Manure

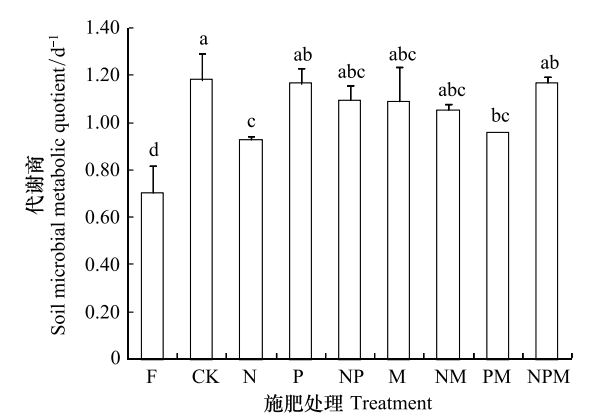


图 2 不同施肥处理土壤微生物代谢商

Fig.2 Soil microbial metabolic quotient in different fertilization treatments
图中字母表示处理间差异达到 5% 显著水平

2.4 土壤微生物量碳、氮,土壤基础呼吸与土壤基本化学性质之间的相关性

相关分析结果表明,微生物量碳、氮除相互间呈极显著相关外,与土壤呼吸、有机质、全氮呈极显著相关关系(表 3)。微生物商仅与微生物量碳、土壤呼吸及代谢商显著相关,与土壤基本养分之间无相关性,这可能是由于微生物商表征的是土壤有机碳的周转速率,是土壤碳动态变化的一个指标。土壤呼吸与微生物量碳、氮及土壤基本化学性质之间均呈极显著或显著相关,代谢商与微生物商、土壤呼吸呈显著相关。

表 3 土壤微生物生物量碳、氮,土壤基础呼吸与土壤基本化学性质之间的相关性

Table 3 Linear correlation coefficients among soil microbial biomass C, microbial biomass N, soil basal respiration rate and soil chemical properties

项目 Item	微生物 生物量碳 Microbial biomass C	微生物 生物量氮 Microbial biomass N	微生物商 Microbial quotient	土壤呼吸 Soil respiration	代谢商 Metabolic quotient	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphor
微生物生物量碳 Microbial biomass C	1.00							
微生物生物量氮 Microbial biomass N	0.87 **	1.00						
微生物商 Microbial quotient	0.75 *	0.62	1.00					
土壤呼吸 Soil respiration	0.95 **	0.87 **	0.68 *	1.00				
代谢商 Metabolic quotient	0.57	0.62	0.68 *	0.73 *	1.00			
有机质 Organic matter	0.86 **	0.81 **	0.33	0.84 **	0.43	1.00		
全氮 Total nitrogen	0.84 **	0.83 **	0.31	0.86 **	0.49	0.98 **	1.00	
全磷 Total phosphor	0.62	0.52	0.28	0.70 *	0.52	0.67 *	0.67 *	1.00

$r_{0.05}=0.666, r_{0.01}=0.798, n=9$; * 表示显著相关, ** 表示极显著相关

3 讨论

(1) 黑垆土经过 26a 不同施肥方式显著的影响了土壤的化学性质(pH 值、有机质、全氮及全磷)和生物学性质(微生物生物量及土壤呼吸)。长期施用有机肥增加土壤碳源,使有机质含量较 CK 增加 36.25%—65.33%,这成为土壤有机碳增加的根本原因,并通过微生物量碳的增加表现出来。白震^[18]等对黑土长期施

肥的研究也论证了这一点。

在连作条件下,长期施用无机肥对土壤微生物生物量碳、氮的影响较小。这是因为小麦生长消耗大部分养分且小麦生长状况较差,根系及残留物都较少,且长期施用化肥,尤其是无机氮肥,使土壤的 C/N 比降低,加速了土壤中原有有机碳的分解,导致土壤中积累的有机碳总量较少^[19]。有机肥的长期施用可以使微生物分解有机碳源速度加快,同化作用加强^[4],可提高土壤养分,保证较高的微生物生物量^[20]。Böhme 等^[5]与 Peacock 等^[21]也认为,施用有机肥可促进活性有机碳积累,进而提高微生物生物量,改善土壤微生物群落结构及其生态功能。本研究表明,长期施用有机肥能显著提高土壤微生物碳氮含量,且均高于单施无机肥的处理,其中有机肥施用使土壤微生物量碳、氮含量较 CK 最高增加 55.82% 和 77.92%。Sneh-Goya 等^[22]和 Seimek 等^[23]对 10a 以上无机有机肥配合施用情况下土壤微生物量碳、氮的变化进行了研究,都说明施肥直接增加根系生物量及根系分泌物,促进微生物生长繁殖,使土壤微生物量碳、氮含量明显高于单施化肥的处理。

微生物商可以充分反映土壤中活性有机碳所占的比例,从微生物学的角度揭示土壤肥力的差异,由于土壤微生物量碳周转快,所以微生物商值越大,土壤有机碳周转越快^[24]。一般土壤的微生物商值在 1%—4%^[25],因为土壤类型、管理措施、分析方法、采样时间等的不同,文献报道中微生物商的范围扩大为 0.27%—7%^[26-27]。本文中微生物商的范围为 3.47%—6.72%,与文献的报道数值相符,也表明长期施肥黑垆土土壤活性有机碳含量高,有机碳周转速率快。

(2) 土壤呼吸往往作为土壤生物活性和土壤肥力乃至透气性的指标,并且指示着生态系统演替的过程与方向^[28]。施用有机肥的处理土壤呼吸明显高于其他处理,其中有机肥与无机肥配施达到最高,为 37.66 mg kg⁻¹ h⁻¹,表明微生物处于良好状态,可以储存和循环更多养分。

微生物代谢商可反映单位生物量的微生物在单位时间里的呼吸强度,同时表示微生物量的大小和活性,并且将微生物生物量与微生物活性及功能联系起来^[29]。施肥处理代谢商低于对照处理,反映土壤具有相对较高的微生物生物量和活性,可以维持土壤生态系统的正常功能。休闲地处理代谢商最低,可能是因为虽然土壤肥力缺乏,但是土壤养分没有作物消耗,微生物可利用碳源较为充足,利用碳源的效率较高。代谢商是反映环境因素、管理措施变化等对微生物活性影响的一个敏感指标^[30-31],在环境胁迫条件下代谢商增大,因此代谢商可以作为微生物胁迫指标之一。

(3) 土壤微生物量碳是土壤有机碳的灵敏指示因子,土壤微生物量氮是土壤氮素矿化势的重要组成部分。本研究中土壤微生物量碳、氮与土壤有机质、全氮呈显著正相关,表明微生物量碳、氮的变化趋势与土壤有机质、全氮变化趋势一致,因此微生物量可以代表土壤有机质、全氮评价土壤肥力状况,并作为评价长期培肥过程中土壤质量变化的生物学指标。李娟等^[10]对褐潮土的研究表明土壤微生物生物量碳氮与土壤全磷含量极显著相关,这与本文的得出的不相关的结论不一致,这可能是由于褐潮土试验初期土壤磷素含量较低,磷素成为主要的制约因子,而黑垆土的全磷、速效磷含量较高,磷素对微生物活性的影响较小。

4 结论

黑垆土上,长期单施有机肥及有机无机肥合理配施使土壤微生物生物量碳氮及土壤养分含量增加,且氮磷肥配施适量厩肥最为显著。单施化肥对土壤除磷素外养分及微生物生物量碳氮无显著影响。长期氮磷肥配施、单施有机肥及有机无机肥配施均可以增强土壤基础呼吸强度,单施氮肥、磷肥使土壤基础呼吸强度降低,产生抑制作用。因此选择有机无机肥配施尤其是氮磷肥配施适量厩肥对于培肥地力尤为重要。

土壤微生物生物量碳氮、土壤呼吸与土壤有机质、全氮密切相关($P < 0.01$),微生物商、代谢商作为其衍生指数,间接受到土壤养分的影响。这说明,这些土壤微生物学特性可以作为科学评价农田土壤健康质量和可持续发展的潜力预测指标。

参考文献 (References):

- [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.

- [2] Doran J W, Parkin T B. Defining and assessing soil quality. In: *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Society of America Special Publication Number 35. Madison: SSSA and ASA, 1994: 3-21.
- [3] Parkhurst C E. *Bio-indicators of Soil Health*, United Kingdom. Oxon: CAB International, 1997.
- [4] 贾伟, 周怀平, 解文艳, 关春林, 邵春花, 石彦琴. 长期有机无机肥配施对褐土微生物生物量碳、氮及酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(4): 700-705.
- [5] Böhme L, Langer U, Böhme F. Microbial biomass, enzyme activities and microbial community structure in two European long-term field experiments. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2005, 109(1/2): 141-152.
- [6] Yusuf A A, Abaidoo R C, Iwuafor E N O, Olufajo O O, Sangina N. Rotation effects of grain legumes and fallow on maize yield, microbial biomass and chemical properties of an Alfisol in the Nigerian savanna. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2009, 129(1/3): 325-331.
- [7] Wang X L, Jia Y, Li X G, Long R J, Ma Q F, Li F M, Song Y J. Effects of land use on soil total and light fraction organic, and microbial biomass C and N in a semi- arid ecosystem of northwest China. *Geoderma*, 2009, 153(1/2): 285-290.
- [8] 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.
- [9] 葛高飞, 梁永超. 玉米生长过程中施肥对土壤呼吸和微生物量碳的影响. *中国农学通报*, 2011, 27(18): 73-78.
- [10] 李娟, 赵秉强, 李秀英, Hwat B S. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 144-152.
- [11] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. *土壤微生物生物量测定方法及其应用*. 北京: 气象出版社, 2006: 54-68.
- [12] 程丽娟, 薛泉宏. *微生物学实验技术*. 西安: 世界图书出版公司, 2000: 181-182.
- [13] 鲍士旦. *土壤农化分析* (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-108.
- [14] 刘满强, 胡锋, 何园球, 李辉信. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义. *土壤学报*, 2003, 40(6): 937-944.
- [15] 陈国潮, 何振立. 红壤不同利用方式下的微生物量研究. *土壤通报*, 1998, 29(6): 276-278.
- [16] Wardle D A. Controls of temporal variability of the soil microbial biomass: A global-scale synthesis. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(13): 1627-1637.
- [17] Lovell R D, Jarvis S C, Bardgett R D. Soil microbial biomass and activity in long-term grassland: effects of management changes. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(7): 969-975.
- [18] 白震, 张明, 宋斗妍, 张旭东. 不同施肥对农田黑土微生物群落的影响. *生态学报*, 2008, 28(7): 3244-3253.
- [19] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 储国良, 王全洪. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响. *应用生态学报*, 2000, 11(4): 549-552.
- [20] 樊军, 郝明德. 长期轮作施肥对土壤微生物碳氮的影响. *水土保持研究*, 2003, 10(1): 85-87.
- [21] Peacock A D, Mullen M D, Ringelberg D B, Tyler D D, Hedrick D B, Gale P M, White D C. Soil microbial community responses to dairy manure or ammonium nitrate application. *Soil Biology Biochemistry*, 2001, 33(7/8): 1011-1019.
- [22] Goyal S, Chander K, Munda M C, Kapoor K K. Influence of inorganic fertilizers and organic amendments on soil organic matter and soil microbial properties under tropical conditions. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(2): 196-200.
- [23] Šimek M, Hopkins D W, Kalčík J, Pícek T, Šantrůčková H, Staňa J, Trávník K. Biological and chemical properties of arable soils affected by long-term organic and inorganic fertilizer applications. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 29(3): 300-308.
- [24] 任天志, Crego 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.
- [25] Brookes P C, Landman A, Pruden G, Jenkinson D S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985, 17(6): 837-842.
- [26] Omay A B, Rice C W, Maddux L D, Gordon W B. Changes in soil microbial and chemical properties under long-term crop rotation and fertilization. *Soil Science Society of America Journal*, 1997, 61(6): 1672-1678.
- [27] Jenkinson D S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil-IV: The decomposition of fumigated organisms in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 1976, 8(3): 203-208.
- [28] 赵吉. 土壤健康的生物学监测与评价. *土壤*, 2006, 38(2): 136-142.
- [29] 周春娟, 贾夏, 董岁明. 低质量分数 Pb 对冬小麦幼苗根微域土壤酶活性、微生物量 C 及土壤呼吸的影响. *西北农业学报*, 2012, 21(2): 178-183.
- [30] Dilly O, Winter K, Lang A, Munch J C. Energetic eco-physiology of the soil microbiota in two landscapes of southern and northern Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2001, 164(4): 407-413.
- [31] 滕应, 黄昌勇, 骆永明, 龙健, 姚槐应. 铅锌银尾矿区土壤微生物活性及其群落功能多样性研究. *土壤学报*, 2004, 41(1): 113-119.