植物营养与肥料学报 2016, 22(5): 1278–1285
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer
doi: 10.11674/zwyf.15309
http://www.plantnutrifert.org

长期施肥对栗褐土有机碳矿化的影响

王朔林[1]，杨艳菊[2]，王改兰[1]*，赵 旭[1]，陈春玉[1]，黄学芳[3]
（1 湖南农业大学资源环境学院，湖南长沙 410128；2 南京师范大学地理科学学院，南京 210046；
3 山西农业科学院旱地农业研究中心，山西太原 030031）

摘要:【**目的**】土壤有机碳矿化是土壤中重要的生物化学过程，与土壤养分的释放、土壤质量的保持以及温室气体的形成密切相关。本文以 25 年长期定位施肥试验为依托，对栗褐土土壤有机碳矿化速率、有机碳累积矿化量的动态变化进行研究，为科学管理土壤肥力、增加栗褐土碳汇、减少温室气体排放提供依据。【**方法**】田间试验开始于 1988，共设置 8 个施肥处理：不施肥 (CK)；单施氮肥 (N)；氮磷肥合施 (NP)；单施低量有机肥 (M_1)；低量有机肥与氮肥合施 (M_1N)；低量有机肥与氮磷肥合施(M_1NP)；高量有机肥与氮肥合施 (M_2N)；高量有机肥与氮磷肥合施 (M_2NP)。于 2013 年玉米播种前，采集耕层 (0—20 cm) 土壤样品，采用室内培养方法，对土壤碳矿化释放 CO_2 的数量和速率进行测定，并利用一级动力学方程计算出土壤有机碳库潜在矿化势和周转速率。【**结果**】各肥料处理不同程度地提高了栗褐土总有机碳含量，以高量有机肥与化肥配施作用最为显著。与 CK 相比，M_2N、M_2NP 处理土壤总有机碳含量增加了 121.1%、166.8%。不同处理土壤样品培养有机碳矿化速率均在第一天达到峰值，随后急剧下降。5 d 后，下降趋缓，不同处理 CO_2 产生速率趋于一致。培养期间，各处理矿化速率变化符合对数函数关系。长期施用不同肥料均可以提高栗褐土有机碳的矿化速率，其大小顺序为：有机肥与化肥配施 > 单施有机肥 > 单施化肥 > 对照。培养 57 d 后，各处理土壤有机碳累积矿化量为 555.0 ~ 980.3 mg/kg，以 M_2NP、M_1N 的累积量较高，为对照的 1.77 倍、1.73 倍。长期施肥栗褐土有机碳矿化率呈下降趋势，以处理 M_2NP 下降最明显，与对照相比，降低了 6.3 个百分点。施肥处理土壤的潜在矿化势均高于对照，M_1N、M_2NP 最高，为 923.7 mg/kg 和 926.4 mg/kg，较对照增加了 74.0% 和 74.5%。不同施肥处理均可明显提升土壤有机碳的周转速率，减少周转时间，其中处理 M_1NP、M_2NP 效果最为明显。【**结论**】长期施用化肥、有机肥及有机无机肥配施可有效促进栗褐土有机碳的积累，提高有机碳的矿化速率和周转速率，降低有机碳的矿化率 (累积矿化量占有机碳总量的比率)，加强了土壤的固碳能力，以 M_2NP 处理的效果更佳。

关键词: 长期施肥；栗褐土；有机碳矿化

中图分类号: S155.2+4; S158　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008–505X(2016)05–1278–08

Effect of long-term fertilization on organic carbon mineralization of cinnamon soil

WANG Shuo-lin[1], YANG Yan-ju[2], WANG Gai-lan[1]*, ZHAO Xu[1], CHEN Chun-yu[1], HUANG Xue-fang[3]
(*1 College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;*
2 College of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;
3 Institute of Dryland Farming, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China)

Abstract:【**Objectives**】Mineralization of soil organic carbon is an essential process of biochemistry in soils, which is closely related to release of soil nutrients, maintenance of soil quality, and formation of greenhouse gases. This paper is to study the effects of different fertilizing treatments on dynamic changes of soil organic carbon mineralization rate and cumulative decomposition in Cinnamon soils for better managements of soil fertility, increasing carbon sinks and decreasing greenhouse gas emissions.【**Methods**】Since 1988, a field

收稿日期: 2015–07–09　　**接受日期:** 2015–11–20
基金项目: 国家国际科技合作专项（2011DFR31230）资助。
作者简介: 王朔林（1989—），女，吉林长春人，硕士研究生，主要从事植物营养与施肥研究。E-mail：wangshuolin3109@126.com
* 通信作者 E-mail：gailanwang@hotmail.com

experiment was conducted in 8 different fertilization treatments: no fertilizer (CK), inorganic N (N, 120 kg/hm^2), inorganic N and P (NP, P_2O_5 75 kg/hm^2), low amount of organic manure (M_1, 22500 kg/hm^2), low amount of organic manure plus inorganic N (M_1N), low amount organic manure plus inorganic N and P (M_1NP), high amount organic manure plus inorganic N (M_2N) and high amount organic manure plus inorganic N and P (M_2NP). Soil samples were collected at 0–20 cm depth before sowing in 2013. Carbon dioxide cumulative emission and mineralization rate were determined by incubation method. First-order kinetic model was used to calculate potential mineralization and turnover rates.【**Results**】All the long-term fertilization treatments increased total organic carbon in the 0–20 cm depth of soil. The effects of manure combined with chemical fertilizer application, especially M_2N and M_2NP were more obvious than those in CK total organic C in M_2N and M_2NP was increased by 121.1% and 166.8%, respectively. The incubation results show that mineralization rates of soil organic carbon in all the treatments are the highest in the first day and then decreased rapidly. After 5 days incubation, the mineralization rate decrease slowdown. The changes of mineralization rates of soil organic carbon of all the treatment were in agreement with the logarithmic function relationship. Long-time fertilization enhanced the mineralization rates of soil organic carbon in the Cinnamon soils in the following order: manure with chemical fertilizer > manure > chemical fertilizer > CK. The cumulative CO_2 during 57 days incubation period was in the range of 555.0–980.3 mg/kg. The M_2NP and M_1N had the highest amounts which were 1.77 and 1.73 fold higher than in CK, respectively. The percentage of cumulative CO_2-C in TOC during the 57 days incubation period in all the fertilization treatments were lower than in comparing to CK. The M_2NP treatment decreased the most with 6.3% lower than that in CK. The potential CO_2-C evolved from the fertilization treatments were all higher than that from the CK, especially the M_1N, and M_2NP that produced 923.7 mg/kg and 926.4 mg/kg, which were 74.0% and 74.5% higher than CK. The fertilization treatment increased the turnover rate of soil organic carbon significantly and reduced the turnover time. Among the fertilization treatments, M_1NP and M_2NP showed strong impact on these.【**Conclusions**】Long-term application of chemical fertilizer, manure, and manure with chemical fertilizer can effectively increase the accumulation of organic carbon in Castano-cinnamon soils and increase organic carbon mineralization rate and turnover rate. However, the fertilization treatments reduce the cumulative mineralization rate (the ratio of accumulated mineralization amount to total organic carbon), and enhance the soil carbon sequestration capacity. Among these treatments, application of 45000 kg/hm^2 manure, 120 kg/hm^2 and P_2O_5 75 kg/hm^2 shows the most significant impact.

Key words: long-term fertilization; cinnamon soil; organic carbon mineralization

土壤有机碳是地球陆地生态系统中最大、最活跃的碳库，全球土壤有机碳库储量为 1200 ~ 2000 Pg，超过了植被与大气有机碳储量之和[1–2]。由于土壤有机碳储量巨大，其微小幅度的变化都将影响到碳向大气的排放，进而影响陆地生态系统的组成、结构和分布[3–4]。土壤有机碳矿化是土壤中重要的生物化学过程，与土壤养分的释放、土壤质量的保持以及温室气体的形成密切相关[5–7]，土壤有机碳的释放是温室气体排放的重要碳源，而土壤有机碳固持对温室气体则起到碳汇的功能[8–9]，因此，全面了解土壤有机碳矿化的变化规律对科学管理土壤养分、控制全球变暖具有重要意义。

关于施肥对土壤有机碳矿化的影响，国内学者已在黑土[10]、红壤[11–12]、湿土[13]等土壤上已有较深入的研究。结果均表明施肥是影响土壤有机碳转化和累积的重要影响因素之一[14–16]，但受气候、土壤母质和耕作等诸多因素的影响，相同施肥措施对土壤有机碳矿化的影响在不同区域、不同土壤类型上存在差异[17–18]。王雪芬等[11]认为长期施有机肥、有机无机肥配施以及平衡施肥(NPK)均可以显著提高旱地红壤土壤有机碳矿化速率、累积矿化量，加快有机碳的周转速率。刘丽等[19]却发现平衡施肥(NPK)对黑土土壤累积矿化量无显著影响。本研究依托 25 年长期定位施肥试验，探讨长期施用不同肥料对栗褐土有机碳矿化的影响，为栗褐土有机碳库的管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 供试土壤

试验于 1988 年布置在山西省河曲县砖窑沟流域的沙坪村窑家嘴梁顶平地上，供试土壤按山西省第二次土壤普查分类为轻壤黄土质淡栗褐土 (土种)，以中国土壤系统分类为黄土正常新成土 (土类)，1988 年作物播种前测得的试验地 0—20 cm 土壤基本理化性状：有机碳含量 3.27 g/kg、全氮 0.455 g/kg、全磷 1.23 g/kg、碱解氮 14.0 mg/kg、速效磷 2.85 mg/kg、速效钾 87.0 mg/kg、pH 8.06、$CaCO_3$ 含量为 13.55%。种植作物从 1988 年到 2008 年为糜子和马铃薯两种作物每年换茬轮作，从 2009 年至今为玉米。

1.2 试验设计

试验设 8 个处理：1) 不施肥 (CK)；2) 单施氮肥 (N)；3) 氮磷肥合施(NP)；4) 单施低量有机肥 (M_1)；5) 低量有机肥与氮肥合施 (M_1N)；6) 低量有机肥与氮磷肥合施 (M_1NP)；7) 高量有机肥与氮肥合施 (M_2N)；8) 高量有机肥与氮磷肥合施 (M_2NP)。供试化肥为尿素 (N 46.0%)，过磷酸钙 (P_2O_5 14.0%)，有机肥使用当地圈肥，含 N 3.64 g/kg，含 P_2O_5 2.46 g/kg (多年平均值)。氮肥用量为 N 120 kg/hm^2，磷肥为 P_2O_5 75 kg/hm^2，不考虑有机肥中养分含量，低量有机肥 22500 kg/hm^2，高量有机肥用量为 45000 kg/hm^2。所有肥料全部作基肥，在作物播种前撒施，并耕翻入土。耕作管理措施与大田相同。试验设 3 次重复，随机区组排列，小区面积 24 m^2 (4 m × 6 m)。

1.3 土壤样品的采集

试验于 2013 年作物播种前按小区采集耕层 (0—20 cm) 土壤样品，新鲜土样挑去根草，于冰箱内冷藏 (4℃)，用于土壤有机碳矿化的测定。

1.4 测定方法

土壤有机碳含量：H_2SO_4—$K_2Cr_2O_7$ 外加热法[20]。

土壤有机碳矿化培养与测定：碱液吸收法测定[21−23]。称取 100.0 g 新鲜土样，调节含水量至田间持水量的 60%，均匀铺于 1 L 广口瓶底部，再将盛有 10 mL 0.1 mol/L NaOH 溶液吸收瓶悬置于广口瓶中，密封广口瓶，于 25℃ 恒温箱内培养。在试验开始后第 1、2、3、4、5、7、9、11、14、17、20、23、26、29、33、37、42、47、52、57 天时更换吸收瓶，吸收瓶中加入 1 mol/L $BaCl_2$ 溶液 2 mL，加 1 滴酚酞指示剂，用标准酸 (约 0.05 mol/L HCl) 滴定至褪色，测得 NaOH 吸收的 CO_2 的量，同时用称量法进行土壤含水量的调整。

计算方法：

土壤有机碳矿化量 (CO_2 mg/kg) = $C_{HCl} \times (V_0 - V) \times 22 \times 10$

其中，C_{HCl} 为盐酸浓度；V_0 为空白滴定值；V 为消耗盐酸的体积。

土壤有机碳矿化速率 [CO_2 mg/(kg · d)] = 培养时间内有机碳矿化量 (CO_2 mg/kg)/培养天数。

累积矿化量 (mg/kg) 从培养开始到某一时间点土壤 CO_2 总释放量。

累积矿化率到某一时间点的土壤累积矿化量占土壤总有机碳的百分比。

采用一级动力学方程 $C_t = C_0(1 - e^{-kt})$ 对土壤累积矿化的 CO_2 进行拟合[12, 24−25]，估测土壤活性有机碳库周转速率。其中，C_0 为土壤潜在有机碳矿化释放 CO_2-C 量，或称土壤有机碳潜在矿化势；C_t 为经过 t 时间后土壤累积释放的 CO_2-C 量；k 是生物活性有机碳库的周转速率。半周转期 $T_{1/2} = \ln 2/k$。

数据处理采用 Microsoft Excel2003、Origin7.0、DPS7.05 软件。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤总有机碳(TOC)含量的影响

经过连续 25 年不同施肥处理后，栗褐土总有机碳含量产生了明显差异 (图 1)。与 CK 相比，高量有机肥与化肥配施 (M_2N、M_2NP)，总有机碳含量较对照分别增加了 121.1%、166.8%，低量有机肥与化肥配施 (M_1N、M_1NP) 分别提高了 78.8%、104%，均达

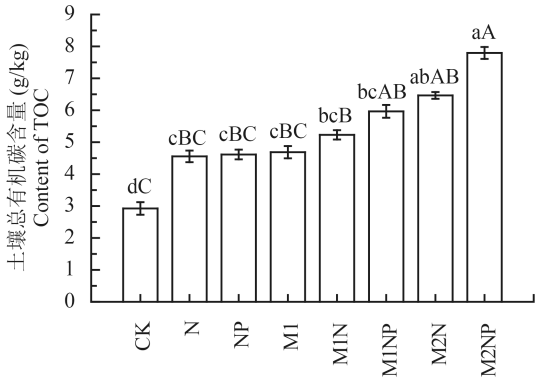

图 1 不同处理土壤总有机碳含量

Fig. 1 Contents of TOC under different treatments

[注（Note）：柱上不同小、大写字母表示处理间差异达到5%、1%显著水平Different lowercase and capital letters above the bars mean significant difference at the 5% and 1% levels among treatments.]

到极显著水平。单施化肥 (N、NP)与单施有机肥 (M_1) 处理土壤总有机碳含量相近，分别为 4.56、4.61 和 4.68 g/kg，较 CK 提高了 55.8%、57.8%、60.3%，差异达到显著水平。

2.2　不同处理土壤有机碳矿化速率

图 2 显示了不同处理土壤在室内培养期间 CO_2 释放速率的变化。总体来看，在培养第 1 d，各处理矿化速率均达到最大值，而后急剧下降，培养第 5 d 仅为第 1 d 的 17.0% ～26.3%。培养 5 d 后，CO_2 产生速率缓慢，变化幅度较小，且随培养时间的延长，不同处理 CO_2 产生速率趋于一致。培养期间不同处理土壤有机碳矿化速率随培养时间的变化符合对数函数关系，相关性均达到极显著水平 (表 1)。

不同处理土壤有机碳矿化速率差异主要表现在培养前 3 d，以 4 个有机肥与化肥配施处理 M_2NP、M_1NP、M_2N、M_1N 土壤矿化速率较高，依次为 147.8 ～36.4，145.9 ～44.6，134.6 ～47.1 和 130.9 ～45.5 mg/(kg · d)，明显高于其他处理。处理 M_1 土壤有机碳矿化速率为 125.8 ～37.9 mg/(kg · d)，显著高于单施化肥处理和对照。单施化肥处理 (N、NP) 土壤矿化速率分别为 111.7 ～29.5 mg/(kg · d)，105.4 ～31.2 mg/(kg · d)，与对照间差异达显著水平。培养 5 ～17 d，CK 处理土壤有机碳矿化速率介于 10.9 ～14.25 mg/(kg · d) 之间，显著低于施肥处理，但各施肥处理之间差异未达到显著水平。培养 20 d 后，不同处理的土壤有机碳的矿化速率均在 15 mg/(kg · d)以下，差异不显著。

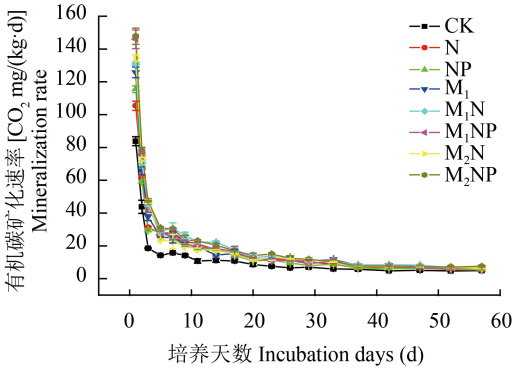

图 2　不同处理土壤有机碳矿化速率

Fig. 2　Mineralization rate of soil organic carbon under different treatments

表 1　不同处理土壤有机碳矿化速率回归方程

Table 1　Equations of soil organic carbon mineralization rate

处理 Treatment	回归方程 Regression	R^2
CK	y = 51.016 – 13.475 ln(x)	0.685**
N	y = 72.032 – 18.719 ln(x)	0.796**
NP	y = 73.678 – 19.524 ln(x)	0.748**
M_1	y = 79.709 – 21.001 ln(x)	0.732**
M_1N	y = 87.267 – 22.879 ln(x)	0.785**
M_1NP	y = 92.068 – 24.862 ln(x)	0.736**
M_2N	y = 86.121 – 23.046 ln(x)	0.736**
M_2NP	y = 95.484 – 25.463 ln(x)	0.758**

注（Note）：y—CO_2 产生速率 CO_2 production rate[mgCO_2/(kg d)]; x—培养天数 Incubation days; **— $P < 0.01$.

2.3　不同处理土壤有机碳累积矿化量

由图 3 可以看出，不同处理土壤有机碳累积矿化量均随着培养时间的延长呈上升趋势，但有机碳累积释放强度逐渐减缓。所有施肥处理均可显著提高土壤有机碳的累积矿化量。与对照相比，N、NP 处理累积矿化量分别提高了 40.3%、47.2%。M_1、M_2N、M_1NP 处理土壤有机碳累积矿化量相近，在 866.7 ～899.4 mg/kg 之间，较对照提高了 56.2% ～62.1%。处理 M_2NP、M_1N 土壤有机碳矿化累积量较高，分别为 980.3、959.8 mg/kg，是对照的 1.77 倍、1.73 倍，不仅显著高于对照，与其他处理间的差异也达到了显著水平。

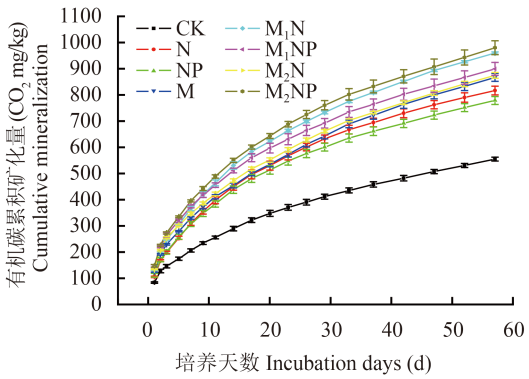

图 3　不同处理土壤有机碳累积矿化量

Fig. 3　Cumulative mineralization amounts of soil organic carbon under different treatments

培养 57 天后，不同施肥处理土壤有机碳累积矿化率如图 4 所示。与不施肥相比，长期施肥土壤有机碳矿化率均有所降低，其中处理 M_1NP、M_2N、M_2NP 降低幅度较大，分别降低了为 4.1、5.3 和 6.3 个百分点。其次是 NP 处理，与对照相比减少了 2.1 个百分点。处理 N、M_1、M_1N 土壤有机碳矿化率降低幅度较小，仅比对照降低了 0.4 ～0.8 个百分点。

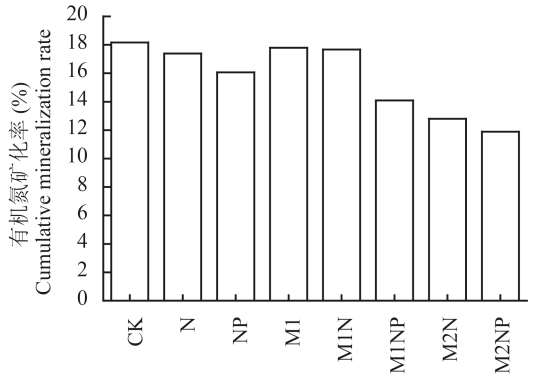

图 4 培养 57 d 不同施肥处理土壤有机碳累积矿化率

Fig. 4 Cumulative mineralization rate of SOC during 57 days' incubation

2.4 不同处理土壤有机碳潜在矿化势及周转速率

表 2 显示，不同处理土壤机碳矿化累积量与培养天数之间的一级动力学方程的拟合相关系数均达到了极显著相关水平，表明该一级动力学方程可以较好地描述不同处理栗褐土有机碳的累积矿化量的变化动态。总体来看，不同施肥处理土壤有机碳的潜在矿化势 C_0 值均显著高于对照，其中，M_1N、M_2NP 处理 CO_2-C 潜在释放量保持较高水平，为 923.7 mg/kg 和 926.4 mg/kg，较对照增加了 74.0% 和 74.5%，且与其他处理间差异达到显著水平；M_1、M_2N、M_1NP 处理次之，较对照分别提高了 56.7%、57.1%、58.3%。N 处理土壤潜在矿化势 C_0 为 791.9 mg/kg，较不施肥处理增加了 49.2%，较 NP 增加了 6.9%。说明，施用化肥或有机肥均可以提高土壤有机碳潜在矿化势，且以 M_2NP、M_1N 处理较为突出。不同施肥条件下土壤有机碳的周转速率以及半周转期也存在差异，周转速率大小顺序为有机肥与氮磷肥配施(M_1NP、M_2NP) > 氮磷肥配施(NP) > 有机肥与氮肥配施(M_1N、M_2N) > 单施氮肥 > 施低量有机肥 > 对照，半周转期顺序与之相反，表明长期施氮肥、磷肥、有机肥及有机无机肥配施均可明显缩短土壤有机碳周转时间，加快周转速率，且三种肥料配施效果（M_1NP、M_2NP）最为明显。

表 2 土壤潜在可释放 CO_2-C 库的大小、周转速率(K)和半周转期($T_{1/2}$)

Table 2 The pool of potential CO_2-C production, turnover rate (K) and half-life time ($T_{1/2}$)

处理 Treatment	C_0 (mg/kg)	K (d^{-1})	$T_{1/2}$ (d)	R^2
CK	530.9 e	0.0589	11.767	0.949**
N	791.9 c	0.0617	11.230	0.972**
NP	740.9 d	0.0661	10.486	0.963**
M_1	831.9 b	0.0590	11.739	0.949**
M_1N	923.7 a	0.0628	11.028	0.965**
M_1NP	840.3 b	0.0722	9.605	0.941**
M_2N	833.9 b	0.0645	10.747	0.939**
M_2NP	926.4 a	0.0683	10.148	0.954**

注（Note）：数据后不同小写字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different lowercase letters mean significant at the 5% level; **— $P < 0.01$.

3 讨论

3.1 土壤总有机碳含量

单施化肥对土壤总有机碳含量的作用研究结果存在着差异，即有提高也有降低，还可能保持不变[26–28]。25 年栗钙土长期定位试验表明，长期单施化肥可有效提高栗褐土总有机碳含量，其效果接近于低量有机肥处理。其原因主要在于化肥可以促进作物生长，提高作物生物量，增加作物根茬及根系分泌物归还量，进而提高土壤总有机碳含量[29]。本试验结果还表明，有机肥与化肥配施是提高土壤有机碳含量的有效手段，因为有机肥与化肥配施，一方面增加了作物产量，使作物残留物量增加，另一方面有机肥直接向土壤提供了有机碳源[16]。

3.2 土壤有机碳矿化速率及有机碳矿化量

土壤有机碳矿化所释放的 CO_2 是通过土壤微生物分解而产生的，是土壤生物学活性的综合体现[30]。土壤有机碳按分解的难易程度可分为活性和惰性有机碳库，活性碳库易分解而被优先分解，矿化速率较快。惰性碳库稳定性高，很难分解，矿化速率较慢。本研究在培养试验的第1天，栗褐土矿化速率最快，因为矿化初期土壤中存在易分解的糖类、蛋白质等有机物质，为微生物提供了丰富的养分，提高了微生物活性。之后，各处理土壤有机碳矿化速率变化呈对数函数变化，与陈涛等[9]的研究结果类似。

关于施用化肥对土壤有机碳矿化量的影响不同研究者的结果不尽一致。李英臣等[13]对湿地草甸土土壤矿化进行研究提出，化肥的输入对有机碳矿化速率有一定的抑制作用，降低了土壤有机碳累积矿化量，其原因是施用化肥将导致土壤酸化，从而降低了土壤生物活性，影响土壤有机碳矿化。于树等[31]认为，长期施用化肥不利于土壤团聚体结构形成，微生物生长环境变劣，导致土壤微生物量降低。相反，李梦雅等[12]的研究结果表明，长期施用化肥可增加土壤有机碳累积矿化量，胡诚等[32]的研究结果显

示，单施化肥可以增加土壤微生物量碳，配合有机物施用这种促进作用更加明显。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，从而增加土壤中可用于矿化的活性有机碳的数量，促进了土壤微生物的繁殖，提高了微生物生物量。本研究中，长期施用化肥的土壤有机碳累积矿化量较对照增加，其原因为：试验土壤为石灰性土壤，土壤pH较高，肥力低，长期施氮肥和氮磷肥配施一方面提高了土壤养分，土壤物理性质也得到改善，作物产量提高[33]，增加了土壤生物归还量；另一方面，长期施用化肥土壤 pH 值略有降低，N 和 NP 处理的土壤 pH 值分别由对照的 8.17 下降为 8.09 和 7.99[34]更有利于微生物的生长繁殖，土壤微生物量增加[35]，促进土壤有机碳的矿化。

本试验结果还显示，与不施肥相比，长期施化肥、有机肥虽然提高了土壤有机碳的矿化总量，但并没有提高单位有机碳的矿化水平 (即矿化率)。其中高量有机肥与氮磷肥配施处理，土壤有机碳矿化量为所有施肥处理中最高的，但单位有机碳矿化水平最低，表明长期施肥在提高土壤有机碳累积量的同时，不会提高有机碳的损失率，起到了固碳的作用，尤其是高量有机肥与氮磷肥配施处理，长期施肥使土壤有机碳矿化率降低的原因可能是：长期施用氮肥土壤无机氮含量增加，无机氮 (NH_4^+、NO_3^-) 可与木质素残体或酚类化合物发生化学反应，从而使有机质具有较低的分解性[18]。另有研究报道，有机肥的胶结作用可以促进团聚体的形成[29]，一些颗粒有机碳，尤其是闭蓄态颗粒有机碳被团聚体包裹其中，有机碳受到物理保护，避免微生物的接触、降解，于建光等[36]指出颗粒有机碳可作为有机碳长期变化的累积性指标。本试验中 M_2NP、M_2N 处理由于连续多年高量有机肥和氮肥的投入，使土壤具有较高的颗粒有机碳含量和无机氮含量[37]，因而其积累的土壤有机碳分解性降低，矿化率较低。M_2NP 较 M_2N 土壤有机碳矿化率更低的原因可能是由于微生物自身固定的碳量较高的缘故。

3.3　土壤有机碳潜在矿化势、有机碳周转速率

李梦雅等[12]通过研究长期施肥对红壤有机碳矿化的影响时得到，长期单施有机肥土壤中潜在矿化势高于有机无机肥配施处理，且两者的潜在矿化势均显著大于单施化肥处理及不施肥处理。但本试验中有机无机肥配施处理效果与单施有机肥效果相似，处理 M_2NP、M_1N 甚至优于单施有机肥处理，究其原因可能是：栗褐土的土壤有机质含量低，矿质养分含量具有缺氮、少磷、钾丰富的特点。有机无机肥配施可以更好调节土壤 C/N，协调土壤微生物生命活动需要的养分和能量，促进微生物的生长繁殖，处理 M_2NP、M_1N 中土壤可培养微生物数量显著高于其他处理[35]，土壤微生物活性较强，因而，土壤有机碳潜在矿化势能随之增加。至于在施用低量有机肥条件下 M_1N 有较高的土壤潜在矿化势，而在施用高量有机肥条件下 M_2NP 的土壤潜在矿化势较高，这可能是因为磷也是土壤微生物的必需营养元素，当微生物对土壤有机碳进行分解时，同时需要吸收一部分磷，以满足其生长繁殖的需要。李春越等[38]的研究发现，碳源多少对于微生物磷起着重要作用，低碳条件下，无机磷的加入对微生物磷的影响不大，在碳源充足的条件下，无机磷的加入微生物磷急剧上升。因此，栗褐土在高量有机肥投入时微生物生命活动需要的磷素增加，因而 M_2NP 处理更有利于平衡微生物养分，促进微生物生长繁殖，具有较高的土壤有机碳潜在矿化势。

王雪芬等[11]报道长期施肥可以提高土壤有机碳周转速率，其中，有机无机肥配施及平衡施肥 (NPK) 处理效果明显，本研究也得出了相似的结论，处理 M_1NP、M_2NP、NP 对加速土壤有机碳周转作用较突出。在这 3 个处理中，磷肥起到了较明显的作用，进一步显示了磷肥在栗褐土碳库周转中的积极作用。研究表明，磷作为是土壤微生物的必需营养元素，当微生物对土壤有机碳进行分解时，同时需要吸收一部分磷，以满足其生长繁殖的需要。当施入磷肥时土壤微生物代谢活力加强，土壤有机质周转速率加快，周转时间缩短。

4　结论

1) 长期施用化肥、有机肥以及有机肥与化肥配施可显著提高栗褐土总有机碳含量，其中有机肥与化肥配施尤其是高量有机肥与化肥配施效果更加明显。

2) 长期施肥均可提高栗褐土有机碳的矿化速率，其大小顺序为：有机肥与化肥配施 > 单施有机肥 > 单施化肥 > 对照，各处理矿化速率变化符合对数函数关系。

3) 长期施肥均可以显著提高土壤有机碳的累积矿化量、土壤潜在矿化势，其中处理 M_2NP、M_1N 增加幅度较大。但长期施肥的土壤有机碳矿化率 (累积矿化量占有机碳总量的比率) 降低，有机碳损失率降低，土壤的固碳能力加强。各处理中尤以 M_1NP、

M_2N、M_2NP 效果明显。

4) 长期施肥可明显提升土壤有机碳的周转速率，减少周转时间，其中以有机肥与氮磷肥配施效果最为明显。

5) 长期高量有机肥配合氮磷肥 (M_2NP) 土壤具有较高的有机碳矿化周转速率，较低的有机碳矿化率，既有利于提高栗褐土的保肥、供肥性能，又可加强土壤的固碳能力，可作为栗褐土碳库管理的较好选择。

参 考 文 献:

[1] 赵广帅, 李发东, 李运生, 等. 长期施肥对土壤有机质积累的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(5): 840–847.
Zhao G S, Li F D, Li Y S, *et al*. Effects of long-term fertilization on soil organic matter accumulation [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(5): 840–847.

[2] 刘中良, 方万太, 周桦, 马强. 不同有机厩肥输入量对团聚体有机碳组分的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1149–1157.
Liu Z L, Fang W T, Zhou H, Ma Q, *et al*. Effect of application rate of barnyard manure on organic carbon fraction of soil aggregates [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1149–1157.

[3] 王根绪, 马海燕, 王一博, 常娟. 黑河流域中游土地利用变化的环境影响[J]. 冰川冻土, 2003, 25(4): 359–367.
Wang G X, Ma H Y, Wang Y B, Chang J. Impacts of land change on environment in the middle reaches of the Heihe River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(4): 359–367.

[4] 赵鑫, 方万太, 李建东, 姜子绍. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展[J]. 应用生态学报, 2006, 17(11): 2203–2209.
Zhao X, Fang W T, Li J D, Jiang Z S. Research advances in soil organic carbon and its fractions under different management patterns [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(11): 2203–2209.

[5] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(2): 517–527.
Shen F F, Yuan Y H, Fan H B, *et al*. Effects of elevated nitrogen deposition on soil organic carbon mineralization and soil enzyme activities in a Chinese fir plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(2): 517–527.

[6] 王红, 范志平, 邓东周, 等. 不同环境因子对樟子松人工林土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(9): 1469–1475.
Wang H, Fan Z P, Deng D Z, *et al*. Effects of environmental factors on soil organic carbon mineralization in a pinus sylvestrisvar mongolica plantation [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(9): 1469–1475.

[7] 王丹, 吕瑜良, 徐丽, 等. 水分和温度对若尔盖湿地和草甸土壤碳矿化的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(20): 6435–6443.
Wang D, Lv Y L, Xu L, *et al*. The effect of moisture and temperature on soil C mineralization in wetland and steppe of the Zoige region, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(20): 6435–6443.

[8] 周焱, 徐宪根, 阮宏华. 武夷山不同海拔高度土壤有机碳矿化速率的比较[J]. 生态学杂志, 2008, 27(11): 1901–1907.
Zhou Y, Xu X G, Ruan H H. Mineralization rates of soil organic carbon along an elevation gradient in Wuyi Mountain of Southeast China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(11): 1901–1907.

[9] 陈涛, 郝晓辉, 杜丽君, 等. 长期施肥对水稻土土壤有机碳矿化的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1494–1500.
Chen T, Hao X H, Du L J, *et al*. Effects of long-term fertilization on paddy soil organic carbon mineralization [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1494–1500.

[10] 苗淑杰, 周连仁, 乔云发, 等. 长期施肥对黑土有机碳矿化和团聚体碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(6): 1068–1075.
Miao S J, Zhou L R, Qiao Y F, *et al*. Organic carbon mineralization and carbon contribution in aggregates as affected by long-time fertilization [J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(6): 1068–1075.

[11] 王雪芬, 胡峰, 彭新华, 等. 长期施肥对红壤不同有机碳库及周转速率的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 954–961.
Wang X F, Hu F, Peng X H, *et al*. Effects of long-term fertilization on organic carbon pools and their turnovers in a red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(5): 954–961.

[12] 李梦雅, 王伯仁, 徐明岗, 等. 长期施肥对红壤有机碳矿化及微生物活性的影响[J]. 核农学报, 2009, 23(6): 1043–1049.
Li M Y, Wang B R, Xu M G, *et al*. Effect of long-time fertilization on mineralization of organic carbon and microbial activity in red soil [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, 23(6): 1043–1049.

[13] 李英臣, 宋长春, 侯翠翠, 宋艳宇. 不同氮施入对湿地草甸沼泽土 N_2O排放和有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2091–2096.
Li Y C, Song C C, Hou C C, Song Y Y. Effects of nitrogen input on meadow marsh soil N_2O emission and organic carbon mineralization [J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(11): 2091–2096.

[14] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, *et al*. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India [J]. Field Crops Research, 2005, 93: 264–280.

[15] Dou F G, Wright A L, Hons F M. Sensitivity of labile soil organic carbon to tillage in wheat-based cropping systems [J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72: 1445–1453.

[16] 张敬业, 张文菊, 徐明岗, 等. 长期施肥下红壤有机碳及其颗粒组分对不同施肥模式的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2012,18(4): 868–875.
Zhang J Y, Zhang W J, Xu M G, *et al*. Response of soil organic carbon and its particle-size fractions to different long-term fertilizations in red soil of China [J]. P1ant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18 (4): 868–875.

[17] Govi M, Francioso O, Ciavatta C, Sequi P. Influence of long-term residue and fertilizer applications on soil humic substances: A study by electrofocusing [J]. Soil Science, 1992, 154(1): 8–13.

[18] Jenkinson D S, Fox R H, Rayner J H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen the so-called ‘priming’ effect [J]. Journal of Soil Science, 1985, 36: 425–444.

[19] 刘丽, 周连仁, 苗淑杰. 长期施肥对黑土水溶性碳含量和碳矿化的影响[J]. 水土保持研究, 2009,16(1): 59–62.
Liu L, Zhou L R, Miao S J. Effect of fertilization on water soluble organic carbon and mineralization of organic carbon in Mollisols [J].

Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(1): 59–62.

[20] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008, 30–34.
Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2008, 30–34.

[21] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式对土壤有机碳矿化影响的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4): 530–538.
Wu J G, Zhang X Q, Xu D Y. The mineralization of soil organic carbon under different land uses in the Liupan Mountain forest zone [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(4): 530–538.

[22] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544–552.
Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(4): 544–552.

[23] 张薇, 王子芳, 王辉, 等. 土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(6): 1013–1019.
Zhang W, Wang Z F, Wang H, *et al*. Organic carbon mineralization affected by water content and plant residues in purple paddy soil [J]. P1ant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(6): 1013–1019.

[24] 吴建国, 艾丽, 苌伟. 祁连山中部四种典型生态系统土壤有机碳矿化及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2007, 26(11):1703–1711.
Wu J G, Ai L, Chang W. Soil organic carbon mineralization and its affecting factors under four typical vegetations in mid Qilian Mountains [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(11): 1703–1711.

[25] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5): 1217–1226.
Li S J, Qiu L P, Zhang X C. Mineralization of soil organic carbon and its relations with soil physical and chemical properties on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(5): 1217–1226.

[26] 韩晓日, 苏俊峰, 谢芳, 等. 长期施肥对棕壤有机碳及各组分的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 730–733.
Han X R, Su J F, Xie F, *et al*. Effect of long-term fertilization on organic carbon and the different soil organic fractions of brown earth [J].Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39 (4): 730–733.

[27] 尹云锋, 蔡祖聪, 钦绳武. 长期施肥条件下潮土不同组分有机质的动态研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 875–878.
Yin Y F, Cai Z C, Qin S W. Dynamics of fluvo-aquic soil organic matter fractions under long-term fertilization [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005,16(5): 875–878.

[28] 王旭东, 张一平, 吕家珑, 樊小林. 不同施肥条件对土壤有机质胡敏酸特性的影响 [J]. 中国农业科学, 2000, 33(2): 75–81.
Wang X D, Zhang Y P, Lv J L, Fan X L. Effect of long term different fertilization on properties of soil organic matter and humic acids [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2000, 33(2): 75–81.

[29] 段建南, 李旭森, 王改兰, 等. 黄土高原土壤变化及其过程模拟[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2001. 55–59.
Duan J N, Li X S, Wang G L, *et al*. Changes of soil and its process simulation in Loess Hilly Area [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2001, 55–59.

[30] 贾曼莉, 郭宏, 李会科. 渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2777–2783.
Jia M L, Guo H, Li H K. Mineralization of soil organic carbon and its relationship with soil enzyme activities in apple orchard in Weibei Area [J]. Environment Science, 2014, 35(7): 2777–2783.

[31] 于树, 汪景宽, 高艳梅. 地膜覆盖及不同施肥处理对土壤微生物量碳和氮的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(4): 602–606.
Yu S, Wang J K, Gao Y M. Effect of plastic mulching and different fertilization treatments on soil microbial biomass carbon and nitrogen[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2006, 37(4): 602–606.

[32] 胡诚, 曹志平, 叶钟年, 吴文良. 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[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 808–814.
Hu C, Cao Z P, Ye Z N, Wu W L. Impact of soil fertility maintaining practice on soil microbial biomass carbon in low production agro-ecosystem in northern China. [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 808–814.

[33] 段建南, 赵丽兵, 王改兰, 等.长期定位试验条件下土地生产力和土壤肥力的变化[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2002, 28(6): 479–482.
Duan J N, Zhao L B, Wang G L, *et al*. Changes of the land productivity and soil fertility under long term experiment[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2002, 28(6): 479–482.

[34] 杨艳菊, 王改兰, 张海鹏, 等. 长期施肥条件下栗褐土磷素积累特征[J]. 生态学杂志, 2013, 32(5): 1215–1220.
Yang Y J, Wang G L, Zhang H P, *et al*. Phosphorus accumulation characteristics in cinnamon soil under long-term fertilization[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(5): 1215–1220.

[35] 杨艳菊, 王改兰, 张海鹏, 等. 长期不同施肥处理对栗褐土可培养微生物数量的影响[J].中国土壤与肥料, 2013, (4): 35–38.
Yang Y J, Wang G L, Zhang H P, *et al*. Effects of long-term different fertilization on culturable microorganisms quantity in cinnamon soil [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2013, (4): 35–38.

[36] 于建光, 李辉信, 陈小云, 胡锋. 秸秆施用及蚯蚓活动对土壤活性有机碳的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 818–824.
Yu J G, Li H X, Chen X Y, Hu F. Effects of straw application and earthworm inoculation on soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(4): 818–824.

[37] 王朔林, 王改兰, 赵旭, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳含量及其组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 104–111.
Wang S L, Wang G L, Zhao X, *et al*. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions and contents of cinnamon soil [J]. Journal of P1ant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1): 104–111.

[38] 李春越, 王益, Philip Brookes, 等. 外源碳磷的加入对农田土壤微生物碳磷比及磷素有效性的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(11): 113–117.
Li C Y, Wang Y, Brookes P, *et al*. Effect of additional carbon, phosphorus on the soil microbial biomass carbon phosphorus ratio and phosphorus availability[J]. Acta Agriculture Boreali-occidentalis Sinica, 2012, 21(11): 113–117.