

DOI: 10.11766/trxb201705260233

长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响*

郭 振¹ 王小利^{1†} 段建军^{2†} 焦克强¹ 孙沙沙¹ 段英华³
张雅蓉⁴ 李 渝⁴ 蒋太明⁴

(1 贵州大学农学院, 贵阳 550025)

(2 贵州大学烟草学院/贵州省烟草品质研究重点实验室, 贵阳 550025)

(3 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081)

(4 农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵阳 550006)

摘 要 以贵州省农业科学院内黄壤性水稻土长期(22年)定位施肥试验为对象, 采用室内模拟培养试验研究了不施肥(对照, CK)、施化肥(NPK)、低量有机无机肥配施(0.5MNPK)、施牛粪(M)和常量有机无机肥配施(MNPK)对土壤有机碳矿化的影响。结果表明: NPK处理土壤有机碳含量(21.6 g kg⁻¹)与CK处理(22.8 g kg⁻¹)基本相同, 而0.5MNPK、M和MNPK处理的土壤有机碳含量较CK处理分别提高了30.6%、72.9%和62.2%, 其中, M和MNPK处理差异达显著水平($p < 0.05$)。模拟培养条件下, CO₂产生速率在培养的第2天达到最大值, 然后迅速下降, 而后缓慢下降(第4~24天), 后期(第24~30天)趋于稳定; 各处理土壤有机碳矿化速率大小依次为: M > MNPK > 0.5MNPK > CK > NPK, 各处理土壤有机碳矿化速率随时间的动态变化均符合对数函数关系($p < 0.01$)。培养结束(30 d)时, 各处理土壤有机碳累积矿化量为1.23~2.37 g kg⁻¹, 以M处理和MNPK处理较高, 较CK处理(1.46 g kg⁻¹)分别增加了62.6%和44.2% ($p < 0.05$); 各施肥处理土壤有机碳的累积矿化率(土壤有机碳累积矿化量/土壤有机碳含量)较CK处理(6.4%)均有所下降, 以M处理和MNPK处理下降较多, 降幅分别为1.2%和0.9%。土壤有机碳累积矿化量随培养天数的动态变化可以用一级动力学方程拟合($p < 0.01$), 模拟结果表明, CK处理土壤潜在可矿化有机碳量为1.55 g kg⁻¹, 与CK处理相比, NPK处理下降了11.6%, 但差异不显著($p > 0.05$), 而有机肥处理(0.5MNPK、M和MNPK)有不同程度的提高(21.3%~73.6%), 其中, M和MNPK处理提高幅度较大($p < 0.05$); 同时, MNPK处理能够提高土壤有机碳的周转速率, 减少周转时间。上述结果指示黄壤性水稻土长期施用有机肥(0.5MNPK、M和MNPK)能够提高土壤有机碳的矿化速率, 在促进土壤有机碳积累的同时降低其累积矿化率(单位有机碳矿化水平), 增强土壤固碳能力。

关键词 长期施有机肥; 黄壤性水稻土; 有机碳矿化; 拟合参数; 有机碳积累

中图分类号 S155.2⁴; S158.5 **文献标识码** A

土壤有机碳库是陆地生态系统中最大的碳库^[1], 影响陆地生态系统的结构与功能^[2]。而土壤有机其微小程度的变化均将影响碳向大气的排放, 进而 碳矿化作为陆地生态系统中重要的生物化学过程,

* 国家自然科学基金项目(31360503, 41361064)、耕地培育技术国家工程实验室开放基金(201701)和贵州大学研究生创新基金(研农2017017)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 31360503 and 41361064), the Project of National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land (No. 201701) and Graduate Innovation Fund of Guizhou University (No. 2017017)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: xlwang@gzu.edu.cn; djwxl@126.com

作者简介: 郭 振(1992—), 男, 陕西大荔人, 硕士, 主要从事土壤有机碳矿化及微生物研究。E-mail: 675334047@qq.com

收稿日期: 2017-05-26; 收到修改稿日期: 2017-07-12; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-07-25

与土壤中养分元素的维持和温室气体的形成密切相关,其释放 CO_2 速率的高低及动态变化过程也是反映土壤质量变化的重要指标^[3-4]。土壤有机碳矿化受土壤水分^[5]、土壤温度^[6]、土壤质地^[7]和外源物料^[8-9]等多种因素的综合影响。长期定位试验由于克服了气候、年际变化等对肥效的影响,结果更为准确,因此,通过长期定位试验来研究施肥对有机碳矿化的影响更具说服力^[10]。目前,国内外学者已在长期施肥对土壤有机碳矿化的影响方面开展了大量的研究:在东北黑土的长期定位施肥试验中,苗淑杰等^[11]认为,单施化肥、单施有机肥和有机无机肥配施的处理均可显著提高土壤有机碳的矿化速率和累积矿化量。刘丽等^[12]却发现单施化肥对黑土有机碳的累积矿化量并无显著性影响。Wagai等^[13]研究也表明化肥的施用对 CO_2 排放的影响不显著。李梦雅等^[14]在红壤上的研究表明,长期施用有机肥或者有机无机肥配施显著地影响了土壤微生物的群落结构,提高了微生物的活性,从而促进了微生物对土壤有机碳的矿化,其有机碳矿化释放的 CO_2 量较施用化肥明显提高,与张旭博等^[15]的研究结果一致。Ginting等^[16]则认为,长期施用有机肥是通过影响碳的转化过程来影响土壤 CO_2 的排放。吴萌等^[10]对重庆紫色土的研究表明,与不施肥处理相比,长期施用氮磷钾肥和秸秆还田配施化肥加快了有机碳的周转速率,提高了土壤有机碳的累积矿化量。Li等^[17]研究表明,土壤有机碳矿化释放 CO_2 的强度与有机物的输入和土壤有机碳的含量有关。

综上,关于长期施肥对土壤有机碳矿化的影响研究虽有报道,但主要集中在黑土、红壤和紫色土等土壤上,而对西南地区黄壤性水稻土有机碳矿化的研究较少。本研究以贵州黄壤稻田22年长期定位施肥试验为依托,通过室内培养、碱液吸收法结合一级动力学方程拟合,揭示长期不同施肥处理下黄壤性水稻土有机碳矿化的动态变化规律,为预测土壤有机碳库平衡提供数据参考,并明确黄壤区域最佳施肥模式。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

长期试验地位于贵州省贵阳市小河区贵州省农业科学院内(106°39'52"E, 26°29'49"N),

地处黔中丘陵区,属亚热带季风气候,平均海拔1 071 m,年均气温15.3°C,年均日照时数1 354 h左右,相对湿度75.5%,全年无霜期270 d左右,年降水量1 100~1 200 mm。试验地为黄壤性水稻土(富铝常湿富铁土),成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物。该长期定位试验始于1995年,2002—2006年由于试验基地灌溉设施损毁,无法满足水稻种植,改种玉米。其他时间种植水稻品种如下:金麻粘(1993—1998年)、农虎禾(1999—2001年)、香两优875(2007—2008年)、汕优联合2号(2009年)和茂优601(2010—2015年)。1994年采集基础土样,其耕层(0~20 cm)土壤基本性质为:有机质31.15 g kg⁻¹,全氮1.76 g kg⁻¹,全磷2.3 g kg⁻¹,全钾13.84 g kg⁻¹,碱解氮134.4 mg kg⁻¹,有效磷21.1 mg kg⁻¹,速效钾157.9 mg kg⁻¹,pH为6.6。

1.2 试验设计

本研究选取该长期试验点5个代表性施肥处理:对照(CK)、施化肥(NPK)、低量有机无机肥配施(0.5MNPK)、施牛粪(M)和常量有机无机肥配施(MNPK)处理。试验小区面积为201 m²,采用大区对比试验,不设重复。所施化肥类型为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 16%)、氯化钾(含K₂O 60%),有机肥为牛廐肥(含C 413.8 g kg⁻¹、N 2.7 g kg⁻¹、P₂O₅ 1.3 g kg⁻¹、K₂O 6.0 g kg⁻¹)。常规用量(NPK处理)为每年施化肥N 165.0 kg hm⁻²、P 36.0 kg hm⁻²、K 68.5 kg hm⁻²,有机肥(M处理)61.1 t hm⁻²。每年根据有机肥的养分含量来调节化学氮肥的施用量,除MNPK处理氮肥施用量不同外,其余施氮小区的氮素施用量相同。种植制度为一年一季水稻,在水稻播种前,各处理按照试验设计方案分别施用氮磷钾肥或配施有机肥作基肥,在水稻生长期再追施2次尿素,水稻于每年4月份插秧,10月中下旬收获,其他时间休闲。具体施肥方案如表1所示。

1.3 土壤样品采集

2015年10月水稻收获后,采集各小区0~20 cm耕层土壤样品:将各小区等分为3个样块(67 m²),每个样块均匀采集5点组成一个混合样,每个小区采集3个土壤样品作为3次重复。将采集的土壤样品除去动植物残体后在室温下风干,一份过2 mm筛,用于土壤有机碳的矿化培养试验,一份过0.25 mm筛,用于测定土壤有机碳。

表1 各处理每年有机肥及纯养分施用量

处理 Treatment	牛廐肥 Cow manure (t hm ⁻²)	氮N (kg hm ⁻²)	磷P (kg hm ⁻²)	钾K (kg hm ⁻²)
CK ¹⁾	0	0	0	0
NPK ²⁾	0	165.0	36.0	68.5
0.5MNPk ³⁾	30.6	165.0	35.4	186.4
M ⁴⁾	61.1	165.0	34.7	304.2
MNPk ⁵⁾	61.1	330.0	70.7	372.7

注: 1) CK: 对照处理; 2) NPK: 施化肥处理; 3) 0.5MNPk: 低量有机无机配施处理; 4) M: 施牛廐处理; 5) MNPk: 常量有机无机配施处理。下同 Note: 1) CK: no fertilizer; 2) NPK: application of chemical fertilizer; 3) 0.5MNPk: low application rate of manure combined with chemical fertilizer; 4) M: application of cow dung; 5) MNPk: normal application rate of manure combined with chemical fertilizer. The same below

1.4 土壤有机碳矿化培养试验

土壤有机碳矿化培养采用碱液吸收法^[18]: 称取过2 mm筛的风干土壤样品30.0 g于50 ml烧杯中, 用去离子水调节至田间持水量的60%左右, 置于1 000 ml 培养瓶底部, 在25℃培养箱中预培养7 d。然后将盛有10 ml 0.1 mol L⁻¹ NaOH溶液的50 ml吸收杯放置于培养瓶底部, 加盖密封, 在25℃恒温箱中暗培养。每个施肥处理重复3次, 同时设3个空白对照, 共18组矿化培养微系统。在培养的第2、4、6、8、10、12、14、16、18、21、24、27和30 天时, 更换碱液吸收杯并加水至恒重, 吸收杯中加入1 mol L⁻¹ BaCl₂溶液2 ml, 再滴加2滴酚酞指示剂, 用0.1 mol L⁻¹ HCl (每次滴定前用硼砂进行标定) 滴定至红色消失。根据CO₂的释放量计算培养期内土壤有机碳的矿化量。

1.5 测定方法

土壤有机碳采用K₂Cr₂O₇-H₂SO₄外加热法测定; 土壤全氮、全磷和全钾分别采用半微量凯氏定氮法、碱熔—钼锑抗比色法和NaOH熔融—火焰光度法测定; 碱解氮、有效磷和速效钾分别采用扩散法、NaHCO₃浸提—钼锑抗比色法和NH₄OAc浸提—火焰光度法测定; pH用电位计法(水土比为2.5:1)测定^[19]。

土壤有机碳矿化量(CO₂ mg kg⁻¹) = C_{HCl} × (V₀ - V₁) × 22 / 0.03; 其中, C_{HCl}为盐酸浓度, mol L⁻¹; V₀为空白滴定的体积, ml; V₁为消耗盐酸的体积, ml。

土壤有机碳累积矿化量指从培养开始至某一时间点土壤CO₂总释放量, 采用一级动力学方程进行

拟合^[14, 20], 即: $C_t = C_0 (1 - e^{-kt})$; 其中: C_t为经过t时间后土壤有机碳的累积矿化量, g kg⁻¹; C₀为土壤潜在可矿化有机碳量, g kg⁻¹; k为有机碳库的周转速率常数, d⁻¹; t为培养天数, d。半周转期 $T_{1/2} = \ln 2/k$ 。

土壤有机碳矿化速率(CO₂ mg kg⁻¹ d⁻¹) = 培养时间内有机碳矿化量(CO₂ mg kg⁻¹) / 培养天数(d)。

土壤有机碳累积矿化率(%) = 至某一时间点的土壤有机碳累积矿化量(g kg⁻¹) / 土壤总有机碳(g kg⁻¹) × 100%。

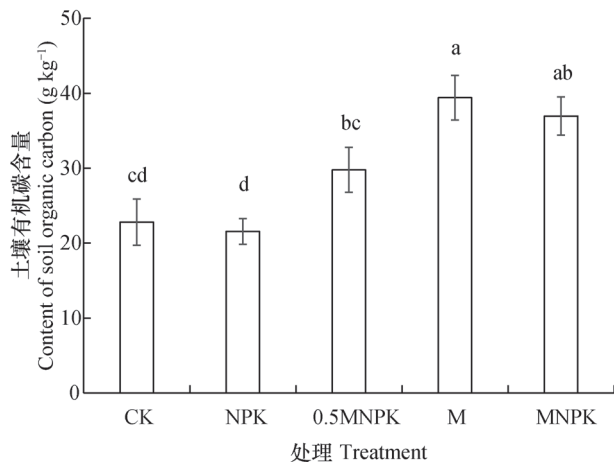
1.6 数据分析

试验数据采用SPSS 19.0 进行方差分析和邓肯(Duncan)多重比较, 比较不同处理间在p < 0.05水平的显著性差异; 用Excel 2016作图, Origin 9.0 进行一级动力学方程拟合。

2 结果

2.1 长期施肥处理土壤总有机碳

长期(22年)施肥后, 5个不同施肥处理土壤有机碳(SOC)含量在21.6~39.4 g kg⁻¹之间(图1)。方差分析结果表明, 不同施肥处理间SOC含量存在差异。与CK处理的SOC含量(22.79 g kg⁻¹)相比, NPK处理下降了5.4%, 未达显著差异水平(p > 0.05)。有机肥处理(0.5MNPk、M和MNPk)的SOC含量较CK处理和NPK处理分别提高了30.6%~72.9%和38.1%~82.8%, 其中, 以M处理效果最显著。



注：柱上不同字母表示处理间有显著差异 ($p < 0.05$)。下同
 Note: Different letters above the bars mean significant difference (at 0.05 level) between treatments. The same below

图1 各处理土壤有机碳含量

Fig. 1 Contents of soil organic carbon (SOC) relative to treatment

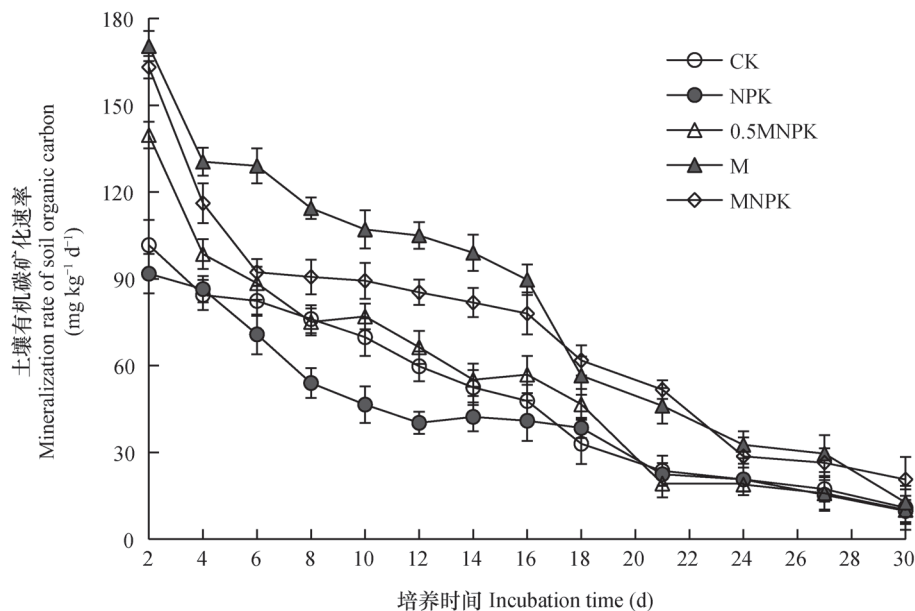


图2 各处理土壤有机碳矿化速率

Fig. 2 Mineralization rate of SOC relative to treatment

2.3 长期施肥处理土壤有机碳矿化量

由图3可以看出, 各施肥处理下 CO_2 的累积释放量随培养时间呈上升趋势, 但其累积释放强度逐渐减缓。培养结束(第30天)时, 与CK处理的土壤有机碳累积矿化量(1.46 g kg^{-1})相比, NPK处理和0.5MNPK处理分别降低和增加了15.7%和9.9%, 但未达到显著差异水平($p > 0.05$), M处理和MNPK处理则分别增加了62.6%和44.2%, 明显

2.2 长期施肥处理土壤有机碳矿化速率

长期不同施肥处理下土壤有机碳矿化速率随培养时间呈下降趋势(图2), 且符合对数函数关系 $y = a + b \ln(x)$ ($p < 0.01$) (表2), 表明培养时间每变化1%个单位时, 土壤有机碳矿化速率将变化b%的绝对值。根据土壤有机碳矿化速率下降的快慢可将其划分为三个阶段: 培养前期(第2~4天), CO_2 产生速率由峰值(第2天)开始迅速下降, 变化幅度较大; 中期(第4~24天), CO_2 的产生速率处于缓慢下降至稳定的阶段, 第4天和24天的矿化速率分别为第2天的70.6%~94.2%和13.5%~22.5%; 末期(第24~30天), CO_2 的产生速率变化幅度较小, 且随培养时间的延长不同施肥处理之间 CO_2 的产生速率趋于一致, 第30天的矿化速率为第2天的7.3%~12.7%, 显著降低($p < 0.05$)。

高于其他各施肥处理($p < 0.05$)。

土壤有机碳累积矿化率可以反映土壤固碳能力的强弱, 该比例越低, 表明土壤的固碳能力越强, 反之, 则固碳能力越弱。由图4可以看出, 培养30 d后, 虽然各施肥处理的土壤有机碳累积矿化率未达到显著差异($p > 0.05$), 但从数值上看仍然有所差异。NPK处理和有机肥(0.5MNPK、M和MNPK)处理的土壤有机碳累积矿化率较CK处理

表2 各处理下土壤有机碳矿化速率回归方程

Table 2 Regression equation of SOC mineralization rate relative to treatment

处理Treatment	回归方程Regression equation	R^2
CK	$y = 139.4 - 35.41 \ln(x)$	0.920**
NPK	$y = 122.2 - 31.55 \ln(x)$	0.956**
0.5MNPk	$y = 172.9 - 46.32 \ln(x)$	0.955**
M	$y = 223.4 - 55.75 \ln(x)$	0.893**
MNPk	$y = 192.1 - 47.28 \ln(x)$	0.922**

注：y: CO_2 产生速率, $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$; x: 培养天数, d; **表示相关性达到极显著水平 ($p < 0.01$)。下同 Note: y: CO_2 production rate, $\text{mg kg}^{-1} \text{d}^{-1}$; x: Incubation day, d; **means significant correlation at 0.01 level. The same below

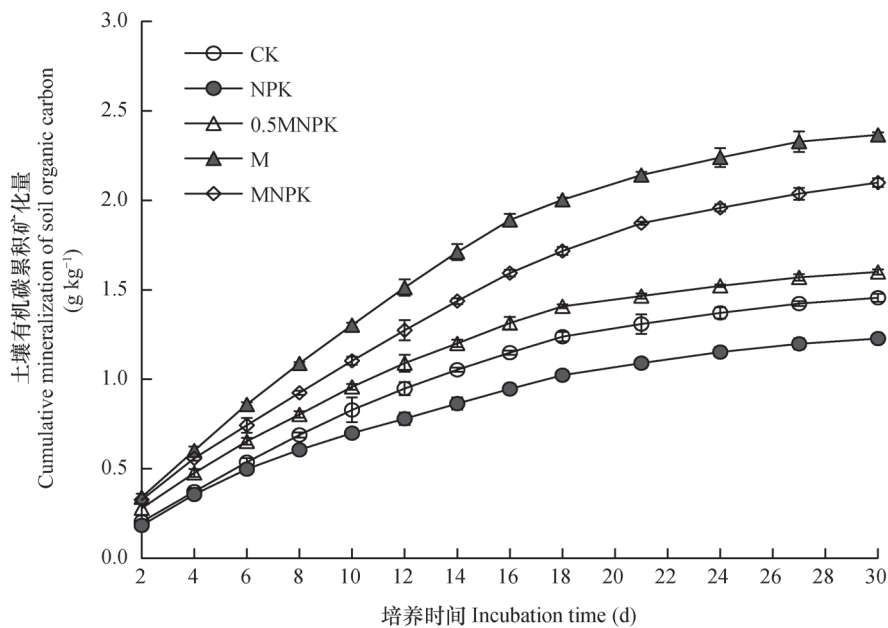


图3 各处理土壤有机碳累积矿化量

Fig. 3 Cumulative mineralization of SOC relative to treatment

(6.4%) 分别降低了0.7%和0.8%~1.2%，其中，以M处理降幅最大，MNPk处理次之。间接表明，不同施肥处理对土壤有机碳起着不同程度的固定作用，有机肥施用效果好于化肥。

2.4 长期施肥处理土壤有机碳矿化参数

长期不同施肥处理下，土壤有机碳累积矿化量与培养天数之间的动态变化可以用一级动力学方程 ($C_t = C_0(1 - e^{-kt})$) 进行拟合 ($p < 0.01$)， C_0 表示土壤潜在可矿化有机碳量 (表3)。结果表明，M处理和MNPk处理的 C_0 较CK处理 (1.55 g kg^{-1}) 增加了73.6%和51.0%，较其他施肥处理有显著性提高 ($p < 0.05$)；0.5MNPk处理和NPK处理下的 C_0 较CK处理分别提高和降低了21.3%和11.6%。说明长期施用有机肥 (0.5MNPk、M和MNPk) 对土

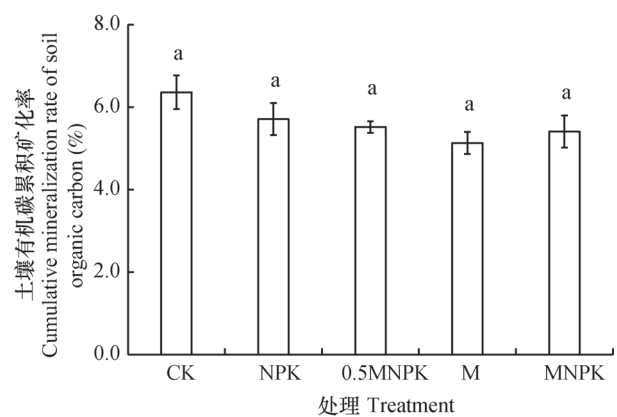


图4 培养30 d各处理土壤有机碳累积矿化率

Fig. 4 Cumulative mineralization rate of SOC during the 30 days of incubation relative to treatment

表3 培养30 d土壤有机碳累积矿化量及其动力学方程参数

Table 3 Cumulative mineralization of SOC after the 30 days of incubation and parameters of its kinetic equations

处理Treatment	$C_t^{1)}$ (g kg ⁻¹)	$C_0^{2)}$ (g kg ⁻¹)	$k^{3)}$ (d ⁻¹)	$T_{1/2}^{4)}$ (d)	$C_0/SOC^{5)}$ (%)	R^2
CK	1.38cd	1.55cd	0.074a	9.4a	6.8a	0.928**
NPK	1.23d	1.37d	0.075a	9.2a	6.4a	0.927**
0.5MNPk	1.60c	1.88c	0.064a	10.9a	6.3a	0.898**
M	2.37a	2.69a	0.071a	9.8a	6.8a	0.918**
MNPk	2.10b	2.34b	0.076a	9.1a	6.3a	0.944**

注: 1) C_t 表示土壤有机碳累积矿化量, 2) C_0 表示土壤潜在可矿化有机碳量, 3) k 表示土壤有机碳矿化速率常数, 4) $T_{1/2}$ 表示半周转期, 5) C_0/SOC 表示土壤潜在可矿化有机碳与总有机碳的比值。同列数据后不同字母表示处理间差异显著 ($p < 0.05$) Note: 1) C_t stands for cumulative mineralization of SOC; 2) C_0 for amount of potential mineralizable SOC; 3) k for constant of mineralization rate of SOC; 4) $T_{1/2}$ for half turnover period; and 5) C_0/SOC for ratio of potential mineralizable organic carbon to total organic carbon in soil. Values followed by different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level between treatments

壤潜在可矿化有机碳的增加有较好的促进作用, 以M处理最为突出, 而长期施用化肥 (NPK) 不利于土壤潜在可矿化有机碳的增加。不同施肥处理下土壤有机碳库的周转速率 (k , 0.064 ~ 0.076 d⁻¹) 以及半周转期 ($T_{1/2}$, 9.1 ~ 10.9 d) 也存在差异但未达显著水平 ($p > 0.05$), 其中, 常量有机无机肥配施可有效缩短土壤有机碳的周转时间, 增加周转速率。

3 讨论

3.1 长期施肥下黄壤性水稻土总有机碳含量变化的原因

长期施用化肥对土壤总有机碳含量的影响主要与研究区域的气候和土壤本底养分有关^[21-22]。本研究结果表明, 长期施用化肥 (NPK) 使土壤总有机碳含量呈现亏损状态, 较CK处理下降了5.40%, 不同于吴萌等^[10]和苗淑杰等^[11]的研究, 但与乔云发等^[21]在黑土及李渝等^[22]在黄壤性水稻土上的研究一致。其原因在于, 单施化肥处理下, 土壤中无外源有机物质的投入, 有机碳的来源主要依靠作物收获后残留在土壤中的作物根茬, 而这部分残留物不足以弥补有机碳的矿化消耗, 并且, 即使每年施用化肥也不能阻止土壤有机碳的矿化, 最终导致土壤有机碳的亏缺^[23]。此外, 还可能与长期试验地土壤有机碳含量的平衡点有关, 当土壤有机碳含量低于最低平衡点时, 施用化肥就能提高土壤有机碳含量^[22, 24], 反之则不能。本试验结果还

表明, 长期施用有机肥 (M、0.5MNPk和MNPk) 均能提高土壤总有机碳含量, 其中, 以M处理提高最显著, 其次为MNPk处理, 说明单施有机肥 (牛粪) 是提升土壤总有机碳的有效施肥模式, 因为施用有机肥一方面直接增加了土壤中碳源的投入, 另一方面, 施用有机肥使作物生物量尤其是根茬及根系分泌物的归还量大量增加, 从而间接增加了碳的投入量^[25]。

3.2 长期施肥下土壤有机碳矿化速率及矿化量的影响因素

土壤有机碳在微生物作用下矿化分解释放CO₂是稻田微系统碳素输出的重要途径, 也是碳循环的重要组成部分^[26]。施肥作为一项最主要的农田管理措施, 通过改变土壤微生物的活性影响土壤有机碳的矿化^[20, 27]。本试验中, 在培养初期CO₂产生速率较快, 因为经过预培养后, 矿化初期土壤中存在大量易分解的糖类和蛋白质等活性有机物质, 为土壤微生物提供了丰富的碳源和养分, 使微生物活性增加^[6]。之后, 随着培养时间的延长, 土壤有机碳矿化速率随着易分解有机物质的减少而逐渐降低, 至培养后期, 土壤中的有机物质主要为难分解的纤维素和木质素等, 不能被微生物利用, 使微生物的活性受到抑制, 所以有机碳矿化速率表现为最低。在30 d的矿化培养试验中, CO₂释放速率呈现出先高后低的趋势, 与众多研究结果^[3, 25]一致。此外, 本试验中土壤有机碳矿化速率与培养时间呈对数函数关系, 与李忠佩等^[4]和陈涛等^[28]的研究结果一致。

长期不同施肥处理下土壤有机碳的累积矿化量一般表现为施肥处理高于不施肥处理，施有机肥或有机无机肥配施高于施化肥处理^[15]。陈涛等^[28]对国家级长期定位监测点的河沙泥和黄泥稻田土壤有机碳的研究表明，高量和中量有机肥处理下的土壤有机碳累积矿化量和呼吸速率高于化肥处理和对照处理，说明有机肥的高投入对土壤有机碳的矿化有一定的促进作用。本研究中，有机肥处理的CO₂释放量和日均矿化速率也均高于化肥处理。这是因为，土壤中可用于矿化的有机碳含量由土壤有机碳输入和输出之间的平衡所决定^[24]。施用有机肥作为农田土壤有机物料输入的一个主要途径，其促进了植物生长，使根系生物量和分泌物的种类、数量大量增加，从而增加了土壤中可用于矿化的活性有机碳的含量^[20]，使得碳素输入大于输出，因此，土壤呼吸强度变大。关于施用化肥对土壤有机碳累积矿化量和日均矿化速率的影响，不同研究者结果不尽一致。苗淑杰等^[11]对东北黑土和张旭博等^[15]对南方红壤的研究均表明，长期施用化肥（NPK）处理较不施肥（CK）处理土壤有机碳的累积矿化量和矿化速率均有所提高，说明化肥施入对土壤有机碳的矿化有一定的促进作用。王朔林等^[25]在对栗褐土有机碳矿化进行研究时提出，长期施用化肥（N和NP）也增加了土壤有机碳累积矿化量和日均矿化速率，其原因是化肥的施用略微降低了土壤的pH（8.17~7.99），改善了土壤性质，达到了微生物最适生长环境，从而促进了其生长繁殖。李英臣等^[9]研究不同氮施入水平对湿地草甸沼泽土有机碳矿化的影响时指出，随着培养时间的进行，有效碳源成为微生物活动的限制因素，降低了土壤微生物活性，从而抑制了土壤有机碳的矿化速率，降低了土壤有机碳的累积矿化量。本试验中，NPK处理的土壤有机碳累积矿化量和日均矿化速率均低于CK处理，原因可能是，长期施用化肥不利于土壤团聚体结构形成，使微生物生长环境变劣，导致土壤微生物生物量降低^[29]，还可能是化肥中的氮素与土壤中的木质素结合生成更稳定的有机化合物^[30]，继而抑制了土壤有机碳的矿化，具体原因仍有待进一步研究。

此外，本试验中，与CK处理相比，所有施肥处理的土壤有机碳累积矿化率均有所下降。其中，化肥处理的土壤有机碳累积矿化率大于有机肥处理，小于CK处理，说明长期施用化肥处理的有机

碳损失率大于有机肥处理小于CK处理；M处理的土壤有机碳累积矿化量最高，但累积矿化率最低，说明长期施用有机肥在增加土壤有机碳累积矿化量的同时不会增加有机碳的损失率，这可能与有机肥的胶结作用有关。段建南等^[31]研究表明，有机肥的胶结作用有利于团聚体结构的形成，而颗粒有机碳受到团聚体的包裹作用从而避免被微生物降解，因此，经有机肥处理后土壤有机碳矿化率有所降低。

3.3 不同施肥处理下土壤有机碳矿化参数的变化

本研究中，长期施肥条件下，M处理的土壤潜在可矿化有机碳量（C₀）最高，MNPK处理次之，且均显著高于其他处理（0.5MNPK、CK和NPK），与李梦雅等^[14]和张旭博等^[15]在长期施肥条件下红壤有机碳矿化方面的研究结果一致，这主要是由于施用有机肥增加了土壤中可供微生物利用的碳源和营养元素，促进了微生物的生长繁殖，提高了土壤CO₂的释放量和土壤潜在可矿化有机碳量。但王朔林等^[25]对栗褐土的研究表明，有机无机肥配施处理的C₀值高于单施有机肥处理。本研究中，C₀/SOC值在各处理间无显著差异，说明长期不同施肥处理下，土壤潜在可矿化有机碳与土壤有机碳具有同步增减的现象^[10]。

有机碳库的周转速率常数（k）是多因子综合作用的结果。李顺姬等^[32]研究发现，k值受土壤类型、养分含量、颗粒组成及pH的影响，同时与土壤母质也有很大关系。陈吉等^[33]对潮土有机碳矿化的研究发现，长期施肥处理对k值的影响并不显著。本试验中四个施肥处理的土壤有机碳周转速率和半周转期同样无显著差异，但0.5MNPK处理和M处理的有机碳周转速率低于CK处理，可能是长期施肥影响了土壤的多种性质所致^[33]，今后应加强土壤有机碳周转速率与土壤理化性质及微生物学特性方面的相关性研究。

由于试验条件的限制，本试验采用30 g土壤样品在室内恒温培养条件下，结合碱液吸收法模拟稻田土壤有机碳的矿化特征，根据一级动力学方程拟合的土壤潜在可矿化有机碳在一定程度上可用来预测田间土壤有机碳的动态变化趋势，而田间条件下影响土壤有机碳矿化的环境因素非常冗杂，因此，本研究结果与田间条件下多因素综合作用的结果可能存在差异。今后尚需加强相关控制试验的研究以及土壤有机碳矿化的田间原位试验研究。

4 结 论

长期施用有机肥(0.5MNPK、M和MNPK)可不同程度提高黄壤性水稻土总有机碳含量,且以单施牛粪和常量有机无机肥配施效果最显著;单施牛粪和常量有机无机肥配施均可显著提高土壤有机碳的累积矿化量、潜在可矿化有机碳量和矿化速率,降低土壤有机碳的累积矿化率。土壤有机碳矿化速率与培养时间呈极显著的对数函数关系。单施有机肥或者常量有机无机肥配施在促进土壤有机碳积累的同时降低其累积矿化率,增强了土壤的固碳能力,可作为黄壤性水稻土碳库管理的较好选择。

参 考 文 献

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304 (5677): 1623—1627
- [2] 赵鑫, 方万太, 李建东, 等. 不同经营管理条件下土壤有机碳及其组分研究进展. *应用生态学报*, 2006, 17 (11): 2203—2209
Zhao X, Fang W T, Li J D, et al. Research advances in soil organic carbon and its fractions under different management patterns (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17 (11): 2203—2209
- [3] 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. *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 (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (2): 517—527
- [4] 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. *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 (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41 (4): 544—552
- [5] Leirs M C, Trasar-Cepeda C, Seoane S, et al. Dependence of mineralization of soil organic matter on temperature and moisture. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31 (3): 327—335
- [6] 林杉, 陈涛, 赵劲松, 等. 不同培养温度下长期施肥水稻土的有机碳矿化特征. *应用生态学报*, 2014, 25 (5): 1340—1348
Lin S, Chen T, Zhao J S, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization at different temperatures in paddy soils under long-term fertilization (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25 (5): 1340—1348
- [7] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51 (5): 1173—1179
- [8] 戚瑞敏, 赵秉强, 李娟, 等. 添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应. *农业工程学报*, 2016, 32 (S2): 118—127
Qi R M, Zhao B Q, Li J, et al. Effects of cattle manure addition on soil organic carbon mineralization and priming effects under long-term fertilization regimes (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (S2): 118—127
- [9] 李英臣, 宋长春, 侯翠翠, 等. 不同氮施入对湿地草甸沼泽土N₂O排放和有机碳矿化的影响. *生态学杂志*, 2010, 29 (11): 2091—2096
Li Y C, Song C C, Hou C C, et al. Effects of nitrogen input on meadow marsh soil N₂O emission and organic carbon mineralization (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29 (11): 2091—2096
- [10] 吴萌, 李忠佩, 冯有智, 等. 长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的动态差异. *中国农业科学*, 2016, 49 (9): 1705—1714
Wu M, Li Z P, Feng Y Z, et al. Dynamic differences of organic carbon mineralization in different types of paddy soil under long-term located fertilization (In Chinese). *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49 (9): 1705—1714
- [11] 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. *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 (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (6): 1068—1075
- [12] 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. *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 (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16 (1): 59—62
- [13] Wagai R, Brye K R, Gower S T, et al. Land use and environmental factors influencing soil surface CO₂

- flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin. *Soil Biology & Biochemistry*, 1998, 30 (12): 1501—1509
- [14] 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. *核农学报*, 2009, 23 (6): 1043—1049
Li M Y, Wang B R, Xu M G, et al. Effect of long-term fertilization on mineralization of organic carbon and microbial activity in red soil (In Chinese). *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2009, 23 (6): 1043—1049
- [15] 张旭博, 徐明岗, 林昌虎, 等. 施肥对红壤有机碳矿化特征的影响. *贵州农业科学*, 2011, 39 (6): 99—102
Zhang X B, Xu M G, Lin C H, et al. Effect of fertilization on mineralization characteristics of organic carbon in red soil (In Chinese). *Guizhou Agricultural Sciences*, 2011, 39 (6): 99—102
- [16] Ginting D, Kessavalou A, Eghball B, et al. Greenhouse gas emissions and soil indicators four years after manure compost applications. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32 (1): 23—32
- [17] Li Z P, Liu M, Wu X C, et al. Effects of long-term chemical fertilization and organic amendments on dynamics of soil organic C and total N in paddy soil derived from barren land in subtropical China. *Soil and Tillage Research*, 2010, 106 (2): 268—274
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2008
Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2008
- [19] 文启孝. 土壤有机质研究法. 北京: 中国农业出版社, 1984
Wen Q X. *Research methods for soil organic matter* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1984
- [20] 马天娥, 魏艳春, 杨宪龙, 等. 长期施肥措施下土壤有机碳矿化特征研究. *中国生态农业学报*, 2016, 24 (1): 8—16
Ma T E, Wei Y C, Yang X L, et al. Mineralization characteristics of soil organic carbon under long-term fertilization management (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24 (1): 8—16
- [21] 乔云发, 韩晓增, 韩秉进, 等. 长期施用化肥对农田黑土有机碳和氮消长规律的影响. *中国土壤与肥料*, 2007 (4): 30—33
Qiao Y F, Han X Z, Han B J, et al. Soil organic carbon and nitrogen of black farmland growth and decline under a long-term experiment chemical fertilizer applications (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007 (4): 30—33
- [22] 李渝, 罗龙皂, 何昫昆, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土耕层有机碳平衡特征的影响. *西南农业学报*, 2014, 27 (6): 2428—2431
Li Y, Luo L Z, He J K, et al. Effects of long-term fertilizations on soil organic carbon balance in paddy soil from yellow earth (In Chinese). *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 27 (6): 2428—2431
- [23] 隋跃宇, 张兴义, 焦晓光, 等. 长期不同施肥制度对农田黑土有机质和氮素的影响. *水土保持学报*, 2005, 19 (6): 190—192
Sui Y Y, Zhang X Y, Jiao X G, et al. Effect of long-term different fertilizer applications on organic matter and nitrogen of black farmland (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19 (6): 190—192
- [24] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 等. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸的影响. *地球科学进展*, 2005, 20 (6): 687—692
Meng L, Ding W X, Cai Z C, et al. Storage of soil organic and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (6): 687—692
- [25] 王朔林, 杨艳菊, 王改兰, 等. 长期施肥对栗褐土有机碳矿化的影响. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (5): 1278—1285
Wang S L, Yang Y J, Wang G L, et al. Effect of long-term fertilization on organic carbon fractions and contents of cinnamon soil (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (5): 1278—1285
- [26] 马力, 杨林章, 慈恩, 等. 长期不同施肥处理对水稻土有机碳分布变异及其矿化动态的影响. *土壤学报*, 2009, 46 (6): 1050—1058
Ma L, Yang L Z, Ci E, et al. Effects of long-term fertilization on distribution and mineralization of organic carbon in paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 (6): 1050—1058
- [27] 王苑, 宋新山, 王君, 等. 干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (2): 342—350
Wang Y, Song X S, Wang J, et al. Effect of drying-rewetting alternation on soil carbon pool and mineralization of soil organic carbon (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (2): 342—350
- [28] 陈涛, 郝晓晖, 杜丽君, 等. 长期施肥对水稻土土壤有机碳矿化的影响. *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 (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19 (7): 1494—1500

- [29] 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. 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 (In Chinese). Journal of Shenyang Agricultural University, 2006, 37 (4): 602—606
- [30] Agren G, Bosatta E, Magill A H. Combining theory and experiment to understand effects of inorganic nitrogen on litter decomposition. *Oecologia*, 2001, 128 (1): 94—98
- [31] 段建南, 李旭森, 王改兰, 等. 黄土高原土壤变化及其过程模拟. 北京: 中国农业大学出版社, 2001
Duan J N, Li X S, Wang G L, et al. Changes of soil and its process simulation in Loess Hilly Area (In Chinese). Beijing: China Agricultural University Press, 2001
- [32] 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. 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 (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (5): 1217—1226
- [33] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 长期施肥潮土在玉米季施肥初期的有机碳矿化过程研究. 土壤, 2009, 41 (5): 719—725
Chen J, Zhao B Z, Zhang J B, et al. Research on process of fluvo-aquic soil organic carbon mineralization in initial stage of maize growth under long-term different fertilization (In Chinese). *Soils*, 2009, 41 (5): 719—725

Long-term Fertilization and Mineralization of Soil Organic Carbon in Paddy Soil from Yellow Earth

GUO Zhen¹ WANG Xiaoli^{1†} DUAN Jianjun^{2†} JIAO Keqiang¹ SUN Shasha¹ DUAN Yinghua³
ZHANG Yarong⁴ LI Yu⁴ JIANG Taiming⁴

(1 College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

(2 College of Tobacco Science, Guizhou University/ Key Laboratory of Tobacco Quality Research in Guizhou Province, Guiyang 550025, China)

(3 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/ National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China)

(4 Field Monitoring Experimental Station for Cultivated Land Preservation and Agro-environment in Guizhou, Ministry of Agriculture, Guiyang 550006, China)

Abstract 【Objective】As a basic biochemical process in the terrestrial ecosystem, mineralization of soil organic carbon (SOC) is closely related to release of soil nutrients, maintenance of soil quality, and formation of greenhouse gases. Fertilization is one of the most important factors influencing of SOC mineralization. The objective of this study is to explore dynamics of SOC mineralization in paddy soil from yellow earth as affected long-term fertilization, illuminate characteristics of organic carbon mineralization in paddy fields of yellow soil different in fertilization and provide guidance for formulating reasonable nutrient management programs. 【Method】Analysis of the data of the 22-year long-term stationary fertilization experiment in paddy soil from yellow earth in the Guizhou Academy of Agricultural Sciences, was done for effect of long-term fertilization on SOC mineralization in the paddy soil, and meanwhile an in-lab incubation experiment was conducted. The field experiment was designed to have five fertilization treatments: CK (no fertilizer), Treatment NPK (application of chemical fertilizer), Treatment 0.5MNPk (application of chemical fertilizer, half the rate, plus organic manure), Treatment M (application of cow dung) and Treatment MNPk (application of NPK, normal in rate, plus organic manure). 【Result】After 22 years of fertilization the SOC content was 22.8 g kg⁻¹ in CK and 21.6 g kg⁻¹ in Treatment NPK, and increased by

30.6%, 72.9% and 62.2%, in Treatments 0.5MNPK, M and MNPK, respectively. Obviously the increase was particularly remarkable in Treatments M and MNPK ($p < 0.05$). In the in-lab incubation experiment, it was found that CO_2 production rate reached a peak on D2, fell rapidly till D4, declined gradually until D24, and leveled off D30. In terms of SOC mineralization rate the five treatments exhibited an order of $M > \text{MNPK} > 0.5\text{MNPK} > \text{CK} > \text{NPK}$. The relationships between mineralization rates of SOC and duration of incubation in all the treatments fit the logarithmic function equation ($p < 0.01$). The cumulative SOC mineralization on D30 varied in the range of 1.23 g kg^{-1} to 2.37 g kg^{-1} . Compared with CK treatment (1.46 g kg^{-1}), Treatment M and MNPK increased significantly or by 62.6% and 44.2%, respectively in cumulative SOC mineralization ($p < 0.05$). But all the treatments were lower than CK (6.4%) in ratio of cumulative SOC mineralization to total SOC after 30 days of incubation, especially Treatments M and MNPK treatments decreasing by 1.2% and 0.9%. The dynamic variation of the cumulative SOC mineralization with incubation time fit the first-order kinetics equation ($p < 0.01$). The simulation results show that soil potential mineralizable organic carbon was 1.15 g kg^{-1} CK decreased insignificantly or by 11.6% in Treatment NPK, but increased in Treatments 0.5MNPK, M and MNPK by 21.3% ~ 73.6%. The increase was the most significantly in Treatments M and MNPK ($p < 0.05$). At the same time, Treatment MNPK increased SOC turnover rate and reduced turnover time. **【Conclusion】** In conclusion, long-term application of organic manures, like in Treatments 0.5MNPK, M and MNPK, can improve SOC mineralization rate, promote SOC accumulation, reduce SOC cumulative mineralization ratio (mineralization level per unit organic carbon), and enhance soil C sequestration capacity.

Key words Long-term application of organic fertilizer; Paddy soil from yellow earth; Organic carbon mineralization; Fitting parameters; Organic carbon accumulation

(责任编辑: 陈荣府)