

DOI: 10.11766/trxb201810230472

地下水位和长期施肥对红壤性水稻土 有机碳矿化特征的影响*

林清美 廖超林[†] 谢丽华 戴齐 唐茹
孙钰翔 黎丽娜 尹力初

(湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘要 以 1982 年开始的长期定位试验红壤性水稻土为对象, 采用室内模拟培养试验方法, 对耕层土壤有机碳矿化特征进行分析, 以探究两个地下水位 (20 cm、80 cm) 下, 长期不同施肥处理 (高量有机肥 + 化肥 (2/3OM)、常量有机肥 + 化肥 (1/3OM)、单施化肥 (NPK)) 红壤性水稻土有机碳矿化特征和差异。结果表明, 较高的地下水位促进土壤有机碳累积, 提高了高量有机肥和常量有机肥处理的土壤有机碳矿化速率, 且增加了其有机碳累积矿化量 (C_t) 及潜在可矿化有机碳量 (C_0), 但土壤有机碳累积矿化率在施用化肥的条件下表现为减少。长期不同施肥的红壤性水稻土土壤有机碳矿化特征在不同地下水位条件下变化明显, 2 个地下水位的土壤有机碳含量、土壤有机碳矿化速率及有机碳累积矿化量高低排序均表现为: 2/3OM>1/3OM>NPK; 20 cm 地下水位长期施用 2/3OM 和 1/3OM 土壤有机碳累积矿化率分别较 NPK 高出 53.32% ($P<0.05$)、15.44%, 80 cm 地下水位则分别低出 5.56%、17.95% ($P<0.05$); 20 cm 地下水位 2/3OM 和 1/3OM 处理的土壤潜在可矿化有机碳量 (C_0) 显著高于 NPK 处理, 而 80 cm 地下水位 C_0 表现为 1/3OM 处理显著低于 NPK 处理; 地下水位对相同施肥处理土壤有机碳周转常数 (k) 影响不明显, 而在同为 80 cm 的地下水位条件下, 长期施用有机肥可显著提高 k 。因此, 长期不同施肥对红壤性水稻土有机碳累积矿化率、潜在可矿化有机碳量及周转常数的影响在不同地下水位条件下发生变化。

关键词 红壤性水稻土; 地下水位; 有机肥; 化肥; 有机碳矿化

中图分类号 S155.2⁺92; S158.5 **文献标识码** A

土壤有机碳库是全球碳库最活跃的组成部分之一。土壤有机碳库的轻微变动便会改变大气环境中温室气体的含量, 影响全球生态系统的碳循环过程, 改变陆地生态系统的结构和功能^[1-2]。而土壤有机碳矿化是陆地生态系统中极其重要的生物化学过程, 土壤养分元素的释放与供应、土壤质量的保持以及温室气体的排放等均受土壤有机碳矿化速率和动态过程的影响^[3]。因此, 揭示土壤中有机碳矿化的规律对于土壤养分的科学管理和应对气候变化等工作

具有重要的实践意义。

施肥是影响土壤有机碳矿化环境因子之一。研究表明, 有机肥以及秸秆的施用均可增加土壤有机碳, 同时提高有机碳矿化速率和累积矿化量, 增大 CO_2 和 CH_4 的排放量^[1,4], 而化肥对土壤有机碳累积矿化量或 CO_2 和 CH_4 排放的影响尚存在争议^[5]。土壤水分状况是影响土壤有机碳矿化的另一重要因素, 土壤水分含量的变化通过影响温度^[6]、通气状况^[7]、氧化还原电位^[8]、土壤有机碳及其组分^[9]以及

* 国家自然科学基金项目 (41571211) 和湖南省高校科研重点项目 (15A085) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41571211) and the University Research Key Projects of Hunan Province in China (No. 15A085)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: clliao@163.com

作者简介: 林清美 (1994—), 女, 海南人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳矿化及土壤质量演变研究。E-mail: 401082458@qq.com

收稿日期: 2018-10-23; 收到修改稿日期: 2019-03-12; 优先数字出版日期 (www.cnki.net): 2019-04-04

土壤微生物的活性与群落结构等^[10]，进一步影响土壤有机碳的矿化。地下水位的差异导致土壤水分状况等土壤环境要素的变化，从而土壤性质及其碳排放发生变化。研究表明，土壤呼吸随着水位降低而增强^[11]，而杜紫贤等^[12]指出，土壤呼吸与水位呈现负相关关系。国内外学者在研究水位升高抑制土壤呼吸的机理方面也取得了较为成熟的进展。侯翠翠等^[8]研究表明，地下水位上升，土壤温度和氧化还原电位降低，会限制土壤中的植物残体、根系及有机物质的分解，导致土壤 CO₂ 通量降低；武海涛等^[13]发现地下水位升高导致土壤容重增加，以及土壤中动物呼吸减弱，从而降低了土壤呼吸；Ryan 和 Law^[14]指出随着地下水位的升高，土壤孔隙度降低，土壤中的 O₂ 难以扩散，植物根系呼吸减弱，表现为土壤呼吸通量降低；杨桂生等^[10]指出，地下水位的升高降低了土壤微生物活性，削弱了土壤呼吸强度；欧强等^[7]研究表明，水位的升高会导致土壤含碳矿物质的化学氧化作用降低，抑制其释放速率，土壤呼吸减弱，从而土壤碳储量增加。因此，地下水位升高抑制土壤呼吸的同时，会限制有机质的矿化分解与微生物利用，促进了腐殖化过程，促进土壤有机碳累积并改变有机碳组分含量^[8]，从而对土壤有机碳的矿化特征产生影响。

南方丘陵水稻土常因处于不同的地下水位，土壤水分状况变化频繁，而导致稻田土壤有机碳组分动态变化^[15]。研究表明，南方红壤性水稻土在高水位或低水位区，施用有机肥均能大幅度提高土壤有机碳和颗粒有机碳，且在高水位下有机碳的积累更为明显^[15]；在低水位下，相同施肥处理的红壤性水稻土团聚体稳定性更好，分形维数值较低，各级团聚体对土壤有机碳的贡献率较低^[16]。地下水位变化对土壤团聚体、有机碳及其组分产生显著影响，其结果势必导致土壤有机碳矿化特征发生变化。长期施肥对土壤有机碳矿化的影响虽有大量报道，然而仍有诸多问题，例如，长期施肥对土壤有机碳矿化特征的影响在不同地下水位条件下是否产生差异？相同地下水位条件下的土壤有机碳矿化特征在不同施肥处理下是否发生变化？本文以长期定位试验的红壤性水稻土为研究材料，选择两个地下水位（20 cm、80 cm）的长期施肥土壤，在室内恒温培养条件下，分析其有机碳矿化特征的差异，探究地下水位和长期不同施肥（高量有机肥、常量有机肥及化

肥）对红壤性水稻土有机碳矿化特征的影响，为揭示不同地下水位稻田土壤有机碳的循环特征及制定合理的养分管理措施等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 长期定位试验概况

本长期定位试验田位于湖南省长沙市湖南农业大学校园内，土壤母质为第四纪红色黏土，于 1982 年开始对试验田施肥，耕作制度为稻-稻-冬闲。试验基地外围和顶部用不锈钢金属网围住，试验小区由 3 组两排相互平行的水泥池组成，每排水泥池布置 6 个规模大小一致的小区，共有 36 个小区，各小区之间互不渗漏，可以独立灌溉，每组小区中间设有水位控制槽，水位控制槽的水位分别为 20 cm 和 80 cm。定位试验之初在 20 cm 和 80 cm 地下水位下分别设置了高量有机肥（2/3OM）、常量有机肥（1/3OM）、化肥（NPK）3 个施肥处理，总计 6 个处理，每个处理随机设定重复试验小区 3 个。按照 N : P₂O₅ : K₂O=1 : 0.5 : 1 的比例作为本试验田的施肥标准。其中，每季水稻 N 和 K₂O 的施用量均为 150 kg·hm⁻²，尿素和氯化钾作为施用化肥过程中的无机氮肥和钾肥使用，P₂O₅ 的施用量为 75 kg·hm⁻²，过磷酸钙作为无机磷肥使用。高量有机肥处理和常量有机肥处理下的有机氮分别占供应总氮的 2/3、1/3，有机物料养分不足部分追加化肥补充。其他耕作及田间管理参见文献^[17]。

1.2 样品采集

2017 年 2 月栽植早稻前，采集各小区 0~10 cm 耕层土壤样品。在每个小区中随机取 3 个土柱（长、宽、高分别为 5 cm、5 cm、10 cm），混合成一个土样，并将 3 个小区土壤样品混合为一个土样。将采集样品用保鲜盒装好带回实验室除去植物残体、小石块后室内自然风干，过 2 mm 筛并均匀分成 3 份作为 3 次重复，用于土壤有机碳矿化培养试验以及土壤有机碳测定。

1.3 测定方法

土壤有机碳含量测定采用 H₂SO₄-K₂Cr₂O₇ 外加热法。

土壤有机碳矿化试验于实验室内采用 25℃ 恒温培养箱培养，并运用 NaOH 溶液对培养过程中释放

的 CO_2 进行吸收采集和测定, 即碱液吸收法^[1]。自然风干的土样过 2 mm 筛, 并用电子天平称取 100 g 烘干土样平铺于 2 L 广口培养瓶底部, 用蒸馏水调节至田间持水量的 60%, 再将盛有 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaOH 溶液吸收杯悬置于广口瓶中, 密封广口瓶, 置于恒温箱内 25°C 条件下培养 128 d。本室内恒温培养试验共设定 21 个有机碳小型培养系统, 其中每个试验处理 3 个重复, 共 18 个, 并增加 3 个无土空白作为对照组的小型培养系统。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、62、67、77、87、97、102、107、112、117、123、128 天时更换吸收杯。为弥补培养过程中培养瓶内水分散失, 培养试验开始前记录每个小型培养系统的重量, 在每次更换吸收杯过程采用称重法对各小型培养系统进行水分调节。更换出来的吸收杯及时加入 2 mL $1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ BaCl_2 溶液于吸收杯中, 并滴入 1~2 滴酚酞指示剂进行显色。用 $0.05 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl (在每次进行滴定前先用无水碳酸钠对 HCl 溶液标定并记录) 滴定至褪色即为滴定终点, 记录每次所消耗的 HCl 体积, 计算相应培养期内 NaOH 吸收的 CO_2 量, 并得出土壤有机碳矿化速率。

1.4 数据处理

$$\begin{aligned} & \text{土壤有机碳矿化量} (\text{CO}_2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}) \\ & = C_{\text{HCl}} \times (V_0 - V) \times 22 \times 10 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, C_{HCl} 代表标定后的 HCl 浓度, $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; V_0 代表空白滴定值, mL; V 代表所消耗的 HCl 溶液体积, mL。

土壤有机碳矿化速率 $[\text{CO}_2 \text{ mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}] =$ 一定培养时间内的土壤有机碳矿化量 ($\text{CO}_2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) / 培养天数 (d)。

土壤有机碳累积矿化量 ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 表示为从培养试验开始至某一时间点土壤 CO_2 总释放量。本文运用一级动力学方程对有机碳累积矿化量、潜在可矿化有机碳与培养时间的关系进行拟合并分析土壤有机碳矿化动态过程^[18-19], 即:

$$C_t = C_0(1 - e^{-kt}) \quad (2)$$

式中, C_t 代表一定培养时间 (t) 内的土壤有机碳

累积矿化量, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; C_0 代表一定培养时间 t 内的土壤潜在可矿化有机碳, $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; k 代表一定培养时间内的土壤有机碳周转速率常数, d^{-1} , 周转速率常数 k 与半周转期 $T_{1/2}$ 的关系式为: $T_{1/2} = \ln 2/k$; t 代表培养天数, d。

土壤有机碳累积矿化率为至某一时间点的土壤累积矿化量占土壤有机碳的百分比。

本文运用 SPSS 16.0 中的双因素方差分析法判断地下水位和长期施肥对土壤有机碳矿化特征的影响, 运用最小显著差异法 (LSD) ($P < 0.05$) 进行显著性检验; 用 WPS2016 作图; 一级动力学方程 ($C_t = C_0(1 - e^{-kt})$) 运用软件 Origin8.0 拟合。

2 结 果

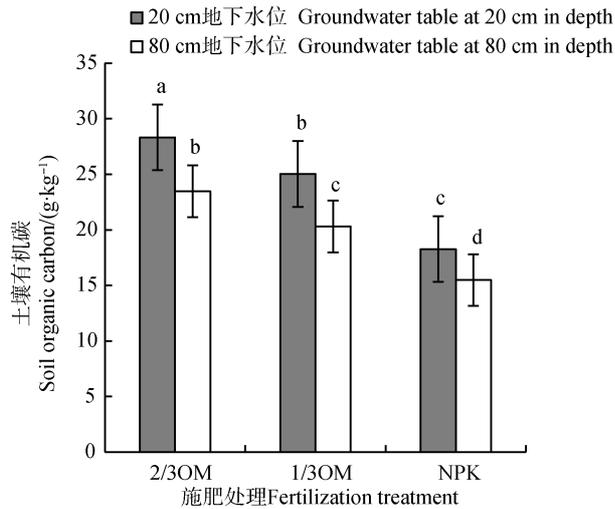
2.1 不同地下水位和长期施肥的土壤有机碳含量

各处理土壤有机碳含量在 $15.49 \sim 28.32 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间 (图 1)。从相同地下水位不同施肥处理来看, 土壤有机碳含量均表现为: $2/3\text{OM} > 1/3\text{OM} > \text{NPK}$, 其中, $2/3\text{OM}$ 和 $1/3\text{OM}$ 处理的土壤有机碳含量分别较 NPK 高出 55.02%、37.04% (20 cm 地下水位) 及 51.58%、31.12% (80 cm 地下水位) ($P < 0.05$); $2/3\text{OM}$ 处理的有机碳含量较 $1/3\text{OM}$ 处理分别高出 13.13% 和 15.60% ($P < 0.05$)。从不同地下水位相同施肥处理来看, 20 cm 地下水位 $2/3\text{OM}$ 、 $1/3\text{OM}$ 、NPK 土壤有机碳含量均显著高于 80 cm 地下水位相应处理, 分别高出 20.66%、23.30% 和 17.97% ($P < 0.05$)。

2.2 不同地下水位和长期施肥的土壤有机碳矿化速率

土壤有机碳矿化速率见图 2。在 128 d 培养期间内, 随着培养时间的延长, 20 cm 和 80 cm 地下水位不同施肥处理的土壤有机碳矿化速率均不断下降, 并最终达到平稳状态, 其相关方程式如表 1 所示。

从相同地下水位不同施肥处理来看, 在 128 天的培养期内, 土壤有机碳矿化速率均表现为: $2/3\text{OM} > 1/3\text{OM} > \text{NPK}$, 但最终随着易分解有机碳组分的减少, 逐渐趋于一致。从不同地下水位相同施肥处理来看, $2/3\text{OM}$ 和 $1/3\text{OM}$ 处理的有机碳矿化速率均表现为 20 cm 地下水位高于 80 cm 地下水位, NPK 处理则相反。



注：2/3OM、1/3OM 和 NPK 分别代表高量有机肥处理、常量有机肥处理和化肥处理。图中柱上不同字母代表不同地下水位和施肥各处理间有显著差异 ($P < 0.05$)。下同 Note: In the figure, 2/3OM, 1/3OM, and NPK indicates the treatment of applying organic manure at a rate to make up 2/3 of the total N supply, applying organic manure at a rate to make up 1/3 of the total N supply and no organic manure applied in addition to N, P, and K, respectively; and N was applied as urea. Different letters above the bars stand for significant difference (at 0.05 level) between treatments of different groundwater tables and fertilization. The same below

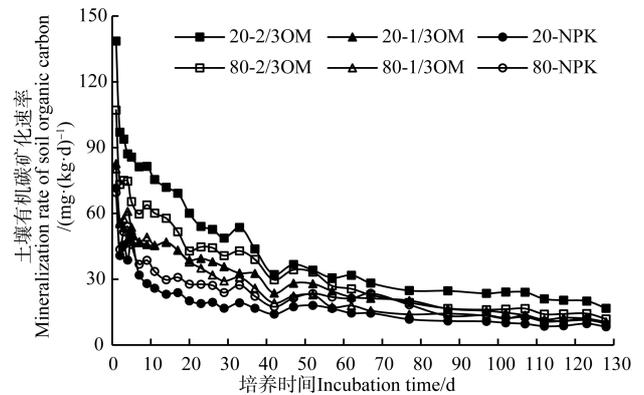
图 1 各地下水位和施肥处理的土壤有机碳含量

Fig. 1 Content of soil organic carbon (SOC) under different groundwater tables and fertilization treatments

2.3 不同地下水位和长期施肥的土壤有机碳矿化量

土壤有机碳累积矿化量表示土壤中的有机碳在

研究的某一段时间内被微生物分解矿化为无机碳后所排放到大气中的 CO_2 数量，它是土壤有机碳矿化速率另一个表现形式^[20]。由图 3 可以看出，各处理土壤有机碳累积矿化量随培养时间的延长呈增加的状态，但其增加的速率不断放慢。室内恒温培养结束（第 128 天）时，各处理土壤有机碳累积矿化量变化范围为：2.03~4.81 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。



注：20-2/3OM、20-1/3OM、20-NPK 分别代表地下水位为 20 cm 的高量有机肥、常量有机肥及化肥；80-2/3OM、80-1/3OM、80-NPK 则分别代表地下水位为 80 cm 的高量有机肥处理、常量有机肥处理及化肥处理，下同 Note: 20-2/3OM, 20-1/3OM and 20-NPK stands for Treatment 2/3OM, 1/3OM and NPK with groundwater table at 20 cm in depth, and 80-2/3OM, 80-1/3OM and 80-NPK for Treatment 2/3OM, 1/3OM and NPK with groundwater table at 80 cm in depth. The same below

图 2 各地下水位和施肥处理的土壤有机碳矿化速率

Fig. 2 SOC mineralization rate of different groundwater tables and fertilization treatments

表 1 各地下水位和施肥处理的土壤有机碳矿化速率回归方程

Table 1 Regression equation of SOC mineralization rate under different groundwater tables and fertilization treatments

地下水位	施肥处理	矿化速率回归方程	R^2
Groundwater table/cm	Fertilization treatment	Regression equation of SOC mineralization rate	
20	2/3OM	$y = -22.24 \ln(t) + 124.7$	0.971**
	1/3OM	$y = -12.37 \ln(t) + 73.52$	0.942**
	NPK	$y = -10.17 \ln(t) + 55.33$	0.893**
80	2/3OM	$y = -17.49 \ln(t) + 98.26$	0.969**
	1/3OM	$y = -13.75 \ln(t) + 76.25$	0.965**
	NPK	$y = -10.44 \ln(t) + 61.36$	0.936**

注：y 为土壤有机碳矿化速率， $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ；t 为培养天数，d；**为相应回归方程达到极显著性的标识 ($P < 0.01$) Note: y means SOC mineralization rate, $\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{d})^{-1}$ ；t means number of incubation days, d；** means significant correlation at 0.01 level for the corresponding regression equation

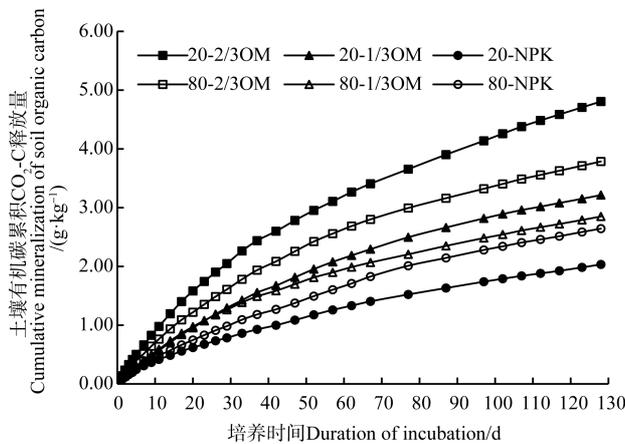


图 3 各地下水位和施肥处理的土壤有机碳累积 $\text{CO}_2\text{-C}$ 释放量

Fig. 3 $\text{CO}_2\text{-C}$ cumulative emission of different groundwater tables and fertilization treatments

从相同地下水位不同施肥处理来看, 培养 128 d 土壤有机碳累积矿化量均表现为 $2/3\text{OM} > 1/3\text{OM} > \text{NPK}$; 与 NPK 相比, $2/3\text{OM}$ 和 $1/3\text{OM}$ 处理的土壤有机碳累积矿化量分别增加了 136.4%、58.08% (20 cm 地下水位) 及 43.23%、7.82% (80 cm 地下水位); $2/3\text{OM}$ 较 $1/3\text{OM}$ 处理的土壤有机碳累积矿化量高出 49.53% (20 cm 地下水位)、32.83% (80 cm 地下水位)。从相同施肥处理不同地下水位来看, 在培养全周期内, 20 cm 地下水位 $2/3\text{OM}$ 和 $1/3\text{OM}$ 处理的土壤有机碳累积矿化量均高于 80 cm 地下水位相应处理, 分别增加了 26.98% 和 12.80%, 而 NPK 相反, 降低了 23.06%。

2.4 不同地下水位和长期施肥的土壤有机碳累积矿化率

如图 4 所示, 各处理土壤有机碳累积矿化率为 11.14%~17.10%。20 cm 地下水位 $2/3\text{OM}$ 和 $1/3\text{OM}$ 处理的土壤有机碳累积矿化率分别较 NPK 处理高出 53.32% ($P < 0.05$)、15.44%, 且 $2/3\text{OM}$ 处理较 $1/3\text{OM}$ 处理高出 32.81% ($P < 0.05$); 而 80 cm 地下水位 $2/3\text{OM}$ 和 $1/3\text{OM}$ 处理的土壤有机碳累积矿化率分别较 NPK 处理低出 5.56%、17.95% ($P < 0.05$), 但 $2/3\text{OM}$ 与 $1/3\text{OM}$ 处理间差异不显著。从同一施肥处理不同地下水位来看, 两个地下水位 $2/3\text{OM}$ 和 $1/3\text{OM}$ 处理的土壤有机碳累积矿化率差异均不显著, 而 20 cm 地下水位 NPK 处理的土壤有机碳累积矿化率低于 80 cm 地下水位 34.85% ($P < 0.05$)。

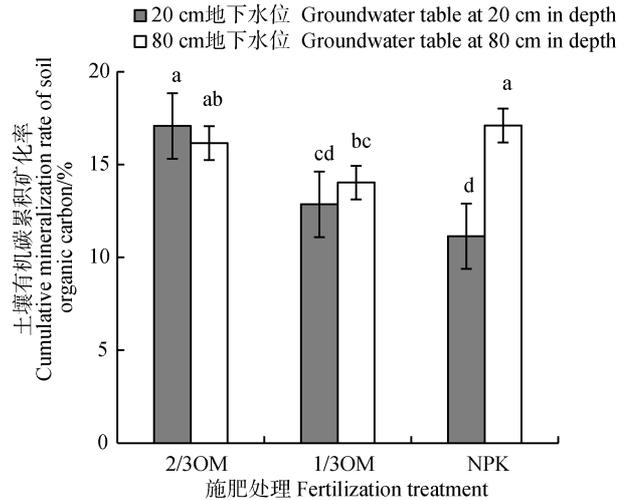


图 4 各地下水位和施肥处理的土壤有机碳累积矿化率
Fig. 4 SOC cumulative mineralization rate of different groundwater tables and fertilization treatments

2.5 不同地下水位和长期施肥的土壤有机碳矿化参数

本研究运用一级动力学方程 ($C_t = C_0 (1 - e^{-kt})$) 将有机碳累积矿化量 (C_t) 和 128 d (t) 室内恒温进行拟合, 并得到长期施肥和地下水位下土壤潜在可矿化有机碳 (C_0), 如表 2 所示。结果表明, 施肥和地下水位不同程度上改变了土壤有机碳矿化的动力学特征参数。经过室内培养 128 d 后, 各处理的 C_0 表现出不同程度的差异性, 其变化范围为 2.43~5.31 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

从相同地下水位不同施肥处理看, 20 cm 地下水位下, $2/3\text{OM}$ 和 $1/3\text{OM}$ 处理的 C_0 较 NPK 分别显著增加了 118.5%、56.38%, 且 $2/3\text{OM}$ 处理较 $1/3\text{OM}$ 处理高出 39.74% ($P < 0.05$)。而 80 cm 地下水位下, $2/3\text{OM}$ 处理的 C_0 分别较 $1/3\text{OM}$ 和 NPK 处理增加了 35.92% 和 26.51% ($P < 0.05$), $1/3\text{OM}$ 和 NPK 处理间差异不显著。20 cm 地下水位下不同施肥处理的土壤有机碳周转速率常数 (k) 的变化范围为 0.014~0.017 d^{-1} , 半周期 ($T_{1/2}$) 的变化范围为 42.34~51.05 d, 但两者在不同处理间的差异均不显著, 而 80 cm 地下水位下, $2/3\text{OM}$ 和 $1/3\text{OM}$ 处理的 k 较 NPK 处理分别显著增加了 38.84%、48.76%, 而 $T_{1/2}$ 分别降低了 28.11%、31.98%。

从不同地下水位相同施肥处理来看, 相对于 80 cm 地下水位, 20 cm 地下水位 $2/3\text{OM}$ 和 $1/3\text{OM}$ 处理的 C_0 分别高出相应处理的 26.43% ($P < 0.05$)、

表 2 培养 128 d 后土壤有机碳累积矿化量及其动力学方程参数

Table 2 SOC cumulative mineralization of after 128 days of incubation period and parameters of its kinetic equations

地下水位 Groundwater table/cm	施肥处理 Fertilization Treatment	C_t /(g·kg ⁻¹)	C_0 /(g·kg ⁻¹)	k /d ⁻¹	$T_{1/2}$ /d	C_0/SOC /%	R^2
20	2/3OM	4.81a	5.31a	0.017ab	42.34bc	18.89ab	0.996**
	1/3OM	3.21c	3.80bc	0.014bc	49.08ac	15.19bc	0.999**
	NPK	2.03e	2.43d	0.014bc	51.05ab	13.25c	0.993**
80	2/3OM	3.79b	4.20b	0.017ab	41.40bc	17.92b	0.999**
	1/3OM	2.85cd	3.09cd	0.018a	39.17c	15.19bc	0.996**
	NPK	2.64d	3.32c	0.012c	57.59a	21.44a	0.997**

注： C_t 、 C_0 分别表示土壤有机碳累积矿化量和潜在可矿化有机碳量，k、 $T_{1/2}$ 分别表示有机碳周转速率常数和半周转期， C_0/SOC 则表示潜在可矿化有机碳与土壤有机碳之比值。不同处理的差异性显著($P<0.05$)表征为同一列数据后有不同的字母。Note: C_t , C_0 stands for cumulative mineralization of SOC and content of potential mineralizable SOC, respectively; k, $T_{1/2}$ mean constant of turnover rate of SOC and its half turnover period, respectively; C_0/SOC means ratio of potential mineralizable organic carbon to organic carbon in soil. Significant differences between different treatments ($P<0.05$) were characterized by different letters behind the data of same column

22.98%，而 NPK 处理则相反，降低了 26.81% ($P<0.05$)。同时，两个地下水位 2/3OM、1/3OM 和 NPK 处理的 k 和 $T_{1/2}$ 差异均不显著。

3 讨论

3.1 地下水位对有机碳矿化的影响

地下水位升高可抑制土壤呼吸，降低土壤有机碳分解及团聚体稳定性，增加土壤有机碳累积量^[6]。本研究表明，20 cm 地下水位 2/3OM、1/3OM 及 NPK 处理的土壤有机碳含量均高于 80 cm 地下水位的相应处理，说明较高的地下水位有利于土壤有机碳的累积，与张蕾等^[21]、欧强等^[7]结果一致，其原因是地下水位升高导致土壤氧化还原电位、微生物活性及有机碳分解能力降低，土壤有机碳累积。施用有机肥处理的有机碳矿化速率、累积矿化量和 C_0 均表现为 20 cm 地下水位下高于 80 cm 地下水位，而化肥处理相反，表明较高地下水位可以提高有机肥处理的有机碳矿化速率，增加有机碳累积矿化量和潜在可矿化有机碳量(C_0)，而对化肥处理的影响相反。研究表明，地下水位可以提高土壤有机碳、轻组有机碳积累量及其在有机碳中的比例^[8]；易亚男等^[15]指出，较高地下水位颗粒态及矿物结合态有机碳较高，轻组及颗粒态有机碳多是土壤中不稳定的碳库。因此，施用有机肥处理的红壤性水稻土在较高的地

下水位具有相对较高的有机碳矿化速率，同时较高的地下水位具有较高的有机碳含量，且矿物结合态等稳定的有机碳含量相对较高，从而表现出有机碳累积矿化量和 C_0 较高。长期施用化肥，由于有机胶结物质相对缺乏，在高水位的渍水环境下，大于 0.25 mm 团聚体因胶结物质的缺乏而更易浸泡分散，其含量相对较少，小于 0.25 mm 的微团聚体增多^[16]，同时微团聚体中的有机碳则大多是高度腐殖化的惰性组分，而大团聚体中含有较多的易分解活性有机碳，较微团聚体中的有机碳更容易矿化^[22]，导致长期施用化肥的红壤性水稻土在较高地下水位下减少了土壤中易被分解的有机碳组分，因此降低了有机碳矿化速率、有机碳累积矿化量以及 C_0 。

有研究表明，长期施用 20~30 年有机肥的红壤性水稻土，其土壤固碳速率并未随着有机肥施用量的增加而增加，相反其固碳速率表现为下降特征^[23]；此外 Six 等^[24]研究表明，外源有机碳的投入并不是无休止地增加土壤固碳量，而是在土壤中存在最大的固碳量，即碳饱和水平。本研究表明，长期施用等量有机肥的红壤性水稻土在 20 cm 和 80 cm 地下水位条件下，土壤有机碳累积矿化率差异不显著。说明经过长期施用有机肥后，红壤性水稻土有机碳损失率一致，并未因地下水位变化而变化，即有机碳输入量和输出量达到平衡，可能是经过长期有机肥施用后，土壤已经达到了碳饱和水平的结果。长期施用等量化肥的红壤性水稻土有机碳累积矿化率

表现为: 20 cm 地下水位低于 80 cm 地下水位, 说明 20 cm 地下水位有机碳损失率低。20 cm 地下水位有机碳含量高, 但累积矿化率最低, 说明随着地下水位的升高, 土壤有机碳含量在增加的同时有机碳损失率并不因此增加, 这可能与团聚体数量及保护作用有关。易亚男等^[15]研究表明, 20 cm 地下水位长期施用化肥的红壤性水稻土中小于 0.25 mm 团聚体含量显著高于 80 cm 地下水位, 同时周萍等^[25]指出, 有机肥的输入有利于土壤团聚体结构的形成, 新输入的有机物料多以颗粒有机碳形式包被于团聚体中而受到物理保护, 减少了微生物与之接触的机会并难以降解。因此, 20 cm 地下水位长期施用化肥的红壤性水稻土土壤有机碳累积矿化率低。

3.2 施肥对有机碳矿化的影响

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有机肥或有机无机肥配施高于施化肥处理^[18]。陈涛等^[26]研究表明, 相比化肥处理, 长期施用高量有机肥以及中量有机肥的水稻土有机碳累积矿化量和呼吸速率均较高, 说明长期施有机肥与土壤有机碳矿化具有一定的正效应。本研究表明, 20 cm 地下水位条件下, 长期不同施肥处理间土壤有机碳含量、有机碳矿化速率及累积矿化量、有机碳累积矿化率、 C_0 均表现为: $2/3OM > 1/3OM > NPK$ 。表明在 20 cm 地下水位下相对施用化肥, 施用高量有机肥和常量有机肥均可提高有机碳含量、有机碳矿化速率、累积矿化量及潜在可矿化有机碳量, 增加土壤有机碳损失率, 促进土壤有机碳矿化。本研究中, 有机肥处理的有机碳含量较高, 是因为长期施用有机肥增加了土壤有机碳的输入^[27]。此外, 长期施用有机肥的土壤有机碳累积矿化量和有机碳矿化速率也均高于长期施用化肥, 孟磊等^[28]研究表明这可能与外源有机碳的输入与输出平衡存在一定的关系。根系是土壤有机碳的重要来源之一, 有机肥的施用一方面提高了土壤肥力, 促进了作物及其根系的生长, 另一方面土壤中根系生物量、根系分泌物的种类及其数量也因此而增加, 导致微生物易利用分解的活性有机碳含量增加^[19], 土壤呼吸强度大。长期施用有机肥处理的有机碳累积矿化率和潜在可矿化有机碳量较高, 可能与土壤的碳饱和有关。Six 等^[29]认为土壤存在固碳最大容量, 长期施肥后, 土壤有机碳含量在一定程度上升至某一定值, 此时的

土壤有机碳的输入和输出已达到相应的平衡关系, 随着外源有机碳的输入土壤有机碳含量不再因此增加, 从而导致有机碳含量和损失量协同增加和减少; 而有机肥处理的潜在可矿化有机碳量较高, 则与有机肥处理的土壤有机碳储量较大有关。

长期施肥下土壤养分状况、pH 以及生物特性如微生物数量、种类、酶活性等均会发生变异, 进而影响到土壤微生物对有机碳的转化和分解^[3]。地下水位变化是土壤有机碳循环转化过程的重要影响因素^[30]。在不同地下水位条件下, 20 cm 地下水位长期不同施肥处理间土壤有机碳含量、有机碳矿化速率、累积矿化量变化特征与 80 cm 地下水位一致, 说明施有机肥提高土壤有机碳含量的同时促进了土壤有机碳矿化。此外, 20 cm 地下水位下有机碳累积矿化率、 C_0 和有机碳周转速率常数 (k) 表现出差异: 施用有机肥处理的有机碳累积矿化率显著高于化肥处理, 说明其有机碳的损失率高于化肥处理, 表明红壤性水稻土施用有机肥增加有机碳输入的同时, 损失率也高, 可能与本研究土壤有机碳含量较高有关。有机肥处理的土壤碳饱和度较高, 输入与输出达到了平衡, 而化肥处理有机碳含量较低, 输入的有机碳被土壤固定的比例较大, 损失率低。80 cm 地下水位 2/3OM 处理的 C_0 显著高于 1/3OM 和 NPK 处理, 而 1/3OM 和 NPK 处理间差异不明显, 可能与不同施肥处理土壤惰性有机碳组分比例有关。有关变化的机理, 今后需加强有机碳稳定机制和微生物降解能力的研究。

3.3 地下水位和施肥对有机碳周转速率的影响

有机碳周转速率常数 (k) 受土壤属性、气候、耕作等多因素的影响。李顺姬等^[20]认为, 土壤母质及其类型、土壤 pH 和养分含量等土壤基本属性均影响有机碳周转速率常数。施用有机肥对土壤有机碳 k 无显著性影响^[31]或降低作用^[1]均有报道, 本研究表明, 相同施肥处理不同地下水位处理间, 土壤有机碳 k 差异均不显著; 相同地下水位不同施肥处理间, 在 80 cm 地下水位条件下, 长期施用有机肥的土壤有机碳 k 值显著高于化肥处理。说明地下水位对相同施肥处理的土壤有机碳 k 影响不明显, 而在同样为 80 cm 的地下水位条件下, 长期施用有机肥可提高土壤有机碳周转速率, 可能是土壤水分、温度、团聚体及有机碳组分等多种土壤因素综合作

用的结果。其中的机理还有待土壤微生物及其碳源代谢、团聚体及其周转速率，铁铝氧化物等数据的支撑。

4 结 论

较高的地下水位有利于土壤有机碳的累积，提高有机肥处理的有机碳矿化速率，增加有机碳累积矿化量和潜在可矿化有机碳量，降低长期施化肥的土壤有机碳累积矿化率。长期不同施肥的土壤有机碳矿化特征在不同地下水位条件下变化明显。20 cm 和 80 cm 地下水位条件下，长期施用有机肥均可显著促进土壤有机碳矿化；但 20 cm 地下水位施用有机肥处理的有机碳累积矿化率高于化肥处理；而 80 cm 地下水位施高量有机肥的土壤潜在可矿化有机碳量高于常量有机肥和化肥。地下水位对相同施肥处理土壤有机碳周转速率影响不明显，而在同为 80 cm 的地下水位条件下，长期施用有机肥可提高土壤有机碳周转速率。

参 考 文 献

- [1] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响. 土壤学报, 2018, 55 (1): 225—236
Guo Z, Wang X L, Duan J J, et al. Long-term fertilization and mineralization of soil organic carbon in paddy soil from yellow earth (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2018, 55 (1): 225—236
- [2] 陈晓芬, 刘明, 江春玉, 等. 红壤性水稻土不同粒级团聚体有机碳矿化及其温度敏感性. 土壤学报, 2019, 56 (5): 1118—1127
Chen X F, Liu M, Jiang C Y, et al. Organic carbon mineralization in aggregate fractions of red paddy soil under different fertilization treatments (In Chinese). Scientia Agricultura Sinica, 2019, 56 (5): 1118—1127
- [3] 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
- [4] 马力, 杨林章, 肖和艾, 等. 施肥和秸秆还田对红壤水稻土有机碳分布变异及其矿化特性的影响. 土壤, 2011, 43 (6): 883—890
Ma L, Yang L Z, Xiao H A, et al. Effects of fertilization and straw returning on distribution and mineralization of organic carbon in paddy soils in subtropical China (In Chinese). Soils, 2011, 43 (6): 883—890
- [5] 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
- [6] 翟生强, 史长光, 杜乐山, 等. 若尔盖泥炭地地下水位和土壤温度对二氧化碳排放的影响. 湿地科学, 2015, 13 (3): 332—337
Zhai S Q, Shi C G, Du L S, et al. Effect on CO₂ emissions of water tables and soil temperatures in Zoigê Peatlands (In Chinese). Wetland Science, 2015, 13 (3): 332—337
- [7] 欧强, 王江涛, 周剑虹, 等. 滨海湿地不同水位梯度下的土壤 CO₂ 通量比较. 应用与环境生物学报, 2014, 20 (6): 992—998
Ou Q, Wang J T, Zhou J H, et al. Comparison of soil CO₂ flux among different water levels in coastal wetlands (In Chinese). Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2014, 20 (6): 992—998
- [8] 侯翠翠, 宋长春, 李英臣, 等. 不同水分条件沼泽湿地土壤轻组有机碳与微生物活性动态. 中国环境科学, 2012, 32 (1): 113—119
Hou C C, Song C C, Li Y C, et al. Light fractions of soil organic carbon and microbial activity dynamics in marshes under different water conditions (In Chinese). China Environmental Science, 2012, 32 (1): 113—119
- [9] 徐广平, 李艳琼, 沈育伊, 等. 桂林会仙喀斯特湿地水位梯度下不同植物群落土壤有机碳及其组分特征. 环境科学, 2019, 40 (3): 1491—1503
Xu G P, Li Y Q, Shen Y Y, et al. Soil organic carbon distributions and its components under different plant communities along a water table gradient in the Huixian Karst wetland in Guilin (In Chinese). Environmental Science, 2019, 40 (3): 1491—1503
- [10] 杨桂生, 宋长春, 王丽, 等. 水位梯度对小叶章湿地土壤微生物活性的影响. 环境科学, 2010, 31 (2): 444—449
Yang G S, Song C C, Wang L, et al. Influence of water level gradient on marsh soil microbial activity of *Calamagrostis angustifolia* (In Chinese). Environmental Science, 2010, 31 (2): 444—449
- [11] 万忠梅. 水位对小叶章湿地 CO₂, CH₄ 排放及土壤微生物活性的影响. 生态环境学报, 2013, 22 (3): 465—468
Wan Z M. Effects of water level on CO₂ and CH₄ flux and soil microbial activity in *Calamagrostis angustifolia* marsh (In Chinese). Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22 (3): 465—468
- [12] 杜紫贤, 曾宏达, 黄向华, 等. 城市沿江芦苇湿地土壤呼吸动态及影响因子分析. 亚热带资源与环境学报, 2010, 5 (3): 49—55
Du Z X, Zeng H D, Huang X H, et al. Soil respiration and controlling factors at *Phragmites communis* community in

- riverside wetlands (In Chinese). *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2010, 5 (3): 49—55
- [13] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原湿地岛状林土壤动物群落结构特征及影响因素. *北京林业大学学报*, 2008, 30 (2): 50—58
- Wu H T, Lü X G, Yang Q, et al. Characteristics and influencing factors of soil fauna community structure in an island forest in wetland, Sanjiang Plain (In Chinese). *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30 (2): 50—58
- [14] Ryan M G, Law B E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, 2005, 73 (1): 3—27
- [15] 易亚男, 尹力初, 张蕾. 不同地下水位和施肥管理对水稻土有机碳组分的影响. *生态学杂志*, 2014, 33 (5): 1284—1289
- Yi Y N, Yin L C, Zhang L. Effects of water table and fertilization on organic carbon fractions in paddy soil (In Chinese). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33 (5): 1284—1289
- [16] 易亚男, 尹力初, 张蕾, 等. 施肥对不同地下水位水稻土团聚体组成及有机碳分布的影响. *水土保持学报*, 2013, 27 (5): 144—149
- Yi Y N, Yin L C, Zhang L, et al. Effects of fertilization on aggregate composition and organic carbon distribution in paddy soil under different groundwater level (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (5): 144—149
- [17] Yin L C, Zhang L, Yi Y N, et al. Effects of long-term groundwater management and straw application on aggregation of paddy soils in subtropical China. *Pedosphere*, 2015, 25 (3): 386—391
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 张蕾, 尹力初, 易亚男, 等. 红壤性水稻土 Eh 动态变化及其影响因素初探. *中国土壤与肥料*, 2014 (5): 11—15
- Zhang L, Yin L C, Yi Y N, et al. The dynamic change of Eh of reddish soil and the preliminary study of its impact factors (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014 (5): 11—15
- [22] 李景, 吴会军, 武雪萍, 等. 长期保护性耕作提高土壤大团聚体含量及团聚体有机碳的作用. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21 (2): 378—386
- Li J, Wu H J, Wu X P, et al. Impact of long-term conservation tillage on soil aggregate formation and aggregate organic carbon contents (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21 (2): 378—386
- [23] Yan X, Zhou H, Zhu Q H, et al. Carbon sequestration efficiency in paddy soil and upland soil under long-term fertilization in southern China. *Soil & Tillage Research*, 2013, 130: 42—51, 31
- [24] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241 (2): 155—176
- [25] 周萍, 宋国茜, 潘根兴, 等. 南方三种典型水稻土长期试验下有机碳积累机制研究 I: 团聚体物理保护作用. *土壤学报*, 2008, 45 (6): 1063—1071
- Zhou P, Song G H, Pan G X, et al. Soc accumulation in three major types of paddy soils under long-term agro-ecosystem experiments from south China I. Physical protection in soil micro-aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (6): 1063—1071
- [26] 陈涛, 郝晓晖, 杜丽君, 等. 长期施肥对水稻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
- [27] 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 mineralization of cinnamon soil (In Chinese). *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22 (5): 1278—1285
- [28] 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 C and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization (In Chinese). *Advances in Earth Science*, 2005, 20 (6): 687—692
- [29] Six J, Paustian K, Elliott E T, et al. Soil structure and

- organic matter I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64 (2): 681—689
- [30] Tiiva P, Faubert P, Rätty S, et al. Contribution of vegetation and water table on isoprene emission from boreal peatland microcosms. *Atmospheric Environment*, 2009, 43 (34): 5469—5475
- [31] 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

Effects of Groundwater Tables and Long-term Fertilization on Mineralization of Organic Carbon in Red Paddy Soil

LIN Qingmei LIAO Chaolin[†] XIE Lihua DAI Qi TANG Ru SUN Yuxiang LI Lina YIN Lichu
(College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract 【 Objective 】 As an essential biochemical process in soil, mineralization of soil organic carbon(SOC)is closely related to release of soil nutrients, maintenance of soil quality, and formation of greenhouse gases. Mineralization of soil organic carbon varied in characteristic with soil properties and environment, while fertilization and groundwater table are two key environmental factors affecting soil properties. The objective of this study is to explore dynamics and characteristics of SOC mineralization in red paddy soil under long-term fertilization relative to pattern of the fertilization and groundwater table, in an attempt to provide certain guidance for rationalizing nutrient management programs.【 Method 】A long-term field experiment, initiated in 1982, was designed to have 3 fertilization treatments (2/3OM, 1/3OM and NPK) and 2 groundwater tables (at 20 cm and 80 cm in depth). In Treatment 2/3OM organic manure was applied at a rate to make up 2/3 of the total N supply; in Treatment 1/3OM organic manure at a rate to make up 1/3; and in Treatment NPK, Urea to make up the total N supply. In all the 3 treatments, P and K was applied the same in rate. Each treatment had 3 replicates. Soil samples were collected from the topsoil layer, 0—10 cm in depth, before ploughing in 2017. Cumulative emission and mineralization rate of carbon dioxide were determined with the incubation method. First-order kinetic model was used to calculate potential mineralization and turnover rates. 【 Result 】 Groundwater table had a significant impact on characteristics of organic carbon mineralization; SOC content in Treatment 2/3OM, 1/3OM and NPK was 20.66%, 23.30% and 17.97%, respectively, higher when the groundwater table was at 20 cm in depth than when it was at 80 cm in depth; Mineralization rate, cumulative mineralization and potential cumulative mineralization (C_0) of SOC in Treatment 2/3OM and 1/3OM was also higher in the former case than in the latter case, whereas in Treatment NPK reverse tendencies were observed; Obviously mineralization of SOC in red soil varied significantly with fertilization pattern and depth of groundwater table. In terms of content, mineralization rate and cumulative mineralization of SOC, the three treatments exhibited an order of 2/3OM>1/3OM>NPK. When the groundwater table was at 20 cm in depth, Treatment 2/3OM and 1/3OM was 53.32% and 15.44% higher than Treatment NPK, respectively, in SOC cumulative mineralization rate, but when the groundwater table was at 80 cm in depth, Treatment 2/3OM and 1/3OM was 5.56% and 17.95%, respectively, lower. Meanwhile, in the case of the former, Treatment 2/3OM and 1/3OM significantly higher than Treatment NPK in potential mineralizable soil organic carbon (C_0), but in the case of the latter, Treatment 1/3OM was significantly lower than Treatment NPK, and in the case of the former, the treatments did not vary much in SOC turnover constant (k), whereas in the case of the latter, Treatments 2/3OM and 1/3OM were significantly higher. 【 Conclusion 】 In conclusion, high groundwater table is conducive to accumulation of soil organic carbon, increase of cumulative mineralization, cumulative mineralization rates and potential cumulative mineralization of

SOC in red soil under long-term application of organic manure, but lowers SOC cumulative mineralization rate in the soil under long-term application of chemical fertilizer. The effects of long-term fertilization on cumulative mineralization rate and potential cumulative mineralization of SOC in red paddy soil vary with depth of groundwater table.

Key words Red paddy soil; Groundwater table; Organic manure; Chemical fertilizer; Organic carbon mineralization

(责任编辑: 陈荣府)