

不同培养温度下长期施肥红壤水稻土有机碳矿化特征研究^①

陈晓芬¹, 吴 萌¹, 江春玉¹, 刘 明^{1,2}, 李忠佩^{1,2*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 以长期不同施肥处理红壤水稻土为研究对象, 布置不同温度下(15、25 和 35 °C)的室内培养试验, 研究有机碳矿化的温度敏感性及施肥对土壤有机碳矿化的影响, 并分析土壤有机碳矿化与土壤理化性质和不同形态碳素之间的关系。结果表明, 培养前期 (0~7 d), 土壤有机碳矿化速率快速下降, 之后逐渐降低并最终趋于稳定。温度升高提高了土壤有机碳矿化速率、累积矿化量和矿化率。磷肥和有机肥的施用提高了土壤有机碳累积矿化量。各处理土壤有机碳矿化的温度敏感性系数 Q_{10} 为 1.31~1.75, 施肥提高了土壤有机碳矿化的温度敏感性。 Q_{10} 与有机碳、全量和速效氮磷、微生物生物量碳、易氧化有机碳和胡敏酸碳呈显著或极显著的正相关关系。3 种培养温度下土壤有机碳累积矿化量均与 pH 呈显著负相关, 与有机碳和全氮呈显著或极显著正相关。25 °C 和 35 °C 培养时, 土壤有机碳累积矿化量与微生物生物量碳、胡敏酸碳和富里酸碳显著或极显著正相关。

关键词: 温度; 长期施肥; 红壤水稻土; 有机碳矿化

中图分类号: S154.1 文献标识码: A

土壤有机碳是土壤质量的核心, 有机碳矿化是陆地生态系统中极其重要的生物化学过程, 关系到土壤碳库的维持和土壤生产力的持续, 同时与温室气体形成等密切相关^[1]。近年来, 土壤有机碳矿化一直是土壤学、环境科学领域研究的热点, 揭示土壤有机碳矿化规律对于土壤养分的科学管理和全球气候变化趋势的缓解具有重要意义。

土壤有机碳矿化受诸多因素的影响, 如土壤质地、有机碳的化学组成、土壤温度、湿度、土地管理措施等。其中, 温度是影响土壤有机碳矿化的主要环境因子^[2-3]。多数研究认为, 温度升高有利于提高土壤微生物活性, 从而促进土壤有机碳的矿化^[3-4], 然而也有研究发现温度升高不会对土壤有机碳矿化产生影响^[5]。土壤有机碳矿化的温度敏感性用 Q_{10} 表示, 由于温度以外的其他因素等的影响, Q_{10} 值存在较大的时空变化, 但这些因素如何影响 Q_{10} 值仍不清楚。施肥作为农业增产的重要手段, 对土壤生态系统养分含量、土壤有机碳组成和存在状态及微生物活性等产生重要影响, 从而影响土壤有机碳矿化。王朔林等^[6]对栗褐土的研究表明, 长期施化肥、有机肥及有机无机肥配施可促进土壤有机碳的积累, 提高土壤有机碳

矿化速率。李梦雅等^[7]发现长期施肥尤其是施有机肥能影响微生物的群落结构, 提高红壤旱地微生物活性, 进而促进土壤有机碳的矿化。研究长期施肥作用下土壤有机碳矿化与土壤特性如养分、有机碳形态等的关系有助于阐明土壤有机碳矿化的作用机制。

水稻土是我国重要的土壤资源, 占全国耕地面积的 25%, 生产出中国约 44% 的粮食^[8-9]。关于温度变化对水稻土有机碳矿化的影响已有一些报道^[10-12], 然而这些研究更多关注的是中高肥力的水田, 新开垦或中低产的水稻土对温度变化的响应如何尚不清楚。本文以开垦自红壤荒地不同施肥处理水稻土为研究对象, 研究有机碳矿化的温度敏感性和施肥对土壤有机碳矿化的影响, 并分析土壤有机碳矿化及其温度敏感性与土壤理化性质及不同碳形态的关系, 以期明确土壤有机碳矿化的影响因素和生态效应及制定合理的养分管理措施提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 长期试验概况

长期肥料定位试验设在鹰潭农田生态系统国家野外科学观测研究站。该研究站位于江西省鹰潭市余

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41601270)、国家自然科学基金重点项目(41430859)和中国博士后基金项目(2016M601904)资助。

* 通讯作者(zhpli@issas.ac.cn)

作者简介: 陈晓芬(1987—), 女, 安徽阜阳人, 博士后, 主要从事土壤有机质转化研究。E-mail: issxfchen@163.com

江县(116°55'E, 28°15'N), 属亚热带季风气候区, 年平均温度 17.6 °C, 年降雨量 1 795 mm, 年蒸发量 1 318 mm, 无霜期 261 d。试验开始于 1990 年, 耕作制为“稻-稻-冬闲”。试验开始时, 将发育自第四纪红黏土的荒地平整, 然后灌水种稻, 共设 9 个处理, 每个处理 3 个重复, 共 27 个试验小区, 随机区组排列。每个小区面积为 30 m², 小区间用水泥埂隔开, 其地下深埋 50 cm, 地上部分高 15 cm。试验前土壤的基本理化性质为: pH 4.5, 黏粒(<1 μm)含量 380 g/kg, 有机碳含量 3.29 g/kg, 全氮 0.43 g/kg, 全磷 (P₂O₅) 0.65 g/kg, 全钾(K₂O) 13.4 g/kg, 有效磷 5.6 mg/kg, 速效钾 105.9 mg/kg, 碱解氮 90.2 mg/kg。

试验处理为: 不施肥(CK); 有机质循环(C); 施氮肥(N); 施氮肥+有机质循环(NC); 施氮磷肥(NP); 施氮磷钾肥(NPK); 施氮磷钾肥+有机质循环(NPKC); 施氮钾肥(NK); 施氮磷钾肥+1/2

秸秆回田(NPKS)。循环处理中除秸秆全部还田外, 每季另施入 833.3 kg/hm²干猪粪用以补充收获籽粒所移出的养分。氮、磷、钾化肥分别为尿素、钙镁磷肥和氯化钾。磷肥和钾肥以基肥形式施入, 尿素分基肥和追肥按 8:7 的比例分两次施入。1998 年以前化肥施用量为每季每公顷 N 230 kg, P₂O₅ 68 kg, K₂O 84 kg; 1998 年以后每季每公顷氮肥施用量减半, 磷肥和钾肥施用量不变。

1.2 样品采集与处理

2010 年 12 月底(冬闲)在每个小区随机选取 5 个点, 采集 0~15 cm 耕层土壤组成一个混合土样。新鲜土壤过 2 mm 筛后, 一部分用于土壤微生物生物量碳的测定, 其余样品在室温下风干, 用于土壤理化性质、不同形态有机碳(包括易氧化有机碳、胡敏酸碳和富里酸碳)含量的测定及有机碳矿化分析。其中各施肥处理土壤理化性质如表 1 所示。

表 1 不同施肥处理土壤基本理化性质
Table 1 Soil basic physiochemical properties under different fertilization treatments

处理	pH	有机碳(g/kg)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	碱解氮(mg/kg)	有效磷(mg/kg)	速效钾(mg/kg)
CK	5.30 a	9.19 e	0.89 cd	0.28 e	13.19 a	85.75 b	3.34 e	112.50 b
C	5.14 bc	12.17 bc	1.07 ab	0.40 d	12.92 a	101.68 ab	6.18 c	81.67 bc
N	5.19 b	10.14 de	0.85 d	0.27 e	12.17 a	90.65 ab	2.99 e	102.50 b
NC	5.00 d	13.42 a	1.21 a	0.41 d	12.70 a	111.48 a	6.02 cd	75.83 bc
NP	5.14 bc	11.72 bc	1.11 ab	0.57 b	12.77 a	106.58 ab	13.09 b	56.67 c
NPK	5.16 b	11.84 bc	1.05 abc	0.57 b	13.20 a	104.13 ab	13.01 b	68.33 bc
NPKC	5.13 bc	12.63 ab	1.18 a	0.69 a	12.58 a	107.80 a	22.63 a	82.50 bc
NK	5.21 b	11.04 cd	0.97 bcd	0.30 e	13.31 a	94.33 ab	3.59 de	175.83 a
NPKS	5.06 cd	11.66 bc	1.14 ab	0.51 c	12.64 a	107.80 a	11.76 b	80.83 bc

注: 表中同列数据小写字母不同表示处理之间差异显著($P < 0.05$), 下同。

1.3 测定项目与方法

土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提法测定^[13]。土壤易氧化有机碳采用 333 mmol/L 高锰酸钾氧化法测定^[14]。土壤胡敏酸碳和富里酸碳采用焦磷酸钠-NaOH 提取-重铬酸钾容量法测定^[15]。

将风干土壤样品调节含水量至田间持水量的 60%, 于 25 °C 培养箱中预培养一周。采用室内恒温培养-碱液吸收法测定土壤有机碳的矿化量^[16]。称取相当于 50 g 干土重的预培养样品, 平铺于 500 ml 培养瓶底部。然后将盛有 5.0 ml 0.6 mol/L NaOH 溶液的 10 ml 特制吸收容量瓶置于培养瓶内, 将培养瓶加盖密封好, 分别在 15、25 和 35 °C 恒温箱中进行培养。同时设置仅装有 NaOH 溶液的培养瓶作为空白。在培养的第 1、3、5、7、14、21、28、35 天取出吸收容量瓶, 用蒸馏水将容量瓶中溶液全部洗至三角瓶

中, 加入 2 ml 1 mol/L 的 BaCl₂ 溶液和 2 滴酚酞指示剂, 用标准酸 (HCl 约 0.15 mol/L) 滴定至红色消失。根据 CO₂-C 的释放量计算培养期内土壤有机碳的矿化量。

1.4 Q₁₀ 值计算

土壤有机碳矿化温度敏感性系数 Q₁₀, 指温度每增加 10 °C 时土壤有机碳矿化速率增加的倍数。本研究土壤有机碳矿化速率与温度之间的关系采用指数模型 $R = ae^{bT}$ 。其中: R 为土壤有机碳矿化速率; T 为培养温度; a 为温度为 0 °C 时的土壤有机碳矿化速率; b 为温度反应系数^[17]。Q₁₀ 计算公式为: $Q_{10} = e^{10b}$ 。

1.5 数据分析

试验数据用 SPSS 18.0 软件进行方差分析和 Pearson 相关分析, 显著性水平为 $P < 0.05$ 。试验结

果以 3 个重复的平均值表示。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳矿化动态

3 种培养温度下不同施肥处理土壤有机碳矿化速率随时间的动态变化如图 1 所示。培养前 7 d, 土壤有机碳矿化速率快速下降, 之后逐渐降低, 直至培养结束时达到稳定状态。培养第 7 天, 土壤有机碳矿化速率分别为开始时的 47.6%、55.5% 和 51.6%, 培养结束时则分别为开始时的 30.5%、22.4% 和 22.4%。所有处理土壤有机碳矿化速率随着培养温度的升高而增加。培养过程中施肥对土壤有机碳矿化速率的影响较为复杂, 因此通过有机碳累积矿化量进行进一步的比较和分析。

2.2 土壤有机碳累积矿化量及温度敏感性(Q_{10})

除 CK 处理外, 其余处理土壤有机碳累积矿化量均随温度升高而增加, 25 °C 时比 15 °C 平均增加 122.5%, 35 °C 时比 25 °C 时增加 32.7% (表 2), 说明

在较低温度范围内, 有机碳矿化受温度变化的影响更大。不同培养温度下, 施肥对土壤有机碳累积矿化量的影响不同。15 °C 培养时, C 和 NC 处理有机碳累积矿化量最高, 分别比 CK 高 26.5% 和 36.7%, 其余处理有机碳矿化量接近。25 °C 培养时, NK 处理有机碳累积矿化量最低, 其次是 N 和 CK 处理; 施磷(NP 和 NPK)较未施磷处理(N 和 NK)有机碳累积矿化量平均提高 32.9%, 施有机肥(C、NC 和 NP KC)较未施有机肥处理(CK、N 和 NPK)提高 17.4%, 1/2 秸秆回田处理(NPKS)比对照提高 9.4%。35 °C 培养时, CK、N 和 NK 处理有机碳累积矿化量同样最低, 施磷比未施磷处理平均提高 31.2%, 施有机肥比未施有机肥处理提高 40.1%, NPKS 处理比 CK 高 39.7%。土壤有机碳矿化率结果显示, 除 CK 处理外, 25 °C 时有机碳矿化率比 15 °C 时平均高 117.6%, 35 °C 时比 25 °C 高 34.6% (表 2)。25 °C 培养时, CK 处理有机碳矿化率最高; 15 °C 培养时, 多数施肥处理有机碳矿化率低于 CK, 而 35 °C 培养结果与之相反。

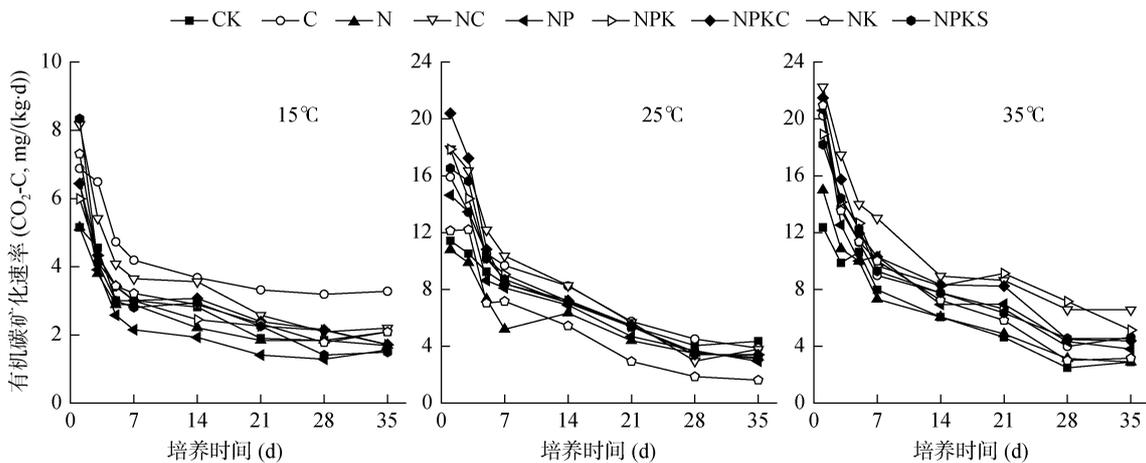


图 1 不同培养温度下长期施肥土壤有机碳矿化速率动态变化

Fig.1 Dynamics of SOC mineralization at different temperatures under different fertilization treatments

表 2 不同施肥处理土壤有机碳累积矿化量和 Q_{10} 值

Table 2 Cumulative amounts and Q_{10} values of SOC mineralization under different fertilization treatments

处理	矿化量(CO ₂ -C, mg/kg)			矿化率(%)			Q_{10}
	15 °C	25 °C	35 °C	15 °C	25 °C	35 °C	
CK	88.98 b	200.60 ab	191.85 c	0.97 ab	2.31 a	2.09 a	1.31 c
C	112.57 ab	239.90 a	264.89 abc	1.08 a	1.93 ab	2.17 a	1.36 bc
N	86.46 b	187.30 bc	201.17 bc	0.99 ab	1.86 b	1.96 a	1.32 c
NC	121.68 a	240.84 a	348.08 a	0.82 ab	1.79 b	2.59 a	1.66 abc
NP	86.49 b	215.05 ab	255.79 abc	0.65 b	1.71 bc	2.17 a	1.57 abc
NPK	89.14 b	220.97 ab	321.06 ab	0.75 ab	1.83 b	2.71 a	1.70 ab
NP KC	95.00 ab	229.95 ab	350.28 a	0.75 ab	1.82 b	2.79 a	1.75 a
NK	92.90 ab	148.03 c	237.47 abc	0.85 ab	1.33 c	2.15 a	1.59 abc
NPKS	86.19 b	219.37 ab	268.00 abc	0.74 ab	1.85 b	2.30 a	1.55 abc

本研究中,土壤有机碳矿化温度敏感性受施肥处理的影响(表 2)。其中,CK 和 N 处理有机碳矿化的 Q_{10} 最低,分别为 1.31 和 1.32, NPKC 处理的 Q_{10} 最高,为 1.75,其余处理的 Q_{10} 为 1.36~1.70。可见,长期施肥提高了红壤水稻土有机碳矿化的温度敏感性。

2.3 土壤不同形态有机碳含量

不同施肥处理土壤各形态有机碳含量差异显著(表 3)。CK、N 和 NK 处理各形态有机碳含量最低。与缺磷处理(N 和 NK)相比,增施磷肥(NP 和 NPK)土壤微生物生物量碳、易氧化有机碳、胡敏酸碳和富里酸碳含量分别提高 45.3%、15.7%、125.0% 和 8.1%。施有机肥(C、NC 和 NPKC)较未施有机肥处理(CK、N 和 NPK)各形态有机碳含量分别提高 56.6%、22.5%、60.7% 和 26.0%。相对于 CK 处理,1/2 秸秆回田处理(NPKS)各形态有机碳含量分别提高 103.5%、43.6%、46.3% 和 35.0%。

表 3 不同施肥处理土壤各形态有机碳含量
Table 3 Contents of SOC fractions under different fertilization treatments

处理	微生物生物量碳 (mg/kg)	易氧化有机碳 (g/kg)	胡敏酸碳 (g/kg)	富里酸碳 (g/kg)
CK	186.18 d	1.88 d	0.54 bc	2.06 b
C	361.23 ab	2.57 bc	0.73 abc	2.49 ab
N	242.00 cd	2.31 c	0.50 bc	2.14 b
NC	413.50 a	2.70 abc	1.22 a	3.09 a
NP	381.50 a	2.88 ab	0.85 abc	2.43 ab
NPK	402.26 a	2.67 abc	0.98 ab	2.28 b
NPKC	422.61 a	3.04 a	1.01 ab	2.57 ab
NK	302.74 bc	2.50 bc	0.35 c	2.22 b
NPKS	378.93 a	2.70 abc	0.79 abc	2.78 ab

2.4 相关性分析

不同培养温度下土壤有机碳累积矿化量与土壤理化性质的相关性分析结果表明(表 4),有机碳累积矿化量与 pH 呈显著负相关,而与有机碳和全氮均呈显著或极显著正相关。全磷、碱解氮和有效磷与部分培养温度下有机碳累积矿化量显著相关。全钾与有机碳累积矿化量相关性不显著,而速效钾与 25 °C 和 35 °C 下有机碳累积矿化量显著负相关。有机碳矿化温度敏感性系数 Q_{10} 与有机碳、全氮、全磷、碱解氮和有效磷均呈显著或极显著正相关。

不同培养温度下土壤有机碳累积矿化量与不同形态有机碳的相关性分析结果显示(表 5),15 °C 下有机碳累积矿化量与各形态有机碳相关性不显著,而 25 °C 和 35 °C 时则呈现出显著或极显著正相关关系

(除 25 °C 时,与易氧化有机碳相关不显著)。有机碳矿化温度敏感性系数 Q_{10} 与除富里酸碳外的碳素形态显著或极显著正相关。

表 4 土壤有机碳矿化量和 Q_{10} 与土壤理化性质的相关性
Table 4 Correlation coefficients between cumulative amounts of SOC mineralization, Q_{10} values and soil physiochemical properties

	土壤有机碳矿化量			Q_{10}
	15 °C	25 °C	35 °C	
pH	-0.452*	-0.390*	-0.466*	ns
有机碳	0.542**	0.448*	0.709**	0.459*
全氮	0.527**	0.421*	0.663**	0.431*
全磷	ns	0.385*	0.552**	0.510**
全钾	ns	ns	ns	ns
碱解氮	0.435*	ns	0.631**	0.445*
有效磷	ns	ns	0.402*	0.405*
速效钾	ns	-0.594**	-0.472*	ns

注:*,**分别表示相关性达到 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平,ns 表示相关性不显著,下表同。

表 5 土壤有机碳矿化量和 Q_{10} 与不同形态有机碳之间相关性

Table 5 Correlation coefficients between cumulative amounts of SOC mineralization, Q_{10} values and SOC fractions

	土壤有机碳矿化量			Q_{10}
	15 °C	25 °C	35 °C	
微生物生物量碳	ns	0.394*	0.625**	0.504**
易氧化有机碳	ns	ns	0.427*	0.467*
胡敏酸碳	ns	0.473**	0.626**	0.456*
富里酸碳	ns	0.430*	0.594**	ns

3 讨论

微生物作用下的土壤有机碳矿化过程,很大程度上依赖于土壤中养分的供应。培养前期,土壤中存在大量可供微生物分解利用的活性有机物质,微生物活动强烈,CO₂ 产生速率较快;随着培养时间的延长,微生物开始利用较难分解的复杂有机物,其活动相对缓和,CO₂ 释放速率开始降低并在培养后期表现出相对稳定的趋势。这种有机碳矿化速率先快后慢的变化特征在很多研究中均有报道^[4,6-7]。

本研究中,土壤有机碳矿化速率、累积矿化量和矿化率均随温度升高而增加。一定温度范围内,温度升高导致的有机碳矿化强度增加可能与土壤微生物和土壤酶活性的增强有关^[18]。Rustad 等^[19]指出,一定程度的温度升高有利于土壤微生物生长和繁殖,并提高微生物活性。韩玮等^[20]发现,与常温(25 °C)处理相比,增温处理(30 °C)土壤转化酶、纤维素酶、

淀粉酶和蛋白酶活性增加,且转化酶对温度变化更为敏感。因此,在一定温度范围内,随着土壤微生物和土壤酶活性的增强,土壤有机质分解过程加剧,有机碳矿化作用增强。

温度敏感性系数 Q_{10} 反映环境温度变化对土壤有机碳矿化速率的影响。前人研究表明稻麦轮作的典型潜育、潜育和淹育水稻土的 Q_{10} 值变化范围为 1.48 ~ 2.88^[11],湖南省 3 个长期定位施肥监测点水稻土的 Q_{10} 为 1.01 ~ 1.53^[12]。本研究中,开垦自红壤荒地不同施肥处理水稻土 Q_{10} 为 1.31 ~ 1.75,在前人报道的水稻土有机碳矿化温度敏感性范围之内。

本研究发现,施肥可以提高水稻土有机碳矿化的温度敏感性(Q_{10}),而马天娥等^[21]对旱作农田土壤的研究却表明,施肥降低了土壤的 Q_{10} 值。理论上认为,土壤有机质含量越高,有机碳矿化速率越大,有机碳矿化的温度敏感性应当越低^[22-23]。然而,有研究发现不同利用方式土壤的 Q_{10} 值与有机质数量大小并非对应关系^[24],而三江平原土壤 Q_{10} 值与土壤有机碳和微生物生物量碳含量呈线性正相关关系^[25]。无论是土壤中易被微生物利用的活性有机碳,还是在活性碳消耗后能被微生物分解的缓效碳,均对温度变化表现出一定敏感性,从而影响土壤有机碳矿化的温度敏感性^[24]。有研究表明,不同施肥处理水稻土 Q_{10} 值与土壤有机碳、易氧化有机碳、胡敏酸碳和富里酸碳均呈显著正相关^[12]。本研究中, Q_{10} 值与有机碳及氮磷的全量和速效养分,以及除富里酸外的有机碳形态显著或极显著正相关。土壤中底物的质量是决定有机碳矿化温度敏感性的重要因素^[26]。施肥、土壤类型、利用方式、植物覆盖等因素导致的土壤有机碳质量差异可能是导致有机碳矿化温度敏感性存在空间差异的重要原因。土壤有机碳矿化温度敏感性的空间格局及其影响因素仍有待于进一步研究探索。

磷肥和有机肥的施用提高了红壤水稻土有机碳累积矿化量。我国南方红壤磷素利用率低,作物容易表现出缺磷的现象^[27-28]。化学磷肥的施用及秸秆和猪粪带入的磷素可以促进作物生长,提高作物根系生物量和分泌物的种类和数量^[29],从而增加土壤中可供矿化的活性有机碳含量。有机肥本身包含大量的有机碳和微生物活性物质,不但能提供大量的可矿化碳,还可促进土壤原有有机碳的矿化^[21]。此外,磷肥和有机肥的施用对土壤微生物活性和多样性的促进作用也是导致土壤有机碳矿化量增加的重要原因^[30-31]。土壤有机碳矿化量增加,有机质分解释放出更多无机养分,有利于改善水稻土养分供应状况。

张鹏等^[32]对宁南旱区土壤的研究表明,有机碳累积矿化量与土壤活性有机碳之间存在极显著正相关性。陈涛等^[33]的研究发现,不同施肥处理水稻土有机碳矿化量与有机碳、微生物生物量碳和水溶性有机碳的相关性极显著。本研究中,3 个培养温度下有机碳累积矿化量与有机碳、全氮显著正相关,25 °C 和 35 °C 有机碳累积矿化量与不同形态有机碳显著正相关。也有研究指出所有培养温度下(10、20 和 30 °C)土壤有机碳矿化量与有机碳、易氧化有机碳、胡敏酸碳和富里酸碳呈显著正相关关系^[12]。本研究中,15 °C 培养时土壤有机碳累积矿化量与不同碳形态无显著相关关系,这可能是因为在当前的肥力水平下,土壤微生物和酶活性更易受低温条件抑制,土壤提供的有效碳源超过微生物活动的需求。此外,土壤有机碳累积矿化量与 pH 显著负相关,这与吴萌等^[34]对长期施肥处理下不同类型水稻土有机碳矿化的研究结果是一致的。

4 结论

1)培养前期土壤有机碳矿化速率较快,之后矿化速率相对较慢并在培养后期趋于稳定。土壤有机碳矿化速率、累积矿化量和矿化率均随温度的升高而增加,因此,在一定温度范围内,升温促进了红壤水稻土有机碳的矿化。各处理土壤有机碳矿化的温度敏感性系数 Q_{10} 为 1.31 ~ 1.75,与土壤理化性质和有机碳形态密切相关。

2)磷肥和有机肥的施用提高了红壤水稻土有机碳累积矿化量,有利于土壤中养分的释放与供应。3 种温度条件下,不同施肥处理土壤有机碳累积矿化量与土壤 pH、有机碳和全氮含量显著相关,25 °C 和 35 °C 培养时与土壤有机碳形态显著相关。

参考文献:

- [1] 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
- [2] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic C storage[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, 27(6): 753-760
- [3] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(2): 155-165
- [4] 郭剑芬,陈玲,林雪婷,等. 温度对武夷山不同海拔土壤有机碳矿化的影响[J]. 亚热带资源与环境学报, 2012, 7(3): 1-7

- [5] Giardina C P, Ryan M G. Evidence that decomposition rates of organic carbon in mineral soil do not vary with temperature[J]. *Nature*, 2000, 404: 858–860
- [6] 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[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1278–1285
- [7] 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
- [8] 李庆逵. 中国水稻土[M]. 北京: 科学出版社, 1992
- [9] 龚子同. 中国土壤系统分类: 理论方法实践[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [10] 任秀娥, 童成立, 孙中林, 等. 温度对不同粘粒含量稻田土壤有机碳矿化的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(10): 2245–2250
- [11] 葛序娟, 潘剑君, 邬建红, 等. 培养温度对水稻土有机碳矿化参数的影响研究[J]. *土壤通报*, 2015, 46(3): 562–569
- [12] 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[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(5): 1340–1348
- [13] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703–707
- [14] Blair G J, Lefroy R D B, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. *Australian Journal of Agricultural Research*, 1995, 46(7): 1459–1466
- [15] 窦森, 于水强, 张晋京. 不同 CO₂ 浓度对玉米秸秆分解期间土壤腐殖质形成的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 4(3): 458–466
- [16] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(8): 1712–1721
- [17] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413: 622–625
- [18] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of organic-matter decomposition—still a topic of debate[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2510–2518
- [19] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming[J]. *Oecologia*, 2001, 126(4): 543–562
- [20] 韩玮, 孙晨曦, 苏敬. 模拟增温和酸雨对水稻土酶活性及温度敏感性的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(12): 1117–1124
- [21] 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[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(1): 8–16
- [22] Sierra C A. Temperature sensitivity of organic matter decomposition in the Arrhenius equation: Some theoretical considerations[J]. *Biogeochemistry*, 2012, 8(1/3): 1–15
- [23] Conant R T, Ryan M G, Ågren G I, et al. Temperature and soil organic matter decomposition rates—synthesis of current knowledge and a way forward[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3392–3404
- [24] 邬建红, 潘剑君, 葛序娟, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳矿化及其温度敏感性[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(3): 130–135
- [25] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(11): 1537–1542
- [26] Wetterstedt J Å M, Persson T, Ågren G I. Temperature sensitivity and substrate quality in soil organic matter decomposition: Results of an incubation study with three substrates[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16(6): 1806–1819
- [27] 李杰, 石元亮, 陈智文. 我国南方红壤磷素研究概况[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 763–768
- [28] 杨芳, 何园球, 李成亮, 等. 不同施肥条件下旱地红壤磷素固定及影响因素的研究[J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 267–272
- [29] Zhong W H, Gu T, Wang W, et al. The effects of mineral fertilizer and organic manure on soil microbial community and diversity[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(1/2): 511–522
- [30] 陈晓芬, 李忠佩, 刘明, 等. 长期施肥处理对红壤水稻土微生物群落结构和功能多样性的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(7): 1815–1822
- [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[J]. *土壤*, 2009, 41(5): 719–725
- [32] 张鹏, 李涵, 贾志宽, 等. 秸秆还田对宁南旱区土壤有机碳含量及土壤碳矿化的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(12): 2518–2525
- [33] 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[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(7): 1494–1500
- [34] 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[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(9): 1705–1714

Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon at Different Temperatures in Red Paddy Soil Under Long-term Fertilizations

CHEN Xiaofen¹, WU Meng¹, JIANG Chunyu¹, LIU Ming^{1,2}, LI Zhongpei^{1,2*}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Red paddy soils under different fertilization treatments were incubated at 15 °C, 25 °C and 35 °C, and then the effects of temperature and long-term fertilization on soil organic carbon (SOC) mineralization, and the relationships between SOC mineralization and soil physiochemical properties as well as SOC fractions were studied. The results indicated that the mineralization rate of SOC decreased rapidly during the early stage of incubation (0–7 d), then decreased gradually and reached a stable state finally. The mineralization rate, cumulative mineralization, and mineralization ratio of SOC all increased with temperature. The applications of phosphate fertilizer and organic manure both increased cumulative mineralization of SOC. The temperature sensitivity of SOC mineralization (Q_{10}) was 1.31–1.75 under different fertilization treatments. Fertilizations increased Q_{10} values compared with the no fertilization treatment. Q_{10} values were positively correlated with SOC, total and available nitrogen and phosphate, microbial biomass carbon, easily oxidized organic carbon, and humic acid carbon. The cumulative amounts of SOC mineralization was negatively correlated with soil pH, but positively correlated with SOC and total nitrogen at the three temperatures. At 25 °C and 35 °C, the cumulative amounts of SOC mineralization had positive correlations with soil microbial biomass carbon, humic acid carbon and fulvic acid carbon.

Key words: Temperature; Long-term fertilization; Red paddy soil; Soil organic carbon (SOC) mineralization