

陕北中部黄土区不同种植年限水稻田 有机碳矿化对温度的响应

赵满兴^{1,2}, 张霞¹, 杨帆¹, 马卓¹, 马文全¹

(1.延安大学生命科学学院,陕西延安716000;2.陕西省红枣重点实验室,陕西延安716000)

摘要:为了探讨陕北中部黄土区不同种植年限水稻田有机碳矿化对温度的响应,以陕北南泥湾水稻种植基地不同种植年限(3、30、78 a)的稻田土壤为研究对象,基于室内35 d培养试验与矿化动态模型研究方法,解析温度对土壤有机碳矿化的影响。结果表明:土壤有机碳累积矿化量和矿化速率均表现为78 a水稻田>30 a水稻田>3 a水稻田>玉米田。土壤累积矿化量、矿化速率、潜在可矿化有机碳含量(C_0)和潜在可矿化有机碳占总有机碳的比值(C_0/SOC)均表现为30℃处理>20℃处理>10℃处理。水稻田矿化累积量均表现为10℃处理(2 015.14 mg·kg⁻¹)显著低于20℃(2 799.20 mg·kg⁻¹)和30℃处理(3 078.47 mg·kg⁻¹)($P<0.05$),但20℃与30℃处理之间无显著差异。玉米田累积矿化量在不同培养温度间没有达到显著差异水平。0~20 cm土层累积矿化量是20~40 cm土层的1.18倍。供试土壤在温度从10℃升高到20℃时的温度系数(Q_{10})值(1.38)均高于从20℃升高到30℃时的 Q_{10} 值(1.14),土层间的 Q_{10} 值大小关系为0~20 cm>20~40 cm。潜在可矿化有机碳含量 C_0 与总有机碳、易氧化有机碳及溶解性有机碳含量之间均呈正相关关系, C_0 与微生物生物量碳含量间呈正相关关系但未能达到显著水平。 C_0/SOC 随水稻种植年限的增加而降低,说明土壤有机碳的固存能力随水稻种植年限的增加而增强。

关键词:水稻田;种植年限;有机碳矿化;温度;陕北中部

中图分类号:S151.9;S154.4 **文献标志码:**A

Response of organic carbon mineralization of paddy soil with different planting years to temperature in loess area of central of Northern Shaanxi Province

ZHAO Manxing^{1,2}, ZHANG Xia¹, YANG Fan¹, MA Zhuo¹, MA Wenquan¹

(1. College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Chinese Jujube, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: To explore the response of organic carbon mineralization in paddy soil with different planting years to temperature, the rice field soil samples with different planting years (3, 30, 78 a) were collected at the Nanniwang Rice Planting Base in the typical loess hilly and gully regions of Northern Shaanxi Province. The characteristics and differences of organic carbon mineralization were measured through indoor 35-day cultivation experiments and mineralization dynamic models between paddy and dry land soils. Temperature changes had a significant impact on organic carbon mineralization. The main results were as follows: the cumulative mineralization amount and mineralization rate of soil organic carbon under different tillage years were shown as 78 a paddy soil>30 a paddy soil>3 a paddy soil>maize soil. The cumulative mineralization amount, mineralization rate, potential mineralizable organic carbon content (C_0) and the ratio of potential mineralizable organic carbon to SOC (C_0/SOC) were shown as 30℃>20℃>10℃. The accumulation of organic carbon mineralization in paddy soil showed a significant decrease at 10℃ (2 015.14 mg·kg⁻¹) compared to 20℃ (2 799.20 mg·kg⁻¹) and 30℃ (3 078.47 mg·kg⁻¹) ($P<0.05$), but there was no significant difference between 20℃ and 30℃. The accumulated mineralization amount of organic carbon in the 0~20 cm soil layer was 1.18 times that in the 20~40 cm soil layer. The temperature coefficient (Q_{10}) was higher under temperature increased from 10℃ to 20℃ (Q_{10} value was 1.38) when relative to the temperature

increased from 20°C to 30°C (Q_{10} value was 1.14), and the order of Q_{10} values under different layers as follows: 0~20 cm>20~40 cm. The potential mineralizable organic carbon content C_0 had a significant positive correlation with TOC, easily oxidized organic carbon and dissolved organic carbon. The relationship between C_0 and microbial biomass carbon indicated a positive correlation, but not reached a significant level. C_0/SOC decreased with the improve of rice planting years, indicating that the soil organic carbon sequestration capacity be enhanced with the rice planting years.

Keywords: paddy soil; planting years; organic carbon mineralization; temperature changes; central of Northren Shaanxi Province

农田生态系统是陆地生态系统碳循环研究的重要环节,而水稻田则是农田生态系统的重要组成部分之一^[1]。与旱地土壤相比,水稻田具备较强的固碳潜力,有机碳输入量、稳定性和固碳效率均较旱地土壤高^[2]。水稻田有机碳含量在空间上分布极不均匀,受成土母质因素影响较大^[3]。在全球变暖的大背景下,土壤有机碳矿化及其温度敏感性已经成为研究土壤有机碳分解与转化的主要内容和关键环节。温度是影响土壤有机碳矿化的最主要环境因子之一,自然状态下,外界温度的变化对土壤碳矿化的影响显著,因此,研究温度对土壤有机碳矿化的影响具有重要意义。

许多研究表明^[4-5]土壤有机碳矿化速率和累积矿化量均表现为随温度升高而上升,在后期逐渐呈现平稳的趋势。樊晶晶^[6]研究紫色丘陵区农田土壤有机碳矿化指出,在相同水分状态下,各培养温度的土壤有机碳累积矿化量和矿化强度的高低顺序为 25°C>20°C>15°C,25°C 培养对紫色丘陵区典型农田土壤有机碳矿化的激发效应更大。一定范围内提高温度会增加土壤微生物的活性,促进土壤有机碳的矿化^[7]。杨继松等^[8]研究湿地土壤有机碳矿化指出,一级动力学方程能较好地描述湿地土壤有机碳矿化动态,土壤潜在有机碳矿化量(C_0)和土壤易分解有机碳占总有机碳的比例(C_0/SOC)均随温度的升高而升高。温度升高促使底物扩散范围更广,矿化分解作用更强烈^[9-11]。土壤有机碳矿化的温度敏感性同样会随着温度的变化而改变,温度敏感性通常用 Q_{10} (温度系数)表示,关于土壤 Q_{10} 在剖面上呈现的垂直变异性,不同学者的研究结论不一致^[12-13],可能由于土壤性质的差异造成土壤温度敏感性的不同,具体机理需要进一步研究。

延安位于陕西北部,是典型的黄土丘陵沟壑区,年均降水量 500 mm 左右,土壤质地以粉砂壤质为主,土壤 pH 值为 8.50 左右,昼夜温差 10°C 左右。该市现有水稻种植面积约 1 333 hm²,土壤类型为黄绵土发育的黄绵土性水稻田。水稻田与旱地土壤

有机碳矿化受温度的影响有何差异尚不清楚。随着陕北中部黄土丘陵沟壑区水稻种植面积的逐步扩大,水稻田固碳效应将进一步显现,开展当地水稻田有机碳的矿化研究就显得尤为必要。目前,陕北中部黄土丘陵沟壑区水稻田有机碳矿化特性随着种植年限的变化特征鲜见报道。因此,开展该区域稻田土壤有机碳矿化对种植年限的响应特征研究,对于揭示陕北中部黄土丘陵沟壑区稻田土壤在不同时间尺度上的有机碳矿化特征及稳定性机制具有重要的科学价值,研究成果将进一步厘清陕北中部黄绵土水稻田与旱地土壤有机碳矿化特性的差异,同时在丰富和完善水稻田有机碳积累理论方面具有一定的价值。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于陕西省延安市宝塔区南泥湾农场,南泥湾处于黄土高原的腹地,是黄河中游水土流失最严重的地区之一。地貌类型属黄土梁峁状丘陵,高原大陆性中温带-暖温带季风气候,年平均气温 10.3°C,年平均降水量 500 mm 左右,降雨主要集中在 7—9 月,无霜期 140 d。海拔高度 800~1 800 m。植被属暖温带阔叶林带,绝大多数为天然次生林,林草覆盖率 87%。土壤类型主要是黄绵土,土壤颗粒以粉粒为主,垂直节理发育,土体疏松绵软,壤中流丰富。

南泥湾农场位于延安城东南 45 km 处,所辖的南泥湾镇九龙泉村的约 67 hm² 水稻种植基地位于南泥湾东北部。本研究中水稻品种经历了几次变化,近几年主栽水稻品种为‘龙粳 31’,栽培密度为 2.08×10⁵ 株·hm⁻²,于每年 5 月份移栽,11 月份收割。水稻生长期采用前期淹水、中期烤田和后期干湿交替的水分管理模式,冬季翻耕炕田。常年土壤平均施肥情况为:有机肥为牛廐肥,施用量为 30 t·hm⁻²。其中 N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 14.3、19.3 g·kg⁻¹和 12.5 g·kg⁻¹。化肥为尿素(含 N 46%)、

过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)和氯化钾(含 K_2O 60%),施用量分别为 600、300、450 $kg \cdot hm^{-2}$ 。化学氮肥按返青肥 40%,分蘖肥 60%的比例分 2 次追施。旱作玉米施肥情况为:有机肥为牛廐肥,施用量为 15 $t \cdot hm^{-2}$ 。其中 N、 P_2O_5 、 K_2O 含量分别为 14.3、19.3 $g \cdot kg^{-1}$ 和 12.5 $g \cdot kg^{-1}$ 。化肥为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 12%)和氯化钾(含 K_2O 60%),施用量分别为 300、150、225 $kg \cdot hm^{-2}$ 。

1.2 土壤样品采集

2021 年 5 月,在陕西省延安市宝塔区南泥湾镇水稻种植基地选取具代表性的不同水稻种植年限稻田土壤,包括种植 3、30、78 a 的水稻田,并以旱地玉米田作为对照,每块样地布置 5 个土壤剖面采样点。玉米田和稻田处于同一个川道,气候条件基本一致,对照地的样地布设数量和土样采集方法与稻田相同。在每个样地内用内径 2 cm 的土钻采集 0~20 cm 和 20~40 cm 土壤样品,并将采集的土样装入自封袋。每块样地随机取 5 个点,充分混合后装好放入冰盒立即带回实验室,剔除可见的植物残根和石砾等杂物,将土样平铺在干净的纸上,于室内阴凉通风处风干,风干后分别过 2 mm 筛和 0.25 mm 筛,用于土壤理化性状的测定。

1.3 测定方法

土壤基本理化指标参照《土壤农化分析》^[14],硝态氮和铵态氮分别采用 KCl 浸提后的分光光度法和靛酚蓝比色法测定;碱解氮采用碱解扩散法测定;有效磷含量采用钼锑抗比色法;速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定;pH 值采用 pH-100 型酸度计(上海力辰邦西仪器科技有限公司) pH 计测定;电导率采用 DDB-303A 型电导率仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定。有机碳含量(SOC)采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;土壤微生物生物量碳含量(MBC)采用三氯甲烷熏蒸-硫酸钾测定法;溶解性有机碳含量(DOC)采用 0.5 $mol \cdot L^{-1}$ 硫酸钾浸提法测定^[15];易氧化有机碳含量(ROC)采用 333 $mmol \cdot L^{-1}$ 高锰酸钾氧化法测定^[15];矿物结合态有机碳含量(MOC)和颗粒有机碳含量(POC)采用 5 $g \cdot L^{-1}$ 六偏磷酸钠分散法测定^[16]。

1.4 土壤有机碳矿化培养

将采集的不同水稻种植年限稻田和作为对照的玉米田 0~20 cm 和 20~40 cm 新鲜土壤样品过 2 mm 筛,称取过筛后的风干土壤样品 20.0 g 置于 25 mL 烧杯中,用去离子水调节至田间持水量的 60% 左右,置于 250 mL 广口瓶底部,在 25℃ 培养箱中预培养 7 d。然后将盛有 20 mL 0.5 $mol \cdot L^{-1}$ KOH 溶

液的 25 mL 吸收杯放置于培养瓶底部,加盖密封,分别在 10℃、20℃、30℃ 恒温箱中暗培养。同时每种温度下设置 3 个仅装有 KOH 溶液的培养瓶作为空白,各温度下每一种土样均设置 3 个重复。分别在培养的第 1、3、7、14、21、28、35 天更换碱液吸收杯,并向土壤样品中补充水分至恒重。吸收杯中加入 1 $mol \cdot L^{-1}$ BaCl₂ 溶液 2.5 mL,再滴加 2 滴酚酞指示剂,用 0.5 $mol \cdot L^{-1}$ HCl 滴定至红色消失。计算得到碱液吸收的 CO₂ 量,根据 CO₂ 的释放量计算培养期内土壤有机碳的矿化量。

1.5 结果计算

土壤温度系数 Q_{10} 表达式如下^[17]:

$$Q_{10} = V_1 / V_2 \quad (1)$$

式中, Q_{10} 表示土壤温度系数; V_1 、 V_2 分别表示温度高和温度低时的平均矿化速率, $mg \cdot kg^{-1} \cdot d^{-1}$ 。

采用一级动力学方程对土壤有机碳矿化过程进行模拟,其表达式如下:

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

式中, C_t 表示 t 时刻土壤有机碳累积矿化量($mg \cdot kg^{-1}$); C_0 为土壤潜在有机碳矿化量($mg \cdot kg^{-1}$); k 表示有机碳矿化常数(d^{-1}); t 表示时间(d)。

土壤有机碳矿化半周转期($T_{1/2}$, d)的表达式如下:

$$T_{1/2} = \ln 2 / k \quad (3)$$

C_0 、 k 用来表征土壤有机碳矿化作用, C_0 值越大, k 值越小,则土壤有机碳的矿化作用越强,反之则土壤有机碳矿化作用越弱。 C_0 /SOC 值能够反映土壤有机碳的固存能力,该值越高,土壤有机碳的矿化能力越强,有机碳的固存量越少。

有机碳矿化率为 35 d 土壤有机碳释放的 CO₂-C 量占土壤总有机碳的比例。

1.6 数据处理

利用 SPSS 26.0 软件对数据进行相关性分析、差异显著性检验、多重比较等。作图采用 Origin 2022 软件。不同供试土样和不同培养条件间矿化特征的差异性均采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)进行分析,采用最小显著差异(LSD)法进行多重比较($P < 0.05$)。采用非线性回归分析对各培养时期土壤有机碳矿化积累量的变化进行一级动力学方程拟合来反映土壤有机碳矿化作用的强弱,得出有机碳矿化常数 k 和土壤潜在可矿化有机碳 C_0 ^[18]。采用 Pearson 法对有机碳矿化常数、土壤潜在可矿化有机碳 C_0 和土壤理化性质、土壤碳组分进行相关性分析来研究有机碳矿化特征与土壤性

质之间的关系。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳累积矿化量

如图 1 所示,在不同培养温度下,水稻田累积矿化量均随种植年限的延长而增加,但不同种植年限水稻田有机碳累积矿化量无显著差异。培养 35 d 时,累积矿化量之间关系为 78 a 水稻田>30 a 水稻田>3 a 水稻田>玉米田。土壤累积矿化量均表现为 30℃>20℃>10℃,30℃ 平均累积矿化量比 20℃ 增加 10.25% ($P>0.05$),比 10℃ 显著增加 51.05% ($P<0.05$)。玉米田在不同培养温度下的土壤有机碳累积矿化量无显著差异 ($P>0.05$)。不同土层间比较,各供试土样 0~20 cm 土层累积矿化量均高于 20~40 cm 土层。

如图 1 中的(a)和(b)所示,在 10℃ 时,0~20 cm 土层,培养 35 d 时,78 a 水稻田比 30 a 水稻田增加 10.31%,比 3 a 水稻田增加 14.76%,比玉米田增加 24.95%。20~40 cm 土层,培养 35 d 时,78 a 水稻田比 30 a 水稻田增加 12.38%,比 3 a 水稻田增加 22.92%,比玉米田增加 34.85%。玉米田不同土层间差异显著 ($P<0.05$),各种植年限水稻田有机碳累积

矿化量在土层间无显著差异 ($P>0.05$)。

如图 1 中的(c)和(d)所示,在 20℃ 时,0~20 cm,培养 35 d 时,78 a 水稻田累积矿化量分别比 30 a 水稻田、3 a 水稻田和玉米田增加了 10.35%、15.68% 和 26.67%。20~40 cm,78 a 水稻田累积矿化量比 30 a 水稻田增加 11.71%,比 3 a 水稻田增加 22.63%,比玉米田增加 53.32%。78 a 水稻田有机碳累积矿化量与玉米田有显著差异 ($P<0.05$),玉米田累积矿化量与 3 a 水稻田和 30 a 水稻田之间无显著差异。玉米田和 3 a 水稻田有机碳累积矿化量在土层间达到显著差异 ($P<0.05$)。

如图 1 中的(e)和(f)所示,在 30℃ 时,0~20 cm 土层,78 a 水稻田比 30 a 水稻田累积矿化量增加 11.50%,比 3 a 水稻田增加 17.39%,比玉米田增加 29.49%。3 a 水稻田、30 a 水稻田土壤累积矿化量与 78 a 水稻田有显著差异 ($P<0.05$),但 3 a 水稻田与 30 a 水稻田之间无显著差异。20~40 cm 土层,78 a 水稻田比 30 a 水稻田累积矿化量增加 8.32%,比 3 a 水稻田增加 17.74%,比玉米田增加 43.86%。30 a 水稻田和 78 a 水稻田土壤累积矿化量均与玉米田有显著差异 ($P<0.05$),30 a 水稻田累积矿化量在土层间无显著差异 ($P>0.05$)。

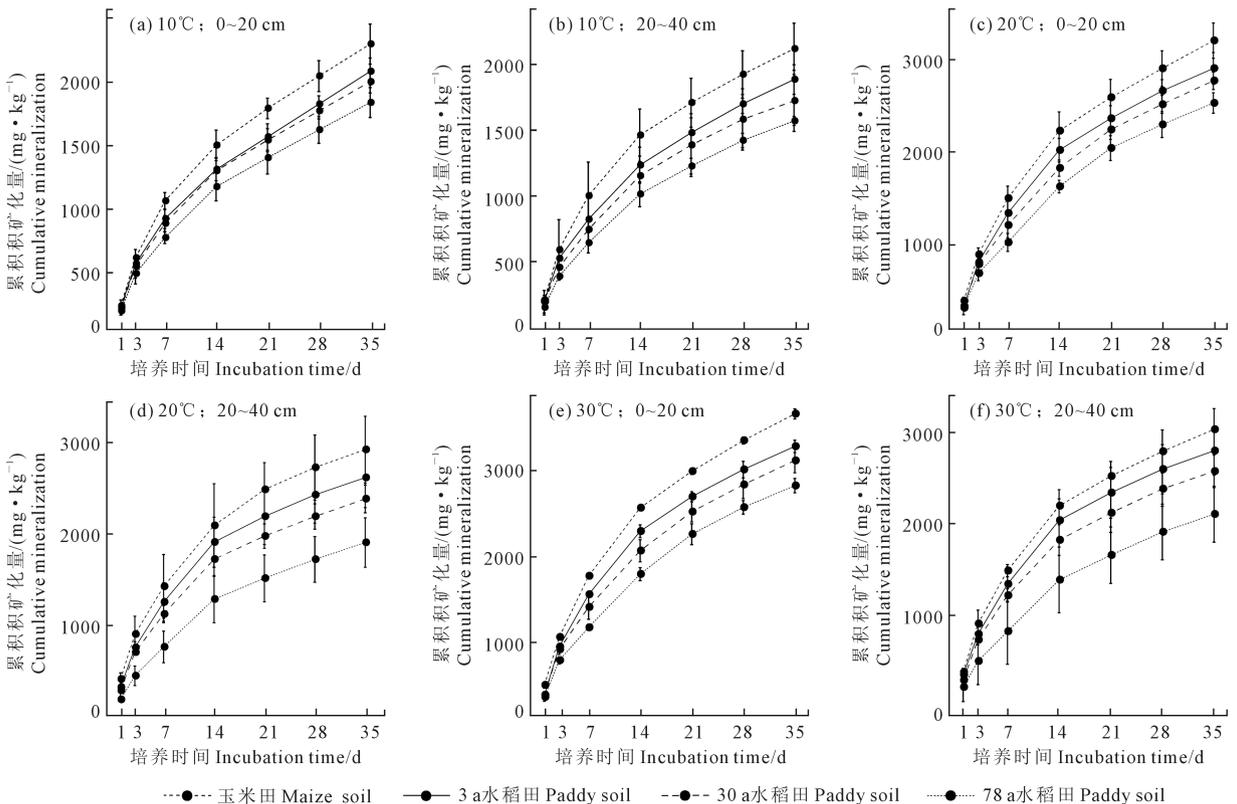


图 1 有机碳累积矿化量

Fig.1 Accumulative mineralization of organic carbon

2.2 土壤有机碳矿化速率

如图2所示,对于0~20 cm和20~40 cm土层而言,矿化速率均随着水稻种植年限的延长而升高,78 a水稻田>30 a水稻田>3 a水稻田>玉米田,玉米田矿化速率显著低于78 a水稻田($P<0.05$),但水稻田之间无显著差异。不同种植年限水稻田有机碳矿化速率均随着温度的升高而增加,说明温度升高有利于土壤有机碳的矿化。0~20 cm土层,10℃的矿化速率比20℃和30℃分别降低了28.19%和36.67%。20~40 cm,10℃的矿化速率比20℃和30℃分别降低了27.81%和31.99%。但随着培养时间的延长,不同温度土壤有机碳矿化速率间的差异逐渐降低。玉米田在不同培养温度之间的土壤有机碳矿化速率无显著差异。3 a水稻田和78 a水稻田有机碳矿化速率均表现为10℃显著低于20℃和30℃($P<0.05$),但20℃与30℃之间无显著差异。30 a水稻田在10℃与30℃之间存在显著性差异(P

<0.05),但二者均与20℃无显著差异($P>0.05$)。总体来看,各供试土样0~20 cm土层矿化速率显著高于20~40 cm土层($P<0.05$)。

如图2中的(a)和(b)所示,在10℃时,0~20 cm土层,第7、21天和35天的平均矿化速率分别为第1天的39.26%、16.06%和15.10%。20~40 cm土层,第7、21天和35天的平均矿化速率分别为第1天的41.32%、17.72%和12.66%。在20℃时(图2c、d),0~20 cm土层,第7、21天和35天的平均矿化速率分别为第1天的34.61%、16.01%和10.79%。20~40 cm土层,第7、21天和35天的平均矿化速率分别为第1天的39.03%、14.68%和9.69%。如图2中的(e)和(f)所示,在30℃时,0~20 cm土层,第7、21天和35天的平均矿化速率分别为第1天的34.88%、14.91%和9.52%。20~40 cm土层,第7、21天和35天的平均矿化速率分别为第1天的38.56%、13.55%和9.44%。

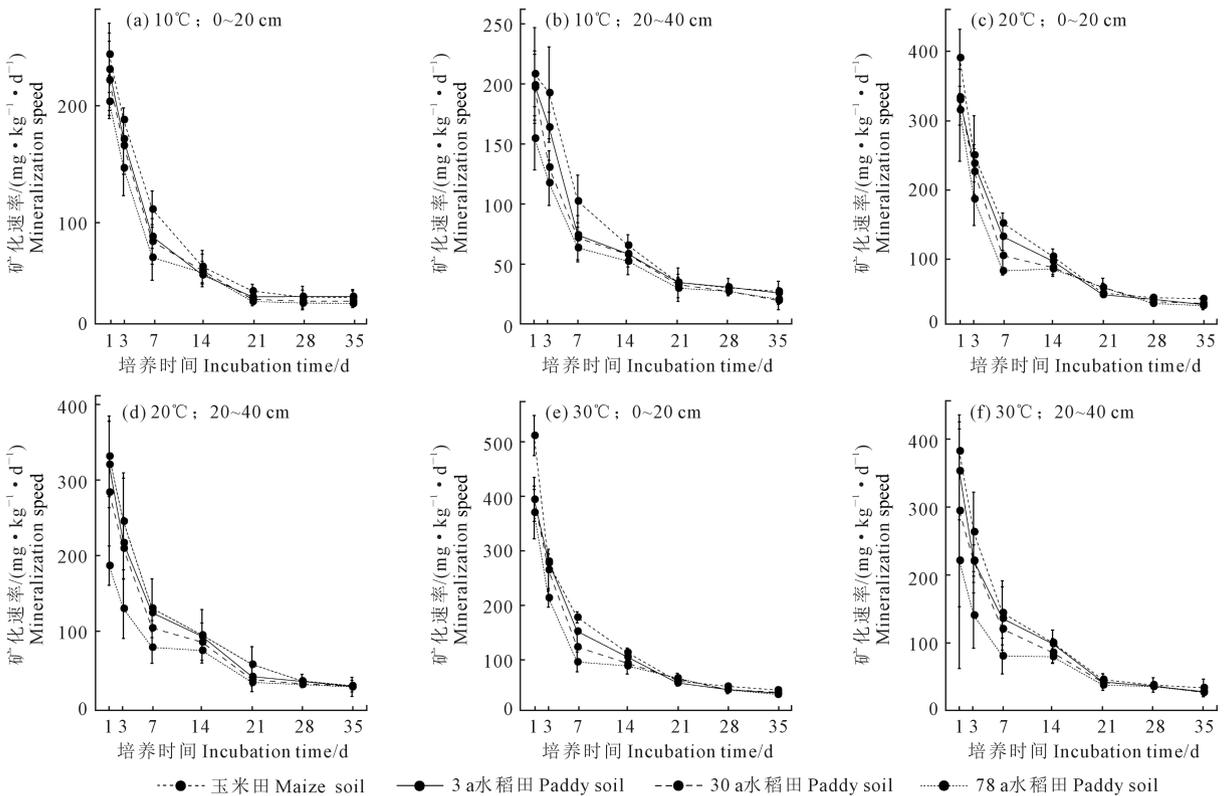


图2 有机碳矿化速率

Fig.2 Organic carbon mineralization rate

2.3 土壤有机碳矿化率

如图3所示,在不同培养温度下,0~20 cm土层的不同土壤之间矿化率无显著差异($P>0.05$)。20~40 cm土层,不同土壤之间矿化率关系为玉米田>

3 a水稻田>30 a水稻田>78 a水稻田,供试土样间无显著差异($P>0.05$)。随着温度升高,矿化率有增大的趋势。30℃矿化率为10.41%~13.06%,20℃矿化率为9.91%~11.81%,10℃矿化率为7.11%~9.72%。

如图 3a 所示,在 10℃ 时,0~20 cm 土层,不同土壤之间矿化率关系为 3 a 水稻田>玉米田>30 a 水稻田>78 a 水稻田。20~40 cm 土层,水稻田矿化率显著低于玉米田($P<0.05$)。土层间矿化率表现为 0~20 cm 土层<20~40 cm 土层,但只有玉米田土层间有显著差异($P<0.05$),水稻田土层间无显著差异($P>0.05$)。

如图 3b 所示,在 20℃ 时,0~20 cm 土层,不同土壤之间矿化率关系为 30 a 水稻田>3 a 水稻田>78 a 水稻田>玉米田。土层间矿化率表现为 0~20 cm 土层<20~40 cm 土层。

如图 3c 所示,在 30℃ 时,0~20 cm 土层,不同土壤之间矿化率关系为 78 a 水稻田>30 a 水稻田>3 a 水稻田>玉米田。土层间 30 a 水稻田矿化率表现为 0~20 cm 土层>20~40 cm 土层,其他供试土样表现为 0~20 cm 土层<20~40 cm 土层。

2.4 土壤有机碳矿化的温度敏感性(Q_{10})

土壤温度系数 Q_{10} 值常用于表征土壤矿化对温度变化的敏感性。 Q_{10} 值越大,土壤矿化对温度的变化就越敏感^[17]。通过不同土壤有机碳平均矿化速率计算 Q_{10} 值,可见 Q_{10} 值随水稻种植年限的变化无显著差异。如图 4 所示,不同类型土壤在温度从 10℃ 升高到 20℃ 时的 Q_{10} 值均高于从 20℃ 升高到 30℃ 时的 Q_{10} 值,说明低温对土壤有机碳矿化速率的影响较大,而高温有可能抑制土壤中微生物的活性,导致土壤有机碳矿化速率的温度敏感性降低。对于 0~20 cm 土层而言,从 10℃ 上升至 20℃ 时的 Q_{10} 值以及从 20℃ 上升至 30℃ 时的 Q_{10} 值,均表现为 78 a 水稻田最高,玉米田最低。对于 20~40 cm 土层而言,从 10℃ 上升至 20℃ 时的 Q_{10} 值,30 a 水稻田最高,玉米田最低。从 20℃ 上升至 30℃ 时的 Q_{10} 值,玉米田最高,78 a 水稻田最低。不同土层比较来看, Q_{10} 值关系为 0~20 cm>20~40 cm。

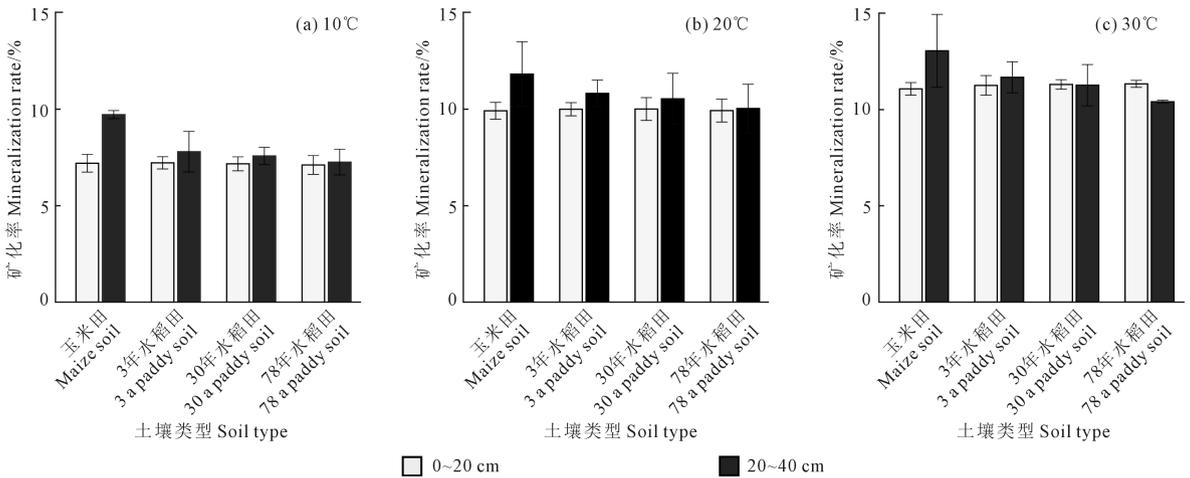


图 3 有机碳矿化率
Fig.3 Ratio of organic carbon mineralization

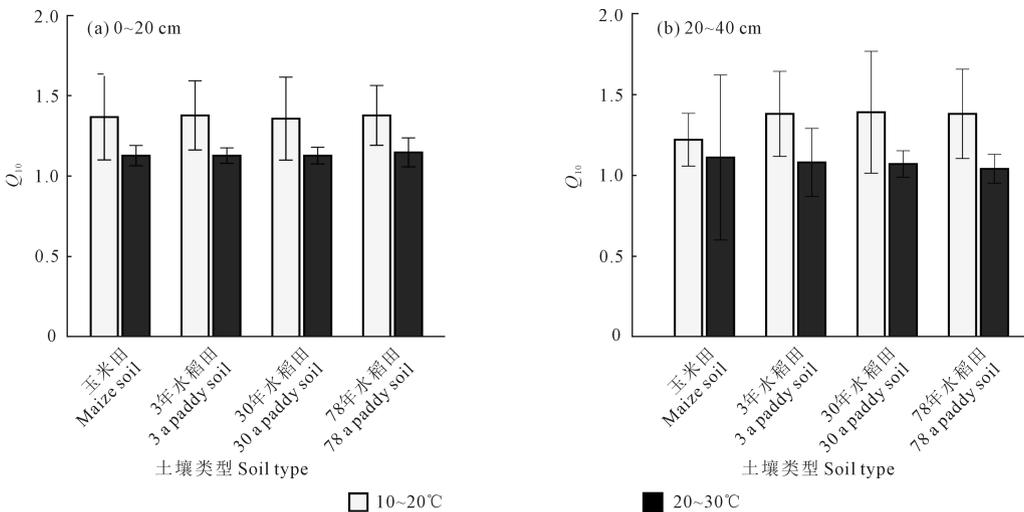


图 4 土壤温度系数
Fig.4 Temperature coefficient of soil

2.5 土壤有机碳矿化参数

如表1~3所示,根据第35天不同温度处理下各个培养阶段测定的CO₂-C释放量,对不同水稻种植年限土壤0~20 cm和20~40 cm土层有机碳累积矿化量分别进行一级动力学方程拟合,拟合效果均较好($R^2 > 0.99$),得到土壤潜在可矿化有机碳C₀、有机碳库的矿化常数k。

10℃、20℃和30℃条件下,随着水稻种植年限的增加,潜在可矿化有机碳C₀逐渐增大,78 a水稻田>30 a水稻田>3 a水稻田>玉米田。半周转期

($T_{1/2}$)有随水稻种植年限的增加而减小的趋势,矿化常数k有随水稻种植年限的增加而升高的趋势,未达到显著差异水平。

对于0~20 cm和20~40 cm土层而言,不同种植年限水稻田间的C₀差异不显著($P > 0.05$),玉米田与水稻田之间的差异也不显著($P > 0.05$)。供试土壤0~20 cm的C₀均大于20~40 cm,但均无显著差异($P > 0.05$)。各供试土样C₀均有随着温度的升高而增加的趋势,说明温度升高会促进土壤有机碳的矿化。

表1 10℃土壤有机碳矿化模型拟合

Table 1 Fitting of soil organic carbon mineralization model at 10℃

土层/cm Soil layer	土壤类型 Soil type	C ₀ /(mg·kg ⁻¹)	K/(d ⁻¹)	半周转期/d T _{1/2}	C ₀ /SOC /%
0~20	玉米田 Maize soil	1900.99±136.44Aa	0.073±0.006Aa	9.53Aa	7.45±0.19Aa
	3 a 水稻田 Paddy soil	2030.25±118.69Aa	0.078±0.014Aa	8.85Aa	7.32±0.12Aa
	30 a 水稻田 Paddy soil	2113.93±200.29Aa	0.076±0.021Aa	9.16Aa	7.28±0.15Aa
	78 a 水稻田 Paddy soil	2318.46±208.54Aa	0.081±0.011Aa	8.56Aa	7.18±0.23Aa
20~40	玉米田 Maize soil	1679.16±83.13Aa	0.068±0.010Aa	10.19Aa	10.41±0.66Aa
	3 a 水稻田 Paddy soil	1795.70±340.20Aa	0.077±0.016Aa	9.00Aa	8.15±0.71Ab
	30 a 水稻田 Paddy soil	1938.58±69.06Aa	0.077±0.022Aa	9.00Aa	7.81±0.52Ab
	78 a 水稻田 Paddy soil	2128.91±60.70Aa	0.087±0.029Aa	7.97Aa	7.31±0.63Ab

注:表中数据为平均值±标准差,不同的大写字母表示不同土层相同种植年限间差异显著($P < 0.05$),小写字母表示相同土层不同种植年限之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Note: The data in the table is the mean± standard deviation. Different uppercase letters indicate significant differences between different soil layers of same rice planting year ($P < 0.05$), while lowercase letters indicate significant differences between different rice planting years of same soil layer ($P < 0.05$). The same below.

表2 20℃土壤有机碳矿化模型拟合

Table 2 Fitting of soil organic carbon mineralization model at 20℃

土层/cm Soil layer	土壤类型 Soil type	C ₀ /(mg·kg ⁻¹)	K/(d ⁻¹)	半周转期/d T _{1/2}	C ₀ /SOC /%
0~20	玉米田 Maize soil	2689.57±91.02Ab	0.071±0.005Aa	9.78Aa	10.54±0.08Aa
	3 a 水稻田 Paddy soil	2857.01±116.17Ab	0.079±0.007Aa	8.80Aa	10.31±0.12Aa
	30 a 水稻田 Paddy soil	2949.57±143.03Aab	0.086±0.007Aa	8.07Aa	10.16±0.19Aa
	78 a 水稻田 Paddy soil	3216.55±178.34Aa	0.088±0.006Aa	7.86Aa	9.96±0.04Aa
20~40	玉米田 Maize soil	2037.35±191.29Bb	0.069±0.017Aa	10.05Aa	12.63±0.23Aa
	3 a 水稻田 Paddy soil	2387.81±130.88Bab	0.093±0.007Aa	7.45Ab	10.84±0.15Aa
	30 a 水稻田 Paddy soil	2629.76±401.54Aab	0.095±0.033Aa	7.30Ab	10.59±0.11Aa
	78 a 水稻田 Paddy soil	2924.57±249.92Aa	0.098±0.022Aa	7.07Ab	10.05±0.21Aa

表3 30℃土壤有机碳矿化模型拟合

Table 3 Fitting of soil organic carbon mineralization model at 30℃

土层/cm Soil layer	土壤类型 Soil type	C ₀ /(mg·kg ⁻¹)	K/(d ⁻¹)	半周转期/d T _{1/2}	C ₀ /SOC /%
0~20	玉米田 Maize soil	2976.59±143.85Ac	0.073±0.003Ac	9.52Aa	11.66±0.23Aa
	3 a 水稻田 Paddy soil	3165.46±112.32Abc	0.084±0.005Abc	8.26Aa	11.42±0.16Aa
	30 a 水稻田 Paddy soil	3299.54±84.62Ab	0.091±0.000Aab	7.62Aa	11.36±0.35Aa
	78 a 水稻田 Paddy soil	3641.71±77.53Aa	0.094±0.003Aa	7.36Aa	11.27±0.14Aa
20~40	玉米田 Maize soil	2278.25±100.54Ba	0.067±0.038Aa	10.35Aa	14.12±0.22Aa
	3 a 水稻田 Paddy soil	2599.48±219.66Ba	0.090±0.010Aa	7.70Ab	11.80±0.26Aa
	30 a 水稻田 Paddy soil	2815.55±289.95Aa	0.094±0.010Aa	7.37Ab	11.34±0.13Aa
	78 a 水稻田 Paddy soil	3007.82±255.87Ba	0.098±0.006Aa	7.07Ab	10.33±0.11Aa

C_0/SOC 值能够反映土壤有机碳的固存能力,该值越高,土壤有机碳的矿化能力越强,有机碳的固存量越少。不同温度培养下,0~20 cm 和 20~40 cm 土层的 C_0/SOC 值均随水稻种植年限的增加而降低,玉米田的平均 C_0/SOC 值(11.13%)高于水稻田(9.84%),说明旱地土壤的有机碳固存能力较差,随着水稻种植年限的增加,土壤固存碳的能力也会逐渐增强。不同种植年限的水稻田在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层 C_0/SOC 均呈现为 $30^\circ\text{C} > 20^\circ\text{C} > 10^\circ\text{C}$ 的趋势,说明温度升高会降低土壤的有机碳固存能力。

2.6 土壤有机碳矿化参数与理化性质的相关性

不同温度条件下供试土壤的 C_0 和 k 值与土壤理化性质、有机碳组分的相关性分析如表 4 和表 5 所示。各温度条件下,土壤 C_0 和 SOC 关系最为密切,表明在影响土壤有机碳矿化强度的众多因子中,总有机碳的含量更重要。土壤 C_0 与土壤有机碳组分和氮素组分关系较为密切。土壤 C_0 和 k 值与土壤 pH 值、有效磷、有效钾、 MOC 、 POC 、 MBC 含量均未达到显著差异水平。整体来看,10℃ 的土壤 C_0 和 k 值与土壤性状的相关性较高,30℃ 的相关性较低。0~20 cm 土壤 C_0 和 k 值与土壤性状的相关性较低,20~40 cm 土壤的相关性较高。

在 10℃ 条件下,0~20 cm 土层,土壤 C_0 与 SOC 、碱解氮之间呈极显著正相关($P < 0.01$);与铵态氮之间呈显著正相关($P < 0.05$)。 k 值与铵态氮之间呈显著正相关($P < 0.05$)。20~40 cm 土层,土壤 C_0 与 ROC 、硝态氮之间均存在极显著正相关关系($P < 0.01$);与 SOC 、 DOC 、碱解氮之间均存在显著正相关关系($P < 0.05$)。 k 值与 SOC 、 DOC 之间存在显著正相关关系($P < 0.05$)。

在 20℃ 条件下,0~20 cm 和 20~40 cm 土层,土壤 C_0 与 SOC 呈极显著正相关($P < 0.01$);与碱解氮呈显著和极显著正相关($P < 0.05$ 、 $P < 0.01$)。 k 值与电导率之间存在显著和极显著正相关关系($P < 0.05$ 、 $P < 0.01$)。0~20 cm 土层,土壤 C_0 与 ROC 之间存在极显著负相关关系($P < 0.01$)。20~40 cm 土层,土壤 C_0 与 DOC 之间存在显著正相关关系($P < 0.05$)。

在 30℃ 条件下,0~20 cm 和 20~40 cm 土层,土壤 C_0 与 SOC 均呈极显著正相关($P < 0.01$)。 k 值与 DOC 之间呈显著正相关($P < 0.05$),与电导率之间呈显著负相关($P < 0.05$)。0~20 cm 土层,土壤 C_0 与碱解氮存在极显著正相关关系($P < 0.01$);20~40 cm 土层,土壤 C_0 与 DOC 之间存在极显著正相关关系($P < 0.01$)。

3 讨论

3.1 不同种植年限水稻田的有机碳累积矿化量

土壤有机碳累积矿化量随水稻种植年限的延长而升高,这与土壤总有机碳含量和活性有机碳含量随种植年限的延长而增加有关。本研究中水稻种植年限长的土壤总有机碳含量和活性有机碳含量较高,供试土壤 SOC 、 POC 、 DOC 和 MBC 均为 78 a 水稻田 > 30 a 水稻田 > 3 a 水稻田 > 玉米田,这与胡佳等^[19]对鄱阳湖围垦区水稻田土壤的研究结果相似。水稻种植年限长的土壤矿化底物较多,其生物有效性也较高,促进了微生物对有机质的分解,因此土壤累积矿化量较大。水稻种植年限影响有机碳含量的原因在于水稻田土壤的水耕熟化过程会积累碳元素,使水稻田土壤的有机碳含量随水稻种植年限的升高而提升,改变了土壤碳库组分构成^[5]。而旱地土壤中,受人为耕作活动影响,导致土壤有机质输入量减少、土壤团聚体破坏、土壤有机碳矿化加快等,使得其土壤 SOC 含量往往会低于水田土壤。

不同土层土壤有机碳的矿化存在差异。20~40 cm 土层的累积矿化量仅有 0~20 cm 土层的 75.29%~92.09%,与已有的研究结果相似^[20]。0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤总有机碳和活性有机碳含量也不同,0~20 cm 土层的土壤 SOC 、 DOC 、 POC 和 MBC 均高于 20~40 cm 土层,说明水稻田土壤不同土层有机碳的矿化差异与不同土层土壤易分解的基质降低有关,表层土壤含有较多易分解的小分子有机化合物,同时能够积累大量的外源有机质残体,有利于微生物的生长、繁殖,能够为微生物提供更多底物。因此,与下层土壤相比,表层土壤有机碳矿化量更多,有机碳矿化能力随土壤深度的增加而降低^[21]。

3.2 不同种植年限水稻田的有机碳矿化速率

各水稻种植年限土壤有机碳矿化速率呈现出培养前期快、后期慢的趋势,矿化速率随培养时间的延长而下降最终趋于平稳,这与已有的研究结果基本一致^[22-25]。在培养的起始阶段,由于可利用性碳源较多,土壤累积矿化量增长较快,之后随着培养时间的延长逐渐减慢,第 7、21 天和 35 天的矿化速率分别下降至第 1 天的 36.91%、15.29% 和 10.82%,这与前人的研究结果相似^[26-28]。培养第 1 天矿化速率较高,是因为预培养后,矿化初期土壤中存在大量易分解的糖类、蛋白质等活性有机物,土壤微生物得到了充足的碳源和养分,活性增加。之

表 4 0~20 cm 土层土壤矿化参数与理化性质间的相关性

Table 4 Correlation between mineralization parameters and soil properties of 0~20 cm soil layer

温度/°C Temperature	参数 Parameter	SOC	DOC	碱解氮 Alkali-hydrolysis nitrogen	有效磷 Olsen phosphorus	有效钾 Available potassium	pH	电导率 Conductivity	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	ROC	MOC	POC	MBC
10	C ₀	1.000**	0.946	0.999**	0.197	-0.676	-0.354	-0.792	0.762	0.950*	0.942	0.866	0.585	0.899
	k	0.901	0.761	0.895	0.383	-0.393	-0.607	-0.659	0.895	0.982*	0.810	0.894	0.699	0.637
20	C ₀	0.999**	0.935	0.997**	0.184	-0.681	-0.384	-0.774	0.782	0.958*	0.932	0.882	0.611	0.886
	k	-0.919	-0.983*	-0.934	-0.486	0.437	0.019	0.969*	-0.496	-0.812	-0.997**	-0.611	-0.233	-0.933
30	C ₀	0.999**	0.936	0.996**	0.154	-0.706	-0.373	-0.767	0.774	0.950	0.929	0.879	0.610	0.894
	k	0.928	0.979*	0.942	0.491	-0.434	-0.057	-0.962*	0.527	0.833	0.997**	0.635	0.265	0.924

注 **和*分别表示在 $P<0.01$ 和 $P<0.05$ 水平差异显著。下同。

Note: ** and * represent significant differences at $P<0.01$ and $P<0.05$ levels, respectively. The same below.

表 5 20~40 cm 土层土壤矿化参数与理化性质间的相关性

Table 5 Correlation between mineralization parameters and soil properties of 20~40 cm soil layer

温度/°C Temperature	参数 Parameter	SOC	DOC	碱解氮 Alkali-hydrolysis nitrogen	有效磷 Olsen phosphorus	有效钾 Available potassium	pH	电导率 Conductivity	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	ROC	MOC	POC	MBC
10	C ₀	0.977*	0.967*	0.972*	0.665	-0.197	-0.573	-0.745	0.991**	0.607	0.998**	0.657	0.900	0.943
	k	0.981*	0.988*	0.915	0.516	0.160	-0.250	-0.906	0.898	0.777	0.911	0.844	0.708	0.900
20	C ₀	0.997**	0.994**	0.973*	0.645	-0.051	-0.452	-0.837	0.972*	0.662	0.977*	0.727	0.843	0.924
	k	-0.899	-0.917	-0.829	-0.517	-0.406	0.010	0.997**	-0.755	-0.685	-0.748	-0.794	-0.539	-0.688
30	C ₀	0.996**	0.997**	0.956*	0.598	0.032	-0.375	-0.869	0.948	0.711	0.956*	0.778	0.794	0.920
	k	0.946	0.959*	0.882	0.548	0.308	-0.114	-0.980*	0.826	0.710	0.824	0.808	0.623	0.771

后,随着培养时间延长,矿化速率随易分解有机物的减少而减慢,培养后期,土壤中的有机物质主要为难分解的纤维素、木质素等,难以被微生物利用,使微生物活性受到抑制,所以有机碳矿化速率在培养 21 d 后降为最低并趋于平稳^[3]。供试土壤平均矿化速率为 44.79~104.66 mg·kg⁻¹·d⁻¹,与郝瑞军等^[27]对苏南地区水稻田平均矿化速率 10.76~65.20 mg·kg⁻¹·d⁻¹的研究结果相比,本研究平均矿化速率偏高,其原因可能是苏南地区土壤 pH 值较南泥湾地区低,土壤酸化抑制了当地土壤微生物活性。

对于 0~20 cm 土层而言,土壤有机碳矿化率随着水稻种植年限的延长而无明显变化趋势。对于 20~40 cm 土层而言,土壤有机碳矿化率随着水稻种植年限的延长而降低,表现为玉米田>3 a 水稻田>30 a 水稻田>78 a 水稻田,说明深层土壤的固碳能力随着水稻种植年限的延长而增强。土层间 0~20 cm 累积矿化率小于 20~40 cm,这与王永慧等^[18]的研究结果不同,其原因可能是本研究培养时间较短,而 0~20 cm 土层有机碳含量较高,潜在可矿化有机碳在培养周期内未能释放完全。

3.3 不同种植年限水稻田的有机碳矿化参数

土壤潜在可矿化有机碳含量 C_0 随水稻种植年限的升高呈现上升趋势,78 a 水稻田>30 a 水稻田>3 a 水稻田>玉米田,与土壤总有机碳含量的变化保持一致,且两者呈极显著正相关,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,这与高强等^[28]研究结果一致。 C_0/SOC 为土壤易分解有机碳占总有机碳的比例,能够直观地显示土壤有机碳的相对稳定性。从本研究中 C_0/SOC 值来看,玉米田平均为 11.13%,3 a 水稻田、30 a 水稻田和 78 a 水稻田分别平均为 9.97%、9.76% 和 9.35%,与郭振等^[29]对贵州地区水稻田的研究结果相比偏大,其原因可能与南泥湾地区水稻田总有机碳含量相对较少有关。供试土样的 C_0/SOC 值均随水稻种植年限的增加而降低,说明土壤有机碳的矿化能力随水稻种植年限的增加而逐渐减弱,土壤有机碳的固存能力随水稻种植年限的增加而逐渐增强,其原因可能与水稻田水耕熟化下发育稳定的微团聚体固碳和铁氧化物固碳有关^[30]。

SOC 和 DOC 与土壤有机碳矿化密切相关,土壤有机碳是微生物矿化的底物,而各种活性有机碳是影响土壤有机碳矿化的重要因素。本研究中土壤 C_0 值与 SOC 和 DOC 相关性很高,说明潜在的可矿化有机碳受其初始含量的影响。这是由于有机碳的解聚和溶解是其矿化的先决条件,有机碳在转化

生成 CO_2 前必须先进入溶液成为溶解性有机碳^[31],因此, DOC 的动态和周转与土壤有机碳矿化密切相关。 MBC 与土壤 C_0 相关性较高,但未能达到显著水平,与其他研究的结果不同^[32],其原因可能是南泥湾地区的气候条件、土地类型和耕作制度导致土壤中微生物量较少。20~40 cm 土层的 ROC 与土壤 C_0 值呈极显著正相关 ($P<0.01$) 或显著正相关 ($P<0.05$),但 0~20 cm 土层相关性较低,其原因可能是 0~20 cm 表层土壤与外界环境接触较密切,土壤 ROC 受外界温度、气候、降雨等因素影响较大。

4 结 论

土壤有机碳累积矿化量、矿化速率、潜在可矿化有机碳含量 C_0 和 C_0/SOC 值均随温度的升高而增大。10℃ 下水稻田有机碳矿化累积量均显著低于 20℃ 和 30℃ 下 ($P<0.05$),但 20℃ 与 30℃ 处理之间无显著差异。玉米田在不同培养温度下的累积矿化量无显著差异。0~20 cm 土层土壤累积矿化量高于 20~40 cm 土层。供试土壤矿化速率在培养第 1 天达到最大值,土壤有机碳累积矿化量和矿化速率均表现为 78 a 水稻田>30 a 水稻田>3 a 水稻田>玉米田。

供试土壤在温度从 10℃ 升高到 20℃ 时的 Q_{10} 值均高于从 20℃ 升高到 30℃ 时的 Q_{10} 值,土层间的 Q_{10} 值大小关系为 0~20 cm>20~40 cm。潜在可矿化有机碳含量 C_0 与总有机碳、易氧化有机碳、溶解性有机碳含量之间的正相关性较强, C_0 与总有机碳之间的相关性最强。 C_0 与微生物生物量碳含量之间呈正相关关系但未能达到显著水平。 C_0/SOC 值随水稻种植年限的增加而降低,说明土壤有机碳的固存能力随水稻种植年限的增加而逐渐增强。

参 考 文 献:

- [1] 徐祥明,覃灵华,杨慧.西南典型水耕人为土诊断层黏土矿物特征[J].土壤通报,2014,45(2):265-271.
XU X M, QIN L H, YANG H. Clay mineral composition of diagnostic horizons in stagnic anthrosols: implications for soil taxonomic classification[J].土壤通报,2014,45(2):265-271.
- [2] 张旭辉,潘兴.水稻田与稻作农业对碳中和的启示[J].科学,2021,73(6):4,18-21.
ZHANG X H, PAN G X. Lessons of carbon neutrality from rice paddy and rice farming[J]. Science, 2021, 73(6):4,18-21.
- [3] 余展,张杨珠,张亮,等.水耕人为土的发生学特性与系统分类研究进展[J].土壤通报,2018,49(6):1487-1496.
YU Z, ZHANG Y Z, ZHANG L, et al. Advances on genetic characteristics of stagnic anthrosols and its taxonomy[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(6):1487-1496.
- [4] 卢韦.不同温度下长期施肥黄壤有机碳的矿化及动力学特征[D].

- 贵阳: 贵州大学, 2019.
- LU W. Mineralization and dynamics of organic carbon in yellow soil under long term fertilization at different temperatures [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [5] 邹建红, 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.
- WU J H, PAN J J, GE X J, et al. Variations of soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity under different land use types[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 130-135.
- [6] 樊晶晶. 紫色丘陵区农田土壤有机碳矿化对温度变化的响应[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- FAN J J. Soil organic carbon mineralization response to temperature change in the typical farmland soil in the purple hilly region [D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [7] GAUTHIER A, AMIOTTE-SUCHET P, NELSON P N, et al. Dynamics of the water extractable organic carbon pool during mineralisation in soils from a Douglas fir plantation and an oak-beech forest—an incubation experiment [J]. Plant and soil, 2010, 330(1): 465-479.
- [8] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 温度、水分对湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(1): 38-42.
- YANG J S, LIU J S, SUN L N. Effects of temperature and soil moisture on wetland soil organic carbon mineralization[J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(1): 38-42.
- [9] 黄锦学, 熊德成, 刘小飞, 等. 增温的 UI 土壤有机碳矿化的影响研究[J]. 生态学报, 2017, 37(1): 12-24.
- HUANG J X, XIONG D C, LIU X F, et al. Effects of warming on soil organic carbon mineralization: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): 12-24.
- [10] MEYER N, WELP G, AMELUNG W, et al. The temperature sensitivity (Q_{10}) of soil respiration: Controlling factors and spatial prediction at regional scale based on environmental soil classes [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2018, 32(2): 306-323.
- [11] 李娟. 成都市不同植被类型与种植年限公园绿地土壤有机碳矿化的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2019.
- LI J. Study on soil organic carbon mineralization of park green space in different vegetation types and years of planting in Chengdu [D]. Yaan: Yaan; Sichuan Agriculture University, 2019.
- [12] LI J Q, PEI J M, PENDALL E, et al. Rising temperature may trigger deep soil carbon loss across forest ecosystems [J]. Advanced Science, 2020, 7(19): 2001242.
- [13] 家伟. 丹江口库区造林对土壤有机碳稳定性和温度敏感性的影响 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- JIA W. The effect of afforestation in the danjiangkou reservoir area on soil organic carbon stability and temperature sensitivity [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 39-188.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 39-188.
- [15] 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系 [J]. 环境科学, 2023, 44(1): 444-451.
- ZHU Y F, LIU W C, LI J X, et al. Mineralization characteristics of soil organic carbon and its relationship with organic carbon components in artificial *Robinia pseudoacacia* forest in loess hilly region [J]. Environmental Science, 2023, 44(1): 444-451.
- [16] 石丽红, 李超, 唐海明, 等. 长期不同施肥措施对双季稻田土壤活性有机碳组分和水解酶活性的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 921-930.
- SHI L H, LI C, TANG H M, et al. Effects of long-term fertilizer management on soil labile organic carbon fractions and hydrolytic enzyme activity under a double-cropping rice system of southern China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(3): 921-930.
- [17] LLOYD J, TAYLOR J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. Functional Ecology, 1994, (8): 315-323.
- [18] 王永慧, 杨殿林, 红雨, 等. 不同地力玉米田土壤有机碳矿化特征 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 590-599.
- WANG Y H, YANG D L, HONG Y, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization in the soil of maize fields with different soil fertility [J]. Journal of agro-environment science, 2019, 38(3): 590-599.
- [19] 胡佳, 吴琴, 陈正兴, 等. 耕作年限对鄱阳湖围垦区水稻田土壤有机碳组分的影响 [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(3): 240-246.
- HU J, WU Q, CHEN Z X, et al. Effects of tillage years on soil organic carbon fractions in the Poyang lake reclaimed paddy fields [J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(3): 240-246.
- [20] 王佳盟, 刘伟, 刘志伟, 等. 生物质炭施用对不同深度稻田土壤有机碳矿化的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9): 2081-2088.
- WANG J M, LIU W, LIU Z W, et al. Effects of biochar application on soil organic carbon mineralization at different depths in paddy soil [J]. Journal of agro-environment science, 2020, 39(9): 2081-2088.
- [21] HAYNES R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(2): 211-219.
- [22] 罗先香, 张贺, 贾红丽, 等. 黄河三角洲滨海湿地土壤有机碳矿化过程模拟研究 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(6): 1-7.
- LUO X X, ZHANG H, JIA H L, et al. The simulation study of soil organic carbon mineralization in Yellow River delta wetlands, China [J]. Periodical of Ocean University of China (Science edition), 2017, 47(6): 1-7.
- [23] 汤奥涵, 肖怡, 鲜昕, 等. 不同生物炭施入对酸性紫色土有机碳矿化特征的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2023, 41(1): 111-118.
- TANG A H, XIAO Y, XIAN X, et al. Effects of different biochars application on mineralization characteristics of organic carbon in acidic purple soil [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2023, 41(1): 111-118.
- [24] 李志鹏, 王俊, 高雨晴, 等. 填闲作物腐解过程及其对后茬冬小麦产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(4): 75-82, 90.
- LI Z P, WANG J, SHANG Y Q, et al. Decomposition of cover crop residues in soils and its effects on winter wheat yield [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 75-82, 90.

- [25] 刘颖川, 杨凯, 叶哲隆, 等. 青海东部地区地膜覆盖条件下土壤有机碳矿化对温度变化的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(11): 143-148.
LIU Y C, YANG K, YE Z L, et al. Responses of soil organic carbon mineralization to temperature change under the plastic film mulching in eastern Qinghai[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(11): 143-148.
- [26] 袁胜南, 商雨晴, 王俊. 不同温度下添加绿肥对旱作农田土壤有机碳矿化的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 45-50.
YUAN S N, SHANG Y Q, WANG J. Effects of green manure on soil organic carbon mineralization in dry land soil under different temperature[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 45-50.
- [27] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍. 苏南水稻田有机碳矿化特征及其与活性有机碳组分的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(9): 1069-1074.
HAO R J, LI Z P, CHE Y P. Characteristics of soil organic carbon mineralization and its relationship with active organic carbons in paddy soils of southern Jiangsu province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(9): 1069-1074.
- [28] 高强, 宓文海, 夏斯琦, 等. 不同施肥模式下黄泥田水稻田团聚体稳定性及有机碳矿化特征[J]. 上海农业学报, 2022, 38(1): 13-20.
GAO Q, MI W H, XIA S Q, et al. Characteristics of aggregate stability and organic carbon mineralization of paddy soil in yellow mud field under different fertilization modes[J]. Acta Agriculture Shanghai, 2022, 38(1): 13-20.
- [29] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻田有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 225-235.
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[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(1): 225-235.
- [30] 朱生堡, 唐光木, 张云舒, 等. 水旱长期耕作下土壤团聚体及有机碳动态变化[J]. 生态环境学报, 2022, 31(11): 2152-2160.
ZHU S B, TANG G M, ZHANG Y S, et al. Changes in soil aggregates associated organic carbon under long-term irrigation and drought cultivation[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, 31(11): 2152-2160.
- [31] 王云秋, 李宇虹, 祝贞科, 等. 铁氧化物对厌氧水稻土中乙酸矿化、转化及其激发效应的影响[J]. 土壤学报, 2022, 59(6): 1683-1694.
WANG Y Q, LI Y H, ZHU Z K, et al. The effect of iron oxides on mineralization, transformation and priming effect of acetate in anoxic paddy soils[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(6): 1683-1694.
- [32] 段勋, 李哲, 刘森, 等. 铁介导的土壤有机碳固持和矿化研究进展[J]. 地球科学进展, 2022, 37(2): 202-211.
DUAN X, LI Z, LIU M, et al. Progress of the iron-mediated soil organic carbon preservation and mineralization[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(2): 202-211.

(上接第 25 页)

- [15] 胡亮亮, 王素华, 王丽侠, 等. 绿豆种质资源苗期耐盐性鉴定及耐盐种质筛选[J]. 作物学报, 2022, 48(2): 367-379.
HU L L, WANG S H, WANG L X, et al. Identification of salt tolerance and screening of salt tolerant germplasm of mungbean (*Vigna radiate* L.) at seedling stage[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(2): 367-379.
- [16] 王瑞峰, 王铁梅, 金晓明, 等. 11 个审定苜蓿品种种子萌发期耐盐性评价[J]. 草业科学, 2012, 29(2): 213-218.
WANG R F, WANG T M, JIN X M, et al. Evaluation of salt tolerance of 11 approved alfalfa cultivars at seed germination stage[J]. Pratacultural Science, 2012, 29(2): 213-218.
- [17] 马宗琪, 赵重, 夏玉鑫, 等. 多个紫花苜蓿引进品种的耐盐性研究[J]. 林业科技, 2017, 42(2): 6-9.
MA Z Q, ZHAO C, XIA Y X, et al. Study on the salt tolerance of several introduced *Medicago sativa* cultivars[J]. Forestry Science & Technology, 2017, 42(2): 6-9.
- [18] 张寒, 潘香逾, 王秀华, 等. 苜蓿萌发期耐盐性综合评价与耐盐种质筛选[J]. 草地学报, 2018, 26(3): 666-672.
ZHANG H, PAN X Y, WANG X H, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant germplasm of alfalfa (*medicago*) at germination stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(3): 666-672.
- [19] 王亚茹, 杨向东, 赵寒冬, 等. 油莎豆种质资源苗期抗旱性鉴定与评价[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 12-22.
WANG Y R, YANG X D, ZHAO H D, et al. Characterization and assessment of drought resistance in tigernut germplasm resources at seedling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 12-22.
- [20] 张则宇, 李雪, 王焱, 等. 59 份苜蓿种质材料苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J]. 草地学报, 2020, 28(1): 112-121.
ZHANG Z Y, LI X, WANG Y, et al. Salt tolerance evaluation and salt tolerance index screening of 59 alfalfa germplasm materials at seedling stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(1): 112-121.
- [21] 荆瑞勇, 王丽艳, 郑桂萍, 等. 水稻萌发期和幼苗期耐盐性鉴定指标筛选及综合评价[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(6): 1-6, 19.
JING R Y, WANG L Y, ZHENG G P, et al. Comprehensive assessment and selection of identification index of rice salt tolerance at germination stage and seedling stage[J]. Journal of Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2019, 31(6): 1-6, 19.
- [22] 彭智, 李龙, 柳玉平, 等. 小麦芽期和苗期耐盐性综合评价[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(4): 638-645.
PENG Z, LI L, LIU Y P, et al. Evaluation of salinity tolerance in wheat (*Triticum aestivum*) genotypes at germination and seedling stages[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2017, 18(4): 638-645.