

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.04.027.

闵旭旭, 肖列, 李鹏, 等. 污泥堆肥施用对土壤单位有机碳矿化及温度敏感性的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 130-136.

MIN Xuxu, XIAO Lie, LI Peng, et al. Effects of Composted Sludge Addition on Soil Unit Organic Carbon Mineralization and Its Temperature Sensitivity[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(4): 130-136.

污泥堆肥施用对土壤单位有机碳矿化及 温度敏感性的影响

闵旭旭, 肖列, 李鹏, 刘然, 赵萌, 刘方园

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘要: [目的]揭示污泥堆肥施用后土壤单位有机碳矿化及温度敏感性(Q_{10})对于市政污泥资源化利用和土壤碳库稳定性的主控因素,并进而为市政污泥处理及土壤有机碳固持提供理论支撑。[方法]以黄土丘陵区退化草地土壤为研究对象,测定了不同污泥堆肥添加比例(0, 2.0%, 5.0%, 10.0%, 15.0%, 20.0%)和培养温度(15℃, 25℃和35℃)下土壤有机碳矿化速率,探讨了污泥堆肥添加对土壤有机碳矿化特征和 Q_{10} 的影响。[结果](1)与CK相比,不同污泥堆肥添加在培养初期土壤单位有机碳矿化速率显著增加($p < 0.01$),之后迅速下降直至趋于稳定;而施用污泥处理组的土壤单位累积矿化量是CK的1.6~4.2倍,在施用比例达到10.0%~20.0%时其有机碳矿化速率与累积矿化量均差异不显著。(2)运用一级动力学方程,拟合不同温度不同污泥添加土壤单位有机碳矿化动态均达到较好效果($R^2 > 0.95$),潜在矿化势(C_0)值在6.92~39.60 mg C/g 差异显著($p < 0.05$),土壤有机碳矿化速率常数(k)范围为0.03~0.12 d,与温度显著相关($p < 0.01$)。(3) Q_{10} 随污泥堆肥施用量的增加其范围为1.18~2.58,在施用量达到10.0%时 Q_{10} 最大,之后随着施用比例的进一步增加 Q_{10} 反而降低。[结论]在污泥堆肥施入量控制在10.0%~20.0%时能够显著增加土壤有机碳含量,并抑制土壤有机碳的再度矿化有效调整土壤 Q_{10} ,确保土壤碳库的相对稳定,并且有利于土壤单位有机碳的固持。

关键词: 污泥堆肥; 单位有机碳矿化; 潜在矿化势; 温度敏感性

中图分类号: S157.4⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)04-0130-07

Effects of Composted Sludge Addition on Soil Unit Organic Carbon Mineralization and Its Temperature Sensitivity

MIN Xuxu, XIAO Lie, LI Peng, LIU Ran, ZHAO Meng, LIU Fangyuan

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Objective] The main controlling factors of soil organic carbon mineralization and its temperature sensitivity (Q_{10}) for municipal sludge resource utilization and soil carbon pool stability after sludge compost application were revealed, which provided theoretical support for municipal sludge treatment and soil organic carbon sequestration. [Methods] In the present study, different doses of composted sludge (0, 2.0%, 5.0%, 10.0%, 15.0%, and 20.0%) were added to the degraded grassland soil collected from the loess hilly area, and the soil organic carbon mineralization rates under different incubation temperatures (15℃, 25℃ and 35℃) were measured. The effects of composted sludge addition on soil organic carbon mineralization characteristics and Q_{10} values were discussed. [Results] (1) Compared with CK, the soil organic carbon mineralization rate significantly ($p < 0.01$) increased with composted sludge addition doses at the initial stage of cultivation, and then it rapidly decreased until it reached to a stable value. The cumulative soil organic carbon mineralization under the composted sludge addition treatments were 1.6~4.2 times greater than that of CK. When

收稿日期: 2022-06-02

修回日期: 2022-06-17

资助项目: 国家自然科学基金(41701603); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金课题(A314021402-202107); 陕西省教育厅协同创新中心项目(22JY043)

第一作者: 闵旭旭(1996—), 男, 陕西商洛人, 在读硕士研究生, 研究方向为土壤生态修复。E-mail: minxu1483@163.com

通信作者: 肖列(1987—), 男, 河北保定人, 博士, 副教授, 主要从事土壤生态修复和土壤微生物研究。E-mail: xiaosha525@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

the composed sludge application doses were between 10.0% and 20.0%, the organic carbon mineralization rate and cumulative mineralization amount had no significant difference. (2) The first-order kinetic equation was used to fit the dynamics of soil organic carbon mineralization with composted sludge addition treatments at different incubation temperatures and achieved good results ($R^2 > 0.95$). Soil organic carbon mineralization potential (C_0) values ranged from 6.92 to 39.60 mg C/g and the differences were significant ($p < 0.05$) among different treatments. The soil organic carbon mineralization kinetic constant (k) ranged from 0.03/d to 0.12/d, and it was significantly correlated with incubation temperatures ($p < 0.01$). (3) The Q_{10} values ranged from 1.18 to 2.58 with the composted sludge application doses, and the Q_{10} reached the maximum value when the application doses reached 10.0%, and then the Q_{10} values decreased with the doses of the composted sludge addition. [Conclusion] When the composted sludge application doses are at 10.0%~20.0%, the content of soil organic carbon can obviously increase, inhibit the re-mineralization of soil organic carbon, effectively adjust soil Q_{10} , and ensure the relative stability of soil carbon pool, which is beneficial for the sequestration of soil organic carbon.

Keywords: composted sludge; soil organic carbon mineralization; soil organic carbon mineralization potential; temperature sensitivity

近年来,全球气候变化和人类不合理的活动加剧了土壤退化过程,造成了土地生产力下降、生物多样性减弱和生态系统功能退化等生态问题^[1]。与此同时,随着城市化进程的加快,市政污泥的产量也逐年增加。市政污泥中含有丰富有机质、氮、磷等营养物质,将污泥无害化处理后进行土地利用有助于改善土壤结构、增加土壤肥力、修复退化土壤,同时也是污泥减量化、资源化利用的重要途径^[2]。土壤有机碳在维持土壤肥力、土壤有机碳储量和调节土壤矿化趋势等方面发挥着重要作用。土壤有机碳矿化是土壤微生物呼吸作用过程中促使有机碳分解释放 CO_2 的过程,是评价土壤碳库稳定性的重要指标^[3]。随着全球气候的变暖,大量研究温度升高对土壤有机碳矿化的影响,普遍认为温度升高会促进土壤有机碳的矿化。而温度对土壤有机碳矿化的影响则用温度敏感性(Q_{10})来表示,即温度升高 10℃时,有机碳矿化速率变化程度^[4]。科学分析市政污泥堆肥添加土壤后有机碳的矿化过程对于市政污泥土地利用和土壤碳库稳定性随温度变化的响应研究具有重要意义。

近年来,大量研究评估了污泥堆肥施用对土壤肥力及土壤碳库组分的影响^[5-6]。吴杰等^[7]发现连续两年在酸性砂土中添加污泥堆肥显著提高了土壤有机质、全氮、全磷含量和土壤综合肥力指数,且这种提高作用随着污泥施用量的增加呈上升趋势。全少伟等^[8]通过盆栽试验证实了啤酒污泥堆肥施用可显著提高土壤有机碳含量和土壤酶活性。基于连续 7 a 的定位试验,俄胜哲等^[9]发现灌漠土中添加污泥有助于土壤游离态有机碳和结合态腐殖质含量的增加,进而提高了土壤有机碳含量。冀拯宇等^[10]和牛明杰等^[11]研究发现无害化污泥堆肥施用显著提高了沙质

潮土土壤总有机碳和各活性碳库组分含量以及土壤腐殖化程度,有利于土壤有机碳的积累。以上相关研究均证实了污泥无害化处理后土地利用促进了土壤有机碳的积累,然而目前对于污泥添加后土壤有机碳稳定性特征研究还略显不足。尤俊坚等^[12]基于室内矿化培养试验发现豫东黄泛平原风沙土中添加城市污泥生物质炭有助于土壤有机碳累积矿化量的减少,增强了土壤碳的稳定性。Zhang 等^[13]通过对温室蔬菜田的生物炭添加培养试验中证实了,随着生物炭的添加会降低土壤矿化过程的 Q_{10} 从而实现土壤有机碳的固定。但是,对于污泥堆肥处理后土地利用对土壤有机碳矿化特征及其对温度的响应还鲜有报道。深入研究污泥堆肥施用土壤有机碳矿化特征及其对温度变化的响应规律,有助于科学评估污泥堆肥施用对土壤有机碳库含量及其稳定性的作用。

黄土高原地处干旱半干旱区,生态环境及其脆弱,大量不合理的人类活动和土地利用导致土壤侵蚀严重土地退化加剧^[14]。退耕还林草是修复退化土壤,改善生态系统稳定性的重要途径,但是黄土高原地区黄绵土有机质含量低、氮磷缺乏以及日均温度差异较大,显著影响退耕区植被恢复的速度和质量^[15]。因此,本研究以黄土丘陵区退化草地土壤为研究对象,添加不同比例污泥堆肥后进行室内矿化培养试验,研究污泥堆肥施用对土壤有机碳矿化特征和温度敏感性的影响,以期为评估污泥堆肥施用土壤碳固存及其稳定性特征提供数据基础。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

土壤样品采集于黄土丘陵沟壑区王茂沟流域退

化草地表层(0—20 cm),采集的土壤样品过 2 mm 筛以去除凋落物和根系,用于后续的室内矿化培养试验。土壤样品的基本理化性质和重金属含量见表 1。

污泥样品取自西安某污水处理厂。采集的污泥于试

验大厅中进行好氧堆肥处理,自然腐熟后获得干污泥。干污泥基本理化性质和重金属含量见参照,《农用污泥污染物控制标准》(GB4284—2018)要求见表 1。将干污泥磨碎过 2 mm 筛后和土壤样品混合后进行矿化培养试验。

表 1 土壤样品和污泥堆肥基本理化性质和重金属含量

指标	田间 持水量/%	SOC/ (g·kg ⁻¹)	pH 值	Cu/ (mg·kg ⁻¹)	Cd/ (mg·kg ⁻¹)	Pb/ (mg·kg ⁻¹)	Zn/ (mg·kg ⁻¹)	Cr/ (mg·kg ⁻¹)	Ni/ (mg·kg ⁻¹)
土壤	21	4.96	7.60	8.89	0.15	22.59	13.95	26.11	12.028
污泥堆肥		237.53	7.45	263.2	2.53	74.42	90.58	133.36	173.07
GB4284—2018(B)级			5.5~8.5	<1500	<15	<1000	<3000	<1000	<200

1.2 试验设计

室内矿化试验于 2021 年 9 月开始进行。试验设置 6 个污泥堆肥添加水平和 3 个培养温度,共计 18 个处理,每个处理 3 个重复。

将污泥堆肥和土壤样品按比例(干重比)混匀,污泥添加比例分别为 0, 2.0%, 5.0%, 10.0%, 15.0%, 20.0%(分别用 CK, W₂, W₅, W₁₀, W₁₅, W₂₀ 表示)。分别取上述不同污泥添加比例混匀后的土壤样品 60 g,装入 250 ml 圆口培养瓶中,将土壤含水量控制在田间持水量的 60.0% 左右。将培养瓶在 25℃ 恒温培养箱中预培养 7 d,用以激活土壤微生物活性。然后将不同污泥添加比例的培养瓶分别放置在 15℃, 25℃, 35℃ 的恒温培养箱中进行矿化培养 50 d。在培养过程中每 2 天采用称重法补充培养瓶中水分至田间持水量的 60.0% 左右。分别在矿化培养的第 1, 3, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 d 进行气体样品的采集。气体样品采集前,先用橡胶塞密封瓶口,然后向培养瓶中注入 30 ml 新鲜空气,待混合均匀后,从培养瓶中抽取 30 ml 混合气体注入真空集气瓶;之后将培养瓶在恒温培养箱中密封培养 8 h 后,再次采集混合气体。两次采集的气体分别用气相色谱仪(Agilent 7890A, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, USA)测定其 CO₂ 浓度,进而计算混合样品有机碳矿化 CO₂ 释放速率。

1.3 数据计算

1.3.1 土壤单位有机碳矿化速率

$$R = \beta \times \frac{V}{m} \times \frac{1}{C} \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T} \times \alpha \quad (1)$$

式中:R 为土壤单位有机碳矿化速率[mg C/(g·d)];β 为 CO₂ 气体转化为标准单位的系数 1.964(kg/m³);V 为培养瓶内总气体体积(m³);m 为培养瓶中样品干质量(kg);C 为各样品有机碳含量(g/kg);Δc 为培养时间内 CO₂ 浓度变化量(mg/kg);Δt 为培养时间(d);T 为培养温度(℃);α 为 CO₂ 转换为 C 的质量转化系数 12/44。

1.3.2 土壤单位有机碳累积矿化量

$$C_m = \sum_{i=1}^{n-1} (R_i \times T_i) \quad (2)$$

式中:C_m 为单位有机碳累积矿化量(mg C/g);i 为测定次数序号;n 为测定总次数;R_i 为两个采样时间段的平均有机碳矿化速率[mg C/(g·d)];T_i 为两个时间段间隔天数(d)。

1.3.3 采用一级动力学方程拟合累积矿化量 短期培养条件下土壤有机碳矿化主要是土壤中活性碳库的分解,因此采用一级动力学方程拟合土壤有机碳矿化动态过程:

$$C_t = C_0 (1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

式中:C_t 为 t 时刻土壤单位累积有机碳的矿化量[mg C/(g·d)];C₀ 为土壤中有机碳潜在的矿化势[mg C/(g·d)];t 为培养的时间(d);k 为有机碳矿化的常数(d)。

1.3.4 土壤有机碳矿化温度敏感性(Q₁₀)

$$Q_{10} = (k_{T_2} / k_{T_1})^{10 / (T_2 - T_1)} \quad (4)$$

式中:k_{T₂} 为高温条件下有机碳矿化常数(d);k_{T₁} 为低温条件下有机碳矿化常数(d)。

1.4 统计分析

采用 Excel2016 软件进行数据整理,利用 SPSS 17.0 软件对数据进行统计分析。用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较(p=0.05)对各处理的有机碳累积矿化量、矿化率、潜在矿化势和 Q₁₀ 等,采用 Pearson 法进行相关分析,Origin 2018 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 污泥堆肥施用对土壤单位有机碳矿化速率和累积矿化量的影响

不同温度下污泥堆肥施用土壤单位有机碳矿化速率随培养时间延长均呈下降趋势(图 1),在矿化培养的前 20 d,土壤有机碳矿化速率呈快速下降趋势,之后土壤有机碳矿化速率呈缓慢下降至稳定。因此,可将矿化培养过程分为迅速矿化阶段(0~20 d)和缓慢矿化阶段(21~50 d)。迅速矿化阶段 35℃ 培养下的矿化速率显著高于 15℃ 和 25℃ 培养条件,缓慢矿化阶段的矿化速率在 3 个培养温度下差异不显著(表

2)。随着污泥堆肥添加比例的增加,15℃,25℃和35℃的矿化速率分别达到了0.04~0.91,0.07~2.01,0.08~4.51 mg C/(g·d),与CK相比添加污泥堆肥后矿化速率显著提高,并在添加比例达到10.0%时单位有机碳矿化速率达到最大值。较CK相比,15℃,

25℃和35℃培养下单位有机碳迅速矿化阶段的矿化速率增加了3.3~4.1,2.1~2.9,1.7~2.3倍,缓慢矿化阶段的矿化速率增加了2.5~4.7,1.7~2.2,1.1~1.3倍,在施用量达到10.0%~20.0%后各处理矿化速率差异不显著。

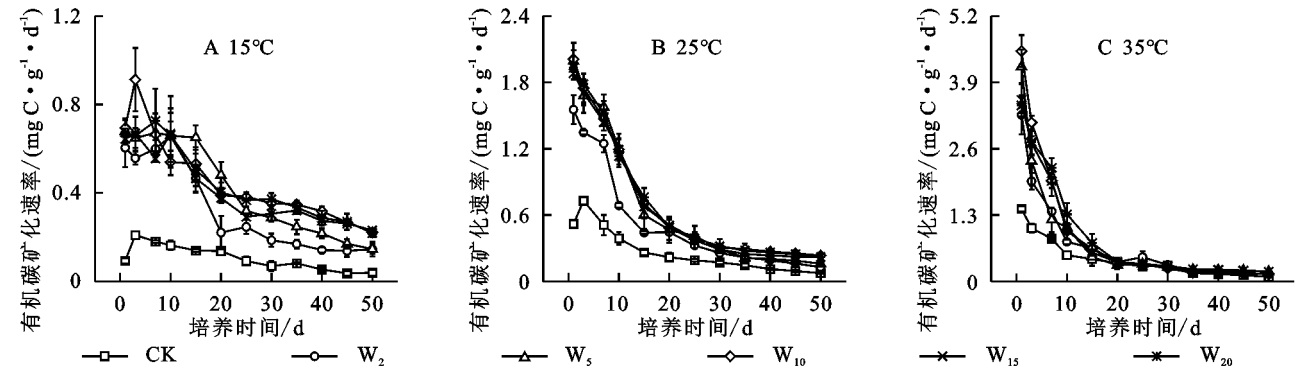


图 1 不同温度下污泥堆肥施用对土壤有机碳矿化速率的影响

表 2 迅速矿化与缓慢矿化阶段平均矿化速率 $10^{-1} \text{ mg C/(g} \cdot \text{d)}$

处理	迅速矿化阶段速率			缓慢矿化阶段速率		
	15℃	25℃	35℃	15℃	25℃	35℃
CK	1.57±0.09Cc	4.21±0.15Bc	7.01±0.48Ac	0.70±0.03Dd	1.43±0.08Cc	2.09±0.29Cb
W ₂	5.24±0.34Cb	8.79±0.24Bb	12.25±0.05Ab	1.77±0.19Dc	2.39±0.14Db	2.68±0.23Da
W ₅	6.37±0.45Ca	11.74±0.93Ba	13.56±1.43Ab	2.59±0.18Db	2.70±0.11Dab	2.56±0.32Da
W ₁₀	6.12±0.34Ca	11.96±0.56Ba	16.65±0.78Aa	3.29±0.12Da	3.13±0.30Da	2.18±0.06Db
W ₁₅	5.59±0.41Ca	11.67±0.56Ba	15.04±0.54Aa	2.93±0.07Dab	3.10±0.28Da	2.68±0.13Da
W ₂₀	6.01±0.37Ca	12.04±0.69Ba	16.43±0.68Aa	3.23±0.08Da	2.87±0.03Da	2.61±0.06Da

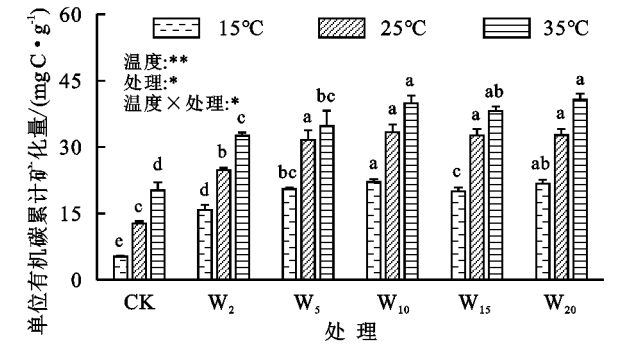
注:表中不同大写字母表示同行平均矿化速率差异显著性,不同小写字母表示同列差异显著($p<0.05$)。

土壤单位有机碳累积矿化量(C_m)较CK相比,施用污泥堆肥的处理组的 C_m 显著增加(图2),当施用量达到10.0%时不同培养温度的 C_m 均达到最大。15℃培养下,较CK相比各处理 C_m 增加了3.0~4.2倍,其中 W_5 , W_{10} 和 W_{20} 处理 C_m 差异不显著;25℃培养下,与CK组相比各处理 C_m 分别增加了1.9~2.6倍,但在施用量达到5.0%~20.0%时 C_m 差异不显著;35℃培养下,较CK相比各处理 C_m 分别增长了1.6~2.0倍,在污泥堆肥施用量达到10.0%~20.0%后 C_m 差异不显著。

2.2 污泥堆肥施用对有机碳矿化特征的影响

运用一级动力学方程,拟合不同温度不同污泥添加土壤有机碳矿化动态均达到较好效果($R^2>0.95$),表明该方程可以很好地拟合不同污泥堆肥添加条件下土壤单位有机碳累积矿化量的动态矿化过程。各处理潜在矿化势(C_0)值在6.92~39.60 mg C/g且差异显著($p<0.05$)(图3),在相同培养时间下, C_0 与污泥堆肥添加量呈显著相关($p<0.01$)。与CK组相比各15℃,25℃和35℃培养下 C_0 增加了2.5~4.3,1.8~2.4,1.5~1.9倍,在施用量达到10.0%~20.0%后各处理 C_0 均未达到显著水平。 k 表示土壤有机碳矿化速率常数,范围为0.03/d~0.12/d,与CK组相比25℃和35℃培养处理组 k

值均显著升高,15℃培养处理组 k 值在添加比例达到5.0%时达到最高之后随着添加比例上升又显著降低。结果表明污泥堆肥添加在0~10.0%时会显著提升土壤有机碳矿化潜势和矿化速率,但在污泥堆肥施用量达到10.0%后不会进一步促进土壤有机碳矿化增加。



注:不同小写字母表示差异显著($p<0.05$);***, **, * 分别表示0.01,0.05,0.1显著水平,下同。

图 2 不同温度下污泥堆肥施用对土壤有机碳累积矿化量的影响

2.3 污泥堆肥施用对土壤有机碳矿化 Q_{10} 的影响

在同一的培养时间下,有机碳矿化 Q_{10} 随污泥堆肥施用量的增加呈显著增长趋势(图4),在不同温度培养下 Q_{10} 值为1.18~2.58且差异显著($p<0.05$),15~25℃培养条件下 Q_{10} 显著高于25~35℃和15~

35℃,在施用量达到 10.0%~20.0%后 Q_{10} 间均无显著性差异。而 25~35℃ 和 15~35℃,在施用量 0~10.0%时 Q_{10} 均显著增加,并在 10.0%时达到最大,随

着施用比例的进一步增加 Q_{10} 有所降低,与 CK 组相比处理组在 15~25℃,25~35℃ 和 15~35℃ 范围内的 Q_{10} 增加了 0.9~1.5,0.9~1.2,1.0~1.5 倍。

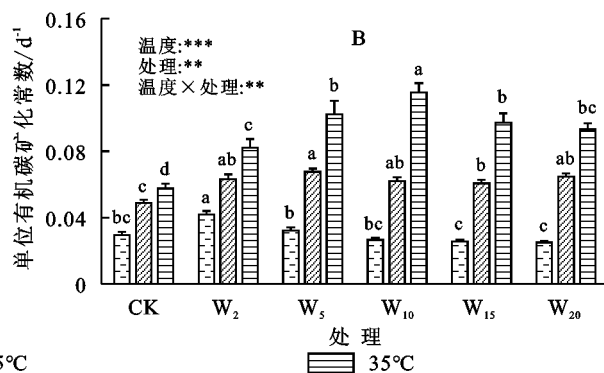
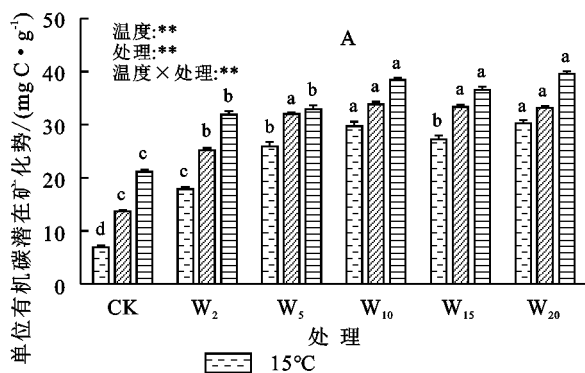


图3 不同温度下污泥堆肥施用对有机碳潜在矿化势和矿化常数的影响

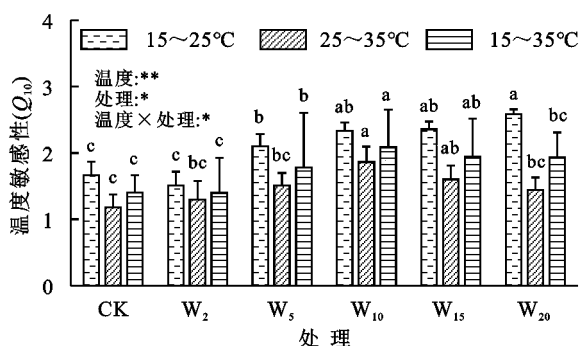
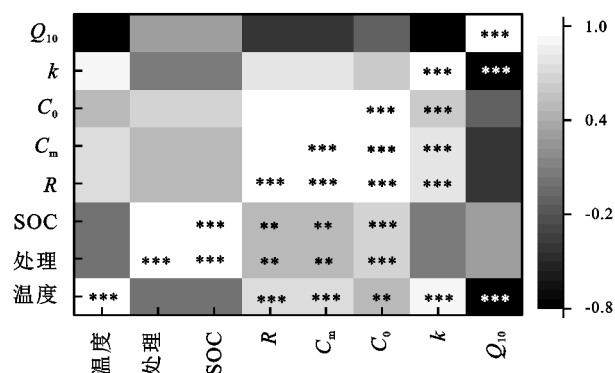


图4 污泥堆肥施用对土壤有机碳矿化过程 Q_{10} 的影响

3 讨论

3.1 污泥堆肥施用对土壤有机碳矿化速率与累积矿化量的影响

污泥堆肥后是一种含碳量丰富的有机混合物,具有很强的稳定性和一定的生物降解能力,施用土壤后能快速提高土壤有机碳含量,随着添加量增加效果越显著,还会改善土壤原有的生物群落,增加土壤微生物活性,改善土壤结构从而对土壤有机碳矿化过程产生影响^[16]。而土壤有机碳矿化是土壤有机碳损失的主要形式,其数量与质量对土壤有机碳矿化具有重要作用,其中有机碳矿化速率与累积矿化量则是衡量土壤有机碳矿化的重要指标之一^[17]。土壤有机碳矿化速率,是指在一定时间内土壤呼吸所产生 CO_2 累积的数量与所用时间的比值,表征了土壤有机碳矿化过程的快慢程度。大量研究发现,土壤有机碳矿化速率和土壤有机碳累积矿化量与土壤有机碳含量呈正相关^[18-19]。本研究结果表明,较 CK 组相比,处理组随着污泥堆肥添加比例的增高有机碳的矿化速率与累积矿化量显著增加(图 5),主要是因为,随着污泥堆肥的添加土壤有机碳含量增加,微生物活性增强,有机碳分解速率越快。



注:图中颜色深浅代表相关系数大小;***, **, * 分别表示 0.01, 0.05, 0.1 显著水平。

图5 不同温度污泥堆肥施用土壤后各矿化指标相关系数

本研究中,污泥堆肥施用土壤后,土壤有机碳矿化速率与累积都呈现两个阶段,培养初期矿化迅速,后期缓慢。在矿化培养初期的迅速矿化阶段,15℃,25℃ 和 35℃ 不同污泥堆肥添加比例的土壤有机碳矿化累积达到总矿化量的 55.3%~66.4%,66.2%~74.4% 和 69.2%~83.6%,与吴健利^[20] 和张鹏^[21] 等研究结果一致。因在矿化培养初期,土壤中因最初加入污泥堆肥,提高了土壤中活性碳的成分,促进了土壤的呼吸作用,因此土壤有机碳的矿化速率与累积矿化量增长迅速。随着时间的延长,土壤中活性较高的有机碳被分解之后,开始分解不易被分解的有机碳源,导致微生物活动减缓,有机碳矿化速率随之减慢,累积矿化量也随之减缓。郭丽欣等^[22] 研究表明,施用生物炭对提高土壤有机碳含量和土壤碳库稳定和促进土壤固碳,指出生物炭的添加会降低土壤相对矿化潜力,并随外源碳的输入对土壤有机炭矿化潜力有一定抑制作用。而赵熙君等^[23] 研究表明,施用含有重金属的生物炭后会增加水稻土中重金属含量,并且对土壤有机碳矿化有着显著的负激发效应。本研究中,不同温度培养下污泥堆肥施用在达到 10.0% 添加比

例后累积矿化量均未达不显著水平,随着施入量的增加,累积矿化量呈下降趋势,土壤固碳能力增加,但是对于污泥施用后土壤重金属含量是否对本次试验矿化过程的影响研究还略显不足。

3.2 污泥堆肥施用对土壤有机碳矿化拟合参数特征的影响

土壤有机碳矿化是土壤有机碳损失的主要形式, C_0 则表征土壤有机碳矿化潜力^[24]。Thiessen 等^[25]研究发现,不同温度下添加外源碳后,土壤的有机碳矿化趋势是不同的,在较高温度培养刺激下激发效应较强但是维持时间短,而较低温度培养下激发效应较弱但持续时间长。本研究中,相同污泥堆肥添加比例在 35℃ 的培养的 C_0 显著高于 15℃ 和 25℃ 培养下。且各处理的 C_0 与污泥添加量呈正相关趋势,主要因为随着污泥添加比例的升高,其有机碳含量增加,提升了微生物活性和土壤矿化潜力,进而增加了土壤的 C_0 ,与 Van 等^[26]的研究一致。而动力常数 k 则表示有机碳矿化势与潜在矿化碳库或土壤中易被降解的碳源的关系^[27],本研究中 k 值随着温度的升高显著提升,15℃ 培养处理组 k 值在添加比例达到 5.0% 时达到最高之后随着添加比例上升均有下降趋势。25℃ 培养下 k 值在污泥堆肥施用量达到 5.0%~20.0% 时均差异不显著,表明 25℃ 培养下污泥堆肥的添加量超过 5.0% 后不仅能提高土壤有机碳含量,还不会改变土壤潜在矿化势与易被分解活性碳的关系,并有利于土壤有机碳的固定。35℃ 培养下随着污泥添加比例的提升 k 值先增大后减小,这可能与污泥添加量的增加土壤有机碳含量增高,进而改变了矿质养分与易降解碳源的结构关系^[28]。而温度与 k 显著相关($p < 0.01$) (图 5),本研究发现在相同的污泥堆肥施用比例下,温度越高其土壤有机碳矿化速率越大,但随着污泥添加比例超过 10.0% 后温度对矿化速率的影响逐渐减小。

3.3 污泥堆肥施用对土壤有机碳矿化 Q_{10} 的影响

土壤有机碳矿化主要是由土壤内微生物作用的酶促反应,而升高温度可以加快部分酶的活性,提高微生物活性,陈颖等^[29]研究表明土壤有机碳矿化速率与温度呈正相关。而外源碳的添加会提高土壤有机碳中的活化的碳库,根据酶的动力学理论,有机碳含量较少的土壤具备更高的活化能,其 Q_{10} 更显著^[30],与本研究污泥堆肥添加后的 Q_{10} 显著增高不符,对此也有研究发现,土壤添加有机碳之后增强了土壤有机碳矿化的 Q_{10} ,主要是因为施入碳的组分改变了土壤

物生物群落所导致。Liu^[31] 和 He 等^[32] 的研究结果表明,土壤中易被分解的活性炭含量高时,其 Q_{10} 会有所降低。在本研究中,污泥添加处理与 CK 相比,添加量在 0~10.0% 时随着添加量的增加 Q_{10} 显著增加,在添加量达到 10.0% 时最为显著,之后随着添加量的提高 Q_{10} 有所下降,主要可能是因为随着污泥堆肥添加量的增加致使土壤中易被分解的活性炭含量增加,从而导致 Q_{10} 有所下降。因此,本研究发现在污泥堆肥施用量小于 10.0% 时, Q_{10} 随污泥堆肥施用量的增加呈显著增长趋势,并在施用量达到 10.0% 时达到最大,但在施用污泥堆肥达到 10.0%~20.0% 时的 Q_{10} 并不会进一步增加。

4 结论

本研究中温度与土壤单位有机碳矿化速率、累积矿化量、矿化常数均显著正相关($p < 0.01$),与潜在矿化势也显著正相关($p < 0.05$),并均在 35℃ 培养时达到最大值,而温度与温度敏感性显著负相关($p < 0.01$)。随污泥堆肥施用量的增加,0~10.0% 时单位土壤有机碳矿化速率、累积矿化量和潜在矿化势均显著增加($p < 0.01$),污泥堆肥施用在达到 10.0%~20.0% 添加比例各矿化相关指标均无显著差异,其中矿化常数与温度敏感性在施入量的增加至 10.0%~20.0% 后随着污泥堆肥添加比例的增加呈显著下降趋势,并且温度与污泥堆肥添加存在一定交互作用。因此,在温度较低的环境下污泥堆肥施入量控制在 10.0%~20.0% 时能够增加土壤有机碳含量,并抑制土壤有机碳的再度矿化降低土壤有机碳矿化趋势,有效调整土壤 Q_{10} ,确保土壤碳库的相对稳定,并且有利于土壤有机碳的固持。

参考文献:

- [1] 郭晓娜,陈睿山,李强,等. IPBES 专题评估中的土地退化过程,机制与影响[J].生态学报,2019,39(17):1-10.
- [2] 姚珂涵.城市污泥添加对土壤养分动态的调控机制[D].西安:西安理工大学,2021.
- [3] 杨雨浚.城市污泥堆肥对土壤温室气体排放的影响研究[D].重庆:西南大学,2018.
- [4] 郭建红,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.
- [5] Nkoa R. Agricultural benefits and environmental risks of soil fertilization with anaerobic digestates: a review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014,34: 473-492.

- [6] 郭康莉,冀拯宇,刘晓等.无害化污泥堆肥施用量对沙质潮土土壤活性有机碳组分的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(1):105-113.
- [7] 吴杰,常会庆,王启震.堆肥污泥连续施用对酸性砂土肥力影响及养分积累风险[J].核农学报,2021,35(11):2606-2615.
- [8] 仝少伟,时连辉,刘登民,等.不同有机废弃物堆肥对土壤有机碳库及酶活性的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):253-258.
- [9] 俄胜哲,时小娟,车宗贤,等.有机物料对灌漠土结合态腐殖质及其组分的影响[J].土壤学报,2019,56(6):1436-1448.
- [10] 冀拯宇,周吉祥,郭康莉,等.连续施用无害化污泥堆肥对沙质潮土肥力的影响[J].植物营养与肥料学报,2018,24(5):1276-1284.
- [11] 牛明杰,郑国砥,朱彦莉,等.城市污泥与调理剂混合堆肥过程中有机质组分的变化[J].植物营养与肥料学报,2016,22(4):1016-1023.
- [12] 尤俊坚,谢凯旋,孙蕾,等.城市污泥生物质炭对豫东黄泛平原风沙耕地土壤有机碳矿化影响[J].水土保持研究,2019,26(6):12-17.
- [13] Zhang X, Zhang Q, Zhan L, et al. Biochar addition stabilized soil carbon sequestration by reducing temperature sensitivity of mineralization and altering the microbial community in a greenhouse vegetable field[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 313. DOI:10.1016/J.JENVMAN.2022.114972.
- [14] Shi P, Li Z, Li P, et al. Trade-offs among ecosystem services after vegetation restoration in China's Loess Plateau[J]. Natural Resources Research, 2021,30(3):2703-2713.
- [15] Xiao L, Liu G, Li P, et al. Ecological stoichiometry of plant-soil-enzyme interactions drives secondary plant succession in the abandoned grasslands of Loess Plateau, China[J]. Catena, 2021,202.DOI:10.1016/J.CATENA.2021.105302.
- [16] 张凤.以浮石为调理剂的脱水污泥好氧堆肥效果研究[D].西安:西安建筑科技大学,2018.
- [17] 张影,刘星,任秀娟,等.秸秆及其生物炭对土壤碳库管理指数及有机碳矿化的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):153-159,165.
- [18] 张曾,宋成芳,单胜道,等.猪粪水热炭对土壤有机碳矿化及土壤性质的影响[J].浙江农林大学学报,2021,38(4):765-773.
- [19] Kimetu J M, Lehmann J, Kinyangi J M, et al. Soil organic C stabilization and thresholds in C saturation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009,41(10):2100-2104.
- [20] 吴健利,刘梦云,赵国庆,等.黄土台塬土地利用方式对土壤有机碳矿化及温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(5):1006-1015.
- [21] 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.
- [22] 郭丽欣,王越,杜雨婷,等.生物炭与秸秆配施对设施土壤有机碳矿化及理化性质的影响[J].北京农学院学报,2022,37(1):43-50.
- [23] 赵熙君,冷雪梅,张旭辉,等.生物质炭施用对重金属污染水稻土有机碳矿化的影响[J].南京农业大学学报,2020,43(3):468-476.
- [24] 陈灿灿,马红亮,高人,等.施氮与凋落物去除影响下中亚热带阔叶林土壤氮素矿化潜势和硝化潜势研究[J].生态环境学报,2021,30(3):503-511.
- [25] Thiessen S, Gleixner G, Wutzler T, et al. Both priming and temperature sensitivity of soil organic matter decomposition depend on microbial biomass: An incubation study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57:739-748.
- [26] Van Groenigen K J, Qi X, Osenberg C W, et al. Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil carbon storage[J]. Science, 2014,344(6183):508-509.
- [27] Marinari S, Lagomarsino A, Moscatelli M C, et al. Soil carbon and nitrogen mineralization kinetics in organic and conventional three-year cropping systems[J]. Soil and Tillage Research, 2010,109(2):161-168.
- [28] Hua W, Luo P, An N, et al. Manure application increased crop yields by promoting nitrogen use efficiency in the soils of 40-year soybean-maize rotation[J]. Scientific Reports, 2020,10(1):1-10.
- [29] 陈颖,刘玉学,陈重军,等.生物炭对土壤有机碳矿化的激发效应及其机理研究进展[J].应用生态学报,2018,29(1):314-320.
- [30] 栾军伟,刘世荣.土壤呼吸的温度敏感性:全球变暖正负反馈的不确定因素[J].生态学报,2012,32(15):4902-4913.
- [31] Liu H. Thermal response of soil microbial respiration is positively associated with labile carbon content and soil microbial activity[J]. Geoderma, 2013,193:275-281.
- [32] He N P, Wang R M, Gao Y, et al. Changes in the temperature sensitivity of SOM decomposition with grassland succession: implications for soil C sequestration[J]. Ecology and Evolution, 2013,3(15):5045-5054.