

水分状况对水稻土有机碳矿化动态的影响

郝瑞军^{1,2}, 李忠佩^{1,2*}, 车玉萍¹

(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 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 水分状况影响土壤水溶性有机 C (DOC) 溶出, 而 DOC 含量变化与土壤有机 C 矿化动态有密切关系。通过室内试验, 研究了不同水土比提取条件对太湖地区水稻土(黄泥土) DOC 含量的影响, 观测了培育过程中土壤 DOC 含量及土壤有机 C 矿化的动态变化。结果表明, 土壤 DOC 含量随着水土比的增大而升高, 且两者之间呈显著的线性关系。长期室内恒温培育条件下, 淹水处理土壤 DOC 含量显著高于好气处理 ($P < 0.01$), 且在整个培养期内都保持这一趋势, 而两处理之间的差值则表现为先增大后减小。培育过程中, 土壤日均矿化量好气处理高于淹水处理, 但两处理之间的差值则随着培养时间延长而不断缩小。

关键词: 水分状况; 水稻土; 有机碳; 矿化

中图分类号: S153.6

土壤有机 C 是土壤重要的组成部分和陆地生态系统最大的有机 C 库, 其含量高低是表征土壤质量的一个重要因子, 不仅影响着土壤物理、化学以及生物学性质, 而且在全球 C 循环中起着重要作用, 与温室气体的排放及大气 CO₂ 固定密切相关^[1]。

土壤有机 C 的矿化是土壤中重要的生物化学过程^[2], 其速率受温度、水分、土壤类型等因素的影响。许多报道都揭示了水分对有机 C 矿化的重要作用, 大多数结果都认为淹水抑制了微生物活性, 降低了土壤中有机 C 的矿化速率。但是, 由于淹水也增加了水溶性有机 C 的溶出, 提高微生物活动的底物浓度, 有可能增加土壤有机 C 的矿化量。近年来, 已有一些文献报道了淹水条件下土壤有机 C 矿化速率高于好气处理的结果^[3-4]。综合来看, 水分状况对土壤有机 C 矿化的影响可能包括微生物活动和有机 C 的解聚释放两方面, 其机理仍需进一步深入揭示。

本研究采用不同有机 C 含量梯度样品, 设置不同水分状况处理, 通过布置室内培育试验观测培养过程中水溶性有机 C 含量变化和土壤有机 C 矿化动态, 旨在揭示水分状况对土壤有机 C 矿化的影响规律, 结果将有助于进一步深入揭示水稻土 C 循环的本质特征。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

选择江苏省常熟市谢桥镇明晶村水稻示范区内相邻的不同有机 C 含量水平的田块, 其中 A、B 为多年耕种的水稻田, C 为水稻田改种一年大豆, D 为水稻田改种一年玉米, E 为水稻田改种一年苗木, 采用多点混合的方法采集表层 (0~20 cm) 土壤样品。样品经挑根处理后分成两份, 一份新鲜样品过 2 mm 筛, 4℃ 下保存, 一份风干后磨细备用。供试土壤的基本理化性状见表 1。

1.2 试验设计

1.2.1 不同水土比提取条件下土壤水溶性有机 C (DOC) 含量变化 称取相当于 10 g 风干土的新鲜土样, 分别按水土比 2:1、4:1、6:1、8:1、10:1 加入超纯水, 振荡 30 min, 然后在 4000 r/min 转速下离心 20 min, 取上清液过 0.45 μm 醋酸纤维滤膜, 测定滤液中 DOC 含量。

1.2.2 培养过程中土壤 DOC 含量动态变化 称取相当于 50 g 风干土的新鲜土样, 置于 200 ml 塑料瓶中分别设置淹水与好气处理, 淹水处理按水土比为 1:1 加入超纯水, 好气处理调节水分使土壤含水量为其最大含水量的 60%, 在室内 28℃ 下开盖恒

①基金项目: 国家自然科学基金项目 (40471066) 资助。

* 通讯作者 (zhpli@issas.ac.cn)

作者简介: 郝瑞军 (1981—), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事土壤生物化学研究。E-mail: rjhao@issas.ac.cn

表 1 供试土壤的理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of tested soils

土壤 编号	pH	总有机 C (TOC) (g/kg)	全 N (g/kg)	DOC (mg/kg)	C/N	DOC/TOC (%)	微生物生物量 C (mg/kg)	微生物生物量 N (mg/kg)
A	5.85	18.0	1.86	35.40	9.66	0.18	1250.74	66.94
B	6.24	23.5	2.32	23.14	10.15	0.10	638.84	67.51
C	7.99	9.08	1.02	31.05	8.90	0.34	235.18	46.67
D	4.85	9.77	1.15	33.70	8.50	0.35	96.90	20.63
E	7.69	17.0	1.73	30.14	9.80	0.18	285.21	30.74

温培养 90 天, 培养过程中定期取样, 测定时好气处理加入超纯水使达到水土比 1:1, 通过振荡提取和过滤, 测定滤液中的 DOC 含量。

1.2.3 培养过程中土壤有机 C 矿化动态 采用碱液吸收法测定培育过程中土壤有机 C 矿化量^[5]。

称取相当于 100 g 风干土的新鲜土样, 置于 500 ml 培养瓶中平铺于底部, 同样设置淹水 (水土比 1:1) 与好气处理 (调节水分最大含水量的 60%), 采用碱液吸收法在 95 天的培养时间内定期取样测定 CO₂ 释放量。

1.3 分析方法

滤液中 DOC 采用岛津 (Shimadzu) 公司的 TOC5000 仪测定。土壤有机 C 采用丘林法测定; 全 N 用半微量克氏法测定^[6]; 土壤 pH 用电位计法测定

^[7]; 土壤微生物生物量 C 和 N 采用熏蒸提取法, 提取液中的有机 C 含量用费恩法测定, 全 N 含量用蒸馏法测定^[8]。

2 结果与讨论

2.1 不同水土比提取对 DOC 含量的影响

供试土壤采自相邻的田块, 母质类型、地形条件等完全相同, 唯有有机 C 和 DOC 含量具有较大差异。通过设置不同的水分条件, 研究水土比变化对不同有机 C 含量水平土壤 DOC 的影响。结果表明 (表 2), 不同水分状况显著影响着土壤中 DOC 含量, 随着水土比的增大, 土壤中 DOC 含量均呈明显的上升趋势。当水土比从 2:1 增加到 10:1 时, 5 种土壤 (A~E) DOC 含量分别增加了 4.3~6.2 倍。

表 2 不同水土比提取条件下土壤 DOC 含量变化 (mg/kg)

Table 2 Dynamics of DOC content under different water-soil ratios

土壤编号	水土比 2:1	水土比 4:1	水土比 6:1	水土比 8:1	水土比 10:1
A	35.4	45.7	88.8	114.6	188.9
B	23.1	58.0	107.0	109.8	128.2
C	31.1	61.5	106.6	124.8	182.3
D	33.7	72.3	133.7	160.0	188.6
E	30.1	132.3	197.7	191.3	216.9

拟合结果表明, 不同土壤 DOC 含量与水土比均有很好的线性关系, 其拟合方程分别为 A: $Y = 37.588 X - 18.086$ ($R^2 = 0.9283$, $n = 5$), B: $Y = 26.178 X + 6.694$ ($R^2 = 0.9119$, $n = 5$), C: $Y = 36.562 X - 8.454$ ($R^2 = 0.9796$, $n = 5$), D: $Y = 39.746 X - 1.582$ ($R^2 = 0.9759$, $n = 5$), E: $Y = 43.25 X + 23.914$ ($R^2 = 0.8109$, $n = 5$), 式中 Y 为 DOC 含量 (mg/kg), X 为水土比。拟合方程的斜率显示, 水土比每增加 1 个单位, DOC 含量增加量在 26.18~43.25 mg/kg 之间。不同土壤条件下 DOC 含量随着水土比变化的增幅有明显差异, 这可能与土壤的理化性质及其有机质的组成结构不同有关^[9]。表 1 结果显示, 不同

土壤之间有机 C 含量的高低与 DOC 含量变化之间并没有表现出一致性, 即有机 C 含量最大的土壤其 DOC 含量并不是最大。通过把 DOC 增幅与 5 种供试土壤的原土有机 C 和 DOC 含量 (水土比 2:1) 做多元回归及相关分析可得 $F = 14.19 - 0.21 X + 0.84 Y$ (式中 F 为 DOC 增幅, X 为原土有机 C 含量, Y 为原土 DOC 含量), 其中 F 与 X、Y 之间的相关系数 R 分别为 -0.58 和 0.74。从回归方程的常数项值和和相关系数结果看, 提取条件下 DOC 含量的增幅可能更多地取决于原土 DOC 的高低, 而受原土有机 C 含量的影响较小^[2]。这表明, 短期提取条件下, 原土 DOC 含量越高, 则随着水分增加而溶出进入

溶液的土壤有机 C 量将越大。

2.2 培育过程土壤 DOC 含量动态变化

不同的水分状况处理,在整个培养期中土壤 DOC 含量都有明显差别(图 1A)。淹水处理 5 种土壤 DOC 平均含量分别为 24.6、31.4、25.2、24.8 和 28.4 mg/kg,好气处理分别为 15.6、17.0、17.2、16.4 和 17.0 mg/kg。统计分析(*t* 检验)显示,供试的 5

种土壤中同一土壤不同水分(淹水、好气)处理之间,DOC 含量差异均达到极显著水平($P < 0.01$),淹水处理土壤的 DOC 含量比好气处理高 57.7%、84.7%、46.5%、51.2%、67.1%,该值与原土有机 C 含量呈极显著正相关(相关系数 0.9279**)。这表明,在较长时间的培养条件下,有机 C 的溶出有充足的时间,则土壤 DOC 含量也决定于原土有机 C 总量的高低。

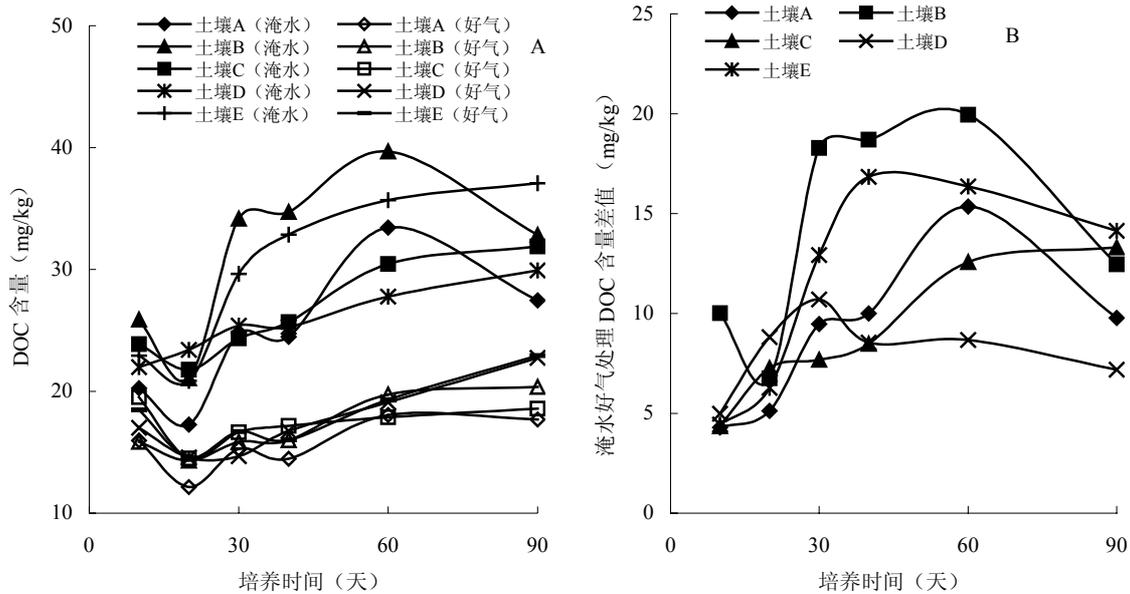


图 1 培养过程中淹水好气处理的 DOC 含量 (A) 及其差值 (B) 变化

Fig. 1 Changes of DOC contents (A) and their differences (B) under different moisture regimes during incubation period

恒温培养过程中,DOC 含量动态变化随不同有机 C 含量土壤和水分处理而异(图 1A)。总体来看,培养 20 天时,DOC 含量下降到最低,此时,好气处理的 DOC 含量仅为原土的 34.3%~62.0%,淹水处理为 48.8%~91.2%;其后,好气处理的 DOC 含量有小幅上升直至培养结束,但整个培养期内 DOC 含量均低于原土;而淹水处理的 DOC 含量则显著升高,其中土壤 A、B 至培养 60 天时达到最大,其后略有下降,土壤 C、D、E 则一直在升高,各土壤在培养 60 天时的 DOC 含量等于或高于原土的含量水平。比较培养过程中淹水处理不同土壤 DOC 含量的变异系数,土壤 A~E 分别为 22.9%、21.4%、15.1%、11.2% 和 22.4%,统计分析显示,该值与原土有机 C 含量呈显著正相关($r = 0.8253^*$)。这进一步表明,原土有机 C 含量较高的土壤,若在较长时间的淹水条件下,土壤 DOC 含量升高的幅度较大,进入溶液的量也有明显增加。

比较培养过程中同一土壤不同水分处理间

DOC 含量差值(淹水与好气处理之差)。结果表明(图 1B),土壤 C 在整个培养过程中该值均呈上升趋势;土壤 D 在开始培养后约 30 天内该值呈上升趋势,此后至培养 40 天略有所下降,其后保持相对稳定至培养结束;而土壤 A、E 则从培养开始该值呈上升趋势;分别在培养 60、40 天达到最大,其后呈下降趋势;而土壤 B 该值则相对复杂。培养过程中,不同土壤之间淹水好气处理 DOC 含量差异的变化明显不同,其原因尚不清楚。但相关分析表明,整个培养过程中的该差值的平均值与原土有机 C 含量有显著相关性($r = 0.8392^*$),而与原土 DOC 含量的相关性不明显。

2.3 培养过程中土壤有机 C 矿化动态

供试土壤有机 C 和 DOC 含量均有显著差异,培养过程中 DOC 含量动态变化有明显不同,这决定了不同土壤在培养过程中其有机 C 矿化量将有明显变化。结果表明(图 2A),好气处理条件下,土壤 A、B 在培养的前 5 天,有机 C 日均矿化量呈下

降趋势, 其后逐渐上升, 至 25~33 天达到最大值后又趋下降; 而土壤 C、D、E 则在培养的前 5~9 天有机 C 日均矿化量快速下降, 其后仍保持下降趋势, 但幅度明显趋缓。淹水处理条件下, 土壤 B、C 在培养前 5 天有机 C 日均矿化量呈下降趋势, 其后则呈上升趋势, 至 13 天时达到最大值后或保持稳定(土壤 C) 或呈下降趋势(土壤 B); 而土壤 A、D、E 则在开始培养后有机 C 日均矿化量呈上升趋势, 至 13 天时达到最大值后保持稳定至培养结束。以往的大多数研究都表明^[2-3], 培养开始后, 土壤有机 C 日均矿化量呈快速下降趋势, 并很快达到一个最低值后保持稳定, 基本符合指数函数变化, 这是因

为土壤有机 C 矿化反应的基质数量逐步减少所致。本研究结果表明, 情况并非完全如此, 培养过程中土壤有机 C 日均矿化量有可能出现增加, 并不完全符合指数函数的变化趋势。显然, 培养过程中 DOC 的溶出释放影响反应基质的浓度和有效性以及水分状况影响微生物活性是造成这种变化的主要原因。但相关分析表明, 培养过程中好气处理土壤 DOC 含量与有机 C 日均矿化量呈显著至极显著负相关 ($r = -0.7685 \sim -0.9216$, $n = 6$), 淹水处理二者之间相关性不明显。可能土壤有机 C 日均矿化量对 DOC 含量变化的响应有滞后性, 二者之间的明确关系如何表现尚难确定。

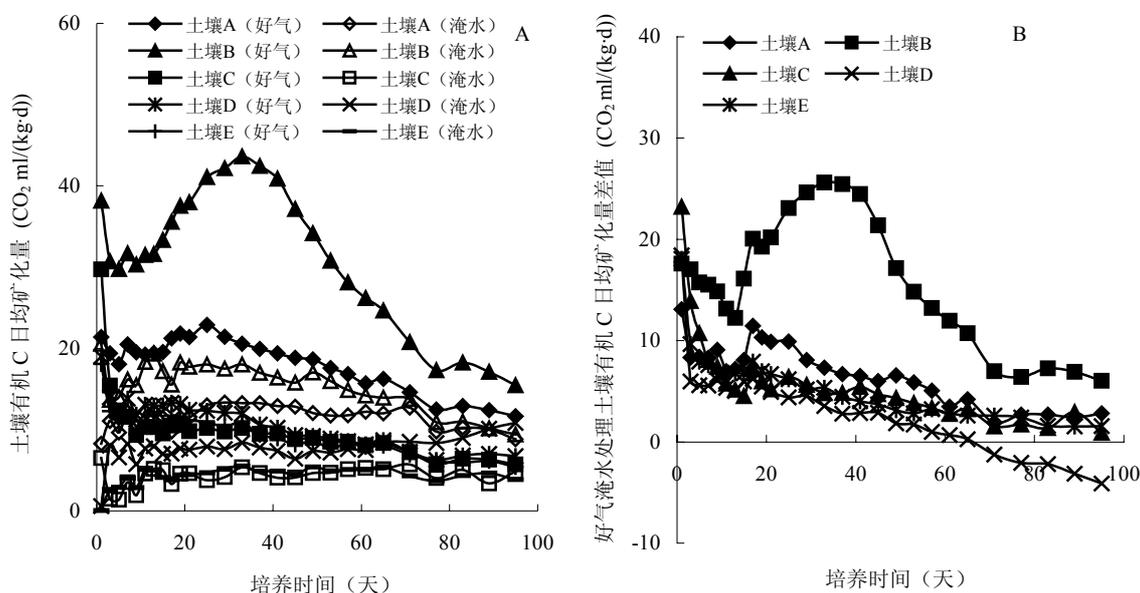


图 2 培养过程中好气淹水处理的土壤有机 C 日均矿化量 (A) 及其差值 (B) 变化

Fig. 2 Changes of organic C daily mineralization (A) and their differences (B) under different moisture regimes during incubation period

比较不同水分状况处理的土壤有机 C 日均矿化量差值。结果表明 (图 2B), 整个培养期内总体表现为好气处理的土壤有机 C 日均矿化量显著高于淹水处理 ($P < 0.05$)。但好气淹水处理之间土壤有机 C 日均矿化量的差值, 除土壤 A、B 在培养的 13~17 天 (土壤 A) 或 13~33 天 (土壤 B) 有升高趋势外, 其他培养时间及土壤则均呈下降趋势。这表明, 随着培养过程的延长, 好气淹水处理的土壤有机 C 日均矿化量趋于接近, 由于淹水处理培养后期 DOC 含量较高, 土壤有机 C 日均矿化量反而保持较高水平。特别值得注意的是, 土壤 D 在淹水处理条件下, 培养后期 (45 天后) 其有机 C 矿化速率有明显

上升的趋势, 并且在培养的第 65 天后开始高于好气处理。这表明, 一定的土壤和水分条件下, 某一时间段内确实有可能出现淹水处理土壤有机 C 矿化量高于好气处理的情况。但出现这种情况的土壤和水分条件, 目前尚不能确定。

3 小结

水分状况影响土壤 DOC 含量及有机 C 矿化^[10]。Akira Sato^[11]认为土壤有机 C 矿化速率与 DOC 呈极显著线性关系。土壤有机 C 的矿化不仅取决于土壤溶液中 DOC 的含量, 也与土壤中活性微生物的数量与种类有关。水分状况影响土壤有机 C 矿化速率

和矿化量可能有两方面原因：一是对土壤有机 C 组分的影响，二是对土壤微生物活性的影响，淹水提高了土壤有机 C 的溶出和导致团聚体的分散，进而增加 DOC 含量^[2]。但是在淹水条件下，改变了土壤原来的通气状态，抑制了土壤微生物的活性^[12]。淹水后土壤有机 C 矿化速率究竟是升高还是降低将取决于这两方面因素的综合作用，如果淹水使得大量 DOC 溶出，而对微生物影响相对较小则应该表现为土壤有机 C 矿化速率升高；反之，如果淹水对 DOC 溶出的贡献相对小于对微生物的影响则表现为土壤有机 C 矿化速率降低。目前对 DOC 的含量动态、生物有效性、影响因素等所知甚少，而 DOC 含量与土壤有机 C 矿化之间的关系可能非常复杂，要正确判定淹水处理有机 C 矿化速率高于好气处理的土壤和环境条件，还需要进一步的工作，但对于有机 C 量丰富的高肥力水稻土，可以初步判定这种情况有客观存在的可能。

参考文献：

- [1] Lal R. Why carbon sequestration in agriculture soils // Kimble JM. Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil. New York: Lewis publishers, 2002: 21-30
- [2] 李忠佩, 张桃林. 可溶性有机碳含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系. 土壤学报, 2004, 41 (4): 544-552
- [3] 朱培立, 黄东迈. ¹⁴C 标记秸秆和根茬在淹水及早地土壤中的矿化特征. 土壤通报, 1994 (7): 67-70
- [4] 蔡祖聪. 土壤水分状况对 CH₄ 氧化, N₂O 和 CO₂ 排放的影响. 土壤, 1999, 31 (6), 289-298
- [5] 孙波, 车玉萍. 测定土壤有机质中 ¹²C 及 ¹³C 分解速率的密闭培养法. 土壤, 1997, 29 (1): 51-53
- [6] 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978: 593
- [7] 鲁如坤主编. 土壤农业化学分析法. 北京: 农业出版社, 2000: 638
- [8] Vance ED, Brookes PC. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. Soil Biol. Biochem., 1987, 19 (6): 703-707
- [9] 代静玉, 秦淑平. 土壤中溶解性有机质分组组分的结构特征研究. 土壤学报, 2004, 41 (5): 721-727
- [10] Chow AT, Kenneth K. Temperature, water content and wet-dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils. Soil Biol. Biochem., 2006, 38 (3): 477-488
- [11] Akira S, Masayuki S. Relationship between rate of carbon dioxide evolution, microbial biomass carbon, and amount of dissolved organic carbon as affected by temperature and water content of a forest and an arable soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 1999, 30 (19): 2593-2605
- [12] 焦昆, 李忠佩. 土壤溶解有机质的含量动态及转化特征的研究进展. 土壤, 2005, 37 (6): 593-601

Effect of Moisture Regime on Dynamics of Soil Organic Carbon Mineralization

HAO Rui-jun^{1,2}, LI Zhong-pei^{1,2}, CHE Yu-ping¹

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

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Soil moisture influences release of soil dissolved organic carbon (DOC), which is related closely to mineralization of soil organic carbon. By lab incubation experiment, dynamics of DOC contents under different water/soil ratios and mineralization of soil organic carbon under different moisture regimes during the incubation period were observed to analyze relationship between DOC content and soil organic carbon mineralization. Results indicated a significantly positive linear relationship between DOC content and water-soil ratio; DOC concentration under submergence treatment was significantly higher than that under aerobic treatment ($P < 0.01$) during whole incubation period, and difference increased at beginning but then decreased with incubation time; Daily mineralization under aerobic condition was higher than that under submergence, but difference decreased gradually with incubation time.

Key words: Moisture regime, Paddy soil, Organic carbon, Mineralization