

张敬智, 马 超, 郅红建. 淹水和好气条件下东北稻田黑土有机碳矿化和微生物群落演变规律[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1160–1166.
ZHANG Jing-zhi, MA Chao, GAO Hong-jian, et al. Investigation of soil organic carbon mineralization and microbial community structure evolution of north-east paddy black soil in waterlogged and aerobic conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1160–1166.

淹水和好气条件下东北稻田黑土有机碳矿化和微生物群落演变规律

张敬智, 马 超, 郅红建*

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

摘 要:通过 360 d 室内恒温 (30 °C) 培养, 研究淹水和好气条件下土壤碳的动态变化及微生物群落结构演变规律。结果表明, 淹水条件下, 土壤 TOC (总有机碳) 降幅 (8.68%) 略高于其在好气条件下的降幅 (6.23%), 但差异不显著 ($P>0.05$), DOC (溶解性有机碳) 含量显著高于其在好气条件下的含量 ($P<0.05$)。土壤有机碳在淹水条件下的矿化速率常数 (0.009 5) 显著高于其在好气条件下的矿化速率常数 (0.007 5)。土壤淹水条件下的 AWCD_{96h} (96 h 平均光密度) 呈现 0~15 d 显著低于好气条件, 30~60 d 差异不显著, 60~360 d 显著高于好气条件的规律 ($P<0.05$)。淹水条件下, 土壤微生物由以利用氨基酸类碳源为主, 演变为以利用酚酸类 (30~60 d) 和氨基酸类碳源 (180~360 d) 为主; 而在好气条件下则演变为以利用多聚物类碳源 (60~360 d) 为主。淹水提高了土壤 DOC 含量, 增加了土壤微生物可利用底物和微生物活性, 提高了土壤微生物对酚酸类和氨基酸类碳源利用, 加快了土壤有机碳矿化。

关键词:土壤有机碳; 矿化特征; 水分条件; 微生物活性; 微生物群落结构

中图分类号: S158 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)06-1160-07 doi:10.11654/jaes.2017-0012

Investigation of soil organic carbon mineralization and microbial community structure evolution of northeast paddy black soil in waterlogged and aerobic conditions

ZHANG Jing-zhi, MA Chao, GAO Hong-jian*

(College of Resources and Environment, Anhui Agriculture University, Hefei 230036, China)

Abstract: Soil carbon dynamics and microbial community structure were studied at 30 °C under simulated waterlogged and aerobic conditions in the laboratory. Results showed that soil total organic carbon (TOC) concentrations did not change during the 360-day incubation period in either waterlogged or aerobic conditions. The change in TOC concentrations was greater under waterlogged conditions (8.68%) than under aerobic conditions (6.23%), but the difference was not statistically significant ($P>0.05$). During the entire incubation period, the concentration of dissolved organic carbon (DOC) in waterlogged conditions was significantly greater than that under aerobic conditions ($P<0.05$). The mineralization rate constant (0.009 5 d⁻¹) in waterlogged conditions was also significantly greater than that (0.007 5 d⁻¹) in aerobic conditions; both rates were well fitted by the first-order kinetic equation. Values of the average well color development at 96 h (AWCD_{96h}) (an index of catabolism of specific carbon substrates) for microbial communities in waterlogged conditions were significantly lower than those in aerobic conditions from 0 to 15 d. There were no significant differences in AWCD from 30 to 60 d, but from 180 to 360 d, the AWCD values for anaerobic microbial communities were significantly greater ($P<0.05$) than those in aerobic conditions. At the beginning of incubation, the carbon resources used by soil microorganisms were mainly amino acids. In waterlogged conditions, they gradually changed to phenolic acids

收稿日期: 2017-01-03

作者简介: 张敬智 (1989—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 从事植物营养研究。E-mail: 995212139@qq.com

* 通信作者: 郅红建 E-mail: hjgao@ahau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFD0200107; 2016YFD030080103; 2016YFD0300901)

Project supported: National Key Research and Development Program (2016YFD0200107; 2016YFD030080103; 2016YFD0300901)

(30~60 d) and amino acids (180~360 d), while they changed to polymer carbon sources (60~360 d) in aerobic conditions. Waterlogged conditions increased the contents of soil DOC, soil microbial activity and metabolism, and the utilization of phenolic acid and amino acid carbon sources by soil microorganisms, and thus promoted the mineralization of soil organic carbon.

Keywords: soil organic carbon; mineralization characteristics; water condition; microbial activity; microbial community structure

土壤有机碳是土壤有机质的主要成分,可以调节土壤理化和生物学特性,改善土壤结构和养分循环^[1]。稻田土壤有较高的碳储量和碳密度^[2],是大气中 CO₂ 的重要汇之一^[3]。稻田土壤中有机碳含量的高低,不仅关系到水稻的产量,而且影响大气中 CO₂ 的平衡^[4]。因此,研究稻田土壤有机碳平衡及其矿化规律,对于稻田土壤碳库管理具有重要意义。

稻田土壤有机碳的矿化过程受水分、温度、施肥、耕作方式等诸多因素的影响^[5-7],其中水分对土壤有机碳矿化的影响较大,主要包括两方面:水分影响土壤 DOC 的含量,调节土壤微生物可利用的底物^[8];水分影响土壤微生物的活性和群落结构,进而调控土壤有机碳的矿化^[9]。有研究表明,稻田淹水条件下土壤有机碳累积矿化量高,有机碳矿化速率大于好气条件^[10];稻田土壤淹水条件下有机碳周转速率较快,其矿化速率平均比好气条件高 24.09%^[11]。也有研究显示,稻田土壤淹水条件下有机碳的矿化速率与好气条件下没有显著差异^[12]。张薇等^[13]的研究表明,稻田淹水条件土壤有机碳的矿化速率显著低于好气条件。这可能是由于淹水条件下形成的厌氧环境,抑制了土壤微生物的生长所致^[14];同时,淹水条件下从木质素衍生而来的苯酚类物质更难降解^[15],导致土壤有机碳的累积。有关水分条件对土壤有机碳矿化的影响尚缺少一致认同的结论,尚有待进一步研究。

东北地区是我国重要的商品粮基地,在国家粮食安全中有着举足轻重的地位^[16]。然而,该地区土壤有机碳库正面临严峻的挑战,深厚的黑土腐殖质层由最初的 60~70 cm 下降到 20 cm,耕层有机质含量也由原初的 4%~6% 下降到 2%~3%^[17],直接影响土壤肥力和粮食产量。水稻是东北地区种植的主要作物,其种植模式是水田和旱田,稻田土壤长期处于淹水(水田)和好气(旱田)条件下,使土壤有机碳的矿化有较大差异。梁巍等^[18]研究了黑龙江黑土稻田土壤呼吸,发现在水稻生长前期,土壤呼吸强度增大,随后略有下降,之后又逐渐增加。然而,有关东北稻田土壤自身有机碳在淹水和好气条件下自然矿化规律及其与微生物群落演变的耦合机制缺少深入研究。

本文以东北水稻土为研究对象,通过在淹水和好

气条件下室内培养实验,比较培养过程中土壤 TOC (总有机碳)和 DOC(溶解性有机碳)等的动态变化特征,分析土壤微生物 AWCD_{96h}(96 h 平均光密度)值及微生物利用碳源的演替规律,揭示淹水和好气条件下土壤有机碳矿化的微生物影响机制,以期为东北地区土壤有机碳的管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤于 2015 年 6 月采自黑龙江省佳木斯市建三江七星农场(北纬 47°59'13.01",东经 133°15'2.03")土地利用方式为单季水稻,土壤类型为黑土,属寒温带湿润季风气候区,采样深度为 0~20 cm,采集耕层土壤,剔除其中的石块和植物根系,装于塑料袋中。土壤基本理化性质:TOC 14.37 g·kg⁻¹,全氮 1.25 g·kg⁻¹,速效钾 226.67 mg·kg⁻¹,速效磷 40.11 mg·kg⁻¹,pH 5.00,含水量 164.6 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

将采集的新鲜土壤过 0.5 cm 筛,测定土壤含水量。调节土壤含水量至 75% 的土壤持水量(Water holding capacity, WHC),之后将土壤放置在 30 °C 恒温培养箱中培养 12 h,以恢复土壤微生物的活性。称取相当于 350 g 烘干土壤的新鲜土壤,装入 500 mL 培养瓶中,保持 75% 的土壤持水量,以此模拟好气条件。另取相同质量的新鲜土壤,装入 500 mL 培养瓶中,加蒸馏水至完全浸没土壤(2 cm),以此模拟淹水条件。培养瓶用带双孔的橡皮塞封口,每隔 7 d 称重补水,以保持土壤含水量稳定。将培养瓶转移至 30 °C 恒温培养箱中培养至 0、30、60、120、180、360 d 时分别进行破坏性取样。每个试验处理在每个取样时间点均设置 3 个重复。

另取相当于 350 g 烘干土壤的新鲜土壤置于 1 L 培养瓶中^[19],培养瓶上部保留足够的空间,防止形成厌氧环境;土壤含水量保持为田间持水量的 75%,以此模拟好气条件。另取相同质量的新鲜土壤,装入 1 L 培养瓶中,加蒸馏水至完全浸没土壤(2 cm),以此模拟淹水条件。将培养瓶转移至 30 °C 恒温培养箱中培养到 3、9、15、30、60、120、180、360 d 时分别收集

CO₂ 气体。每个试验处理在每个取样时间点均设置 3 个重复。每次取样之后,用真空泵排净内部空气,继续培养。

1.3 测定方法

1.3.1 CO₂ 分析

收集的气体用气相色谱仪分析,主要工作条件:仪器型号为 Agilent Technologies 7890B;色谱柱为 porapak Q 80/100 SS;进样量为 0.5 mL;GC system 柱温为 60 ℃,载气为 N₂,流速为 6.5 mL·min⁻¹;FID 检测器(CO₂),温度为 300 ℃,H₂ 为 50 mL·min⁻¹,空气为 400 mL·min⁻¹,尾吹为 3 mL·min⁻¹,尾吹气体为 Ar/CH₄ 混合气体,外标法定量。

1.3.2 微生物分析

称取新鲜土样 10 g,放入盛有 90 mL 无菌水的三角瓶中,振荡摇匀 10 min 使土和水充分混合,静置 15 min。然后用移液枪从三角瓶中吸取上清液 2 mL,放入 18 mL 预先准备好的盛有无菌水的试管中,摇匀,再从中吸取 2 mL 放入 18 mL 无菌水的试管中,此时为稀释 1000 倍的土壤溶液,此操作过程均在无菌环境中进行。将稀释后的土壤水溶液摇匀,用 8 通道移液枪取 150 μL 接种到 Biolog ECO 板上,放入 30 ℃恒温培养箱中培养,每隔 24 h 用酶标仪在 590 nm 下测 OD 值。

1.3.3 DOC 分析

称取相当于 4 g 风干土壤的新鲜土壤,加入 20 mL 去离子水振荡 1 h^[20],10 000 r·min⁻¹ 离心 5 min,过 0.45 μm 滤膜,用岛津 MUII N/C2100 TOC 分析仪测定 TOC 含量。TOC 分析仪的工作条件为:进样体积 300 μL,吹扫时间 90 s,炉温 800 ℃,通过标准曲线进行定量。

1.3.4 其他指标

土壤 TOC 采用重铬酸钾外加加热法分析;土壤含水量用 105 ℃烘干法测定。

1.4 数据计算与处理

平均光密度值 $AWCD = \sum(C-R)/n$

式中: C 为每个有培养基孔的光密度值; R 为对照孔的光密度值; n 为培养基数据,ECO 板 n 值为 31。

采用曲线整合方法估计颜色扩展^[21]:

$$\text{梯形面积 } S = \sum_{i=1}^n \frac{v_i + v_{i-1}}{2} (t_i - t_{i-1}),$$

式中: v_i 为 t_i 时刻的光密度。

碳源平均利用率 $= (\sum S_i)/N$

式中: S_i 为每种碳源的梯形面积; N 为每类碳源所包

含的碳水化合物类、羧酸类、胺类、氨基酸类、酚酸类化合物和多聚物类, N 取值分别为 10、7、2、6、2、4。

一级动力学方程拟合土壤有机碳的矿化过程:

$$N_t = N_0(1 - e^{-kt})$$

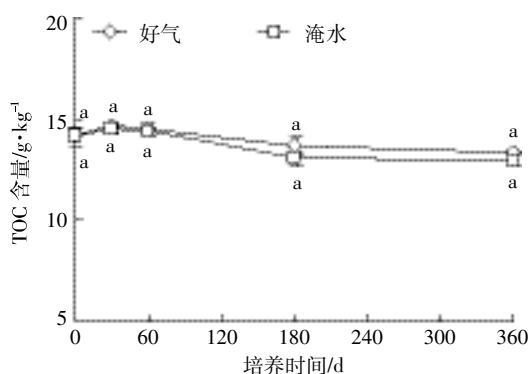
式中: N_t 为某时刻 CO₂ 的累积量, mL·kg⁻¹; k 为碳矿化速率常数; N_0 为碳素的矿化潜力,即所能释放的 CO₂ 最大值, mL·kg⁻¹; t 为培养时间, d。

试验数据采用 Microsoft Excel 2007 软件作图,采用 SPSS 19.0 软件单因素方差分析(One way ANOVA)方法分析淹水和好气处理之间的差异,采用 Origin 8.0 软件对土壤矿化碳的矿化过程进行一级动力学曲线拟合。

2 结果与分析

2.1 土壤 TOC 的动态变化

在淹水和好气条件下,土壤 TOC 含量在 0~60 d 的培养时间内变化不明显,在 60~360 d 逐渐下降。在 0~360 d 的培养时间内,淹水和好气条件下土壤 TOC 的含量变化不明显(图 1)。经过 360 d 的培养,土壤 TOC 在淹水和好气条件下的含量分别比培养初始时减少了 8.68% 和 6.23%,均与初始含量达显著差异水平($P < 0.05$)。



同一培养时间下不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
Different letter at the same incubation time indicates significant differences between treatments($P < 0.05$). The same below

图 1 淹水和好气条件下土壤总 TOC 的动态变化

Figure 1 The dynamic changes of soil TOC in waterlogged and aerobic conditions

2.2 土壤 DOC 的动态变化

土壤 DOC 的含量在淹水条件下呈现 0~60 d 上升、60~360 d 下降的规律;而在好气条件下则呈现出 0~30 d 略有上升、随后(30~360 d)逐渐下降的趋势(图 2)。淹水条件下土壤 DOC 在第 60 d 达最大值

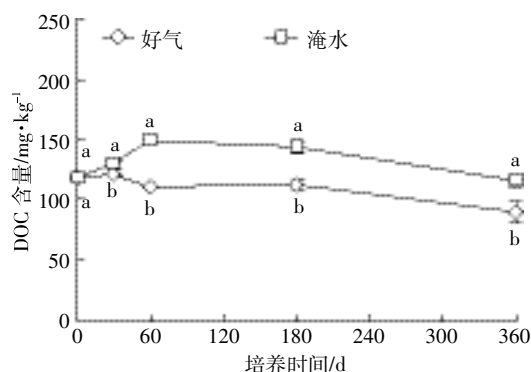


图2 淹水和好气条件下土壤 DOC 的动态变化

Figure 2 The dynamic changes of DOC in waterlogged and aerobic conditions

($148.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 第 360 d 达到最小值($115.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);而在好气条件下,土壤 DOC 在第 30 d 达最大值($120.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),第 360 d 达最小值($89.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。在不同培养时期,淹水条件下土壤 DOC 含量均显著高于好气条件($P < 0.05$)。

2.3 土壤有机碳的矿化规律

在淹水和好气条件下,土壤有机碳的矿化(CO_2 累积释放量)随时间的变化表现出相同的变化趋势,即在 0~60 d 快速上升、60~180 d 缓慢上升、180 d 之后保持稳定(图 3)。在 0~360 d 培养时间内,淹水条件下土壤 CO_2 的累积释放量显著高于好气条件;培养结束时,土壤 CO_2 在淹水条件下的累积释放量为 $960.11 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$,比好气条件下(累积释放量 $620.21 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)高 54.8%。土壤有机碳矿化的一级动力学方程拟合结果见表 1,在淹水条件下土壤有机碳的矿化速率常数(0.009 5)和潜在矿化量($990.04 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)高于好气条件(矿化速率常数 0.007 5、潜在矿化量 $647.52 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

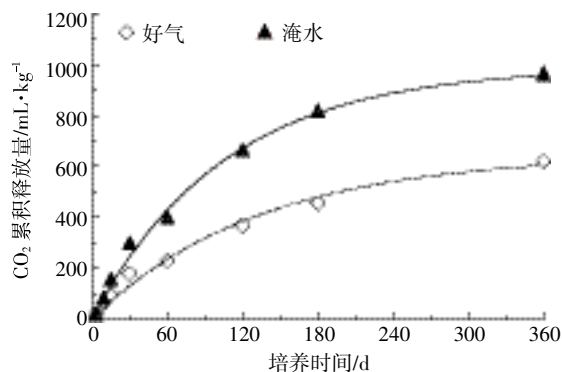


图3 淹水和好气条件下土壤有机碳的累积矿化

Figure 3 The cumulative mineralization of soil organic carbon in waterlogged and aerobic conditions

表 1 土壤有机碳矿化的一级动力学方程拟合

Table 1 The first order kinetic equation of soil organic carbon mineralization

处理	$N_0/\text{mL} \cdot \text{kg}^{-1}$	k	R^2	P
好气	647.52 ± 42.33	0.0075 ± 0.00	0.983	< 0.01
淹水	990.04 ± 32.61	0.0095 ± 0.00	0.994	< 0.01

这说明,土壤有机碳在淹水条件下的矿化速率明显高于好气条件,即淹水条件促进了土壤有机碳的矿化。

2.4 土壤微生物群落结构的变化

2.4.1 土壤微生物 AWCD 值的动态变化

土壤微生物的 AWCD 值反映了土壤微生物代谢活性。随着培养时间的延长,土壤微生物利用碳源的 AWCD 值变化符合微生物生长的 S 型曲线(图 4A、图 4B)。在好气和淹水培养条件下,土壤微生物的 AWCD 值分别呈现 $15 \text{ d} > 0 \text{ d} > 30 \text{ d} > 60 \text{ d} \approx 180 \text{ d} \approx 360 \text{ d}$ 和 $360 \text{ d} \approx 180 \text{ d} > 15 \text{ d} > 0 \text{ d} > 30 \text{ d} > 60 \text{ d}$ 的规律。在淹水和好气培养条件下,土壤 AWCD 值均在 0~96 h 内上升较快,而在 96~192 h 上升变缓,即 96 h 为土壤微生物代谢活性的生长拐点。进一步分析发现,在 0~15 d 内,土壤微生物在好气条件下的 $\text{AWCD}_{96\text{h}}$ 值显著高于淹水条件;在 15~60 d 内,两者没有显著差异;而在 180~360 d 内,土壤微生物在淹水条件下 $\text{AWCD}_{96\text{h}}$ 值显著高于好气条件($P < 0.05$)。

2.4.2 土壤微生物对不同碳源的利用

土壤微生物对碳水化合物类、羧酸类、胺类、氨基酸类、酚酸类和多聚物类等不同种类碳源利用能力反映了微生物群落的结构组成。在淹水条件下(图 5A),土壤微生物在 0~15 d 内主要利用氨基酸类碳源,分别占其利用总碳源的 24%(0 d)、27%(15 d);在 30~60 d 主要利用酚酸类碳源,分别占其利用总碳源的 27%(30 d)、39%(60 d);在 180~360 d 主要利用氨基酸类碳源,分别占其利用总碳源的 26%(180 d)、27%(360 d)。在好气培养条件下(图 5B),土壤微生物在 0~30 d 内主要利用氨基酸类碳源,分别占其利用总碳源的 24%(0 d 和 15 d)、25%(30 d);在 60~360 d 内主要利用多聚物类碳源,分别占其利用总碳源的 24%(60 d)、34%(180 d)和 40%(360 d)。

3 讨论

土壤有机碳是评价土壤质量和可持续发展管理的重要指标之一,其含量高低直接影响土壤肥力和质量^[22]。土壤有机碳矿化是土壤固有有机质和外源有机质(如植物凋落物、根茬以及人为有机物料的投入等)

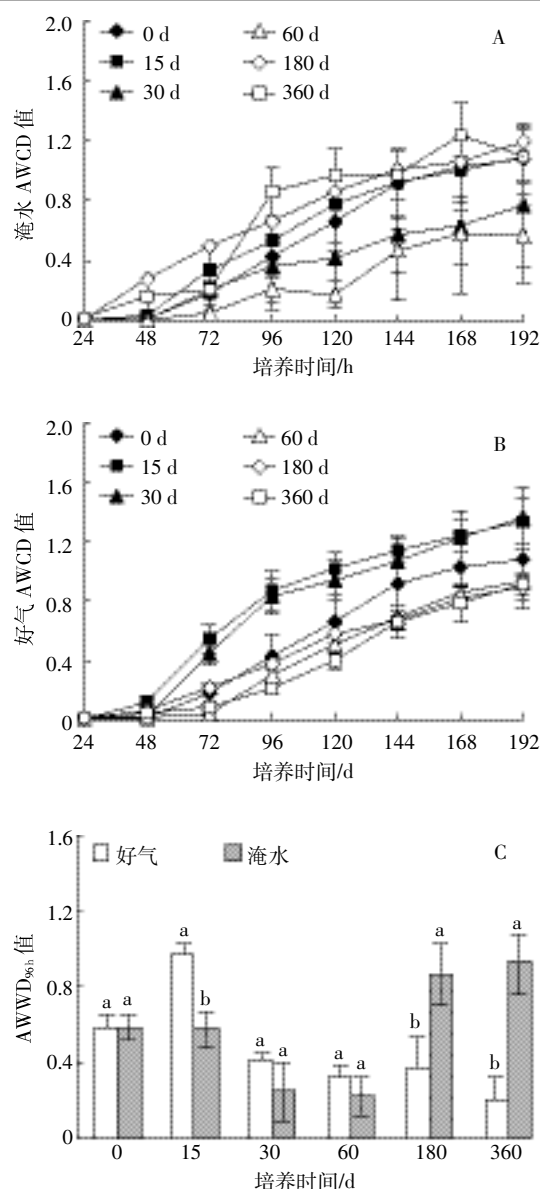


图4 淹水和好气条件下土壤微生物 AWCD_{96h} 的动态变化
Figure 4 The dynamic change of AWCD_{96h} in waterlogged and aerobic conditions

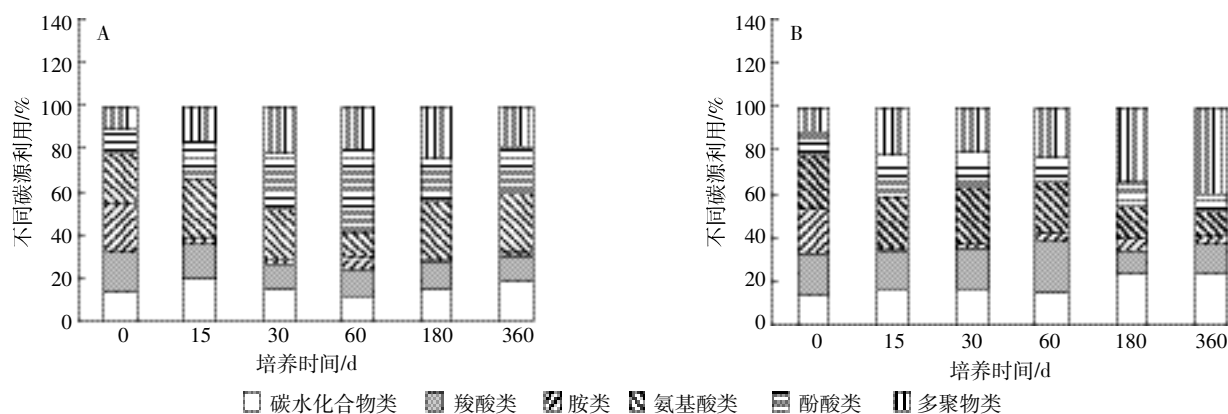


图5 淹水(A)和好气(B)条件下土壤微生物对六类碳源利用的动态变化

Figure 5 The dynamic change of soil microbial carbon source utilization in waterlogged(A) and aerobic(B) conditions

在微生物作用下分解,转化为 CO₂ 的过程^[23],是陆地生态系统碳循环过程的重要环节,对维持土壤生产力和温室气体的稳定具有重要意义。

土壤水分含量通过调节土壤 DOC 的含量与组成以及土壤微生物的活性与群落结构^[24],影响土壤有机碳的矿化。本文的研究结果表明,淹水条件下土壤有机碳的矿化显著高于好气条件。这可能是由于土壤有机碳必须首先进入土壤溶液中才能被矿化^[8],淹水条件破坏了土壤团聚体结构,导致土壤中易矿化组分溶出^[25],提高了土壤中 DOC 含量,增加了土壤微生物可利用的底物,使淹水条件下土壤有机碳的矿化速率显著高于好气条件。这与李忠佩等^[8]、黄东迈等^[26]、唐国勇等^[10]报道的淹水条件提高了土壤有效碳库,加快了土壤有机碳矿化的研究结果一致。然而孙中林等^[27]和 Sahrawat 等^[15]的研究表明,淹水条件不利于土壤有机碳的矿化,造成土壤有机碳的累积,研究结果的差异可能是由于不同的土壤类型对水分的响应不同,外源有机物料的加入抑制了土壤原有有机碳矿化,而且淹水条件下形成的有机物结构更加复杂。

土壤微生物是土壤有机碳矿化的驱动器^[28]。水分影响了土壤微生物的活性和群落结构,进而影响了土壤有机碳的矿化^[29]。Zhang 等^[30]和刘岳燕等^[31]发现,土壤微生物在淹水条件下的活性显著高于好气条件。本研究结果表明,土壤微生物活性(AWCD_{96h})在淹水条件下 0~15 d 内显著低于好气条件,在 30~60 d 差异不显著,而在 60~360 d 表现为淹水条件显著高于好气条件。这可能是由于淹水条件下短期培养,水分的加入形成了厌氧环境,降低了土壤 Eh,抑制了土壤中好氧微生物的生长^[32],使淹水条件下土壤微生物 AWCD_{96h} 显著低于好气条件。然而,随培养时间延长,淹水条件提高土壤 DOC 的含量,导致微生物可利用的碳源增

加^[33],使淹水条件下土壤微生物的活性显著高于好气条件,从而加快了土壤有机碳的矿化。

本研究还显示,淹水和好气条件下微生物群落结构的差异,可能也是土壤有机碳矿化差异的一个重要原因。刘长红等^[34]的研究表明,稻田改为旱田后土壤细菌数量显著降低,但对真菌并没有明显影响。据Bailey等^[35]报道,真菌为主导的微生物群落结构会导致土壤有机碳的累积。培养初始(0 d)时,土壤微生物主要利用氨基酸类碳源,在好气条件下逐渐演替为利用多聚物类碳源(60~360 d);而淹水条件下逐渐向利用酚酸类碳源(30~60 d)和氨基酸类碳源(180~360 d)演变,促进了土壤有机碳的周转。这可能因为以利用氨基酸类和酚酸类碳源为主的微生物群落结构,比以利用多聚物类碳源为主的微生物群落结构更加有利于土壤有机碳的周转。

本文的研究结果显示,淹水条件促进了土壤团聚体中有机碳的溶出,提高了土壤有机碳的矿化速率,降低了土壤有机碳的含量;而在好气条件下,土壤DOC含量较低,土壤微生物利用DOC等易分解碳源,保留了难降解组分,进而减缓了土壤有机碳的矿化。这为东北地区水田和旱地土壤有机碳的稳定和地力的维持提供了理论依据。

4 结论

(1)相对于好气培养条件,淹水提高了土壤DOC的含量,而TOC的含量变化不明显。

(2)相对于好气培养条件,淹水前期抑制土壤微生物的活性,后期提高了土壤微生物的活性,土壤微生物群落结构在淹水条件下逐渐演变为以利用酚酸类和氨基酸类等易矿化碳源为主,而在好气条件则演变为以利用多聚物类难矿化碳源为主。

综上,与好气培养条件相比,淹水增加了土壤DOC和易矿化碳源含量,提高了土壤微生物的活性,加快了土壤有机碳的矿化。

参考文献:

- [1] 杨景成,韩兴国,黄建辉,等.土地利用变化对陆地生态系统碳贮量的影响[J].应用生态学报,2003,14(8):1385-1390.
YANG Jing-cheng, HAN Xing-guo, HUANG Jian-hui, et al. Effects of land use change on carbon storage in terrestrial ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1385-1390.
- [2] 潘根兴,赵其国,蔡祖聪.《京都议定书》生效后我国耕地土壤碳循环研究若干问题[J].中国基础科学,2005,7(2):12-18.
PAN Gen-xing, ZHAO Qi-guo, CAI Zu-cong. Issues on C cycling studies of cropland soils of China in commitment to Kyoto Protocol[J]. *China Basic Science*, 2005, 7(2): 12-18.
- [3] 李忠佩,林心雄,车玉萍.中国东部主要农田土壤有机碳库的平衡与趋势分析[J].土壤学报,2002,39(3):351-360.
LI Zhong-pei, LIN Xin-xiong, CHE Yu-ping. Analysis for the balance of organic carbon pools and their tendency in typical arable soils of eastern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(3): 351-360.
- [4] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model[J]. *Nature*, 2000, 408(6809): 184-187.
- [5] Benbi D K, Khosa M K. Effects of temperature, moisture, and chemical composition of organic substrates on C mineralization in soils[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2014, 45(21): 2734-2753.
- [6] 汪张懿,宗良纲,褚慧,等.有机肥分解及其对土壤有机碳矿化影响的模拟研究[J].农业环境科学学报,2013,32(1):36-42.
WANG Zhang-yi, ZONG Liang-gang, CHU Hui, et al. A simulation study on decomposition of organic fertilizers and its effects on soil organic carbon mineralization[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 36-42.
- [7] 路丹,何明菊,区惠平,等.耕作方式对稻田土壤活性有机碳组分、有机碳矿化以及腐殖质特征的影响[J].土壤通报,2014(5):1144-1150.
LU Dan, HE Ming-ju, OU Hui-ping, et al. Effects of tillage patterns on the labile organic carbon components, organic carbon mineralization and humus characteristics in paddy soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014(5): 1144-1150.
- [8] 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.
LI Zhong-pei, ZHANG Tao-lin, CHEN Bi-yun. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544-552.
- [9] Drenovsky R E, Vo D, Graham K J, et al. Soil water content and organic carbon availability are major determinants of soil microbial community composition[J]. *Microbial Ecology*, 2004, 48(3): 424-430.
- [10] 唐国勇,童成立,苏以荣,等.含水量对¹⁴C标记秸秆和土壤原有有机碳矿化的影响[J].中国农业科学,2006,39(3):538-543.
TANG Guo-yong, TONG Cheng-li, SU Yi-rong, et al. Effects of soil moisture content on the mineralization of added ¹⁴C-labelled straw and native soil organic carbon in upland soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(3): 538-543.
- [11] 郝瑞军,李忠佩,车玉萍.水分状况对水稻土有机碳矿化动态的影响[J].土壤,2006,38(6):750-754.
HAO Rui-jun, LI Zhong-pei, CHE Yu-ping. Effect of moisture regime on dynamics of soil organic carbon mineralization[J]. *Soil*, 2006, 38(6): 750-754.
- [12] Bridgman S D, Updegraff K, Pastor J. Carbon, nitrogen, and phosphorus mineralization in northern wetlands[J]. *Ecology*, 1998, 79(5): 1545-1561.
- [13] 张薇,王子芳,王辉,等.土壤水分和植物残体对紫色水稻土有机碳矿化的影响[J].植物营养与肥料学报,2007,13(6):1013-

- 1019.
- ZHANG Wei, WANG Zi-fang, WANG Hui, et al. Organic carbon mineralization affected by water content and plant residues in purple paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13(6):1013–1019.
- [14] Peralta A L, Ludmer S, Matthews J W, et al. Bacterial community response to changes in soil redox potential along a moisture gradient in restored wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73:246–253.
- [15] Sahrawat K L. Organic matter accumulation in submerged soils[J]. *Advances in Agronomy*, 2003, 81(3):169–201.
- [16] 潘文博. 东北地区水稻生产潜力及发展战略研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009.
- PAN Wen-bo. Research on rice potential productivity and development strategy in Northeast China[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009.
- [17] 王铁宇, 颜 丽, 关连珠, 等. 长期定位监测黑土有机物质的变化[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(1):76–79.
- WANG Tie-yu, YAN li, GUAN Lian-zhu, et al. Variations of organic matter with long-term location monitoring in black soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(1):76–79.
- [18] 梁 巍, 岳 进, 吴 劼, 等. 微生物生物量 C、土壤呼吸的季节性变化与黑土稻田甲烷排放[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12):2278–2280.
- LIANG Wei, YUE jin, WU Jie, et al. Seasonal variations of soil microbial biomass, respiration rate and CH₄ emission in black earth rice fields[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(12):2278–2280.
- [19] Franco M G, Corrêa S M, Marques M, et al. Emission of volatile organic compounds and greenhouse gases from the anaerobic bioremediation of soils contaminated with diesel[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2014, 225(2):1–9.
- [20] Chantigny M H, Curtin D, Beare M H, et al. Influence of temperature on water-extractable organic matter and ammonium production in mineral soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(2):517–524.
- [21] Guckert J B, Carr G J, Johnson T D, et al. Community analysis by Biolog: Curve integration for statistical analysis of activated sludge microbial habitats[J]. *Journal of Microbiological Methods*, 1996, 27(2/3):183–197.
- [22] 窦 森, 李 凯, 关 松. 土壤团聚体中有机质研究进展[J]. 土壤学报, 2011, 48(2):412–418.
- DOU Sen, LI Kai, GUAN Song. A review on organic matter in soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2):412–418.
- [23] 黄 耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6):709–714.
- HUANG Yao, LIU Shi-liang, SHEN Qi-rong, et al. Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6):709–714.
- [24] Thomsen I K, Schjøning P, Jensen B, et al. Turnover of organic matter in differently textured soils: II. Microbial activity as influenced by soil water regimes[J]. *Geoderma*, 1999, 89(3/4):199–218.
- [25] 郝瑞军, 李忠佩, 车玉萍, 等. 好气与淹水条件下水稻土各粒级团聚体有机碳矿化量[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9):1944–1950.
- HAO Rui-jun, LI Zhong-pei, CHE Yu-ping, et al. Organic carbon mineralization in various size aggregates of paddy soil under aerobic and submerged conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(9):1944–1950.
- [26] 黄东迈, 朱培立, 王志明, 等. 旱地和水田有机碳分解速率的探讨与质疑[J]. 土壤学报, 1998, 35(4):482–492.
- HUANG Dong-mai, ZHU Pei-li, WANG Zhi-ming, et al. A study and question on the decomposition rate of organic carbon under upland and submerged soil conditions[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35(4):482–492.
- [27] 孙中林, 吴金水, 葛体达, 等. 土壤质地和水分对水稻土有机碳矿化的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(1):214–220.
- SUN Zhong-lin, WU Jin-shui, GE Ti-da, et al. Effects of soil texture and water content on the mineralization of soil organic carbon in paddy soils[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(1):214–220.
- [28] Cayuela M L, Sinicco T, Mondini C. Mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(1):118–127.
- [29] Schimel J P, Gullledge J M, Clein-Curley J S, et al. Moisture effects on microbial activity and community structure in decomposing birch litter in the Alaskan taiga[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(6):831–838.
- [30] Zhang G. Changes of soil labile organic carbon in different land uses in Sanjiang Plain, Heilongjiang Province[J]. *Chinese Geographical Science*, 2010, 20(2):139–143.
- [31] 刘岳燕, 姚槐应, 黄昌勇. 水分条件对水稻土微生物群落多样性及活性的影响[J]. 土壤学报, 2006, 43(5):828–834.
- LIU Yue-yan, YAO Huai-ying, HUANG Chang-yong. Influence of soil moisture regime on microbial community diversity and activity in a paddy soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(5):828–834.
- [32] 刘艳丽, 张 斌, 胡 锋, 等. 干湿交替对水稻土碳氮矿化的影响[J]. 土壤, 2008, 40(4):554–560.
- LIU Yan-li, ZHANG Bin, HU feng, et al. Carbon and nitrogen mineralization of paddy soils as affected by wetting and drying[J]. *Soil*, 2008, 40(4):554–560.
- [33] Wang W J, Dalal R C, Moody P W, et al. Relationships of soil respiration to microbial biomass, substrate availability and clay content[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2003, 35(2):273–284.
- [34] 刘长红, 袁 野, 杨 君, 等. 稻田改为旱地后土壤有机碳矿化及微生物群落结构的变化[J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(5):960–966.
- LIU Chang-Hong, YUAN Ye, YANG Jun, et al. Variation in soil organic carbon mineralization and microbial community structure induced by the conversion from double rice fields to drained fields[J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, 21(5):960–966.
- [35] Bailey V L, Smith J L, Bolton H. Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34(7):997–1007.