

干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响^{*}

王 苑¹ 宋新山^{1†} 王 君¹ 严登华² 王宇晖¹ 周 斌¹

(1 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

(2 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044)

摘 要 水分是影响土壤活性碳库和惰性碳库周转过程的主导因子, 而土壤有机碳的周转速率会对气候变化造成潜在的重要影响。以农田水稻土为供试土壤, 通过培育试验研究了干湿交替过程对土壤有机碳矿化的影响, 并利用两库叠加模型对土壤不同碳库及其降解动力学进行初步评估。结果表明: 干湿交替激发了土壤呼吸, 增加了土壤微生物代谢活性。三次湿润过程对土壤呼吸的激发量分别为 119.3%、159.5% 和 87.3%, 激发效应随干湿交替频率的增加先升高后降低。多次干湿交替后, 土壤累积 CO₂ 释放量低于恒湿土壤, 湿润所引起的激发的矿化量不足以弥补干早期降低的矿化量。在湿润的数小时内, 土壤溶解性有机碳含量先升高后降低。干湿交替提升了土壤活性碳库的降解速率, 降低了惰性碳库的降解速率, 湿润后土壤活性碳库显著增加。多次干湿交替降低了土壤真菌/细菌比, 使土壤微生物群落结构发生变化, 细菌成为优势种群。

关键词 干湿交替; 土壤呼吸; 活性碳库; 惰性碳库; 土壤微生物

中图分类号 S153.6 **文献标识码** A

由于化石燃料的燃烧和土地利用方式的变化, 全球大气 CO₂ 浓度持续增加。作为重要温室气体, CO₂ 源、汇及通量变化近年来受到广泛关注。土壤是仅次于海洋的第二大有机碳库, 其较小的变幅即能引起 CO₂ 浓度较大的波动^[1]。土壤呼吸释放 CO₂ 作为土壤碳库周转过程中唯一碳输出途径, 在陆地生态系统碳循环过程中起着极其重要的作用^[2]。土壤水分是土壤有机碳矿化的主要影响因素^[3]。在全球气候变化背景下, 土壤频繁经历长时间的干旱和迅速的降水再湿润过程。长时间干旱后的强降雨会使土壤微生物量和土壤呼吸产生明显的激发效应, 土壤碳排在短时间内突然升高^[4]。这种激发效应可能会引起潜在的土壤碳流失, 影响土壤碳储量和碳循环, 进而对全球气候变化产生潜在影响^[5]。

根据土壤有机碳周转速率的快慢, 土壤有机碳库可分为活性碳库和惰性碳库^[6]。通过影响有效养分供应和周转, 活性碳库可能会改变微生物生物量及其活性, 从而改变土壤微生物生态系统的群落结构和生产力^[7]; 而土壤惰性碳库则影响长期土壤

碳储备^[8]。不同的土壤碳库可能对干湿交替产生不同的响应。一些研究表明, 活性碳库对土壤水分、温度以及植物群落结构的变化非常敏感^[9]。土壤干旱可能会限制植物和微生物生长, 降低土壤有机质分解速率^[10]。而干湿交替则会加速土壤碳循环, 释放不稳定碳, 减小活性碳库^[11]。而目前对这方面的研究仍然较少, 影响机制尚不清楚。

为了探究干湿交替过程对土壤碳库的影响以及土壤微生物在其中的作用, 本文通过短期培养实验研究了农田水稻土经过多次干湿交替后土壤有机碳矿化情况和微生物群落结构变化, 并利用非线性回归拟合土壤呼吸速率曲线, 以期对土壤不同碳库及其降解动力学进行初步评估, 预测生态系统碳平衡对干湿交替的响应。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤为采自上海郊区农田的水稻土。作物收获后采集农田表层 0~15 cm 的原状新鲜土样,

* 国家 973 计划“气候变化对旱涝灾害的影响及风险评估”(2010CB951102) 和国家自然科学基金项目(51079028) 资助

† 通讯作者, E-mail: newmountain@163.com

作者简介: 王 苑(1989—), 女, 安徽芜湖人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境研究。E-mail: wangyuan_04@126.com

收稿日期: 2013-04-19; 收到修改稿日期: 2013-09-16

自然风干后拣去可见的根系杂物,磨碎过 2 mm 筛备用。一部分土样用于培育实验,一部分土样用于

基本理化性质的测定。供试土壤的基本理化性质见表 1。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Properties of the soil before incubation

土壤类型 Soil Type	pH	有机碳 SOC(g kg ⁻¹)	全氮 Total N(g kg ⁻¹)	活性碳 Labile C(g kg ⁻¹)	黏粒 Clay(%)	容重 Bulk density(g cm ⁻³)	田间持水量 WHC(g g ⁻¹)
水稻土 Stagnic Anthrosols	6.8	16	1.27	1.02	50	1.21	0.3025

1.2 培育试验

试验设置干湿交替(DW)和恒湿(CW)两个水分状况处理。分别称取 500 g 过 2 mm 筛的风干土样装入试验装置(图 1)中,每组试验各设 3 个重复,在 28 ± 1℃ 的人工气候箱中恒温培育。干湿交替处理设置 3 个连续干湿循环,每个干湿周期包括缓慢干旱过程和快速湿润过程;其中脱水过程通过硅胶干燥使装置中土壤体积含水率从田间持水量(Water-holding Capacity, WHC)的 100% 降至 30%,湿润过程采取快速喷淋式使土壤含水率在数分钟内迅速达到 100% WHC。恒湿处理通过定期补充水分,保持土壤含水率为 100% WHC。

培养时间从 2012 年 3 月 12 日开始,6 月 20 日结束,共 100 d。在培养过程中每天测定土壤呼吸量。同时测定干湿交替过程中湿润前 24 h 和湿润后 3、8、24、48 h 的土壤溶解性有机碳、微生物生物量。

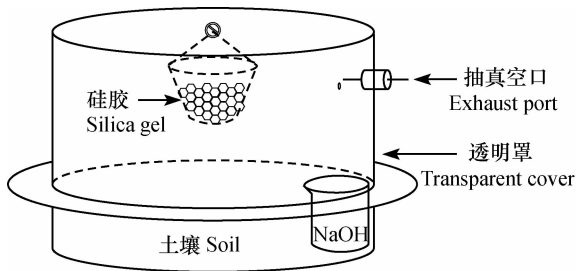


图 1 培养实验装置

Fig. 1 Apparatus used in the incubation experiment

1.3 试验装置及测定方法

试验装置为带盖密闭的真空罩,容积为 2.9 L。干湿交替处理真空罩内顶部悬挂一塑料杯,内装硅胶用于干燥,每两天更换一次硅胶。土壤有机碳矿化量采用碱液吸收法^[12]测定,底部放置 20 ml 0.5 mol L⁻¹ NaOH 溶液用于吸收土壤呼吸 CO₂。土壤有机碳采用重铬酸钾外加热法^[13]测定。溶解性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)使用 K₂SO₄ 浸

提-TOC 仪(TOC-V_{CPH}, Shimadzu)测定^[14]。微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)采用氯仿熏蒸-K₂SO₄ 浸提-TOC 仪^[15]测定。微生物生物量采用平板计数法^[13]测定。

1.4 分析方法

为了估计土壤呼吸 CO₂ 释放的动力学参数,本研究采用两库叠加模型拟合土壤 CO₂ 释放速率曲线,该模型假设活性碳库降解速率呈指数递减,惰性碳库则以恒定速率降解^[15]:

$$R_t = R_i \times e^{-k_1 \times t} + R_r \quad (1)$$

式中, R_t 为呼吸速率($mg\ kg^{-1}\ d^{-1}$); R_i 为活性碳库的初始降解速率($mg\ g^{-1}\ d^{-1}$); k_1 为活性碳库的降解常数(d^{-1}); R_r 为惰性碳库的降解速率($mg\ g^{-1}\ d^{-1}$)。活性碳库初始大小(C_1)则通过 R_i/k_1 计算得到:

$$C_1 = \frac{R_i}{k_1} \quad (2)$$

微生物代谢熵(qCO_2)是指单位重量微生物生物量碳的呼吸量值,是衡量土壤微生物对土壤碳利用效率的重要数据^[16]。按下式计算:

$$qCO_2 = CO_2 - C \times 1\ 000 / SMB - C \times D \quad (3)$$

式中, qCO_2 为微生物代谢熵($g\ kg^{-1}\ d^{-1}$), $CO_2 - C$ 为土壤呼吸量($mg\ kg^{-1}$), $SMB - C$ 为土壤微生物生物量碳含量($mg\ kg^{-1}$), D 为收集 CO₂ 的天数(d), 1 000 为单位换算系数。

1.5 数据统计

采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析(ANOVA),差异显著性水平($p < 0.05$)通过最小显著差数法(LSD)进行检验,采用 SigmaPlot 12.0 软件作图并对呼吸速率进行拟合。

2 结果

2.1 干湿交替对土壤呼吸作用强度的影响

本研究中一个完整的干湿交替过程包括:土壤

先经历缓慢脱水过程,使含水量从田间持水量的 100% 降低至 30%,接着进行一次快速湿润使含水率迅速恢复至 100% 田间持水量。整个培育时间内干湿交替组共进行了三次连续干湿循环,并在第三次湿润后又进行了一次脱水过程,培养天数共 100 d。本研究分别以 C1 ~ C3 代表三次完整的干湿循环,以 P1 ~ P4 代表四次脱水过程。

从图 2a 中可以明显观察到干湿交替过程中干旱后湿润对土壤呼吸的瞬时激发效应。培育时间内,在每次干湿循环的干旱期,随着干旱时间的延长,土壤呼吸速率快速降低。第一次干旱期 5 d 后,土壤呼吸速率即明显低于恒湿组,干旱在一定程度上抑制了土壤呼吸。在湿润阶段,每次湿润后土壤呼吸速率均能在短时间内迅速达到高峰。三次干旱后湿润对土壤呼吸的激发分别使呼吸速率较恒湿组增加了 119.3%、159.5% 和 87.3%,湿润后的瞬时激发效应随着循环数的增加先升高后降低,在第二次湿润后达到最高,第三次湿润后开始减弱。此外,第一次湿润后 3 h 呼吸速率达到最高值,而随

后的两次湿润后,经过 8 h 呼吸速率才上升至最高值,即随着干湿循环数的增加,瞬时激发效应有所延迟。短暂的激发效应结束后,再次干旱使土壤呼吸速率又迅速降低,三次循环中分别经过 5 d、13 d、1 d 降至低于恒湿组水平。与干湿交替组相比,恒湿组土壤呼吸速率随着培育时间的延长呈现逐渐降低的趋势,并在 40 d 左右基本趋于恒定。

图 2b 是干湿交替和恒湿组土壤累积 CO_2 释放量随时间的变化。干湿交替组在干早期 CO_2 释放量要显著低于恒湿组;而每次湿润后,虽然伴随土壤呼吸的激发效应, CO_2 释放量均有所增加,但是增加量不足以抵消干早期减少的 CO_2 释放量,且增加幅度随着干湿循环的进行逐渐减弱,因此三次干湿交替后, CO_2 总释放量仍然低于恒湿组。干湿交替引起的土壤 CO_2 释放主要发生在湿润后最初的几个小时至几天里,三次干湿交替前 1 d 的 CO_2 累积释放量分别达到了 12.2%、10.0% 和 10.9%,前 7 d 的 CO_2 累积释放量分别达到了 50.0%、47.2% 和 43.7%。

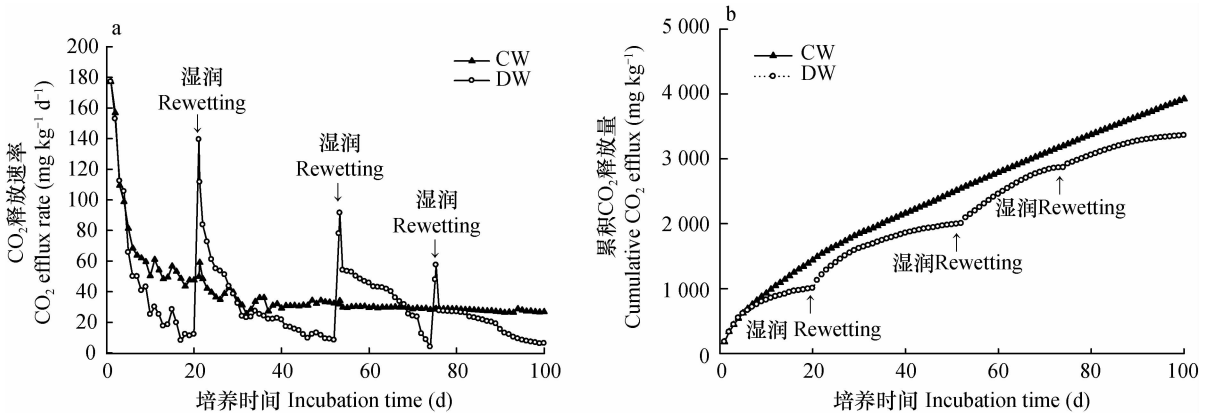


图 2 干湿交替(DW)和恒湿(CW)条件下土壤呼吸速率变化(a)和土壤累积 CO_2 释放量(b)

Fig. 2 Soil respiration rate (a) and cumulative CO_2 release (b) in soils under drying-rewetting alternation (DW) and under constant wetting (CW)

2.2 干湿交替对碳库“库容”和降解速率的影响

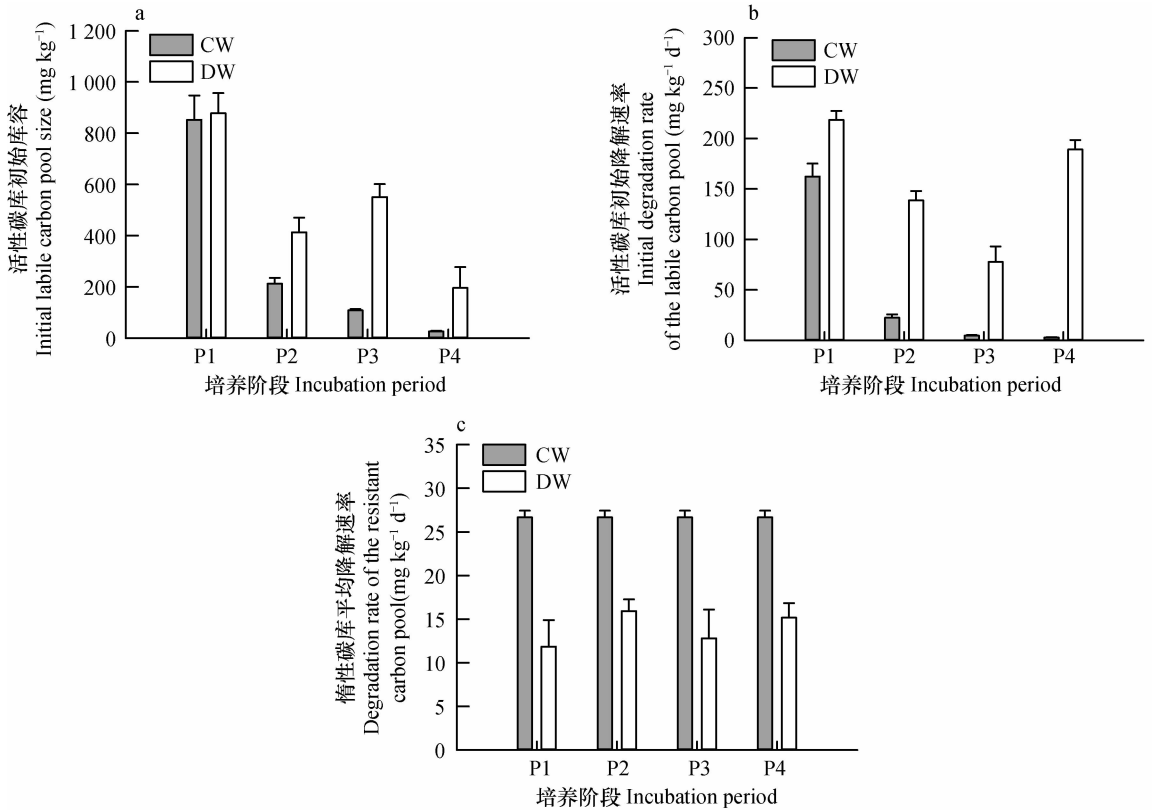
用式(1)拟合土壤呼吸速率,曲线拟合程度均达到显著水平($R^2 = 0.86 \sim 0.98, p < 0.01$)。图 3 是根据式(1)拟合土壤呼吸速率估计得到的湿润后土壤活性碳库初始降解速率和惰性碳库平均降解速率,以及根据式(3)计算得到的湿润后活性碳库“库容”。P1 ~ P4 分别代表干湿交替四个干旱周期,其中 P1 为未经历湿润的初始干旱过程,P2 ~ P4 为湿润后脱水过程。图 3a 中 P1 阶段,由恒湿组和干湿交替组土壤呼吸速率分别拟合估计得到的活性碳库与初始“库容”十分接近,与实际情况相符。图

3a、图 3b 显示,干湿交替组湿润后活性碳库初始降解速率和活性碳库“库容”均高于恒湿土壤。恒湿组活性碳库降解速率和大小随着时间的延长逐渐降低。而干湿交替组土壤随着干湿循环数的增加,湿润后活性碳库初始降解速率呈现先降低后增加的趋势,活性碳库“库容”的变化趋势则相反,先增加后降低。经过三个周期的干湿交替,湿润后土壤活性碳库初始降解速率仍然较高,约为 189.1 mg kg^{-1} 。

式(1)假设土壤惰性碳库的降解速率恒定,在此基础上对恒湿组和干湿交替组四个干旱阶段的惰性碳库平均降解速率进行估计,得到图 3c。从图

中可以看出,干湿交替组土壤惰性碳库的平均降解速率显著低于恒湿组土壤($p < 0.001$)。经历了三

个干湿循环后,土壤惰性碳库平均降解速率略有增加,但不显著($p > 0.05$)。



注: P1、P2、P3、P4分别表示四个湿润后脱水过程 Note: P1, P2, P3 and P4 represents 4 drying periods after rewetting

图 3 干湿交替(DW)和恒湿(CW)土壤活性碳库初始库容(a)、活性碳库初始降解速率(b)和惰性碳库平均降解速率(c) Fig. 3 Labile carbon initial pool size (a), its initial degradation rate (b) and resistant carbon pool mean degradation rate (c) in soils under drying-rewetting alternation(DW) and under constant wetting(CW)

2.3 干湿交替对土壤溶解性有机碳含量的影响

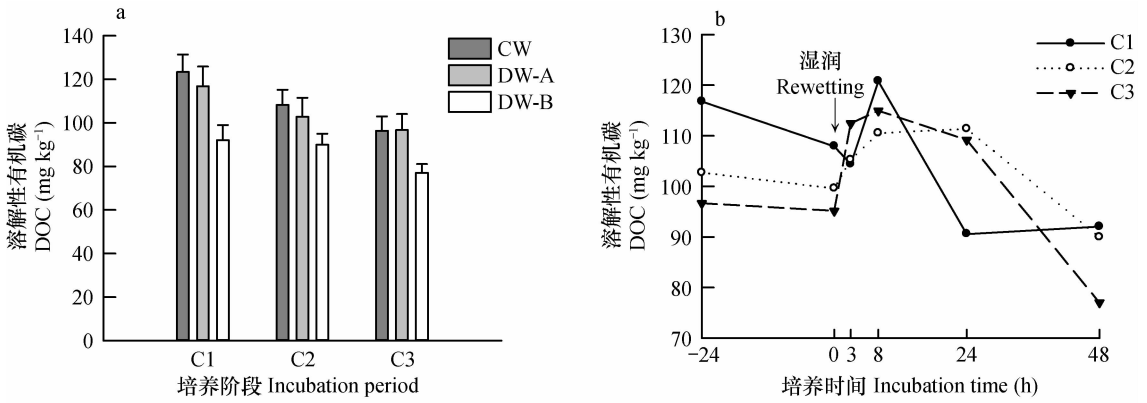
图 4a 中,干湿交替组土壤干旱阶段 DOC 含量略低于恒湿组,相差不大;湿润后 DOC 含量明显降低。但是对湿润后数小时内土壤 DOC 含量的短期监测发现,旱后湿润能使土壤 DOC 在短期内先升高再降低(图 4b)。湿润后约 8 h DOC 迅速升高至最高值,湿润后 24 ~ 48 h DOC 大幅度降低。比较图 4a 中每次循环湿润后(DW)和下次循环干旱(D)阶段的 DOC 含量,发现干湿交替湿润后,再次经历缓慢干旱的土壤 DOC 会有小幅度的升高。经过三次干湿交替后,土壤 DOC 含量总体趋于降低,且最终 DOC 含量要低于恒湿土壤。

旱后湿润为土壤中 DOC 浓度在短期内迅速升高的主要机制,一方面可能是微生物调节渗透压排出的含碳化合物,另一方面可能来源于土壤水分变化导致的土壤团聚体和土壤胶体破坏^[17]。土壤在湿润后再

次经历干旱时,DOC 浓度小幅度的回升可能来源于被水分胁迫导致的死亡微生物细胞的裂解。

2.4 干湿交替对土壤微生物种群结构的影响

图 5a 显示,经过 100 d 的培育,恒湿组土壤微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)含量略有上升,总体变化不大。干湿交替组土壤在干旱阶段 MBC 大幅度降低,且随着干湿循环数增加 MBC 含量越来越少。旱后湿润显著提升土壤 MBC 含量,三次湿润对 MBC 的激发较恒湿组分别提高了 24.2%、10.7% 和 25.9%。随着干湿循环的增加,湿润对 MBC 的刺激作用也不断增加。三次干湿循环 MBC 呈现相似的变化。图 5b 中,微生物代谢熵在干旱期较高,湿润后迅速降低,且经过三个周期的干湿循环,微生物代谢熵降至最低水平,表明微生物对碳源利用率随着干湿交替的进行逐渐升高,微生物逐渐适应干湿交替胁迫。



注: C1、C2、C3分别表示三个干湿循环,下同 Note: C1, C2 and C3 represents 3 successive rounds of drying-rewetting alternation. The same below

图 4 恒湿(CW)、干湿交替湿润前(DW-A)、湿润后(DW-B) (a)及湿润后数小时内(b)土壤溶解性有机碳含量变化

Fig. 4 Soil DOC contents under constant wetting (CW), before rewetting (DW-A), after rewetting (DW-B) (a) and within hours after rewetting (b)

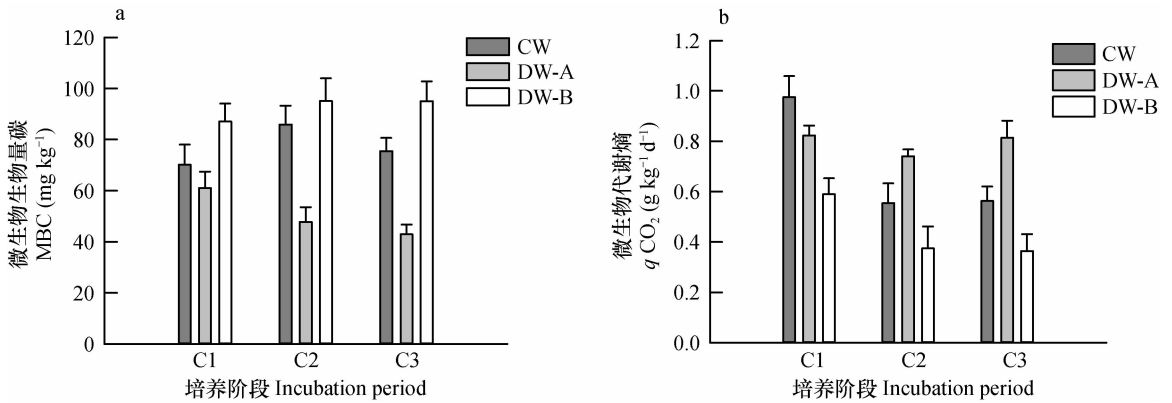


图 5 恒湿(CW)、干湿交替湿润前(DW-A)和湿润后(DW-B)土壤微生物生物量碳含量(a)及微生物代谢熵(b)变化

Fig. 5 Soil MBC contents (a) and $q\text{CO}_2$ (b) under constant wetting (CW), before rewetting (DW-A) and after rewetting (DW-B)

图 6 为干湿循环湿润前后细菌、真菌占微生物总数的比重变化,表 2 为相应的微生物总数绝对值。本研究中,微生物总数以细菌和真菌两者之和计,不考虑其他种类。一般情况下,细菌占土壤微生物总量的 70% ~ 90%。第一次干湿循环的干早期细菌数占微生物总数的 70.6%,湿润后比例上升至 84.7%。随着干湿交替的进行,第二次干旱使土壤细菌总数大量减少,真菌比重有所上升,细菌占微生物总数比例降至 76.0%。然而湿润 24 h 后,细菌数量再次激增,比例上升至 93.4%,湿润对细菌总数的刺激作用非常明显。第三次干旱同样造成了细菌总数的显著减少,细菌占微生物总数比例降至 76.6%。同时,真菌数量并未受到干旱的明显影响,这使得真菌占据优势地位。第三次湿润后,细菌总

数再次出现激增,细菌比例上升至 94.7%。第一次干早期土壤中真菌与细菌的比例为 0.42,经历三次干湿交替后这一比例降为 0.06。三次干湿交替过程中,每次干旱过程均伴随着真菌比重的增长,细菌总数大量减少;而旱后湿润则刺激了细菌数量的大幅度增长。随着干湿交替的进行,湿润对细菌数量的刺激作用逐渐减弱。经历了三次干湿交替后,土壤中细菌逐渐成为优势种群,真菌数量仅占微生物总数的 5.3%。

3 讨论

3.1 干旱后湿润对土壤呼吸的激发效应

干湿交替能够引起土壤短期内的 CO₂ 激发效

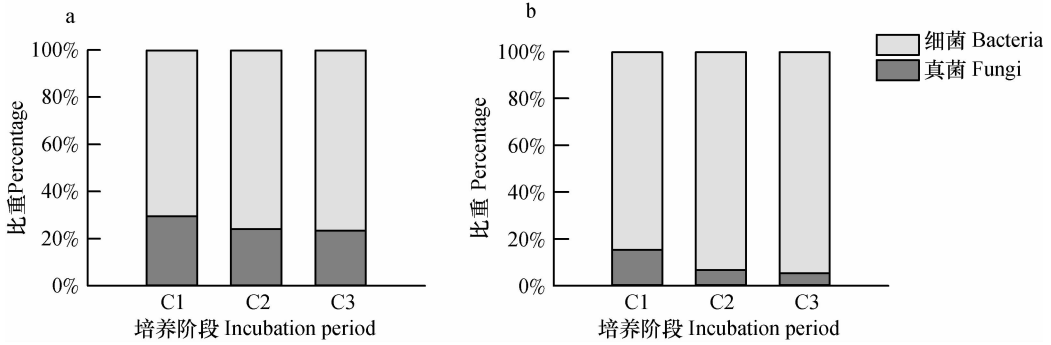


图 6 多次干湿交替湿润前(a)和湿润后(b)细菌、真菌占微生物总数比重变化

Fig. 6 Proportions of bacteria and fungi to the total of soil microbes before (a) and after (b) rewetting during the alternation

表 2 恒湿(CW)、干湿交替湿润前(DW-A)和湿润后(DW-B)土壤细菌、真菌总数变化

Table 2 Total numbers of bacteria and fungi in soils under constant wetting (CW), before rewetting (DW-A) and after rewetting (DW-B)

培养阶段 Incubation period	微生物总数 Total of microorganisms (cfu g ⁻¹)			
	细菌 Bacteria		真菌 Fungi	
	DW-A	DW-B	DW-A	DW-B
C1	26.4 × 10 ⁶	27.6 × 10 ⁶	11.0 × 10 ⁶	5.0 × 10 ⁶
C2	9.5 × 10 ⁶	28.1 × 10 ⁶	3.0 × 10 ⁶	2.0 × 10 ⁶
C3	14.7 × 10 ⁶	115.5 × 10 ⁶	4.5 × 10 ⁶	6.5 × 10 ⁶
CW	39.2 × 10 ⁶		5.8 × 10 ⁶	

注: C1、C2、C3 分别表示三个干湿循环 Note: C1, C2 and C3 represent 3 successive rounds of drying-rewetting alternation

应。本研究仅考虑土壤中微生物的异养呼吸,排除了植物根系呼吸和植物碳输入的干扰。干旱过程土壤呼吸受到显著抑制,快速湿润后土壤呼吸作用迅速增强,呈脉冲式发展(图 1)。干旱时,土壤溶解性有机碳的扩散受到阻碍,使土壤中的微生物处于饥饿环境之中,抑制土壤呼吸。此外,当土壤水分含量降低时,土壤微生物为了防止细胞发生萎蔫现象,就会将能量转移至生产适当的溶质上去(例如氨基酸、多元醇等),调节渗透压,从而减少 CO₂ 的产生^[18-19]。进一步干旱还会导致微生物大量死亡,微生物活性降低,使之对碳源的利用率降低(图 5b),土壤呼吸受到显著抑制。本研究观察到在快速湿润后的数小时内,土壤溶解性有机碳含量先升高后降低(图 4)。湿润后,随着土壤水势突然增加,土壤微生物通过渗透调节作用将大量含碳化合物从细胞体内排出,导致短时间内土壤中溶解性有机碳量迅速升高^[20-21]。此外,湿润会引起土壤团聚体的膨胀裂解,使团聚体中稳定的有机质暴露,被微生物利用^[22]。湿润后微生物受到刺激重新活跃,对碳源的利用率升高(图 5),能够快速分解利用累积的活性有机质,导致土壤 DOC 的迅速降低,短时间

内释放大量 CO₂。湿润对土壤呼吸的激发量远高于对微生物生物量的激发量,也有研究表明干湿交替降低了微生物生物量^[17],这说明湿润使微生物恢复至高代谢活性状态,使之具有更强的生物活性^[11]。随着新一轮的干旱慢慢加剧,一部分微生物死亡,凋亡细胞中的有机碳就充当了溶解性有机碳,所以干旱后期土壤中的溶解性有机碳含量又逐渐增加。

经过多次干湿交替后,湿润对土壤呼吸的瞬时激发效应逐渐减弱,主要表现为激发响应时间延长、激发效应持续时间变短以及激发量减少(图 1)。许多田间实验也表明干湿交替的激发作用随着干湿交替频率的增加而不断减缓^[23-24]。但是第三次湿润后微生物生物量仍然表现为骤增(图 5a),这说明激发效应减弱是由于对微生物代谢活性的刺激减弱而非对微生物数量的刺激减少,这可能来源于土壤基质有效性的降低。由于整个培育过程没有外源碳输入,土壤中可供微生物消耗的有机质数量有限^[25],导致土壤呼吸激发效应逐渐减弱。此外,干湿交替能够影响土壤孔隙的大小和稳定性^[26],多次干湿交替后土壤持水能力下降,土壤团聚体裂解释放出的有机质含量也逐渐耗尽。

3.2 多次干湿交替对土壤碳库的影响

累积矿化碳量受干湿交替强度和持续时间的强烈影响,这使得研究土壤碳库对干湿交替的响应增加了许多不确定性。本实验中,多次干湿交替下的土壤 CO_2 累积释放量显著低于恒湿的土壤(图 2),与 Muhr 等^[27]的研究一致。湿润对土壤呼吸的激发效应一般可按照持续时间分为两个阶段^[5]:第一阶段是湿润后数分钟至数小时内发生的土壤呼吸瞬时激增,此时激发效应与土壤水分和温度无关;第二阶段是随后较长一段时期内土壤呼吸的持续增加,这一阶段土壤呼吸激发量与土壤水分状况显著相关。本研究中每次湿润后均要经历 20 d 左右的干早期,干早阶段土壤水分亏缺对土壤微生物呼吸的抑制在一定程度上平衡了湿润后土壤呼吸的激发量,使得多次干湿交替的累积矿化碳总量要低于恒湿组。在本研究中,至少在于旱阶段,土壤可作为碳汇累积环境中的 CO_2 。一般而言,累积矿化碳量随着干旱强度和持续时间的增加而降低,较短的干早期和较长的湿润期会导致更多的碳矿化。因此,自然生态系统中干旱和降水对土壤碳矿化的效应还需要结合实际情况,基于全面综合的田间实验进行进一步探究。

本研究中,干湿交替组干早后湿润提高了土壤活性碳库初始降解速率和湿润后活性碳库“库容”(图 3a,图 3b),这与湿润后土壤溶解性有机碳和微生物生物量碳激增的现象一致(图 4b,图 5a)。湿润后微生物生物量骤增,导致活性碳库降解率显著提高。增加的活性碳库“库容”可能来源于上述土壤溶解性有机碳含量的增加。另一方面,干湿交替破坏土壤团聚体,释放出—部分活性碳源,更易被微生物降解。

与恒湿土壤相比,干湿交替显著降低了土壤惰性碳库降解速率(图 3c, $p < 0.001$)。在多次干湿交替试验中,虽然干早期细菌大量减少,真菌占有优势,但每次湿润过程对细菌数量的刺激作用非常明显,能够引起细菌种群的重新建立(图 6)。多次干湿交替大大降低了土壤真菌与细菌比例,土壤微生物群落结构发生变化,细菌成为优势种群。这可能是因为细菌主要结合于土壤团聚体内,受到保护,而真菌游离于土壤团聚体外,更易受到水分状况变化的影响^[17]。细菌主要趋向于降解活性有机质,如糖类、纤维素等,而真菌是降解土壤稳定有机质的主要微生物。已有研究表明,土壤中的真菌丰度与土壤木质素降解酶显著相关^[28],因此真菌比重降低

可能会导致酶活性的降低,从而降低土壤惰性碳库的降解速率。经过多次干湿循环后,土壤惰性碳库的降解速率有所增加。Saetre 和 Stark^[11]发现细菌和真菌数量在湿润后 2d 内达到高峰,在死亡前会迅速耗尽活性碳库。由于培育实验没有外加碳源,在活性碳库耗尽后微生物有可能转而开始降解惰性碳库^[29],导致惰性碳库降解速率小幅度增加。

本实验中曲线拟合程度均达到显著水平($R^2 = 0.86 \sim 0.98, p < 0.01$),说明两库叠加模型可以很好地拟合呼吸速率曲线,并能清晰阐述短期 CO_2 激发释放的相关过程机理^[25]。而另一方面,拟合曲线相关参数的可靠性基于呼吸速率的准确测定。由于本实验呼吸速率的测定采用较为简易的碱液吸收法,因此存在一定的不确定性。此外,活性碳库的大小是通过拟合参数计算得到,可能与实测值有一定的差异。

4 结 论

与恒湿土壤相比,多次干湿交替能显著激发土壤有机碳矿化,激发效应随着干湿交替频率的增加而逐渐减弱,其中累积矿化碳量受干湿交替强度和持续时间的影响。本研究中,多次干湿交替土壤累积 CO_2 释放量低于恒湿土壤,这是由于在长期干旱情况下,土壤水分亏缺对土壤微生物呼吸的抑制在一定程度上平衡了湿润后土壤呼吸的激发量。多次干湿交替提升了土壤活性碳库的降解速率和大小,降低了惰性碳库的降解速率,并且使土壤微生物群落结构发生变化,细菌成为优势种群。

参 考 文 献

- [1] 周莉,李保国,周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99—105. Zhou L, Li B G, Zhou G S. Advances in controlling factors of soil organic carbon (In Chinese). Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 99—105
- [2] Valentini R, Mettencci G, Dolman A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. Nature, 2000, 404(6789): 861—865
- [3] Werner B, Egbert M. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils. Global Change Biology, 2009, 15: 808—824
- [4] Birch H F. Mineralisation of plant nitrogen following alternate wet and dry conditions. Plant Soil, 1964, 20: 43—49
- [5] Unger S, Mágua C, Joás, et al. Interpreting post-drought rewetting effects on soil and ecosystem carbon dynamics in a Mediterranean

- oak savannah. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 154/155:9—18
- [6] McLaughlan K K, Hobbie S E. Comparison of labile soil organic matter fractionation techniques. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68:1616—1625
- [7] Pastor J, Post W M. Influence of climate, soil moisture, and succession on forest carbon and nitrogen cycles. *Biogeochemistry*, 1986, 2:3—27
- [8] Trumbore S E, Bonani G, Wolfli W. The rates of carbon cycling in several soils from AMS ^{14}C measurements of fractionated soil organic matter//Bouwman A F. *Soils and the greenhouse effect*. New York: John Wiley, 1990:405—414
- [9] Trumbore S E, Chadwick O E, Amundson R. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric carbon dioxide driven by temperature change. *Science*, 1996, 272:393—396
- [10] Liu W X, Zhang Z, Wan S Q. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland. *Global Change Biology*, 2009, 15(1):184—195
- [11] Saetre P, Stark J M. Microbial dynamics and carbon and nitrogen cycling following re-wetting of soils beneath two semi-arid plant species. *Oecologia*, 2005, 142:247—260
- [12] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, et al. Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64:613—623
- [13] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法. 北京: 科学出版社, 2008. Li Z G, Luo Y M, Teng Y. *Research methods for soil and environmental microorganism* (In Chinese). Beijing: Science Press, 2008
- [14] Jones D L, Willett V B. Experimental evaluation of methods to quantify dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved organic carbon (DOC) in soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(5):991—999
- [15] Carrillo Y, Pendall E, Feike A, et al. Response of soil organic matter pools to elevated CO_2 and warming in a semi-arid grassland. *Plant Soil*, 2011, 347:339—350
- [16] 刘艳丽, 张斌, 胡锋, 等. 干湿交替对水稻土碳氮矿化的影响. *土壤*, 2008, 40(4):554—560. Liu Y L, Zhang B, Hu F, et al. Carbon and nitrogen mineralization of paddy soils as affected by wetting and drying (In Chinese). *Soils*, 2008, 40(4):554—560
- [17] Helen G, Philip M, Richard D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(2):302—311
- [18] Rosacker L L, Kieft T L. Biomass and adenylate energy charge of a grassland soil during drying. *Soil Biology & Biochemistry*, 1990, 22:1121—1127
- [19] Fierer N, Schimel J P. A proposed mechanism for the pulse in carbon dioxide production commonly observed following the rapid rewetting of a dry soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3):798—805
- [20] Kieft T L, Soroker E, Firston M K. Microbial biomass response to a rapid increase in water potential when dry soil is wetted. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19:119—126
- [21] Unger S, Mágua C. The influence of precipitation pulses on soil respiration—Assessing the “Birch effect” by stable carbon isotopes. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42:1800—1810
- [22] Deneff K, Six J, Bossuyt H, et al. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter and microbial community dynamics. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(12/13):1599—1611.
- [23] Schimel J P, Teri C B, Matthew W. Microbial stress-response physiology and its implications for ecosystem function. *Ecology*, 2007, 88(6):1386—1394
- [24] Fierer N, Schimel J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34:777—787
- [25] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 等. 干燥和重新湿润过程引起土壤 CO_2 激发释放的模拟研究. *农业环境科学学报*, 2004, 23(2):318—322. Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, et al. Flush of carbon dioxide caused by soil drying and rewetting (In Chinese). *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2):318—322
- [26] Peng X, Horn R. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3):584—592
- [27] Muhr J, Goldberg S, Borken W, et al. Repeated drying/rewetting cycles and their effects on the emission of CO_2 , N_2O , NO_x and CH_4 in a forest soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171:719—728
- [28] Carney K M, Hungate B A, Drake B G, et al. Altered soil microbial community at elevated CO_2 leads to loss of soil carbon. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 2007, 104(12):4990—4995
- [29] Cheng L, Leavitta S W, Kimball B A, et al. Dynamics of labile and recalcitrant soil carbon pools in a sorghum free-air CO_2 enrichment (FACE) agroecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39:2250—2263

EFFECT OF DRYING-REWETTING ALTERNATION ON SOIL CARBON POOL AND MINERALIZATION OF SOIL ORGANIC CARBON

Wang Yuan¹ Song Xinshan^{1†} Wang Jun¹ Yan Denghua² Wang Yuhui¹ Zhou Bin¹

(1 *Environmental Science and Engineering College, Donghua University, Shanghai 201620, China*)

(2 *Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China*)

Abstract Soil moisture is a leading factor that affects turnover of the labile and resistant soil carbon pools, while the turnover rate of soil organic carbon has a potential important impact on global climate change. An indoor paddy soil incubation experiment was carried out to explore effect of drying-rewetting alternation on mineralization of soil organic carbon and evaluate different soil carbon pools and their degradation dynamics using a two-order model. Results show that drying-rewetting alternation significantly stimulated soil respiration as well as metabolic activity of soil microbes. Three successive rounds of drying-rewetting alternation stimulated soil respiration by 119.3%, 159.5% and 87.3%, respectively, and with the alternation increasing in frequency, the effect intensified first and then waned. After rounds of alternation, the release of CO₂ accumulated in the soil fell lower than that from the soil kept permanently wet because the mineralization stimulated by rewetting was far from enough to make up the drop in mineralization during the drying period. Within the hours after rewetting, soil soluble organic carbon rose and then fell in content. Drying-rewetting alternation raised degradation rate of the soil labile carbon pool and lowered that of the soil resistant carbon pool. After rewetting, the soil labile carbon pool was significantly bigger in size. Frequent drying-rewetting alternation lowered soil fungi/bacteria ratio and altered the community structure of soil microbes, pushing bacteria into dominancy.

Key words Drying-rewetting alternation; Soil respiration; Labile C pools; Resistant C pools; Soil microbes

(责任编辑:檀满枝)