

模拟干湿交替对若尔盖高寒湿地土壤呼吸及 可溶性碳氮稳定性的影响

乐 艺, 张晓雅, 高俊琴, 丁 艳, 李谦维

(北京林业大学 自然保护区学院, 北京 100083)

摘 要:全球气候变化下,极端干旱和强降水事件频发,土壤经历更为复杂和频繁的干湿交替过程,这对于土壤呼吸有极为重要的影响。以若尔盖高寒湿地土壤为研究对象,设置两种干湿交替强度(高强度和低强度)和两种干湿交替频率(高频率和低频率)以及恒定水分共 5 种处理,在人工气候箱恒温培养 144 d,研究了干湿交替对若尔盖高寒湿地土壤呼吸、土壤可溶性碳、无机氮及其稳定性的影响。结果表明:干湿交替强度对土壤呼吸、可溶性有机碳、可溶性有机碳/无机氮的比值及其稳定性影响显著,高强度干湿交替促进了呼吸,而低强度干湿交替有利于增加可溶性有机碳的含量和提高可溶性有机碳/无机氮的比值。铵态氮含量及铵态氮稳定性受干湿交替频率及交互作用的显著影响,硝态氮受干湿交替强度及交互作用的显著影响。无机氮及稳定性均不受干湿交替强度、频率及交互作用的影响。干湿交替强度和频率对若尔盖高寒湿地土壤呼吸、可溶性碳氮及其稳定性有不同程度的影响,这些结果有助于理解未来气候变化下高寒湿地碳循环过程及机制。

关键词:干湿交替强度; 干湿交替频率; 若尔盖高寒湿地; 湿地土壤; 土壤呼吸

中图分类号:S153

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0081-07

Effect of Simulated Drying-Rewetting Cycles on Soil Respiration and Dissolved Organic Carbon and Nitrogen Stability in Zoige Alpine Wetlands

YUE Yi, ZHANG Xiaoya, GAO Junqin, DING Yan, LI Qianwei

(School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: With the global climate change, extreme droughts and heavy precipitation events occur frequently, thus soils are undergoing more complicated and frequent drying-rewetting cycles, which have an important effect on soil respiration. We conducted a 144-day incubation experiment with two intensities (low and high intensities), two frequencies (low and high frequencies) of drying-rewetting cycles and one constant soil moisture to study the effect of drying-wetting intensity and frequency on soil respiration, soil dissolved organic carbon, inorganic nitrogen and their stability in Zoige alpine wetlands. The results showed that the intensity of drying-wetting cycles had significant effect on soil respiration, dissolved organic carbon, ratio of dissolved organic carbon to inorganic nitrogen and their stabilities; high-intensity drying-rewetting cycles promoted soil respiration, while low-intensity drying-rewetting cycles was beneficial to increase of the content of dissolved organic carbon and the ratio of dissolved organic carbon to inorganic nitrogen; the content and the stability of ammonium nitrogen were significantly affected by the frequency and interaction of drying-rewetting intensity and frequency, while nitrate nitrogen was significantly affected by the intensity and interaction of drying-rewetting intensity and frequency; inorganic nitrogen and its stability were not affected by the drying-rewetting cycles. In conclusion, the intensity and frequency of drying-rewetting cycles had different effects on the soil respiration, dissolved organic carbon, inorganic nitrogen and their stabilities in Zoige

收稿日期:2019-02-04

修回日期:2019-03-09

资助项目:国家自然科学基金“干湿交替对若尔盖泥炭湿地关键碳过程的影响”(41571084)

第一作者:乐艺(1995—),女,重庆市奉节县人,硕士研究生,主要从事湿地生态学研究。E-mail:17812157721@163.com

通信作者:高俊琴(1979—),女,山西临汾人,博士,教授,主要从事湿地生态学研究。E-mail:gaojq@bjfu.edu.cn

alpine wetlands. These results are helpful to understand the carbon cycle process and mechanism of alpine wetlands under future climate change.

Keywords: drying-rewetting intensity; drying-rewetting frequency; Zoige alpine wetland; wetland soil; soil respiration

全球气候变化如气温升高、极端干旱和强降雨事件频发,已成为国内外广泛关注的研究热点问题^[1]。极端干旱和强降雨事件通过影响干旱期长短、降雨量和降雨强度等,引起区域降水格局发生变化,导致土壤经历的干湿交替更频繁和复杂^[1-3]。干湿交替是土壤反复经历干旱和湿润的一个自然过程^[4],能够导致土壤水分发生较大的波动、土壤涨缩及土壤团聚体变化,从而影响土壤微生物种类、数量及其活性,对土壤呼吸和有机质矿化作用产生影响^[5-6]。

土壤呼吸是土壤中的有机碳在微生物的作用下转化为无机碳的过程,是碳循环过程中的重要环节^[7-9]。一般来说,干湿交替能促进土壤呼吸^[10-11]。干湿交替的干旱过程限制了土壤活性有机碳的扩散,影响了土壤微生物活性,从而对土壤碳的转化和矿化产生不同程度的影响^[12]。同时,干旱过程引起土壤中部分微生物死亡,增加了土壤可利用有机碳源^[13]。重新湿润后,土壤活性有机碳的扩散增强,微生物得以大量繁殖,且微生物的活性明显增加,在一定程度上加快土壤有机碳的矿化^[11,13-14]。研究表明,干湿交替的重新湿润过程能引起土壤有机碳矿化速率短时激增的激发效应,促进土壤呼吸和 CO₂ 的排放^[4,15],但多次干湿交替的激发效应会逐渐减弱^[16]。然而多次干湿交替的强度和频率对土壤呼吸的影响是否一致,还缺少相应研究,尤其是对高寒湿地土壤。

土壤可溶性有机碳是土壤活性碳库的重要组成部分,在土壤中不稳定且易被土壤微生物利用^[2,17-18]。干湿交替通过破坏土壤团聚体结构,使原本受保护的有机质暴露,增强了土壤的矿化作用,增加了土壤可溶性有机碳含量^[2,19],改变了土壤中容易被植物吸收利用的养分,比如硝态氮和铵态氮含量。已有研究表明,干湿交替频率增加可降低土壤硝态氮含量,增加铵态氮含量^[20]。但对多次干湿交替条件下土壤可溶性有机碳及无机氮的研究相对不足,尚没有一致的结论,尤其是高寒湿地土壤。

本研究以若尔盖高寒湿地土壤为研究对象,探究不同干湿交替强度和频率对高寒湿地土壤呼吸、土壤可溶性碳和无机氮的影响,为深入理解气候变化下高寒湿地土壤碳氮动态提供基础,也为高寒湿地应对气候变化和制定温室气体排放清单提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究土壤来自若尔盖高寒湿地。若尔盖高寒湿地位于青藏高原东部,是我国重要的水源涵养地和碳储藏区^[21],也是世界上最大的高原泥炭湿地。由于其位于高海拔地区,对气候变化敏感,若尔盖高寒湿地成为全球气候变化的敏感区和预警区^[21-22]。该区属于寒温带大陆性季风气候,日照强、温差大,年平均气温 0.6~1.2℃,年降水 550~700 mm^[2]。若尔盖高寒湿地以低山、丘陵、河谷和阶地地貌为主^[23],地表常年淹水、季节性淹水或临时性淹水。植物群落以西藏蒿草(*Kobresia tibetica*)、木里苔草(*Carex muliensis*)、毛苔草(*Carex lasiocarpa*)为优势种^[2]。2016 年 9 月,选择若尔盖典型高寒沼泽湿地,设置 4 个 1 m×1 m 的样方,去除地表植被,采用多点混合法采集表层(0—20 cm)土壤 2 kg,保持土壤原状带回实验室。

1.2 试验设计

根据野外观测的生长季降水量和降水频率,设置两个干湿交替强度即高强度(221 mm,约占全年降水量的 40%,相当于试验期野外实际降水量)、低强度(155 mm,相当于 70 %野外实际降水量),两个频率即高频(8 d/次,野外降水频率均值)、低频(16 d/次,延长一倍野外降水频率),另设恒定水分组(CK)作为对照,共 5 种干湿交替处理,每种处理 5 个重复(图 1)。在 250 ml 培养瓶底部铺 5 mm 石英砂,野外采集的土壤经过挑根和过筛处理,平铺 2 cm 在培养瓶内。培养瓶底部放置装有 10 ml 浓度为 1 mol/L NaOH 的小棕瓶,NaOH 溶液用于吸收培养过程中土壤呼吸释放的 CO₂,同时在培养瓶瓶口悬挂无水硅胶用于吸收培养过程中蒸发的水分,培养瓶密闭后置于人工气候箱恒温(15℃)无光条件下培养 144 d,即高频率和低频率处理分别经历 18,9 个干湿交替周期。试验开始前,在室内常温避光条件下进行预培养试验以恢复微生物的活性。培养期间根据不同的干湿交替处理定期进行水分添加,每 4 d 更换一次干燥剂,同时称量培养瓶的质量,计算水分变化。培养期前 64 d 每 8 d 更换一次 NaOH 溶液,培养后期由于

土壤呼吸速率减慢,每16 d更换一次,更换的碱液加入过量的 BaCl_2 (1 mol/L) 溶液后利用 HCl (0.5 ml/L) 进行酸碱滴定计算释放的 CO_2 的量。

1.3 指标测定

利用 NaOH 溶液吸收土壤呼吸作用所释放的 CO_2 。每次更换的 NaOH 溶液加入过量的 BaCl_2 (1 mol/L) 溶液,自动滴定仪 (ZDJ-5 型自动滴定仪) 用 0.5 mol/l 盐酸溶液滴定剩余 NaOH 溶液的浓

度^[12,15],自动滴定仪显示滴定过程中所用盐酸的体积,计算不同干湿交替处理条件下 CO_2 的释放总量,其计算公式如下^[24]:

$$m = \frac{1}{2} (C_1 - C_2) \times V \times M \quad (1)$$

式中: m 为释放 CO_2 的质量; C_1 为碱液吸收 CO_2 前的浓度; C_2 为碱液吸收 CO_2 后的浓度; V 为培养过程中碱液的体积; M 为 CO_2 的摩尔质量。

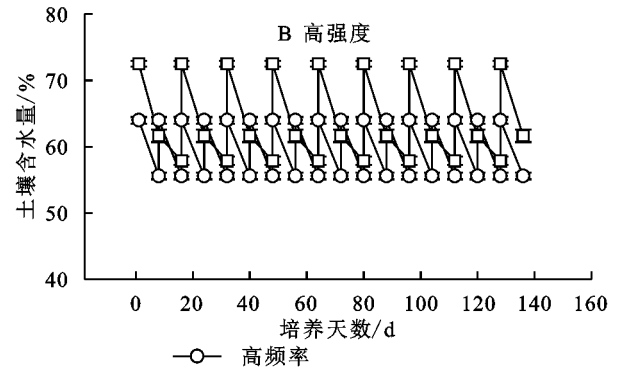
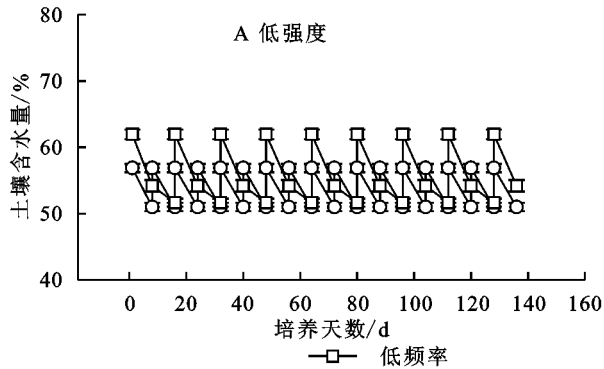


图1 土壤干湿交替变化处理

土壤可溶性有机碳测定采用如下方法^[2]:称取 5 g 新鲜土样放入 50 ml 的离心管中,加入 25 ml 去离子水,将离心管置于振荡机中在常温条件下以 120 r/min 的速度振荡 1.5 h,再将离心管置于离心机以 3 000 r/min 的速度离心 10 min,将土壤提取液经过 0.45 μm 微孔滤膜过滤。利用 multi N/C 3100 TOC 分析仪 (德国耶拿分析仪器股份公司,耶拿,德国),测定土壤可溶性有机碳含量。

土壤铵态氮和硝态氮测定采用如下方法^[25]:称取土壤 5.00 g 置于 50 ml 离心管中,加入 0.05 ml/L K_2SO_4 溶液 25 ml,将离心管置于摇床中在常温条件下以 120 r/min 的速度震荡 1.5 h,再将离心管置于离心机以 3 000 r/min 的速度离心 10 min,将土壤提取液上经过 0.45 μm 微孔滤膜过滤,利用连续流动分析仪 (德国 SEAL 公司,诺德施泰特,德国) 测定所得溶液即可得到铵态氮和硝态氮含量。无机氮为硝态氮和铵态氮二者之和。

1.4 数据计算与分析

本研究中引入 Orwin & Wardle 稳定系数,用以表征土壤各个指标应对干湿交替干扰的稳定性,其计算公式如下^[20]:

$$RS = 1 - \frac{2 |X_0|}{D_c + |X_0|} \quad (2)$$

式中:RS 为土壤稳定性系数; X_0 为不同干湿交替组与对照组土壤 CO_2 总量、无机氮、 NH_4^+ 、 NO_3^- 含量的差值; D_c 为对照组土壤 CO_2 总量、无机氮、 NH_4^+ 、

NO_3^- 的含量。

稳定性系数 RS 用于比较土壤呼吸、无机氮、 NH_4^+ 、 NO_3^- 对干湿交替强度和频率的稳定性,以 -1 和 +1 为界限,稳定性系数 RS 越接近 -1 则土壤对干湿交替的干扰稳定性越低,越接近 +1 则其稳定性越高^[26]。

采用 Excel 2013 处理初始数据,利用 SPSS 统计分析软件对数据进行双因素分析,并利用 Sigmaplot 12.5 绘图软件作图。

2 结果与分析

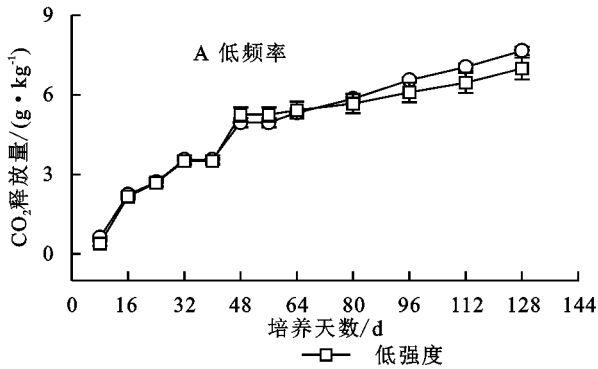
2.1 干湿交替对土壤呼吸的影响

随着培养时间延长, CO_2 累积排放量逐渐增加。培养前期, CO_2 排放量随培养时间的增加而逐渐加快,但到培养中后期, CO_2 排放量随时间增加逐渐减慢。在培养过程中,低强度干湿交替条件下高频率较低频率的 CO_2 排放量少 (图 2A,B)。

方差分析表明,干湿交替强度对 CO_2 排放量影响显著 ($p=0.028$),而干湿交替频率以及频率和强度的交互作用对 CO_2 排放量没有显著影响 (表 1)。高强度干湿交替下土壤呼吸显著高于低强度处理,其 CO_2 释放量分别为 (8.06 ± 0.29) g/kg 和 (7.12 ± 0.25) g/kg。相同干湿交替强度条件下,低频处理 CO_2 释放量高于高频处理。高强度干湿交替处理下,低频、高频处理 CO_2 释放量分别为 (8.17 ± 0.15) g/kg, (7.93 ± 0.58) g/kg。低强度干湿交替处理下,低频、高频处理 CO_2 释放量分别为 $(7.40 \pm$

0.42) g/kg,(6.84±0.25) g/kg(图 3A)。

土壤水分是影响土壤呼吸作用的主要因素^[16,27]。本研究中干湿交替强度显著影响了 CO₂ 排放量,即低强度干湿交替抑制了土壤呼吸。研究表明土壤含水量变化于 60%~70%左右适宜于微生物活动及土壤有机质的矿化作用^[28]。当土壤处于较干燥的情况下,适当增加土壤水分能够提高土壤呼吸作用增加 CO₂ 释放量,但是当土壤中水分超过一定水平



时,土壤的空隙被水分填充,土壤氧气缺乏,好氧微生物活性降低,CO₂的释放受到抑制^[23]。本研究中土壤水分含量范围在 51.0%~72.5%,该土壤含水量比较适合于土壤微生物活动,尤其是高强度干湿交替,从而导致了高强度干湿交替下土壤呼吸最强烈。在本研究中,不同干湿交替处理下土壤呼吸释放的 CO₂量介于 6~9 g/kg,这一范围与以往研究的 CO₂ 释放量范围一致^[11-12,15]。

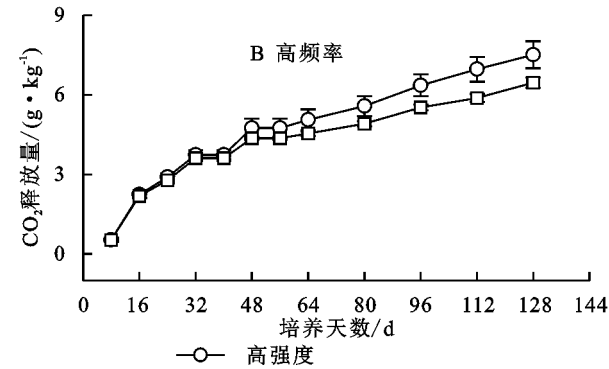


图 2 干湿交替对若尔盖高寒湿地土壤呼吸的影响

表 1 干湿交替对若尔盖高寒湿地土壤呼吸及土壤碳氮的影响方差分析

因子	强度		频率		强度×频率	
	$F_{1,16}$	p	$F_{1,16}$	p	$F_{1,16}$	p
CO ₂	5.8	0.028	1.1	0.311	0.2	0.689
DOC	4.9	0.041	0.2	0.664	0.2	0.703
无机氮	3.1	0.095	1.2	0.291	1.2	0.296
铵态氮	4.2	0.058	20.2	0.001	23.7	0.001
硝态氮	7.9	0.013	3.9	0.065	5.0	0.040
DOC/无机氮	11.7	0.003	2.1	0.163	0.4	0.558

研究表明,相对于淹水或土壤水分饱和条件,干湿交替能促进土壤呼吸,其影响机制主要是干湿交替对微生物活性的激活效应及土壤物理结构的裂变作用^[5]。干旱条件下,土壤中的有机碳扩散受到抑制,难以被微生物所利用,降低土壤呼吸作用,甚至会导致微生物的死亡,在一定程度上增加土壤中可利用有机碳^[15-16]。湿润之后土壤团聚体膨胀裂解,使原本受团聚体保护的稳定的有机质暴露,为微生物的正常代谢和生长提供物质基础^[5,13,16],且重新湿润后,微生物的活性和新陈代谢能力增强,微生物对有机物质的利用提高^[5,13]。随着干湿交替强度的增加,土壤激发作用随之增强,这是因为小强度的降水只能湿润表层土壤,且水分蒸发迅速,无法到达下层土壤对微生物产生激活作用^[29]。随着干湿交替次数的增加,干湿交替对土壤呼吸作用的激发效应逐渐减弱,主要表现为激发效应响应时间延长、激发效应持续时间

缩短及激发量的减少^[16]。这与本研究在培养后期 CO₂的释放量逐渐减少的结果一致。其可能原因是随着干湿交替过程的不断进行,没有外源有机碳的输入,土壤团聚体的稳定性得以提高,所释放的有机物质减少^[30],土壤中可供微生物利用的有机物质的可得到性降低,导致土壤呼吸作用受到抑制,所释放的 CO₂量也相应减少^[5,12,16]。本研究中干湿交替频率对土壤呼吸没有显著影响,可能是由于干湿交替高低频率下土壤含水量波动变化差异不是很大,土壤微生物群落和活性变化不大,从而导致土壤呼吸没有显著差异。

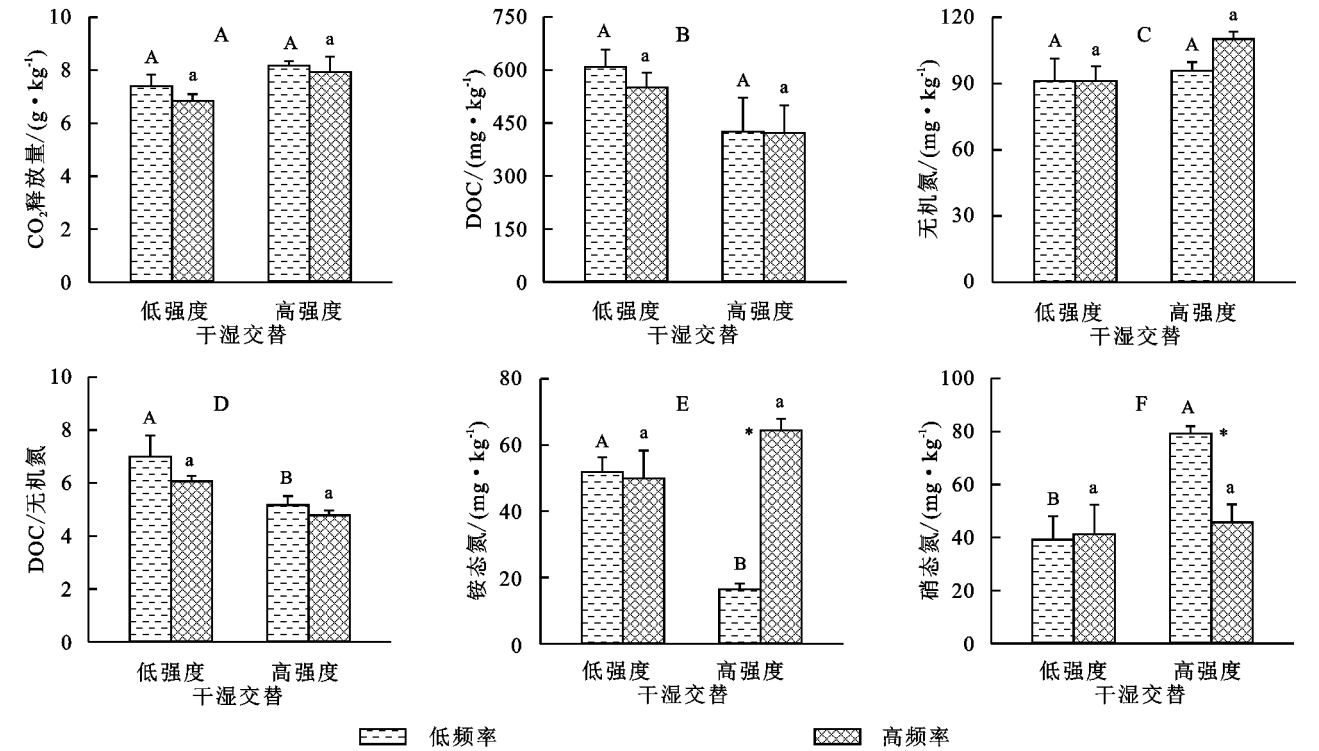
2.2 干湿交替对土壤可溶性有机碳和无机氮的影响

干湿交替强度显著影响土壤可溶性有机碳(DOC)含量($p=0.041$)和 DOC/无机氮($p=0.003$)(表 1)。低强度干湿交替处理下 DOC 含量和 DOC/无机氮的比值显著高于高强度处理(图 3B,D)。干湿交替强度和频率对土壤无机氮没有显著影响。铵态氮含量受干湿交替频率及交互作用的影响显著,硝态氮受干湿交替强度及交互作用的影响显著(表 1)。在高强度干湿交替下,增加频率显著增加了铵态氮含量,降低了硝态氮含量;在低强度干湿交替下,频率变化对土壤硝态氮和铵态氮含量均没有显著影响(图 3E,F)。

土壤 DOC 是土壤中容易被微生物所利用的碳源。干湿交替过程中土壤呼吸作用大量消耗土壤中的可利用性碳,进而对土壤可溶性有机碳含量产生影响。本研究中干湿交替强度增加显著增加了土壤呼

吸,高强度干湿交替处理下土壤可溶性有机碳的含量显著低于低强度处理,这一结果与前人研究结果一致^[4]。本研究中干湿交替对无机氮含量没有显著影响,但对硝态氮和铵态氮有影响,在高强度干湿交替条件下,干湿交替频率的增加降低了硝态氮含量,增

加了铵态氮含量,这与前人的研究结果较为一致^[10,25,31]在高强度干湿交替条件下,高频率的干湿交替下土壤保持较高的含水量,有利于反硝化作用的进行,而硝化作用受到抑制^[32],因此降低了硝态氮含量,增加了铵态氮含量。



注:不同大小写字母代表同一干湿交替频率下不同强度之间差异显著; * 代表同一干湿交替强度下不同频率之间差异显著($p<0.05$)。

图 3 干湿交替对若尔盖高寒湿地土壤呼吸及土壤碳氮的影响

2.3 土壤呼吸和土壤碳氮稳定性

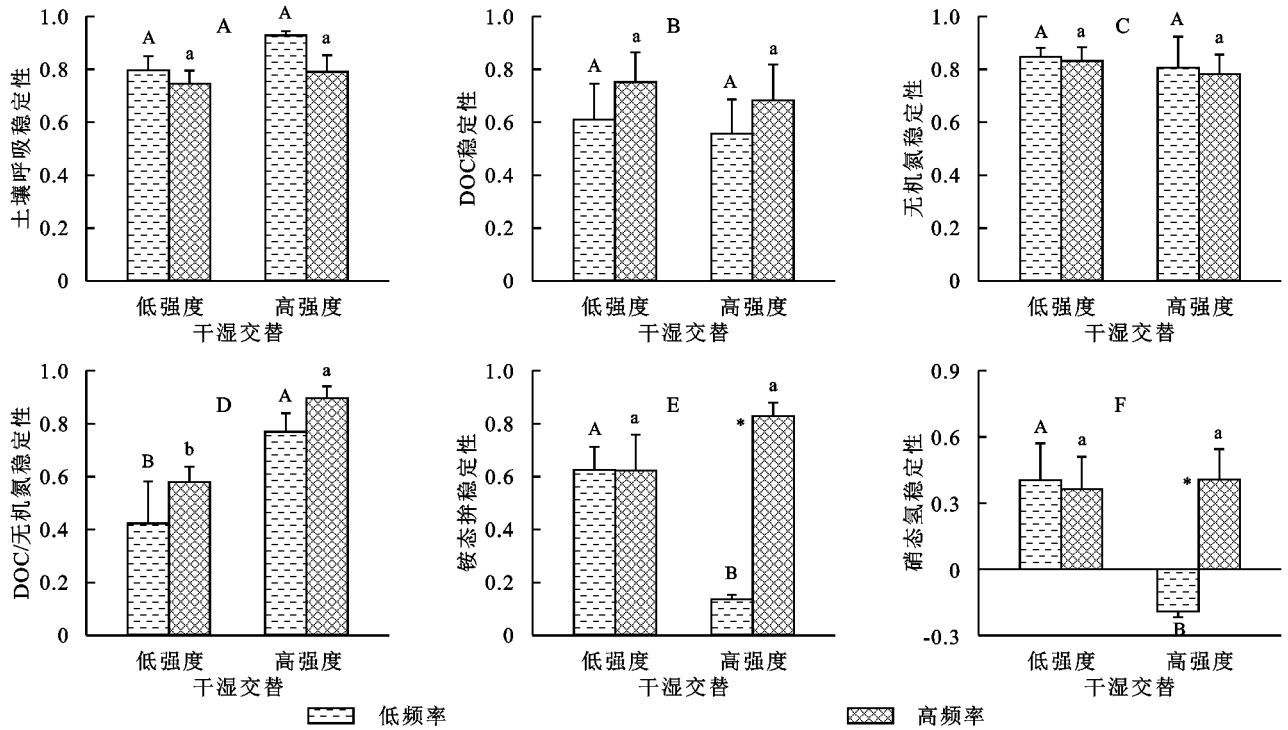
干湿交替强度显著影响 DOC/无机氮稳定性,干湿交替频率、强度与频率的交互作用显著影响土壤铵态氮稳定性,硝态氮稳定性受干湿交替强度和频率交互作用的影响显著。干湿交替强度和频率对土壤呼吸稳定性、DOC 和无机氮稳定性均没有显著影响(表 2)。

高强度干湿交替处理显著增加了 DOC/无机氮的稳定性(图 4D)。在高强度干湿交替下,增加频率有利于维持土壤铵态氮和硝态氮的稳定性(图 4E,F)。

表 2 干湿交替对土壤稳定性的影响

因子	强度		频率		强度×频率	
	$F_{1,16}$	p	$F_{1,16}$	p	$F_{1,16}$	p
土壤呼吸	3.3	0.090	3.8	0.070	0.8	0.393
DOC	0.2	0.646	1.1	0.314	0.0	0.951
DOC/无机氮	12.4	0.003	2.3	0.152	0.0	0.877
无机氮	0.4	0.552	0.1	0.796	0.0	0.959
铵态氮	2.7	0.117	16.3	0.001	16.6	0.001
硝态氮	4.4	0.053	4.5	0.051	5.9	0.028

土壤稳定性是土壤健康的指标之一,是土壤抵抗人为干扰和自然环境变化的能力^[33-34]。本研究选取了土壤呼吸释放 CO₂ 总量、DOC,DOC/无机氮、无机氮、铵态氮和硝态氮等指标反映若尔盖湿地土壤对于干湿交替干扰的抵抗性。本研究中干湿交替强度、频率及交互作用对土壤呼吸稳定性均无显著影响,主要由于本研究中土壤水分的波动变化不是很剧烈(图 1),高频率下土壤含水量变化于 55.6%~64.0%(高强度)和 51.0%~56.9%(低强度),低频率下土壤含水量变化于 57.9%~72.5%(高强度)和 51.6%~61.9%(低强度),该土壤含水量范围都比较适合于土壤微生物活动,即较小的干湿交替变化对土壤微生物进行碳氮矿化作用的影响不大,导致土壤呼吸稳定性没有差异。铵态氮和硝态氮稳定性对干湿交替的响应趋势较为一致。研究表明,相对于硝态氮,微生物会优先选择铵态氮作为氮源,其原因可能是利用铵态氮所消耗的能量较少^[35]。在高强度干湿交替下,低频率促进微生物消耗更多的铵态氮,导致土壤中的铵态氮显著减少,降低了其稳定性。



注:不同大小写字母代表同一干湿交替频率下不同强度之间差异显著; * 代表同一干湿交替强度下不同频率之间差异显著 ($p < 0.05$)。

图 4 干湿交替对若尔盖高寒湿地土壤呼吸稳定性的影响

3 结论

干湿交替强度和频率对若尔盖高寒湿地土壤呼吸及其稳定性影响不同。干湿交替强度显著影响若尔盖高寒湿地土壤呼吸、DOC 及 DOC/无机氮的比值,低强度干湿交替显著降低了 CO_2 排放,同时有利于增加可溶性有机碳的含量和提高 DOC/无机氮的比值。土壤铵态氮及稳定性受干湿交替频率及交互作用的显著影响,硝态氮受干湿交替强度及交互作用的显著影响。土壤呼吸、DOC 和无机氮稳定性均不受干湿交替强度、频率及交互作用的显著影响。因此,降水模式改变,尤其是降水量的变化,影响土壤干湿交替强度,将对若尔盖高寒湿地土壤呼吸和 DOC、铵态氮及硝态氮含量产生影响,进而影响高寒湿地土壤活性碳氮的稳定性。未来可进一步加强气候变化下高寒湿地碳氮循环过程研究,为深入理解高寒湿地应对全球气候变化提供基础。

参考文献:

- [1] 李峰平,章光新,董李勤.气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J].地理科学,2013,33(4):457-464.
- [2] 张雪雯,莫熠,张博雅,等.干湿交替及凋落物对若尔盖泥炭土可溶性有机碳的影响[J].湿地科学,2014,12(2):134-140.
- [3] Zeppel M J B, Wilks J V, Lewis J D. Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation

on plants[J]. Biogeosciences, 2014,11(11):3083-3093.

- [4] 李梦寻,王冬梅,任远,等.不同干湿交替频率对土壤速效养分、水溶性有机碳的影响[J].生态学报,2018,38(5):1542-1549.
- [5] 张梦瑶,高永恒,谢青琰.干湿交替对土壤有机碳矿化影响的研究进展[J].世界科技研究与发展,2017,39(1):17-23.
- [6] 唐江,丁长欢,樊晶晶,等.水热对三峡水库消落带退耕稻田土壤有机碳矿化的影响[J].土壤,2016,48(6):1202-1208.
- [7] Taggart M, Heitman J L, Vepraskas M. Temperature and water content effects on carbon mineralization for Sapric soil material[J]. Wetlands, 2012,32(5):939-944.
- [8] 李典鹏,姚美思,韩东亮,等.新疆达坂城盐湖不同植物群落土壤呼吸研究[J].土壤,2017,49(3):621-629.
- [9] 吕富成,王小丹.凋落物对土壤呼吸的贡献研究进展[J].土壤,2017,49(2):225-231.
- [10] Kruse J S, Kissel D E, Cabrera M L. Effects of drying and rewetting on carbon and nitrogen mineralization in soils and incorporated residues[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004,69(3):247-256.
- [11] Gao J, Feng J, Zhang X, et al. Drying-rewetting cycles alter carbon and nitrogen mineralization in litter-amended alpine wetland soil[J]. Catena, 2016,145:285-290.
- [12] 黄石德,叶功富,林捷,等.干湿交替对武夷山不同海拔土壤碳矿化的影响[J].生态学杂志,2018,37(2):312-321.

- [13] 王健波,张燕卿,严昌荣,等.干湿交替条件下土壤有机碳转化及影响机制研究进展[J].土壤通报,2013,44(4):998-1004.
- [14] 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[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(3):798-805.
- [15] 孟伟庆,莫训强,胡蓓蓓,等.模拟干湿交替对湿地土壤呼吸及有机碳含量的影响[J].土壤通报,2015,46(4):910-915.
- [16] 王苑,宋新山,王君,等.干湿交替对土壤碳库和有机碳矿化的影响[J].土壤学报,2014,51(2):342-350.
- [17] 丁婷婷,王百群,何瑞清,等.施用秸秆对土壤可溶性有机碳氮及矿质氮的影响[J].水土保持研究,2014,21(6):72-77.
- [18] 杨果果,孔玉华,赵佳宝,等.不同松栎混交林土壤溶解性有机碳氮的差异分析[J].水土保持研究,2017,24(6):79-83.
- [19] 张晓雅,胡益珩,安菁,等.若尔盖泥炭沼泽土壤中可溶性有机碳含量对降水变化的响应[J].湿地科学,2018,16(4):546-551.
- [20] Morillas L, Durán J, Rodríguez A, et al. Nitrogen supply modulates the effect of changes in drying-rewetting frequency on soil C and N cycling and greenhouse gas exchange[J]. Global Change Biology, 2015,21(10):3854-3863.
- [21] 申格,徐斌,金云翔,等.若尔盖高原湿地研究进展[J].地理与地理信息科学,2016,32(4):76-82.
- [22] 柴露露,吴中华,周甲男,等.若尔盖高原湿地水生植物现状及保护策略[J].武汉大学学报(理学版),2018,64(1):37-45.
- [23] 张雪雯.干湿交替对若尔盖湿地枯落物和土壤有机质分解的影响[D].北京:北京林业大学,2014.
- [24] 陈全胜,李凌浩,韩兴国,等.水热条件对锡林河流域典型草原退化群落土壤呼吸的影响[J].植物生态学报,2003,27(2):202-209.
- [25] 安菁,张晓雅,段牧莹,等.干湿交替强度和频率对香菇草—土壤系统无机氮及净氮矿化的影响[J].云南农业大学学报(自然科学),2018,33(3):494-499.
- [26] Orwin K H, Wardle D A. New indices for quantifying the resistance and resilience of soil biota to exogenous disturbances[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2004,36(11):1907-1912.
- [27] 包振宗,侯艳艳,朱新萍,等.干湿交替和模拟氮沉降对巴音布鲁克高寒湿地土壤 CO₂ 排放的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(3):598-604.
- [28] Linn D M. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and non-tilled soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984,48(3):647-653.
- [29] 赵蓉,李小军,赵洋,等.固沙植被区土壤呼吸对反复干湿交替的响应[J].生态学报,2015,35(20):6720-6727.
- [30] 赵蓉,李小军,赵洋,等.固沙植被区两类结皮斑块土壤呼吸对不同频率干湿交替的响应[J].生态学杂志,2015,34(1):138-144.
- [31] 范志平,胡亚林,黎锦涛,等.干湿交替对半干旱区沙地樟子松人工林土壤 C 和 N 矿化速率影响[J].生态学杂志,2015,34(12):3360-3367.
- [32] 邓焕广,张智博,张菊,等.多重干湿交替对城市河岸带土壤氮转化及 N₂O 排放的影响研究[J].土壤通报,2018,49(3):640-645.
- [33] 李小方,邓欢,黄益宗,等.土壤生态系统稳定性研究进展[J].生态学报,2009,29(12):6712-6722.
- [34] 唐萱恩.土壤生态系统的稳定性[J].生物化工,2017,3(5):88-89.
- [35] 程谊,张金波,蔡祖聪.土壤中无机氮的微生物同化和非生物固定作用研究进展[J].土壤学报,2012,49(5):1030-1036.