

冻融交替对高寒草甸 N₂O 排放速率的影响

李尚宏¹, 周 赓², 杜岩功³

(1. 西宁特殊钢股份有限公司, 青海 西宁 810008; 2. 威海市农业局, 山东 威海 264411;

3. 中国科学院西北高原生物研究所, 青海 西宁 810001)

摘要:采用室内培养方法,分析了高寒矮嵩草草甸土壤 N₂O 排放速率对土壤冻融交替作用的响应特征。结果表明:随着冻结时间增加, -10℃和-5℃冻结土壤 N₂O 排放速率均明显降低,且前者的降低速率显著高于后者、均低于对照土壤 N₂O 排放速率;随着冻结土壤的融化, -10℃和-5℃培养土壤 N₂O 排放速率急剧增加,融化 2 h 出现排放峰值,而后逐渐降低,但均高于对对照样地,在冻结 21 d 时,各处理高寒草甸土壤 N₂O 排放速率达到最低值。随着冻融交替循环次数从 1 次增加到 12 次,高寒草甸土壤 N₂O 排放速率明显增加,从最初的 1.23±0.05 g/(kg·h) 增加到 3.34±0.59 g/(kg·h)。从第 12 次到第 24 次冻融循环时,高寒草甸土壤 N₂O 排放速率显著下降($P<0.05$),降低幅度达到 31.7%。土壤冻融过程会显著激发高寒草甸 N₂O 排放速率,有助于科学估算高寒草甸 N₂O 排放量。

关键词:冻融交替;高寒草甸;氧化亚氮;青藏高原

中图分类号:X 821 文献标志码:A 文章编号:1009-5500(2018)03-0085-05

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2018.03.014

氧化亚氮(N₂O)是引起全球气候变化的重要温室气体之一,占全球增温效应的 7.9%^[1],在大气中寿命较长(121年),参与大气对流层和平流层很多光化学反应,破坏大气臭氧层^[2]。目前,大气 N₂O 浓度约为 322 nL/L,相比于工业革命前(270 nL/L)增加了 20%,且年增长速率约为 0.7 nL/L^[3-4]。

冻融交替是由于季节或昼夜热量变化在表土或一定深度反复冻结-解冻的土壤过程,在中高纬度及高海拔地区,土壤冻融交替现象普遍存在。土壤冻融交替直接影响到高寒草甸土壤物理和微生物性状、氮素转化过程与强度,激发土壤 N₂O 排放^[5-6]。

冻融过程能显著增加羊草草原(*Aneurolepidium chinense*)、高寒金露梅(*Potentilla fruticosa*)灌丛草甸

和沼泽湿地土壤 N₂O 排放速率^[7-9],其中冻融胁迫能促使土壤 N₂O 排放量增加 220%^[10];寒温带土壤休眠季 N₂O 排放通量来自于冻融交替过程的占氮排放量的 65%^[11],挪威森林土壤冻融期 N₂O 排放量占年排放量的 80%以上^[12];内蒙围封样地冻融过程 N₂O 排放量占总排放量的 72%^[13];冬季三江平原沼泽湿地是 N₂O 汇,随着冻融期土壤地温逐渐升高,转变成为 N₂O 源^[14]。

高寒草甸是青藏高原的主体类型之一,约占高原总面积的 35%^[15],具有独特的自然环境和大气环流格局,是世界气候变化的重要启动区和调节区,为全球气候变化和地球系统科学研究的最佳天然实验室,长期受冻融作用影响。受温室效应影响,区域降水增加的气候情景,促使青藏高原地区冻融交替次数增加^[16-17],这将对高寒草甸 N₂O 排放速率产生怎样的影响,已成为科学界广泛关注的热点研究内容。因此,通过研究冻结温度和冻融时间对高寒草甸 N₂O 排放速率的影响,为探讨青藏高原高寒草甸对冻融循环过程的影响及发生机制、揭示全球气候变化的区域效应和高海拔生态系统的管理提供科学依据和理论指导。

收稿日期:2017-12-19; 修回日期:2018-05-08

基金项目:国家自然科学基金(31470530 和 31770532); 青海省自然科学基金(2016-ZJ-918Q)资助

作者简介:李尚宏(1979-),男,青海乐都人,学士,助理工程师,主要从事土壤生态学研究。

E-mail:403672585@qq.com

杜岩功为通讯作者。

E-mail:ygdu@nwipb.cas.cn

1 材料和方法

1.1 研究区概况

试验所采集土壤样地,位于中国科学院海北高寒草甸生态系统定位站(海北站),地处祁连山北支冷龙岭东段南麓的大通河谷, N 37°29′~37°45′, E 101°12′~101°23′,海拔 3 280 m。属典型的高原大陆性气候,年均气温-1.7℃,最冷月(1月)平均气温-14.8℃,最热月(7月)平均温度 9.8℃。年均降水量 560 mm,主要集中于 5~9 月,占年降水量的 80%,植物生长季,雨热同期。

土壤类型为高山草甸土,平均厚度约为 0.65 m。0~10 cm 表层土壤有机碳和全氮为 5.50%、0.76%;铵态氮和硝态氮含量分别为 8.96、6.05 g/kg;土壤容重为 0.78 g/cm³[1]。海北站地区冻融交替作用主要发生在 4~5 月,白天温度高,土壤开始解冻,夜间平均温度低于 0℃,土壤反复冻结[5]。

1.2 试验设计与方法

2014 年 8 月,选择地势平坦且长势均匀的矮高草甸为研究对象,利用蛇形取样法采集 0~10 cm 土壤中样品,在实验室自然风干、通过 2 mm 土壤筛,称取 50 g 土壤样品,放置于 500 mL 棕色培养瓶,定期称其重量,将土壤湿度保持在田间持水量(53.6%重量含水量)。

在高低温试验箱(TRS-50),设置-10℃,-5℃和 5℃(对照实验,CK)培养 1 个月,分别再培养 2、4、8、24 h,3、5、7、14、21、28 d,各 3 次重复。之后将-10℃,-5℃冻结土壤在 5℃条件下分别培养 2、4、8、24 h,3、5、7 d,分析不同冻结和融化温度及培养时间对高寒草甸土壤 N₂O 排放速率的影响。

设置冻结温度-5℃、冻结 12 h,融化温度 5℃,融化时间 12 h,采用程序升、降温的方式,以 24 h 为 1 次冻融交替周期,进行冻融循环实验,冻融交替次数分别为 1、2、4、8、12 和 24 次。用带有三通阀的 30 mL 注射器采集气体,采用气相色谱法(HP4890D, Agilent, 内装电子捕获器 ECD),测定其 N₂O 排放速率。柱箱和检测器温度分别为 70℃和 300℃,最小因子检测限为 ±5 nL/L, N₂O 排放速率(F)的计算。

$$F = \frac{M \times \rho \times (V_1 - V_2) \times 10^6}{S \times 24 \text{ h}}$$

式中:M 为气体浓度,ρ 为气体密度,V₁ 为培养室和 V₂

土壤体积,S 为底面积。

1.3 数据分析

依据单因素方差分析,研究冻融循环次数对高寒草甸土壤 N₂O 排放速率的影响(P<0.05)。统计分析均利用 SPSS 16.0 (SPSS, Chicago, USA) 实现,相关图件采用 Excel 2010 绘制。

2 结果与分析

2.1 不同冻结和融化时间对高寒草甸土壤 N₂O 排放速率的影响

随着冻结时间的延长,-10℃和-5℃培养温度下,青藏高原高寒草甸土壤 N₂O 排放速率均明显降低,且前者的降低速率显著高于后者,均低于对照土壤 N₂O 排放速率(图 1)。

冻结 2 h 后,草甸土壤在 5℃对照,-5℃和-10℃培养时,土壤 N₂O 排放速率分别为 3.58±0.07, 2.45±0.04 和 2.13±0.04 g/(kg·h),冻结土壤 N₂O 排放速率明显低于对照样地(P<0.05),降低幅度分别为 31.6%和 40.5%(图 1)。
-5℃培养土壤冻结 24 h 后,土壤 N₂O 排放速率略有增加,对照处理土壤 N₂O 排放通量接近。经过 5 d 冻结,-10℃培养和对照处理相比于冻结 3 d 处理,土壤 N₂O 排放速率增加。各处理均在冻结 21 d 时,高寒草甸土壤 N₂O 排放速率达到最低值。5℃对照,-5℃和-10℃培养时,土壤 N₂O 排放速率分别为 0.34±0.06, 0.05±0.09 和 0.12±0.03 g/(kg·h)(图 1)。

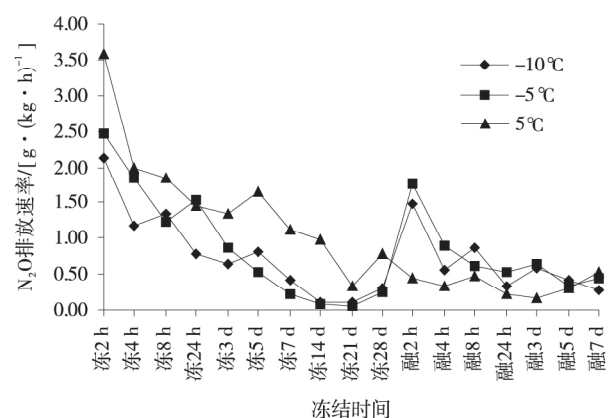


图 1 不同冻结温度,冻结时间及融化时间处理下高寒草甸土壤 N₂O 的排放速率

Fig. 1 Effect of frozen temperature and time and thawed time on soil N₂O emission rates

随着冻结土壤的融化, -5°C 和 -10°C 培养土壤 N_2O 排放速率急剧增加, 随后逐渐降低, 但均高于对对照地。冻结土壤融化 2 h, 5°C 对照、 -5°C 和 -10°C 培养时, 土壤 N_2O 排放速率分别为 0.45 ± 0.04 , 1.75 ± 0.02 和 $1.48 \pm 0.1 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ (图 1), 后两者土壤 N_2O 排放速率是对照样地的 3.9 和 3.3 倍 ($P < 0.01$)。冻融交替作用显著的激发了高寒草甸土壤 N_2O 排放速率。

冻结期间, 土壤冻结显著降低高寒草甸土壤 N_2O 排放速率, 随着冻结温度降低, 相比于对照处理, -10°C 和 -5°C 培养土壤 N_2O 降低速率分别为 49.7% 和 39.7%, 且均达到统计学差异 ($P < 0.05$)。融化期间, -5°C 培养土壤 N_2O 排放速率显著高于 -10°C 和 5°C 培养土壤, 三者之间存在显著差异 ($P < 0.05$) (表 1)。试验期间, 冻融交替过程高寒草甸土壤 N_2O 排放速率从高到低分别为 $5^{\circ}\text{C} > -5^{\circ}\text{C} > -10^{\circ}\text{C}$ 条件培养土壤 ($P < 0.05$), 冻融交替作用对高寒草甸土壤 N_2O 排放速率的影响, 受冻结温度的调控。

表 1 不同冻结温度处理下高寒草甸土壤 N_2O 的排放速率

Table 1 Effect of frozen temperature on soil N_2O emission rates in alpine meadow

时间	N_2O 排放速率/ $[(\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{h})^{-1})]$		
	-10°C	-5°C	5°C
冻结 1月 (n=10)	$0.76 \pm 0.22^{\text{a}}$	$0.91 \pm 0.28^{\text{b}}$	$1.51 \pm 0.29^{\text{a}}$
融化 7 d (n=6)	$0.65 \pm 0.17^{\text{b}}$	$0.75 \pm 0.19^{\text{a}}$	$0.36 \pm 0.05^{\text{c}}$
冻融交替平均值	$0.73 \pm 0.21^{\text{c}}$	$0.84 \pm 0.17^{\text{b}}$	$1.04 \pm 0.21^{\text{a}}$

2.2 冻融循环次数对高寒草甸土壤 N_2O 排放速率的影响

随着冻融交替循环次数从 1 次增加到 12 次, 高寒草甸土壤 N_2O 排放速率明显增加, 从最初的 1.23 ± 0.05 增加到 $3.34 \pm 0.59 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$ ($P < 0.05$)。从第 1 次到第 2 次、第 8 次到第 12 次冻融循环阶段, 高寒草地土壤 N_2O 排放速率急速增加, 增加速率分别为 59.3% 和 30.5%, 均达到显著性差异。而其他各阶段增长缓慢, 从第 2 次到第 4 次、第 4 次到第 8 次冻融循环过程, 高寒草甸土壤 N_2O 排放速率增加幅度仅为 13.8% 和 14.8% (图 2)。

从第 12 次到第 24 次冻融循环时, 高寒草甸土壤 N_2O 排放速率开始下降, 从 3.34 ± 0.59 降低到 $2.28 \pm 0.08 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{h})$, 两者之间存在显著性差异 ($P <$

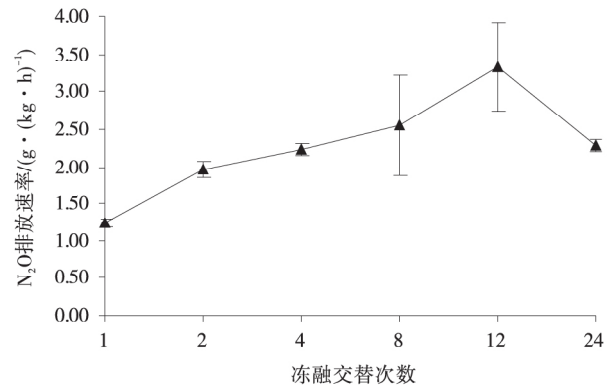


图 2 冻融交替次数处理下高寒草甸 N_2O 的排放速率

Fig. 2 Effect of alternate freezing-thawing times on soil N_2O rates in alpine meadow

0.05), 降低幅度达到 31.7% (图 2)。

3 讨论

土壤硝化和反硝化作用是草地生态系统 N_2O 排放的主要过程, 受到多种因素影响, 如土壤微生物活性、土壤有机质含量、pH、氧化还原电位、铵态氮和硝态氮含量等^[18-19]。冻融交替不仅使土温发生变化, 而且对土壤的理化性质和生物过程都会产生直接的作用, 可能会增加微生物吸收利用的碳氮微生物底物, 提高硝化细菌和反硝化细菌数量^[20]。不论野外和室内试验均表明冻融作用会激发高寒草地土壤 N_2O 排放^[21-22]。

研究发现随着冻结温度降低、冻结时间延长, 高寒草甸土壤 N_2O 排放速率明显降低; 土壤融化时, 高寒草甸土壤 N_2O 急剧增加, 融化 2 h 其 N_2O 排放速率达到峰值; 随着冻融循环次数增加, 高寒草甸土壤 N_2O 排放速率继续增加, 12 次冻融循环时排放速率达到峰值, 随后降低。可能是因为冻融交替作用显著影响土壤水热传导、同时引起土壤水分向冻结土壤周围转移, 有利于维持高寒草甸土壤水分^[14,23], 土壤长期处于较高土壤水分状态, 导致形成局部厌氧环境, 从而提高了土壤反硝化作用^[5]。此外, 反复冻融交替过程能够降低土壤团聚体稳定性, 引起团聚体破碎; 大量根系的死亡(细根), 其腐烂、降解会促进土壤碳氮循环, 产生较多碳氮养分供给微生物吸收利用, 促进反硝化作用^[5,24]。土壤反硝化作用是草地生态系统 N_2O 产生及排放的重要途径^[1,25]。但是随着底物逐渐被微生物耗竭, 土壤 N_2O 排放速率可能呈现降低趋势。

4 结论

随着冻结时间的延长,高寒草甸土壤 N_2O 排放速率均明显降低。冻结 2 h 后,高寒草甸 $-5^\circ C$ 和 $-10^\circ C$ 培养土壤 N_2O 排放速率明显降低,且后者降低幅度高于前者;各处理均在冻结 21 d 时,高寒草甸土壤 N_2O 排放速率达到最低值。随着冻结土壤的融化, N_2O 排放速率急剧增加,融化 2 h, $5^\circ C$ 对照, $-5^\circ C$ 和 $-10^\circ C$ 培养时,后两者土壤 N_2O 排放速率是对照样地的 3.9 和 3.3 倍。冻融交替作用显著的激发了高寒草甸土壤 N_2O 排放速率。随着冻融交替循环次数从 1 次增加到 12 次,高寒草甸土壤 N_2O 排放速率明显增加($P < 0.05$)。如果忽略冻融期高寒草甸 N_2O 排放速率的观测,可能会低估高寒草甸 N_2O 年排放量。

参考文献:

- [1] 杜岩功,周赓,郭小伟,等. 青藏高原高寒草甸土壤 N_2O 排放通量对温度和湿度的响应[J]. 草原与草坪,2016,36(1):55-59.
- [2] Smith K A. Changing views of nitrous oxide emissions from agricultural soil: key controlling processes and assessment at different spatial scales[J]. European Journal of Soil Science,2017,68(2):137-155.
- [3] Blasing T J. Recent Greenhouse Gas Concentrations[M]. Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge, TN, 2016.
- [4] PCC. Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2013.
- [5] 杜岩功,曹广民,邓永翠,等. 金露梅灌丛草甸氧化亚氮排放特征及冻融交替的影响研究[J]. 山地学报,2009,27(6):688-697.
- [6] 孙志高,刘景双,杨继松,等. 三江平原典型小叶章湿地土壤硝化-反硝化作用与氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报,2007,18(1):185-192.
- [7] Holst J, Liu C, Yao Z, et al. Fluxes of nitrous oxide, methane and carbon dioxide during freezing-thawing cycles in an Inner Mongolian steppe[J]. Plant and Soil, 2008, 308: 105-117.
- [8] Prieme A, Christensen S. Natural perturbations, drying-wetting freezing-thawing cycles, and the emission of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from farmed organic soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(15):2083-2091.
- [9] Quist M, Nilsson M, Srensson F, et al. Nitrous oxide production in a forest soil at low temperatures processes and environmental controls[J]. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 49: 371-378
- [10] Van B, Prevost D, Pelletier F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil. [J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5):1638-1643.
- [11] Wagner R C, Thurtell G W, Kidd G K, et al. Estimates of nitrous oxide emissions from agricultural fields over 28 months[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1997, 77(2):135-144.
- [12] Goldberg S D, Muhr J, Borken W. Fluxes of climate relevant trace gases between a Norway spruce forest soil and atmosphere during repeated freeze thaw cycles in mesocosms[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(5):729-739.
- [13] Wolf B, Zheng X, Brüggemann N, et al. Grazing-induced reduction of natural nitrous oxide release from continental steppe[J]. Nature, 2010, 464(7290):881-884.
- [14] 宋长春,王毅勇,王跃思,等. 季节性冻融期沼泽湿地 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放动态[J]. 环境科学, 2005, 26(4): 7-12.
- [15] 李英年,赵亮,赵新全,等. 5 年模拟增温后矮蒿草甸群落结构及生产量的变化[J]. 草地学报, 2004, 12(3): 236-239.
- [16] 王根绪,程国栋. 青藏高原草地土壤有机碳库及全球意义[J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 693-700.
- [17] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. Nature, 2010, 467(7311): 43-51.
- [18] 王金鹤,刘嘉,马卉,等. 冻融交替过程对黑土氧化亚氮释放特性的影响[J]. 环境与发展, 2014, 26(4): 42-45.
- [19] Jackson R D, Oates L G, Schacht W H, et al. Nitrous oxide emissions from cool-season pastures under managed grazing[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 101(3): 365-376.
- [20] Wagnerriddle C, Congreves K A, Abalos D, et al. Globally important nitrous oxide emissions from croplands induced by freeze-thaw cycles [J]. Nature Geoscience, 2017, 10(4): 334-356.
- [21] Virkaj rvi P, Maljanen M, Saarij rvi K, et al. N_2O emis-

- sions from boreal grass and grass-clover pasture soils [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 137(12): 59–67.
- [22] Wang L, Qi Y, Dong Y, *et al.* Effects and mechanism of freeze-thawing cycles on the soil N₂O fluxes in the temperate semi-arid steppe[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 56(6): 192.
- [23] Muller C, Martin M, Stevens R J, *et al.* Processes leading to N₂O emissions in grassland soil during freezing and thawing[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1325–1331.
- [24] 林笠, 王其兵, 张振华, 等. 温暖化加剧青藏高原高寒草甸土非生长季冻融循环[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017(1): 171–178.
- [25] 曹莹芳, 郭小伟, 周赓, 等. 青藏高原高寒草甸 N₂O 排放速率及其对降水和气温的响应特征[J]. *草原与草坪*, 2017, 37(4): 20–24.

Effect of alternative freezing and thawing on nitrous oxide rates in alpine meadow

LI Shong-hong¹, ZHOU Geng², DU Yan-gong³

(1. *Xining Special Steel Corporation Limited, Xining 810008, China*; 2. *Weihai Agricultural Bureau, Weihai 264411, China*; 3. *Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810008, China*)

Abstract: Alpine meadow was dominated on the Tibetan Plateau. It was revealed as a source of atmosphere N₂O. Seasonal alternatively freezing and thawing process was one of the main climate characteristic on the Tibetan Plateau. The response of N₂O emission flux of alpine *Kobresia* meadow to alternatively freezing and thawing was studied by laboratory incubation. The result indicated that soil N₂O emission rates decreased gradually under -10°C and -5°C incubation condition along with the increasing of freezing time. The rate of dropping in the former was significantly higher than the latter, and both fluxes were lower than the control. Along with the increasing of temperature, soil N₂O emission rates increased dramatically under -10 and -5°C incubation, and the fluxes reached at the peak in 2 hours, and then the rates decreased gradually. Meanwhile, the lowest emission rates of all plots were measured after freezing 21 days. In addition, alpine meadow ecosystem N₂O emission rates increased significantly from 1.23 ± 0.05 to 3.34 ± 0.59 g/(kg · h) with the increase of freezing and thawing process from 1 to 12. After that the flux decreased dramatically till 24 cycles. Processes of the alternative freezing and thawing could significantly stimulate the emission rates of N₂O. This study would contribute to accurate estimation of N₂O emission quantity in alpine meadow.

Key words: alternative freezing and thawing; alpine meadow; nitrous oxide; Tibetan Plateau