DOI: 10.5846/stxb201301150097

伍星,刘慧峰,张令能,傅伯杰,李宗善,汪庆兵,刘国华.雪被和土壤水分对典型半干旱草原土壤冻融过程中 CO₂和 N₂O 排放的影响.生态学报, 2014,34(19):5484-5493.

Wu X, Liu H F, Zhang L N, Fu B J, Li Z S, Wang Q B, Liu G H.Effects of snow cover and soil moisture on CO₂ and N₂O fluxes from typical semi-arid grassland soil subjected to freeze-thaw cycles. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19):5484-5493.

雪被和土壤水分对典型半干旱草原土壤冻融 过程中 CO₂ 和 N₂ O 排放的影响

伍 星1,刘慧峰1,2,张令能1,傅伯杰1,李宗善1,汪庆兵3,刘国华1,*

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 富阳 311400)

摘要:土壤冻融期间的温室气体排放量会显著增加,并在全年总排放量中占有重要的份额。但目前开展的土壤冻融循环模拟实 验大多是在土壤冻结之前调节土壤水分含量,而忽视了雪被在整个土壤冻融过程中的作用,因此导致室内模拟研究的结果与野 外原位观测的结果差异较大。为探索开展室内模拟土壤冻融实验的优化方案,采用人工浇水和覆雪两种方式调节土壤水分含 量,研究了雪被和土壤水分对内蒙古典型半干旱草原土壤冻融过程中 CO₂和 N₂O 排放的影响。结果表明,浇水和覆雪两种处理 对冻融循环过程中土壤 CO₂排放影响的差异不显著,CO₂排放量在消融期都会明显增加并随着冻融循环次数的增加而逐渐减 小。当土壤孔隙含水率达 50%左右时,浇水处理中的 N₂O 排放量在第 1 次土壤冻融循环中最高并随冻融循环次数增加而降 低,但在覆雪处理中,N₂O 在第 1 次冻融循环中的排放较小,而在后两次冻融循环中的排放量更为显著。造成两种处理 N₂O 排 放规律出现显著不同的原因可能是土壤剖面水分动态变化过程和微生物性状等方面的差异。土壤冻融过程中 CO₂和 N₂O 排放 量随土壤含水量升高而增加,但 N₂O 在土壤含水量较低时排放不明显,这表明可能只有当土壤含水量达到一定阈值时,冻融作 用才会对 N₂O 的排放产生显著影响。这些结果显示,雪被和土壤水分显著影响土壤冻融过程中的 CO₂和 N₂O 排放,室内模拟 土壤冻融实验应进一步优化。

关键词:雪被;土壤水分;冻融循环;温室气体;半干旱草原

Effects of snow cover and soil moisture on CO₂ and N₂O fluxes from typical semiarid grassland soil subjected to freeze-thaw cycles

WU Xing¹, LIU Huifeng^{1,2}, ZHANG Lingneng¹, FU Bojie¹, LI Zongshan¹, WANG Qingbing³, LIU Guohua^{1, *}

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, China

Abstract: Soil freeze-thaw cycle is very common in the regions at mid-high latitude and high altitude. Soil physical properties, chemical composition and microbial activities could be affected significantly during this cycle. Increases in greenhouse gas fluxes have been frequently reported during soil freezing and thawing, both in laboratory and field experiments. Moreover, some studies indicated that the accumulative fluxes during soil freezing and thawing could contribute a lot to the annual budget, especially of N_2O . However, many soil incubation studies have introduced experimental artifacts that diminish the realism and relevance of the freeze-thaw cycle. Most of past laboratory studies adjusted soil moisture before

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05060103);国家重点基础研究发展计划项目(2012CB417103);国家自然科学基金项目 (41105117)

收稿日期:2013-01-15; 网络出版日期:2014-03-07

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: ghliu@ rcees.ac.cn

http://www.ecologica.cn

soil freezing, so that the effect of snow cover and water from melting snow was not considered during soil freeze-thaw cycles. In order to simulate field conditions more closely in the laboratory, the effects of snow cover and soil moisture on CO₂ and N₂O fluxes during freeze-thaw cycles were evaluated for a typical semi-arid grassland soil. Three different soil moisture levels were established either prior to soil freezing or by adding fresh snow to the soil surface after freezing. Our results showed that the dynamics of soil CO₂ fluxes during three freeze-thaw cycles under snow cover and watering treatments were not significantly different. Soil CO, emissions were generally enhanced during the first freeze-thaw cycle, and gradually decreased with successive cycles. However, snow cover had significant effect on soil N₂O fluxes during freeze-thaw cycles when the soil water-filled pore space (WFPS) were around 50%. The highest emissions of N₂O were observed during the first freeze-thaw cycle in watering treatment, while in snow cover treatment a repetition of the freeze-thaw cycles resulted in a further increase of N₂O emissions. The reasons for the significant differences in N₂O performance between two treatments might be the different soil water dynamics and microbial properties along the soil profile. CO₂ emissions were a function of soil moisture, with emissions being largest around 50% WFPS and smallest at 32% WFPS. Emissions of N₂O during soil freeze-thaw increased with increasing soil moisture, which suggests that denitrification, instead of nitrification, might be the main process in the soil producing N₂O during these periods. No significant N₂O emissions were observed during freeze-thaw cycles under relatively low soil water conditions, which indicate that the enhanced N, O emissions might only become significant when the soil moisture reaches a certain threshold. In addition, the dynamics of soil air concentration of CO_2 and N₂O along the soil profile were positively correlated with soil-surface fluxes and could provide additional information on the N and C turnover processes in the soil.

Key Words: snow cover; soil moisture; freeze-thaw cycles; greenhouse gases; semi-arid grassland

土壤冻融交替主要是由于季节或昼夜温度的变 化使得土壤出现反复冻结--融化的过程,这种自然 现象在中、高纬度和高海拔地区普遍存在^[1]。冻融 过程不仅可使土壤的水热条件发生变化[2],而且影 响土壤的理化性质和微生物活性[3-4],改变土壤元素 的生物地球化学循环过程[5-6],从而对土壤生态系统 结构和功能产生影响。近几年的大量研究表明,冻 融区土壤是温室气体重要的排放源,冻融期土壤温 室气体的排放量在全年总排放量中占有重要的份 额^[7-12]。尤其是 N₂O, 冬季冻融期间的排放量可占 全年排放量的80%以上[11]。虽然我国是世界第三 大冻土国,季节性冻土面积广阔,但关于冻融作用对 土壤温室气体排放的研究并不多[12],主要集中在东 北三江平原、内蒙半干旱草原和川西高山森林等地 区^[5,13-16],并有一部分为室内模拟研究^[13-14]。而近 期的一些研究显示,目前室内模拟的土壤冻融循环 与自然状态下的过程在土壤水热变化等方面仍存在 一定的差异[7-8,10],如何在室内条件下更为准确地再 现自然状态下的土壤冻融过程是开展相关模拟实验 的关键。

雪被是土壤冻融过程中重要的组成部分,它不 仅可以直接影响土壤温度、水分和冻融格局[12, 17-18], 还会影响土壤碳氮等元素的循环过程以及土壤微生 物和酶的活性等[5,16,19-20]。但是,目前开展的土壤冻 融循环模拟实验通常是在土壤冻结之前通过调节不 同土壤水分含量进行相关研究[3, 21-22],忽视了雪被 在整个土壤冻融过程中的作用,从而导致室内模拟 研究的结果与野外原位观测的结果差异较大[7-8]。 另外,土壤水分是影响温室气体产生与排放的重要 因素之一,它不仅是土壤中营养物质输移的载体,而 且能通过改变土壤的通透性等因素影响土壤生物地 球化学过程^[9]。但土壤水分在土壤冻融循环过程中 对温室气体的影响机制尚不清晰^[22]。因此,本文通 过采集内蒙古典型半干旱草原原状土柱样品,对比 研究采用土壤冻结之前人工浇水和覆雪两种方式调 节不同土壤水分含量条件下冻融循环过程对土壤 CO,和N,O排放影响的差异,探讨雪被和土壤水分 在土壤冻融过程中对 CO2和 N2O 排放的影响,以期 为室内模拟土壤冻融过程研究的实验方案优化提供 理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况和样品采集

本研究试验区位于内蒙古锡林郭勒草原东部的 白音锡勒牧场,该地区草原原始面貌保存较好,在气 候、植被和土壤等方面,不仅在我国温带草原区具有 较强的典型性,对整个欧亚草原区而言也有明显的 代表性。该地区属于温带大陆性季风气候,四季变 化明显,年平均气温0.7 ℃,最低气温可达-30 ℃,多 年平均降水量为335 mm,其中60%—80%集中在6 至8月。植被类型以典型草原为主,建群和优势种 主要为羊草、大针茅、冷蒿等。土壤主要为粟钙土, 有机质含量较高。前期的野外原位观测^[23-24]和室内 培养实验^[13-14]均表明,土壤冻融交替过程对该地区 的土壤碳氮循环产生显著影响。

2009 年 7 月,选取典型半干旱草原样地(东经 116°43′,北纬43°58′;样地大小为100 m×100 m), 用直径为15 cm、高为50 cm的PVC 管在样地内沿 对角线法均匀采集 0—40 cm的原状土样18 个,采 样过程中尽量减少对采样管中土样的扰动以保持原 有的土壤性质,原状土样采集之后PVC 管上部仍有 10 cm的高度便于之后的温室气体通量观测。将采 集的新鲜原状土样迅速运回实验室,在+4.0℃的恒 温室内保存。另外,采集多份 0—20 cm 表层土壤样 品进行土壤物理化学性质的分析,土壤容重为1.37 g/cm³,沙粒、粉粒和粘粒的含量分别为64.5%、 21.4%和14.1%,土壤 pH 值为6.62,有机碳含量 18.4 g/kg,全氮1.7 g/kg,铵态氮2.15 mg/kg,硝态氮 1.93 mg/kg。

1.2 试验设计

为使室内模拟的冻融环境更接近于自然状态, 即温度变化尽可能从表层土壤开始,在 PVC 管外包 裹石棉网以达到较好的绝缘效果。沿 PVC 管壁在 不同土壤深度处(5、10、20 cm 和 30 cm)开直径 5 mm 的小孔,并用橡胶塞密封,以便土壤剖面气体的 采集。将原状土样放入低温培养箱(Thermo Electron LED BK 700, GmbH, Germany),在5℃预培养 10 d 后再进行模拟试验与观测。首先,在5℃条件下连 续测定所有原状土样 CO₂和 N₂O 通量以及土壤剖面 气体浓度 3d。然后通过人工浇水对所有土样模拟 25 mm 的降雨,其化学组分按标准雨水含量配制 (1000 mL 去离子水中添加 11 mg CaCl₂,24.4 mg KCl 和 18.6 mg Na₂SO₄)^[25]。待 CO₂和 N₂O 气体通量达 到稳定后,为研究雪被和土壤水分含量对冻融循环 过程中温室气体产生与排放的影响,将采集的 18 个 原状土样随机分为两组,每组 9 个。根据研究区多 年气象数据,通过人工浇水对第 1 组原状土样在土 壤冻结之前模拟 0 mm (R1)、20 mm (R2)和 40 mm (R3)的降雨以调节土壤水分梯度,而第二组原状土 样的 3 个土壤水分含量梯度是在土壤冻结 2 d 之后 通过在土壤表面覆盖天然积雪实现(NH₄⁺: (0.81± 0.07) mg/L, NO₃⁻: (1.07±0.18) mg/L; mean ±SE, n=6),其积雪的添加量与第 1 组实验中 3 个水分梯 度补充的水分一致,每个处理设 3 个重复。

同时对两组原状土样模拟 3 次冻融循环,每次 冻融循环周期为 20 d(冻结 10 d,消融 10d),土壤冻 结和消融过程分别在-10 ℃和+5 ℃条件下完成,所 添加的积雪在第 1 次消融过程中完全融化。在整个 培养过程中,土壤 CO₂和 N₂O 气体通量每天测定一 次。将装有风扇和密封采样孔的不锈钢盖子罩在 PVC 管上,并用铁圈固定密封,用 10 mL 注射器分别 于 0、15、30、45 和 60 min 采集气体。另外,利用特制 不锈钢针头采样器(5 mL,外径 1.5 mm,长 5 cm,侧 面开细孔)采集土壤剖面气体,每周至少采集 2 次。 在完成所有室内模拟实验后,分层测定原状土样的 土壤理化性质和微生物量碳氮含量(表 1)。

1.3 测定方法

分别应用装有热传导检测器(TCD)和电子捕获 检测器(ECD)的气相色谱(Perkin Elmer, Waltham, USA;GC-14A, Shimadzu, Japan)测定 $CO_2 \pi N_2O$,载 气分别为高纯 He 和 N_2 ,具体色谱条件参见文 献^[13-14]。为排除 CO_2 等杂质对 ECD 信号的影响,在 上游气路加装了填充碱石棉的过滤柱,每周更换 1 次添料。 $CO_2 \pi N_2O$ 气体通量采用公式(1)计算:

$$F = \rho \times \frac{V}{A} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{\Delta c}{\Delta t}$$
(1)

式中,F 为气体交换通量, ρ 为标准状态下气体的密度(g/cm³),V 和 A 分别为箱体体积(cm³)和底面积(cm²), T_0 和 P_0 分别为标准状态下空气绝对温度($^{\circ}$)和气压(Pa),T 和 P 分别为采样时的气温($^{\circ}$)和气压(Pa), Δc 为 Δt 时间内箱内气体浓度的变化。

在 105 ℃下烘干 24 h 测定土壤含水量,并计算

土壤孔隙含水率(water-filled pore space, WFPS)^[9], 土壤铵态氮和硝态氮含量用分光光度法测定,利用 自动碳氮分析仪(Elementar, Hanau, Germany)测定 土壤有机碳和全氮,土壤微生物量碳氮采用熏蒸浸 提法测定^[13-14]。

Table 1 Soil physical and chemical properties and microbial biomass C/N at different soil depths for two treatments after the incubation experiment

处理	土层	容重 Bulk density/	NH ₄ ⁺ -N/	NO ₃ -N/	微生物量碳 Biomass C/	微生物量氮 Biomass N/	W	土壤孔隙含水量 ater-filled pore space	e/%
Treatment	Soil depth/cm	(g/cm^3)	(mg/L)	(mg/L)	(mg C/g干土重)	(µg N g ⁻¹ 干土重)	R1	R2	R3
浇水处理	0—7.5	1.25±0.05 A	1.5±0.7 A	16.7±3.7 A	0.22 ± 0.02 A	50.4±2.2 A	35.3±1.2 Aa	42.3±1.4 Ab	50.0±1.5 Ac
Watering	7.5—15	1.43 ± 0.02 B	0.3±0.1 B	5.4±0.3 B	0.11 ± 0.02 B	27.5±1.8 B	30.7±1.3 Aa	$38.0{\pm}3.9~\mathrm{ABb}$	$44.7{\pm}2.5~{\rm Ac}$
	15—25	1.51±0.02 BC	0.5±0.2 B	4.3±0.2 B	0.06±0.01 C	17.7±0.6 C	27.9±2.3 Aa	30.7 ± 0.9 Bab	$36.8{\pm}2.2~\mathrm{Bb}$
	25—35	1.56±0.03 C	0.4±0.1 B	2.9±0.4 B	0.04±0.01 C	11.4±1.2 D	16.2±5.1 Ba	$33.6 \pm 2.9 \text{ Bb}$	35.9 ± 2.1 Bb
覆雪处理	0—7.5	$1.26{\pm}0.06~\mathrm{A}$	0.9±0.1 A	6.7±0.9 A	$0.26{\pm}0.02~\mathrm{A}$	36.1±1.3 A	30.1±2.5 Aa	40.3 ± 2.2 Ab	51.3 ± 0.2 Ac
Snow cover	7.5—15	1.35 ± 0.03 AB	0.6 ± 0.2 A	4.8±0.6 B	0.16 ± 0.01 B	17.1±1.5 B	27.6±2.2 Aa	$38.3{\pm}3.2~{\rm Ab}$	$42.3{\pm}1.8~{\rm Ab}$
	15—25	1.44 ± 0.04 B	$0.6\pm0.1~\mathrm{A}$	4.3±0.3 B	0.11±0.01 C	11.5±0.7 C	28.4±0.2 Aa	32.0±0.6 Ba	$42.6{\pm}5.1~\mathrm{Ab}$
	25—35	1.54±0.03 C	0.5±0.1 A	3.7±0.6 B	$0.07{\pm}0.01~\mathrm{D}$	$7.0\pm0.9~\mathrm{D}$	25.4±1.6 Aa	32.7±2.6 Bb	41.0±0.3 Ac

* 测定值为平均值±标准误差(SE), N=9;同一列数据后不同大写字母表示不同土层间差异显著,同一行数据后不同小写字母表示不同处理间土壤含水量差异显著(P < 0.05); R1, R2和 R3分别代表(25+0)mm,(25+20)mm,(25+40)mm,公5+40)mm,公5+40)mm,公5+40

1.4 统计分析

试验数据均采用 Sigmaplot 2000 和 SPSS 13.0 进行分析,土壤剖面气体浓度变化采用 Sigmaplot 2000 制图。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和多 因素方差分析(two-way ANOVA)检验土壤水分条 件、冻融循环过程和不同处理对土壤 CO₂和 N₂O 通 量的影响,用 Pearson 相关系数评价地表气体交换通 量与土壤剖面气体浓度之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 雪被和土壤水分对土壤冻融过程中 CO₂排放的 影响

覆雪和浇水处理的土壤 CO₂排放通量在模拟第 1 次降雨(25 mm)过程中均出现明显的排放高峰,最 高值达 97.5 mg C m⁻² h⁻¹,但随时间而逐渐减小(图 1)。在浇水处理中,模拟的 20 mm (R2)和 40 mm (R3)降雨使土壤 CO₂再次出现短时排放峰,R3 水分 条件下的排放量略高于 R2,但不显著(图 2)。而在 覆雪处理中,即使在补充与 40 mm 降雨等量的水分 条件下也没有出现明显的 CO₂排放峰,其原因可能 是相对于浇水处理,积雪消融对土壤水分的补充是 缓慢的过程,从而造成土壤可利用有机质含量和微 生物活性等方面的差异。

当温度降至-10℃时,覆雪和浇水处理的土壤

CO₂通量都减小至 10 mg C m⁻² h⁻¹左右,但在随后的 消融过程中都出现显著的上升(*P* < 0.05)。随着冻 融循环次数增加,两种处理条件下的土壤 CO₂通量 都出现显著降低(*P* < 0.05,图 3)。土壤水分含量在 土壤冻结期间对 CO₂通量的影响不明显,但在土壤 消融期间排放的 CO₂普遍随着土壤水分含量上升而 显著增加(图 2)。除第 1 次冻融循环过程的 R3 水 分条件,在其它条件下覆雪和浇水处理对土壤 CO₂ 通量影响的差异不显著(图 3)。多因素方差分析表 明,在 3 个土壤水分条件下,冻融循环过程均对土壤 CO₂通量产生显著影响(*P* < 0.01),但不同处理只在 R3 水分条件下才对土壤 CO₂通量产生显著影响 (*P* = 0.006,表 2)。

2.2 雪被和土壤水分对土壤冻融过程中 N₂O 排放的影响

与 CO₂相似,覆雪和浇水处理的土壤 N₂O 排放 通量在模拟第 1 次降雨(25 mm)过程中也出现明显 增加并逐渐下降(图 4)。但在后续模拟的不同水分 添加条件下,覆雪和浇水处理的 N₂O 通量均无显著 变化。在 R3 水分条件下,土壤孔隙含水率(WFPS) 达 50%左右,覆雪和浇水处理对土壤冻融循环过程 中 N₂O 通量影响的差异显著。在浇水处理 R3 水分 条件下的第 1 次冻融循环过程中出现明显的 N₂O 排 放峰,最高值达 18.9 μg N m⁻² h⁻¹,但 N₂O 排放量随





黑色箭头表示第1次浇水,灰色箭头表示第2次浇水,浅灰色箭头表示覆雪;土壤剖面 CO2气体浓度(µg/g)



图 2 冻融循环过程中不同土壤水分和温度条件下 CO₂和 N₂O 通量

 Fig.2 CO2 and N2O fluxes at different soil moisture and temperature levels during freezing-thawing cycles

 剔除 25 mm 模拟降水的影响,不同大写字母表示不同温度间差异显著,不同小写字母表示不同水分梯度间差异显著 (P < 0.05)</td>

 http://www.ecologica.cn

着冻融循环次数的增加显著降低(P < 0.05,图3)。 而在覆雪处理的 R3 水分条件下,土壤 N₂O 通量在 第1次冻融循环过程中增加不明显,但在随后的两 次冻融循环过程中出现显著的排放峰,最高峰值为 29.8 ug N m⁻² h⁻¹(图3,图4)。在 R1 和 R2 两个土 壤水分含量较低的条件下,覆雪和浇水处理对冻融 循环过程中 N₂O 排放的影响不显著。多因素方差分 析表明,在 R1 和 R2 土壤水分条件下,冻融循环过程 和不同处理都对土壤 N₂O 通量产生显著影响,而两 者之间的交互作用在 3 个土壤水分条件下对土壤 N₂O通量的影响均达到极显著水平(P < 0.001, 表 2)。



图 3 不同处理条件下冻融循环次数对 CO₂和 N₂O 通量的影响

Fig.3 Effects of freezing-thawing cycles and snow cover on CO₂ and N₂O fluxes

不同大写字母表示不同冻融循环间差异显著,不同小写字母表示不同处理间差异显著 (P < 0.05)

表 2 オ	不同土壤水分条件下冻融循环	(C)和不同处理	T)对土壤 CO,和 N,	O 通量影响的显著度分析	two-way ANOVA
-------	---------------	----------	---------------	--------------	---------------

Table 2 Results (P-values) of two-way ANOVA on the effects of freeze-thaw cycles (C), treatment (T) and their interactions on soil CO₂ and N₂O fluxes under different soil moisture levels

	R1		I	R2	R3	
	CO2	N ₂ O	CO2	N ₂ O	CO ₂	N ₂ O
С	< 0.001	0.001	0.002	0.001	0.008	0.574
Т	0.316	< 0.001	0.401	< 0.001	0.006	0.768
$C \times T$	0.405	< 0.001	0.766	< 0.001	0.130	< 0.001

土壤剖面气体浓度变化及其与地表通量的相 关性

土壤剖面 CO₂和 N₂O 的浓度在冻融循环过程中 呈现明显的动态变化。当土壤处于低温冻结间,4 个 土壤深度的 CO₂和 N₂O 浓度均显著降低,而在土壤 消融期间,各土壤深度的气体浓度都出现不同程度 的增加(图1,图4)。不同土壤水分条件下剖面 CO₂ 浓度之间的差异不显著,这与 CO₂地表通量受土壤 水分含量影响较小相一致。但不同土壤水分条件下 的剖面 N₂O 浓度呈显著差异,R3 水分条件下的剖 面 N₂O 浓度明显高于 R1 和 R2。在覆雪和浇水处理 的 R1 和 R2 水分条件下,土壤剖面 N₂O 浓度在 3 次 冻融循环过程中没有显著变化,这与期间地表 N₂O 通量变化不明显具有较好的一致性。而在 R3 水分 条件下,土壤剖面 N₂O 浓度出现剧烈变化,尤其在覆 雪处理的土壤消融期间出现显著上升,浓度体积分 数最高值达 1000ppb 以上。

土壤剖面 CO₂和 N₂O 浓度与地表通量之间呈较 好的正相关(表 3),即当土壤剖面气体浓度显著变 化并与地表大气浓度之间形成明显的浓度差时,地 表气体交换通量也会发生相应改变。覆雪处理中,4 个土壤深度的 CO₂和 N₂O 浓度均与地表通量呈显著 正相关(P < 0.01),而在浇水处理中,土壤剖面 20 cm以上的 CO₂浓度和地表通量显著相关(P < 0.01), 但 N₂O 通量只与土壤 5 cm 处的浓度呈显著正相关 (P < 0.05)。这可能由于土壤 CO₂和 N₂O 通量对浇 水处理的响应较快,而在此期间表层土壤的理化性 质和微生物活性等受影响更为显著。冻融循环实验 之后两种处理条件下土样的分析结果也显示,浇水 处理中表层土壤的 NH⁴₄、NO⁵₃ 和微生物量氮含量等 指标都明显高于覆雪处理(表 1)。



图 4 浇水和覆雪处理下冻融循环过程中 N2O 通量(a, e)和土壤剖面(0—30 cm)气体浓度变化(b—d, f—h)

Fig.4 N_2O fluxes and dynamics (a, e) of soil air N_2O concentrations along the soil profile (0-30 cm) during freezing-thawing cycles (b-d, f-h) for watering and snow cover treatments

黑色箭头表示第一次浇水,灰色箭头表示第二次浇水,浅灰色箭头表示覆雪;土壤剖面 N₂0 气体浓度单位(µg/g)

表 3 不同处理条件下土壤地表 CO₂和 N₂O 通量与剖面气体浓度的

相关	系	数
100.00		~~

Table 3	Correlation	coefficients	between	CO ₂ :	and	N_2O	fluxes	and
soil gas c	oncentrations	at different	soil dept	ths for	· diffe	erent	treatm	ents

土层/cm	浇水处理	Watering	覆雪处理	覆雪处理 Snow cover		
Soil depth	CO_2	N_2O	CO2	N_2O		
5	0.60 **	0.43 *	0.83 **	0.73 **		
10	0.63 **	0.30	0.80 **	0.73 **		
20	0.62 **	0.27	0.80 **	0.72 **		
30	0.33	0.28	0.82 **	0.68 **		

* P < 0.05; ** P < 0.01; n = 26

3 讨论

3.1 雪被对土壤冻融过程中 CO₂和 N₂O 排放的 影响

野外原位观测^[9, 23-24]和室内培养实验^[13-14, 21-22] 均表明土壤冻融交替过程中 CO₂和 N₂O 排放量增大 的现象在许多生态系统中普遍存在。但目前大多数 室内培养实验在进行冻融循环之前,土壤水分或不 同水分梯度的调节已经完成,而在冻融循环过程中 额外补充的水分有限。但在野外自然条件下,天然 覆雪不仅可以减缓土壤温度的剧烈波动,还可在消融过程中为土壤补充新的水分,尤其是表层土壤^[17-18]。因此,大多数室内培养实验在冻融循环过程中的土壤水分动态变化过程与野外自然条件下有显著差异,从而导致两种条件下的土壤碳氮循环以及温室气体交换过程的差别也较大^[7-8]。

本研究的浇水处理参考之前大多数室内培养实 验调节土壤水分的方法,实验结果显示,土壤 CO,排 放通量在消融期会出现明显上升,但随着冻融循环 次数的增加,CO2通量升高的幅度逐渐减小,这与以 往的研究结果一致^[26]。Herrmann 和 Witter 的研究 结果显示,随着冻融循环次数的增加,土壤矿化作用 强度逐渐减小,这表明冻融作用对土壤矿化作用的 影响受土壤本底碳库大小的限制,因此最终导致 CO,排放通量的增加幅度随着冻融循环次数的增加 而逐渐减小[27]。覆雪条件下冻融循环过程对土壤 CO₂排放的影响与浇水处理之间的差异不显著,并与 Mikan 等^[28]和 Dörsch 等^[29]在野外开展的原位观测 结果一致。Wu 等^[9]基于高频连续自动观测系统,对 德国云杉林长达5年的观测结果也显示,当初春气 温第一次明显上升并使积雪开始融化时,往往会伴 随 CO,排放通量显著增加,但在之后的冻融循环过 程中没有明显的 CO,排放高峰。

土壤物理性状、微生物量和活性的改变,以及土 壤可溶性养分含量增加等方面是导致土壤冻融循环 过程中 N,O 排放显著增大的主要原因^[9-10, 12]。本研 究结果显示,冻融循环使得土壤中 NO3 等含量显著 增加,尤其是表层土壤(表1),从而有利于硝化和反 硝化过程并促进 N₂O 的排放。在浇水处理 R3 水分 条件下,土壤 N₂O 排放量在第1次冻融循环过程中 显著增大,但其增加的幅度随冻融循环次数的增加 而减小,这与以往的室内培养实验结果一致^[21, 26]。 而在覆雪处理相应的水分条件下,土壤 N₂O 排放显 著增大是在后两次冻融循环过程中才出现。Papen 等^[30]和 Wu 等^[9]的野外观测研究显示,当气温开始 在波动中缓慢上升至零度以上时,只会导致 N,O 排 放的一些小幅增加,而只有当冻融循环次数增加或 温度出现明显上升,才会产生显著的 N,O 排放峰。 由此可见,在野外自然条件下,土壤 N,O 的排放高峰 往往不是在第1次冻融循环过程中就形成,而是在 随后的冻融循环过程或温度显著升高时产生。这与 本研究模拟覆雪条件下土壤冻融循环对 N₂O 排放影响的结果相似。

不同的土壤水分动态变化过程可能是导致浇水 和覆雪处理中 N₂O 排放规律出现明显差异的原因之 一。对于浇水处理,在土壤进行冻融循环之前,添加 的水分已经进入土壤内部。在第一次冻融循环过程 中,土壤内部的水分会形成冰晶颗粒在土壤孔隙中 扩张,从而导致土粒间的结合力减弱和土壤团聚体 的破坏,并随之释放出一定活性有机物质供微生物 利用,从而促进矿化和反硝化作用^[14]。但在多次冻 融循环之后,随着土壤本底碳、氮含量及有效性的逐 渐降低,产生与排放的 N₂O 也会随之减少。而对于 覆雪处理,在土壤消融之前,大部分补充的水分以积 雪的形式覆于地表,并没有进入土壤内部。积雪在 第一次消融过程中缓慢融化,并不断向土壤补充水 分,这使得表层土壤一直处于水分含量较高的状态。 而 Davidson 等^[31]的研究表明,土壤水分含量过高不 仅会降低土壤的通透性,还会促进反硝化作用,从而 使 N,O 进一步转化为 N,。因此,与浇水处理相比, 天然覆雪一方面降低了第一次冻融循环过程中对土 壤团聚体的破坏程度,释放的活性有机物质也可能 随之减少;另一方面,表层土壤水分长期处于较高状 态可能会促进反硝化作用使 N2O 向 N2转化,从而减 少 N,O 的产生与排放。此外,两种处理条件下土壤 剖面部分土壤理化性质和微生物性状的差异也可能 导致不同的 N₂O 产生与排放动态过程,但其影响机 制还有待进一步研究。

3.2 土壤水分对冻融过程中 CO₂和 N₂O 排放的 影响

土壤水分含量是影响冻融过程中 CO₂和 N₂O 产 生与排放的关键因素。Wu 等^[13]和 Yao 等^[14]的研 究显示,土壤冻融过程中排放的 CO₂和 N₂O 随着土 壤含水量升高而增加。Teepe 等^[22]的研究也表明, 土壤水分的升高会显著增加冻融过程中 N₂O 的排放 量,但当土壤孔隙含水率(WFPS)达到 76%时, N₂O 排放量出现明显下降,这可能是因为反硝化作用促 使 N₂O 进一步转化为 N₂。在本研究的两种处理中, 出现显著 CO₂和 N₂O 排放的 R3 水分条件下的 WFPS 均在 50%左右,显著高于其余两个水分条件 (P < 0.05,表 1)。另外,本研究中 N₂O 在两个较低 土壤含水量条件下的冻融循环过程中无明显排放表 明,可能只有当土壤含水量达到一定阈值时,冻融作 用才会对 N₂O 的排放产生显著影响。Li 等^[32]在我 国新疆高寒草原的研究指出,造成该地区春季冻融 交替时期土壤 N₂O 没有显著增加的主要原因可能是 相对较低的土壤水分含量和温度等。

3.3 土壤剖面气体浓度与地表通量

由于地表 CO₂和 N₂O 通量是土壤中产生的气体 沿土壤剖面向大气逐渐扩散的结果,因此,土壤剖面 气体浓度梯度法也被广泛应用于估算地表通 量^[33-34]。野外观测^[34-35]和室内培养^[13-14]研究均表 明,土壤剖面气体浓度变化与地表通量之间具有显 著的相关性。本研究中,土壤剖面 CO₂和 N₂O 浓度 与地表通量之间呈明显的正相关,而在土壤水分含 量较低条件下,土壤剖面 N₂O 浓度动态变化过程也 佐证了期间地表 N₂O 排放不显著。虽然利用土壤剖 面气体浓度梯度准确估算地表通量还存在一定的局 限性,尤其是在土壤异质性较大或地表通量较小的 地区^[32, 34],但该方法可为进一步分析土壤剖面温室 气体产生的动态过程提供科学依据。

4 结论

(1)在土壤冻融循环过程中,浇水和覆雪两种处 理条件下的 CO₂排放通量之间的差异不显著,CO₂排 放量在消融期都会明显增加并随着冻融循环次数的 增加而逐渐减小。

(2)当土壤孔隙含水率达50%左右时,浇水处理 中的 N₂O 排放量在第一次土壤冻融循环中最高并随 冻融循环次数增加而降低;而在覆雪处理中,第一次 冻融循环中的 N₂O 排放量较小,但在后两次冻融循 环中的排放量更为显著。造成两种处理 N₂O 排放规 律出现显著差异的原因之一可能是不同的土壤剖面 水分动态变化过程。

(3)土壤冻融过程中 CO₂和 N₂O 排放量随土壤 含水量升高而增加,但 N₂O 在土壤含水量较低时排 放不明显,这表明可能只有当土壤含水量达到一定 阈值时,冻融作用才会对 N₂O 的排放产生显著影响。

References:

Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, Hardy J P, Fttzhugh R
 D, Tiemey G L. Colder soils in a warmer world: a snow manipulation study in a northern hardwood forest ecosystem. Biogeochemistry, 2001, 56(2): 135-150.

- Iwata Y, Hirota T, Hayashi M, Suzuki S, Hasegawa S. Effects of frozen soil and snow cover on cold-season soil water dynamics in Tokachi, Japan. Hydrological Processes, 2010, 24 (13): 1755-1765.
- [3] Sharma S, Szele Z, Schilling R, Munch J C, Schloter M. Influence of freeze-thaw stress on the structure and function of microbial communities and denitrifying populations in soil. Applied and Environmental Microbiology, 2006, 72 (3): 2148-2154.
- [4] Lipson D A, Schadt C W, Schmidt S K. Changes in soil microbial community structure and function in an Alpine dry meadow following spring snow melt. Microbial Ecology, 2002, 43 (3): 307-314.
- [5] Yang Y L, Wu F Z, Yang W Q, Tan B, Xu Z F, Liu Y, Kang L N. Effects of snow pack removal on soil hydrolase enzyme activities in an alpine *Abies faxoniana* forest of western Sichuan. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7045-7052.
- [6] Feng X J, Nielsen L L, Simpson M J. Responses of soil organic matter and microorganisms to freeze-thaw cycles. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(8): 2027-2037.
- [7] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(5): 977-986.
- [8] Matzner E, Borken W. Do freeze-thaw events enhance C and N losses from soils of different ecosystems? A review. European Journal of Soil Science, 2008, 59(2): 274-284.
- [9] Wu X, Brüggemann N, Gasche R, Shen Z Y, Wolf B, Butterbach-Bahl K. Environmental controls over soil-atmosphere exchange of N₂ O, NO and CO₂ in a temperate Norway spruce forest. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(2): GB2012, doi: 10.1029/2009GB003616.
- [10] Kim D G, Vargas R, Bond-Lamberty B, Turetsky M R. Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: a review of current literature and suggestions for future research. Biogeosciences, 2012, 9(7): 2459-2483.
- [11] Goldberg S D, Borken W, Gebauer G. N_2O emission in a Norway spruce forest due to soil frost: concentration and isotope profiles shed a new light on an old story. Biogeochemistry, 2010, 97(1): 21-30.
- [12] Wu X, Shen Z Y. Effects of freezing-thawing cycle on greenhouse gases production and emission from soil: A review. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(7): 1432-1439.
- [13] Wu X, Yao Z, Brüggemann N, Shen Z Y, Wolf B, Dannenmann M, Zheng X, Butterbach-Bahl K. Effects of soil moisture and temperature on CO₂ and CH₄ soil-atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(5): 773-787.
- Yao Z S, Wu X, Wolf B, Dannenmann M, Butterbach-Bahl K, Brüggemann N, Chen W W, Zheng X H. Soil- atmosphere exchange potential of NO and N₂O in different land use types of Inner Mongolia as affected by soil temperature, soil moisture, freeze-thaw, and drying-wetting events. Journal of Geophysical Research, 2010, 115 (D17): D17116, doi: 10. 1029/2009JD013528.

- [15] Song C C, Wang Y S, Wang Y Y, Zhao Z C. Emission of CO₂, CH₄ and N₂O from freshwater marsh during freeze-thaw period in Northeast of China. Atmospheric Environment, 2006, 40 (35): 6879-6885.
- [16] Tan B, Wu F Z, Yang W Q, Yang Y L, Wang A, Kang L N. Effects of snow pack removal on the dynamics of winter-time soil temperature, carbon, nitrogen, and phosphorus in alpine forests of west Sichuan. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (10): 2553-2559.
- [17] Buckeridge K M, Grogan P. Deepened snow increases late thaw biogeochemical pulses in mesic low arctic tundra. Biogeochemistry, 2010, 101(1/3): 105-121.
- [18] Chang J, Wang G X, Gao Y H, Wang Y B. Impacts of snow cover change on soil water-heat processes of swamp and meadow in Permafrost Region, Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(23): 7289-7301.
- [19] Groffman P M, Hardy J P, Driscoll C T, Fahey T J. Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest. Global Change Biology, 2006, 12(9): 1748-1760.
- [20] Monson R K, Lipson D L, Burns S P, Turnipseed A A, Delany A C, Williams M W, Schmidt S K. Winter forest soil respiration controlled by climate and microbial community composition. Nature, 2006, 439(7077): 711-714.
- [21] Koponen H T, Martikainen P J. Soil water content and freezing temperature affect freeze-thaw related N₂O production in organic soil. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 69 (3): 213-219.
- [22] Teepe R, Vor A, Beese F, Ludwig B. Emissions of N₂ O from soils during cycles of freezing and thawing and the effects of soil water, texture and duration of freezing. European Journal of Soil Science, 2004, 55(2): 357-365.
- [23] Wolf B, Zheng X H, Brüggemann N, Chen W W, Dannenmann M, Han X G, Sutton M A, Wu H, Yao Z, Butterbach-Bahl K. Grazing-induced reduction of natural nitrous oxide release from continental steppe. Nature, 2010, 464(7290): 881-884.
- [24] Holst J, Liu C, Yao Z, Brüggemann N, Zheng X, Giese M, Butterbach-Bahl K. Fluxes of nitrous oxide, methane and carbon dioxide during freezing-thawing cycles in an Inner Mongolian steppe. Plant and Soil, 308(1/2): 105-117.
- [25] Breuer L, Kiese R, Butterbach-Bahl K. Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical rain-forest soils. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(3): 834-844.
- [26] Priemé A, Christensen S. Natural perturbations, drying-wetting and freezing-thawing cycles, and the emission of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from farmed organic soils. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(15): 2083-2091.
- [27] Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the

flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34(10): 1495-1505.

- [28] Mikan C J, Schimel J P, Doyle A P. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34 (11): 1785-1795.
- [29] Dörsch P, Palojärvi A, Mommertz S. Overwinter greenhouse gas fluxes in two contrasting agricultural habitats. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2004, 70(2): 117-133.
- [30] Papen H, Butterbach-Bahl K. A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a Nsaturated spruce and beech forest ecosystem in Germany, 1. N₂O emission. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (D15): 18487-18503.
- [31] Davidson E A, Keller M, Erickson H E, Verchot L V, Veldkamp E. Testing a conceptual model of soil emissions of nitrous and nitric oxides. Bioscience, 2000, 50(8): 667-680.
- [32] Li K H, Gong Y M, Song W, Lv J L, Chang Y H, Hu Y K, Tian C Y, Christie P, Liu X J. No significant nitrous oxide emissions during spring thaw under grazing and nitrogen addition in an alpine grassland. Global Change Biology, 2012, 18 (8): 2546-2554.
- [33] Wolf B, Chen W W, Brüggemann N, Zheng X H, Pumpanen J, Butterbach-Bahl K. Applicability of the soil gradient method for estimating soil-atmosphere CO₂, CH₄ and N₂O fluxes for steppe soils in Inner Mongolia. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174(3): 359-372.
- [34] Jacinthe P A, Lal R. Effects of soil cover and land-use on the relations flux-concentration of trace gases. Soil Science, 2004, 169(4): 243-259.
- [35] Kusa K, Sawamoto T, Hu R G, Hatano R. Comparison of the closed-chamber and gas concentration gradient methods for measurement of CO₂ and N₂O fluxes in two upland field soils. Soil Science and Plant Nutrition, 2008, 54(5): 777-785.

参考文献:

- [5] 杨玉莲,吴福忠,杨万勤,谭波,徐振锋,刘洋,康丽娜.雪 被去除对川西高山冷杉林冬季土壤水解酶活性的影响.生态 学报,2012,32(22):7045-7052.
- [12] 伍星, 沈珍瑶. 冻融作用对土壤温室气体产生与排放的影响. 生态学杂志, 2010, 29(7): 1432-1439.
- [16] 潭波,吴福忠,杨万勤,杨玉莲,王奥,康丽娜.雪被去除对 川西高山森林冬季土壤温度及碳、氮、磷动态的影响.应用生态学报,2011,22(10):2553-2559.
- [18] 常娟, 王根绪, 高永恒, 王一博. 青藏高原多年冻土区积雪对 沼泽、草甸浅层土壤水热过程的影响. 生态学报, 2012, 32 (23): 7289-7301.