

冻融交替对土壤CO₂及N₂O释放效应的研究进展^①

杨红露¹, 秦纪洪², 孙 辉^{1*}

(1 四川大学环境科学与工程系, 成都 610065; 2 成都大学城乡建设学院环境工程系, 成都 610106)

摘要: 在秋冬交替和冬春交替时期高纬度地区和高海拔生态系统表层土壤常有冻融交替频繁发生。由于冻融交替作用通过改变土壤水热性质而对土壤物理、化学、生物学特性产生效应。冻结通常导致土壤团聚体破裂、微生物细胞及细根死亡, 释放出活性较高的有机物, 增强随后融解的土壤的反硝化和呼吸活性, 从而影响土壤生物、生物化学过程以及生物地化循环。已有对苔原、泰加林等北极和亚北极生态系统的研究表明, 土壤冻融交替次数、冻融极端温度、土壤水分、土壤团聚体结构变化等对CO₂和N₂O的释放通量影响较为显著, 一般在冻融的最初几个循环温室气体排放会增加, 随后会降至一个较为稳定的水平。目前, 冻融循环变化背景下的温室气体排放研究主要是针对北方高纬度地区, 而且对冻融交替影响土壤温室气体排放的机理研究也不够。我国面积广大的青藏高原高海拔地带在全球增温背景下, 轻微增温会导致季节性冻土表层冻融交替次数增加, 甚至冻土季节消失, 加强全球增温背景下我国高山亚高山季节性冻土生态系统效应和过程研究, 特别是土壤暖化导致的温室气体排放变化通量和变化机理的研究, 对揭示全球变化的区域效应以及高海拔生态系统的管理都具有重要作用。

关键词: 冻融循环; 温室气体; 土壤暖化; 亚高山土壤

中图分类号: S154.1

土壤冻融交替(或称冻融循环freeze-thaw cycle), 是由于季节或昼夜热量变化在表土及以下一定深度形成的反复冻结-解冻的土壤过程, 这种现象在高纬度或高海拔地带低温生态系统的土壤非常普遍^[1]。目前, 针对温带草甸草原和农田, 高纬度地区苔原、泰加林等北极和亚北极生态系统的冻融循环效应进行了很多研究, 表明土壤冻融循环对温室气体的排放有不可忽视的影响, 土壤冻融循环对N₂O和CO₂气体排放的影响也备受关注。土壤是N₂O的主要排放源, 全球近60%的N₂O来自土壤排放^[2]; 土壤还是一个巨大的碳库, 作为大气CO₂重要的源和汇, 土壤CO₂排放的变化会明显改变大气中CO₂浓度^[3]。土壤冻结和解冻过程会对土壤的物理性质、微生物活性及微生物种群和组成产生强烈的作用^[4-5], 因此土壤冻结会影响土壤中碳和氮动态过程, 显著地影响土壤中N₂O和CO₂的排放^[6]。

IPCC(2007)评估报告指出20世纪80年代以来北极多年冻土顶层温度的上升幅度已高达3℃, 且北半球地区从1900年以来季节性冻土覆盖的最大面积已减少了约7%, 而春天减少达15%; 还预计冻融地区雪被将进一步退缩, 大部分冻土区的融化深度将大幅增加^[7], 因此全球暖化导致冻融格局改变正在发生,

而且范围和程度将进一步加深。有资料显示, 冻融区在冻融期N₂O的排放量约占土壤全年排放量的65%^[8], 因此冻融区土壤是全球N₂O和CO₂的重要排放源, 而冻融作用对温室气体的排放, 其影响程度主要取决于冻融速率、温度、冻融交替次数、土壤含水量、土壤结构等要素。目前, 国内对冻融交替对温室气体CO₂和N₂O释放效应方面的研究缺乏, 本文主要通过冻融作用下土壤物理性质的变化、微生物性状的变化及不同冻融格局对土壤CO₂和N₂O气体释放的效应3个方面来探讨冻融交替对土壤CO₂和N₂O气体释放的效应, 这有助于探讨全球增温和冻土暖化背景下土壤温室气体排放通量及其影响因素的环境效应。

1 冻融作用下土壤物理性状的变化及其对CO₂及N₂O排放的影响

1.1 冻融作用的土壤物理效应

1.1.1 冻融对土壤剖面温度的影响 冻融对土壤的影响首先改变了土壤剖面温度(特别是低温生态系统), 以及土壤热传导及与大气之间能量与水分交换。冻融期土壤温度的变化过程伴随着土壤水分运动及其相变, 土壤水热变化是相互联系和相互影响的。此外,

①基金项目: 国家自然科学基金项目(40871124)和国际科学基金会(IFS)项目(D/4600-1)资助。

* 通讯作者(sunhui@sc.cn)

作者简介: 杨红露(1987—), 女, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态。Email: yanghonglu2006@126.com

土壤剖面温度变化不仅与土壤水分含量有关,还与地表覆盖状况有关。初步研究显示,土壤表层和覆盖层对土壤剖面温度的影响至关重要,表层覆盖物(凋落物或者雪被)对土壤剖面温度有显著的缓冲作用,土壤的冻融交替主要发生在季节性冻土的表层,在时间上主要发生在气温波动剧烈的晚秋和早春。同时,土壤的冻结改变了土壤的热传导性能和热动力学,从而影响土壤剖面在低温季节的温度分布。由于温度降低,冻结期有利于土壤深层维持水分,使得冻融期土壤剖面水分含量较高。频繁冻融导致的土壤水分变化,也会导致土壤热容量以及与大气之间的热交换通量的变化。

1.1.2 冻融作用改变了土壤水分性质和土壤水势

冻融过程改变了土壤水动力性质,水分在土壤中运动模式改变且重新分布。土壤冻结时,冻结土壤水势梯度大,导致水分从非冻结土壤中向冻结土壤迁移。由于冰雪融化以及冻结阻碍水分入渗,积雪融化后表土含水量显著提高。冻融作用还对土壤渗透特性产生重要影响,但土壤质地不同,冻融对土壤渗透性影响程度也不同。黏土冻融后渗透性增加较大,渗透系数是原来土壤的 3 ~ 10 倍,而砂质土冻融后渗透性增加幅度较小^[9]。非冻结条件下,土壤固相以矿物成分为主,组成比例相对稳定;冻结条件下,土壤固相则是由矿物和冰组成,随着土壤温度改变,液态水会发生相转化,土壤固液气三相比例发生改变,土壤水的相变必然引起土壤理化性质和生物过程变化。

1.1.3 冻融作用对土壤结构的影响 冻融循环破坏团聚体。冻结时土壤孔隙中的冰晶膨胀打破了土壤团聚体颗粒间的联接,破坏土壤团聚体结构。冰冻对不同粒径团聚体破坏作用不同,对小团聚体稳定性的破坏程度强于微团聚体^[10],这可能是因为小团聚体水分含量比微团聚体的高。

冻结对土壤团聚体的破坏程度随土壤含水量增加而增强,但是当含水量超过饱和含水量后破坏作用又开始下降。土壤粒级组成不同,冻融过程对团聚体破坏程度有差异。冻融交替能够有效地将土壤大团聚体破碎成小团聚体,而细颗粒物有向中等大小颗粒聚集的倾向^[11]。土壤黏粒含量越高,团聚体稳定性越高。土壤有机质含量不同,土壤冻结对团聚体的影响也不同。土壤有机质含量大于 30 g/kg、含水量低于 0.20 kg/kg 时,冻融作用有助于增强团聚体稳定性,这可能是由于低含水量时有机质增强了土壤的弹性,能够抵制冰晶膨胀的作用力,而高含水量时冰晶膨胀的作用力增大,导致大团聚体稳定性降低^[12]。

1.2 土壤物理性质改变对土壤温室气体排放的影响

1.2.1 土壤温度改变对土壤温室气体排放的影响

土壤冻融后冰晶融化导致土壤含水量较高,太阳在土壤表层的反照率较低,吸收太阳短波辐射的能力增强,使得土壤温度迅速升高,这有利于土壤水分的蒸发,因此也增加了大气中水汽含量^[17]。这样就改变了地气之间的能量交换和水分循环,界面层频繁的冻融循环,伴随着冻融引起的土壤相变及温度变化,影响土壤的潜热吸收和释放,改变了土壤的热状况及土壤的结构和性质,低温导致某些土壤微生物数量的下降,并会对微生物种群的组成和功能产生影响,导致土壤温室气体 CO₂ 和 N₂O 排放的变化^[13]。研究表明土壤温度变化会影响微生物呼吸作用和反硝化作用,进而导致 CO₂ 和 N₂O 排放的变化。

1.2.2 土壤渗透势变化对温室气体排放的影响 由于冻融作用对土壤水分的分布、渗透、传导都产生了影响,所以使得土体中不同部位土壤颗粒水分特性与含量有差异,土壤的呼吸作用和硝化、反硝化作用强度不同, N₂O 和 CO₂ 产生的量也不同。冻融区域及其附近区域水分含量较高,致使氧通过土壤基体扩散的速度受到影响,导致氧的消耗超过扩散速度,使缺氧的区域发育,微生物的反硝化作用增强,因此促进了 N₂O 气体的生成,同时形成的冰膜也阻止了 N₂O 的排放^[14]。

土壤冻结条件下,水分及气体的分布、渗透、传导受到影响,利于土壤厌氧环境的形成,增强了微生物的反硝化作用和厌氧呼吸作用,促进 CO₂ 和 N₂O 气体的生成,导致解冻后气体释放达到峰值。土壤含水量是控制反硝化的一个关键因素,含水量高会导致氧气扩散速率下降,有利于反硝化作用,已有研究表明土壤含水量为 65% 的情况下比含水量为 58% 时 N₂O 排放量高^[15]。

1.2.3 土壤结构和团聚体破坏对温室气体排放的影响

冻融作用于土壤后,土壤中有机质和养分通过土壤团聚体破坏、交换位点暴露而变为有效养分,成为非微生物来源有机物质,可为残余微生物提供养分与能量,促进反硝化作用和增强微生物的呼吸作用,使得产生和排放较多的 N₂O 及 CO₂。Skogland 和 Lomeland^[16]的研究指出土壤冻融时期 CO₂ 排放量的增加是因为土壤冻结破坏团聚体结构,释放出大量的活性碳供微生物利用,土壤中微生物利用有机质的能力增强。

冻融使土壤碳矿化作用和反硝化作用增加了 95%, N₂O 的排放量增加 220%,且微团聚体的增量比大团聚体高 57%^[10]。Burton 和 Beauchamp^[17]对土壤冻

融循环中N₂O在冬季和早春时期的过度排放进行了研究, 他们认为N₂O在未冻底土中产生但却封存在冰冻表土下, 从而造成N₂O的累积, 积累的N₂O会在解冻时释放出来。Elberling^[18]认为土壤冻结期间部分微生物还具有活性, 产生的CO₂也被封存在冰冻表土下, 在解冻时期会释放出来。

2 冻融作用下土壤生物性质的变化及其对CO₂及N₂O排放的影响

2.1 冻融作用于土壤酶的效应及其对N₂O和CO₂气体排放的影响

冻结作用导致土壤中部分细菌、真菌死亡继而释放出细胞内物质, 变为有效的养分刺激微生物活性, 另一方面土壤团聚体破坏而释放出可被利用的有机质, 这些有机质及多糖、氨基酸等一定程度上能激活酶的活性。已有研究表明冻融作用能激活酶活性^[19], 由于土壤中酶的活性增强, 促进有机质分解矿化和改变土壤氮素营养, 促进土壤中碳氮矿化作用, 导致冻融期CO₂排放量和矿化氮增多, 又因为自养硝化细菌对环境比较敏感, 恢复较慢, 而反硝化作用增强, N₂O排放量也增多^[17]。

Bremner和Zantau^[20]研究指出在土壤温度达到-20℃时土壤酶的活性依然存在, 这与生物过程有关。Pelletier等^[21]在加拿大的研究发现, 反硝化酶活性存在季节性变化, 在一年中最冷的月份观测到了比较活跃的反硝化酶活性, 土壤冻融时植物体中和微生物中释放出有机碳从而促进了微生物活性。魏丽红^[22]对黑土冻融的研究中, 冻融交替作用明显地增强土壤中磷酸酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的活性, 随冻融强度的加大和冻融频次的增加, 土壤中的磷酸酶、硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的活性呈现出增强的趋势。

2.2 冻融作用于土壤微生物的效应及其对N₂O和CO₂气体排放的影响

土壤冻结和解冻使得土壤温度发生急剧的变化, 影响土壤温度变化速率、通气性以及水分和营养物质的迁移, 甚至导致部分微生物死亡, 而影响微生物的生物量和活性^[23], 但是冻融循环并没有导致微生物活动停止。Teepe等^[24]的研究证实, 一些土壤微生物在温度低至-20℃时还能够进行新陈代谢, 在0℃以下土壤同样可以排放N₂O。Coxson和Parkinson等^[25]认为只要土壤还存在未冻结的水分甚至水膜, 微生物就还能够保持生理活性。Muller等^[26]和Quist等^[27]利用同位素标记法及添加硝化抑制剂的方法得出结论, 即土壤冻融过程中微生物反硝化作用是N₂O产生的主要过程,

而Rover等^[28]的研究发现土壤灭菌对冻融时期N₂O的排放产生阻碍作用, 结果表明冻融交替过程中N₂O的释放与微生物活动显著相关, 最大的N₂O释放量来源于有机质和矿物团聚体含量高的土壤^[26], 也反映了土壤有机质与反硝化作用的相关关系。Lipson等^[29]的研究发现土壤解冻后微生物量及微生物细胞数量减少, 但是Grogan等^[30]的研究表明冻融对微生物量的影响很小。

冻融对土壤微生物的影响与微生物区系组成有关, 土壤中细菌和真菌的特性不同, 对极端温度的耐受性不同, 对冻融交替的响应也有区别。通过同位素标记法, 发现土壤遭受较深冻结后(冻结温度为-15℃), 土壤中真菌的生物量减少了, 而细菌的生物量受到的影响微乎其微^[31]。Soulides和Allison^[32]的研究表明, 在解冻时期冻土中微生物呼吸作用增强, 尽管第一次冻融循环就能使土壤中50%的微生物致死。这主要是因为冻融作用于土壤后, 使得部分微生物和根系死亡, 死亡微生物细胞内物质释放, 使得剩余微生物可利用底物增多, 增强剩余微生物活性, 微生物的呼吸作用和反硝化作用因可被利用的有机质和养分增加而增强。因此, 不论是原位研究还是实验室研究都发现, 土壤解冻期N₂O和CO₂排放量增加, N₂O和CO₂的排放在土壤冻融后达到峰值, 但是通常只持续几天, 而且只有开始几个冻融周期排放通量增加较多, 随后的冻融周期都维持在相对稳定的水平^[12,23]。

2.3 冻融作用的其他土壤生物效应及其对温室气体排放的影响

冻融作用还能够导致植物分解残留物的矿化作用加快。Reuss等^[33]对阿拉斯加苔原带针叶林松树根周围土壤冻融研究表明, 冬季土壤冻结层有大量细根死亡, 增加了土壤中的可矿化物质, 使土壤微生物活性提高, 土壤有机质和养分的数量及其利用率发生变化。季节性冻融还会引起凋落物物理破坏、化学变化、异养微生物组成及胞外酶活性变化等^[15], 从而影响凋落物矿化释放养分数量和比例, 凋落物释放的养分进入土壤后又促进微生物活性, 这也是冻融作用后CO₂和N₂O释放增加的另外一个原因。

3 冻融格局对冻融作用于土壤CO₂及N₂O排放的影响

不同的冻融格局(极端最低温度、冻结持续时间、覆雪深度、冻融交替次数)会导致冻融对土壤N₂O和CO₂气体排放的效应不同, 而凋落物层厚度以及是否存在、土壤类型等也影响到土壤冻融格局。Skogland

等^[16]和Deluca等^[34]研究表明冻结期团聚体的破坏及死亡的微生物数量依赖于各种环境因素,比如冻融强度、冻融次数等,由于冻融格局不同导致的综合作用,所导致的土壤CO₂和N₂O排放通量也发生相应变化,例如极端低温决定了存活微生物的数量和种类,冻融周期数量决定了微生物的逆境适应能力以及土壤有机碳和营养物质的有效性等^[35],这些都对土壤温室气体的排放至关重要。

3.1 冻融极端低温

Tierney等^[36]的研究发现冻融对土壤N₂O、CO₂气体释放的效应与冻融极端温度、冻结深度有关,当土壤低温冻结处理时,使团聚体及微生物细胞破裂,还可能破坏细根,使得土壤中养分供应增加,刺激剩余微生物活性,然后导致N₂O和CO₂气体释放的增加^[15];已往研究也发现冻结温度下降将导致土壤中碳和氮损失量增加,这也证实了冻融对土壤生物化学过程的影响。Neilsen等^[23]研究发现土壤冻结温度为-13℃时冻融后CO₂排放量比冻结温度为-3℃时的排放量高,而冻结温度为-3℃时土壤呼吸强度又比未冻土的呼吸作用强。Hannu和Pertti^[15]的研究证实,当冻融温度为-15℃~+4℃时,在冻融期土壤N₂O气体的排放量比温度-1.5℃~+4℃处理下土壤的N₂O排放量高。在对挪威云杉林的冻融研究中,冻结极端低温分别设置为-3℃、-8℃、-13℃,在-13℃处理下的土壤冻融时期CO₂排放量增加的现象最显著^[37]。

3.2 冻融交替次数

冻融作用于土壤后,CO₂和N₂O气体的排放高峰出现在前几个冻融循环期,在接下来的冻融交替中CO₂和N₂O气体排放又降到一个相对稳定的水平。周旺明等人^[38]研究了冻融条件对湿地土壤有机氮、有机碳的矿化率影响,研究表明冻融温度和冻融次数对土壤可溶性有机氮(DON)和有机碳(DOC)的矿化有影响,随着冻融次数的增加,土壤DOC和DON含量呈先增加后降低趋势,同时N₂O和CO₂排放量也呈先增加后降低的趋势,这是因为由于矿化作用,土壤中的DOC和DON在不断地被活的微生物利用分解^[30],土壤中微生物进行呼吸作用和反硝化作用的底物减少了^[17]。国外对冻融交替下草地、苔原土、北部森林CO₂和N₂O过度排放的研究中,N₂O和CO₂气体排放的峰值出现在冻融交替前几次循环中,随着循环次数的增加,N₂O和CO₂的排放速率下降,直到稳定^[10,17]。Herrmann和Witter^[39]的冻融研究中,在40天内让耕地土壤经受20次短期的冻融循环,在第一次冻融后土壤呼吸和氮矿化作用受冻融影响很剧烈,对N₂O和CO₂的排放影响作

用较大,而接下来的冻融循环对其影响作用减弱。Schimel和Clein^[40]研究发现苔原土与泰加森林土在冻融时会导致微生物呼吸作用增强,CO₂最大量产生于第一个冻融周期,在随后周期中逐渐减少,且在土壤解冻后10天,土壤呼吸作用强度已降至未冻土的水平,并保持在相对稳定的水平上。Teepe等^[24]在对苔原土和森林土壤的冻融实验中观察到CO₂的排放量峰值出现在解冻后的前2天,在接下来4天排放量又降低到一个稳定水平。

这种趋势可能有两个原因:①冻融作用于土壤后,由于死亡的微生物释放出营养物质和易降解的有机质,短暂地刺激了残余微生物活性,增强了微生物的呼吸作用,但是在重复的冻融循环作用下土壤微生物分解利用有机碳的能力下降。②另一种解释是大部分有机或无机物质在第一次冻融循环后已经释放出来,随着冻融循环次数的增加可利用的底物及养分数量也减少,导致冻融后CO₂及N₂O的释放量下降。

3.3 冻结持续时间

由于不同地区气候条件的差异,其冻结持续时间也不同,随着全球变暖将会导致很多地区冻融持续时间缩短,更多表现为季节性冻融或日冻融循环。研究表明,当冻结时间为3天时土壤N₂O的排放量比冻结时间为11天的少22%^[18]。

3.4 其他影响因素

植被及土壤类型。Teepe和Ludwig^[31]与Teepe等^[24]对冻融循环下苔原土壤和森林土壤CO₂和N₂O的排放进行了研究,他们发现冻融条件下苔原土壤CO₂的排放量低于森林土壤,而且在实验中未观察到苔原土壤N₂O的排放,而森林土壤N₂O排放量高,主要的原因是苔原土生物可利用的有机碳较少及苔原土中NO₃⁻含量较少。Teepe和Ludwig^[31]研究发现对于不同类型的土壤,冻融时期N₂O的排放量有较大的区别,在对壤土、沙土、黏土的冻融循环试验中,当3种土壤分别经过2个冻融循环后,沙土中N₂O气体排放没有增加,粉土中N₂O气体的排放量增加不明显,壤土中N₂O排放量增加最明显,这可能与优势植物物种、土壤氮素、有机质、理化特性等有关。

覆雪。雪被厚度被认为是控制土壤温度、根及微生物活动、土壤养分流失及土壤气体排放的一个关键因素^[41]。全球气候变化导致土壤覆雪深度变浅,这将导致冻结现象的频繁、养分流失的增多,而且还会导致土壤气体排放量的变化。土壤覆雪时,土壤与低温环境形成隔离,使得冻融强度减弱、冻结深度变浅,甚至可能阻止土壤冻结现象的发生^[11,36]。深度覆雪还

会阻碍氧气向土壤扩散, 减少土壤中氧气的供应促进微生物厌氧呼吸作用, 这也对土壤 CO₂ 的释放量产生影响^[42]。Hugh^[43]对冻融循环的研究中指出覆雪深度对土壤冻融过程的影响, 未覆雪的土壤受冻结的影响较大, 对土壤中团聚体结构破坏作用更大, 尤其是针对水分含量高的土壤, 使得土壤冻结对微生物群体的破坏程度更严重, 土壤中有有机碳和养分的损失也与覆雪土壤不同, 土壤解冻期 N₂O 和 CO₂ 的排放量也有差别。当土壤没有覆雪时, 将导致土壤温度降低、冻融强度增强、冻融循环次数增加^[37]。Papen 研究中与土壤覆雪的处理相比, 在 4 月份雪融化后, 未覆雪的土壤中硝酸盐含量相对较高, 其 N₂O 的排放量也相对较高^[44]。

凋落物。如前所述, 与覆雪一样, 凋落物厚度以及存在与否对土壤剖面温度和土壤空气的波动至关重要, 尤其是在低温季节。Teepe 和 Ludwig^[31]的研究中发现当移除凋落物层后, 土壤 CO₂ 排放量立即减少了 50%, 在接下来的冻融期 N₂O 的总排放量与第一次冻融期相比减少了 70%, 表明 N₂O 气体的排放某种程度上与凋落物层有关。这个结果与 Papen 和 Butterbach-Bahl^[44]的研究结果一致。

4 当前研究中存在的问题及展望

4.1 原位研究有待开展, 亚高山等高海拔区域研究有待加强

当前对土壤冻融循环的研究多为实验室模拟研究, 由于野外原位实验条件差、费用高、影响因素难以控制、费时费力, 所以国内外的研究工作多为实验室模拟研究。由于实验室模拟研究中常将土壤装于 PVC 管中, 这使得土壤所处冻融环境和原位研究有所区别, 实验一般通过冰箱和培养箱控制气温而实现土壤冻融交替, 由于控制温度下降迅速, 加之实验土壤的体积小土壤温度下降极快, 而且冻融交替也快速进行, 这也与自然状况差别较大。因此, 在全球变暖背景下, 鉴于低温生态系统在全球碳库中的重要地位, 对高纬度和高海拔重要生态系统开展原位定量研究, 揭示这些生态系统温室气体排放通量是必要的。

国外冻融研究多聚焦在高纬度苔原、泰加林等地区, 而缺乏对高海拔地区冻融效应的研究, 高纬度地区与高海拔地区都是冻融作用影响的永冻土和季节性冻土区域, 不同的地理位置其研究结果可能是有所区别的。今后的研究中应加强对高海拔低温生态系统冻融环境的研究, 并对比高纬度地区的研究结果, 对不同地区冻融循环效应进行总结分析, 并研究得出冻融效应产生差异的原因及其深层的影响机理, 这有利于

对全球变暖情形下冻融格局变化后冻融循环效应的研究。

4.2 实验控制冻融格局设置有待优化, 以更加接近实际情况

冻融格局主要指冻融交替次数和冻融持续时间, 有的冻融交替次数和冻融周期的设置不尽合理, 已有研究中设置的不同时间(数天到数月)和温度(最低温度为 -7℃ ~ -20℃)交替格局与自然状况差异甚大。冻融交替格局的设置应以自然环境条件为根据, 有的研究区域有凋落物覆盖且覆雪, 使得冻融的强度不高, 土壤冻结的深度也较浅, 在实验室模拟研究的冻融格局设置时需要考虑这些具体的情况。当前一些土壤冻融研究中冻融循环次数设置较少(已有大多数研究中, 冻融循环次数少于 5 次), 冻融格局不同对土壤生化过程的影响差异可能很大, 而目前对冻融交替及其格局对土壤生化过程及碳氮循环的影响机理仍不清楚。这难以揭示冻融过程的长期效应和积累效应, 以及对土壤呼吸或者土壤气体排放影响的动态变化过程。此外, 冻融格局变化不但体现在持续数天至数周的短期交替的周期长度的变化, 还体现在由于气候变化导致的更长时间尺度的冻融格局变化, 但目前这方面的研究还没有开展。

4.3 亟需采用综合研究手段揭示冻融循环作用的影响机理

研究已经证实, 土壤水分、凋落物、植被、土壤理化性质、冻融交替格局都会对土壤冻融作用产生相应的影响, 研究者也提出了很多假设, 低温生态系统的温室气体排放是一个多因素影响的综合效应过程。但是, 冻融循环交替格局改变的背景下, 对土壤 CO₂ 和 N₂O 等温室气体的排放的影响大小, 在不同的研究中存在差异, 而冻融交替则是明显改变了原有的生物和生物化学过程, 已有研究尚不能明确冻融作用的影响机理, 不能确定冻融作用下土壤生物与生物化学过程对 CO₂ 和 N₂O 排放的贡献。尽管现有研究揭示了这类生态系统温室气体的一些规律, 但是对揭示这些低温生态系统的温室气体排放机理和过程的研究还有相当距离。

因此, 在该领域中, 除了原有的土壤生物与生物化学研究手段之外, 今后应该更多综合运用稳定同位素标记、高效液相、气相和气质联用仪等现代分析手段, 着重对有机碳氮的转化过程和中间产物的定量分析, 结合 PLFA、DGGE 等研究方法, 对冻融交替背景下微生物功能群动态和多样性及其相关功能进行分析, 这些工作将为揭示温室气体的排放机理提供帮助,

同时这些工作也才能为重要的低温生态系统的管理提供科学依据。

参考文献:

- [1] 孙辉, 秦纪洪, 吴杨. 土壤冻融交替生态效应研究进展. 土壤, 2008, 40(4): 505-509
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press: 2001: 7-76
- [3] 刘绍辉, 方精云. 土壤呼吸的影响因素及全球尺度下温度的影响. 生态学报, 1997, 17(5): 469-477
- [4] Schadt CW, Martin AP, Lipson DA, Schmidt SK. Seasonal dynamics of previously unknown fungal lineages in tundra soils. *Science*, 2003, 301: 1 359-1 361
- [5] Schmidt SK, Lipson DA. Microbial growth under the snow: implications for nutrient and allelochemical availability in temperate soils. *Plant Soil*, 2004, 259: 1-7
- [6] Ludwig B, Teepe R. CO₂ and N₂O emissions from gleyic soils in the Russian tundra and a German frost during freeze-thaw periods—A microcosm study. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38: 3 516-3 519
- [7] 国家气候中心. 全球气候变化的最新科学事实和研究进展——IPCC 第一工作组第四次评估报告初步解读. 环境保护, 2007, 37(17): 27-30
- [8] Wagner-Riddle C, Thurtell GW, Kidd GK. Estimates of nitrous oxide emissions from agricultural fields over 28 months. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, 77(2): 135-144
- [9] 杨平, 张婷. 人工冻融土物理力学性能研究. 冰川冻土, 2002, 24(5): 665-667
- [10] Van Bochove E, Prévost D, Pelletier F. Effects of freeze-thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1 638-1 643
- [11] Lehrs GA, Sojka RE, Carter DL. Freezing effects on aggregate stability affected by texture, mineralogy, and organic matter. *Soil Science Society of America Proceedings*, 1991, 55: 1 401-1 406
- [12] 王洋, 刘景双, 王国平, 周旺明. 冻融作用与土壤理化效应的关系研究. 地理与地理信息科学, 2007, 23(2): 91-97
- [13] 杨梅学, 姚檀栋. 青藏高原表层土壤的日冻融循环. 科学通报, 2006, 51(16): 1974-1976
- [14] 王连峰, 蔡延江, 解宏图. 冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系. 应用生态学报, 2007, 18(10): 2 361-2 367
- [15] Hannu TK, Pertti JM. Soil water content and freezing temperature affect freeze-thaw related N₂O production in organic soil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 69: 213-219
- [16] Skogland T, Lomeland S, Goksoyr J. Respiratory burst after freezing and thawing of soil: Experiments with soil bacteria. *Soil Biol. Biochem.*, 1988, 20: 851-856
- [17] Burton DL, Beauchamp EG. Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentrations in a soil subject to freezing. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1994, 58: 115-122
- [18] Elberling BO. Seasonal trends of soil CO₂ dynamics in a soil subject to freezing. *Journal of Hydrology*, 2003, 276: 159-175
- [19] Chen GBT, Bourget SJ, Ou Ellert GJ. Influence of alternate freezing and thawing on the availability of some soil minerals. *Canadian Journal of Soil Science*, 1971, 51: 323-328
- [20] 魏丽红. 冻融作用对土壤理化及生物学性质的影响综述. 安徽农业科学, 2009, 37(11): 5 054-5 057
- [21] Pelletier FD, Prevost, G Laberte, Van Bcchove E. Seasonal response of denitrifiers to temperature in a Quebec cropped soil. *Canadian Journal of Soil Science*. 1999, 79: 551-556
- [22] 魏丽红. 冻融交替对黑土土壤有机质及氮钾养分的影响(硕士学位论文). 吉林: 吉林农业大学, 2004
- [23] Nielsen CB, Groffman PM, Hamburg SP, Driscoll CT, Fahey TJ, Hardy JP. Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 1 723-1 730
- [24] Teepe R, Brumme R, Beese F. Nitrous oxide emissions from soil during freezing and thawing periods. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33 (9) : 1 269-1 275
- [25] Coxson DS, Parkinson D. Winter respiratory activity in aspen woodland forest floor litter and soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1987, 19: 49-59
- [26] Muller C, Martin M, Stevens RJ, Laughlin RJ, Kamman C, Ottow JC G, Jager HJ. Processes leading to N₂O emissions in grassland soil during freezing and thawing. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 1 325-1 331
- [27] Quist MG, Nilsson M, Persson T, Weslien P, Klemetsson L. Nitrous oxide production in a forest soil at low temperatures—Processes and environmental controls. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 2004, 49: 371-378
- [28] Rover M, Heinemeyer O, Kaiser EA. Microbial induced nitrous oxide emissions from an arable soil during winter. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30: 1 859-1 865
- [29] Lipson DA, Schmidt SK, Monson RK. Links between microbial population dynamics and nitrogen availability in an alpine ecosystem. *Ecology*, 1999, 80: 1 623-1 631
- [30] Grogan P, Michelsen A, Ambus P, Jonasson S. Freeze-thaw regime effects on carbon and nitrogen dynamics in sub-arctic heath tundra mesocosms. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36:

- 641-654
- [31] Teepe R, Ludwig B. Variability of CO₂ and N₂O emissions during freeze-thaw cycles: results of model experiments on undisturbed forest-soil cores. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167: 153-159
- [32] Soulides DA, Allison FE. Effects of drying and freezing soil on carbon dioxide production, available mineral nutrients, aggregation and bacterial population. *Soil Sci.*, 1961, 91: 291-298
- [33] Ruessr W, Hendrick PL, Bryan TJP. Regulation of fine root dynamics by mammalian borers in early successional Alaskantaiga forests. *Ecology*, 1998, 79: 2 706-2 720
- [34] DeLuca TH, Keeney DR, McCarthy GW. Effect of freeze-thaw events on mineralization of soil nitrogen. *Biol. Fertil. Soils*, 1992, 14: 116-120
- [35] Carl JM, Joshua PS, Allen PD. Temperature controls of microbial respiration in arctic tundra soils above and below freezing. *Soil Biology & Biochemistry*, 2002, 34: 1 785-1 795
- [36] Tierney GL, Fahey TJ, Groffman PM, Hardy JP, Fitzhugh RD, Driscoll CT. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 2001, 56: 175-190
- [37] Matzner E, Borkfn W. Do freeze-thaw events enhance C and N losses from soils of different ecosystems? A review. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59: 274-284
- [38] 周旺明, 王金达, 刘景双, 秦胜金, 王洋. 冻融对湿地土壤可溶性碳、氮和氮矿化的影响. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3): 1-6
- [39] Herrmann A, Witter E. Sources of C and N contributing to the flush in mineralization upon freeze-thaw cycles in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 2002, 34: 1 495-1 505
- [40] Schimel JP, Clein JS. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28(8): 1 061-1 066
- [41] Edwards AC, Cresser MS. Freezing and its effect on chemical and biological properties of soil. *Advances in Soil Science*, 1992, 18: 59-79
- [42] Anthony CE, Riccardo S, Michele F. Changes in the seasonal snow cover of alpine regions and its effect on soil processes: A review. *Quaternary International*, 2007, 162/163: 172-181
- [43] Hugh ALH. Soil freeze-thaw cycle experiments: Trends, methodological weaknesses and suggested improvements. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 977-986
- [44] Papen H, Butterbach-Bahl K. 3-year continuous record of N-trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest in Germany: I. N₂O emissions. *J. Geophys. Research*, 1999, 104: 487-503

A Review: Response of Soil CO₂ and N₂O Emissions to Freeze-Thaw Pattern Change

YANG Hong-lu¹, QIN Ji-hong², SUN Hui¹

(1 Department of Environmental Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2 Department of Environmental Engineering, College of Urban and Rural Construction, Chengdu University, Chengdu 610106, China)

Abstract: In high latitude and altitude ecosystems, surface soil is subjected to experience freeze-thaw cycles during alternating autumn and winter or spring period. As the role of freeze-thaw alternation can change the hydrothermal properties of soil, and produce the effects on soil physicochemical properties and biological characteristics, which led to the breakdown of soil aggregates and the deaths of some micro-organisms and fine roots, release a certain degree of active organic matter and nutrients to enhance the remaining anti-microbial nitrification and respiration, thus can affect soil biological, biochemical process and bio-geochemical cycle. The conducted studies on the tundra, taiga and other Arctic and sub-Arctic ecosystems showed that the number of alternate freezing and thawing, freeze-thaw extreme temperatures, soil moisture, soil aggregates structure and other factors had significant effects on the release of CO₂ and N₂O fluxes, generally during several previous freeze-thaw cycles greenhouse gas emissions increased, then dropped to a more stable level. The current research of freeze-thaw cycle is mainly targeted to the northern high-latitude areas, but with inadequate attentions on the mechanism of the effect of alternate freezing and thawing that lead to greenhouse gas emissions. The Qinghai-Tibet Plateau of China is the vast high-altitude zone, a slight warming maybe increase the times of alternate freezing and thawing of seasonal frozen soil layer, even lead to the seasonal disappearance of permafrost, so in the context of global warming strengthening the research on the effects and processes of sub-alpine mountains of China's seasonal freeze soil ecosystem studies, particularly the changes of greenhouse gas emissions and the mechanism of these changes, plays an important role in revealing the regional effects of global change as well as high-altitude ecosystem management

Key words: Freeze-thaw cycle, Greenhouse gases, Soil warming, Sub-alpine soils