

陈哲, 韩瑞芸, 杨世琦, 等. 东北季节性冻融农田土壤 CO₂、CH₄、N₂O 通量特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(2):387–395.

CHEN Zhe, HAN Rui-yun, YANG Shi-qi, et al. Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from seasonal freeze-thaw arable soils in Northeast China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(2):387–395.

东北季节性冻融农田土壤 CO₂、CH₄、N₂O 通量特征研究

陈哲¹, 韩瑞芸¹, 杨世琦¹, 张爱平¹, 张晴雯¹, 米兆荣², 王永生³, 杨正礼^{1*}

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所农业清洁流域创新团队/农业部农业环境重点实验室, 北京 100081; 2.中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 3.北京农业信息技术研究中心, 北京 100097)

摘要:为了评估季节性冻融交替对土壤温室气体排放的影响,采用静态暗箱-气相色谱法,监测了东北松嫩平原两种典型农田生态系统(稻田和玉米田)非生长季土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 通量变化。研究表明:三种温室气体排放土壤在土壤冻结期、覆雪期、融雪期和解冻期具有明显的季节动态特征。冻结期和融雪期对温室气体排放贡献最大,这两个时期内稻田和玉米田 CO₂ 排放量分别占非生长季总累积排放量的 74.9%和 68.6%,稻田 CH₄ 排放占非生长季总排放的 95.7%,尽管玉米田土壤 CH₄ 以吸收为主,但在融雪过程中存在明显释放峰;短暂的融雪期内 N₂O 呈集中爆发性释放,稻田和玉米田 N₂O 通量峰值分别是冻结前的 40 倍和 99 倍,排放量占到总累积排放量的 73.9%和 80.7%,覆雪期土壤 CH₄ 和 N₂O 存在弱的吸收。另外,土壤温室气体排放存在土地利用方式间的差异,表现在稻田土壤比玉米田(非生长季)具有更高的温室气体排放潜力。稻田土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 累积排放量均高于玉米田,表现为净排放(源),而玉米田土壤 CH₄ 通量表现为净吸收(汇);稻田土壤 CO₂ 和 CH₄ 平均排放速率显著高于玉米田;除覆雪期外,其他时期内三种温室气体平均通量在两类农田之间也存在显著差异。总之,在评价季节性冻土区温室气体排放时需要重视土壤冻结和融化过程,同时需要考虑不同土地利用方式间的差异。

关键词:黑土;非生长季;温室气体;冻融交替;雪被;源汇;净温室效应

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2016)02-0387-09 **doi:**10.11654/jaes.2016.02.025

Fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from seasonal freeze-thaw arable soils in Northeast China

CHEN Zhe¹, HAN Rui-yun¹, YANG Shi-qi¹, ZHANG Ai-ping¹, ZHANG Qing-wen¹, MI Zhao-rong², WANG Yong-sheng³, YANG Zheng-li^{1*}

(1.Agricultural Clear Watershed Innovation Group, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 2.Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453002, China; 3.Beijing Research Center for Information Technology in Agricultural, Beijing 100097, China)

Abstract: We monitored the dynamics of soil CO₂, CH₄ and N₂O fluxes of two typical agricultural ecosystems (paddy/maize field) in Songnen Plain using static opaque chamber-gas chromatograph method. The greenhouse gases (GHG) emissions showed obvious seasonal pattern, which could be divided into four periods—freezing, snow cover, snow melting, and frost free. The freezing and snow melting periods were critical for greenhouse gases (GHG) emissions. During these two periods, CO₂ emissions from paddy and maize fields accounted for 74.9% and 68.6% of the total cumulative CO₂ emissions, respectively. The CH₄ emissions from paddy field amounted to 95.7% of the total CH₄ emissions. In the maize field, CH₄ showed absorption during the experimental period. However, it had large releases during snow melting. Soil N₂O emissions showed intensive explosive release during the short snow melting period. The peak of N₂O flux from paddy and maize fields was respectively 40 times and 99 times higher than that before soil freezing. The cumulative emissions of N₂O from two farmlands accounted for 73.9% and 80.4% of the total N₂O emissions, respectively. During the snow covering period, CH₄ and N₂O were weakly absorbed. In addition, different land uses showed different patterns of GHG emissions. Paddy had higher potential GHG emissions than

收稿日期:2015-09-23

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07201-009)

作者简介:陈哲(1987—),男,陕西宝鸡人,博士研究生,从事农田土壤氮循环与温室气体排放研究。E-mail:chenzhe80122@163.com

*通信作者:杨正礼 E-mail:yangz426@126.com

maize field did. Taken together, CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes from paddy field were net emissions (source), and the total cumulative emission was higher than that of maize field. The average emission rates of CO_2 and CH_4 were significantly higher in paddy than in maize field. However, CH_4 flux of maize field was net absorption (sink). The average GHG flux was significantly different between these two types of farmland. In conclusion, GHG emissions during soil freezing, thawing and snow melting periods should be taken into account when evaluating the GHG emissions in seasonal frozen regions. GHG emissions under different land uses are different.

Keywords: black soil; non-growing season; greenhouse gas; freeze-thaw cycle; snow cover; source and sink; net greenhouse effect

全球中高纬度地区土壤广泛受到冻融作用的影响,仅北半球土壤存在冻融交替现象的面积就达 $79.3 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占到北半球陆地总面积的 82.7%^[1]。这类地区平均气温低,土壤有机质矿化分解缓慢,土体储藏大量有机质,是陆地生态系统重要碳库和全球碳、氮循环中的重要角色^[2]。近年来在全球增温驱动下,寒冷地区土壤有机质分解呈加速趋势^[3],可能导致长期储存在土壤有机质中的碳氮以 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的形式排放,对气候变暖产生正反馈^[4-7]。同时,非生长季内土壤冻结、积雪覆盖、雪水补给以及频繁的昼夜冻融等特殊因素,造成该时期温室气体生产机制、排放特征以及对碳氮收支贡献的比例不同于生长季。已有研究表明,非生长季冻融交替时期是大气温室气体的热点排放源^[8-10],冻结及融冻过程中土壤的痕量气体排放量可能占到全年总量的 20%~70%^[11]。这可能是由于非生长季中频繁的冻融交替、极端的冻结温度、漫长的积雪覆盖、大量的雪水补给等特殊因素,对土壤团聚结构、通气状况、微生物区系、土壤酶活性、速效养分等造成影响^[12-14],进而加速土壤温室气体产生和排放。室内冻融模拟试验也证明,在土壤“冻结-融化”过程中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的释放明显增加^[15-16]。因此,在评价季节性冻土区土壤温室气体排放时应当考虑非生长季的排放情况,但目前研究多集中在植物生长季,非生长季土壤温室气体监测存在取样频率低、采样时间代表性不强的缺点,这可能会低估非生长季的温室气体排放。

本研究试验地点选择在我国纬度最高的东北地区进行,希望通过开展野外原位监测、提高采样频率的方式重点监测土壤冻结、积雪覆盖、积雪融化和土壤解冻这些关键时期内土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量的变化特征,以期为进一步认识冻融环境中温室气体排放规律提供支持,为非生长季土壤温室气体排放的温室效应评估提供科学数据。同时希望通过对比稻田和玉米田两种土地利用方式下土壤温室气体排放差异,为准确计算季节性冻融农田生态系统土壤碳氮收支提供必要数据,为我国寒冷冻融区农田土壤温室气体

排放提供原始数据积累。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验所在地区为哈尔滨市方正县,位于黑龙江省中南部、松嫩平原东北部,松花江中游南岸、长白山支脉张广才岭北段西北麓、蚂蜒河下游,属于典型的中纬度季节冻土区,作物非生长期长达 200 d,每年存在昼夜冻融的天数约 110 d。该地气候属于寒温带大陆性季风气候,春季风大雨小,夏季炎热雨多,秋季凉爽干旱,冬季漫长、酷寒、干燥,年均气温 2.6°C ,极端低温 -36.8°C ,极端高温 36.3°C ,年均积温 $2500\sim 2700^\circ\text{C}$,无霜期 125 d,年降水量 $400\sim 600 \text{ mm}$,年均太阳可照时数 4446 h。土壤类型以棕壤土、黑壤土、草甸土、草甸化白浆土为主。大田农作物主要为水稻和玉米,生育期 5 月初至 9 月底^[17]。本试验样地地理坐标为:水稻田 $128^\circ 48' 42.5088''\text{E}$, $45^\circ 49' 46.4088''\text{N}$;玉米田 $128^\circ 52' 24.744''\text{E}$, $45^\circ 47' 51.7524''\text{N}$ 。两类样地土壤 0~30 cm 土层基本理化性质详见表 1。

1.2 样品采集与测定

试验所在地每年 10 月初至次年 4 月底为耕作休闲期,即非生长季。当地以往气象资料表明 3 月中旬至 4 月中旬、10 月中旬至 11 月中旬昼夜气温差异大,为土壤发生冻融交替的主要时期。为保证采样的代表性,这两段时间内监测频率设为 2 d 一次,而 11 月中旬至次年 3 月初土壤完全冻结,采样时段设为 10 d 一次。本试验监测期为 2014 年 9 月底至 2015 年 5 月初。参考往年气象数据,冻结期(Freezing period)为秋季日最低温第一次出现 0°C 以下的日期至日最高温低于 0°C 且积雪不再消融的日期;当日最高温持续低于 0°C 时起至次年春季日最高气温再次高于 0°C 为止,该时期积雪不融化,称为覆雪期(Snow cover period);融雪期(Snow melting period)为春季第一次出现日最高温高于 0°C 的日期至积雪全部融化的日期;当积雪融化后,土壤开始自上而下解冻,直到播种前全部融化,该时期为解冻期(Thawing period)。根据试

表1 水稻田和玉米田土壤理化性质(0~30 cm)

Table 1 Soil physicochemical properties of paddy and maize fields (0~30 cm)

样地 Field	全氮 Total N/%	全磷 Total P/%	全钾 Total K/%	水解性氮 Hydrolyzable N/mg·kg ⁻¹	硝态氮 Nitrate/ mg·kg ⁻¹	铵态氮 Ammonium/ mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ g·kg ⁻¹	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	pH
水稻田 Paddy field	0.196	0.05	1.78	164.67	2.57	11.74	25.48	0.10	41.18	5.77
玉米田 Maize field	0.137	0.06	1.99	137.70	8.00	21.30	27.62	0.10	24.18	5.01

验期间大气温度和积雪覆盖的变化,本研究所监测的时间段内冻结期、覆雪期、融雪期、解冻期的具体时间和持续天数分别为:2014.09.29—2014.11.26(59 d)、2014.11.27—2015.03.13(106 d)、2015.03.14—2015.03.31(18 d)、2015.04.01—2015.05.05(35 d)。

依照目前国际上的通用做法,选择在晴朗天气上午8:00—11:00采集气体样品,并假定该时段测定值能够代表当日交换通量。试验采用密闭静态暗箱采集气体样品。静态暗箱由不锈钢材料制成的采样箱(长0.5 m×宽0.5 m×高0.3 m)和底座(长0.5 m×宽0.5 m×高0.3 m)两部分组成。箱体内置高灵敏度温度探针、空气搅拌风扇和采样管。采样箱外壁用锡纸包裹,以反射阳光从而防止太阳辐射下箱内空气温度过快升高。箱体底部粘贴有3排D型密封条,确保箱体和底座连接密闭。将底座下端插入土体30 cm深。气体一次完整采样在30 min内完成,用100 mL注射器每10 min(第0、10、20、30 min)从静态箱中抽取一管空气,经三通阀注入铝箔采集袋(大连海德科技有限公司)。每次取样时记录抽气时间、箱内外温度、土壤温度^[18]。气体样品采用中国科学院大气物理研究所研制的CA-5进样仪注入气相色谱(Agilent 7890A,美国),一次进样可同时测定CO₂、CH₄、N₂O三种气体浓度。

1.3 数据分析

气相色谱仪测得样品中气体的峰面积 A_s ,用下式计算样品的气体浓度 C_s (CO₂、CH₄:mL·m⁻³;N₂O:μL·m⁻³)。

$$C_s = \frac{A_s \times C_0}{A_0}$$

式中: C_0 为标准气样浓度(CO₂:398.60 mL·m⁻³;CH₄:1.97 mL·m⁻³;N₂O:318.00 μL·m⁻³); A_0 为标准气样所测峰面积。

由于当地大气压强并非标准大气压,在计算气体通量时需要根据实际大气压和大气温度对气体密度 ρ 经行校准。经推导,气体交换通量 F (CO₂:mg·m⁻²·h⁻¹;CH₄、N₂O:μg·m⁻²·h⁻²)计算公式可表示如下:

$$F = \frac{dc}{dt} \cdot \frac{M}{V_0} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot H$$

式中: dc/dt 为采样箱内气体浓度随时间变化的回归曲线斜率; M 为气体摩尔质量,g·mol⁻¹; P 为当地大气压强(99.991 kPa); T 为箱内实际温度,K; V_0 、 P_0 、 T_0 分别为标准状态下的气体摩尔体积(22.4 L·mol⁻¹)、标准大气压(101.325 kPa)和大气温度(273 K); H 为采样气室高度(0.3 m)。

F 为负值时表示气体净吸收,正值时表示净排放。温室气体的累积通量采用线性内插法计算。农田净温室效应目前普遍采用全球增温潜势来衡量,以CO₂、CH₄、N₂O三种温室气体净交换量的CO₂当量的代数和来计算。由于单位质量CH₄和N₂O在百年时间尺度全球增温潜势分别是CO₂的25倍和298倍,净温室效应(kg CO₂·hm⁻²)可表示为:

$$\text{净温室效应} = \text{CO}_2 + \text{CH}_4 \times 25 + \text{N}_2\text{O} \times 298$$

本研所得数据的统计分析在R(3.2.1)软件(R Developmentcore team,2015)中进行。采用一般线性模型单变量两因素方差分析判断时间和样地类型是否影响温室气体通量;样地间,非生长季温室气体平均通量和不同冻融时期平均通量采用配对 t 检验比较;同一样地不同冻融时期,温室气体平均通量差异性采用单因素方差分析比较。差异显著性水平 $\alpha=0.05$ 。图形绘制使用Origin 8.5软件。

2 结果与分析

2.1 温度和积雪变化

如图1所示,在观测期内试验所在地日平均气温-6.4℃,白天平均温度-0.6℃,夜间平均温度-12℃,白天最高温31.3℃,夜间极端最低温-34.0℃(2015年2月9日)。土壤冻结前和积雪融化过程中,昼夜温差大,波动幅度为1.7~26.0℃,剧烈的温度变化使土壤发生显著的昼夜冻融交替现象。在整个非生长季试验区降水量达115.3 mm,主要集中在9月、10月和4月、5月。2014年11月上旬出现积雪覆盖,随冬季降水的增加2015年3月2日雪被厚度达到最大值44.7

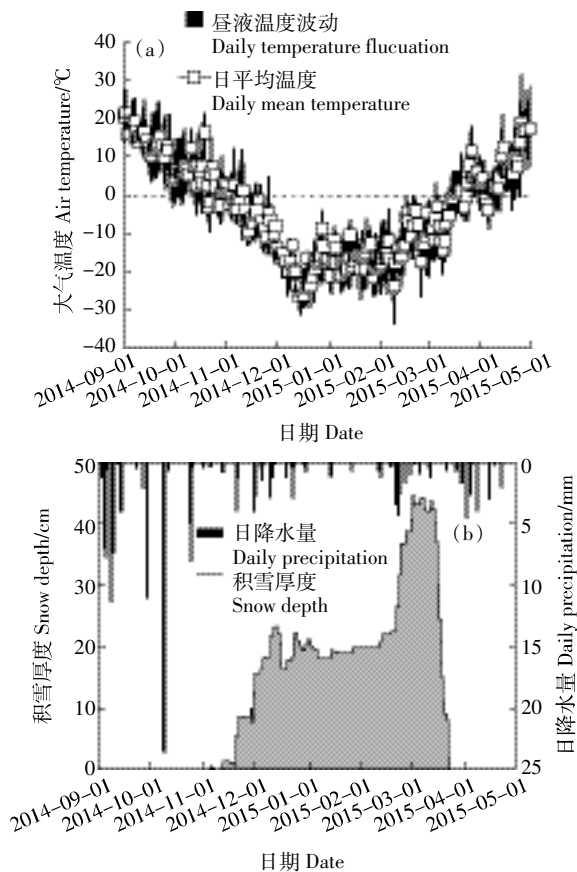


图1 非生长季温度(a)、降水量和积雪覆盖(b)变化

Figure 1 Variation of temperature(a), rainfall and snow cover(b) during non-growing season

cm,但最大积雪厚度持续时间较短,3月底全部融化。冻结期内土壤热量以释放为主,冻结锋面整体向下延伸。此阶段内由于气温昼夜波动较大,夜晚低于零度,昼夜频繁的热量交换使表层土壤发生多次冻融交替,持续天数达到59 d;非生长季中超过一半的时间土壤处于覆雪状态,积雪天数长达107 d;融雪期内白天气温高于0℃积雪逐渐融化,约2周时间全部融化;积雪融化后土壤进入解冻期,裸露的土壤受太阳辐射作用,土壤热量以吸收为主,融化层逐渐向下延伸。解冻期初期与冻结期类似,气温昼夜波动大,表层土壤发生多次冻融交替,持续25 d。

2.2 CO₂、CH₄、N₂O 通量时空变化特征

水稻田和玉米田土壤在作物非生长季内CO₂、CH₄和N₂O三种温室气体呈现不同排放规律(图2)。样地土壤CO₂在覆雪前均具有较高的排放量,随着温度的降低以及积雪的出现排放量逐渐降低,当积雪开始融化后CO₂排放量逐渐增加,整体上呈“U型”变化趋势。水稻田在积雪覆盖前CO₂排放峰值(132.05 mg·m⁻²·h⁻¹)要远大于积雪融化后(65.03 mg·

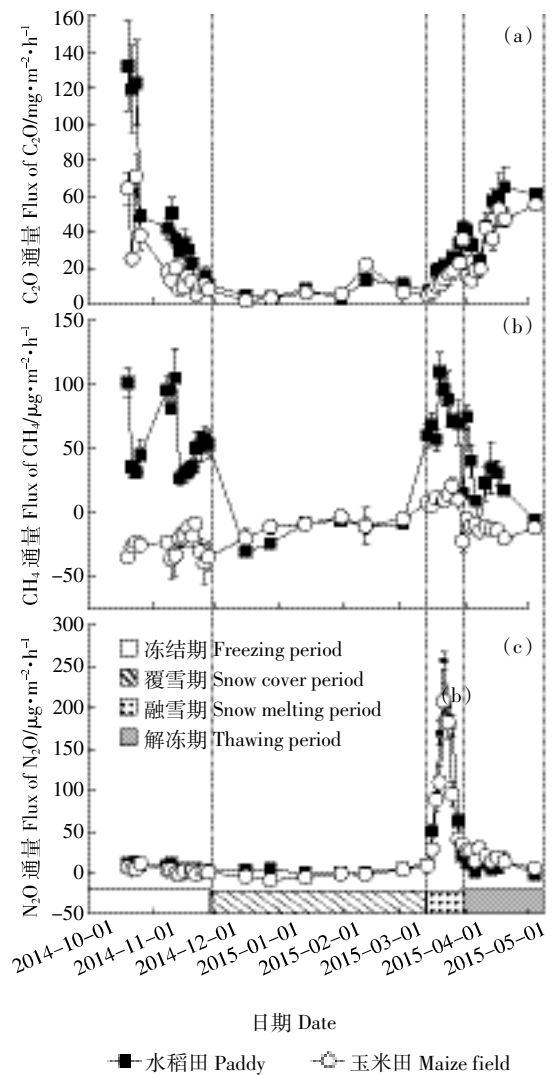


图2 非生长季水稻田和玉米田土壤温室气体排放动态变化

Figure 2 Dynamics of greenhouse gas emissions from paddy and maize fields during non-growing season

m²·h⁻¹),而玉米田在覆雪前后CO₂排放峰值差异不大。稻田土壤CH₄呈“双峰型”动态特征,在覆雪前、融雪过程中以释放为主,排放峰值分别为104.37、109.31 μg·m⁻²·h⁻¹,而在冬季积雪覆盖时期监测通量均为负值,即存在CH₄吸收现象;而玉米田在整个非生长季土壤CH₄以吸收为主,只在积雪融化和融化后很短的时间出现弱的释放峰,最大释放速率仅为20.72 μg·m⁻²·h⁻¹。水稻田和玉米田样地中N₂O通量变化都呈明显的“单峰型”变化规律,积雪覆盖前表现为弱释放,覆雪期为弱吸收,而在积雪消融及土壤开始解冻的短期内排放速率急剧增加,通量峰值分别达到257.43、207.44 μg·m⁻²·h⁻¹,分别是土壤冻结前N₂O平均排放速率的40.10倍和99.25倍。可见在春季融雪和土壤解冻的过程N₂O存在脉冲式集中释放。

时间、样地两因素显著影响非生长季内水稻和玉米田土壤 CO₂、CH₄ 通量 ($P<0.05$), 且存在显著的交互作用, 而 N₂O 排放只与时间因素有关。这三种温室气体通量在时间序列上均具有较大的变异系数, 特别是 N₂O 通量的变异系数在水稻和玉米样地中分别达到 1.97、1.92 (表 2), 属于高度变异, 表明非生长季温室气体排放的波动性大, 存在明显的时间动态。同时, 配对 t 检验表明非生长季土壤 CO₂ 和 CH₄ 通量在水稻和玉米样地间具有显著差异 ($P<0.05$)。水稻田土壤 CO₂ 和 CH₄ 平均通量均显著高于玉米田。而两种样地中 N₂O 非生长季平均通量差异不显著 ($P=0.118$), 见表 2。由此可见, 种植不同作物的土壤在非生长季 CO₂ 和 CH₄ 通量存在显著差异, 而 N₂O 通量动态变化主要与时间因素有关, 与作物种植的类型关系不大。

2.3 不同冻融期 CO₂、CH₄、N₂O 通量特征

试验所在区域冬季漫长、酷寒, 积雪覆盖时间长、厚度大, 且土壤冻结前和积雪融化后表层土壤存在昼夜冻融交替显现, 这种特殊条件会影响土壤温室气体排放。监测结果表明: CO₂、CH₄ 和 N₂O 在冻结期、覆雪期、融雪期和解冻期的平均通量均具有显著差异 (图 3)。稻田不同冻融时期土壤 CO₂ 平均通量表现为冻结期>解冻期>融雪期、覆雪期 (图 3a); 稻田土壤 CH₄ 平均通量融雪期、冻结期显著高于解冻期, 而覆雪期 CH₄ 平均通量为负值, 表现为弱“汇” (图 3b); 稻田在融雪期内 N₂O 平均通量显著高于其他三个时期 (图 3c)。玉米田土壤 CO₂ 冻结期和解冻期平均通量显著高于覆雪期和融雪期 (图 3a); 融雪期内玉米田 CH₄ 平均通量为正, 表现为“源”, 而冻结期、覆雪期和解冻期 CH₄ 平均通量为负值, 表现为“汇”, 其中冻结期

CH₄ 的平均吸收速率显著高于其他两个时期 (图 3b); 融雪期和解冻期内玉米田土壤 N₂O 排放表现为“源”, 平均释放速率显著高于冻结期, 尽管覆雪期 N₂O 平均通量为负值, 表现为弱“汇”, 但与冻结期弱的释放速率差异不显著 (图 3c)。这表明在气温回暖过程中, 特别是积雪融化和土体开始解冻的初期土壤存在 N₂O 的急剧释放过程。

同一冻融时期内, 各温室气体在不同样地间的平均通量亦存在显著差异。具体表现为: 冻结期, 稻田土壤 CO₂、CH₄、N₂O 平均通量显著高于玉米田; 覆雪期, CO₂ 和 CH₄ 平均通量在两类样地间无差异, 而水稻和玉米田 N₂O 的源汇关系相反; 融雪期, 稻田土壤 CO₂、CH₄、N₂O 平均通量均显著高于玉米田; 解冻期, 稻田土壤 CO₂ 平均通量显著高于玉米田, 而 N₂O 平均通量却显著低于玉米田, 但 CH₄ 在两类样地中的源、汇关系恰相反, 且差异显著。

2.4 非生长季温室气体累积排放量

稻田整个非生长季的土壤 CO₂、CH₄ 和 N₂O 表现为净释放, 总累积排放量分别达到 1172.15、893.83、706.67 g·hm⁻²。玉米田整个非生长季土壤 CO₂ 和 N₂O 同样表现为净释放, 但总累积排放量分别仅为 812.16 kg·hm⁻² 和 482.44 g·hm⁻², 显著低于稻田排放量, 而玉米田土壤 CH₄ 却表现为净吸收, 总累积排放量为 -596.82 g·hm⁻²。可见不同土地利用方式下非生长季土壤温室气体排放量有所差别, 特别是玉米田土壤是大气 CH₄ 的重要“汇”。

不同冻融时期各温室气体累积排放量在整个非生长季排放量中所占比例有所区别。冻结期和解冻期是非生长季土壤 CO₂ 排放的主要时期, 该时期内水稻

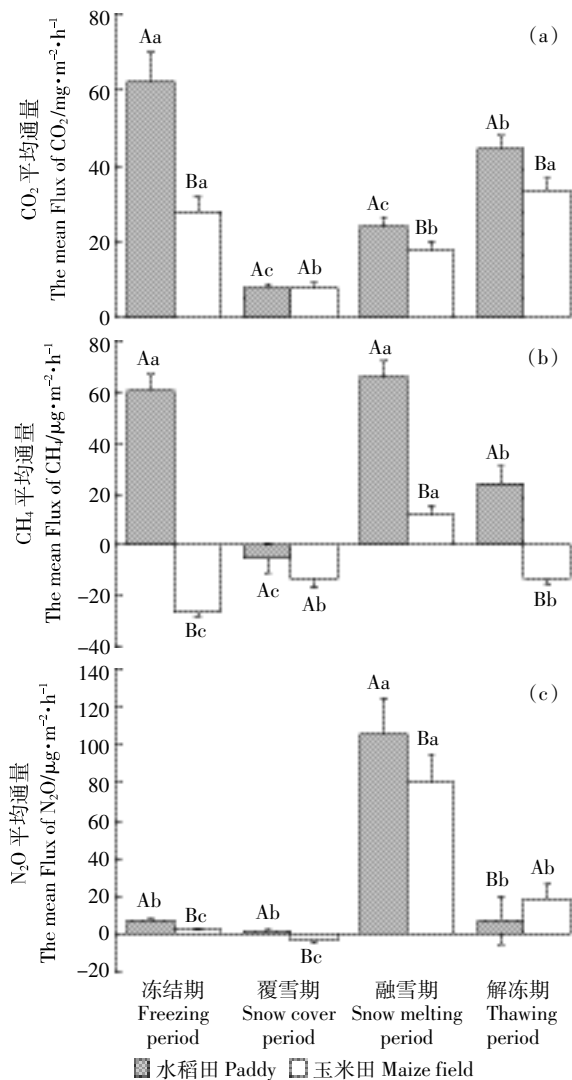
表 2 非生长季温室气体平均通量及采样时间和样地类型对温室气体排放影响的重复测量方差分析

Table 2 Average greenhouse gas flux during non-growing season and repeated measures ANOVA on sampling date and field type

温室气体 Greenhouse gas	非生长季平均通量 Mean fluxes (Mean±SE)		变异系数 Coefficients of variation		因素 Factor	P
	水稻田 Paddy	玉米田 Maize field	水稻田 Paddy	玉米田 Maize field		
CO ₂ /mg·m ⁻² ·h ⁻¹	37.97±3.46a	22.92±1.90b	0.89	0.83	时间 Date	<0.001
					样地 Field	0.001
					时间×样地 Date×Field	<0.001
CH ₄ /μg·m ⁻² ·h ⁻¹	37.05±4.13a	-13.24±1.08b	0.92	-1.19	时间 Date	<0.001
					样地 Field	<0.001
					时间×样地 Date×Field	<0.001
N ₂ O/μg·m ⁻² ·h ⁻¹	25.44±5.5a	20.95±4.27a	1.97	1.92	时间 Date	<0.001
					样地 Field	0.118
					时间×样地 Date×Field	<0.001

注: 不同小写字母表示两种地间温室气体平均通量差异显著。显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

Note: Different lowercase letters mean significant difference in greenhouse gas flux between two soils at 0.05.



不同大写字母表示同一时期内两种样地间温室气体通量差异显著;不同小写字母表示同一样地内不同时期间温室气体通量差异显著
Different capital letters mean significant difference in GHG flux between two arable soils at the same period; different lowercase letters denote difference in GHG flux between periods in the same field

图3 不同冻融时期温室气体平均通量

Figure 3 Average GHG flux during different freezing and thawing periods

和玉米田对总排放量的贡献分别为74.91%、68.56%。稻田土壤 CH_4 总排放量中95.69%来自于冻结期和融雪期,覆雪期 CH_4 表现为净吸收,对总排放量的贡献为-12.40%;与稻田不同,玉米田土壤 CH_4 净吸收主要发生在冻结期和覆雪期,占净吸收总量的86.99%,而融雪期表现为弱释放,对总吸收量的贡献仅为-6.90%。融雪期是稻田和玉米田土壤 N_2O 排放的重要时期,分别占总排放量的73.89%、80.74%,所不同的是玉米田土壤在覆雪期表现为 N_2O 的净吸收,对总排放量的贡献为-13.84%(图4)。

就非生长季净温室效应来看,水稻田的全球增温潜势达到 $1405.08 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于玉米田 ($941.01 \text{ kg CO}_2 \cdot \text{hm}^{-2}$)。可见,非生长季水田与旱田相比具有较高的温室气体排放潜力(图5)。

3 讨论

3.1 冻融环境下土壤 CO_2 排放

土壤 CO_2 释放主要与土壤呼吸有关,而非生长季

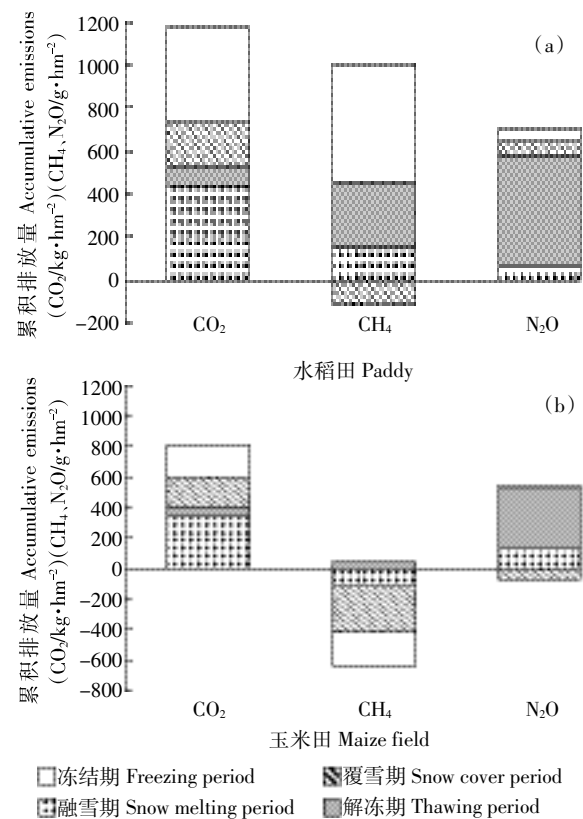


图4 非生长季土壤温室气体累积释放量

Figure 4 Cumulative emissions of greenhouse gases during non-growing season

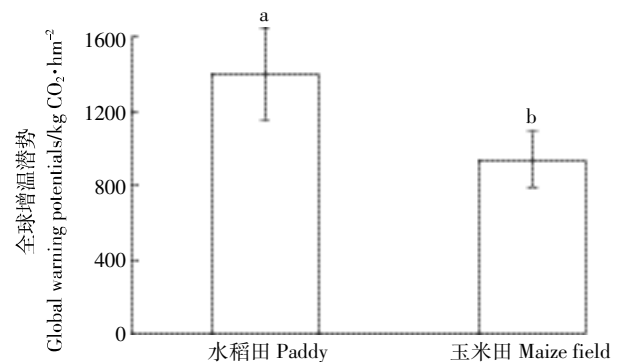


图5 非生长季水稻田和玉米田净温室效应

Figure 5 Net greenhouse effect of paddy and corn fields during non-growing season

不存在植物根系呼吸,土壤冻结也使土壤动物的活动受限,故土壤微生物呼吸是非生长季土壤CO₂产生的主要来源。从稻田和玉米田非生长季土壤CO₂通量变化可以看出,随着气温的降低,CO₂排放速率逐渐下降并在深冬覆雪期维持在较低的排放水平,而当气温回暖积雪开始融化后呼吸强度上升,同时在融雪期内出现短暂的排放峰。可见土壤冻结前和积雪融化后温度上升、土壤含水量提高时微生物呼吸代谢增强,是非生长季土壤CO₂排放的主要时期。大量的野外原位监测同样表明土壤呼吸强度同土壤温度、土壤湿度显著正相关^[19]。融雪期CO₂释放出现短暂排放峰,这一现象在北极苔原、北方针叶林、北方落叶阔叶林、高寒草地等季节性冻融特征明显的生态系统中同样被发现^[20-21]。目前普遍认为融雪和解冻过程中土壤频繁的冻融交替作用是导致该时期气体排放出现释放峰的主要因素。冻融交替会打破土壤原有团聚体内部结构,暴露出更多活性有机碳,增加呼吸作用所需碳源^[7];同时土壤中冰晶的形成会杀死部分微生物,其死亡后裂解释放出大量可供存活微生物利用的呼吸底物(如糖、氨基酸),从而刺激呼吸作用^[22]。尽管在融雪过程中存在CO₂释放峰,但有天然植被覆盖的土壤中并未发现冻融交替使CO₂累积排放量增加的现象^[23]。有研究根据野外农田观测结果估算了冻融期的CO₂排放量,发现仅占其全年排放量的5%左右^[20];农田土壤室内培养试验也表明随着冻融循环次数的增加(三次以上),CO₂排放速率不再增加并趋于稳定^[15]。可见冻融交替对土壤CO₂排放的影响有限。而稻田非生长季CO₂排放量高于玉米田,可能主要是由于前者土壤有机质含量更高(表1),微生物碳源较玉米田更丰富。

3.2 冻融环境下土壤CH₄排放

大气CH₄主要来源于土壤微生物活动,由产甲烷菌在严格厌氧环境中氧化有机物的过程中产生。稻田属于湿地的一种,在淹水条件下是陆地生态系统中大气CH₄的热点排放源。一般热带、亚热带地区稻田休闲期很短甚至常年淹水,但我国东北稻作区属于高纬度地区,气候寒冷,农田休闲期长,长期处于落干状态,因此该地区非生长季CH₄排放是一个长期被忽略的部分。但本研究却发现在积雪覆盖前土壤仍存在CH₄释放峰,且具有较大的波动。这可能与稻田落干后土壤中仍然存活的产甲烷菌活动有关。在土壤上冻过程中冻融交替会影响土壤通气状况和氧化还原条件,当土壤冻结时形成的厌氧环境有利于产CH₄菌活动,而当土壤融化后会释放出这部分CH₄。在西伯利

亚的泥炭沼泽中同样发现深秋土壤上冻时期CH₄排放量明显增大^[24]。也有研究通过高频率自动通量呼吸室监测发现,高纬度沼泽地中在生长季结束后(9月下旬),CH₄排放量下降到稳定的低值,但是在土壤和根区冻结深度不断增加(9月下旬至10月底)过程中,可以观测到CH₄排放量有持续几个星期的大幅度增长,这一时期的排放速率比夏季大很多,且排放总量相当于夏季排放量的总和^[8]。这与本研究稻田CH₄通量动态变化类似,在2014年10月中旬至10月下旬CH₄排放量下降,而11月初至11月底近一个月时间内CH₄的排放速率有所增加。Mastepanov等^[8]指出这些现象发生在土壤的活跃层逐渐结冻时期,可能是积累在这些土层孔隙中的甲烷在土壤结冻过程中被挤压出来所致。覆雪期稻田土壤甲烷呈现弱吸收,则是由于冰冻层和积雪阻隔了土壤同大气间的气体交换,且积雪疏松的结构和较大的比表面积有利于吸附部分CH₄。漫长的冬季土壤冻结期为产甲烷菌创造了厌氧环境,有利于甲烷产生,因此当积雪融化、土壤解冻时,被禁锢在土体中的CH₄得以释放。同时由于冻结层的存在,融化的雪水无法下渗,导致表层土壤处于雪水浸泡之下,形成了高度厌氧环境,使融雪过程土壤CH₄产量增加,排放量增多。这可能也是造成玉米田在积雪融化过程中出现CH₄弱的排放峰的重要原因。冻结期和融雪过程是非生长季稻田CH₄排放的主要时期,占总排放的95.69%。在其他生态系统中也发现在土壤融化过程中的CH₄释放量在全年占有重要比重,如东北三江平原地区沼泽湿地冻融交替时期(4月至6月)CH₄释放量占全年排放量的23.5%~36.9%^[10];青藏高原高寒沼泽湿地连续监测中发现解冻期CH₄存在排放峰,且非生长季的排放量占到全年43.2%~46.1%。这表明以往可能低估了CH₄非生长季排放对全年的贡献^[25]。非生长季玉米田土壤CH₄通量不同于水稻田,大部分时间表现为净吸收,是大气CH₄的汇。土壤CH₄吸收的现象在草地、森林、荒漠等类型的生态系统中同样存在^[26],是由于在透气良好的土壤中甲烷氧化菌会消耗大气中的CH₄,因此通气较好土壤也是陆地生态系统中重要的CH₄汇^[27]。

3.3 冻融环境下土壤N₂O排放

本研究发现在非生长季短暂的融雪过程N₂O排放量急剧增加,排放速率可达其他时期的40~100倍,融雪期累积排放量占到了非生长季总排放量的70%以上。类似的研究结果在中高纬度的农田、高寒草甸、针叶林、落叶林等生态系统中同样存在,仅春季融雪

和解冻的过程中 N_2O 的排放量就占到全年排放量的 50% 以上^[21, 23, 28-29]。 N_2O 主要来源于土壤硝化作用和反硝化作用,前者发生在厌氧环境下,后者发生在好氧环境下。而在融雪和土壤开始解冻的初期土壤水分频繁的发生“固相-液相”交替,当冰晶融化后在土壤内部形成大量“有氧”、“无氧”或者介于二者之间的具有独特氧化还原条件的微域,这种特殊的氧化还原条件有利于硝化作用和反硝化作用同时进行^[12]。尽管硝化和反硝化过程对 N_2O 产生的贡献难以量化,但有研究表明冻融交替过程中反硝化作用是导致 N_2O 释放量增加的主要过程^[6]。另外,冻融交替造成的团聚体破碎、细根断裂、微生物死亡等会增加土壤有效氮含量,刺激微生物反硝化作用。还有研究表明,漫长的冬季中土壤冻结期内温带草原^[30]和亚高山森林^[31]土壤氮矿化量特别是 NO_3^- 净积累量增加,因此冻结土壤硝酸盐的累积无疑会促进土壤解冻后反硝化微生物的活动。同时该地区长期较高的氮肥施用量(稻田 $60 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$,玉米田 $80 \text{ kg} \cdot 667 \text{ m}^{-2}$)造成土体硝酸盐累积,这为反硝化作用提供大量底物。土壤冻融模拟试验表明冻融过程中 N_2O 释放与循环次数、冻结温度、土壤水分有关,随着冻融循环次数的增加 N_2O 增量逐渐减少^[32],极端温度(-13°C)冻结处理后,冻融交替过程中 N_2O 的排放大于温和的冻结处理(-3°C)^[11],融雪期土壤 N_2O 排放主要来源于表层湿润土壤^[33]。而积雪融化后,裸露的农田土壤易于吸收热量,冻结温度随之上升,且干燥的气候会加速雪水蒸发,土壤趋于干旱,通气性增强,因此经过短期的融雪期后稻田和玉米田 N_2O 排放迅速回归正常。稻田 N_2O 累计排放量以及融雪期的排放速率高于玉米田,主要是与稻田较高的有机质、速效氮含量有关。此外,还监测到玉米田土壤在冻结期、覆雪期和土壤完全解冻后 N_2O 存在吸收的现象。Chapuis-Lardy 等^[34]明确指出,当土壤 N_2O 还原量超过 N_2O 产生量时土壤 N_2O 表现为负排放;Goldberg 等^[35]认为,在土壤较为干旱或有氧条件下也会发生 N_2O 负排放;Wu 等^[36]发现当土壤氮素含量较低时,反硝化细菌可以利用 N_2O 代替 NO_3^- 作为电子受体,将更多 N_2O 还原为 N_2 ,这会增加土壤对 N_2O 的消耗,甚至出现净吸收。非生长季旱田土壤干燥、通气,且物质分解缓慢,土壤有效氮素相对贫乏,与 Wu 等提出的低氮环境下 N_2O 吸收机制相吻合,同时积雪覆盖和冰冻层的隔绝阻碍了土壤中 N_2O 向大气的扩散,且其性质不稳定,在反硝化作用下最终被还原为 N_2 ,因此 N_2O 不会在土壤中长时间累积。这

不同于 CH_4 和 CO_2 ,不存在 N_2O 禁锢释放。总之,积雪融化和土壤解冻初期 N_2O 的剧烈排放同该时期频繁的冻融交替、有效氮含量较高、硝化/反硝化微生物活跃有关。关于冻融环境中 N_2O 释放的具体机制目前仍不清楚,还需要应用微生物学方法进行深入研究。

4 结论

东北季节性冻融农田在非生长季,土壤仍是大气温室气体重要排放源。 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 三种温室气体的排放具有明显的季节动态,尽管冻结期、融雪期、解冻期在非生长季中持续的时间短,但却是温室气体排放的关键时期,因而在这三个时期应重点监测。覆雪期土壤 CH_4 和 N_2O 存在负排放,冬季土壤是大气 CH_4 和 N_2O 的弱汇。短暂融雪期内土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 均存在释放峰,且 N_2O 脉冲式释放特征突出,占整个非生长季 N_2O 释放的 70% 以上。土地利用方式的差异使水稻田土壤温室气体排放高于玉米田,因而非生长季水田比旱田具有更高的温室气体排放潜力。总之,在计算以及评估季节性冻土区温室气体排放时需要考虑不同土地利用方式下土壤冻融和积雪融化过程中的温室气体排放。

参考文献:

- [1] Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Distribution of seasonally and perennially frozen ground in the Northern Hemisphere[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Permafrost. AA Balkema Publishers, 2003, 2:1289-1294.
- [2] Schuur E, McGuire A, Schädel C, et al. Climate change and the permafrost carbon feedback[J]. *Nature*, 2015, 520(7546): 171-179.
- [3] Hollesen J, Matthiesen H, Møller A B, et al. Permafrost thawing in organic Arctic soils accelerated by ground heat production[J]. *Nature Climate Change*, 2015, 5:574-578.
- [4] Köhler P, Knorr G, Bard E. Permafrost thawing as a possible source of abrupt carbon release at the onset of the Bølling/Allerød[J]. *Nature Communications*, 2014, 5:5520.
- [5] Mccalley C K, Woodcroft B J, Hodgkins S B, et al. Methane dynamics regulated by microbial community response to permafrost thaw[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 478-481.
- [6] Del Grosso S J. Climate change: Grazing and nitrous oxide[J]. *Nature*, 2010, 464(7290): 843-844.
- [7] Matzner E, Borken W. Do freeze-thaw events enhance C and N losses from soils of different ecosystems? A review[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(2): 274-284.
- [8] Mastepanov M, Sigsgaard C, Dlugokencky E J, et al. Large tundra methane burst during onset of freezing[J]. *Nature*, 2008, 456(7222): 628-630.
- [9] 朴河春, 刘广深, 洪业汤. 全球冻融地区土壤是重要的 N_2O 释放源的综合分析[J]. *地球科学进展*, 1995, 10(3): 283-295.
- [10] PIAO He-chun, LIU Guang-shen, HONG Ye-tang. Soils in global

- freezing-thawing areas as the major N₂O releasing source[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1995, 10(3):283-295.
- [10] Song C, Wang Y, Wang Y, et al. Emission of CO₂, CH₄ and N₂O from freshwater marsh during freeze-thaw period in Northeast of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(35):6879-6885.
- [11] Nielsen C B, Groffman P M, Hamburg S P, et al. Freezing effects on carbon and nitrogen cycling in northern hardwood forest soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65(6):1723-1730.
- [12] 陈哲, 杨世琦, 张晴雯, 等. 冻融对土壤氮素损失及有效性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(4). doi:10.5846/stxb201406061171.
CHEN Zhe, YANG Shi-qi, ZHANG Qing-wen, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil nitrogen loss and availability[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(4). doi:10.5846/stxb201406061171.
- [13] 孙辉, 秦纪洪, 吴杨. 土壤冻融交替生态效应研究进展[J]. 土壤, 2008, 40(4):505-509.
SUN Hui, QIN Ji-hong, WU Yang. Freeze-thaw cycles and their impacts on ecological process: A review[J]. *Soils*, 2008, 40(4):505-509.
- [14] 蔡延江, 王小丹, 丁维新, 等. 冻融对土壤氮素转化和 N₂O 排放的影响研究进展[J]. 土壤学报, 2013, 50(5):1032-1042.
CAI Yan-jiang, WANG Xiao-dan, DING Wei-xin, et al. Effects of freeze-thaw on soil nitrogen transformation and N₂O emission: A review[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5):1032-1042.
- [15] 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[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(15):2083-2091.
- [16] Ludwig B, Wolf I, Teepe R. Contribution of nitrification and denitrification to the emission of N₂O in a freeze-thaw event in an agricultural soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2004, 167(6):678-684.
- [17] 张久明, 迟凤琴, 杨思平, 等. 哈尔滨市黑土养分空间异质性分析——以方正县德善村为例[J]. 土壤通报, 2009, 40(3):533-537.
ZHANG Jiu-ming, CHI Feng-qin, YANG Si-ping, et al. The spatial variability of nutrient contents in black soil region of harbin: In Deshan village of Fangzheng County[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2009, 40(3):533-537.
- [18] 陈哲, 陈媛媛, 高霁, 等. 不同施肥措施对黄河上游灌区油菜田土壤 N₂O 排放的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1):129-139.
CHEN Zhe, CHEN Yuan-yuan, GAO Ji, et al. Effects of different fertilization measures on N₂O emission in oil sunflower field in irrigation area of upper Yellow River[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(1):129-139.
- [19] 崔骁勇, 陈佐忠, 陈四清. 草地土壤呼吸研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(2):315-325.
CUI Xiao-yong, CHEN Zuo-zhong, CHEN Si-qing. Progress in research on soil respiration of grasslands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2):315-325.
- [20] Dörsch P, Palojarvi A, Mommertz S. Overwinter greenhouse gas fluxes in two contrasting agricultural habitats[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 70(2):117-133.
- [21] 王广帅, 杨晓霞, 任飞, 等. 青藏高原高寒草甸非生长季温室气体排放特征及其年度贡献[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8):1994-2001.
WANG Guang-shuai, YANG Xiao-xia, REN Fei, et al. Non-growth season's greenhouse gases emission and its yearly contribution from alpine meadow on Tibetan Plateau of China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8):1994-2001.
- [22] Larsen K S, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 21(3):187-195.
- [23] Groffman P M, Hardy J P, Driscoll C T, et al. Snow depth, soil freezing, and fluxes of carbon dioxide, nitrous oxide and methane in a northern hardwood forest[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(9):1748-1760.
- [24] Panikov N S, Dedysh S. Cold season CH₄ and CO₂ emission from boreal peat bogs (West Siberia): Winter fluxes and thaw activation dynamics[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(4):1071-1080.
- [25] Song W M, Wang H, Wang G S, et al. Methane emissions from an alpine wetland on the Tibetan Plateau: Neglected but vital contribution of the nongrowing season[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(8):1475-1490.
- [26] 李玉娥, 林而达. 土壤甲烷吸收汇研究进展[J]. 地球科学进展, 1999, 14(6):613-618.
LI Yu-e, LIN Er-da. Progress in study on methane uptake by aerobic soil[J]. *Advance in Earth Sciences*, 1999, 14(6):613-618.
- [27] Duenas C, Fernandez M, Carretero J, et al. Methane uptake in soils of Southern Spain estimated by two different techniques: Static chamber and 222 Radon flux and soil air concentration profiles[J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(4):545-552.
- [28] Regina K, Syväsalö E, Hannukkala A, et al. Fluxes of N₂O from farmed peat soils in Finland[J]. *European Journal of Soil Science*, 2004, 55(3):591-599.
- [29] Papen H, Butterbach-Bahl K. A 3-year continuous record of nitrogen trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany: 1. N₂O emissions[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 1999, 104(D15):18487-18503.
- [30] Zhang X, Bai W, Gilliam F S, et al. Effects of *in situ* freezing on soil net nitrogen mineralization and net nitrification in fertilized grassland of northern China[J]. *Grass and Forage Science*, 2011, 66(3):391-401.
- [31] 殷睿, 徐振锋, 吴福忠, 等. 雪被斑块对川西亚高山两个森林群落冬季土壤氮转化的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(8):2061-2067.
YIN Rui, XU Zhen-feng, WU Fu-zhong, et al. Effects of snow pack on wintertime soil nitrogen transformation in two subalpine forests of western Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(8):2061-2067.
- [32] Koponen H T, Flöjt L, Martikainen P J. Nitrous oxide emissions from agricultural soils at low temperatures: A laboratory microcosm study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(5):757-766.
- [33] Wagner-Riddle C, Hu Q, Van Bochove E, et al. Linking nitrous oxide flux during spring thaw to nitrate denitrification in the soil profile[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4):908-916.
- [34] Chapuis-Lardy L, Wragge N, Metay A, et al. Soils, a sink for N₂O? A review[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(1):1-17.
- [35] Goldberg S D, Gebauer G. N₂O and NO fluxes between a Norway spruce forest soil and atmosphere as affected by prolonged summer drought[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(9):1986-1995.
- [36] Wu D, Dong W, Oenema O, et al. N₂O consumption by low-nitrogen soil and its regulation by water and oxygen[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 60:165-172.