

4 种温带森林非生长季土壤二氧化碳、 甲烷和氧化亚氮通量

刘 实, 王传宽*, 许 飞

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要:中高纬度森林土壤在漫长的非生长季中对重要温室气体——二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)的释放或吸收在碳氮年收支中作用很大,但目前研究甚少。采用静态暗箱-气相色谱法,比较研究东北东部4种典型温带森林土壤表面CO₂、CH₄和N₂O通量在非生长季中的时间动态及其影响因子。结果表明:4种森林土壤在非生长季中整体上均表现为CO₂源、N₂O源和CH₄汇的功能。红松林、落叶松林、蒙古栎林、硬阔叶林的非生长季平均土壤表面CO₂通量分别为(65.5±8.1) mg m⁻² h⁻¹(平均值±标准差)、(70.5±10.2) mg m⁻² h⁻¹、(77.1±8.0) mg m⁻² h⁻¹、(80.5±23.5) mg m⁻² h⁻¹;CH₄通量分别为(-17.2±4.6) μg m⁻² h⁻¹、(-15.4±4.2) μg m⁻² h⁻¹、(-31.5±4.5) μg m⁻² h⁻¹、(-23.6±4.1) μg m⁻² h⁻¹;N₂O通量分别为(19.3±5.1) μg m⁻² h⁻¹、(11.5±2.5) μg m⁻² h⁻¹、(16.4±4.0) μg m⁻² h⁻¹、(14.4±5.4) μg m⁻² h⁻¹;其中非生长季土壤表面CO₂总排放量分别为143.4 g m⁻²、162.8 g m⁻²、189.9 g m⁻²、252.7 g m⁻²,分别占其年通量的7.3%、10.6%、8.4%和8.5%。所有林型非生长季土壤表面CO₂通量在春季土壤解冻前均维持在较低水平;在解冻进程中随温度升高而增大。土壤表面CO₂通量与5cm深土壤温度(T₅)呈极显著的指数函数关系。在隆冬时节出现CH₄净释放现象,但释放强度及其出现时间因林型而异,其中以红松林的释放强度较大,高达43.6 μg m⁻² h⁻¹。土壤表面CH₄通量与T₅呈显著的负相关。土壤表面N₂O通量的时间动态格局在林型间的分异较大,但在春季土壤解冻阶段均释放出N₂O,而释放峰值和出现时间因林型而异。土壤表面N₂O通量与0—10cm深土壤含水量呈显著的正相关(红松林除外)。研究展示了不同温带森林类型的土壤水热条件对其非生长季土壤CO₂、CH₄和N₂O通量的重要影响,但这3种温室气体的林型间分异的生物学机理尚需进一步研究。

关键词:非生长季;冬季;冻融循环;土壤解冻;温室气体

Soil effluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide during non-growing season for four temperate forests in northeastern China

LIU Shi, WANG Chuankuan*, XU Fei

College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: The forests in mid- and high-latitudes experience a long non-growing season, during which the forest soil emission or consumption of greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) plays an important role in ecosystem carbon and nitrogen budgets. However, fluxes of these trace gases in non-growing seasons have been scarcely quantified in the temperate forests in northeastern China. In this study, we investigated temporal dynamics of soil CO₂, CH₄ and N₂O effluxes and their controlling factors for four representative temperate forests in this region with a static closed chamber and gas chromatograph technique. These forests were Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation, Dahurian larch (*Larix gmelinii*) plantation, Mongolian oak (*Quercus mongolica*) forest, and hardwood forest (dominated by *Fraxinus mandshurica*, *Juglans mandshurica*, and *Phellodendron amurense*). Six static chambers (40 cm × 50 cm × 50 cm) were randomly installed in each forest type. From early November of 2008 to May of 2009, gas samples were collected and analyzed every 1—2 weeks, 16 times in total. The results showed that all forest soils were overall

基金项目:国家自然科学基金(30625010);林业公益性行业科研专项(200804001);“十一五”科技支撑项目(2006BAD03A0703);国家林业局重点项目(2006-77)

收稿日期:2010-02-02; **修订日期:**2010-05-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangck-cf@nefu.edu.cn

atmospheric CO₂ source, N₂O source, and CH₄ sink during the non-growing season. The mean values of soil CO₂ efflux in the non-growing season were (65.5 ± 8.1) mg m⁻² h⁻¹ (mean ± standard deviation), (70.5 ± 10.2) mg m⁻² h⁻¹, (77.1 ± 8.0) mg m⁻² h⁻¹, and (80.5 ± 23.5) mg m⁻² h⁻¹ for the pine plantation, larch plantation, oak forest, and hardwood forest, respectively; those of soil CH₄ efflux were (-17.2 ± 4.6) μg m⁻² h⁻¹ (negative values represent sink), (-15.4 ± 4.2) μg m⁻² h⁻¹, (-31.5 ± 4.5) μg m⁻² h⁻¹, and (-23.6 ± 4.1) μg m⁻² h⁻¹, respectively; and those of N₂O efflux were (19.3 ± 5.1) μg m⁻² h⁻¹, (11.5 ± 2.5) μg m⁻² h⁻¹, (16.4 ± 4.0) μg m⁻² h⁻¹, and (14.4 ± 5.4) μg m⁻² h⁻¹, respectively; the estimated accumulative CO₂ emission during the non-growing season were 143.4 gm⁻², 162.8 gm⁻², 189.9 gm⁻², and 252.7 gm⁻², respectively, which accounted for 7.3%, 10.6%, 8.4%, and 8.5% of annual soil CO₂ efflux, respectively. The soil CO₂ efflux remained fairly low until the spring soil thawing started when it increased with soil temperature increasing. There was a significant exponential relationship between soil CO₂ efflux and soil temperature ($P < 0.001$). There was a net CH₄ source occurring in the mid-winter for all forests, but the source strength, occurring time and duration changed with forest types. The largest mid-winter CH₄ source was observed in the pine plantation (43.6 μg m⁻² h⁻¹). The soil CH₄ efflux was negatively correlated with soil temperature ($P < 0.001$). The temporal variability of soil N₂O efflux among the forest types was greater than those of soil CO₂ and CH₄ effluxes. All forest soils emitted N₂O during the spring soil thawing period, but the maximum efflux and its occurring time varied with forest types. The soil N₂O efflux was positively correlated with soil water content between 0 and 10 cm depths for all forests except for the pine plantation ($P < 0.01$). This study illustrated the significant influences of soil temperature and water content on the variability of soil CO₂, CH₄ and N₂O effluxes in non-growing seasons among the temperate forests, and also highlighted the necessity of further studies on potential biological mechanisms contributed to these variations.

Key Words: non-growing season; winter; freezing-thawing circle; soil thawing; greenhouse gas

在所有的温室气体中,二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)对强化温室效应(Enhanced greenhouse effect)的贡献量分别占第1、2和4位^[1],而且它们与陆地生态系统碳氮循环密切相关。因此,研究这3种温室气体的排放规律引起了全球变化科学界的高度重视。然而,以往对CO₂、CH₄和N₂O通量的研究多集中在生长季内,而对非生长季的测定及其调控机制研究非常少,且测定结果存在很大的不确定性。例如:Burton等^[2]认为冻融期较高的土壤N₂O释放量是源于下层未冻结的土壤产生的N₂O在上层土壤解冻后的物理释放;Christensen等^[3]则认为是解冻期间土壤微生物反硝化作用的结果;而Teep等^[4]认为是物理释放和微生物释放综合作用的结果。对于冬季森林土壤CH₄通量的有无、低温作用下CH₄负通量的产生等问题的研究结果也不一致^[5-7]。地处中高纬度地区的我国东北林区,低温致使森林土壤的温室气体通量较低,但漫长的非生长季温室气体的累积释放量在年通量中仍然占有很大的比例^[8],其中N₂O甚至高达50%以上^[9]。冬季积雪对CO₂、CH₄和N₂O的通量变化的强烈影响^[5,10],甚至可以延续到生长季^[11-12]。另外,非生长季包含土壤冻融交替和冬季土壤冻结两个重要时期^[13-14],影响着土壤理化性质、有机质的分解、养分有效性及动态、微生物动态等生态系统过程^[14-18],因而直接关系土壤表面CO₂、CH₄和N₂O通量的动态。但是以往有关土壤冻融交替效应的研究多为在室内培养或人为控制条件下进行的模拟实验^[19],其结果不一定适于野外自然条件^[20-21]。因此,研究东北森林在自然条件下非生长季的CO₂、CH₄和N₂O通量及其控制机制尤显重要。

本研究以东北东部地区4种典型森林——红松(*Pinus koraiensis*)人工林、落叶松(*Larix gmelinii*)人工林、蒙古栎(*Quercus mongolica*)林、硬阔叶林为研究对象,采用静态箱-气相色谱法测定非生长季期间其土壤表面CO₂、CH₄和N₂O通量的释放规律,以揭示非生长季期间温带森林中这3种温室气体释放的控制因子,为本地区森林温室气体的年通量估测奠定基础。

1 研究方法

1.1 研究地概况

研究地设在黑龙江帽儿山森林生态站 (45°24'N, 127°40'E), 平均海拔 400m, 平均坡度 15°, 地带性土壤为暗棕色森林土。该地区气候属于大陆性季风气候, 年降水量约 770mm, 年蒸发量约 880mm, 年平均气温 2.8℃, 无霜期 120—140d。该地区的植被属于长白植被区系。现有植被是原地带性植被—阔叶红松林屡遭人为干扰后演替成的天然次生林和人工林, 代表着东北东部山区典型的森林林型。本研究选取该地区方圆 2km 内立地条件和植被组成不同的 4 种典型森林类型, 分别为: 山坡下部的红松人工林和落叶松人工林、分布在山脊地带的蒙古栎林、沟谷地带的硬阔叶林, 其植被组成、立地条件详见杨金艳等^[22], 其土壤理化性质详见刘爽等^[23]。

1.2 土壤表面温室气体通量及其相关环境因子测定

土壤表面温室气体通量采用静态箱-气相色谱法测定。2008 年秋季, 在每个林型内随机设置 6 个不锈钢静态箱。静态箱体积为 40cm × 50cm × 50cm, 箱侧面安装数字式温度计和直流电风扇, 顶面安装采气阀。在 2008 年冬季土壤结冻和 2009 年春季土壤解冻期(保留积雪), 每星期取样测定 1 次; 其它非生长季约两星期测定 1 次, 在 2008 年 11 月 7 日至 2009 年 5 月 3 日期间, 共取样测定 16 次。取样时, 先将顶箱置于底座上密封; 然后每隔 10min (即: 0、10、20min 和 30min) 用注射针管从箱中抽取 50mL 气体, 注入气体采集袋(大连海德科技有限公司), 在低温下保存, 并在 1 星期内完成室内测定。

气体样品中的 CO₂ 和 CH₄ 浓度采用安捷伦 7890A 型气相色谱仪(7890A GC System, USA)测定。气相色谱的柱温 55℃; FID 检测器工作温度 250℃; 载气为高纯 N₂; CO₂ 分析完成时间 1.6min, CH₄ 分析完成时间 1.8min。样品中的 N₂O 浓度采用岛津 2010 型气相色谱仪 (SH IMAD2ZU, Japan) 测定。气相色谱的柱温 70℃; ECD 检测器工作温度 300℃; 载气为 95% 氩甲烷, 分析完成时间 6min。

土壤表面温室气体 (CO₂、CH₄、N₂O) 通量采用如下公式计算:

$$F = \rho \frac{V}{A} \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \frac{dC_t}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为单位时间单位面积静态箱内某一温室气体的质量变化; ρ 为标准状态下被测气体的密度; V 为箱内气体体积; A 为箱子覆盖的面积; P 为采样点的大气压; T 为采样时的绝对温度; dC_t/dt 为采样时气体浓度随时间变化的直线斜率; P_0 和 T_0 分别为标准状态下的标准大气压和绝对温度。

在每次采集气样的同时, 用土钻在静态箱附近林地取 0—10cm 的混合土样, 采用烘干称量法测定土壤质量含水量 (W_{10}); 用 JM624 型便携式数字温度计测定箱温和 5cm 深土壤温度 (T_5)。

1.3 数据处理

采用 SPSS 14.0 统计软件包完成数据统计分析。采用单因素方差分析和 Duncan 多重比较各林型间土壤表面温室气体通量的差异。采用指数函数回归建立土壤表面 CO₂ 通量与 T_5 之间的关系; 用线性回归建立土壤表面 CH₄、N₂O 通量与 T_5 、 W_{10} 之间的关系。利用林地附近自动气象站连续监测数据、土壤表面 CO₂、CH₄ 通量和温度之间的关系, 估算整个非生长季各林型的 CO₂ 累积释放量和 CH₄ 总吸收量。

2 结果

2.1 土壤表面 CO₂、CH₄、N₂O 通量及土壤温度和含水量的时间动态

整个测定时期可以分为 3 个阶段(图 1): 晚秋初冬土壤上冻阶段(2008 年 11 月)、冬季土壤持续冻结阶段(2008 年 12—2009 年 2 月)和春季土壤冻融阶段(2009 年 3 月至 5 月)。其中第 3 阶段又可以分为冻融交替期(3 月 29—4 月 19 日, 此期昼融夜冻)和完全解冻期(4 月下旬以后)。除了土壤上冻阶段林型间的 T_5 差异比较大之外, 4 种林型 T_5 在非生长季中的变化基本一致, 呈现出入冬下降开春上升的趋势(图 1a)。4 种林型的 W_{10} 在土壤冻融阶段开始前都较低, 除了硬阔叶林之外均维持在 40% 以下(图 1b)。2008 年 12 月 1 日气温异常, 达到 0℃ 以上, 并伴有降水事件, 因此测得的 W_{10} 异常。在春季冻融阶段, 冻融交替期 W_{10} 增大; 完全

解冻期 W_{10} 则随 T_5 的增大而降低。整个非生长季中,处于沟谷地带的硬阔叶林的 W_{10} 始终显著地高于其它 3 个林型。在 2008 年 11 月 15 日的测定中,各林型地表开始出现雪被(3—5cm),非生长季中最大雪被厚度出现在硬阔叶林(2009 年 2 月 16 日,27cm),其它 3 林型最大雪被厚度在 17—21cm 之间。蒙古栎林雪被消失时间较早(2009 年 3 月 9 日),而其它 3 林型的雪被在 3 月 29 日的测定中消失。

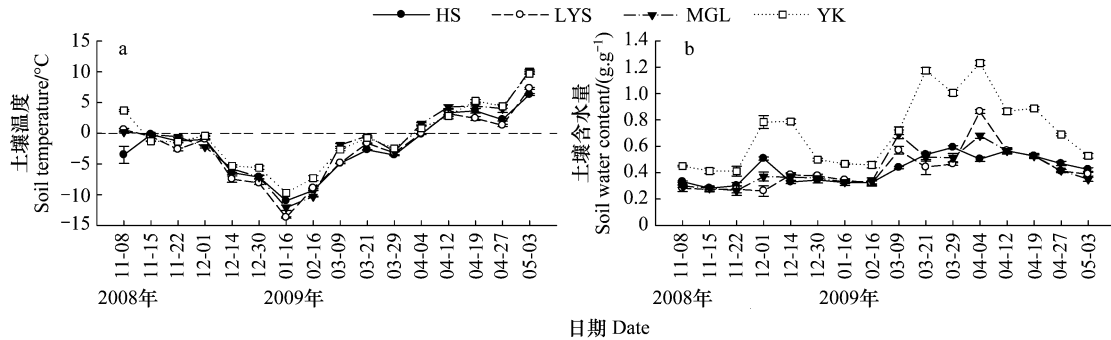


图 1 4 种林型非生长季 5cm 深土壤温度和 0—10cm 平均土壤含水量的变化

Fig. 1 Changes in soil temperature at 5 cm depth and mean soil water content between 0 and 10 cm depths for the four forests during the non-growing season

HS、LYS、MGL 和 YK 依次代表红松人工林、落叶松人工林、蒙古栎林和硬阔叶林

4 种林型土壤表面 CO_2 通量的时间动态基本一致(图 2a)。从 2008 年 11 月至 2009 年 3 月 29 日(土壤解冻前),土壤表面 CO_2 通量一致维持在很低水平($< 80 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$),最低值出现在 1 月 16 日(T_5 也出现最低值)。随着土壤解冻进程和 T_5 的升高,土壤 CO_2 通量随之增加,并在 4 月 12 日出现一个 CO_2 排放峰值(除硬阔叶林外),而硬阔叶林的土壤表面 CO_2 通量则呈现持续上升的趋势。

总体上看,非生长季期间各林型土壤对 CH_4 起着汇的作用, CH_4 汇的强度呈现一个单峰曲线(图 2b)。自土壤上冻之后,4 种林型土壤 CH_4 汇强度均随 T_5 的降低而减弱;在隆冬时节成为 CH_4 源(即 CH_4 净释放);之后又由 CH_4 源转换为汇,且汇的强度随 T_5 的升高而增强。然而, CH_4 释放的峰值大小和出现时间却因林型而异。红松林和落叶松林土壤 CH_4 释放峰值出现在 3 月 9 日(分别为 $-43.6 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 和 $-32.5 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$);蒙古栎林土壤 CH_4 释放峰值出现在 2 月 6 日($-23.2 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$);而硬阔叶林土壤表面 CH_4 通量在 12 月至 3 月间则波动在 $-8 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 至 $+10 \mu\text{g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 之间。

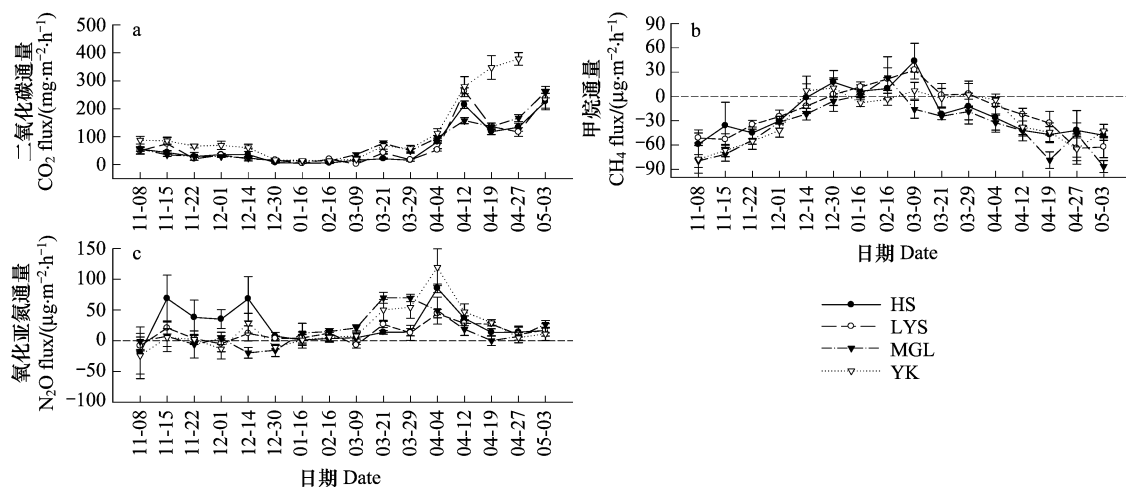


图 2 4 种林型非生长季土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量的变化

Fig. 2 Changes in soil CO_2 , CH_4 and N_2O fluxes for the four forests during the non-growing season

与 CO_2 和 CH_4 通量不同,非生长季土壤表面 N_2O 通量及其时间动态格局在林型间的分异较大(图 2c)。在晚秋初冬土壤上冻阶段,各林型土壤表面 N_2O 通量分异最大:红松林土壤表面 N_2O 基本上为正值,且释放通量显著高于其它林型;落叶松林土壤表面 N_2O 通量基本为正值,但林型内变异较大;而蒙古栎林和硬阔叶林土壤表面 N_2O 通量则在正负值之间波动,前者的波动幅度大于后者。在冬季土壤持续冻结阶段,4 种林型土壤均有较弱的 N_2O 释放。在春季土壤解冻阶段,4 种林型土壤均释放出 N_2O ,但释放峰值和出现时间因林型而异。其中蒙古栎林 N_2O 排放峰值出现最早(3 月 21 日),其它 3 种林型土壤 N_2O 释放峰值均出现在 4 月 4 日;释放峰值以硬阔叶林最高($119\mu\text{gm}^{-2}\text{h}^{-1}$),落叶松林最低($44\mu\text{gm}^{-2}\text{h}^{-1}$),前者比后者大 1.7 倍。

2.2 不同林型土壤表面 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量的比较

从整个非生长季来看,4 种林型的土壤均为大气 CO_2 和 N_2O 的源、 CH_4 的汇(表 1)。测定期间,林型间 T_5 差异不显著,波动在 $-3.3\text{--}-1.3^\circ\text{C}$ 之间;但硬阔叶林平均土壤含水量(0.64gg^{-1})显著地高于其它林型(平均值为 0.40gg^{-1})。硬阔叶林土壤表面 CO_2 通量显著大于其它林型。蒙古栎林土壤 CH_4 吸收能力最强($-31.5\mu\text{gm}^{-2}\text{h}^{-1}$),显著高于红松林和落叶松林。各林型土壤表面 N_2O 通量的大小顺序为:红松林 > 蒙古栎林 > 硬阔叶林 > 落叶松林,其中红松林土壤 N_2O 通量比落叶松林大近 1 倍。

表 1 4 种林型土壤表面 CO_2 通量、 CH_4 通量、 N_2O 通量、土壤温度和土壤含水量平均值多重比较

Table 1 Duncan's multiple-range test for the means of soil surface fluxes of CO_2 , CH_4 and N_2O , soil temperature at 5 cm depth, and mean soil water content between 0 and 10 cm depths for the four forests

林型 Forest type	二氧化碳通量 CO_2 flux / $(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	甲烷通量 CH_4 flux / $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	氧化亚氮通量 N_2O flux / $(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	土壤温度 Soil temperature / $^\circ\text{C}$	土壤含水量 Soil water content / $(\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$
红松人工林 <i>P. koraiensis</i> plantation	65.5 ± 8.1^B	-17.2 ± 4.6^B	19.3 ± 5.1^A	-3.1 ± 0.5^A	0.40 ± 0.01^B
落叶松人工林 <i>L. gmelinii</i> plantation	70.5 ± 10.2^B	-15.4 ± 4.2^B	11.5 ± 2.5^B	-3.3 ± 0.6^A	0.39 ± 0.02^B
蒙古栎林 <i>Q. mongolica</i> forest	77.1 ± 8.0^B	-31.5 ± 4.5^A	16.4 ± 4.0^{AB}	-2.2 ± 0.6^A	0.40 ± 0.01^B
硬阔叶林 Hardwood forest	80.5 ± 23.5^A	-23.6 ± 4.1^{AB}	14.4 ± 5.4^{AB}	-1.3 ± 0.5^A	0.64 ± 0.03^A

A、B 表示显著性差异组别($\alpha = 0.05$)

2.3 土壤表面 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量与土壤温度和含水量的关系

测定期间所有林型的土壤表面 CO_2 通量均与 T_5 呈极显著的指数函数关系,但与 W_{10} 关系不显著($P > 0.05$)。各林型土壤表面 CO_2 通量对温度的敏感性因林型而异(图 3)。硬阔叶林、红松林、落叶松林和蒙古栎林的土壤 CO_2 通量的温度系数(Q_{10})分别为 13.5、7.4、5.5 和 4.1。非生长季各林型土壤表面 CO_2 总排放量分别为:红松林 143.4gm^{-2} 、落叶松林 162.8gm^{-2} 、蒙古栎林 189.9gm^{-2} 、硬阔叶林 252.7gm^{-2} ,与这些林型 2004 年在生长季测得结果^[24]相比,非生长季各林型土壤表面 CO_2 总排放量分别占年通量的 7.3%、10.6%、8.4% 和 8.5%。

各林型土壤表面 CH_4 通量与 T_5 均呈极显著负相关关系($P < 0.001$),但与 W_{10} 关系不显著($P > 0.05$)(图 4)。非生长季各林型土壤表面 CH_4 总吸收量分别为:红松林 -11.37mg m^{-2} 、落叶松林 -6.16mg m^{-2} 、蒙古栎林 -76.14mg m^{-2} 、硬阔叶林 -48.2mg m^{-2} 。土壤表面 N_2O 通量与 T_5 之间关系不显著($P > 0.05$),但与 W_{10} 之间的关系却因林型而异(图 5)。除红松林之外,其它林型的土壤表面 N_2O 通量与 W_{10} 均呈显著正相关

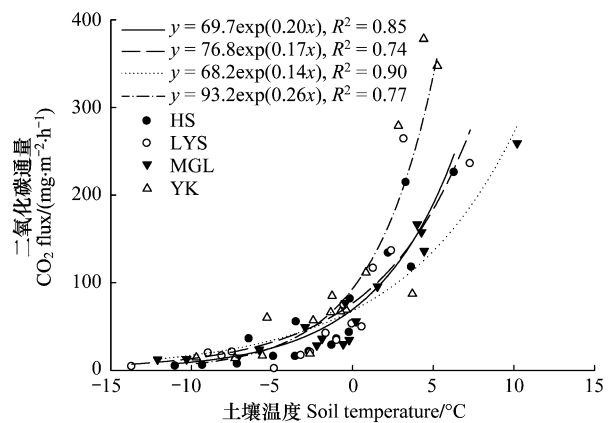


图 3 4 种林型土壤表面 CO_2 通量与 5cm 深土壤温度之间的关系
Fig.3 The relationships between soil surface CO_2 flux and soil temperature at 5cm depth for the four forests
所有的回归方程均极显著($P < 0.01$)

($P < 0.05$), 只是其斜率分异较大。

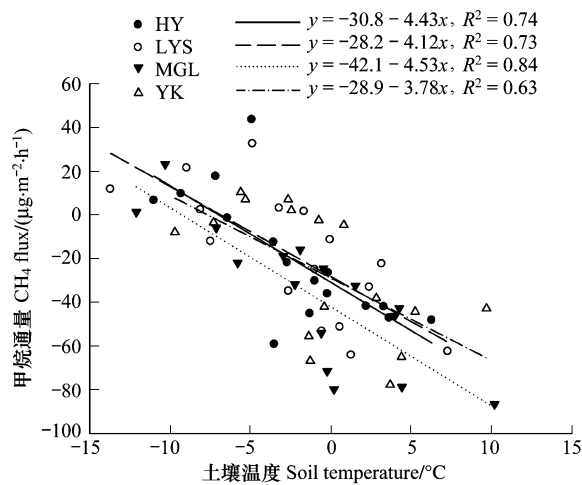


图4 4种林型土壤表面 CH_4 通量与5cm 深土壤温度之间的关系

Fig. 4 The relationship between soil surface CH_4 flux and soil temperature at 5cm for the four forests

所有的回归方程均极显著 ($P < 0.01$)

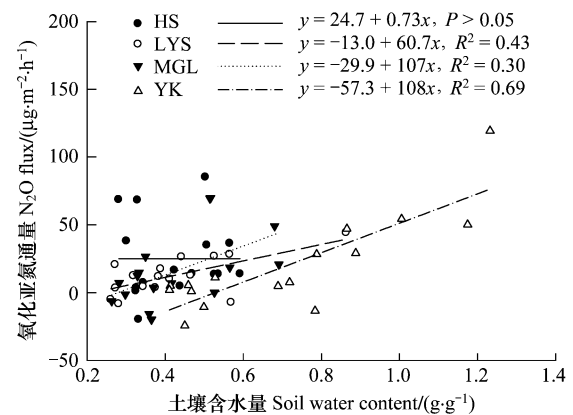


图5 4种林型土壤表面 N_2O 通量与土壤含水量之间的关系

Fig. 5 The relationship between soil surface N_2O flux and average soil water content from 0 to 10 cm for the four forests

除红松林之外所有的回归方程均显著 ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 非生长季土壤表面 CO_2 通量

本研究表明,非生长季森林土壤表面 CO_2 通量波动在 $143.4\text{--}252.7\text{ g m}^{-2}$, 占全年释放量的 $7.3\%\text{--}10.6\%$, 略低于以往对中纬度温带森林的研究结果(分别为 $227\text{--}483\text{ g m}^{-2}$ 之间, $10\%\text{--}17\%$)^[25-28]。引起两者差异的主要原因可能是土壤表面积雪厚度不同造成的。积雪在一定程度上阻断冬季低温对土壤的影响,甚至可使其免于冻结^[29]。以往研究结果表明:冬季去除积雪会增加植物细根和土壤微生物的死亡率,使非生长季土壤呼吸减弱^[30-31]。此外,冬季积雪还会为土壤微生物活动提供水分、并增加土壤氮素输入^[32]。本研究中,2008 年冬季降雪量较低,最大积雪厚度仅为 20cm 左右,使 12 月中旬至 3 月初各林型的 T_5 基本维持在 -5°C 以下,最低 T_5 近 -14°C (图 1);而在其它中纬度的雷同研究中,冬季积雪厚度可保持在 50cm 以上(最大积雪厚度超过 100cm),土壤温度可保持在 -5°C 以上^[25-28]。

本研究中不同林型土壤 CO_2 通量存在显著差异,硬阔叶林土壤表面 CO_2 通量明显高于其它 3 种林型。产生这种现象的可能原因包括两方面:(1)虽然林型间土壤温度差异不显著,但硬阔叶林平均土壤温度总体高于其它林型(表 1),且其 CO_2 通量对土壤温度变化的敏感性最高。(2)4 种林型中,硬阔叶林的土壤有机碳含量、全氮含量、微生物生物量碳氮等均最高^[23-24],而且生长季土壤表面 CO_2 通量与土壤有机碳含量之间存在显著的正相关关系。由此推测,硬阔叶林土壤微生物的底物和丰度在非生长季也可能较高。

以往许多土壤冻融交替实验研究发现,冻融作用一方面刺激土壤微生物的活动,另一方面解除对冬季产生的 CO_2 扩散的物理障碍,使得在土壤解冻过程中出现一个短暂的 CO_2 释放峰值^[33-35]。本研究中除硬阔叶林之外,其它林型均观测到 CO_2 释放峰值(图 2a)。造成这一现象的主要原因是由于 4 种林型的林分组成和所处的立地条件的差异使其春季土壤升温快慢(图 1)和微生物活性不一,导致林型间 CO_2 释放的时间动态格局不一;而本研究所采用的 7d 一次的采样频率未能捕捉到硬阔叶林的 CO_2 释放峰值。

3.2 非生长季土壤表面 CH_4 通量

对于非生长季森林土壤表面 CH_4 通量的研究不多,至今尚无一致的结论。Groffman 等发现美国北部硬木林土壤结冻后仅有短暂的 CH_4 释放现象^[5]。而 Castro 等却报道美国马萨诸塞州红松林土壤在冬季始终吸收

CH_4 [6]。Sullivan 等研究美国西南部黄松林地 CH_4 排放时未发现冬季 CH_4 通量 [7]。本研究中, 冬季森林土壤总体上吸收 CH_4 , 但其吸收强度随土壤温度降低而逐渐减弱, 并在一定低温时出现 CH_4 净释放, 只是释放的强度和持续时间因林型而异 (图 2b)。这一研究结果与以往的研究不同, 其中的生物学机理尚不清楚。推测其中的主要原因可能包括: 一是低温范围。土壤表面 CH_4 通量与土壤温度呈负相关, 而与土壤含水量相关不显著 (图 4)。Castro 等也发现, 当土壤温度在 $-5\sim 10^\circ\text{C}$ 时, 温度为控制森林土壤 CH_4 吸收的主导因子, 而当土壤温度在 10°C 以上时, 土壤含水量则成为主导因子 [6]。Steinkamp 等 [36] 也报道, 土壤温度在 $0\sim 10^\circ\text{C}$ 范围内时对 CH_4 通量影响显著, 而当土壤温度高于 10°C 时则对土壤 CH_4 通量影响减弱。需要指出的是, 上述研究的冬季土壤温度最低为 -5°C , 而在本研究中由于积雪厚度较薄而使 5cm 的土壤温度低至 -13.7°C (图 1a)。当土壤温度降至某一阈值时可能会诱发森林土壤 CH_4 释放。二是林型差异, 主要表现在土壤 CH_4 释放的持续时间和对低温的响应程度。蒙古栎林土壤表面 CH_4 通量对温度响应最敏感 (图 4), 但出现 CH_4 净释放的温度低 (-12.1°C)、持续时间短 (1 月 16 日—2 月 16 日, 图 2b), 因此其 CH_4 汇强度最大 (表 1)。相反, 硬阔叶林土壤表面 CH_4 通量对温度响应最不敏感, 虽然出现 CH_4 净释放的温度高 (-5.6°C)、持续时间长 (12 月 14 日—3 月 29 日), 但 CH_4 通量一直波动在在 $-8\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 至 $+10\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 之间, 从而使其 CH_4 净释放量也不高。介于两者之间的红松林和落叶松林, 其土壤 CH_4 通量对温度响应居中, 出现 CH_4 净释放的温度 (分别为 -7.2°C 和 -8.1°C) 及其持续时间 (分别为 12 月 30 日—3 月 9 日和 12 月 30 日—3 月 29 日) 也适中, 因而这两种林型在非生长季释放出的 CH_4 较大 (表 1)。总体看来, 两种阔叶林型土壤 CH_4 通量低于两种针叶林, 这与以往的研究结果一致 [6,37]。Heyer [38] 推测, 针叶林的酸性土壤中甲烷氧化菌的数量远低于阔叶林可能是造成这一现象的原因之一。至于温度变化通过影响不同林型中的哪些生态学过程来控制土壤 CH_4 释放尚需要进一步探究。

3.3 非生长季土壤表面 N_2O 通量

本研究中常绿针叶林-红松林的土壤 N_2O 通量最高, 比落叶松林大近一倍 (表 2), 与 2007 年生长季所测得的结果一致 [39]; 而两种阔叶林的土壤 N_2O 通量与 Groffman 等 [5] 对美国北部阔叶林所测得的结果相近 ($13.83\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)。

土壤含水量是影响土壤 N_2O 通量的重要因素 [40]。Mummey 等 [41] 的研究表明, 当土壤处于饱和含水量以下时, N_2O 的排放量随土壤水分的增加而增加。Teepe 等 [9] 报道, 土壤含水量与整个冬季的 N_2O 通量呈正相关。本研究中, 土壤含水量对土壤 N_2O 通量的影响因林型而异, 其中落叶松林、蒙古栎林和硬阔叶林的土壤 N_2O 通量与土壤含水量呈正相关, 而红松林则不相关 (图 5)。温度对土壤 N_2O 通量的影响, 在不同的研究中结果并不一致。Furon 等 [42] 报道, 冬季土壤 N_2O 通量与地表温度显著相关, 但其相关性随土壤深度加深而下降。而 Teepe 等 [9] 的研究表明, 温度对冬季土壤 N_2O 通量有控制作用, 但两者间关系未达到显著水平。肖冬梅 [43] 等对长白山阔叶红松林土壤 N_2O 通量全年观测结果显示, 土壤温度与 N_2O 通量之间存在显著的指数关系。本研究中, 没有发现土壤 N_2O 通量与 5cm 深土壤温度之间的显著关系 ($P > 0.05$), 但总体上 1 月份土壤温度最低时, 土壤 N_2O 通量达到最小值; 此后, 随土壤温度上升, 土壤 N_2O 通量也开始增加 (图 1a 和图 2c)。

冻融作用对土壤 N_2O 释放有促进作用。土壤冻结过程中部分微生物被杀死, 释放出来的营养物质被幸存的微生物快速利用产生大量 N_2O [44-46]。Müller 等 [47] 利用 ^{15}N 对草地土壤的研究表明, 冻融期土壤 N_2O 释放主要受土壤微生物反硝化作用的控制。冬季当土壤结冻后, 土壤胶粒表面仍有一层未冻结的水膜, 其外部覆盖一冰层, 从而形成厌氧环境, 既有利于反硝化作用产生 N_2O , 又阻止了 N_2O 的释放 [4,48]。因此, 高的土壤含水量有促进冬季土壤微生物的反硝化作用, 从而增加 N_2O 的产生 [49]。当土壤解冻时, 这部分累积的 N_2O 得以释放, 出现 N_2O 排放峰值 [46,50]。本研究的 4 种林型在春季土壤解冻期均出现土壤 N_2O 释放峰值, 这与以往研究的结果一致 [44,50]。其中蒙古栎林的土壤 N_2O 排放峰值较其它林型出现得早, 可能与蒙古栎林地处山脊阳坡, 春季升温较快, 土壤解冻较早有关。

4 结论

非生长季 4 种温带森林土壤均表现为 CO_2 和 N_2O 源、 CH_4 汇的作用,但 CH_4 汇的强度在低温下显著减弱,甚至成为 CH_4 源,表明了非生长季温带森林土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量对于 3 种主要大气温室气体的年释放量或吸收量的重要影响。然而,非生长季土壤对 3 种温室气体的源汇强度因林型和时间而异。温度最低的隆冬季节,红松林和落叶松林土壤甚至出现明显的 CH_4 排放现象。春季冻融作用对土壤 CO_2 和 N_2O 的释放有明显的促进作用。整个非生长季中,土壤 CO_2 通量与土壤温度呈显著的指数函数关系,而土壤 CH_4 通量与土壤温度呈显著的负相关。土壤 N_2O 通量多与土壤含水量呈显著的正相关。除了不同林型的环境因子的差异之外,造成非生长季土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量的林型间分异的生物学机理尚需要进一步研究。

References:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: The Scientific Basis Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Burton D L, Beauchamp E G. Profile of nitrous oxide and carbon dioxide concentrations in a soil subject to freezing. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58: 115-122.
- [3] Christensen S, Christensen B T. Organic matter available for denitrification in different soil fractions: Effect of freeze / thaw cycles and straw disposal. *Journal of Soil Science*, 1991, 42: 637-647.
- [4] Teepe R, Brumme R, Beese F. Nitrous oxide emissions from soil during freezing and thawing periods. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33 (9): 1269-1275.
- [5] 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: 1748-1760.
- [6] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 1-10.
- [7] Sullivan B W, Kolb T E, Hart S C, Kaye J P, Dore S, Montes-Helu M. Thinning reduces soil carbon dioxide but not methane flux from southwestern USA ponderosa pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255: 4047-4055.
- [8] Wang C, Bond-Lamberty B, Gower S T. Soil surface CO_2 flux in a boreal black spruce fire chronosequence. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 108 (D3): 8224.
- [9] Teepe R, Brumme R, Beese F. Nitrous oxide emissions from frozen soils under agricultural, fallow and forest land. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32: 1807-1810.
- [10] Brooks P D, Williams M W, Schmidt S K. Inorganic nitrogen and microbial biomass dynamics before and during spring snowmelt. *Biogeochemistry*, 1998, 43 (1): 1-15.
- [11] Liu C Y, Hicolas J, Br ggwmann N. Winter-grazing reduces methane uptake by soils of a typical semi-arid steppe in Inner Mongolia, China. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 5948-5958.
- [12] Holst J, Liu C, Yao Z, Br ggemann 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*, 2008, 308:105-117.
- [13] 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: 1495-1505.
- [14] 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 and Biochemistry*, 2004, 36: 641-654.
- [15] Schimel J P, Clein J S. Microbial response to freeze-thaw cycles in tundra and taiga soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 1996, 28: 1061-1066.
- [16] Liu C Y, Hicolas J, Br ggwmann N. Winter-grazing reduces methane uptake by soils of a typical semi-arid steppe in Inner Mongolia, China. *Atmospheric Environment*, 2007, 41: 5948-5958.
- [17] Clein J S, Schimel J P. Microbial activity of tundra and taiga soils at subzero temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27: 1231-1234.
- [18] Edwards K A, McCulloch J, Kershaw G P, Jefferies R L. Soil microbial and nutrient dynamics in a wet arctic sedge meadow in late winter and early spring. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 2843-2851.
- [19] 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: 274-284.
- [20] Chapuis-Lardy L, Wrage N, Metay A, Chotte J L, Bernoux M. Soils, a sink for N_2O ? A review. *Global Change Biology*, 2007, 13:1-17.

- [21] Henry H A L. Soil freeze-thaw cycle experiments: trends methodological weaknesses and suggested improvements. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 977-986.
- [22] Yang J Y, Wang C K. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO₂ flux of forests in northeastern China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30 (2): 286-294.
- [23] Liu S, Wang C K. Spatio-temporal patterns of soil microbial biomass carbon and nitrogen in five temperate forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(12): 3135-3143.
- [24] Yang J Y, Wang C K. Soil carbon storage and flux of temperate forest ecosystems in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2876-2882.
- [25] Mariko S, Nishimura N, Mo W, Matsui Y, Kibe T, Koizumi H. Winter CO₂ flux from soil and snow surfaces in a cool-temperate deciduous forest, Japan. *Ecological Research*, 2000, 15: 363-372.
- [26] McDowell N G, Marshall J D, Hooker T D, Musselman R C. Estimating CO₂ flux from snow packs at three sites in the Rocky Mountains. *Tree Physiology*, 2000, 20: 745-753.
- [27] Mo W, Lee M, Uchida M, Inatomi M, Saigusa N, Mariko S, Koizumi H. Seasonal and annual variations in soil respiration in a cool-temperate deciduous broad-leaved forest in Japan. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 134: 81-95.
- [28] Schindlbacher A, Zechmeister-Boltenstern S, Glatzel G, Jandl R. Winter soil respiration from an Austrian mountain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 146: 205-215.
- [29] Hardy J P, Groffman P M, Fitzhugh R D, Henry K S, Welman T A, Demers J D, Fahey T J, Driscoll C T, Tierney G L, Nolan S. Snow depth, soil frost and water dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 2001, 56: 151-174.
- [30] Tierney G L, Fahey T J, Groffman P M, Hardy J P, Fitzhugh R D, Driscoll C T. Soil freezing alters fine root dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 2001, 56: 175-190.
- [31] Groffman P M, Driscoll C T, Fahey T J, Hardy J P, Fitzhugh R D, Tierney G L. Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 2001, 56: 191-213.
- [32] Fitzhugh R D, Driscoll C T, Groffman P M, Tierney G L, Fahey T J, Hardy J P. Effects of soil freezing disturbance on soil solution nitrogen, phosphorus and carbon chemistry in a northern hardwood ecosystem. *Biogeochemistry*, 2001, 56: 215-238.
- [33] Ludwig B, Teepe R, Lopes de Gerenyu V, Flessa H. CO₂ and N₂O emissions from gleyic soils in the Russian tundra and a German forest during freeze-thaw periods-a microcosm study. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38: 3516-3519.
- [34] Mast M A, Wickland K P, Striegl R T, Clow D W. Winter fluxes of CO₂ and CH₄ from subalpine soils in Rocky Mountain National Park, Colorado. *Global Biogeochem Cycles*, 1998, 12 (4): 607-620.
- [35] Winston G C, Stephens B B, Sundquist E T, Hardy J P, Davis R E. Seasonal variability in CO₂ transport through snow in a boreal forest // Tonnessen K A, Williams M W, Tranter M eds. *Biogeochemistry of Seasonally Snow-Covered Catchments*. Wallingford, Oxfordshire, UK: IAHS Publication. 1995: 61-70.
- [36] Steinkamp R, Butterbach-Bahl K, Papen H. Methane oxidation by soils of an N limited and N fertilized spruce forest in the Black Forest, Germany. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33: 145-153.
- [37] Steudler P A, Bowden R D, Melillo J M, Aber J D. Influence of nitrogen fertilization on methane uptake in temperate forest soils. *Nature*, 1989, 341: 314-316.
- [38] Heyer J. Results of enrichment experiments of methane-assimilating organisms from an exological point of view // Skryabin G K, Ivanov M V, Kondratjeva E N, Zavarzin G A, Yu, Trotsenko A, Nesterov A I eds. *Microbial Growth on C1-Compounds*. Puschino: USSR Academic Science, 1977: 19-21.
- [39] Wang Y, Wang C K, Fu M J, Liu S, Wang X C. Soil nitrous oxide emission in four temperate forests in northeastern China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20 (5): 1007-1012.
- [40] Teepe R, Vor A, Beese F, Ludwig B. Emissions of N₂O 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: 357-365.
- [41] Mummey D L, Smith J L, Bolton H J R. Nitrous oxide flux from a shrub-steppe ecosystem: Sources and regulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1994, 26: 279-286.
- [42] Furon A C, Wagner-Riddle C, Smith C R, Warland J S. Wavelet analysis of wintertime and spring thaw CO₂ and N₂O fluxes from agricultural fields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148: 1305-1317.
- [43] Xiao D M, Wang M, Ji L Z, Han S J, Wang Y S. Variation characteristics of soil N₂O emission flux in broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23 (5): 46-52.
- [44] Singurindy O, Molodovskaya M, Richards B K, Steenhuis T S. Nitrous oxide emission at low temperatures from manure-amended soils under corn

(*Zea mays* L.). Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009 132:74-81.

- [45] Larsen K S, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types. Applied Soil Ecology, 2002, 21 (3): 187-195.
- [46] Papen H, Butterbach-Bahl K. A 3-year continuous record of N-trace gas fluxes from untreated and limed soil of a N-saturated spruce and beech forest ecosystem in Germany 1. N₂O emissions. Journal of Geophysical Research, 1999, 104 (D15): 18487-18503.
- [47] Müller C, Martin M, Stevens R J, Laughlin R J, Kammann C, Ottow J C G, Jäger H J. Processes leading to N₂O emissions in grassland soil during freezing and thawing. Soil Biology and Biochemistry, 2002, 34: 1325-1331.
- [48] Öquist M G, Nilsson M, S rensson F, Kasimir-Klemetsson Å, Persson T, Weslien P, Klemetsson L. Nitrous oxide production in a forest soil at low temperatures processes and environmental controls. FEMS Microbiology Ecology, 2004, 49: 371-378.
- [49] Edwards A C, Killham K. The effect of freeze-thaw on gaseous nitrogen loss from upland soils. Soil Use and Management, 1986, 2(3): 86-91.
- [50] 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.

参考文献:

- [23] 刘爽, 王传宽. 五种温带森林土壤微生物生物量碳和氮的时空格局. 生态学报, 2010, 30(12): 3135-3143.
- [24] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳储量和碳通量. 生态学报, 2005, 25(11): 2876-2882.
- [39] 王颖, 王传宽, 傅民杰, 刘实, 王兴昌. 四种温带森林土壤氧化亚氮通量及其影响因子. 应用生态学报, 2009, 20 (5): 1007-1012.
- [43] 肖冬梅, 王森, 姬兰柱, 韩士杰, 王跃思. 长白山阔叶红松林土壤 N₂O 排放通量的变化特征. 生态学杂志, 2004, 23 (5): 46-52.