

# 大兴安岭重度火烧迹地天然次生林土壤 温室气体通量及其影响因子

梁东哲 赵雨森 辛 颖\*

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

**摘 要** 为研究大兴安岭重度火烧迹地自然恢复后的林分土壤温室气体源汇强度及其影响因素,采用静态箱/气相色谱法,对生长季(6—9月)天然次生林土壤温室气体  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  通量进行原位观测.结果表明:1)生长季内天然次生林土壤为大气  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  的源,  $\text{CH}_4$  的汇,平均通量分别为  $575.81 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 、 $17.81 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  和  $-68.69 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $\text{CO}_2$  与  $\text{CH}_4$  通量在生长季内表现出明显的双峰变化规律,  $\text{N}_2\text{O}$  通量则呈单峰变化,且均在8月达到观测期的最大值.2)土壤温度是影响该区天然次生林土壤温室气体通量的主控因子,土壤湿度和大气湿度在昼夜与季节尺度上与土壤温室气体通量的相关性不同.3)该区天然次生林 9:00—12:00 时段观测获得的土壤气体通量值经矫正后可代表当日气体通量.研究补充了大兴安岭火烧迹地森林生态系统温室气体通量数据,为该区土壤温室气体源汇的相关研究提供了依据.

**关键词** 大兴安岭; 火烧迹地; 天然次生林; 土壤; 温室气体

**Soil greenhouse gases fluxes and the affecting factors of natural secondary forest from seriously burned area in Greater Khingan Mountains, China.** LIANG Dong-zhe, ZHAO Yu-sen, XIN Ying\* (College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China).

**Abstract:** To learn the intensity of greenhouse gases (GHG) fluxes source/sink from soil and the influence factors of a natural secondary forest from seriously burned area in Greater Khingan Mountains, we used static chamber-GC technique to measure soil GHG ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) *in situ* during the growing season (from June to September). The results showed that: 1) The soil of natural secondary forest was atmospheric  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  source and  $\text{CH}_4$  sink. The mean fluxes of soil GHG ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) during the growing season were  $575.81 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,  $17.81 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$  and  $-68.69 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , respectively. The  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  fluxes showed an obvious double-peak trend and the change of  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes was a single-peak pattern during the growing season, with all maximum fluxes occurred in August. 2) Soil temperature was the predominant factor controlling the soil GHG fluxes. The correlation of soil/atmospheric humidity and soil GHG fluxes was complicated and differed between diurnal scale and seasonal scale. 3) The soil GHG fluxes measured at 9:00–12:00 am could represent the diurnal average fluxes on the same day after proper correction in this area. The findings supplemented the soil GHG fluxes data of fired forest ecosystem in Greater Khingan Mountains, which could provide a basis for related research of soil GHG source/sink in this area.

**Key words:** Greater Khingan Mountains; burned area; natural secondary forest; soil; greenhouse gases.

自 1750 年以来,温室气体  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度均已大幅度增加,分别为 40%、150% 和 20%<sup>[1]</sup>,其对全球气候变暖的贡献分别为 60%、20% 和 6%<sup>[2]</sup>.近年来,温室气体排放及其所导致的气候和环境变化倍受全球关注.森林土壤每年向大气中排放  $\text{CO}_2$  约  $2.51 \times 10^3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[3]</sup>,每年大约可吸收  $0.18 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$  的  $\text{CH}_4$ <sup>[4]</sup>.同时,森林土壤又是向大气中排放  $\text{N}_2\text{O}$  的重要源<sup>[5]</sup>.大兴安岭地区是我国北方最大的林区,也是林火发生最严重的林区之一.1987 年的“五·六大火”使森林受害面积达  $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,当地森林覆盖率从 76% 下降至 61.5%,重度火烧迹地生物多样性消失殆尽,使得以落叶松 (*Larix gmelinii*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 为建群种所组成的森林资源被山杨 (*Populus davidiana*)、白桦 (*Betula platyphylla*) 等先锋树种侵入,逆行演替为杨桦次生林.据样地所在地林业部门 2009 年森林资源二类调查数据,该地区天然林占有林地面积 94.3%,其中白桦、山杨等次生先锋树种占有林地面积 46% 以上.目前对大兴安岭火烧迹地植被恢复的研究,多集中于土壤性质、微生物及林下植被等方面<sup>[6-8]</sup>.也有研究者对该地区地带性植被温室气体排放规律<sup>[9]</sup>和火干扰后地带性植被土壤呼吸<sup>[10]</sup>开展了研究,但关于重度火烧迹地经过天然恢复形成的大面积的天然次生林温室气体排放规律研究还未见报道.

本研究以大兴安岭重度火烧迹地天然次生林土壤为对象,采用静态箱/气相色谱法,探究重度火烧迹地经过自然恢复后土壤  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征,探讨温度和湿度等环境因子对  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放的影响,以期对我国火烧迹地森林生态系统温室气体排放数据进行补充,为明晰大兴安岭地区森林生态系统在全球气候变化中的作用提供科学参考.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于大兴安岭地区漠河县阿木尔林业局,地理坐标为  $52^\circ 15' 03''$ — $53^\circ 33' 15'' \text{ N}$ ,  $122^\circ 38' 30''$ — $124^\circ 05' 05'' \text{ E}$ ,属额尔齐河流域,为 1987 年“五·六大火”重灾区.该区属于寒温带大陆性气候,夏季(平均气温  $\geq 22^\circ \text{C}$ )短暂,冬季(平均气温  $< 10^\circ \text{C}$ )漫长,昼夜温差大.年均气温  $-2.6^\circ \text{C}$ ,7 月最高温度  $40^\circ \text{C}$ ,1 月最低温度  $-49.5^\circ \text{C}$ .多年平均降水量  $432.0 \text{ mm}$ ,无霜期 95 d 左右.土壤以棕色针叶林土为主,还有

沼泽土和泥炭土.地带性植被类型为寒温带针叶林,主要乔木树种有:落叶松 (*Larix gmelinii*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、山杨 (*Populus davidiana*)、白桦 (*Betula platyphylla*) 等;灌木主要有:杜香 (*Ledum palustre*)、兴安杜鹃 (*Rhododendron dauricum*)、越桔 (*Vaccinium vitis-idaea*)、胡枝子 (*Lespedeza bicolor*)、山刺玫 (*Rosa davurica*) 等;草本主要有:鹿蹄草 (*Pyrola calliantha*)、小叶章 (*Deyeuxia angustifolia*)、蚊子草 (*Filipendula palmate*) 等.

### 1.2 研究方法

**1.2.1 样地设置** 以大兴安岭 1987 年“五·六大火”形成的重度火烧迹地天然恢复后的次生林为研究对象,林分内地表有 3 cm 左右的枯落物腐殖质层,土层厚度为 30 cm 左右,土壤容重为  $(1.05 \pm 0.06) \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,pH 为  $(5.09 \pm 0.04)$ ,土壤有机碳含量为  $(43.75 \pm 13.12) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤全氮含量为  $(3.54 \pm 1.19) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ .选取有代表性的林分设置 3 个  $20 \text{ m} \times 30 \text{ m}$  的标准样地.每个标准样地内设置 1 个采样点,于试验开始前 7 d 将静态箱底座插入采样点,底座内土壤、枯落物等维持原状,整个观测期不再移动,以减少人为活动对气体通量的影响.静态箱由厚 2.0 mm 的不锈钢板制成,顶箱规格为  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ ,底座规格为  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ .底座上部设有水槽,用于每次采样时加水密封.顶箱外部粘有白色保温板.

**1.2.2 样品的采集与测定** 2017 年 6 月 3 日至 9 月 21 日,采用静态箱/气相色谱法每隔 10 d 在天然次生林进行温室气体 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ ) 通量的原位观测,于每个采样日 9:00—11:00 时段对气体进行采集.在每月第 3 个采样日进行温室气体昼夜变化观测,每 3 h 采集一次气体样品,共 8 次.在采样箱罩箱后分别于 0、10、20 和 30 min 用带有三通阀的 100 mL 医用注射器采集气体,并注入 500 mL 气体采集袋.气体样品带回实验室用气相色谱仪(美国安捷伦 GC7890B)对  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  浓度进行分析.每次取样同时测定箱内温度、0~5 cm 土壤湿度、温度和大气湿度.

**1.2.3 气体通量计算** 通量是指单位时间通过某单位面积界面输送的物理量.气体通量按下式计算:

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

式中:  $F_t$  为气体通量;  $M$  为气体的摩尔质量;  $P_0$  和  $T_0$  为理想气体标准状态下的大气压和温度;  $V_0$  为标准状态下的摩尔体积;  $H$  为采样箱高度;  $P$  和  $T$  为采样

时的实际气压和气温; $dc/dt$ 为气体浓度随时间变化的回归曲线斜率( $R^2 \geq 0.9$  视为有效).当  $F_i$  为正值时表示排放, $F_i$  为负值时表示吸收.

1.3 数据处理

采用 SPSS 18.0 和 Excel 2010 软件对数据进行统计分析,采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)进行方差分析,用 Pearson 法对  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  通量与环境因子进行相关分析.利用 Origin 2015 软件作图.图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差.

2 结果与分析

2.1 土壤温室气体通量昼夜变化

$\text{N}_2\text{O}$  通量昼夜变化皆呈现出昼高夜低的变化规律,通量极大值出现在 12:00—15:00,极小值则出现在凌晨 3:00 左右(图 1).其中,8 月  $\text{N}_2\text{O}$  通量日较差最大( $25.27 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),6 月最小( $9.92 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ).6、7 月  $\text{CH}_4$  吸收通量的昼夜变化规律一致,昼高夜低;8 月和 9 月吸收通量则昼低夜高.6、7 月昼夜吸收高峰出现在 12:00—15:00 时段,

吸收最低值出现在凌晨 24:00—3:00 时段;8、9 月则相反.整个观测期间,9 月凌晨 24:00 的  $\text{CH}_4$  通量最大,为 $-134.82 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,7 月  $\text{CH}_4$  通量最低,为 $-56.17 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ .9 月  $\text{CH}_4$  日变化幅度最大( $75.83 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),6 月最小( $17.94 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ).土壤  $\text{CO}_2$  通量值普遍表现出昼高夜低的趋势,7 月和 9 月于 15:00 左右出现峰值,7 月和 9 月则分别于 18:00 和 12:00 出现峰值;6 月、7 月和 8 月于凌晨 3:00 出现最低值,9 月在 9:00 为当日通量最低值.从  $\text{CO}_2$  日较差来看,9 月最大( $321.92 \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ),8 月最小( $140.55 \text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ).

由表 1 可见,在白天的测定中,6 月观测日 9:00—12:00 和 18:00 的  $\text{N}_2\text{O}$  通量观测值在全天平均值标准差范围内,7 月在 9:00—12:00 和 18:00 时段,8 月则是 9:00 和 15:00—18:00 时段,9 月仅为 9:00.因此,可把 9:00 观测值矫正后,作为生长季  $\text{N}_2\text{O}$  的通量.将观测日的  $\text{CH}_4$  通量日均值与当日各时段的即时通量进行比较,6 月 9:00—12:00 时段和 18:00 即时通量观测值在昼夜通量均值范围内,7 月为 12:00 和 18:00 时段,8 月在 9:00—12:00 时段,9 月为 15:00—18:00 时段.因此,选择 12:00 的观测值矫正后可作为当天的  $\text{CH}_4$  平均通量.同理,6 月、7 月和 8 月 9:00—12:00 时段测得的  $\text{CO}_2$  即时通量值在日均值范围内,9 月为 15:00—18:00 时段.选择 9:00—12:00 观测值矫正后作为每个采样日  $\text{CO}_2$  平均通量相对适宜.

综合考虑 3 种温室气体及实际情况,将 9:00—12:00 时段作为生长季的采样时间,通量值矫正后可代表当日温室气体通量.

2.2 土壤温室气体通量生长季变化

由图 2 可见,整个生长季天然次生林土壤为  $\text{N}_2\text{O}$  的源, $\text{N}_2\text{O}$  通量季节变化呈明显的单峰曲线,通量值变化在( $6.10 \sim 58.43$ )  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ .生长季初期,随着气温回升,土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量逐渐增加,到 8 月中旬达到生长季排放最高峰,之后又随气温的下降而降低.8 月  $\text{N}_2\text{O}$  通量为( $38.49 \pm 18.41$ )  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,显著高于其他 3 个月,6 月、7 月和 9 月  $\text{N}_2\text{O}$  通量分别为( $8.54 \pm 3.34$ )、( $13.90 \pm 4.79$ )和( $10.32 \pm 2.71$ )  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ,3 个月份之间无显著差异.

寒温带天然次生林土壤对  $\text{CH}_4$  的吸收通量具有明显的季节变化特征,生长季天然次生林土壤为大气  $\text{CH}_4$  的汇,通量值在( $-12.35 \sim -117.09$ )

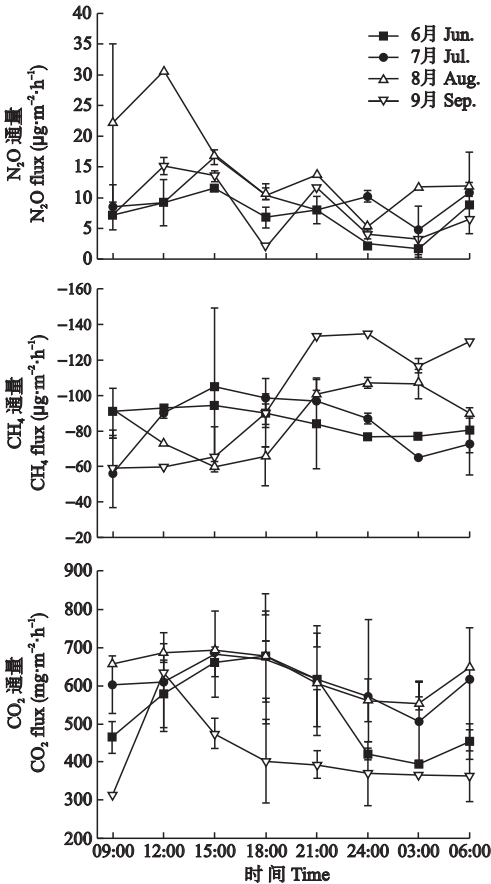


图 1 天然次生林土壤温室气体的昼夜变化  
Fig.1 Diurnal variation of greenhouse gases flux in soil of natural secondary forest.

表 1 天然次生林生长季土壤温室气体昼夜平均吸收通量和即时通量  
Table 1 Average diurnal greenhouse gases fluxes and instant fluxes at the certain time during the growing season in soil of natural secondary forest

项目 Item	月份 Month	日均值 Mean daily	9:00		12:00		15:00		18:00	
			即时通量 Instant flux	校正值 Correction value (%)	即时通量 Instant flux	校正值 Correction value (%)	即时通量 Instant flux	校正值 Correction value (%)	即时通量 Instant flux	校正值 Correction value (%)
N <sub>2</sub> O 通量	6	7.0±3.9	7.2	-3.1	9.2	-31.7	11.6	-66.3	6.9	+1.5
N <sub>2</sub> O flux	7	9.8±3.9	8.5	15.3	9.2	5.7	16.6	-41.0	10.5	-6.9
( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	8	15.4±7.8	22.1	-30.7	30.5	-49.7	17.0	-9.8	10.7	+43.2
	9	7.9±5.0	7.3	+8.0	15.4	-47.8	13.6	-41.7	1.9	+326.0
CH <sub>4</sub> 通量	6	-85.7±7.2	-90.8	+5.6	-92.8	+7.7	-94.5	+9.3	-89.8	+4.5
CH <sub>4</sub> flux	7	-84.0±17.5	-56.2	-48.5	-90.1	+6.8	-105.0	+20.0	-98.8	+15.0
( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	8	-86.9±18.5	-92.2	+5.8	-73.0	-19.0	-59.8	-45.3	-65.6	-32.4
	9	-98.7±34.1	-59.0	-67.3	-59.7	-65.3	-65.5	-50.8	-90.0	-9.7
CO <sub>2</sub> 通量	6	533.3±113.2	464.1	+14.9	579.2	-7.9	662.4	-19.5	677.7	-21.3
CO <sub>2</sub> flux	7	609.9±55.1	602.7	+1.2	610.1	0.0	682.7	-10.7	670.9	-9.1
( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	8	635.8±55.6	657.1	-3.2	687.5	-7.5	693.7	-8.4	678.0	-6.2
	9	414.4±100.4	313.6	+32.1	635.5	-34.8	474.8	-12.7	401.6	+3.2

$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ . 生长季初期, 伴随气温回升, CH<sub>4</sub> 吸收通量逐渐增加, 于 6 月下旬达到第一次峰值. 随后进入雨季, 7 月降水增多, 温度略有下降, CH<sub>4</sub> 吸收通量减少. 8 月达到季节吸收最高峰, 之后又随气温

降低而下降. 6—9 月的月均 CH<sub>4</sub> 通量分别为  $(-57.01 \pm 40.34)$ 、 $(-57.03 \pm 20.69)$ 、 $(-99.94 \pm 14.88)$  和  $(-60.79 \pm 2.04) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ .

天然次生林土壤 CO<sub>2</sub> 通量呈现明显的季节变化, 呈以 7 月中旬和 8 月中旬为峰值的双峰变化趋势. 7 月底和 8 月上旬当地降雨集中, CO<sub>2</sub> 通量相对减少. 月均 CO<sub>2</sub> 通量值分别为 8 月  $(802.04 \pm 283.66 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}) > 7$  月  $(688.57 \pm 206.62 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}) > 9$  月  $(408.74 \pm 120.21 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}) > 6$  月  $(403.89 \pm 90.05 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1})$ , 8 月 CO<sub>2</sub> 通量显著高于 6 月和 9 月.

2.3 温室气体通量与环境因子的关系

由表 2 可见, N<sub>2</sub>O 通量与土壤温度始终保持显著正相关, 在 6 月和 7 月与土壤湿度呈显著负相关, 8 月和 9 月与土壤湿度呈极显著正相关; CO<sub>2</sub> 与土壤温度呈极显著正相关, 6 月与土壤湿度呈极显著负相关, 8、9 月与土壤湿度呈显著正相关; CH<sub>4</sub> 通量 6 月和 7 月与土壤温度呈负相关关系, 8 月和 9 月则呈显著正相关, 6 月和 9 月与土壤湿度呈极显著正相关.

对土壤 0~5 cm 层温湿度、大气湿度等相关环境因子与温室气体通量之间进行了 Pearson 相关分析( $n=36$ ). 由表 3 可见, 土壤温度与温室气体通量均呈极显著的相关性, 其中土壤温度与 CH<sub>4</sub> 通量呈极显著负相关 ( $R^2 = -0.510$ ). CO<sub>2</sub> 与大气湿度之间呈极显著正相关 ( $R^2 = 0.541$ ), 且与 N<sub>2</sub>O 通量存在一定相关性. 土壤湿度与生长季温室气体通量之间并无显著相关关系.

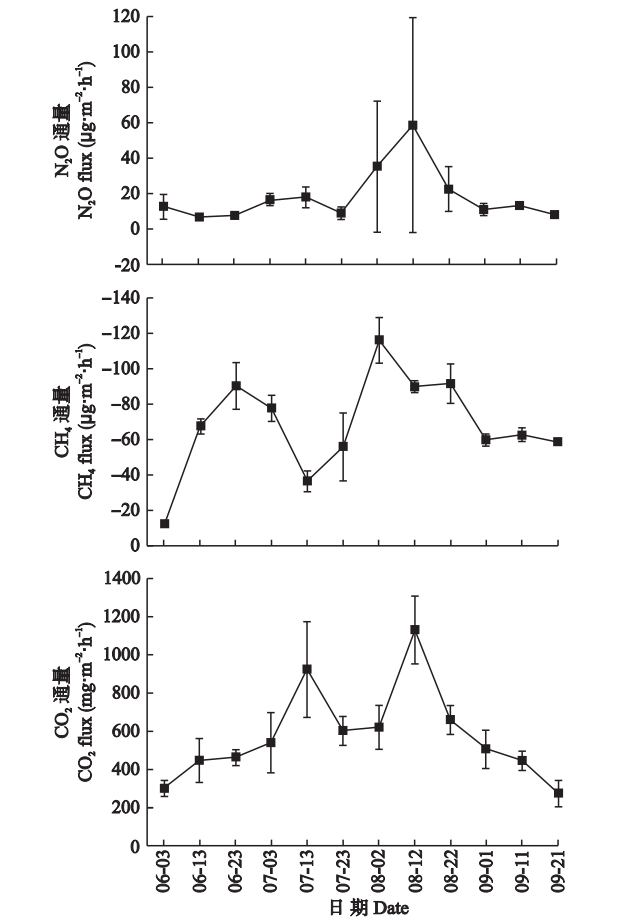


图 2 天然次生林土壤温室气体通量生长季变化  
Fig.2 Variation dynamics of greenhouse gases flux in soil of natural secondary forest during growth season.



表 2 土壤 N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 昼夜通量与环境因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between soil N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> diurnal fluxes and environmental factors

月份 Month		N <sub>2</sub> O 通量 N <sub>2</sub> O flux	CH <sub>4</sub> 通量 CH <sub>4</sub> flux	CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> flux
6	CH <sub>4</sub> 通量 CH <sub>4</sub> flux	-0.423 *		
	CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> flux	0.505 *	-0.569 **	
	大气湿度 Atmospheric humidity	-0.601 **	0.553 **	-0.551 **
	土壤温度 Soil temperature	0.459 *	-0.438 *	0.535 **
	土壤湿度 Soil moisture	-0.456 *	0.547 **	-0.494 *
7	CH <sub>4</sub> 通量 CH <sub>4</sub> flux	-0.237		
	CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> flux	0.212	-0.426 *	
	大气湿度 Atmospheric humidity	-0.395	0.339	-0.333
	土壤温度 Soil temperature	0.407 *	-0.480 *	0.535 **
	土壤湿度 Soil moisture	-0.448 *	0.138	-0.257
8	CH <sub>4</sub> 通量 CH <sub>4</sub> flux	0.277		
	CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> flux	0.417 *	0.740 **	
	大气湿度 Atmospheric humidity	-0.174	-0.194	-0.152
	土壤温度 Soil temperature	0.554 **	0.778 **	0.673 **
	土壤湿度 Soil moisture	0.719 **	0.369	0.461 *
9	CH <sub>4</sub> 通量 CH <sub>4</sub> flux	0.441 *		
	CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> flux	0.620 **	0.471 *	
	大气湿度 Atmospheric humidity	-0.638 **	-0.726 **	-0.580 **
	土壤温度 Soil temperature	0.597 **	0.482 *	0.673 **
	土壤湿度 Soil moisture	0.743 **	0.783 **	0.749 **

\* P<0.05; \*\* P<0.01. 下同 The same below.

表 3 土壤 N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量与环境因子的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between soil N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes and environmental factors

	N <sub>2</sub> O 通量 N <sub>2</sub> O flux	CH <sub>4</sub> 通量 CH <sub>4</sub> flux	CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> flux
CH <sub>4</sub> 通量 CH <sub>4</sub> flux	-0.256		
CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> flux	0.377 *	-0.265	
大气湿度 Atmospheric humidity	0.260	-0.248	0.541 **
土壤温度 Soil temperature	0.567 **	-0.510 **	0.798 **
土壤湿度 Soil moisture	0.157	0.133	-0.227

3 讨 论

3.1 天然次生林土壤 N<sub>2</sub>O 通量变化及其影响因子

天然次生林土壤 N<sub>2</sub>O 通量季节变化表现出明显的单峰变化趋势,整个生长季均为 N<sub>2</sub>O 的源,与前人研究一致<sup>[9,11]</sup>.森林土壤中 N<sub>2</sub>O 的排放主要来源于微生物的反硝化、硝化过程及其他一些生物过程.温度是影响土壤释放 N<sub>2</sub>O 的重要因素之一,可对反硝化微生物的数量、活性及反应速率产生影响<sup>[12]</sup>.一般认为,反硝化作用与温度呈正相关,因而呈现出随季节温度变化而变化的趋势,夏季排放通量最高,春秋次之<sup>[13]</sup>.土壤湿度也是影响 N<sub>2</sub>O 通量变化的关键因子.该地区生长季雨水充足,土壤水分并非其生长季限制性影响因子.降水也会影响 N<sub>2</sub>O

的排放,可直接影响微生物的生理活性,并改变土壤的通透性和氧分压来间接作用于反硝化微生物<sup>[14]</sup>,使 N<sub>2</sub>O 大量产生;加之降水集中期的土壤湿度增大,土壤通气性能下降,抑制 N<sub>2</sub>O 的释放<sup>[13]</sup>,导致降水后出现排放峰值.

本研究发现,N<sub>2</sub>O 释放季节通量与土壤湿度相关性不大,与傅民杰等<sup>[15]</sup>和马秀枝等<sup>[9]</sup>的研究结果一致.而昼夜变化规律与土壤湿度保持了极好的相关性,与孙向阳等<sup>[16]</sup>和杜睿等<sup>[17]</sup>的土壤 N<sub>2</sub>O 通量取决于土壤湿度的结论一致.这可能是因为昼夜尺度上,土壤养分质量及微生物数量变化较小,主要影响因素是土壤温湿度.但 6 月与 7 月呈负相关,8 月与 9 月呈正相关,是因为 6 月和 7 月是该地区植被生长旺盛时期,树木在该阶段吸收 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的能力较强,导致该时期土壤中铵态氮含量较低<sup>[18]</sup>,微生物反应底物的受限使得土壤温度对土壤 N<sub>2</sub>O 的释放起到主控作用,而土壤湿度的增大会抑制 N<sub>2</sub>O 的释放.8 月和 9 月植被生长缓慢,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 逐渐积累,加之雨季储备的丰富水资源,土壤湿度和温度共同作用并促进 N<sub>2</sub>O 排放.土壤温度对 N<sub>2</sub>O 通量的影响始终正相关,而土壤湿度对其的影响可能受到植被生长状况的影响而有所不同.

3.2 天然次生林土壤 CH<sub>4</sub> 通量变化及其影响因子

森林土壤对 CH<sub>4</sub> 的吸收是生物活动的结果,因此对生物活动产生影响的因素都会对 CH<sub>4</sub> 的吸收通量产生影响.温度是影响 CH<sub>4</sub> 吸收的重要环境因素,并与其保持极显著的正相关性,且表现出随温度上升而增加的趋势.同时,土壤湿度也是影响 CH<sub>4</sub> 吸收的重要环境因子,且 CH<sub>4</sub> 氧化细菌对温度的依赖性远低于产生 CH<sub>4</sub> 的细菌,其对 CH<sub>4</sub> 吸收通量的影响要大于温度,温度的影响效应只有在特定的水分含量条件下才能表现出来<sup>[19]</sup>.土壤湿度对土壤 CH<sub>4</sub> 氧化速率的影响遵循抛物线变化,过低或过高的土壤湿度都会抑制 CH<sub>4</sub> 的氧化速率<sup>[20]</sup>.整个生长季土壤 CH<sub>4</sub> 氧化速率与土壤湿度相关性不显著,可能因为土壤湿度对 CH<sub>4</sub> 氧化速率的抑制和促进作用的交互影响导致的,而降水则是产生这种影响的关键因素<sup>[21]</sup>.这是因为降水会通过影响土壤湿度而影响微生物等的活动,进而影响 CH<sub>4</sub> 的吸收.对生长季整体而言,在 7 月中下旬 CH<sub>4</sub> 吸收通量明显下降,这是由于降水致使土壤湿度过高,土壤空隙被水分所占据,大气中的 CH<sub>4</sub> 和 O<sub>2</sub> 向土壤中扩散受阻<sup>[22]</sup>,加之伴随降雨温度略有下降,使得生长季土壤 CH<sub>4</sub> 吸收通量呈现双峰变化.8 月初时土壤湿度达到最佳,

出现吸收峰值.而马秀枝等<sup>[9]</sup>的观测结果虽然也与降雨有关,但未出现双峰变化现象,可能是因为植被及地被物类型的不同,使得土壤中  $\text{CH}_4$  氧化细菌对环境因子变化的敏感性不同导致的.

6月、7月  $\text{CH}_4$  通量变化规律与8月、9月截然相反.可能是因为土壤  $\text{CH}_4$  的吸收通量与土壤温湿度之间存在一定的阈值关系,但有关阈值的表述并不一致.有报道称,土壤温度在 $-5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[23]</sup>之间,温度与土壤吸收  $\text{CH}_4$  速率呈正相关,很好地解释了6、7月土壤温度与土壤  $\text{CH}_4$  吸收通量的关系.这是因为在温度较低条件下,大气中的  $\text{CH}_4$  和  $\text{O}_2$  向土壤中的扩散速率及  $\text{CH}_4$  氧化细菌生理活性较低<sup>[24]</sup>,使得土壤温度成为土壤  $\text{CH}_4$  吸收通量的主导因子,呈现出随温度变化而变化的规律;当8、9月土壤温度高于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着土壤含水量的增加,土壤  $\text{CH}_4$  吸收通量对温度的敏感性降低<sup>[24]</sup>,土壤湿度成为主导因子<sup>[23]</sup>.但由于雨季水分的积累,土壤湿度 $>50\%$ <sup>[25]</sup>,抑制了气体的扩散.土壤平均温度虽然 $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,但由于昼夜气温的波动,使得其与  $\text{CH}_4$  氧化速率呈负相关.也有报道称,土壤温度范围为 $0\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[26]</sup>.这也印证了在季节尺度上土壤温度与土壤  $\text{CH}_4$  氧化速率呈显著正相关.

### 3.3 天然次生林土壤 $\text{CO}_2$ 通量变化及其影响因子

土壤  $\text{CO}_2$  的释放主要来源于土壤中生物的呼吸、根系呼吸和有机质的矿化分解<sup>[27]</sup>.这是一个十分复杂的生化过程.各环境因子影响着土壤生物群落结构和生物量,并调控底物的供应<sup>[28]</sup>,进而影响土壤呼吸和对环境因子的敏感性<sup>[29]</sup>.研究地为寒温带林区,土壤温度是影响土壤呼吸的主要因素,与其他寒温带森林的研究结果一致<sup>[9-10]</sup>.土壤水分状况也是影响土壤  $\text{CO}_2$  通量的关键因子<sup>[9,30]</sup>.但我国东北地区生长季雨量充沛,土壤含水率并非该地区土壤呼吸的限制性因子<sup>[31]</sup>.降水会影响森林底物组成、土壤通气状况和土壤微生物活性等,进而改变  $\text{CO}_2$  通量<sup>[32]</sup>.降水对  $\text{CO}_2$  通量的影响与土壤本身的水分状况有关,在土壤水分状况良好的地区,降水会在一定程度上抑制土壤  $\text{CO}_2$  的释放,并导致季节上出现双峰变化.同时,大气湿度也是影响微生物活动和土壤呼吸作用的主要因素之一<sup>[3]</sup>,可能是因为天然次生林林内气温和湿度受阳光和风等因子影响较大,进而对林地土壤呼吸产生影响.

就昼夜变化而言,在不同的湿度范围内,土壤湿度对土壤呼吸的影响不同:6月生长季初期,植被需水量较大,土壤含水量较低;7月进入雨季,土壤湿

度略有增加,可能未达到实际需水量,使得6、7月土壤  $\text{CO}_2$  通量与土壤湿度呈负相关.8、9月  $\text{CO}_2$  通量与土壤湿度呈正相关,与康永祥等<sup>[33]</sup>和 Bowden 等<sup>[34]</sup>的研究结果一致.可能是因为有一定湿度范围内,土壤湿度的增加会促进土壤  $\text{CO}_2$  释放;但小于或大于这个范围,土壤湿度会抑制土壤呼吸速率.在昼夜尺度上,土壤  $\text{CO}_2$  通量与大气湿度呈负相关,而在季节尺度上其呈正相关,与沙地土壤研究结果一致<sup>[35]</sup>.昼夜和季节尺度上土壤  $\text{CO}_2$  通量均与土壤温度的相关性达到了显著水平,与赵哈林等<sup>[35]</sup>的研究结果不一致,可能是因为林地土壤地被物丰富,减弱了能够削弱土壤呼吸对环境因子变化响应程度的因素,使其不论是昼夜还是季节尺度均受到土壤温度变化的制约.

### 3.4 国内不同森林生态系统土壤温室气体通量对比

与国内相近温度带不同林分土壤温室气体通量进行对比(表4),可以看出,寒温带大兴安岭火烧迹地天然次生林土壤温室气体通量明显高于同温度带的兴安落叶松林.可能是因为天然次生林地表枯落物及腐殖质层厚度远小于兴安落叶松林,其分解速率高于针叶林,有机质输入量较高,为微生物活动提供了充分的底物.本研究的土壤  $\text{N}_2\text{O}$  通量显著小于长白山阔叶红松林和东灵山油松林,这是因为随着纬度的升高,土壤微生物活性下降,土壤反硝化抑制作用增强导致的<sup>[15]</sup>.寒温带天然次生林土壤  $\text{CH}_4$  通量显著高于温带阔叶红松原始林,可能是因为随着纬度的升高,土壤通气状况得到提高<sup>[15]</sup>,利于大气中的  $\text{CH}_4$  和  $\text{O}_2$  向土壤中扩散,进而提高土壤  $\text{CH}_4$  氧化能力.本研究土壤  $\text{CH}_4$  通量与暖温带相比较小,主要是因为温度带差异导致的.寒温带火烧迹地天然次生林土壤  $\text{CO}_2$  通量无论从通量变化范围还是均值,均高于长白山和东灵山林地土壤,变化范围略低于温带的妙峰山林地土壤.可能是因为重度火烧迹地土壤有机碳等含量较高<sup>[37]</sup>,为土壤呼吸提供较多底物,导致其出现违背土壤呼吸速率随纬度升高而降低的规律.

## 4 结 论

对大兴安岭地区“五·六大火”后,经30年自然恢复的天然次生林土壤生长季温室气体通量的研究发现:1)天然次生林土壤是  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的源,是  $\text{CH}_4$  的汇.2)土壤温度是该地区温室气体通量的主控因子;大气湿度在昼夜尺度上与土壤  $\text{CO}_2$  通量呈

表 4 国内部分温带森林系统土壤温室气体能量比较  
Table 4 Comparison of greenhouse gases fluxes in forest soil of temperate zone in China

地点 Location	温度带 Climatic zone	森林类型 Forest type	林龄 Age (a)	观测时段 Observation time	N <sub>2</sub> O 通量 N <sub>2</sub> O flux (μg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	CH <sub>4</sub> 通量 CH <sub>4</sub> flux (μg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 通量 CO <sub>2</sub> flux (mg·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
阿木尔 Amul	寒温带 Cold-temperature zone	天然次生林 Natural secondary forest	30	6—9 月	17.8	-68.7	575.8 (274.3~1128.9)
根河 Genhe <sup>[9]</sup>	寒温带 Cold-temperature zone	兴安落叶松林 <i>Larix gmelinii</i> forest	-	6—9 月	9.0	-58.0	429.3
长白山 Changbai Mountains <sup>[36]</sup>	温带 Temperature zone	阔叶红松林 Broad-leaved Korean pine forest	200	-	100.7	-15	15.1~781.8
东灵山 Dongling Mountain <sup>[17]</sup>	暖温带 Warm-temperature zone	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i> forest	-	5—10 月	50	-79	182
妙峰山 Miaofeng Mountain <sup>[3]</sup>	温带 Temperature zone	侧柏、侧柏-油松混交林 <i>Platycladus orientalis</i> 、 <i>P. orientalis</i> - <i>Pinus tabulaeformis</i> mixed forest	4~35	1995.04— 1996.03	-	-	-341.0~1193.6

负相关,在季节尺度上为极显著正相关;土壤湿度在昼夜尺度上 6、7 月与土壤 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 呈负相关,8、9 月呈正相关,季节尺度上二者不相关.3) 该地区生长季土壤温室气体采样时间确定为 9:00—12:00.4) 本研究土壤温室气体通量均高于同为寒温带的兴安落叶松林土壤.将来应在气候变化敏感(如雨季等)时期进行密集观测,并开展长期的监测工作和室内模拟试验,探究土壤水热因子对土壤温室气体的具体影响.这将对大兴安岭地区重度火烧后自然恢复的森林生态系统温室气体排放研究具有重要意义,并为该地区火后植被恢复提供理论依据.

参考文献

[1] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014: 151

[2] Dalal RC, Allen DE. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. *Australian Journal of Botany*, 2008, **56**: 369-407

[3] Sun X-Y (孙向阳), Qiao J (乔杰), Tan X (谭笑). Flux of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in temperate forest soil. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2001, **29**(1): 34-39 (in Chinese)

[4] Sun X-Y (孙向阳). CH<sub>4</sub> emission flux of forest soils in lower mountain area, Beijing. *Soil and Environmental Sciences* (土壤与环境), 2000, **9**(3): 173-176 (in Chinese)

[5] Zhang W, Mo JM, Yu GR, *et al.* Emissions of nitrous oxide from three tropical forests in Southern China in response to simulated nitrogen deposition. *Plant and Soil*, 2008, **306**: 221-236

[6] Wang L-H (王丽红), Xin Y (辛颖), Zhao Y-S (赵雨森), *et al.* Soil microbial biomass and enzyme

activity in the process of vegetation restoration in burned area of Great Xing'an Mountains. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2015, **29**(3): 184-189 (in Chinese)

[7] Wang L-H (王丽红), Xin Y (辛颖), Zou M-L (邹梦玲), *et al.* Plant diversity and biomass distribution of vegetation restoration in burned area of Great Xing'an Mountains. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2015, **37**(12): 41-47 (in Chinese)

[8] Xin Y (辛颖), Zhao Y-S (赵雨森), Chen Q (陈强). Soil physical and chemical properties of different forests in burned area of Daxing'an Mountains after vegetation restoration. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2013, **41**(8): 65-68 (in Chinese)

[9] Ma X-Z (马秀枝), Zhang Q-L (张秋良), Li C-S (李长生), *et al.* Temporal variation of soil greenhouse gases fluxes in a cold-temperate *Larix gmelinii* forest in Inner Mongolia, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(8): 2149-2156 (in Chinese)

[10] Hu T-X (胡同欣), Hu H-Q (胡海清), Sun L (孙龙). Effects of fire disturbances on soil respiration in Dahurian larch (*Larix gmelinii*) forests. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2018, **38**(8): 2915-2924 (in Chinese)

[11] Mu C-C (牟长城), Shi L-Y (石兰英), Sun X-X (孙晓新). Fluxes and controls of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in a marsh wetland of Xiaoxing'an Mountains, northeastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2009, **33**(3): 617-623 (in Chinese)

[12] Pajares S, Bohannan, BJM. Ecology of nitrogen fixing, nitrifying, and denitrifying microorganisms in tropical forest soils. *Frontiers in Microbiology*, 2016, **7**: 1045

[13] Xiao D-M (肖冬梅), Wang M (王淼), Ji L-Z (姬兰柱), *et al.* Variation characteristics of soil N<sub>2</sub>O emission flux in broad-leaved Korean pine forest of Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2004, **23**(5): 46-52 (in Chinese)

[14] Cheng Y, Wang J, Wang SQ, *et al.* Effects of soil mois-



- ture on gross N transformations and  $\text{N}_2\text{O}$  emission in acid subtropical forest soils. *Biology and Fertility of Soils*, 2014, **50**: 1099–1108
- [15] Fu M-J (傅民杰), Wang C-K (王传宽), Wang Y (王颖), *et al.* Effects of climate warming on the  $\text{N}_2\text{O}$  emission from *Larix gmelinii* forest soils at different latitudes during soil thawing period. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20** (7): 1635–1642 (in Chinese)
- [16] Sun X-Y (孙向阳), Xu H-C (徐化成). Emission flux of nitrous oxide from forest soils in Beijing. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2001, **37** (5): 57–63 (in Chinese)
- [17] Du R (杜睿), Huang J-H (黄建辉), Wan X-W (万小伟), *et al.* The research on the law of greenhouse gases emission from warm temperate forest soils in Beijing region. *Environmental Science* (环境科学), 2004, **25** (2): 12–16 (in Chinese)
- [18] Xu C-Q (许翠清), Chen L-X (陈立新), Yan Y-Q (颜永强), *et al.* Seasonal dynamic characteristics of ammonium-nitrogen and nitrate-nitrogen contents in soils in temperate forests. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2008, **36** (10): 19–21 (in Chinese)
- [19] Ding W-X (丁维新), Cai Z-C (蔡祖聪). Effect of temperature on atmospheric  $\text{CH}_4$  oxidation in soils. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2003, **22** (3): 54–58 (in Chinese)
- [20] Bowden RD, Newkirk KM, Rullo GM. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**: 1591–1597
- [21] Ju H (菊花), Shen G-Z (申国珍), Ma M-Z (马明哲), *et al.* Greenhouse gas fluxes of typical northern subtropical forest soils: Impacts of land use change and reduced precipitation. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2016, **40** (10): 1049–1063 (in Chinese)
- [22] Li J (李俊), Tong X-J (同小娟), Yu Q (于强). Methane uptake and oxidation by unsaturated soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2005, **25** (1): 141–147 (in Chinese)
- [23] Castro MS, Steudler PA, Melillo JM, *et al.* Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, **9**: 1–10
- [24] Shukla PN, Pandey KD, Mishra VK. Environmental determinants of soil methane oxidation and methanotrophs. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, **43**: 1945–2011
- [25] Dunfield PF, Topp E, Archambault C, *et al.* Effect of N fertilizers and moisture content on  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes in a humisol: Measurements in the field and intact soil cores. *Biogeochemistry*, 1995, **29**: 199–222
- [26] Dong Y, Peng G, Li J. Spatio-temporal characteristic of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  emission in temperate forest soils. *Acta Geographica Sinica*, 1996, **51**: 120–128
- [27] Steudler PA, Melillo JM, Bowden RD, *et al.* The effects of natural and human disturbances on soil nitrogen dynamics and trace gas fluxes in a Puerto Rican wet forest. *Biotropica*, 1991, **23**: 356–363
- [28] Davidson EA, Janssens IA, Luo YQ. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: Moving beyond  $Q_{10}$ . *Global Change Biology*, 2006, **12**: 154–164
- [29] Yang Q-P (杨庆朋), Xu M (徐明), Liu H-S (刘洪升), *et al.* Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31** (8): 2301–2311 (in Chinese)
- [30] Yang J-Y (杨金艳), Wang C-K (王传宽). Effects of soil temperature and moisture on soil surface  $\text{CO}_2$  flux of forests in northeastern China. *Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2006, **30** (2): 286–294 (in Chinese)
- [31] Zhang H-D (张慧东), Zhou M (周梅), Zhao P-W (赵鹏武), *et al.* Soil respiration of *Larix gmelinii* forest in cool temperate zone. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2008, **44** (9): 142–145 (in Chinese)
- [32] Wang Y-D (王义东), Wang H-M (王辉民), Ma Z-Q (马泽清), *et al.* Review of response mechanism of soil respiration to rainfall. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2010, **34** (5): 601–610 (in Chinese)
- [33] Kang Y-X (康永祥), Xia G-W (夏国威), Liu J-J (刘建军), *et al.* Soil respiration characteristics in the clear-cutting site of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in Xiaolong Mountain in Qinling Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25** (2): 342–350 (in Chinese)
- [34] Bowden RD, Davidson E, Savage K, *et al.* Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, **196**: 43–56
- [35] Zhao H-L (赵哈林), Li Y-Q (李玉强), Zhou R-L (周瑞莲). Soil respiration rates and its relation with environmental factors in Horqin Sand Land. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30** (8): 1972–1980 (in Chinese)
- [36] Dang X-S (党旭升), Cheng S-L (程淑兰), Fang H-J (方华军), *et al.* The controlling factors and coupling of soil  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes in a temperate needle-broadleaved mixed forest. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35** (19): 6530–6540 (in Chinese)
- [37] Ren Q-S (任清胜). Effects of Burning on Organic Carbon and Black Carbon in Soil Aggregates of Natural *Larix gmelinii* Forests in Great Xing'an Mountains. Master Thesis. Harbin: Northeast Forestry University, 2016 (in Chinese)

作者简介 梁东哲,男,1993年生,硕士研究生.主要从事水土保持及生态修复研究. E-mail: 1325551312@qq.com

责任编辑 张凤丽

梁东哲, 赵雨森, 辛颖. 大兴安岭重度火烧迹地天然次生林土壤温室气体通量及其影响因子. 应用生态学报, 2019, **30** (3): 777–784

Liang D-Z, Zhao Y-S, Xin Y. Soil greenhouse gases fluxes and the affecting factors of natural secondary forest from seriously burned area in Greater Khingan Mountains, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, **30** (3): 777–784 (in Chinese)