

DOI: 10.5846/stxb201809111952

梁东哲, 赵雨森, 曹杰, 辛颖. 不同恢复方式下大兴安岭重度火烧迹地林地土壤温室气体通量. 生态学报, 2019, 39(21): - .

Liang D Z, Zhao Y S, Cao J, Xin Y. Greenhouse gas emissions from woodland soils in a severely burned area under different restoration methods in the Greater Khingan Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

不同恢复方式下大兴安岭重度火烧迹地林地土壤温室气体通量

梁东哲, 赵雨森, 曹杰, 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不同恢复方式下林地土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放特征及其影响因素, 采用静态箱/气相色谱法, 在 2017 年生长季(6 月—9 月)对 3 种恢复方式(人工更新、天然更新和人工促进天然更新)林地土壤温室气体 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 通量进行了原位观测。研究表明:(1)3 种恢复方式林地土壤在生长季均为大气 CO_2 、 N_2O 的源, CH_4 的汇; 生长季林地土壤 CO_2 排放通量大小关系为人工促进天然更新($634.40 \pm 246.52 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) > 人工更新($603.63 \pm 213.22 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) > 天然更新($575.81 \pm 244.12 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), 3 种恢复方式间无显著差异; 人工更新林地土壤 CH_4 吸收通量显著高于人工促进天然更新; 天然更新林地土壤 N_2O 排放通量显著高于其他两种恢复方式。(2)土壤温度是影响 3 种恢复方式林地土壤温室气体通量的关键因素; 土壤水分仅对人工更新林地土壤 N_2O 通量有极显著影响($P < 0.01$); 3 种恢复方式林地土壤 CO_2 通量与大气湿度具有极显著的响应($P < 0.01$); 土壤 pH 仅与天然更新林地土壤 CO_2 通量显著相关($P < 0.05$); 土壤全氮含量仅与人工促进天然更新林地土壤 CH_4 通量显著相关($P < 0.05$)。(3)基于 100 年尺度, 由 3 种温室气体计算全球增温潜势得出, 人工促进天然更新($1.83 \times 10^4 \text{ kg CO}_2 \text{ hm}^{-2}$) > 人工更新($1.74 \times 10^4 \text{ kg CO}_2 \text{ hm}^{-2}$) > 天然更新($1.67 \times 10^4 \text{ kg CO}_2 \text{ hm}^{-2}$)。(4)阿木尔地区林地土壤年生长季 CO_2 和 N_2O 排放量为 $8.85 \times 10^6 \text{ t}$ 和 $1.88 \times 10^2 \text{ t}$, CH_4 吸收量为 $1.05 \times 10^3 \text{ t}$ 。

关键词:火烧迹地; 不同恢复方式; 林地土壤; 温室气体; 全球增温潜势

Greenhouse gas emissions from woodland soils in a severely burned area under different restoration methods in the Greater Khingan Mountains

Liang Dongzhe, Zhao Yusen, Cao Jie, Xin Ying*

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

Abstract: Global climate change is the focus of humanity's attention. Greenhouse gases (GHG) are a crucial element of this focus. Forests are important for contributing to the maintenance of ecological balance, and forest soils are an important source and sink of GHG to the atmosphere. The study of the GHG from forest soil and its influence factors could assist the deceleration of global warming is highly significant. The Greater Khingan Mountains are often affected by fire and the restoration of severely degraded ecosystems has always been a focus of experts' attention. In 1987, the forest resources were severely damaged in the Greater Khingan Mountains and owing to short growth seasons and cold weather, the local ecological environment had difficulty recovering. The restoration methods affected the soil properties and vegetation of these degraded ecosystems. In order to know the effects of different restoration methods on woodland soil GHG (CO_2 , CH_4 and N_2O) emissions, we used a gas static chamber-GC technique to observe the soil GHG in situ from June to September in 2017. The results showed that in the growing season, the forest soil of three restoration methods was the source of atmospheric CO_2 and

基金项目: 重度退化生态系统恢复与重建关键技术研究示范(2011BAD08B02)资助

收稿日期: 2018-09-11; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xinying2004@126.com

N_2O , and the sink of CH_4 . In the growing season, the woodland soil CO_2 emission flux of artificial promotion of natural regeneration ($634.40 \pm 246.52 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) was greater than artificial regeneration ($603.63 \pm 213.22 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) and natural regeneration ($575.81 \pm 244.12 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). There was no significant difference between the three recovery methods. The woodland soil CH_4 uptake flux of the artificial regeneration was significantly higher than that of the artificial promotion of natural regeneration. The emissions of N_2O from the woodland soil of natural regeneration were significantly higher than the other two restoration methods. During the growing season, the woodland soil greenhouse gas fluxes of the three vegetation recovery methods were markedly different. Soil temperature was the key factor affecting the woodland soil greenhouse gas fluxes of the three vegetation recovery methods. Soil moisture had a significant effect on N_2O fluxes of artificially regenerated soils ($P < 0.01$). The CO_2 flux of woodland soil had a very significant response to atmospheric humidity. The soil pH value was significantly correlated only with the CO_2 flux from the naturally regenerated woodland soil ($P < 0.05$) and the total nitrogen content in the soil was only significantly related to the CH_4 flux of woodland soil from the artificial promotion of natural regeneration ($P < 0.05$). Based on the centennial scale, we calculated the global warming potential (GWP) from three greenhouse gases in three recovery modes. The contribution potential of greenhouse effects in the artificial promotion of natural regeneration was $1.83 \times 10^4 \text{ kg CO}_2\text{hm}^{-2}$, and in artificial and natural regeneration were 1.74×10^4 and $1.67 \times 10^4 \text{ kg CO}_2\text{hm}^{-2}$, respectively. The CO_2 and N_2O emissions of forest soils in the Amuer region were $8.85 \times 10^6 \text{ t}$ and $1.88 \times 10^2 \text{ t}$ and the absorption of CH_4 was $1.05 \times 10^3 \text{ t}$ in the annual growth season. These results provide a scientific basis for the restoration and reconstruction of degraded ecosystems in the Greater Khingan Mountains.

Key Words: burned area; different restoration methods; woodland soils; greenhouse gases; global warming potential

自 1750 年以来,温室气体 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的浓度均已大幅增加,分别为 40%、150% 和 20%^[1],目前仍以 0.4%、0.6% 和 0.3% 的速率增长^[2]。森林作为陆地生态系统的主体,占全球陆地面积的 27.7%^[3],是维持生态平衡的重要保障。森林土壤是大气温室气体重要的源和汇,排放到大气中的 CO_2 量每年约为 $2.51 \times 10^3 \text{ g/m}^2$ ^[4],每年吸收的 CH_4 约为 $9.16 (\pm 3.84) \text{ Tg}$ ^[5],同时排放的 N_2O 约为 $2.4\text{—}5.7 \text{ Tg/a}$ ^[6-7]。因此,研究森林土壤温室气体排放规律及其影响因子,对减缓温室气体排放具有重要意义。

大兴安岭林区是我国面积最大的林区,是我国东北平原重要的生态屏障,具有特殊的生态地位。同时大兴安岭林区又是我国森林火灾频发区和“东北亚”环境敏感区^[8],1965—2010 年总过火林地面积为 $3.4 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中重度火烧面积占到了 43.91%^[9]。1987 年的“五·六”大火严重破坏了当地的生态环境、动植物资源和森林后备资源,使得该地区森林覆盖率从 76% 下降至 61.5%,重度与中度火烧迹地生物多样性消失殆尽^[10]。因其位于我国最北部,生长季较短,属于寒温带季风气候区,受大陆季风气候的影响,春、秋两季干旱少雨,干冷气候致使灾后土壤结构长期恶化^[11],森林资源恢复十分困难。植被恢复初期,重度火烧迹地形成大面积山杨(*Populus davidian*)白桦(*Betula platyphylla*)次生林,有樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)母树地段幼苗大量产生,落叶松(*Larix gmelinii*)迹地未更新^[12]。现经 30 a 的植被恢复,已形成大面积的天然次生林和人工林。

火烧迹地森林生态系统功能的恢复是诸多专家学者关注的焦点,大家希望通过生物、生态及工程技术措施,使其尽快恢复到一定的或原有的甚至更高的水平^[13]。目前,该地区火烧迹地的研究主要有植被恢复模式的探讨^[14]及不同恢复方式^[15]和恢复过程中土壤性质^[16-17]等研究,对于火烧迹地土壤温室气体通量的研究较少,不同恢复措施下的土壤温室气体通量的研究未见报道。本研究选取 3 种恢复方式的林地土壤为研究对象,探讨 3 种恢复方式下林地土壤 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 通量的生长季变化规律,以评估不同恢复方式林地土壤温室气体的排放潜力,为大兴安岭地区制定碳排放决策和火烧迹地生态修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地区位于大兴安岭地区阿木尔林业局(122°38′30″—124°15′05″E,52°15′03″—53°33′15″N,平均海拔500—800 m),东西宽约50 km,南北长约160 km,边境线长约74 km,为1987年“五·六”大火重灾区。属于寒温带大陆性气候,夏季短暂炎热,冬季漫长寒冷。年均温-2.6℃,最高气温40℃;年均降水量429—527 mm,年降雨多集中于7—8月,降雪期一般从9月下旬开始至次年5月上旬。全年无霜期95 d左右,冰封期180—200 d。土壤以棕色针叶林土为主,另有沼泽土和泥炭土。土壤砾石含量较大,土层普遍较薄。根据实地踏查,在大兴安岭地区阿木尔林业局选择1987年重度火烧后分别经过人工更新、天然更新和人工促进天然更新的3种林地土壤为研究对象,于每种林地内分别呈“品”字形设置3块20 m×30 m标准样地用于林分调查,每个标准样地内设置1个气体采样点。所选林地在1987年“五·六”大火重度火烧前均为落叶松林,人工更新为1989年在重度火烧迹地上栽植落叶松,造林时苗龄为2 a,每公顷3300株;天然更新林地在恢复过程中未受任何人为活动干扰;人工促进天然更新是在天然更新的基础上穴状整地,促进植被恢复。样地基本情况见表1。

1.2 样品采集

2017年6月3日开始至9月21日止,采用静态箱/气相色谱法每隔10 d对3种恢复方式林地土壤进行温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)通量原位观测,于每个采样日9:00—11:00时段对气体进行采集^[18]。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,并分别注入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CO₂、CH₄和N₂O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(ZDR-20T)和大气温湿度(TES-1360A)。

于观测期每月下旬在每个底座周围2 m附近采用梅花点采样法采集0—20 cm层土壤样品,风干、研磨和过筛后将每个样地土壤样品等质量混合,测定土壤基本性质。土壤pH采用pH计水浸液测定法;土壤有机碳含量使用元素分析仪(vario TOC,德国Elementar)测定;土壤全氮含量使用连续流动分析仪(AA3,德国SEAL)测定。

表1 样地基本情况
Table 1 Basic information of plots

恢复方式 Recovery mode	乔木 Macrophanerophytes				灌木 Shrub			草本 Herb
	树高 Height/m	胸径 Diameter at breast height/cm	郁闭度 Crown density	主要树种 Main tree species	株高 Height/cm	盖度 Coverage/%	主要灌木 Main herb specise	
天然更新 Natural regeneration	6.18	5.77	0.6	白桦 <i>Betula platyphylla</i> 日本桤木 <i>Alnus japonica</i>	27.83	63	杜香 <i>Ledum palustre</i> 红莓苔子 <i>Vaccinium oxycoccos</i> 鹿蹄草 <i>Pyrola calliantha</i>	小叶章 <i>Deyeuxia angustifolia</i>
人工更新 Artificial regeneration	12.10	14.55	0.8	落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	22.50	56	蔓越橘 <i>Oxycoccos</i> 连翘 <i>Forsythia suspense</i> . 鹿蹄草 <i>Pyrola calliantha</i>	小叶章 <i>Deyeuxia angustifolia</i> 舞鹤草 <i>Maianthemum bifolium</i>
人工促进天然更新 Artificial promotion of natural regeneration	6.32	4.61	0.5	白桦 <i>Betula platyphylla</i> 山杨 <i>Populus davidian</i> . 落叶松 <i>Larix gmelinii</i> 樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	30.08	82	杜香 <i>Ledum palustre</i> 笃斯越桔 <i>Vaccinium uliginosum</i> 鹿蹄草 <i>Pyrola calliantha</i>	小叶章 <i>Deyeuxia angustifolia</i> , 地榆 <i>Sanguisorba officinalis</i>

1.3 温室气体计算

用下式计算温室气体通量:

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

式中: F_i 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。当 F_i 为正值时表示排放, F_i 为负值时表示吸收。

生长季温室气体通量的估算方法为 6—9 月各旬平均排放通量 $\times 10$ 加和^[19]。

本研究选择 100 年尺度来计算土壤温室气体排放的全球增温潜势 (GWP):

$$\text{GWP} = 25 \times (\text{CH}_4) + 298 \times (\text{N}_2\text{O}) + 1 \times (\text{CO}_2)$$

式中: 25 和 298 分别为 CH_4 和 N_2O 在百年尺度上相对于 CO_2 的 GWP 倍数^[20]。

1.4 数据处理

用 Excel 2010 对数据进行初步整理, 采用 SPSS 18.0 进行统计分析, 利用邓肯多重比较 (Duncan) 分析不同恢复方式数据均值组间差异, 用 Pearson 法分析 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量与环境因子之间的相关性。利用 Origin 2015 作图。图表中数据为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 不同恢复方式对环境因子的影响

由图 1 可见, 3 种恢复方式环境因子变化规律基本一致。土壤温度差异不大, 人工更新林内土壤温度略高于其他 2 种恢复方式。人工更新林内大气湿度较天然更新和人工促进天然更新分别高 5.69% 和 7.23% (表 2)。而在生长季人工更新林地土壤 5 cm 湿度显著低于其他 2 种恢复方式, 天然更新和人工促进天然更新林地土壤湿度较为接近, 后者土壤湿度最高。

3 种恢复方式林地土壤 pH 生长季变化规律一致, 6 月 pH 最小, 7 月达到生长季最大值 (图 1d), 人工促进天然更新林地土壤 pH 显著高于其他 2 种恢复方式 (表 2)。不同恢复方式对林地土壤有机碳含量影响显著 (表 2), 人工更新较天然更新显著提高 53.37%, 天然更新较人工促进天然更新显著 ($p < 0.01$) 提高 105.59%。生长季 3 种恢复方式林地土壤全氮变化规律基本一致, 均与 7 月达到生长季最小值 (图 1f), 3 种恢复方式林地土壤全氮含量差异显著 (表 2)。

恢复方式的不同影响林分结构和植被类型, 进而对土壤湿度和土壤理化性质产生显著影响, 但对大气湿度与土壤温度影响较小。

2.2 恢复方式对林地土壤温室气体通量的影响

2.2.1 N_2O 通量

生长季 3 种恢复方式下林地土壤均表现为 N_2O 的源。排放通量分别为: 天然更新 ($17.81 \pm 15.12 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)^[21] > 人工促进天然更新 ($10.80 \pm 7.96 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) > 人工更新 ($10.37 \pm 5.52 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)。人工更新和人工促进天然更新较天然更新林地土壤 N_2O 排放通量分别下降了 41.77% 和 39.36%, 说明人为干预会一定程度降低土壤 N_2O 的排放。天然更新林地土壤 N_2O 通量显著高于人工更新和人工促进天然更新, 人工更新与人工促进天然更新之间无显著差异 (表 2)。

生长季 3 种恢复方式林地土壤 N_2O 排放通量呈明显单峰变化, 峰值均出现在 8 月份, 表现为: 天然更新 ($58.43 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) > 人工促进天然更新 ($29.47 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) > 人工更新 ($26.87 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)。6 月和 9 月林地土壤 N_2O 排放通量较低。天然更新林地土壤排放通量峰值出现在 8 月中旬, 人工更新和人工促进天然更新峰值均出现在 8 月下旬。

2.2.2 CH_4 通量

生长季 3 种恢复方式林地土壤均表现为 CH_4 的汇。天然更新、人工更新和人工促进天然更新林地土壤 CH_4 通量分别为 ($-68.69 \pm 27.79 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)^[21]、($-81.40 \pm 23.67 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)、($-65.55 \pm 21.26 \mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$)。其中人工更新林地土壤 CH_4 吸收通量较天然更新和人工促进天然更新分别高出 18.50% 和 24.18%, 说明人工更新林地土壤对大气 CH_4 的吸收能力较好, 天然更新较人工促进天然更新高 4.79%。人工更新林地土壤 CH_4 吸

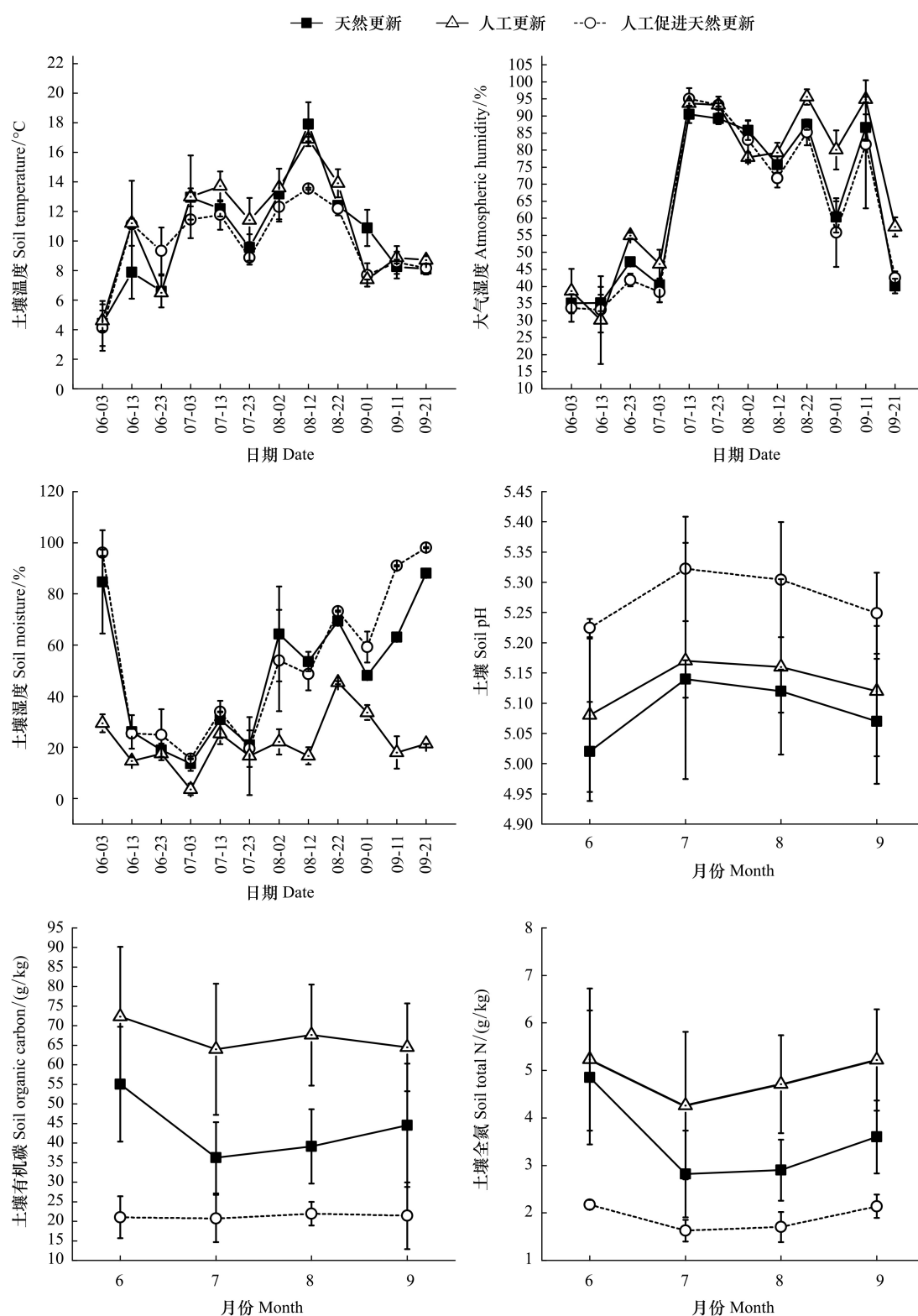


图1 生长季3种恢复方式林地环境因子变化

Fig.1 Changes in environmental factors for the three recovery modes during the growing season

收通量显著高于人工促进天然更新,天然更新与其他2种更新方式无显著差异(表2)。

人工更新和天然更新林地土壤 CH_4 吸收通量均表现为双峰变化,但峰值出现时间略有不同:天然更新林地土壤 CH_4 吸收峰值两次分别出现在6月下旬和8月上旬,人工更新两次峰值较天然更新峰值均有滞后现象

(7 月和 8 月中旬)。人工促进天然更新生长季林地土壤 CH₄ 吸收通量变化表现为单峰变化, 于 8 月上旬和天然更新一起出现吸收峰值。3 种恢复方式林地土壤 CH₄ 吸收通量极大值均出现在 8 月, 6 月和 9 月整体较低。

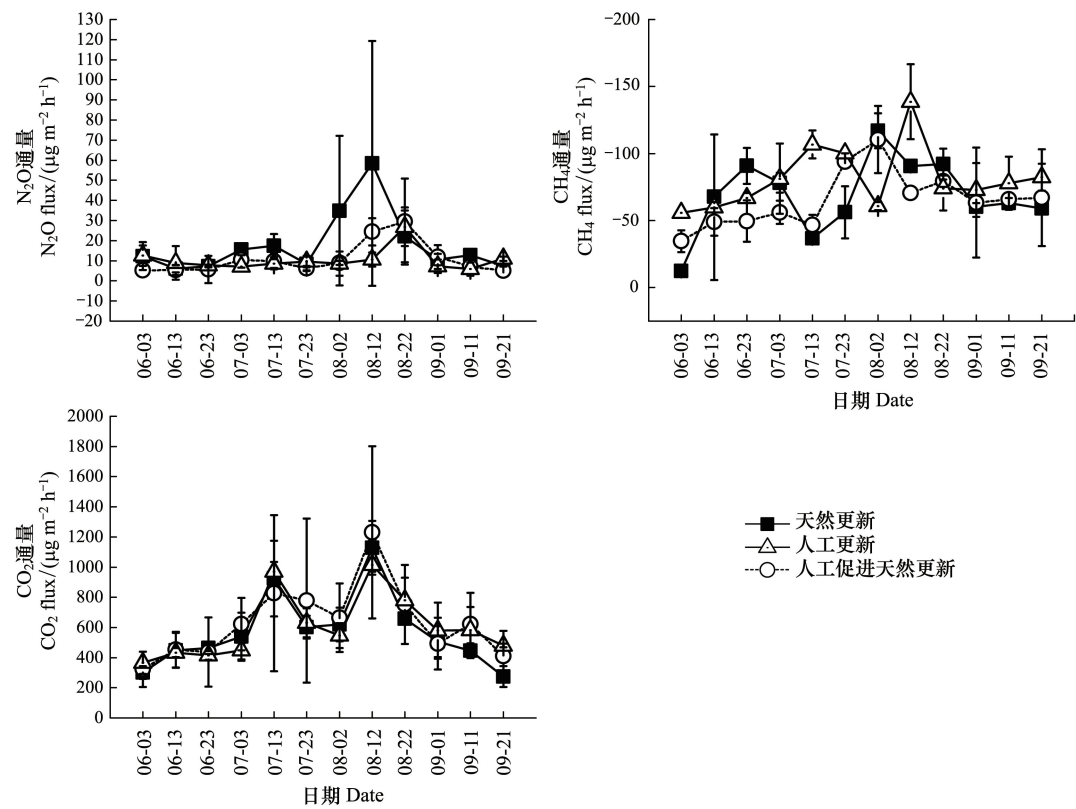


图 2 生长季 3 种恢复方式林地土壤温室气体通量变化

Fig.2 Changes of GHG fluxes in woodland soil for the three recovery modes during the growing season

2.2.3 CO₂ 通量

生长季 3 种恢复方式林地土壤均表现为 CO₂ 的源, 平均通量分别为: 人工促进天然更新 (634.40±246.52 mg m⁻² h⁻¹) > 人工更新 (603.63±213.22 mg m⁻² h⁻¹) > 天然更新 (575.81±244.12 mg m⁻² h⁻¹)^[21]。人工更新和人工促进天然更新林地土壤较天然更新 CO₂ 排放通量分别提高 4.83% 和 10.17%, 生长季 3 种恢复方式林地土壤 CO₂ 排放通量差异不显著 (表 2)。

表 2 3 种恢复方式林地土壤温室气体通量和环境因子平均值多重比较

Table 2 Duncan's multiple-range test for the means of fluxes of GHG from woodland soil and environmental factors for the three recovery modes

恢复方式 Recovery mode	N ₂ O 通量 N ₂ O Flux/ (μg m ⁻² h ⁻¹)	CH ₄ 通量 CH ₄ Flux/ (μg m ⁻² h ⁻¹)	CO ₂ 通量 CO ₂ Flux/ (mg m ⁻² h ⁻¹)	大气湿度 Atmospheric moisture/%	土壤温度 Soil temperature/°C	土壤湿度 Soil moisture/%	pH	土壤容重 Bulk density /(g/m ³)	有机碳 Organic carbon /(g/kg)	全氮 Total N /(g/kg)
天然更新 Natural regeneration	17.81±15.1a	-68.69±27.8ab	575.81±244.1a	64.49±23.5a	10.36±3.6a	48.72±26.0a	5.09±0.0a	1.05±0.1a	43.75±13.1a	3.54±1.2a
人工更新 Artificial regeneration	10.37±5.5b	-81.40±23.7a	603.63±213.2a	70.18±23.6a	10.82±3.6a	22.02±10.6b	5.13±0.1a	0.95±0.1a	67.10±13.2b	4.86±1.2b
人工促进天然更新 Artificial promotion of natural regeneration	10.80±8.0b	-65.55±21.3b	634.40±246.5a	62.95±24.4a	9.93±2.6a	53.29±30.5a	5.28±0.1b	1.73±0.1b	21.28±5.2c	1.91±0.3c

a、b 表示显著性差异组别 (α=0.05)

不同恢复方式下林地土壤生长季 CO₂ 通量变化规律基本一致, 7 月中旬和 8 月中旬各出现一次峰值, 生

长季初末期(6月和9月)林地土壤 CO_2 排放通量较低。7月中旬峰值大小为:人工更新($970.26 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)>天然更新($924.28 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)>人工促进天然更新($826.48 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)。8月中旬峰值大小表现为:人工促进天然更新($1231.60 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)>天然更新($1128.89 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)>人工更新($1014.11 \text{ mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$)。

2.3 温室气体通量与环境因子相关性分析

由表3可见,生长季3种恢复方式林地土壤 CO_2 通量与5 cm 土壤温度和林内大气湿度均表现为极显著正相关,与土壤湿度相关性不显著。林地土壤 N_2O 通量在天然更新^[21]和人工促进天然更新林地均与5 cm 层土壤温度极显著正相关,但与林内大气湿度和土壤湿度相关性不强;人工更新林地土壤 N_2O 通量与土壤温度显著正相关($P<0.05$),与土壤湿度极显著正相关($P<0.01$)。3种恢复方式林地土壤 CH_4 吸收通量均与土壤湿度相关性不显著,天然更新^[21]和人工更新林地土壤 CH_4 吸收通量与5 cm 土壤温度极显著正相关,天然更新与大气湿度相关性不强。土壤 pH 与天然更新林地土壤 CO_2 通量显著正相关,土壤全氮与人工促进天然更新林地土壤 CH_4 吸收通量显著负相关。

表3 3种恢复方式林地土壤温室气体通量与环境因子之间的关系
Table 3 Relationships between GHG fluxes and the environmental factors

恢复方式 Recovery mode	温室气体 Greenhouse gas	大气湿度 Atmospheric moisture	土壤温度 Soil temperature	土壤湿度 Soil moisture	pH	土壤有机碳 Soil organic carbon	土壤全氮 Soil total N
天然更新	N_2O	0.260	0.567 **	0.157	0.110	-0.154	-0.282
Natural regeneration	CH_4	-0.248	-0.510 **	0.133	-0.295	0.230	0.363
	CO_2	0.541 **	0.798 **	-0.227	0.583 *	-0.473	-0.548
人工更新	N_2O	0.221	0.341 *	0.703 **	-0.076	0.221	0.148
Artificial regeneration	CH_4	-0.428 **	-0.506 **	0.143	0.135	-0.150	-0.064
	CO_2	0.635 **	0.650 **	0.156	0.148	-0.045	-0.183
人工促进天然更新	N_2O	0.290	0.521 **	-0.050	0.439	0.006	-0.558
Artificial promotion of	CH_4	-0.441 **	-0.268	-0.027	-0.503	0.041	0.623 *
natural regeneration	CO_2	0.434 **	0.531 **	-0.160	0.125	0.253	-0.382

* $P<0.05$; ** $P<0.01$

2.4 不同恢复方式对温室气体源/汇的影响及阿木尔地区温室气体排放量估算

结合全球变暖潜势值进行分析,在100年尺度上,1分子的 CH_4 排放到大气中相当于25分子 CO_2 的辐射影响,同时1分子的 N_2O 的辐射效果是 CO_2 的298倍^[22]。天然更新、人工更新和人工促进天然更新林地土壤生长季温室效应的贡献潜力分别为 1.67×10^4 、 1.74×10^4 和 $1.83\times 10^4 \text{ kg CO}_2\text{hm}^{-2}$ 。3种恢复方式中天然更新林地土壤 GWP 值最小,较人工更新和人工促进天然更新分别下降4.02%、8.74%。这可能是因为人为干预后,林地结构得到优化,林内生物量增多,土壤结构及微生物种类和数量得到改善,温室气体累计排放量及增温潜势高于天然更新。同时,天然更新、人工更新和人工促进天然更新林地土壤 GWP 组成结构(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)依次为99.39%、0.30%、0.91%,99.86%、0.33%、0.48%和99.75%、0.26%、0.50%, CO_2 均占绝对优势。因此大兴安岭地区重度火烧迹地生长季3种恢复方式林地土壤的温室效应贡献者主要是 CO_2 。

表4 3种恢复方式林地土壤温室气体累计排放通量及全球增温潜势
Table 4 Average emission fluxes and GWP of GHG in three recovery mode

恢复方式 Recovery mode	$\text{CO}_2/(\text{kg}/\text{hm}^2)$	$\text{CH}_4/(\text{kg}/\text{hm}^2)$	$\text{N}_2\text{O}/(\text{kg}/\text{hm}^2)$	$\text{GWP}/(\text{kg CO}_2\text{hm}^{-2})$
天然更新 Natural regeneration	1.66×10^4	-1.98	0.51	1.67×10^4
人工更新 Artificial regeneration	1.74×10^4	-2.34	0.30	1.74×10^4
人工促进天然更新 Artificial promotion of natural regeneration	1.83×10^4	-1.89	0.31	1.83×10^4

阿木尔林业局所辖林区自“五·六大火”重度火烧后,现有植被均为人工林或天然次生林。因此对不同恢复方式林地土壤温室气体生长季排放量进行平均计算得出:生长季林地土壤 CO_2 排放量为 17.42 t/hm^2 ; N_2O 排放通量为 0.37 kg/hm^2 ; CH_4 吸收量为 2.07 kg/hm^2 。据阿木尔林业局林业调查显示所辖有林地 $50.80 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 估算,阿木尔林业局所辖林地土壤每年生长季 CO_2 排放量约为 $8.85 \times 10^6 \text{ t}$, N_2O 释放量约为 $1.88 \times 10^2 \text{ t}$, CH_4 吸收量约为 $1.05 \times 10^3 \text{ t}$ 。

3 讨论

3.1 不同恢复方式对林地土壤 N_2O 排放的影响

天然更新林地土壤生长季 N_2O 排放通量显著高于其他 2 种恢复方式,人工更新最小,均高于同纬度落叶松林生长季土壤 N_2O 通量^[18]。这种差异产生的原因可能与不同恢复方式改变林地小气候、土壤理化性质及地上有机物和无机养分的输入有关。天然更新为阔叶林,人工促进天然更新为针阔混交林,人工更新为针叶林,阔叶林的凋落物数量及其分解速率高于人工林,有机质输入量较高,利于土壤 N_2O 的产生^[23-24];同时天然更新林分较人工促进天然更新郁闭度高,对林下植被遮阴作用好,也利于 NO_3^- 和 NO_2^- 的积累,从而促进 N_2O 的排放^[20,25],天然更新和人工更新相比,虽然遮阴效果较差,但林下生物量大于人工更新^[26],光合作用固定的 C 比人工更新多,可为根系呼吸和根系分泌活动提供更多能源,从而为 N_2O 产生细菌提供丰富底物,有效促进 N_2O 的排放^[19]。多种因素综合使得生长季天然更新林地土壤 N_2O 排放通量较人工更新和人工促进天然更新分别提高了 83.61% 和 64.91%。

相关分析发现,天然更新和人工促进天然更新林地土壤 N_2O 排放通量与土壤温度具有较好的相关性,与土壤湿度相关性不强,这与马秀枝^[18] 和杜睿^[27] 等的研究结果一致。人工更新林地土壤 N_2O 通量仅与土壤湿度极显著相关,即 N_2O 排放通量的大小主要取决于土壤湿度^[28]。造成这种差异的原因可能因为人工更新林地土壤湿度显著低于其他 2 种恢复方式(表 2),因此在土壤水分状况良好的条件下土壤温度是土壤 N_2O 排放的主控因子;而在土壤湿度较低时,土壤 N_2O 排放受土壤水分状况影响较大。

3.2 不同恢复方式对林地土壤 CH_4 吸收的影响

森林土壤对 CH_4 的吸收是土壤中 CH_4 产生与消耗过程的综合结果,受底物有效性、温度、水分状况、养分、植被类型及土壤 pH 等环境因子的影响^[29]。天然更新林地土壤 CH_4 平均吸收通量与其他 2 种恢复方式无显著差异,人工更新显著高于人工促进天然更新(表 3),均高于同纬度落叶松林^[18]。土壤容重的大小关系正好相反:人工促进天然更新 > 天然更新 > 人工更新(表 2)。这是因为土壤容重的增加,会抑制大气中 CH_4 向土壤扩散速率和降低土壤中 O_2 浓度从而致使土壤中 CH_4 的氧化速率降低^[30-31],而人工更新土壤结构较为疏松,通气性较好,适合 CH_4 氧化菌的生长、代谢和繁殖^[32]。本研究发现土壤有机碳含量较高时会促进土壤吸收 CH_4 ,反之则与土壤 CH_4 吸收通量负相关(表 3),且生长季 3 种恢复方式下林地土壤 CH_4 通量的大小关系与土壤有机碳大小关系一致(表 2)。有研究发现天然更新的次生林土壤 CH_4 吸收通量要高于人工更新的人工林^[23],这与本研究结论相反,可能是底物有效性及植被类型的不同和土壤理化性质差异导致的。

本研究中人工更新和天然更新林地土壤 CH_4 吸收通量与土壤温度具有较高的相关性,人工更新和人工促进天然更新与大气湿度具有较高相关性,3 种恢复方式均与土壤湿度不相关。可能因为本研究区观测期间水热同期,温度对 CH_4 氧化菌的影响大于水分对其的影响,水分对 CH_4 氧化菌的影响可能在生长季不同时期有不同的作用^[21]。有研究发现土壤全氮含量是影响土壤 CH_4 通量的主要因子^[33],而本研究土壤全氮仅与人工促进天然更新林地土壤 CH_4 通量显著相关,可能是因为该恢复方式土壤全氮含量显著低于其他 2 种恢复方式,因而表现出显著的相关性(表 3)。造成 3 种恢复方式林地土壤 CH_4 通量差异显著的原因除水热因子外,可能与林型、土壤理化状况、地表植被的生长及凋落物厚度有关^[34]。

3.3 不同恢复方式对林地土壤 CO₂排放的影响

大兴安岭重度火烧迹地 3 种恢复方式林地土壤 CO₂排放通量季节变化特征一致,2 次峰值均出现在土壤水热状况较好时期。雨季时,温度伴随降雨略有降低,加之降雨会抑制湿润土壤 CO₂排放通量^[35],导致土壤 CO₂排放通量于 7 月中旬至 8 月中旬之间略有下降,使得雨季前后出现两次峰值。有研究发现土地利用方式的改变会导致土壤相关微环境及其生理生化过程发生改变,从而影响土壤中温室气体的产生与排放^[36]。人工促进天然更新林地土壤 CO₂平均通量最大,天然更新最小,3 者均高于同纬度落叶松林生长季土壤 CO₂通量^[18]。造成 3 种恢复方式林地土壤 CO₂通量差异可能是由于不同森林类型之间植物根生物量、土壤微生物生物量、土壤有机质和容重的差异造成的^[37]。本研究发现,人工更新生长季林地土壤 CO₂通量大于天然更新,这与菊花等的研究结果一致^[23],这可能是与人为干预导致底物数量、植被生长特性和土壤理化性质同天然更新之间存在差异有关。生长季 3 种恢复方式林地土壤 CO₂通量差异不显著,可能是因为火烧发生 7 年后植被基本恢复,土壤 CO₂通量已回到火灾发生前的水平^[38];也可能是观测时间过短造成的短期效应^[39]或生态系统的特殊性^[40]等原因造成的。

相关分析表明,3 种恢复方式林地土壤温度与土壤 CO₂排放通量均呈极显著正相关,土壤温度通过影响土壤生物的群落结构和生物量并调控底物的供应状况^[41],进而影响到土壤 CO₂的通量。3 种恢复方式林地土壤湿度与 CO₂通量未发现显著相关性,可能是因为自然状态下土壤水分状况并非该地区土壤 CO₂排放的限制性因子^[42]。但其与大气湿度具有极显著的相关性,这与沙地土壤研究结果一致^[43],同时由于 3 种恢复方式林内大气湿度差异不显著,这或许也是 3 种恢复方式下林地土壤 CO₂排放通量差异不显著的原因。土壤 pH 会通过影响土壤化学反应和土壤酶活性来影响土壤呼吸速率^[44],本研究仅天然更新林地土壤 CO₂通量与土壤 pH 显著相关,可能因为该恢复方式土壤 pH 较低(表 2),对土壤呼吸速率影响显著。

4 结论

通过对不同恢复方式下大兴安岭重度火烧迹地林地土壤温室气体生长季通量研究发现,经过 30 a 植被恢复,3 种林地土壤均是大气 CO₂和 N₂O 的“源”,CH₄的“汇”。3 种温室气体通量具有明显季节动态。土壤温度是影响土壤温室气体通量的关键因子;土壤湿度仅对人工更新林地土壤 N₂O 有极显著影响;温室气体通量对大气湿度的响应因林型和气体类型而异;土壤 pH 仅与天然更新林地土壤 CO₂通量显著相关;土壤全氮含量仅与人工促进天然更新林地土壤 CH₄通量显著相关。恢复方式对林地土壤 CH₄和 N₂O 通量影响显著,对土壤 CO₂通量影响不显著。基于 100 a 时间尺度,受到人工干预(人工更新和人工促进天然更新)的林地土壤具有更高的温室气体排放潜力。阿木尔林业局所辖林区生长季林地土壤 CO₂、N₂O 释放量分别为 8.85×10^6 t、 1.88×10^2 t,CH₄吸收量为 1.05×10^3 t。将来应深入探讨导致该地区土壤温室气体通量差异的驱动性因子,将对准确评估火烧迹地植被恢复后土壤温室气体通量具有重要意义,为该地区退化生态系统修复与重建提供理论依据。

参考文献(References):

- [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, Switzerland: IPCC, 2014.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [3] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Global Forest Resources Assessment 2015: How are the World's Forests Changing? Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015.
- [4] 孙向阳, 乔杰, 谭笑. 温带森林土壤中的 CO₂排放通量. 东北林业大学学报, 2001, 29(1): 34-39.
- [5] Yu L J, Huang Y, Zhang W, Li T T, Sun W J. Methane uptake in global forest and grassland soils from 1981 to 2010. Science of the Total Environment, 2017, 607-608: 1163-1172.
- [6] Davidson E A, Kanter D. Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions. Environmental Research Letters, 2014, 9(10): 105012.

- [7] 王会来, 刘娟, 姜培坤, 周国模, 李永夫, 吴家森. 营林措施对森林土壤 N_2O 排放影响的研究进展. 土壤学报, 2018, 55(1): 18-30.
- [8] 周梅, 余新晓, 冯林, 王林和, 那平山. 大兴安岭林区冻土及湿地对生态环境的作用. 北京林业大学学报, 2003, 25(6): 91-93.
- [9] 胡海清, 魏书精, 孙龙. 1965—2010 年大兴安岭森林火灾碳排放的估算研究. 植物生态学报, 2012, 36(7): 629-644.
- [10] 罗菊春. 大兴安岭森林火灾对森林生态系统的影响. 北京林业大学学报, 2002, 24(5/6): 101-107.
- [11] DeBano L F, Neary D G, Ffolliott P F. Fire's Effects on Ecosystems. New York: John Wiley and Sons, 1998.
- [12] 罗菊春. “五·六”森林大火对生态环境与植物群落的影响. 北京林业大学学报, 1990, 12(S2): 133-136.
- [13] 赵桂久. 生态环境综合整治和恢复技术研究(第1集). 北京: 北京科学技术出版社, 1993.
- [14] 王绪高, 李秀珍, 孔繁花, 李月辉, 石秉路, 高振岭. 大兴安岭北坡火烧迹地自然与人工干预下的植被恢复模式初探. 生态学杂志, 2003, 22(5): 30-34.
- [15] 辛颖, 赵雨森, 陈强. 大兴安岭火烧迹地植被恢复后土壤理化性质. 东北林业大学学报, 2013, 41(8): 65-68.
- [16] 韩雪成, 赵雨森, 辛颖, 陈强, 刘曼. 大兴安岭北部火烧迹地兴安落叶松人工林土壤水文效应. 水土保持学报, 2012, 26(4): 183-188.
- [17] 王丽红, 辛颖, 赵雨森, 侯殿忠, 孙涛, 关彦军. 大兴安岭火烧迹地植被恢复中土壤微生物量及酶活性. 水土保持学报, 2015, 29(3): 184-189.
- [18] 马秀枝, 张秋良, 李长生, 陈高娃, 王飞. 寒温带兴安落叶松林土壤温室气体通量的时间变异. 应用生态学报, 2012, 23(8): 2149-2156.
- [19] 牟长城, 张博文, 韩丽冬, 于丽丽, 顾韩. 火干扰对小兴安岭白桦沼泽温室气体排放的短期影响. 应用生态学报, 2011, 22(4): 857-865.
- [20] 王金龙, 李艳红, 李发东. 博斯腾湖人工和天然芦苇湿地土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量. 生态学报, 2018, 38(2): 668-677.
- [21] 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影响因子. 应用生态学报, 30(3): 777-784.
- [22] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [23] 菊花, 申国珍, 马明哲, 葛结林, 徐文婷, 赵常明, 张秋良. 北亚热带地带性森林土壤温室气体通量对土地利用方式改变和降水减少的响应. 植物生态学报, 2016, 40(10): 1049-1063.
- [24] 贾朋, 高常军, 李吉跃, 周平, 王丹, 许小林. 华南地区尾巨桉和马占相思人工林地表温室气体通量. 生态学报, 2018, 38(19): 6903-6911.
- [25] 陈冠雄, 徐慧, 张颖, 张秀君, 李玥莹, 史荣久, 于克伟, 张旭东. 植物——大气 N_2O 的一个潜在排放源. 第四纪研究, 2003, 23(5): 504-511.
- [26] 王丽红, 辛颖, 邹梦玲, 赵雨森, 刘双江, 任清胜. 大兴安岭火烧迹地植被恢复中植物多样性与生物量分配格局. 北京林业大学学报, 2015, 37(12): 41-47.
- [27] 杜睿, 黄建辉, 万小伟, 贾月慧. 北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律. 环境科学, 2004, 25(2): 12-16.
- [28] 孙向阳, 徐化成. 北京低山区两种人工林土壤中 N_2O 排放通量的研究. 林业科学, 2001, 37(5): 57-63.
- [29] 程淑兰, 方华军, 于贵瑞, 徐敏杰, 张裴雷, 郑娇娇, 高文龙, 王永生. 森林土壤甲烷吸收的主控因子及其对增氮的响应研究进展. 生态学报, 2012, 32(15): 4914-4923.
- [30] Price S J, Kelliher F M, Sherlock R R, Tate K R, Condron L M. Environmental and chemical factors regulating methane oxidation in a New Zealand forest soil. Australian Journal of Soil Research, 2004, 42(7): 767-776.
- [31] Teh A Y, Silver W L, Conrad M E. Oxygen effects on methane production and oxidation in humid tropical forest soils. Global Change Biology, 2010, 11(8): 1283-1297.
- [32] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 张德强, 刘世忠. 鼎湖山主要森林生态系统地表 CH_4 通量. 生态科学, 2006, 25(4): 289-293.
- [33] 张强, 沈燕, 韩天宇, 勾蒙蒙. 湖南莽山 4 种林型甲烷通量及其影响因子. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(9): 104-111.
- [34] Dinsmore K J, Skiba U M, Billett M F, Rees R M, Drewer J. Spatial and temporal variability in CH_4 and N_2O fluxes from a Scottish ombrotrophic peatland: Implications for modelling and up-scaling. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6): 1315-1323.
- [35] 金冠一, 赵秀海, 康峰峰, 汪金松. 太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应. 生态学报, 2013, 33(6): 1832-1841.
- [36] 刘慧峰, 伍星, 李雅, 李宗善, 刘国华. 土地利用变化对土壤温室气体排放通量影响研究进展. 生态学杂志, 2014, 33(7): 1960-1968.
- [37] 莫江明, 方运霆, 徐国良, 李德军, 薛璟花. 鼎湖山苗圃和主要森林土壤 CO_2 排放和 CH_4 吸收对模拟 N 沉降的短期响应. 生态学报, 2005, 25(4): 682-690.
- [38] Burke R A, Zepp R G, Tarr M A, Miller W L, Stocks B J. Effect of fire on soil-atmosphere exchange of methane and carbon dioxide in Canadian boreal forest sites. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1997, 102(D24): 29289-29300.
- [39] Saurette D D, Chang S X, Thomas B R. Land-use conversion effects on CO_2 emissions: from agricultural to hybrid poplar plantation. Ecological Research, 2008, 23(3): 623-633.
- [40] Raich J W, Tufekciogul A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 71-90.
- [41] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 王劲松, 刘丽香, 迟永刚, 郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [42] 张慧东, 周梅, 赵鹏武, 包青春, 海龙. 寒温带兴安落叶松林土壤呼吸特征. 林业科学, 2008, 44(9): 142-145.
- [43] 赵哈林, 李玉强, 周瑞莲. 沙漠化对沙地土壤呼吸的影响及其对环境变化的响应. 生态学报, 2010, 30(8): 1972-1980.
- [44] 宋启亮, 董希斌. 大兴安岭 5 种类型低质林土壤呼吸日变化及影响因素. 东北林业大学学报, 2014, 42(9): 77-82.