

# 非生长季刺槐林土壤 CH<sub>4</sub> 通量的 变化特征及其影响因子

庄静静<sup>1,2</sup>, 张劲松<sup>1,2\*</sup>, 孟平<sup>1,2</sup>, 郑宁<sup>1,2</sup>, 李剑侠<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091; 2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037; 3. 济源市国有大沟河林场, 河南济源 454650)

**摘要:** [目的] 探讨在非生长季不同天气条件下 45 年生刺槐林土壤 CH<sub>4</sub> 通量的日变化和季节变化特征, 并确定其主要影响因子。 [方法] 2014 年 10 月—2015 年 4 月 (非生长季), 在华北低山丘陵区黄河小浪底森林生态系统定位研究站, 利用基于离轴积分腔输出光谱技术的土壤 CH<sub>4</sub> 通量自动观测系统, 对土壤 CH<sub>4</sub> 通量进行连续观测, 同步观测林内大气温度和相对湿度、5 cm 深处土壤温度和土壤湿度、林内总辐射以及降雨量, 分析各因子间的相互关系并确定影响土壤 CH<sub>4</sub> 通量的主要因子。 [结果] 表明: (1) 在非生长季, 刺槐人工林土壤为大气 CH<sub>4</sub> 重要的汇, 变化范围为 -0.15 ~ -2.34 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>。晴天的林地土壤吸收 CH<sub>4</sub> 能力 (-0.78 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>) 明显高于阴天 (-0.61 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>)、降雨或降雪天气 (-0.58 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>), 而且呈“V”型日际变化特征; 在 2014 年 11 月—2015 年 1 月, 土壤吸收 CH<sub>4</sub> 能力逐渐下降, 并维持相对较低的水平, 直至 2015 年 3 月达到最大值 (-2.34 nmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>); (2) 土壤 CH<sub>4</sub> 通量与大气温度、5 cm 深处土壤温度呈显著负相关, 与相对湿度呈正相关; 在 2015 年 1 月, 土壤 CH<sub>4</sub> 通量与总辐射呈正相关; (3) 在生长末期土壤上冻阶段和冬季土壤冻结阶段, 大气温度和相对湿度为影响土壤 CH<sub>4</sub> 通量的主要因子; 而在生长季初期, 主要的影响因子为大气温度和 5 cm 深处土壤温度。 [结论] 非生长季刺槐林土壤表现为大气 CH<sub>4</sub> 的汇, 在非生长季初期土壤吸收 CH<sub>4</sub> 的能力最弱, 主要受大气温度和相对湿度的影响, 而在非生长季末期土壤吸收 CH<sub>4</sub> 的能力逐渐增加, 主要受大气温度和土壤温度的影响。

**关键词:** 华北山区; 刺槐; 人工林; 甲烷; 非生长季

中图分类号: S792.27

文献标识码: A

## Change of Soil CH<sub>4</sub> Fluxes of *Robinia pseudoacacia* Stand During Non-growing Season and the Impact Factors

ZHUANG Jing-jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Jin-song<sup>1,2</sup>, MENG Ping<sup>1,2</sup>, ZHENG Ning<sup>1,2</sup>, LI Jian-xia<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of the State Forestry Administration, Beijing 100091, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Dagouhe National Forest Farm, Jiyuan 454650, He'nan, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the diurnal and seasonal variation of CH<sub>4</sub> fluxes in different weather conditions, and explore the effects of soil and meteorological factor on CH<sub>4</sub> fluxes in black locust forest soil. [Method] The automatic observation system with the near infrared laser and infrared laser analysis composite technology was used to measure the CH<sub>4</sub> fluxes of soil in *Robinia pseudoacacia* L. plantation in low hilly land of north China from October 2014 to April 2015. Meanwhile, the atmospheric temperature and relative humidity, soil temperature and

收稿日期: 2015-09-08

基金项目: “十二·五”国家科技计划课题“太行山低山区干瘠山地植被恢复技术与示范”(2015BAD07B02); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(RIF2013-08)

作者简介: 庄静静(1988—), 女, 河南洛阳人, 博士研究生, 主要从事森林土壤温室气体研究。E-mail: zhuangjingnd@126.com

\* 通讯作者: 张劲松, 研究员, 主要从事农林气象研究。E-mail: zhangjs@caf.cn

soil water content (5 cm), global radiation and precipitation were concurrently measured. The principal component analysis and stepwise regression analysis were used to analyze the relationship among the factors and determine the main factor of soil CH<sub>4</sub> flux. [Result] (1) The soil of *R. pseudoacacia* plantation was the important atmospheric CH<sub>4</sub> sink during the non-growing season with the range from  $-0.15$  to  $-2.34 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . The diurnal variation of CH<sub>4</sub> fluxes showed diurnal characteristics of “V-shape”, and had higher absorption capacity in a clear day ( $-0.78 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) but lower in cloudy ( $-0.61 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), rainy or snowy day ( $-0.58 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ). From November 2014 to January 2015, a gradual decline in the absorption capacity of soil was found. The remained fairly low until the spring when the soil started thawing. The soil CH<sub>4</sub> absorption capacity reached the maximum ( $-2.34 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in March 2015. (2) There was a significant negative correlation relationship between soil CH<sub>4</sub> fluxes and atmospheric temperature, soil temperature. The soil CH<sub>4</sub> fluxes was positively correlated with atmospheric relative humidity. In March and April 2015, the most significant positively correlation was observed between CH<sub>4</sub> fluxes and global radiation. (3) The factors of atmospheric temperature and relative humidity became the leading elements in terminal growth and winter while the atmospheric temperature and soil temperature (5 cm in depth) were the primary factors of soil CH<sub>4</sub> fluxes in early growing season. [Conclusion] The *R. pseudoacacia* forest soil was the sinks of atmospheric CH<sub>4</sub> during non-growing season. The absorption capacity of CH<sub>4</sub> was the weakest in early non-growing season, while the absorption capacity of the soil gradually increased at the end of non-growing season. In the early period, the soil CH<sub>4</sub> fluxes were mainly affected by atmospheric temperature and relative humidity. In the latter period, the soil CH<sub>4</sub> fluxes were influenced by air temperature and soil temperature.

**Keywords:** hilly areas; *Robinia pseudoacacia* L.; plantation; methane; non-growing season

甲烷(CH<sub>4</sub>)是仅次于CO<sub>2</sub>的重要温室气体,其红外线吸收能力是CO<sub>2</sub>的20~30倍,并且在大气中平均存留时间长达10 a,远高于CO<sub>2</sub>的存留时间(3 a)。虽然CH<sub>4</sub>在大气中的浓度比CO<sub>2</sub>少,但作为一种痕量温室气体,但其增长率远高于CO<sub>2</sub>,它所导致全球气候变暖的能力也是CO<sub>2</sub>的2倍<sup>[1]</sup>。因此,CH<sub>4</sub>在全球气候变暖过程中的作用及其产生、消耗和排放机制引起广泛关注。森林作为地球上分布最广的植被类型,约占陆地总面积的1/3,在陆地生态系统温室气体源汇功能方面占据十分重要的地位<sup>[2]</sup>。森林土壤被认为是有效的氧化大气CH<sub>4</sub>的汇,对全球大气CH<sub>4</sub>的汇起着约4%的贡献<sup>[3]</sup>,而森林土壤吸收CH<sub>4</sub>的能力是影响大气CH<sub>4</sub>浓度变化的重要因子<sup>[4]</sup>。因此,森林土壤CH<sub>4</sub>的排放特征及其变化趋势,已成为世界各国气象、生态、林业科学家研究的重点和热点问题;然而,过去的绝大多数土壤CH<sub>4</sub>通量的测定均集中在生长季内,对非生长季的土壤CH<sub>4</sub>测定及其调控机制的研究非常少<sup>[5-6]</sup>,且得到的结论仍然存在很大的不确定性<sup>[7-9]</sup>。非生长季森林生态系统土壤CH<sub>4</sub>通量虽然很小<sup>[10]</sup>,但有时也能完全决定该生态系统的源与汇。因此,需要广泛开展相关研究,不仅有助于了解我国温室气体的源汇状况,

而且可以更准确地评价森林在减缓温室气体方面的重要作用。

刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)是华北石质山区主要造林树种之一,广泛分布于我国北方地区<sup>[11]</sup>,但国内对刺槐林地土壤CH<sub>4</sub>通量的研究还未见报道。本研究以刺槐人工林为例,采用离轴积分腔输出光谱(OA-ICOS)技术的土壤CH<sub>4</sub>通量自动观测系统,观测华北低山丘陵区45年生刺槐林土壤CH<sub>4</sub>通量,结合同步观测的5 cm深处土壤温度、土壤湿度及气象因子,分析非生长季土壤CH<sub>4</sub>通量随时间的变化规律及其影响机制,旨在进一步丰富暖温带山地人工林生态系统CH<sub>4</sub>通量观测数据,为精确估算华北石质山区人工林生态系统土壤CH<sub>4</sub>总量提供科学依据,为进一步评价该地区林业生态工程对碳循环和气候变化的影响提供理论依据。

## 1 研究区概况

试验地位于黄河小浪底森林生态系统定位研究站(35.01° N, 112.28° E)站内<sup>[11]</sup>。黄河小浪底林区地处黄河中游,紧连太行山,属暖温带大陆性季风气候,以人工林为主,主要树种有刺槐、侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)和栓皮栎(*Quercus variabilis* Bl.)<sup>[10]</sup>。全年日照时数为2 367.7 h,

年日照率为54%， $\geq 0^{\circ}\text{C}$ 的多年平均积温为5 282 $^{\circ}\text{C}$ ， $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的多年平均积温达4 847 $^{\circ}\text{C}$ 。历年平均降水量641.7 mm，其中，6—9月的多年平均降水量为438.0 mm，约占全年的68.3%<sup>[11]</sup>。

样地为退耕还林已45年的刺槐人工林地，面积200 m<sup>2</sup>，平均株高8.3 m，平均胸径10.8 cm，郁闭度为0.9，平均土层厚度为61 cm<sup>[12]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计与样品采集

2014年9月，在样地中选取灌木和草本层尽量一致的区域，利用基于箱式—激光法的高频土壤CH<sub>4</sub>通量自动观测系统(Los Gatos Research, USA)，共设置4个气室，气室覆盖面积78.5 cm<sup>2</sup>，测定频率为1 Hz，测定获取以1 h为间隔的24 h高频土壤CH<sub>4</sub>通量(F)。2014年10月(21 d)、11月(30 d)、12月(31 d)，2015年1月(31 d)、3月(17 d)、4月(27 d)，共获得157 d完整昼夜数据，与此同时，通过安装在试验区的TE525M翻斗式雨量筒(Texas Inc., USA)、HMP45C型大气温湿度传感器(Vaisala, Helsinki, Finland)、土壤温度传感器(AV-10T, USA)和水分传感器(EC-H2O, Avalon Sci. Inc., USA)等，分别同步观测了研究区林内大气温度(T<sub>a</sub>)和相对湿度(RH)、5 cm深处的土壤温度(T<sub>5</sub>)和土壤湿度(S<sub>5</sub>)、林内总辐射(R<sub>a</sub>)、林内降雨量(P)。数据采集均通过CR10X数据采集器(Campbell, USA)和AR5-8A-SE数据采集器(Avalon Sci. Inc., USA)进行，数据采集频率设定为每1 min采集1次，每10 min输出1组平均值。

### 2.2 通量计算

土壤通量计算公式如下<sup>[13]</sup>：

$$F = \frac{10VP_0(1 - \frac{W_0}{1\,000\,000})}{RS(T_0 + 273.15)} \times \frac{\Delta c}{\Delta t}$$

式中： $F$ 为土壤CH<sub>4</sub>通量(nmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)； $V$ 为气路体积(cm<sup>3</sup>)； $P_0$ 为气室内部原始气压(kPa)； $W_0$ 为气室内部原始水汽浓度(mmol·mol<sup>-1</sup>)； $S$ 为气室覆盖面积(cm<sup>2</sup>)； $T_0$ 为气室内部原始温度(°C)； $\Delta c/\Delta t$ 为CH<sub>4</sub>浓度随时间的变化率(μmol<sup>-1</sup>·mol·s<sup>-1</sup>)； $R$ 为理想气体常数(8.314 Pa·m<sup>3</sup>·K<sup>-1</sup>·mol<sup>-1</sup>)。

CH<sub>4</sub>通量方向通常以正负来表示，当CH<sub>4</sub>通量为负值时，土壤氧化甲烷，数值越低表示CH<sub>4</sub>氧化

能力越强。

### 2.3 数据分析

本研究的试验数据使用SPSS 19.0进行相关性分析，并对测定指标进行标准化处理，利用标准化处理后的数据进行主成分分析。以得到的主成分变量为因变量，测定指标为自变量进行逐步回归，回归系数通过差异显著性检验的指标对主成分进行途径分析。使用Origin Pro 8.0进行图形图像输出。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同月份总降雨量以及总辐射、大气温度和相对湿度的平均日变化

整个观测期降雨量为93.2 mm，主要集中在2015年3月和4月，分别为20、40 mm(图1)。总辐射随着太阳高度角的日变化大致呈倒“V”型，最小值出现在2014年12月，最大值出现在2015年4月，从强到弱不同月份排序为：2015年4月>2015年3月>2014年10月>2014年11月>2015年1月>2014年12月(图2)。大气温度的最大值和最小值分别出现在2015年3月和2014年12月，各月大气温度变化范围分别为8.68~13.36、5.24~11.72、-3.03~5.58、-2.15~6.98、-0.07~14.34和5.46~12.83 $^{\circ}\text{C}$ (图2)。相对湿度最大值和最小值分别出现在2014年11月和2014年12月，从大到小不同月份排序为：2014年11月>2014年10月>2015年3月>2015年1月>2015年4月>2014年12月(图2)。这与总辐射的强弱排序不同，可能是由于相对湿度虽易受总辐射的影响，但在总辐射较小的月份，对相对湿度的影响作用不大。2015年3月和4月的降雨量也说明了在总辐射较强的4月份，虽然降雨量较3月份多，但其相对湿度仍低于4月份。

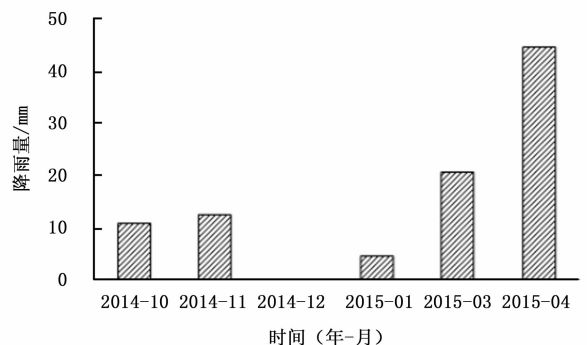


图1 非生长季不同月份的总降雨量

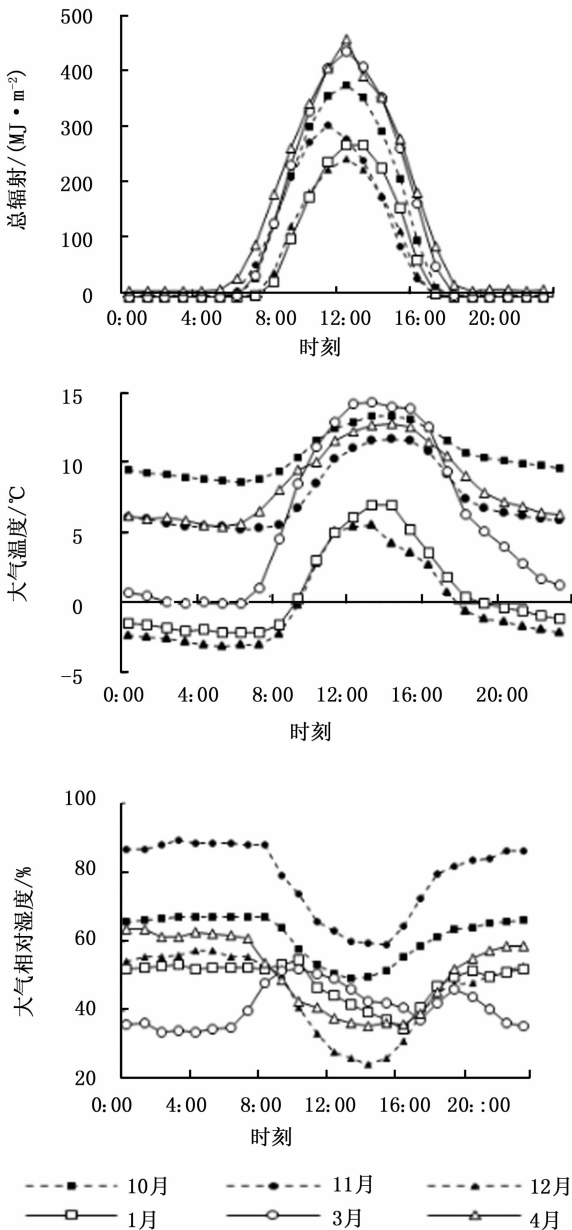


图2 不同月份总辐射、大气温度和相对湿度的平均日变化

### 3.2 刺槐人工林土壤 CH<sub>4</sub> 通量变化规律

#### 3.2.1 典型天气条件下土壤 CH<sub>4</sub> 通量平均日变化规律

由图3可知:在整个观测期(2014年10月—2015年4月)的晴天,土壤吸收 CH<sub>4</sub> 的能力明显比阴天、降雨或降雪天的高,且在后2种天气条件下,土壤 CH<sub>4</sub> 通量的日变化不明显;在降雨或降雪天,这种现象更加明显。逐月分析表明:在晴天,2014年10月土壤 CH<sub>4</sub> 通量日均值为  $-0.76 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而阴天和降雨或降雪天均为  $-0.65 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3);在晴天,2014年10月和11月的最低时刻差值为  $0.27 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,而在阴天、降

雨或降雪天,最低时刻差值较小,分别为  $-0.03$ 、 $0.14 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (图3)。2014年12月和2015年1月,土壤吸收 CH<sub>4</sub> 能力较低,而且日变化不明显,在3种天气下,变化趋势也几乎相同(图3)。这主要是由于这2个月的5 cm深处土壤温度低,且日内变化幅度小;另外,观测期间林木耗水量及降水少,使得5 cm深处土壤湿度较低,从而造成土壤微生物活动的物理环境相对较为稳定,使土壤 CH<sub>4</sub> 通量日变化特征不明显。2015年的3月和4月,土壤吸收大气 CH<sub>4</sub> 能力逐渐恢复,但在降雨或降雪天,土壤 CH<sub>4</sub> 通量日均值仍明显小于晴天(图3),这与该时期的气象因子密切相关。

#### 3.2.2 典型天气条件下土壤 CH<sub>4</sub> 通量季节变化规律

图4表明:在整个非生长季,刺槐人工林土壤为大气 CH<sub>4</sub> 汇。除2014年12月和2015年1月外,在晴天土壤 CH<sub>4</sub> 通量均呈“V”型日际变化特征,并在2015年的3月和4月土壤 CH<sub>4</sub> 通量最低值分别为  $-2.34$ 、 $-2.30 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。在阴天,虽然日际变化特征不明显,但具有一定的季节变化规律,各月日平均的土壤 CH<sub>4</sub> 通量从大到小依次为2015年4月 > 2014年11月 > 2015年3月 > 2014年10月 > 2014年12月 > 2015年1月,波动范围分别为  $-0.22 \sim -2.30$ 、 $-0.62 \sim -1.39$ 、 $-0.21 \sim -2.34$ 、 $-0.43 \sim -1.12$ 、 $-0.40 \sim -0.85$  和  $-0.40 \sim -0.71 \text{ nmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。由此可知,秋季随着气温的下降,土壤吸收 CH<sub>4</sub> 能力逐渐下降,到2014年12月达到吸收能力最低值;春季以后吸收能力开始逐渐恢复,2015年3月达到吸收能力的最大值。这一现象主要是由于随着气温的降低、降水的减少、林木叶片的脱落及耗水量的降低,导致土壤温度和含水量均有所降低,最终影响到土壤 CH<sub>4</sub> 通量。

### 3.3 刺槐人工林土壤 CH<sub>4</sub> 通量与环境因子的关系

#### 3.3.1 不同月份刺槐人工林土壤 CH<sub>4</sub> 通量与环境因子的相关分析

表1表明:在2014年10、11、12月以及2015年3、4月总辐射与土壤 CH<sub>4</sub> 通量呈极显著负相关,而在2015年1月与其相关不显著。大气温度与总辐射相同,均在2014年10、11、12月及2015年3、4月与土壤 CH<sub>4</sub> 通量呈极显著负相关。各月的相对湿度与各月土壤 CH<sub>4</sub> 通量均呈极显著正相关,说明各月土壤 CH<sub>4</sub> 通量受相对湿度的影响较大。5 cm深处土壤温度除了在2015年1月外,其余月份的土壤温度在整个观测期与土壤 CH<sub>4</sub> 通量都呈极显著负相关。在2014年10、12月,5 cm深处

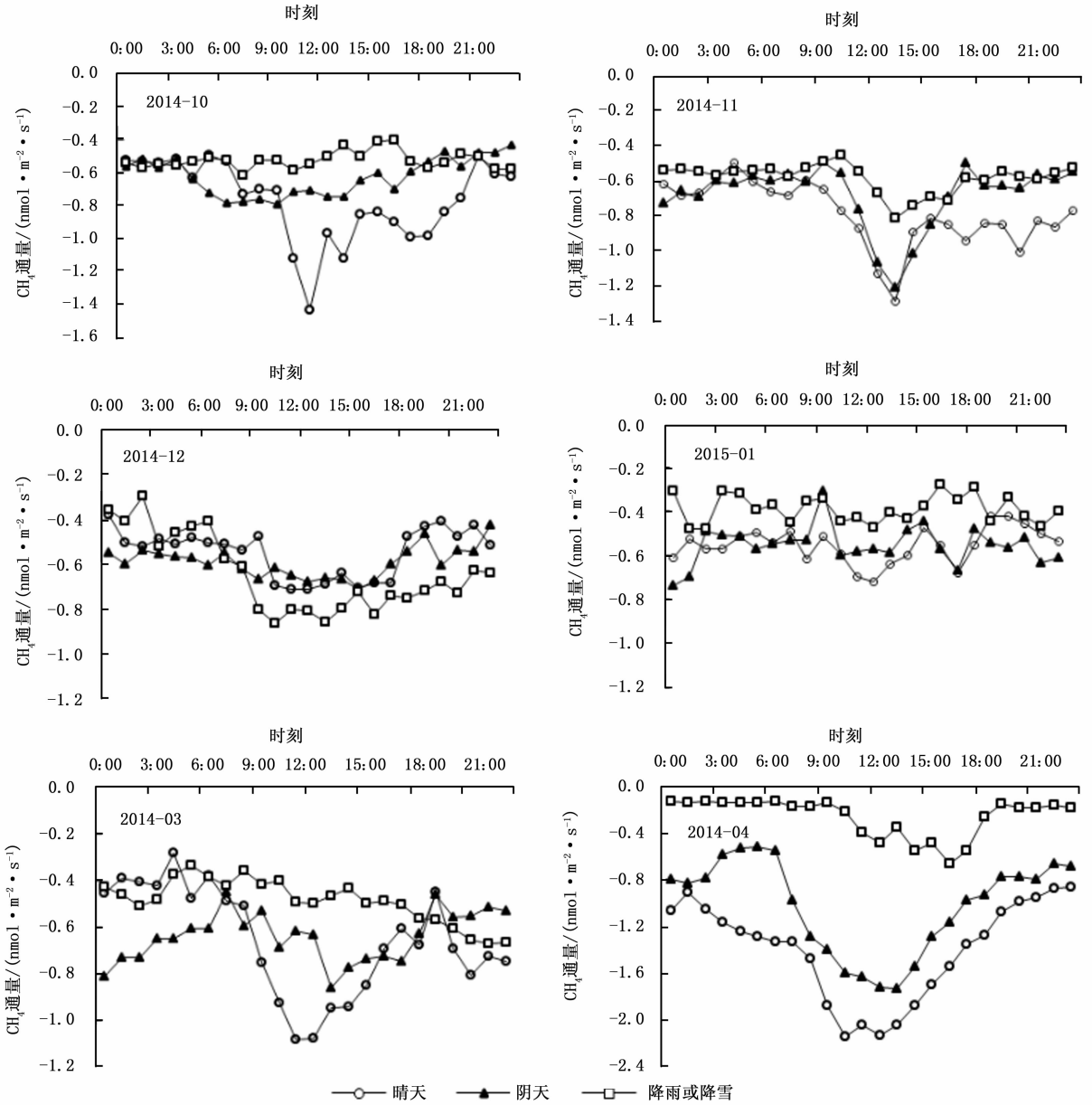


图3 各月典型天气条件下刺槐林地土壤 CH<sub>4</sub> 通量平均日变化规律

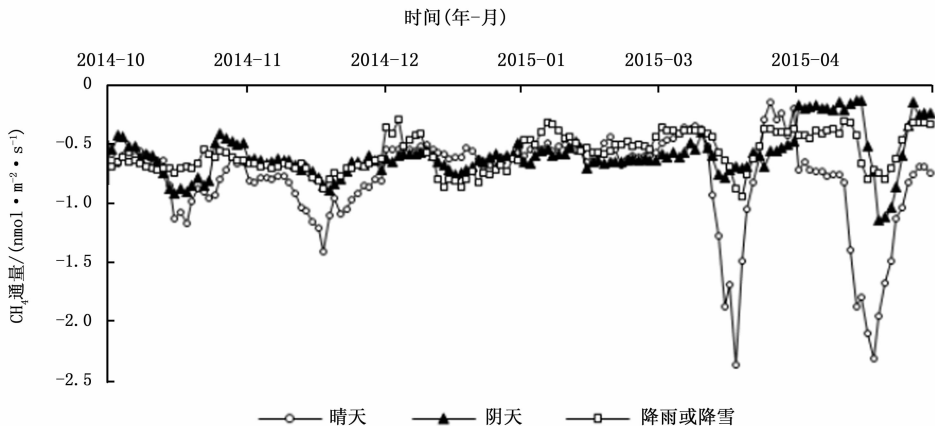


图4 典型天气条件下土壤 CH<sub>4</sub> 通量的季节变化规律

土壤湿度与土壤 CH<sub>4</sub> 通量均不相关,而在 2014 年 11 月、2015 年的 3、4 月都与土壤 CH<sub>4</sub> 通量呈显著或极显著相关。总的来说,各月不同因子间的相关关

系也不尽相同,具有较大的差异性(表 1)。说明,土壤 CH<sub>4</sub> 通量与各环境因子间存在着复杂的相关关系。

表 1 不同月份土壤 CH<sub>4</sub> 通量与各影响因子的相关系数

时间 (年-月)	因子	土壤 CH <sub>4</sub> 通量	总辐射	大气 温度	相对 湿度	土壤 温度	土壤 湿度	时间 (年-月)	因子	土壤 CH <sub>4</sub> 通量	总辐射	大气 温度	相对 湿度	土壤 温度	土壤 湿度
2014-10	通量	1						2015-01	通量	1					
	总辐射	-0.47**	1						总辐射	0.03	1				
	大气温度	-0.48**	0.64**	1					大气温度	0.04	0.66**	1			
	相对湿度	0.84**	-0.63**	-0.56**	1				相对湿度	0.17**	-0.60**	-0.81**	1		
	土壤温度	-0.35**	0.06	-0.03	-0.53**	1			土壤温度	-0.06	0.26**	0.79**	-0.61**	1	
	土壤湿度	-0.04	-0.01	0.02	-0.26**	0.54**	1		土壤湿度	-0.19**	-0.04	0.41**	-0.37**	0.63**	1
2014-11	通量	1						2015-03	通量	1					
	总辐射	-0.48**	1						总辐射	-0.62**	1				
	大气温度	-0.58**	0.46**	1					大气温度	-0.43**	0.71**	1			
	相对湿度	0.73**	-0.55**	-0.66**	1				相对湿度	0.67**	-0.56**	-0.64**	1		
	土壤温度	-0.49**	0.17**	0.79**	-0.43**	1			土壤温度	-0.36**	0.50**	0.85**	-0.53**	1	
	土壤湿度	0.53**	-0.20**	-0.16**	0.34**	-0.16**	1		土壤湿度	-0.30**	0.31**	0.63**	-0.62**	0.71**	1
2014-12	通量	1						2015-04	通量	1					
	总辐射	-0.24**	1						总辐射	-0.82**	1				
	大气温度	-0.52**	0.63**	1					大气温度	-0.79**	0.69**	1			
	相对湿度	0.57**	-0.68**	-0.79**	1				相对湿度	0.87**	-0.66**	-0.72**	1		
	土壤温度	-0.44**	0.04	0.53**	-0.21**	1			土壤温度	-0.72**	0.56**	0.90**	-0.60**	1	
	土壤湿度	0.03	-0.06	0.02	0.33**	0.60**	1		土壤湿度	0.11*	0.11*	0.05	0.13*	-0.11*	1

注: \*\*  $P < 0.01$ ; \*  $P < 0.05$ 。土壤温度与湿度均为 5cm 深处土壤的值。

3.3.2 不同月份刺槐人工林土壤 CH<sub>4</sub> 通量与环境因子的主成分分析 为了进一步确定不同月份土壤 CH<sub>4</sub> 通量的主要影响因子,将不同月份影响土壤 CH<sub>4</sub> 通量的环境因子作主成分分析。本研究中基于累积贡献率大于 85% 的原则,并结合实际情况提取了 3 个主成分。由表 2 可以看出:各月份各提取 3 个主成分,2014 年 10 月,第一主成分主要包括总辐射和相对湿度;第二主成分为 5 cm 深处土壤温度,第三主成分为 5 cm 深处土壤湿度,各主成分方差贡献率分别为 47.60%、30.99% 和 11.09%,累积贡献率达 89.68%。2014 年 11 月与 2014 年 12 月相同,第一主成分主要包括 2 个要素,分别为大气温度和相对湿度;5 cm 深处土壤温度和土壤湿度为第二主成分,总辐射为第三主成分,2 个月份的第一主成分方差贡献率分别为 53.40% 和 50.87%,第二主成分分别为 20.11% 和 33.14%,第三主成分分别为 16.44% 和 11.25%,累积贡献率分别为 89.95% 和 95.26%。2015 年 1 月,第一主成分包含要素较多,主要为大气温度、相对湿度和 5 cm 深处土壤温度,其方差贡献率最大,为 62.92%;5 cm 深处土壤湿度为第二主成分,而且 2 个成分已达到 85% 以上,说明

在 2015 年 1 月主要受第一主成分内的要素影响。2015 年 3 月和 4 月,大气温度和 5 cm 深处土壤温度均为其第一主成分,其方差贡献率分别为 68.88% 和 61.46%;2015 年 3 月的第二主成分为总辐射和 5 cm 深处土壤湿度,其累积贡献率达到 83.56%,而 2015 年 4 月第二主成分和第三主成分分别为 5 cm 深处土壤湿度和总辐射,其累积贡献率达到 92.73%。除 2015 年 1 月,2 个主成分提供了原始变量的足够信息外,其它月份均在累积到第三主成分时达到 85% 以上,主成分分析的效果比较好,而且各月主成分分析中的第一主成分的贡献率均高于 47%,这解释了土壤 CH<sub>4</sub> 通量变化的大多数信息。

3.3.3 不同月份刺槐人工林土壤 CH<sub>4</sub> 通量与环境因子的通径分析 对 3 个主成分所包含的要素进行回归方程拟合分析,从表 3 可知:2014 年 10 月,相对湿度的直接作用最大,总辐射的次之,其通径系数分别为 1.07、0.20,这与表 2 中主成分分析中第一主成分所占贡献率最大相同。5 cm 深处土壤温度和土壤湿度的直接作用较小,土壤湿度的总间接作用比相对湿度小,主要因为土壤湿度通过总辐射和 5 cm 深处土壤温度的间接作用较小。在 2014 年 11 月和

表2 不同年份各月主成分(PCA)的因子负荷量和贡献率

指标	2014-10 主成分			2014-11 主成分			2014-12 主成分		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
总辐射	<b>0.77</b>	-0.45	-0.02	0.65	-0.37	<b>0.59</b>	0.80	-0.23	<b>0.54</b>
大气温度	0.72	-0.50	0.29	<b>0.90</b>	0.33	0.00	<b>0.94</b>	0.11	-0.15
相对湿度	<b>-0.92</b>	-0.05	0.24	<b>-0.84</b>	0.19	-0.13	<b>-0.90</b>	0.30	0.16
土壤温度	0.52	<b>0.74</b>	-0.35	0.75	<b>0.51</b>	-0.33	0.46	<b>0.82</b>	-0.30
土壤湿度	0.38	0.74	<b>0.54</b>	-0.40	<b>0.69</b>	0.60	-0.03	<b>0.92</b>	0.36
特征根	2.38	1.55	0.56	2.67	1.01	0.82	2.54	1.66	0.56
方差贡献率/%	47.60	30.99	11.09	53.40	20.11	16.44	50.87	33.14	11.25
累积贡献率/%	47.60	78.59	89.68	53.40	73.51	89.95	50.87	84.01	95.26

指标	2015-01 主成分			2015-03 主成分			2015-04 主成分		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
总辐射	0.64	-0.69	-0.19	0.73	<b>-0.64</b>	0.02	0.83	0.07	<b>-0.47</b>
大气温度	<b>0.96</b>	-0.13	0.14	<b>0.93</b>	-0.10	0.23	<b>0.95</b>	0.01	0.22
相对湿度	<b>-0.88</b>	0.18	0.11	-0.80	0.04	<b>0.56</b>	<b>-0.84</b>	0.25	0.23
土壤温度	<b>0.85</b>	0.36	0.35	<b>0.88</b>	0.21	0.36	<b>0.88</b>	0.09	0.43
土壤湿度	0.58	<b>0.73</b>	<b>-0.36</b>	0.79	<b>0.52</b>	-0.12	0.06	<b>0.99</b>	-0.07
特征根	3.15	1.19	0.32	3.44	0.73	0.51	3.07	1.05	0.51
方差贡献率/%	62.92	23.71	6.37	68.88	14.68	10.17	61.46	21.01	10.26
累积贡献率/%	62.92	86.63	93.00	68.88	83.56	93.73	61.46	82.47	92.73

注:黑色加粗部分为选定主成分要素。

表3 不同月份土壤 CH<sub>4</sub> 通量与各影响因子的通径分析

时间(年-月)	指标	相关系数	直接通径系数				间接通径系数				总间接通径系数
			总辐射	相对湿度	土壤温度	土壤湿度	总辐射	相对湿度	土壤温度	土壤湿度	
2014-10	总辐射	-0.47**	0.20	-	-0.67	0.01	-0.00	-	-0.67		
	相对湿度	0.84**	1.07	-0.13	-	-0.06	-0.05	-	-0.23		
	土壤温度	-0.35**	0.11	0.01	-0.57	-	0.10	-	-0.46		
	土壤湿度	-0.04	0.19	-0.00	-0.28	0.06	-	-	-0.22		
2014-11	总辐射	-0.48**	-0.12	-	-0.26	-0.04	-0.06	-	-0.36		
	相对湿度	0.73**	0.47	0.07	-	0.09	0.11	-	0.27		
	土壤温度	-0.49**	-0.22	-0.02	-0.20	-	-0.05	-	-0.27		
	土壤湿度	0.53**	0.31	0.02	0.16	0.04	-	-	0.22		
2014-12	总辐射	-0.24**	0.21	-	-0.44	-0.01	-	-	-0.46		
	相对湿度	0.57**	0.65	-0.15	-	0.07	-	-	-0.08		
	土壤温度	-0.44**	-0.31	0.01	-0.14	-	-	-	-0.13		
2015-01	总辐射	0.04	0.60	-	-0.46	-0.09	-	-	-0.56		
	相对湿度	0.17**	0.58	-0.48	-	0.08	-	-	-0.40		
	土壤湿度	-0.19**	-0.22	0.25	-0.21	-	-	-	0.03		
2015-03	总辐射	-0.62**	-0.52	-	0.34	-0.35	-0.14	0.04	-0.10		
	大气温度	-0.43**	0.48	-0.37	-	-0.39	-0.24	0.08	-0.91		
	相对湿度	0.67**	0.62	0.29	-0.30	-	0.15	-0.08	0.05		
	土壤温度	-0.36**	-0.28	-0.26	0.40	-0.33	-	0.09	-0.09		
	土壤湿度	-0.30**	0.13	-0.16	0.30	-0.38	0.09	-	-0.15		
2015-04	总辐射	-0.82**	-0.44	-	0.11	-0.31	-0.20	0.02	-0.38		
	大气温度	-0.79**	0.16	-0.30	-	-0.33	-0.32	0.04	-0.95		
	相对湿度	0.87**	0.47	0.29	-0.11	-	0.22	0.02	0.41		
	土壤温度	-0.72**	-0.36	-0.24	0.14	-0.28	-	0.01	-0.37		
	土壤湿度	0.11*	0.13	-0.05	0.01	0.06	-0.04	-	-0.02		

12月,相对湿度对土壤 CH<sub>4</sub> 通量的直接作用均最大,总辐射最小。在2014年12月,总辐射通过相对湿度和5 cm深处土壤温度对土壤 CH<sub>4</sub> 通量的间接作用最大。2015年1月,总辐射的直接作用和间接作用都较大,相对湿度次之,2015年3月和4月,相对湿度的直接作用最大,而大气温度的间接作用最大。2015年3月和4月大气温度通过总辐射、相对湿度和5 cm深处土壤温度的间接作用都较大,间接系数分别为-0.37、-0.39、-0.24和-0.30、-0.33、-0.32。在2015年4月,间接系数较大的要素均受总辐射的影响。这说明在生长季初期,大气温度逐渐回升,日照时间逐渐增加,受大气温度和总辐射的影响较大,相对湿度的日变化也较剧烈。因此,由于气象因子的变化,导致不同月份影响土壤 CH<sub>4</sub> 通量的因子也各不相同。

## 4 讨论

### 4.1 土壤 CH<sub>4</sub> 通量的变化规律

在晴天,2014年10、11月和2015年3、4月,土壤吸收 CH<sub>4</sub> 能力较其它天气的高;在2014年12月和2015年1月,由于大气温度较低或降雪的影响,使土壤 CH<sub>4</sub> 通量在3种天气的日变化差异较小。这与陈德章等<sup>[14]</sup>、上官行健等<sup>[15-16]</sup>的研究结果一致,在晴朗天气稻田土壤 CH<sub>4</sub> 通量的日变化易受大气温度的影响,变化趋势明显,而在阴天或降雨条件下变化趋势不明显。大多数研究者在进行森林土壤 CH<sub>4</sub> 通量研究时,多以晴天为主,这有可能会高估了全年森林土壤吸收 CH<sub>4</sub> 的能力。关于冬季森林土壤是否吸收 CH<sub>4</sub> 存在一定的争议,本研究发现,非生长季刺槐林土壤总体上为吸收大气 CH<sub>4</sub>;Castro等<sup>[8]</sup>研究发现,在冬季,美国马萨塞州红松林土壤仍保持吸收 CH<sub>4</sub> 能力;王广帅等<sup>[5]</sup>对青藏高原高寒草甸的研究发现,在非生长季土壤吸收 CH<sub>4</sub> 量占全年的53.47%;而Mastepanov等<sup>[17]</sup>研究发现,在北极苔原冻融期,土壤 CH<sub>4</sub> 爆发式释放,而且释放量相当于整个夏季的排放量,其研究与本研究结果不一致。这主要是由于本研究区属于暖温带大陆性季风气候,冬季的冰雪覆盖层较薄,虽然其限制了气体扩散,不利于土壤吸收甲烷,但仍有一定的吸收能力,并在春季随着温度的回升、冰雪的融化、土壤含水量的增加使土壤吸收 CH<sub>4</sub> 的能力也逐渐增大。杜睿等<sup>[18]</sup>发现,北京市东灵山3种不同类型的森林(阔叶混交林、辽东栎林和油松林)土壤 CH<sub>4</sub> 吸收通量

都明显比寒温带长白山森林土壤的大,这主要是不同气候带导致植被类型和土壤类型的差异,引起土壤微生物菌群类型、土壤氧化菌的活性和氧化能力以及土壤理化性质的区别,最终产生了这种现象。

在非生长季,土壤吸收 CH<sub>4</sub> 的季节变化规律大致为生长季初期土壤冻融阶段(2015年3、4月) > 生长末期土壤上冻阶段(2014年10、11月) > 冬季土壤冻结阶段(2014年12月、2015年1月),可见土壤吸收 CH<sub>4</sub> 的能力随着大气温度、土壤温度以及总辐射的降低而逐渐下降,但随着其回升又逐渐恢复。孙向阳等<sup>[19]</sup>发现,在冬季,北京低山区森林土壤 CH<sub>4</sub> 的吸收值几乎为0,春秋季节较高。刘玲玲<sup>[20]</sup>研究发现,在江西千烟洲亚热带红壤丘陵区,冬季(12月—翌年2月)低温限制了土壤对 CH<sub>4</sub> 的吸收,吸收值最低;3—6月的雨季,温度升高有利于 CH<sub>4</sub> 的吸收,CH<sub>4</sub> 吸收通量开始增加。肖冬梅<sup>[21]</sup>的研究也表明,长白山阔叶红松林秋季甲烷的吸收通量较高;冬季土壤被冰雪覆盖,CH<sub>4</sub> 的吸收通量最低,而周存宇等<sup>[22]</sup>在鼎湖山的研究发现,旱季(11—次年1月)的吸收通量高于雨季(4—9月),这与土壤的通气状况密切相关。

### 4.2 土壤 CH<sub>4</sub> 通量对环境因子的响应

研究发现,土壤 CH<sub>4</sub> 通量与各环境因子间存在着复杂的相关关系。本研究中,除2015年1月外,土壤 CH<sub>4</sub> 通量与大气温度、5 cm深处土壤温度呈极显著负相关,且 CH<sub>4</sub> 通量与大气温度的相关性高于5 cm深处土壤温度,这主要是由于大气温度不仅能影响土壤温度的变化,而且大气温度与土壤温度呈极显著正相关。这与陈德章等<sup>[14]</sup>和上官行健等<sup>[15-16]</sup>的研究结果一致,温度较高(天气晴朗)时,CH<sub>4</sub> 排放率与气温的相关较大,而在阴雨天气则较小。李玉娥<sup>[22]</sup>曾指出在一定的温度范围内,气体扩散等因子(而非温度)是土壤吸收 CH<sub>4</sub> 的控制因子。在本研究中,进入非生长季(10月份)后,随着落叶树种叶片凋落,林冠的作用减弱,加之当地日照时间缩短,受太阳辐射影响较小,林内的大气温度变化差异减小,使林内空气交换受到一定程度的阻碍,从而使大气温度和相对湿度在生长末期土壤上冻阶段、冬季土壤冻结阶段成为影响土壤 CH<sub>4</sub> 通量的主要因子;而在生长季初期(4月份),林冠层还未恢复,白天较高的气温对土壤表层温度产生了显著的影响,同时由于凋落物的存在,使其具有一定的保温性,从而使大气温度和5 cm深处土壤温度在生长季



初期成为其主要的影 响因子。在本研究中也发现,土壤 CH<sub>4</sub> 通量与大气相对湿度呈极显著正相关,5 cm 深处土壤温度与大气相对湿度呈现极显著负相关,而不同月份,5 cm 深处土壤湿度与大气湿度的相关性不同。李攀<sup>[24]</sup>研究发现,相对湿度与土壤 CH<sub>4</sub> 通量的线性拟合关系显著,且随相对湿度的增加,土壤 CH<sub>4</sub> 通量随之减少;而崔楠等<sup>[25]</sup>、孙景鑫等<sup>[26]</sup>的研究表明,荒漠草地、胡杨林地土壤 CH<sub>4</sub> 通量与相对湿度的相关性均不显著。这主要是由于研究区域气候特征以及植被类型不同造成的差异。

## 5 结论

本研究认为,非生长季刺槐人工林土壤均表现为 CH<sub>4</sub> 汇,吸收能力因季节波动而异,在温度最低的 2014 年 12 月和 2015 年 2 月,刺槐人工林土壤吸收 CH<sub>4</sub> 的能力最弱,而春季冻融时期(2015 年 3 月和 4 月)对土壤吸收 CH<sub>4</sub> 能力有明显的促进作用。非生长季土壤 CH<sub>4</sub> 通量是森林生态系统的重要组成部分,本研究通过观测非生长季刺槐林土壤 CH<sub>4</sub> 通量不仅有助于了解我国北方森林土壤对温室气体的源汇状况,还补充了对非生长季土壤 CH<sub>4</sub> 通量的观测数据。春季土壤解冻时期可能是影响土壤 CH<sub>4</sub> 通量年际变化的一个关键时期。因此,未来应加强对非生长季土壤 CH<sub>4</sub> 通量的研究。

## 参考文献:

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Working Group I Report: The Physical Science Basis [C]// Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 杨 阔. 五种温带森林非生长季土壤呼吸的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [3] 高文龙. 大兴安岭北京森林土壤 CH<sub>4</sub> 吸收对氮输入 的响应研究 [D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [4] 孙景鑫. 艾比湖地区生长季典型生态系统土壤甲烷排放通量分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.
- [5] 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.
- [6] 刘 实, 王传宽, 许 飞. 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[J]. 生态学报, 2010, 30(15): 4075-4084.
- [7] 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: 1748-1760.
- [8] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9: 1-10.
- [9] Sullivan B W, Kolb T E, Hart S C, *et al.* Thinning reduces soil carbon dioxide but not methane flux from southwestern USA ponderosa pine forests [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255: 4047-4055.
- [10] 王鹤松, 张劲松, 孟 平, 等. 华北山区非主要生长季典型人工林土壤呼吸变化特征[J]. *林业科学研究*, 2007, 20(6): 820-825.
- [11] 赵 娜, 孟 平, 张劲松, 等. 华北低丘山地不同退耕年限刺槐人工林土壤质量评价[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 351-358.
- [12] 张劲松, 孟 平, 王鹤松, 等. 华北石质山区刺槐人工林的土壤呼吸[J]. *林业科学*, 2008, 44(2): 8-14.
- [13] 高 峻, 韩光鲁, 黄彬香, 等. 多通道土壤吸收长期自动测量系统的集成与性能测试[J]. *林业科学*, 2011, 47(9): 153-157.
- [14] 陈德章, 王明星. 稻田 CH<sub>4</sub> 排放和土壤、大气条件的关系[J]. *地球科学进展*, 1993, 8(5): 37-46.
- [15] 上官行健, 王明星, 沈壬兴. 温度对稻田 CH<sub>4</sub> 排放日变化及季节变化的影响[J]. *中国科学院研究生院学报*, 1994, 11(2): 214-224.
- [16] 上官行健, 王明星, 沈壬兴, 等. 我国华中地区稻田甲烷排放特征[J]. *大气科学*, 1994, 18(3): 358-365.
- [17] Mastepanov M, Sigsgaard C, Dlugokencky E J, *et al.* Large tundra methane burst during onset of freezing[J]. *Nature*, 2008, 456: 628-630.
- [18] 杜 睿, 黄建辉, 万小伟, 等. 北京地区暖温带森林土壤温室气体排放规律[J]. *环境科学*, 2004, 25(2): 12-16.
- [19] 孙向阳. 北京低山区森林土壤中 CH<sub>4</sub> 排放通量的研究[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(3): 173-176.
- [20] 刘玲玲, 刘允芳, 温学发, 等. 千烟洲红壤丘陵区人工针叶林土壤 CH<sub>4</sub> 排放通量[J]. *植物生态学报*, 2008, 32(2): 431-439.
- [21] 肖冬梅, 王 森, 姬兰柱, 等. 长白山阔叶红松林土壤氮化亚氮和甲烷的通量研究[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(10): 1855-1859.
- [22] 周存宇, 周国逸, 王迎红, 等. 鼎湖山主要森林生态系统地表 CH<sub>4</sub> 通量[J]. *生态科学*, 2006, 25(4): 289-293.
- [23] 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.
- [24] 李 攀. 寒温带针叶林火烧迹地土壤温室气体通量研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [25] 崔 楠, 秦 璐, 刘 东, 等. 艾比湖地区荒漠草地、胡杨林地土壤甲烷排放日变化规律及其环境影响因子研究[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(1): 81-88.
- [26] 孙景鑫, 刘 东, 秦 璐, 等. 艾比湖地区棉田、撂荒地土壤 CH<sub>4</sub> 排放通量日变化规律研究[J]. *新疆农业科学*, 2012, 49(8): 1489-1496.

(责任编辑:詹春梅)