

# 兴安落叶松生态系统近地表 CH<sub>4</sub> 浓度及其影响因子

巴 特<sup>1</sup>,张 健<sup>2</sup>,田 原<sup>1</sup>,王 冰<sup>1</sup>,张秋良<sup>1,\*</sup>

(1. 内蒙古农业大学 林学院,内蒙古 呼和浩特 010018;2. 兴安盟林业科学研究所,内蒙古 兴安盟 137400)

**摘 要:**采用 DLT-100FMA 快速甲烷分析仪对内蒙古大兴安岭北部兴安落叶松生态系统进行定位连续观测,分析兴安落叶松生态系统甲烷(CH<sub>4</sub>)的日变化、月变化规律及其影响因子。结果表明:1)生长季不同月份兴安落叶松 CH<sub>4</sub> 浓度的日变化随温度的升高而降低,最大值和最小值分别出现在 1:00 和 13:00 左右。2)CH<sub>4</sub> 浓度的月变化呈现先减少后增大的规律,5 月平均浓度为 1.350 mg·m<sup>-3</sup>,6—9 月分别为 1.332、1.330、1.336 mg·m<sup>-3</sup>和 1.349 mg·m<sup>-3</sup>,11 月为 1.384 mg·m<sup>-3</sup>,7 月最低为 1.330 mg·m<sup>-3</sup>。3)CH<sub>4</sub> 浓度随气温的升高而降低,相关关系为: $y=7E-07x^3+1E-05x^2-0.0018x+1.3583$ ( $R^2=0.6385$ , $P<0.01$ );CH<sub>4</sub> 浓度随着空气湿度的增加呈现先降低后升高的变化趋势,湿度低于 9 285.71 mg·m<sup>-3</sup>时,CH<sub>4</sub> 浓度随湿度增大而降低;湿度高于 9 285.71 mg·m<sup>-3</sup>时,CH<sub>4</sub> 浓度随湿度增大而升高。

**关键词:**兴安落叶松;甲烷(CH<sub>4</sub>);生长季;影响因子

中图分类号:S791.22

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2017)02-0057-04

## Near-surface CH<sub>4</sub> Concentration in the *Larix gmelinii* Ecosystem

Bate<sup>1</sup>,ZHANG Jian<sup>2</sup>,TIAN Yuan<sup>1</sup>,WANG Bing<sup>1</sup>,ZHANG Qiu-liang<sup>1,\*</sup>

(1. College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. Xing'anmeng Institute of Forestry Science, Xing'anmeng, Inner Mongolia 137400, China)

**Abstract:** The DLT-100FMA rapid CH<sub>4</sub> analyzer was used to conduct continuous observation in the *Larix gmelinii* ecosystem in northern Daxing'anling, Inner Mongolia. The diurnal and monthly variations of CH<sub>4</sub> and its influencing factors in *L. gmelinii* ecosystem were analyzed. The results indicate that 1) the diurnal variation of the CH<sub>4</sub> concentration decreased with the increase of temperature during the growing season. The maximum and minimum values were found at 1:00 and 13:00, respectively. 2) The monthly CH<sub>4</sub> concentration decreased at first and then increased. The average concentration in May was 1.350 mg·m<sup>-3</sup>; the average concentrations from June to September were 1.332, 1.330, 1.336 mg·m<sup>-3</sup> and 1.349 mg·m<sup>-3</sup>, respectively; the average concentration in November was 1.384 mg·m<sup>-3</sup>; the minimum concentration was 1.330 mg·m<sup>-3</sup> in July. 3) CH<sub>4</sub> concentration decreased with the increase of temperature; the correlation equation was  $y=7E-07x^3+1E-05x^2-0.0018x+1.3583$ ( $R^2=0.6385$ , $P<0.01$ ). With the increase of the air humidity, the CH<sub>4</sub> concentration decreased at first and then increased. When the humidity was lower than 9 285.71 mg·m<sup>-3</sup>, the CH<sub>4</sub> concentration decreased with the increase of humidity; when the humidity was higher than 9 285.71 mg·m<sup>-3</sup>, the CH<sub>4</sub> concentration increased with the increase of humidity.

**Key words:** *Larix gmelinii*; CH<sub>4</sub>; growing season; influence factors

自工业革命以来,大气中温室气体浓度急剧增加所导致的全球气候变暖已成为当今人类社会关注

收稿日期:2016-07-13 修回日期:2016-10-31

基金项目:中国科学院野外站联盟项目(KFJ-SW-YW026);“十二五”国家科技支撑(2011BAD22B0204)。

作者简介:巴特,男,蒙古族,在读硕士,研究方向:森林可持续经营理论与技术。E-mail:305226763@qq.com

\*通信作者:张秋良,男,教授,博士生导师,研究方向:森林可持续经营、森林生态。E-mail:18686028468@163.com

的焦点,并且气候变暖所导致的各种破坏性影响已经显现并陆续被证实<sup>[1]</sup>。CH<sub>4</sub>是仅次于CO<sub>2</sub>的重要温室气体,在温室效应和臭氧层的化学破坏过程中扮演重要的角色<sup>[2]</sup>。根据2007年IPCC(政府间气候变化专业委员会)第4次评估报告,以百年时间尺度上甲烷在大气中持续时间约为8.4 a,其温室效应约为CO<sub>2</sub>的25倍<sup>[3]</sup>,其对温室效应的影响贡献率为20%<sup>[4]</sup>。大气中的CH<sub>4</sub>主要来源于天然湿地和稻田排放、天然气渗漏、垃圾填埋场释放、反刍动物排气以及生物物质的燃烧,其中天然湿地是甲烷重要的源,其中湿地生态系统对全球CH<sub>4</sub>排放的贡献率约为20%,即为100~200 Tg·a<sup>-1</sup><sup>[5]</sup>。森林、草原和农田生态系统是CH<sub>4</sub>的“源”还是“汇”,研究结论各异。好气的自然土壤(如森林、草原等)都具有吸收大气CH<sub>4</sub>的能力<sup>[6]</sup>,可降低大气中CH<sub>4</sub>浓度,但农田、草地和森林变化较大,总体不超过100 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,森林土壤是其中最大的CH<sub>4</sub>的汇<sup>[7]</sup>。

兴安落叶松是北方针叶林重要的森林生态系统,主要分布在寒温带,冻土、湿地(沼泽)冷湿环境的强烈发育形成独特的兴安落叶松生态系统,对全球气候变化比较敏感。研究其甲烷浓度及其环境控制机制对全球碳循环以及气候变化的研究具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区设在内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站(50°49′—50°51′N, 121°30′—121°31′E),地处大兴安岭北部寒冷湿润气候区,属于寒温带大陆性季风气候。年均气温-4.4℃,年均降水量为481.6 mm,无霜期80~100 d。植被5月中旬开始生长,9月后开始凋落枯萎进入生长末期。土壤以棕色针叶林土为主,土层厚约30~40 cm,腐殖质在10 cm左右,滞水性强,土壤pH值为4.5~6.5。有多年冻土分布。区内湿地资源丰富,面积占据比例达32%。湿地总是与冻土相关联,低温、潜育、冻土、湿润是湿地形成的主要原因。湿地既是森林肺叶,又是林区碳储库,也是寒温带森林生物、生物多样性的重要组成部分。森林覆盖率较高,达到90%以上,具有复杂的森林植被类型及垂直结构,以兴安落叶松构成的明亮针叶林为主要森林类型。

### 1.2 研究方法

1.2.1 数据获取 在研究区利用快速甲烷分析仪(DLT-100FMA)连续定位测定了兴安落叶松林内距地面40 cm的甲烷浓度和大气湿度。快速甲烷分

析仪采用了OA-ICOS吸收池技术有效地控制激光量子,并采用高反射性镜面,使激光量子在离开吸收池之前进行了几千次的传递,并通过关闭激光并检测光子离开光腔的时间来实现自我校准,精确测定环境空气甲烷浓度和空气湿度。测定频率使用内置泵时可以达到1 Hz,使用外置泵时可以达到10 Hz以上。大气温度采用自动气象站。

1.2.2 数据处理和分析 取用2015年5—11月份兴安落叶松CH<sub>4</sub>浓度数据和相关气象数据进行研究生长季CH<sub>4</sub>浓度变化规律。为确保数据准确性,去除原始数据中大于6倍标准差数据,计算平均值和方差,采用SPSS统计软件对CH<sub>4</sub>浓度与温度、湿度进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 CH<sub>4</sub>的日变化规律

在兴安落叶松生长季内分别选取5月和8月的24 h CH<sub>4</sub>观测数据。由观测数据(图1,图2)可知,生长季不同月份兴安落叶松CH<sub>4</sub>浓度的日变化规律存在一定差异,但整体呈单谷曲线,即:1:00左右CH<sub>4</sub>浓度分别达到最大值1.361 mg·m<sup>-3</sup>和1.370 mg·m<sup>-3</sup>,之后开始逐渐降低,到13:00左右分别出现最小值1.344 mg·m<sup>-3</sup>和1.341 mg·m<sup>-3</sup>,之后浓度逐渐升高,到次日1:00左右CH<sub>4</sub>浓度再次达到最大值。CH<sub>4</sub>浓度随温度的升高而降低呈负相关关系。

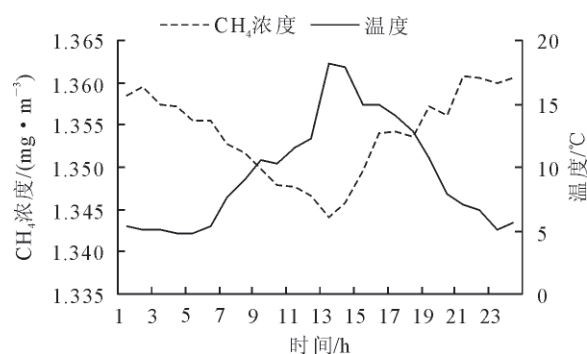


图1 兴安落叶松生长季5月CH<sub>4</sub>日变化规律

Fig. 1 Daily changes of CH<sub>4</sub> in May in the growing season of *Larix gmelinii* forest

### 2.2 CH<sub>4</sub>的月变化规律

兴安落叶松生态系统CH<sub>4</sub>浓度5月份平均浓度为1.350 mg·m<sup>-3</sup>,6—9月份分别为1.332、1.330、1.336 mg·m<sup>-3</sup>和1.349 mg·m<sup>-3</sup>,11月为1.384 mg·m<sup>-3</sup>。CH<sub>4</sub>浓度的月变化规律,呈现先减少后增大的趋势(图3)。5月进入初春,气温较低,林内CH<sub>4</sub>浓度较高,5月2日出现本月CH<sub>4</sub>浓度极大值约1.372 mg·m<sup>-3</sup>,随着气温逐渐回升

CH<sub>4</sub> 浓度逐渐降低。6、7 月随着大气气温的不断升高,降雨量增加,兴安落叶松生态系统进入生长季。大气 CH<sub>4</sub> 浓度逐渐降低,7 月份最低为 1.330 mg · m<sup>-3</sup>,可能是由于生长季内植物根系活动增加破坏了厌氧环境,增加了土壤同空气间的气体交换,同时植物根系活动增加,新根萌发使得更多的 CH<sub>4</sub> 在植物根系附近和土壤有氧层被 CH<sub>4</sub> 氧化菌氧化。

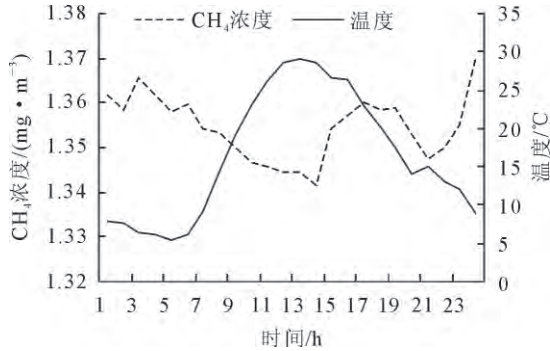


图 2 兴安落叶松生长季 8 月 CH<sub>4</sub> 日变化规律  
Fig. 2 Daily changes of CH<sub>4</sub> in August in the growing season of *L. gmelinii* forest

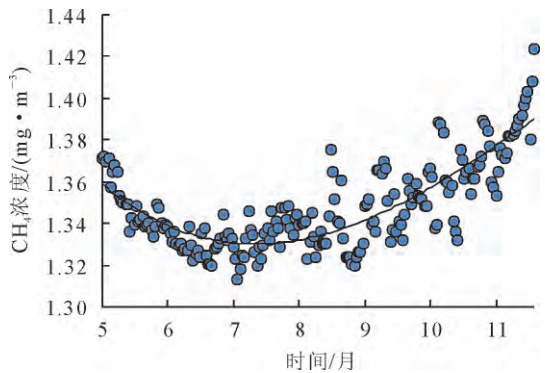


图 3 兴安落叶松生长季 CH<sub>4</sub> 浓度值月变化  
Fig. 3 Monthly variation of CH<sub>4</sub> concentration in the growing season of *L. gmelinii* forest

8 月份研究区当月气候变化较大,大气中 CH<sub>4</sub> 浓度也成现剧烈变化的态势,CH<sub>4</sub> 浓度开始逐渐增高。9 月份寒冷空气南下,气温逐渐降低,降雨量减少植物根系活动减弱。受温度关系影响,产 CH<sub>4</sub> 菌和 CH<sub>4</sub> 氧化菌活性都有所降低,但 CH<sub>4</sub> 氧化菌对温度的敏感性较产 CH<sub>4</sub> 菌低,受低温环境影响小,低温环境下依然保持较高的活性。

10、11 月份,气温逐渐降低,大气中的 CH<sub>4</sub> 浓度进一步升高。10 月份大气中的 CH<sub>4</sub> 浓度呈不可预测的变化规律,总体趋势向上,月平均值为 1.364 mg · m<sup>-3</sup>;11 月份 CH<sub>4</sub> 浓度变化较大,可能是由于受低温天气影响,植物根系活动完全停止,土壤层中厌氧层上升,产 CH<sub>4</sub> 菌厌氧环境范围扩大,同时冻土层上升导致 11 月份空气中 CH<sub>4</sub> 平均浓度较大为

1.384 mg · m<sup>-3</sup>。

好气的自然土壤(如森林土壤)具有吸收大气中 CH<sub>4</sub> 的作用<sup>[8]</sup>。6—9 月为兴安落叶松生长季 CH<sub>4</sub> 浓度处于全年空气 CH<sub>4</sub> 浓度低水平状态,大兴安岭兴安落叶松生长季表现为大气 CH<sub>4</sub> 的汇。

### 2.3 兴安落叶松生态系统生长季 CH<sub>4</sub> 的影响因素分析

2.3.1 CH<sub>4</sub> 浓度与气温相关关系 兴安落叶松 CH<sub>4</sub> 浓度随气温的升高而降低(图 4),呈负相关关系,相关方程如表 1。研究表明,温度是影响兴安落叶松林内 CH<sub>4</sub> 浓度的关键因子,其主要原因是由于环境温度的升高,土壤中的 CH<sub>4</sub> 氧化菌活性增强所致。

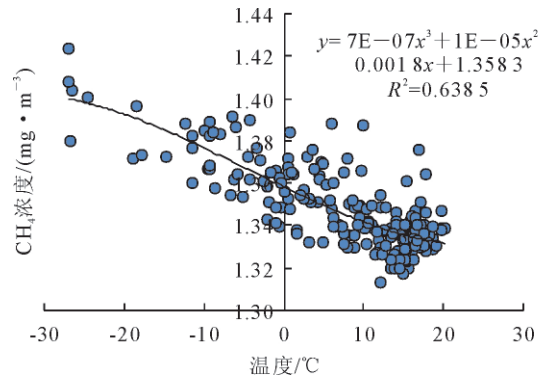


图 4 CH<sub>4</sub> 浓度与温度的关系  
Fig. 4 The relationship between CH<sub>4</sub> concentration and temperature

2.3.2 CH<sub>4</sub> 浓度与空气湿度相关关系 从图 5 看出,当空气湿度 < 9 285.71 mg · m<sup>-3</sup> 时,兴安落叶松生态系统 CH<sub>4</sub> 浓度随空气湿度增大而降低;当空气湿度 > 9 285.71 mg · m<sup>-3</sup> 时,兴安落叶松生态系统 CH<sub>4</sub> 浓度随空气湿度增大而升高。空气湿度 9 285.71 mg · m<sup>-3</sup> 为 CH<sub>4</sub> 浓度变化的临界值。CH<sub>4</sub> 浓度越低可能是由于受同时良好的水热环境有利于植物根系的萌发,使土壤厌氧层下降,氧化层范围变宽所致。林内较大的空气湿度增加了土壤含水量,使得土壤中土壤氧化层范围下降,厌氧层升高同时增加了空气中的 CH<sub>4</sub> 浓度。

## 3 结论与讨论

### 3.1 讨论

空气中的 CH<sub>4</sub> 浓度可能受温度、水分、土壤有机物和植物类型影响较大。受温度影响主要是由于温度影响土壤中的产 CH<sub>4</sub> 菌和 CH<sub>4</sub> 氧化菌活性所致<sup>[9]</sup>。水分主要影响土壤的通气性和氧化还原电位,一般认为高水位创造出的还原环境有利于产 CH<sub>4</sub> 菌的生存,高水位条件下土壤 CH<sub>4</sub> 通量较高<sup>[10-11]</sup>,空气中的 CH<sub>4</sub> 浓度也较高。CH<sub>4</sub> 的生成

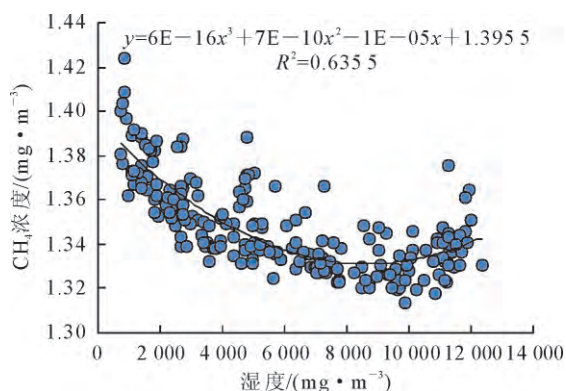


图5 CH<sub>4</sub>浓度与湿度的关系

Fig. 5 The relationship between CH<sub>4</sub> concentration and humidity

表1 CH<sub>4</sub>浓度随气象因子变化拟合方程及显著性检验

Table 1 The fitting equation of CH<sub>4</sub> concentration with meteorological factors and its significance test

| 自变量 | 方程   | R <sup>2</sup> | P     |
|-----|--|----------------|-------|
| 温度  | $y = 7E-07x^3 + 1E-05x^2 - 0.0018x + 1.3583$ | 0.6385         | <0.01 |
| 湿度  | $y = 6E-16x^3 + 7E-10x^2 - 1E-05x + 1.3955$  | 0.6355         | <0.01 |

源于多种类型微生物对有机物质的分解,CH<sub>4</sub>的潜在产量与有机物种类、数量紧密相关<sup>[12]</sup>。植物在CH<sub>4</sub>排放过程中的作用主要包括充当CH<sub>4</sub>的传输通道,为产CH<sub>4</sub>菌提供基质,传输H<sub>2</sub>到植物根系使CH<sub>4</sub>氧化等<sup>[13]</sup>。

2012年马秀枝<sup>[8]</sup>等在内蒙古大兴安岭大区研究寒温带兴安落叶松林土壤温室气体通量的时间变异性得出结论:兴安落叶松林土壤甲烷吸收通量具有明显的月变化,呈单峰曲线,在8月达到最大。8月份CH<sub>4</sub>浓度平均值为1.336 mg · m<sup>-3</sup>,处于全年空气CH<sub>4</sub>浓度低水平状态,这与马秀芝的研究结论相符。2013年陈媛媛<sup>[14]</sup>在湖南会同进行杉木人工林土壤水分与环境因子关系研究中发现:土壤含水量与空气相对湿度呈现出极显著的正相关性,但在变化的同时土壤含水量呈现出一定的滞后性。空气湿度对CH<sub>4</sub>浓度的影响主要体现在影响土壤含水量,空气湿度越大则相对土壤含水量越高进而土壤中的氧化层范围降低而厌氧层范围变大,增加了空气中的甲烷浓度。从甲烷变化规律中可以得出,空气中的甲烷浓度主要是受温度和湿度协同作用的影响,这与丁维新<sup>[15]</sup>等提出当土壤含水率适宜时,温度对CH<sub>4</sub>氧化的影响才能表现出来的研究结果相一致。

森林土壤有机碳库在维持全球碳平衡过程中起着重要作用<sup>[16]</sup>。森林土壤是甲烷在陆地生态系统中最大的汇,天然湿地是全球甲烷重要的源。而大

兴安岭林区具有森林和湿地的双重属性。研究其甲烷浓度及其环境控制机制对全球碳循环以及气候变化的研究具有重要意义。

### 3.2 结论

生长季不同月份兴安落叶松CH<sub>4</sub>浓度的日变化整体呈单谷曲线且存在一定差异,总体CH<sub>4</sub>浓度随温度的升高而降低,最大值和最小值分别出现在1:00和13:00左右。

CH<sub>4</sub>浓度的月变化规律,呈现先减少后增大的趋势。兴安落叶松生态系统CH<sub>4</sub>浓度5月份平均浓度为1.350 mg · m<sup>-3</sup>,6-9月分别为1.332、1.330、1.336 mg · m<sup>-3</sup>和1.349 mg · m<sup>-3</sup>,11月为1.384 mg · m<sup>-3</sup>,7月份最低为1.330 mg · m<sup>-3</sup>。

兴安落叶松CH<sub>4</sub>浓度随气温的升高而降低,相关关系为 $y = 7E-07x^3 + 1E-05x^2 - 0.0018x + 1.3583$  ( $R^2 = 0.6385$ ,  $P < 0.01$ )。

兴安落叶松CH<sub>4</sub>浓度随着空气湿度的增加呈现先降低后升高的变化趋势。空气湿度9285.71 mg · m<sup>-3</sup>为CH<sub>4</sub>浓度变化的临界值。当空气湿度<9285.71 mg · m<sup>-3</sup>时,兴安落叶松生态系统CH<sub>4</sub>浓度随空气湿度增大而降低;当空气湿度>9285.71 mg · m<sup>-3</sup>时,兴安落叶松生态系统CH<sub>4</sub>浓度随空气湿度增大而升高。

### 参考文献:

- [1] 高升华. 长江滩地杨树人工林甲烷通量研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [2] 李红军, 唐俊红. 大气甲烷排放源研究进展[J]. 杭州电子科技大学学报, 2014(2): 52-55.
- [3] WANG Z P, SONG Y, GULLEDGE J, *et al.* China's grazed temperate grasslands are a net source of atmospheric methane [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(13): 2148-2153.
- [4] 凌威, 黄志宏. 森林土壤甲烷通量研究进展[J]. 环境与生活, 2014, 22: 249-250.
- [5] 陈槐, 周舜, 吴宁, 等. 湿地甲烷的产生、氧化及排放通量研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2006(5): 726-733. CHEN H, ZHOU S, WU N, *et al.* Advance in studies on production, oxidation and emission flux of methane from wetlands [J]. *Chin. J. Appl. Environ. Biol.*, 2006(5): 726-733. (in Chinese)
- [6] GONZALO J G, PELTOLA H, BRICENO-ELIZONDO E, *et al.* Changed thinning regimes may increase carbon stock under climate change: a case study from a finnish boreal forest [J]. *Climatic Change*, 2007, 81: 431-454.
- [7] DALAL R C, ALLEN D C, LIVESLEY S J, *et al.* Magnitude and biophysical regulators of methane emission and consumption in the Australian agricultural, forest, and submerged landscapes: a review [J]. *Plant and Soil*, 2008, 309: 43-76.

(下转第66页)

- nal of Changjiang Vegetables, 2010(20):27-32. (in Chinese)
- [7] 赵英,张斌,赵华春,等. 农林复合系统中南酸枣蒸腾特征及影响因子[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11):2035-2040.  
ZHAO Y, ZHANG B, ZHAO H C, *et al.* Transpiration of *Chorospondias axillarisin* agro-forestrial system and its affecting factors[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11): 2035-2040. (in Chinese)
- [8] 康博文,王得祥,刘建军,等. 城市不同绿地类型降温增湿效应的研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(2):54-56.  
KANG B W, WANG D X, LIU J J, *et al.* The effects of reducing temperature and increasing humidity by different greenland in urban area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2005, 20(2):54-56. (in Chinese)
- [9] 汪志荣,张建丰,王文焰. 温度影响下土壤水分运动模型[J]. 水利学报, 2002, 10:46-50.  
WANG Z R, ZHANG J F, WANG W Y. Applicability of greenampt formula for infiltration affected by temperature[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 10:46-50. (in Chinese)
- [10] 张建兵,熊黑钢,李宝富,等. 干旱区农田土壤水分地温变化规律及其相互关系[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2):127-133.  
ZHANG J B, XIONG H G, LI B F, *et al.* The variation rule and interrelationship of farmland soil moisture content and ground temperature in arid areas[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(2):127-133. (in Chinese)
- [11] 李文华,赖世登. 中国农林复合经营[M]. 北京:科学出版社, 1994:68.
- [12] 向成华,黄礼隆,将俊明,等. 国内外防护林体系效益研究动态综述[J]. 四川林业科技, 1998, 9(1):52-56.
- [13] 王述礼,金昌杰,关德新. 沿海防护林体系热效应的遥感分析[J]. 生态学杂志, 1995, 14(4):1-5.  
WANG S L, JIN C J, GUAN D X. Remote sensing analysis on the heat effects of coastal shelterbelt system[J]. Chinese Journal of Ecology, 1995, 14(4):1-5. (in Chinese)
- [14] 吴发启,刘秉正. 黄土高原流域农林复合配置[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2003:1-30.
- [15] 梁振山. 核桃农林复合栽培对农田小气候影响[J]. 陕西林业科技, 2014(1):54-56.  
LIANG Z S. Effect of agroforestry conception-based walnut plantation on the weather conditions of farming land[J]. Shaanxi Forest Science and Technology, 2014(1):54-56. (in Chinese)
- [16] 陆森,张劲松,孟平,等. 石榴-小麦间作系统的地面热通量[J]. 林业科学, 2012, 48(8):6-10.  
LU S, ZHANG J S, MENG P, *et al.* Soil surface heat flux in the *Punica granatum-Triticum aestivum* intercropping system[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(8):6-10. (in Chinese)
- [17] 赵忠宝. 徐淮平原农林复合系统小气候效应研究[D]. 南京:南京林业大学, 2006.
- [18] 张劲松,宋兆民,孟平,等. 银杏-小麦间作系统水热效应的研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(4):457-462.  
ZHANG J S, SONG Z M, MENG P, *et al.* Study on the water and heat effects of ginkgo-wheat inter-cropping[J]. Forest Research, 2002, 15(4):457-462. (in Chinese)
- [19] 包翔,常金宝. 干旱半干旱地区农林复合生态系统农田小气候变化研究[J]. 内蒙古林学院学报:自然科学版, 1999, 21(2):39-43.  
BAO X, CHANG J B. A study on climate variation over the restrictive farmland in a farm-forest compound ecosystem in the arid semi-arid district[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry College: Natural Science Edition, 1999, 21(2):39-43. (in Chinese)

(上接第 60 页)

- [8] 马秀枝,张秋良,李长生,等. 寒温带兴安落叶松林土壤温室气体通量的时间变异[J]. 应用生态学报, 2012(8):2149-2156.  
MA X Z, ZHANG Q L, LI C S, *et al.* Temporal variation of soil greenhouse gases fluxes in a cold-temperate *Larix gmelinii* forest in Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012(8):2149-2156. (in Chinese)
- [9] 刘意立,李竺霖,何云峰. 影响湿地甲烷产生、传输与氧化因素的研究进展[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2014(9):157-162.  
LIU Y L, LI Z L, HE Y F. The factors influencing generation, transmission and oxidation of methane in wetlands: a review[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2014(9):157-162. (in Chinese)
- [10] DIJKSTRA F A, MORGAN J A, FOLLETT R F, *et al.* Climate change reduces the net sink of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in a semi-arid grassland[J]. Global Change Biology, 2013, 19(6):1816-1826.
- [11] VAN HUISSTEDEN J, MAXIMOV T C, DOLMAN A J. High methane flux from an arctic floodplain (Indigirka lowlands, eastern Siberia)[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114:G02018.
- [12] L D M, LIU M Q, CHENG Y H, *et al.* Methane emissions from double-rice cropping system under conventional and no tillage in Southeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 113(2):77-81.
- [13] 姚守平,罗鹏,王艳芬,等. 湿地甲烷排放研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2007(2):58-63.  
YAO S P, LUO P, WANG Y F, *et al.* Advances in the research on methane emissions from wetlands[J]. World Sci-tech R&D, 2007(2):58-63. (in Chinese)
- [14] 陈媛媛. 杉木人工林土壤水分与环境因子关系研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2013.
- [15] 丁维新. 沼泽湿地及其不同利用方式下甲烷排放机理研究[D]. 南京:中国科学院研究生院(南京土壤研究所), 2003.
- [16] 于洋,王海燕,雷相东,等. 东北过伐林区蒙古栎天然林土壤有机碳研究[J]. 西北林学院学报, 2011(2):57-62.  
YU Y, WANG H Y, LEI X D, *et al.* Soil organic carbon in over-logged forest stands of *Quercus mongolica* in Northeastern China[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011(2):57-62. (in Chinese)