

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150020

环境因子对兴安落叶松林生态系统 CO₂ 通量的影响

李小梅 张秋良

(内蒙古农业大学林学院)

摘要:采用涡度相关技术,研究了主要环境因子与兴安落叶松林生态系统 CO₂ 通量的关系。结果表明:1) 生长季, CO₂ 通量表现出较显著的日变化特征,白天为碳吸收阶段,12:30—13:30 CO₂ 通量吸收出现峰值,而夜间为碳排放阶段,昼夜 CO₂ 通量变化幅度在 -1.09 ~ 0.11 mg/(m²·s) 之间,生态系统整体表现出较强的碳汇特征;非生长季,昼夜 CO₂ 通量变化幅度在 0 ~ 0.3 mg/(m²·s) 之间,生态系统整体表现为碳源。2) 生长季光合有效辐射(PAR)与 CO₂ 通量呈对数相关($R^2 = 0.4861$),随 PAR 增强,生态系统碳汇能力增大,PAR 是 CO₂ 通量的直接影响因子;非生长季 CO₂ 通量与 PAR 相关性不显著。3) 在生长季,兴安落叶松林 CO₂ 通量与气温(t_a)有很好的相关性,决定系数 R^2 为 0.6272,CO₂ 通量随 t_a 的升高而降低, t_a 是兴安落叶松林生态系统 CO₂ 通量的主要限制因子;非生长季的 12 月至次年 2 月份,气温的变化对 CO₂ 通量无显著作用。4) 土壤温度(t_s)和含水率(RH)对 CO₂ 通量的影响,主要体现在生态系统呼吸(R_e)上,兴安落叶松林生态系统的土壤含水率在 62% ~ 87% 之间,土壤含水率达到 67% 以上时,CO₂ 通量基本上不受土壤水分大小的影响。在水分不成为 CO₂ 通量限制因子的情况下,土壤温度对兴安落叶松林生态系统 CO₂ 通量影响起主要作用,研究表明:土壤温度与 CO₂ 通量呈指数相关(生长季 $R^2 = 0.2826$,非生长季 $R^2 = 0.2223$);即在适当的温度范围内,土壤温度的升高会加速植物和微生物的代谢,从而增强森林生态系统的呼吸作用,促进 CO₂ 排放。

关键词:兴安落叶松; 涡度相关法; CO₂ 通量; 环境因子

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-1522(2015)08-0031-09

LI Xiao-mei; ZHANG Qiu-liang. **Impact of climate factors on CO₂ flux characteristics in a *Larix gmelinii* forest ecosystem.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015) **37**(8) 31-39 [Ch, 27 ref.] Forestry Institute of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia, 010019, P. R. China.

Using the open path eddy covariance technique, we measured and analyzed the CO₂ flux characteristics related to climate variables in a *Larix gmelinii* forest ecosystem (hereinafter referred to as "the ecosystem"). The results showed that: 1) In the growing season, the ecosystem CO₂ flux changes with a diurnal cycle. The system assimilates CO₂ in daytime and releases CO₂ at night. The assimilation reaches its peak between 12:30 and 13:30. The CO₂ flux ranges from -1.09 to 0.11 mg/(m²·s) during the day. In the non-growing season, the ecosystem shows a carbon source with the CO₂ flux ranging from 0 to 0.3 mg/(m²·s). 2) In the growing season, there is a logarithmic relationship between the CO₂ flux and photosynthetic active radiation ($R^2 = 0.4861$), and the carbon sequestration capacity increases with the enhancement of PAR; therefore, PAR is a factor affecting CO₂ flux directly. In the non-growing season, such relationship is not significant. 3) The CO₂ flux is well correlated with air temperature (t_a) in growing seasons ($R^2 = 0.6272$), and CO₂ flux is reduced with the rising t_a , suggesting that t_a is a main limiting factor in the ecosystem. In the non-growing season from December to February, the change of air temperature has no significant effects on CO₂ flux. 4) The influence of soil

收稿日期: 2015-01-22 修回日期: 2015-04-27

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201204101-2)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050601-01-07)、内蒙古农业大学科技创新团队项目(ndpytd2013-4)。

第一作者: 李小梅, 博士生。主要研究方向: 森林经理学。Email: lxmhlyl@163.com 地址: 100101 北京市朝阳区安翔北里甲 11 号北京创业大厦 A 座东门 3 层。

责任作者: 张秋良, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林经理和森林生态学研究。Email: 18686028468@163.com 地址: 010019 内蒙古呼和浩特市赛罕区新建东街 275 号内蒙古农业大学林学院。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

temperature (t_s) and soil moisture content (RH) on CO_2 flux is mainly reflected in ecosystem respiration (R_e). The soil moisture content ranges between 62%–87% in the ecosystem, with an average of 84% in the growing season and 67% in the non-growing season. Soil moisture content is not the main factor limiting CO_2 flux in the ecosystem. On condition that water is not the limiting factor, soil temperature plays the major role on regulating CO_2 flux in the ecosystem. Our research shows that there exists an exponential relationship between CO_2 flux and soil temperature ($R^2 = 0.2826$ in growing season and 0.2223 in non-growing season). Within a certain range, the rise of soil temperature will accelerate the metabolism of plants and microorganisms, and thus enhance the respiration of forest ecosystem and promote the emission of CO_2 .

Key words *Larix gmelinii*; eddy covariance; CO_2 flux; environmental factors

森林生态系统是陆地上碳储量最大的生态系统,通过光合作用吸收大气中 CO_2 长期储存于生态系统中,同时,森林通过自身和有机物分解等方式将固定下来的碳排放到大气中。相关研究结论表明,大气与陆地生物圈间的 CO_2 交换中,森林约占 70%,是重要碳汇^[1]。森林与大气的碳交换与光照、温度、湿度等气候环境因子有密切关系,受光合有效辐射 (PAR) 的影响,植被的光合作用会随着光照强度的增大而增强,表现出明显的昼夜规律。当光照强度增大到光饱和点后,光合作用强度就受温度和水分等环境因子的影响,植被的呼吸作用更受其影响和限制^[2]。因此,研究和探讨森林生态系统的碳交换动态特征及其与环境因子的关系,对于定量评估森林的碳汇功能具有重要的意义。鉴于研究方法、观测仪器、地理环境等方面的影响和制约,森林生态系统与大气中 CO_2 的交换及其控制机制等一直是研究的重点和难点。近年来,涡度相关技术的迅速发展,为研究生态系统与大气 CO_2 交换提供了新技术并得到了广泛应用。目前,在温带阔叶混交林生态系统^[3-11]、亚热带杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林生态系统^[12-13]、杨树 (*Populus* spp.) 人工林生态系统^[14-15] 和热带季雨林^[16] 等已经开展了碳通量相关研究工作,兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 林生态系统碳通量的研究还鲜有报道。

兴安落叶松林集中在我国高纬度寒温带地区,是北方针叶林的主要建群树种,属于明亮针叶林森林类型,是我国独具特色的寒温带针叶林森林生态系统,其地域的独特性、对气候变化的敏感性和生态环境的重要性和脆弱性,成为全球气候变化最为敏感的区域之一,在全球气候变化研究中,具有特别重要的地位。因此,加强兴安落叶松林生态系统的碳通量研究对深入了解碳循环机制、科学经营,以及准确评估森林生态系统碳收支等方面均具有重要意义。

本研究以位于我国寒温带地区的兴安落叶松林生态系统为研究对象,基于大兴安岭森林生态系统

国家野外科学观测研究站的涡度相关技术观测资料,探讨兴安落叶松林生态系统的碳交换及其主要影响因子。旨在深入了解其碳循环和控制机制,为准确评估其碳收支与科学经营提供参考和依据。

1 研究区概况

通量观测塔设立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的兴安落叶松原始林试验区内。地理坐标为 $121^\circ30' \sim 121^\circ31' \text{E}$, $50^\circ49' \sim 50^\circ51' \text{N}$, 海拔 $800 \sim 1\,000 \text{ m}$ 。属于寒温带湿润气候区,气温平均值为 $-5.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 冬季(气温平均值 $< 10 \text{ }^\circ\text{C}$)可长达 9 个月,夏季(气温平均值 $> 22 \text{ }^\circ\text{C}$)却不超过 1 个月,无霜期为 80 d。最低气温 $-50 \text{ }^\circ\text{C}$, 最高气温 $40 \text{ }^\circ\text{C}$; 年降水量 $450 \sim 550 \text{ mm}$, 60% 集中在 7—8 月。9 月末至次年 5 月初为降雪季,降雪厚度为 $20 \sim 40 \text{ cm}$; 全年地表蒸发量 $800 \sim 1\,200 \text{ mm}$ 。该地区地貌为低山山地,土壤为棕色针叶林土,且分布有大面积沼泽湿地和连续多年冻土。植被类型主要为兴安落叶松林,其分布面积约占该区总面积的 79%。试验区内,树高 $25 \sim 30 \text{ m}$, 胸径 $26 \sim 30 \text{ cm}$, 蓄积量为 $150 \sim 200 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 。伴生有白桦 (*Betula platyphylla*)、山杨 (*Populus davidiana*)、黑桦 (*Betula davurica*) 和樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongholica*) 等,树种组成多为 8 落 2 白。林下植物众多,如杜鹃 (*Rhododendron simsii*)、杜香 (*Ledum palustre*)、柴桦 (*Betula fruticosa*)、越橘 (*Vaccinium vitis-idaea*)、铃兰 (*Convallaria majalis*)、舞鹤草 (*Maianthemum bifolium*)、红花鹿蹄草 (*Pyrola incarnata*)、长芒拂子茅 (*Calamagrostis epigeios*)、矮山黧豆 (*Lathyrus humilis*)、大叶章 (*Deyeuxia langsdorffii*) 和泥炭藓 (*Herba sphagni*) 等^[17]。

2 研究方法

本研究数据分别选用了通量观测塔 2013 年生长季的 6—8 月和 2012 年非生长季的 12 月, 2013 年

1、2月份 30 min 的 CO₂ 通量和光辐射、气温、降水量、土壤温度和土壤含水量等环境因子进行研究。

2.1 CO₂ 通量观测

通量观测塔采用统一的开路涡度相关系统(OPEC)与观测技术进行植被与大气之间的 CO₂、H₂O 和能量通量的长期连续观测。在观测塔高度为 60 m 高度处(大约为冠层高度 3 倍)安装了三维超声风速仪(Model CSAT-3, Campbell Scientific Inc., USA)、开路式红外线 CO₂/H₂O 气体分析仪(Model LI-7500, LiCor Inc., USA), 测定三维风速、超声温度和 CO₂/H₂O 浓度波动。用数据采集器 CR5000(Model CR5000, Campbell Scientific Inc.) 记录和储存 10 Hz 的原始数据, 同时计算和输出 30 min 的平均 CO₂ 通量(F_c)、潜热通量(LE)和感热通量(H)等统计量。

2.2 环境因子观测

在通量观测塔上配备了常规气象梯度观测系统(RMET), 在通量塔 1.5、8、18、38、42、50 和 60 m 高度处分别安装了芬兰 Vaisala 公司生产的 HMP45C 和美国 Campbell 公司生产的 A100R 数据采集仪, 自动记录空气温、湿度和风速; 在塔高 60 m 处还安装了 R. M. YOUNG 公司的 52203 和美国 Campbell 公司的 W200P、CNR-1 仪器, 测定降水和光合有效辐射、净辐射; 土壤热通量观测深度为 10 cm, 采用 HFPO1 仪器观测; 土壤温度、含水率观测深度为 5、10、20、40 和 80 cm, 分别采用美国 Campbell 公司的 TCAV 和 CS616-L150 仪器观测土壤温度和含水量。以上观测数据的采样频率均为 0.5 Hz, 用 CR1000 数据采集器自动记录。

2.3 数据处理与分析方法

2.3.1 CO₂ 通量测定与计算

大气中各物质之间的垂直交换通常是通过空气的涡旋状流动来进行的, 利用涡动相关技术测定森林与大气间 CO₂ 交换, 通过垂直风速(w')与 CO₂ 浓度(c')脉动值的协方差 $w'c'$ 计算获得, 是净生态系

统生产力(NEE), 它的大小与生态系统总生产力(GEP)和生态系统呼吸(R_e)有直接关系。本研究采用 EdiRe(Eddy Reprocessing)软件对 10 Hz 原始测定数据通过二次坐标旋转^[18], 频率损失订正, WPL 校正, 得到 30 min 平均 CO₂ 通量(F_c), 再通过储存项预处理(F_s)^[19]后, 得出兴安落叶松林净生态系统 CO₂ 通量。

2.3.2 数据剔除与插补

在观测过程中, 针对观测仪器、大气稳定度影响等导致的数据缺失和异常问题, 需要对数据进行剔除和插补。剔除降水同期数据、阈值剔除、偏离正常数据变化范围的异常值剔除以及低于摩擦风速(u^*)临界值的剔除等, 本研究判断降雨同期数据的标准是: $|F_c| \geq 2.0 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 是否发生降雨等, 阈值是指 $-3 \sim 3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 以外的数据, 偏离正常数据变化范围的异常值采用“差分法”^[20]。低于摩擦风速(u^*)临界值的剔除, 采用“平均值检验法”, 即夜间临界摩擦风速取 0.15 m/s, 当小于 0.15 m/s 时, 剔除相应的通量数据。对于异常值和缺测的数据, 采用“滑动窗口法”^[21]进行插补, 白天采用 14 d, 夜间 7 d 左右的平均值数据插补。

2.3.3 数据统计分析

对经过质量控制和插补后 30 min 有效观测数据进行分析, 分别对主要环境因子(光合有效辐射、气温、降水量、土壤温、湿度)和 CO₂ 通量进行月均值和日均值统计, 分析生长季和非生长季的月变化和日变化特征, 研究 CO₂ 通量日变化规律; 探索 CO₂ 通量与环境因子的相关关系。

3 结果与分析

3.1 主要环境因子变化特征

本研究中, 环境因子主要包括: 光合有效辐射(PAR)、气温(t_a)、降水量(P)和土壤温度(t_s)、土壤含水率(RH)。兴安落叶松林生态系统主要环境因子月平均值变化见表 1。

表 1 环境因子月平均变化

Tab. 1 Average monthly changes in environmental factors

季节 Season	月份 Month	PAR/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	$t_a/^\circ\text{C}$	P/mm	$t_s/^\circ\text{C}$	RH/%
生长季 Growing season	6	495.83 ± 7.92	14.76 ± 2.06	3.92 ± 0.29	6.70 ± 1.44	79.43 ± 1.37
	7	424.87 ± 8.23	16.75 ± 1.97	11.38 ± 1.21	9.97 ± 1.09	86.27 ± 2.19
	8	326.54 ± 4.37	15.66 ± 2.71	3.10 ± 0.02	15.48 ± 1.24	87.24 ± 1.03
非生长季 Non-growing season	12	24.96 ± 4.19	-18.02 ± 2.56	8.2 ± 0.94	-9.36 ± 1.48	73.57 ± 1.26
	1	15.93 ± 5.20	-26.82 ± 2.33	7.2 ± 1.02	-8.83 ± 0.93	66.46 ± 1.97
	2	39.69 ± 6.74	-22.91 ± 2.87	7.3 ± 1.14	-8.64 ± 1.12	62.42 ± 2.10

由表1看出:在生长季的6、7、8月,PAR月平均值分别为 (495.83 ± 7.92) 、 (424.87 ± 8.23) 和 $(326.54 \pm 4.37) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其大小顺序为6月>7月>8月,从3个月的日平均值分析,从6—8月PAR整体呈下降趋势,在 $86.25 \sim 748 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间波动(图1a),最大值为 $748 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 出现在6月下旬,辐射强度在6月下旬到7月末较大。非生长季,12月、次年1月、次年2月PAR分别为 (24.96 ± 4.19) 、 (15.93 ± 5.20) 和 $(39.69 \pm 6.74) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,其大小顺序为次年2月>12月>次年1月,日平均光合有效辐射范围为 $1.02 \sim 266.45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,12月到次年1月PAR变化比较平稳,次年2月份开始呈上升趋势(图1b)。从各月同期降雨分析,6、7、8月的日平均降水量分别为3.92、11.38和3.10 mm,降水天数分别为12、14和22 d。12月、次年1月、次年2月的日平均降水量分别为8.2、7.2和7.3 mm,降水天数12、14和11 d。说明PAR太阳高度角有关外,与同期的降水有直接关系,阴雨天的次数影响PAR的强度。

生长季6、7、8月份,兴安落叶松生态系统 t_a 分别为 (14.76 ± 2.06) 、 (16.75 ± 1.97) 、 $(15.66 \pm 2.71) ^\circ\text{C}$, t_s 分别为 (6.70 ± 1.44) 、 (9.97 ± 1.09) 、 $(15.48 \pm 1.24) ^\circ\text{C}$ 。其中,7月份 t_a 最高,8月份 t_s 最高(表1)。从日变化来看, t_a 从6月开始整体呈上升趋势,到8月初开始下降,其变化范围在 $5.69 \sim$

$20.37 ^\circ\text{C}$ 之间,波动幅度较大;6月23日出现峰值,说明受森林小气候的影响气温变化无常。 t_s 的变化范围为 $1.70 \sim 18.74 ^\circ\text{C}$,趋势与 t_a 基本相同,变化幅度小,明显滞后于 t_a ,在6月到8月初小于 t_a ,8月初(约8月3日)之后高于 t_a ,这是因为 t_s 随 t_a 的升高和下降吸收和释放热量滞后造成的。非生长季,从12月1日气温持续下降,到1月10日达到最低,之后开始回升,日平均气温变化范围 $-34.78 \sim -7.64 ^\circ\text{C}$,1月平均气温最低。土壤温度变化范围 $-4.29 \sim -13.32 ^\circ\text{C}$,最低出现在12月28日,之后开始回升,二者变化趋势比较一致,变化幅度小于 t_a (图1c、1d)。

兴安落叶松林生态系统土壤RH均比较高,生长季的6、7、8月份均在80%左右,6月为79.43%,7月为86.27%,8月份最大为87.24%,6月中旬到7月中旬波动较大,峰值出现在7月7日(图1e)。主要原因应该是研究区的降雨期在6—9月中旬,7月份降雨的频度和强度最大,加之研究区坡度比较平缓、土壤腐殖质层较厚,土壤入渗增加了土壤含水量,基本规律为:随着降雨量的增加土壤含水率逐渐增大,且滞后出现。非生长季的12月、次年1月和次年2月份,RH在73.57%~62.42%之间,这3个月变化不明显,整体呈下降趋势(图1f)。非生长季RH的变化一方面受生长季降雨的影响,同时受雪盖的影响,雪盖会减少地面蒸发,随气温、地温回升,

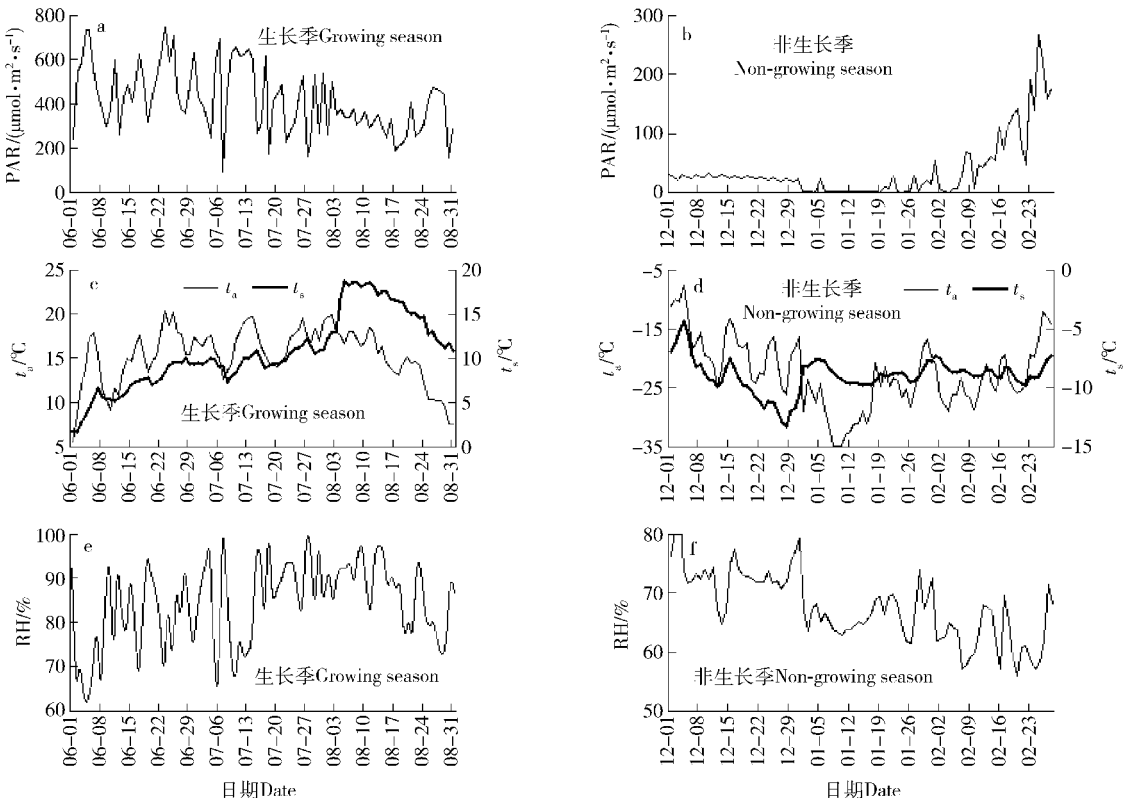


图1 兴安落叶松林生长季与非生长季气象因子月平均日变化特征

Fig. 1 Changes of meteorological factors in the *Larix gmelinii* forest in the growing and non-growing seasons

地面开始蒸发;同时,冰雪消融,RH的变化受多种因素影响有待进一步研究。

3.2 CO₂ 通量日变化特征

根据 CO₂ 通量 30 min 有效观测数据,分析了兴安落叶松林生态系统生长季和非生长季的 CO₂ 通量日变化特征(图 2)。从图 2 可以看出,在生长季,CO₂ 通量具有明显的日变化规律,日出后,随着太阳高度角的增大,光照强度的增强及气温的升高,植被的光合作用随之增强。从 06:00 开始 CO₂ 通量值从正值逐渐变为负值,表明兴安落叶松林生态系统的光合速率大于呼吸速率,生态系统与大气 CO₂ 交换开始由碳释放转为碳吸收,且碳吸收能力逐渐加大,一直持续到(12:00—13:30)达到吸收峰值之后。随着太阳高度角的变小,光照强度的减弱,气温的降低,植被光合作用能力变小,CO₂ 吸收量也逐渐减弱,在 18:30—19:30 由负值逐渐转为正值,至次日 06:00 一直为碳排放。由此可以得出兴安落叶松林生态系统 CO₂ 通量的日变化规律为:06:00—19:30 为碳汇,峰值在 12:30—13:30 之间,夜间从 19:30 至次日 06:00 为碳源,变化幅度较小,CO₂ 通量日变化范围为 $-1.09 \sim 0.11 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在非生长季,兴安落叶松林生态系统 CO₂ 通量较小,变化相对稳定,通常小于 $0.3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,表现为碳释放。研究结果与其他学者研究的针阔混交林和农林复合生态系统 CO₂ 通量日变化规律较为一致^[20,23]。

3.3 CO₂ 通量与主要环境因子的关系

兴安落叶松林生态系统内植被的生物学特性决定了 CO₂ 通量的变化规律,同时不同的环境条件对森林生态系统 CO₂ 通量也会产生显著的调节作用^[24]。本文探讨 CO₂ 通量与光合有效辐射、空气温度、土壤温度和土壤含水率关系。

3.3.1 光合有效辐射与 CO₂ 通量

光合有效辐射强度直接影响植物光合作用的大小,光合作用关系到森林生态系统总生产力(GEP),生态系统总生产力减去生态系统呼吸(R_e)等于生

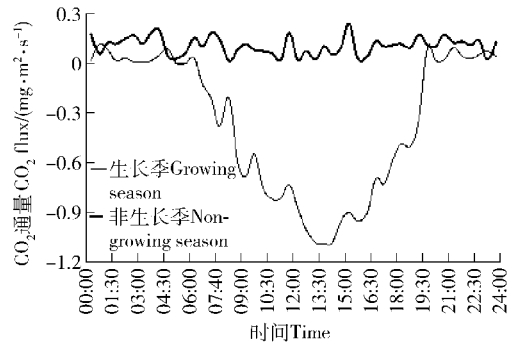


图 2 兴安落叶松林生态系统生长季与非生长季 CO₂ 通量日变化进程

Fig. 2 Daily variations of CO₂ flux in the *Larix gmelinii* forest in the growing and non-growing seasons

态系统净生产力(NEE),生态系统净生产力与生态系统 CO₂ 通量大小相等,符号相反^[5]。本文分别采用生长季和非生长季光合有效辐射日平均值与 CO₂ 通量值,绘制散点图并进行相关关系拟合(图 3)。从图 3 可以看出,在生长季,兴安落叶松林生态系统 CO₂ 通量随着光合有效辐射的增强而减小,呈对数相关($R^2 = 0.4861, P < 0.01$),表明光合有效辐射强弱直接影响森林生态系统净生产力(NEE)。光合有效辐射对 CO₂ 通量的影响较为显著,随着光合有效辐射的逐渐增强($> 100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),CO₂ 通量值逐渐变小,生态系统净生产力逐渐增加;当光合有效辐射最强时(接近 $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),CO₂ 通量达到最低值,生态系统净生产力达到峰值。结果表明:光合有效辐射是影响 CO₂ 通量的直接因素。

非生长季,光合有效辐射对 CO₂ 通量的影响不显著,相关关系分析,决定系数 $R^2 = 0.0013$ 。主要原因是,研究区属于高纬度的寒温带,12 月至次年 2 月气温在 $-20 \sim -30 \text{ }^\circ\text{C}$,极端气温可达到 $-45 \text{ }^\circ\text{C}$,植物处于休眠状态,代谢活动停止,即使有充足的光照,也不进行光合作用,从而导致非生长季整个生态系统表现为碳释放。因此,光合有效辐射是影响兴安落叶松林 CO₂ 通量的重要环境因子,这与刘乙

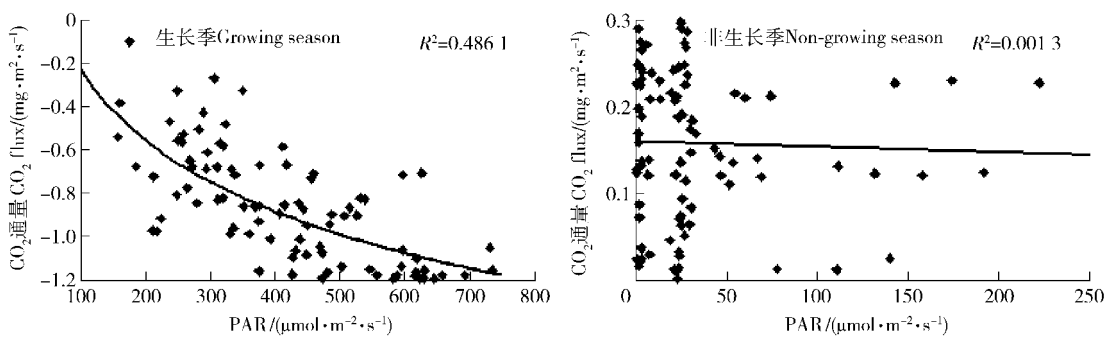


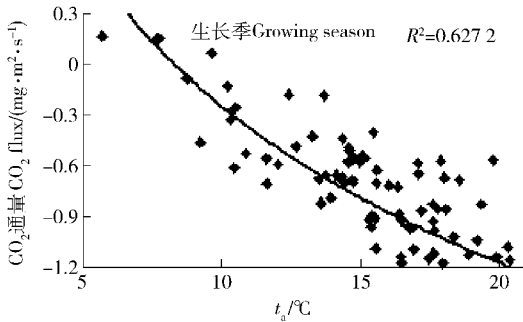
图 3 生长季和非生长季白天 CO₂ 通量与光合有效辐射的关系

Fig. 3 Relationship between day CO₂ flux and photosynthetic active radiation in the growing and non-growing seasons

等^[25]的研究结果类似。

3.3.2 CO₂通量与气温

空气温度的高低影响植物叶片酶的活性,进而影响到植物光合作用强弱。本文用林冠层 32 m 高度的日平均气温与兴安落叶松林生态系统生长季和非生长季的 CO₂通量进行相关关系分析(图 4)。从图 4 可看出,生长季的 CO₂通量与气温呈显著对数相关($R^2 = 0.6272$),CO₂通量值随 t_a 的升高而降低,生态系统的净生产力增加,碳吸收能力增大。说明 t_a 升高可促进植物叶片酶的活性有利于植物光



合作用,当 t_a 在 13 °C 以下时,随着 t_a 的升高,CO₂通量缓慢增加;当 t_a 在 13 °C 以上时,随着 t_a 升高,碳 CO₂通量值增加速度明显加快,碳汇量增加较快。研究表明 t_a 达到 13 °C 以上时,兴安落叶松叶片酶活性逐渐加强,进入生理活动旺盛期,光合作用显著增强。非生长季 CO₂通量与气温($R^2 = 0.0165$)相关不显著,其原因主要是大兴安岭地处寒温带是极端低温月份,大雪覆盖,植物、土壤微生物均进入休眠期,光合、呼吸作用等生理代谢基本停止的缘故。

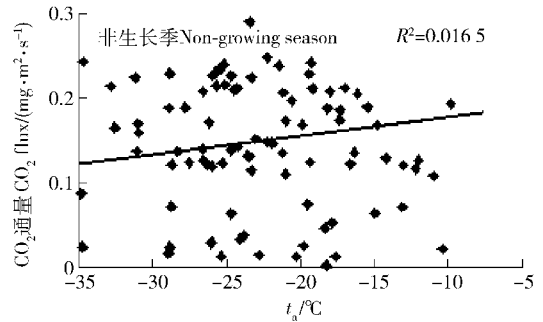
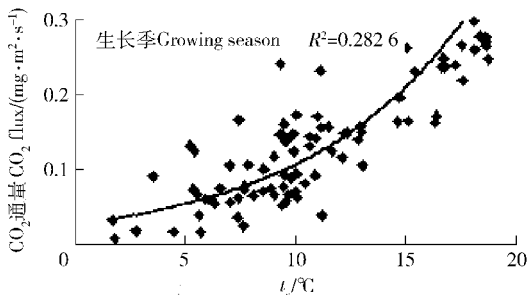


图 4 生长季与非生长季 CO₂通量与气温的关系

Fig. 4 Relationship between CO₂ flux and the air temperature in the growing and non-growing seasons

3.3.3 CO₂通量与土壤温、湿度

研究表明,植物呼吸作用的强弱主要由温度和水分决定^[26-27],因此土壤温度和水分是控制生态系统呼吸最主要的环境因子。在夜间,植物的光合作用停止,大气与森林生态系统之间的 CO₂通量交换主要由生态系统的呼吸过程来控制,因此夜间生态系统总呼吸量与夜间 CO₂通量相等。图 5 为兴安落叶松林生态系统生长季和非生长季夜间 CO₂通量对土壤温度之间的响应关系。从图 5 可看出,兴安落叶松林生态系统在生长与非生长季,随着土壤温度的升高,CO₂通量显著增加,二者均呈指数相关(生长季 $R^2 = 0.2826$,非生长季 $R^2 = 0.2223$),表明土壤温度升高对于兴安落叶松林生态系统呼吸起到促进作用。主要原因是植物根系呼吸量与土壤微生物活性随土壤温度的升高而增强,导致呼吸作用加强,



使得整个生态系统的碳排放量增加;反之,土壤温度越低,碳排放量减少。

相关研究表明,森林生态系统呼吸与土壤温度的相关性会因土壤含水率的不同而有所差异^[25]。本研究根据生长季 6、7、8 月与非生长季 12 月、次年 1 月、次年 2 月土壤含水率平均值为界限,将生长季和非生长季的土壤含水率观测数据分别划分为 2 个区间:生长季 $\leq 84\%$ 和 $> 84\%$,非生长季 $\leq 68\%$ 和 $> 68\%$ 。研究不同土壤水分条件下兴安落叶松生态系统 CO₂通量与土壤温度之间的关系,拟合结果表明两者均为指数函数关系(图 6、7)。

在生长季,土壤含水率 $> 84\%$ 时,CO₂通量与土壤温度的相关不显著($R^2 = 0.2556$),2013 年 6—8 月,降雨量比较频繁且强度大,过量的土壤水分可能会造成水分胁迫;同时,连绵的阴雨天气导致土壤温

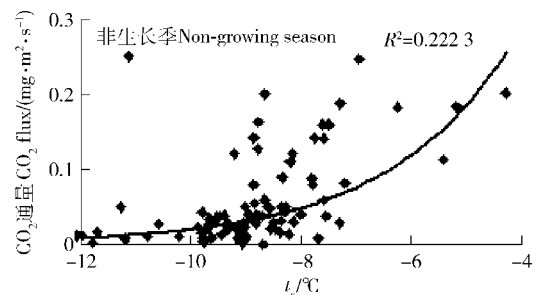
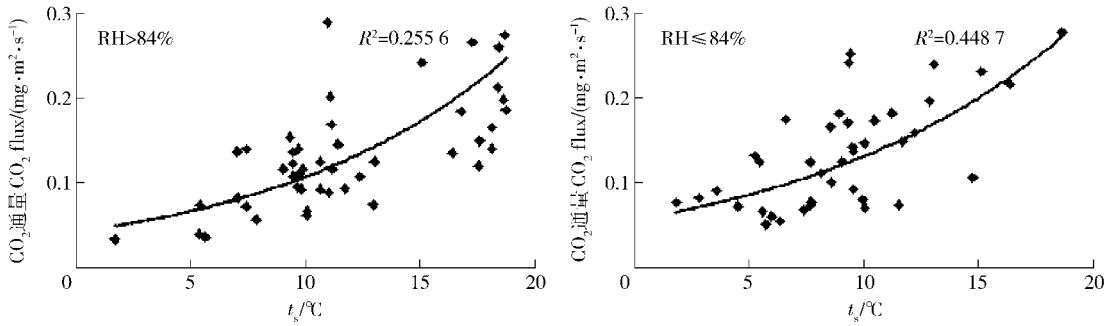
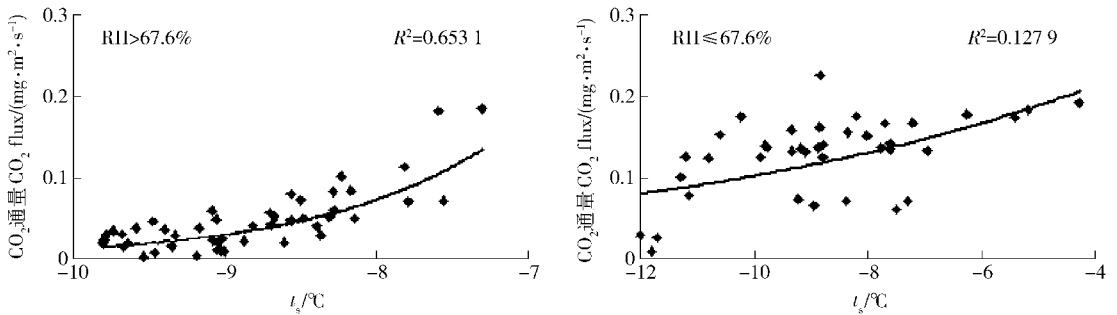


图 5 土壤温度与 CO₂通量的关系

Fig. 5 Relationship between soil temperature and CO₂ flux

图6 不同土壤含水率下生长季夜间 CO₂ 通量与土壤温度的关系Fig. 6 Relationship between night CO₂ flux and soil temperature in growing season at different soil moisture contents图7 非生长季夜间不同土壤含水率下 CO₂ 通量与土壤温度的关系Fig. 7 Relationship between soil temperature and night CO₂ flux in different soil moisture contents at non-growing season

度降低,蒸散量较少,制约了土壤微生物和植物的呼吸作用。土壤含水率 $\leq 84\%$ 时,CO₂通量与土壤温度的决定系数为 $R^2 = 0.4487$ 。随着土壤温度的增加,生态系统呼吸速率逐渐加快;因此就兴安落叶松林生态系统而言,当年的降水影响土壤的含水量和土壤的温度,进而对兴安落叶松林碳交换产生一定的影响。

在非生长季,当土壤含水率 $> 67.6\%$ 时,CO₂通量与土壤温度的决定系数 $R^2 = 0.6531$;土壤含水率 $\leq 67.6\%$ 时,其决定系数 $R^2 = 0.1279$,兴安落叶松林生态系统呼吸作用在2种不同土壤水分条件下差异较大(图7)。分析原因,在非生长季的12月、次年1月、次年2月份,由于12月的降雪量大于次年1月、次年2月份,大雪吸收了大气的热量,覆盖对地温起到了保温的作用。

综合分析图5、6、7得出,土壤温度、土壤含水率对于夜间兴安落叶松林生态系统CO₂通量均有一定的影响,土壤温度的影响较明显,土壤含水量对兴安落叶松林生态系统CO₂通量影响不大。因为兴安落叶松林土壤含水率在60%以上,达到了饱和含水量,因此水分的变化几乎不影响CO₂通量的变化。

4 结论与讨论

1) 兴安落叶松生态系统的PAR从6—8月整

体呈下降趋势,在 $86.25 \sim 748 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之间波动,辐射强度在6月下旬到7月末较大;12月、次年1月、次年2月份分别为 (24.96 ± 4.19) 、 (15.93 ± 5.20) 和 $(39.69 \pm 6.74) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,日平均PAR范围为 $1.02 \sim 266.45 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。气温6、7、8月的变化范围在 $5.69 \sim 20.37 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,7月份最高; t_s 的变化范围为 $1.70 \sim 18.74 \text{ }^\circ\text{C}$,8月份最高。12月、次年1月、次年2月份 t_a 为 $-34.78 \sim -7.64 \text{ }^\circ\text{C}$,1月平均气温最低; t_s 变化范围 $-4.29 \sim -13.32 \text{ }^\circ\text{C}$,最低出现在12月份。 t_a 与 t_s 变化趋势基本相同,吸收和释放热量滞后;土壤平均含水率6、7、8月份均在80%左右,8月份最大为87.24%。12月、次年1月和次年2月份,RH在73.57%~62.42%之间,变化不明显。

2) 在生长季,兴安落叶松林生态系统整体表现为较强的碳汇,CO₂通量呈现出较明显的日变化特征,白天为碳吸收,夜间为碳释放,昼夜CO₂通量变化范围为 $-1.09 \sim 0.11 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。在非生长季,CO₂通量无明显日变化趋势,昼夜通量变动范围 $0 \sim 0.3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,兴安落叶松林生态系统整体表现为碳源。

3) 生长季光合有效辐射与CO₂通量呈对数关系($R^2 = 0.4861$),光合有效辐射是光合作用的前提条件,在一定范围内,光合有效辐射越强,兴安落叶

松林生态系统碳汇能力越大,当超过植物光合作用饱和点后,光合作用将不再随光照的增强而增加。非生长季 CO_2 通量与光合有效辐射相关性不显著 ($R^2 = 0.0013$),非生长季,植物停止生长,代谢活动停止, CO_2 通量基本不受光照强度大小的影响了。

4) 生长季,兴安落叶松林 CO_2 通量与气温有很好的相关性,决定系数 $R^2 = 0.6272$,表明温度是兴安落叶松生态系统 CO_2 通量的主要限制因子。 CO_2 通量随气温的升高而降低,增加碳吸收量;非生长季12月—次年2月份,气温的变化对 CO_2 通量无显著作用。

5) 土壤温度和土壤含水率对 CO_2 通量的影响,主要体现在生态系统呼吸上。环境因子变化特征研究表明,兴安落叶松林生态系统的土壤含水率在62%~87%之间,生长季与非生长季分别为84%和67%,土壤含水率达到67%时对 CO_2 通量基本没有影响了。在水分不成为限制因子的情况下,土壤温度对兴安落叶松林生态系统 CO_2 通量影响起主要作用。研究表明: CO_2 通量与土壤温度呈指数相关,在一定的温度范围内,土壤温度升高会加速植物和微生物的代谢,导致森林生态系统呼吸作用增强,促进 CO_2 的排放。

参 考 文 献

- [1] FALGE E, BALDOCCHI D, TENHUNEN J, et al. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113:53-74.
- [2] 于贵瑞,牛栋,王秋凤. 联合国气候变化框架公约谈判中的焦点问题[J]. *资源科学*, 2001, 23(6):10-16.
YU G R, NIU D, WANG Q F. Focal issues in the negotiation of united nations framework convention on climate change [J]. *Resources Science*, 2001, 23(6):10-16.
- [3] 方精云,朴世龙,赵淑清. CO_2 失汇与北半球中高纬度陆地生态系统的碳汇[J]. *植物生态学报*, 2001, 26:594-602.
FANG J Y, PU S L, ZHAO S Q. The role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the northern hemisphere [J]. *Phytoecologica Sinica*, 2001, 26:594-602.
- [4] 吴家兵,张玉书,关德新. 森林生态系统 CO_2 通量研究方法与发展[J]. *东北林业大学学报*, 2003, 31(6):49-51.
WU J B, ZHANG Y S, GUAN D X. Methods and progress of research on CO_2 flux of forest ecosystem [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, 31(6):49-51.
- [5] 周丽艳. 中国北方针叶林生长季碳交换及其调控机制[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(20):2449-2456.
ZHOU L Y. Carbon exchange of Chinese boreal forest during its growth season and related regulation mechanisms [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(20):2449-2456.
- [6] 于成龙,刘丹. 小兴安岭天然阔叶混交林生长季 CO_2 通量特征分析[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(4):525-529.
YU C L, LIU D. Analysis CO_2 flux during growth season of natural broadleaved mixed forest in Xiaoxinganling Mountains [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(4):525-529.
- [7] 王宇,周广胜,贾丙瑞,等. 中国东北地区阔叶红松林与兴安落叶松林的碳通量特征及其影响因子比较[J]. *生态学报*, 2010, 30(16):4376-4388.
WANG Y, ZHOU G S, JIA B R, et al. Comparisons of carbon flux and its controls between broad Leaved Korean pine forest and Dahurian larch forest in northeast China [J]. *Ecologica Sinica*, 2010, 30(16):4376-4388.
- [8] 李勇,刘继明,秦世立,等. 大兴安岭3种林分夏季土壤呼吸的日变化[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(10):65-80.
LI Y, LIU J M, QIN S L, et al. Daily variation of soil respiration in three typical stands in Daxing'an mountains in summer [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(10):65-80.
- [9] 孟春,王俭,狄海廷. 白桦和落叶松人工林生长季节土壤 CO_2 排放通量及主要影响因素[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(4):56-70.
MENG C, WANG J, DI H T. Soil CO_2 flux in *Betula platyphylla* and *Larix gmelini* plantations and its main influence factors during growing season [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2011, 39(4):56-70.
- [10] 赵光影,刘景双,王洋. CO_2 体积分数升高对土壤-植物系统碳过程的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2009, 37(3):99-102.
ZHAO G Y, LIU J S, WANG Y. Effects of elevated atmospheric CO_2 on carbon dynamics in soil-plant system [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2009, 37(3):99-102.
- [11] 杨金艳,王传宽. 土壤水热条件对东北森林土壤表面 CO_2 通量的影响[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(2):286-294.
YANG J Y, WANG C K. Effects of soil temperature and moisture on soil surface CO_2 flux of forests in northeastern China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(2):286-294.
- [12] HUANG H, ZHANG J S, MENG P, et al. Seasonal variation and meteorological control of CO_2 flux in a hilly plantation in the mountain areas of north China [J]. *Meteorologica Sinica*, 2011, 25(2):238-248.
- [13] 赵仲辉. 亚热带杉木林生态系统与大气间的碳通量研究[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2011.
ZHAO Z H. A study on carbon flux between Chinese fir plantations and atmosphere in subtropical belts [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2011.
- [14] 王妍,彭镇华,江泽慧,等. 长江滩地杨树林生态系统的碳通量特征[J]. *林业科学*, 2009, 45(11):156-160.
WANG Y, PENG Z H, JIANG Z H. Characteristics of carbon flux of *Populus* forest in the reaches of Yangtze river in Hunan [J]. *Forestry Science*, 2009, 45(11):156-160.
- [15] 耿绍波. 河南西平杨树人工林生态系统碳通量及其环境响应研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
GENG S B. Study on the carbon flux observation over poplar plantation ecosystem of Xiping city in Henan province of China [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [16] 赵仲辉,张利平,康文星,等. 湖南会同杉木人工林生态系统 CO_2 通量特征[J]. *林业科学*, 2011, 47(11):6-12.

- ZHAO Z H, ZHANG L P, KANG W X, et al. Characteristics of CO₂ flux in a Chinese fir plantation ecosystem in Huitong County, Hunan Province[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(11):6-12.
- [17] 周丽艳. 中国北方针叶林生态系统碳通量及其影响机制研究[D]. 北京:北京林业大学,2011.
- ZHOU L Y. Study on carbon flux and its controlling mechanisms in Chinese boreal forest ecosystem[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [18] WILCZAK J M, ONCLEY S P, STAGE S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2001, 99:127-150.
- [19] WEBB E K, PEARMAN G, LEUNING R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447):85-100.
- [20] 沈文清. 江西千烟洲人工针叶林生态系统碳收支研究[D]. 北京:北京林业大学,2006.
- SHEN W Q. Carbon budgets of coniferous plantations in Qianyanzhou Experimental Station, Jiangxi, China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.
- [21] FALGE E, BALDOCCHI D, OLSON R O, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1):43-69.
- [22] ZHANG L M, Gap filling and partitioning[R]. Beijing: China Flux Training Course, 2009.
- [23] 于贵瑞,孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- YU G R, SUN X M. The principle and method of terrestrial ecosystem flux measurements[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [24] FANG J Y, WANG G G, LIU G H, et al. Forest biomass of China: an estimate based on the biomass-volume relationship[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8:1084-1091.
- [25] 刘乙,胡海波,刘准桥. 北亚热带次生栎林生态系统非生长季 CO₂通量特征[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(7):22-27.
- LIU Y, HU H B, LIU Z Q. CO₂ flux characteristics of an secondary oak forest ecosystem in Non-growing seasons in Northern subtropics, China[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(7):22-27.
- [26] 李超,胡海波. 次生栎林生态系统碳通量与环境因子非对称相应机制[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(9):94-101.
- LI C, HU H B. Response mechanism between carbon flux and asymmetrical environmental factors in secondary oak forest ecosystem[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2012, 32(9):94-101.
- [27] 于贵瑞,孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征[M]. 北京:科学出版社,2008.
- YU G R, SUN X M. Flux measurement and research of terrestrial ecosystem in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.

(责任编辑 赵 勃
责任编辑委 臧润国)