

# 贝加尔针茅草原生态系统生长季碳 通量及其影响因素分析

徐丽君<sup>1</sup>, 唐华俊<sup>1</sup>, 杨桂霞<sup>1</sup>, 王旭<sup>1</sup>, 王波<sup>2</sup>, 辛晓平<sup>1\*</sup>

(1. 农业部资源遥感与数字农业重点开放实验室 呼伦贝尔国家野外站 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081;  
2. 中国工程院咨询服务中心, 北京 100088)

**摘要:**以贝加尔针茅草原为研究对象,利用涡度相关通量测量系统,测定 CO<sub>2</sub> 通量及其影响因子。结果表明,贝加尔针茅草原 CO<sub>2</sub> 通量存在明显的日、季变化,不同生育阶段 CO<sub>2</sub> 通量日、季变化呈“U”型,其中以7月最为明显,CO<sub>2</sub> 通量固碳、释放碳最大值均出现在7月,分别为-0.56和0.83 mg/(m<sup>2</sup>·s)。潜热通量、显热通量、有效光合辐射与 CO<sub>2</sub> 通量显著相关,与土壤温度、土壤含水量相关不显著。

**关键词:**贝加尔针茅草原;涡度相关技术;CO<sub>2</sub> 通量;环境因子

**中图分类号:**S812.29 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-5759(2011)06-0287-06

\* 草地生态系统是全球陆地生态系统的主体类型,在全球碳循环研究中占有重要位置<sup>[1-3]</sup>。草地生态系统碳素行为很活跃,碳蓄积能力强,这些潜在碳汇在全球碳循环中起着重要作用<sup>[4-6]</sup>。近年来涡度相关技术的进步使得长期的定位观测成为可能。涡度相关技术是对大气与森林、草原或农田等生态系统间的 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O 和热量通量进行非破坏性测定的一种微气象观测技术<sup>[6-8]</sup>。目前,涡度相关技术已经广泛应用于陆地生态系统 CO<sub>2</sub> 吸收与排放的测定中,也是世界上 CO<sub>2</sub> 和水热通量测定的标准方法,所观测的数据已经成为检验各种模型估算精度的权威资料<sup>[8-11]</sup>。利用涡度技术研究草地生态系统碳通量变化在国外已有大量报道,而目前国内相关研究报道较少,特别是涡度相关技术的应用,多集中在草地微生物<sup>[12,13]</sup>与呼吸方面的研究<sup>[14]</sup>。

呼伦贝尔草原是我国目前原生植被保存最好、景观生态类型和生物多样性最丰富的草原生态系统类型,是我国北方草原的主要代表,是最大的生物系统<sup>[15,16]</sup>。呼伦贝尔草原对保持生态多样性,保持水土和维护生态平衡发挥着重要作用,而且是我国北方乃至东亚地区的重要生态屏障。因此,以呼伦贝尔草甸草原为典型代表,深入研究草原生态系统碳循环过程及其与环境因子之间的影响和响应机制,其结果可为估测贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)草原生态系统碳收支估算和相关碳模型参数修正提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区自然概况

试验地选在呼伦贝尔国家野外站(内蒙古海拉尔市谢尔塔拉镇),北纬 49°06'~49°32',东经 119°32'~120°35',研究区域内水热条件较好,属于温带大陆性气候,海拉尔河与伊敏河交汇于此,水资源丰富,无霜期一般为 110 d 左右,年平均气温-2℃,日照时效平均为 2 807 h,太阳辐射年总量平均为 5 161 MJ/m<sup>2</sup>。土壤为黑钙土,肥力中等,土壤含水量在 13%~15%。研究区为贝加尔针茅草原,围封 3 年,面积为 33.33 hm<sup>2</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 数据来源** 通量观测系统为开路式涡度相关系统,主要由开路式 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 分析仪(CS7500, LI-COR, USA)、超声风速仪(CSAT-3, Campbell, USA)和数据采集器(CR3000, Campbell, USA)组成。观测仪器安装在 4 m 高度,测量植被与大气间的通量交换,采样频率为 10 Hz,同时在线计算 30 min 通量及其他各种必要的协方差并把结果存储在数据采集器内。按照微气象学符号,净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换(net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange, NEE)向下通量(即碳吸收)用负号表示。

\* 收稿日期:2010-08-26;改回日期:2011-03-21

基金项目:草畜业数字化管理与优化决策技术研究(2007AA10Z230)和现代农业产业技术体系建设专项资金资助。

作者简介:徐丽君(1978-),女,蒙古族,内蒙古通辽人,博士。E-mail: xulijun\_nmg@163.com

\* 通讯作者。E-mail: xinxp@sina.com

微气象观测系统主要包括:辐射(CNR-1, Kipp&Zonen, The Netherlands)、光合有效辐射(LI-190SB, LI-COR, USA)监测,辐射探头安装高度为2 m;2,4,10,20,32 m处的空气温/湿度(HMP45C, Campbell, USA)、风速(Model010C, Campbell, USA)以及2 m处风向(Model0 20C, Campbell, USA)监测。其他相关环境要素如温度、相对湿度、降水量数据均通过气象观测站固定观测,土壤温度(5,10,15,20,40 cm)、土壤湿度(10,20,50,100,180 cm)等分别采用温度109和水分探头CS(CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.)进行定位测定。

**1.2.2 数据分析与处理** 选取了2008年贝加尔针茅草原生态系统主要生长季(6—10月)的碳通量和相关数据进行研究,为确保数据的准确性,对涡动相关系统的半小时通量数据进行了3次坐标旋转和WPL密度效应修正<sup>[17]</sup>。为了消除夜间低湍流的影响,以夜间摩擦风速 $>0.1$  m/s为标准对数据进行了筛选<sup>[5]</sup>。经过数据筛选和剔除异常点后,白天的碳通量利用光响应曲线进行插补<sup>[5,18,19]</sup>;夜间当摩擦速度 $>0.1$  m/s时,碳通量采用指数关系插补。

### 1.3 统计分析

试验数据为2008年贝加尔针茅草原生长季数据,选择各生长季连续7 d的试验数据进行计算,文中数据均是7 d数据的平均值。土壤温度、土壤湿度设置5个重复。数据采用SAS 8.0进行相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 气象因子变化

试验区的降水量、土壤湿度及土壤温度存在一定的差异性(表1)。8月各项指标均出现明显的“拐点”,出现了“高温低湿”的现象,这一现象的出现对牧草的生产造成较大的影响,这将在下面草原CO<sub>2</sub>通量的变化规律上有所体现。

### 2.2 贝加尔针茅草原碳通量的月均日动态

贝加尔针茅草原生态系统CO<sub>2</sub>通量月平均变化具有明显的季节性,不同月份间CO<sub>2</sub>通量变化存在一定的差异性(图1)。7月CO<sub>2</sub>通量日变化波动较大,其余月份CO<sub>2</sub>通量日变化波动较平缓。6—10月白天CO<sub>2</sub>通量以小于0为主,表明地表植被和土壤总体上表现为CO<sub>2</sub>吸收。夜间CO<sub>2</sub>通量以大于0为主,说明地表植被和土壤总体上表现为CO<sub>2</sub>排放。CO<sub>2</sub>通量日变化幅度夏季明显高于秋季,夏季CO<sub>2</sub>通量平均日变化幅度为48.98 kg C/(hm<sup>2</sup>·d),秋季CO<sub>2</sub>通量平均日变化幅度为20.23 kg C/(hm<sup>2</sup>·d),说明夏季地表植被具有更强的光合吸收能力。从各月份CO<sub>2</sub>通量变化来看,随着气温的升高和降水量的增加(土壤含水量的增加),植物日间CO<sub>2</sub>吸收量和夜间的CO<sub>2</sub>排放量都开始增大,出现了不同程度的日吸收峰值,碳通量的日变化呈“U”型曲线,10月变化不明显。

2008年贝加尔针茅草原生态系统生长季碳通量的月均最大固碳量和最大碳排放量均出现在7月,分别为-0.56和0.83 mg/(m<sup>2</sup>·s),说明贝加尔针茅草原生态系统在7日日间的碳固定和夜间的碳排放活动都较强。

### 2.3 贝加尔针茅草原碳通量影响因素分析

**2.3.1 碳通量与潜热通量、显热通量的关系** 潜热通量和显热通量与碳通量总体上呈显著相关关系(图2),在不同生长时期,变化趋势相似。6月以后,海拉尔地区气温逐渐回升,水热条件逐渐转好,贝加尔针茅草原植被生长加速。分析结果显示,6—7月CO<sub>2</sub>通量随着潜热通量、显热通量的增加呈逐渐下降的变化趋势,即CO<sub>2</sub>通量排放量随潜热通量、显热通量的增加而逐渐减少,以碳吸收为主。8月以后,贝加尔针茅草原生态系统碳通量以碳排放为主。从相关系数看,潜热通量、显热通量与CO<sub>2</sub>通量相关系数6,7和9月明显高于8和10月。显热通量与CO<sub>2</sub>通量的相关系数略高于潜热通量。

**2.3.2 碳通量与光合有效辐射(PAR)的关系** 不同时期,CO<sub>2</sub>通量与PAR相关程度不同,6—9月相关系数分别为0.835,0.897,0.445和0.854,10月缺值(图3)。

表1 气象因子月平均变化

Table 1 Average monthly changes in meteorological factors in 2008

月份 Month	降水量 Rainfall (mm)	土壤湿度 Soil humidity (%)	土壤温度 Soil temperature (°C)	气温 Air temperature (°C)
6	45.5	24.49	21.37	17.90
7	120.2	35.82	19.46	19.55
8	39.4	16.51	19.35	17.60
9	30.5	31.61	12.42	9.35
10	23.9	26.66	4.84	0.60

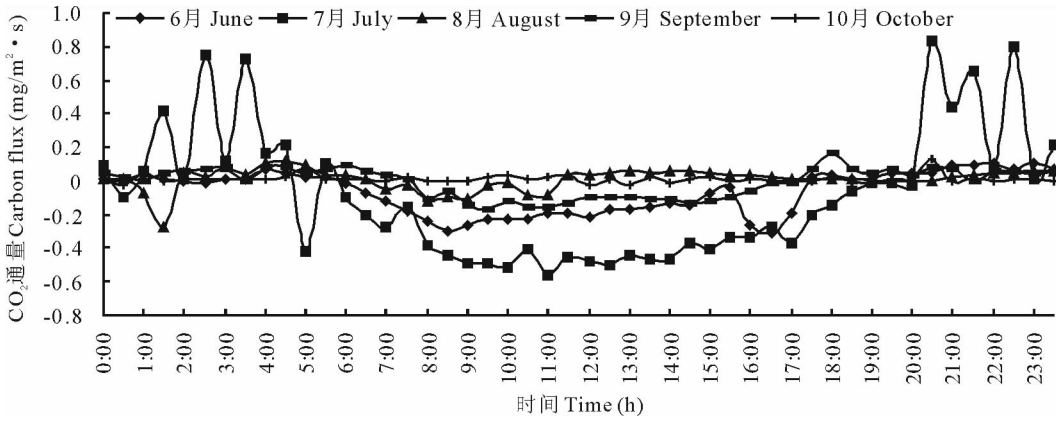


图 1 贝加尔针茅草原碳通量月均日变化

Fig. 1 Average data change in one month of net ecosystem carbon flux exchange over *S. baicalensis* in the growing season

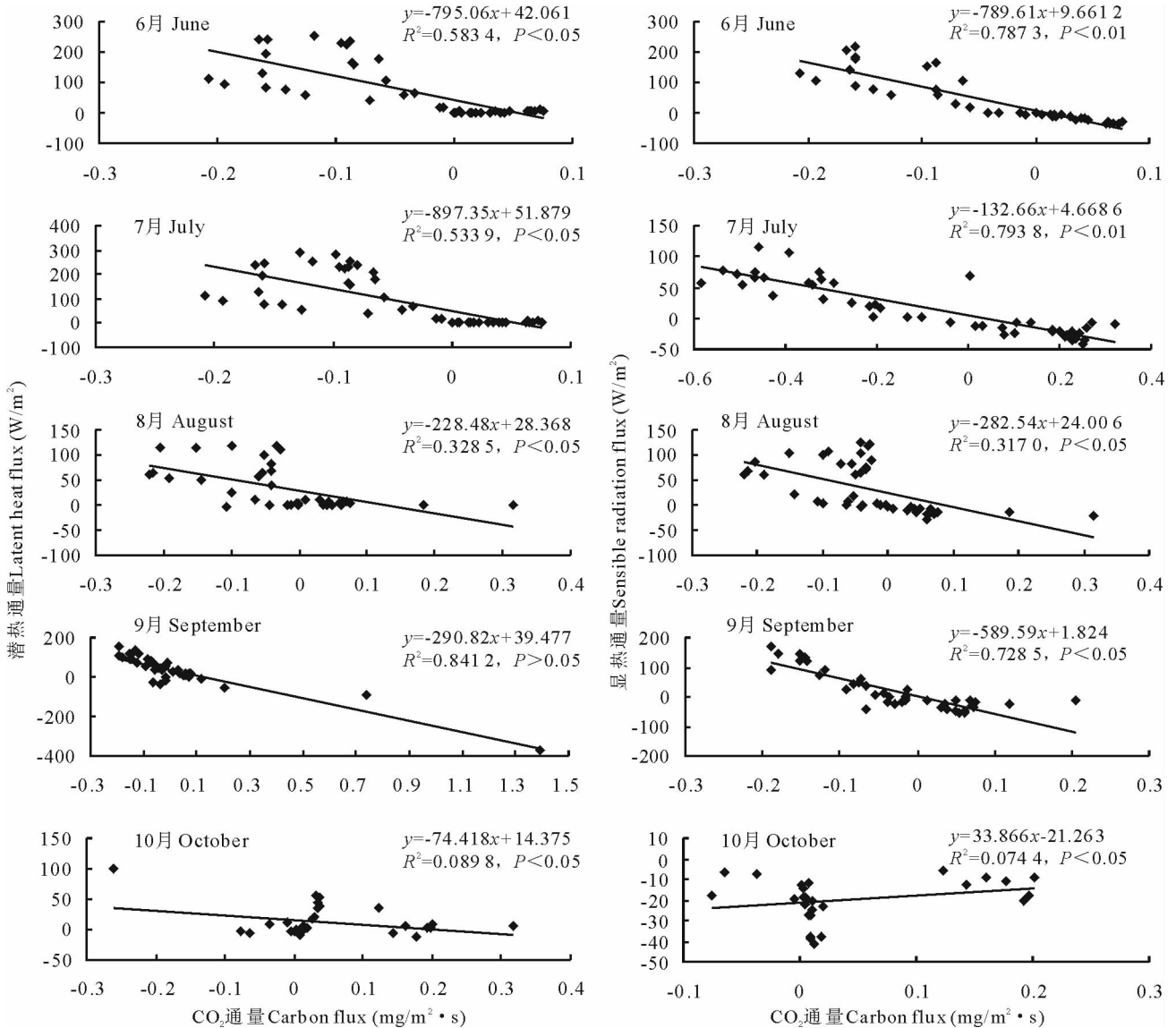


图 2 CO<sub>2</sub> 通量与潜热通量、显热通量回归分析

Fig. 2 Regression analysis between carbon flux and latent heat flux, sensible radiation flux

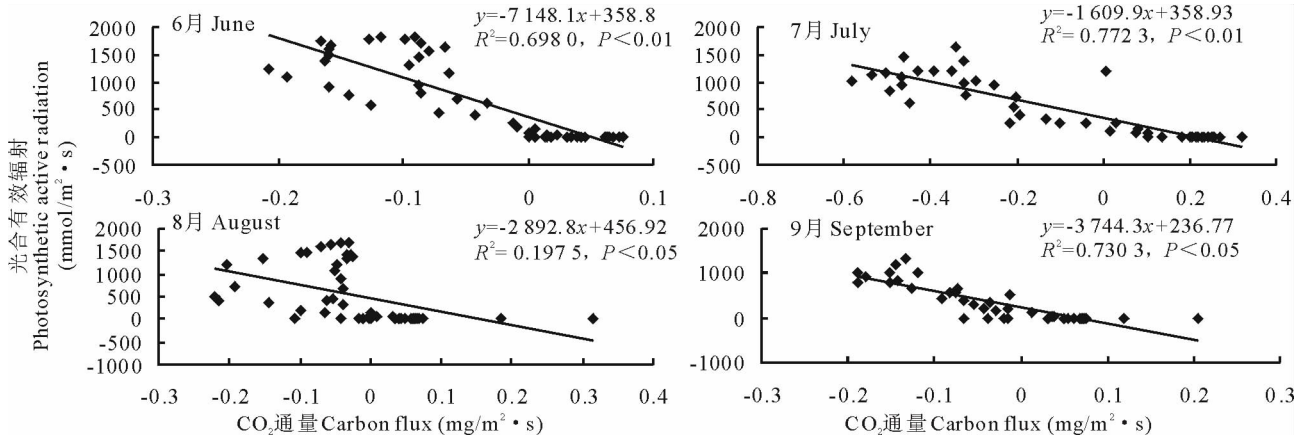
图3 CO<sub>2</sub> 通量与光合有效辐射回归分析

Fig. 3 Regression analysis between carbon flux and PAR

**2.3.3 碳通量与土壤温度、土壤含水量的关系** 草地 CO<sub>2</sub> 通量与土壤温度、土壤含水量间总体上呈一元二次线性关系(表 2)。CO<sub>2</sub> 通量与土壤温度间的关系与生长季节有关,6,8,和 10 月呈负相关,7 和 9 月呈正相关。CO<sub>2</sub> 通量与土壤含水量总体上呈正相关,但不显著,相关系数与土壤温度相比相对较低。

表 2 贝加尔针茅草原生态系统碳通量与土壤温度、土壤含水量间相关分析

Table 2 Correlation analysis among carbon flux and soil temperature, soil water content

指标 Index	月份 Month	回归方程 Regression equation	相关系数 Correlation coefficient (R)	显著性 Significance (P)
土壤温度 Soil temperature	6	$y = -418.45x^2 - 41.407x + 22.585$	0.569	<0.01
	7	$y = 0.0485x + 22.261$	0.580	<0.01
	8	$y = -32.153x^2 + 4.3223x + 20.939$	0.366	<0.01
	9	$y = 1.583x + 11.081$	0.130	<0.05
	10	$y = -6.9479x^2 - 0.2847x + 3.7765$	0.174	<0.05
土壤含水量 Soil water content	6	$y = 0.9395x^2 + 0.0965x + 0.2331$	0.536	<0.05
	7	$y = 0.0433x^2 + 0.0091x + 0.3235$	0.146	<0.05
	8	$y = 0.0074x^2 - 0.0017x + 0.1456$	0.121	<0.05
	9	$y = -0.0074x^2 + 0.0122x + 0.2537$	0.170	<0.05
	10	$y = -0.2311x^2 + 0.0306x + 0.2659$	0.466	<0.05

### 3 讨论

海拉尔地区由于气温低,贝加尔针茅草原通常在 5 月才进入返青期,该阶段温度低,日平均气温在 9℃左右,但土壤水分条件相对较好,主要以雨、雪作为水分来源,月降水量在 41 mm 左右,植物的生长活动逐渐恢复,土壤呼吸释放 CO<sub>2</sub> 逐渐增多。进入 6 月,随着雨量和温度的逐渐升高,白天碳吸收峰值有所增强。进入 7 月以后,温度、水分不再成为光合作用的限制因子,适宜的温度、水分、植物的根系都将大大促进系统的呼吸<sup>[20]</sup>,从测定结果可以看出,7-9 月这一阶段碳吸收活动最强,特别是 7 月,NEE 形成宽大的单峰曲线。10 月以后,贝加尔针茅草原进入生长末期,植物体逐渐衰老枯萎,光合作用微弱,整个系统碳吸收活动微弱,表现为碳排放的过程。

6 月 CO<sub>2</sub> 通量日波动较大,日间基本处于碳吸收阶段,夜间处于碳排放状态;7 月出现了明显的 CO<sub>2</sub> 日吸收峰,分别出现在 10:00-11:00 和 14:00 期间,CO<sub>2</sub> 通量的变化呈“U”型曲线(图 1);到了 10 月,除在凌晨 0:00-6:00 期间 CO<sub>2</sub> 通量波动较大外,全天 CO<sub>2</sub> 通量日变化都较为平缓,且全天大部分时间均处于碳排放状态。与其他针茅草原生态系统相比,贝加尔针茅草原高于克氏针茅草原(最小值和最大值分别为 -0.16 和 0.08

$\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ), 与以  $C_4$  植物为主的大须芒草 (*Andropogon gerardii*) 草原 ( $-1.4$  和  $0.5 \text{ mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )、美国俄克拉荷马州地区的高草草原 ( $-1.1$  和  $0.44 \text{ mg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) 相近。说明影响草原生态系统碳通量的因素, 除了与光照、温度、水分等环境因素有关外, 植物种类、地理位置等也是影响碳排放的因素<sup>[18,20]</sup>。

#### 4 结论

2008 年生长季, 贝加尔针茅草原生态系统  $\text{CO}_2$  通量白天以固碳为主, 夜间以碳释放为主, 进入生长季后期,  $\text{CO}_2$  通量白天以碳释放为主, 夜间以固碳为主; 贝加尔针茅草原生态系统生长季固碳和碳释放的最大值均出现在 7 月, 相应的数值分别为  $-0.56$  和  $0.83 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

分析影响  $\text{CO}_2$  通量的各因子, 相关分析结果显示, 显热通量、潜热通量和光合有效辐射对  $\text{CO}_2$  通量影响较大, 土壤温度与土壤含水量对其影响相对较小。

#### 参考文献:

- [1] 周萍, 刘国彬, 薛蕙. 草地生态系统土壤呼吸及其影响因素研究进展[J]. 草业学报, 2009, 18(4): 184-193.
- [2] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 中国陆地生态系统碳库[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996: 251-280.
- [3] 陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [4] 王俊明, 张兴昌. 退耕草地演替过程中的碳储量变化[J]. 草业学报, 2009, 18(1): 1-8.
- [5] 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: 4.
- [6] 郝彦宾, 王艳芬, 孙晓敏, 等. 内蒙古羊草草原碳交换季节变异及其生态学解析[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36(增刊 I): 174-182.
- [7] 耿元波, 董云社, 齐元春. 草地生态系统碳循环研究评述[J]. 地理科学进展, 2004, 23(3): 74-81.
- [8] Suyker A E, Verma S B. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie[J]. Global Change Biology, 2001, 7: 279-289.
- [9] Xu L K, Baldocchi D B. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a Mediterranean annual grassland in California[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2004, 123: 79-96.
- [10] 王妮, 周晓梅, 郭继勋. 东北羊草草原两种主要群落环境因素对土壤呼吸贡献量的影响[J]. 草业学报, 2002, 11(1): 12-16.
- [11] 林同保, 王志强, 宋雪雷, 等. 冬小麦农田二氧化碳通量及其影响因素分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1458-1463.
- [12] 陈海军, 王明玖, 韩国栋, 等. 不同强度放牧对贝加尔针茅草原土壤微生物和土壤呼吸的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(4): 165-169.
- [13] 徐世晓, 赵新全, 李英年, 等. 青藏高原高寒灌丛生长季和非生长季  $\text{CO}_2$  通量分析[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2004, 34(增刊 II): 118-124.
- [14] 崔骁勇, 王艳芬, 杜占池. 内蒙古典型草原主要植物群落土壤呼吸的初步研究[J]. 草地学报, 1999, 7(3): 245-250.
- [15] 杨殿林. 呼伦贝尔草原群落植物多样性与生产力关系的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005: 4.
- [16] 颜淑云, 周志宇, 秦彧, 等. 玛曲高寒草地不同利用方式下土壤氮素含量特征[J]. 草业学报, 2010, 19(2): 153-159.
- [17] 陈佐忠, 黄德华. 内蒙古锡林河流域大针茅草原土壤呼吸和凋落物分解的  $\text{CO}_2$  排放速率研究[J]. 植物学报, 1999, 41(6): 645-650.
- [18] 薛红喜, 李琪, 王云龙, 等. 克氏针茅草原生态系统生长季碳通量变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1742-1747.
- [19] 王云龙. 克氏针茅草原的碳通量与碳收支[D]. 北京: 中国科学院, 2008.
- [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.

**Variation of net ecosystem carbon flux and its impact factors on *Stipa baicalensis*  
steppe in the growing season**

XU Li-jun<sup>1</sup>, TANG Hua-jun<sup>1</sup>, YANG Gui-xia<sup>1</sup>, WANG Xu<sup>1</sup>, WANG Bo<sup>2</sup>, XIN Xiao-ping<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Resources Remote Sensing and Digital Agriculture/Hulunber Grassland Ecosystem  
Observation and Research Station/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning  
of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Consultany  
Programme Centre of Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China)

**Abstract:** CO<sub>2</sub> flux and its impact factors were measured by an eddy correction system in *Stipa* grassland. There were distinct diurnal and seasonal variations with an inverted U-shape diurnal change in CO<sub>2</sub> flux. There was obvious change in July, and the maximum uptake and emission were  $-0.56$  and  $0.83$  mg/(m<sup>2</sup> · s), respectively. Latent heat flux, sensible heat flux, net radiation flux and photosynthetic active radiation were related to CO<sub>2</sub> flux. There was no obvious correlation between soil temperature and soil water content with CO<sub>2</sub> flux.

**Key words:** *Stipa baicalensis* steppe; Eddy correction system; CO<sub>2</sub> flux; environment factor