

温度对克氏针茅草原生态系统生长季碳通量的影响

李 峰¹, 李 琪^{2,3}, 薛红喜¹, 吴东丽¹, 王云龙^{2,3}

(1.中国气象局气象探测中心, 北京 100081; 2.南京信息工程大学 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044; 3.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044)

摘 要:草地生态系统碳通量的驱动机制研究是碳循环研究的重要方面。利用涡度相关技术观测了克氏针茅草原生态系统的净生态系统碳交换(NEE)、生态系统初级生产力(GEP)、生态系统呼吸(R_{eco})的变化,探讨了2010年生长季内温度对该系统NEE、GEP和 R_{eco} 的影响。结果表明,2010年生长季内,克氏针茅草原日尺度上NEE和GEP只出现了1个明显的吸收峰, R_{eco} 则呈现倒“U”型变化规律。克氏针茅草原空气温度与NEE、GEP和 R_{eco} 呈极显著相关关系,气温日较差对该系统碳通量的影响程度较小;土壤温度与NEE、GEP和 R_{eco} 之间也呈极显著相关关系,土壤温度的增加会同时提高克氏针茅草原生态系统的固碳能力、初级生产力及呼吸作用。空气温度和土壤温度都是影响克氏针茅草原生态系统碳收支的重要驱动因子。

关键词:温度;碳通量;克氏针茅;生态系统;驱动因子

中图分类号:X171 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)07-1453-07

The Impact of Temperature on Carbon Flux Over *Stipa krylovii* Ecosystem During the Growing Season

LI Feng¹, LI Qi^{2,3}, XUE Hong-xi¹, WU Dong-li¹, WANG Yun-long^{2,3}

(1.Meteorological Observation Centre of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2.Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environmental Monitoring and Pollution Control, NUIST, Nanjing 210044, China; 3.School of Environmental Science and Engineering of NUIST, Nanjing 210044, China)

Abstract: The driving mechanism of grassland ecosystem carbon fluxes is the important research aspect on carbon cycle. To gain insight into temperature effects on the net ecosystem carbon exchange (NEE), the gross ecosystem productivity (GEP), and the ecosystem respiration (R_{eco}), NEE, GEP and R_{eco} of the *Stipa krylovii* ecosystem were measured by the eddy covariance technique in the 2010 growing season. The results showed that both NEE and GEP had only one peak on the daily-scale level in the 2010 growing season. The R_{eco} had an inverted U-shaped variation pattern. The maximal carbon emission of the *Stipa krylovii* ecosystem occurred in the late July of 2010. GEP had the highly significant positive correlation with NEE and the highly significant negative correlation with R_{eco} . There were the highly significant correlation between air temperatures and NEE, GEP, R_{eco} , indicating the rise of air temperature would improve both carbon fixation ability and carbon emission ability of the *Stipa krylovii* ecosystem. Air temperature had higher influence on respiration than on carbon fixation function of the *Stipa krylovii* ecosystem. The diurnal change of temperature had a significant positive correlation with R_{eco} , while on the whole, the diurnal change of temperature had little influence on carbon fluxes of *Stipa krylovii* ecosystem in the 2010 growing season. Meanwhile, there were the highly significant correlation between soil temperatures and NEE, GEP, R_{eco} , meaning the rise of soil temperature would improve carbon fixation ability, gross ecosystem productivity, and respiration function. Soil temperature had higher influence on respiration than on carbon fixation function of *Stipa krylovii* ecosystem. Air temperature and soil temperature were important driving factors which impact the carbon budget of the *Stipa krylovii* ecosystem.

Keywords: temperature; carbon flux; *Stipa krylovii*; ecosystem; driving factor

收稿日期:2011-12-18

基金项目:中国气象局气象新技术推广项目(CMATG2010Z05)

作者简介:李 峰(1974—),男,理学博士,主要从事灾害性天气机理和新探测资料应用及试验研究工作。E-mail: lifl04@cma.gov.cn

草原生态系统占全世界自然植被的 32%,是陆地生态系统的重要组成部分。受环境要素的影响,草原生态系统的生产力表现出较大的年际间波动,因此在确定草原生态系统作为碳源或碳汇方面存在不确定性^[1-3]。草原生态系统的多样性及其较大的环境变异性为草原生态系统碳通量环境驱动机制研究带来了一定的难度,而涡度相关技术的应用则为深入研究草原生态系统碳通量的长期和连续观测成为可能^[4-7]。中国有丰富的草原生态系统类型,由于中国草原生态系统碳通量存在较大的空间和时间变异性,现有的研究成果还不足以精确评估中国草原生态系统的碳通量及其驱动机制^[8-9]。

克氏针茅草原是亚洲中部特有的草原类型,是我国北方保持最完整、最具代表性的典型草原的代表群系之一。对克氏针茅草原生态系统碳通量的研究相对较少,其碳通量变化的控制机制还不确定^[10-13]。本文利用克氏针茅草原生态系统的涡度相关观测数据,初步分析该生态系统 2010 年生长季内净生态系统碳交换(NEE)、生态系统初级生产力(GEP)、生态系统呼吸(R_{eco})对空气和土壤温度的响应规律,为深入认识克氏针茅草原生态系统碳通量的驱动机制提供依据,并为中国草原生态系统碳收支的精确估算以及相关碳模型参数的修正提供参考。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

本研究所设立的涡度相关观测系统(44°08'31" N, 116°18'45" E)位于内蒙古锡林浩特市东北的国家气候观象台站内,海拔约 1 160 m,下垫面开阔平坦,在国家气候观象台综合布局中属于典型的草原观测区。该区气候类型为温带半干旱大陆性季风气候,年均气温 2.5 °C,平均风速 3.5 m·s⁻¹,日照时数 3 024.7 h,相对湿度 56%,大于 0 °C 积温 2 986.1 °C。1 月平均气温 -18.3 °C,7 月平均气温 20.7 °C,年均降水量 273 mm。

研究区内以克氏针茅群落为主,构成该群落的主要植物种类有克氏针茅(*Stipa krylovii*)、羊草(*Ane-marrhena asphodeloides*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、知母(*Anemarrhena asphodeloides* Bunge)、矮葱(*Allium amsopodium* Regel)等。

1.2 研究方法

通量数据由开路式涡度相关系统采集,该系统主要由开路式 CO₂/H₂O 分析仪(CS7500)、超声风速仪(CSAT-3)和数据采集器(CR3000)组成,观测高度为

4 m,采样频率为 10 Hz;土壤温度采用铂电阻地温仪(PT100)观测,观测深度为 5、10、15、20、40 cm,采样频率为 0.5 Hz,通量和土壤温度数据通过数据采集器在线计算 30 min 统计数据。

通量数据经过 3 次坐标旋转、WPL 校正、野点去除、数据插补等预处理后^[6,14-17],对通量数据和土壤温度数据分别计算日数据(某日的值由前一日 20:30 至当日 20:00 的值进行计算),并选取 2010 年克氏针茅草原生长季内的观测数据(GEP<0)进行研究。空气温度则选取同时段内的日观测数据,其中温差由日最高和最低温度的差值表示;土壤温度选取 5 cm 处的观测值;采用 Excel 软件对数据进行分析 and 绘图。

涡度相关系统观测碳通量的原理及公式可参考文献[4]和文献[14],按微气象学符号协定,向下通量(即碳吸收)用负号表示,即 NEE 和 GEP 的负值表示生态系统的固碳作用。

2 结果与分析

2.1 克氏针茅草原生态系统 NEE、GEP 和 R_{eco} 日总值变化

图 1 显示了研究区 2010 年生长季(4 月 27 日—11 月 21 日)内环境因子的变化情况(2010 年 1 月 1 日记做第 1 d,依此类推),其中温度略高于常年平均值,日照时数略低于常年平均值,降水与常年平均值持平,土壤含水量的变化也在正常范围内。图 2 显示了克氏针茅草原生态系统 2010 年生长季内 NEE、GEP 和 R_{eco} 日总值的变化情况。从图 2 可以看出,2010 年生长季内,克氏针茅草原生态系统只是在 6 月中旬出现了 1 个较明显的碳吸收峰,此时也是克氏针茅 GEP 能力最强的时候,另外 NEE 与 GEP 的变化基本保持同步,说明随着生态系统初级生产力的提高,整个克氏针茅草原生态系统的碳固定能力逐步增强。

2010 年生长季内,克氏针茅草原生态系统的 R_{eco} 变化呈倒“U”型,但其波动的幅度要小于 2008 年^[13]。在生长季前期,随着温度的升高,生态系统的呼吸能力逐渐增强,在 7 月下旬左右达到最大碳排放能力,之后随着温度的下降,克氏针茅草原生态系统的碳排放能力也下降。

图 3 显示了 2010 年生长季内克氏针茅草原生态系统 NEE、GEP、 R_{eco} 之间的相互关系,可以看出 NEE 与 GEP 之间有极显著的相关关系($P<0.01$,下同),二者变化的同步性(图 2)是这一关系的具体表现。NEE

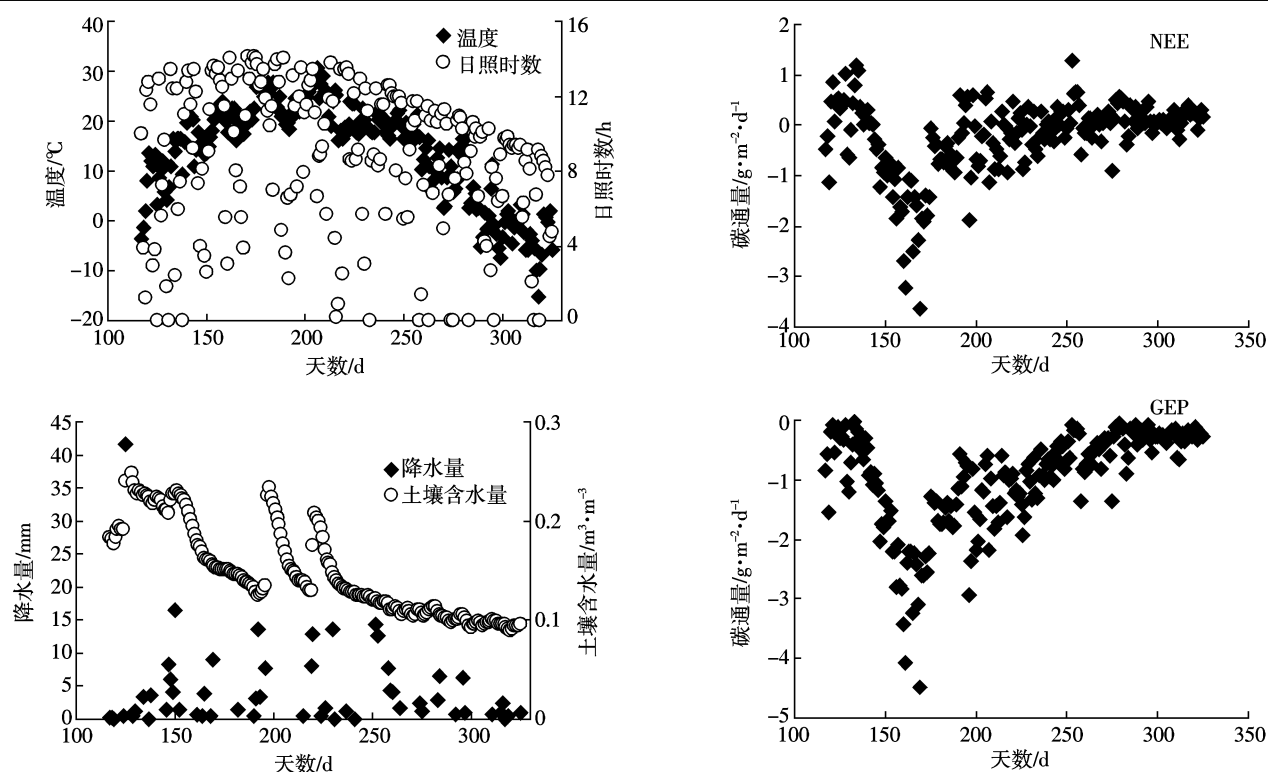


图1 研究区2010年生长季内的环境因子变化

Figure 1 Variation of environmental factors in the study area during growing season in 2010

和 GEP 与 R_{eco} 都呈负相关关系, 但 NEE 与 R_{eco} 的相关性不显著, GEP 与 R_{eco} 之间则有极显著的相关性, 表明随着克氏针茅草原生态系统初级生产力的提高, 系统的呼吸作用也逐渐增强。

2.2 空气温度对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响

从图4可以看出, 空气温度与 NEE、GEP、 R_{eco} 之间都有极显著的相关关系, 其中空气温度和 NEE 以及 GEP 之间是线性的负相关关系, 即在2011年生长季中, 随着空气温度的升高, 克氏针茅草原生态系统的 NEE 和 GEP 都有明显的下降趋势, 表明其固碳能力在增强。空气温度和 R_{eco} 之间有指数关系, 即在生长季内, 克氏针茅草原生态系统的呼吸能力随着空气温度的增加快速提高。从拟合方程的决定系数来看, 空气温度可以解释研究时段内克氏针茅草原生态系统 7%~71% 的碳通量的变化, 并且其对系统呼吸作用的影响程度要远高于对系统碳固定作用的影响。

图5显示了气温日较差对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响。结果显示, 气温日较差与 NEE 之间有极显著的正相关, 与 R_{eco} 之间有显著的正相关 ($P < 0.05$, 下同), 而与 GEP 之间没有明显的相关关系。气

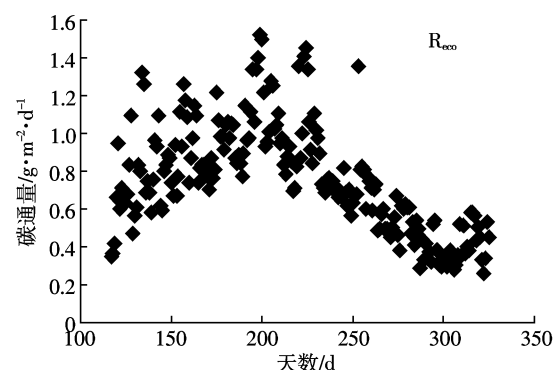
图2 克氏针茅草原生态系统2010年生长季 NEE、GEP、 R_{eco} 日总值变化

Figure 2 Variation of daily NEE, GEP and R_{eco} over *Stipa krylovii* ecosystem during growing season in 2010

温日较差对 NEE 和 GEP 的影响都是正效应, 表明气温日较差的增大会减弱克氏针茅草原生态系统生长季内的碳固定能力。但从整体来看, 气温日较差对克氏针茅草原碳通量变化的解释远远低于空气温度, 说明在研究区内, 气温日较差对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响较小。

2.3 土壤温度对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响

图6显示了克氏针茅草原生态系统2010年生长季内 5 cm 土壤温度与碳通量之间的关系。可以看出, 随着表层土壤温度的升高, 克氏针茅草原生态系统的固碳能力、初级生产力以及呼吸作用呈现出了不同的

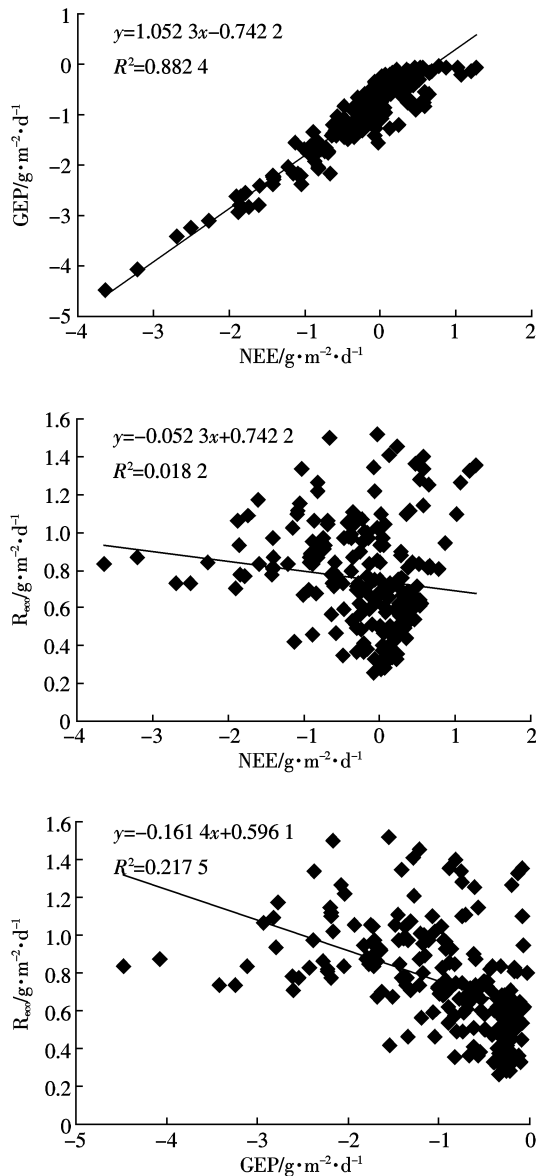


图3 克氏针茅草原生态系统 NEE、GEP、 R_{eco} 之间的相互关系
Figure 3 Relationship between the NEE, GEP and R_{eco} of *Stipa krylovii* ecosystem

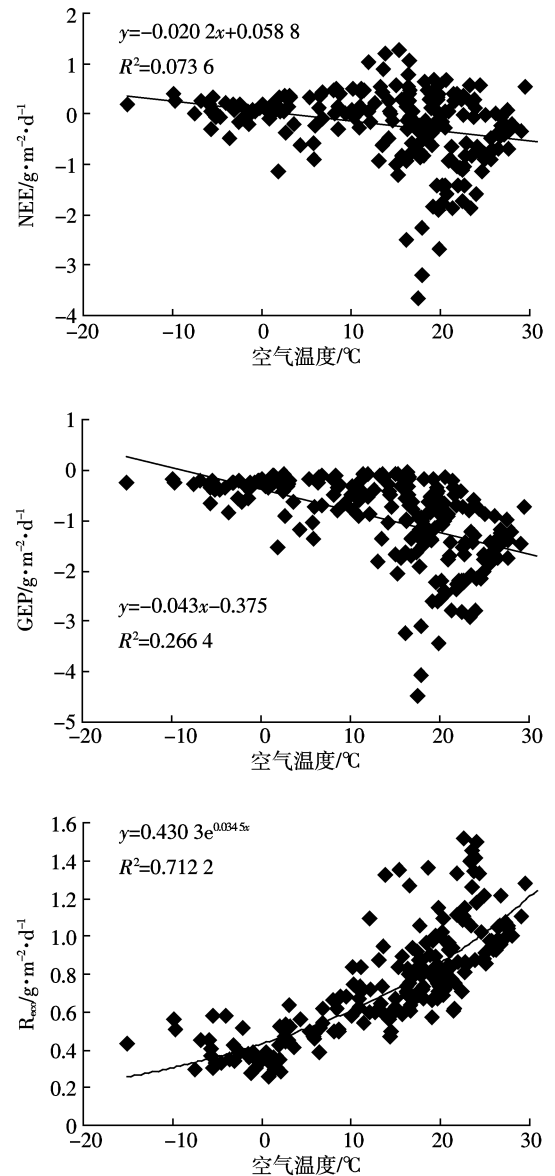


图4 空气温度对克氏针茅草原生态系统 NEE、GEP、 R_{eco} 的影响
Figure 4 Impaction of air temperature on the NEE, GEP and R_{eco} of *Stipa krylovii* ecosystem

响应方式。其中土壤温度与 NEE、GEP 的关系可以用线性方程表示,随着土壤温度的升高,克氏针茅草原生态系统 NEE 和 GEP 的绝对值在增加,说明其固碳能力在增强;土壤温度与 R_{eco} 则呈指数关系,随着温度的升高,系统的碳排放能力也在增强。相关性检验结果表明,3 个拟合方程都达到了极显著相关的水平 ($P<0.01$),说明土壤表层温度是克氏针茅草原生态系统碳通量的重要驱动因子。从拟合的结果来看,土壤温度对 R_{eco} 的决定系数 ($R^2=0.68$) 远高于对 NEE ($R^2=0.12$) 和 GEP ($R^2=0.33$) 的,说明土壤温度对克氏针茅草原生态系统呼吸作用的影响程度更显著。

3 讨论

研究表明,温度是影响草地生态系统碳通量的重要因子^[18-22],本文的研究结果也表明,温度是克氏针茅草原生态系统碳通量变化的重要驱动因子,其中空气温度可以解释克氏针茅草原生态系统 2011 年生长季内 7%~71% 的碳通量组分的变化,土壤表层温度可以解释 12%~68% 的碳通量组分的变化。从拟合的响应方程也可以看出,不论是空气温度还是土壤温度,其对 GEP 和 R_{eco} 的影响程度都要高于对 NEE 的影响,说明温度主要是通过影响草原生态系统的光合作用

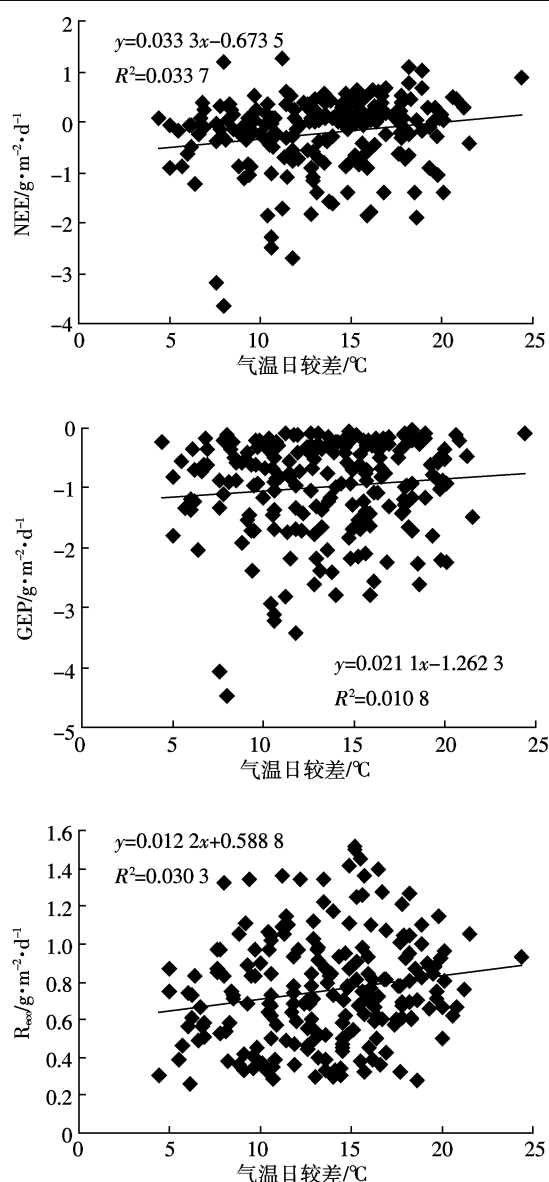


图 5 气温日较差对克氏针茅草原生态系统 NEE、GEP、 R_{ee} 的影响
Figure 5 Impaction of daily range of temperature on the NEE, GEP and R_{ee} of *Stipa krylovii* ecosystem

和呼吸作用,进而影响整个生态系统碳的净交换。

已有研究表明,昼夜温差是影响植物生长和有机物积累的重要因素,昼夜温差大有利于植物光合作用,从而有助于形成生态系统的碳汇^[23-24]。但本文的研究表明,克氏针茅草原生态系统生长季温度日较差与 NEE 呈极显著的正相关关系,昼夜温差大会抑制克氏针茅草原生态系统的固碳作用,而对疏勒河上游高寒草甸以及西藏高原草原化蒿草草甸研究也得出了与本文类似的结论^[25-26]。其原因很可能是在研究区域内,气温日较差的增大主要是依赖于白天温度的升高,因此气温日较差越大,意味着白天的温度越高。从

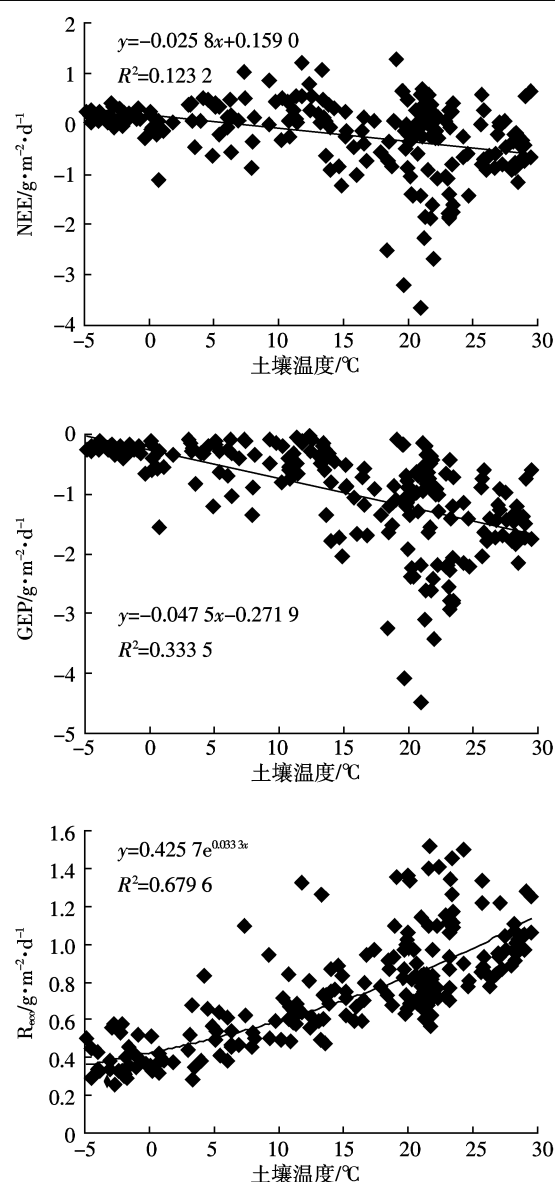


图 6 5 cm 土壤温度对克氏针茅草原生态系统 NEE、GEP、 R_{ee} 的影响
Figure 6 Impaction of soil temperature at 5 cm on the NEE, GEP and R_{ee} of *Stipa krylovii* ecosystem

拟合的方程来看,空气温度对克氏针茅草原生态系统 NEE 和 GEP 的拟合方程为直线方程,而对 R_{ee} 的拟合方程为指数方程,说明随着温度的升高,克氏针茅草原生态系统的碳吸收能力的增加速率要小于植被和土壤碳排放的速率,因此气温日较差越大,克氏针茅草原生态系统的碳固定能力反而会下降。这也可以在一定程度上解释为什么 2010 年生长季内,克氏针茅草原生态系统碳吸收峰没有出现在空气温度较高、生长最旺盛的 7、8 月份,反而出现在了气温相对较低的 6 月中旬。

从拟合方程来看,土壤表层温度对克氏针茅草原生态系统的 GEP 和 R_{eco} 的拟合效果(决定系数分别为 33%和 68%)要远高于对 2008 年的拟合效果(决定系数分别为 20%和 47%)^[13],这很可能是因为 2011 年生长季的土壤温度低于 2008 年的土壤温度,低温对克氏针茅草原生态系统的光合和呼吸作用有更强的限制作用。

4 结论

(1)2010 年生长季内,克氏针茅草原生态系统日尺度上的 NEE、GEP 在 6 月中旬出现了 1 个明显的碳吸收峰, R_{eco} 呈现倒“U”型变化规律,7 月中下旬达到最大碳排放量。

(2)2010 年生长季内,克氏针茅草原生态系统空气温度与 NEE、GEP 和 R_{eco} 之间都呈极显著的相关关系,空气温度是该系统碳通量的重要驱动因子;气温日较差对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响程度较小。

(3)2010 年生长季内,克氏针茅草原生态系统土壤温度与 NEE、GEP 和 R_{eco} 之间也呈极显著的相关关系,土壤温度的增加会同时提高克氏针茅草原生态系统的固碳能力、初级生产力及呼吸作用。

草原生态系统的碳通量变化是包括温度在内的多因素驱动的复杂的过程^[27-29],鉴于篇幅问题,本文仅从温度的角度探讨了克氏针茅草原生态系统碳交换的影响机制,今后会继续围绕克氏针茅草原生态系统碳交换的环境因子的驱动机制进行深入研究,为准确评估克氏针茅草原生态系统的碳源/汇功能提供理论依据。

参考文献:

- [1] Frank A B, Dugas W A. Carbon dioxide fluxes over a northern, semiarid, mixed grass prairie[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 317-326.
- [2] Kjelgaard J F, Heilman J L, McInnes K J, et al. Carbon dioxide exchange in a subtropical, mixed C₃/C₄ grassland on the Edwards Plateau, Texas [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 48: 953-963.
- [3] 徐世晓, 赵新全, 李英年, 等. 青藏高原高寒灌丛 CO₂ 通量日和月变化特征[J]. *科学通报*, 2005, 50(5): 481-484.
XU Shi-xiao, ZHAO Xin-quan, LI Ying-nian, et al. Diurnal and monthly variations of carbon dioxide flux in an alpine shrub on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(5): 481-484.
- [4] 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 Gui-rui, SUN Xiao-min. Carbon flux observation techniques and temporal and spatial characteristics on terrestrial ecosystems in China [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [5] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: Past, present and future [J]. *Global Change Biology*, 2003, 9: 479-492.
- [6] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. Measurement of carbon storage by long-term eddy correlation: Method and a critical assessment of accuracy[J]. *Global Change Biology*, 1996, 2(2): 169-182.
- [7] Baldocchi D D, Hicks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchange of biologically related gases with micro meteorologically methods[J]. *Ecology*, 1988, 69(5): 1331-1340.
- [8] Yu G R, Fu Y L, Sun X M, et al. Recent progress and future directions of China flux[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2006, 49: 1-23.
- [9] 岳广阳, 赵 林, 赵拥华, 等. 青藏高原草地生态系统碳通量研究进展[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1): 166-174.
YUE Guang-yang, ZHAO Lin, ZHAO Yong-hua, et al. Research advances of grassland ecosystem CO₂ flux on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(1): 166-174.
- [10] 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.
WANG Yun-long. Flux and balance of payments of carbon over *Stipa krylovii* steppe[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [11] 杨 娟, 周广胜, 王云龙, 等. 内蒙古克氏针茅草地生态系统: 大气通量交换特征[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 533-538.
YANG Juan, ZHOU Guang-sheng, WANG Yun-long, et al. Characteristics of net ecosystem flux exchanges over *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(3): 533-538.
- [12] 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.
XUE Hong-xi, LI Qi, WANG Yun-long, et al. Variation of net ecosystem carbon flux exchange over *Stipa krylovii* steppe in the growing season[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2009, 28(8): 1742-1747.
- [13] 李 琪, 薛红喜, 王云龙, 等. 土壤温度和水分对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响初探[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3): 605-610.
LI Qi, XUE Hong-xi, WANG Yun-long, et al. The preliminary study on the impact of soil temperature and moisture on carbon flux over *Stipa krylovii* ecosystem[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2011, 30(3): 605-610.
- [14] Webb E K, Pearman G I, 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: 85-100.
- [15] 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.
- [16] Lee X. On micrometeorological observation of surface-air exchange over tall vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91(1-2): 39-49.

- [17] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107:43–69.
- [18] 耿绍波, 鲁绍伟, 饶良懿, 等. 基于涡度相关技术测算地表碳通量研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(3):24–28.
GENG Shao-bo, LU Shao-wei, RAO Liang-yi, et al. Research progress of measurement of land surface carbon budget based on eddy covariance technology[J]. *World Forestry Research*, 2010, 23(3):24–28.
- [19] 赵拥华, 赵林, 杜二计, 等. 唐古拉地区高寒草甸生态系统 CO₂ 通量特征研究[J]. 高原气象, 2011, 30(2):525–531.
ZHAO Yong-hua, ZHAO Lin, DU Er-ji, et al. Study on the CO₂ flux characteristic in the Tanggula alpine meadow ecosystem of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(2):525–531.
- [20] 赵亮, 古松, 周华坤, 等. 青海省三江源区人工草地生态系统 CO₂ 通量[J]. 植物生态学报, 2008, 32(3):544–554.
ZHAO Liang, GU Song, ZHOU Hua-kun, et al. CO₂ fluxes of artificial grassland in the source region of the three rivers on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3):544–554.
- [21] 徐世晓, 赵亮, 李英年, 等. 温度对青藏高原高寒灌丛 CO₂ 通量日变化的影响[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5):717–721.
XU Shi-xiao, ZHAO Liang, LI Ying-nian, et al. The Correlation between CO₂ flux and temperature of the alpine shrub meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(5):717–721.
- [22] Fu Y L, Yu G R, Sun X M, et al. Depression of net ecosystem CO₂ exchange in semi-arid *Leymus chinensis* steppe and alpine shrub [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137:234–244.
- [23] 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 CO₂ 通量分析[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2004, 34(增刊 II):118–124.
XU Shi-xiao, ZHAO Xin-quan, LI Yin-nian, et al. Carbon dioxide flux analysis of alpine shrubs in Qinghai-Tibet Plateau during the growing and non-growing season[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2004, 34(Suppl II):118–124.
- [24] Gu S, Tang Y H, Du M Y, et al. Short-term variation of CO₂ flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108:4670–4679.
- [25] 王杰, 叶柏生, 张世强, 等. 祁连山疏勒河上游高寒草甸 CO₂ 通量变化特征[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3):646–653.
WANG Jie, YE Bo-sheng, ZHANG Shi-qiang, et al. Changing features of CO₂ fluxes in alpine meadow in the upper reaches of Shule River, Qilianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3):646–653.
- [26] 石培礼, 孙晓敏, 徐玲玲, 等. 西藏高原草甸化嵩草草甸生态系统 CO₂ 净交换及其影响因子[J]. 中国科学 D 辑 地球科学, 2006, 36(增刊 I):194–203.
SHI Pei-li, SUN Xiao-min, XU Lin-lin, et al. Net ecosystem CO₂ exchange and controlling factors in a steppe-Kobresia meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2006, 36(Suppl I):194–203.
- [27] Hunt J E, Kelliher F M, McSeveny T M, et al. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(1):65–82.
- [28] Jongen M, Pereira J S, Aires L M I, et al. The effects of drought and timing of precipitation on the inter-annual variation in ecosystem-atmosphere exchange in a Mediterranean grassland[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151:595–606.
- [29] Meyers T P. A comparison of summertime water and CO₂ fluxes over rangeland for well watered and drought conditions[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 106(3):205–214.