

# 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

李 琪<sup>1</sup>, 薛红喜<sup>2\*</sup>, 王云龙<sup>1</sup>, 胡正华<sup>1</sup>, 李 洁<sup>1</sup>

(1.南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2.中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘 要:**草地和大气间碳通量的观测有助于理解草原生态系统的碳循环及其控制机理。利用涡度相关技术观测了克氏针茅草原生态系统与大气之间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 2008 年生长季内土壤温度和水分对克氏针茅草原生态系统  $NEE$ 、 $GEP$  和  $R_{eco}$  的影响。结果表明,2008 年生长季内,克氏针茅草原日尺度上  $NEE$  和  $GEP$  都出现了 3 个峰,二者之间有极显著的相关性, $R_{eco}$  则呈现倒“U”型变化规律。克氏针茅草原土壤温度与  $NEE$ 、 $GEP$  呈二次曲线的关系,而与  $R_{eco}$  呈指数关系,土壤水分的增加会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。土壤温度和水分是影响克氏针茅草原生态系统碳收支的重要因子。

**关键词:**土壤温度;土壤水分;碳通量;克氏针茅草原生态系统;涡度相关

**中图分类号:**X171.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)03-0605-06

## The Preliminary Study on the Impact of Soil Temperature and Moisture on Carbon Flux Over *Stipa krylovii* Ecosystem

LI Qi<sup>1</sup>, XUE Hong-xi<sup>2\*</sup>, WANG Yun-long<sup>1</sup>, HU Zheng-hua<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1</sup>

(1.School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Long-term measurement of the carbon fluxes between the grassland and the atmosphere has facilitated the research on carbon cycle in grassland ecosystems and its controlling mechanism. Based on the eddy covariance technique, the variations of the net ecosystem carbon exchange ( $NEE$ ), the gross ecosystem productivity ( $GEP$ ) and the ecosystem respiration ( $R_{eco}$ ) over *stipa krylovii* ecosystem were measured, and the impact of soil temperature and moisture on the  $NEE$ ,  $GEP$  and  $R_{eco}$  was discussed during the growing season in 2008. As discussed in the paper, there had three peaks of the  $NEE$  and  $GEP$  patterns for *Stipa krylovii* ecosystem on the daily-scale level during the growing season in 2008, and there existed very significant correlation between  $NEE$  and  $GEP$ . Shown in the  $R_{eco}$  pattern by the inverted U-shaped pattern, the respiration function first increased and then decreased as the time went on, which illustrated conic correlation between the soil temperature and the  $NEE$  and  $GEP$ , and the  $R_{eco}$  was correlated exponentially with the soil temperature on daily-scale level. All three equations had highly significant correlation. The carbon fixation ability, the gross productivity and the respiration function of *stipa krylovii* ecosystem improved with the increase of the soil moisture. Thus, the soil temperature and moisture, but not limited to, were the important factors to impact the carbon budget of the *Stipa krylovii* ecosystem. The control mechanism of the soil temperature and moisture on the carbon flux over *Stipa krylovii* ecosystem was very complicated, and upon the different time scale, *Stipa krylovii* ecosystem had the different feedback mechanism to the soil temperature and moisture.

**Keywords:** soil temperature; soil moisture; carbon flux; *Stipa krylovii* ecosystem; eddy covariance

收稿日期:2010-08-26

基金项目:中国气象局气象新技术推广项目(CMATG2010Z05);南京信息工程大学科研启动项目(20080264)

作者简介:李 琪(1977—),男,河北新城人,博士,讲师,主要从事生态气象、农业气象、陆地生态系统碳循环的研究。E-mail:liqix123@sina.com

\* 通讯作者:薛红喜 E-mail:xue-hongxi@163.com

陆地生态系统对环境的响应是全球变化研究的关键议题之一<sup>[1]</sup>,草原生态系统在其中占有举足轻重的地位,这不仅因为它占全世界自然植被的 32%,更重要的是草原生态系统表现出的大的年际间总生产力的波动,在确定草原生态系统作为碳源或碳汇方面存在不确定性<sup>[2-3]</sup>。草原生态系统碳循环是全球碳循环研究的热点,而草原生态系统的植被多样性及其较大的环境变异性为研究草原生态系统的各种生理生态过程对环境变化的响应提供了良好的机会<sup>[4]</sup>。近年来涡度相关技术在观测生态系统碳通量中得到广泛应用<sup>[5-6]</sup>,该技术使草原生态系统碳通量的长期和连续观测成为可能。

中国草原碳通量的研究主要集中在内蒙古羊草草原和青藏高原高寒草甸上,从日、季节、年际尺度上对这两种典型草原进行了研究<sup>[7-11]</sup>,并从温度、水分、光合有效辐射、积雪等方面探讨了碳通量变化的环境影响机制<sup>[12-22]</sup>。已有的研究表明,中国草原生态系统碳通量存在较大的空间和时间变异性,说明这两种草原类型还不具备精确评估中国草原碳通量的能力<sup>[23]</sup>。中国对克氏针茅草原的研究较少,其碳通量的控制机理还不明确。克氏针茅草原是亚洲中部特有的草原类型,是典型草原的代表区系,分布范围较广,中心分布区位于蒙古高原,向西直接与荒漠草原亚带相连,反映出更加旱生的特点。克氏针茅草原受亚洲大陆性季风气候影响,干旱与炎热同步是该生态系统水热条件变化的基本规律,而土壤温度和水分可以从一定程度上反映这种水热条件变化。本文利用涡度相关技术定位观测克氏针茅草原生态系统碳通量及土壤环境要素,分析该生态系统 2008 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( $R_{eco}$ )的变化规律,初步探讨土壤温度和水分对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响方式,为克氏针茅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 研究区域

本研究所选取的研究地点(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。该观象台位于锡林郭勒草原中心,是典型的草原生态区,在国家气候观象台综合布局中属于草原观测区。该区属中温带半干旱气候类型,冬季寒冷干燥,夏季温暖湿润,

太阳辐射较强。研究区年平均气温 2.6 °C,年平均降水量约 280 mm,且主要集中在 6—9 月。

### 1.2 基本理论公式

在利用涡度相关技术进行生态系统碳通量研究时,植被与大气间的  $NEE$  定义为<sup>[16,24]</sup>:

$$NEE = \overline{\omega' \rho_c'} + \mu (\overline{\rho_c} / \overline{\rho_a}) \overline{\omega' \rho_v'} + (1 + \mu \sigma) (\overline{\rho_c} / \overline{T}) \overline{\omega' T} \quad (1)$$

式中:第一项为  $CO_2$  湍流通量,即单位时间垂直方向上通过单位截面积的  $CO_2$  的量,  $\omega$  为垂直风速,  $\rho_c$  为  $CO_2$  的浓度;右边第二、第三项为 WPL 校正项,其中  $\rho_a$  为干空气密度,  $\rho_v$  为水汽密度;上划线表示某时间段内的平均值,撇号表示瞬时值与平均值的偏差,即脉动。此值经过 3 次坐标旋转后,即为可使用的  $NEE$  值。

夜间植被与大气间的  $NEE$  仅来源于生态系统呼吸作用,生态系统夜间的  $R_{eco}$  可用 Lloyd-Taylor 方程进行插补:

$$R_{eco} = R_{eco,ref} e^{E_0 \left( \frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T_k - T_0} \right)} \quad (2)$$

式中:  $R_{eco,ref}$  是参考温度下的生态系统夜间呼吸,  $T_{ref}$  为参考温度,取值为 283.15 K,  $T_0$  为温度试验常数,取值为 227.13 K,  $E_0$  为活化能,取值为 308.56 K。生态系统白天的呼吸根据夜间生态系统呼吸数据建立的函数关系外延到白天后获得的。

白天植被与大气之间的净生态系统  $CO_2$  交换( $NEE$ )是生态系统初级生产力( $GEP$ )和生态系统呼吸( $R_{eco}$ )的总和,因此  $GEP$  就可定义为:

$$GEP = NEE - R_{eco} \quad (3)$$

### 1.3 研究方法

通量观测系统为开路式涡度相关系统,该系统主要由开路式  $CO_2/H_2O$  分析仪、超声风速仪和数据采集器组成。观测气象数据的微气象观测系统主要包括辐射、光合有效辐射、空气温/湿度、风速、土壤温度、土壤水分等。通量数据采集频率为每秒 10 次,土壤温度、水分数据采集频率为每 2 秒 1 次,这些数据通过数据采集器在线计算 30 min 统计数据。

涡度相关系统于 2007 年 7 月开始观测,为保证数据的完整性,选取了 2008 年克氏针茅草原生长季内的观测数据( $GEP > 0$ ),即 4 月 29 日至 10 月 2 日的碳通量和土壤温度、水分数据。对通量和土壤温度、水分数据进行处理后<sup>[25-27]</sup>,再分别计算日统计数据。因克氏针茅根系较浅,本文选择 5 cm 处的土壤温度以及 10 cm 和 20 cm 处土壤水分的平均值进行分析。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 结果分析

### 2.1 克氏针茅草原 $NEE$ 、 $GEP$ 和 $R_{eco}$ 日总值变化

图 1a、b、c 分别显示了克氏针茅草原生长季  $NEE$ 、 $GEP$  和  $R_{eco}$  日总值的变化情况(2008 年 1 月 1 日记做第 1 d, 依此类推)。从图 1a 可以明显看出, 在 2008 年生长季内, 克氏针茅草原生态系统出现了 3 个较明显的碳吸收峰, 其中 4 月 30 日至 5 月 22 日的吸收峰较小且时间较短, 6 月 23 日至 7 月 20 日以及 8 月 9 日至 9 月 20 日的两个吸收峰较强且持续时间较长。除了 3 个吸收峰以外, 在生长季的其他时间里,

克氏针茅草原生态系统表现为碳的排放(即碳源)。从图 1a 还可以看出, 2008 年克氏针茅草原生态系统  $NEE$  最大日累积吸收量为  $-2.38 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 出现在 7 月 5 日(第 187 d),  $NEE$  最大日累积释放量为  $1.47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 出现在 8 月 4 日(第 217 d)。

图 1b 显示克氏针茅草原  $GEP$  与  $NEE$  变化的规律一致, 出现了 3 个初级生产力的峰。相关性检验表明,  $GEP$  与  $NEE$  之间有极显著的相关关系, 拟合的直线方程可以解释 80% 的  $NEE$  的变化, 这说明随着克氏针茅草原生态系统初级生产力的提高, 整个生态系统的碳吸收能力也逐步增强。2008 年生长季内  $GEP$  最大值出现在 7 月 5 日, 为  $-3.88 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ , 与  $NEE$  最大日累积吸收量的时间相吻合。

图 1c 显示, 克氏针茅草原  $R_{eco}$  的日总值变化呈倒“U”型, 即呈现先升高后降低的趋势, 说明环境条件对生态系统的呼吸也有明显的影响。2008 年生长季内克氏针茅草原  $R_{eco}$  的最大值出现在 8 月 3 日(第 216 d), 为  $1.89 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。该时间前后克氏针茅草原正处在碳排放时期, 生态系统的初级生产力也比较低, 这说明在克氏针茅草原生态系统初级生产力较低的情况下,  $R_{eco}$  对草原生态系统碳源/汇的转换具有重要影响。

### 2.2 土壤温度对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响

图 2a、b、c 分别显示了研究区克氏针茅草原 2008 年生长季内 5 cm 土壤表层温度与  $NEE$ 、 $GEP$  和  $R_{eco}$  的关系。由图 2 可以看出, 2008 年生长季内克氏针茅草原土壤表层温度的变化范围在  $6 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$  之间, 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响应方式。其中土壤温度与  $NEE$ 、 $GEP$  呈二次曲线的关系, 而与  $R_{eco}$  呈指数关系, 相关性检验结果表明, 3 个拟合方程都达到了极显著相关水平 ( $P < 0.01$ ), 说明土壤表层温度是影响克氏针茅草原生态系统碳通量的重要因子。在不考虑其他因素的影响下, 从日尺度上拟合的方程来看, 土壤表层温度可以解释克氏针茅草原生态系统生长季内 11%~48% 的碳通量组分的变化。其中对  $R_{eco}$  的拟合效果(决定系数为 48%)要高于对羊草草原的拟合效果<sup>[16]</sup>, 其原因有待进一步研究。

图 2c 显示, 在适宜的温度范围内, 呼吸作用随着土壤温度的升高而逐步增强, 土壤温度解释了  $R_{eco}$  48% 左右的变化, 是控制克氏针茅草原呼吸过程的重要因子; 而碳吸收能力和初级生产力则在土壤温度到达一个阈值后, 出现了下降的现象, 即温度过高会抑

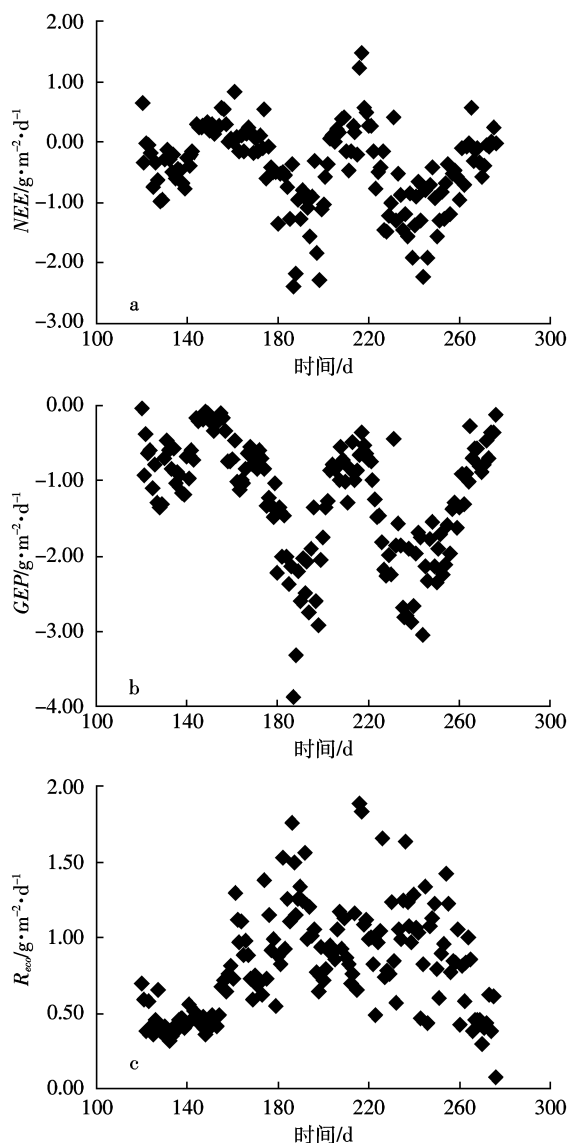


图 1 克氏针茅草原生态系统  $NEE$ 、 $GEP$ 、 $R_{eco}$  日总值变化  
Figure 1 Variation of daily  $NEE$ (a),  $GEP$ (b) and  $R_{eco}$ (c) over *Stipa krylovii* ecosystem

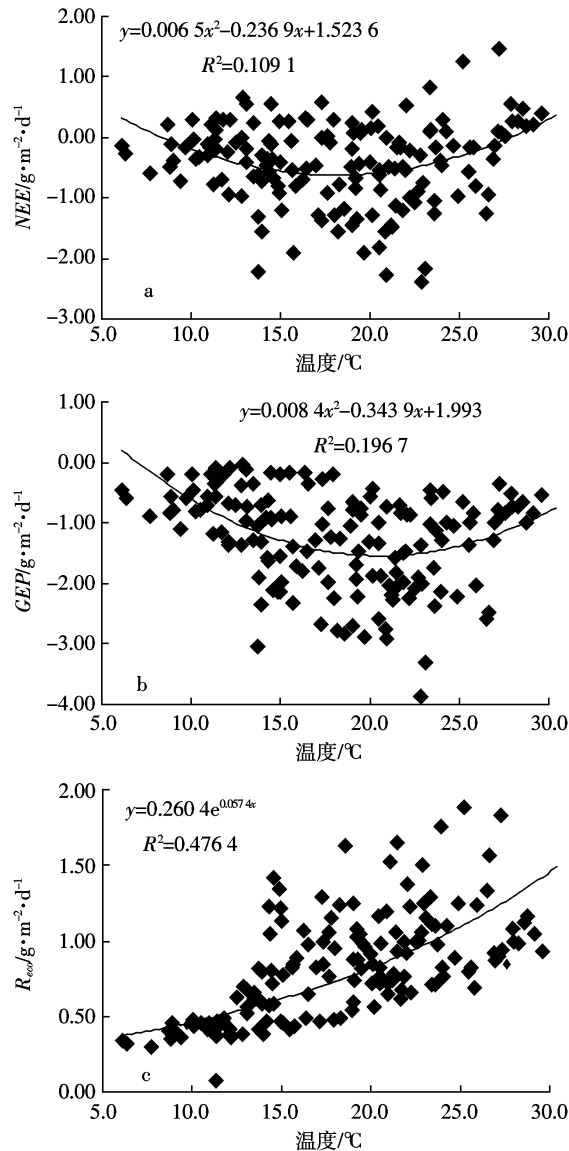


图 2 土壤温度对克氏针茅草原生态系统  $NEE$ (a)、 $GEP$ (b)、 $R_{eco}$ (c)的影响

Figure 2 Impaction of soil temperature on the  $NEE$ (a),  $GEP$ (b) and  $R_{eco}$ (c) of *Stipa krylovii* ecosystem

制上述两个过程,但土壤温度对  $NEE$  和  $GEP$  的控制作用(决定系数分别为 11%和 20%)显然要远小于对  $R_{eco}$  的控制作用。从图 2a、b 可以看出, $NEE$  的适宜土壤温度为 18 °C, $GEP$  的适宜土壤温度为 20 °C,也就是说,当土壤温度超过 20 °C时,克氏针茅草原生态系统的初级生产能力已经开始下降,而此时生态系统的呼吸作用仍然在上升,这样就会影响克氏针茅草原生态系统的碳吸收能力。

### 2.3 土壤水分对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响

图 3a、b、c 分别显示了研究区内克氏针茅草原 2008 年生长季 10 cm 和 20 cm 处土壤水分的平均值

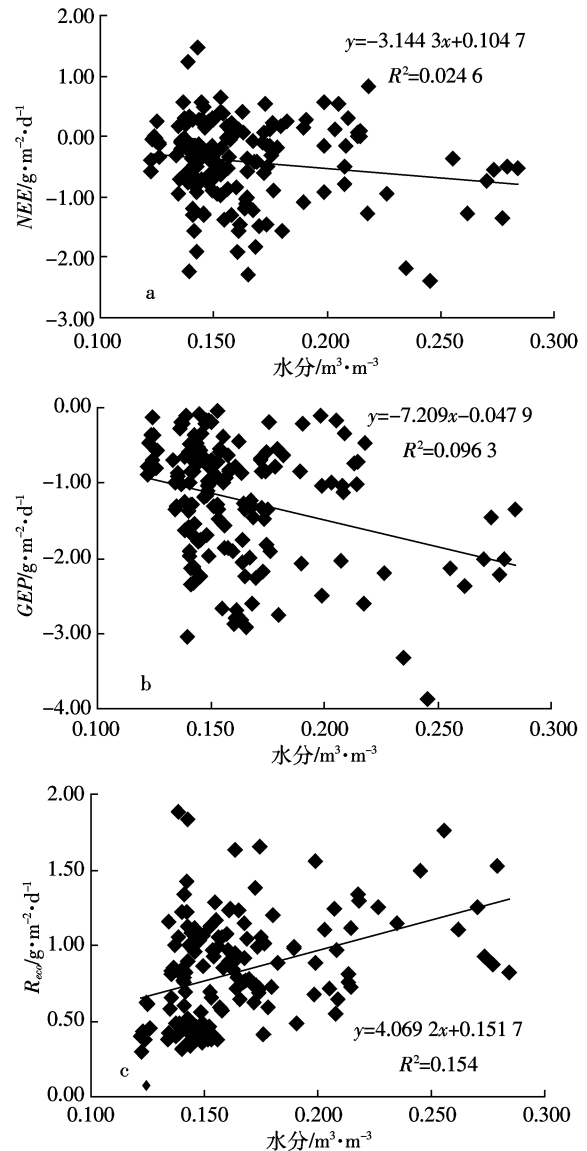


图 3 土壤水分对克氏针茅草原生态系统  $NEE$ (a)、 $GEP$ (b)、 $R_{eco}$ (c)的影响

Figure 3 Impaction of soil water content on the  $NEE$ (a),  $GEP$ (b) and  $R_{eco}$ (c) of *Stipa krylovii* ecosystem

与  $NEE$ 、 $GEP$  和  $R_{eco}$  的关系。从图 3 可以看出,2008 年生长期克氏针茅草原土壤含水量并不高,变化范围在 0.12~0.28  $m^3 \cdot m^{-3}$  之间。随着土壤水分的增加,克氏针茅草原日尺度上的  $NEE$  和  $GEP$  都呈下降的趋势,而  $R_{eco}$  则呈上升的趋势,这说明土壤含水量的增加会提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。

从图 3 可以看出,土壤水分与  $NEE$  呈显著的负相关关系,与  $GEP$  呈极显著的负相关关系,而与  $R_{eco}$  呈极显著的正相关关系,但土壤水分与  $NEE$ 、 $GEP$  和  $R_{eco}$  的相关系数并不高,拟合的方程只可以解释 2%~

15%的碳通量组分的变化,相关系数与相关性检验结果不吻合的主要原因是由于数据样本量较大( $n=157$ )。另外对羊草草原的研究结果显示<sup>[20]</sup>,土壤水分可以解释20%~50%的 $NEE$ 变化,远远高于本研究的结果,这可能与研究区较为干旱的环境条件下克氏针茅的适应性有关。从方程的拟合结果来看,仍然是土壤水分与 $R_{eco}$ 的拟合效果好于与 $NEE$ 、 $GEP$ 的拟合效果。但从整体来看,2008年生长季内土壤水分对克氏针茅草原日尺度上的碳通量各组分控制作用并不明显,这可能与克氏针茅草原生态系统处于更干旱的地区,土壤水分含量相对较低有关(本研究中土壤水分全部低于 $0.30\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-3}$ )。

### 3 讨论

土壤温度和水分都是影响草地生态系统碳通量的重要因素。青藏高原高寒灌丛草甸生态系统非生长季 $NEE$ 与5 cm土壤温度变化呈显著正相关,土壤温度是影响非生长季高寒灌丛草甸 $NEE$ 变化的主导气候因子<sup>[13]</sup>;青藏高原高寒草甸夜间的 $NEE$ 与5 cm地温有很好的指数函数关系<sup>[12]</sup>。锡林河流域的羊草草地生态系统生长季内的白天 $NEE$ 与土壤含水量的变化呈现显著的负相关关系<sup>[19]</sup>。也有研究表明土壤温度在作用于草地生态系统碳通量时,会受到土壤水分的影响。在干旱或半干旱地区当土壤水分成为胁迫因子时可能取代温度成为土壤呼吸的主要控制因子,从而影响到整个生态系统的碳通量。在干旱的年份,土壤水分是影响羊草草地生态系统碳源/汇转换的重要因素<sup>[4]</sup>。

本文的研究则显示克氏针茅草原生态系统生长季内日尺度上土壤温度和 $NEE$ 、 $GEP$ 呈极显著的二次曲线关系, $R_{eco}$ 与土壤温度呈极显著的指数关系;另外土壤水分与 $NEE$ 和 $GEP$ 呈负相关关系,与 $R_{eco}$ 呈正相关关系。可以看出,在不同的时间尺度上,不同的草地生态系统类型对土壤温度和水分响应方式是不同的。

另外本文的研究结果显示,当土壤温度超过 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,会抑制克氏针茅草原生态系统的 $GEP$ 作用而促进 $R_{eco}$ 作用;而水分的增加则会同时促进克氏针茅草原生态系统的 $GEP$ 作用和 $R_{eco}$ 作用。2008年7月下旬到8月上旬之间研究区域内的土壤含水量偏低,而土壤温度值较高,克氏针茅草原生态系统主要受土壤温度的影响,呼吸作用较强而初级生产力较低,这可以从一定程度上解释克氏针茅草原生态系统由碳汇

转化成碳源(图1a所示第203~221 d较强的系统碳排放)的原因。而2008年5月下旬到6月中旬的碳排放在一定程度上是受土壤温度和水分共同控制的。

以上的研究成果显示,土壤温度和水分对克氏针茅草原生态系统碳通量的控制机理是十分复杂的,二者之间有较强的耦合作用,而且在不同的时间尺度上,草地生态系统碳通量对土壤温度和水分反馈机制是不同的,本文在日尺度上的研究进一步证实了这一点。

### 4 结论

(1)2008年生长季内,克氏针茅草原日尺度上的 $NEE$ 、 $GEP$ 都出现了3个峰,且二者之间存在极显著的相关性; $R_{eco}$ 则呈现倒“U”型变化规律。

(2)2008年生长季内,克氏针茅草原土壤温度与 $NEE$ 、 $GEP$ 呈二次曲线的关系,而与 $R_{eco}$ 呈指数关系,也就是说土壤温度的升高会提高克氏针茅草原生态系统的呼吸作用,但固碳能力和初级生产力则出现先促进后抑制的规律。

(3)2008年生长季内克氏针茅草原土壤水分的含量不高,土壤水分的增加会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。

综上所述,土壤温度和水分是影响草原生态系统碳收支的重要环境因子,但其对草原碳通量的控制机理是十分复杂的,除了二者之间以及与其他环境因子之间的相互作用会增加研究的难度外,不同的草原类型、时间尺度以及环境状况都会对研究结果产生影响。为了准确评估我国草原生态系统碳源/汇功能,必须在原有研究成果的基础上加大对草原生态系统碳循环驱动机制的研究力度。

### 参考文献:

- [1] Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon Dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113:97-120.
- [2] 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.
- [3] Kjelgaard J F, Heilman J L, McInnes K J, et al. Carbon dioxide exchange in a subtropical, mixed C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> grassland on the Edwards Plateau, Texas[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 48:953-963.
- [4] Fu Y L, Yu G R, Wang Y F, et al. Effect of water stress on ecosystem photosynthesis and respiration of a *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2006, 36(Supp. II):196-206.

- [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] 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.
- [7] Xu L L, Zhang X Z, Shi P L, et al. Establishment of apparent quantum yield and maximum ecosystem assimilation on Tibetan Plateau alpine meadow ecosystem[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2005, 48(Suppl. I): 141–147.
- [8] 徐世晓, 赵 亮, 李英年, 等. 青藏高原高寒灌丛暖季 CO<sub>2</sub> 地—气交换特征[J]. *中国环境科学*, 2007, 27(4): 433–436.  
XU Shi-xiao, ZHAO Liang, LI Ying-nian, et al. Characteristics of carbon dioxide exchange between atmosphere and alpine shrub on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(4): 433–436.
- [9] Xu S X, Zhao X Q, Li Y N, 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(6): 539–543.
- [10] Zhao L, Li Y N, Zhao X Q, et al. Comparative study of the net exchange of CO<sub>2</sub> in 3 type of vegetation ecosystems on the Qinghai-Tibetan plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(16): 1767–1774.
- [11] 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.
- [12] 徐玲玲, 张宪洲, 石培礼, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统净二氧化碳交换量特征[J]. *生态学报*, 2005, 25(8): 1948–1952.  
XU Ling-ling, ZHANG Xian-zhou, SHI Pei-li, et al. Net ecosystem carbon dioxide exchange of alpine meadow in the Tibetan Plateau from August to October[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8): 1948–1952.
- [13] 徐世晓, 赵 亮, 赵新全, 等. 青藏高原高寒灌丛非生长季节 CO<sub>2</sub> 通量特征[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(12): 2528–2532.  
XU Shi-xiao, ZHAO Liang, ZHAO Xin-quan, et al. Carbon dioxide flux characteristics of alpine shrubs in Qinghai-Tibet Plateau beyond the growing season[J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2006, 26(12): 2528–2532.
- [14] Kato T, Tang Y H, Gu S, et al. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 124: 121–134.
- [15] Shi P L, Sun X M, Xu L L, et al. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and controlling factors in a steppe-Kobresia meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2006, 49 (Suppl. II): 207–218.
- [16] 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.
- [17] 黄祥忠, 郝彦宾, 王艳芬, 等. 极端干旱条件下锡林河流域羊草草原净生态系统碳交换特征[J]. *植物生态学报*, 2006, 30(6): 894–900.  
HUANG Xiang-zhong, HAO Yan-bin, WANG Yan-fen, et al. Impact of extreme drought on net ecosystem exchange from *Leymus chinensis* steppe in Xilin River Basin, China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(6): 894–900.
- [18] 张法伟, 李英年, 赵新全, 等. 一次降水过程对青藏高原高寒草甸 CO<sub>2</sub> 通量和热量输送的影响[J]. *生态学杂志*, 2008, 27(10): 1685–1691.  
ZHANG Fa-wei, LI Ying-nian, ZHAO Xin-quan, et al. Effects of one precipitation process on CO<sub>2</sub> flux and thermal transportation in alpine meadow of Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(10): 1685–1691.
- [19] 赵 亮, 徐世晓, 伏玉玲, 等. 积雪对藏北高寒草甸 CO<sub>2</sub> 和水汽通量的影响[J]. *草地学报*, 2005, 13(3): 242–247.  
ZHAO Liang, XU Shi-xiao, FU Yu-ling, et al. Effects of snow cover on CO<sub>2</sub> flux of northern alpine meadow on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2005, 13(3): 242–247.
- [20] 郝彦宾. 内蒙古羊草草原碳通量观测及其驱动机制分析[D]. 北京: 中国科学院, 2006.  
HAO Yan-bin. Characteristics of net ecosystem exchange of carbon dioxide and their driving factors over a fenced *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [21] Zhang F W, Li H Q, Li Y N, et al. “Turning point air temperature” for alpine meadow ecosystem CO<sub>2</sub> exchange on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2007, 24(9): 20–28.
- [22] Fu Y L, Yu G R, Sun X M, et al. Depression of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in semi-arid *Leymus chinensis* steppe and alpine shrub[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137: 234–244.
- [23] Yu G R, Fu Y L, Sun X M, et al. Recent progress and future directions of ChinaFLUX[J]. *Science in China Series D Earth Sciences*, 2006, 49: 1–23.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.