

DOI: 10.11686/cyxb2017231

http://cyxb.lzu.edu.cn

牛亚毅, 李玉强, 王旭洋, 等. 干旱年份沙质草地生态系统净 CO₂ 通量年变化特征. 草业学报, 2018, 27(1): 215—221.

Niu Y Y, Li Y Q, Wang X Y, *et al.* Characteristics of annual variation in net carbon dioxide flux in a sandy grassland ecosystem during dry years. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(1): 215—221.

干旱年份沙质草地生态系统净 CO₂ 通量年变化特征

牛亚毅^{1,2}, 李玉强^{1*}, 王旭洋^{1,2}, 龚相文^{1,2}, 罗永清¹, 田德宇^{1,2}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:草地生态系统是干旱半干旱区生态系统类型的重要组成部分,在区域生态系统碳平衡中起着极为重要的作用。采用涡度相关法对科尔沁沙质草地生态系统进行连续两年(2015 和 2016 年)的碳通量观测,此两年恰逢研究区的相对干旱之年,年降水量约为历史平均值的 60%。研究结果表明:1)年最大日均 CO₂ 吸收速率分别为 -6.68 和 -9.58 g · m⁻² · d⁻¹,年最大日均释放速率分别为 5.69 和 5.21 g · m⁻² · d⁻¹。2)生长季(5—9 月)碳吸收量分别为 -120.54 和 -139.83 g · m⁻²,非生长季碳释放量分别为 230.33 和 212.82 g · m⁻²。3)全年尺度上沙质草地生态系统表现为碳源,2015 年净碳释放量(109.79 g · m⁻² · 年⁻¹)稍高于 2016 年(72.99 g · m⁻² · 年⁻¹)。4)生态系统净 CO₂ 交换量(NEE)与空气温度、土壤温度及土壤湿度存在显著相关关系,但不同年份同期 NEE 对环境温度和湿度的响应程度不尽一致。

关键词:沙质草地;年变化;生态系统净 CO₂ 通量;科尔沁沙地

*Characteristics of annual variation in net carbon dioxide flux in a sandy grassland ecosystem during dry years

NIU Ya-yi^{1,2}, LI Yu-qiang^{1*}, WANG Xu-yang^{1,2}, GONG Xiang-wen^{1,2}, LUO Yong-qing¹, TIAN De-yu^{1,2}

1.Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Grassland ecosystems are a major component of terrestrial ecosystems in arid and semi-arid regions and play an important role in regional carbon balances. Continuous observation (from 2015 to 2016) of carbon dioxide flux was conducted using the eddy covariance technique in the ‘Horqin Sandy Land’ grassland ecosystem. The study period coincided with the drought in the study area and the annual rainfall during the study was 60% of the historical average. Key results were: 1) The maximum daily absorption rates were -6.68 and -9.58 g · m⁻² · d⁻¹, respectively, in 2015 and 2016, while the release rate was 5.69 and 5.21 g · m⁻² · d⁻¹. 2) The amount of CO₂ absorption was -120.54 and -139.83 g · m⁻² during growing season and the emission was 230.33 and 212.82 g · m⁻² during the non-growing season. 3) The Horqin sandy grassland ecosystem was a carbon source when considered from an annual perspective. The net carbon release in 2015 (109.79 g · m⁻² · yr⁻¹) was slightly greater than that in 2016 (72.99 g · m⁻² · yr⁻¹). 4) There were significant correlations between net ecosystem exchange (NEE) and air temperature, soil temperature, and soil moisture. However, the

* 收稿日期:2017-05-08;改回日期:2017-09-11

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC0500901),中国科学院百人计划项目(Y551821)和国家自然科学基金项目(31640012,31560161)资助。

作者简介:牛亚毅(1992-),女,甘肃通渭人,硕士。E-mail:niuyayi@126.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liyq@lzb.ac.cn

response of NEE to environmental temperature and humidity was not consistent across the two years.

Key words: sandy grassland; annual variation; net carbon dioxide flux; Horqin Sandy Land

草地是全球主要自然群系中面积最大的一类,其中温带草原生态系统占全球自然植被的 32%^[1]。近年来有关草地生态系统 CO₂ 通量的长期监测得到了快速的发展。很多研究发现草地是全球陆地生态系统中非常重要的碳汇^[2-8],例如温带和热带草地每年吸收 0.5 Pg 碳^[5],青藏高原人工草地不同年际间净固碳量的范围为 129~513 g·m⁻²·年⁻¹^[6],内蒙古羊草(*Leymus chinensis*)草地年 CO₂ 净吸收量为 126~195 g·m⁻²^[8]。亦有研究表明草地生态系统的碳收支趋于平衡^[2,7],例如美国德克萨斯州牧草草地的 CO₂ 净吸收量为 0^[2]。也有研究发现草地生态系统在年尺度上表现为碳源,例如温带半干旱草地和青海三江源退化草地的年 CO₂ 释放量分别为 482^[9]和 30 g·m⁻²^[6]。世界天然草地生态系统中的 80% 处于中纬度干旱半干旱地区,往往受到水分条件的限制,相对于其他陆地生态系统而言,其碳循环过程对降水(强度、次数和时间分布)变化的响应更为敏感,它所表现的弱源或者弱汇特征在降水的扰动下容易发生方向性的逆转,从而使得碳的源/汇功能表现出极大的不确定性^[10],因此各研究区得出结论也不尽一致。

沙质草地是我国北方干旱半干旱区重要的土地资源,近年来,由于气候变化和人为干扰等因素的影响使得该区域土地沙漠化日趋严重^[11],造成植被与土壤碳的流失^[12];加之干旱半干旱地区降水条件的限制,可能导致生态系统由碳汇转变为碳源。对沙质草地生态系统 CO₂ 通量动态和碳收支状况的长期监测和研究,有助于确定沙质草地生态系统的源/汇状况,为区域尺度碳收支的核算提供基础数据和科学依据。本研究以地处我国北方半干旱农牧交错带的科尔沁沙质草地为研究对象,基于连续两年的碳通量观测数据,通过认识沙质草地生态系统净 CO₂ 交换量(NEE)在不同时间尺度的变化特征及其对环境因子变化的响应规律,为区域生态系统碳循环的深入研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古东部科尔沁沙地的奈曼旗境内,依托中国科学院奈曼沙漠化研究站(42°55' N, 120°42' E, 海拔 345 m)开展试验。研究区属于温带大陆性半干旱气候,年均温 6.4 °C, ≥10 °C 的年积温为 3000~3400 °C;多年平均降水量 360 mm 左右^[13];无霜期 151 d,年均潜在蒸发量 1972.8 mm;年平均风速为 3.5 m·s⁻¹,大风日数 20~60 d。地带性土壤为沙质栗钙土,但在风蚀作用下多已退化为风沙土。

1.2 样地类型

研究样地为科尔沁典型的沙质草地,地势平坦,植被较为均一,2015 和 2016 年生长高峰期(8 月)的植物生物量如表 1 所列(地下生物量采样深度为 30 cm)。表层 0~20 cm 平均土壤有机碳含量为 1.27 g·kg⁻¹,全氮含量为 0.21 g·kg⁻¹,pH 值为 7.42,电导率为 16.04 μS·cm⁻¹;土壤粗砂(0.10~2.00 mm)含量为 92.76%,细砂(0.05~0.10 mm)含量为 3.28%,粘粉粒(<0.05 mm)含量为 3.96%。主要优势植物有狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)和五星蒿(*Bassia dasyphylla*)等。

表 1 2015 和 2016 年生长高峰期植物生物量

Table 1 The plant biomass during peak growth periods in 2015 and 2016 (g·m⁻²)

年份 Year	地上生物量 Above-ground biomass			地下生物量 Underground biomass	
	立枯生物量 Standing dead biomass	凋落物生物量 Litter biomass	活体植物生物量 Living plant biomass	活根生物量 Living root biomass	死根生物量 Dead root biomass
2015	72.8±13.0	150.8±23.5	149.6±25.7	20.9±3.0	65.4±11.3
2016	85.8±18.0	182.1±28.6	180.4±26.5	28.3±4.3	62.3±9.6

1.3 生态系统碳通量观测

利用涡度相关技术对沙质草地生态系统进行连续观测(2015 年 1 月 1 日至 2016 年 12 月 31 日),并利用以下公式进行 CO_2 通量的计算。 $F_{\text{CO}_2} = \overline{\omega'c'}$,式中: F_{CO_2} 为生态系统净 CO_2 通量(NEE,负值表示碳吸收,正值表示碳释放); ω' 为空气瞬时垂直速度脉动量,用三维超声风速仪(CSAT3, Campbell, USA)测定; c' 为空气 CO_2 的脉动量,用红外线分析仪(LI-7500, Li-cor, USA)测定;上横线表示某一段时间段的平均^[14]。传感器距地面的高度为 2.0 m,原始数据采样频率为 10 Hz。同时对土壤温度和土壤湿度等进行连续观测。所有数据由数据采集器 CR3000 (Campbell, USA)采集并计算。

对涡动相关法观测到的 10 Hz 原始湍流数据运用 Logger Net 软件进行格式转换(TOBI),然后利用美国 Li-cor 公司研发的 EddyPro 软件进行系列校正计算,包括异常值和野点剔除、坐标旋转修正、频率损失修正、超声虚温修正、空气密度效应修正等基本质量控制,初步得到间隔为 30 min 的通量数据,然后依据下列原则进一步剔除异常数据:1)剔除降水期间的数据;2)根据 3 倍标准差剔除异常突出数据,由原始时间序列 x 求相邻点之差 Δx 的总体标准差($\sigma_{\Delta x}$),逐点检查,如某点 $\Delta x \geq 3\sigma_{\Delta x}$,则为野点值,若连续 6 点都符合以上判断,则不做野点值处理;3)利用净辐射(R_n)小于 $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 判断出夜间数据,对夜间数据,用一个给定的临界阈值 μ_c^* 加以检验,当 $\mu_c < \mu_c^*$ 时,则剔除该通量数据, μ_c^* 一般的取值范围为 $0.10 \sim 0.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,本研究取 $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过上述质量控制后,对缺失的 CO_2 通量数据进行插补:对于缺失小于 2 h 的数据采用线性内插法,缺失大于 2 h 的数据采用平均日变化法(夜间以 7 d 为周期,白天以 14 d 为周期)^[15],最后得到以 30 min 为间隔,连续的、质量可靠的数据集。

1.4 数据统计分析

应用 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析,NEE 与环境因子(空气温度、5 cm 土壤温度、5 cm 土壤体积含水量)之间的关系用皮尔逊相关法进行分析。采用 Microsoft Excel 2010 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 环境因子变化

温度和降水均表现出明显的季节变化(图 1a)。2015 和 2016 年空气温度(T_a)日均值的变化范围分别为 $-17.64 \sim 27.81 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-26.02 \sim 30.29 \text{ }^\circ\text{C}$;最低月(1 月)平均气温分别为 -14.66 和 $-10.02 \text{ }^\circ\text{C}$,最高月(7 月)平均气温分别为 23.23 和 $24.15 \text{ }^\circ\text{C}$ 。年均温 2015 年($7.80 \text{ }^\circ\text{C}$)稍高于 2016 年($7.25 \text{ }^\circ\text{C}$)。5 cm 土壤温度(T_s)日均值的变化范围分别为 $-14.55 \sim 29.69 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-18.07 \sim 31.36 \text{ }^\circ\text{C}$,1 月的平均温度分别为 -8.86 和 $-13.67 \text{ }^\circ\text{C}$,7 月的平均温度分别为 26.56 和 $27.49 \text{ }^\circ\text{C}$; T_s 全年均值 2015 和 2016 年分别为 9.51 和 $9.39 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2015 和 2016 年降水总量分别为 212.3 和 277.2 mm (图 1b),均明显低于该地区历史多年平均降水量(360 mm);降水频率 2015 年(70 次)低于 2016 年(85 次);降水分配主要集中在植物生长期 5—9 月($>80\%$)。5 cm 土壤体积含水量(SWC):2015 年的最低值(1.66%)出现在 1 月,最高值(7.07%)出现在 9 月;2016 年的最低值(1.73%)出现在 12 月,最高值(8.81%)出现在 5 月;年均值分别为 3.37% 和 3.77% 。

2.2 沙质草地 NEE 日变化

2015 和 2016 年,沙质草地生态系统最大日均 CO_2 吸收速率分别为 -6.68 (6 月 20 日)和 $-9.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (7 月 14 日),最大日均 CO_2 释放速率分别为 5.69 (9 月 19 日)和 $5.21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (9 月 18 日),年日平均 NEE 分别为 0.30 和 $0.20 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (图 2)。

2.3 沙质草地 NEE 月动态

从不同年份逐月总量来看(图 3),2015 和 2016 年生长季(5—9 月)沙质草地生态系统均表现为净碳吸收,吸收总量分别为 120.54 和 $139.83 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;最大月分别在 6 和 7 月,净吸收量为 74.96 和 $103.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。非生长季均表现为碳排放,排放总量分别为 230.33 和 $212.82 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;最大月均出现在 9 月,排放量分别为 88.36 和 $78.13 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。从年际尺度净 CO_2 通量来看,沙质草地生态系统两年均表现为大气 CO_2 的源,2015 年碳释放量($109.79 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$)高于 2016 年($72.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$)。

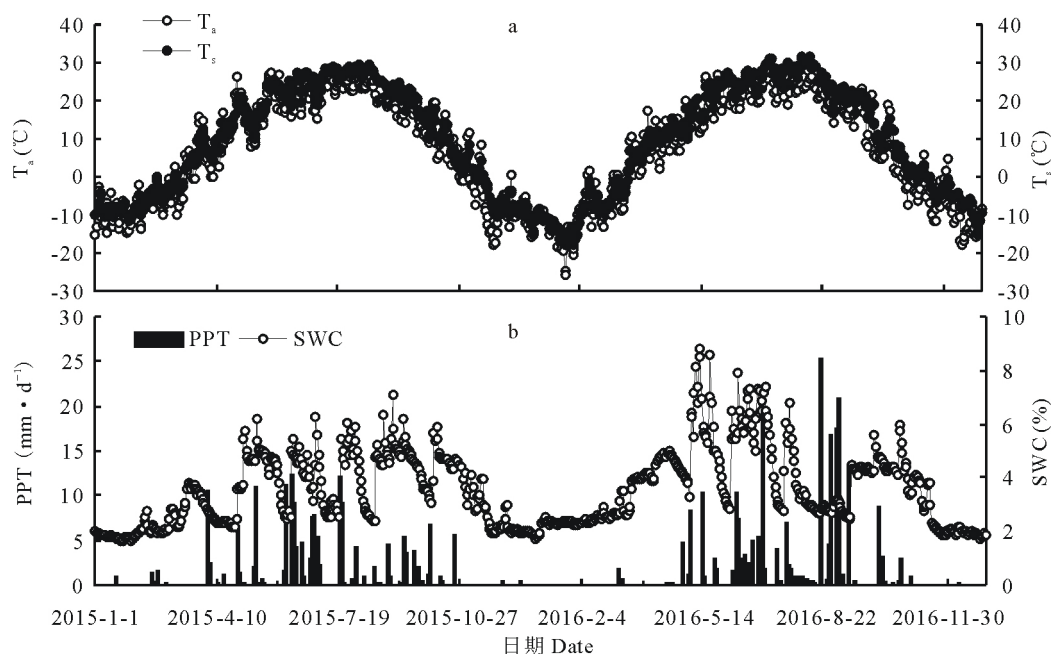


图1 空气温度(T_a)、5 cm 土壤温度(T_s)、5 cm 土壤体积含水量(SWC)和日降水量(PPT)的季节变化

Fig.1 Seasonal variation of air temperature (T_a), soil temperature at 5 cm depth (T_s), soil water content at 5 cm depth (SWC) and precipitation (PPT) in sandy grassland ecosystem

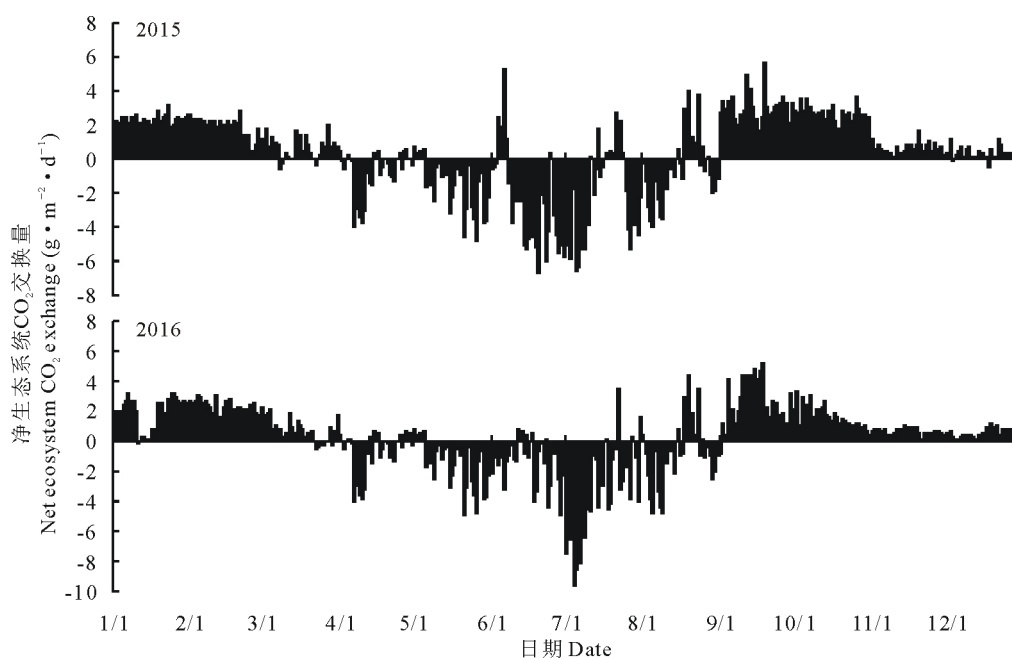


图2 2015 和 2016 年生态系统净 CO_2 交换量(NEE)逐日变化

Fig.2 Variation of diurnal net ecosystem CO_2 exchange (NEE) during 2015 and 2016

2.4 NEE 与环境因子之间的关系

以生长季和非生长季为周期,分年度对 NEE 与环境因子之间的关系进行相关分析,结果表明 NEE 与环境因子(T_a 、 T_s 和 SWC)之间总体上存在负相关关系(表 2),除 2015 年非生长季的 T_a 和 2016 年非生长季的 SWC 与 NEE 之间的相关性不显著外($P > 0.05$),其余时段 NEE 与环境因子均表现出显著的负相关关系,说明随着温度和湿度的增加,生态系统固定 CO_2 的能力增加。

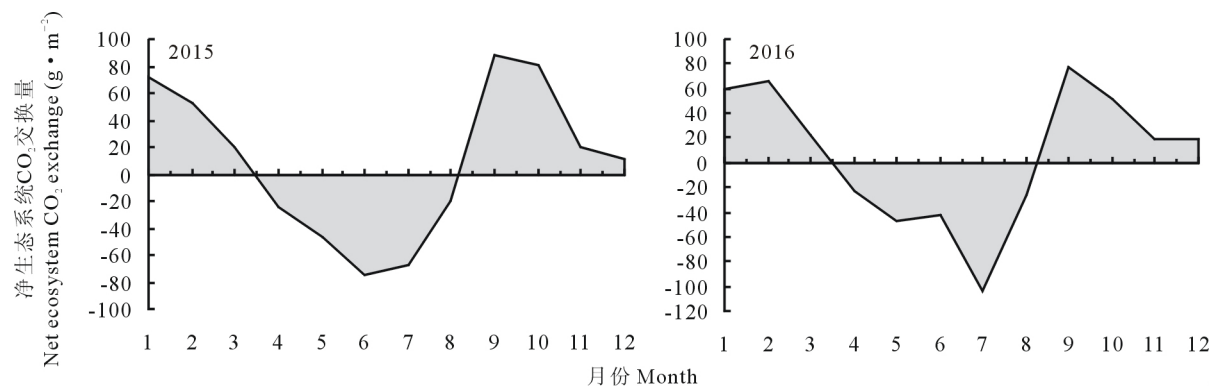


图 3 2015 和 2016 年生态系统净 CO₂ 交换量(NEE)月变化

Fig.3 Variation of monthly net ecosystem CO₂ exchange (NEE) during 2015 and 2016

表 2 NEE 与环境因子之间的皮尔逊相关系数

Table 2 The Pearson's correlation coefficients between NEE and environment factors

月份 Month	T _a		T _s		SWC	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016
生长季 Growing season (5—9)	−0.31**	−0.38**	−0.25**	−0.42**	−0.38**	−0.31**
非生长季 Non-growing season (1—4,10—12)	−0.14	−0.30**	−0.18**	−0.41*	−0.14*	−0.00

注：* * 表示相关系数通过 0.01 显著性检验；* 表示通过 0.05 显著性检验。T_a:空气温度；T_s:5 cm 土壤温度；SWC:5 cm 土壤体积含水量。

Note: * * The correlation coefficient was tested by 0.01 significance test; * The correlation coefficient was tested by 0.05 significance test. T_a: Air temperature; T_s: Soil temperature at 5 cm depth; SWC: Soil water content at 5 cm depth.

3 讨论

本研究中沙质草地生态系统 2015 和 2016 年碳吸收速率的日均最大值分别为 6.68 和 9.58 g · m⁻² · d⁻¹,与西藏当雄草原化嵩草(*Kobresia myosuroides*)草甸(7.43 g · m⁻² · d⁻¹)^[16]和蒙古国干旱草原(8.44 g · m⁻² · d⁻¹)^[17]相当,稍低于三江源退化高寒草地(11.01 g · m⁻² · d⁻¹)、三江源人工草地(10.64 g · m⁻² · d⁻¹)^[6]和海北高寒草甸(11.74 g · m⁻² · d⁻¹)^[18],但远低于加拿大湿草地(18.35 g · m⁻² · d⁻¹)^[19]和美国的奥克拉马高原草原(36.70 g · m⁻² · d⁻¹)^[20]。

在日尺度上,两个生长季内生态系统均出现了 NEE 为正值(即碳排放)的情形(图 2)。对应图 1b 可知,NEE 为正的日期均出现在降水发生后,生长季发生于半干旱地区的阵发式降水能够强烈地激发土壤中 CO₂ 的释放量^[21-23],导致生态系统 CO₂ 的日排放量超过固定量,因而 NEE 表现为正值。而在非生长季 NEE 出现负值(即碳吸收)的情形,其原因可能是冬季环境温度低,土壤呼吸微弱,但是 CO₂ 在水中的溶解度随温度下降而升高,此时土壤孔隙中的 CO₂ 易被土壤水分吸收而积聚在冻土层中,大气中的 CO₂ 浓度因高于土壤孔隙中的 CO₂ 浓度而向土壤扩散^[24],表现为碳吸收。

本研究中沙质草地生态系统生长季净碳吸收量(2015 和 2016 年分别为 120.54 和 139.83 g · m⁻²)低于以往类似的研究结果,例如内蒙古锡林浩特羊草草原为 183.50~249.56 g · m⁻²^[25]、海北高寒灌丛为 500.00~611.00 g · m⁻²^[1]、北美大草原为 279.00~345.00 g · m⁻²^[18]。同样,本研究中两个非生长季日平均 CO₂ 净释放速率(分别为 1.62 和 1.47 g · m⁻² · d⁻¹)相对较低,例如海北高寒灌丛为 1.82~2.05 g · m⁻² · d⁻¹^[1]、美国堪萨斯州的高杆草大草原为 3.00 g · m⁻² · d⁻¹^[7]。

生态系统碳通量受生物、非生物等诸多因子的影响,即使是同一个生态系统不同年际间碳收支也存在很大的波动。例如三江源退化高寒草甸在相邻年际间分别表现为弱碳源和弱碳汇^[6];吉林通榆退化草原也出现了类似的现象,该生态系统出现碳释放的年份降水异常偏少,日均净碳交换速率较低且生长季净碳吸收过程较短^[25];内

蒙古典型草原在湿润年呈弱碳汇,而在干旱年迅速转变为碳源^[26]。水分的亏缺一方面会严重的抑制草地生态系统的碳吸收能力;另一方面影响着植物的生长发育,在降水减少情况下,植物的光合速率和蒸腾速率会下降^[6],而且干旱可以导致植物生长期缩短,从而引起系统向碳源方向转变^[20,27]。本研究中连续两年的观测表明在年际尺度上沙质草地生态系统均表现为碳源,其根本原因在于降水偏少,但要充分认识该类型生态系统碳源/汇功能特征变化对于降水的响应规律及机制,需要更长时间序列上的连续观测。

4 结论

沙质草地生态系统日均碳通量变化幅度较小,2015 和 2016 年最大 CO_2 吸收速率分别为 -6.68 和 $-9.58 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,最大日 CO_2 释放速率分别为 5.69 和 $5.21 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

沙质草地生态系统在相对干旱的年份表现为碳源,2015 和 2016 年净碳释放量分别为 109.79 和 $72.99 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{年}^{-1}$ 。

总体而言,NEE 与空气温度、土壤温度及土壤含水量呈现负相关关系,即随着环境温度和水分的增加,生态系统固定 CO_2 的能力增强。

参考文献 References:

- [1] Qiao C L, Li J M, Wang J H, *et al.* Annual carbon dioxide flux variation of alpine shrub ecosystem in the Qinghai-Tibet plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(6): 910—916.
乔春连, 李靖梅, 王基恒, 等. 青藏高原高寒灌丛生态系统 CO_2 通量年变化特征研究. *草地学报*, 2011, 19(6): 910—916.
- [2] Dugas W A, Heuer M L, Mayeux H S. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999, 93(2): 121—139.
- [3] Suyker A E, Verma S B. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 279—289.
- [4] Valentini R, Gamon J A, Field C B. Ecosystem gas exchange in a California grassland: Seasonal patterns and implications for scaling. *Ecology*, 1995, 76(6): 1940—1952.
- [5] Jmo S, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 229—233.
- [6] Wang B. Study on the Carbon Flux and Its Controlling Mechanism of Degraded Alpine Meadow and Artificial Pasture in the Three-River Source Region of the Qinghai-Tibet Plateau. Tianjin: Nankai University, 2014.
王斌. 三江源区退化和人工草地生态系统 CO_2 通量及其影响机制的研究. 天津: 南开大学, 2014.
- [7] Kim J, Verma S B, Clement R J. Carbon dioxide budget in a temperate grassland ecosystem. *Geophysical Research*, 1992, 97(D5): 6057—6063.
- [8] Chen Z Z, Wang S P. Typical Grassland Ecosystem in China. Beijing: Science Press, 2000.
陈佐忠, 汪诗平. 中国典型草原生态系统. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] Balogh J, Czöbel S, Juhász A, *et al.* Seasonal carbon-balance of a semi-desert temperate grassland ecosystem over a year period. *Acta Biologica Szegediensis*, 2002, 46(3): 221—222.
- [10] Peng Q, Qi Y C, Dong Y S, *et al.* Responses of carbon cycling key processes to precipitation changes in arid and semiarid grassland ecosystems: a review. *Progress in Geography*, 2012, 31(11): 1510—1518.
彭琴, 齐玉春, 董云社, 等. 干旱半干旱地区草地碳循环关键过程对降雨变化的响应. *地理科学进展*, 2012, 31(11): 1510—1518.
- [11] Shang W, Li Y Q, Wang S K, *et al.* Dynamic changes of surface soil organic carbon and light-fraction organic carbon after mobile dune afforestation with Mongolian pine in Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8): 2069—2074.
尚雯, 李玉强, 王少昆, 等. 科尔沁沙地流动沙丘造林后表层土壤有机碳和轻组有机碳的变化. *应用生态学报*, 2011, 22(8): 2069—2074.
- [12] Zhao H L, Li Y Q, Zhou R L. Effects of desertification on C and N storage in grassland ecosystem on Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2412—2417.
赵哈林, 李玉强, 周瑞莲. 沙漠化对科尔沁沙质草地生态系统碳氮储量的影响. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2412—2417.
- [13] Liu X P, He Y H, Zhao X Y, *et al.* Characteristics of precipitation in Nanman region of Horqin sandy land. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(2): 155—158.
刘新平, 何玉惠, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地奈曼地区降水变化特征分析. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 155—158.

- [14] Zhu Z L, Sun X M, Zhang R H, *et al.* The estimate of energy and mass exchange in Inner Mongolia semi-arid grassland micrometeorological methods. *Climatic and Environmental Research*, 2002, 7(3): 351–358.
朱治林, 孙晓敏, 张仁华, 等. 内蒙古半干旱草原能量物质交换的微气象方法估算. 气候与环境研究, 2002, 7(3): 351–358.
- [15] Falge E, Baldocchi D, Olson R, *et al.* Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 71–77.
- [16] Kato T, Tang Y, Gu S, *et al.* Temperature and biomass influences on interannual changes in CO₂ exchange in an alpine meadow on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2006, 12(7): 1285–1298.
- [17] Li S G, Asanuma J, Eugster W, *et al.* Net ecosystem carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology*, 2005, 11(11): 1941–1955.
- [18] Shi P L, Sun X M, Xu L L, *et al.* The net carbon flux and its influencing factors in Tibetan alpine steppe meadow ecosystem. *Science in China: Earth Science*, 2006, 36(S1): 194–203.
石培礼, 孙晓敏, 徐玲玲, 等. 西藏高原草原化嵩草草甸生态系统 CO₂ 净交换及其影响因子. 中国科学: 地球科学, 2006, 36(S1): 194–203.
- [19] Frank A B. Carbon dioxide fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): 397–403.
- [20] Suyker A E, Verma S B, Burba G G. Interannual variability in net CO₂ exchange of a native tallgrass prairie. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 255–265.
- [21] Saetre P, Stark J M. Microbial dynamic sand carbon and nitrogen cycling following rewetting of soils beneath two semi-arid plant species. *Oecologia*, 2005, 142: 247–260.
- [22] Wang X Y, Li Y L, Zhao X Y, *et al.* Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4890–4901.
王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展. 生态学报, 2012, 32(15): 4890–4901.
- [23] 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. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 111(1): 65–82.
- [24] Zhang J X, Cao G M, Zhou D W, *et al.* The carbon storage and carbon cycle among the atmosphere, soil, vegetation and animal in the *Kobresia humilis* alpine meadow ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 627–634.
张金霞, 曹广民, 周党卫, 等. 高寒矮嵩草草甸大气—土壤—植被—动物系统碳素储量及碳素循环. 生态学报, 2003, 23(4): 627–634.
- [25] Du Q, Liu H Z, Feng J W, *et al.* Carbon dioxide exchange processes over the grassland ecosystems in semiarid areas of China. *Science in China: Earth Science*, 2012, 55(4): 644–655.
杜群, 刘辉志, 冯健武, 等. 半干旱区草原生态系统的碳交换特征. 中国科学: 地球科学, 2012, 55(4): 644–655.
- [26] Hao Y, Wang Y, Sun X, *et al.* Seasonal variation in carbon exchange and its ecological analysis over *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. *Science in China: Earth Science*, 2006, 49(Supple 2): 186–195.
- [27] Meyers T P. A comparison of summertime water and CO₂ fluxes over rangeland for well watered and drought conditions. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2001, 106(3): 205–214.