

沙质草地生长季生态系统碳净交换量特征及土壤呼吸贡献率

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

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

摘要 以科尔沁沙质草地为研究对象, 利用开路涡度相关系统和 LI-8150 土壤呼吸自动观测系统, 分析了生长季生态系统二氧化碳 (CO_2) 净交换量 (NEE) 的变化特征, 土壤呼吸 (R_s) 对生态系统呼吸 (R_{eco}) 的贡献率, 以及生态系统总初级生产力 (GPP) 的大小。结果表明: 生长季 NEE 存在明显的月均日变化特征, 总体呈单峰型, 其中 7 月的日变化最为明显, NEE 月均日最大吸收速率 ($-5.62 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 和最大释放速率 ($3.14 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 均出现在 7 月份; 生长季内生态系统总体表现为碳汇, 固碳量为 $25.85 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$; R_s 对 R_{eco} 的贡献率为 78.39%, R_{eco} 对 GPP 的贡献率为 90.62%, 生长季内 GPP 总累积量为 $275.51 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

关键词 沙质草地; 碳通量; 土壤呼吸; 生态系统呼吸; 总初级生产力

The characteristics of net ecosystem carbon exchange and the contribution of soil respiration during the growing season in sandy grassland. NIU Ya-yi^{1,2}, LI Yu-qiang^{1*}, GONG Xiang-wen^{1,2}, WANG Xu-yang^{1,2}, LUO Yong-qing¹, ZHANG Jian-peng^{1,2} (¹Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China).

Abstract: Based on the eddy covariance system and LI-8150 automatic soil respiration observation system, this present study investigated the characteristics of net ecosystem CO_2 exchange (NEE), the contribution of soil respiration (R_s) to ecosystem respiration (R_{eco}), and the gross primary productivity (GPP) in Horqin sandy grassland of China. The results showed that the average monthly diurnal variations of NEE changed apparently with a single peak curve; the highest absorption rate ($-5.62 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) and the highest release rate ($3.14 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) were observed in July. The sandy grassland ecosystem was a carbon sink, with a sequestration amount of $25.85 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ during the growing season. The contribution of R_s to R_{eco} accounted for 78.39%; the GPP was $275.51 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ and the contribution of R_{eco} to GPP accounted for 90.62%.

Key words: sandy grassland; carbon flux; soil respiration; ecosystem respiration; gross primary productivity.

草地生态系统作为全球陆地生态系统最重要、分布最广的生态系统类型之一, 在全球碳循环和气候调节中起着非常重要的作用 (Scurlock *et al.*, 1998; Scurlock *et al.*, 2002; 朴世龙等, 2004)。草地

生态系统的碳储量在全球陆地生态系统中仅次于森林生态系统, 在全球碳平衡中起着重要作用 (Tans *et al.*, 1990), 并且草地是受人类影响最为严重的生态系统之一, 脆弱的生态环境与频繁的人类活动使之较其他生态系统对全球气候与环境变化的响应更为敏感, 因此研究草地植被与大气间 CO_2 交换机理对理解全球陆地生态系统碳收支以及碳循环具有非常重要的意义 (于贵瑞等, 2006)。

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

收稿日期: 2017-01-09 接受日期: 2017-06-06

* 通讯作者 E-mail: liyq@lzb.ac.cn

涡度相关技术是对大气与森林、草地或农田等生态系统间的 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 和热量通量进行非破坏性测定的一种微气象观测技术(于贵瑞等,2006),是目前最先进和首选的测定地-气交换最好的方法之一,已经被广泛应用于估算陆地生态系统的物质和能量交换(朱治林等,2006)。涡度相关技术的发展使得对通量数据长期并且连续定点位观测成为可能。近年来应用涡动相关系统进行通量观测的站点越来越多,对于草地生态系统的研究也越来越深入,主要集中在羊草草原(黄祥忠等,2006;王雷等,2010)、高寒草甸(王斌等,2012;张法伟等,2012;Chai *et al.*,2017)和人工草地(赵亮等,2008;吴力博等,2010;王斌,2014)碳通量特征等方面的研究,但对于沙质草地碳净交换量的动态研究尚未见报道。

土壤呼吸作用是土壤有机碳输出的主要途径,是生态系统碳循环的重要环节之一(王旭等,2013),此外,土壤呼吸还是土壤生态系统物质循环与能量转化的外在表现,对土壤有机质的矿化速率、异养代谢情况、土壤腐殖质和枯枝落叶层中碳代谢、植被地下碳分配和生态系统生产力等有重要指示作用(王新源等,2012),土壤呼吸作为干旱半干旱区土壤碳损失主要途径,研究土壤呼吸对于生态系统呼吸的贡献率,对于准确估算碳收支,阐明未来气候变化条件下陆地生态系统在碳循环方面的源汇功能,揭示失踪的碳汇之谜有着非常重要的意义。

科尔沁沙质草地生态系统处于我国北方典型的半干旱区,具有非常脆弱的草地生态资源,相比于其他下垫面,对气候变化的响应更为敏感。近年来,该地区有关的研究主要是运用 LI-6400-09 土壤呼吸系统测定土壤呼吸(李玉强等,2006;孙殿超等,2015),有一定的局限性。也有利用涡动相关系统测定水热通量的报道(王婧等,2016),但对于整个草地生态系统 NEE 的变化特征缺少系统的研究,因此研究该地区 NEE 的动态特征,对于了解区域碳的源汇功能和退化草地的恢复具有重要意义。

本研究基于涡度相关通量观测系统和 LI-8150 土壤呼吸观测系统的定位连续观测数据,研究分析了科尔沁沙质草地生态系统 NEE 动态特征、土壤呼吸(R_s)对生态系统呼吸(R_{eco})的贡献率及生态系统总初级生产力(GPP)的大小,并对沙质草地生态系统的碳收支进行定量评价,以期为区域碳收支估算和相关碳模型参数修正提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于科尔沁沙地中南部内蒙古通辽市奈曼旗,依托中国科学院奈曼沙漠化研究站($42^\circ55'N$, $120^\circ42'E$,海拔 345 m)开展试验。本区属于温带大陆性半干旱气候,年均温 6.4°C , $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温为 $3000\sim 3400^\circ\text{C}$;年均降水量 360 mm 左右,主要集中在 6—8 月;无霜期 151 d,年均潜在蒸发量 1972.8 mm;年平均风速为 $3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,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 研究方法

1.2.1 样地类型 研究样地为科尔沁沙地典型的沙质草地,地势平坦,植被较为均一。表层 0~20 cm 平均土壤有机碳含量为 $1.27\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $0.21\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 值为 7.42,电导率为 $16.04\text{ }\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,土壤粗砂(0.1~2 mm)含量为 92.76%,细砂(0.05~0.1 mm)含量为 3.28%,黏粉粒($<0.05\text{ mm}$)含量为 3.96%。优势植物有狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)和五星蒿(*Bassia dasyphylla*)等。

本研究所获取的各类数据区间为 2016 年生长季 6—9 月。

1.2.2 生态系统碳通量观测系统 通量观测系统为开放式涡度相关系统,主要由 LI-7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪(Li-Cor, USA)、CSAT3 超声风速仪(Campbell, USA)和 CR3000 数据采集器(Campbell, USA),以及四分量净辐射仪、光合有效辐射仪、土壤温度传感器、土壤水分传感器、土壤热通量板等组成。仪器安置在地势平坦、植被均一,具有足够大“风浪区”的沙质草地中心。水汽分析仪安装在距地面 2 m 高的位置。原始数据采集频率为 10 Hz。按照微气象学符号,NEE 向下通量(即碳吸收)用负号表示。

1.2.3 土壤呼吸测定系统 土壤呼吸数据采用 LI-8150(Li-Cor, USA)自动观测系统获取。在距离涡度塔大约 50 m(通量贡献区内)的位置布设样地,在样地中按照等边三角形的方式设置 3 个 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的固定样方,在每个样方内布设 1 个土壤 CO_2 通量的观测点(即安装 3 个长期自动观测室),每两个观测点之间的距离大约为 10 m,每个观测点埋入高 5 cm、直径 20 cm 的 PVC 圈作为土壤呼吸观测环,嵌入土后露出地面 3 cm。土壤呼吸环在正式测量前

10 天安置完毕,以减少人为干扰造成的结果误差。观测期间不定期齐地面剪掉环内的活体植物。数据获取间隔为 30 min。

1.2.4 生物量测定 在生长季每个月中旬测定地上、地下生物量:地上生物量采用收割法,随机选择 6 个 50 cm×50 cm 的样方,首先将立枯植物和凋落物分开装入纸袋中,然后剪下活体生物量装入纸袋中;地下生物量用根钻(直径 10 cm)法,按照 0~10、10~20 和 20~30 cm 三层取样,在实验室将采集回来的土柱放在水中浸泡 24 h 左右,然后将土柱放入孔径为 0.5 mm 的网筛中,用流水冲洗,利用目测法将植物的活根和死根(包括地下凋落物)分开,活根通常有弹性,颜色鲜亮,不容易折断,且外皮和周皮不容易分开;死根没有弹性通常易碎,颜色多呈黑暗褐色或黑色,且外皮起皱易脱落(Robertson *et al.*, 1990)。然后将收集的根系在 80 ℃ 恒温在烘箱内烘至恒重后称重,单位取 g·m⁻²。

1.3 数据分析

1.3.1 碳通量数据质量控制 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(TOB1),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(WPL 修正)等基本质量控制,得到取样间隔为 30 min 的通量数据。

将 EddyPro 软件输出的 30 min 通量数据进行进一步剔除,主要包括:1)剔除同时期降水数据。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 $\Delta x \geq 3\sigma_{\Delta x}$,则为野值点,若连续 6 点都符合以上判断,则不做野点值处理(张智慧等, 2010)。3)利用净辐射(R_n)小于 1 W·m⁻²判断出夜间数据,对夜间数据,用一个给定的临界阈值 u_c^* 加以检验,当 $u^* < u_c^*$ 时,则剔除该通量数据(李祎君等,2007), u_c^* 一般的取值范围为 0.1~0.2 m·s⁻¹,本文取 0.1 m·s⁻¹。原始通量数据进行质量控制后,剔除低质量数据会影响数据的连续性。因此,本研究对缺失的 NEE 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(MDV)(夜间以 7 d 为周期,白天以 14 d 为周期)(Falge *et al.*, 2001)。

1.3.2 生态系统呼吸的计算 夜间 NEE 可以近似的看作 R_{eco} , R_{eco} 与空气温度(T_a)之间的关系采用

V'ant Hoff 呼吸方程来拟合(张前兵等,2012),白天生态系统呼吸利用夜间所建立的指数模型进行计算。

$$R_{eco} = a \exp(bT_a)$$

(1)

式中: R_{eco} 单位为 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$; T_a 单位为 ℃; a 、 b 为拟合参数。

1.3.3 生态系统总初级生产力(GPP) GPP(为了计算方便,本文 GPP 取正值)利用净生态系统生产力 NEP(NEP 在数值上与 NEE 相等,符号相反,NEP 为正表示碳吸收,为负表示碳释放)与 R_{eco} 计算:

$$GPP = R_{eco} + NEP = R_{eco} - NEE$$

(2)

应用 SPSS 19.0 软件进行数据的统计分析与相关性检验,应用 Microsoft Excel 2010 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 气象因子及生物量的变化

研究区生长季内不同月份的降雨量、土壤湿度、土壤温度、空气温度等存在一定的差异性(表 1),其中 7 月降雨量明显低于其他月份,空气和土壤温度都稍高于其他月份。7—8 月地上活体生物量高于其他月份(表 2),表明该段时间内水热条件较适宜,植物生长旺盛,而进入 9 月份生长季后期,植物逐渐开始衰老、枯萎,地上凋落生物量明显高于其他月份。

2.2 沙质草地生态系统 NEE 的月均日动态

沙质草地生态系统 NEE 月均日变化具有明显

表 1 气象因子月动态
Table 1 Monthly dynamics of meteorological factors from June to September in 2016

月份	降水总量 (mm)	平均土壤 湿度(%)	平均空气 温度(℃)	平均土壤 温度(℃)
6	64.00	5.80	22.43	25.35
7	37.30	5.81	24.36	27.87
8	70.70	5.92	23.23	27.42
9	46.50	6.24	18.42	20.84

表 2 生物量月动态(g·m⁻²)
Table 2 Monthly dynamics of biomass

月份	地上生物量			地下生物量	
	立枯 生物量	凋落物 生物量	活体植 物生物量	活根 生物量	死根 生物量
6	69.9±10.4a	186.7±26.8ab	31.9±2.9b	24.1±2.5a	32.9±4.5a
7	59.8±12.0a	125.5±22.4b	116.7±31.0a	11.5±2.1b	65.1±13.7a
8	85.8±18.0a	182.1±28.6ab	180.4±26.5a	28.3±4.3a	62.3±9.6a
9	59.2±16.2a	251.7±18.1a	105.9±18.0a	19.0±1.8ab	48.8±6.2a

同一列不同字母表示统计分析显著差异($P < 0.05$)。

的季节动态(图 1),基本呈现“单峰型”曲线。当地时间 07:00 左右,NEE 变为负值,表现为碳吸收,11:00—14:00 之间出现碳吸收的峰值,随后开始下降,19:00 左右 NEE 逐渐变为正值,由碳吸收转换为碳排放。在生长高峰期,NEE 的月均日最大碳吸收和排放速率均出现在 7 月,最大吸收速率($-5.62 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)出现的时间为 10:30,最大碳排放速率($3.14 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)出现的时间为 20:30。生长季白天 NEE 碳吸收的大小依次为:7 月>8 月>6 月>9 月,夜间 NEE 的总体变化较平缓。

2.3 沙质草地生态系统 NEE 日累积量的季节动态

沙质草地生态系统 NEE 日累积值出现了 3 个明显的吸收峰值(图 2),6 月 24 日—7 月 16 日吸收峰值最大且持续时间较长,7 月 24 日—8 月 14 日吸收峰值较小,整体的变化也较为平缓,但持续时间最长,8 月 23 日—9 月 3 日碳吸收的峰值最小且持续时间最短。除生长季少数几天表现为碳源外,其余大多数时间都表现为碳汇,NEE 的日积累最大碳吸

收出现的时间为 7 月 4 日(第 186 天),吸收速率为 $2.61 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,最大碳排放出现的时间为 9 月 18 日(第 262 天),排放速率为 $1.42 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

2.4 沙质草地生态系统各月碳收支量

生长季 6 月、7 月和 8 月均表现为碳吸收,月累积净固碳量分别为 11.42、28.26 和 $6.95 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,而 9 月表现为碳释放,累积释放量为 $20.76 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。沙质草地生态系统整个生长季内总体表现为碳汇,总固碳量为 $25.85 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。6—9 月每月对整个生长季碳汇的贡献率分别为 45.12%、111.62%、27.42%、-84.16%。

2.5 沙质草地生态系统 R_s 和 R_{eco} 日平均碳释放速率

生长季内 R_s 和 R_{eco} 日平均碳释放速率的变化总体趋于一致(图 4),二者都大体上呈“单峰型”变化趋势。 R_s 日平均速率的变化范围为 $0.37 \sim 2.76 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,总体平均值为 $1.32 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;出现最小值的时间为 6 月 8 日(第 160 天),出现最

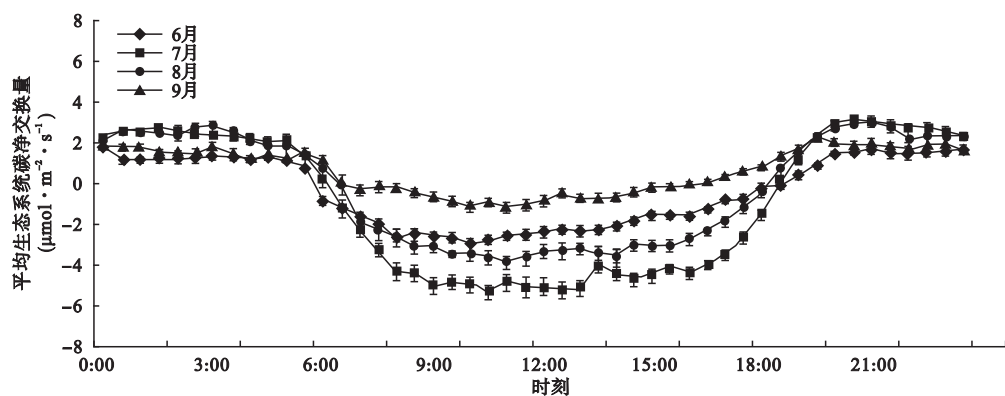


图 1 沙质草地生态系统碳净交换量的月均日动态
Fig.1 Monthly mean diurnal dynamics of NEE in sandy grassland ecosystem

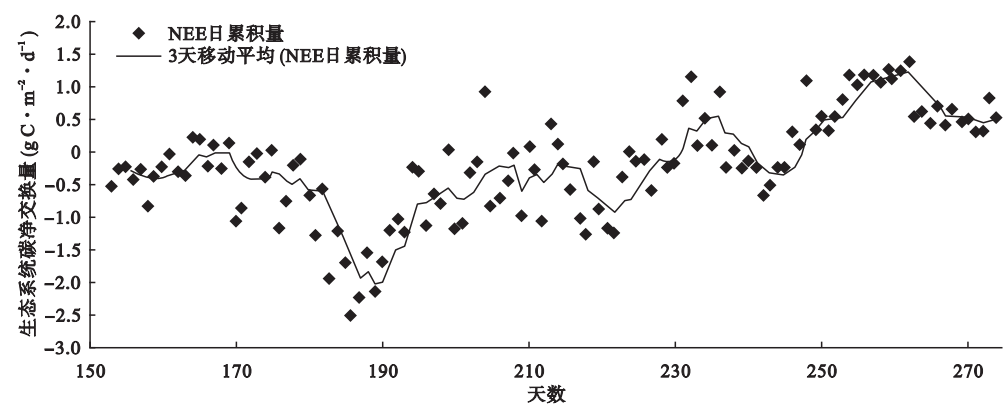


图 2 沙质草地生态系统碳净交换量日累积量的季节变化
Fig.2 Seasonal variation of the daily accumulated NEE in sandy grassland ecosystem

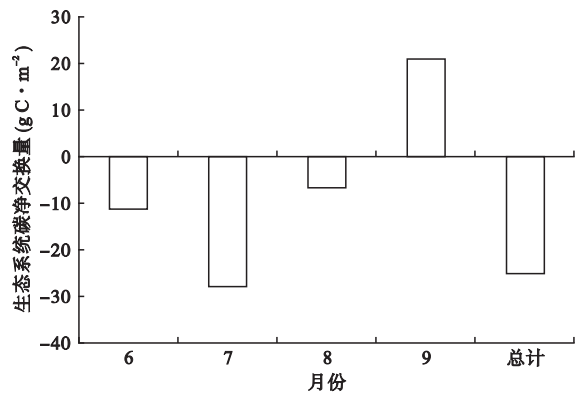


图3 沙质草地生态系统各月碳收支
Fig.3 Monthly carbon budget of sandy grassland ecosystem

大值的时间为7月23日(第205天)。 R_{eco} 日平均速率的变化范围为 $0.62 \sim 3.55 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 总体平均值为 $2.06 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 出现最小值的时间为9月27日(第270天), 出现最大值的时间为

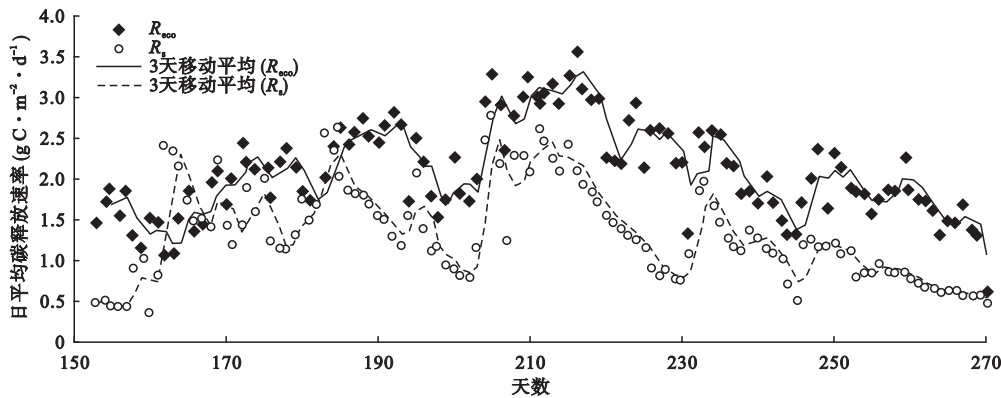


图4 生态系统呼吸(R_{eco})与土壤呼吸(R_s)日平均碳释放速率变化
Fig.4 Changes of average daily carbon release rate of ecosystem respiration and soil respiration

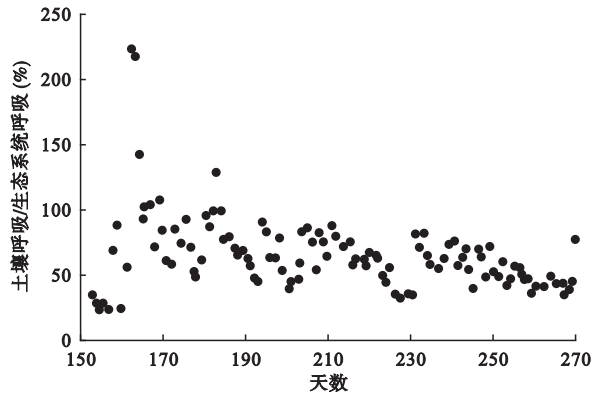


图5 土壤呼吸与生态系呼吸日平均碳释放速率的比值
Fig.5 Ratio of average daily carbon release rate of soil respiration to ecosystem respiration

8月3日(第216天)。
 R_s 日平均碳释放速率和 R_{eco} 日平均碳释放速率的比值变化如图5所示, 6—8月总体上呈“波浪形”曲线, 9月份的变化趋势相对平缓。 R_s/R_{eco} 的最小值和最大值均出现在6月份, 最小值为23.68%, 最大值出现大于100%的情况。

2.6 沙质草地生态系统各月 R_s 对 R_{eco} 的贡献率及GPP的变化

生长季(6—9月)各月 R_s 累积碳释放量分别为 $39.87, 54.15, 42.46$ 和 $23.25 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 总释放量为 $159.73 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$; R_{eco} 的累积碳释放量分别为 $52.57, 76.52, 72.99$ 和 $47.57 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 总释放量为 $249.66 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ (图6)。生长季各月 R_s 对于 R_{eco} 贡献率分别为24.42%、21.79%、18.23%和14.34%, 总贡献率为78.39%。

生长季(6—9月)各月的GPP值分别为63.99、103.78、79.94和26.81 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$, 总GPP值为275.51

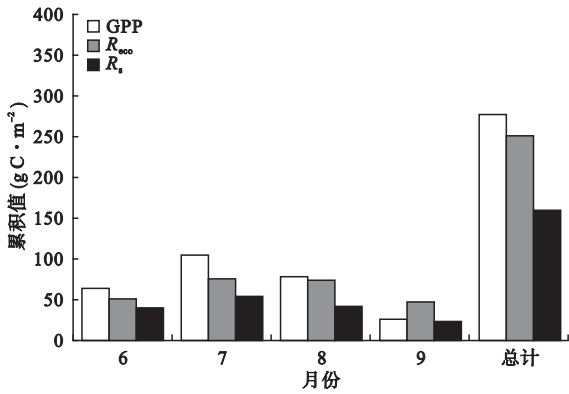


图6 沙质草地生态系统各月土壤呼吸、生态系统呼吸和GPP的月积累值
Fig.6 Monthly accumulation of soil respiration, ecosystem respiration and GPP in sandy grassland ecosystem

$\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$ (图6)。对总 GPP 的贡献率,6—9 月分别为 23.23%、38.03%、29.01% 和 9.73%。 R_{eco} 累积碳释放量占总 GPP 的比例,6—9 月分别为 82.15%、73.04%、91.31% 和 177.45%, 总体比例为 90.62%。

3 讨 论

3.1 草地生态系统 NEE 特征及其影响因素

草地是陆地生态系统的重要组成部分,研究草地生态系统与大气之间物质和能量的交换过程在目前全球碳循环及气候变化的响应方面有非常重要的意义。已有研究表明,NEE 月均最大值(吸收和释放速率)出现在生长季高峰期 7—8 月,如草甸生态系统的 NEE 月均最大值出现在 7 月份(王婧等,2015),与本研究结果相一致;克氏针茅草原生态系统的 NEE 月均最大值出现在 8 月份(杨娟等,2008)。不同区域生态系统 NEE 月均最大吸收和释放速率存在差异,如内蒙古克氏针茅草原为 -5.5 和 $1.6 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (杨娟等,2008),蒙古羊草草地为 -3.6 和 $1.2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Li *et al.*, 2005),新西兰草丛草原为 -5 和 $2 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Hunt *et al.*, 2002),北美大草原为 -32 和 $15 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Ham *et al.*, 1998; Dugas *et al.*, 1999; Suyker *et al.*, 2001)。本研究的 NEE 月均最大吸收和释放速率分别为 -5.62 和 $3.14 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 说明半干旱区沙质草地生态系统 NEE 的特征参数处于相对较低的水平。导致该差异的原因一方面可能是由于光照、温度、水分等环境因子的不同,另一方面植物的种类也是影响草地生态系统光合作用的重要因素。

本研究中,沙质草地生态系统生长季白天 NEE 碳吸收的大小依次为:7 月 > 8 月 > 6 月 > 9 月,出现这一现象的原因是 6 月份开始进入生长季的初期,随着降雨量和温度的逐渐增加,干旱胁迫减弱,白天的碳吸收变化较为明显。7、8 月份植物进入生长高峰期,随着降雨量的增加,土壤水分不再成为限制因子,适宜的温度、水分条件和较为活跃的植物根系活动等同时促进生态系统呼吸,虽然土壤呼吸也释放大量的 CO_2 ,但由于该段时间内植物生长旺盛,光合作用强,此阶段的碳吸收活动最强,7 月白天 NEE 的吸收峰值达到最大,形成宽大的 NEE 单峰吸收曲线。9 月份以后,草地进入生长季末期,植物逐渐开始枯萎,光合作用能力减弱,月累积固定大气 CO_2 量小于生态系统碳释放量,因此该阶段总体上表现为碳释放。

由于植被类型及其所处的环境条件不同,致使土壤呼吸、植被光合作用和呼吸作用、土壤微生物的分解等过程产生差异,进而会影响生态系统 NEE 的季节动态特征。本研究中,沙质草地生态系统 NEE 净累积值出现了 3 个明显的碳吸收峰,这与薛红喜等(2009)对克氏针茅草地 NEE 峰值变化的研究结果相同。生长季内出现碳释放,其主要原因是降水不平衡,出现水分匮乏的时段,限制了植物的光合固碳能力,即在干旱条件下生态系统表现为碳源。因此科尔沁沙质草地生态系统 NEE 对降雨(总量、频度、单次强度等)及水热耦合的响应机制在今后的研究中有待于进一步深入。

对于生长季草地生态系统的碳汇强度亦有不少结果。例如,三江源地区人工草地生态系统生长季(5—9 月)的固碳量为 $73.09 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ (吴力博等, 2010),海北矮嵩草草地生态系统的生长季固碳量为 $223.83 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ (Kato *et al.*, 2004),明显高于本研究中沙质草地的固碳量($25.85 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$),说明低降雨量、低土壤有机质条件导致科尔沁沙质草地植被生产力较低,碳汇强度较弱。

3.2 R_{eco} 与 R_s 及 GPP 的关系

R_s 是 R_{eco} 的重要组成部分。本研究中,按日平均速率作为参数, R_s/R_{eco} 的最小值为 23.68%,但是其最大值在某些日期出现大于 100% 的情况。究其原因有两方面:一是降水(比值大于 100% 的日期都有降水发生),夏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 CO_2 的释放量(Saetre *et al.*, 2005; 王新源等, 2012),而对于涡动相关系统而言,降水扰乱了正常的大气湍流运动,并可能导致仪器失灵,为保证数据质量,需剔除掉降水同期的观测数据(李春等, 2008),该段时间内的数据通过插补方法得到,通过插补方法得到的数据可能小于实际值,导致 $R_s/R_{\text{eco}} > 100\%$;二是由于白天的 R_{eco} 是通过夜间 NEE 数据和空气温度之间的关系拟合得来的,夜间数据会由于湍流弱的原因,低估 R_{eco} 值,用夜间的拟合公式来推算白天的 R_{eco} 值,可能导致白天的 R_{eco} 值也偏小(姜楠, 2016),出现 $R_s/R_{\text{eco}} > 100\%$ 。此种情况在芦苇湿地生态系统的研究中也报道(姜楠, 2016)。按整个研究时段的累积量作为参数,本研究中生长季 R_s 累积量对 R_{eco} 累积量的贡献率为 78.39%。相关研究表明,全球 R_s/R_{eco} 的估算比例为 77% (于贵瑞等, 2013),森林生态系统 R_s/R_{eco} 的变化范围为 30% ~ 80% (Luo *et al.*, 2006),亚

热带马尼拉草坪生态系统 R_s/R_{eco} 的变化范围为 50%~74%(张静,2008),古尔班通古特沙漠南缘梭梭群落 R_s/R_{eco} 为 67%(杨洁等,2016),敦煌葡萄农田生态系统 R_s/R_{eco} 为 45%(马婷,2016)。

R_{eco}/GPP 用来描述生态系统呼吸量占光合作用固碳量的比例,可以反映生态系统碳消耗的强度(马婷,2016)。Falge 等(2002)研究了陆地生态系统的 GPP 和 R_{eco} 的关系,发现 GPP 主要由植被状况决定,而 R_{eco} 主要受温度的影响。本研究中沙质草地生态系统生长季 R_{eco} 对 GPP 的贡献率为 90.62%,高于三江源地区人工草地生态系统生长季(5—9月) R_{eco} 对 GPP 的贡献率(84%)(吴力博等,2010)。出现这一差异的原因可能是三江源地区海拔高,即使在植物生长旺季的 7 月,其月平均气温也只有 10℃左右,日最低温度可降到 0℃以下,生态系统常年处于低温环境中, R_{eco} 较低,但强辐射为植物的光合作用提供了充足的能源,产生了较高的 GPP(Ni,2001;Kato *et al.*,2004;吴力博等,2010),致使该区域 R_{eco} 对 GPP 的贡献率相对较低。

4 结 论

沙质草地生态系统生长季 NEE 的月均日变化为“单峰型”曲线,正午前后出现碳吸收谷,晚间整体表现为碳排放,白天 NEE 碳吸收速率大小依次为 7月>8月>6月>9月;NEE 月均日变化的最大值和最小值均出现在 7 月,最大碳吸收速率为 $-5.62 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,最大碳释放速率为 $3.14 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;NEE 日累积值出现了 3 个明显的碳吸收峰。

沙质草地生态系统生长季 GPP 为 $275.51 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$, R_{eco} 碳释放总量为 $249.66 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,生态系统净固碳量为 $25.85 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$,表现为一个弱的碳汇。

沙质草地生态系统生长季 R_s 对 R_{eco} 的贡献率为 78.39%,表明 R_s 是 R_{eco} 中的主要贡献者; R_{eco} 占 GPP 的比例为 90.62%,表明沙质草地生态系统碳消耗强度高。

参考文献

黄祥忠,郝彦宾,王艳芬,等. 2006. 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. 植物生态学报, **30**(6): 894-900.

姜楠. 2016. 芦苇湿地生态系统碳通量的测定与土壤碳通量的贡献分析(硕士学位论文). 上海: 华东师范大学.

李春,何洪林,刘敏,等. 2008. ChinaFLUX CO₂ 通量数

据处理系统与应用. 地球信息科学, **10**(5): 557-565.

李祎君,许振柱,王云龙,等. 2007. 玉米农田水热通量动态与能量闭合分析. 植物生态学报, **31**(6): 1132-1141.

李玉强,赵哈林,赵学勇,等. 2006. 不同强度放牧后自然恢复的沙质草地土壤呼吸、碳平衡与碳储量. 草业学报, **15**(5): 25-31.

马婷. 2016. 敦煌葡萄农田生态系统土壤呼吸动态与碳平衡特征研究(硕士学位论文). 兰州: 兰州大学.

朴世龙,方精云,贺金生,等. 2004. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, **28**(4): 491-498.

孙殿超,李玉霖,赵学勇,等. 2015. 放牧及围封对科尔沁沙质草地土壤呼吸的影响. 中国沙漠, **35**(6): 1620-1627.

王斌,李洁,姜微微,等. 2012. 草地退化对三江源区高寒草甸生态系统 CO₂ 通量的影响及其原因. 中国环境科学, **32**(10): 1764-1771.

王斌. 2014. 三江源区退化和人工草地生态系统 CO₂ 通量及其影响机制的研究(博士学位论文). 天津: 南开大学.

王婧,刘廷玺,雷慧闽,等. 2015. 科尔沁草甸生态系统净碳交换特征及其驱动因子. 草业学报, **24**(11): 10-19.

王婧,刘廷玺,雷慧闽,等. 2016. 基于涡度相关的半干旱区沙丘-草甸水热通量对比分析. 干旱区研究, **33**(3): 593-600.

王雷,刘辉志,David Schaffra,等. 2010. 内蒙古羊草草原和大针茅草原下垫面水汽、CO₂ 通量输送特征. 高原气象, **29**(3): 605-613.

王旭,闫玉春,闫瑞瑞,等. 2013. 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响. 生态学报, **33**(18): 5631-5635.

王新源,李玉霖,赵学勇,等. 2012. 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, **32**(15): 4890-4901.

吴力博,古松,赵亮,等. 2010. 三江源地区人工草地的生态系统 CO₂ 净交换、总初级生产力及其影响因子. 植物生态学报, **34**(7): 770-780.

薛红喜,李琪,王云龙,等. 2009. 克氏针茅草原生态系统生长季碳通量变化特征. 农业环境科学学报, **28**(8): 1742-1747.

杨洁,刘冉,马杰,等. 2016. 古尔班通古特沙漠南缘梭梭(*Haloxylon ammodendron*) 群落土壤呼吸对生态系统呼吸的贡献. 中国沙漠, **36**(3): 726-733.

杨娟,周广胜,王云龙,等. 2008. 内蒙古克氏针茅草原生态系统-大气通量交换特征. 应用生态学报, **19**(3): 533-538.

于贵瑞,何念鹏,王秋风,等. 2013. 中国生态系统碳收支及碳汇功能: 理论基础与综合评估. 北京: 科学出版社.

于贵瑞,孙晓敏,付玉玲,等. 2006. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社.

张静. 2008. 亚热带马尼拉草坪生态系统呼吸及其影响因子(硕士学位论文). 福州: 福建师范大学.

张法伟,李英年,曹广民,等. 2012. 青海湖北岸高寒草甸草原生态系统 CO₂ 通量特征及其驱动因子. 植物生态学报, **36**(3): 187-198.

张前兵,杨玲,王进,等. 2012. 干旱区不同灌溉方式及

- 施肥措施对棉田土壤呼吸及各组分贡献的影响. 中国农业科学, **45**(12): 2420–2430.
- 张智慧, 王维真, 马明国, 等. 2010. 黑河综合遥感联合试验涡动相关通量数据处理及产品分析. 遥感技术与应用, **25**(6): 788–796.
- 赵亮, 古松, 周华坤, 等. 2008. 青海省三江源区人工草地生态系统 CO₂ 通量. 植物生态学报, **32**(3): 544–554.
- 朱治林, 孙晓敏, 温学发, 等. 2006. 中国通量网 (China-FLUX) 夜间 CO₂ 涡度相关通量数据处理方法研究. 中国科学, D 辑: 地球科学, **36**(S1): 34–44.
- Chai X, Shi PL, Zong N, *et al.* 2017. Biophysical regulation of carbon flux in different rainfall regime in a northern Tibetan alpine meadow. *Journal of Resources and Ecology*, **8**: 30–41.
- Dugas WA, Heuer ML, Mayeux HS, *et al.* 1999. Carbon dioxide fluxes over bermudagrass, native prairie, and sorghum. *Agricultural and Forest Meteorology*, **93**: 121–139.
- Falge E, Baldocchi D, Olson R, *et al.* 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, **107**: 43–69.
- Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, *et al.* 2002. Seasonality ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, **113**: 53–74.
- Ham JM, Knap AK. 1998. Fluxes of CO₂, water vapor, and energy from a prairie ecosystem during the seasonal transition from carbon sink to carbon source. *Agricultural and Forest Meteorology*, **89**: 1–14.
- Hunt JE, Kelliher FM, Mcseveny TM, *et al.* 2002. Evaporation and carbon dioxide exchange between the atmosphere and a tussock grassland during a summer drought. *Agricultural and Forest Meteorology*, **111**: 65–82.
- Kato T, Tang YH, Gu S, *et al.* 2004. Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, **124**: 121–134.
- Li SG, Asanuma J, Eugster W, *et al.* 2005. Net ecosystem Carbon dioxide exchange over grazed steppe in central Mongolia. *Global Change Biology*, **11**: 1941–1955.
- Luo YQ, Zhou XH. 2006. Soil Respiration & the Environment: Soil Respiration and the Environment. San Diego: Academic Press.
- Ni J. 2001. Carbon storage in terrestrial ecosystem of China: Estimates at different spatial resolutions and their responses to climate change. *Climatic Change*, **49**: 339–358.
- Robertson GP, Coleman DC, Bledsoe CS, *et al.* 1999. Standard soil methods for long-term ecological research. *Earth Sciences & Geography*, **1999**: 272–278.
- Saetre P, Stark JM. 2005. Microbial dynamic sand carbon and nitrogen cycling following rewetting of soils beneath two semi-arid plant species. *Oecologia*, **142**: 247–260.
- Scurlock JMO, Hall DO. 1998. The global carbon sink: A grassland perspective. *Global Change Biology*, **4**: 229–233.
- Scurlock JMO, Johnson K, Olson RJ. 2002. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, **8**: 736–753.
- Suyker AE, Verma SB. 2001. Year-round observations of the net ecosystem exchange of carbon dioxide in a native tallgrass prairie. *Global Change Biology*, **7**: 279–289.
- Tans PP, Fung IY, Takahashi T, *et al.* 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, **247**: 1431–1438.

作者简介 牛亚毅, 女, 1992 年生, 硕士研究生, 主要从事草地生态系统碳通量特征的研究。E-mail: niuyayi@126.com
责任编辑 张敏
