

铁杆蒿灌丛对黄土高原草地碳交换特征的影响

沈晓坤, 李旭东*, 傅 华

(草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学 草地农业科技学院, 兰州 730020)

摘 要: 用静态箱法于 2012 年生长季(5~10 月)对黄土高原围封草地常见半灌木铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)灌丛内外土壤呼吸速率和净生态系统 CO₂ 交换速率及其主要环境因子进行实地观测, 并对草地土壤基本理化性质进行分析, 以揭示铁杆蒿灌丛内外碳交换变化规律及其影响因素。结果显示: (1) 铁杆蒿灌丛内的土壤呼吸和净生态系统 CO₂ 交换的日交换速率均显著高于灌丛外; 灌丛内外土壤呼吸速率和净生态系统 CO₂ 交换速率的峰值出现时间一致, 且灌丛内显著高于灌丛外; 土壤呼吸速率的峰值出现在 8 月份, 净生态系统 CO₂ 交换速率的峰值出现在 9 月份。(2) 灌丛内外土壤呼吸速率日动态均呈“单峰型”变化趋势, 生长季平均值都接近 5 月份观测值, 分别为 (5.49 ± 0.18) 和 $(2.93 \pm 0.04) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; 灌丛内外净生态系统 CO₂ 交换速率日动态均以“S”型变化趋势为主, 在水分亏缺时期表现为微弱的“双峰”型趋势。(3) 灌丛内生长季净生态系统 CO₂ 交换速率平均值为 $(-3.86 \pm 0.09) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 是灌丛外草地 $(-1.19 \pm 0.07) \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的 3.2 倍, 灌丛内外均表现为碳汇。研究表明, 铁杆蒿灌丛存在“肥岛”现象, 有助于该区草地生态系统有机碳的积累, 土壤水分和土壤温度是影响灌丛内外土壤呼吸速率的主要因素, 而灌丛内外净生态系统 CO₂ 交换速率主要受土壤水分的影响。

关键词: 黄土高原; 铁杆蒿; CO₂ 交换; 土壤温度; 土壤水分

中图分类号: Q948.1

文献标志码: A

Effects of *Artemisia gmelinii* Shrub Patch to CO₂ Exchange in the Grassland of Loess Plateau

SHEN Xiaokun, LI Xudong*, FU Hua

(State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

Abstract: Grassland ecosystem is one of the most important terrestrial ecosystems and plays a critical role in global carbon cycle. However, compared with other ecosystems, studies of carbon stock in grassland ecosystem, especially in the Loess Plateau were relatively less. Shrubs are the dominant plant life form in Loess Plateau, Northern China. Based on the continuous measurement of soil respiration and net ecosystems CO₂ exchange rate within and outside of the *Artemisia gmelinii* shrub patch in the grassland of Loess Plateau by using closed chamber method in the growing season of 2012, the temporal variations of soil respiration and net ecosystems CO₂ exchange were studied with the effects of temperature and soil water content. The results are as follows: (1) The diurnal variation of soil respiration rate both within and outside of the shrub patch showed an asymmetric single-peak pattern, while that of net ecosystems CO₂ exchange rate both showed sigmoid curve under normal circumstances and “twin peaks” type with the water deficit. The peak

收稿日期: 2014-01-11; 修改稿收到日期: 2014-03-03

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050403); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2013-79); 国家自然科学基金项目(31070412, 31201837); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120211110029)

作者简介: 沈晓坤(1984—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事草地生态学方面的研究。E-mail: shenxk11@lzu.edu.cn

* 通信作者: 李旭东, 博士, 讲师, 主要从事草地生态学方面的研究。E-mail: lixudong@lzu.edu.cn

values of soil respiration rate appear in August while net ecosystems CO_2 exchange rate in September. (2) The daily averages of soil respiration and net ecosystems CO_2 exchange rate within the shrub patch are significantly higher than that outside. The averages of soil respiration rate within and outside of shrub patch in the growing season are 5.49 and $2.93 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively, and are close to the observed value in May. (3) The averages of net ecosystems CO_2 exchange rate within and outside of shrub patch in the growing season are -3.86 and $-1.19 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, close to that observed in May and July, respectively. “fertile island” is observed under the shrub, which can contribute to the carbon accumulation in this region. Soil moisture and soil temperature are the key factors controlling the variation of soil respiration rate, both within and outside of shrub patch, while net ecosystems CO_2 exchange rate was mainly controlled by soil moisture.

Key words: Loess Plateau; *Artemisia gmelinii* shrub patch; CO_2 exchange; soil temperature; soil moisture

陆地生态系统-大气间 CO_2 通量主要包括植被光合固定碳(即生态系统总初级生产力, Gross primary productivity, GPP)与生态系统呼吸释放碳(Total ecosystem respiration, TER, 包括自养呼吸和异养呼吸)两个过程^[1]。通过对陆地生态系统碳通量各个环节及其与环境因子之间的关系进行研究, 可以确定系统的碳源汇性质, 并预测在全球变化背景下生态系统各个碳库的响应。对全球碳平衡中各主要碳汇和碳源的估计结果表明: 已知的碳汇不能平衡已知的碳源, 有碳失汇的存在^[2-3]。碳失汇问题提出后, 寻找陆地碳汇成为研究的焦点^[4], 与此密切相关的陆地生态系统碳通量的变化则备受广泛关注^[5-7]。草地是世界最广布的植被类型之一, 参与了包括陆地生态系统在内的全球碳循环过程, 是陆地生态系统的重要组成部分^[8], 在全球生态系统碳循环以及对全球气候变化的响应中具有十分重要的意义。但是与森林和农田等^[9-13]其它陆地生态系统相比, 有关草地生态系统特别是黄土高原草地生态系统碳循环的研究则鲜有报道^[14-15]。

灌丛是黄土高原广泛分布的植被类型^[16]。其中蒿属植物是黄土高原草地比较常见的灌木, 铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*) 群落是黄土高原一种较为稳定的地带性植被^[17], 研究灌丛的碳交换特征及其对黄土高原地区草地碳收支的影响, 对深入研究黄土高原地区生态系统碳循环具有重要意义。然而在该区以往的草地生态系统相关方面的研究中灌丛却常被忽视^[18], 这在一定程度上会影响该区碳收支的定量估算从而限制碳增汇减源措施在该区的制定和实施。本研究通过对黄土高原围封草地铁杆蒿灌丛内外生态系统 CO_2 交换速率进行实地观测研究, 试图揭示铁杆蒿灌丛内外碳交换变化规律及其影响因素, 以期为进一步研究黄土高原草地生态系统碳循环机制和量化灌木对黄土高原草地系统碳收支的影

响提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

兰州大学半干旱气候与环境观测站(SACOL)位于黄土高原的半干旱地区($35^{\circ}57' \text{ N}$, $104^{\circ}08' \text{ E}$), 海拔 $1\,961 \text{ m}$, 气候类型属于温带半干旱大陆性季风气候; 年平均气温为 6.7°C , 平均年降雨量 381.8 mm , 年平均蒸发量 $1\,528.5 \text{ mm}$, 相对湿度 63% ; 全年盛行东南风和西北风, 年平均风速约 1 m/s ; 土壤类型为第四纪风蚀黄土、灰钙土, 下垫面属于典型的黄土高原地貌, 植被为典型草原; 该区域塬面原为传统的耕作农田, 20 世纪 80 年代中期弃耕, 于 2005 年 10 月设置围栏^[19-20], 研究样地面积为 8 hm^2 , 样地各主要物种及其重要值见表 1。

1.2 研究方法

1.2.1 净生态系统 CO_2 交换速率和土壤呼吸速率的测定 以气候站周围的围封草地作为研究样地, 在围封样地中设置 5 个 $40 \text{ m} \times 40 \text{ m}$ 的重复样地。每个重复样地中随机选取 2 个生长状况良好且冠幅面积相近(约 0.25 m^2)的铁杆蒿灌丛和 2 个灌丛边缘 1.5 m 以外(避免灌丛对土壤的影响可能超出灌

表 1 试验地群落的物种组成及其重要值

Table 1 Species composition and the importance values

物种 Species	相对高度 Relative height	相对盖度 Relative coverage	重要值 Importance value
铁杆蒿 <i>Artemisia gmelinii</i>	0.34	0.09	0.21
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	0.15	0.64	0.39
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i>	0.12	0.13	0.13
二裂萎陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	0.04	0.01	0.03
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	0.24	0.03	0.13
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i>	0.11	0.10	0.11

注: 重要值 = (相对高度 + 相对盖度) / 2^[21]。

Note: Importance value = (relative height + relative coverage) / 2.

木覆盖区)的草本样方^[22-23];每次测定时提前 1 d 安装下 0.5 m×0.5 m 的基座,底座高 8 cm,插入地下 5 cm。其中 1 个铁杆蒿灌丛和 1 个草本样方基座内植物地上部分齐地面剪去,同时手工清除基座内的枯落物用于土壤呼吸速率的测定。测定时,先将装有小风扇的 50 cm×50 cm×50 cm 同化箱放在底座上,将四个角的密封扣扣好后打开同化箱风扇,利用 LICOR-840(LICOR, Inc., Lincoln NE, USA) 进行测定。所有测定于 2012 年 5~10 月进行,每月中旬测定 1 次日动态,每次测定均选择晴朗天气。日动态测定频度为 6:00~次日 3:00 每隔 3 h 测 1 次。 CO_2 交换速率 F_c 的计算采用以下公式:

$$F_c = \frac{VP_{av}(1000 - W_{av})}{RS(T_{av} + 273.15)} \times \frac{dc}{dt}$$

式中, V 为箱体的体积[同化箱长×宽×(箱体高度+底座露出地上部的高度)]; P_{av} 为测量期间箱体內的平均大气压强(kPa); W_{av} 是测量期间箱体內的水汽分压($\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$); R 是大气常数($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); S 是同化箱的面积; T_{av} 是测量期间箱体內的平均温度; dc/dt 为 90 s 测定时间内 CO_2 浓度($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)变化速率。

利用日动态各个时间点测定得出的 CO_2 交换速率代表其所在时间段的 CO_2 交换速率,以此估算当天的 CO_2 交换速率,进而估算各月的 CO_2 交换速率^[18]。

1.2.2 土壤温度与水分的测定 在每次测定 CO_2 交换速率的同时,用 6310 针式温度计测定基座外沿 5 cm 深度的土壤温度。由于土壤水分在全天中无明显波动^[24],在全天测定结束后,用土壤水分探测仪(Trime TDR probe, IMKO, Ettlingen, Germany)原位测定基座内 10 cm 深度的土壤体积含水量。

1.2.3 生物量测定 于 8 月 17 日进行生物量测定和样方调查。将碳通量日变化测定结束后的基座内植物齐地面剪下,收集地面凋落物,分别标记装入信封袋。用根钻($d=9.3 \text{ cm}$)收集 0~50 cm 土层根样,每个样方内取 2 钻,同一样方同一土层混合,干筛(0.5 mm)获得根样,带回室内用清水洗净。各植物样品均于 65 °C 下烘干 48 h 后称重。

1.2.4 土壤样品采集 于 2012 年 8 月中旬用土钻法采集土壤样品。灌丛内土样于灌丛中心处采集;灌丛外土样取自距离冠缘约 1.5 m 的空地,同时确保该采样点距离其他灌丛冠缘 $>1.5 \text{ m}$ ^[23];选择冠幅面积接近 CO_2 交换速率测定的灌丛,按 0-10-20-30-40-50 cm 的土层顺序取土,灌丛内外各土层取 5

个重复。

1.2.5 样品处理与分析 样品带回室内自然风干后过 2 mm 筛,先用毛巾摩擦塑料直尺静电吸取植物细根,土样用于土壤 pH 测定(无 CO_2 的蒸馏水作浸提剂,水土比为 2.5 : 1,电位法测定^[20]);部分土样过 0.5 mm 筛,用于土壤有机碳和土壤全氮的测定;土壤有机碳含量采用重铬酸钾-硫酸外加热氧化法;植物各组分样品碳含量采用元素分析仪(Flash-EA-1112, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA)测定;土壤全氮采用开氏方法消化[浓硫酸加硫酸钾:硫酸铜(10 : 1)催化剂消化后,用 FIAstar 5000 流动注射分析仪(FOSS, Sweden)]分析。

1.2.6 数据处理 用 SPSS 17.0 for Windows 统计分析软件进行灌丛内外相关指标的差异性分析和 CO_2 交换速率与土壤温度及土壤水分的相关分析,动态曲线采用 Microsoft Excel 2003 绘制。

2 结果与分析

2.1 铁杆蒿灌丛内外生物量比较

灌丛内各组分生物量均显著高于灌丛外(图 1)。根据各组分碳含量可得:灌丛内地上活体、地下根系及凋落物的碳贮量分别为(142.2 ± 10.2) g/m^2 、(469.9 ± 30.8) g/m^2 和 (22.5 ± 3.1) g/m^2 ;灌丛外分别为(73.7 ± 1.3) g/m^2 、(78.0 ± 3.2) g/m^2 和 (12.1 ± 1.6) g/m^2 ,各组分碳贮量均表现为灌丛内显著高于灌丛外,灌丛内外根冠比分别为 4.0 和 1.3。

2.2 铁杆蒿灌丛对土壤性质的影响

灌丛内外 0~50 cm 各土层土壤有机碳和土壤全氮含量均随着土层深度增加而降低(表 2),且灌

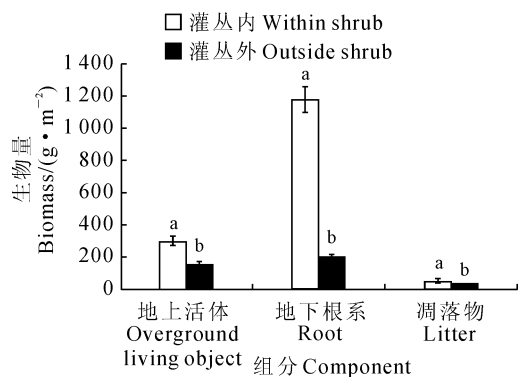


图 1 灌丛内外各组分生物量

图中同一组分标不同小写字母表示灌丛内外差异显著($P < 0.01$)
Fig. 1 Biomass components within and outside of shrub patch
The different lowercase letters indicate significant difference between within and outside shrub($P < 0.01$)

表 2 研究样地不同土层土壤性质

Table 2 Soil properties in different soil layers in the study sites

土层 Soil layer	处理 Treatment	土壤有机碳 Soil organic carbon /(g · kg ⁻¹)	土壤全氮 Total soil nitrogen /(g · kg ⁻¹)	土壤 pH 值 Soil pH
0~10 cm	灌丛内 Within	16.40±0.36**	1.57±0.03**	8.39±0.02**
	灌丛外 Outside	8.96±0.08	0.75±0.02	8.45±0.01
10~20 cm	灌丛内 Within	9.02±0.14**	0.90±0.05**	8.52±0.02
	灌丛外 Outside	7.42±0.09	0.69±0.02	8.49±0.01
20~30 cm	灌丛内 Within	7.88±0.32*	0.77±0.05*	8.35±0.03*
	灌丛外 Outside	6.42±0.09	0.66±0.04	8.42±0.01
30~40 cm	灌丛内 Within	7.56±0.11*	0.71±0.07**	8.35±0.01*
	灌丛外 Outside	5.39±0.06	0.48±0.06	8.38±0.02
40~50 cm	灌丛内 Within	6.04±0.12*	0.61±0.03**	8.29±0.01**
	灌丛外 Outside	4.14±0.04	0.47±0.06	8.44±0.04

注：* 和 ** 分别表示同一土层灌丛内外在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。
Note: * and ** show significant difference between different treatments in the same soil layer at 0.05 and 0.01 level, respectively.

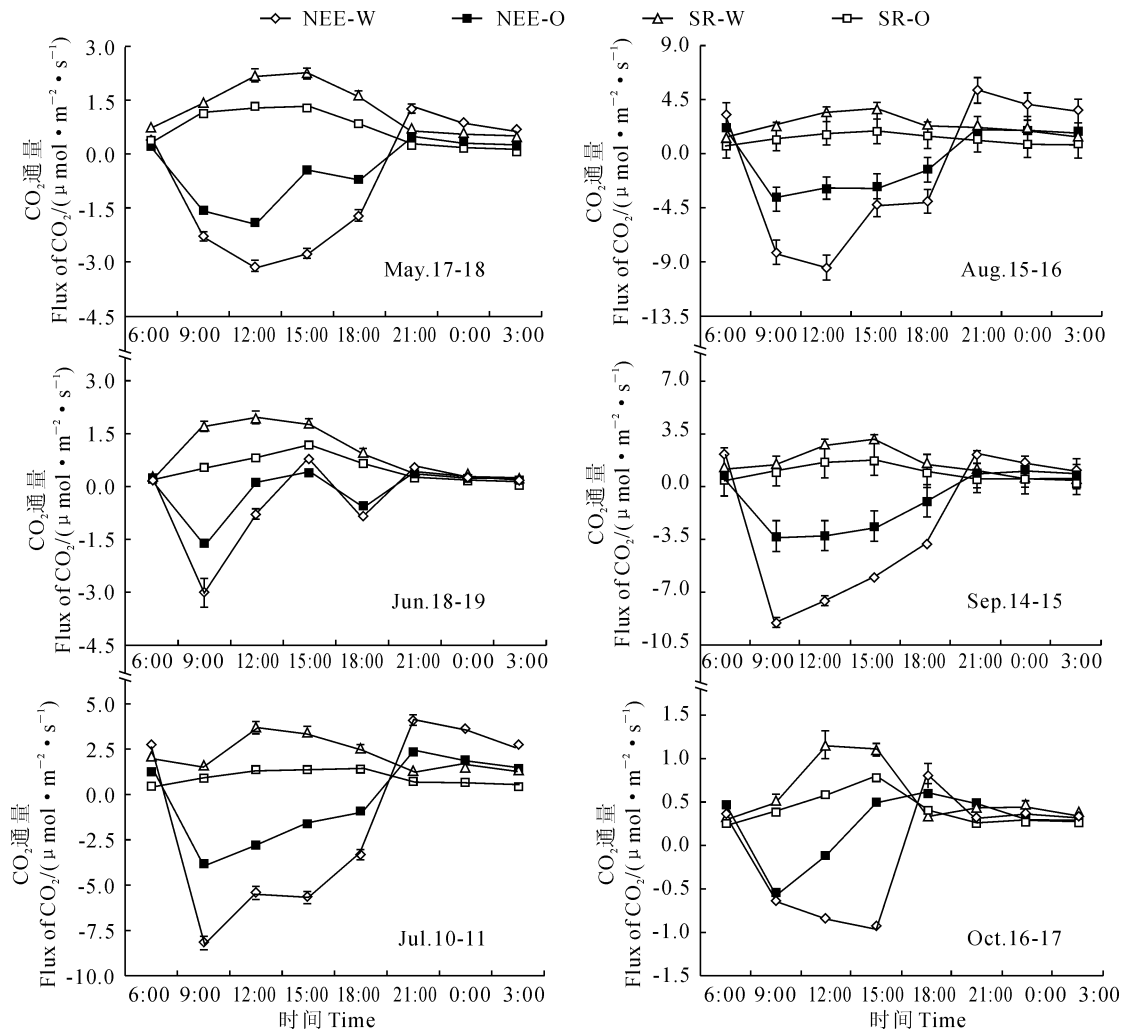


图 2 不同季节灌丛内(W)和灌丛外(O)净生态系统 CO₂ 交换(NEE)和土壤呼吸(SR)速率的日变化

Fig. 2 Diurnal variations in net ecosystem CO₂ exchange (NEE) and soil respiration (SR) rate within(W) and outside(O) of shrub patch in growing season

丛内显著高于灌丛外,其中 0~10 cm 土层灌丛内土壤有机碳和全氮含量分别是灌丛外的 1.8 和 2.1 倍;灌丛内外土壤 pH 变化范围为 8.29~8.52,且最高值均在 10~20 cm 土层;除 10~20 cm 土层无显著差异外,其它各土层灌丛内土壤 pH 均显著低于灌丛外。

2.3 生长季灌丛内外 CO₂ 交换速率日动态特征

灌丛内外生长季不同季节土壤呼吸速率日变化趋势均呈现“单峰型”曲线(图 2),表现为白天高、夜间低,最高值均出现在 12:00~15:00,且多数时间段灌丛内显著高于灌丛外($P<0.01$)。灌丛内外净生态系统 CO₂ 交换速率日变化除了 6 月份(土壤水分亏缺)呈微弱的“双峰型”曲线外,其它月份日变化趋势基本均呈现“S”型曲线,即昼间的净生态系统 CO₂ 交换速率为负值(碳汇),在 9:00~12:00 前后达到 CO₂ 净吸收峰值,且灌丛内净吸收量显著高于灌丛外($P<0.01$),进入夜间前净生态系统 CO₂ 交换由碳吸收转变为碳排放,呈现正值(碳源),在 18:00~21:00 达到 CO₂ 排放峰值,且灌丛内显著高

于灌丛外($P<0.01$)。

2.4 灌丛内外 CO₂ 交换速率季节动态特征及其影响因素

2.4.1 灌丛内外 CO₂ 交换速率的季节变化特征

根据全天各个时间段 CO₂ 交换量求平均值估算日通量,最后以日交换量估算每月 CO₂ 交换量。结果如图 3 所示:灌丛内外土壤呼吸速率最高值均出现在 8 月份,分别为(8.75 ± 0.27)和(4.42 ± 0.15) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;生长季平均值均接近 5 月份观测值,分别为(5.49 ± 0.18)和(2.93 ± 0.04) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;最高值和平均值均表现为灌丛内显著高于灌丛外($P<0.01$)。灌丛内外生长季净生态系统 CO₂ 交换速率峰值均出现在 9 月份,分别为(-9.22 ± 0.33)和(-3.28 ± 0.26) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;平均值分别为(-3.86 ± 0.09)和(-1.19 ± 0.07) $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,灌丛内平均值接近 5 月份观测值,灌丛外则接近 7 月份观测值;最高值和平均值均表现为灌丛内显著高于灌丛外($P<0.01$);从 5~9 月,灌丛内外均表现为碳汇,而 10 月(生长季末期)灌丛外表现为微弱

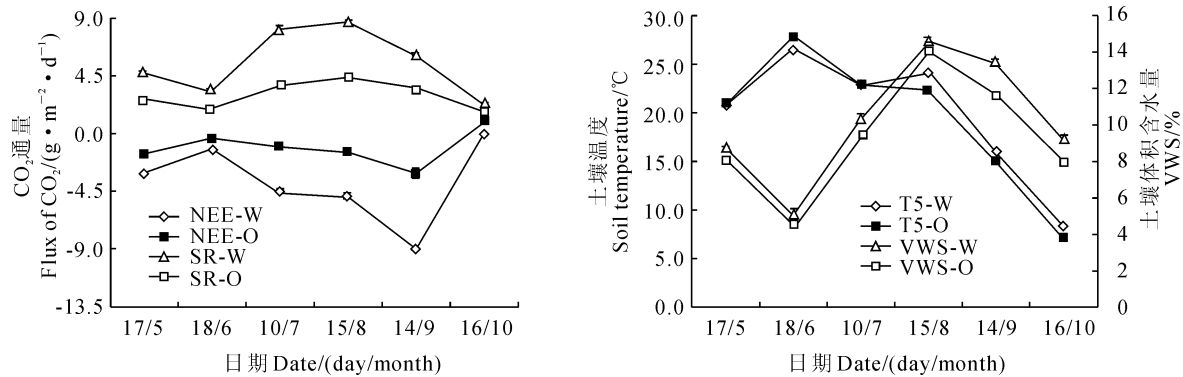


图 3 灌丛内(W)和灌丛外(O)净生态系统 CO₂ 交换(NEE)速率、土壤呼吸(SR)速率、5 cm 土壤温度(T5)以及 0~10 cm 土壤水分(VWS, 土壤体积含水量)的季节变化

Fig. 3 Seasonal variations in net ecosystem CO₂ exchange (NEE) rate, soil respiration (SR) rate, soil temperature at 5 cm (T5) and soil moisture (VWS) at 0~10 cm within (W) and outside (O) of shrub patch

表 3 CO₂ 交换速率与土壤温度和土壤水分的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between CO₂ exchange rate and soil temperature and soil moisture (n=30)

环境因子 Environmental factor	灌丛内 Within shrub		灌丛外 Outside shrub	
	净生态系统 CO ₂ 交换速率 Net ecosystem CO ₂ exchange rate	土壤呼吸速率 Soil respiration rate	净生态系统 CO ₂ 交换速率 Net ecosystem CO ₂ exchange rate	土壤呼吸速率 Soil respiration rate
5 cm 土壤温度 Soil temperature at 5 cm	vs 0.050	0.504 **	-0.181	0.503 **
10 cm 土壤水分 Soil moisture at 10 cm	vs -0.667 **	0.581 **	-0.587 **	0.799 **

注: ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。
Note: ** shows that correlation is significant at 0.01 level(2-tailed).

的碳源,灌丛内则表现为微弱的碳汇。

2.4.2 灌丛内外 CO₂ 交换速率与环境因素的关系

土壤温度的季节变化呈现单峰型趋势(图 3),除 6 月份与土壤呼吸速率变化不一致外,其它月份均表现出相似的变化趋势。6 月份土壤水分含量较低,使得灌丛内外土壤呼吸速率和净生态系统 CO₂ 交换速率的日交换量均出现下降趋势;将每次测定的各重复日平均 CO₂ 交换速率与其对应的 5 cm 土壤日平均温度和 10 cm 土壤水分含量作相关分析,结果显示土壤温度和土壤水分均与灌丛内外土壤呼吸速率呈显著正相关($P < 0.01$,表 3);土壤温度与灌丛内外净生态系统 CO₂ 交换速率的相关性不显著($P > 0.05$),而土壤水分则与灌丛内外净生态系统 CO₂ 交换速率呈显著线性相关($P < 0.01$)。

3 结论与讨论

3.1 植被和土壤养分对生态系统 CO₂ 交换速率的影响

植被是影响生态系统碳收支的重要因子,其生物量和凋落物积累反映了生态系统的初级生产力水平和生态系统对大气中 CO₂ 的固定^[25-27]。本研究结果显示,铁杆蒿群落的重要值仅次于该区优势草本植物长芒草群落,而其灌丛内生物量和凋落物积累量分别是灌丛外的 4.2 倍和 1.9 倍,灌丛内植被和凋落物碳贮量也显著高于灌丛外($P < 0.01$),说明铁杆蒿灌丛在该区草地生态系统碳循环过程中具有不可忽视的作用。

本研究中,铁杆蒿灌丛下土壤有机碳和全氮含量均高于其灌丛间草地。凋落物是土壤有机质最主要的来源,灌丛能够降低风速、截获凋落物和风蚀物,使更多的有机物质和养分积累在灌丛下,形成“灌丛肥岛”效应,从而使灌丛周围土壤肥力和植被得以改善^[28-30]。土壤有机质是土壤呼吸的重要基质^[31],有研究表明,土壤有机质含量与土壤呼吸速率呈正相关;也有研究者用土壤有机质含量来预测土壤呼吸速率^[32-33]。本研究中生长季灌丛内土壤呼吸速率显著高于灌丛外($P < 0.05$),灌丛内较高的土壤有机质含量可能是其中最主要原因。植物的光合作用与土壤有机质矿化作用是影响碳素循环的两个主要因素^[34],灌丛内土壤呼吸速率增强引起土壤有机质消耗的同时,可加速有机质矿化释放无机养分被根系吸收^[35],并输送到地上部分供应植物光合作用^[36],本研究结果表明,铁杆蒿灌丛白天净生态系统 CO₂ 交换量显著高于灌丛外($P < 0.01$),虽然

灌丛内夜间净生态系统 CO₂ 交换过程中碳排放量也显著高于灌丛外,但其全天 CO₂ 净吸收量仍然要显著高于灌丛外,“灌丛肥岛”效应和灌丛内较高的地上及地下生物量等因素间的相互促进是其中的重要原因。

由此可见,研究区的植被、土壤养分和生态系统碳交换速率三者之间可相互促进,即铁杆蒿灌丛内的“肥岛效应”在一定程度上能促进土壤呼吸,土壤有机质因土壤呼吸速率的增强又会加快矿化促进根系吸收充足的矿质养分供地上部分光合作用并促进植株生长,使得灌丛内生长季净生态系统 CO₂ 交换速率保持较高水平,而植株的生长又会反过来增加凋落物和有机质向土壤的输入,从而形成一个有利于碳积累的循环机制,使铁杆蒿灌丛在生长季中具有比灌丛外草地更强的固碳能力。

3.2 环境因子对生态系统 CO₂ 交换的影响

温度是影响土壤呼吸速率,生态系统光合作用和呼吸作用的重要因子之一^[26,37]。有研究表明,土壤温度能够影响土壤有机质分解速率以及土壤微生物和根系的活性^[38-40],因此土壤温度可通过影响根系活动进而影响生态系统地上部分的代谢过程。本研究中土壤温度与灌丛内外土壤呼吸速率具有显著的相关性,土壤呼吸速率与土壤温度日变化呈现相近的“单峰型”趋势,两者表现出显著相关性,这与研究区其它的研究结果相近^[41]。然而,温度对净生态系统 CO₂ 交换速率并没有产生显著的影响,如本研究中生长季土壤温度最高值出现在 6 月份,而灌丛内外净生态系统 CO₂ 交换速率最大值则出现在 9 月份,且当中午气温过高时植被还会出现“光合午休”现象^[42],这可能是由于净生态系统 CO₂ 交换速率是植物光合、植物呼吸以及土壤呼吸等诸多碳交换过程的综合结果,而温度仅是影响各个过程的众多因素之一,导致净生态系统 CO₂ 交换速率对温度不具有特定的响应。

水分是黄土高原半干旱地区植物生长的主要限制因子,且植被类型不同,需水量和土壤水分利用能力高低存在差异^[43]。本研究中铁杆蒿灌丛内各月的土壤含水量与灌丛外土壤存在一定程度的差异,且有的月份灌丛内显著高于灌丛外($P < 0.05$)。一方面,灌丛下土壤较高的有机质含量有利于保水^[38],另外,灌丛内地上部分较大生物量和盖度降低了土壤水分的蒸发损失。水分也是影响生态系统碳收支的重要因素之一^[26],本研究中,6 月份由于土壤水分处于生长季最低值,限制了土壤微生物的活

性以及植物的生长,可能是导致灌丛内外土壤呼吸速率和净生态系统 CO_2 交换速率均出现下降趋势的主要原因。该结果也表明土壤水分是生长季灌丛内外土壤呼吸速率和净生态系统 CO_2 交换速率的主要限制因子。

由于在非生长季植被进入休眠期,净生态系统

CO_2 交换通量接近于土壤呼吸通量,此时的低温^[41]不但可降低生态系统 CO_2 排放量,而且能够缩小灌丛内外 CO_2 交换量的差异,使得灌丛内在生长季比灌丛外多积累的碳不会在非生长季被过多消耗,进而利于生态系统有机碳的积累。

参考文献:

- [1] ZHANG W L(张文丽), CHEN SH P(陈世莘), MIAO H X(苗海霞), *et al.* Effects on carbon flux of conversion of grassland steppe to cropland in China[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2008, **32**(6): 1 301—1 311(in Chinese).
- [2] WANG X K(王效科), BAI Y Y(白艳莹), OUYANG ZH Y(欧阳志云), *et al.* Missing sink in global carbon cycle and its causes[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(1): 94—103(in Chinese).
- [3] OJIMA D S, DIRK B O M, GLEOVN E P, *et al.* Assessment of C budget for grasslands and drylands of the world[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1993, **70**: 95—109.
- [4] FANG J Y(方精云), PIAO SH L(朴世龙), ZHAO SH Q(赵淑清). The carbon sink; the role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the northern hemisphere[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2001, **25**(5): 594—602(in Chinese).
- [5] HAYES D J, TUMER D P, STINSON G, *et al.* Reconciling estimates of the contemporary North American carbon balance among terrestrial biosphere models, atmospheric inversions, and a new approach for estimating net ecosystem exchange from inventory-based data[J]. *Global Change Biology*, 2012, **18**(4): 1 282—1 299.
- [6] ZHU L L(朱玲玲), RONG Y P(戎郁萍), WANG W G(王伟光), *et al.* Effects of grazing on the net ecosystem exchange of carbon dioxide in grassland ecosystems(Research Review)[J]. *Acta Agrestia Sinica* (草地学报), 2013, **21**(1): 3—10(in Chinese).
- [7] ZHUANG M H(庄明浩), LI Y CH(李迎春), GUO Z W(郭子武), *et al.* Effects of elevated CO_2 and/or elevated O_3 on membrane lipid antioxidant systems in *Phyllostachys edulis* leaves[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2013, **33**(2): 322—328(in Chinese).
- [8] FAN J W(樊江文), ZHONG H P(钟华平), LIANG B(梁 颺), *et al.* Carbon stock in grassland ecosystem and its affecting factors[J]. *Grassland of China* (中国草地), 2003, **25**(6): 51—58(in Chinese).
- [9] YANG X, RICHARDSON T K, JAIN A K. Contributions of secondary forest and nitrogen dynamics to terrestrial carbon uptake[J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**: 3 041—3 050.
- [10] WOOD T E, CAVALERI M A, REED S C. Tropical forest carbon balance in a warmer world; a critical review spanning microbial-to ecosystem-scale processes[J]. *Biological Reviews*, 2012, **87**(4): 912—927.
- [11] CIAIS P, GERVOIS S, VUICHARD N, *et al.* Effects of land use change and management on the European cropland carbon balance[J]. *Global Change Biology*, 2011, **17**(1): 320—338.
- [12] LOKUPITIYA E, PAUSTIAN K, EASTER M, *et al.* Carbon balances in US croplands during the last two decades of the twentieth century[J]. *Biogeochemistry*, 2012, **107**(1—3): 207—225.
- [13] SIEMENS J, PACHOLSKI A, HEIDUK K, *et al.* Elevated air carbon dioxide concentrations increase dissolved carbon leaching from a cropland soil[J]. *Biogeochemistry*, 2012, **108**(1—3): 135—148.
- [14] LIU W(刘 伟), CHENG J M(程积民), GAO Y(高 阳), *et al.* Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2012, **49**(1): 68—76(in Chinese).
- [15] LEWIS S L, LOPEZ-GONZALEZ G, SONKE B, *et al.* Increasing carbon storage in intact African tropical forests[J]. *Nature*, 2009, **457**: 1 003—1 006.
- [16] MAO W(毛 伟), LI Y L(李玉霖), ZHAO X Y(赵学勇), *et al.* Effect of *Caragana microphylla* on leaf traits of *Setaria viridis* in Horqin sandy land[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2009, **18**(6): 144—150(in Chinese).
- [17] WANG G L(王国梁), LIU G B(刘国彬). Study on the interspecific association of the *Artemisia sacrorum* community in loess hilly region [J]. *Grassland of China* (中国草地), 2002, **24**(3): 1—6(in Chinese).
- [18] 李旭东. 黄土高原草地与农田系统土壤呼吸及碳平衡[D]. 兰州: 兰州大学, 2011.
- [19] LI X D(李旭东), ZHANG CH P(张春平), FU H(傅 华). Seasonal dynamics of root-shoot ratio and the effect of factors in grazed and ungrazed grasslands of the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2012, **21**(4): 307—312(in Chinese).
- [20] DONG X Y(董晓玉), FU H(傅 华), LI X D(李旭东), *et al.* Effects on plant biomass and CNP contents of plants in grazed and fenced steppe grasslands of the Loess Plateau[J]. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2010, **19**(2): 175—182(in Chinese).

- [21] LIU X ZH(刘秀珍), ZHANG F(张 峰), ZHANG J T(张金屯). Study on species diversity during the succession of plant communities on abandoned farmlands in Guancen Mountains, Shanxi[J]. *Journal of Wuhan Botanical Research* (武汉植物学研究), 2008, **26**(4): 391—396(in Chinese).
- [22] DUNKERLEY D. Hydrologic effects of dryland shrubs: defining the spatial extent of modified soil water uptake rates at an Australian desert site[J]. *Journal of Arid Environments*, 2000, **45**(2): 159—172.
- [23] LI J(李 君), ZHAO CH Y(赵成义), ZHU H(朱 宏), *et al.* Species effect of *Tamarix* spp. and *Haloxylon ammodendron* on shrub “fertile island”[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(12): 5 138—5 147.
- [24] JIN B R, ZHOU G S, WANG F Y, *et al.* Effects of grazing on soil respiration of *Leymus chinensis* steppe[J]. *Climatic Change*, 2007, **82**: 211—223.
- [25] PIAO SH L(朴世龙), FANG J Y(方精云), HE J SH(贺金生), *et al.* Spatial distribution of grassland biomass in China[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2004, **28**(4): 491—498(in Chinese).
- [26] WU L B(吴力博), GU S(古 松), ZHAO L(赵 亮), *et al.* Variation in net CO₂ exchange gross primary production and its affecting factors in the planted pasture ecosystem in Sanjiangyuan Region of the Qinghai-Tibetan Plateau of China[J]. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2010, **34**(7): 770—780(in Chinese).
- [27] PENG SH L(彭少麟), LIU Q(刘 强). The dynamics of forest litter and its responses to global warming[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(9): 1 534—1 544(in Chinese).
- [28] YIN C H, FENG G, ZHANG F G, *et al.* Enrichment of soil fertility and salinity by tamarisk in saline soils on the northern edge of the Taklamakan Desert[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, **97**(12): 1 978—1 986.
- [29] MEENTEMEYER V, BOX E O, THOMPSON R. World patterns and amounts of terrestrial plant litter production[J]. *Bioscience*, 1982, **32**(2): 125—128.
- [30] 裴世芳. 放牧和围封对阿拉善荒漠草地土壤和植被的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [31] GUPTA S R, SINGH J S. Soil respiration in a tropical grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, **13**(4): 261—268.
- [32] ZHANG D Q(张东秋), SHI P L(石培礼), ZHANG X ZH(张宪洲). Some advance in the main factors controlling soil respiration[J]. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2005, **20**(7): 778—785(in Chinese).
- [33] SIKORA L J, MCCOY J L. Attempts to determine available carbon in soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, **9**(1): 1 9—24.
- [34] SHAN ZH J(单正军), CAI D J(蔡道基), REN ZH H(任阵海). A preliminary assessment of CO₂, CH₄ and N₂O emission from soil in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 1996, **16**(2): 150—154(in Chinese).
- [35] WANG Q CH(王庆成), CHENG Y H(程云环). Response of fine roots to soil nutrient spatial heterogeneity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(6): 1 063—1 068(in Chinese).
- [36] WU CH(吴 楚), FAN ZH Q(范志强), WANG ZH Q(王政权). Effect of phosphorus stress on chlorophyll biosynthesis, photosynthesis and biomass partitioning pattern of *Fraxinus mandchurica* seedling[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(6): 935—940(in Chinese).
- [37] KOU T J(寇太记), ZHU J G(朱建国), XIE Z B(谢祖彬), *et al.* The effects of temperature and soil moisture on soil respiration in the cropland under elevated pCO₂[J]. *Ecology and Environment* (生态环境), 2008, **17**(3): 950—956(in Chinese).
- [38] YANG J CH(杨景成), HAN X G(韩兴国), HUANG J H(黄建辉), *et al.* The dynamics of soil organic matter in cropland responding to agricultural practices[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(4): 787—796(in Chinese).
- [39] XIAO H L(肖辉林), ZHENG X J(郑习健). Effects of soil warming on soil microbial activity[J]. *Soil and Environmental Sciences* (土壤与环境), 2001, **10**(2): 138—142(in Chinese).
- [40] WANG L R(王连荣), XUE Y ZH(薛拥志), CHEN H J(陈海江), *et al.* Effect of soil temperature on enzyme activities of root system of *Zaolupan* flat peach during dormancy in greenhouse[J]. *Journal of Hebei North University* (河北北方学院学报), 2006, **22**(1): 45—48(in Chinese).
- [41] LI X D, FU H, GUO D, *et al.* Partitioning soil respiration and assessing the carbon balance in a *Setaria italica* (L.) Beauv. cropland on the Loess Plateau, Northern China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(2): 337—346.
- [42] ZHENG G SH(郑国生), WANG T(王 焘). Nonstomatic limitations in midday depression of photosynthesis in winter wheat leaves[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2001, **12**(5): 799—800(in Chinese).
- [43] XU B CH(徐炳成), SHAN L(山 仑), CHEN Y M(陈云明). Review and discuss on the effect and influence factors of vegetation construction on soil water in semi-arid on Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Constervation* (中国水土保持科学), 2003, **1**(4): 32—35(in Chinese).