

DOI: 10.5846/stxb201306101636

高艳红^{1,*}, 李新荣¹, 刘立超¹, 贾荣亮¹, 杨昊天¹, 赵洋¹, 陈永乐¹, 李培广², 李刚¹. 腾格里荒漠红砂-珍珠群落 CO₂ 收支变化及其不同观测方法间的比较. 生态学报 2015 35(7): 2085–2093.

Gao Y H, Li X R, Liu L C, Jia R L, Yang H T, Zhao Y, Chen Y L, Li P G, Li G. Variation of the carbon budget and comparison between static chamber method and eddy covariance method in the *Reaumuria soongorica*–*Salsola passerina* community in the Tennger Desert. Acta Ecologica Sinica 2015 35(7): 2085–2093.

腾格里荒漠红砂-珍珠群落 CO₂ 收支变化及其不同观测方法间的比较

高艳红^{1,*}, 李新荣¹, 刘立超¹, 贾荣亮¹, 杨昊天¹, 赵洋¹, 陈永乐¹, 李培广², 李刚¹

¹ 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 沙坡头沙漠研究试验站, 兰州 730000

² 中国科学院西双版纳热带植物园 中国科学院热带森林生态学重点实验室, 云南 650223

摘要: 由于荒漠生态系统植被覆盖度低、生产力低下, 其在全球碳循环中的作用被长期忽视。为探讨荒漠生态系统碳收支各组分的变化规律, 以腾格里荒漠红砂(*Reaumuria soongorica* Maxim.)–珍珠(*Salsola passerina* Beg.) 群落为研究对象, 采用静态箱式法研究了该群落的净生态系统 CO₂ 交换量(NEE)、生态系统呼吸、土壤呼吸的日变化规律, 同时将该方法所获得的 NEE 结果与涡动相关法观测的结果进行了比较。结果表明: (1) 红砂-珍珠群落 NEE 的日变化表现为, 在 6:00–9:00 左右出现一个 CO₂ 吸收的高峰值, 随后在 12:00–15:00 左右出现一个 CO₂ 释放高峰值。红砂种群、珍珠种群和整个群落 NEE 的平均值分别为 0.018、0.020 和 0.028 mgCO₂ m⁻² s⁻¹; (2) 红砂种群、珍珠种群、土壤及整个群落生态系统呼吸速率的日变化规律一致, 均表现为明显的单峰变化趋势, 在 12:00–15:00 左右出现一个 CO₂ 释放的高峰值。红砂种群、珍珠种群、土壤和整个群落的生态系统呼吸的平均值分别为: 0.121、0.062、0.029 和 0.040 mg CO₂ m⁻² s⁻¹。以盖度为加权因子计算得到红砂种群、珍珠种群和土壤呼吸占生态系统呼吸的比例分别为: 9%、21% 和 70%, 由此可见, 生态系统呼吸主要来源于土壤呼吸。(3) 将箱式法和涡动相关法观测的 NEE 进行比较, 结果表明两种方法观测的 NEE 变化规律基本一致, 相关系数达到 0.7。采用箱式法观测的 NEE 高于涡动相关法观测的结果, 平均值分别 0.028 mgCO₂ m⁻² s⁻¹ (箱式法) 和 0.015 mg CO₂ m⁻² s⁻¹ (涡动相关法), 涡动相关法的观测结果与箱式法观测结果的比值为 0.54。综上可得, 荒漠生态系统土壤呼吸的变化速率决定了生态系统呼吸的变化规律, 采用箱式法可能高估了荒漠生态系统 CO₂ 的释放量。

关键词: 荒漠生态系统; 碳收支; 生态系统呼吸; 土壤呼吸; 箱式法; 涡动相关

Variation of the carbon budget and comparison between static chamber method and eddy covariance method in the *Reaumuria soongorica*–*Salsola passerina* community in the Tennger Desert

GAO Yanhong^{1,*}, LI Xinrong¹, LIU Lichao¹, JIA Rongliang¹, YANG Haotian¹, ZHAO Yang¹, CHEN Yongle¹, LI Peiguang², LI Gang¹

¹ Shapotou Desert Research and Experimental Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

² Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助(2013CB429901); 国家自然科学基金项目(41301080, 41001025, 41371100); 中国科学院西部之光博士项目

收稿日期: 2013-06-10; 网络出版日期: 2014-07-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gao_yanhong@lzb.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

Abstract: Long-term field measurements of the exchange of CO_2 between terrestrial ecosystems and the atmosphere can contribute to our knowledge on the role of a particular ecosystem in the global carbon cycle. To date, little information is available on the carbon fluxes in a typical steppe desert, especially in areas with annual precipitation less than 200 mm. The community dominated by *Reaumuria soongorica* Maxim. and *Salsola passerina* Bge. is one of the most common vegetation types in desert areas in China. In this program, the *R. soongorica*-*S. passerina* community in the Tennger Desert was selected as our study object. The diurnal variation of the net ecosystem CO_2 exchange (NEE), the gross primary productivity (GPP), the ecosystem respiration (Reco) and the soil respiration (R_{soil}) were measured using the closed static chamber method. The results obtained by the chamber method were compared with eddy covariance measurements and the main results were as follows: (1) NEE of the *R. soongorica*-*S. passerina* community exhibited a negative peak (negative values indicate CO_2 uptake by the desert ecosystem) in the morning between 6:00—9:00, and then increased and showed positive values (positive values indicate CO_2 release from the desert ecosystem to atmosphere) with the largest efflux peak occurring between 12:00—15:00. The diurnal variation of NEE in the *R. soongorica*-*S. passerina* community was similar to the *S. passerina* population, which means the variation of the *R. soongorica*-*S. passerina* community was determined by the *S. passerina* population. The mean NEEs of the *R. soongorica* population, *S. passerina* population and *R. soongorica*-*S. passerina* community were 0.018 , 0.020 and $0.028 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively. (2) The diurnal variation of the respiration of the *R. soongorica* population, *S. passerina* population, soil and the whole community were similar, and exhibiting single-peak curves at daytime with the peak appearing at between 12:00—15:00, and the mean values of respiration of *R. soongorica* population, *S. passerina* population, soil and the whole community were 0.121 , 0.062 , 0.029 , and $0.040 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively. We calibrated the carbon efflux using the coverage-weighted-average method and found that the *R. soongorica* population, *S. passerina* population and the soil system comprise 9%, 21% and 70% of the total *R. soongorica*-*S. passerina* community ecosystem respiration, respectively. Therefore the ecosystem respiration derived mainly from the soil system. (3) The variation of NEE monitored using the closed static chamber method was generally consistent with that by using eddy covariance method. The NEE measured by the closed static chamber was linearly correlated with the eddy covariance, and the correlative value was 0.7. The NEE measured by the closed static chamber was higher than the eddy covariance, with the mean values were $0.028 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (the former), $0.015 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (the latter), respectively. The result measured by the eddy covariance vs closed static chamber was 0.54. In conclusion, the carbon efflux of desert ecosystem maybe overestimated by using the closed static chamber method.

Key Words: desert ecosystem; carbon budget; ecosystem respiration; soil respiration; static chamber method; eddy covariance

陆地生态系统与大气间碳交换的长期定位观测及其精确估算,是精确评估陆地生态系在全球碳循环中的作用和地位以及准确预测其对未来气候变化响应的基础和前提^[1],因此陆地生态系统碳循环与碳收支研究成为全球变化研究中的一个核心问题。明确碳收支各组分及其贡献率,对预测未来气候变化的背景下,碳循环规律及源汇动态变化非常重要^[2]。20世纪90年代,随着涡动相关技术和仪器的日益成熟,该技术已经在全世界范围内被广泛地应用于大气和地球表面碳通量的观测中。涡动相关法可以在生态系统尺度上连续、直接地观测植被与大气间净 CO_2 交换量(NEE),但是该技术的观测结果不能直接区分为生态系统光合、生态系统呼吸以及土壤呼吸,从而无法为准确理解和预测生态系统碳交换过程提供足够的信息^[3]。如果要获得白天生态系统呼吸,许多研究者采用环境因子和夜间生态系统呼吸之间关系外推白天的生态系统呼吸^[4-5]。但是也有研究表明,在干旱区,由于夜间生态系统呼吸与环境因子之间的关系较弱^[6],从而使得采用环境因子与夜间生态系统呼吸关系外推白天生态系统呼吸存在较大的误差^[7-8]。因此采用涡动相关法无法准确推算碳收支各组分的量,从而在估算碳收支过程中存在较大的误差^[9]。

除了涡动相关技术之外,箱式法也是目前碳通量观测中常用的方法^[10]。该技术可以用于观测各种低矮植被(如灌木、草地)及土壤与大气间 CO₂ 交换量的时空变异特征,并且可以区分出碳收支各组分(包括总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸(R_{eco})、土壤呼吸(R_{soil})等)。该方法原理简单、适应范围广、移动性强、易于操作,被广泛应用于我国典型的陆地生态系统微量气体的同步观测中。但是箱式法的观测结果也受到环境^[9,11]和箱子体积^[10]等因素的影响,导致观测数据存在误差。因此,为了准确认识碳交换的过程,需要采用箱式法对碳收支的各组分进行观测,但是由于箱式法观测的局限性,还需将箱式法与涡动相关法的结果进行比较。

红砂(*Reaumuria soongorica* Maxim.)-珍珠猪毛菜(*Salsola passerina* Bge.)群落(简称红砂-珍珠群落)是我国荒漠地区分布最广泛的植被类型之一^[12]。在自然界中,红砂和珍珠群落常镶嵌分布,由红砂和珍珠所组成的超旱生半灌木层片群落是我国荒漠东部和荒漠区中的顶级植物群落。但是目前采用箱式法及涡动相关法对该群落碳收支各组分的研究还非常少见,因此对红砂-珍珠群落碳收支各组分变化特征的研究,是对我国陆地生态系统碳循环研究的一个重要补充,可以为正确认识荒漠生态系统在全球碳循环中的作用及其对全球变化的响应提供基础的数据,为我国荒漠生态系统碳管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

实验区位于宁夏回族自治区中卫市与甘肃省景泰县交界处的小红山地区-中国科学院沙坡头沙漠研究试验站荒漠生态系统碳通量观测场(37°29' N, 104°25' E, 海拔 1665 m),距离中国科学院沙坡头沙漠研究试验站约 60 km。该区地处腾格里沙漠东南缘,属于典型的草原化荒漠。年降水量不足 200 mm,主要集中在 7—9 月份,年潜在蒸发量达到 3000 mm。该区的年平均气温约 10 °C,植物生长期 150—180 d。该区生长的灌木、半灌木主要有红砂、珍珠、驼绒藜(*Ceratoides latens*)、合头草(*Sympegma regelii*)、盐爪爪(*Kalidium gracile*)、白刺(*Nitraria tangutorum*)。草本主要有雾冰藜(*Bassia dasyphylla*)、小画眉草(*Eragrostis poaeoides*)、沙葱(*Allium mongolicum*)、隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等。植被总盖度为 10%—30%,优势种为红砂和珍珠。群落发育良好,植被分布均匀,形成干旱地区典型的主要由稀疏植被或荒漠植被构成的生态系统(斑块植被结构或镶嵌植被结构)。

1.2 试验方法

1.2.1 碳收支各组分观测

(1) 箱式法仪器及观测方法

自 2010 年 8 月开始采用静态箱式法结合 CO₂ 红外气体分析仪(Li-840ACO₂/H₂O, Li-Cor, USA)测定红砂、珍珠种群的 NEE、GPP、 R_{eco} 、 R_{soil} 。分别在 2010 年 8 月 13 日 15:00—2010 年 8 月 17 日 6:00、2010 年 9 月 13 日 11:00—2010 年 9 月 14 日 8:00、2010 年 10 月 13 日 12:00—2010 年 10 月 15 日 9:00、2011 年 7 月 15 日 9:00—2011 年 7 月 16 日 6:00 进行了观测,共观测了 4 次,测定了 8 d。分别选择 3 株大小相近且在整个群落中长势处于中间状况的红砂、珍珠进行固定观测。本实验中观测的红砂株高约为 40 cm,冠幅约为 45 cm,地上生物量为 97 g/株^[13];珍珠的株高约为 30 cm,冠幅为 38 cm,地上生物量为 245 g/株^[13]。将底座(50 cm × 50 cm)插入每株植物所在的土壤中,深度为 20 cm,同时选择无植物生长的空白地也插入 3 个同样大小的底座,用以测定土壤呼吸(R_{soil})。观测时将采样箱(50 cm × 50 cm × 50 cm)扣在底座上,同时连接 CO₂ 红外分析仪,采用明箱和暗箱分别测量红砂、珍珠种群的 NEE、Reco、Rsoil。在箱体罩上底座之后,待 CO₂ 浓度变化平稳之后,就开始测量,每隔 1 s 记录 1 个数据,测量 1 min,每次测量约 2 min。由于实验地较远,因此开始观测的时间存差异。观测时每隔 3 h 观测 1 次,以完成一个完整的观测日为 1 d 来计算日平均值。

(2) 数据处理

静态箱-CO₂ 红外气体分析仪测定 CO₂ 通量的公式如下:

<http://www.ecologica.cn>

$$F_c = \frac{dc'}{dt} \times V \times P_{av} \times \frac{(1000 - W_{av})}{R \times S \times (T_{av} + 273)} \quad (1)$$

式中 F_c 为 CO_2 交换速率 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); $\frac{dc'}{dt}$ 为经过水汽校正后的 CO_2 浓度变化速率,即斜率; V 为采样箱体积 (m^3); P_{av} 为测量期间箱体內的平均大气压 (kPa); W_{av} 为测量期间箱体內的水汽分压; R 为气体常数 8.314; S 为箱体底面积 (m^2); T_{av} 为观测期间箱体內温度 ($^{\circ}\text{C}$)。由于涡动相关系统的观测结果 ($\text{mg CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 因此将箱式法观测的 F_c 的单位最后换算成了 ($\text{mg CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。

以盖度为权重,采用加权法计算 R_{eco} 和 NEE ($\text{mg CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。 R_{eco} 采用以下公式计算

$$R_{eco} = R_{Reaumuria} \times C_1 + R_{Salsola} \times C_2 + R_{soil} \times (1 - C_1 - C_2) \quad (2)$$

式中, R_{eco} 为生态系统呼吸; $R_{Reaumuria}$ 为红砂种群的生态系统呼吸速率; C_1 为红砂种群盖度 (4%); $R_{Salsola}$ 为珍珠种群生态系统呼吸速率; C_2 为珍珠种群盖度 (20%); R_{soil} 为土壤呼吸速率; $(1 - C_1 - C_2)$ 为空白土壤的盖度 (76%)。

$$NEE = NEE_{Reaumuria} \times C_1 + NEE_{Salsola} \times C_2 + R_{soil} \times (1 - C_1 - C_2) \quad (3)$$

式中, NEE 为群落净 CO_2 交换量; $NEE_{Reaumuria}$ 为红砂种群净 CO_2 交换量; $NEE_{Salsola}$ 为珍珠种群净 CO_2 交换量。

由于 NEE 计算结果中负值时表示植被系统从大气中吸收 CO_2 , 正值表示植被系统向大气中释放 CO_2 , 因此 $GPP = -NEE + R_{eco}$ 。

1.2.2 涡动相关观测方法

(1) 涡动相关观测仪器及方法

涡动相关系统观测塔安装高度 3 m, 安装三维超声风速仪 (CAST3, Campbell Scientific Inc, USA) 测量三维风速和超声虚温, 采用开路式红外气体分析仪 (Li7500, Li-Cor, USA) 测量 CO_2 浓度和水汽密度。实时观测的数据记录在带低温扩展板的数据采集器 CR5000 (Campbell Scientific Inc, USA) 中, 采样频率为 10 Hz。

(2) 数据资料处理

参考 Gao 等^[6]的方法, 从涡动相关仪观测 10Hz 的原始数据出发, 采用英国爱丁堡大学开发的 Edire (Edire Reprocessing) 软件对观测数据进行后处理, 处理过程主要包括: 野点剔除、延迟时间校正、超声虚温转化为实际空气温度、坐标旋转 (平面拟合法)、空气温度密度效益的校正 (即 wpl 校正) 等。同时对数据进行了严格的质量控制, 包括阈值检查、摩擦风速检验、湍流强度、湍流相似性规律检验以及湍流的平稳性、发展的充分性检验。采用平均昼夜变化法, 对通量观测中缺失的数据进行了插补。对于处理好的涡动相关数据, 选择与箱式法观测时间一致的数据进行比较。由于在该研究中发现, 夜间碳通量与温度的相关性较弱, 这可能是由于在干旱区, 土壤含水量较低时限制了植物的呼吸速率和土壤呼吸速率, 因此两者之间没有表现出较好的相关性。从而采用夜间碳通量与温度的关系外推白天的生态系统呼吸存在较大的误差, 因此本研究中仅将两种方法观测的 NEE 进行了比较。

2 结果与分析

2.1 净生态系统 CO_2 交换量 (NEE) 的日变化规律

静态箱式法观测的红砂与珍珠种群的 NEE 日变化特征见图 1。从图中可以看出, 红砂种群 NEE 的日变化幅度大于珍珠种群。在所有观测中还发现 NEE 在早晨 6:00—9:00 左右时出现一个较大的 CO_2 吸收峰值, 其中红砂种群峰值最大的出现在 2011 年 7 月 15 日的 9:00, 峰值为 $-0.232 \text{ mg CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 珍珠种群峰值最大的出现在 2011 年 7 月 16 日的 6:00, 峰值为 $-0.166 \text{ mg CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。随后在 12:00—15:00 左右 NEE 出现一个较大的 CO_2 释放峰 (图 1)。红砂和珍珠种群 NEE 的平均值分别为: 0.018 和 $0.020 \text{ mg CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。

2.2 生态系统呼吸与土壤呼吸的日变化特征

红砂和珍珠种群生态系统呼吸的日变化特征见图 2。从图中可以看出, 红砂和珍珠种群生态系统呼吸的

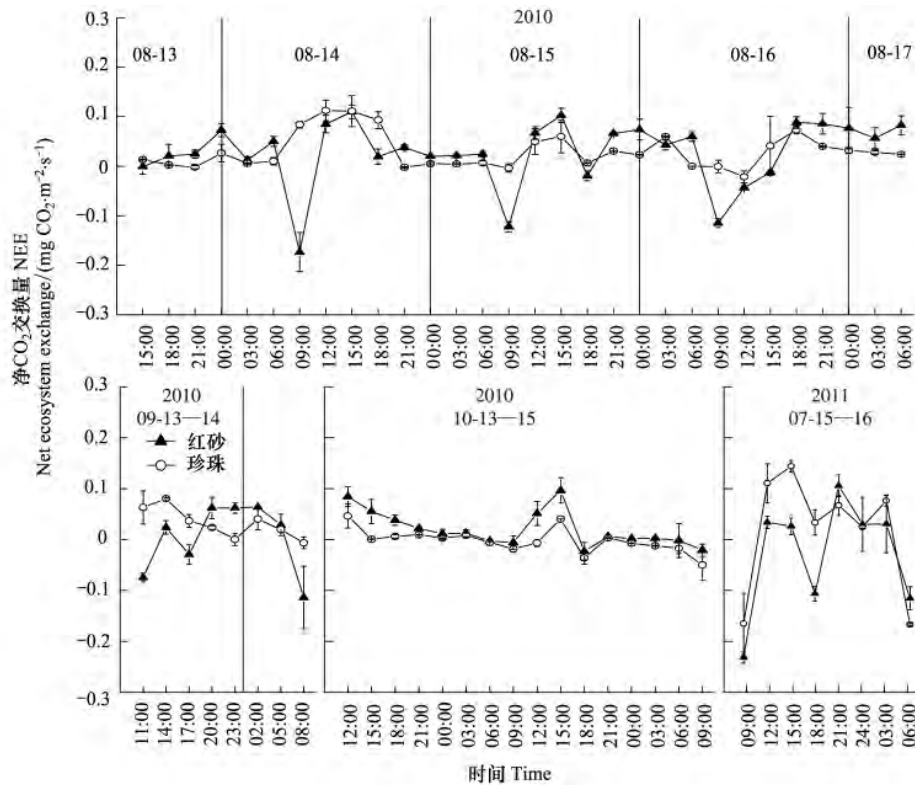
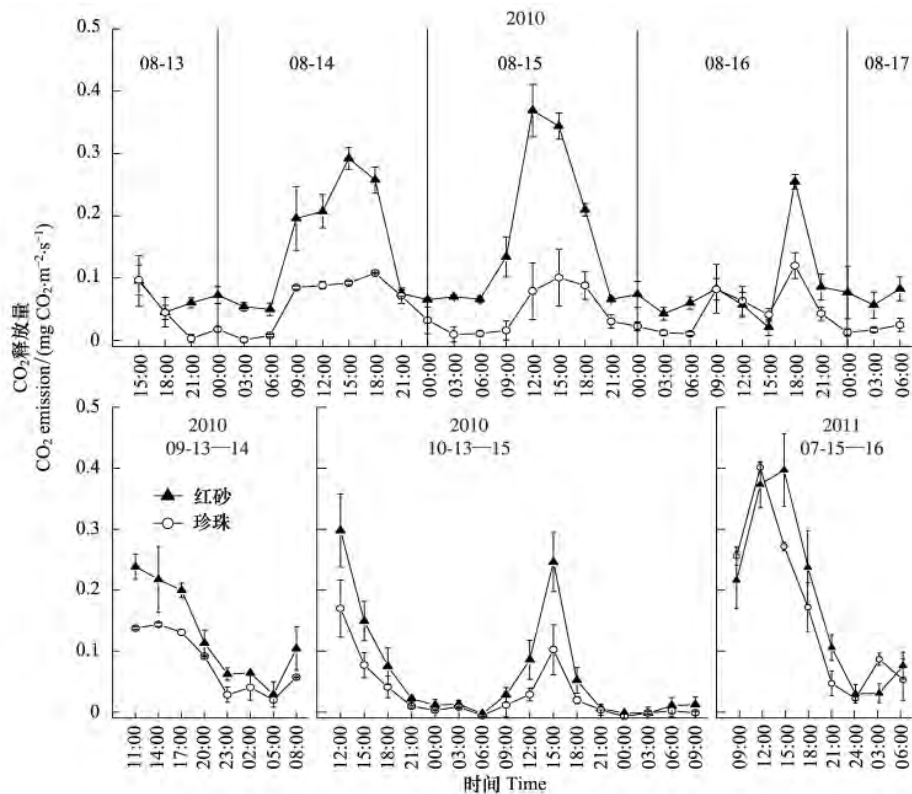
图1 红砂与珍珠种群净生态系统 CO₂ 交换量日变化特征(2010—2011 年)Fig.1 Diurnal variation of net ecosystem exchange (NEE) in *Reaumuria soongorica* population and *Salsola passerina* population(2010—2011)

图2 红砂与珍珠种群生态系统呼吸日变化特征

Fig.2 Diurnal variation of ecosystem respiration (R_{eco}) in *Reaumuria soongorica* population and *Salsola passerina* population

日变化规律基本一致,红砂种群的生态系统呼吸量高于珍珠种群,两个种群的平均生态系统呼吸分别为: $0.121 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (红砂种群)、 $0.062 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (珍珠种群)。除了2010年8月16日之外,其他观测日的生态系统呼吸均表现为单峰变化的趋势,最大值12:00—15:00之间。土壤呼吸与群落生态系统呼吸的变化规律见图3。土壤呼吸与群落生态系统呼吸的变化规律基本一致,均表现为单峰变化的趋势。群落生态系统呼吸、土壤呼吸的平均值分别为: 0.040 、 $0.029 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 。以盖度为加权因子计算生态系统呼吸中各组分占生态系统的比例,红砂种群呼吸、珍珠种群呼吸、土壤呼吸占生态系统呼吸的比例分别为:9%、21%、70%。生态系统的呼吸主要来源于土壤呼吸。

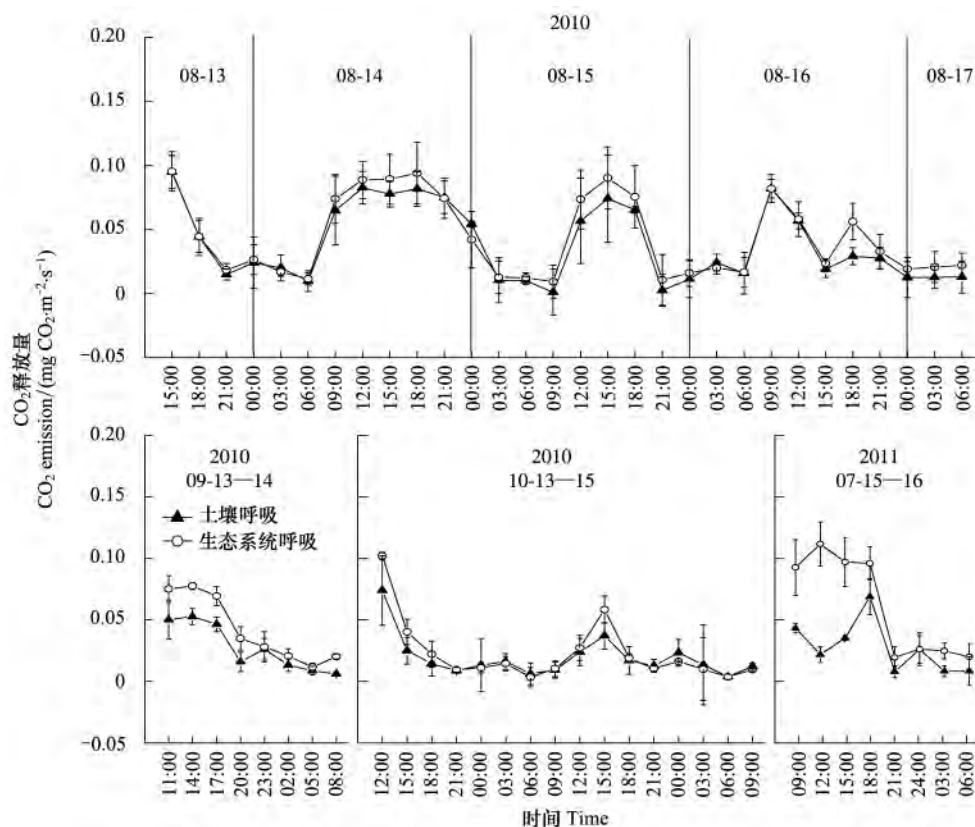


图3 生态系统呼吸与土壤呼吸的日变化特征(2010—2011年)

Fig. 3 Diurnal variation of ecosystem respiration (R_{eco}) and soil respiration (R_{soil}) (2010—2011)

2.3 箱式法与涡动相关法结果比较

箱式法观测荒漠植被系统碳通量的日变化如图4所示,与涡动相关的结果相比,除了2010年8月16日和2010年10月13—15日的日变化规律有较大的差异之外;其他观测日的日变化基本一致,两者之间有着较好的相关性。采用箱式法观测的碳通量高于涡动相关法观测的结果,两种方法的观测结果平均值分别为 $0.028 \text{ mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (箱式法)、 $0.015 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (涡动相关),箱式法观测结果为涡动相关法观测结果的1.8倍。

箱式法与涡动相关法观测碳通量的曲线拟合见图5,从图中可以看出,箱式观测的结果与涡动相关的观测结果有显著的正相关关系,相关系数为0.70。

3 讨论与结论

陆地生物圈和大气圈之间碳的净交换(NEE)是指光合作用的碳吸收与植物呼吸、土壤呼吸和扰动过程造成的碳释放平衡的结果。由于碳交换中不同的生态过程对环境因子的响应存在差异,因此碳收支各组分变化规律存在差异。我们采用静态箱式法的观测结果显示,红砂-珍珠群落NEE在每天6:00—9:00左右出现

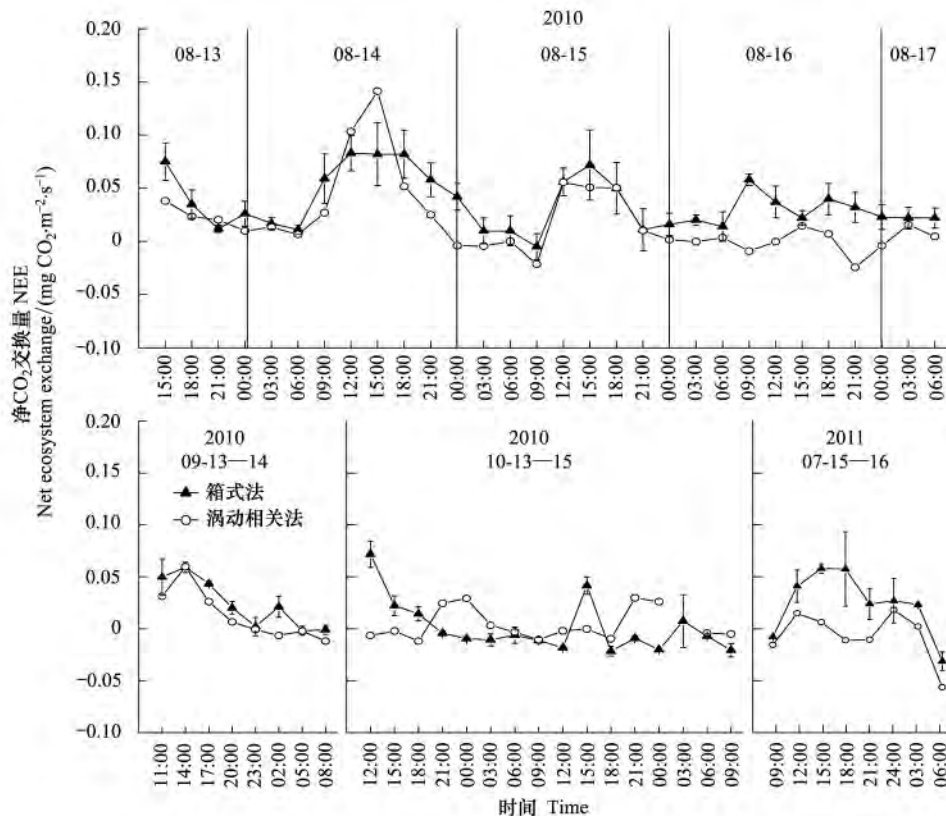


图4 箱式法观测碳通量与涡动相关法观测碳通量日变化特征

Fig.4 Diurnal variation of net ecosystem exchange (NEE) measured with closed static chamber and eddy covariance (EC)

一个 CO₂ 吸收的高峰值,随后在 12:00—15:00 左右出现一个 CO₂ 释放高峰值,珍珠种群 NEE 的日变化幅度和规律与整个群落的变化规律更为一致(图 1,图 4)。目前,在大多数干旱区的研究中^[8,14-16] NEE 的日变化规律表现为白天吸收 CO₂,夜间释放 CO₂ 的模式,与本研究观测的 NEE 日变化规律存在差异。在本研究中 6:00—9:00 左右出现一个吸收的高峰值,这可能是因为植物为了避开高温的影响,在高温出现之前的短暂时间内充分利用水与光资源,从而在早晨出现了这种现象。Zhang 和 Gao^[17] 在研究荒漠植被的日光合动态变化时也发现,荒漠植物的光合曲线的第 1 个高峰出现在 8:00 左右,这与本文发现的现象基本一致。此外,在白天出现 1 个 CO₂ 释放高峰的原因可能是一方面因为荒漠植物受到高温胁迫时,光合作用的正常功能不能实现,因此植物的净光合速率受到限制^[18];此外,在本研究的观测期内,降水较少(在植物生长季(4—10 月份) 2010 降水量为 126.4 mm; 2011 年降水量为 181.3 mm (在 2011 年 4—7 月份的降水量仅为 64.2 mm)),由于受到干旱胁迫的影响,荒漠植物为了应对胁迫,都要以光合能力的消弱为代价^[19];另一个原因是高温对生态系统呼吸,尤其是土壤呼吸的限制作用较弱,因此本研究 NEE 的变化主要受到生态系统呼吸的控制,在观测中白天出现较多正值且出现了一个释放的高峰。

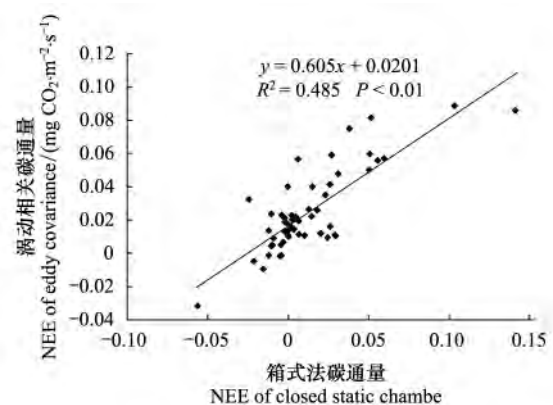


图5 箱式法与涡动相关法观测碳通量结果比较

Fig.5 Comparison of the net ecosystem exchange (NEE) measured by eddy covariance and closed static chamber

表 1 碳收支各组分的日平均值及土壤和植物呼吸与生态系统呼吸的比值

Table 1 The mean values of carbon budget components and the ratio of soil and plant respiration vs ecosystem respiration

日期 Date	碳收支各组分 Carbon budget components/($\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$)				土壤呼吸 / 生态系统呼吸	植物呼吸 / 生态系统呼吸
	总初级生产力 Gross Primary Productivity	生态系统呼吸 Ecosystem Respiration	土壤呼吸 Soil Respiration	植物呼吸 Plant Respiration	Soil Respiration / Ecosystem Respiration	Plant Respiration / Ecosystem Respiration
2010-08-14	0.12	1.4	1.29	0.11	0.92	0.08
2010-08-15	0.22	0.9	0.75	0.15	0.83	0.17
2010-08-16	0.19	0.9	0.78	0.12	0.87	0.13
2010-09-13	0.35	0.99	0.65	0.34	0.66	0.34
2010-10-13	0.2	0.63	0.49	0.14	0.78	0.22
2010-10-14	0.17	0.454	0.42	0.034	0.93	0.07
2011-07-15	0.8	1.44	0.65	0.79	0.45	0.55

红砂、珍珠种群的生态系统呼吸、土壤呼吸和群落的生态系统呼吸的日变化规律一致,均表现为明显的单峰变化趋势。其中红砂种群的生态系统呼吸最高,分别约为珍珠种群、群落生态系统呼吸、土壤呼吸的 2、3、4 倍。表 1 给出了碳收支各组分在不同观测日的值。从表 1 中可以看出,在红砂-珍珠群落中,植物呼吸作用 (R_{plant}) 与 GPP 的比值为 0.82; R_{eco} 与 GPP 的比值为 3.3。有研究表明,森林生态系统植物的自养呼吸是 GPP 中一个相对恒定的部分,植物的总呼吸约是 GPP 的一半(48%—60%)^[20-21];在草地生态系统中,生态系统呼吸占 GPP 的比值约为 0.7—1.0^[22];在盐生荒漠群落中干旱年份 GPP 与 Reco 的量几乎一致,而在湿润年份 GPP 大于生态系统呼吸^[23]。土壤呼吸是生态系统呼吸的重要组成部分,约占 75%^[24]。而我们采用箱式法的结果显示生态系统呼吸远大于 GPP,两者的比值约为 3.3。出现这种现象可能是因为荒漠植物受到高温和干旱的胁迫,植物光合速率降低,从而导致两者之间的比值较大。 R_{soil} 与 R_{plant} 占 R_{eco} 的比例在不同的观测日存在较大的差异,变化范围分别为:45%—93%、7%—55%。以盖度为加权因子计算生态系统呼吸中各组分占生态系统的比例,红砂种群呼吸、珍珠种群呼吸、土壤呼吸占生态系统呼吸的比分别为:9%、21%、70%。因此土壤呼吸的变化规律决定了生态系统呼吸的变化规律。

将箱式法和涡动相关法的结果进行比较,结果表明,这两种方法观测的碳通量变化规律基本一致,相关系数达到 0.7,但是涡动相关法的观测结果仅为箱式法的 54%,这一结果低于森林^[25-26]、高山草甸^[5, 27]、盐生荒漠^[28]等生态系统的研究结果。造成这种差异的主要原因可能是由于箱体罩上之后,会导致温度升高,而土壤呼吸主要受到温度的影响^[4-5],因此在采用箱式法观测时土壤呼吸可能会偏高,从而导致箱式法的结果高于涡动相关法。Buchmann^[29]也认为造成箱式法与涡动相关差异的原因可能是土壤呼吸的差异所致。且在本文研究的群落中,生态系统呼吸的量远超过植物的光合作用,因此生态系统呼吸的微小升高都会导致 NEE 较大的变化,这可能也是本文研究观测结果中箱式法结果偏高的原因。

参考文献(References):

- [1] 于贵瑞,付玉玲,孙晓敏,温学发,张雷明. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的研究进展及其发展思路. 中国科学 D 辑, 2006, 36(S1): 1-21.
- [2] Wang Y S, Wang Y H. Quick Measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem. Advance in Atmospheric Science, 2003, 20(5): 842-844.
- [3] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, Schulze E-D, Rebmann C, Moors E J, Granier A, Gross P, Jensen N O, Pilegaard K, Lindroth A, Grelle A, Bernhofer C, Grünwald T, Aubinet M, Ceulemans R, Kowalski A S, Vesala T, Rannik Ü, Berbigier P, Loustau D, Gudmundsson J, Thorgeirsson H, Ibrom A, Morgenstern K, Clement R, Moncrieff J, Montagnani L, Minerbi S, Jarvis P G. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. Nature, 2000, 404(6780): 861-865.
- [4] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grünwald T, Havrankova K, Ilvesniemi H, Janous D, Knohl A, Laurila T, Lohila A, Loustau D, Matteucci G, Meyers T, Miglietta F, Ourcival J M, Pumpanen J, Rambal S, Rotenberg E, Sanz M, Tenhunen J, Seufert G, Vaccari F, Vesala T, Yakir D, Valentini R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. Global Change Biology, 2005, 11(9):

1424-1439.

- [5] Gilmanov T G, Soussana J F, Aires L, Allard V, Ammann C, Balzarolo M, Barcza Z, Bernhofer C, Campbell C L, Cernusca A, Cescatti A, Clifton-Brown J, Dirks B O M, Dore S, Eugster W, Fuhrer J, Gimeno C, Gruenwald T, Haszpra L, Hensen A, Ibrom A, Jacobs A FG, Jones M B, Lanigan G, Laurila T, Lohila A, Manca G, Marcolla B, Nagy Z, Pilegaard K, Pinter K, Pio C, Raschi A, Rogiers N, Sanz M J, Stefani P, Sutton M, Tuba Z, Valentini R, Williams M L, Wohlfahrt G. Partitioning European grassland net ecosystem CO₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 121(1/2): 93-120.
- [6] Gao Y H, Li X R, Liu L C, Jia R L, Yang H T, Li G, Wei Y P. Seasonal variation of carbon exchange from a revegetation area in a Chinese desert. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 156: 134-142.
- [7] Baldocchi D. Measuring and modelling carbon dioxide and water vapour exchange over a temperate broad-leaved forest during the 1995 summer drought. *Plant, Cell and Environment*, 1997, 20(9): 1108-1122.
- [8] Hastings S J, Oechel W C, Muhlia-Melo A. Diurnal, seasonal and annual variation in the net ecosystem CO₂ exchange of a desert shrub community (Sarcocaulis) in Baja California, Mexico. *Global Change Biology*, 2005, 11(6): 927-939.
- [9] 郑泽梅, 于贵瑞, 孙晓敏, 曹广民, 王跃思, 杜明远, 李俊, 李英年. 涡动相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 290-298.
- [10] 王跃思, 王迎红. 中国陆地和淡水湖泊与大气间碳交换观测. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] Liang N, Nakada T, Hirano T, Qu L, Koike T, Fujinuma Y, Inoue G. In situ comparison of four approaches to estimating soil CO₂ efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 123(1/2): 97-117.
- [12] 丘明新, 刘家琮. 珍珠植物群落的研究. *生态学报*, 1982, 2(4): 311-318.
- [13] 杨昊天, 李新荣, 刘立超, 贾荣亮, 王增如, 李小军, 李刚. 荒漠草地 4 种灌木生物量分配特征. *中国沙漠*, 2013, 33(5): 1340-1348.
- [14] Emmerich W E. Carbon dioxide fluxes in a semiarid environment with high carbonate soils. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 116(1/2): 91-102.
- [15] 刘冉, 王勤学, 唐立松, 李彦. 盐生荒漠地水热与二氧化碳通量的季节变化及驱动因素. *生态学报*, 2009, 29(1): 67-75.
- [16] 许皓, 李彦, 谢静霞, 程磊, 赵彦, 刘冉. 光合有效辐射与地下水水位变化对柽柳属荒漠灌木群落碳平衡的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(4): 375-386.
- [17] Zhang S R, Gao R F. Diurnal changes of gas exchange, chlorophyll fluorescence, and stomatal aperture of hybrid polar clone subjected to midday light stress. *Photosynthetica*, 2000, 37: 559-571.
- [18] 蒋高明, 朱桂杰. 高温强光环境条件下 3 种沙地灌木的光合生理特点. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 525-531.
- [19] 周海燕. 荒漠沙生植物生理生态学研究展望. *植物学通报*, 2001, 18(6): 643-648.
- [20] Ryan M G. A simple method for estimating gross carbon budgets for vegetation in forest ecosystems. *Tree Physiology*, 1991, 9(1/2): 255-266.
- [21] Yi C X, Li R Z, Bakwin P S, Desai A, Ricciuto D M, Burns S P, Turnipseed A A, Wofsy S C, Munger J W, Wilson K, Monson R K. A nonparametric method for separating photosynthesis and respiration components in CO₂ flux measurements. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(17): 125-135.
- [22] Flanagan L B, Wever L A, Carlson P J. Seasonal and interannual variation in carbon dioxide exchange and carbon balance in a northern temperate grassland. *Global Change Biology*, 2002, 8(7): 599-615.
- [23] Liu R, Pan L P, Jenerette G G, Wang X Q, Cieraad E, Li Y. High efficiency in water use and carbon gain in a wet year for a desert halophyte community. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, 162-163: 127-135.
- [24] Law B E, Thornton P E, Irvine J, Anthoni P M, Van Tuyl S. Carbon storage and fluxes in ponderosa pine forests at different developmental stages. *Global Change Biology*, 2001, 7(7): 755-777.
- [25] Lavigne M B, Ryan M G, Anderson D E, Baldocchi D D, Crill P M, Fitzjarrald D R, Goulden M L, Gower S T, Massheder J M, McCaughey J H, Rayment M, Striegl R G. Comparing nocturnal eddy covariance measurements to estimates of ecosystem respiration made by scaling chamber measurements at six coniferous boreal sites. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 28977-28985.
- [26] Griffis T J, Black T A, Gaumont-Guay D, Drewitt G B, Nesic Z, Barr A G, Morgenstern K, Kljun N. Seasonal variation and partitioning of ecosystem respiration in a southern boreal aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(3/4): 207-223.
- [27] Wohlfahrt G, Anfang C, Bahn M, Haslwanter A, Newesely C, Schmitt M, Drösler M, Pfadenhauer J, Cernusca A. Quantifying nighttime ecosystem respiration of a meadow using eddy covariance, chambers and modeling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128(3/4): 141-162.
- [28] 马杰, 吴玉, 郑新军, 唐立松, 王玉刚. 盐生荒漠净生态系统碳交换的涡度相关法与箱式法对比. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2627-2634.
- [29] Buchmann N. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(11-12): 1625-1635.