

DOI: 10.5846/stxb202112303709

王秀英, 周秉荣, 苏淑兰, 周华坤, 杜华礼, 张睿. 青藏高原高寒草甸和荒漠碳交换特征及其气象影响机制. 生态学报, 2023, 43(3): 1194-1208.

Wang X Y, Zhou B R, Su S L, Zhou H K, Du H L, Zhang R. Carbon exchange characteristics and meteorological influence mechanism of Alpine Meadow and Desert in Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1194-1208.

青藏高原高寒草甸和荒漠碳交换特征及其气象影响机制

王秀英^{1,2}, 周秉荣^{1,2,*}, 苏淑兰^{1,2}, 周华坤³, 杜华礼^{1,2}, 张睿^{1,2}

1 青海省气象科学研究所, 西宁 810001

2 青海省防灾减灾重点实验室, 西宁 810001

3 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810001

摘要:以青藏高原玛沁地区高寒草甸和沱沱河地区高寒荒漠草原为观测研究站,利用涡动协方差技术获取高寒生态系统水平上的 CO₂ 通量以及水和能量通量,通过 REddyProc、随机森林(Random Forest, RF)进行了数据后处理,探究了不同下垫面典型环境因子对净生态系统 CO₂ 交换量(Net Ecosystem Exchange, NEE)的影响机制。结果表明:1)玛沁高寒草甸在 6—7 月以吸收为主,表现为碳汇,吸收峰值出现在 11:00—12:00(北京时,下同)之间,而在 3、4、5、8 月以排放为主,表现为碳源,排放峰值出现在 21:00—23:00 之间;沱沱河高寒荒漠在 3—8 月以吸收为主,表现为净碳汇,吸收峰值出现在 13:00—14:00 之间;整个生长季前后(3—8 月),玛沁和沱沱河的累计 NEE 分别为 79.50 g C/m² 和 79.24 g C/m², 都表现为碳汇。2)不同尺度不同下垫面,气象因子对 NEE 的重要程度不同,小时尺度上,高寒草甸辐射对 NEE 的重要性最大,高寒荒漠草原蒸散发对 NEE 的重要性最大;日尺度上,高寒草甸土壤含水率对 NEE 的重要性最大,高寒荒漠草原风速对 NEE 的重要性最大;3)生态系统呼吸(Ecosystem Respiration, Reco)和 NEE 都受到总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP)的显著限制,高寒荒漠草原 GPP 对 NEE 的影响远大于高寒草甸 GPP 对 NEE 的影响;4)NEE 与蒸散发呈显著相关性,表明水分条件是控制高寒草甸和高寒荒漠草原碳和水收支变化的最重要因素。

关键词:高寒草甸;高寒荒漠草原;涡动协方差;净生态系统 CO₂ 交换量(NEE)

Carbon exchange characteristics and meteorological influence mechanism of Alpine Meadow and Desert in Qinghai-Tibet Plateau

WANG Xiuying^{1,2}, ZHOU Bingrong^{1,2,*}, SU Shulan^{1,2}, ZHOU Huakun³, DU Huali^{1,2}, ZHANG Rui^{1,2}

1 The Qinghai Institute of Meteorological Science, Xining 810001, China

2 Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Qinghai Province, Xining 810001, China

3 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Science, Xining 810001, China

Abstract: In this study, the alpine meadow in Maqin area of Qinghai-Tibet Plateau and the alpine desert steppe in Tuotuo Rivers area were taken as the observation stations. The eddy covariance technique was used to obtain the CO₂ flux, water and energy flux at the level of alpine ecosystem. The data were post-processed by REddyProc and Random Forest (RF), and the variation characteristics of Net Ecosystem Exchange (NEE) at different time scales and different underlying surfaces were analyzed, so as to accurately evaluate and compare the carbon budget under different underlying surfaces. The influence mechanism of meteorological factors on CO₂ flux of alpine meadow and alpine desert grassland was explored, which

基金项目:国家自然科学基金-联合基金项目(U21A2021);青海省科技厅创新平台建设专项(2022-ZJ-Y11);中国气象局创新发展专项(CXFZ2022P022)

收稿日期:2021-12-30; **网络出版日期:**2022-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zbr0515@foxmail.com

provided reference and data support for the research on carbon and water cycle of alpine meadow and alpine desert grassland in Qinghai-Tibet Plateau. The results showed that: 1) Maqin alpine meadow mainly absorbed carbon sink from June to July, and the absorption peak appeared between 11:00 and 12:00 (Beijing, the same below). However, in March, April, May and August, the main emission was carbon source, and the emission peak appeared between 21:00 and 23:00. The alpine desert of Tuotuo Rivers was mainly absorbed from March to August, showing net carbon sink, and the absorption peak appeared between 13:00 and 14:00; around the whole growing season (March—August), the cumulative NEE of Maqin and Tuotuo Rivers were 79.50 g C/m^2 and 79.24 g C/m^2 , respectively, showing carbon sink. 2) The correlation between carbon flux and meteorological factors was different in different scales and underlying surfaces. On the hourly scale, the importance of alpine meadow radiation (R_g) to carbon flux was the largest. Evapotranspiration (ET) in alpine desert steppe was the most important factor for carbon flux. On the daily scale, soil water content (Soil_VWC) was the most important factor for carbon flux in alpine meadow, while wind speed (WS) was the most important factor for carbon flux in alpine desert steppe. 3) Ecosystem Respiration (Reco) and Net Ecosystem Exchange (NEE) were significantly restricted by total primary productivity (GPP), and 91% of the GPP contributed to Reco and 9% to NEE; in alpine desert steppe, 40% of the GPP contributed to Reco and 60% to NEE. 4) NEE was significantly correlated with ET, indicating that water condition was the most important factor controlling the changes of carbon and water budget in alpine meadow and alpine desert steppe. 5) Human activities intensified the impact of climate change and the susceptibility of carbon balance, and became the inducing factors of weak carbon sources in March, April, May and August in Maqin.

Key Words: alpine meadow; alpine desert steppe; eddy covariance; net ecosystem exchange (NEE)

陆地生态系统碳平衡是生态系统物质能量循环的关键生态过程,对生态系统碳水循环有着不容忽视的影响^[1]。它既是地表能量平衡的组成部分,也是碳水循环过程中的重要项目之一。定量评估碳收支是生态系统与全球变化研究的重要任务^[2]。净生态系统 CO_2 交换量(NEE)是指生态系统中植物光合作用、冠层空气中的碳储存和生物及非生物呼吸消耗的碳排放引起的生态系统碳蓄积的变化量^[3]。它主要从通量观测的角度,反应生态系统碳的收支情况,决定着地表生态系统“汇-源”或者“源-汇”的转变过程^[4]。青海地处我国西北干旱半干旱地区,其高寒生态系统的碳平衡对气候变化极其敏感,因此,在不断变化的气候中精确测定和估算青藏高原高寒生态系统的碳通量,阐明高寒生态系统碳通量的空间格局和环境驱动因素,对于准确评估青藏高原生态系统碳平衡和碳气候至关重要,该地区的 NEE 有助于科学了解青藏高原高寒沼泽湿地生态系统的碳通量特征及其影响因子,对评价青藏高原生物地球化学循环对全球变化的响应和反馈具有重要的科学意义^[5]。随着地表能量交换和物质迁移研究的深入及碳减排的迫切要求,NEE 的观测研究越来越受到国内外学者的重视。涡度协方差法是测量大气和各种生态系统之间碳收支的最有用的方法之一,其以物理学基础坚实、测量精度高、不破坏下垫面的优点,自 20 世纪 80 年代开始,被广泛应用于测量大气与地表的物质和能量交换^[6-8]。目前,基于涡动协方差技术(Eddy Covariance, EC)对不同生态系统碳收支状况及其影响因子的研究陆续展开,朱志鹏等(2015)表明高寒草甸生态系统通过光合作用固定的碳,大部分通过呼吸作用消耗,并且在生长季,NEE 受光合有效辐射的影响较大。

青藏高原 CO_2 通量的大小和空间格局决定了青藏高原区域陆地碳平衡。高寒草甸和高寒荒漠草原是青藏高原的主要植被类型。青藏高原生态系统生长在极端恶劣的环境中,其特点是年平均气温和降雨量低、太阳辐射和风速高、土壤养分和水的可用性有限、生长季节短^[9-10]。因此,这些高寒生态系统对气候变化异常脆弱和敏感,以往的研究都集中于单站和稳定的生态系统 CO_2 通量及其影响因素,其研究结果是否能够准确评估青藏高原陆地碳收支和影响因素具有局限性,并且,大多数研究仅考虑了研究区域内的多种植被类型,无法揭示单一植被类型的主要环境因素^[11]。此外,由于极端困难和偏远地区 CO_2 通量观测和数据共享政策的限制,涡度协方差通量数据的获取程度大,缺乏对多种生态系统碳通量的综合研究。高寒草地生态系统因环

境变化,在不同时期可能是碳汇、碳源或碳中性^[12-13]。因此,深入了解高寒草地生态系统碳水通量的主要影响因素,是确定气候变化下区域碳平衡预测的关键,对青藏高原不同下垫面通量数据研究和对比分析,可以更深入地了解青藏高原 CO₂通量的空间格局和环境影响因素。由于辐射、温度、降水、冠层覆盖和养分有效性等不同环境和生物因素的影响,高寒生态系统的碳通量会表现出较大的空间差异性,因此,气候变化对青藏高原不同植被类型生态系统碳源或碳汇动态的影响机制目前还不十分明确,尤其是不同下垫面类型的生态系统碳通量的日、月、季特征变化更具有不明确性。

针对上述青藏高原不同下垫面、多站点 CO₂通量不确定性的研究现状,文中以青藏高原高寒草甸和高寒荒漠草原生态系统为研究对象,利用涡度相关系统观测的 NEE 数据,分析了 CO₂通量在不同时间尺度和不同下垫面的变化特征,准确评估和比较不同下垫面下的碳收支状况,并探究了气象因素对高寒草甸和高寒荒漠草 CO₂通量的影响机制,为青藏高原高寒草甸和高寒荒漠草原碳水循环研究提供参考和数据支持。

1 材料与方法

1.1 站点描述

试验地位于中国气象局青海高寒生态气象野外科学试验基地大武试验站(简称玛沁站)和沱沱河试验站(简称沱沱河站)(图 1)。玛沁站位于青海省果洛州玛沁县大武镇,海拔 3759 m,位于东经 100°12',北纬 34°29',下垫面植被类型为典型的高寒草甸生态系统。样地植物群落建群种为矮嵩草(*Kobresia humilis*),主要伴生种有小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、早熟禾(*Poa annua*)、细叶亚菊(*Aj aniatenui folic*),样地土壤类型以高山草甸土(*Alpine meadow soil*)和高山灌丛草甸土(*Alpine shrubby meadow soil*)为主^[14]。玛沁年平均气温为 -3.8—3.5 °C,年均降水量为 423—565 mm。沱沱河站位于青海省格尔木市唐古拉山镇附近,海拔 4533 m,位于东经 92°26',北纬 34°13',下垫面植被类型为典型的高寒荒漠化草原生态系统。主要牧草种类有高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)、矮嵩草(*Kobresia humilis*)、苔草(*Carex tristachya*),样地土壤类型为高山草甸土为主。年平均气温 -2.50 °C,年平均降水量 367.59 mm,年平均日照时数为 2967.9 h,年大风日数在 117—154 d 之间。

文中涉及的地图是基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统下载的审图号为 GS(2019)1719 的中国地图(世界地图)制作,底图无修改。

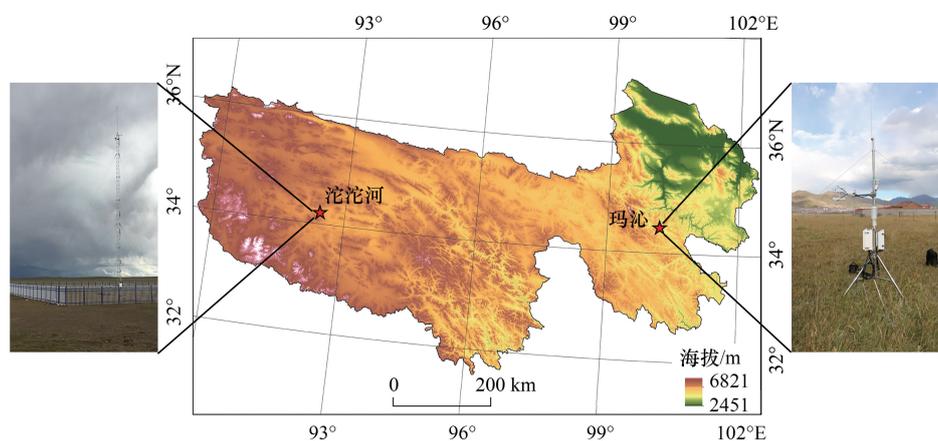


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.2 研究方法

1.2.1 数据观测

玛沁站和沱沱河站的涡度相关系统分别始建于 2016 年和 2018 年,玛沁站涡动协方差塔高为 2.0 m,沱沱河站为 3.28 m。在每个塔上,安装了一台三维超声风速仪(CSAT-3,美国坎贝尔科学公司)和一台开放式红

外二氧化碳和水蒸气分析仪(Li-7500A,美国利科公司),用于测量 10 Hz 下的三维风速和二氧化碳和水蒸气浓度。为了处理原始数据收集,在使用开源软件 EddyPro6.0 去除峰值、二维坐标旋转、时间滞后补偿和密度波动校正^[15-16]后,计算半小时平均 NEE 和 ET。观测项目还包括微气象观测,微气象观测系统具体观测项目包括气压、四分量辐射(1.5 m)、光合有效辐射(1.5 m)、风速(2 m)、空气温湿度(2 m)、土壤温湿(0.1 m)、土壤热通量(8 cm/10 cm);其供电和数据采集的配件参数分别为:配置一块 80 W 太阳能板(沱沱河为三块),1 块 100AH 的胶体电池和一块 CR3000 数采(沱沱河为一块 CR6 数采)。

1.2.2 数据处理

在通量观测过程中,由于仪器故障、天气状况、大气稳定性和供电系统故障等因素,会产生数据缺失,据统计,在欧洲通量网和美洲通量网的观测中,NEE 数据具有较高的缺失比率,一年中有 17%—50%的观测数据会缺失和被剔除^[17-19],给通量塔数据的应用带来困难,因此,如何建立有效合理的数据插补方法来形成完整和可靠的碳通量数据集成为当前函待解决的问题。本文中利用 R 语言中开发的 REddyProc 包进行数据插补,插补方法包括四部分:第一,NEE 异常值监测和剔除(MAD 算法);第二,计算夜间摩擦风速阈值。当夜间大气湍流运动较弱时,摩擦风速降低,涡动相关系统测量 NEE 会出现低估的现象^[17,19-21]。为避免夜间 NEE 数据出现系统性偏差^[22],通常需要判断出摩擦风速阈值,从而剔除低于摩擦风速阈值的 NEE^[23]。第三,插补 NEE。筛选出的具有时间序列缺口的通量数据以及缺失数据需要利用现有的通量数据和气象测量数据进行插补^[24],从而得到完整的时间序列下的通量值;第四,根据总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸作用(Reco)和 NEE 三者关系进行通量划分^[24],即 $NEE = R_{eco} - GPP$ 。夜间 NEE 数据拆分方法是假设 Reco 只与温度变化有关,且夜间植被只进行呼吸作用,因此可以通过夜间 NEE 对温度的响应变化曲线推出白天植被的 Reco 变化,最后根据以上关系式求出 GPP。白天 NEE 数据拆分方法是将白天 NEE 和总辐射的关系假设为 R_g 和 VPD 对 GPP 的影响以及温度对 Reco 的影响的综合。这些总通量对于理解陆-气相互作用至关重要。

1.2.3 统计分析

玛沁站和沱沱河站研究数据选取 2019 年 3—8 月的涡度相关系统所观测的原始数据(其它观测时段缺失),数据质量等级选取 $qc=0$ 和 $qc=1$ (qc 为 0 表示数据质量最高,1 为一般,2 为较差)。NEE 观测数据缺失状况如表 1 所示,2019 年数据平均缺失率为 17%。其中,6 月缺失情况最严重(27%),其次为 5 月和 9 月(27%),3 月缺失率最低(7%)。

REddyProc 算法中使用风速(wind velocity(WS)m/s)、总辐射(global radiation(R_g) W/m^2)、水汽压饱和差(vapor pressure deficit(VPD)hPa)、空气温度(air temperature(T_{air}) $^{\circ}C$)和相对湿度(relative humidity(RH)%)进行 NEE 滤除、插补和拆分,再合 WS 、 R_g 、 T_{air} 、净辐射(net radiation(R_n) W/m^2)、土壤温度(soil temperature($soil_T$) $^{\circ}C$)、土壤含水率(soil moisture content($Soil_VWC$)%)、土壤热通量(soil heat flux($Soil_G$) W/m^2)、 RH 、蒸散发(evapotranspiration(ET)mm)等气象因子,分析净生态系统 CO_2 交换量对环境驱动因子的敏感性,这对于解释陆气相互作用和改进地球系统模型具有重要意义。

表 1 研究区 NEE 观测数据缺失统计表/%

Table 1 Statistical table showing the absence of observed NEE in the study area

站名 Station name	0 级占比 Percentage of level 0	1 级占比 Percentage of level 1	2 级占比 Percentage of level 2	缺失值占比 Percentage of NAN
玛沁	26.23	41.63	19.69	12.45
沱沱河	50.41	26.74	16.18	6.67

选用决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、绝对平均误差 MAE 评价 REddyProc 算法插补精度,以及模拟值与观测值之间的相关性,两站的具体参数如表 2 所示。

表 2 REddyProc 算法插补精度

Table 2 Interpolation accuracy of REddyProc algorithm

站名 Station name	Pearson	R^2	RMSE	MAE
玛沁	0.82	0.66	4.54	1.29
沱沱河	0.75	0.55	0.83	3.43

Pearson: 皮尔逊相关系数 pearson correlation coefficient; R^2 : 决定系数 coefficient of determination; RMSE: 均方根误差 root mean square error; MAE 平均绝对误差 mean absolute error

2 结果与分析

2.1 NEE 不同时间尺度变化特征

2.1.1 NEE 月交换特征

玛沁站和沱沱河站 NEE 如图 2 所示, 玛沁在 6—7 月以净吸收为主, 表现为碳汇, 7 月净吸收达到最大, 为 $-2.06 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ 。在 3、4、5、8 月以排放为主, 表现为碳源, 4 月排放速率达到最大, 为 $0.34 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$; 沱沱河在 3—8 月都以净吸收为主, 表现为碳汇, 3 月净吸收达到最大, 为 $-0.58 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ 。图 2 展示了两站的 NEE 月变化特征, 随着年内植被结构的发展, 碳吸收量增加, 直到生长季中期达到最大值。

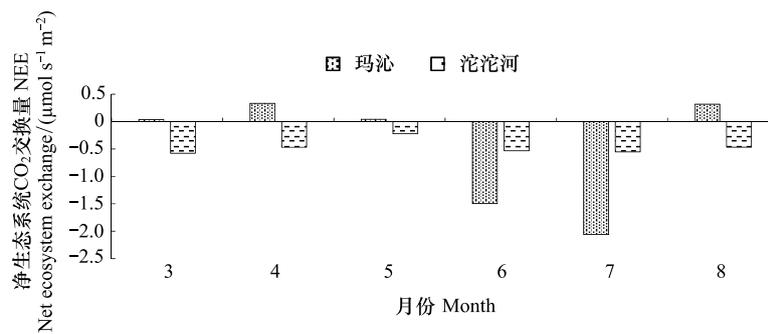


图 2 2019 年 NEE 月变化特征

Fig. 2 Monthly variation characteristics of NEE in 2019

2.1.2 NEE 日交换特征

玛沁站和沱沱河站日 NEE 如图 3 所示, 玛沁日平均 NEE 为 $-0.55 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, 日吸收峰值为 $-4.06 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, 出现在 7 月 9 日, 日排放峰值为 $4.35 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, 出现在 8 月 23 日; 沱沱河日平均 NEE 为 $-0.46 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, 日吸收峰值为 $-1.44 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, 出现在 4 月 20 日, 日排放峰值为 $0.20 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, 出现在 4 月 8 日。

2.1.3 NEE 小时交换特征

由于月尺度的 NEE 变化存在显著差异性, 因此分析每月的小时平均 NEE 变化来表征 NEE 在一天中的变化特征(图 4)。玛沁吸收峰值为 $-8.44 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, 出现在 11:00—12:00 之间, 排放峰值为 $5.02 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, 出现在 21:00—23:00 之间; 沱沱河吸收峰值为 $-1.63 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, 出现在 13:00—14:00 之间, 排放峰值为 $2.40 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$, 出现在 22:00 左右。图 4 看出, 高寒草甸和高寒荒漠草原 3、4 月的 NEE 的日变化范围相近, 5、6、7、8 月 NEE 的日变化范围差异性明显, 玛沁白天表现为强碳汇, 有着较好的日固碳能力, 沱沱河 NEE 的日波动浮动较为平缓, 白天表现为弱碳汇。

2.1.4 累计 NEE

日尺度上, 2019 年玛沁和沱沱河日平均 NEE 分别为 -0.57 g C/m^2 和 -0.48 g C/m^2 。月尺度上, 2019 年玛沁和沱沱河月平均 NEE 分别为 -14.64 g C/m^2 和 -14.59 g C/m^2 。年际尺度上, 2019 年玛沁 3—8 月累积 NEE 为 -79.50 g C/m^2 , 相比之下沱沱河的累积 NEE 为 -79.24 g C/m^2 。

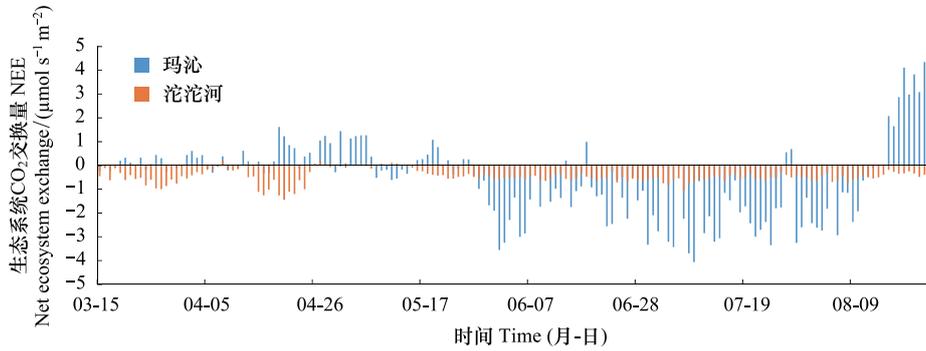


图3 NEE 日变化趋势

Fig.3 Trends in daily Evapotranspiration

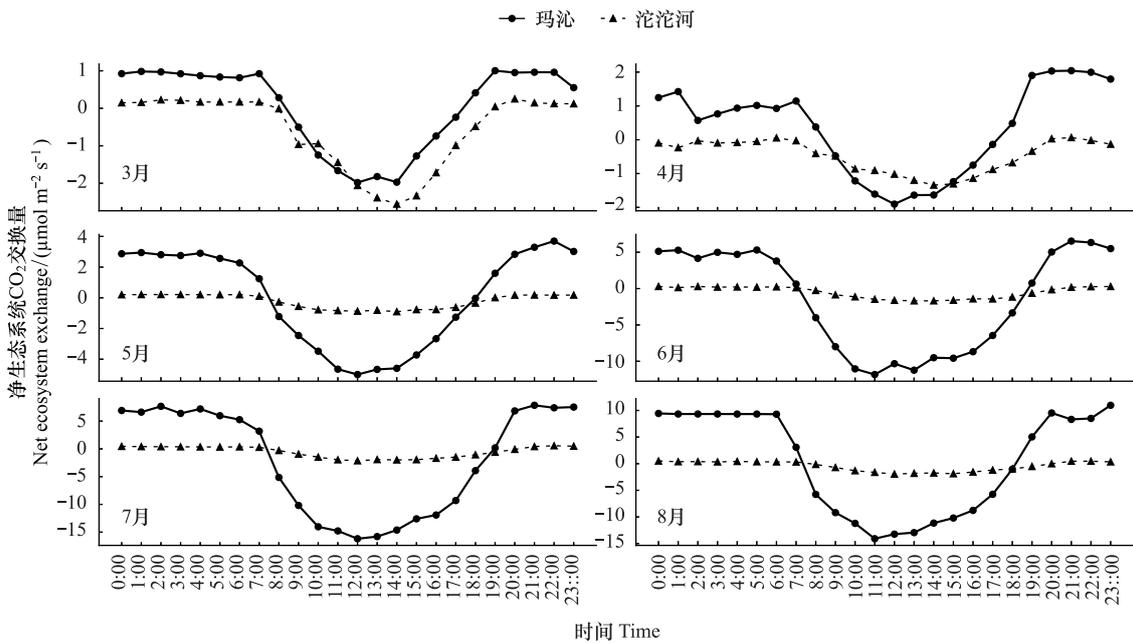


图4 NEE 小时平均变化趋势

Fig.4 Trend of hourly average NEE

2.2 环境变化对 NEE 的影响及其机制

2.2.1 环境变量的动态变化特征

净生态系统 CO₂ 交换量因为环境、水文、土壤、植被类型等诸多因素表现出不同的日变化、季节变化规律,进而表现出不同的碳收支情况,研究不同下垫面生态系统地气间的 CO₂ 交换特征,首先需要分析研究区域的气象、水文因子的变化特征。图 5 展示了玛沁高寒草甸和沱沱河高寒荒漠草原生态系统的 *ET*、*Soil_VWC*、*Soil_T*、*R_g*、*WS*、*RH*、*T_{air}* 等气象要素的变化特征。可以发现,两个生态系统下,各气象因子变化量不同,尤其 *Soil_VWC*、*R_g* 表现出了非常大的差别。玛沁 3—8 月 *Soil_VWC* 变化幅度为 13.01%—32.99%,平均 *Soil_VWC* 为 27.44%,沱沱河 3—8 月 *Soil_VWC* 变化幅度为 0.15%—0.39%,平均 *Soil_VWC* 为 0.26%,相差量达到两个数量级;玛沁 3—8 月 *R_g* 变化幅度为 60.63—387.91 W/m²,平均 *R_g* 为 242.47 W/m²,沱沱河 3—8 月 *R_g* 变化幅度为 20.62—263.34 W/m²,平均 *R_g* 为 68.62 W/m²,平均辐射相差量达到近 4 倍。

2.2.2 环境因子重要性分析

机器学习算法—随机森林(Random Forest, RF)具有很强的抗噪声能力和很高的抗过拟合和欠拟合能

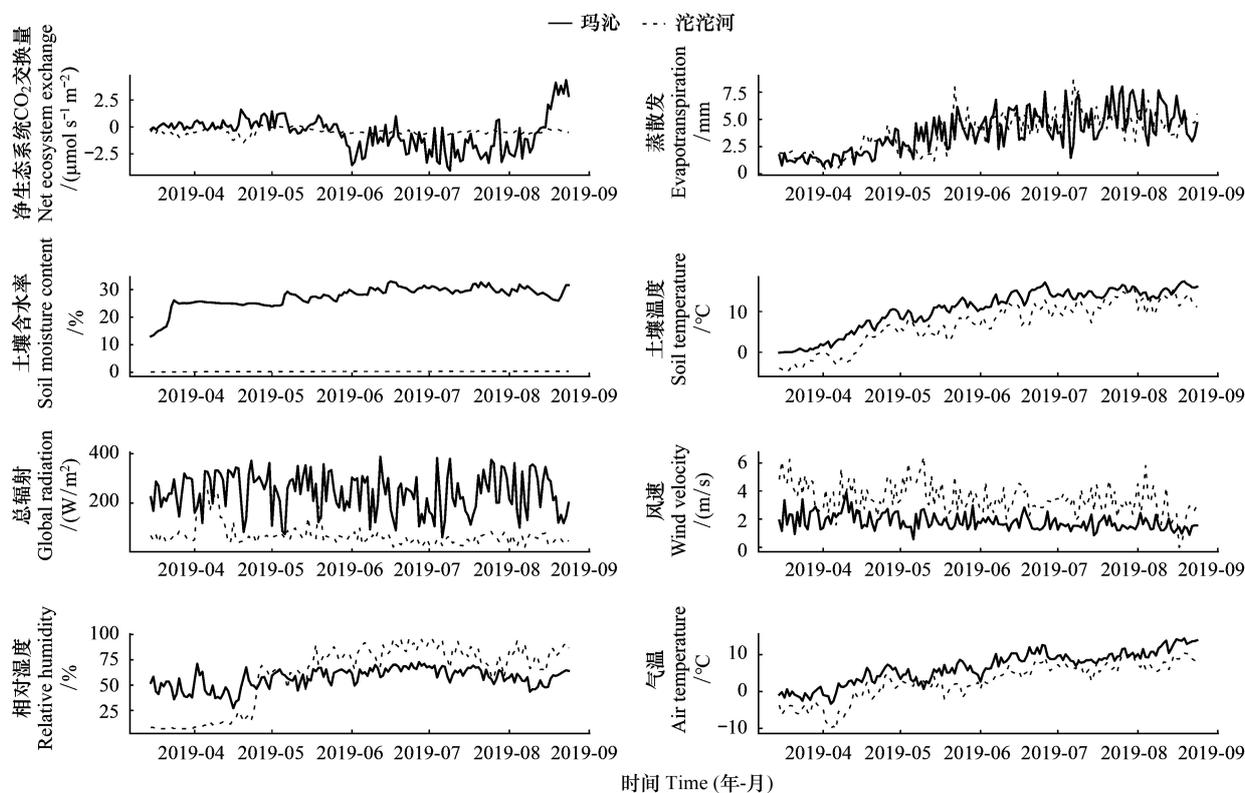


图5 气象因子动态变化特征

Fig.5 Trends of daily NEE and Meteorological factors in Maqin

力,可以处理大量混合型数据,并提供评估可变重要性分数的方法,确定日尺度和月尺度下环境变量中 NEE 的主要驱动因素 ($ET, Soil_VWC, Soil_T, R_g, WS, RH, T_{air}$),如图 6 所示。

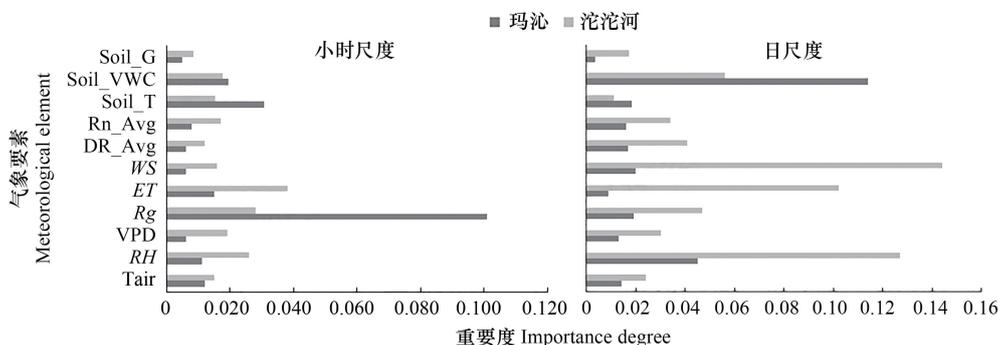


图6 影响 NEE 的气象因子重要性排序

Fig.6 The importance ranking of meteorological factors affecting NEE

NEE:净生态系统 CO₂ 交换量;ET:蒸散发;Soil_VWC:土壤含水率;Soil_T:土壤温度;R_g:总辐射;WS:风速;RH:相对湿度;T_{air}:空气温度;Soil_G:土壤热通量;Rn_Avg:净辐射;DR_Avg:入射短波辐射;VPD:水汽压饱和差

图 6 可以看出,小时尺度上 R_g 是高寒草甸 NEE 变化的主要控制因子, ET 是高寒荒漠草原 NEE 变化的主要控制因子;日尺度上 $Soil_VWC$ 是高寒草甸 NEE 变化的主要控制因子, WS 是高寒荒漠草原 NEE 变化的主要控制因子。不难发现,对于玛沁,不论是小时尺度还是日尺度,气象因子 $Soil_VWC, Soil_T, R_g$ 对 NEE 的重要性较高;对于沱沱河,气象因子 ET, RH, R_g 对 NEE 的重要性较高,说明太阳辐射是植物进行光合作用的

前提条件。另外发现,玛沁高寒草甸 NEE 对 Soil_T 的敏感性高于对 Tair 的敏感性,这一发现的原因也许是生态系统环境差异造成 Soil_T 对 NEE 的生物物理调控作用大于 Tair 对 NEE 的生物物理调控作用。

针对小时值和日值的气象因子重要度排序有所不同,为进一步分析环境因子对 NEE 的影响,选取了 11 个环境变量绘制了相关系数矩阵热力图,如图 7 所示。

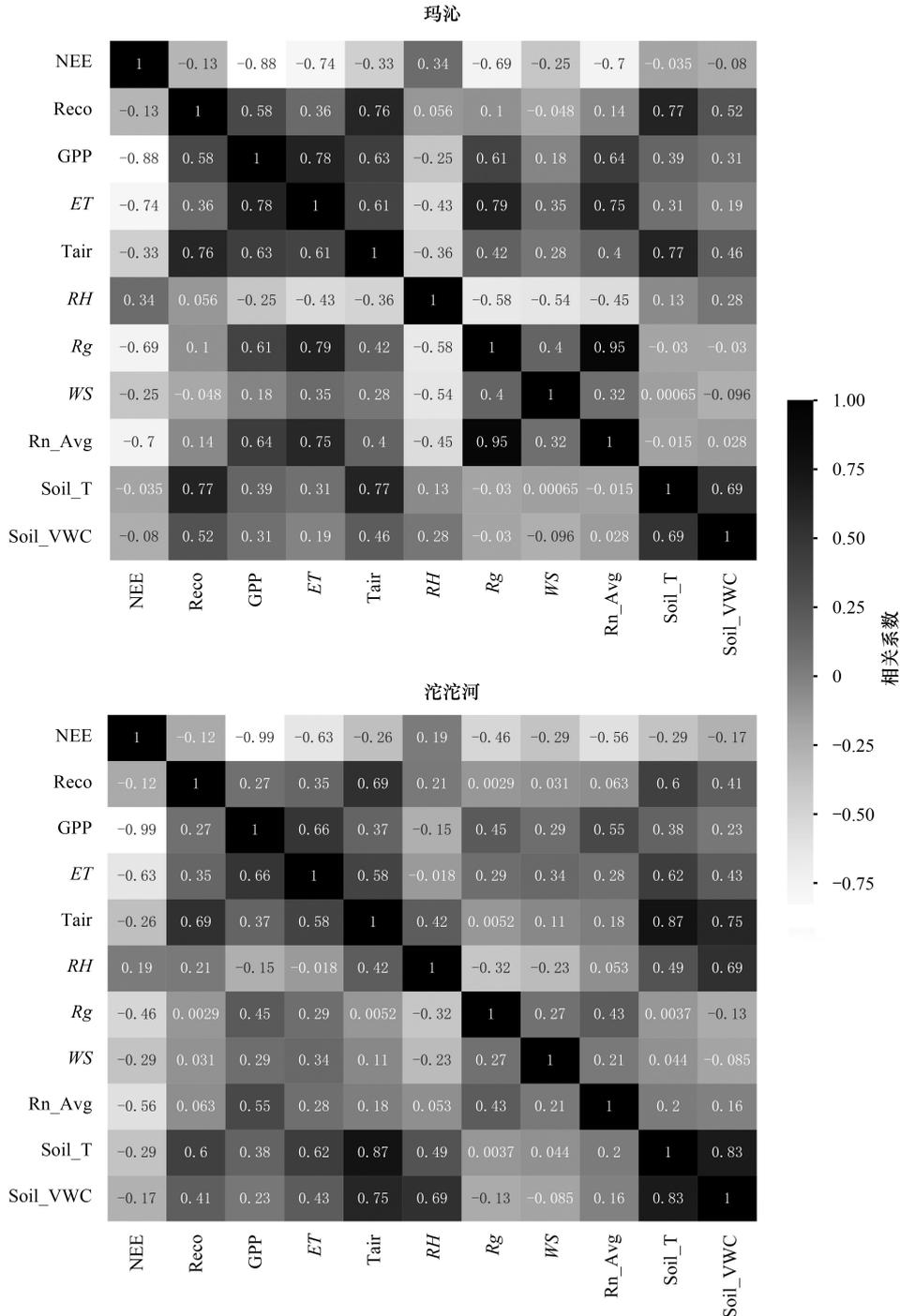


Fig.7 Correlation coefficient matrix thermal diagram

相比两个生态系统,沱沱河 WS、Soil_T、Soil_VWC 与 NEE 的相关性高于玛沁,考虑到是由于高寒草甸下垫面水分相比高寒荒漠草原充足,从而导致草甸净生态系统 CO₂交换量对土壤水分和土壤温度的敏感性低于

荒漠草原。

2.2.3 高原地区水分条件控制碳收支变化

为明晰 NEE 与气象因子的动态变化过程,以及水分条件是否成为高寒草甸和高寒荒漠草原碳和水收支变化的最重要因素,结合图 6 和图 7 选取气象因子 ET 、 $Soil_VWC$ 、 $Soil_T$ 、 R_g 、 WS 、 RH 与 NEE 绘制日尺度的变化特征,如图 8—9 所示。

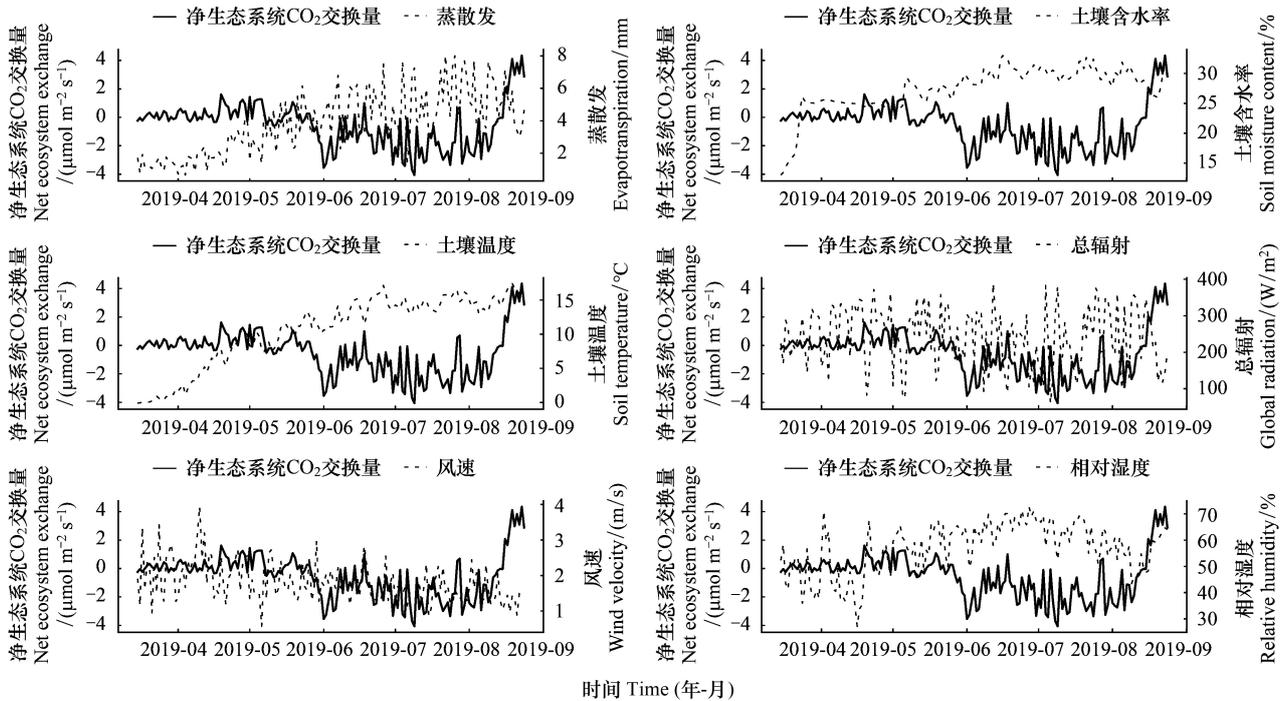


图 8 玛沁日 NEE 与气象因子变化趋势

Fig.8 Trends of daily NEE and Meteorological factors in Maqin

从图 8—9 可以看出,净生态系统呼吸(NEE)的净吸收或排放与 ET 和 $Soil_VWC$ 呈较高相关关系,NEE 在 5—6 月期间迅速下降(朝向更高的 CO_2 吸收),然后随着 ET 和 $Soil_VWC$ 的增加趋于稳定。 ET 和 $Soil_VWC$ 在 7 月左右达到最大值,而此时的 NEE 为最大负值,即达到吸收峰值,当 NEE 为正值,表现为碳排放时, ET 和 $Soil_VWC$ 下降至最低,下降幅度与碳排放速率升高幅度相近。在一定范围内,风速减小,NEE 从碳排放向碳吸收转变,吸收速率随着风速减小幅度的增大而增大;辐射越低,NEE 越容易转变为碳排放,排放速率也随着辐射减小幅度的增大而增大。总体来看,蒸散发的变化趋势与 NEE 的趋势最为相关,这是因为,植物通过气孔调节水分、能量和碳与大气的交换。这些通量的气孔调节依赖于有效能量、蒸腾需求以及根区的有效土壤水分。当可利用能量和水分都比较充足时,气孔开放,水和碳可以自由进出;气孔对地表通量的控制作用较低。当可利用能量较高但土壤水分有限时,气孔趋于关闭,对水分和碳通量^[25]施加较大的控制,这也说明了,碳交换量在水分相对充足的玛沁地区比水分有限的沱沱河地区更高的原因。

根据 3.2.1 可以看出,两个生态系统下, $Soil_VWC$ 和 R_g 表现出了非常大的差别,玛沁平均土壤含水率是沱沱河平均土壤含水率的 106 倍,玛沁平均辐射是沱沱河平均辐射的 4 倍。由于 $Soil_VWC$ 和 R_g 表现出不同的变化特征,导致不同下垫面生态系统地气间的 CO_2 交换特征差异明显,在一定范围内, R_g 的增大导致 NEE 呼吸作用增大的趋势,然而超过一定阈值后,NEE 呼吸作用有减少的趋势,说明 R_g 可以增强呼吸作用,而当 R_g 超过一定范围时,在高光强或水分匮乏的条件下,植被气孔导度迅速减小,光合作用或呼吸作用受到抑制。

ET 、 $Soil_VWC$ 成为驱动 NEE 的控制因子,是因为温度和水分影响植物生理过程的酶活性^[26],进而影响

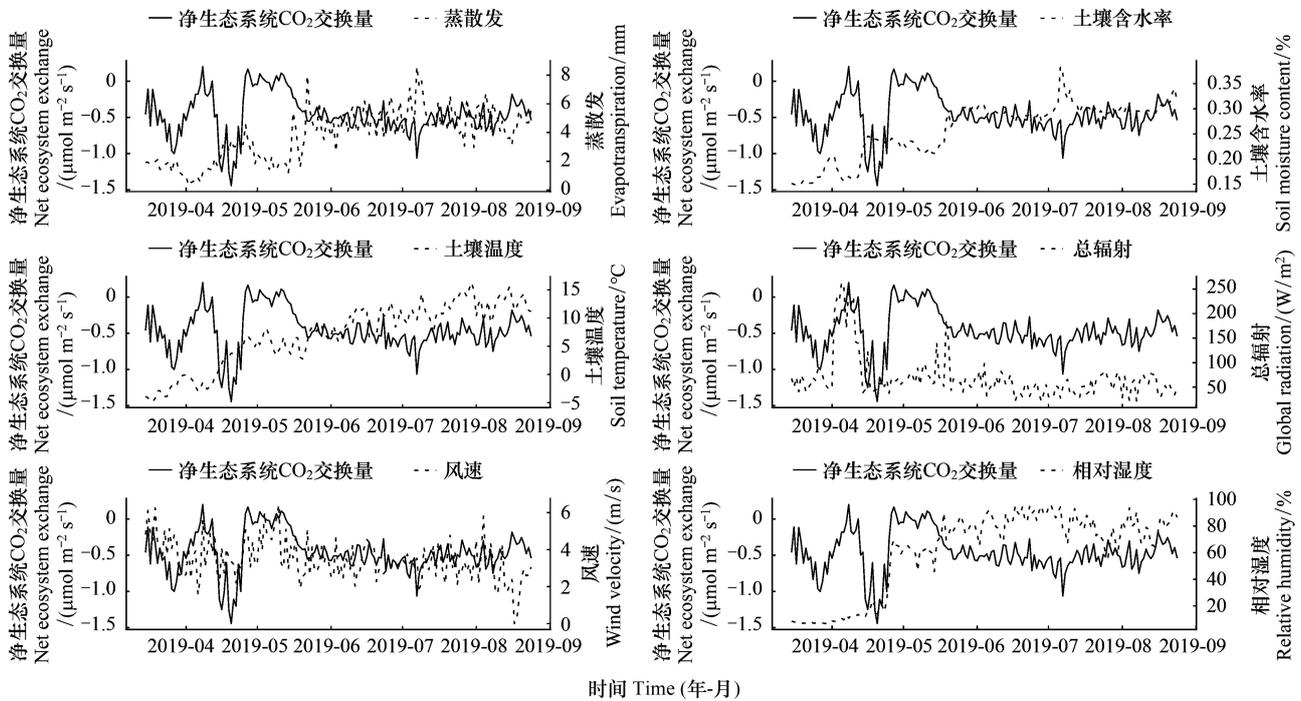


图9 沱沱河日 NEE 与气象因子变化趋势

Fig.9 Trends of daily NEE and Meteorological factors in Tuotuo River

生态系统的光合作用,这与 Hongqin Li^[16]对水分条件(大气水蒸汽和土壤水分)是控制高山草原碳和水收支空间变化的最重要因素的研究结论一致。因为在水分有限的生态系统中, ET 是植被水分可用性的综合度量标准^[27-28],因为植被从深根或侧根获取水分的能力因下垫面和生态系统的不同而不同。因此, ET 解释了水分输入的变化,以及影响能量平衡的植物气孔调节和其他植被特征的差异。再者 ET 是通过与 NEE 相同的仪器、相同的时间尺度、相同的通量足迹上进行测量的,可以更能反应 NEE 对环境变量的敏感性。由此我们分析了玛沁和沱沱河 NEE、 ET 、Soil_VWC 的变化趋势,如图 10 所示,NEE 和 ET 呈现出明显的季节变化,结合图 11,表明随着温度的升高,玛沁春季生态系统呼吸作用大于光合作用,NEE 稳定在较低水平,夏季生态系统光合作用高于呼吸作用。沱沱河在整个生长季生态系统光合作用大于呼吸作用,NEE 整体上表现为负值,生态系统为一个碳汇。

研究表明,半干旱生态系统可以调节陆地碳汇并控制其年际变化^[29-30]。这种可变性主要是由于构成 NEE 的两个较大的生物源通量之间的不平衡造成的,即 CO_2 的光合吸收(GPP)和 CO_2 的呼吸释放(Reco)。2019 年,玛沁和沱沱河日平均 GPP 分别是 6.25 g C/m^2 和 0.79 g C/m^2 ,日平均 Reco 分别为 5.68 g C/m^2 和 0.32 g C/m^2 ;月平均 GPP 分别是 181.12 g C/m^2 和 24.18 g C/m^2 ,月平均 Reco 分别为 166.48 g C/m^2 和 9.59 g C/m^2 ;3—8 月累积 GPP 分别是 984.05 g C/m^2 和 131.36 g C/m^2 ,累积 Reco 分别为 904.55 g C/m^2 和 52.12 g C/m^2 。在 REddyProc 中是根据土壤和空气温度计算 Reco^[19,24,31-33],玛沁地区的物候模式表明,该地点可能在雨季成为碳汇,也可能在旱季成为碳源,因为一些主要物种在冬季和春季繁殖。从两站的 NEE、GPP、Reco 的月变化特征看出,土壤和空气温度升高,植物根系的呼吸作用和土壤微生物的生命活动变得活跃,随着年内植被结构的发展,碳吸收量增加,直到生长季中期达到最大值。NEE 峰值出现在播种后约 2 个月(7 月),与植被生长峰值相对应。Reco 和 NEE 都受到 GPP 的显著限制,高寒草甸 GPP 的 91%对 Reco 有贡献,9%对 NEE 有贡献;高寒荒漠草原 GPP 的 40%对 Reco 有贡献,60%对 NEE 有贡献。在日尺度上的回归分析表明,相比 Reco,GPP 对 NEE 贡献更大,如图 12 所示,高寒荒漠草原沱沱河 NEE 与 GPP 之间有显著相关性,说明高寒荒漠草原 GPP 对 NEE 的影响远大于高寒草甸 GPP 对 NEE 的影响。

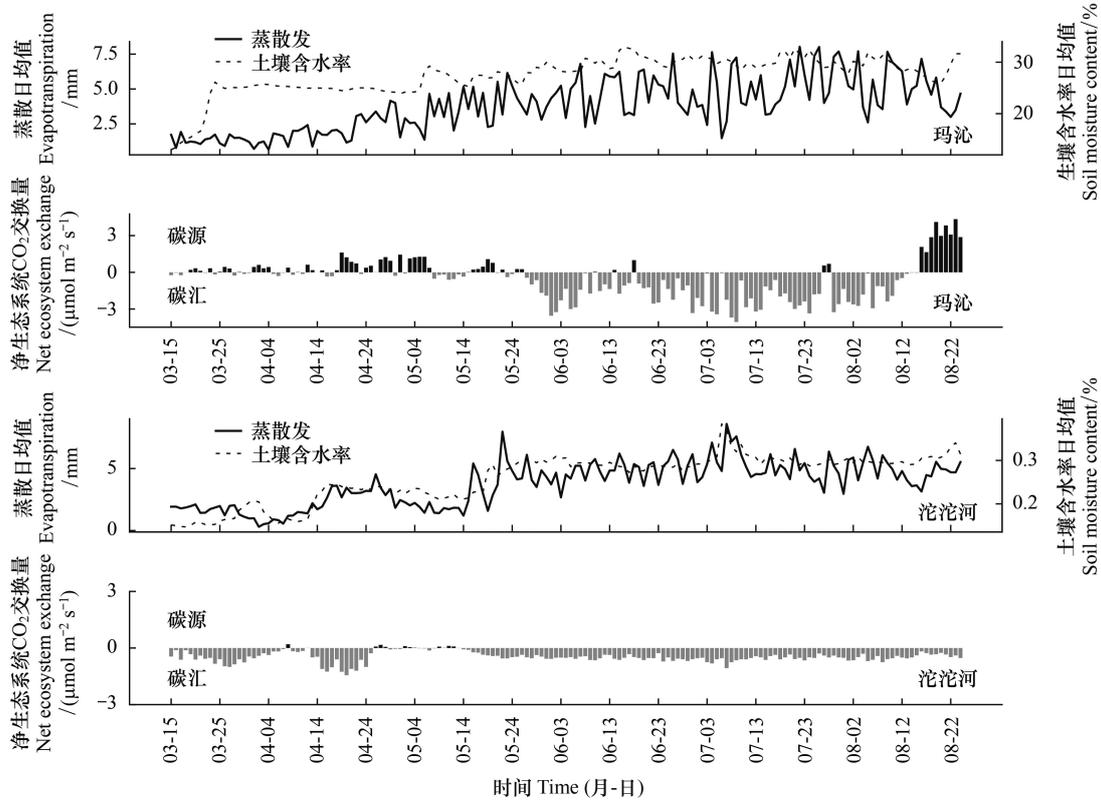


图 10 NEE 与 ET、Soil_VWC 的变化趋势

Fig.10 Trends of NEE and ET, Soil_VWC

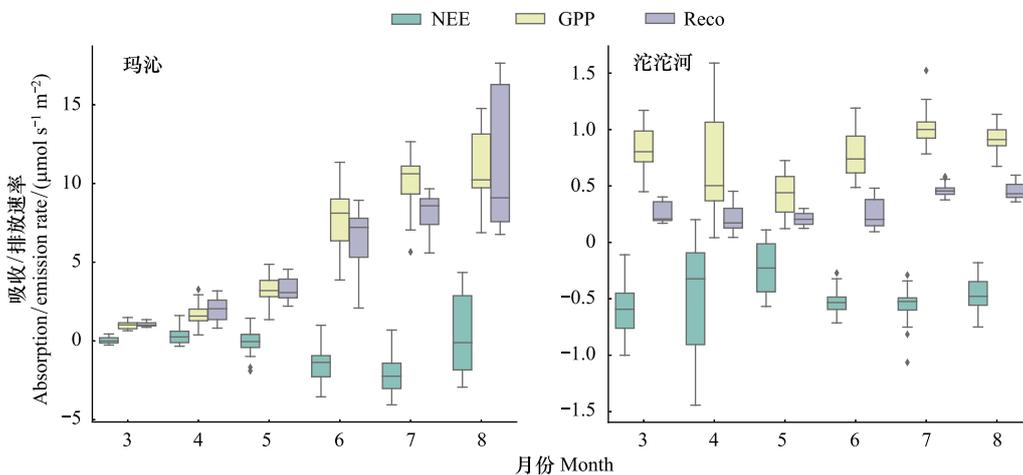


图 11 2019 年 NEE、GPP、Reco 月均值统计分布图

Fig.11 Statistical distribution of monthly mean NEE, GPP, Reco flux of in 2019

可以看出, *ET* 和 *NEE* 的交互过程较为同步, 从图 13 表明, *ET* 与 *GPP* 的关系比 *ET* 与 *Reco* 的关系更强, 这是因为 *ET* 和 *GPP* 是陆地生态水文过程的重要组成部分, 受叶片气孔调节的影响下, 通过蒸腾作用和光合作用密切耦合, 从而在气候情景变化下表现出相似的响应特征。 *ET* 对生态系统光合作用的驱动性大于对呼吸作用的驱动性, 明确了 *ET* 对生态系统光合作用的重要性, 表明水分条件是控制高寒草甸和高寒荒漠草原碳和水收支变化的最重要因素, 因此在青藏高原变暖或变干燥的气候背景下, 固碳功能也会受到抑制。

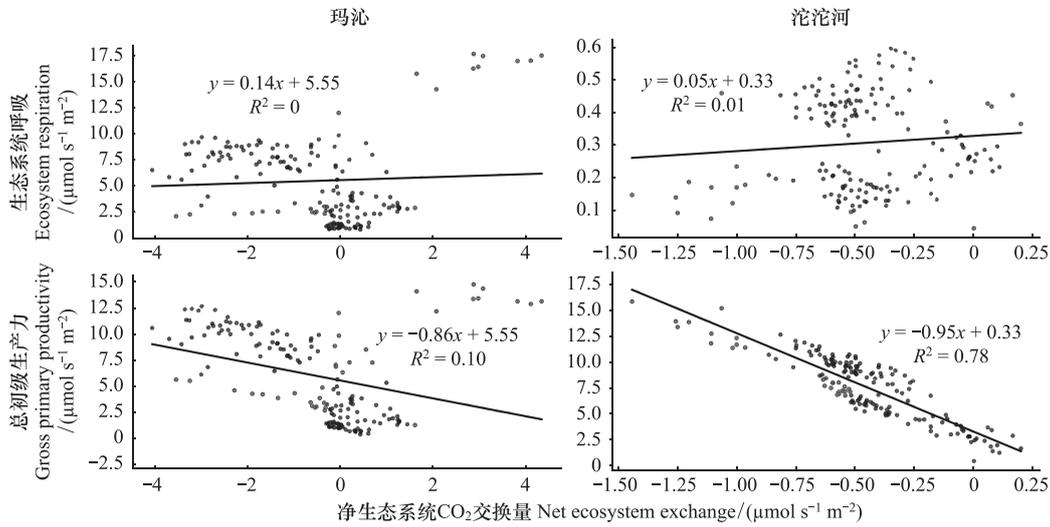


图 12 NEE 和 Reco,GPP 的拟合程度

Fig.12 The fitting degree of NEE with Reco and GPP

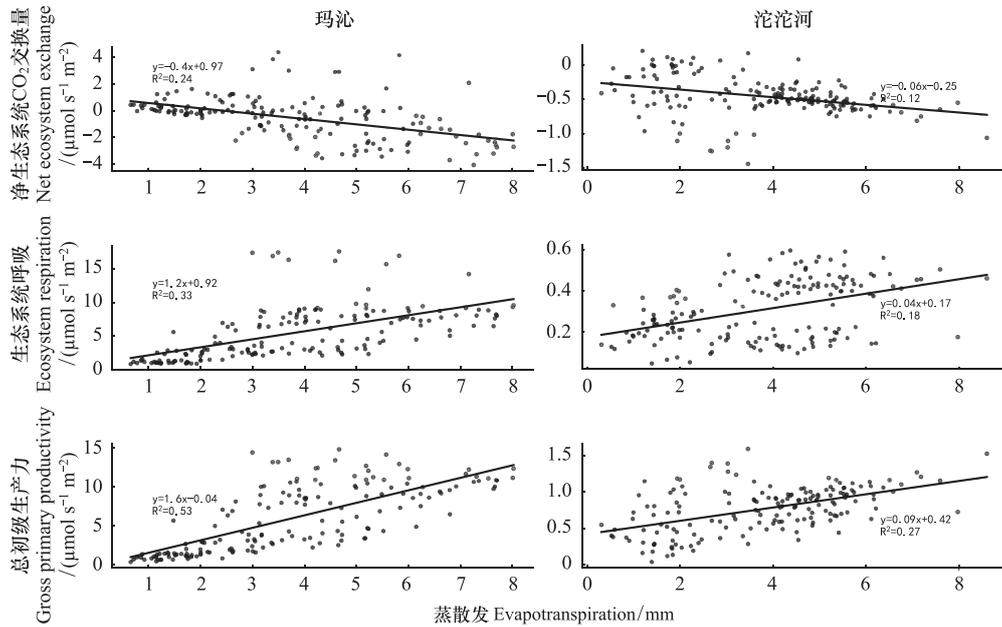


图 13 NEE、Reco、GPP 与 ET 的拟合程度

Fig.13 The fitting degree of ET with NEE, Reco and GPP

3 讨论

3.1 净生态系统 CO₂ 交换

本研究结果表明,玛沁在6—7月以吸收为主,表现为碳汇。3、4、5、8月以排放为主,表现为碳源;日吸收峰值出现在11:00—12:00之间,日排放峰值出现在21:00—23:00之间;沱沱河在3—8月以吸收为主,表现为净碳汇,日吸收峰值出现在13:00—14:00之间,日排放峰值出现在22:00左右。NEE峰值出现在返青后约2个月(7月),与植被生长峰值相对应,这与朱志鹏^[1],祝景彬^[3]及柴曦^[4]的研究结果一致。高寒草甸玛沁的日吸收峰值和日排放峰值都远高于高寒荒漠草原,可能原因是植被生长季雨水和热量的同步化和植物生长季

的低温和降水使得气候寒冷潮湿。这种气候为高寒草甸生态系统提供了良好的光合条件和有利于碳同化的低有机物分解速率。

3.2 净生态系统 CO₂交换的主要环境控制因子

小时尺度上,玛沁地区气象因子对 NEE 的重要度大小为: $R_g > \text{Soil_T} > \text{Soil_VWC} > ET > T_{air}$, 沱沱河地区气象因子对 NEE 的重要度大小为: $ET > R_g > RH > VPD > \text{Soil_VWC}$ 。日尺度上,玛沁地区气象因子对 NEE 的重要度大小为: $\text{Soil_VWC} > RH > WS > R_g > \text{Soil_T}$, 沱沱河地区气象因子对 NEE 的重要度大小为: $WS > RH > ET > \text{Soil_VWC} > R_g$ 。Jinkui Wu 等^[34]的研究表明,对于具有明显的旱涝季节或年份的生态系统,碳和水通量的驱动因素往往在不同尺度和不同生长阶段表现出明显的差异性。

生态系统碳和水循环受植物气孔导度的耦合和调控,而植物的呼吸作用和光合作用的反馈机制表明 Reco 和 NEE 都受到 GPP 的显著限制,本研究结果表明,玛沁高寒草甸 GPP 的 91% 对 Reco 有贡献 9% 对 NEE 有贡献;沱沱河高寒荒漠草原 GPP 的 40% 对 Reco 有贡献,60% 对 NEE 有贡献。在日尺度上,相比 Reco, GPP 对 NEE 贡献更大,并且高寒荒漠草原 GPP 对 NEE 的影响远大于高寒草甸 GPP 对 NEE 的影响。Yuyang Wang 等^[11]的研究结果指出, GPP 和 Reco 对净碳吸收影响重要,尤其是在生长季没有水分胁迫的情况下尤为重要,因为冻土融化和充足的降水为植被生长提供了足够的水分。在非生长季节,低温会使植物枯萎,水分胁迫对 Reco 的影响不大。

温度和水分影响植物生理过程的酶活性,进而影响生态系统的光合作用。从本研究的结果中可以看出, ET 和 NEE 的交互过程较为同步,但是 ET 对生态系统光合作用的驱动性大于对呼吸作用的驱动性,进而明确了 ET 对生态系统光合作用的重要性,表明水分条件是控制高寒草甸和高寒荒漠草原碳和水收支变化的最重要因素,因此在青藏高原变暖或干旱的气候背景下,固碳功能也会受到抑制。

3.3 人类活动对净生态系统 CO₂交换的影响

玛沁 3、4、5、8 月表现为弱碳源,理论上,高寒草甸生态系统在夏季应该以碳吸收为主,表现为碳汇。究其原因可以概括为下:玛沁站址,是一个天然牧场,但是,近两年有牧民在春、夏两季牵至附近放牧和短期过渡性居住。放牧导致的原生覆盖物的移除造成草地退化,导致土壤肥力降低,进一步导致 GPP 下降,导致正碳平衡,从而成为碳源。加之,人类呼吸和异氧呼吸作用加速了人为排放。在这些因素的共同作用下,玛沁的碳动态变化呈现碳源的趋势。因此,人类活动加剧了气候变化的影响和碳平衡的易感性,成为碳汇源变化的诱导因素。研究结果明晰了人类活动在地-气间 CO₂通量时空变化特征和碳汇源变化过程中扮演着重要角色,从而有助于更好地了解碳通量的空间格局和环境控制。

4 结论

本研究基于涡度相关法,观测了 2019 年玛沁高寒草甸和沱沱河高寒荒漠草原与大气界面的 CO₂通量,通过 REddyProc、随机森林(RF)进行了数据后处理,探讨了不同尺度下净生态系统 CO₂交换量动态特征,并分析了相关环境因子对净生态系统 CO₂交换量的影响,得出的主要结果如下:(1)玛沁白天表现为强碳汇,有着较好的日固碳能力,沱沱河 NEE 的日波动浮动较为平缓,白天表现为弱碳汇。(2)不同尺度不同下垫面,气象因子对 NEE 的重要程度不同,蒸散发和土壤含水率对 NEE 有着不可忽视的作用。总之,水分条件成为影响净生态系统 CO₂交换量的重要因子。但是,随着人类活动的影响,碳通量变化特征产生变化,因此,人类活动与气候系统之间的相互作用需要立即关注和研究。对地表大气通量的长期监测将使我们能够改进对未来天气、气候系统及其对我们社会影响的预测。

参考文献(References):

- [1] 朱志鹏,马耀明,胡泽勇,李茂善,孙方林. 青藏高原那曲高寒草甸生态系统 CO₂净交换及其影响因子. 高原气象, 2015, 34(5): 1217-1223.

- [2] 王兴昌, 王传宽. 森林生态系统碳循环的基本概念和野外测定方法评述. 生态学报, 2015, 35(13): 4241-4256.
- [3] 祝景彬, 贺慧丹, 李红琴, 张法伟, 李英年, 杨永胜, 张光茹, 王春雨, 罗方林. 青藏高原高寒灌丛 2003—2016 年生长季的不同月份 CO₂ 通量对气温日较差的响应. 生态学报, 2020, 40(23): 8773-8782.
- [4] 柴曦, 李英年, 段呈, 张涛, 宗宁, 石培礼, 何永涛, 张宪洲. 青藏高原高寒灌丛草甸和草原化草甸 CO₂ 通量动态及其限制因子. 植物生态学报, 2018, 42(1): 6-19.
- [5] 吴方涛, 曹生奎, 曹广超, 汉光昭, 林阳阳, 成淑艳. 青海湖高寒藏嵩草湿草甸湿地生态系统 CO₂ 通量变化特征. 生态与农村环境学报, 2018, 34(2): 124-131.
- [6] 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏. 基于涡度相关技术估算植被/大气间净 CO₂ 交换量中的不确定性. 地球科学进展, 2004, 19(4): 658-663.
- [7] 陈世苹, 游翠海, 胡中民, 陈智, 张雷明, 王秋风. 涡度相关技术及其在陆地生态系统通量研究中的应用. 植物生态学报, 2020, 44(4): 291-304.
- [8] 刘晨峰, 张志强, 查同刚, Ge Sun, Chen Jiquan, 朱金兆, 申李华, 张津林, 陈军, 崔令军. 涡度相关法研究土壤水分状况对沙地杨树人工林生态系统能量分配和蒸散日变化的影响. 生态学报, 2006, 26(8): 2549-2557.
- [9] Liu S B, Zamanian K, Schleuss P M, Zarebanadkouki M, Kuzyakov Y. Degradation of Tibetan grasslands: consequences for carbon and nutrient cycles. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 93-104.
- [10] Georg Miehe, Per-Marten, Schleuss, Elke Seeberc, Wolfgang Babel, Tobias Biermann, Martin Braendle, Fahu Chen, Heinz Coners, Thomas Foken, Tobias Gerken, Hans-F. Graf, Georg Guggenberger, Silke Hafner, Maika Holzapfel, Johannes Ingrisch, Yakov Kuzyakov, Zhongping Lai, Lukas Lehnert ... Karsten Wesche. The Kobresia pygmaea ecosystem of the Tibetan highlands-Origin, functioning and degradation of the world's largest pastoral alpine ecosystem: Kobresia pastures of Tibet. *Sci. Total Environ*, 2019. 648, 754-771.
- [11] Wang Y Y, Xiao J F, Ma Y M, Luo Y Q, Hu Z Y, Li F, Li Y N, Gu L L, Li Z G, Yuan L. Carbon fluxes and environmental controls across different alpine grassland types on the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 311: 108694.
- [12] Li Z, Chen Y N, Wang Y, Fang G H. Dynamic changes in terrestrial net primary production and their effects on evapotranspiration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(6): 2169-2178.
- [13] Sun X M, Wen X F, Yu G R, Liu Y F, Liu Q J. Seasonal drought effects on carbon sequestration of a mid-subtropical planted forest of southeastern China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(2): 110-118.
- [14] 权晨, 周秉荣, 韩永翔, 赵天良, 肖建设. 长江源区高寒退化湿地地表蒸散特征研究. 冰川冻土, 2016, 38(5): 1249-1257.
- [15] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [16] Li H Q, Wang C Y, Zhang F W, He Y T, Shi P L, Guo X W, Wang J B, Zhang L M, Li Y N, Cao G M, Zhou H K. Atmospheric water vapor and soil moisture jointly determine the spatiotemporal variations of CO₂ fluxes and evapotranspiration across the Qinghai-Tibetan Plateau grasslands. *Science of the Total Environment*, 2021, 791: 148379.
- [17] Moffat A M, Papale D, Reichstein M, Hollinger D Y, Richardson A D, Barr A G, Beckstein C, Braswell B H, Churkina G, Desai A R, Falge E, Gove J H, Heimann M, Hui D F, Jarvis A J, Kattge J, Noormets A, Stauch V J. Comprehensive comparison of gap-filling techniques for eddy covariance net carbon fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147(3/4): 209-232.
- [18] Eva Falge, Dennis Baldocchi, Richard Olson, Peter Anthoni, Marc Aubinet, Christian Bernhofer, George Burba, Reinhart Ceulemans, Robert Clement, Han Dolman, André Granie, Patrick Gross, Thomas Grünwald, David Hollinger, Niels-Otto Jensen, Gabriel Katul, Petri Keronen, Andrew Kowalski, Chun Ta Lai, Beverley E. Law, Tilden Meyers, John Moncrieff, Eddy Moors, J. William Munger, Kim Pilegaard, Ilar Rannik, Corinna Rebmann, Andrew Suyker, John Tenhunen, Kevin Tu, Shashi Verma, Timo Vesala, Kell Wilson, Steve Wofsy. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [19] Desai A R, Richardson A D, Moffat A M, Kattge J, Hollinger D Y, Barr A, Falge E, Noormets A, Papale D, Reichstein M, Stauch V J. Cross-site evaluation of eddy covariance GPP and RE decomposition techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(6/7): 821-838.
- [20] 刘敏, 何洪林, 于贵瑞, 孙晓敏, 朱旭东, 张黎, 赵新全, 王辉民, 石培礼, 韩士杰. 数据处理方法不确定性对 CO₂ 通量组分估算的影响. 应用生态学报, 2010, 21(9): 2389-2396.
- [21] 黄昆, 王绍强, 王辉民, 仪垂祥, 周蕾, 刘允芬, 石浩. 中亚热带人工针叶林生态系统碳通量拆分差异分析. 生态学报, 2013, 33(17): 5252-5265.
- [22] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 2006, 3(4): 571-583.
- [23] Aubinet M, Vesala T, Papale D. *Eddy Covariance*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2012.
- [24] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grünwald T,

- Havránková 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.
- [25] Mallick K, Trebs I, Boegh E, Giustarini L, Schlerf M, Drewry D T, Hoffmann L, von Randow C, Kruijt B, Araújo A, Saleska S, Ehleringer J R, Domingues T F, Ometto J P H B, Nobre A D, de Moraes O L L, Hayek M, Munger J W, Wofsy S C. Canopy-scale biophysical controls of transpiration and evaporation in the Amazon Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(10): 4237-4264.
- [26] 陈梓涵. 九段沙潮汐盐沼湿地 CO₂ 通量及影响机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020: 1-80.
- [27] Biederman J A, Scott R L, Bell T W, Bowling D R, Dore S, Garatuza-Payan J, Kolb T E, Krishnan P, Krofcheck D J, Litvak M E, Maurer G E, Meyers T P, Oechel W C, Papuga S A, Ponce-Campos G E, Rodriguez J C, Smith W K, Vargas R, Watts C J, Yezpe E A, Goulden M L. CO₂ exchange and evapotranspiration across dryland ecosystems of southwestern North America. *Global Change Biology*, 2017, 23(10): 4204-4221.
- [28] Scott R L, Knowles J F, Nelson J A, Gentine P, Li X, Barron-Gafford G, Bryant R, Biederman J A. Water availability impacts on evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 297: 108251.
- [29] Piao S L, Liu Q, Chen A P, Janssens I A, Fu Y S, Dai J H, Liu L L, Lian X, Shen M G, Zhu X L. Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 2019, 25(6): 1922-1940.
- [30] Scott R L, Biederman J A, Hamerlynck E P, Barron-Gafford G A. The carbon balance pivot point of southwestern US semiarid ecosystems: insights from the 21st century drought. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2015, 120(12): 2612-2624.
- [31] Lasslop G, Reichstein M, Papale D, Richardson A D, Arneeth A, Barr A, Stoy P, Wohlfahrt G. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 187-208.
- [32] Sulman B N, Roman D T, Scanlon T M, Wang L X, Novick K A. Comparing methods for partitioning a decade of carbon dioxide and water vapor fluxes in a temperate forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 226/227: 229-245.
- [33] Keenan T F, Migliavacca M, Papale D, Baldocchi D, Reichstein M, Torn M, Wutzler T. Widespread inhibition of daytime ecosystem respiration. *Nature Ecology & Evolution*, 2019, 3(3): 407-415.
- [34] Wu J K, Wu H, Ding Y J, Qin J, Li H Y, Liu S W, Zeng D. Interannual and seasonal variations in carbon exchanges over an alpine meadow in the northeastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau, China. *PLoS One*, 2020, 15(2): e0228470.