

李青青,甘永德,刘艳强,等.灌丛草地生态系统非生长季碳通量及影响因素[J].环境科学与技术,2025,48(3):1-9. Li Qingqing, Gan Yongde, Liu Yanqiang, et al. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in the shrubland-grassland ecosystem during the non-growing season and its influencing factors[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(3): 1-9.

# 灌丛草地生态系统非生长季碳通量及影响因素

李青青<sup>1</sup>, 甘永德<sup>1\*</sup>, 刘艳强<sup>1</sup>, 孙君文<sup>1</sup>,  
吴玉帅<sup>1</sup>, 靳润芳<sup>2</sup>

(1. 青海大学土木水利学院, 青海 西宁 810016;  
2. 河南省水利勘测设计研究院有限公司, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 湟水河流域分布着广泛的灌丛草地,其非生长季碳收支平衡对整个生态系统具有重要意义,但目前对灌丛草地生态系统非生长季碳通量的动态变化及其与环境因子间的关系知之甚少。因此,该研究基于涡度观测系统,探讨湟水河流域灌丛草地生态系统碳通量特征及其主要影响因子。研究表明:研究区非生长季净生态系统碳交换量(NEE)呈明显的“U”型变化曲线,白天多为碳吸收,夜间为碳排放,日间碳吸收峰值出现在12:00-15:00之间,研究期间各月累计NEE均为负值。研究期间温度(空气温度、土壤温度)、相对湿度、饱和水汽压差和光合有效辐射均对NEE产生显著影响。此外,灌丛草地生态系统对温度较为敏感,在整个非生长季光合作用均较为明显,整个非生长季灌丛草地生态系统NEE累计为-376.938 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>,是一个弱的碳汇。

**关键词:** 涡度相关; 碳通量; 灌丛草地; 非生长季; 影响因子

中图分类号: X171.1 文献标志码: A doi: 10.19672/j.cnki.1003-6504.1714.24.338 文章编号: 1003-6504(2025)03-0001-09

## Net Ecosystem CO<sub>2</sub> Exchange in the Shrubland-grassland Ecosystem During the Non-growing Season and Its Influencing Factors

LI Qingqing<sup>1</sup>, GAN Yongde<sup>1\*</sup>, LIU Yanqiang<sup>1</sup>, SUN Junwen<sup>1</sup>,  
WU Yushuai<sup>1</sup>, JIN Runfang<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Water Resources, Qinghai University, Xining 810016, China;

2. Henan Water Conservancy Survey, Design and Research Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** The non-growing season carbon budget balance is of great significance to the whole ecosystem. However, there is limited knowledge regarding the dynamic alterations of carbon flux in the non-growing season and its association with environmental factors. Therefore, based on vorticity observation system, this study discussed the carbon flux characteristics and main influencing factors of shrub grassland ecosystem in the Huangshui River. The results showed that the non-growing season net ecosystem carbon exchange (NEE) in the study area showed an obvious U-shaped change curve, with carbon uptake in the daytime and carbon emission at night. The peak of carbon uptake in the daytime occurred between 12:00 and 15:00, and the cumulative NEE was negative in all months during the study period. During the study period, temperature (air temperature, soil temperature), relative humidity, saturated vapor pressure difference, light and effective radiation all had significant effects on NEE. In addition, the shrub grassland ecosystem was more sensitive to temperature and photosynthesis was obvious in the whole non-growing season. The total NEE of the shrub grassland ecosystem in the whole non-growing season was -376.938 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, which was a weak carbon sink.

**Key words:** vorticity correlation; carbon flux; shrub grassland; off-growing season; influencing factor

工业革命以来,化石燃料的燃烧以及森林的砍伐,引起大气中CO<sub>2</sub>浓度升高,造成全球气候变暖<sup>[1]</sup>,而陆地生态系统的碳汇过程降低了大气中CO<sub>2</sub>累积

的速率,但碳汇的数量和分布情况尚未得到确定<sup>[2]</sup>。由于地理位置及气象条件的限制,对生态系统碳通量及环境因子的变化进行长期监测具有一定的难度。

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期:2024-10-11;修回2024-12-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3206303);水联网联合开放基金项目(sk1hse-2023-low07)

作者简介:李青青(1999-),女,硕士研究生,研究方向为水文与水资源,(电子信箱)2933417059@qq.com;\*通讯作者,(电子信箱)bfganyd@163.com。

涡度相关法是目前测定生态系统水热碳通量的一种直接、准确的方法<sup>[3]</sup>,其观测原理是将空气流动看作无数个湍流,利用物理量的脉动和垂直风速脉动的协方差来计算湍流通量。涡度观测方法物理基础完备、理论假设少,可以实现对水热碳通量的长期、连续、非破坏性检测<sup>[4]</sup>。因此越来越多的学者基于涡度观测,研究生态系统碳通量的动态变化及其与环境因子间的关系<sup>[5-7]</sup>。

在气候变暖背景下,生态系统的碳汇能力及其动态变化逐渐成为研究的热点。非生长季作为生态系统组成的一部分,其碳收支情况对生态系统有重要意义<sup>[8]</sup>。冬季生态系统呼吸主要受土壤温度影响,即使土壤温度低于0℃,生态系统仍进行呼吸作用<sup>[9]</sup>。其次,在适宜环境中少数常绿植物也能进行光合作用<sup>[10,11]</sup>。研究表明,在冬季常出现无霜期的地方,常绿针叶林和冬季一年生植物可能在温和天气进行光合作用<sup>[12]</sup>,高山植物的光合作用可以在0℃以下进行,只要温度高于叶片的冰点温度<sup>[9]</sup>,并且植物光合作用的最低温度会随生物和非生物因素而发生变化<sup>[13]</sup>。在温度接近-2℃时,科罗拉多亚高山森林生态系统<sup>[14]</sup>的光合作用碳吸收速率为5 μmol/(m<sup>2</sup>·s),阿拉斯加北极矮灌木<sup>[15]</sup>在叶片温度为-4.7℃时,光合作用碳吸收速率为1.0 μmol/(m<sup>2</sup>·s)。此外,生态系统碳收支的动态变化还受环境因子的影响,比如太阳辐射能直接影响植物光合作用原料CO<sub>2</sub>的有效转化<sup>[13]</sup>;温度和水分会影响植物生理过程的酶活性,进而会对生态系统的碳交换过程产生影响<sup>[16]</sup>。综上所述,非生长季生态系统的碳收支情况存在较大不确定性,应对其进行进一步研究。

湟水流域位于西北干旱半干旱生态过渡带,受人类活动和自然条件影响,该区域水土流失较为严重,且区域内森林资源少分布零星,灌丛是该区域的主要植被类型<sup>[17]</sup>。灌丛植被多耐寒、抗旱性较强,根系十分发达,能够适应并改善恶劣的外界环境,在高原地区的生态环境保护 and 能源代替方面有不可替代的作用。本研究利用涡度观测系统获取位于青海省互助县湟水河流域下沙沟地区灌丛草地生态系统2023年11月-2024年4月的通量及气象数据,研究灌丛草地生态系统非生长季碳通量变化特征及主要环境因子与碳收支的关系。通过开展非生长季灌丛草地生态系统碳通量及其驱动因子的研究,可以增强研究者对灌丛草地生态系统关于气候变化适应过程的认识,评估灌丛草地生态系统的碳交换潜力,明晰研究区碳收支情况,为今后研究灌丛草地生态系统碳收支提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省东部、海东市北部(36.5843°N、102.117°E,海拔2 431.5 m),属于黄河流域、湟水水系,位置如图1所示。观测时间为2023年11月-2024年4月,该区域属大陆寒温带气候,受西伯利亚季风和东南沿海台风影响,平均气温5.8℃,降水量47.4 mm,蒸发量1 198.3 mm,观测期间最高气温为27.78℃,最低温度为-18.90℃。研究区以沙棘、柠条、骆驼蓬、白莲蒿等灌丛及草地为主,间或生长着部分青海云杉、侧柏等树木,植被覆盖度高。

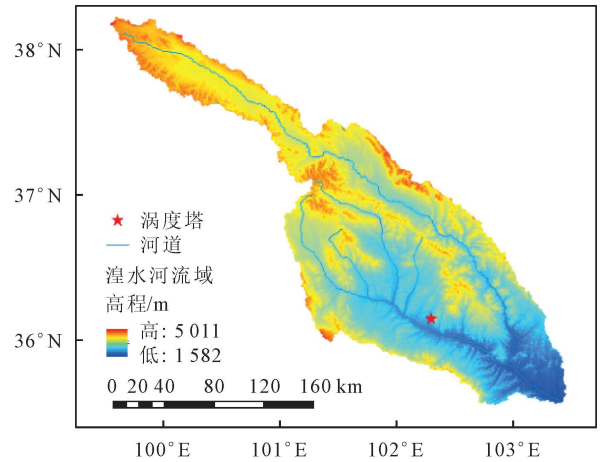


图1 研究区地理位置

Fig.1 Geographical location of the study area

### 1.2 涡度观测系统

本研究采用涡度相关(EC)系统在下沙沟地区展开通量及气象数据的实时动态监测工作,系统由三维超声风速仪(Wind Master Pro,LI-Cor,美国)和开路式气体分析仪(LI-7500DS,LI-Cor,美国)在距离地面20 m处测量CO<sub>2</sub>通量,采集频率为10 Hz,同时在通量塔上安装有气象观测设备,在地下5、20、40 cm处安装有土壤温湿度传感器及土壤热通量板,具体观测设备及其型号见表1。

表1 研究区观测仪器汇总表

Table 1 Summary of research instruments

| 观测项目               | 设备名称      | 设备型号          |
|--------------------|-----------|---------------|
| CO <sub>2</sub> 通量 | 气体分析仪     | LI-7500DS     |
| 三维风速               | 三维超声风速计   | WindMasterPro |
| 降水量                | 翻斗式雨量桶    | TR-525M       |
| 光合有效辐射             | 光合有效辐射传感器 | LI-190R       |
| 空气温湿度              | 大气温湿度仪    | HMP155        |
| 土壤温湿度              | 土壤温湿传感器   | TEROS12       |
| 辐射                 | 四分量净辐射传感器 | CNR4          |
| 土壤热通量              | 土壤热通量板    | HFP01         |

### 1.3 通量数据处理

#### 1.3.1 数据预处理

EC系统采集频率为10 Hz,将采集到的原始数据利用仪器内置的EddyPro软件进行在线计算,计算过程包括野点去除、过滤10 Hz原始数据、坐标转换、超

声虚温修正、频谱修正以及空气密度波动修正等。根据数据质量评价方法将通量结果分为3个质量等级:0为数据质量最佳,1为数据质量适中,2为数据质量较差,最终获得带有数据质量标志的30 min数据。

### 1.3.2 数据质量控制

EC系统进行观测时由于外界环境干扰、仪器故障等原因会造成数据质量较差,因而需要进行数据质量控制:(1)剔除夜间碳通量小于0的数据;(2)剔除明显异于正常值的数据;(3)剔除降雨前后30 min的数据;(4)剔除夜间湍流不充分(摩擦风速 $U^* < 0.15$  m/s)时的数据;(5)剔除数据质量标志为2的数据。

### 1.3.3 数据插补

涡度数据由于外界环境干扰、仪器故障及数据质量控制等原因,数据丢失率较高,需采用合适的数据插补方法来获取完整有效的通量数据。常用的数据插补方法有平均昼夜变化法(mean diurnal variation, MDV)<sup>[18]</sup>、查表法(look-up table, LUT)<sup>[19]</sup>、边际分布采样法(marginal distribution sampling, MDS)<sup>[20]</sup>、非线性回归法(non-linear regression, NLR)<sup>[18]</sup>及人工神经网络法(artificial neural network, ANN)<sup>[21]</sup>等。在本研究中采用综合查表法、平均日变化法的R语言REddyProc包进行数据插补,同时考虑通量变量及气象变量的协同变化及通量变量的时间自相关<sup>[20]</sup>。在观测期间总共获得8 736条数据,其中有效数据为5 131条,经过数据质量控制后插补数据3 605条,总体数据质量良好。数据插补后的结果如图2所示。

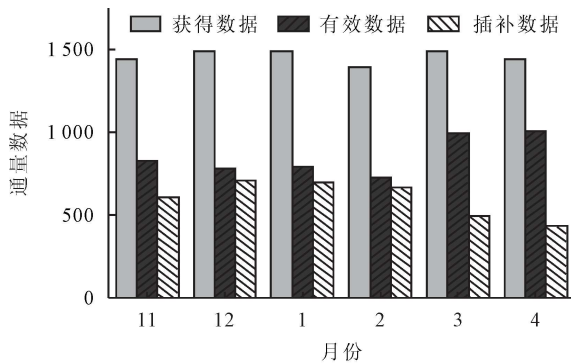


图2 非生长季有效通量数据和插补通量数据  
Fig.2 Effective flux data and interpolation flux data in non-growing season

### 1.3.4 碳通量数据拆分

采用Lloyd-Taylor方程<sup>[22]</sup>拟合夜间生态系统呼吸( $R_{eco}$ )与土壤温度(TS)的函数关系,并将其外延到白天生态系统呼吸的变化,拟合方程如式(1):

$$R_{eco}(T) = R_{eco,ref} e^{E_0 \left( \frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right)} \quad (1)$$

式中, $R_{eco}(T)$ 和 $R_{eco,ref}$ 分别为生态系统呼吸和参考温度( $T_{ref}$ )下生态系统呼吸, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,以 $\text{CO}_2$ 物质的量计; $E_0$ 为活动能量; $T_{ref}$ 为参考温度, $T_{ref} = 15^\circ\text{C} = 288.15\text{ K}$ ;  $T_0$ 为生态系统呼吸为0时10 cm处的土壤温

度, $T_0 = -46^\circ\text{C} = 227.15\text{ K}$ ;  $T$ 为土壤温度, $^\circ\text{C}$ ,本研究取5 cm处的土壤温度。

光合作用碳吸收过程即总初级生产力(GPP)的计算公式如下:

$$\text{GPP} = R_{eco} - \text{NEE} \quad (2)$$

式中,NEE为净生态系统碳交换量。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤温度与水分的变化

研究区非生长季土壤温度和水分的变化如图3所示,在研究期间土壤温度(TS)呈“V”形变化,在2月以前,深层(40 cm)土壤温度比浅层(5 cm)高,进入2月以后,随着太阳辐射、空气温度等环境因子的增大,土壤温度呈增加趋势,且浅层土壤温度高于深层。土壤含水量(SWC)的变化与土壤温度的变化有明显的关联性,在土壤温度急剧下降时,土壤含水量也快速下降。进入2月以后,土壤温度逐渐增加,土壤含水量也开始呈增加趋势,4月以前,深层土壤含水量高于浅层,4月以后,随着降雨增多及太阳辐射的增强,土壤水分及土壤蒸发增加,中层(20 cm)土壤含水量最高。

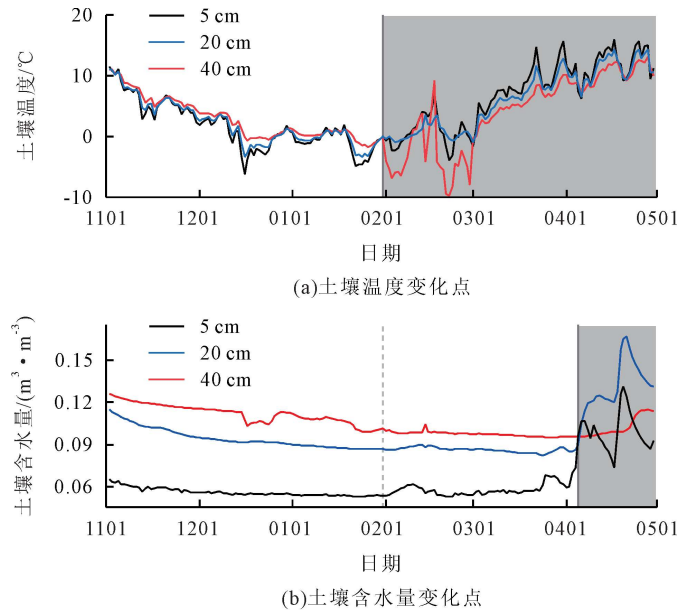


图3 非生长季土壤温度及含水量的变化  
Fig.3 Changes of soil temperature and water content in non-growing season

### 2.2 不同时间尺度碳通量的动态变化

#### 2.2.1 非生长季各月碳通量平均日内变化及主要环境因子的动态变化

对非生长季2023年11月-2024年4月碳通量数据逐月取相同时刻的平均值,得到碳通量月平均日内变化(图4)。由图4可知,非生长季NEE在各月均呈为“U”形曲线变化,夜间均为正值,表现为碳排放,为碳源;白天大多数时间为负值,表现为碳吸收,为碳汇,且NEE数值的大小能反映碳收支的多少。自11月起至次年2月。09:00开始,研究区从碳源

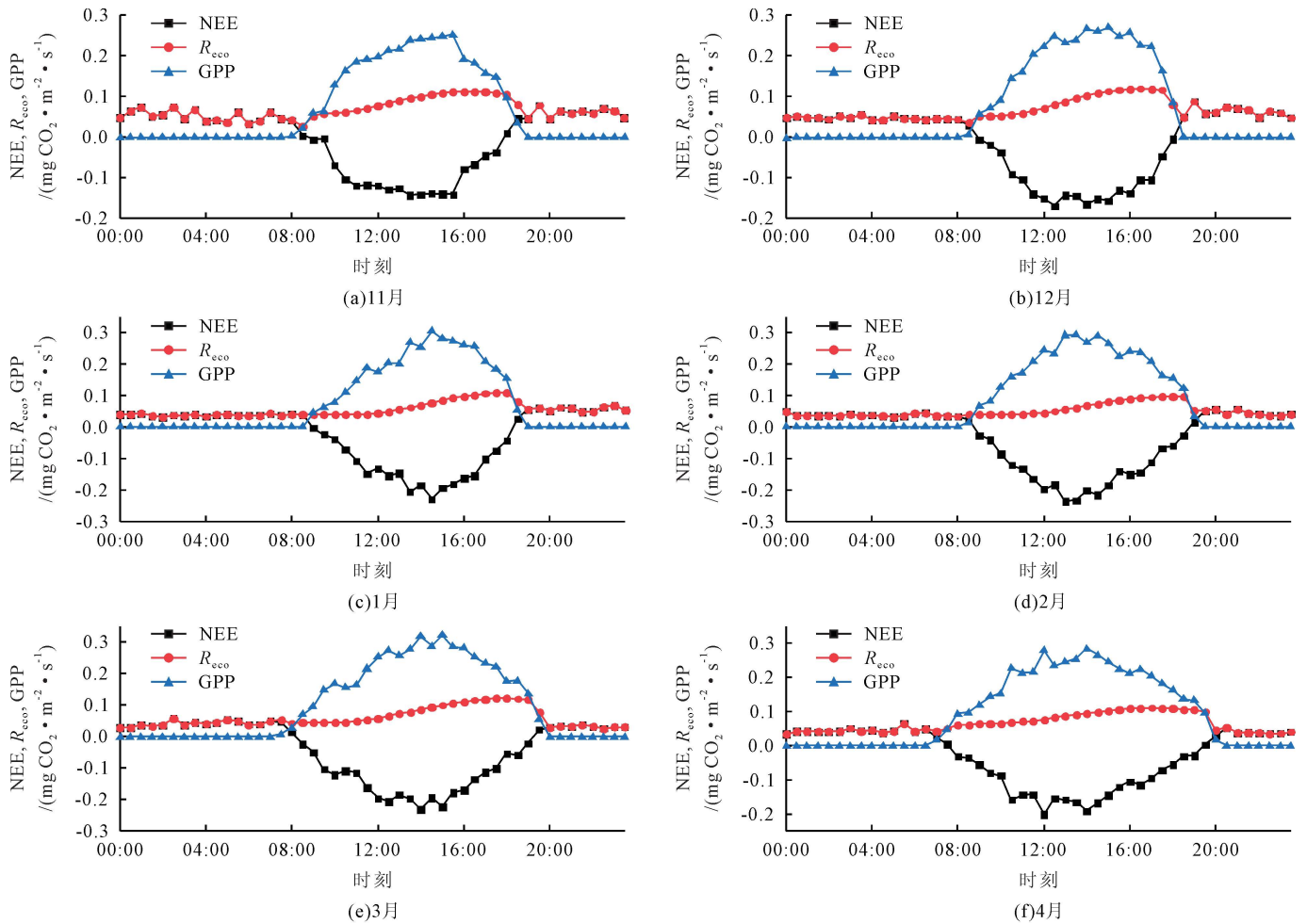


图4 非生长季碳通量各月平均日内变化

Fig.4 Average monthly diurnal variation of carbon flux in non-growing season

转变为碳汇,至18:00又转变为碳源,碳吸收峰值出现时间逐渐推迟,3月14:00达到整个非生长季碳吸收峰值,为 $-0.236 \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。光照、温度、水分等因素会对植被的光合作用产生较大影响,由各个月碳通量随时间的变化(图4)以及非生长季环境因子的变化(图5)可知二者之间存在明显的相关性。在非生长季,太阳辐射( $R_g$ )、饱和水汽压差(VPD)、空气温度(TA)、光合有效辐射(PAR)表现出随时间推移先减小后增大的变化趋势,与碳通量呈现一致的变化规律。碳通量的峰值出现在3月而非4月,则与4月降水(PPT)较多有密切联系。 $R_{eco}$ 在夜间较为稳定,波动较小,峰值出现在18:00,整个非生长季最大峰值为 $0.122 \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。GPP呈倒“U”形曲线变化,峰值出现在3月,为 $0.323 \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

### 2.2.2 非生长季净生态系统碳交换量NEE的月变化

2023年11月-2024年4月观测期间,研究区各月NEE的累积量均为负值。受温度、太阳辐射等环境因子变化的影响,从11月下旬开始,生态系统表现为碳排放,至12月中下旬以后,生态系统表现为碳吸收,与气温、辐射等环境因子的变化较为一致。1-3月,NEE日平均值多小于 $0 \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,进入4月后,

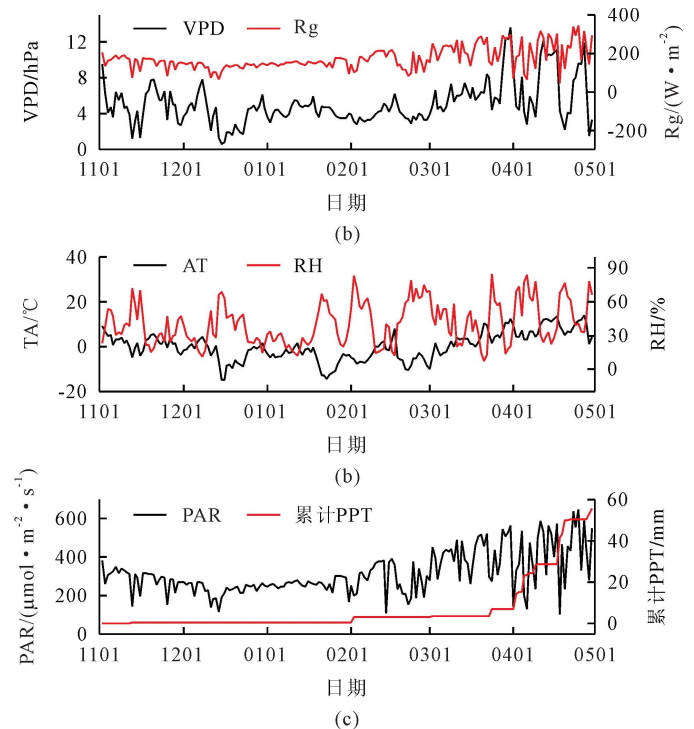


图5 非生长季环境因子动态变化

Fig.5 Dynamic changes of environmental factors in non-growing season

NEE日平均值出现较为明显的波动,主要是受降雨等环境因子的影响。在整个非生长季日碳吸收最大值

出现在3月19日,为 $-0.085\ 1\ \text{mg CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,日碳排放量最大值出现在11月2日,为 $0.037\ 4\ \text{mg CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,

总体来看,随着时间的推移,日NEE平均值逐渐减小,说明研究区植被的光合作用逐渐增强(图6)。

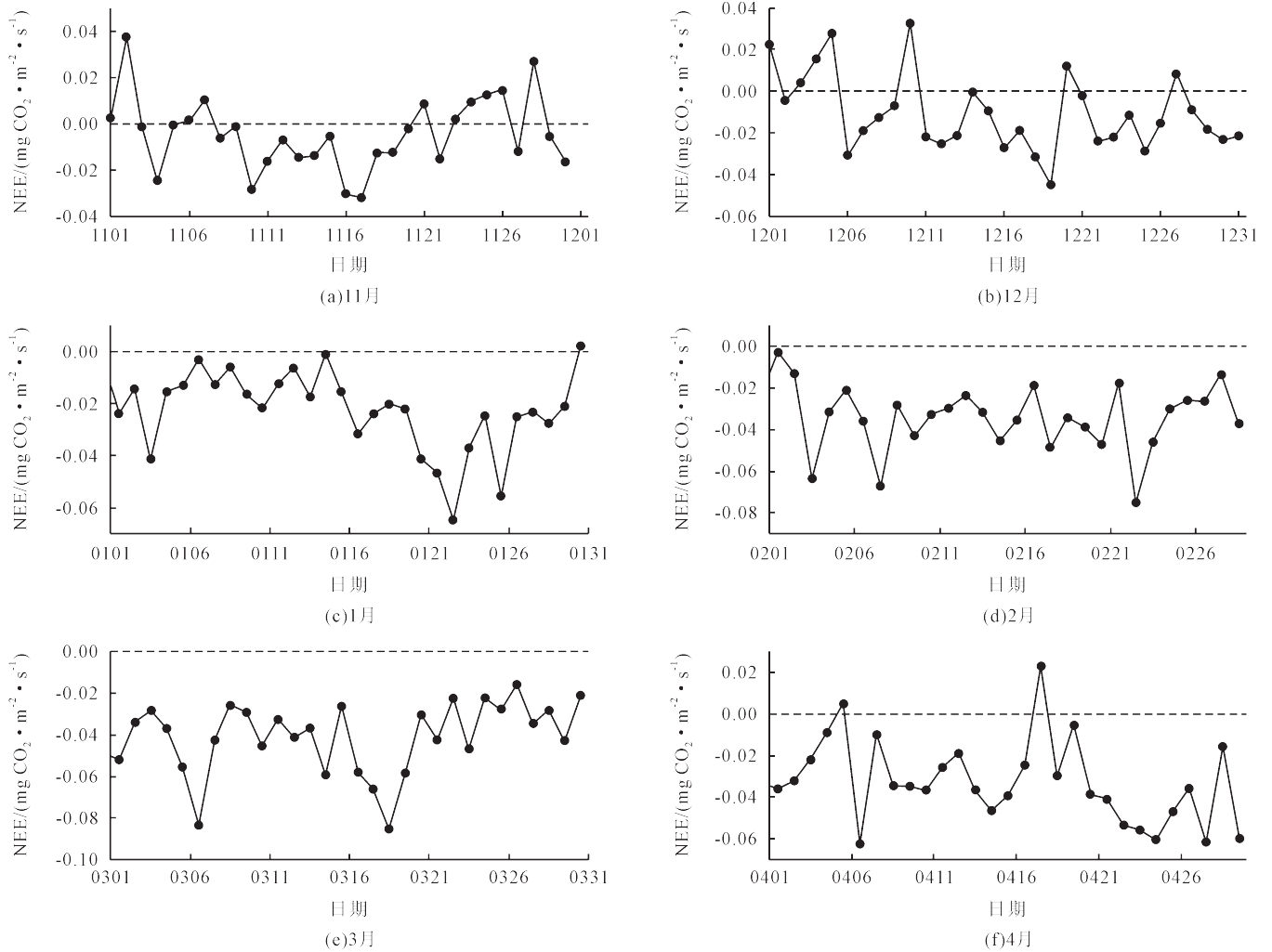


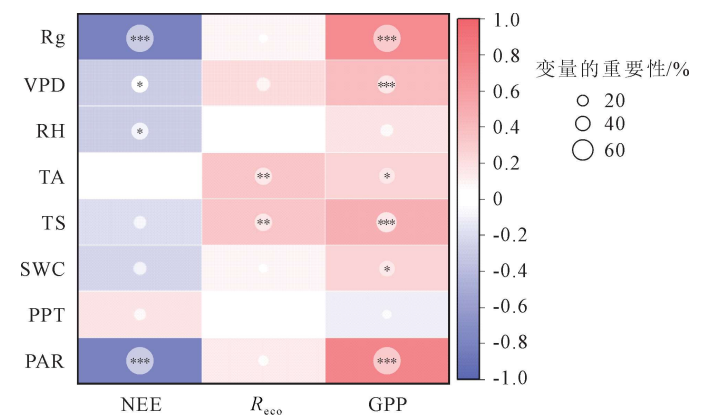
图6 非生长季不同月份日平均净生态系统碳交换量NEE变化规律

Fig.6 Changes of NEE in the daily average net ecosystem carbon exchange in different months of non-growing season

### 2.3 环境因子对碳通量的影响

非生长季各环境因子与碳通量的相关关系如图7所示,由图7可知,NEE与Rg、PAR呈极显著负相关( $P\leq 0.001$ ),与VPD、RH呈显著负相关( $P\leq 0.05$ ),从变量的重要性来看,Rg与PAR对NEE最为重要,但由于Rg和PAR对NEE影响的高度相关性,在后期分析环境因子与NEE的关系时不再考虑Rg,VPD、RH、TS、SWC以及PPT对NEE存在影响; $R_{\text{eco}}$ 与TA、TS呈较显著正相关( $P\leq 0.01$ ),VPD、TA、TS对 $R_{\text{eco}}$ 较为重要,其余变量对 $R_{\text{eco}}$ 存在影响;GPP与Rg、VPD、TS、PAR呈极显著正相关( $P\leq 0.001$ ),与TA、SWC呈显著正相关( $P\leq 0.05$ ),从变量的重要性来看,Rg与PAR对GPP最为重要,VPD、TS对GPP较为重要,RH、TA、SWC对GPP存在影响。

为进一步探究环境因子与NEE的关系,以NEE作为因变量、PAR为中间变量,建立结构方程模型,模型检验采用3种指标,包括:CMIN/DF $< 5$ (CMIN:卡方;DF:自由度);CFI $> 0.9$ (CFI:比较拟合优化指数);

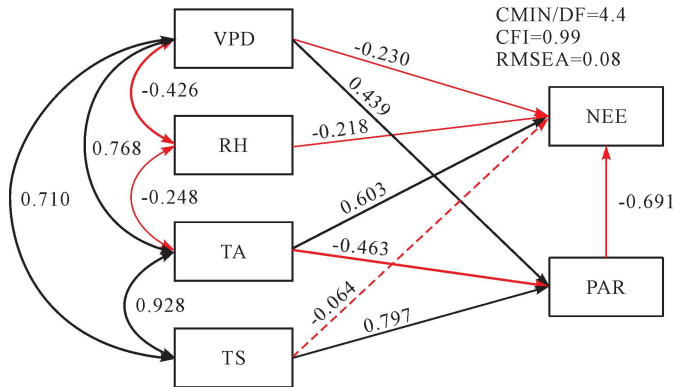


注: \*表示在 $P\leq 0.05$ 水平显著相关; \*\*表示在 $P\leq 0.01$ 水平显著相关; \*\*\*表示在 $P\leq 0.001$ 水平显著相关。

图7 非生长季碳通量与环境因子的相关关系  
Fig.7 Correlation between carbon flux and environmental factors in non-growing season

RMSEA $< 0.1$ (RMSEA:近似均方根误差)。其中箭头表示某一变量对另一变量的影响,单箭头表示单向作用,双箭头表示变量间的相互作用。如图8所示,模型拟合度优。由模拟结果(表2)可知,非生长季NEE主要受PAR和TA调控,直接影响程度分别为 $-0.691$

和0.603, TS对NEE不存在直接影响,但其间接影响因子为-0.551。总体来说,环境因子与NEE的相关性分析结果与结构方程模型的结果具有一致性,PAR、VPD、温度以及RH均会对NEE产生影响。



注:箭头上的数字为标准化路径系数,黑色实线箭头为正,红色实线箭头为负,线的粗细代表影响程度,不显著影响的路径用虚线表示。

图8 非生长季NEE与环境因子的结构方程模型  
Fig.8 Structural equation model of NEE and environmental factors in non-growing season

表2 环境因子对NEE的标准化路径系数  
Table 2 Standardized path coefficients of NEE for meteorological factors

|      | VPD    | RH     | TA    | TS     | PAR    |
|------|--------|--------|-------|--------|--------|
| 直接影响 | -0.230 | -0.218 | 0.603 | -0.064 | -0.691 |
| 间接影响 | -0.304 | 0      | 0.320 | -0.551 | 0      |
| 总影响  | -0.534 | -0.218 | 0.923 | -0.615 | -0.691 |

### 3 讨论

#### 3.1 灌丛草地生态系统碳交换量的变化特征

灌丛草地生态系统非生长季碳通量各月平均日内变化均呈“U”型曲线,碳吸收峰值出现在12:00-15:00之间,与朱牛等<sup>[5]</sup>对亚高山森林生态系统及舒海燕等<sup>[6]</sup>对毛竹林生态系统非生长季CO<sub>2</sub>通量的研究结果类似。整个非生长季NEE总量为-376.938 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>,表现为弱的碳汇,碳吸收能力弱于亚高山森林生态系统<sup>[5]</sup>非生长季碳吸收(-596.759 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>),但强于祁连山高寒草甸生态系统<sup>[8]</sup>非生长季碳吸收(-18.057 mg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>)。前人研究发现,不同植物有不同的光适应特性,植被的光合特性不仅受植被自身生理特征限制,还与水、热等环境因子密切相

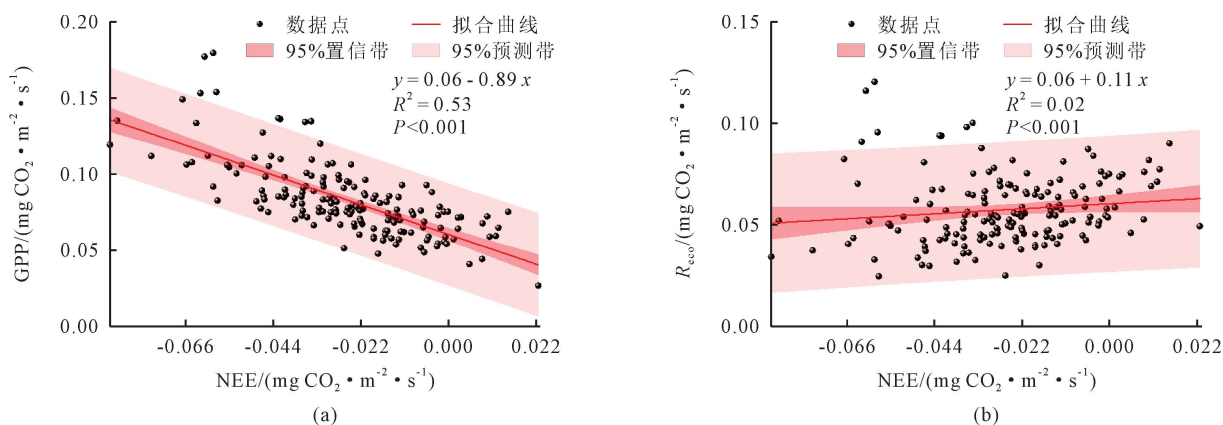
关<sup>[23,24]</sup>。Bag等<sup>[25]</sup>研究发现,高纬度或者高海拔森林生态系统由于其光合作用光系统之间能直接传递能量,且其自身叶片结构特点,使得其能在寒冷环境保持活性,因而在非生长季仍能进行碳吸收活动,而灌丛、草甸生态系统在非生长季相较于森林生态系统而言,其叶片凋落,光和能力较弱。另一方面,与研究区的地理位置及环境因子有密切关系,由图8及表2可知,非生长季NEE与TA之间存在极显著的相关性,与Qi等<sup>[23]</sup>研究结果一致,本研究中TA明显高于祁连山高寒草甸生态系统,研究区生态系统的生理活动及其代谢活动也强于祁连山高寒草甸生态系统。此外,有学者研究发现,随着海拔梯度升高,植被的叶绿素含量呈下降趋势<sup>[26,27]</sup>,而叶绿素含量的高低会直接影响植被的光合作用。研究区海拔高度的不同,也可能是非生长季碳吸收量差异较大的原因。

灌丛草地生态系统作为调节陆地碳汇的重要组成部分,其NEE的变化主要由构成NEE的2个生物源通量间的不平衡造成,即光合作用碳吸收(GPP)和呼吸作用碳排放( $R_{eco}$ )<sup>[16]</sup>。为进一步确定灌丛草地生态系统NEE非生长季的影响成分,将非生长季每月的日NEE和GPP、 $R_{eco}$ 进行线性回归关系分析。由表3可知,在非生长季,除11月外,均表现出GPP对NEE存在显著影响,且在1月GPP对NEE的影响程度最高( $R^2=0.69$ )。为进一步明确NEE与GPP、 $R_{eco}$ 的关系,对其进行线性回归分析,结果表明,灌丛草地生态系统NEE的变化主要受到GPP影响,回归方程为: $GPP=0.06-0.89 \times NEE$ ,受 $R_{eco}$ 的影响较小,回归方程为: $R_{eco}=0.06+0.11 \times NEE$ (图9),与王秀英等<sup>[16]</sup>对高寒草甸和荒漠的研究和祝景彬等<sup>[28]</sup>对高寒灌丛草地的研究结果相一致。在11月时,NEE主要受 $R_{eco}$ 影响,则是由于11月,PAR较低,直接影响植被的光合作用强度,且温度较低,影响植被生理过程的酶活性,进一步影响光合作用,因而该时期 $R_{eco}$ 对NEE的影响较大。

表3 非生长季每月的日NEE和GPP、 $R_{eco}$ 的线性回归关系  
Table 3 Linear regression relationship of daily NEE, GPP and  $R_{eco}$  in non-growing season

| 时间     | NEE与GPP的线性回归关系及拟合优度        | NEE与 $R_{eco}$ 的线性回归关系及拟合优度 |
|--------|----------------------------|-----------------------------|
| 202311 | $y=0.023-0.41x, R^2=0.15$  | $y=-0.043+0.54x, R^2=0.34$  |
| 202312 | $y=0.028-0.59x, R^2=0.51$  | $y=-0.026+0.16x, R^2=0.02$  |
| 202401 | $y=0.037-0.80x, R^2=0.69$  | $y=-0.041+0.37x, R^2=0.05$  |
| 202402 | $y=0.012-0.54x, R^2=0.48$  | $y=-0.042+0.15x, R^2=0.02$  |
| 202403 | $y=-0.004-0.39x, R^2=0.35$ | $y=-0.046+0.06x, R^2=0.01$  |
| 202404 | $y=0.009-0.45x, R^2=0.64$  | $y=-0.035+0.16x, R^2=0.02$  |

注:y代表每日平均NEE,x代表每日平均GPP、 $R_{eco}$ 。

图9 NEE与GPP、R<sub>eco</sub>的线性回归关系Fig.9 Linear regression relationship between NEE, GPP and R<sub>eco</sub>.

### 3.2 影响灌丛草地生态系统碳交换的主要影响因子

以往研究表明灌丛草地生态系统NEE受辐射、温度、土壤水分等因素的调控<sup>[7,29,30]</sup>。在本研究中,通过以月尺度上统计的日平均值数据为依据,分析环境因子对NEE的影响,结果表明灌丛草地生态系统NEE受PAR、VPD、温度等多个环境因子共同影响。PAR是植被光合作用的主要能量来源,PAR的强弱可直接影响叶片的光合产量<sup>[5]</sup>,随着PAR的增加,灌丛草地生态系统碳吸收能力增强,与高天胜等<sup>[31]</sup>在高山草甸生态系统以及席振华等<sup>[30]</sup>在珠峰北坡高寒灌丛草原的研究结果相一致。在本研究中,随着VPD的增加,生态系统碳吸收能力减弱,原因是VPD通过控制植被的气孔大小对碳交换产生影响,VPD增加时,植被光合速率会下降<sup>[32]</sup>,影响植被生产力进而对植被生长产生影响<sup>[33]</sup>。温度和水分会影响植物生理过程的酶活性,对生态系统的碳交换过程产生影响<sup>[16]</sup>。温度主要通过TA和TS两种方式对生态系统的碳交换过程产生影响,研究结果表明从11月下旬开始,生态系统表现为碳排放,至12月中下旬以后,生态系统表现为碳吸收,在最冷的12月,生态系统碳吸收量最少,随着TA回升以后,生态系统碳吸收量逐渐增大,与TA的变化较为一致。TS通过影响根系呼吸以及土壤中微生物的呼吸进而影响NEE<sup>[26]</sup>,是决定夜间生态系统呼吸的重要因素。

NEE是R<sub>eco</sub>与GPP的差值,环境因子对NEE的影响是直接构成NEE的2个生物源通量。由图7可知,TS与R<sub>eco</sub>和GPP之间存在极显著的正相关关系,但TS与NEE之间存在极显著负相关关系(表2),进一步证明了研究区非生长季NEE的变化主要受到GPP影响,因而对碳同化过程产生影响的因素会对生态系统的碳交换过程产生更大的影响。以往研究发现,生态系统碳交换能力主要受PAR<sup>[5]</sup>、TS<sup>[34]</sup>、物候<sup>[35]</sup>等因素影响。本研究结果表明,灌丛草地生态系统非生长季碳交换过程主要受GPP限制,由PAR及温度共同调

控,因为研究区水热条件好,日照充足,即使在最寒冷的月份,白天的温度也多在0℃以上,满足光合作用CO<sub>2</sub>吸收温度<sup>[9]</sup>,因而研究区在非生长季仍具备碳吸收功能。故而灌丛生态系统在湟水河流域碳收支中具有重要地位,有助于调节局部小气候,维持生态系统功能,削减人为或自然的碳排放。

## 4 结论

本文基于涡度观测系统探讨了灌丛草地生态系统非生长季(2023年11月-2024年4月)碳通量的动态变化及其与环境因子间的关系。结果表明,研究区非生长季日间碳吸收明显,最大吸收峰值为-0.236 mg CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>·s),受环境因子变化的影响11-12月累计CO<sub>2</sub>吸收值较小,整个非生长季表现为弱的碳汇。在非生长季光合有效辐射、温度(空气温度、土壤温度)是影响净生态系统碳交换量的最主要的环境因素,饱和水气压差、相对湿度是影响净生态系统碳交换量的重要环境因素。本研究揭示了研究区非生长季碳通量的动态变化,强调了环境因子在碳交换过程中的重要性,为了解该地区碳收支过程及其对气候变化的响应提供了重要参考。

### [参考文献]

- [1] 徐小锋,田汉勤,万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报, 2007,31(2):175-188.  
Xu Xiaofeng, Tian Hanqin, Wan Shiqiang. Climate warming impacts on carbon cycling in terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007,31(2):175-188.
- [2] Janssens I A, Freibauer A, Ciais P, et al. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7 to 12% of European anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions[J]. Science, 2003,300(5625):1538-1542.
- [3] 陈露,章熙锋,王艳强,等. 紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发与水分利用效率及其影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021,29(6):991-1007.

- Chen Lu, Zhang Xifeng, Wang Yanqiang, et al. Temporal characteristics and influencing factors of evapotranspiration and water use efficiency on sloping farmlands with purple soil[J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2021,29(6):991-1007.
- [4] Gong Y, Ji X, Hua Y, et al. Research progress of CO<sub>2</sub> flux in forest ecosystem based on eddy covariance technique: a review[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2020,37(3):593-604.
- [5] 朱牛,王金牛,王旭峰,等. 三江并流核心区亚高山森林非生长季净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换量及其影响因素[J]. 生态学报, 2023,43(14):5967-5979.
- Zhu Niu, Wang Jinniu, Wang Xufeng, et al. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and its influencing factors in non-growing season at a sub-alpine forest in the core Three Parallel Rivers Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(14):5967-5979.
- [6] 舒海燕,江洪,陈晓峰,等. 安吉毛竹林非生长季 CO<sub>2</sub> 通量与其光合响应关系探究[J]. 生态科学, 2017,36(2):15-25.
- Shu Haiyan, Jiang Hong, Chen Xiaofeng, et al. Study on the response relationship between CO<sub>2</sub> flux and photosynthesis of *Phyllostachys edulis* forest during non-growing season in Anji, Zhejiang[J]. Ecological Science, 2017,36(2):15-25.
- [7] Sun S B, Che T, Li H Y, et al. Water and carbon dioxide exchange of an alpine meadow ecosystem in the northeastern Tibetan Plateau is energy-limited[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019,275:283-295.
- [8] 张文豹,辛惠娟,李宗省,等. 祁连山高寒草甸非生长季碳水通量及其影响因素[J]. 冰川冻土, 2024,46(2):688-696.
- Zhang Wenbao, Xin Huijuan, Li Zongsheng, et al. Carbon flux and its influencing factors in alpine meadow of Qilian Mountain in non-growing season[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2024,46(2):688-696.
- [9] Skinner H. Winter carbon dioxide fluxes in humid-temperate pastures[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2007,144(1/2):32-43.
- [10] Larsen K S, Grogan P, Jonasson S, et al. Respiration and microbial dynamics in two subarctic ecosystems during winter and spring thaw: effects of increased snow depth[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2007,39(2):268-276.
- [11] 宗宁,石培礼. 冬季升温对高山生态系统碳氮循环过程的影响[J]. 生态学报, 2020,40(9):3131-3143.
- Zong Ning, Shi Peili. Effects of winter warming on carbon and nitrogen cycling in alpine ecosystems: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(9):3131-3143.
- [12] Oquist G, Huner N P A. Photosynthesis of overwintering evergreen plants[J]. Annual Review of Plant Biology, 2003,54:329-355.
- [13] Bowling D R, Massman W J. Persistent wind-induced enhancement of diffusive CO<sub>2</sub> transport in a mountain forest snowpack[J]. Journal of Geophysical Research, 2011,116(G4):G04006.
- [14] Huxman T E, Turnipseed A A, Sparks J P, et al. Temperature as a control over ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes in a high-elevation, subalpine forest[J]. Oecologia, 2003,134(4):537-546.
- [15] Starr G, Oberbauer S F. Photosynthesis of Arctic evergreens under snow: implications for tundra ecosystem carbon balance[J]. Ecology, 2003,84(6):1415-1420.
- [16] 王秀英,周秉荣,苏淑兰,等. 青藏高原高寒草甸和荒漠碳交换特征及其气象影响机制[J]. 生态学报, 2023,43(3):1194-1208.
- Wang Xiuying, Zhou Bingrong, Su Shulan, et al. Carbon exchange characteristics and meteorological influence mechanism of alpine meadow and desert in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(3):1194-1208.
- [17] 余常团,肖欢,范春雨,等. 青海省东北部灌丛草地群落β多样性组分分解及其驱动因素[J]. 应用与环境生物学报, 2023,29(3):515-522.
- Yu Changtuan, Xiao Huan, Fan Chunyu, et al. Decomposition of β-diversity and its driving factors in shrub communities in northeast Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2023,29(3):515-522.
- [18] Falge E, Baldocchi D, Olson R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001,107(1):43-69.
- [19] Wang E L, Smith C J, MacDonald B C T, et al. Making sense of cosmic-ray soil moisture measurements and eddy covariance data with regard to crop water use and field water balance[J]. Agricultural Water Management, 2018,204:271-280.
- [20] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm[J]. Global Change Biology, 2005,11(9):1424-1439.
- [21] Papale D, Valentini R. A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization[J]. Global Change Biology, 2003,9(4):525-535.
- [22] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration[J]. Functional Ecology, 1994,8(3):315.
- [23] Qi Y H, Wei D, Zhao H, et al. Carbon sink of a very high marshland on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021,126(4): e2020JG006235.
- [24] 吴飞洋,柳新红,董峰平,等. 光照和土壤对乌柏秋季叶片色素及可溶性糖的影响[J]. 西南林业大学学报: 自然科学, 2019,39(6):41-48.
- Wu Feiyang, Liu Xinhong, Dong Fengping, et al. Effects of light and soil on pigment and soluble sugar in leaves of *Sapium sebiferum*[J]. Journal of Southwest Forestry University: Natural Science, 2019,39(6):41-48.

- [25] Bag P, Chukhutsina V, Zhang Z S, et al. Direct energy transfer from photosystem II to photosystem I confers winter sustainability in Scots Pine[J]. *Nature Communications*, 2020,11(1):6388.
- [26] 李惠梅, 师生波. 不同海拔麻花艸植物光合特性的比较[J]. *安徽农业科学*, 2008,36(11):4799-4804.  
Li Huimei, Shi Shengbo. Photosynthetic characteristics of *Gentiana straminea* at different altitudes[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008,36(11):4799-4804.
- [27] 周党卫, 朱文琰, 滕中华, 等. 不同海拔珠芽蓼抗氧化系统的研究[J]. *应用与环境生物学报*, 2003,9(5):489-492.  
Zhou Dangwei, Zhu Wenyan, Teng Zhonghua, et al. Antioxidative compounds of *Polygonum viviparum* L. from different altitudes[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2003,9(5):489-492.
- [28] 祝景彬, 贺慧丹, 李红琴, 等. 青藏高原高寒灌丛草地2003-2016年生长季的不同月份CO<sub>2</sub>通量对气温日较差的响应[J]. *生态学报*, 2020,40(23):8773-8782.  
Zhu Jingbin, He Huidan, Li Hongqin, et al. The response of CO<sub>2</sub> fluxes in different months to the amplitude of diurnal temperature in alpine shrubland on the Qinghai-Tibetan Plateau during the growing season from 2003 to 2016[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(23):8773-8782.
- [29] Zhang F W, Li H Q, Wang W Y, et al. Net radiation rather than surface moisture limits evapotranspiration over a humid alpine meadow on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Ecohydrology*, 2018,11(2):e1925.
- [30] 席振华, 王玉阳, 马耀明, 等. 珠峰北坡高寒灌丛草原生长季碳、水通量特征分析[J]. *高原气象*, 2023,42(4):887-898.  
Xi Zhenhua, Wang Yuyang, Ma Yaoming, et al. Characteristics of carbon and water fluxes in the growing season of alpine shrub grassland on the north slope of Mount Everest[J]. *Plateau Meteorology*, 2023,42(4):887-898.
- [31] 高天胜, 付宇鹏, 陈生云, 等. 祁连山典型亚高山草甸生态系统碳交换季节动态[J/OL]. *草业科学*, 1-16[2024-09-18].  
Gao Tiansheng, Fu Yupeng, Chen Shengyun, et al. Seasonal dynamics of carbon exchange in a typical subalpine meadow ecosystem of the Qilian Mountains[J]. *Pratacultural Science*, 1-16[2024-09-18].
- [32] Fletcher A L, Sinclair T R, Allen L H. Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered 'slow-wilting' and commercial soybean[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007,61(2):145-151.
- [33] Konings A G, Williams A P, Gentine P. Sensitivity of grassland productivity to aridity controlled by stomatal and xylem regulation[J]. *Nature Geoscience*, 2017,10(4):284-288.
- [34] 李愈, 葛继稳, 斯南雍茜, 等. 神农架大九湖泥炭湿地非生长季CO<sub>2</sub>通量特征[J]. *安全与环境工程*, 2022,29(6):240-247.  
Li Yu, Ge Jiwen, Sinan Yongxi, et al. Characteristics and influencing factors of CO<sub>2</sub> flux in non-growing season of Dajiuhu Peat Wetland in Shennongjia[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2022,29(6):240-247.
- [35] Xia J Y, Niu S L, Ciais P, et al. Joint control of terrestrial gross primary productivity by plant phenology and physiology[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015,112(9):2788-2793.