若尔盖高寒湿地-大气间碳交换特征及驱动机制研究

陈怡璇¹, 文军^{*}, 涂镇武, 颜晶

1. 成都信息工程大学大气科学学院/高原大气与环境四川省重点实验室,四川省 成都市 610225

摘要:在全球变暖背景下,高寒湿地生态系统的碳过程是复杂且敏感。然而,高寒湿地生态系统碳收支的 长期动态及其驱动机制尚不清楚。本研究利用涡度协方差技术测量的二氧化碳(CO₂)通量,分析了若尔 盖高寒湿地 2017-2021 年间的 CO₂交换通量,以及 CO₂交换通量的动态变化和驱动机制。结果显示,在植 被生长季(6-10月),若尔盖高寒湿地的年均生态系统总初级生产力(Gross Primary Productivity, GPP) 和生态系统呼吸(Ecosystem espiration, Re)呈现出单峰型分布,而年均生态系统 CO₂交换(Net Ecosystem Exchange, NEE)则呈现 V 型趋势。若尔盖高寒湿地生态系统在生长季节是一个碳汇,即一个吸收比释放 更多的陆-气间碳交换过程。多年日平均 NEE、GPP 和 Re 分别达到-3.10±4.61、4.78±5.61 和 1.65±1.56 umol/(m²·s)。在月度尺度上,回归分析了气温(Air Temperature, Ta)、土壤温度(Soil Temperature, Ts)、 光合光子通量密度(Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD)、降水量(Precipitation, PPT)、空气相 对湿度(Air Relative Humidity, RH)和水汽压差(Vapor Pressure Deficit, VPD)分别对 NEE、GPP 和 Re 的影响,结果显示,Ts、Ta 和 VPD 是月度 NEE 变化的主要决定因素,NEE 与它们都呈负相关。Ts 和 Ta 在很大程度上决定了每月 GPP 的变化,GPP 与其呈正相关,Ts、Ta 和 PPT 是月度 Re 变化的主要决定因素, Re 与它们都呈正相关。利用分类回归树算法(Classification and Regression Tree, CART)分析了日尺度上 各个要素对碳交换通量的影响,结果表明:土壤温度对日 GPP 和 Re 具有较大影响,气温是每日 NEE 的主 要控制因素。本研究结果为理解高寒湿地生态系统碳收支提供了重要数据和参考依据。

关键词: 高寒湿地; 交换; 碳交换通量; 驱动 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2408.24025

收稿日期 2024-09-10; 网络预出版日期 通讯作者:文军,男,教授,主要从事陆面过程与气候变化研究, E-mail: jwen@cuit.edu.cn 作者简介:陈怡璇,女,硕士研究生,从事陆面过程研究与气候变化, E-mail: itsdis1937@163.com 资助项目:国家自然科学基金项目(42375032);成都信息工程大学科研项目(KYTZ201821) Funded by: Project of National Natural Science Foundation of China(42375032); Project of Science Foundation of Chengdu University of Information Technology(KYTZ201821)

A study on the characteristics and driving mechanism of carbon exchange between the Zoige alpine wetland and atmosphere

CHEN Yixuan, WEN Jun, TU Zhenwu, YAN Jin

(Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, Sichuan, China)

Abstract: In the context of global warming, the carbon process of alpine wetland ecosystems is complex and sensitive. However, the long-term dynamics and driving mechanisms of carbon balance in alpine wetland ecosystems are still unclear. In this study, the carbon dioxide (CO₂) flux measured by eddy covariance technique is used to analyze the CO₂ exchange flux of the Zoige alpine wetland from 2017 to 2021, as well as the dynamics and driving mechanisms of CO_2 exchange flux. The results showed that during the vegetation growing season (June - October), the annual gross primary productivity (Gross Primary Productivity, GPP) and ecosystem respiration (Ecosystem espiration, Re) of the ecosystem showed an unimodal pattern, while the annual net ecosystem CO2 exchange (Net Ecosystem Exchange, NEE) of the ecosystem showed a V-shaped trend. The Zoige alpine wetland ecosystem is a carbon sink during the growing season, which is a carbon exchange process between land and air that absorbs more than releases. The daily average NEE, GPP, and Re over the years reached -3.10 ± 4.61 , 4.78 ± 5.61 , and 1.65 ± 1.56 umol(m² • s), respectively. On the monthly scale, the effects of air temperature (Air Temperature, Ta), soil temperature (Soil Temperature, Ts), photosynthetic photon flux density (Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD), precipitation (Precipitation, PPT), air relative humidity (Air Relative Humidity, RH) and vapor pressure deficit (Vapor Pressure Deficit, VPD) on NEE, GPP and Re were analyzed by the regression analysis. The results showed that Ta, Ts and PPT were the main determinants of monthly NEE changes, and NEE was negatively correlated with them. Ts and Ta largely determined the monthly variation of GPP, which is positively correlated with it. Ts, Ta and PPT are the main determinants of monthly Re variation, and Re is positively correlated with them. The Classification and Regression Tree (Classification and Regression Tree, CART) algorithm was used to analyze the effects of various factors on carbon exchange flux in the daily scale. The results showed that soil temperature had a great influence on daily GPP and Re, and temperature is the main controlling factor for daily NEE. The results of this study provide important data and

reference for understanding the carbon budget of alpine wetland ecosystems.

Key Words: alpine wetland, exchange, carbon exchange flux, drive

1 引言

陆地生态系统作为地球表层重要组成部分,是全球碳循环的核心,其包括植物体和土壤 有机质在内的碳库总量约为大气碳库的三倍(Houghton, 2014)。陆-气碳交换过程是影响 陆地生态系统碳平衡的关键因素,在地球系统碳中和过程中起着重要作用(李国栋等,2013)。 陆地生态系统-大气间碳交换过程主要包括绿色植物光合作用固定碳(即生态系统总初级生 产力,Gross Primary Productivity,GPP)与生态系统呼吸作用释放碳(即生态系统必可吸, Ecosystem espiration, Re)两个过程,即生态系统植物通过光合作用将 CO₂转化为有机物碳 化物(Cn(H₂O)m)储存在植被和土壤层中,有机物质随着植物自养呼吸和凋落过程进入土 壤,随后又返回到大气中,从而形成大气-植被-土壤-大气碳循环过程(刘晓文, 2020)。

高寒湿地作为易受损的自然生态系统,具备保护水源、调节气候、储存碳等重要生态功能,对地球化学循环和气候调节至关重要。高寒湿地的净生态系统碳交换(Net Ecosystem Exchange, NEE)主要以二氧化碳(CO₂)循环为主,其次是甲烷(CH₄)和一氧化碳(CO)的循环(李成一等,2020)。地表与大气层之间的CO₂交换量主要受光合作用、呼吸等因素的平衡影响(朱玲玲等,2013),这一过程的CO₂交换结果决定了生态系统的碳排放/吸收能力。因此,研究近年来高寒湿地碳交换通量的变化过程,深入探究碳交换通量对各种环境因素的响应机制,有助于准确评估我国高寒湿地的碳储量,揭示恢复高寒湿地碳储存潜力,为湿地保护和恢复提供数据支持,同时也可为我国在国际气候变化研究领域提供基础数据支持。

目前,高寒湿地的碳循环被国内外很多学者关注。Masahito 等人(2013)为了更好地了 解北极生态系统和大气间的 CO₂交换,他们对阿拉斯加(美国)的八个北极苔原和北方生 态系统中测量的 1998-2010 年的 CO₂通量数据进行合成。研究表明,所有北方和八个北极苔 原生态系统中的七个在生长季都是碳汇。除苔原的 Re 外,CO₂排放的季节性模式主要由气 温决定。对于苔原生态系统,GPP 和净 CO₂汇强度的空间变化可以用生长季的时长解释, 而 RE 则随着生长度日的增加而增加。对于北方生态系统,净碳汇强度的空间变化主要取决 于 GPP 火灾后的恢复程度。叶面积指数(LAI)比归一化差异植被指数(NDVI)和增强植 被指数(EVI)更能解释阿拉斯加生态系统 GPP 和 NEE 的空间变化。Ruth 等(2017)对瑞 士高山沼泽地 8-9 月 CO₂净通量的昼夜模式进行研究,发现 CO₂的吸收随光照强度的变化 而变化(8 月为 98±57 至 391±43 mg·m⁻²h⁻¹),但在低辐射水平下光合作用的光饱和明显; 9 月的 CO₂通量与 8 月相比普遍较低,且 CO₂排放具有明显的温度依赖性。

青藏高原被称为"第三极",其气温上升速度是其他低海拔地区的两倍多(Zhou and

Zhang, 2021)。因此, 青藏高原湿地在全球变暖情景下的碳循环方面受到广泛关注。张法 伟等人(2008)利用 2005 年青藏高原东北部地区涡动协方差法测得的 CO2 通量数据,得出 高寒湿地生态系统是碳源,该年向大气排放 316.02 gCO2 • m⁻²,其中 5 月至 9 月生长季吸收 230.16 gCO2 • m⁻², 1 月至 4 月和 10 月至 12 月非生长季释放 546.18 gCO2 • m⁻²。日均 CO2 吸收率和释放率的最大值分别为7月的(0.45±0.0012) mgCO₂•m⁻²•s⁻¹和8月的(0.22 ±0.0090)mgCO2•m⁻²•s⁻¹。平均日变化在生长季节呈单峰型,但在非生长季节波动很小。 此外,他们还对影响因素进行分析,即 NEE 和 GPP 均与气温、VPD 和地表反射率相关,与 地上生物量呈负线性相关,而Re与这些因子呈正相关。Cao等(2017)利用 2011 年至 2013 年涡相关系统测量的青海湖高寒湿地生态系统不同营养发育阶段的 CO2 通量, 计算出青海 湖地区高山湿地生态系统是一个全年碳汇。平均生态系统净 CO2 交换量为-904.42g CO2/m2, Re 平均量为 1450g CO₂/m², GPP 平均为 2354.42g CO₂/m², 全年生长季 NEE、Re 和 GPP 均 为最大值。他们还探讨了 CO₂ 的控制因素,月 NEE 的值与月平均总太阳辐射(SR)、入射 光合有效辐射、VPD、月总降水量、月平均 LAI 和 EVI 之间存在显著的负相关。NEE 与月 平均气温、0-5cm 深度土壤温度和 RH 之间存在极显著的多项式非线性负相关。青海湖高山 湿地生态系统不同阶段的月 Re 量与月平均 EVI 呈线性关系外, 与其他因素呈显著的非线性 正相关。不同营养发育阶段的月 GPP 量与月平均气温呈显著指数相关、与 VPD 呈幂函数关 系、与月平均土壤温度呈二次多项式关系、与相对湿度和月降水量呈显著指数相关性、与月 平均 LAI 和 EVI 存在极显著的线性相关性。Adile 等人(2022)为了分析全球变暖的背景下 高寒湿地温室气体排放的反应,于2019年生长季对研究区进行变暖处理,即分别将温度升 高1°C和2°C,测量出青藏高原湿地中洼地和山丘微观地形特征的白天CO2通量。结果 表明,由于 GPP 和 Re 的增加,变暖显著增加了湿地两种微观地形特征的累积 NEE。NEE 通量是先上升后下降的,在7月底达到峰值,可见气候变暖增强了青藏高原高山湿地的 CO2 汇功能。Yan 等(2023)为了研究地下水位(WTL)变化和持续时间(DR)对高寒湿地碳 通量的影响,他们连续两年观测了若尔盖湿地生长季的碳通量,包括净生态系统生产力 (NEP)、Re、总生态系统生产率(GEP),采用混合效应模型分析了WTL 变化和DR对 高山泥炭地碳通量的影响。研究表明,WTL 和 DR 都显著影响了碳通量。WTL 对 Re、NEP 和 GEP 有显著负面影响。另一方面, DR 对 Re、NEP 和 GEP 有显著正面影响。此外, 环境 因素(温度、土壤含水量、地上生物量(AGB))与碳通量之间的关系因 WTL 而异。

尽管陆地生态系统在全球碳循环中扮演着关键角色,但高寒湿地生态系统碳收支的准确 评估和预测仍有待深入探究。涡动相关系统是一种重要的观测技术,可直接监测陆地生态系 统与大气之间的物质和能量通量。在全球变化研究中,它在国际通量网络(FLUXNET)以 及众多气象、生态和水文观测站点中扮演着关键角色(王少影等,2020)。该技术利用微气 象原理来估算垂直风速与物质或能量脉动的协方差,以直接测量植被冠层与大气之间的能量 和物质交换通量(Baldocchi,2020)。与传统的通量观测方法相比,涡动相关技术具有许多 优势:首先,它能够整合生态系统与大气之间的物质和能量交换(Aubinet, 2008; 宜树华 等,2022)。其次,在时间上,该方法可以实现连续的小时、日、月、年甚至年际尺度的通 量观测,提供了更长时间尺度的数据。第三,在空间尺度上,涡动相关技术可以显著增加单 个站点通量的尺度,通过印痕函数分析通量与来流影响区域之间的关系,确定对通量贡献较 大的"源区"范围,从而将观测扩展到区域范围,覆盖数百平方米到几平方千米的范围(王 雪等,2010;陈世苹等,2020)。本研究在补足通过涡动协方差法测得的 CO₂通量数据缺 测值和异常值的基础上,使用相关正态分布变量的总和和均值公式来计算经过边缘分布采样 法(Marginal Distribution Sampling, MDS)插值后 NEE 的不确定性,从而量化误差项,评 估模型预测的可靠性。

此外,高寒湿地生态系统的碳过程是复杂和敏感的,但长期动态及其驱动机制尚不清楚,即对于若尔盖高寒湿地近年来 CO₂交换通量的年际变化和驱动机制缺乏详细的研究。本文应用 CART 分类回归树算法对若尔盖高寒湿地近年来年均 GPP、Re 和 NEE 的变化特征进行分析,探讨主要环境因子,如气温、土壤温度、光合光子通量密度、降水量等对若尔盖高寒湿地 CO₂交换通量影响。对揭示高寒湿地生态系统的碳收支特征,以及对湿地保护、恢复以及国际气候变化研究领域提供基础数据,为未来气候变化下高寒湿地生态系统碳收支预测提供理论依据。

2 数据与研究方法

2.1 研究区域概况

若尔盖高寒湿地地处青藏高原东缘(101°51′-103°39′E,32°51′-34°19′N)(图 1),平均海拔约 3500 m,该区域四季区分不明显,属于高原亚寒带半湿润大陆性季风气候 (陆宣承等,2020),有冷暖季节之分,年均气温 0.6-1.2 ℃,90%降水主要集中于温润而 凉爽的夏季(4-9月),冬季干燥寒冷,年降雨量 612 mm 到 770 mm. 植被返青期为 5-6 月, 生长旺盛期为 7-8 月,在 10 月中旬以后进入非生长季. 日照充足,年均日照时数 2100 h 左 右(冉启凡等,2015)。

本文所采集的数据来自中国科学院若尔盖高原湿地生态系统研究站花湖观测场,该观测场位于四川省阿坝藏族自治州的若尔盖高寒湿地北部边界(102°49′09″E,33°55′09″N)。观测点位于海拔3435m处,地表为典型的高寒泥炭沼泽湿地,植被、水体和泥炭层发育良好,土壤主要为沼泽土和亚高山草甸土(陆宣承等,2020)。水体通常在12月前后开始结冰,次年4月前后解冻(郭斌等,2018)。



图 1 若尔盖高寒湿地的地理位置及地形图(图中阴影区为若尔盖高寒湿地范围) Fig.1 The geographical location and topographic map of the Zoige alpine wetland (the shadow area in the figure is the range of the Zoige alpine wetland)

2.2 研究数据

本文基于 2017-2021 年花湖湿地观测数据和常规气象观测数据,开展对若尔盖高寒湿地 碳交换通量的分析研究。文中使用的数据包括:碳交换通量、感热通量、潜热通量、相对湿度、气温、土壤温度、摩擦速度和降水量等观测数据。

花湖湿地观测场内设有涡动相关系统、辐射观测系统和土壤水热观测系统等主要观测系统。涡动相关系统安装在 2.4m 高处,包括三维超声风速仪 CSAT3 (美国 Campbell Scientific, Inc.)、开路式水汽二氧化碳分析仪 LI-7500RS (美国 LI-COR Biosciences)以及 CR3000数据采集器。辐射收支观测系统使用 CNR4 四分量净辐射传感器(荷兰 Kipp&Zonen B.V.)并安装在 1.6m 高处。土壤水热观测系统深度为 10.0cm,包括 HFP01SC-10 自标定型土壤热通量板、CS616 土壤水分传感器和 109 温度传感器 (美国 Campbell Scientific, Inc.)。

观测数据处理包括以下步骤: (1) 排除受降水和仪器故障等影响的数据时段,并通过 方差检验法去除异常值; (2)进行二维坐标旋转并消除平均值,得到湍流脉动量; (3) 对 湍流通量进行必要的修正,例如密度脉动修正(Webb-Pearman-Leuning, WPL)等; (4) 对缺失数据,采用 MDS 进行插补处理。

2.3 研究方法

2.3.1 CO2交换通量预处理与数据质量控制

已有研究表明,涡度协方差站点会受到夜间通量误差的影响(陈世苹等,2020),夜间 通量误差的主要成因是在弱湍流条件下,相比湍流通量,储存通量和平流项变得更为重要, 导致 CO2通量被低估,年际尺度上 NEE 被高估。为了抵消这种误差,有必要对数据进行处 理(吴家兵等,2007)。本研究采用 Ustar 阈值确定涡动通量(如热量、水汽和二氧化碳等) 是否有效,在仪器所在高度测量对应的最小摩擦速度(u*)定义为u* 阈值。这里 u*根据 Papale 等人(2006) 描述的方法估计,即基于断点检测法(the breakpoint detection method, CPT) 来估计 u* 阈值的。

涡度协方差方法提供了生态系统和大气之间质量和能量交换的连续数据集。然而,由于 不利的微观气象条件和仪器故障会造成数据的缺失和误差。因此,有必要对这些数据进行标 准化填补(缺口填补),以获得每日、每月或每年的数据集。

在应用 Ustar 阈值滤除 NEE 之后,可能会导致更多的 NEE 数据缺失,需要进行插补处 理。本研究使用的通量观测数据总体缺失值较少,其中 2018 年缺失值相比于其他年份多一 点,但多为几小时的短时间数据缺失,误差影响较小;2021 年则出现过大约 16 天的较长时 间数据缺失。在进行涡动相关法观测时,常常会遇到数据空缺的情况。数据缺失的原因可能 是仪器故障,例如涡动相关系统中的传感器、数据记录设备发生故障,导致数据采集中断或 数据丢失。恶劣的天气条件(如风暴、闪电等)也可能影响仪器的正常运行或数据的采集质 量。此外,操作人员的维护不当或操作失误可能导致数据采集不完整或错误。

本研究采用 MDS 插值法来填补这些缺失数据,该方法结合了查表法插补(Look-up Table, LUT)和平均日变化曲线法(Mean Diurnal Course, MDC)两种技术,同时考虑了通量与气 象变量的相关性以及通量的时间自相关性(Reichstein 等, 2005),根据通量数据与气象因 子之间的关系以及通量数据在时间上的自相关性进行插补(白雪洁等, 2022)(图 2)。



图 2 运用 MDS 算法插补 NEE 流程图(Rg 为向下短波辐射(Global Radiation)) Fig.2 Interpolation of NEE flow chart using MDS algorithm

2.3.2 MDS 插值的不确定性

在 NEE 插补过程中使用 MDS 算法可以填充缺失值,但难免会引入误差。因此我们需要量化误差项,计算插值的不确定范围。这里使用相关正态分布变量的总和和均值的公式来

计算均值的不确定性,评估模型预测的可靠性。按照 MDS 算法计算原理每个 NEE 值的随机误差仅与临近值的随机误差部分相关,此外,与单个观测的平均相对不确定性相比,总体值的相对不确定性会降低。

均值的计算公式为:

$$m = \frac{\sum x_i}{n} \tag{1}$$

这里考虑 NEE 之间存在相关性, 方差公式为:

$$Var(m) = \frac{s^2}{n_{eff}}$$
(2)

式中, $s^2 = \frac{n_{eff}}{n_{(n_{eff}-1)}\sum_{i=1}^{n}\sigma_i^2}$,并且随着有效观测次数的增加; σ^2 为方差, $\sigma_i = x_i - x_i$; 有效观测值的数量 n_{eff} 会随着记录之间的自相关而减小(Bayley and Hammersley, 1946; Zieba and Ramza, 2011),其计算公式如下:

$$n_{eff} = \frac{n}{1 + 2\sum_{k=1}^{n-1} \left(1 - \frac{k}{n}\right)\rho_k}$$
(3)

式中, ρ_k 为观测数据, $k = 0, 1, \dots, n-1$ 。

平均标准偏差 $\sqrt{\sigma_i^2}$ 的减少与 $\sqrt{n_{eff}}$ 有关:

$$Var(m) = \frac{s^2}{n_{eff}} = \frac{\frac{n_{eff}}{n(n_{eff}-1)} \sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2}{n_{eff}} = \frac{1}{n(n_{eff}-1)} \sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2 = \frac{1}{n(n_{eff}-1)} n \overline{\sigma_i^2} = \frac{\overline{\sigma_i^2}}{(n_{eff}-1)}$$
(4)
2.3.3 GPP 和 Re 计算方法

净生态系统交换量(NEE)是指生态系统与大气之间的净碳交换量,包括植物的吸收和释放 CO₂、土壤呼吸以及其他生态系统过程对碳循环的影响。NEE 通常用于评估生态系统的碳平衡状态(Baldocchi, 2003),它表征陆地生态系统吸收大气碳能力的高低(张睛和李力, 2009),通常来说 NEE 为正值时,陆地生态系统为碳源,反之,则为碳汇(范德民, 2020)。因此,NEE 可以反映一个地区碳吸收/释放碳能力的大小。NEE、Re 和 GPP 三者关系为:

$$NEE = R_e - GPP = (R_{e,day} + R_{e,night}) - GPP$$

式中, GPP、Re、NEE 的单位为 umol·m⁻²s⁻¹。

目前,NEE 拆分为 Re 和 GPP 主要方法有利用夜间 NEE 数据拆分(Reichstein et al.,2005) 和利用白天 NEE 数据(Lasslop et al., 2010)拆分两种。夜间 NEE 数据拆分方法基于假设 植被呼吸(Re)只与气温(Ta)相关,利用夜间 NEE 对气温的响应曲线推导白天植被呼吸,并通过净生态系统交换值计算白天总生产力(GPP),目前,夜间 NEE 数据拆分方法更为 常用。

本研究使用夜间 NEE 数据拆分方法,依据 Lloyd-Taylor 方程(Lloyd and Taylor, 1994) 可以计算生态系统呼吸(Re):

$$R_e = R_{e,ref} e^{E_0 \left(\frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0}\right)}$$
(6)

(5)

式中, R_e 单位为 umol·m⁻²s⁻¹; T 为土壤温度; $R_{e,ref}$ 为生态系统的基础呼吸速率,单位为 umol·m⁻²s⁻¹; 活化能 $E_0 = 307K$; 参考温度 $T_{ref} = 238.15K$; 生态系统呼吸为零时的土壤温度 $T_0 = 227.13K$ 。

为了从夜间数据中过滤生态系统呼吸(Re),仅选择 Rg小于 10 W/m²的数据,并与当 地时间的日出和日落数据以及标准太阳计算的潜在辐射进行交叉检查。接下来,将数据集拆 分为长度为 14 天的连续周期,并检查每个时段的可用数据点是否超过 6 个,以及温度范围 是否超过 5℃。只有在这些条件下,所得结果才合理。

对每个周期计算的回归参数和统计量,然后进行回归后的评估。假设具有最小标准误差 E₀的三个估计值能最好地代表R_e短期温度响应,并将其平均,从而得到整个数据集的E₀值。 随后,在参考温度(R_{e,ref})下,利用R_e与温度的非线性回归,根据E₀连续4天的夜间数据 估计呼吸的季节性过程(徐晓梧等,2020)。其中E₀固定为E_{0,avg}值(总窗口大小为七天)。 然后将估计值R_{e,ref}分配到周期的中心时间点,并进行线性插值。最后,R_e可以将其估计为 温度的函数,因为对于每个半小时,参数E₀和R_{e,ref}都是可用的。

夜间太阳辐射小于 10 W/m², 植被基本不发生光合作用, 夜间净 CO₂交换量(*NEE_{night}*) 与夜间生态系统呼吸 (*R_{e,night}*) 间关系为(孙爽等, 2022):

$$IEE_{night} = -R_{e,night} \tag{7}$$

故用式(2)对筛选后的NEE_{night}与土壤温度分时段进行拟合,并对模型进行校准和参数化,从而计算生态系统白天的呼吸(R_{e,day})值。再由式(1)计算植被GPP的值。 2.3.4 决策树算法

常见的决策树算法有分类和回归树(Classification and Regression Tree, CART)、ID3 迭代二分器(Iterative Dichotomiser 3, ID3)、C4.5(Classification and Regression Tree using 4.5 Release)和卡方自动交互检测(Chi-squared Automatic Interaction Detection, CHAID)等 (Martin and Naomi, 2017)。其中,C4.5 算法在 ID3 算法基础上进行了改进,能够处理连 续型特征和缺失值,并采用信息增益比来选择最佳特征。C4.5 算法具有高度的灵活性和泛 化能力,但它容易受到噪声和异常值的干扰。但是 ID3 和 C4.5 算法,生成的决策树是多叉 树,只能处理分类不能处理回归(李强,2006),而 CART 分类回归树算法,既可用于分 类也可用于回归(路红梅,2007)。CART 使用基尼系数(Gini Index)作为分裂准则,它 衡量了分裂后的样本集合的纯度。C4.5 使用信息增益(Information Gain)作为分裂准则, 它衡量了分裂后的信息熵的减少程度(张晋敏等,2022)。另外,对于缺失值的处理,CART 对于缺失值有较好的处理能力,可以通过将样本分到子节点中的多个分支来处理缺失值。 C4.5 也可以处理缺失值,但是它使用了一种启发式的方法来估计缺失值(袁汉宁等,2020)。 总的来说,CART 更加灵活,适用于分类和回归问题,并且对于处理缺失值有较好的能力。 C4.5 主要用于分类问题,使用信息增益作为分裂准则,但它在处理缺失值方面相对较弱。

分类树的输出是样本的类别,回归树的输出是一个实数。CART 算法将数据集划分为两

个子集,每次选取最佳的特征和最佳的切分点,生成二叉树结构,用于分类和回归问题。 CART 算法具有高效、易于理解和实现等优点,但它容易产生过拟合问题,需要对模型进行 剪枝处理(官雨洁等,2018)。另外,选择哪种决策树算法需要根据具体问题需求和数据特 点进行综合评估。如果样本量较大、特征数较多且存在混杂数据,则应选择 CART 算法; 如果数据集中存在连续型特征和缺失值,则应选择 C4.5 算法(谢金梅和王艳妮,2008)。 本文研究 2017-2021 年五年内的每日平均气象要素对碳交换通量的影响,样本量较大,因此 选取 CART 算法。

3 碳交换通量年及际变化和驱动因素分析



Fig.3 Daily NEE uncertainty using MDS interpolation during 2017-2021 (Green solid line represents the value of NEE, grey shadow represents uncertainty)

计算出 2017-2021 年五年间使用 MDS 插值后,每日 NEE 的不确定性(图 3),可以看出不确定性平均在每日-0.2gC/m²到 0.2gC/m²之间,这意味着经过 MDS 插值处理后的 NEE 数据在统计意义上具有较小的变动范围。这种相对较小的不确定性范围表明, MDS 插值方 法在填补缺失的 NEE 数据时能够提供较为稳健和可靠的结果。

3.2 碳交换通量的日变化特征

对 2017-2021 年五年间 NEE 每半小时通量进行平均,得出 NEE 半小时变化的年分布图 (图 4),可以看出若尔盖高寒湿地生态系统在生长季节是一个碳汇,即一个吸收比释放更 多的大气碳库。在生长季(6-10 月),白天的时候 NEE 负值尤为明显,此时对应植物生长 旺盛,吸收 CO₂ 能力强,在非生长季 NEE 平均数值较小,此时植被衰败,有光合作用吸收 CO₂ 的能力下降。



图 4 2017-2021 年期间右尔盖湿地恢父挟进重半均年受化 Fig.4 Average annual variation of carbon exchange flux in Zoige wetland during 2017-2021

绘制出年均 NEE 变化的散点图(图 5),图中黑色的点代表 NEE 五年内年均每半小时的变化,红线代表 NEE 每日的平均值,从图中可以更好的看出,在生长季年均 NEE 呈 V型趋势。结果同张法伟等人(2008)的一致,碳通量平均日变化在生长季呈单峰型,在非生长季波动很小。



图 5 2017-2021 年期间若尔盖湿地碳交换通量半小时变化的平均年分布图(红色实线代表每日 NEE 的平均值,黑色点代表 NEE 每半小时的值)



由于高寒湿地非生长季温度低、降水少,植被生长代谢较弱,与生态系统呼吸相比,植被的光合生产能力较低(Zhao et al., 2010),因此高寒湿地在非生长季 NEE 每日平均在 0 左右波动。在生长季,由于青藏草原的特殊气候和生长季节有利的水热条件,草原植物具有较高的初级生产能力(Luo et al., 2015)。此外,由于温度相对较低,尤其是夜间温度较低,植被呼吸和土壤呼吸消耗的有机质相对较少(Chai et al., 2017),因此,NEE 相对更高,导致生长季高寒湿地是碳汇。



图 6 2017-2021 年期间若尔盖湿地碳通量的平均年变化 (a) NEE 的年均变化和 (b) GPP 的年均变化以及 (c) Re 的年均变化

Fig.6 Average annual variation of carbon flux in Zoige wetland from 2017 to 2021 (a) annual variation of NEE and (b) annual variation of GPP and (c) annual variation of Re

统计出年均 NEE, GPP, Re 的数值(图 6),结果表明,在生长季(6-10 月),年均 生态系统总初级生产力(GPP)和生态系统呼吸(Re)呈单峰模式,年均生态系统 CO₂交 换(NEE)呈 V型趋势,多年日平均 NEE、GPP 和 Re 分别达到-3.10±4.61、4.78±5.61 和 1.65±1.56 umol/(m² • s)。

3.3 碳交换通量驱动因素分析

在月度尺度上,应用皮尔逊相关性分析了气温(Ta)、土壤温度(Ts)、光合光子通量 密度(Photosynthetic Photon Flux Density, PPFD)、降水量(Precipitation, PPT)、空气相 对湿度(Air Relative Humidity, RH)和水汽压差(VPD)分别对 NEE、GPP 和 Re 的影响 (表 1),结果显示,Ts、Ta 和 VPD 是月度 NEE 变化的主要决定因素,NEE 与它们都呈负 相关(R < -0.85)。Ts 和 Ta 在很大程度上决定了每月 GPP 的变化,GPP 与其呈正相关(R > 0.90),Ts、Ta 和 PPT 是月度 Re 变化的主要决定因素,Re 与它们都呈正相关(R > 0.95)。 表 1 碳交换通量的影响因素相关性分析



对这些影响因素进行 T 检验,来比较变量间的差异是否显著,结果表明,碳通量的影响因子都通过了显著性检验(P>0.05)。Cao等(2017)在生长季对青藏高原高寒湿地碳通量也进行过影响因素的分析,他们研究得出月 NEE 与光照、VPD、降水量之间存在显著的负相关,NEE 与平均气温、土壤温度和 RH 之间存在极显著的多项式非线性负相关。与本研究结果类似,即 NEE 与上述影响因素相关性为负。

Chayawat 等人(2019)研究表明 NEE 的上升随着温度和蒸汽压的增加而减少。一般来 说,高 VPD 可能会降低通过气孔的 CO₂含量,而较低的温度可能会导致呼吸增加。在高温 (Ta ≥ 30°C)下,光合作用受到抑制,并且与植物的呼吸能力很强,导致 CO₂吸收不足。 另一方面,VPD 通过影响气孔关闭来控制光合速率。湿地的碳通量受多种因素的影响,包 括温度、生物量和湿地表面的水深等。这些因素对湿地生态系统的碳循环和光合作用能力有 着重要影响。温度是影响湿地植被光合作用和生长代谢的关键因素。较高的温度可以促进植 物的光合作用和呼吸作用,加速生长过程。此外,温度还会影响土壤中微生物的数量和酶活 性,进而影响土壤有机质的分解和养分释放,间接影响植被的光合作用能力(Kato et al., 2006)。植被的生物量对湿地生态系统的碳循环和净生态系统交换也起着重要作用,高寒植 被具有更多的地上生物量(Shen et al., 2015),而温度的累积效应是影响植被休眠、植被 返青和生长代谢的主要因素(Ganjurjav et al., 2015;祝景彬等,2021)。湿地表面的水深 对土壤呼吸有重要影响,适当的水分条件有利于土壤氧气进入,促进微生物对有机质的分解, 为植被提供养分,从而间接促进植被的光合作用能力的提高(Chimner and Cooper, 2003)。

应用 CART 算法分析 2017-2021 年平均每日间各个要素对碳交换通量的影响,结果显示, Ta 可以解释每日 NEE 变化的 73.3%(图 7a),Ts 可以解释每日 GPP 变化的 76.4%(图 7b)。 Ts 是每日 Re 的主导因素,可以解释每日 Re 变化的 82.4%(图 7c)。因此,Ts 对日尺度上 GPP 和 Re 的变化有较大影响,而 Ta 是 NEE 的主要控制因素。研究结果指出,在全球变暖 的情况下,有利于提升高寒湿地的总初级生产能力。这可能是由于高寒草地植被在地上生物 量方面相对较高(Zhu et al., 2022;贺慧丹等,2022)。然而,一些研究也指出,温度的上 升会增加生态系统的呼吸作用,土壤高温可以刺激微生物活性和酶活性,从而促进生态系统 的呼吸作用(李岩等,2020)。因此,对于高寒湿地生态系统的碳平衡状态仍需要更深入的 研究。另外,Ts 对高山湿地月 Re 的控制作用比 Ta 更强,这表明与植被呼吸相比,高山湿 地的土壤呼吸可能对热条件更敏感。

K



图 7 高寒湿地环境变量的逐日碳通量回归树 (a) 逐日 NEE 的回归树模型和 (b) 逐日 GPP 的回归树模型及其(c) Re 逐日的回归树模型(图中 MEAN 为碳通量的平均值、SD 为标准 差、N 为个数、PRE 为精确度)

SD=0.601 N=85

Fig.7 Daily carbon flux regression tree of environmental variables in alpine wetland (a) daily NEE regression tree model and (b) daily GPP regression tree model and (c) Re daily regression tree model (MEAN is the average value of carbon flux, SD is the standard deviation, N is the number, PRE is the accuracy)

为了将本论文的结论与其他湿地的研究结果进行比较,我们将不同研究结果整理归纳 (表 2),从而明确本文的研究在全球湿地碳通量领域中的相对位置,从而深化对湿地碳汇 功能和环境影响的理解。这种比较可以验证本研究结果的普遍性或特殊性,并为未来的湿地 研究和管理提供更有针对性的参考。

表 2 不同研究关于高寒湿地碳通量结果的比较

Table 2 Comparison of Carbon Flux Research in Alpine Wetlands by Various Scholars							
不同研究	地区	时间范围	研究方法	主要结果			
Masahito et al.	阿拉斯加	1998-2010 年	CO2通量数据合成	北极苔原在生长季为碳汇,CO ₂ 排 放季节性由气温决定,GPP与NEE 的空间变化与生长季时长相关			
Ruth et al.	瑞士高山 沼泽地	8-9月	CO ₂ 净通量昼夜 模式测量	CO2吸收随光照强度变化,光合作 用光饱和明显,9月 CO2排放温度 依赖性显著			
张法伟等	青藏高原 东北部	2005 年全 年	涡动协方差法测 量	高寒湿地是碳源,生长季吸收 230.16 gCO ₂ ·m ⁻² ,非生长季释放 546.18 gCO ₂ ·m ⁻²			
Cao et al.	青海湖高 寒湿地	2011-2013 年	涡相关系统测量	高山湿地是全年碳汇,NEE 与 GPP、Re 与环境因素显著相关			

Adile et al.	青藏高原	2019 年生	变暖处理 CO2 通	变暖显著增加 NEE,气候变暖增
	湿地	长季	量测量	强 CO2 汇功能
Yan et al.	若尔盖湿 地	连续两年	碳通量观测和混 合效应模型分析	WTL和DR显著影响碳通量,WTL
				负面影响 Re、NEP 和 GEP, DR
				正面影响
本文	若尔盖高 寒湿地	6-10 月	影响因子分析、 CART 算法	GPP 和 Re 呈单峰模式, NEE 呈 V
				型趋势, Ts 对 GPP 和 Re 有较大影
				响,Ta是NEE的主要控制因素

4 结论和展望

本研究分析了若尔盖高寒湿地 2017-2021 年间涡动相关法测得的 NEE 的变化,用夜间 NEE 数据拆分方法,得到 GPP 和 Re 的值,可以知道,在若尔盖高寒湿地生态系统中,生 长季(6-10月)是一个碳汇,在这段时期内,植被吸收大气中的 CO₂能力强于释放。进一步分析了碳交换通量在月尺度和日尺度上的驱动因素。研究表明:

(1)统计出年均 NEE, GPP, Re 的数值,结果表明,在生长季(6-10月),年均生态
系统总初级生产力(GPP)和生态系统呼吸(Re)呈单峰模式,年均生态系统 CO₂交换(NEE)
呈 V 型趋势。统计出,多年日平均 NEE、GPP 和 Re 分别达到-3.10±4.61、4.78±5.61 和 1.65
±1.56 umol/(m² • s)。

(2)土壤温度(Ts)、气温(Ta)和水汽压差(VPD)是月度碳交换通量变化的主要驱动因素,对 NEE、GPP 和 Re 都具有显著的影响。其中,土壤温度(Ts)对生态系统呼吸(Re)的影响最为显著。

(3) 日尺度上的分析显示, 土壤温度(Ts) 对每日 GPP 和 Re 的变化有较大的影响, 而气温(Ta) 是每日 NEE 的主要控制因素。在实际中,该研究对于我国高寒湿地的碳贮量 和恢复具有重要意义,可以为湿地保护和恢复提供数据支持,也为国际气候变化研究提供基 础数据支持。

未来研究可以进一步探索其他影响碳交换通量的其他因素,以全面了解高寒湿地生态系 统碳交换通量的驱动机制。对于涡度相关法的应用,可以进一步改进夜间通量误差的处理方 法,以提高数据的准确性和可靠性。

参考文献:

Adile Y, Niu B, Chen Z G, et al. 2022. Effect of warming on the carbon flux of the alpine wetland on the Qinghai-Tibet Plateau, Frontiers in Earth Science[J]. 10: 935641.

- Aubinet M. 2008. Eddy covariance CO₂ flux measurements in nocturnal conditions: an analysis of the problem[J]. Ecological Applications, 18: 1368-1378.
- 白雪洁,王旭峰,柳晓惠,等. 2022. 黑河流域湿地、农田、草地生态系统碳通量变化特征及驱动因子分析[J]. 遥 感技术与应用, 37(1): 94-107. Bai Xuejie, Wang Xufeng, Liu Xiaohui, et al. 2022. Dynamics and Driving

Factors of Carbon Fluxes in Wetland, Cropland and Grassland Ecosystems in Heihe River Basin[J]. Remote Sensing Technology and Application, 37(1): 94-107.

- Baldocchi D. 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future[J]. Global change biology, 9(4): 479-492.
- Baldocchi D. 2020. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of global change biology[J]. Global Change Biology, 26: 242-260.
- Bayley G V, Hammersley J M. 1946. The "effective" number of independent observations in an autocorrelated time series[J]. Journal of the Royal Statistical Society, 8(2): 184-197.
- Cao S K, Cao G C, Feng Q, et al. 2017. Alpine wetland ecosystem carbon sink and its controls at the Qinghai Lake[J]. Environmental Earth Sciences, 76: 210.
- Chai X, Shi P L, Zong N, et al. 2017. Biophysical regulation of carbon flux in different rainfall regime in a northern Tibetan alpine meadow[J]. Journal of Resources and Ecology,8(1):30-41.
- Chayawat C, Satakhun D, Kasemsap P, et al. 2019. Environmental controls on net CO₂ exchange over a young rubber plantation in Northeastern Thailand[J]. ScienceAsia, 45(1):50-59.
- 陈世苹,游翠海,胡中民,等. 2020. 涡度相关技术及其在陆地生态系统通量研究中的应用[J]. 植物生态学报, 44(4): 291-304. Chen Shiping, You Cuihai, Hu Zhongmin, et al. 2020. Eddy covariance technique and its applications in flux observations of terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 44(4): 291-304.
- Chimner R A, Cooper D J. 2003. Influence of water table levels on CO₂ emissions in a colorado subalpine fen:an in situ microcosm study[J]. Soil Biology and Biochemistry, 35(3): 345-351.
- 范德民. 2020. 北极地区典型下垫面碳收支特征分析[J].地理科学研究, 9(4): 205-214. Fan Demin. 2020. Analysis of carbon budget characteristics of typical underlying surfaces in the Arctic region [J]. Geographical Science Research, 9(4): 205-214.
- Ganjurjav H, Gao Q Z, Zhang W N, et al. 2015. Effects of warming on CO2 fluxes in an alpine meadow ecosystem on the central Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plos One, 10(7): e0132044.

官雨洁,王伟,刘寿东. 2018. 基于 CART 算法的夏季高温预测模型构建与应用[J]. 气象科学, 38(4): 539-544. Guan Yujie, Wang Wei, Liu Shoudong. 2018. Building and application of summer high temperature prediction model based on CART algorithm[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 38(4): 539-544.

郭斌,王珊,张菡,等. 2018. 若尔盖湿地天然牧草生育期变化特征及其对气候变化的响应[J]. 高原山地气象研 究, 38(2): 49-57. Guo Bin, Wang Shan, Zhang Han, et al. 2018. Change Characteristics of Growth Period of Natural Grass in Zoige Wetland and Its Response to Climate Change[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2018, 38(2): 49-57.

- 贺慧丹,李红琴,符义稳,等. 2022. 祁连山南麓高寒灌丛生态系统生长季 CO2 通量动态年际特征及环境驱动 [J]. 科学通报, 67(2): 173-183. He Huidan, Li Hongqin, Fu Yiwen. 2022. Interannual characteristics and driving mechanism of CO2 fluxes in alpine shrubland ecosystem during growing season at the southern foot of Qilian Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 67(2): 173-183.
- Houghton R A. 2014. The Contemporary Carbon Cycle[J]. Treatise on Geochemistry (Second Edition), 10: 399-435.
- Kato T, Tang Y H, Gu S, et al. 2006. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO₂ exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Global Change Biology, 12(7): 1285-1298.
- Lasslop G, Reichstein M, Papale D, et al. 2010. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation[J]. Global Change Biology, Wiley Online Library, 16: 187-208.

李成一,李希来,孙华方,等. 2020. 高寒湿地旱化过程及其对 CO2交换的影响[J]. 草地学报, 28(3): 750-758. Li

Chengyi, Li Xilai, Sun Huafang, et al. 2020. Drought Processes of Alpine Wetland and Their Influences on CO₂ Exchange[J]. Acta Agrestia Sinica, 28(3): 750-758.

- 李国栋,张俊华,陈聪,等. 2013. 气候变化背景下中国陆地生态系统碳储量及碳通量研究进展[J]. 生态环境学报, 22(5): 873-878. Li Guodong, Zhang Junhua, Chen Cong, et al. 2013. Research progress on carbon storage and flux in different terrestrial ecosystem in China under global climate change[J]. Ecology and Environmental Sciences, 22(5): 873-878.
- 李强. 2006. 创建决策树算法的比较研究——ID3,C4.5,C5.0 算法的比较[J]. 甘肃科学学报, 4: 84-87. Li Qiang. 2006. A Comparative Study on Algorithms of Constructing Decision Trees——ID3,C4.5 and C5.0[J]. Journal of Gansu Sciences, 4: 84-87.
- 李岩,干珠扎布,胡国铮,等. 2020. 增温对青藏高原高寒草甸呼吸作用的影响[J]. 生态学报, 40(1): 266-273. Li Yan, Hasbagan Ganjurjav, Hu Guozheng, et al. 2020. Effects of warming on respiration in alpine meadow in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 40(1): 266-273.
- 刘晓文. 2020. 陆地生态系统过程模型参数估计及其在碳水通量模拟中的研究——以 CEVSA 模型为例 [D]. 兰州大学硕士学位论文. Liu Xiaowen. 2020. Parameter Estimation of Terrestrial Ecosystem Process Model and its Application in Carbon and Water Fluxes Simulation—the CEVSA Model as an Example[D]. Lanzhou University, Chinese Academy of Sciences.
- Lloyd J, Taylor J A. 1994. On the temperature dependence of soil respiration[J]. Functional Ecology, 8(3): 315-323.
- 陆宣承,文军,田辉,等. 2020. 若尔盖高寒湿地-大气间水热交换湍流通量的日变化特征分析[J]. 高原气象,39(4):719-728. Lu Xuancheng, Wen Jun, Tian Hui, et al. 2020. Analysis of the Turbulent Fluxes of Water & Heat Exchange between the Zoige Alpine Wetland and Atmosphere[J]. Plateau Meteorology, 39(4): 719-728.
- 路红梅.2007.基于决策树的经典算法综述(论文资料[J]. 宿州学院学报, 22(2): 91-95. Lu Hongmei. 2007. Review of Classification Algorithn based on Decision Tree[J]. Journal of Suzhou College, 22(2): 91-95.
- Luo C Y, Zhu X X, Wang S P, et al. 2015. Ecosystem carbon exchange under different land use on the qinghai-Tibetan plateau[J]. Photosynthetica,53(4):527-536.
- Martin K, Naomi A. 2017. Classification and regression trees[J]. Nature Methods, 14: 757-758.
- Masahito U, Hiroki I, Yoshinobu H, et al. 2013. Growing season and spatial variations of carbon fluxes of Arctic and boreal ecosystems in Alaska (USA)[J]. Ecological Applications, 23(8): 1798-1816.
- Papale D, Reichstein M, Aubinet M, et al. 2006. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: Algorithms and uncertainty estimation[J]. Biogeosciences, 3(4): 571-583.
- 冉启凡,孙庚,刘琳,等. 2015. 若尔盖高寒草地沙化过程碳通量的变化特征[J]. 应用与环境生物学报, 21(5): 954-959. Ran Qifan, Sun Geng, Liu Lin, et al. 2015. Changes in carbon flfl uxes during the desertififi cation process of alpine grasslands on the Zoige Plateau[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 21(5): 954-959.
- Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, et al. 2005. On the Separation of Net Ecosystem Exchange into Assimilation and Ecosystem Respiration: Review and Improved Algorithm[J]. Global Change Biology, 11(9): 1424-1439.
- Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, et al. 2005. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm[J]. Global Change Biology, 11: 1424-1439.
- Ruth H, Simrita C, Marc F, et al. 2017. Diurnal Patterns of Greenhouse Gas Fluxes in a Swiss Alpine Fen[J]. Wetlands, 37: 193-204.
- Shen M G, Piao S L, Jeong S J, et al. 2015. Evaporative cooling over the Tibetan Plateau induced by vegetation growth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 112(30): 9299-9304.

- 孙爽,郑东海,刘少民,等. 2022. Noah-MP 陆面模式在高寒草地生长季水热交换的模拟评估和改进[J]. 中国科 学: 地球科学, 52(4): 679-696. Sun Shuang, Zheng Donghai, Liu Shaomin, et al. 2022. Assessment and improvement of Noah-MP for simulating water and heat exchange over alpine grassland in growing season[J]. Scinence China Earth Sciences, 52(4): 679-696.
- 王少影,张宇,孟宪红,等. 2020. 机器学习算法对涡动相关缺失通量数据的插补研究[J]. 高原气象, 39(6): 1348-1360. Wang Shaoying, Zhang Yu, Meng Xianhong, et al. 2020. Fill the Gaps of Eddy Covariance Fluxes Using Machine Learning Algorithms[J]. Plateau Meteorology, 39(6): 1348-1360.
- 王雪,蔡旭晖,康凌,等. 2010. 复杂地形湍流观测特征及通量代表性分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 46(6): 965-971. Wang Xue, Cai Xuhu, Kang Ling, et al. 2010. Assessment of Turbulence State and Analysis of Flux Footprint over Complex Terrain[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 46(6): 965-971.
- 吴家兵,关德新,孙晓敏,等. 2007. 长白山阔叶红松林二氧化碳湍流交换特征[J]. 应用生态学报, 18(5): 953-958. Wu Jiabing, Guan Dexin, Sun Xiaomin. 2007. CO₂ turbulent exchange in a broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 18(5): 953-958.
- 谢金梅,王艳妮. 2008. 决策树算法综述[J]. 软件导刊, 11: 83-85. Xie Jinmei, Wang Yanni. 2008. Review of Decision Tree Algorithms[J]. Software Guide,, 11: 83-85.
- 徐晓梧,李瀚之,余新晓,等. 2020. 基于稳定碳同位素的北京西山侧柏林生态系统呼吸区分[J]. 应用生态学报, 31(6): 1844-1850. Xu Xiaowu, Li Hanzhi, Yu Xinxiao, et al. 2020. Partitioning ecosystem respiration of a Platycladus orientalis forest in the west mountainous area of Beijing, China using stable carbon isotope[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 31(6): 1844-1850.
- Yan L, Li Y, Zhang X D, et al. 2023. Carbon fluxes of alpine peatlands were jointly affected by water table level changes and the duration[J]. Journal of Soils and Sediments, 23: 3776–3786.
- 宜树华,陈世苹,李英年,等. 2022. 中国生态脆弱区联网协同观测及其在承载力研究中的应用[J]. 应用生态学报, 33(8): 2271-2278. Yi Shuhua, Chen Shiping, Li Yingnian, et al. 2022. Collaborative monitoring network of ecologically fragile areas in China and its application in carryingcapacity research[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 33(8): 2271-2278.
- 袁汉宁,王树良,金福生,等. 2020. 数据仓库与数据挖掘(第2版)[M]. 北京: 机械工业出版社. Yuan Hanning, Wang Shuliang, Jin Fusheng, et al. 2020. Data Warehouse and Data Mining (2nd Edition)[M]. Beijing: China Machine Press.
- Zhao L, Li J, Xu S X, et al. 2010. Seasonal variations in carbon dioxide exchange in an alpine wetland meadow on the qinghai-Tibetan plateau[J]. Biogeosciences,7(4):1207-1221.

Zhang F W, Liu A H, Li Y N, et al. 2008. CO₂ flux in alpine wetland ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 28(2): 453-462.

- 张晋敏,李旭芳,樊弟. 2022. 基于决策树的上市公司风险分类与预测[J]. 应用数学进展, 11(1): 370-380. Zhang Jinming, Lixufang, Fandi. 2022. Risk Classification and Forecast of Listed Companies Based on Decision Tree[J]. Advances in Applied Mathematics, 11(1): 370-380.
- 张睛,李力. 2009.我国净生态系统碳交换量(NEE)的时空变化特征研究[J].安徽农业科学, 37(7): 3108-3140. Zhang Jing, Li Li. 2009. Study on the spatiotemporal variation characteristics of net ecosystem carbon exchange (NEE) in China [J]. Anhui Agricultural Science, 37(7): 3108-3140.
- Zhou T, Zhang W. 2021. Anthropogenic warming of Tibetan Plateau and constrained future projection[J]. Environmental Research Letters, 16(4): 044039.
- Zhu J H, Li H Q, He H D. 2022. Interannual characteristics and driving mechanism of CO₂ fluxes during the growing season in an alpine wetland ecosystem at the southern foot of the Qilian Mountains[J]. Frontiers in plant science, 13: 1013812.
- 朱玲玲,戎郁萍,王伟光,等. 2013. 放牧对草地生态系统 CO2 净气体交换影响研究概述[J]. 草地学报, 21(1):

3-10. Zhu Lingling, Rong Yuping, Wang Weiguang, et al. 2013. Effects of Grazing on the Net Ecosystem
Exchange of Carbon Dioxide in Grassland Ecosystems (Research Review)[J]. Acta Agrestia Sinica, 21(1):
3-10.

祝景彬,贺慧丹,李红琴,等. 2021. 祁连山南麓高寒灌丛 GPP 变化特征及对生长季积温的响应[J]. 草业科学, 38(2): 221-230. Zhu Jingbin, He Huidan, Li Hongqin, et al. 2021.

Effect of growing season degree days on gross

- primary productivity and its variation characteristics in alpine shrubland at the southern foot of Qilian mount ains[J]. Pratacultural Science, 38(2): 221-230.
- Zieba Andrzej, Ramza Piotr. 2011. Standard Deviation of the Mean of Autocorrelated Observations Estimated with the Use of the Autocorrelation Function Estimated From the Data[J]. Metrology and Measurement Systems, 18(4): 529-542.







