

DOI: 10.11686/cyxb2025004

<http://cyxb.magtech.com.cn>

程杨, 井长青. 基于CoLM陆面模式的不同类型草地生长季碳水通量及其影响因素. 草业学报, 2025, 34(12): 33-49.

CHENG Yang, JING Chang-qing. Carbon and water fluxes of different grassland types in the growing season based on the Common Land Model. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(12): 33-49.

# 基于CoLM陆面模式的不同类型草地 生长季碳水通量及其影响因素

程杨, 井长青\*

(新疆农业大学草业学院, 新疆草地资源与生态重点实验室, 西部干旱荒漠区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆乌鲁木齐830052)

**摘要:** 草地生态系统是我国陆地面积最大的生态系统, 其碳水通量对陆-气物质和能量循环起着重要作用。本研究优化了CoLM陆面模式的根系吸水(RWUF)和土壤呼吸(SRF)过程, 评估了模型在不同草地生态系统碳水通量模拟中的适用性, 模拟并分析了不同类型草地碳水通量生长季变化和日变化趋势, 探讨了不同类型草地碳水过程的关键影响因子。结果表明: 优化后的CoLM陆面模式对不同草地生态系统生长季碳水通量模拟的适用性较好, 对蒸散发(ET)的模拟结果整体优于碳通量[总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸( $R_{eco}$ )、净生态系统交换量(NEE)]。温性荒漠、温性草原、荒漠草原和山地草甸的生长季蒸散发总量均大于降水量, 温性草原、荒漠草原和山地草甸生长季碳吸收量分别为 $-28.2$ 、 $-41.5$ 和 $-152.0$   $g\ C\cdot m^{-2}$ , 均表现出对碳的固定, 且碳固持能力顺序为山地草甸 > 荒漠草原 > 温性草原。降水和净辐射是影响不同类型草地生长季蒸散发最主要的因素, 且与碳水通量呈显著正相关( $P < 0.01$ ), 相较于干旱地区低植被覆盖草地蒸散发受土壤蒸发的影响明显, 植被覆盖较好的草地生态系统蒸散发受植物蒸腾作用的影响更大; 叶面积指数是草地生态系统碳交换量最主要的影响因素, 其次是降水和净辐射。研究结果为了了解干旱-半干旱区草地生态系统碳、水过程及其对气候变化的响应提供了一定的参考。

**关键词:** 碳通量; 水通量; CoLM陆面模式; 草地生态系统参数优化

## Carbon and water fluxes of different grassland types in the growing season based on the Common Land Model

CHENG Yang, JING Chang-qing\*

College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Western Arid Region, Ministry of Education, Urumqi 830052, China

**Abstract:** Grassland ecosystems occupy the largest area among the terrestrial ecosystems in China, and their carbon and water fluxes play an important role in the land-air carbon and energy cycles. In this study, we optimized the root water uptake function (RWUF) and soil respiration function (SRF) of a Common Land Model, evaluated the applicability of the model to the simulation of carbon and water flux in different grassland ecosystems, simulated and analyzed trends in the seasonal and daily variation of carbon and water flux in different grassland types, and discussed the key factors influencing water and carbon processes in different grassland types. It was found that the Common Land Model was suitable for simulating carbon and water fluxes in different grassland ecosystems during the growing season, and the simulation results of evapotranspiration (ET) were better than those of carbon fluxes (gross primary

收稿日期: 2025-01-07; 改回日期: 2025-03-04

基金项目: 国家自然科学基金(42161024)和自治区财政林草科技项目(XJLYKJ-2023-18)资助。

作者简介: 程杨(2000-), 男, 新疆阿克苏人, 在读硕士。E-mail: midwww@outlook.com

\*通信作者 Corresponding author. E-mail: jingchangqing@126.com

productivity, ecosystem respiration, net ecosystem exchange). The total evapotranspiration of temperate desert, temperate steppe, desert steppe and mountain meadow in the growing season is greater than precipitation, and the carbon uptake of temperate steppe, desert steppe and mountain meadow in the growing season is  $-28.2$ ,  $-41.5$ , and  $-152.0 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}$ , respectively, showing carbon fixation and carbon sequestration capacity ranking as: Mountain meadow > desert steppe > temperate steppe. Precipitation and net radiation were the most important factors affecting evapotranspiration of different grassland types during the growing season, and were significantly positively correlated with carbon and water flux ( $P < 0.01$ ). With low vegetation cover in arid land, evapotranspiration was more significantly affected by soil evaporation than was the case with grassland, and evapotranspiration of grassland with good vegetation cover was more affected by plant transpiration. Leaf area index (LAI) was the most important factor affecting carbon exchange in grassland ecosystems, followed by precipitation and net radiation. This study provides a framework for understanding the carbon and water cycling processes of grassland ecosystems and their responses to climate change in arid and semi-arid areas.

**Key words:** carbon flux; water flux; Common Land Model; parameter optimization of grassland ecosystem

草原总面积约占全球陆地总面积的30%,在陆地—大气物质和能量循环中具有重要作用<sup>[1-2]</sup>,揭示其碳水通量与环境因子的相互作用机制,是准确评估区域碳平衡的关键<sup>[3]</sup>。生态系统总初级生产力(gross primary productivity, GPP)是评估陆地生态系统碳通量的重要指标<sup>[4]</sup>,与生态系统呼吸(ecosystem respiration,  $R_{\text{eco}}$ )对降水具有不同的响应敏感性<sup>[5]</sup>,二者响应敏感性的差异将影响生态系统 $\text{CO}_2$ 净交换(net ecosystem exchange, NEE)能力,并最终决定了草地生态系统的碳源—汇关系及强度<sup>[6]</sup>。蒸散发(evapotranspiration, ET)作为水循环的关键通量,是土壤—植被—大气相互作用的重要纽带,也是碳水循环的关键环节<sup>[7]</sup>。此外,碳通量与水通量的变化密切相关,二者的耦合作用是深入了解草原生态系统碳汇功能响应气候变化的关键途径<sup>[8-9]</sup>。涡度相关法是目前最常用的碳水通量观测方法<sup>[10]</sup>,但其所代表的空间尺度较小,受到空间异质性和下垫面复杂的影响,很难将站点上的观测结果向更大的空间尺度推算<sup>[11]</sup>,相较于对站点碳水通量的观测,生态系统过程模型不仅描述了植被生长和生理过程,还考虑了生态系统空间结构和时间变化方面的特征<sup>[12]</sup>。如何提高区域气候模式对干旱—半干旱地区植被碳水通量的模拟能力,进而更好地理解草地生态系统的碳水循环过程,并为研究干旱—半干旱地区陆—气相互作用的机理和预测碳水变化趋势提供可靠的定量分析工具就成为亟待解决的问题。

CoLM陆面模式(common land model, CoLM)是目前国际上应用最广泛的陆面模式之一<sup>[13]</sup>,已广泛运用于全球变化研究中<sup>[14]</sup>。郭琦等<sup>[15]</sup>利用FLUXNET数据集对CoLM陆面模式站点进行评估,结果表明模型对感热、潜热通量和净辐射通量都有较好的模拟能力,尤其对净辐射的模拟效果最好。井长青等<sup>[16]</sup>的研究表明,CoLM陆面模式对典型干旱荒漠草地生态系统的陆面过程具有较好的模拟性能,能正确描述能量通量的日变化特征。江红南等<sup>[17]</sup>的研究发现,CoLM对干旱区土壤湿度的模拟具有一定适宜性。Li等<sup>[18]</sup>利用粒子群优化算法对CoLM陆面模式模拟的碳水通量敏感性参数进行了优化,优化后的模型对潜热通量和总初级生产力的模拟精度具有明显提升。这些研究都提升了陆面模式的模拟性能,使模型在不同下垫面对碳水循环过程的描述更加准确,尤其是对模型根系吸水过程(root water uptake function, RWUF)的改进成功解决了模型对蒸散发低估的问题。模型默认根系吸水过程(RWUF0)采用根系吸水效率与土壤水势之间的线性关系,这种线性表示的吸水过程在干旱地区没有很好地反映水分胁迫对植被的影响<sup>[16]</sup>,而非线性的根系吸水过程(RWUF1)对这种现象进行了描述,这使得模型在干旱区具有更好的适用性。此外,模型对植物呼吸(plant respiration, PR)过程有较好的描述,但是忽略了土壤呼吸过程(soil respiration function, SRF)并简单地将其视为一个常数<sup>[19]</sup>,这使得模型对生态系统呼吸的模拟值比实际值偏低,土壤呼吸作为大气碳的主要来源<sup>[20]</sup>,对生态系统呼吸起着重要的作用,所以更好地描述模型中土壤呼吸过程,能够使模型对碳通量的模拟更加准确。限于对草地生态系统碳水通量观测资料的缺乏,目前模型在碳通量的模拟过程仍有很多不确定性,虽然CoLM在全球多种生态系统进行了模拟验证,但由于干旱区植

被稀疏,陆面模式对水分相关植被、土壤参数敏感性较强<sup>[21]</sup>,其对干旱一半干旱区的模拟效果仍有待改进。研究不同水分条件下陆面模式对不同类型草地碳水通量的模拟效果,对评价陆面模式在干旱区的应用具有重要意义。

本研究通过改进 CoLM 陆面模式中的根系吸水和土壤呼吸过程,优化了模型对碳水通量敏感性参数,提升了不同草地类型碳水通量的模拟精度,并探究不同类型草地生长季碳水通量变化及其关键影响因素,这将有助于推进 CoLM 陆面模式在不同草地生态系统中的应用,并进一步揭示草地生态系统的碳水通量和气候与环境之间的关系。

## 1 材料与方法

### 1.1 CoLM 陆面模式

本研究基于站点湍度数据,运用 CoLM 陆面模式对不同类型草地碳水通量进行模拟分析。模式是结合了 Bonan 陆面模式(land surface model, LSM)、中国科学院大气物理研究所陆面模式(IAP94)和生物圈-大气传输模式(biosphere-atmosphere transfer scheme, BATS)3 个模式现有的优点发展的通用陆面过程模式<sup>[22]</sup>,该模式综合考虑了大气-植被-雪层-土壤之间的相互作用关系,在雪盖、土壤湿度以及感热、潜热通量等方面的模拟都表现出了较好的准确性。模式参数化过程所需参数主要包括生物量、植被类型、叶面积指数、土壤属性参数和根系功能等。对陆面模式中关键参数进行正确的设置是决定模型精度的关键,因此在模型开展站点模拟研究时需要对其关键参数进行整体优化。本研究所用 CoLM 陆面模式获取于中山大学陆-气相互作用研究小组(<http://globalchange.bnu.edu.cn/>)。

优化后的模型输入变量在原始模型的基础上增加了叶面积指数(leaf area index, LAI)数据,时间尺度由 8 d 插值到 30 min,模型共有 92 个输出变量,本研究选取了与碳水通量相关的变量进行分析。NEE 可由模型总呼吸速率(total respiratory rate, respc)和冠层同化速率(canopy assimilation rate, assim)计算所得,输入输出变量的时间尺度均为 30 min(表 1)。

### 1.2 数据来源与预处理

**1.2.1 站点描述** 阜康站(87°56'E, 44°17'N, 450 m, FK)位于古尔班通古特沙漠南缘,属于中国生态研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)及国家生态系统观测研究网络(Chinese National Ecosystem Research Network, CNERN)的中国科学院阜康荒漠生态系统试验站(图 1),该站属于温性荒漠,丘间低地以梭梭(*Haloxylon ammodendron*)群落为主,伴生耐盐碱的旱生草本<sup>[23]</sup>。多伦站(116°17'E, 42°02'N, 1324 m, DL)位于内蒙古自治区锡林郭勒盟多伦县,中国科学院多伦恢复生态学实验示范研究站长期围封样地内,站区属于内陆干旱区一半干旱区温性草原,草地植被以克氏针茅(*Stipa krylovii*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)为优势植物<sup>[1]</sup>。四子王旗站(111°47'E, 41°46'N, 1456 m, SW)位于内蒙古自治区乌兰察布市四子王旗中南部,依托单位内蒙古农牧

表 1 CoLM 陆面模式的输入输出变量

Table 1 Input and output variables of the Common Land Model

变量类型	变量	物理意义	单位
Variable type	Variable	Physical meaning	Unit
输入变量 Input variable	SW	太阳短波辐射 Solar shortwave radiation	$W \cdot m^{-2}$
	LW	大气长波辐射 Atmospheric long wave radiation	$W \cdot m^{-2}$
	TA	气温 Air temperature	K
	RH	比湿 Specific humidity	$kg \cdot kg^{-1}$
	PR	降水速率 Precipitation rate	$mm \cdot s^{-1}$
	US	U 风速 U-wind	$m \cdot s^{-1}$
	VS	V 风速 V-wind	$m \cdot s^{-1}$
	PA	大气压 Atmospheric pressure	hPa
	LAI	叶面积指数 Leaf area index	$m^2 \cdot m^{-2}$
输出变量 Output variable	H	感热通量 Sensible heat flux	$W \cdot m^{-2}$
	LE	潜热通量 Latent heat flux	$W \cdot m^{-2}$
	Fevpa	蒸散发速率 Evapotranspiration rate	$mm \cdot s^{-1}$
	assim	冠层同化速率 Canopy assimilation rate	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
	respc	总呼吸速率(植物+土壤) Total respiratory rate (Plant+soil)	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
	Etr	植物蒸腾 Plant transpiration	$mm \cdot s^{-1}$
	Fg	土壤蒸发 Soil evaporation	$mm \cdot s^{-1}$
	Wliq	10 层土壤水分含量 Soil moisture content of 10 layer	$kg \cdot m^{-2}$
	Tss	10 层土壤温度 10 layer soil temperature	K

业科学院, 站点地处内蒙古高原中心东南缘。该站草地类型属于荒漠草原, 优势植物为短花针茅(*Stipa breviflora*)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)和冷蒿等。菊花台站(87°09'E, 43°27'N, 2289 m, JHT)位于新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市西南部。草地类型属于山地草甸, 草地植物主要以天竺葵属(*Pelargonium*)、委陵菜属(*Potentilla*)、党参属(*Codonopsis*)为主。

各站点由于所处地理位置不同, 其生长环境和气候类别也存在较大差异。所选的4个站点分别代表了温性荒漠、温性草原、荒漠草原、山地草甸, 年降水量为185~442 mm, 气温和降水具有明显的差异, 其中代表山地草甸的菊花台站年降水量最大。

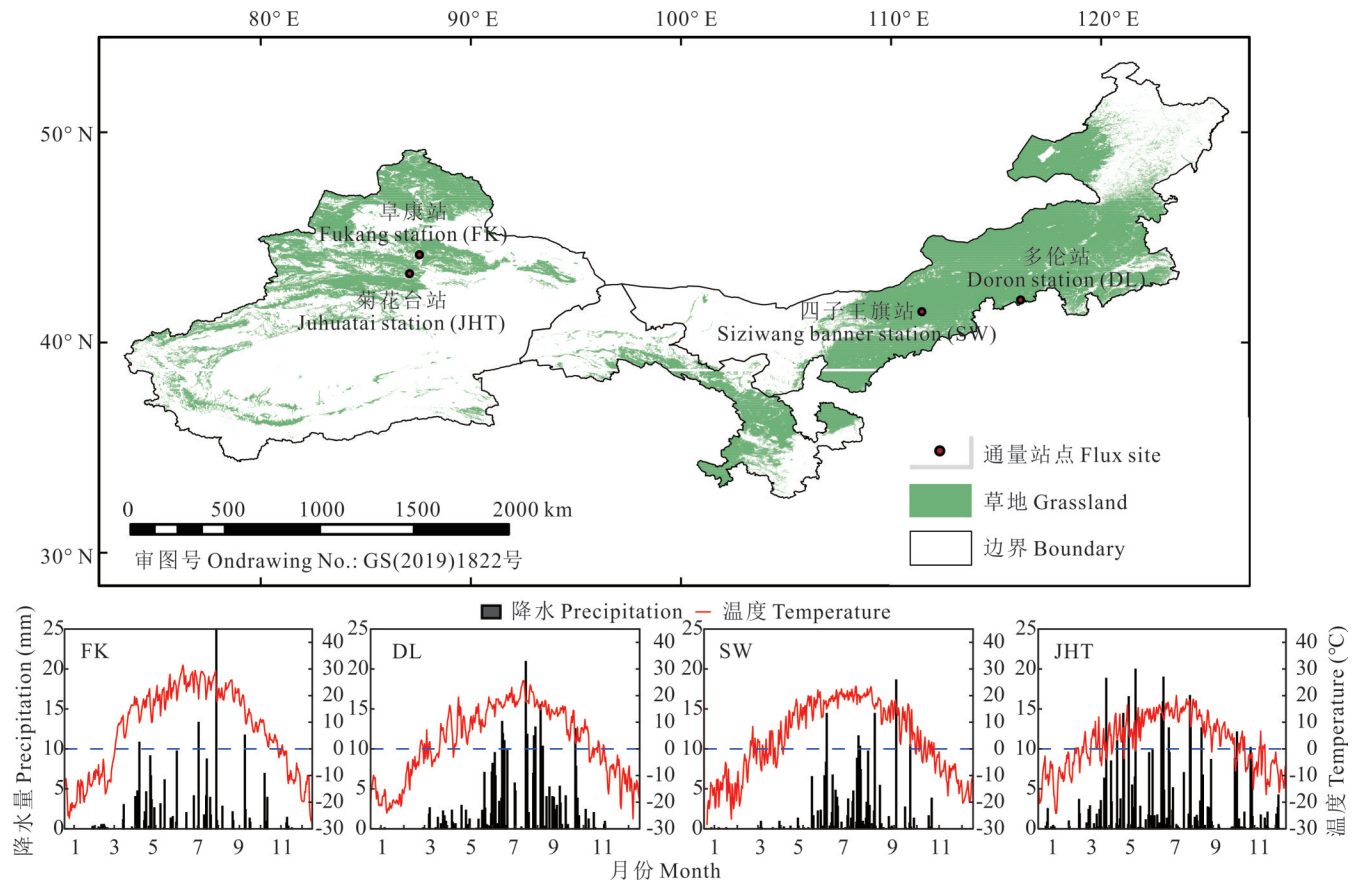


图1 站点分布概况及日均气温和日降水量

Fig. 1 Site distribution, daily average temperature and daily precipitation

基于自然资源部标准地图服务网站GS(2019)1822号标准地图绘制, 底图边界无修改 Based on the standard map service website GS(2019)1822 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified; 蓝色虚线是日均温度为0°C的辅助线 The blue dotted line is the 0 scale auxiliary line of daily average temperature.

**1.2.2 涡度相关系统观测和数据采集方法** 本研究站点通量观测系统包括开路式涡度相关系统和常规微气象观测系统, 开路式涡度相关系统主要由开路式红外气体分析仪器(LI图7500, LICOR Inc., 林肯, 美国)、三维超声风速仪[CSAT3, Campbell Scientific Inc. (CSI)、洛根, 美国]和数据采集器[CR5000, Campbell Scientific Inc. (CSI)、洛根, 美国]三部分组成, 用于高频CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O和能量通量数据的连续观测。常规气象观测系统净辐射仪(CNR-1, Kipp & Zonen, 荷兰)用于测量净辐射, 光合有效辐射量子传感器(LI190SB, LICOR Inc., 林肯, 美国)测量光合有效辐射; 空气温湿度传感器[HMP45C, Campbell Scientific Inc. (CSI)、洛根, 美国]用于测量空气温湿度; 降水量用雨量筒[TE525MM, Campbell Scientific Inc. (CSI)、洛根, 美国]测定; 土壤水分观测仪[CS616, Campbell Scientific Inc. (CSI)、洛根, 美国]测量0~10 cm的土壤含水量; 土壤温度传感器[107, Campbell Scientific Inc. (CSI)、洛根, 美国]置于地表测量不同深度的土壤温度; 土壤热通量板[HFT-3, Campbell

Scientific Inc. (CSI)、洛根,美国]安置在地表以下 2 cm 处用于测定土壤热通量;数据存储时间尺度为 1/2 h。

通量观测数据的计算主要包括原始数据校正、数据质量控制、缺失数据插补、净 CO<sub>2</sub> 通量(NEE)拆分。利用 EddyPro 软件(LICOR)完成高频 10 Hz 通量数据的处理,具体包括数据趋势去除、延迟时间校正、野点剔除、坐标旋转、WPL 校正、频率响应校正等,得到 30 min 通量数据。后对碳通量观测数据异常值进行剔除,包括小于临界摩擦风速( $u^*$ )阈值的夜间无效碳水通量数据以及夜间和冬季 NEE 负值<sup>[24]</sup>。由于数据质量控制和仪器故障造成的数据缺失,对小于 2 h 的气象数据使用相邻数据进行线性插值处理,大于 2 h 的气象数据使用平均日变化法(average daily variation, MDV)进行插补,对长时段的气象数据利用不同环境变量之间的关系进行插补,同时用临近气象塔数据补充。缺失时长超过 2 h 的 NEE 数据采用非线性回归的方式插补。白天和夜间通量数据分别采用直角双曲线光响应方程<sup>[25]</sup>和 Van'tHoff 方程<sup>[26]</sup>进行插补。缺失大于 2 h 的潜热通量(latent heat flux, LE)和感热通量(sensible heat flux, H)数据采用平均日变化法进行插补。各站点的涡度通量数据基本信息如表 2 所示,在碳通量分析时,由于阜康站碳通量数据质量非常差,因此没有分析阜康站的碳通量。

菊花台站、多伦站、四子王旗站的气象数据和涡度数据分别为 2018、2008、2013 年生长季 4—10 月,阜康站为 2007 年 5—10 月,时间分辨率均为 30 min(表 2)。

表 2 涡度通量数据基本信息

Table 2 Basic information of vorticity flux data

站点 Site	草地类型 Grassland type	数据时段 Data period	时间分辨率 Time resolution (min)
菊花台 Juhatai (JHT)	山地草甸 Mountain meadow	Apr. — Oct. 2018	30
多伦 Doron (DL)	温性草原 Temperate grassland	Apr. — Oct. 2008	30
阜康 Fukan (FK)	温性荒漠 Temperate desert	May. — Oct. 2007	30
四子王旗 Siziwang Banner (SW)	荒漠草原 Desert steppe	Apr. — Oct. 2013	30

NEE 的拆分通过 Lloyd 等<sup>[27]</sup>的呼吸方程来拟合夜间生态系统呼吸( $R_{eco}$ )与温度的函数关系外延至白天的  $R_{eco}$  变化:

$$R_{eco} = R_{ref} \exp \left[ E_0 \left( \frac{1}{T_{ref} - T_0} - \frac{1}{T - T_0} \right) \right] \quad (1)$$

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

式中:  $T_{ref}$  是参考温度;  $R_{ref}$  是参考温度下的基础呼吸;  $E_0$  是活化能相关参数;  $T_0$  是恒定温度( $-46.02\text{ }^\circ\text{C}$ );  $T$  为大气或土壤温度。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 模型优化** 已有研究表明 CoLM 陆面模式对叶面积指数的模拟具有一定偏差,而碳水通量的模拟结果对 LAI 具有较强的敏感性<sup>[18]</sup>,故使用相应年份 NASA 数据中心 (<https://appears.earthdata-cloud.nasa.gov/task/point>) 的 MODIS LAI 成品数据替换原始模型中的 LAI(图 2),时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 500 m。

根系吸水过程的准确性对模型碳水通量的结果有重要影响,本研究使用了 Zheng 等<sup>[28]</sup>提出的根系吸水模型(RWUF1)替代 CoLM 陆面模式默认的根系吸水过程(RWUF0),该根系吸水模型已被验证在干旱一半干旱区具

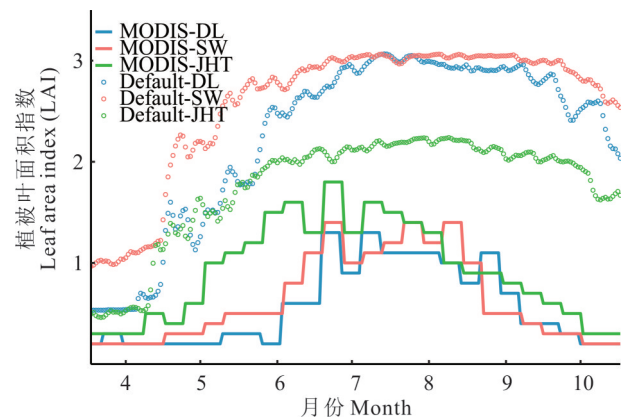


图 2 各站点模型默认叶面积指数和 MODIS 叶面积指数季节变化情况

Fig. 2 Model default LAI and MODIS LAI seasonal changes at each station

折线表示 MODIS LAI 数据,空心圆表示 CoLM 陆面模式默认叶面积指数数据,分别用 MODIS 和 Default 表示。Broken lines represent MODIS LAI data, hollow circles represent Common Land Model default leaf area index data, it is represented by MODIS and Default respectively.

有更好的模拟效果<sup>[16]</sup>,根系吸水过程如下:

先由模型默认方法计算得到土壤可利用水分对根系吸水阻力的贡献( $\alpha$ )和其累积因子( $W$ ),后对求得的  $W$  重新定义:

$$W = \begin{cases} 1.0 & W \geq W_c \\ W/W_c & W < W_c \end{cases} \quad (3)$$

$$\omega = \begin{cases} 0 & \alpha < \text{Max}(\alpha_{\max}, W_x) \\ 1.0 & \alpha \geq \text{Min}(\alpha_{\max}, W_x) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $W_c$  为经验参数,并且模型重新设置变量  $\omega$  参与根系吸水效率计算;  $\alpha$  为某一层土壤可利用水分对根系吸水阻力的贡献;  $\alpha_{\max}$  为最湿润土壤层可利用水分对根系吸水阻力的贡献,通过设置经验阈值  $W_x$  使得只有最湿润的土层吸收土壤水分。土壤的根系吸水效率  $\epsilon$  表示为:

$$\epsilon = \frac{f_{\text{root}} \alpha}{W} = \frac{f_{\text{root}} \alpha^m \omega}{\sum f_{\text{root}} \alpha^m \omega} \quad (5)$$

式中:  $f_{\text{root}}$  为土壤层根分数,加入一经验常量  $m$  使最终求得的根系吸水效率函数用一个非线性过程来表示。

此外,模型加入了 Shao 等<sup>[19]</sup>改进的土壤呼吸函数,增加了模型土壤呼吸过程。在之前的研究中发现已证实夜间土壤呼吸的敏感性高于白天<sup>[29-30]</sup>,该过程在土壤呼吸对温度的敏感性基础上区分了白天和夜晚<sup>[31]</sup>,假设  $E_0^{\text{night}} > E_0^{\text{day}}$ 。

$$\begin{cases} E_0^{\text{night}}(\text{RSWC}) = (a_{E_0^{\text{night}}} + b_{E_0^{\text{night}}} \cdot \text{RSWC}) & S_{\downarrow} = 0 \\ E_0^{\text{day}}(\text{RSWC}) = (a_{E_0^{\text{day}}} + b_{E_0^{\text{day}}} \cdot \text{RSWC}) & S_{\downarrow} > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $E_0^{\text{night}}$  和  $E_0^{\text{day}}$  是土壤呼吸对夜间和日间温度的敏感性;  $\text{RSWC}$  是相对土壤水分含量;  $S_{\downarrow}$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 是向下的太阳短波辐射;  $a_{E_0^{\text{night}}}$ ,  $a_{E_0^{\text{day}}}$ ,  $b_{E_0^{\text{night}}}$  和  $b_{E_0^{\text{day}}}$  是 4 个新拟合参数。

当植物具有更高的年生产力时,更多的生物量将被分配到地下部分,这会通过直接根呼吸或提供更多底物供微生物呼吸而导致土壤呼吸速率增加<sup>[32]</sup>。为了表示地下部分的生产力比例,引入了  $LAI/LAI_{\max}$ 。这是基于以下假设:当  $LAI$  等于  $LAI_{\max}$  时,是根生物量达到最大值的季节。此外,考虑到不同生态系统中根周转速率的差异<sup>[33]</sup>,根据土壤呼吸模型<sup>[31]</sup>对  $R_{\text{ref}}$  进行了修正:

$$R_{\text{ref}} = \{ a \cdot [ (\frac{LAI}{LAI_{\max}})^{\lambda} - 1 ] + 1 \} \cdot \text{root}_{\max} \cdot R_{\text{root}} + R_0 \quad (7)$$

式中:  $a$  是根周转速率 ( $\text{yr}^{-1}$ ) [即年度地下净生产力 (belowground net primary productivity, BNPP) /  $\text{root}_{\max}$ ];  $\text{root}_{\max}$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 是季节最大根生物量;  $R_{\text{root}}$  ( $\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 是在参考条件下 ( $T_{\text{ref}} = 15^{\circ}\text{C}$  且没有水分限制) 通过根生物量确定的土壤呼吸速率;  $R_0$  是裸露土壤的基础呼吸速率;  $\lambda$  是经验参数。

**1.3.2 贝叶斯参数优化** 参数优化是改善模型性能的重要方法,陆面模式在干旱区的应用需优化关键地表参数以适应干旱生态环境。在本研究中,采用了贝叶斯优化 (Bayesian optimization, BO) 方法来优化模型对碳水通量敏感性较强的参数。BO 是一种全局参数优化方法,旨在通过建立目标函数的概率模型来推断最佳参数值。该算法适用于高维搜索空间和有噪声干扰的情景,能够有效地识别最佳参数集合<sup>[34]</sup>。该算法包括以下步骤:定义目标函数、构建概率模型、初始化参数集合、评估目标函数、更新模型、选择下一个参数集合,并重复该过程直到满足停止条件。在初始化参数集合后,该算法通过迭代评估目标函数来推断最佳参数值<sup>[35]</sup>。本研究优化了模型植被光合作用、根系吸水 (RWUF) 和土壤呼吸 (SRF) 过程相关参数,算法由 R 包 “rBayesianOptimization” 实现,定义先验 100 次,迭代 50 次,使用决定系数  $R^2$  作为目标函数,目标函数  $R^2$  取值越接近 1 表示模拟结果与观测数据之间的一致性越好。

**1.3.3 数据分析与精度验证** 本研究 CoLM 陆面模式在 Linux 操作系统下运行,贝叶斯参数优化和影响因子分析及绘图使用 R 包 rBayesianOptimization、randomForest 和 ggplot 2。通过决定系数  $R^2$  和均方根误差 (root-mean-square error, RMSE) 来验证模型精度。计算公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

式中： $y_i$ 为观测值； $\bar{y}$ 为观测值均值； $\hat{y}_i$ 为模型模拟值； $n$ 为总样点数。决定系数  $R^2$  取值为  $[0, 1]$ ， $R^2$  越接近 1，表示模型模拟效果越好。 $RMSE$  表示观测值与模拟值之间的平均偏差程度。

**1.3.4 随机森林模型** 随机森林(random forests, RF)模型是一种基于集成学习的机器学习算法,通过构建多个决策树来进行预测和分类,能够处理大规模的数据,并且具有较强的拟合能力和较好的泛化性,能够有效减少过拟合的风险<sup>[36]</sup>。本研究先对输入的数据集按照一定比例划分为训练集和测试集,系统从数据集中随机抽取样本,样本与各影响因素之间进行回归拟合,拟合的结果即为 GPP、 $R_{eco}$ 、NEE 和 ET 的预测值,每个影响因素对于预测样本的贡献率即为重要值,本研究随机森林模型使用 R 包“randomForest”实现。

#### 1.4 数据处理

本研究对各站点碳水通量数据季节变化和日变化进行分析时,将模型模拟和涡度相关数据由 30 min 尺度分别转为日尺度和小时尺度。环境因子与碳水通量之间的相关性采用 Pearson 相关性分析法,使用  $t$  检验比较其是否存在显著差异。采用 R 语言和 Excel 对数据进行处理;采用 Arcgis 10.2 对区域概况图进行绘制;采用 R 包“ggplot 2”制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 能量闭合情况

涡度数据使用前需对其能量闭合情况进行分析,通过能量分析对涡度数据的质量和可用性做出评价。能量闭合情况分析采用能量平衡线性回归方程:

$$R_{net} - G = LE + H \quad (10)$$

式中： $LE$ 、 $H$ 、 $R_{net}$ 、 $G$  分别是潜热通量、感热通量、净辐射通量(net radiation flux)和土壤热通量(soil heat flux)。

图 3 为 4 个站点的能量闭合情况,用  $(R_{net} - G)$  和  $(LE + H)$  的关系表示。可以看出卓康站、多伦站、四子王旗站和菊花台站的能量闭合程度分别为 89%、82%、88% 和 71%，决定系数  $R^2$  除四子王旗站为 0.84,其他站点均大于或等于 0.9,能量闭合情况较好,可用于能量通量分析。

### 2.2 ET 的模拟与生长季变化

CoLM 陆面模式对 4 个类型草地 ET 的模拟值与观测值进行比较发现(图 4),优化后的模型对 ET 的模拟精度均超过 0.6,对温性草原模拟精度为 0.75,相较于其他草地类型,模型对水分条件较好的温性草原和山地草甸的 ET 模拟效果更好,整体上模型对不同草地生态系统具有较好的模拟结果。

通过对生长季 ET 的季节变化模拟分析发现(图 5),模型对温性荒漠、温性草原、荒漠草原和山地草甸 ET 的模拟趋势基本一致,从每月 ET 累积量来看,模型 ET 模拟值略高于实测值,季节变化趋势呈先增加后减少,在 7—8 月降水最多时 ET 达到峰值,且季节变化趋势与气温和降水的季节性变化均具有较好的一致性。温性荒漠、温性草原、荒漠草原和山地草甸生长季 ET 总量分别为 279、391、516 和 476 mm,在生长季蒸散发量均大于生长季降水总量,符合干旱—半干旱区蒸散发特征,其中荒漠草原蒸散发总量最高,这可能受其地理位置的影响,而温性荒漠蒸散发明显小于其他草地类型。

生长季 ET 具有明显的日变化特征,模型对温性荒漠和荒漠草原模拟值偏高,温性草原的模拟结果较好。在日峰值时段,模型对 ET 模拟仍存在偏差,正午时段模型对 ET 的模拟值偏高,说明模型在太阳辐射较强时间段对 ET 的模拟仍存在不足(图 6)。不同类型草地在生长季的 ET 日变化趋势均表现为“单峰型”曲线,日峰值约为 6 mm,ET 总量在日尺度表现为山地草甸 > 温性草原 > 温性荒漠。

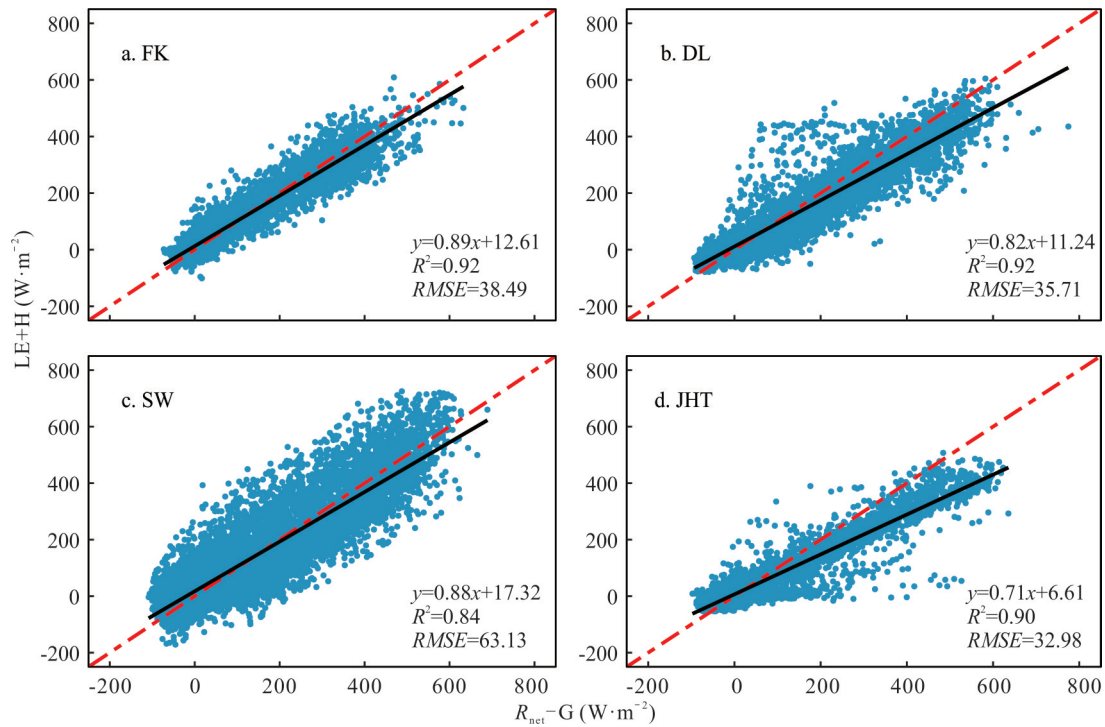


图3 4个草地类型能量闭合情况

Fig. 3 Station energy closure situation of different grassland types

斜率代表能量闭合率 The slope represents the energy closure rate;  $R^2$ : 决定系数 The coefficient of determination; RMSE: 均方根误差 Root mean square error; 黑色实线表示模型模拟值与实测值的线性回归, 红色虚线为 1:1 线 The black solid line represents the linear regression between the simulated value and the measured value of the model, and the red dashed line is the 1:1 line; 下同 The same below.

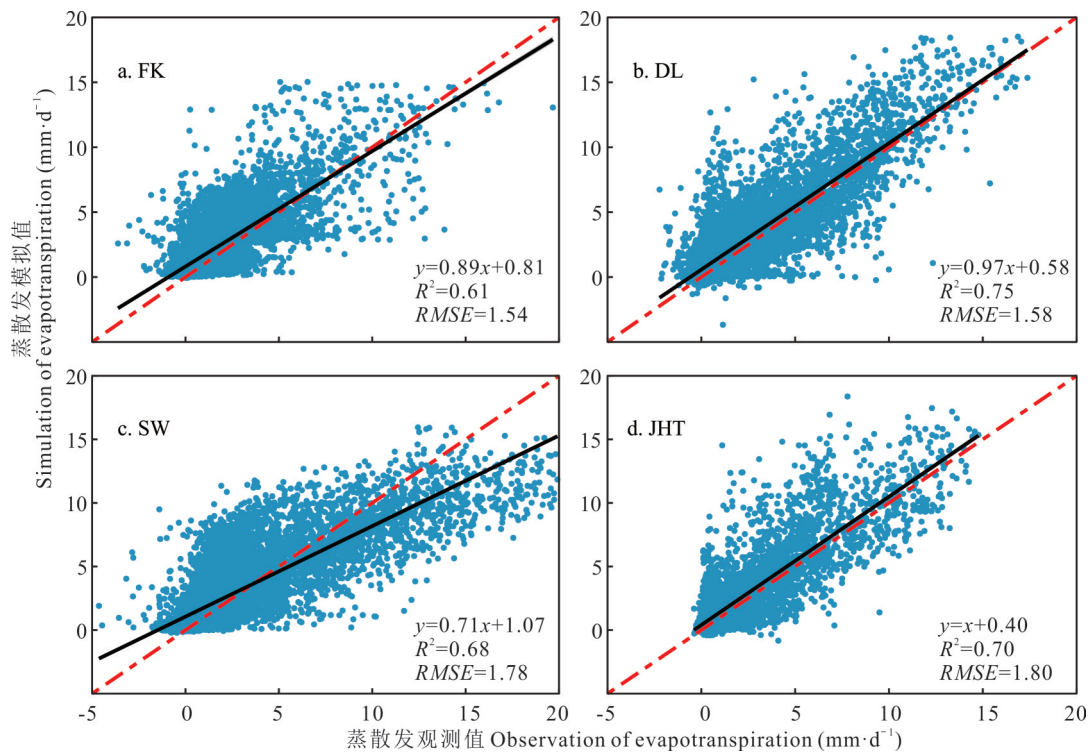


图4 CoLM 陆面模式对4个草地类型蒸散发模拟值与观测值的比较

Fig. 4 Comparison between simulated and observed evapotranspiration of different grassland types by Common Land Model

蒸散发时间尺度为 30 min。The time scale is 30 min for evapotranspiration value.

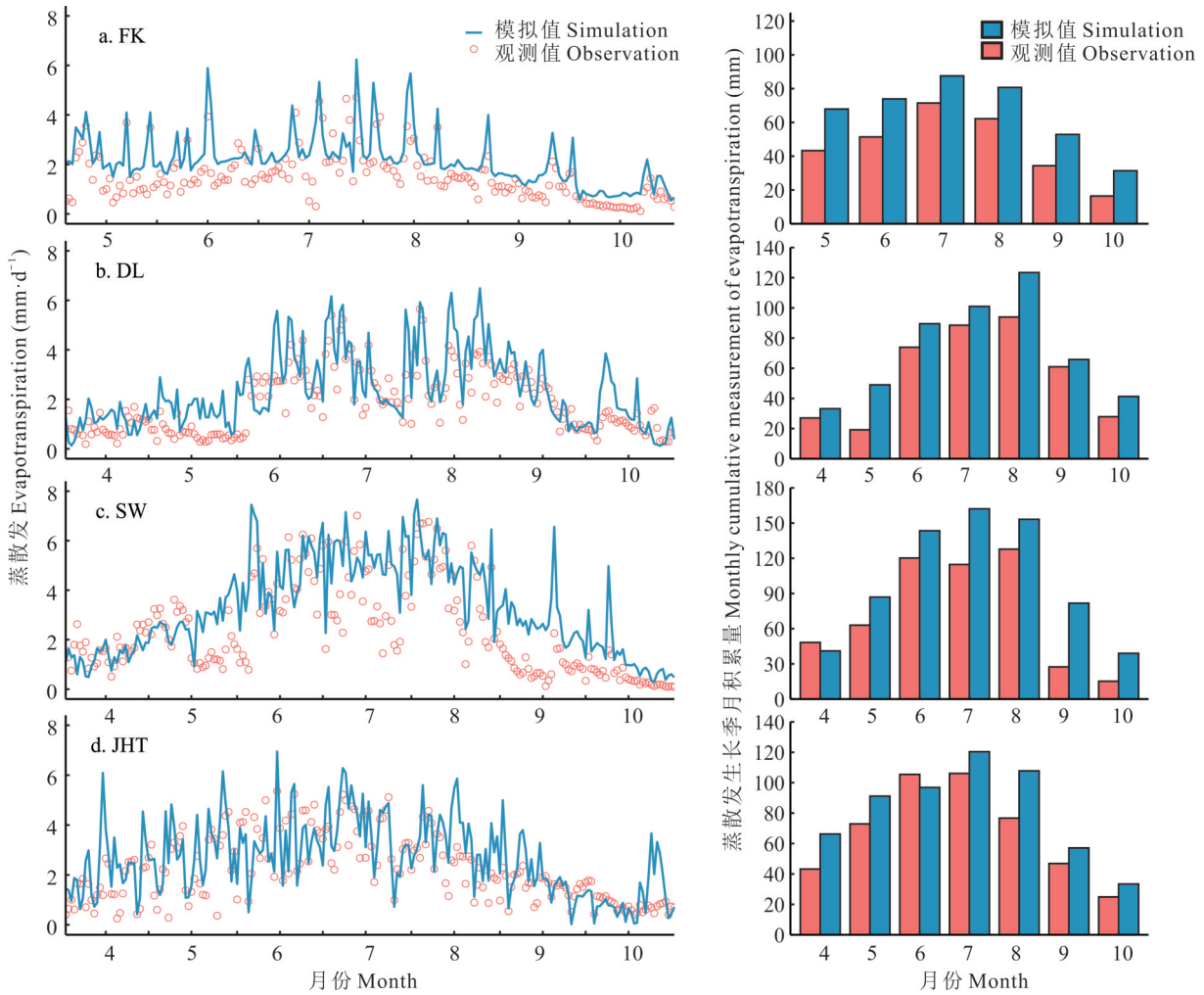


图 5 CoLM 陆面模式对 4 个草地类型蒸散发模拟值与观测值生长季变化趋势及月积累量

Fig. 5 Seasonal variation and monthly accumulation of simulated and observed evapotranspiration of different grassland types by Common Land Model

蒸散发时间尺度为日尺度 The time scale is the daily scale for evapotranspiration value of the growing season.

### 2.3 NEE、 $R_{eco}$ 和 GPP 的模拟与生长季变化

总体来看模型对碳通量的 GPP 模拟效果较好, 模拟精度分别为 0.73、0.65、0.78, 对荒漠草原  $R_{eco}$  的模拟精度偏低, 仅为 0.43, 对 NEE 的模拟精度均在 0.6 以上, 从结果上看, 整体上模型对不同草地生态系统的碳通量模拟精度较好, 尤其是对 GPP 和 NEE 的模拟, 但是对  $R_{eco}$  的模拟值略低于实测值(图 7)。

CoLM 陆面模式在生长季阶段对不同类型草地碳通量模拟值与观测值变化趋势基本一致(图 8), 但  $R_{eco}$  的模拟值与观测值的峰值模拟存在偏差。模型能够很好地模拟出不同草地生态系统生长季碳通量总量, 尤其是 GPP 和  $R_{eco}$  的模拟值与实测值相差较小。温性草原、荒漠草原和山地草甸生长季 GPP 值分别为 169.3、265.8 和 585.4  $g \cdot C \cdot m^{-2}$ ,  $R_{eco}$  为 140.5、224.2 和

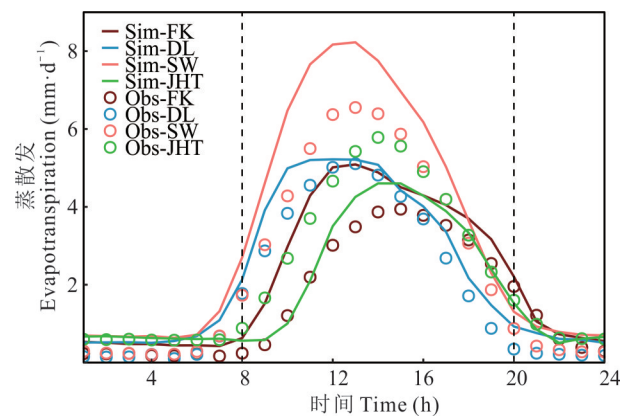


图 6 CoLM 陆面模式对 4 个草地类型蒸散发模拟值与观测值的日变化趋势

Fig. 6 Daily variation trend of simulated and observed evapotranspiration of different grassland types by Common Land Model

Sim: 模拟值 Simulation; Obs: 观测值 Observation.

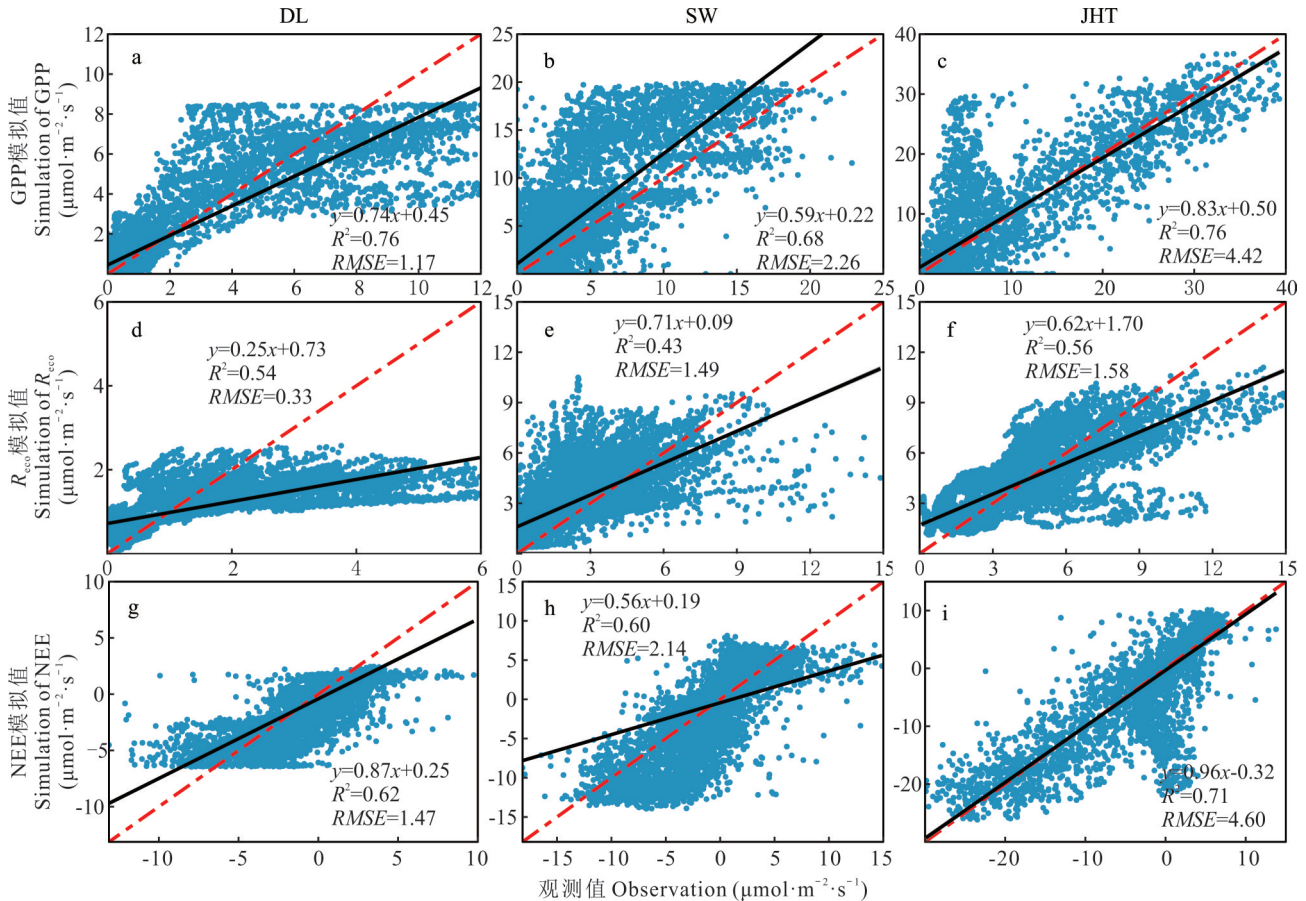


图7 CoLM陆面模式对温性草原(DL)、荒漠草原(SW)、山地草甸(JHT)碳通量模拟值与观测值的比较

Fig. 7 Comparison of simulated and observed carbon fluxes in temperate steppe (DL), desert steppe (SW) and mountain meadow (JHT) by Common Land Model

GPP: 总初级生产力 Gross primary productivity;  $R_{eco}$ : 生态系统呼吸 Ecosystem respiration; NEE: 净生态系统交换量 Net ecosystem exchange; 下同 The same below; 生长季碳通量时间尺度为 30 min The time scale of 30 min for carbon flux in the growing season.

474.8  $g \cdot C \cdot m^{-2}$ , GPP值和 $R_{eco}$ 值均表现为山地草甸>荒漠草原>温性草原, NEE为-28.2、-41.5和-152.0  $g \cdot C \cdot m^{-2}$ , 生长季净生态系统碳交换量表现为山地草甸<荒漠草原<温性草原, NEE均为负值, 3个草地类型在生长季均表现出对 $CO_2$ 的吸收, 碳固持能力为山地草甸>荒漠草原>温性草原。

荒漠草原和山地草甸的GPP在白天模拟值比实测值偏高, NEE值偏低, 温性草原的GPP和NEE模拟结果较好,  $R_{eco}$ 的模拟值相较于实测值偏低(图9)。模型在正午时段对草地生态系统的碳通量模拟值偏高, 这与ET正午时段的模拟值偏差情况一致。整体上优化后的CoLM陆面模式对不同类型草地的碳通量模拟均表现出较好的结果。GPP、 $R_{eco}$ 和NEE日变化趋势和ET相同, 表现为“单峰型”日变化特征。在碳通量日变化趋势中, 山地草甸在正午时段的GPP和 $R_{eco}$ 明显大于温性草原和荒漠草原。

#### 2.4 环境因子对碳水通量的影响

CoLM陆面模式对ET、GPP、 $R_{eco}$ 和NEE模拟结果显示, 模型对不同类型草地碳水通量模拟效果较好。本研究选取了涡度相关数据和模型模拟结果(表3), 作为不同类型草地的影响因子, 植物蒸腾、土壤蒸发、土壤水分含量和土壤温度数据通过气象数据驱动CoLM陆面模式模拟数据, LAI数据获取与MODIS成品数据集, 时间尺度为8d, 其余环境因子为气象驱动数据和涡度观测数据。

温性草原、荒漠草原和山地草甸的感热通量在生长季表现为先减少, 到生长季中期降到最低值然后上升的变化趋势, 潜热与感热通量变化趋势相反, 呈先增加后减少的趋势, 净辐射与潜热变化趋势一致, 荒漠草原的感热、

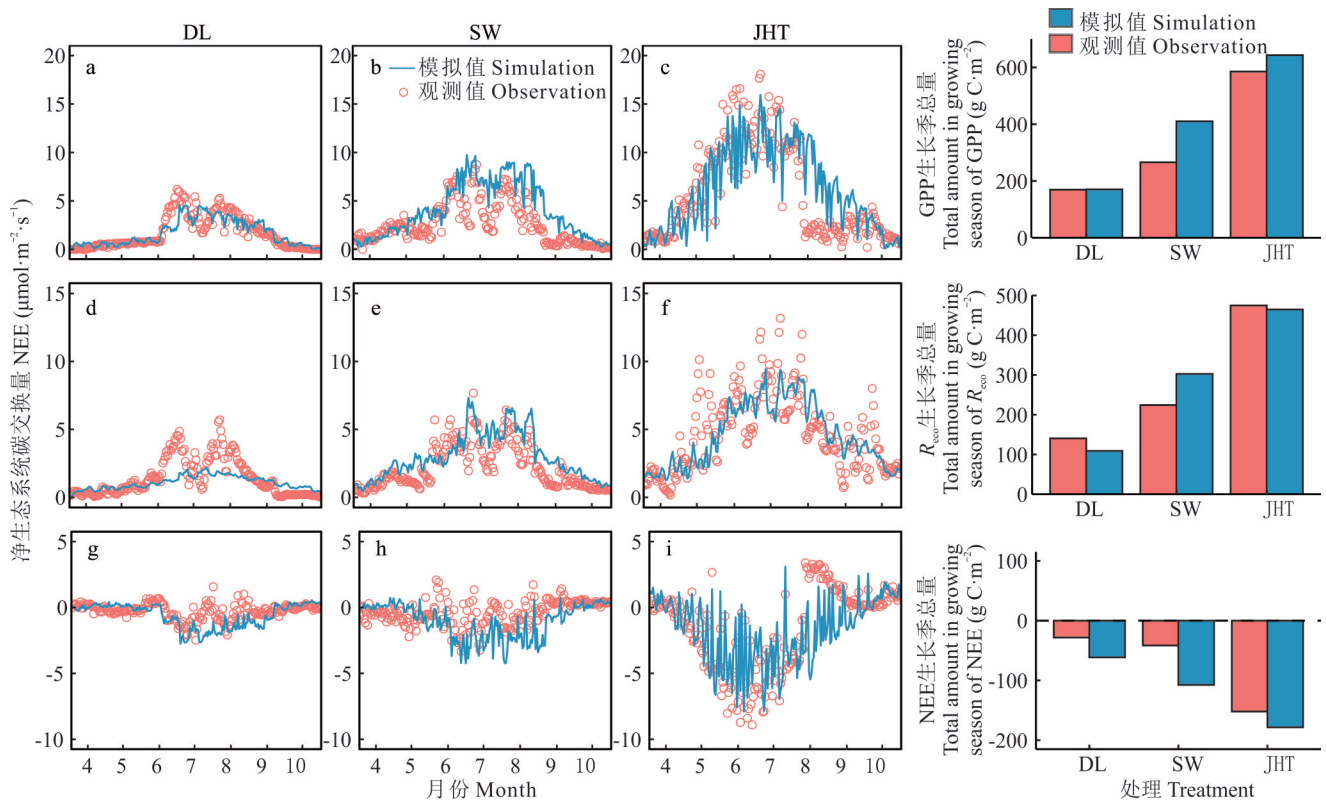


图 8 CoLM 陆面模式对温性草原(DL)、荒漠草原(SW)、山地草甸(JHT)碳通量模拟值与观测值生长季变化趋势及碳总量

Fig. 8 Growth season variation trend of simulated and observed carbon flux and total carbon in temperate steppe (DL), desert steppe (SW) and mountain meadow (JHT) by Common Land Model

潜热通量和净辐射都大于温性草原和山地草甸(图 10);温性草原、荒漠草原和山地草甸的蒸腾随着植物在生长季的增长逐渐增加,在 7 月达到峰值后,蒸腾逐渐减小,土壤蒸发则受到降水的影响,变化趋势随着降水出现的频率而波动,生长季累计降水趋势表现为山地草甸>温性草原>荒漠草原;山地草甸土壤水分含量最大,荒漠草原土壤温度最高;LAI 表现为山地草甸>荒漠草原>温性草原,说明代表荒漠草原的四子王旗站植被长势和覆盖度要好于温性草原的多伦站;荒漠草原的日均温最高,其次是温性草原;山地草甸的空气湿度高于温性草原和荒漠草原,饱和水汽压差表现为荒漠草原>温性草原>山地草甸。

植被生长季期间各影响因子在不同类型草地上对碳水通量的影响存在差异(图 11,表 4)。温性草原、荒漠草原的 ET、GPP、 $R_{eco}$  与感热通量均显著负相关( $P < 0.01$ ),与其余各环境因子均显著正相关( $P < 0.01$ ),山地草甸的 ET 与感热通量和空气湿度均显著负相关,GPP、 $R_{eco}$  与感热通量显著负相关( $P < 0.01$ ),与其余各环境因子均显著正相关( $P < 0.01$ )。温性草原的净辐射对 ET 的贡献率最大(23.6%),叶面积指数对 GPP 的贡献率最大(30%),温度对  $R_{eco}$  的贡献率最大(21.3%),降水对 NEE 的贡献率最大(20.3%)。荒漠草原的降水对 ET、GPP 和 NEE 的贡献率最大(24.5%,23.8%,23.9%)。山地草甸的净辐射对 ET 的贡献率最高(28.5%),降水对 GPP 和 NEE 的贡献率最高(37.1%,46.6%),叶面积指数对  $R_{eco}$  贡献率最高(28.3%)。

综上对不同草地类型碳水通量影响因子分析发现,草地生态系统碳水通量与感热通量显著负相关( $P < 0.01$ ),与其余各环境因子均显著正相关( $P < 0.01$ ),在水分亏缺时,降水对草地生态系统 ET 的影响最大,其次是净辐射对草地生态系统蒸散发起着关键作用,在水分条件较好的山地草甸,空气湿度与蒸散发显著负相关( $P < 0.01$ )。各环境因子在不同草地类型对 GPP、 $R_{eco}$  和 NEE 的影响情况基本一致,与感热通量呈显著负相关( $P < 0.01$ ),与其余环境因子显著正相关( $P < 0.01$ )。草地生态系统的降水对 NEE 的影响最大,气温和降水对  $R_{eco}$  起关键作用,叶面积指数、降水和净辐射是影响草地生态系统碳通量的关键因素。

### 3 讨论

#### 3.1 CoLM陆面模式碳水通量模拟

通过对不同类型草地站点碳水通量的参数优化和模拟分析,可以看出 CoLM陆面模式对不同草地类型生长季的碳水通量模拟结果整体较好,尤其是对 ET 的模拟,在不同草地类型上均有较好的模拟精度,这与郭琦等<sup>[15]</sup>利用 CoLM 单点模型验证了不同气候类型草地能量模拟研究结果类似。改进后的 CoLM 陆面模式对草地生态系统生长季 ET、GPP 和 NEE 的模拟具有较好的结果,模拟精度  $R^2$  均在 0.6 以上,对  $R_{eco}$  的模拟仍存在一定偏差,通过对 3 个草地类型生态系统呼吸和日降水趋势分析发现(图 1 和图 8),生态系统呼吸和日降水变化趋势基本一致,在日降水量最大时,各草地类型  $R_{eco}$  的观测值也达到峰值,这说明生态系统呼吸对降水具有很强的敏感性<sup>[37]</sup>,而模型  $R_{eco}$  的模拟值没有很好地体现这一变化趋势,将模型生态系统呼吸过程与降水建立更好的联系是提高模型生态系统呼吸模拟结果准确性的关键。模型对正午时段碳水通量的模拟仍存在被高估的情况,这可能是正午时气温最高太阳辐射最强,从而导致植被气孔关闭,光合作用减弱甚至停止<sup>[38]</sup>,出现午休现象,模型对这一过程

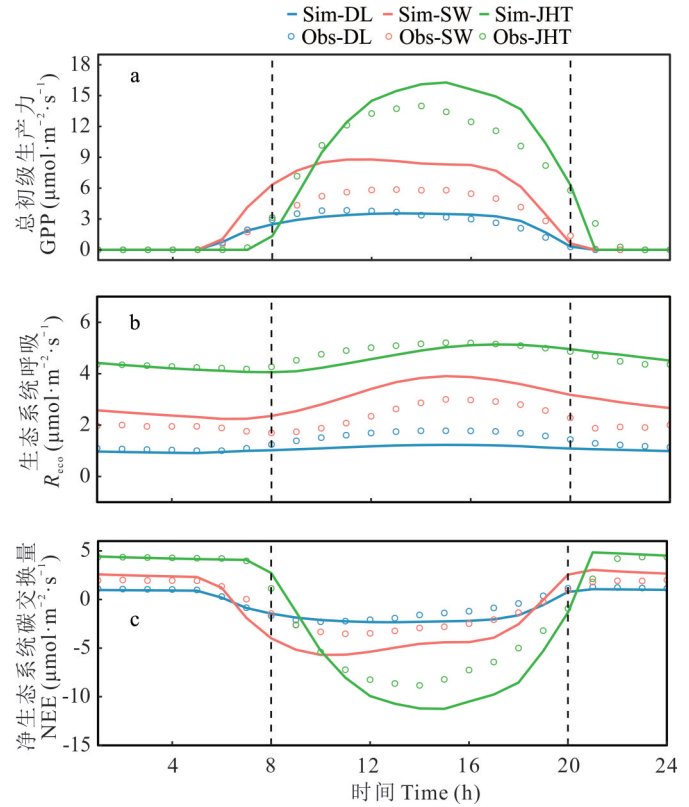


图 9 CoLM 陆面模式对温性草原 (DL)、荒漠草原 (SW)、山地草甸 (JHT) 碳通量模拟值与观测值的日变化趋势

Fig. 9 Daily variation trend of simulated and observed carbon flux values in temperate steppe (DL), desert steppe (SW) and mountain meadow (JHT) by Common Land Model

表 3 影响碳水通量的环境因子

Table 3 Environmental factors affecting carbon water flux

影响因子 Influence factor	变量名称 Variable name	单位 Unit	数据来源 Data sources
H	感热通量 Sensible heat flux	$W \cdot m^{-2}$	涡度数据 Vorticity data
LE	潜热通量 Latent heat flux	$W \cdot m^{-2}$	涡度数据 Vorticity data
Etr	植物蒸腾 Plant transpiration	mm	CoLM 模拟 CoLM simulation
Fg	土壤蒸发 Soil evaporation	mm	CoLM 模拟 CoLM simulation
$R_{net}$	净辐射通量 Net radiation flux	$W \cdot m^{-2}$	涡度数据 Vorticity data
SWC (0~71 cm)	土壤水分含量 Soil moisture content (0-71 cm)	$kg \cdot m^{-3}$	CoLM 模拟 CoLM simulation
Ts (0~71 cm)	土壤温度 Soil temperature (0-71 cm)	K	CoLM 模拟 CoLM simulation
Ta	气温 Air temperature	$^{\circ}C$	气象数据 Meteorological data
Prec	累计降水 Accumulated precipitation	mm	气象数据 Meteorological data
LAI	叶面积指数 Leaf area index	—	MODIS 数据 MODIS data
RH	空气湿度 Air humidity	%	涡度数据 Vorticity data
VPD	饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	kPa	涡度数据 Vorticity data

描述不足导致。已有研究表明,模型对 GPP 的模拟精度受到 LAI 数据的影响很大<sup>[18]</sup>,本研究在不同类型草地上替换模型 LAI 数据后,对 GPP 的模拟精度有大幅度提升,所得结论与其一致, LAI 反映了不同草地类型的植被生

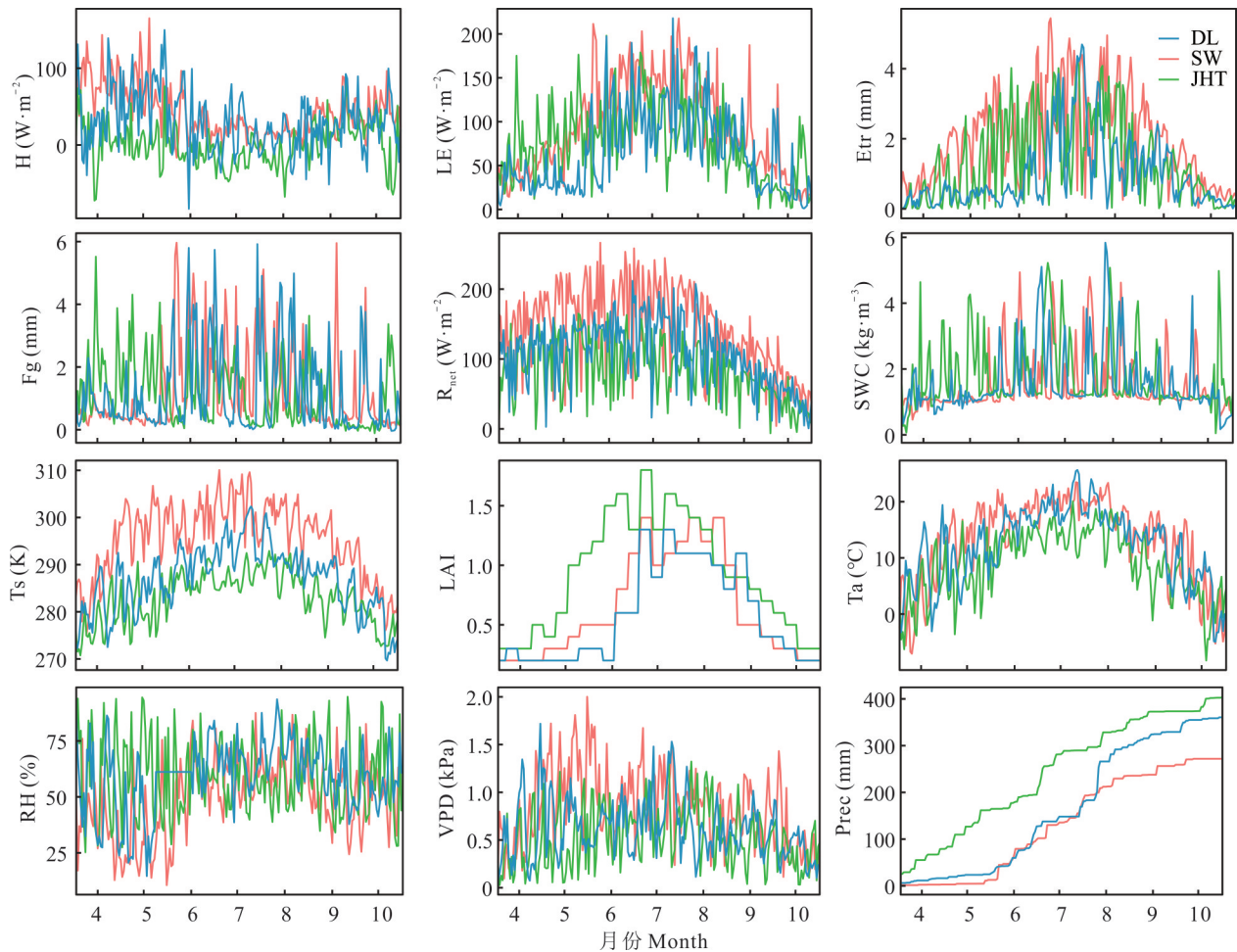


图 10 温性草原(DL)、荒漠草原(SW)、山地草甸(JHT)生长季碳水通量环境因子变化趋势

Fig. 10 Simulate the trend of changes in environmental factors related to carbon and water flux during the growing season in temperate steppe (DL), desert steppe (SW) and mountain meadow (JHT)

长情况,对模型碳水通量模拟起着重要作用。因此,如何改进并完善 CoLM 陆面模式中 LAI 计算过程是提升模型模拟碳水通量精度的关键因素之一。

### 3.2 不同草地类型碳水通量变化特征

生长季阜康站、多伦站、四子王旗站和菊花台站的蒸散发总量分别为 279、391、516 和 476 mm,ET 季节变化和日变化特征均表现为“单峰型”,蒸散发的季节变化趋势与气温和降水一致,蒸散发除了受到降水的直接影响外,还受到包括气温、太阳辐射、土壤温度和土壤质地等综合因素的影响<sup>[39]</sup>,生长季期间各类草地的蒸散发总量均大于降水量,符合干旱—半干旱区蒸散发的特点<sup>[40]</sup>。整个生长季温性草原、荒漠草原和山地草甸碳吸收量分别为  $-28.2$ 、 $-41.5$  和  $-152.0 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2}$ ,3 个草地类型对  $\text{CO}_2$  的释放量小于吸收量,均表现为对碳的固定,植被总初级生产力、生态系统总呼吸和碳固定能力表现为山地草甸 > 荒漠草原 > 温性草原。荒漠草原在生长季降水明显低于温性草原,但其 GPP、 $R_{\text{eco}}$  和对  $\text{CO}_2$  的固定均高于温性草原,这可能是由不同草原类型植物组成差异所致<sup>[41]</sup>。

### 3.3 碳水通量对环境因子的响应

对生长季水通量的影响因素分析发现,净辐射和降水是影响蒸散发的关键因素,不同类型草地的蒸散发主要受到净辐射和降水的影响,与路倩倩等<sup>[42]</sup>对森林生态系统蒸散发影响因素研究结果一致,降水能够提供蒸散发所需的水分,净辐射提供水分蒸发所需的能量。在水分较少的温性草原和荒漠草原蒸散发受到蒸发的影响也比较明显,并且呈显著正相关( $P < 0.01$ ),而水分较充分的山地草甸,蒸发与蒸散发仅有微弱的相关性,山地草甸的蒸散发相较其他两类草地受到蒸腾的影响更大,说明温性草原和荒漠草原蒸散发主要以土壤蒸发为主,山地草甸的

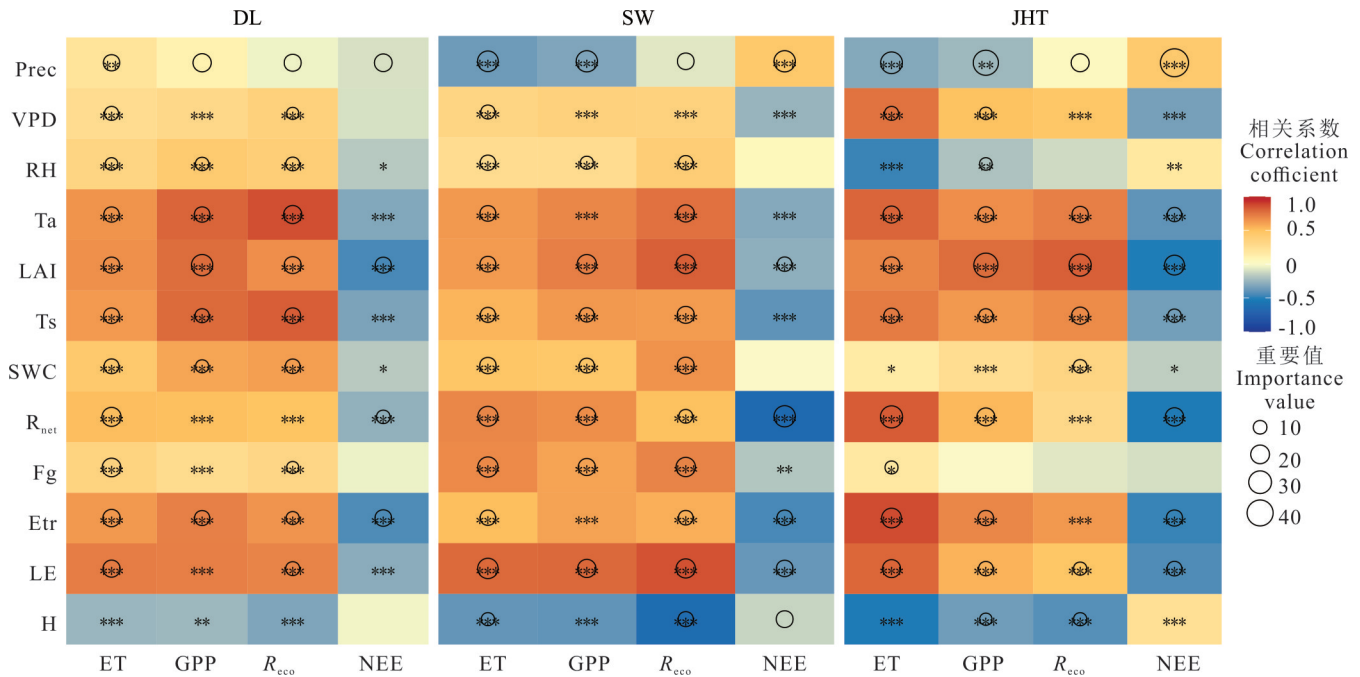


图 11 各环境因子对蒸散发、总初级生产力、生态系统呼吸和净生态系统交换量的影响

Fig. 11 The impact of various environmental factors on evapotranspiration, gross primary productivity, ecosystem respiration and net ecosystem exchange

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; \*\*\*:  $P < 0.001$ .

表 4 环境因子对不同类草地碳水通量的影响程度

Table 4 The impact of environmental factors on carbon and water fluxes in different types of grasslands (%)

通量站点 Flux site	变量 Variable	重要值 Importance value				
		1	2	3	4	5
多伦多站 Doron station (DL)	ET	R <sub>net</sub> (23.6)**	Fg(22.7)**	Etr(19.5)**	LE(19.0)**	Prec(16.8)**
	GPP	LAI(30.0)**	Prec(21.6)**	Ta(15.0)**	Etr(14.3)**	Ts(12.2)**
	R <sub>cco</sub>	Ta(21.3)**	LAI(18.5)**	Prec(18.5)**	Ts(15.7)**	SWC(13.3)**
	NEE	Prec(20.3)**	Etr(17.5)**	LAI(16.1)**	R <sub>net</sub> (11.3)*	—
四子王旗站 Siziwang banner (SW)	ET	Prec(24.5)**	LE(21.8)**	Fg(21.5)**	R <sub>net</sub> (20.9)**	SWC(13.5)**
	GPP	Prec(23.8)**	LAI(19.3)**	LE(17.1)**	R <sub>net</sub> (16.8)**	Fg(15.0)**
	R <sub>cco</sub>	Fg(19.5)**	LE(19.2)**	LAI(18.9)**	Ta(15.2)**	Ts(14.7)**
	NEE	Prec(23.9)**	R <sub>net</sub> (23.8)**	H(14.4)**	LE(13.8)**	Etr(11.8)**
菊花台站 Juhatai station (JHT)	ET	R <sub>net</sub> (28.5)**	Prec(27.4)**	Etr(22.3)**	LE(18.4)**	Ta(16.3)**
	GPP	Prec(37.1)**	LAI(33.9)**	R <sub>net</sub> (18.3)**	Ta(13.4)**	Etr(12.9)**
	R <sub>cco</sub>	LAI(28.3)**	Prec(18.3)**	Ts(16.8)**	Ta(14.8)**	SWC(9.7)**
	NEE	Prec(46.6)**	LAI(22.8)**	R <sub>net</sub> (19.2)**	Etr(14.5)**	LE(11.7)*

Importance value 1~5: 环境因子对碳水通量的重要程度由大到小排序,数值表示各环境因子对碳水通量的贡献率(%) The order of importance value of environmental factors to carbon and water fluxes from large to small, and the numerical value indicates the contribution rate of each environmental factor to carbon and water fluxes(%); \*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ .

蒸散发主要受植被气孔调节,从侧面证实了水分条件充足的草地类型蒸散发受到植物蒸腾作用的影响很大<sup>[43-44]</sup>。相对湿度也是影响生长季蒸散发的关键因素<sup>[45]</sup>,温性草原和荒漠草原的蒸散发与相对湿度显著正相关( $P < 0.05$ ),山地草甸的蒸散发与相对湿度显著负相关( $P < 0.05$ ),原因可能是山地草甸空气相对湿度较大,会抑制植被蒸腾作用和土壤水分蒸发<sup>[46]</sup>。叶面积指数是影响不同草地类型碳通量最大的环境因子,说明植被的生长情况

是反映草地生态系统固碳能力最主要的因素,该结论与祁连山高寒草甸影响因素分析结果一致<sup>[47]</sup>,其次温性草原GPP主要受到温度和蒸腾作用的调控,荒漠草原和山地草甸的GPP受到降水和净辐射的影响更大。

#### 4 结论

本研究运用改进根系吸水(RWUF)和土壤呼吸(SRF)过程后的CoLM陆面模式,模拟了温性荒漠、温性草原、荒漠草原和山地草甸在生长季的碳水通量,对模型在不同水分条件的草地碳水通量模拟适用性做出评价,分析了不同类型草地生长季碳水通量季节变化和日变化特征,并探讨环境因子对其碳水通量的影响。结果表明:1)改进后的CoLM陆面模式对不同草地类型碳水通量的模拟都有较好的适用性,其模拟值与观测值的决定系数 $R^2$ 均超过0.6,但模型对 $R_{eco}$ 的模拟精度仍存在偏差,对水通量(ET)的模拟结果整体优于碳通量(GPP、 $R_{eco}$ 、NEE),并且在模型碳通量模拟过程中发现LAI是提高模型碳通量模拟精度的关键因素。2)通过对不同草地类型的碳水通量分析发现,生长季的碳水通量季节变化和日变化特征均表现为“单峰型”,蒸散发的季节变化趋势与气温、降水趋势一致,且草地的蒸散发量容易受到所处地理位置水分条件的影响。不同草地类型的GPP和 $R_{eco}$ 都表现为山地草甸>荒漠草原>温性草原;温性草原、荒漠草原和山地草甸在生长季的NEE分别为-28.2、-41.5和-152 g C·m<sup>-2</sup>,3个草地类型均表现出对CO<sub>2</sub>的固定,固碳能力表现为山地草甸>荒漠草原>温性草原。3)针对碳水通量关键影响因素的研究发现:降水和净辐射是影响不同类型草地蒸散发最主要的因素,并与碳水通量显著正相关( $P<0.01$ )。相对湿度对草地生态系统生长季蒸散发起着重要作用,在不同水分条件下对其蒸散发的影响存在差异;叶面积指数与不同类型草地生长季碳通量具有显著正相关关系,反映出植被的生长情况是草地生态系统固碳能力最关键的因素,其次不同类型草地碳通量还受到降水和净辐射的影响。

#### 参考文献 References:

- [1] You C H, Wang Y B, Chen S P. A dataset of carbon and water fluxes of the typical grasslands in Duolun County, Inner Mongolia during 2006–2015. *China Scientific Data*, 2023, 8(2): 99–109.  
游翠海, 王彦兵, 陈世苹. 2006–2015年内蒙古多伦典型草原碳水通量观测数据集. *中国科学数据*, 2023, 8(2): 99–109.
- [2] Bai Y F, Han X G, Wu J G, *et al.* Ecosystem stability and compensatory effects in the Inner Mongolia grassland. *Nature*, 2004, 431(7005): 181–184.
- [3] Xi Z H, Wang Y Y, Ma Y M, *et al.* Characteristics of carbon and water fluxes over the alpine shrub steppe ecosystem during growing season on the northern slope of Qomolangma region. *Plateau Meteorology*, 2023, 42(4): 887–898.  
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. *高原气象*, 2023, 42(4): 887–898.
- [4] Anav A, Friedlingstein P, Beer C, *et al.* Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: A review. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(3): 785–818.
- [5] Chen S P, Lin G H, Huang J H, *et al.* Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2450–2461.
- [6] Zhang B W, Tan X R, Wang S S, *et al.* Asymmetric sensitivity of ecosystem carbon and water processes in response to precipitation change in a semi-arid steppe. *Functional Ecology*, 2017, 31(6): 1301–1311.
- [7] Wang L, Liu H Z, Shao Y P, *et al.* Water and CO<sub>2</sub> fluxes over semiarid alpine steppe and humid alpine meadow ecosystems on the Tibetan Plateau. *Theoretical and Applied Climatology*, 2018, 131(1): 547–556.
- [8] Chen S P, Chen J Q, Lin G H, *et al.* Energy balance and partition in Inner Mongolia steppe ecosystems with different land use types. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(11): 1800–1809.
- [9] Chaves M M, Flexas J, Pinheiro C. Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. *Annals of Botany*, 2009, 103(4): 551–560.
- [10] Guo W Z, Jing C Q, Deng X J, *et al.* Variations in carbon flux and factors influencing it on the northern slopes of the Tianshan Mountains. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(5): 1–12.  
郭文章, 井长青, 邓小进, 等. 新疆天山北坡荒漠草原碳通量特征及其对环境因子的响应. *草业学报*, 2022, 31(5): 1–12.
- [11] Xu S X, Jing C Q, Gao S H, *et al.* Evaluation of the applicability of remote sensing GPP models in four typical ecosystems in the arid zone of Central Asia. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9689–9700.  
许世贤, 井长青, 高胜寒, 等. 遥感GPP模型在中亚干旱区4个典型生态系统的适用性评价. *生态学报*, 2022, 42(23):

9689—9700.

- [12] Wang S J, Zhou S J, Fang C L. Spatial-temporal patterns and evolution of carbon storage in China's terrestrial ecosystems from 1980 to 2020. *Scientia Sinica Terrae*, 2024, 54(10): 3323—3339.  
王少剑, 周诗洁, 方创琳. 1980—2020年中国陆地生态系统碳储量时空格局与演进规律. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(10): 3323—3339.
- [13] Dai Y J, Dickinson R E, Wang Y P. A two-big-leaf model for canopy temperature, photosynthesis, and stomatal conductance. *Journal of Climate*, 2004, 17(12): 2281—2299.
- [14] Dai Y J, Zeng X B, Dickinson R E, *et al.* The Common Land Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, 84(8): 1013—1023.
- [15] Guo Q, Liu S F, Yuan H, *et al.* Evaluating energy fluxes of the common land model based on FLUXNET dataset. *Climatic and Environmental Research*, 2022, 27(6): 688—706.  
郭琦, 刘少锋, 袁华, 等. 基于FLUXNET数据集对陆面模式CoLM能量通量的单点评估. *气候与环境研究*, 2022, 27(6): 688—706.
- [16] Jing C Q, An S Z. Numerical simulation of land surface processes in arid desert grassland ecosystems in Central Asia by CoLM land surface model. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 13—21.  
井长青, 安沙舟. CoLM陆面模式对中亚干旱荒漠草地生态系统陆面过程的数值模拟. *草业学报*, 2017, 26(3): 13—21.
- [17] Jiang H N, Xu J H. Soil moisture simulation and error analysis in arid area of China based on CoLM model. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(1): 244—248.  
江江南, 许剑辉. 基于CoLM模式的干旱区土壤湿度模拟试验与误差分析. *草地学报*, 2018, 26(1): 244—248.
- [18] Li Y Z, Li L H, Dong J Q, *et al.* Process refinement contributed more than parameter optimization to improve the CoLM's performance in simulating the carbon and water fluxes in a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 291(1923): 108067.
- [19] Shao Y Q, Yuan X L, Jing C Q, *et al.* A better simulation of water and carbon fluxes in a typical desert grassland ecosystem through the Common Land Model. *Journal of Hydrology*, 2024, 644(1694): 132111.
- [20] Zhang K Y, Liu D F, Liu H, *et al.* Soil respiration characteristics and influencing factors of shrub ecosystem on the Loess Plateau. *Pearl River*, 2022, 43(4): 83—94.  
张奎月, 刘登峰, 刘慧, 等. 黄土高原灌丛生态系统土壤呼吸特征及其影响因素. *人民珠江*, 2022, 43(4): 83—94.
- [21] Li J D, Duan Q Y, Dai Y J, *et al.* A study of the most sensitive parameters for simulating soil temperature and moisture of CoLM. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(4): 841—851.  
李剑铎, 段青云, 戴永久, 等. CoLM模拟土壤温度和湿度最敏感参数的研究. *大气科学*, 2013, 37(4): 841—851.
- [22] Xin Y F, Bian L G, Zhang X H. The application of CoLM to arid region of north west China and Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2006(4): 567—574.  
辛羽飞, 卞林根, 张雪红. CoLM模式在西北干旱区和青藏高原区的适用性研究. *高原气象*, 2006(4): 567—574.
- [23] Liu R, Wang Q X, Tang L S, *et al.* Seasonal variation in water, heat and CO<sub>2</sub> fluxes and its driving forces over a saline desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 67—75.  
刘冉, 王勤学, 唐立松, 等. 盐生荒漠地表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.
- [24] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, *et al.* 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] Zhang L M, Yu G R, Sun X M, *et al.* Seasonal variations of ecosystem apparent quantum yield (a) and maximum photosynthesis rate (Pmax) of different forest ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 176—187.
- [26] Yu G R, Wen X F, Li Q K, *et al.* Seasonal patterns and environmental control of ecosystem respiration in subtropical and temperate forests in China. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 2005, 48(S1): 93—105.
- [27] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315.
- [28] Zheng Z, Wang G. Modeling the dynamic root water uptake and its hydrological impact at the Reserva Jaru site in Amazonia. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 2007, 112(G4): 8512—8518.
- [29] Darenova E, Pavelka M, Acosta M. Diurnal deviations in the relationship between CO<sub>2</sub> efflux and temperature: A case study. *Catena*, 2014, 123(123): 263—269.
- [30] Juszczak R, Acosta M, Olejnik J. Comparison of daytime and night time ecosystem respiration measured by the closed chamber

- technique on a temperate mire in poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2012, 21(3): 643–658.
- [31] Hashimoto S, Carvalhais N, Ito A, *et al.* Global spatiotemporal distribution of soil respiration modeled using a global database. *Biogeosciences*, 2015, 12(13): 4121–4132.
- [32] Burri S, Niklaus P A, Grassow K, *et al.* Effects of plant productivity and species richness on the drought response of soil respiration in temperate grasslands. *PLoS One*, 2018, 13(12): e0209031.
- [33] Gill R A, Jackson R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *The New Phytologist*, 2000, 147(1): 13–31.
- [34] Jones D R, Schonlau M, Welch W J. Efficient global optimization of expensive black-box functions. *Journal of Global Optimization*, 1998, 13(4): 455–492.
- [35] Katakami S, Sakamoto H, Okada M. Bayesian hyperparameter estimation using Gaussian process and bayesian optimization. *Journal of the Physical Society of Japan*, 2019, 88(7): 074001.
- [36] Breiman L. Random forests, machine learning 45. *Journal of Clinical Microbiology*, 2001, 2: 199–228.
- [37] Xu L L, Niu B, Zhang X Z, *et al.* Climate responses of carbon fluxes in two adjacent alpine grasslands in northern Tibet. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(6): 1–16.  
徐玲玲, 牛犇, 张宪洲, 等. 藏北两个临近不同高寒草地碳通量对气候条件的响应. *草业学报*, 2024, 33(6): 1–16.
- [38] Flexas J, Ribas-Carbó M, Diaz-Espejo A, *et al.* Mesophyll conductance to CO<sub>2</sub>: Current knowledge and future prospects. *Plant, Cell and Environment*, 2008, 31(5): 602–612.
- [39] Pu C, Yang B, Zhao Y G, *et al.* Comparison of the variation characteristics and influencing factors of evapotranspiration in two alpine grasslands on the Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2024, 43(5): 1102–1112.  
蒲春, 杨斌, 赵阳刚, 等. 青藏高原两处高寒草地蒸散发的变化特征及影响因子对比. *高原气象*, 2024, 43(5): 1102–1112.
- [40] Li Q H, Zhang H S, Ju T T, *et al.* Experimental research on the characteristics of the atmospheric boundary layer in the semi-arid north China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2020, 56(2): 215–222.  
李倩惠, 张宏升, 鞠婷婷, 等. 华北北部半干旱地区夏季大气边界层特征的实验研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(2): 215–222.
- [41] Wang X D. Study on the productivity and community dynamics of grassland vegetation in Inner Mongolia and their response to climate. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.  
王晓栋. 内蒙古草原植被生产力与群落结构动态及其对气候变化响应的研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- [42] Lu Q Q, He H L, Zhu X J, *et al.* Study on the variations of forest evapotranspiration and its components in eastern China. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(9): 1436–1448.  
路倩倩, 何洪林, 朱先进, 等. 中国东部典型森林生态系统蒸散及其组分变异规律研究. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1436–1448.
- [43] Zhang M D, Zhang L F, Chen Z G, *et al.* Effects of evaporation and transpiration on evapotranspiration of degraded meadow in the Three-River Source Region. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(18): 7138–7152.  
张梦迪, 张立锋, 陈之光, 等. 土壤蒸发和植被蒸腾对三江源退化高寒草甸蒸散的影响. *生态学报*, 2021, 41(18): 7138–7152.
- [44] Spinelli G M, Snyder R L, Sanden B L, *et al.* Water stress causes stomatal closure but does not reduce canopy evapotranspiration in almond. *Agricultural Water Management*, 2016, 168(3774): 11–22.
- [45] Xiao M Z, Yu Z B, Kong D D, *et al.* Stomatal response to decreased relative humidity constrains the acceleration of terrestrial evapotranspiration. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9): 094066.
- [46] Yun W L, Hou Q, Wang Y L, *et al.* Spatial and temporal distribution of crop coefficient and actual evapotranspiration in typical steppe of Inner Mongolia. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(2): 300–311.  
云文丽, 侯琼, 王永利, 等. 内蒙古典型草原作物系数和实际蒸散量的时空分布特征. *自然资源学报*, 2013, 28(2): 300–311.
- [47] Zhang W B, Xin H J, Li Z S, *et al.* Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange in alpine meadows in the Qilian Mountains during the non-growing season and its influencing factors. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024, 46(2): 688–696.  
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. *冰川冻土*, 2024, 46(2): 688–696.