

2012–2016年宁夏盐池毛乌素沙地黑沙蒿灌丛生态系统通量观测数据集

韩 聪¹ 母艳梅¹ 查天山^{1,2} 秦树高^{1,2} 刘 鹏^{1,2} 田 赟^{1,2} 贾 昕^{1,2*}

¹北京林业大学水土保持学院, 宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083; ²北京林业大学水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083

摘 要 干旱、半干旱区分布广泛, 是陆地生态系统的重要组成部分, 半干旱生态系统对全球碳水循环的长期趋势和年际变异具有重要的调控作用。已有关于陆地生态系统碳水循环的机理研究和数据产品研制大多关注森林、草原和农田等生态系统类型, 针对沙地灌丛的研究仍相对较少, 数据可利用性较低, 制约着区域生态功能的准确评估和预测。自2011年起, 采用涡度协方差法对黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)灌丛生态系统碳水热通量开展了长期连续观测。该研究通过对2012–2016年原始数据进行通量计算、质量控制、缺失值插补和碳通量拆分等处理步骤, 生成各时间尺度(半小时、日、月、年)生态系统碳水热通量观测数据集, 同时整理并生成相对应的微气象数据集。数据集包括生态系统净CO₂交换(NEE)、总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸(Re)、潜热通量(LE)和显热通量(Hs)以及相关微气象观测指标。数据集的有效数据占比和能量闭合程度分析表明: (1) 质量控制后的有效NEE、LE和Hs半小时数据全年占比分别为56.23%–62.19%、79.40%–94.12%和77.56%–91.27%; (2) 在年尺度和月尺度的能量平衡比率变化范围分别为0.78–0.83和0.59–1.19; (3) 基于逐日数据, 采用最小二乘回归(LE + Hs vs. Rn – G; Rn为净辐射, G为土壤热通量)分析能量闭合程度, 不同年份间和不同季节间的回归斜率变化范围分别为0.73–0.79和0.73–0.92。上述结果表明, 本数据集有效数据占比高, 能量闭合程度处于合理范围, 能够为不同时空尺度生态系统过程与功能研究提供较好的数据支撑。

关键词 碳水通量; 能量平衡; 涡度协方差; 毛乌素沙地; 半干旱灌丛

韩聪, 母艳梅, 查天山, 秦树高, 刘鹏, 田赟, 贾昕 (2023). 2012–2016年宁夏盐池毛乌素沙地黑沙蒿灌丛生态系统通量观测数据集. 植物生态学报, 47, 1322–1332. DOI: 10.17521/cjpe.2023.0001

A dataset of ecosystem fluxes in a shrubland ecosystem of Mau Us Sandy Land in Yanchi, Ningxia, China (2012–2016)

HAN Cong¹, MU Yan-Mei¹, ZHA Tian-Shan^{1,2}, QIN Shu-Gao^{1,2}, LIU Peng^{1,2}, TIAN Yun^{1,2}, and JIA Xin^{1,2*}

¹Yanchi Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; and ²Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract

Arid and semi-arid ecosystem areas, which constitute an important component of the global land surface, act to regulate the long-term trend and interannual variations in global carbon and water cycles. Previous studies on the mechanisms underlying ecosystem carbon and water cycling and the development of relevant data products focus primarily on forest, grassland, and cropland ecosystems, with few research attention given to semi-arid shrublands. This research gap hinders the evaluation and projection of ecosystem functions at the regional scale. Since 2011, we used the eddy covariance technique to make continuous *in situ* measurements of carbon, water and heat fluxes in a shrubland ecosystem at Yanchi Research Station, the Mau Us Sandy Land. Data processing steps mainly included data collection, post-processing of raw data, quality control, gap-filling and carbon flux partitioning. We produced flux and micro-meteorological datasets at half-hourly, daily, monthly, and annual temporal resolutions for the years 2012–2016, and analyzed the overall quality of the datasets in terms of the proportion of valid data and the energy balance closure of flux measurements. Results showed: (1) After quality control, the proportion of valid data for

收稿日期Received: 2023-01-02 接受日期Accepted: 2023-03-06

基金项目: 国家生态科学数据中心(NESDC20210101)、国家自然科学基金(32071843、32101588、32071842和31901366)和中央高校基本科研业务费专项资金(PYX202122和PYX202123)。Supported by the National Ecosystem Science Data Center (NESDC20210101), the National Natural Science Foundation of China (32071843, 32101588, 32071842, and 31901366), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (PYX202122 and PYX202123).

* 通信作者Corresponding author (xinjia@bjfu.edu.cn)

half-hour net ecosystem CO₂ exchange (NEE), latent heat flux (LE), and sensible heat flux (Hs) was 56.23%–62.19%, 79.40%–94.12%, and 77.56%–91.27%, respectively. (2) Annual and monthly energy balance ratio ranged 0.78–0.83 and 0.59–1.19, respectively. (3) The energy balance closure estimated using the “ordinary least squares” regression method showed that the interannual and seasonal variations in the slope of regression curves varied with a range of 0.73–0.79 at interannual scale and 0.73–0.92 at seasonal scale, respectively. These results indicate that our datasets have a high proportion of valid data and a reasonable energy balance closure, and thus can be used in studies related to ecosystem processes and functions at varying spatio-temporal scales.

Key words carbon and water fluxes; energy balance; eddy covariance; Mau Us Sandy Land; semi-arid shrubland

Han C, Mu YM, Zha TS, Qin SG, Liu P, Tian Y, Jia X (2023). A dataset of ecosystem fluxes in a shrubland ecosystem of Mau Us Sandy Land in Yanchi, Ningxia, China (2012–2016). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 47, 1322–1332. DOI: 10.17521/cjpe.2023.0001

干旱、半干旱区分布广泛, 是陆地生态系统的重要组成部分, 约占陆地面积的40%, 占我国国土面积的50% (Piao *et al.*, 2005; Reynolds *et al.*, 2007)。半干旱生态系统对全球碳水循环的长期趋势和年际变异具有重要的调控作用 (Poulter *et al.*, 2014; Ahlström *et al.*, 2015)。因此, 开展干旱、半干旱生态系统碳水热通量长期连续观测, 对于估算区域碳汇, 揭示其变化机理, 预测气候变化对生态系统的影响, 具有极为重要的意义。

目前, 涡度协方差技术已广泛应用于陆地生态系统碳水循环研究, 成为生态系统通量观测的标准方法 (陈世苹等, 2020)。通过站点联网, 已经形成了全球尺度的国际通量网 (FLUXNET) 以及区域尺度的子网, 包括美洲通量网 (AmeriFlux)、欧洲通量网 (EuroFlux)、亚洲通量网 (AsiaFlux) 和中国通量网 (ChinaFLUX) 等长期定位观测网络。过去20余年, 通过大量的单站点研究和联网整合分析, 揭示了不同类型生态系统碳水循环与能量平衡的时空变化规律与调控机理, 相关的共享通量数据集也广泛应用于大尺度模型模拟和遥感数据产品的验证 (陈世苹等, 2020)。

国际通量网目前覆盖超过1 000个通量观测站点, 大部分集中于北美中东部、西欧和东亚的森林和草地生态系统; 中国通量网目前覆盖79个站点, 其中森林、草地和农田站点合计占76%, 而荒漠站仅有2个。已有研究多关注温带森林、温带草原、高寒草甸等生态系统的碳汇功能、水文效应和能量平衡, 针对沙地灌丛的研究仍相对较少, 数据可利用性较低, 制约着对于干旱、半干旱区生态功能的准确评估和预测。我国北方沙地灌丛在气候上呈现水热基本同期, 季节温差巨大, 冬季严寒; 在物种组成上以C₃植物为优势种, 缺乏常绿植物种; 在物候特征上, 植物展叶和枯黄时间主要受温度影响, 其次

受降水影响 (Biederman *et al.*, 2018; Mu *et al.*, 2022)。因此, 为准确评估我国生态系统碳汇规模, 服务国家“双碳”战略, 有必要提高我国北方干旱半干旱区灌丛生态系统的可利用性, 研制、公开生态系统通量观测共享数据产品。

宁夏盐池毛乌素沙地生态系统定位观测研究站 (下文简称“盐池站”) 地处毛乌素沙地南缘, 位于干旱、半干旱气候过渡带、农牧区交错带。以黑沙蒿 (*Artemisia ordosica*) 为优势种的灌丛群落是毛乌素沙地最具代表性的植物群落类型, 在沙地生态系统恢复中起重要作用。自2011年6月以来, 采用涡度协方差技术对典型黑沙蒿灌丛生态系统碳水热通量及相关气象因子进行长期连续监测。基于观测数据, 探究了生态系统净CO₂交换 (NEE) 和蒸散发的昼夜、季节和年际变化规律, 明晰了生物、非生物因素对碳水平衡的影响机理, 并以论文电子附件等形式公开了部分月尺度研究数据 (Jia *et al.*, 2014, 2016, 2018, 2020; Mu *et al.*, 2022)。

本文整理了2012–2016年盐池站多时间尺度 (半小时、日、月、年) 的碳水热通量和相关气象数据。经过通量计算、质量控制、缺失值插补和通量拆分等处理步骤, 确保数据的可靠性、完整性、综合性。该数据集可为评估与预测区域碳水平衡特征提供数据支撑, 为整合分析补充有区域代表性的生态系统类型。

1 材料和方法

1.1 站点概况

盐池站 (37.71° N, 107.23° E, 海拔高度1 530 m) 位于宁夏回族自治区盐池县, 毛乌素沙地南缘, 地处干旱、半干旱气候过渡带、农牧区交错带。属于典型的中温带大陆性气候, 冬季干燥寒冷, 夏季高温多雨, 多年平均气温8.3 °C, 最高月平均气温为

25.2 °C (7月), 最低月平均气温为-13.8 °C (12月)。多年平均降水量293 mm, 年际间波动较大(140–587 mm), 约80%的降水集中在4–10月。多年平均潜在蒸散量约为1 300 mm (气象数据来源于盐池气象站和盐池站, 见Mu *et al.*, 2022)。土壤类型以风沙土为主(砂、粉、黏粒占比分别为96.6%、3.2%和0.2%), 0–10 cm深度土壤密度约为1.50 g·cm⁻³, 田间持水量约为20%, 凋萎点约为3.6% (Miao *et al.*, 2020; Mu *et al.*, 2022)。0–10 cm表层土壤总氮含量为0.1–0.2 g·kg⁻¹, 有机碳含量约为2.0 g·kg⁻¹ (Jiang *et al.*, 2021)。主要植被类型为沙生灌丛, 植被盖度约为70%, 黑沙蒿为优势物种, 其他木本植物包括蒙古羊柴(*Corethroedendron fruticosum* var. *mongolicum*)、细枝羊柴(*C. scoparium*)和北沙柳(*Salix psammophila*); 草本植物主要为赖草(*Leymus secalinus*)、白草(*Pennisetum flaccidum*)、沙生针茅(*Stipa caucasica* subsp. *glareosa*)、角蒿(*Incarvillea sinensis*)和华北白前(*Vincetoxicum mongolicum*)等。植被高度为1.0–1.5 m, 生物量为350–600 g·m⁻², 叶面积指数为0–1.2 m²·m⁻² (Jia *et al.*, 2014; Jiang *et al.*, 2021; Mu *et al.*, 2022)。优势灌木物种的根系主要分布于20–50 cm深度, 因此无法获取地下水(深度超过8 m), 降水对土壤水分的补给是植物根系吸水的唯一来源(Jia *et al.*, 2016)。

1.2 野外观测

野外观测设备的安装、调试主要在2011年6–10月完成, 主要包括涡度协方差观测系统和微气象观测系统(表1)。

涡度协方差观测系统: 主要由三维超声风速仪和闭路红外气体分析仪组成。涡度协方差系统安装在观测塔上, 距地面高度为6.2 m, 下垫面平坦(坡度<1°), 各个方向植被盖度和物种组成相似, 90%以上的通量足迹来自于上风向220 m范围内。原始数据测定频率为10 Hz, 由数据采集器记录, 由维护人员每周下载, 并离线计算半小时通量数值。定期对涡度协方差系统进行现场标定、光路清洁、气路清洁和过滤网更换等维护工作, 保证系统运行状态良好。

微气象观测系统: 观测塔上安装了各类型传感器, 对气象环境变量开展同步观测, 微气象传感器的观测高度均为6 m, 观测指标包括空气温度、相对湿度、风速、风向、太阳辐射(总辐射)、净辐射和光合有效辐射。在观测塔周围10 m范围内不同方向

的3个位置挖掘土壤剖面, 埋设传感器, 测定土壤温度和体积含水率, 测量深度为10 cm和30 cm。在观测塔周围10 m范围内不同方向的5个位置埋设土壤热通量传感器(10 cm深度), 测定土壤热通量, 并根据0–10 cm土壤热储量变化率对土壤热通量数值进行校正(Ochsner *et al.*, 2007)。上述指标采集频率均为0.1 Hz。选取观测塔周围约50 m距离不同方向的3个位置, 在2 m高度架设翻斗式雨量筒, 测定降雨量(精度0.1 mm)。大气压由涡度协方差系统的闭路红外气体分析仪中内置的气压传感器测定。由不同的数据采集器计算并存储上述指标的半小时数值(详见表1)。

饱和水汽压差由空气温度和相对湿度计算得出。翻斗式雨量筒于2012年7月下旬安装调试, 因此在2012年8月1日前半小时降雨量数据为缺失值。采用盐池县气象站1–5月逐日降雨观测数据和盐池站5–7月人工雨量筒逐日测定数据进行补充, 构建2012年度日、月、年尺度的完整降雨数据集(Jia *et al.*, 2014)。野外观测各项指标以及所用仪器设备信息详见表1。

1.3 数据处理

采用EddyPro 7.0.2软件(LI-COR, Lincoln, USA)对涡度协方差系统观测的10 Hz原始数据进行计算, 得到半小时通量数据(包括CO₂通量、潜热通量(LE)和显热通量(Hs))。主要计算步骤包括剔除异常值、二次坐标旋转、频率损失校正、时间延迟校正、去趋势和通量计算等(Jia *et al.*, 2020)。由于LI-7200闭路式气体分析仪(LI-COR, Lincoln, USA)可以直接输出气体混合比(不受气体密度影响), 因此没有进行密度校正(即Webb-Pearman-Leuning (WPL)校正)。采用中位数绝对偏差法(median of absolute deviation about the median, MAD) (Papale *et al.*, 2006)对半小时通量数据进行异常值剔除。

采用R软件包“REddyProc”对夜间半小时CO₂通量数据进行摩擦风速(u^*)剔除, 然后进行半小时通量数据的缺失值插补和CO₂通量拆分。进行CO₂通量 u^* 剔除时, 采用动点法(moving point method) (Papale *et al.*, 2006; Wutzler *et al.*, 2018)估算每年 u^* 的阈值(年际间变化范围为0.22–0.32 m·s⁻¹)。通过上述质量控制流程的CO₂通量作为NEE的观测值, 夜间NEE代表夜间生态系统呼吸(Re)。

采用边际分布抽样算法(marginal distribution

表1 宁夏盐池毛乌素沙地黑沙蒿灌丛生态系统通量和气象观测指标、观测仪器和数据采集器信息
Table 1 Summary of measured variables, instruments, and dataloggers in a *Artemisia ordosica* shrubland ecosystem of Mau Us Sandy Land in Yanchi, Ningxia

观测系统 Measurement system	数据采集器 (制造商) Datalogger (manufacturer)	观测指标 Measured variable	仪器型号 (制造商) Instrument model (manufacturer)
通量观测系统 Flux measurement system	LI-7550 (LI-COR, Lincoln, USA)	大气压 Atmospheric pressure	LI-7200 (LI-COR, Lincoln, USA)
		碳水通量 Carbon and water flux	LI-7200 (LI-COR, Lincoln, USA)
		潜热、显热通量 Latent heat and sensible heat flux	LI-7200 (LI-COR, Lincoln, USA)
		三维超声风速 3D sonic anemometer	CSAT-3 (Campbell, Logan, USA)
气象观测系统 Meteorological measurement system	CR200X (Campbell, Logan, USA)	降雨量 Rainfall	TR-525M (Texas Electronics, Dallas, USA)
	CR3000 (Campbell, Logan, USA)	空气温度 Air temperature	HMP155A (Vaisala, Helsinki, Finland)
		相对湿度 Relative humidity	HMP155A (Vaisala, Helsinki, Finland)
		饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	HMP155A (Vaisala, Helsinki, Finland)
	EM50 (METER Environment, Pullman, USA)	风速 Wind speed	034B (Met-One Instruments, Grants Pass, USA)
		风向 Wind direction	034B (Met-One Instruments, Grants Pass, USA)
		太阳辐射 Solar radiation	CMP3 (Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands)
		净辐射 Net radiation	CNR-4 (Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands)
		光合有效辐射 Photosynthetically active radiation	PAR-LITE (Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands)
		土壤热通量 Soil heat flux	HFP01 (Hukseflux Thermal Sensors, Delft, The Netherlands)
		土壤温度 Soil temperature	ECH2O-5TE (METER Environment, Pullman, USA)
		土壤含水量 Soil water content	ECH2O-5TE (METER Environment, Pullman, USA)

sampling, MDS)进行半小时通量数据的缺失值插补, 该算法的窗口大小随着太阳辐射、温度和饱和水汽压差等气象数据的可利用性改变, 大多数情况下为1–14天, 随着气象数据可利用性下降, 时间窗口最大可扩展至140天, 具体算法流程详见Wutzler等(2018)。微气象变量的缺失值优先采用与其他相关指标的回归关系进行插补(如光合有效辐射和太阳辐射的关系), 当无法建立回归关系时, 则采用MDS法进行插补(Reichstein *et al.*, 2005; Wutzler *et al.*, 2018)。因缺乏可靠算法, 未对大气压、风向和土壤含水量进行缺失值插补, 缺失值用NA表示。大气压、风向和土壤含水量的整体缺失值占比分别为5.5%、6.3%和0.006%。

在缺失值插补后, 将日间NEE拆分成总初级生产力(GPP)和Re。首先, 采用Lloyd & Taylor模型(Lloyd & Taylor, 1994)建立夜间Re的温度响应函数:

$$\text{Re} = \text{Re}_{\text{ref}} \exp \left[E_0 \left(\frac{1}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{T_a - T_0} \right) \right] \quad (1)$$

式中, T_0 是恒值, 为−46.02 °C; T_a 指空气温度; T_{ref} 为参考温度, 为15 °C; Re_{ref} 指参考温度下的生态系统

呼吸速率; E_0 指活化能, 能够量化Re的温度敏感性。计算 E_0 时, 将时间序列分割为每15天一段, 应用公式(1)进行回归分析, 并通过多个时段的加权平均(权重为 E_0 标准误的倒数), 得到每年一个 E_0 值。计算 Re_{ref} 时, 将时间序列分割为每4天一段, 围绕其中心时间点, 建立7天的时间窗口, 应用公式(1)进行回归分析, 将得到的 Re_{ref} 值赋给中心时间点, 最后进行线性插值, 得到每半小时的 Re_{ref} 。再利用公式(1)计算日间Re, 并最终得到GPP和净生态系统生产力(NEP):

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

$$\text{NEP} = -\text{NEE} = \text{GPP} - \text{Re} \quad (3)$$

数据集中未包括半小时尺度生态系统蒸散发(ET)数据, 数据使用者可采用LE计算ET (mm):

$$\text{ET} = \frac{\text{LE}}{\lambda \times \rho} \times 1.8 \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中, λ 为水的汽化潜热(2.45 kJ·g^{−1}), ρ 为水的密度(1 g·cm^{−3})。

1.4 数据集质量检验

1.4.1 有效数据占比

统计质量控制后半小时NEE、LE和Hs通量数据缺失率, 计算得出各年份3个指标的有效观测数据占比。

1.4.2 能量闭合评估

表面能量闭合是根据生态系统能量输入和输出的一致性,判定通量观测系统运行状况和数据可靠程度的常用指标。陆地生态系统的表面能量平衡方程为:

$$R_n - G = LE + H_s + F_s + Q \tag{5}$$

式中, R_n 为净辐射, G 为土壤热通量, H_s 为显热通量, LE 为潜热通量, F_s 为冠层储热, Q 为其他能量输出项。其中 F_s 和 Q 占比例较小,且难以被测量获取,因此忽略不计,采用湍流能量($LE + H_s$)和辐射有效能($R_n - G$)进行能量闭合评估。

当前学界常用的两种能量闭合评价方法是最小二乘法线性回归法(OLS)和能量平衡比率法(EBR)(McGloin *et al.*, 2018)。对于($LE + H_s$)和($R_n - G$), OLS方法和EBR的计算方式分别为拟合回归曲线和计算比值,具体公式如下:

OLS方法: $LE + H_s = a(R_n - G) + b \tag{6}$

EBR方法: $EBR = \frac{\sum (LE + H_s)}{\sum (R_n - G)} \tag{7}$

式中, a 为斜率, b 为截距。

本研究采用OLS方法,基于逐日数据,验证不同年份间和不同季节间能量闭合状况的边际值,即 a 与1的差异, a 越接近1则能量闭合程度越高; OLS回归的 R^2 较高,意味着系统受到随机误差的影响越小;采用EBR验证月尺度和年尺度的能量闭合状况的绝对值, EBR越接近1则能量闭合程度越高。根据前人对通量站点的整合分析,能量不闭合程度的合理区间为10%–30% (Wilson *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2005)。

2 结果

2.1 数据集描述

本数据集为2012–2016年宁夏盐池毛乌素沙地黑沙蒿灌丛生态系统通量观测数据,存储为Excel文件,文件夹命名分别为“通量观测数据”和“气象观测数据”,每个文件夹内按照时间尺度划分为“半小时尺度.xlsx”、“日尺度.xlsx”、“月尺度.xlsx”和“年尺度.xlsx”,共8个“.xlsx”文件,总数据量约为21.4 MB (附录)。

表2和表3分别以半小时通量和气象观测数据为例,列出所含数据项的具体名称、单位和相关说明。图1展示了碳通量(GPP、 R_e 、NEE)和热通量(LE 、 H_s)逐日值在2012–2016年期间的变化动态,图2展

示了空气温度、降雨量和光合有效辐射3种气象变量逐日值在2012–2016年期间的变化动态。从时间序列可以看出,生态系统通量和气象指标表现出显著的季节动态和年际变异。

2.2 有效数据占比

经过质量控制的NEE、 LE 和 H_s 的有效观测数据在5年间平均占比分别为60.08%、88.51%和86.57%,不同年份间有效观测数据占比变化范围分别为56.23%–62.19%、79.40%–94.12%和77.56%–91.27%,其中2015和2013年3项指标的有效数据占比分别为最高和最低的年份。可以看出,各项通量指标在5年观测期内有效数据占比较高,未出现长时间的数据缺失情况,数据可信度较高。具体各年的有效数据占比情况如表4所示。

2.3 能量闭合分析

采用EBR评价盐池毛乌素沙地灌丛年尺度和月尺度能量闭合状况。在年尺度(表5),5年EBR平均值为0.81,不同年份间EBR变化范围为0.78 (2014年)至0.83 (2013年)。在月尺度(表6),不同年份间EBR月平均值为0.83 (2014年)至0.90 (2013年),与年尺度所得结果相同。不同月份间,5年平均月尺度EBR变化范围为0.67–1.06,其中EBR较高的月份多集中在1月和12月,5年平均值与1.00接近; EBR较低的月份多集中在7–9月,5年均值在0.70左右。无论是在年尺度还是月尺度,EBR的值均较高,能量不闭合程度小于30%,说明数据质量较为可靠。

本研究采用OLS方法评价盐池毛乌素沙地灌丛在不同年份和季节上日尺度能量闭合程度的边际

表2 盐池站半小时通量观测数据表单内容
Table 2 Summary of half-hourly ecosystem flux data at Yanchi Research Station

数据项 Data item	计量单位 Unit
年 Year	—
月 Month	—
日 Day	—
时 Hour	—
分 Minute	—
潜热通量 Latent heat flux	$W \cdot m^{-2}$
显热通量 Sensible heat flux	$W \cdot m^{-2}$
总初级生产力 Gross primary productivity	$mg \ C \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
生态系统呼吸 Ecosystem respiration	$mg \ C \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
生态系统净CO ₂ 交换 Net ecosystem CO ₂ exchange	$mg \ C \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

—, 无数据。
—, no data.

表3 盐池站微气象半小时观测数据表单内容
Table 3 Summary of half-hourly micro-meteorological data at Yanchi Research Station

数据项 Data item	计量单位 Unit	数据项说明 Description
年 Year	—	年份 Year
月 Month	—	月份 Month
日 Day	—	日期 Day
时 Hour	—	小时 Hour
分 Minute	—	分钟 Minute
空气温度 Air temperature	℃	冠层上方平均空气温度 Mean air temperature above canopy
相对湿度 Relative humidity	%	冠层上方平均相对湿度 Mean relative humidity above canopy
饱和水汽压差 Vapor pressure deficit	kPa	冠层上方饱和水汽压差 Vapor pressure deficit above canopy
大气压 Atmospheric pressure	kPa	大气压强 Atmospheric pressure
风速 Wind speed	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	冠层上方风速 Wind speed above canopy
风向 Wind direction	°	冠层上方风向 Wind direction above canopy
太阳辐射 Solar radiation	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	太阳总辐射 Total solar radiation
净辐射 Net radiation	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	净辐射 Net radiation
光合有效辐射 Photosynthetically active radiation	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	光合有效辐射 Photosynthetically active radiation
土壤热通量 Soil heat flux	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	土壤热通量 Soil heat flux
一层土壤(10 cm)温度 10 cm soil temperature	℃	距地表10 cm土壤温度 Soil temperature 10 cm underground
二层土壤(30 cm)温度 30 cm soil temperature	℃	距地表30 cm土壤温度 Soil temperature 30 cm underground
一层土壤(10 cm)含水量 10 cm soil water content	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	距地表10 cm土壤水分 Soil water content 10 cm underground
二层土壤(30 cm)含水量 30 cm soil water content	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$	距地表30 cm土壤水分 Soil water content 30 cm underground
降雨量 Rainfall	mm	降雨量 Rainfall

—, 无数据。
—, no data.

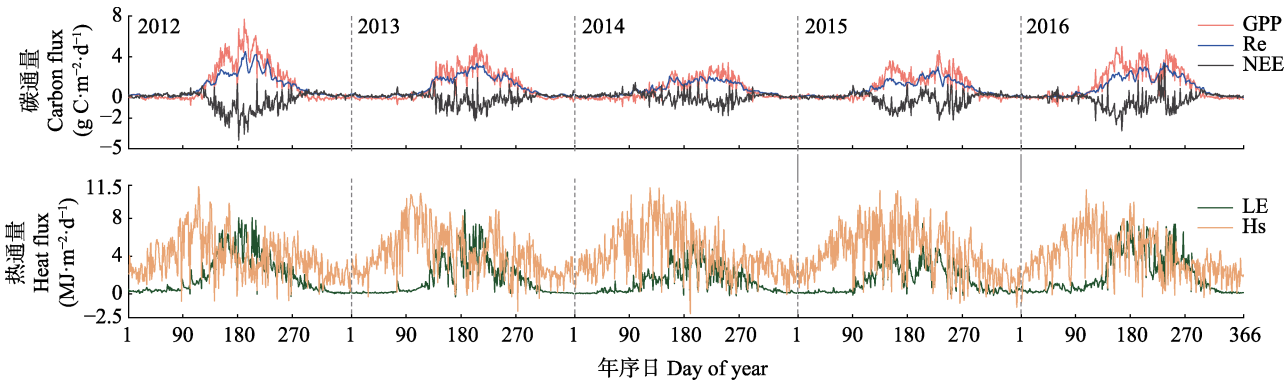


图1 盐池站碳通量和热通量逐日值在2012–2016年期间的变化动态。GPP, 总初级生产力; Hs, 显热通量; LE, 潜热通量; NEE, 净生态系统CO₂交换; Re, 生态系统呼吸。

Fig. 1 Temporal variations in daily carbon and heat fluxes at Yanchi Research Station during 2012–2016. GPP, gross primary productivity; Hs, sensible heat flux; LE, latent heat flux; NEE, net ecosystem CO₂ exchange; Re, ecosystem respiration.

值。在不同年份间(图3), 决定系数(R^2)和OLS回归方程的斜率(a)变化范围分别为0.83–0.88和0.73–0.79, 其中 R^2 最高和最低的年份分别为2015、2016年(图3D、3E)和2014年(图3C), a 最高和最低的年份分别为2015年(图3D)和2014年(图3C)。图3F为5年总体的日尺度能量闭合状况, R^2 和 a 分别为0.86和0.75。在不同季节间(图4), R^2 和 a 分别为0.78–0.80和0.73–0.92, 其

中 R^2 和 a 最高和最低的季节均为夏季(图4B)和秋季(图4C)。无论是在不同年份还是不同季节, R^2 和 a 均较高, 说明数据受随机误差影响较小, 能量闭合程度较好。

3 讨论

依托宁夏盐池毛乌素沙地生态系统国家定位观

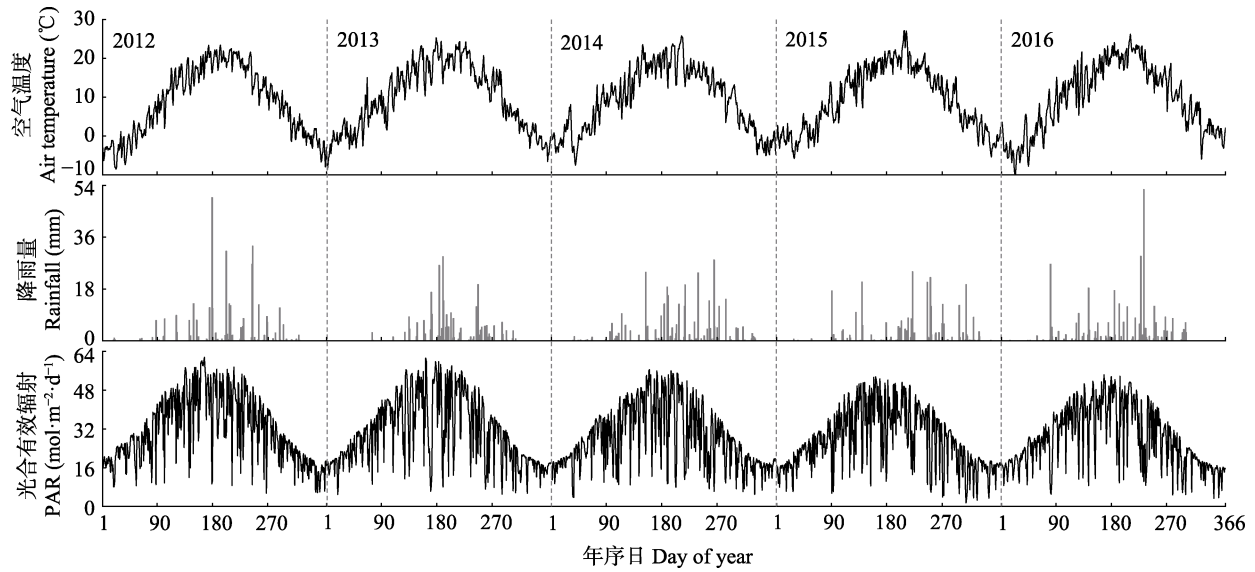


图2 盐池站空气温度、降雨量、光合有效辐射逐日值在2012–2016年期间的变化动态。
Fig. 2 Temporal variations in daily mean air temperature, daily total rainfall and daily mean photosynthetically active radiation (PAR) at Yanchi Research Station during 2012–2016.

表4 盐池站2012–2016年通量观测有效数据占比
Table 4 Proportion of valid flux data at Yanchi Research Station during 2012–2016

年份 Year	NEE (%)	LE (%)	Hs (%)
2012	59.89	91.23	90.84
2013	56.23	79.40	77.56
2014	61.53	90.03	88.33
2015	62.19	94.12	91.27
2016	60.56	87.78	84.86
平均 Mean	60.08	88.51	86.57

Hs, 显热通量; LE, 潜热通量; NEE, 净生态系统CO₂交换。
Hs, sensible heat flux; LE, latent heat flux; NEE, net ecosystem CO₂ exchange.

表5 盐池站2012–2016年通量观测年尺度能量平衡比率
Table 5 Annual energy balance ratio (EBR) for flux measurements at Yanchi Research Station during 2012–2016

年份 Year	能量平衡比率 EBR
2012	0.83
2013	0.83
2014	0.78
2015	0.80
2016	0.80
平均 Mean	0.81

测研究站, 于2012–2016年, 对毛乌素沙地典型黑沙蒿灌丛生态系统的碳水热通量及相关微气象因子进行连续观测。通过对原始观测数据进行通量计算、质量控制、缺失值插补和碳通量拆分, 生成各时间尺度(半小时、日、月、年)生态系统碳水热通量观

表6 盐池站2012–2016年通量观测月尺度能量平衡比率
Table 6 Monthly energy balance ratio (EBR) for flux measurements at Yanchi Research Station during 2012–2016

月份 Month	年份 Year					平均 Mean
	2012	2013	2014	2015	2016	
1	1.10	1.19	1.08	0.86	0.90	1.03
2	0.96	1.06	0.82	0.92	0.96	0.94
3	0.90	0.99	0.95	0.93	0.90	0.93
4	0.97	0.96	0.80	0.82	0.83	0.87
5	0.82	0.85	0.82	0.81	0.69	0.80
6	0.81	0.79	0.79	0.79	0.82	0.80
7	0.72	0.64	0.68	0.77	0.77	0.72
8	0.72	0.78	0.63	0.77	0.71	0.72
9	0.72	0.65	0.59	0.62	0.79	0.67
10	0.86	0.88	0.79	0.82	0.75	0.82
11	0.88	0.88	0.91	0.68	1.00	0.87
12	1.01	1.12	1.04	1.13	0.98	1.06
平均 Mean	0.87	0.90	0.83	0.83	0.84	0.85

测数据集。数据集所含数据项较为全面, 包括常用的碳水热通量数据以及空气温湿度、风速风向、太阳辐射、光合有效辐射、净辐射、土壤温度、土壤含水量和降雨量等气象数据。通量计算、质量控制、缺失值插补和碳通量拆分等数据计算处理流程, 均采用国际通量学界的主流方法和规范软件包(“EddyPro”、“REddyProc”等)完成。在观测期间定期对仪器设备进行标定维护, 数据精度好, 有效数

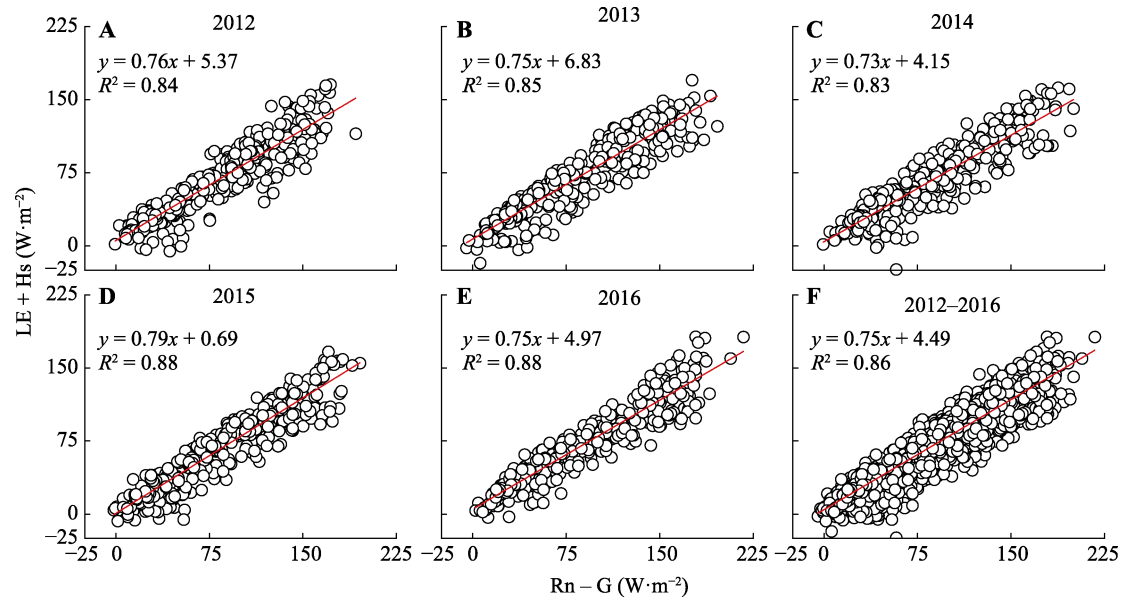


图3 盐池站2012–2016年间不同年份间通量逐日数据能量闭合回归分析。G, 土壤热通量; Hs, 显热通量; LE, 潜热通量; Rn, 净辐射。

Fig. 3 Regression analysis on the energy balance closure of daily flux values at Yanchi Research Station for different years during 2012–2016. G, soil heat flux; Hs, sensible heat flux; LE, latent heat flux; Rn, net radiation.

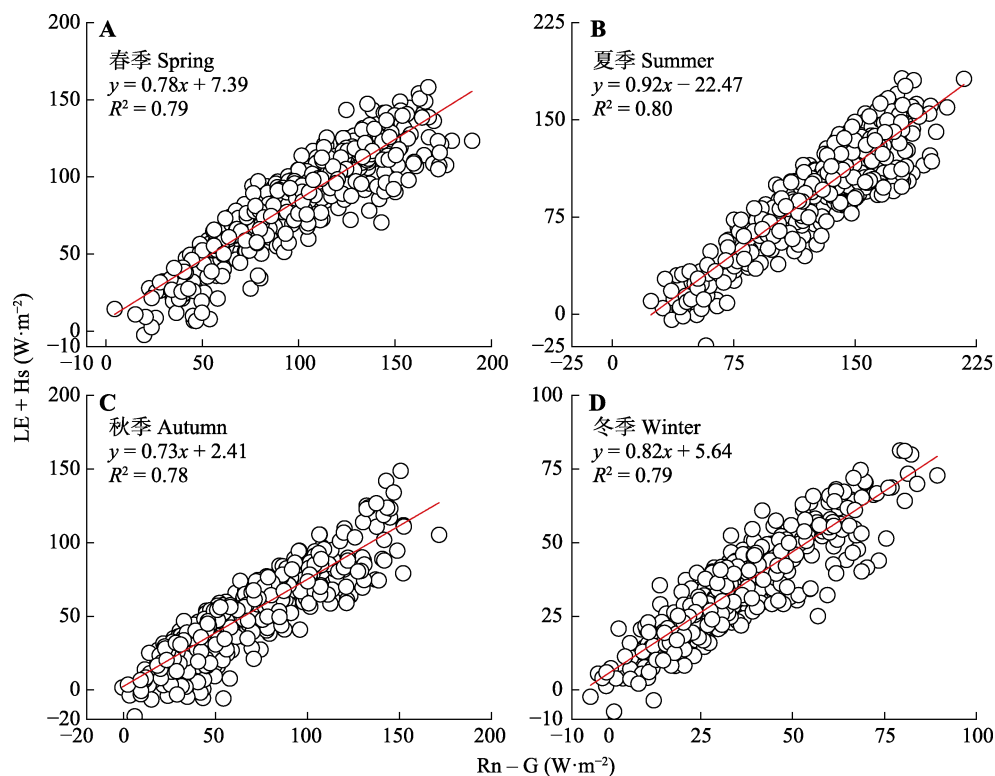


图4 盐池站2012–2016年间不同季节间通量逐日数据能量闭合回归分析。G, 土壤热通量; Hs, 显热通量; LE, 潜热通量; Rn, 净辐射。

Fig. 4 Regression analysis on the energy balance closure of daily flux values at Yanchi Research Station for different seasons during 2012–2016. G, soil heat flux; Hs, sensible heat flux; LE, latent heat flux; Rn, net radiation.

据占比高, 能量闭合程度处于FLUXNET和ChinaFLUX站点的中等水平(Wilson *et al.*, 2002; Li

et al., 2005), 说明数据质量较好, 能够为不同时空尺度研究提供较好的数据支撑。

本数据集观测站点位于毛乌素沙地南缘的黑沙蒿灌丛生态系统, 该区域在20世纪中后期曾经经历严重的荒漠化, 尽管近20多年生态恢复成效显著, 但生态系统仍对气候变化和人类活动干扰极为敏感, 稳定性较差, 是北方的典型脆弱生态系统类型。此外, 在全国甚至全球范围内, 类似气候特征、土壤特征和植物群落组成的通量站点目前仍很少。因此, 本数据集在区位、气候、植被类型上具有一定的独特性和代表性, 可补充和提升已有站点观测数据的覆盖面, 有助于全面认识陆地生态系统的碳水循环规律和准确评估区域碳水平衡。本数据集的碳通量指标表现出较大的年际变化: Re 为300 (2014年)–426 (2012年) $g\ C\ m^{-2}\cdot a^{-1}$ 、 GPP 为277 (2014年)–503 (2012年) $g\ C\ m^{-2}\cdot a^{-1}$ 、 NEE 为–77 (2012年)–23 (2014年) $g\ C\ m^{-2}\cdot a^{-1}$; 5年中仅2014年为净碳源, 其他4年均均为净碳汇(Jia *et al.*, 2016, 2018, 2020)。该站点前期研究表明, 白天 NEE 的光响应和夜间 NEE 的温度响应均受到30 cm深度土壤含水量的调控(Jia *et al.*, 2014, 2018, 2020; Liu *et al.*, 2019); 秋季降雨减少可引发次年春季干旱, 进而对 NEE 产生滞后影响, 并导致 NEE 与当年降水量解耦(Jia *et al.*, 2016); 生长季 Re 与 GPP 关系的斜率约为0.5, 即大约50%的总初级生产增量分配给生态系统呼吸(Jia *et al.*, 2020); 光合有效辐射是 NEE 在日和月尺度变化的主导因子, 温度则通过影响植被物候进而驱动 NEE 在整个生长季到全年的动态变化(Jia *et al.*, 2018); ET 的年际间变化范围为194 mm (2014年)至297 mm (2016年), 其在小时和日尺度的变化主要受土壤水分和饱和水汽压差调控, 季节变化主要受叶面积指数和表面导度调控(Mu *et al.*, 2022); 降雨量与年 ET 、湿季(7–11月) ET 和旱季(12–6月) ET 解耦, 湿季 ET 通常小于同期降雨量, 而旱季 ET 通常大于同期降雨量, 表明水文损失(深层入渗、地下径流等)和土壤水分的遗留效应在生态系统水量平衡中具有重要作用(Mu *et al.*, 2022)。

本数据集中的碳水热通量数据均经过质量控制和数据插补等处理步骤, 部分数据为估算值, 本质上与气象变量之间不独立, 因此在进行单站点机理性分析时应应对结果谨慎考虑。此外, 国际通量网(FLUXNET)目前的标准数据处理流程采用R软件包“REddyProc”进行通量数据缺失值插补和拆分(Wutzler *et al.*, 2018; Pastorello *et al.*, 2020), 由于各

个站点的生长季开始和结束时间不同, 为增强算法的广泛适用性, 该拆分算法默认对全年数据进行计算。本数据集也是采用该算法生成, 因此即使在非生长季, GPP 也不为0, 其围绕0的微小变化代表观测和拆分模型的随机误差。许多已有研究也采用了相似的数据处理方式(如Barr *et al.*, 2007; Gu *et al.*, 2018; Wutzler *et al.*, 2018; Jia *et al.*, 2020)。本数据集使用者如有需要, 可自行确定生长季的开始和结束时间, 并将非生长季的 GPP 强制赋值为0, 将非生长季的 Re 强制赋值为 NEE , 此处理对结果影响很小。

本数据集可为评估和预测干旱、半干旱地区的碳水平衡及其与环境因子的关系提供数据支撑, 并可作为站点尺度生态系统模型的优化和验证的数据来源, 也能够用于干旱、半干旱区灌丛和草地生态系统的整合研究。此外, 可采用本数据进行区域尺度研究或多站点联网研究, 例如与中国科学院西北生态环境资源研究院沙坡头站(Fu *et al.*, 2021)、中国科学院植物研究所鄂尔多斯站(Yu *et al.*, 2020)等周边其他站点的观测数据联合使用, 提升对区域碳水循环的机理认识和预测的准确度。

致谢 感谢宁夏回族自治区盐池县自然资源局的杨学武、刘世君在野外观测、仪器维护和数据采集工作中给予的帮助。

参考文献

- Ahlström A, Raupach MR, Schurgers G, Smith B, Arneth A, Jung M, Reichstein M, Canadell JG, Friedlingstein P, Jain AK, Kato E, Poulter B, Sitch S, Stocker BD, Viovy N, *et al.* (2015). Carbon cycle. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO_2 sink. *Science*, 348, 895-899.
- Barr AG, Black TA, Hogg EH, Griffis TJ, Morgenstern K, Kljun N, Theede A, Nesic Z (2007). Climatic controls on the carbon and water balances of a boreal aspen forest, 1994–2003. *Global Change Biology*, 13, 561-576.
- Biederman JA, Scott RL, Arnone III JA, Jasoni RL, Litvak ME, Moreo MT, Papuga SA, Ponce-Campos GE, Schreiner-McGraw AP, Vivoni ER (2018). Shrubland carbon sink depends upon winter water availability in the warm deserts of North America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 407-419.
- Chen SP, You CH, Hu ZM, Chen Z, Zhang LM, Wang QF (2020). Eddy covariance technique and its applications in flux observations of terrestrial ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 291-304. [陈世苹, 游翠海,

- 胡中民, 陈智, 张雷明, 王秋凤 (2020). 涡度相关技术及其在陆地生态系统通量研究中的应用. *植物生态学报*, 44, 291-304.]
- Fu TL, Li XR, Jia RL, Feng L (2021). A novel integrated method based on a machine learning model for estimating evapotranspiration in dryland. *Journal of Hydrology*, 603, 126881. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126881.
- Gu Q, Wei J, Luo SC, Ma MG, Tang XG (2018). Potential and environmental control of carbon sequestration in major ecosystems across arid and semi-arid regions in China. *Science of the Total Environment*, 645, 796-805.
- Jia X, Mu Y, Zha TS, Wang B, Qin SG, Tian Y (2020). Seasonal and interannual variations in ecosystem respiration in relation to temperature, moisture, and productivity in a temperate semi-arid shrubland. *Science of the Total Environment*, 709, 136210. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136210.
- Jia X, Zha TS, Gong JN, Wang B, Zhang YQ, Wu B, Qin SG, Peltola H (2016). Carbon and water exchange over a temperate semi-arid shrubland during three years of contrasting precipitation and soil moisture patterns. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228, 120-129.
- Jia X, Zha TS, Gong JN, Zhang YQ, Wu B, Qin SG, Peltola H (2018). Multi-scale dynamics and environmental controls on net ecosystem CO₂ exchange over a temperate semiarid shrubland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 259, 250-259.
- Jia X, Zha TS, Wu B, Zhang YQ, Gong JN, Qin SG, Chen GP, Qian D, Kellomäki S, Peltola H (2014). Biophysical controls on net ecosystem CO₂ exchange over a semiarid shrubland in northwest China. *Biogeosciences*, 11, 4679-4693.
- Jiang XY, Jia X, Gao SJ, Jiang Y, Wei NN, Han C, Zha TS, Liu P, Tian Y, Qin SG (2021) Plant nutrient contents rather than physical traits are coordinated between leaves and roots in a desert shrubland. *Frontiers in Plant Science*, 12, 734775. DOI: 10.3389/fpls.2021.734775.
- Li ZQ, Yu GR, Wen XF, Zhang LM, Ren CY, Fu YL (2005). Energy balance closure at ChinaFLUX sites. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 48, 51-62.
- Liu P, Zha TS, Jia X, Black TA, Jassal RS, Ma JY, Bai YJ, Wu YJ (2019). Different effects of spring and summer droughts on ecosystem carbon and water exchanges in a semiarid shrubland ecosystem in northwest China. *Ecosystems*, 22, 1869-1885.
- Lloyd J, Taylor JA (1994). On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 8, 315-323.
- McGloin R, Šigut L, Havránková K, Dušek J, Pavelka M, Sedlák P (2018). Energy balance closure at a variety of ecosystems in Central Europe with contrasting topographies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 418-431.
- Miao L, Feng W, Zhang YQ, Bai YX, Sun YF, She WW, Mao HN, Lai ZR, Qin SG (2020). Chemoheterotrophic diazotrophs contribute to nitrogen incorporation in a semi-arid desert. *Biology and Fertility of Soils*, 56, 1165-1176.
- Mu YM, Yuan Y, Jia X, Zha TS, Qin SG, Ye ZQ, Liu P, Yang RZ, Tian Y (2022). Hydrological losses and soil moisture carryover affected the relationship between evapotranspiration and rainfall in a temperate semiarid shrubland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 315, 108831. DOI: 10.1016/j.agrformet.2022.108831.
- Ochsner TE, Sauer TJ, Horton R (2007). Soil heat storage measurements in energy balance studies. *Agronomy Journal*, 99, 311-319.
- Papale D, Reichstein M, Aubinet M., Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D (2006). Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 3, 571-583.
- Pastorello G, Trotta C, Canfora E, Chu HS, Christianson D, Cheah YW, Poindexter C, Chen JQ, Elbashandy A, Humphrey M, Isaac P, Polidori D, Reichstein M, Ribeca A, van Ingen C, *et al.* (2020). The FLUXNET2015 dataset and the ONEFlux processing pipeline for eddy covariance data. *Scientific Data*, 7, 225. DOI: 10.1038/s41597-020-0534-3.
- Piao SL, Fang JY, Liu HY, Zhu B (2005). NDVI-indicated decline in desertification in China in the past two decades. *Geophysical Research Letters*, 32, L06402. DOI: 10.1029/2004GL021764.
- Poulter B, Frank D, Ciais P, Myneni RB, Andela N, Bi J, Broquet G, Canadell JG, Chevallier F, Liu YY, Running SW, Sitch S, van der Werf GR (2014). Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature*, 509, 600-603.
- Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grünwald T, Havránková K, Ilvesniemi H, Janous D, Knohl A, *et al.* (2005). On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11, 1424-1439.
- Reynolds JF, Smith DMS, Lambin EF, Turner II BL, Mortimore M, Batterbury SPJ, Downing TE, Dowlatabadi H, Fernández RJ, Herrick JE, Huber-Sannwald E, Jiang H, Leemans R, Lynam T, Maestre FT, *et al.* (2007). Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 316, 847-851.
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law BE, Kowalski A, Meyers T, *et*

DOI: 10.17521/cjpe.2023.0001

- al. (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223-243.
- Wutzler T, Lucas-Moffat A, Migliavacca M, Knauer J, Sickel K, Šigut L, Menzer O, Reichstein M (2018). Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. *Biogeosciences*, 15, 5015-5030.
- Yu HY, Xu ZZ, Zhou GS, Shi YH (2020). Soil carbon release responses to long-term versus short-term climatic warming in an arid ecosystem. *Biogeosciences*, 17, 781-792.
- 责任编辑: 陈世苹 责任编辑: 乔鲜果

附录 宁夏盐池毛乌素沙地黑沙蒿灌丛生态系统通量观测数据集(2012–2016)
Supplement A dataset of ecosystem fluxes in a shrubland ecosystem of Mau Us Sandy Land in Yanchi, Ningxia, China (2012–2016)
<https://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2023.0001-D1.zip>