

DOI: 10.5846/stxb201401130092

何学敏, 吕光辉, 秦璐, 杨建军, 刘东, 郭振洁. 艾比湖荒漠-湿地生态系统非生长季碳通量数据特征. 生态学报, 2014, 34(22): 6655-6665.

He X M, Lv G H, Qin L, Yang J J, Liu D, Guo Z J. Research on data characteristics during non-growing season of desert-wetland ecosystem in Ebinur Lake. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6655-6665.

艾比湖荒漠-湿地生态系统非生长季碳通量数据特征

何学敏^{1,2}, 吕光辉^{1,2,*}, 秦璐^{1,2}, 杨建军^{1,2}, 刘东^{1,2}, 郭振洁^{1,2}

(1. 新疆绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 选取新疆艾比湖湿地国家级自然保护区非生长季(2012年1月15日—3月15日、11月1日—12月14日、2013年11月1日—11月16日)通量观测数据, 参考中国通量数据处理标准开展荒漠-湿地生态系统非生长季碳通量数据特征研究。结果表明: 研究区非生长季碳通量观测数据存在大量“野点”, 占数据总量的 37.39%, 有效通量变化范围为 $-0.197 \sim 0.283 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; 平面拟合旋转(PF)校正具有较好的结果($R^2 = 0.9349$, $P < 0.01$), 频率响应校正引起的碳通量增量为 7.55%, 水热校正影响较小; 碳通量数据在不同质量等级分布较平均, 大气湍流发展的充分性处于中等水平, 夜间摩擦风速可划分为 3 级, 在 $0 \text{ m/s} < u^* < 0.30 \text{ m/s}$ 内进行选择性剔除; 传感器状态异常、检验分析和阈值分析剔除数据比例分别为 26.34%、2.48% 和 8.57%; 碳通量与 5 cm 土壤温度和太阳辐射不存在显著相关, 采用线性内插和平均每日变异法可实现缺失数据的插补。

关键词: 碳通量; 非生长季; 荒漠-湿地生态系统; 质量控制与评价; 数据插补

Research on data characteristics during non-growing season of desert-wetland ecosystem in Ebinur Lake

HE Xuemin^{1,2}, LÜ Guanghui^{1,2,*}, QIN Lu^{1,2}, YANG Jianjun^{1,2}, LIU Dong^{1,2}, GUO Zhenjie^{1,2}

1 Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi 830046, China

2 College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: With the global climate change and the resulting frequent regional natural disasters becoming increasingly real, CO_2 , H_2O , and energy transport and transformation processes of the surface atmosphere are becoming important concerns for the international community. Carbon flux in the non-growing season (Jan. 15 to Mar. 15, Nov. 1 to Dec. 14 in 2012; Nov. 1 to 16 in 2013) was measured in the Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve of Xinjiang using the eddy covariance technique. Then, research was conducted on the carbon flux data processing method after consulting the flux data processing standards in China, and the data were further analyzed to understand the carbon flux data characteristics in the non-growing season, and to attempt to reveal the controlling factors and change law. The results indicated that there were a large number of “wild” non-growing season carbon flux observation data in the study area, which accounted for 37.39% of the total. The effective carbon flux was in the range from $-0.197 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ to $0.283 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, and the average atmospheric CO_2 concentration and carbon flux were 766.905 mg/m^3 and $0.018 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively, which showed weak carbon sources. Axis-rotation correction results showed $\text{TR} < \text{DR} < \text{PF}$, and the planer fit (PF) correction showed better accuracy ($R^2 = 0.9349$, $P < 0.01$). The frequency-response correction increased carbon flux by 7.55%, but the carbon flux was less affected by the hydrothermal correction. The energy closure throughout the non-growing season in the study area was 0.62, indicating that 38% of the energy is not closed in the non-growing season. The proportion of IST classification results of

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41130531); 教育部创新团队(IRT1180)

收稿日期: 2014-01-13; 修订日期: 2014-08-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ler@xju.edu.cn

carbon flux data in the desert wetland in quality levels 1—6 was 92.03%, indicating that the distribution in different quality grades of carbon flux data in the desert-wetland ecosystem was relatively uniform. The percentage of ITC classification results in the five quality levels was 91.65%, illustrating that the development of atmospheric turbulence was at a middle level of adequacy in this period. When the friction velocity was 0—0.15, 0.15—0.30, and more than 0.30 m/s, respectively, the carbon flux showed grade variation characteristics; therefore, frictional wind speed at night can be divided into the three levels, and data within the 0 m/s and 0.30 m/s can be selectively weeded out. The proportions of data eliminated through the methods of sensor abnormal state, check analysis, and threshold analysis were 26.34%, 2.48%, and 8.57%, respectively, and the vast majority showed intermittent loss characteristics. There were no significant correlations between carbon flux and solar radiation or 5 cm soil temperature. Use of the linear interpolation and average daily variation methods could realize interpolation of missing data, but these could not reflect the true flux variations in a better manner. Conducting research on carbon flux in the non-growing season in a unique ecosystem in a desert-wetland environment surrounded by arid land and probing the carbon flux data characteristics and peculiarities could help provide the needed carbon flux research data and also a basis for improving research on carbon flux in China.

Key Words: carbon flux; non-growing season; desert-wetland ecosystem; quality control and evaluation; data interpolation

在全球气候变化和区域自然灾害频发这一现实背景下,地表大气间 CO_2 、 H_2O 以及能量的输送与转化过程日益受到国际社会的关注,成为全球研究热点问题之一。目前,国际通量观测网络 (FLUXNET) 在全球已经建立了 576 个站点,我国通量观测网络 (ChinaFLUX) 的站点数量也超过了 100 个^[1]。随着科学家们对生态系统水、碳和能量通量观测数据需求的日益增加,如何向研究全球变化相关问题的科学家和建模者们提供完整可靠的生态系统通量数据,已成为全球通量观测研究领域面临的一个严峻挑战^[2]。

基于通量观测塔的涡度相关技术 (Eddy Covariance) 是微气象学法中直接测定大气与群落间 CO_2 交换量的主要方法,也是目前国际上碳水通量测定的最有效方法^[3],已经成为支撑我国通量观测网络的主流方法。相关学者在研究中发现,每一季节内温差的大小能够影响到植物生长季节的长短,从而最终影响到碳通量的年际收支状况^[4]。因此在时间尺度的研究中,对不同生态系统碳通量的季节变化进行精确推算很有必要的^[5]。但值得注意的是,在现有观测台站中,没有一个台站的通量观测数据是真正完全连续的,一般情况下,有效的数据量大约只有总数的 65—75%^[6]。而对于特殊季节和特殊环境条件下这一有效数据量则更少。

我国西部干旱区面积广阔,其非生长季内天气寒冷且降雪频繁,土壤冻结,植被枯萎或处于休眠状

态,此时的下垫面土壤特征、指标状况和环境因子均表现与东中部地区甚至部分西部地区差异明显。虽然我国西部干旱区通量研究工作已经取得了一定进展,但在时间与空间的代表性方面还存在很多不足^[7-10],特别是对于干旱背景下的荒漠-湿地这一独特生态系统碳通量相关研究尚未见报道。

利用 2011 年 CSI 新开发的 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪 (EC150) 和三维超声风速温度仪 (CSAT3) 组成的开路涡动相关通量系统,获取艾比湖湿地国家级自然保护区特殊的荒漠-湿地生态系统碳通量连续有效观测数据,在此基础上以我国通量数据处理标准为参考,结合数据实际特征对研究区非生长季碳通量数据进行预处理和质量评价,探讨非生长季荒漠-湿地生态系统碳通量数据特征及其特殊性,以期完善我国通量观测相关研究工作提供依据。

1 研究区概况

研究区位于新疆博尔塔拉蒙古自治州艾比湖湿地国家级自然保护区境内,地理位置为 $82^\circ 30' 47''$ — $83^\circ 50' 21''\text{E}$, $44^\circ 37' 05''$ — $45^\circ 10' 35''\text{N}$, 平均海拔高度约 300 m。该地区地处北温带大陆性干旱气候区,夏季高温干旱,冬季寒冷,年平均降水量低于 100 mm,年平均气温为 6.60 — 7.80°C 。2012 年冬季极端最低温达 -33.50°C ,平均积雪厚度为 10 cm,冻土厚度约为 20 cm。

艾比湖通量观测塔 (2012XJ-AibiHu-OPEC) 架设

于保护区下辖的东大桥林业管护站附近, 土壤类型以荒漠土为主, $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪的观测高度为 15 m。塔周围群落类型以胡杨 (*Populus euphratica*) 为优势种, 群落盖度大于 50—60%, 平均高度约 8.5 m。其间散布有梭梭 (*Haloxylon ammodendron*)、琵琶柴 (*Reaumuria soongonica*) 等灌木, 草本植物则以旱生芦苇 (*Phragmites australis*)、甘草 (*Glycyrrhiza* spp.) 为主。

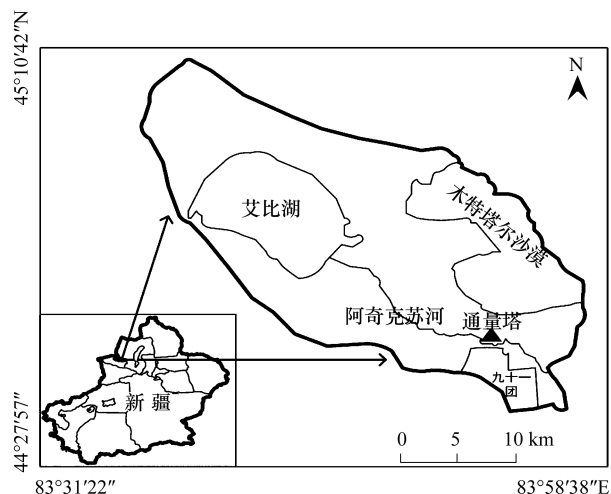


图1 研究区示意图

Fig.1 Study area shemes

2 数据与方法

2.1 数据获取

利用开路涡度相关系统 (Open Path Eddy

Covariance, OPEC) 进行碳通量连续观测, 该系统由三维超声风温仪 (CSAT3, Campbell, USA) 和开路 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪 (EC150, Campbell, USA) 组成, 数据采集器采用 CR3000 (Campbell, USA), 采样频率为 10Hz。同时在涡度系统旁架设一套空气温湿度传感器, 进行空气温湿度数据的连续观测。采用 NR01 (Campbell, USA) 测量太阳辐射, 采用 HFP01 (Campbell, USA) 测量 5 cm 处土壤热通量。所有仪器均为标定后直接进行观测, 用以保证观测精度。

2.2 数据处理

使用 loggernet 4.3 进行数据分割与格式转换, 使用 Edire 软件进行数据处理, Edire 数据处理程序参考王介民等编写的 Edire-w^[11], 结合观测仪器与数据特征进行适当修订^[12]。数据预处理包括: 倾斜校正、频率损失修正、WPL 校正和能量闭合分析。数据质量控制与评价包括: 稳态测试、方差相似性测试和夜间通量评估。使用 Sigmaplot 10.0 (SystatSoftware Inc, USA) 绘图。数据处理时间均采用研究区地方时间。

3 结果与分析

3.1 原始数据特征分析

观测期内大气 CO_2 浓度原始数据呈散布特征 (图 2), 变化范围在 611.740—3777.032 mg/m^3 之间, 其绝对值偏向于大值区间的观测值均为错误值。主要原因在于研究区非生长季低温突出, 时有降雪且

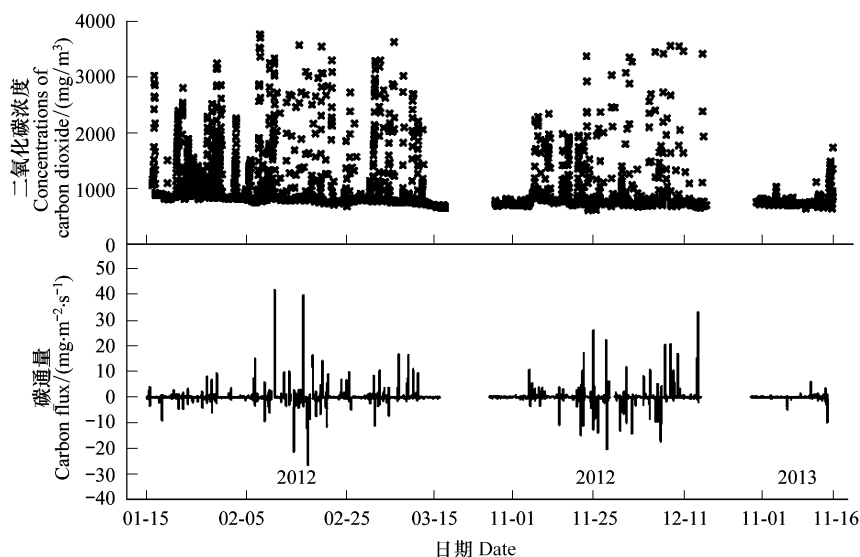


图2 大气 CO_2 浓度和碳通量原始数据

Fig.2 The original CO_2 concentration and carbon fluxes from tower observations

霜冻现象频发,导致大气 CO_2 原始观测浓度和碳通量值存在大量的“噪声”和“野点”。已有研究表明全球大气 CO_2 平均浓度约为 748.786 mg/m^3 ^[13],以此为参考值结合 CO_2 测量信号强度可对错误点集进行初步判断,剔除 CO_2 测量信号强度小于 0.8 的原始数据。

研究区非生长季大气碳通量原始值变化范围为 $-26.470\text{—}41.725 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,其与 CO_2 浓度变化密切相关 ($P < 0.01$),数据波动更为明显,受空气水热变化影响更为强烈,同时其数据绝对值存在高估现象。已有研究表明,我国西部森林区非生长季的大气 CO_2 通量平均值约为 $-0.300\text{—}0.500 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ^[14],考虑到观测区下垫面较典型森林而言相对稀疏和较低矮的植被特征,可初步判断荒漠-湿地生态系统原始碳通量变化范围过大,因此需要进一步开展数据处理分析。

3.2 数据预处理与分析

3.2.1 倾斜校正

倾斜校正方法可参考 Wilczak 等^[15] 的相关内容,在此不赘述。选取数据质量较理想的 2012 年 1 月 30 日碳通量数据作为非生长季标准日变化数据,分别采用二次坐标轴旋转 (Double Rotation, DR)、三次坐标轴旋转 (Triple Rotation, TR) 及平面拟合 (Planar Fit, PF) 3 种方法对通量数据进行坐标轴旋转处理,同时对观测期内全时段数据不同处理结果进行回归分析 (图 3)。

对 1 月 30 日通量数据进行倾斜校正可以看出 (图 3),PF 法修正效果最好,但 3 种方法差异不大。当把时间尺度扩展到全时段数据时,不同处理方法表现出明显不同的结果,TR 校正结果最差 ($R^2 = 0.5771$, $P < 0.01$),其次是 DR 法 ($R^2 = 0.9310$, $P < 0.01$),处理结果最好的为 PF 法 ($R^2 = 0.9349$, $P < 0.01$)。

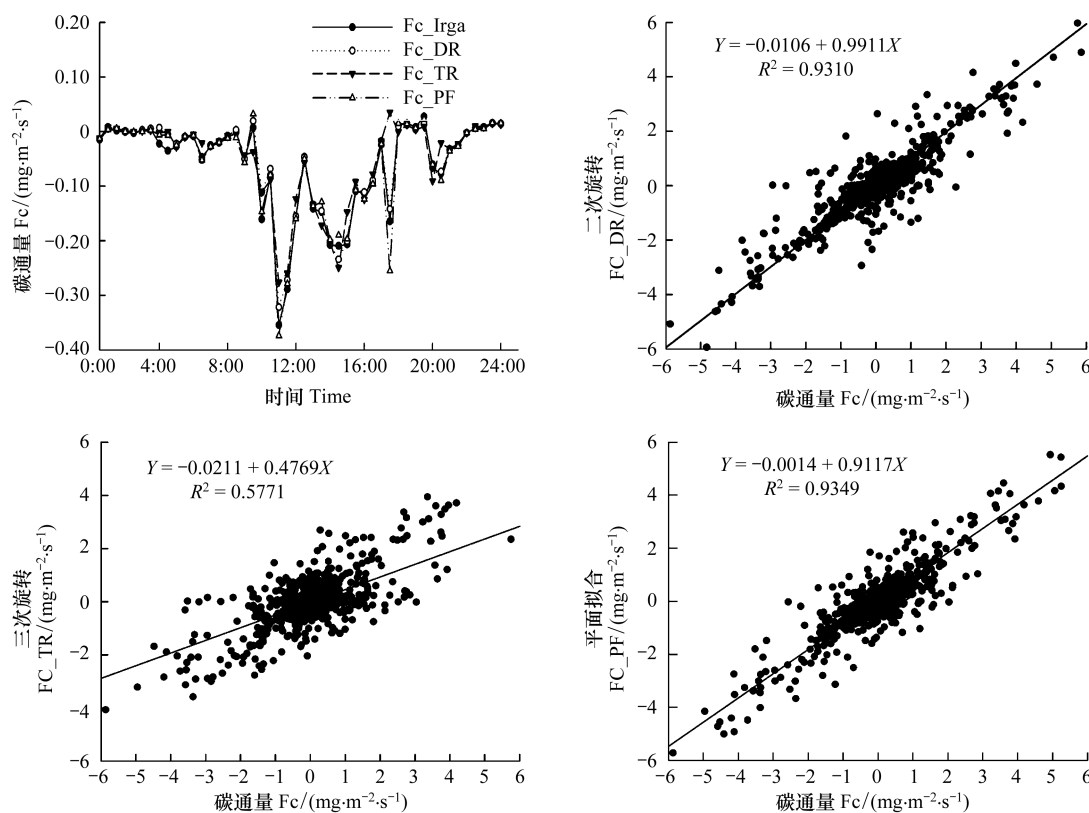


图 3 倾斜校正 (2012 年 1 月 30 日不同倾斜校正比较和 DR、TR、PF 处理结果的回归分析)

Fig.3 Tilt correction (comparison of different slant correction in Jan. 30th in 2013 and regression analysis of DR、TR、PF Processing results, respectively)

3.2.2 频率响应校正

所有涡度相关仪器系统均存在一定的局限性,主要表现为对高频湍流信号的频率响应不足、传感

器以测量路径平均值替代空间点值、不同物理量传感器之间的空间分离、离散取样等^[16]。艾比湖通量观测系统中三维超声风速仪与 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪之

间的距离为 6 cm,虽然小于 LI-Cor 系列的 20 cm,但其仍然不可避免的造成仪器频率响应损失的出现,因此必须对频率损失进行修正。规定 08:00—18:00 为昼间,18:30—07:30 为夜间(冬季昼短夜长),开展进一步分析。

由表 1 可以看出,进行频率响应修正对 CO₂ 通量产生了一定的影响,造成其在一定范围内的增减。

本文研究发现对通量数据进行频率响应修正对全时段数据、昼间分别增加了 0.0019 mg m⁻² s⁻¹、0.0014 mg m⁻² s⁻¹,夜间通量平均值增加了 0.0023 mg m⁻² s⁻¹,各占相对应平均通量的 7.55%、4.52% 和 13.37%,同时其各自的标准差增加比例分别为 6.38%、5.58% 和 7.89%。

表 1 频率响应修正前后对通量数据影响

Table 1 Comparison of flux data before and after the frequency response correction

处理 Dispose	全时段(00:00—24:00) Full-period		昼间(08:00—18:00) Day time		夜间(18:30—07:30) Night time	
	平均值 Mean	标准差 SD	平均值 Mean	标准差 SD	平均值 Mean	标准差 SD
修正前 Before	0.0238	0.2283	0.0320	0.3530	0.0174	0.1327
修正后 After	0.0257	0.2428	0.0335	0.3730	0.0197	0.1431

3.2.3 WPL 校正

在对通量数据进行坐标轴旋转与频率响应修正后,必须进行 WPL 校正(即密度扰动校正)^[17],WPL 校正不仅可以修订因大气水热变化而引起的湍流通量误差,同时可以订正垂直方向上的大气湍流变化。

由图 4(a)可以看出,1 月 30 日在夜间(19:00—

10:00)校正效果较好,在昼间(11:00—18:00)效果较差,这主要是由于昼间(12:00 左右)温度回升,湿度增加导致水热校正影响较大。而对全时段数据 WPL 校正前后进行回归分析,则表现很好的拟合结果($R^2 = 0.9551, P < 0.01$)。

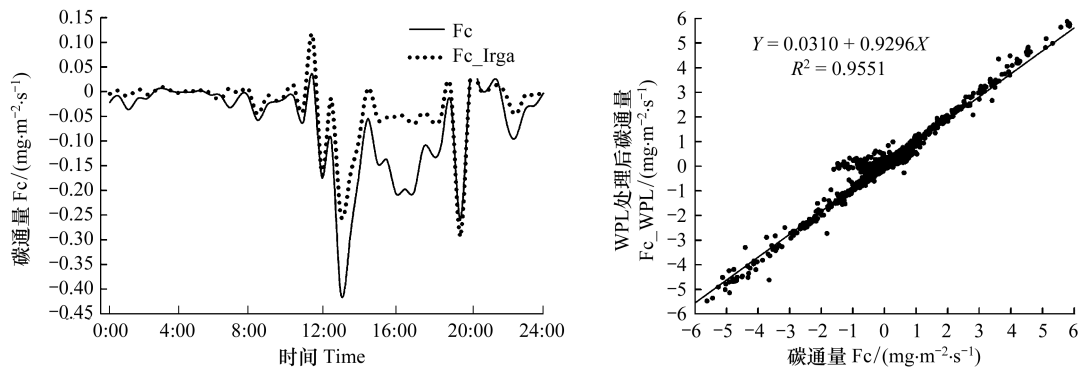


图 4 WPL 校正(2012 年 1 月 30 日 WPL 校正前后数据比较与全时段数据 WPL 校正回归分析)

Fig.4 WPL correction (comparison of data before and after the WPL calibration and WPL correction regression analysis for data full-period)

3.2.4 能量闭合分析

根据能量地表能量平衡方程^[18],忽略无法直接观测且影响较小的植物冠层热储存量(S)和附加能源项(Q),通过计算湍流通量($LE+B$)和可利用能量($Rn-G$),分析研究区非生长季月能量累积量和能量闭合度(图 5)。

研究区 2012 年 1 月湍流通量和可利用能量月累积量分别为 19.60 MJ/m² 和 27.93 MJ/m²,到 3 月增长为 120.92 MJ/m² 和 236.59 MJ/m²,在 11 月和 12 月则下降明显,其中 12 月湍流通量和可利用能量月

累积量仅为 10.18 MJ/m² 和 16.17 MJ/m²,而在 2013 年 11 月能量月累积量均小于 2012 年,为 22.79 MJ/m² 和 32.79 MJ/m²,主要原因在于:(1)2013 年 11 月阴天和降雨降雪等异常天气多于 2012 年同期;(2)利用半月平均值计算整个 11 月份导致数据略有偏离。

荒漠-湿地生态系统 1 月能量闭合度达 0.70,到 3 月降为 0.51,在 11 月增长到 0.70,2013 年 11 月低于 2012 年同期,仅为 0.60,这同样与该月异常天气频繁密切相关。研究区整个非生长季内能量闭合度约为 0.62,表明非生长季内有存在 38% 的能量不

闭合。

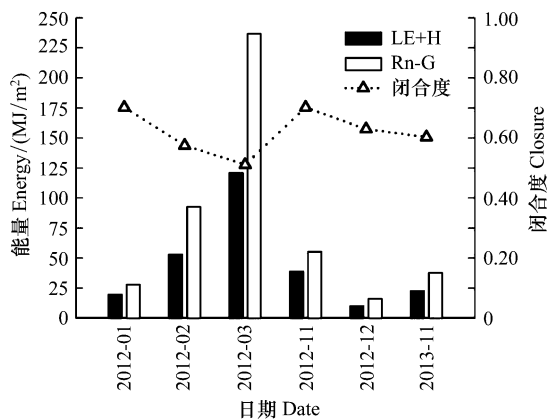


图5 荒漠-湿地生态系统非生长季能量月积累与能量闭合度
Fig.5 Monthly energy accumulated and energy closure in desert-wetland ecosystem during non-growing season

3.3 数据质量控制与评价

3.3.1 稳态测试与方差相似性测试

采用湍流平稳性方法检验计算非平稳指数 (IST),同时根据IST分类表,将不同全时段数据进

行分级。方差相似性测试与稳态测试相似,根据通量相关数据计算出总体湍流特征指数(ITC),并根据相关分类表分析数据质量状况^[19](表2)。

全时段数据进行IST分类以后可以看出,第1质量级IST数据占总数据的比例最大为32.83%,其次为第5质量级为19.44%,第8、9质量级数据分别仅占2.05%和2.03%。大气湍流平稳性随着质量级的增加而逐渐将低,虽然IST结果显示不同质量级数据均有分布,但1—6质量级总比例为92.03%,说明总体数据质量分布平均。

同样对全时段数据进行ITC分类以后可以看出,观测期内ITC之具有一定的规律与集中性,第1质量级、第2质量级与第5质量级分别占总数据ITC值的2.19%、6.16%和91.65%,三者比例总和则为100%。ITC检验表明湍流发展的充分程度随质量级的增加而降低,Foken^[20]提出1、2质量级为大气湍流发展充分的表现,本文中ITC范围多集中在第5数据级,表明大气湍流发展的充分性处于中等水平。

表2 全时段通量数据IST和ITC分类

Table 2 Index of Nonstationarity (IST) and Integrated Turbulence Characteristics (ITC) classification of full-period flux data									
质量级 Quality level	1	2	3	4	5	6	7	8	9
范围 Range/%	0—15	16—30	31—50	51—75	76—100	101—250	251—500	501—1000	>1000
IST 各级比例/% Percentage of all levels	32.83	13.60	10.59	9.59	19.44	15.98	3.89	2.05	2.03
ITC 各级比例/% Percentage of all levels	2.19	6.16	0.00	0.00	91.65	0.00	0.00	0.00	0.00

3.3.2 夜间通量评估

已有关于夜间通量数据研究发现,夜间CO₂湍流通量观测数据的质量下降明显,这主要是由于大气处于稳定层结的夜间条件下,涡度相关技术不能测定非湍流过程中的通量,但是夜间的非湍流过程对净生态系统CO₂交换影响显著^[21]。目前,国际通量界通常剔除摩擦风速(u^*)临界值(u_c^* , $u^* < u_c^*$)以下的夜间观测数据,以确保涡度相关技术的测定是强湍流条件下的观测结果^[22]。

研究区冬季摩擦风速的变化范围为0.002—1.376 m/s,摩擦风速在06:00—21:00内呈波动上升趋势(图6),期间出现多个波峰与波谷,但整体上白天大于夜间。对全时段数据摩擦风速进行修正,修正前后决定系数高达0.9657(图6),表明摩擦风速修正对总体数据质量的影响不大。

已有研究表明,夜间CO₂通量与摩擦风速之间存在正相关关系,通量值随摩擦风速的升高而增大,但当摩擦风速超过临界值之后便会趋于稳定^[23]。本研究中由于夜间极端天气特征较为明显,CO₂通量与摩擦风速表现出等级变化特征,结果见图7。

由图7可以看出,当摩擦风速介于0—0.15 m/s时,碳通量呈现出大范围波动;当摩擦风速介于0.15—0.30 m/s时,95%以上通量值集中在-2.00—2.00 mg m⁻² s⁻¹内;当摩擦风速大于0.30 m/s时,通量值趋近于0。

参考平均值检验法(Average Values Test, AVT)^[24],分别比较摩擦风速分段平均和累加平均下的碳通量数据。以往关于夜间碳通量的研究经验认为,在F_{c2}增大的过程中,当F_{c1}随摩擦风速的变化而快速增加时,摩擦风速 u^* 对F_{c1}的影响将会比较

显著^[23-24],当选取 F_{c1} 随 u^* 增大过程中第一个明显的拐点 ($u^* = 0.12 \text{ m/s}$) 作为临界点时,夜间通量的大部分数据都将被剔除(图 7);而当摩擦风速大于

0.30 m/s 时,通量值均逐渐趋近于 0,因此,对于研究区冬季摩擦风速的数据,应该在 $0 \text{ m/s} < u^* < 0.30 \text{ m/s}$ 内进行选择性剔除。

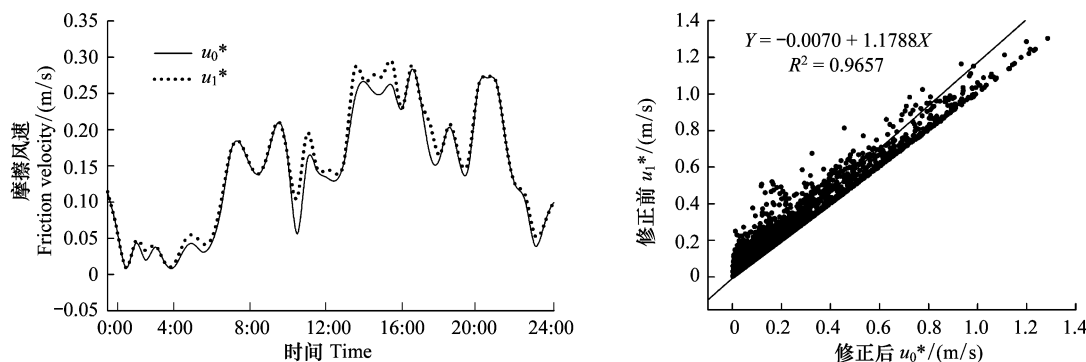


图 6 摩擦风速修正(一天内摩擦风速修正前后数据变化和全时段数据摩擦风速修正前后回归)

Fig.6 Friction wind correction (friction velocity data changes before and after correction in one day and regression analysis for before and after friction velocity correction of full-period data)

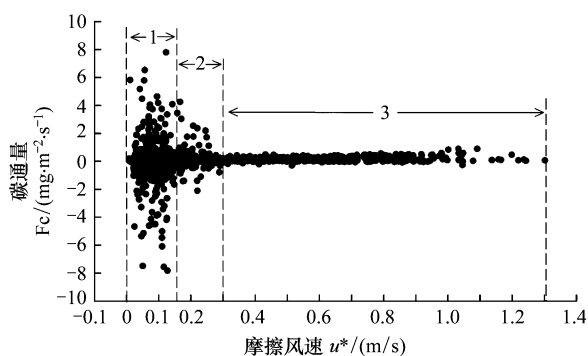


图 7 非生长季夜间 CO_2 通量与摩擦风速关系

Fig.7 Relationship between friction velocity and CO_2 flux at night during the non-growing season

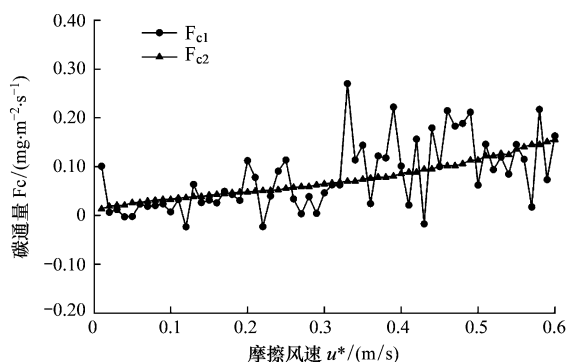


图 8 夜间碳通量与摩擦风速平均值之间的关系 (F_{c1} 为分段平均, F_{c2} 为累加平均)

Fig.8 Relationship between average friction velocity and carbon flux at night (F_{c1} is segmental averaging, F_{c2} is progressive average)

3.4 通量数据的剔除与插补

3.4.1 异常数据剔除

总结数据预处理和质量控制与评估结果,分别从传感器状态异常、检验分析和阈值分析 3 个方面对异常数据进行剔除。

由表 4 可以看出,本研究中传感器异常造成的通量数据的剔除占到总数据的 26.34%,这主要是由于非生长季霜冻现象导致仪器传感器边缘结霜,影响信号传输,但当温度上升到一定程度时即解冻,仪器信号则恢复到正常范围内。在剔除传感器异常数据后,对剩余数据进行检验分析和阈值分析后相对剔除的比例较少,分别占总数据的 2.48%和 8.57%,剩余数据仅占总数据的 62.61%。

3.4.2 缺失数据的插补

目前,较成熟的通量数据的插补方法为:昼间通量数据通常使用 Michaelis-Menten 模型拟合插补^[25],夜间数据利用生态系统净二氧化碳通量对 5 cm 土壤温度的响应关系进行拟合插补^[8,26]。考虑到不同研究区的差异以及寒冷地区非生长季通量数据插补研究的缺乏,本文尝试利用非生长季剔除后的有效通量数据分别与光合有效辐射 (PAR) 和 5 cm 土壤温度 (T_s) 进行拟合分析,讨论其对经验模型的适用性。

由表 5 可以看出,研究区非生长季昼间碳通量与同步观测到的光合有效辐射不仅不满足已有插补模拟,其最佳拟合曲线相关性也不显著 ($R^2 = 0.1851$, $P < 0.01$),而夜间通量数据与 5 cm 土壤温度亦无显

表 4 异常数据统计

Table 4 Abnormal data statistics

处理方式 Process mode	异常数据/个 Abnormal data	剔除数据占总数据比例/% Percentage of eliminate data in total	剩余数据占总数据比例/% Percentage of remaining data in total
传感器异常 Abnormal sensor	1530	26.34	73.66
检验分析 Check analysis	144	2.48	71.18
阈值分析 Threshold analysis	498	8.57	62.61

著相关关系 ($R^2 = 0.1515, P < 0.01$), 说明 Michaelis-Menten 模型和夜间土壤温度响应模型对于研究区非生长季数据插补不适用。基于上述分析, 通过参考中国陆地生态系统碳通量观测数据处理方法^[27], 采用标准通量数据插补方法, 即对于 2 h 之内的缺失数据段, 采用线性内差值法进行填补; 对于 7 d 以内的数据缺失段, 则采用平均每日变异法 (Mean Diurnal Variation, MDV), 即用相邻天的对应时刻的数据平均值进行填补, 白天以 14 d、晚上以 7 d 为一个窗口

的固定窗口法进行填补, 插补结果见图 9。

经数据剔除后对剩余数据重新插补, 相对于原始碳通量数据其质量有了明显提升, 但仍有个别“突变点”存在。由图 10 可以看出, 研究区荒漠-湿地生态系统非生长季的碳通量变化范围为 $-0.197 \sim 0.283 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 1—3 月碳通量变幅小于 11、12 月, 整个观测期内平均碳通量为 $0.018 \text{ mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 表现为弱的碳源, CO_2 平均浓度为 766.905 mg/m^3 。

表 5 碳通量与太阳辐射和 5cm 土壤温度的最佳拟合方程

Table 5 Best regression equations between PAR and 5cm soil temperature

指标 Index	时间段 Time	最佳拟合方程 Best regression equations	R^2	P
$F_c, \text{ PAR}$	昼间	$Y = 362.0727 + 390.8595 / (1 + \exp(-(X + 0.0304) / -0.0089))$	0.1851	< 0.01
F_c, T_s	夜间	$Y = 2.3460 - 8.0947 \exp(-0.5 \times \text{abs}(X - 0.0019) / 0.0377)$	0.1515	< 0.01

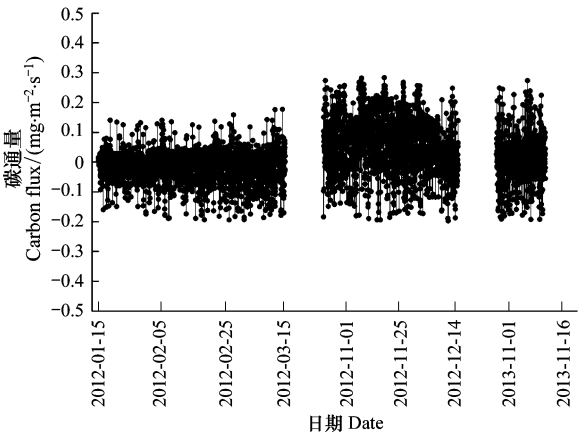


图 9 插补后全时段数据碳通量变化

Fig.9 Full-period carbon flux data changes after the interpolation

4 讨论

4.1 荒漠-湿地生态系统碳通量数据处理结果

基于涡度相关技术的碳通量观测受环境条件和仪器自身等诸多因素的影响, 观测到的原始数据必须经过系统处理, 在某一段时间内由于雨、雪等天气

以及仪器电压造成的瞬时不稳定信号均可能造成大气碳通量的“野点”^[28]。影响研究区非生长季碳通量观测的最主要因素是降雪和低温引起的霜冻现象, 这些均可造成光路阻塞而引起传感器异常, 在数据处理和评价中, 传感器异常数据约占 26.34%。

地表能量不闭合对生态系统碳通量具有选择性的影响, 表现为昼间和夜间的差异^[29]。干旱区能量不闭合现象普遍存在, 且非生长季能量不闭合度明显高于生长季^[30-32], 非生长季最主要的能量支出项为感热通量^[33], 马虹等的研究认为干旱区荒漠河岸灌丛的能量闭合度约为 72.3%^[34], 高于本研究的能量闭合度。艾比湖地区非生长季从 11 月份开始降雪, 下垫面逐渐被雪被覆盖, 可能对研究区非生长季地表能量平衡产生潜在影响。

研究区下垫面较为平坦, 但坐标轴旋转结果为 $\text{TR} < \text{DR} < \text{PF}$, 说明 PF 法均具有较好的结果。而在稳态测试与方差相似性测试中, 大气湍流通量观测成分随时间变化和天气条件变化, 或观测点相对于气象事件的变化都会对大气湍流的稳态造成影响。对

于荒漠-湿地生态系统而言,冬季湍流通量稳态测试的结果在各级均有分布,同时方差相似性检验为第 5 级高达 87.76%,说明研究区冬季实际大气特征并不能达到较理想的通量监测要求,这与数据经评估后大比例剔除密切相关。已有研究表明,在对夜间通量数据评估中,一般情况下高大植被覆盖的如森林生态系统其摩擦风速多选取 0.3 m/s 或更高^[35-36],而低矮植被的覆盖生态系统多选取 0.10—0.20 m/s^[37-38],荒漠-湿地生态系统摩擦风速集中于 0—0.30 m/s 范围内,与低矮植被覆盖生态系统更加相似。

4.2 荒漠-湿地生态系统非生长季碳通量特征

艾比湖地区的荒漠-湿地生态系统冬季碳通量在经过数据处理与评估后,增加了数据的可信程度,可以初步确定对于荒漠-湿地生态系统非生长季而言,仍然存在一定的 CO₂ 交换过程,与中高纬度森林和农田生态系统非生长季相似^[39-40],表现为弱的碳源。艾比湖荒漠-湿地生态系统非生长季的碳通量变化范围为 -0.197—0.283 mg m⁻² s⁻¹,接近于北亚热带次生栎林非生长季碳通量,其昼夜变动范围为 -0.370—0.230 mg m⁻² s⁻¹^[41]。

关于寒区旱区碳通量研究多认为非生长季碳通量与温度和太阳辐射存在一定相关性^[42-45],但也有研究表明非生长季碳通量与雪厚度和土壤湿度存在一定相关关系^[46],本研究表明非生长季碳通量与温度和太阳辐射不存在相关性。荒漠-湿地生态系统在生长季存在 38% 的能量不闭合,可能是导致碳通量与太阳辐射和土壤温度无显著相关的直接原因,因此不能使用模型插补缺失数据。

利用线性内插和平均每日变异法插补荒漠-湿地生态系统非生长季碳通量缺失数据,能够使数据集保持完整的序列,但会忽略相邻时段间数据波动的差异,造成一定时期内插补数据的变化规律极为相似,无法较好反映通量真实波动情况。而对于已有模型插补方法,不适用于研究区非生长季,因此,在进行数据积累的基础上开展适合研究区特点的非生长季碳通量插补模型是下一阶段研究重点。

5 结论

(1) 荒漠-湿地生态系统非生长季碳通量观测数据存在大量“野点”,碳通量变化范围为 -0.197—

0.283 mg m⁻² s⁻¹,大气平均 CO₂ 浓度和碳通量分别为 766.905 mg/m³ 和 0.018 mg m⁻² s⁻¹,表现为弱的碳源。

(2) 平面拟合校正具有较好的结果 ($R^2 = 0.9349, P < 0.01$),频率响应校正引起的碳通量增加值为 7.55%,整个非生长季能量闭合度为 0.62。

(3) 荒漠-湿地生态系统碳通量数据在非生长季不同质量等级数据分布较均匀且质量较好,该时期的大气湍流发展的充分性处于中等水平,当摩擦风速介于 0—0.15 m/s、0.15—0.30 m/s 和大于 0.30 m/s 时,碳通量表现出等级变化特征,应该在 0 m/s < $u^* < 0.30$ m/s 内对碳通量数据进行选择性剔除。传感器状态异常、检验分析和阈值分析剔除的数据比例分别为 26.34%、2.48% 和 8.57%,且绝大部分呈现出间断性缺失特征。

(4) 整个非生长季有效数据仅占总数据的 62.61%,对应碳通量与太阳辐射和 5 cm 土壤温度不存在显著相关。

References:

- [1] Wang J M, Wang W Z, Liu S M, Ma M G, Li X. The problems of surface energy balance closure—an overview and case study. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(7): 705-714.
- [2] Li C, He H L, Liu M, Su W, Fu Y L, Zhang L M, Wen X F, Yu G R. The design and application of CO₂ flux data processing system at China FLUX. *Geo-Information Science*, 2008, 10(5): 557-565.
- [3] China Association for Science and Technology, Ecological Society of China. Report on Advances in Ecology. Beijing: China Science and Technology Press, 2010: 56-57.
- [4] Kukla G, Karl T R, Riches M R. Asymmetric Change of Daily Temperature Range. Conf- 9309350, US Department of Energy, Washington, DC, 1994, 495.
- [5] Song X, Liu Y F, Xu X F, Yu G R, Wen X F. Comparison study on carbon dioxide, water and heat fluxes of the forest in red earth hilly zone over winter and spring. *Resources Science*, 2004, 26(3): 96-104.
- [6] Pattey E, Strachan I B, Desjardins R L, Massheder J. Measuring nighttime CO₂ flux over terrestrial ecosystems using eddy covariance and nocturnal boundary layer methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/4): 145-158.
- [7] Yu G R, He N P, Wang Q F. Carbon Budget and Carbon Sink of Ecosystems in China: Theoretical Basis and Comprehensive Assessment. Beijing: Science Press, 2013: 3-5.
- [8] Liu R, Wang Q X, Tang L S, Li Y. Seasonal variation in water, heat and CO₂ fluxes and its driving forces over a saline desert. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 67-75.
- [9] Geng S B, Lu S W, Rao L Y, Yang X F, Gao D, Feng Z H.

- Research progress of measurement of land surface carbon budget based on eddy covariance technology. *World Forestry Research*, 2010, 23(3): 24-28.
- [10] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, Li W H, Xie Z K. Analysis of soil CO₂ efflux in *Populus* and *Ulmus pumila* planting shelterbelts in arid region, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(5): 526-534.
- [11] Wang J M. Eddy covariance flux measurement guide book [2012-12-12]. <http://www.hydro-lab.cn/pt/download/woduxiangguantongliangguancezhidaoshou.pdf>.
- [12] He X M. Preliminary Study on Monitoring Carbon Fluxes and its Response Mechanisms During Non-growing Season in Ebinur Lake Area [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2012.
- [13] World Meteorological Organization. Greenhouse Gas Bulletin. 2007.
- [14] Wu J B, Guan D X, Shi T T, Han S J, Yu G R, Sun X M. Non-growing seasons CO₂ flux of a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(9): 1-6.
- [15] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99(1): 127-150.
- [16] Wu J B, Guan D X, Zhang M, Han S J, Yu G R, Sun X M. Carbon budget characteristics of the broadleaved Korean pine forests in Changbaishan Mountains. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(1): 1-6.
- [17] Webb E K, Pearman G, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [18] Kyaw Tha Paw U, Baldocchi D D, Meyers T P, Wilson K B. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97(3): 487-511.
- [19] Aubinet M, Chermanne B, Vandenhaute M, Longdoz B, Yernaux M, Laitat E. Long-term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(4): 293-315.
- [20] Foken T, Göckede M, Mauder M, Mahr T, Amiro B, Munger W. Post-field data quality control // Lee X H, Massman M, Law B. *Handbook of Micrometeorology. A Guide for Surface flux Measurement and Analysis*. Boston: Kluwer Academic, 2004: 181-208.
- [21] Guan D X, Wu J B, Zhao X S, Han S J, Yu G R, Sun X M, Jin C J. CO₂ fluxes over an old, temperate mixed forest in north-eastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 138-149.
- [22] Yu G R, Sun X M. *Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystem*. Beijing: Higher Education Press, 2006: 5-20.
- [23] Gu L H, Falge E M, Boden T, Baldocchi D D, Black T A, Saleska S R, Suni T, Verma S B, Vesala T, Wofsy S C, Xu L K. Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128(3/4): 179-197.
- [24] Zhu Z L, Sun X M, Wen X F, Zhou Y L, Tian J, Yuan G F. Methods on nocturnal CO₂ flux data in China FLUX. *Science in China, Series D Earth Sciences*, 2006, 36(Supp.1): 34-44.
- [25] Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grunwald T, Hollinger D, Jensen N O, Katul G, Keronen E, Kowalski A, Lai C T, Law B E, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J W, Pilegaard K, Rannik U, Rebmann C, Suyker A, Tanhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [26] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315-323.
- [27] Yu G R, Sun X M. *Flux Measurement and Research of Terrestrial Ecosystem in China*. Beijing: Science Press, 2008: 4-11.
- [28] Chu L H. Quality Assessment and Spatial Representation of Flux Data on an Upland of the Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009.
- [29] Liang J N, Zhang L, Zhang W, Shi J S. Energy balance analysis over Loess Plateau and the consequences for carbon dioxide flux. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(9): 099203-1-099203-12.
- [30] Yang Q D. Simulation Research of Land Surface Process over Two Typical Underlying Covers in the Arid and Semi-arid Areas [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [31] Si J H, Feng Q, Xi H Y, Chang Z Q. Evapotranspiration and energy balance analysis for *Tamarix ramosissima* stands under extreme arid conditions. *Arid Land Geography*, 2006, 29(4): 517-522.
- [32] Zhu D Q, Chen W, Liu H Z, Huang R H. The comparison of surface radiation budget between typical arid region in northwest China and plateau region. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(6): 683-690.
- [33] Zhang X J, Yuan F H, Chen N N, Deng J L, Yu X Z, Sheng X J. Energy balance and evapotranspiration in broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 607-613.
- [34] Ma H, Chen Y N, Li W H. Characteristics of energy balance of riparian *Tamarix* shrubs in desert. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(1): 108-117.
- [35] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Daube B C, Wofsy S C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 169-182.
- [36] Griffis T J, Black T A, Morgenstern K, Barr A G, Nesic Z, Drewitt G B, Gaumont-Guay D, McCaughey J H. Ecophysiological controls on the carbon balances of three southern boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 117(1/2): 53-71.
- [37] Lafleur P M, Roulet N T, Admiral S W. Annual cycle of CO₂ exchange at a bog peatland. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2001, 106(D3): 3071-3081.
- [38] Saito M, Miyata A, Nagai H, Yamada T. Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. *Agricultural Forest and Meteorology*, 2005, 135(1/4): 93-109.
- [39] Liu S, Wang C K, Xu F. Soil effluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide during non-growing season for four temperate

- forests in northeastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30 (15): 4075-4084.
- [40] Strack M, Zuback Y C A. Annual carbon balance of a peatland 10yr following restoration. *Biogeosciences*, 2013, 10 (5): 2885-2896.
- [41] Liu Y, Hu H B, Liu Z Q. CO₂ flux characteristics of an secondary oak forest ecosystem in non-growing seasons in northern subtropics, China. *Journal of Northeast Forestry University*, 2013, 41(7): 22-27.
- [42] Zhang F W, Li Y N, Cao G M, Li F X, Ye G J, Liu J H, Wei Y L, Zhao X Q. CO₂ fluxes and their driving factors over alpine meadow grassland ecosystems in the northern shore of Qinghai Lake, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(3): 187-198.
- [43] Wang G S, Yang X X, Ren F, Zhang Z H, He J S. Non-growth season's greenhouse gases emission and its yearly contribution from alpine meadow on Tibetan Plateau of China. *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(8): 1994-2001.
- [44] Crawford B, Grimmond C S B, Christen A. Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(4): 896-905.
- [45] Huth V, Jurasinski G, Glatzel S. Winter emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide from a minerotrophic fen under nature conservation management in north-east Germany. *Mires and Peat*, 2012, 10(4): 1-13.
- [46] Chen W W, Wolf B, Zheng X H, Yao Z S, Butterbach-Bahl K, Brüggemann N, Han S H, Liu C Y, Han X G. Carbon dioxide emission from temperate semiarid steppe during the non-growing season. *Atmospheric Environment*, 2013, 64: 141-149.
- [10] 张丽华, 陈亚宁, 赵锐锋, 李卫红, 谢忠奎. 干旱区杨树、榆树人工防护林地土壤 CO₂ 释放通量研究. *植物生态学报*, 2010, 34(5): 526-534.
- [11] 王介民. 涡度相关通量观测指导手册[2012-12-12]. <http://www.hydro-lab.cn/pt/download/woduxiangguantongliangguancezhidaoshouce.pdf>.
- [12] 何学敏. 艾比湖地区非生长季碳通量监测及响应机制初探[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.
- [14] 吴家兵, 关德新, 施婷婷, 韩士杰, 于贵瑞, 孙晓敏. 非生长季长白山红松阔叶混交林 CO₂ 通量特征. *林业科学*, 2006, 42(9): 1-6.
- [16] 吴家兵, 关德新, 张弥, 韩士杰, 于贵瑞, 孙晓敏. 长白山阔叶红松林碳收支特征. *北京林业大学学报*, 2007, 29(1): 1-6.
- [22] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京: 高等教育出版社, 2006: 5-20.
- [24] 朱治林, 孙晓敏, 温学发, 周艳莲, 田静, 袁国富. 中国通量网(ChinaFLUX)夜间 CO₂ 涡度相关通量数据处理方法研究. *中国科学 D 辑*, 2006, 36(增刊 I): 34-44.
- [27] 于贵瑞, 孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征. 北京: 科学出版社, 2008: 4-11.
- [28] 楚良海. 黄土塬区通量数据的质量评价及空间代表性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [29] 梁捷宁, 张镭, 张武, 史晋森. 黄土高原半干旱区地表能量不闭合及其对二氧化碳通量的影响. *物理学报*, 2013, 62(9): 099203-1-099203-12.
- [30] 杨启东. 干旱半干旱区两种典型下垫面的陆面过程模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- [31] 司建华, 冯起, 席海洋, 常宗强. 极端干旱区柽柳林地蒸散量及能量平衡分析. *干旱区地理*, 2006, 29(4): 517-522.
- [32] 朱德琴, 陈文, 刘辉志, 黄荣辉. 我国西北典型干旱区和高原地区地表辐射能量收支特征的比较. *气候与环境研究*, 2006, 11(6): 683-690.
- [33] 张新建, 袁凤辉, 陈妮娜, 邓珺丽, 于小舟, 盛雪娇. 长白山阔叶红松林能量平衡和蒸散. *应用生态学报*, 2011, 22(3): 607-613.
- [34] 马虹, 陈亚宁, 李卫红. 荒漠河岸柽柳(*Tamarix chinensis*)灌丛的能量平衡特征. *中国沙漠*, 2014, 34(1): 108-117.
- [39] 刘实, 王传宽, 许飞. 4 种温带森林非生长季土壤二氧化碳、甲烷和氧化亚氮通量. *生态学报*, 2010, 30(15): 4075-4084.
- [41] 刘乙, 胡海波, 刘淮桥. 北亚热带次生栎林生态系统非生长季 CO₂ 通量特征. *东北林业大学学报*, 2013, 41(7): 22-27.
- [42] 张法伟, 李英年, 曹广民, 李凤霞, 叶广继, 刘吉宏, 魏永林, 赵新全. 青海湖北岸高寒草甸草原生态系统 CO₂ 通量特征及其驱动因子. *植物生态学报*, 2012, 36(3): 187-198.
- [43] 王广帅, 杨晓霞, 任飞, 张振华, 贺金生. 青藏高原高寒草甸非生长季温室气体排放特征及其年度贡献. *生态杂志*, 2013, 32(8): 1994-2001.

参考文献:

- [1] 王介民, 王维真, 刘绍民, 马明国, 李新. 近地层能量平衡闭合问题—综述及个例分析. *地球科学进展*, 2009, 24(7): 705-714.
- [2] 李春, 何洪林, 刘敏, 苏文, 伏玉玲, 张雷明, 温学发, 于贵瑞. ChinaFLUX CO₂ 通量数据处理系统与应用. *地球信息科学*, 2008, 10(5): 557-565.
- [3] 中国科学技术协会主编, 中国生态学会编著. 生态学科发展报告. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 56-57.
- [5] 宋霞, 刘允芬, 徐小锋, 于贵瑞, 温学发. 红壤丘陵区人工林冬春时段碳、水、热通量的观测与分析. *资源科学*, 2004, 26(3): 96-104.
- [7] 于贵瑞, 何念鹏, 王秋风. 中国生态系统碳收支及碳汇功能—理论基础与综合评估. 北京: 科学出版社, 2013: 3-5.
- [8] 刘冉, 王勤学, 唐立松, 李彦. 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.
- [9] 耿绍波, 鲁绍伟, 饶良懿, 杨晓菲, 高东, 冯宗红. 基于涡度相关技术测算地表碳通量研究进展. *世界林业研究*, 2010, 23(3): 24-28.