

基于MODIS产品的生态系统呼吸模型 在内蒙古半干旱草原的验证

姜海梅^{1,2,†} 叶昊天^{1,2} 王若静³ 郝勇^{1,2} 王成刚^{1,2} 曹乐^{1,2}

1. 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044; 3. 锡林浩特国家气候观象台, 锡林浩特 026000; † E-mail: hmjiang@nuist.edu.cn

摘要 利用2010—2013年锡林浩特国家气候观象台涡动相关通量观测系统数据以及MODIS产品数据, 验证基于增强型植被指数(EVI)、陆地表面水分指数(LSWI)和地表温度(LST)的生态系统呼吸模型在内蒙古半干旱草原的适应性, 并探讨该遥感生态系统呼吸模型存在的问题。结果表明: 生态系统呼吸模型能较好地模拟夜间生态系统呼吸速率(R_{eco})在生长季内和年际间的变化, 模拟值与观测值吻合较好($R^2=0.90$, $RMSE=0.02$ $mgCO_2/(m^2 \cdot s)$); 夜间 R_{eco} 的观测值与 $EVI_s \times W_s$ (EVI_s 和 W_s 分别是EVI和LSWI对光合作用的影响函数)呈较显著的线性相关($R^2=0.63$), 与LST的关系基本上满足L-T方程($R^2=0.39$); 夜间 R_{eco} 在生长季的前、中、后期对 $EVI_s \times W_s$ 和LST的响应不同是造成模型误差的重要原因之一。

关键词 内蒙古; 半干旱草原; 生态系统呼吸模型; MODIS 遥感数据

A Validation Study of MODIS-Based Ecosystem Respiration Model in a Semi-Arid Grassland of Inner Mongolia

JIANG Haimei^{1,2,†}, YE Haotian^{1,2}, WANG Ruojing³, HAO Yong^{1,2}, WANG Chenggang^{1,2}, CAO Le^{1,2}

1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing 210044;
2. School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044;
3. Xilinhaote National Climatological Observatory, Xilinhot 026000; † E-mail: hmjiang@nuist.edu.cn

Abstract Eddy covariance data from Xilinhaote National Climatological Observatory in Xilin Gol League during growing seasons of 2010–2013 as well as MODIS data were used to validate an ecosystem respiration model based on enhanced vegetation index (EVI), land surface water index (LSWI) and land surface temperature (LST) in a semi-arid grassland of Inner Mongolia. The limitations of this remote sensing respiration model were also discussed. The results indicate that this model can successfully simulate the variations of nocturnal ecosystem respiration (R_{eco}) in the growing seasons and between different years. The simulated nocturnal R_{eco} also agreed remarkably with the observed R_{eco} ($R^2=0.90$, $RMSE=0.02$ $mgCO_2/(m^2 \cdot s)$). Moreover, the observed nocturnal R_{eco} showed a good linear correlation with $EVI_s \times W_s$ ($R^2=0.63$), in which EVI_s and W_s are response functions of EVI and LSWI on photosynthesis, respectively. The response of nocturnal R_{eco} to LST was also found following the L-T equation ($R^2=0.39$). In addition, the difference between responses of nocturnal R_{eco} to $EVI_s \times W_s$ and LST in the early, middle and late stages of the growing season is indicated as one principal source of the deviations of model results.

Key words Inner Mongolia; semiarid grassland; ecosystem respiration model; MODIS remote sensing data

生态系统净碳交换速率(net ecosystem exchange, NEE)是大气 CO_2 浓度变化的主要驱动因素^[1]。NEE是生态系统总初级生产力(gross primary producti-

vity, GPP)与生态系统呼吸速率(R_{eco})的差值, 因此, 对 R_{eco} 和GPP的准确评估是生态系统碳交换研究中的关键问题^[2]。人们采用观测和模拟手段, 针对不

同生态系统的 R_{eco} 在不同时空尺度上的影响因子开展了广泛的研究^[3-8]。现有研究表明, 温度和水分条件是影响生态系统呼吸的重要因素^[4,6-12]。在此基础上, 发展了一系列由温度和水分条件驱动的生态系统呼吸模型, 并进行验证, 如 Lloyd&Taylor 模型^[7]、Arrhenius 模型^[8]、指数模型^[9-10]和 Q_{10} ^[11-12]模型等。这些模型的驱动因子都来源于地面观测资料, 但由于客观条件的限制, 很多区域缺乏长期的连续的地面观测资料^[13]。为了弥补地面观测资料的不足, 学者们利用遥感手段对生态系统碳交换进行模拟。2013 年以来, 将遥感植被因子引入生态系统呼吸模型中, 用来模拟和估算生态系统呼吸速率取得较好的效果^[14]。此类生态系统呼吸模型的驱动因子包括土壤湿度、土壤温度以及增强型植被指数 EVI (enhanced vegetation index), 其对土壤温度和土壤湿度地面观测资料的依赖在一定程度上限制了模型的应用范围。Xiao 等^[15]构建的植被光合模型 (Vegetation Photosynthesis Model, VPM) 用水分指数 W_s 替代土壤湿度, 可以通过对遥感陆地表面水分指数 LSWI (land surface water index) 的反演得到 W_s 。Sims 等^[16]发现, 由遥感资料反演得到的地表温度 LST (land surface temperature) 的变化与土壤温度的变化密切相关, 可以用 LST 代表土壤温度。因容易获取且具有较好的区域代表性等优点, LST 和 LSWI 等遥感观测资料被广泛应用于生态系统生产力估算及地表特征参数反演中, 已成为区域和全球尺度生态系统碳平衡研究的重要手段之一^[17-19]。Gao 等^[20-21]建立 R_cRSM 模型, 利用遥感观测获取的 EVI, LSWI 和 LST 对生态系统的 R_{eco} 进行模拟, 但该遥感生态系统呼吸模型尚未得到广泛的应用和验证。

中纬度半干旱草原是全球陆地生态系统的重要类型, 也是中国主要的地表类型之一^[22]。内蒙古草原是其中最具代表性的, 是国际地圈-生物圈计划中陆地样带的重要组成部分^[23]。该地区是我国北方比较有代表性的气候敏感区和生态脆弱区, 其碳通量的时空变化对全球碳循环有重要影响^[24], 准确地估算该生态系统的呼吸速率对深入研究该生态系统碳循环特征有重要意义。目前, 尚未开展遥感生态系统呼吸模型在该生态系统的适应性研究及效果验证。

本文基于锡林浩特国家气候观象台 2010—2013 年生长季涡动相关系统的观测资料以及 2010—2013 年的 MODIS 数据, 分析 R_{eco} 与 EVI, LST 和 LSWI 之

间的关系, 评估基于遥感数据的生态系统呼吸模型估算 R_{eco} 的精度和可行性, 并基于敏感性分析, 探究遥感生态系统呼吸模型的不足和可能原因。

1 材料和方法

1.1 研究站点

研究站点位于内蒙古自治区锡林郭勒盟境内 (44°08'31"N, 116°18'45"E)。锡林郭勒盟是我国重要的畜牧业基地, 平均海拔约 1030 m, 属于大陆性温带半干旱草原气候, 年平均气温为 2~3℃, 年平均风速为 3~4 m/s, 以西南风为主, 年平均降水量约为 300 mm, 降水集中在 8 月。土壤类型为典型栗钙土, 有机质积累丰富, 下垫面植被以抗低温的旱生草本植物为主, 植被覆盖较均匀, 主要植物种类有克氏针茅 (*Stipa krylovii* Roshev.) 以及羊草 (*Leymus chinensis*) 等, 5—9 月为牧草生长季^[25-26]。

1.2 涡动相关资料数据处理

本文所用涡动相关通量系统观测资料来自锡林浩特国家气候观象台, 该系统主要由超声风速温度仪 (CSAT3, Campbell Scientific) 和 CO₂/H₂O 开路分析仪 (LI-7500, LI-COR) 组成, 采样频率为 10 Hz, 观测高度为 4 m。本文运用 2010—2013 年生长季 (5—9 月) 夜间的近地层通量观测数据, 将湍流原始资料分割为 30 min 时长的片段后进行计算处理, 步骤如下: 1) 剔除降水天气影响以及仪器故障等时段的数据, 并用方差检验法剔除野点; 2) 进行二维坐标旋转并去除平均值, 得到湍流脉动量; 3) 计算经 WPL (Webb-Pearman-Leuning) 方法修正后的 CO₂ 通量^[27]。假定夜间植被-大气间净生态系统的 CO₂ 交换仅来源于生态系统呼吸, 夜间观测到的 CO₂ 通量即为夜间 R_{eco} 值。为了与 MODIS 遥感数据的时间分辨率 (8 天) 相匹配, 本研究对夜间 R_{eco} 的观测值求 8 天平均值。

1.3 MODIS 数据

本文利用 2010—2013 年 5—9 月的 MODIS 地表反射率产品 MOD09A1 来计算光谱植被指数, 该产品包括 7 个波段 8 天合成的地表反射率产品, 空间分辨率为 500 m。基于观测站点的经纬度信息, 提取站点所在位置单个像元的反射率, 使用其中红 (620~670 nm)、近红外 (841~876 nm)、蓝 (459~479 nm) 及短波红外 (1628~1652 nm) 4 个波段的数据, 计算增强型植被指数 EVI 和地表水分指数 LSWI, 计算公式^[18]如下:

$$\text{EVI} = 2.5 \times \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{NIR}} + 1 + 6.0\rho_{\text{red}} + 7.5\rho_{\text{blue}}}, \quad (1)$$

$$\text{LSWI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{SWIR}}}, \quad (2)$$

其中, ρ_{NIR} 为近红外波段的地表反射率, ρ_{blue} 为蓝光波段的地表反射率, ρ_{red} 为红光波段的地表反射率, ρ_{SWIR} 为短波红外波段的地表反射率。

利用 MOD11A2 产品获取地表温度(LST)数据, 其空间分辨率为 1 km, 为 8 天合成的 L3 产品。

1.4 遥感生态系统呼吸模型

生态系统呼吸可以分为植物体呼吸(R_{GPP})及生态系统有机质(植被凋落物、土壤有机质)和土壤微生物呼吸(R_{EOM})两部分^[21], 其中植物体呼吸部分与植被的生长状况及水分条件有关。根据 Gao 等^[20]的研究, R_{GPP} 与 EVI 影响函数(EVI_s)以及水分对最大光能利用效率的影响函数(W_s)的关系可表示为

$$R_{\text{GPP}} = \alpha \text{PC}_{\text{max}} \text{EVI}_s W_s, \quad (3)$$

其中, α 为模型参数; PC_{max} 表示不同植被的最大光合作用能力, 不同植被类型的 PC_{max} 值不同, 半干旱草原生态系统的 PC_{max} 值取 $1.11 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ^[20]; EVI_s 表示植被对光合作用能力的影响, 为 EVI 的函数, $\text{EVI}_s = \text{EVI} - 0.1$, 即当 EVI 趋近 0.1 时, GPP 趋近 0^[20]; W_s 表示水分对光合作用的影响, 通常表示为土壤水分和水汽压差的函数^[19], 在 Gao 等^[20]的模型中用遥感陆地表面水分指数 LSWI 替代:

$$W_s = \frac{1 + \text{LSWI}}{1 + \text{LSWI}_{\text{max}}}. \quad (4)$$

R_{EOM} 与地表温度的关系参考 L-T 方程^[7]:

$$R_{\text{EOM}} = R_{\text{ref}} e^{\left[\frac{E_0}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{\text{LST} - T_0} \right]}, \quad (5)$$

其中, R_{ref} 为处于参考温度 T_{ref} (10°C) 时的生态系统有机质及土壤微生物呼吸速率(R_{EOM}); E_0 为活化能相关参数; T_0 (-46.02°C) 为 R_{EOM} 为 0 时对应的温度; LST 为地表温度, 本文用 MODIS 地表温度产品代表研究地点的地表温度。因此, 遥感生态系统呼吸模型可表示为

$$R_{\text{eco}} = \alpha \text{PC}_{\text{max}} \text{EVI}_s W_s + R_{\text{ref}} e^{\left[\frac{E_0}{T_{\text{ref}} - T_0} - \frac{1}{\text{LST} - T_0} \right]}. \quad (6)$$

1.5 模型参数

遥感生态系统呼吸模型有 α , PC_{max} , R_{ref} 和 E_0 这 4 个待拟合参数。本文利用 2010—2012 年的数据拟合模型参数, 并用 2013 年的数据进行模型的验证与评估。表 1 给出模型的拟合参数及统计学参数。

表 1 遥感生态系统呼吸模型参数及统计学参数
Table 1 Model parameters and statistical parameters of remote sensing ecosystem respiration model

模型参数				统计学参数	
α	$\text{PC}_{\text{max}}/(\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	E_0/K	$R_{\text{ref}}/(\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$	R^2	$\text{RMSE}/(\text{mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$
0.28	1.11	245.91	0.04	0.68	0.02

说明: α 为待拟合参数, R^2 为决定系数, RMSE 为均方根误差。

2 结果与分析

2.1 EVI, LST 和 LSWI 的季节动态

图 1 显示, 2010—2013 年 5—9 月的 LSWI 有明显的季节变化, 平均值分别为 -0.11 , -0.13 , -0.02 和 -0.07 。2012 年研究站点的地表水分最充足, 2013 年次之, 2010 和 2011 年地表较干旱。

每年生长季的 LST 呈多峰状分布, 从整体上看, 4 年的 LST 差别不大(生长季平均 LST 分别为 10.6, 9.8, 10.1 和 9.7), 在生长季前后期较低, 中期较高。

2010—2013 年生长季 EVI 的变化趋势与 LSWI

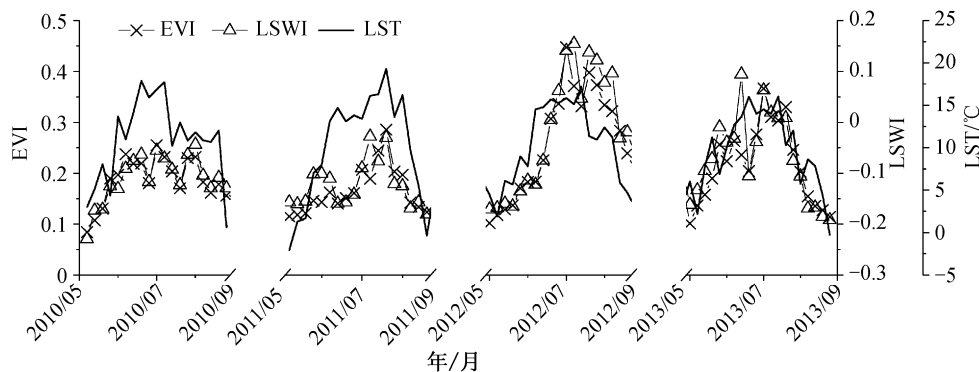


图 1 2010—2013 年生长季 EVI, LSWI 和 LST 的变化

Fig. 1 Changes of EVI, LSWI and LST during growing seasons from 2010 to 2013

的变化趋势基本上一致,说明该生态系统水分越充足,植被生长状况越好。EVI在生长季的峰值都出现在7—8月,最大值依次为0.25, 0.29, 0.45和0.37。从总体上看,研究站点2012年植被生长状况最好,2013年次之,2010和2011年较差,与该区域水分条件的年际变化特征一致。LSWI峰值出现的时间与EVI峰值出现的时间基本上吻合,但在2013年生长季的6月16号,LSWI出现峰值而EVI值较低,说明此时植被的生长状况尚未到达峰期。

2.2 生态系统呼吸速率的模拟

我们利用2010—2012年生长季夜间的 R_{eco} 观测数据,拟合出遥感生态系统呼吸模型参数: $a=0.28$, $E_0=245.91$, $R_{ref}=0.04 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。在此基础上,用2013年的EVI, LST和LSWI数据,对2013年的夜间 R_{eco} 进行模拟,并利用2013年生长季夜间的 R_{eco} 观测数据,对模型结果进行验证。图2(a)显示,2010—2012年的模拟值与观测值显著相关($R^2=0.90$),拟合直线斜率为0.97,表明该遥感生态系统呼吸模型的模拟效果较好,模拟值仅存在3%的低估。图2(b)是模型模拟的2013年生长季夜间 R_{eco} 与观测值的比较,拟合结果表明两者之间有很好的相关性($R^2=0.94$),拟合直线斜率为0.79。上述结果表明,尽管该遥感生态系统呼吸模型会对夜间 R_{eco} 造成低估,但研究时段内夜间 R_{eco} 的模拟值与观测值之间的线性相关关系十分显著。

图3中比较遥感生态系统呼吸模型模拟的夜间 R_{eco} 与观测值在研究时段的变化趋势。生长季前期,2010, 2012和2013年模拟值存在一定程度的低估,

2011年的模拟值略有高估;生长季中期,2010和2011年的模拟值高于观测值,2012和2013年的模拟值存在一定程度的低估;生长季后期,2010—2012年的模拟值都有不同程度的低估,2013年的模拟结果与观测值比较接近。

生长季前期,4年模拟结果的平均值为 $0.03 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,低于观测值的平均值 $0.04 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;生长季中期,4年模拟结果的平均值为 $0.08 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,低于观测值的平均值 $0.09 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;生长季后期,4年模拟结果的平均值为 $0.05 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,高于观测值的平均值 $0.03 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。总的来说,生长季的前期和中期,模拟值会对观测值有不同程度的低估;生长季的后期,模拟值略高于观测值。

2.3 生态系统呼吸与遥感生态系统呼吸模型驱动因子的关系

本研究所应用的遥感生态系统呼吸模型由EVI_s, W_s 和LST共同驱动,模型的表现与3个驱动因子有密切的联系。探讨生态系统呼吸与EVI_s, W_s 和LST的相关性,可以在一定程度上解析遥感生态系统呼吸模型结构的合理性。Gao等^[20]的研究表明,EVI_s与 W_s 的归一化处理能更好地反映 R_{eco} 的变化。图4显示,2010—2013年夜间 R_{eco} 观测值与EVI_s× W_s 呈较显著的线性相关关系($R^2=0.63$),表明本文采用的遥感生态系统呼吸模型中 R_{GPP} 与EVI_s× W_s 为线性相关关系是与实际情况相符的,模型中对植物体呼吸这部分的设置是合理的。

图5展示2010—2013年夜间 R_{eco} 与LST的关系,

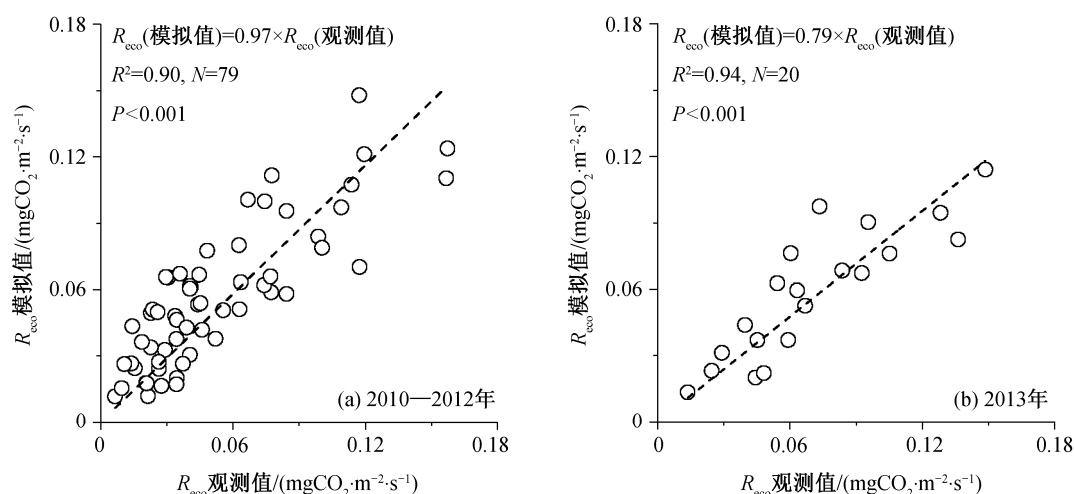
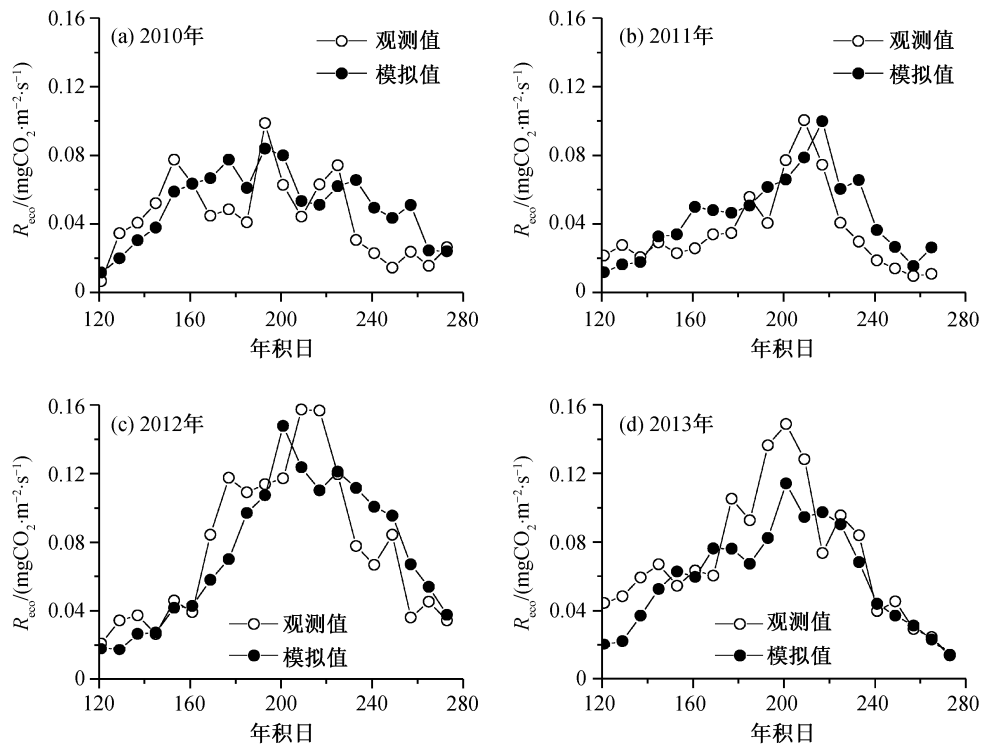
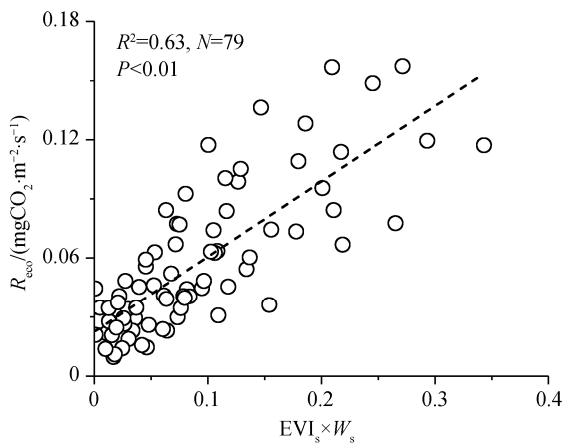
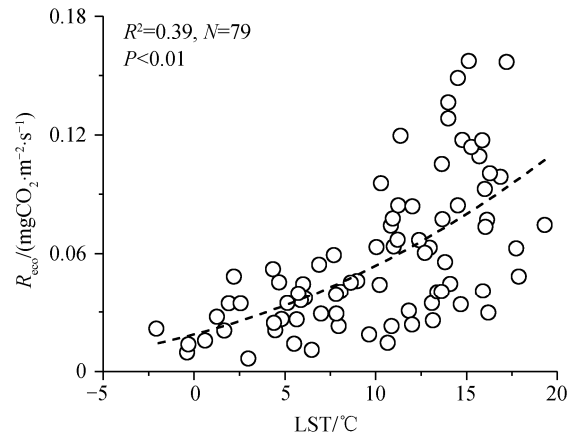


图2 生长季夜间生态系统 R_{eco} 观测值与模拟值的比较

Fig. 2 Scatterplots of the observed vs. modeled nocturnal R_{eco} in growing seasons

图3 2010—2013 年生长季夜间 R_{eco} 季节动态变化Fig. 3 Time series of nocturnal R_{eco} during growing seasons from 2010 to 2013图4 2010—2013 年生长季夜间 R_{eco} 与 $EVI_s \times W_s$ 的关系Fig. 4 Relationship between nocturnal R_{eco} and $EVI_s \times W_s$ during the growing seasons from 2010 to 2013图5 2010—2013 年生长季夜间 R_{eco} 与 LST 的关系Fig. 5 Relationship between nocturnal R_{eco} and LST during the growing seasons from 2010 to 2013

随着 LST 升高, 夜间 R_{eco} 有增大的趋势, 且增长速率逐渐加大。因本文所用的遥感生态系统呼吸模型中 R_{EOM} 满足 L-T 方程, 故利用 L-T 方程对夜间 R_{eco} 与 LST 进行拟合, 结果表明两者在一定程度上存在相关性 ($R^2=0.39$), 即在研究区域 8 天的时间尺度上, 夜间 R_{eco} 与 LST 的关系基本上满足 L-T 方程。

2.4 遥感生态系统呼吸模型的特征分析

为了更好地揭示该遥感生态系统呼吸模型的特

征, 图 6 给出该模型模拟的 R_{EOM} 和 R_{GPP} 两部分在不同时段内占夜间生态系统总呼吸速率的权重。可以看出, R_{GPP} 在生长季前期和后期占总呼吸速率的比例较小, 生长季中期占比较大。即在该遥感生态系统呼吸模型中, 在生长季的前期和后期, 生态系统呼吸主要来源于有机质及土壤微生物的呼吸; 在生长季的中期, 生态系统呼吸来源于植物体呼吸的比例比前期和后期大。研究表明, 在生长季中期生态

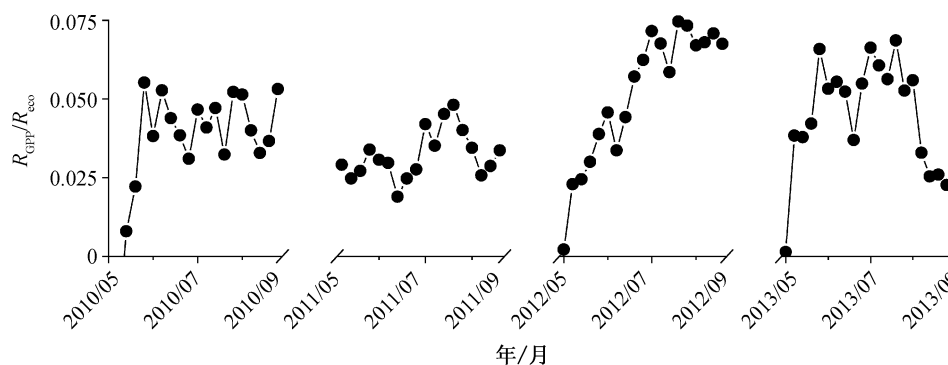

 图 6 2010—2013 年生长季夜间 R_{GPP} 占 R_{eco} 的比例

 Fig. 6 Proportions of R_{GPP} in R_{eco} during the growing seasons from 2010 to 2013

系统的植被生长状况最佳时,呼吸作用最强^[26]。因此,本文应用的遥感生态系统呼吸模型模拟的 R_{GPP}/R_{eco} 特征与实际情况相符。同时, R_{GPP} 占夜间生态系统总呼吸速率的比例在较湿润年份(2012 和 2013 年)明显高于较干旱年份(2010 和 2011 年),揭示土壤水分条件是影响和限制半干旱草原植物体夜间呼吸的重要因子。

为了进一步研究遥感生态系统呼吸模型的表现,本研究引入相对敏感性系数 K 来表示自变量的相对变化(%)引起的因变量相对变化(%)。函数 $f(x,y)$ 对 x 敏感性 K_x 表示为

$$K_x = \frac{x}{f(x,y)} \times \frac{\partial f(x,y)}{\partial x} \quad (7)$$

因此,该遥感生态系统呼吸模型对 $EVI_s \times W_s$ 和 LST 的相对敏感性系数可分别表示为

$$K_{EVI_s \cdot W_s} = \frac{EVI_s \cdot W_s}{R_{eco}} \times \frac{\partial R_{eco}}{\partial (EVI_s \cdot W_s)} \quad (8)$$

$$K_{LST} = \frac{LST}{R_{eco}} \times \frac{\partial R_{eco}}{\partial LST} \quad (9)$$

通过偏微分运算后,得到遥感生态系统呼吸模型对 $EVI_s \times W_s$ 的相对敏感性系数和对 LST 的相对敏感性系数的表达式:

$$K_{EVI_s \cdot W_s} = \frac{R_{GPP}}{R_{eco}} \quad (10)$$

$$K_{LST} = \frac{R_{EOM}}{R_{eco}} \times \frac{E_0 \cdot LST}{(LST - T_0)^2} \quad (11)$$

图 7(a)展示遥感生态系统呼吸模型中 $K_{EVI_s \cdot W_s}$ 随 $EVI_s \times W_s$ 的变化。 $K_{EVI_s \cdot W_s}$ 在 $EVI_s \times W_s$ 的范围内均为正值,并随 $EVI_s \times W_s$ 增加呈现上升的趋势,最终趋于稳定,表明该遥感生态系统呼吸模型模拟的夜间 R_{eco} 随着 $EVI_s \times W_s$ 的增加而增加,且增长速率逐渐加大。 $K_{EVI_s \cdot W_s}$ 随 $EVI_s \times W_s$ 的变化特征与米氏方程(Michaelis-Menten equation)形式类似,用米氏方程将 $K_{EVI_s \cdot W_s}$ 进行拟合,得到 $R^2=0.84$, $P<0.01$,表明随着 $EVI_s \times W_s$ 值变大,该遥感生态系统呼吸模型模拟的夜间 R_{eco} 增长速率逐渐增加,并最终达到稳定。

图 7(b)展示遥感生态系统呼吸模型中 K_{LST} 随

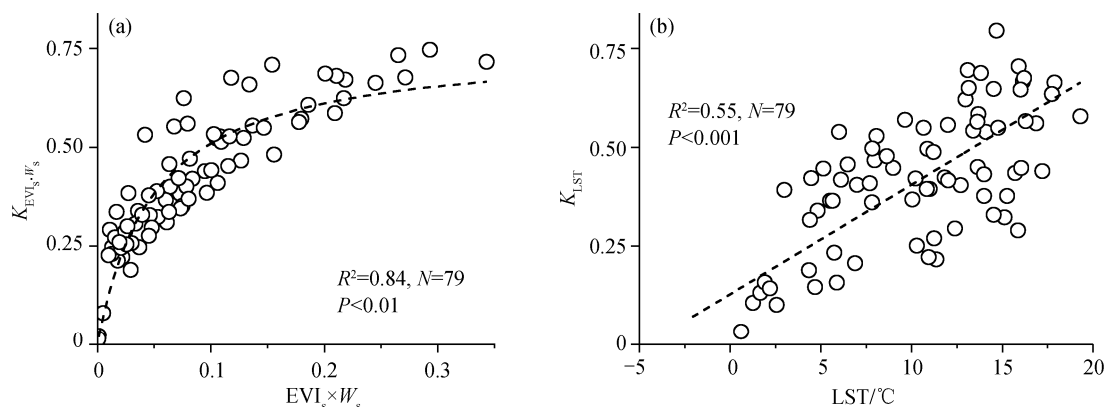

 图 7 相对敏感性系数 K 随自变量 $EVI_s \times W_s$ (a)和 LST (b)的变化

 Fig. 7 Variations of relative sensitivity coefficient K vs. $EVI_s \times W_s$ (a) and LST (b)

LST 的变化。模型的 K_{LST} 值在 LST 的变化范围内 ($-5\sim 20^{\circ}\text{C}$) 为 $0\sim 1$, K_{LST} 随 LST 的增加呈线性增长 ($R^2=0.55$, $P<0.01$), 且始终大于 0, 表明该遥感生态系统呼吸模型模拟的夜间 R_{eco} 在 LST 的区间内随 LST 的增加而增大, 且增长速率逐渐加大。观测的夜间 R_{eco} 随 LST 的变化情况如图 5 所示, 夜间 R_{eco} 随着 LST 的升高逐渐增加, 且增长速率加大, 进一步说明该遥感生态系统呼吸模型用 LST 作为驱动因子, 引用 L-T 方程模拟 R_{EOM} 是可行的。

2.5 遥感生态系统呼吸模型的误差分析

R_{eco} 的模拟值与观测值的时间序列的比较(图 3)表明, 尽管模拟值可以较好地反映夜间 R_{eco} 的整体变化趋势, 但模拟值与观测值之间存在一定程度的误差。为了深入分析模型产生误差的原因, 我们将整个生长季分为前期、中期和后期 3 个阶段, 分别讨论各阶段夜间 R_{eco} 与 $EVI_s \times W_s$ 的关系。

图 8 表明, 在生长季的前期、中期和后期, 夜间 R_{eco} 与 $EVI_s \times W_s$ 的线性拟合关系存在显著差异, 拟合斜率分别为 0.35, 0.35 和 0.26。即在生长季的 3 个阶段, 夜间 R_{eco} 对 $EVI_s \times W_s$ 变化的响应程度是不同的, 生长季前期和中期的敏感性大于后期。将生长季 3 个阶段的夜间 R_{eco} 用遥感生态系统呼吸模型进行拟合(R_{ref} 和 E_0 值保持不变), 得到生长季前期、中期和后期的 a 分别为 0.32, 0.32 和 0.15, 而对整个生长季拟合得到的 a 为 0.28。上述结果表明, 当 $EVI_s \times W_s$ 相同时, 实际情况是生长季前期和中期的

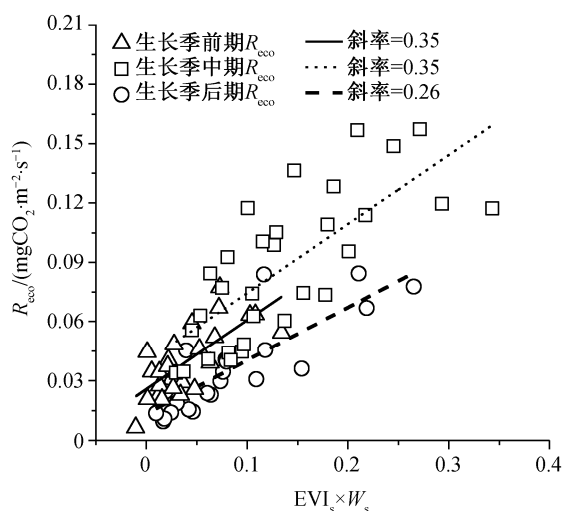


图 8 2010—2013 年生长季前中后期夜间 R_{eco} 与 $EVI_s \times W_s$ 的关系

Fig. 8 Relationship between nocturnal R_{eco} and $EVI_s \times W_s$ during the growing seasons from 2010 to 2013

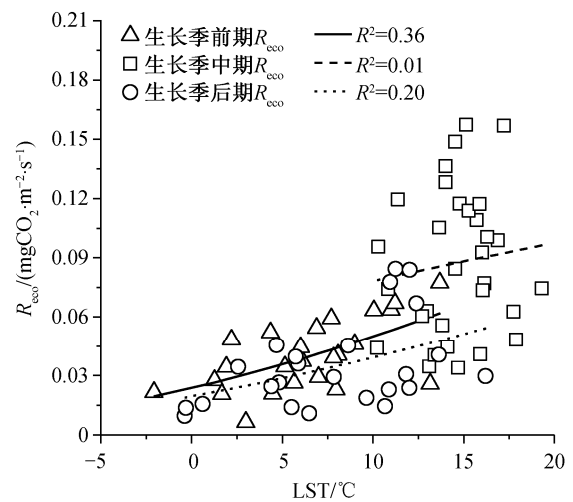


图 9 2010—2013 年生长季前中后期夜间 R_{eco} 与 LST 的关系
Fig. 9 Relationship between nocturnal R_{eco} and LST during the growing seasons from 2010 to 2013

夜间 R_{eco} 大于后期, 而该呼吸模型将整个生长季统一处理, 以致对生长季前期和中期的夜间 R_{eco} 产生低估, 对生长季后期的夜间 R_{eco} 产生高估。

图 9 给出生长季前期、中期和后期 3 个阶段 R_{eco} 与 LST 的关系。在生长季的中期, 夜间 R_{eco} 与 LST 的相关性很弱, 且没有通过显著性水平检验; 在生长季的前期和后期, 夜间 R_{eco} 与 LST 满足 L-T 方程(R^2 分别为 0.36 和 0.20)。结合图 7 可知, 遥感生态系统呼吸模型模拟的夜间 R_{eco} 随着 LST 的增加而增大, 生长季前期和中期的实际情况基本上满足这种规律, 但生长季中期的夜间 R_{eco} 随 LST 的变化不显著, 可能是模型存在误差的原因。将生长季 3 个阶段的夜间 R_{eco} 用遥感生态系统呼吸模型进行拟合(a 和 E_0 保持不变), 得到生长季前期、中期和后期的 R_{ref} 分别为 0.05, 0.05 和 0.02, 而对整个生长季拟合得到的 R_{ref} 为 0.04, 表明该呼吸模型将整个生长季统一处理可能是导致对生长季前期和中期的夜间 R_{eco} 产生低估, 对生长季后期的夜间 R_{eco} 产生高估的原因。

3 讨论

3.1 遥感生态系统呼吸模型的机理

植物体呼吸是植物体在器官发育过程中消耗某些光合作用产物时产生的呼吸, R_{GPP} 与植物体的生长状况有密切的关系^[14]。从式(6)可以看出, 在该模型中, R_{GPP} 主要受所在区域植被类型、植被生长状况及水分条件的影响。Huang 等^[14]利用遥感植被指数对生态系统呼吸速率进行模拟, 结果表明增强型

植被指数 EVI 的表现最好, 因此本文采用的模型中同样选取 EVI 来表征植被生长状况。此外, 生态系统中 GPP 与 $EVI_s \times W_s$ 成正比, 有很强的相关性(温带草原站点的 $R^2=0.81$)^[20], 本文中 R_{eco} 观测值与 $EVI_s \times W_s$ 的相关性亦较高($R^2=0.63$)(图 4)。

该模型中, 生态系统有机质(植被凋落物、土壤有机质)及土壤微生物呼吸速率 R_{EOM} 主要受温度影响, R_{EOM} 与地表温度的关系参照 L-T 方程。本文结果表明, R_{eco} 观测值与 LST 基本上满足 L-T 方程, 但拟合决定系数值不大($R^2=0.39$), 可能是由于半干旱草原生态系统的水分条件可以通过影响呼吸底物及相关生物酶的活性来限制生态系统的呼吸速率^[10], 但在 R_{EOM} 的表达式中加入 W_s 作为驱动因子没有显著地提升模型的模拟效果(本文没有给出图示), 这是未来需要进一步探讨的问题。

3.2 遥感生态系统呼吸模型的参数特征

本文研究的遥感生态系统呼吸模型主要含有 4 个参数(a , PC_{max} , R_{ref} 和 E_0), 研究区域的地理位置、植被类型和环境条件不同, 相应的模型参数也存在差异。本文的研究区域是内蒙古半干旱草原生态系统, 为了使模型的模拟精度更高, 没有直接引用 Gao 等^[21]总结的经验参数, 而是采用该区域 2010—2012 年共 3 年的数据进行参数拟合, 并用 2013 年的数据进行验证。

植物体在生长过程中会消耗自身的 GPP, 为生长提供能量, 植被的生长状态越好, 表示植物体呼吸占植物体 GPP 比例的参数 a 越小。Gao 等^[21]的研究表明, 该遥感生态系统呼吸模型在高山灌木林生态系统的表现最好($R^2=0.93$), $a=0.52$ 。本研究中 $a=0.28$, 远远小于高山灌木林生态系统, 即半干旱草原生态系统中植物体呼吸消耗占 GPP 的比例更小。Gao 等^[20]对 5 种生态系统的研究表明, 不同生态系统的 PC_{max} 是不同的, 可以很好地反映不同植被类型对 R_{GPP} 的影响。本研究中 PC_{max} 取 $1.11 \text{ mg CO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 略高于高山灌木林生态系统中的 PC_{max} ($0.9 \text{ mgCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)。本研究中 R_{ref} 和 E_0 值与高山灌木林生态系统差异不大。

3.3 遥感生态系统呼吸模型的不足与发展前景

本文对遥感生态系统呼吸模型在半干旱草原的适用性进行验证性研究, 证明 Gao 等^[20-21]只利用遥感数据研究生态系统碳循环是合理可行的。遥感生态系统呼吸模型在不同生态系统的模拟效果存在差异, 这是未来的应用研究中亟需解决的问题。在半

干旱草原的应用中也发现一些问题: 1) R_{EOM} 会受水分条件的影响^[11], 但在该模型的 R_{EOM} 中加入 W_s 作为驱动因子, 并没有显著地提升模拟效果; 2) 实际观测的夜间 R_{eco} 与 LST 的相关性较弱, 尤其是在生长季的中期, LST 是否可以作为驱动 R_{EOM} 的唯一因子仍存疑问; 3) 实际观测的夜间 R_{eco} 在生长季的前期、中期和后期对 $EVI_s \times W_s$ 和 LST 的响应不同, 会对模拟结果的准确性造成一定的影响。这些也是未来工作中要解决的问题。

尽管现有的遥感生态系统呼吸模型中考虑的影响因子有限(如未考虑土壤有机碳和土壤氮等的含量), 但因其具有较大尺度的空间代表性, 该模型在区域及全球尺度的 R_{eco} 估算中仍有较好的应用前景。未来, 随着土壤水分、植被生物量等卫星反演算法的发展, 遥感生态系统呼吸模型的精度有望进一步提升, 成为缺乏涡动相关通量观测数据情况下研究陆地生态系统碳循环的有效手段之一。

4 结论

本文研究结果表明, 应用 MODIS 遥感数据以及基于 EVI, LST 和 LSWI 构建的遥感生态系统呼吸模型, 可以较好地模拟半干旱草原生态系统的夜间 R_{eco} (拟合年份和验证年份的 R^2 分别为 0.90 和 0.94); 涡动相关通量观测系统获取的观测数据表明, 夜间 R_{eco} 与 $EVI_s \times W_s$ 的相关性较强($R^2=0.63$), 与地表温度 LST 的关系基本上满足 L-T 方程($R^2=0.39$); 将生长季分为前期、中期和后期 3 个阶段, 利用观测获取的夜间 R_{eco} 拟合得到的 R_{ref} 分别为 0.05, 0.05 和 0.02, 表明夜间 R_{eco} 在生长季的前期、中期和后期对 $EVI_s \times W_s$ 和 LST 的响应强度不同, 该现象可能是模型的主要误差来源之一。

参考文献

- [1] Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems—recent progress and challenges. *Global Change Biology*, 2010, 12(2): 141–153
- [2] Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, et al. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 113(1): 53–74
- [3] Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404: 861–865

- [4] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, et al. Productivity overshadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 269–278
- [5] Barr A G, Griffis T J, Black T A, et al. Comparing the carbon budgets of boreal and temperate deciduous forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32(5): 813–822
- [6] Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 113(1): 97–120
- [7] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315–323
- [8] Zhao Z M, Zhao C Y, Yan Y Y, et al. Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and moisture in an oasis cotton field, central Asia. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 168(11): 46–52
- [9] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(2): 155–165
- [10] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 217–227
- [11] Reichstein M, Tenhunen J D, Rouspard O, et al. Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm Oak forests: drought effects and decomposition dynamics. *Functional Ecology*, 2002, 16(1): 27–39
- [12] 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学: 地球科学*, 2004, 34(增刊 2): 84–94
- [13] Running S W, Baldocchi D D, Turner D P, et al. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 108–127
- [14] Huang N, Zheng N. Estimating soil respiration using spectral vegetation indices and abiotic factors in irrigated and rainfed agroecosystems. *Plant & Soil*, 2013, 367(1/2): 535–550
- [15] Xiao X, Hollinger D, Aber J, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89(4): 519–534
- [16] Sims D A, Rahman A F, Cordova V D, et al. A new model of gross primary productivity for North American ecosystems based solely on the enhanced vegetation index and land surface temperature from MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 112(4): 1633–1646
- [17] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, et al. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Bioscience*, 2004, 54(6): 547–560
- [18] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. Net primary productivity mapped for Canada at 1-km resolution. *Global Ecology & Biogeography*, 2002, 11(2): 115–129
- [19] 伍卫星, 王绍强, 肖向明, 等. 利用 MODIS 影像和气候数据模拟中国内蒙古温带草原生态系统总初级生产力. *中国科学: 地球科学*, 2008, 38(8): 993–1004
- [20] Gao Y N, Yu G R, Yan H, et al. A MODIS-based photosynthetic capacity model to estimate gross primary production in Northern China and the Tibetan Plateau. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 148(5): 108–118
- [21] Gao Y N, Yu G R, Li S G, et al. A remote sensing model to estimate ecosystem respiration in Northern China and the Tibetan Plateau. *Ecological Modelling*, 2015, 304: 34–43
- [22] 杜群, 刘辉志, 冯健武, 等. 半干旱区草原生态系统的碳交换特征. *中国科学: 地球科学*, 2012(5): 711–722
- [23] 郝彦宾, 王艳芬, 孙晓敏, 等. 内蒙古羊草草原碳交换季节变异及其生态学解析. *中国科学: 地球科学*, 2006, 36(增刊 1): 174–182
- [24] 叶笃正, 陈泮勤. 中国的全球变化预研究. 北京: 地震出版社, 1992
- [25] 王英舜, 史激光. 典型草原区生长季大气 CO₂ 浓度特征分析. *中国农学通报*, 2010, 26(13): 363–365
- [26] 李金花, 潘浩文, 王刚. 内蒙古典型草原退化原因的初探. *草业科学*, 2004, 21(5): 49–51
- [27] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological*, 1980, 106: 85–100