

黑河上游植被总初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应

闫 敏 李增元* 田 昕 陈尔学 谷成燕

中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091

摘 要 定量描述植被总初级生产力(*GPP*)对于全球碳循环和全球气候变化研究具有重要意义。针对MODIS MOD_17 *GPP* (MOD_17)产品在通量站点低估的现象,通过3个实验依次改进了模型输入参数(气象数据和吸收的光合有效辐射吸收比例(*fPAR*))和模型本身的参数(最大光能利用率),分析了各个参数对模拟结果的不确定性影响,结果表明各参数对模拟结果都有不同程度的影响。在阿柔草地站,最大光能利用率的重新标定对结果影响最大,*GPP*估算结果的提高最为明显;在关滩森林站利用广义神经网络算法得到的GLASS *fPAR*代替原始MODIS *fPAR*产品,比其他参数的改进效果更明显,*GPP*的值更接近涡动通量观测值。利用改进的MOD_17模型重新估算了黑河上游2001–2012年间植被*GPP*,通过趋势分析得出该研究时段内*GPP*以 $9.58 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的平均速率呈上升趋势。同时计算了气候因子(温度、降水和饱和水汽压差(*VPD*))与时间序列*GPP*的偏相关性,分析了植被*GPP*对气候变化的响应情况,2001–2012年平均温度和*VPD*与年*GPP*大部分区域呈正相关,体现了温度和*VPD*对植被生长的促进作用;2001–2012年的降水量与年*GPP*无明显相关,且大部分区域呈负相关。

关键词 植被总初级生产力; MOD_17模型; 趋势分析; 气候因子; 偏相关分析

引用格式: 闫敏, 李增元, 田昕, 陈尔学, 谷成燕 (2016). 黑河上游植被总初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应. 植物生态学报, 40, 1–12. doi: 10.17521/cjpe.2015.0253

Remote sensing estimation of gross primary productivity and its response to climate change in the upstream of Heihe River Basin

YAN Min, LI Zeng-Yuan*, TIAN Xin, CHEN Er-Xue, and GU Cheng-Yan

Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract

Aims Quantifying the gross primary productivity (*GPP*) of vegetation is of primary interest in studies of global carbon cycle. This study aims to optimize the MODIS *GPP* model for specific environments of a fragile waterhead ecosystem, by performing simulations of long-term (from 2001 to 2012) *GPP* with optimized MOD_17 model, and to analyze the response of *GPP* to the local climatic variations.

Methods The original MODIS *GPP* products that underestimate *GPP* were validated against two years (2010–2011) of eddy covariance (EC) data at two sites (i.e. an alpine pasture site and a forest site, respectively) in the upstream of Heihe River Basin. Three comparative experiments were then conducted to analyze the effects of input parameters derived from three sources (i.e. meteorological, biome-specific, and fraction of absorbed photosynthetically active radiation (*fPAR*) parameters) on the model behavior. After refining the model-driven parameters, long-term *GPPs* of the study area were estimated using the optimized MOD_17 model, and the Least Absolute Deviation method was applied to analyze the partial correlations between interannual *GPPs* and climatic variables (temperature, precipitation and vapor pressure deficit (*VPD*)).

Important findings The uncertainties in the original MODIS *GPP* products are attributable to biome-specific parameters, input data (e.g. meteorological and radiometry data) and vegetation maps. At the pasture site, the light use efficiency had the strongest impact on the *GPP* simulations. The refined *fPAR* calculated from the leaf area index (*LAI*) products of Global Land Surface Satellite (GLASS) greatly improved the *GPP* estimates, especially at the forest site. The *GPPs* from the optimized MOD_17 model well matched the EC data ($R^2 = 0.90$, root mean squared error (*RMSE*) = $1.114 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ at the alpine pasture site; $R^2 = 0.91$, *RMSE* = $0.649 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ at the

收稿日期Received: 2015-07-03 接受日期Accepted: 2015-10-23

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: lizy@caf.ac.cn)

forest site). The time series of *GPPs* displayed an up trend at an average rate of $9.58 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ from 2001 to 2012. Examination of the partial correlations between interannual *GPPs* and climatic variables showed that the annual mean temperature and *VPD* generally had significant positive impacts on *GPP*, and the annual precipitation had a negative impact on *GPP*.

Key words gross primary productivity; MOD_17 model; trend analysis; climatic factors; partial correlation analysis

Citation: Yan M, Li ZY, Tian X, Chen EX, Gu CY (2016). Remote sensing estimation of gross primary productivity and its response to climate change in the upstream of Heihe River Basin. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 1–12. doi: 10.17521/cjpe.2015.0253

植被储存的碳是陆地生态系统碳库的重要组成部分, 植被碳主要储存在森林、草地和农田中, 占陆地生态系统碳库的27.2% (王旭峰, 2012)。植被碳循环就是植被与大气间碳交换的过程, 该过程由于受到气候变化、 CO_2 浓度变化和人类活动引起的土地利用变化等方面的影响(周广胜等, 2002; 龙慧灵等, 2010; Dury *et al.*, 2011; Dai *et al.*, 2014), 存在极大的不确定性。植被总初级生产力(*GPP*)反映的是植被所固定的碳的总量, 是碳循环的重要评价指标(Beer *et al.*, 2010; Piao *et al.*, 2011), 因此量化植被*GPP*对于碳循环的模拟具有重要意义。

MODIS MOD_17 *GPP* (MOD_17)模型是目前应用广泛的基于遥感的光能利用率模型, 它利用MODIS数据进行空间分辨率为1 km的全球陆地生态系统*GPP*估算(Running *et al.*, 1999; Heinsch *et al.*, 2003)。该模型产品已经过北美、欧洲和我国通量网多个站点的验证(Plummer, 2006; Yang *et al.*, 2007; Coops *et al.*, 2009)。我国通量站点的验证结果表明原始MODIS *GPP*产品在森林、草地和农田站点均存在估算不准确的现象, 产品有很大的不确定性。Zhang等(2008)在海北高寒草甸站和禹城农田站利用通量观测数据验证了MODIS *GPP*产品在这两个站点的精度, 结果表明原始MODIS *GPP*产品存在明显的低估现象。Wang等(2013)收集了我国北方10个通量站(包括森林、草地和农田站)生长季的观测资料, 对MODIS *GPP*产品做了进一步的验证, 发现原始MODIS *GPP*产品在所有研究站点都明显低于通量观测数据。

植被*GPP*具有明显的空间和时间变化特征, 气候因子是植被生长最直接的影响因素(Nemani *et al.*, 2003)。黑河流域植被大部分分布于上游祁连山地区, 祁连山冰雪融水是整个黑河流域农田以及人类用水的重要来源, 在水土保持、涵养水源和生物多样性

保护等方面具有重要作用。黑河上游是典型的寒区和旱区, 植被生态脆弱, 高山地区水资源、生态系统受气候变化和人类活动的扰动, 干旱少雨的气候加之人类活动对流域水资源的过度利用, 使得上游森林和草地等主要植被生态系统十分不稳定(卢玲等, 2005)。因此, 借助遥感手段进行植被*GPP*时空变化的驱动力分析, 可为保护上游地区生态环境和合理利用森林及草地等资源提供科学数据, 从而有效地抑制流域土地荒漠化、河道断流、水资源缩减等问题的进一步恶化。

目前针对黑河上游植被生产力的研究主要存在研究时间尺度较短、结果验证不足、对生产力及其与气候之间关系的研究结果不尽一致等问题。一般来讲, 寒区植被生产力与温度正相关, 温度的适量增加有助于植被生长季的延长。陈正华等(2008)通过分析1998–2002年间植被净初级生产力与气候因子的相关性证明了这一点。另一方面, 降水的增加对旱区植被光合作用、生长所需水分都有很大影响, Lu等(2009)和李旭谱(2013)通过相关分析得出水分条件是植被生产力的决定性因素, 其影响力远远超过了温度对植被生产力的影响。总体来看, 植被生产力与驱动力因子之间有着复杂的关系。

因此, 本文针对原始MODIS *GPP*产品在我国生态脆弱地区存在较大不确定性的现象, 利用2010和2011年获取的黑河上游祁连山阿柔草地站和关滩森林站涡动(eddy covariance)通量观测数据, 针对原始产品低估的现象进行了分析, 对模型参数进行了改进, 并重新估算了黑河上游2001–2012年时间序列*GPP*; 利用偏相关分析法分析了长时间序列植被*GPP*的变化趋势及其对气候变化(温度、降水和饱和水汽压差(*VPD*)的变化)的响应情况, 可为分析和评价我国生态脆弱地区的生态环境保护提供科学的参考依据。

1 研究区和数据概况

1.1 研究区

黑河是我国西北地区第二大内陆河,发源于祁连山北麓中段。黑河流域地貌丰富,地形复杂多变,从南到北依次为黑河上游祁连山、中游河西走廊和下游阿拉善高原。黑河上游位于青藏高原北缘的祁连山地,是黑河流域的发源地和产流区。上游属于温带大陆性气候,受青藏高原气候影响,冬季寒冷干燥,全年内降水基本发生在夏季,年降水量为350–495 mm,年平均气温为3.1–3.6 °C (潘小多, 2012)。祁连山地区海拔1 500–6 000 m,主要植被类型为森林、灌木和高寒草甸。森林主要由青海云杉(*Picea crassifolia*)组成,极少数区域混杂着祁连圆柏(*Juniperus przewalskii*),森林主要分布在海拔2 500–3 300 m的阴坡。近年来,由于对水资源和森林的过度开发,大量放牧,导致了流域生态环境日趋恶化,草原和森林大面积萎缩(郭云等, 2015)。图1所示为黑河上游位置及植被分类图,分类图是在参考冉有华制作的黑河植被类型图(Ran *et al.*, 2012)以及Landsat-7 TM 影像的基础上利用分类规则集算法得到的,并经过2014年森林样地数据的验证,

森林类别分类精度为98%。

1.2 数据概况

1.2.1 站点气象数据

文中用于改进MOD_17模型的站点气象数据来自阿柔站和关滩站,这两个站点为2008年黑河综合遥感联合实验(WATER)建立的自动气象观测站(李新等, 2008)。阿柔站位于黑河上游支流八宝河南侧的河谷高地上,试验场周围相对平坦开阔,站点地理坐标为100.45° E、38.03° N,海拔为3 033 m,下垫面为高寒草甸。关滩站位于黑河上游,站点地理坐标为100.25° E、38.53° N,海拔为2 835.2 m,下垫面为青海云杉林。文中所有站点气象数据为8天的日最低温(T_{min})、VPD和光合有效辐射(PAR),其中 T_{min} 和VPD均为8天的平均值,PAR为8天的累加值,2010–2011年站点8天的气象数据季节变化情况如图2和图3所示。

1.2.2 黑河上游气象驱动数据

利用基于遥感的光能利用率模型重新估算黑河上游植被生产力,需要有流域网格的时间序列 T_{min} 、VPD以及PAR数据,因此,文中采用潘小多(2012)基于中国气象局15个站点(额济纳旗、酒泉、张掖、祁连、马鬃山、拐子湖、玉门镇、金塔、高台、阿拉

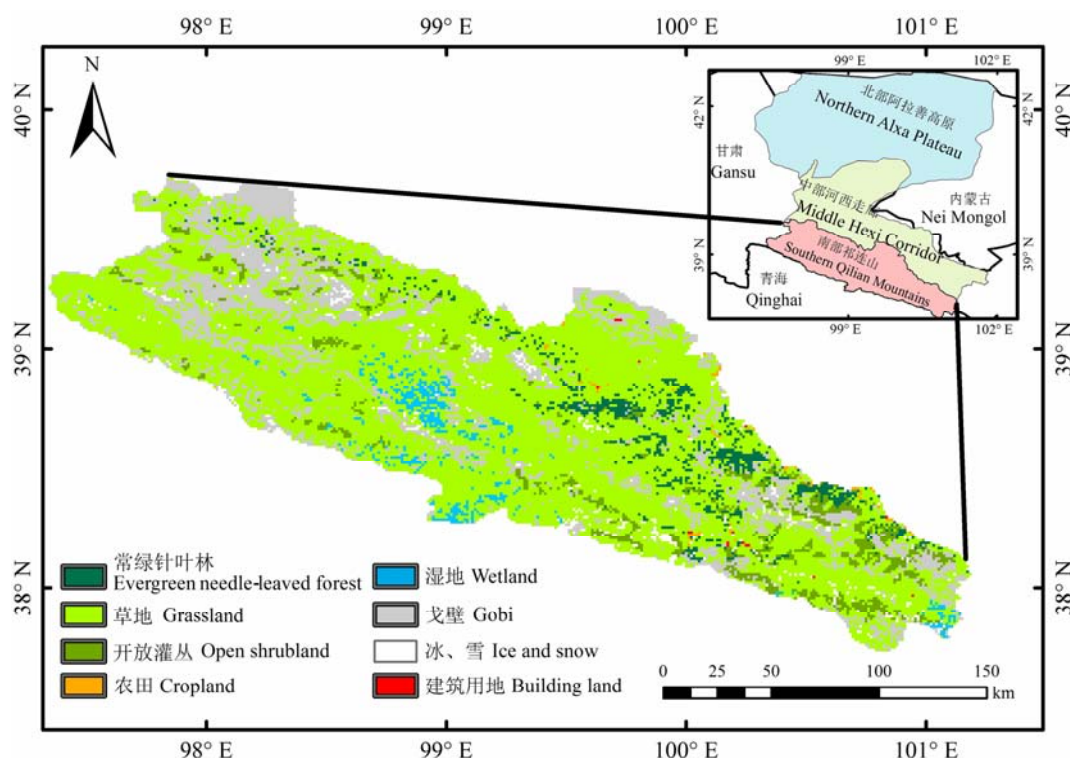


图1 黑河上游位置及植被分类图。

Fig. 1 The location and vegetation classification map of the upstream of Heihe River Basin.

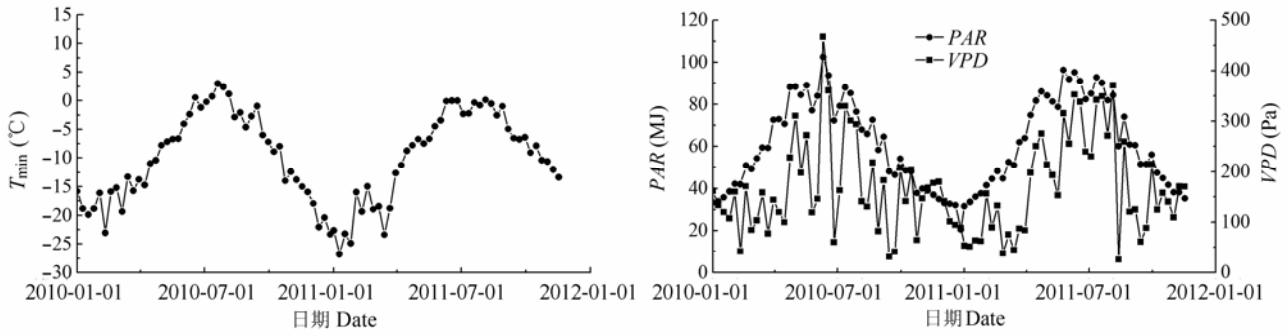


图2 阿柔站8天最低温度(T_{\min})、光合有效辐射(PAR)和饱和水汽压差(VPD)的季节变化。

Fig. 2 Seasonal variations of the 8-day minimum temperature (T_{\min}), photosynthetically active radiation (PAR), and vapor pressure deficit (VPD) at the Arou station.

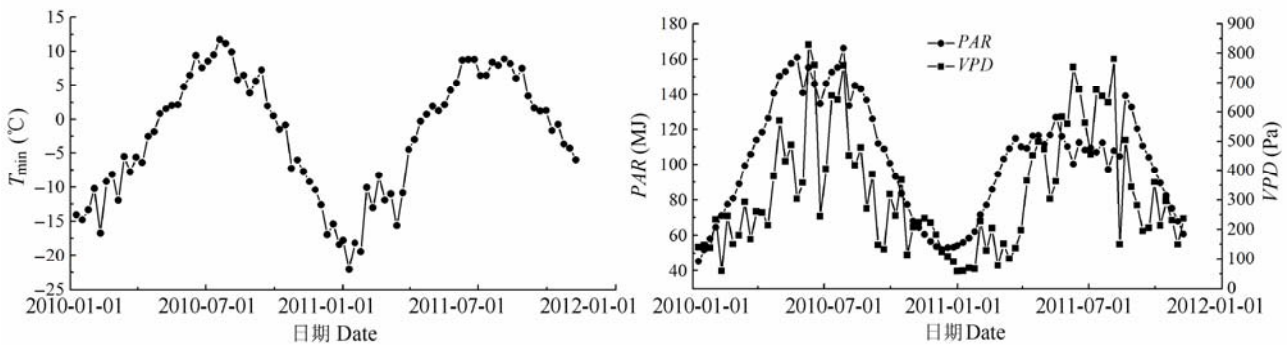


图3 关滩站8天最低温度(T_{\min})、光合有效辐射(PAR)和饱和水汽压差(VPD)的季节变化。

Fig. 3 Seasonal variations of the 8-day minimum temperature (T_{\min}), photosynthetically active radiation (PAR), and vapor pressure deficit (VPD) at the Guantan Station.

善右旗、托勒、野牛沟、山丹、永昌、刚察)以及WATER项目7个加密观测站(阿柔观测站、冰沟寒区水文气象观测站、大冬树山垭口观测站、大野口关滩森林站、花寨子站、大野口马莲滩草地站、盈科灌区绿洲站)的数据借助气象研究与预测(WRF)模式获得黑河流域1 km的气象驱动数据。

1.2.3 通量观测数据

本文基于阿柔站和关滩站2010–2011年的碳通量数据,验证及改进MOD_17模型。这两个站点的涡动观测系统由三维声波风速计、 CO_2 和 H_2O 气体分析仪、热流板、四分量辐射计、温度和相对湿度探头、风速传感器和数据记录仪组成,数据采样频率为10 Hz,利用EdiRe软件处理成30 min的通量数据,具体处理过程包括野点剔除、坐标系旋转、频率响应订正等(Wang *et al.*, 2014)。

涡动相关观测可直接得到生态系统与外界的净交换量(NEE),进而从 NEE 中分解出 GPP 和生态系统呼吸量(ER)。植被在夜间不进行光合作用,因此

把夜间 NEE 看作生态系统呼吸量,研究认为呼吸强度与温度之间存在指数函数的关系,文中采用Vant's Hoff呼吸方程:

$$NEE_{\text{night}} = R_{\text{ref},10} \times Q_{10}^{(T-10)/10} \quad (1)$$

$R_{\text{ref},10}$ 是10 °C时的呼吸速率, Q_{10} 是呼吸随温度的变化速率, T 是实测的10 cm土壤温度。在假定白天温度对生态系统呼吸 ER 的响应与夜晚相同的条件下,可以根据公式(1)推算白天生态系统的呼吸量,进而得到站点的 GPP 值(Desai *et al.*, 2008):

$$GPP = NEE + ER \quad (2)$$

1.2.4 遥感数据

文中采用的遥感数据主要有原始MODIS $fPAR$ (moderate-resolution imaging spectroradiometer, fraction of absorbed photosynthetically active radiation) (MOD15A2产品)和MODIS GPP (MOD17A2产品) (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>)。为对比分析MOD_17模型改进前后的结果,文中将全球陆表特征参量(Global Land Surface Satellite, GLASS)空间分辨率为

1 km、8天合成的叶面积指数(LAI)产品(<http://glass-product.bnu.edu.cn/>)用于改进的MOD_17模型估算植被GPP (Xiao *et al.*, 2014)。

2 研究方法

2.1 MOD_17模型

基于MOD_17模型, 美国国家航空和宇宙航行局(NASA)推出了空间分辨率为1 km的MODIS GPP模型, 该模型是基于遥感的光能利用率模型, 主要驱动数据为模型生物物理参数(最大光能利用率, ϵ_{\max})、气象数据(T_{\min} 、VPD和PAR)以及光合有效辐射吸收比例($fPAR$), 模型表达式为:

$$GPP = \epsilon_{\max} \times f(T_{\min}) \times f(VPD) \times APAR$$

$$APAR = PAR \times FPAR \quad (3)$$

其中 ϵ_{\max} 为查找表中获得的最大光能利用率, 该参数并不是固定值, 而是随着植被类型的改变而发生变化(Coops *et al.*, 2009), 这些变化的产生主要是由植被生理生态结构以及生长环境不同引起的; T_{\min} 是最小温度, VPD是饱和水汽压差。

MODIS GPP原始产品采用的PAR为入射短波辐射的常数倍(0.45), $fPAR$ 为MOD15A2产品, PAR、 T_{\min} 和VPD由NASA全球陆面数据同化组织(DAO, <http://polar.gsfc.nasa.gov/index.php>)提供, 空间分辨率为1 km, $f(T_{\min})$ 和 $f(VPD)$ 的表达式如下:

$$f(T_{\min}) = \begin{cases} 0, & T_{\min} < T_{\min_{\min}} \\ \frac{T_{\min} - T_{\min_{\min}}}{T_{\min_{\max}} - T_{\min_{\min}}}, & T_{\min_{\min}} < T_{\min} < T_{\min_{\max}} \\ 1, & T_{\min} > T_{\min_{\max}} \end{cases} \quad (4)$$

$$f(VPD) = \begin{cases} 0, & VPD > VPD_{\max} \\ \frac{VPD_{\max} - VPD}{VPD_{\max} - VPD_{\min}}, & VPD_{\min} < VPD < VPD_{\max} \\ 1, & VPD < VPD_{\min} \end{cases} \quad (5)$$

$T_{\min_{\max}}$ 、 $T_{\min_{\min}}$ 、 VPD_{\max} 、 VPD_{\min} 是与植被类型有关的参数, 可以从查找表中获得相应的值。MODIS GPP (MOD17A2)产品中用到的植被类型图是根据马里兰大学分类标准输出的全球植被类型图, MOD_17模型中的查找表见表1 (Running *et al.*, 2000)。

为分析MOD_17模型中各输入参数对模拟结果影响的大小, 文中进行了3个对比实验。GPP_MOD1: 采用站点气象数据(T_{\min} 、VPD和PAR)和其他默认参

数(ϵ_{\max} 、 $T_{\min_{\max}}$ 、 $T_{\min_{\min}}$ 、 VPD_{\max} 、 VPD_{\min} 和 $fPAR$)进行站点GPP的估算; GPP_MOD2: 采用站点观测的气象数据和由站点通量观测数据与APAR计算得到的 ϵ_{\max} 估算站点GPP, 其他参数采用默认值; GPP_MOD3: 考虑到MODIS $fPAR$ 产品中的异常值会对GPP的估算造成影响, 因此在GPP_MOD1和GPP_MOD2改进的参数基础上, 采用GLASS LAI计算得到的 $fPAR$ 估算站点的GPP。

根据站点生长季(4–9月)涡动通量观测的GPP与站点APAR的比值计算得到各植被类型的最大光能利用率, 草地和森林分别为 $1.05 \text{ g C} \cdot (\text{MJ} \cdot \text{APAR})^{-1}$ 、 $1.13 \text{ g C} \cdot (\text{MJ} \cdot \text{APAR})^{-1}$, 查找表中草地和森林默认值分别为 $0.68 \text{ g C} \cdot (\text{MJ} \cdot \text{APAR})^{-1}$ 、 $1.008 \text{ g C} \cdot (\text{MJ} \cdot \text{APAR})^{-1}$ 。GLASS LAI产品经广义神经网络算法处理减少了噪声的影响(Xiao *et al.*, 2014), $fPAR$ 产品根据公式(6)由GLASS LAI (Jarvis & Leverenz, 1983)计算得到:

$$fPAR = 1 - (e^{(-K \times LAI)}) \quad (6)$$

其中 K 为消光系数, 草地和森林的值均设为0.5, 同原始MODIS GPP算法和Biome-BGC模型中的设置(Running *et al.*, 2000)保持一致。图4为MODIS $fPAR$ 与计算得到的GLASS $fPAR$ 季节变化对比图, 相比原始的 $fPAR$, GLASS产品波动性较小, 年内变化曲线比较平滑, 去除了大部分噪声的影响。

2.2 GPP时间序列分析及其对气候变化的响应

在研究植被生长或气候变化特征时, 通常采用线性回归模型的斜率表征植被在一段时期的变化趋势。文中采用一元线性回归模型对植被GPP时间序列进行拟合:

$$y = a + bx + \epsilon \quad (7)$$

式中 y 表示植被生长状况的因变量(如GPP), x 为自变量表示时间, 斜率 b 为线性回归方程对植被变化的量化指标, a 和 ϵ 分别表示线性回归方程的截距和误差。文中利用最小一乘法(least absolute deviation, LAD)确定回归模型的参数, 最小一乘法计算回归模型参数的准则为观测值与拟合值的绝对偏差值之和最小, 如下式所示:

$$\Delta = \min \left(\sum_{i=1}^n |y_i - \bar{y}_i| \right) \quad (8)$$

式中 Δ 为观测值与拟合值的绝对偏差值之和的最小值, y_i 为观测值, \bar{y}_i 为模型拟合值, i 为观测值个数, n 为观测值总数。

表1 MOD_17模型查找表
Table 1 The lookup table of MOD_17 model

植被类型 Vegetation type	最大光能利用率 Maximum light use efficiency (g·MJ-APAR ⁻¹)	最低温度最小值 Lowest minimum temperature, $T_{\min\min}$ (°C)	最低温度最大值 Highest minimum temperature, $T_{\min\max}$ (°C)	饱和水汽压差最大值 Maximum vapor pressure deficit (VPD_{\max}) (Pa)	饱和水汽压差最小值 Minimum vapor pressure deficit (VPD_{\min}) (Pa)
常绿针叶林 Evergreen needle-leaved forest	1.008	-8	8.31	2 500	650
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest	1.159	-8	9.09	3 900	1 100
落叶针叶林 Deciduous needle-leaved forest	1.103	-8	10.44	3 100	650
落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest	1.044	-8	7.94	2 500	650
混交林 Mixed forest	1.116	-8	8.50	2 500	650
多树草原 Grassy woodland	0.800	-8	11.39	3 100	930
稀树草原 Savanna	0.768	-8	11.39	3 100	650
郁闭灌丛 Closed shrubland	0.888	-8	8.61	3 100	650
开放灌丛 Open shrubland	0.774	-8	8.80	3 600	650
草原 Grassland	0.680	-8	12.02	3 500	650
农田 Cropland	0.680	-8	12.02	4 100	650

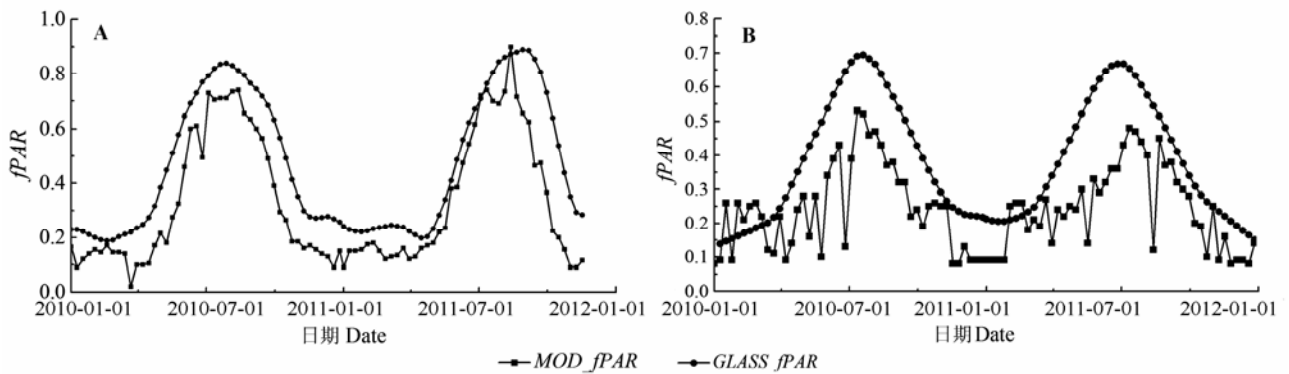


图4 阿柔(A)和关滩站(B)中分辨率成像光谱仪吸收的光合有效辐射吸收比例($fPAR$)和全球陆表参量吸收的光合有效辐射吸收比例产品对比图。 MOD_fPAR , 中分辨率成像光谱仪光合有效辐射吸收比例; $GLASS_fPAR$, 全球陆表参量光合有效辐射吸收比例。

Fig. 4 Comparisons between the moderate-resolution imaging spectroradiometer fraction of absorbed photosynthetically active radiation (MOD_fPAR) and the Global Land Surface Satellite fraction of absorbed photosynthetically active radiation ($GLASS_fPAR$) at the Arou Station (A) and the Guantan Station (B).

最小一乘法在拟合过程中能将异常值对模型参数的影响最小化(Birkes & Dodge, 1993), 对于误差分布不对称或重尾的对称误差分布数据, 最小一乘法的回归效果较好。

为研究植被GPP对单一气候因子的响应作用, 文中采用基于像元的空间分析法进行植被GPP与温度、降水和VPD的偏相关分析, 偏相关系数计算公式如下:

$$R_{12,34} = \frac{R_{12,3} - R_{14,3}R_{24,3}}{\sqrt{(1 - R_{14,3}^2)(1 - R_{24,3}^2)}} \quad (9)$$

式中 $R_{12,34}$ 为固定3、4变量情况下, 1和2两个变量的

偏相关系数, $R_{12,3} = \frac{R_{1,2} - R_{1,3}R_{2,3}}{\sqrt{(1 - R_{1,3}^2)(1 - R_{2,3}^2)}}$, $R_{14,3}$ 和 $R_{24,3}$

的计算与 $R_{12,3}$ 的计算相同, $R_{1,2}$ 、 $R_{1,3}$ 、 $R_{2,3}$ 为1和2变量、1和3变量、2和3变量之间的简单线性相关系数。偏相关系数与简单相关系数相比, 更能反映两变量间的关系。

3 结果和分析

3.1 站点GPP估算结果

原始的MODIS GPP产品是利用全球陆面同化

系统获得的气象数据和MODIS *fPAR*产品计算所得, 经阿柔和关滩站点涡动通量数据验证, 表明MODIS *GPP*原始产品在黑河上游的草地和森林站点均存在低估现象, 结果用多元线性回归系数 R^2 和均方根误差(root mean squared error, *RMSE*)表示(如图5所示, 草地: $R^2 = 0.75$, $RMSE = 2.708 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 森林: $R^2 = 0.47$, $RMSE = 2.534 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)。

*GPP_MOD1*实验中, 采用了站点实测的气象数据后, 两个站点的*GPP*估测值较原始产品精度有所提高: 阿柔站 R^2 提高至0.87, $RMSE$ 提高至 $2.277 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 关滩站 R^2 提高至0.68, $RMSE$ 提高至 $1.731 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。*GPP_MOD2*实验中, 将利用站点观测数据重新标定的最大光能利用率代入模型后, *GPP*的值较*GPP_MOD1*有较大提高, 阿柔站 R^2 提高至0.88, $RMSE$ 提高至 $1.154 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 关滩站 R^2 提高至0.73, $RMSE$ 提高至 $1.384 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 重新标定后的森林站最大光能利用率与模型查找表中的值差

异较小, 因此, *MOD2*实验中森林站的改进较小。*GPP_MOD3*的实验是为了减小MODIS *fPAR*产品中可能存在的噪声误差, 会对*GPP*估算结果产生影响。实验结果表明, 采用GLASS *LAI*计算*fPAR*产品后, 估算的*GPP*更接近通量观测值。关滩森林站的改进尤为明显, R^2 提高至0.91, $RMSE$ 提高至 $0.649 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 而阿柔站的 R^2 和 $RMSE$ 稍有提高, 分别提高至0.90和 $1.024 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。原始MODIS产品以及文中3个实验结果的*GPP*季节变化总体趋势与涡动通量观测较为一致, 但存在严重的整体低估现象, 通过改进模型驱动参数, 可显著提高模型精度。

综上所述, *MOD_17*模型的误差源主要存在于气象驱动数据、最大光能利用率和*fPAR*产品。气象驱动数据: 原始产品利用NASA数据同化组织利用全球气象站点3 h的气象数据基于全球环流模型(global circulation model, GCM)制备的分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的气象驱动数据, $1^\circ \times 1^\circ$ 的像元代表地面约

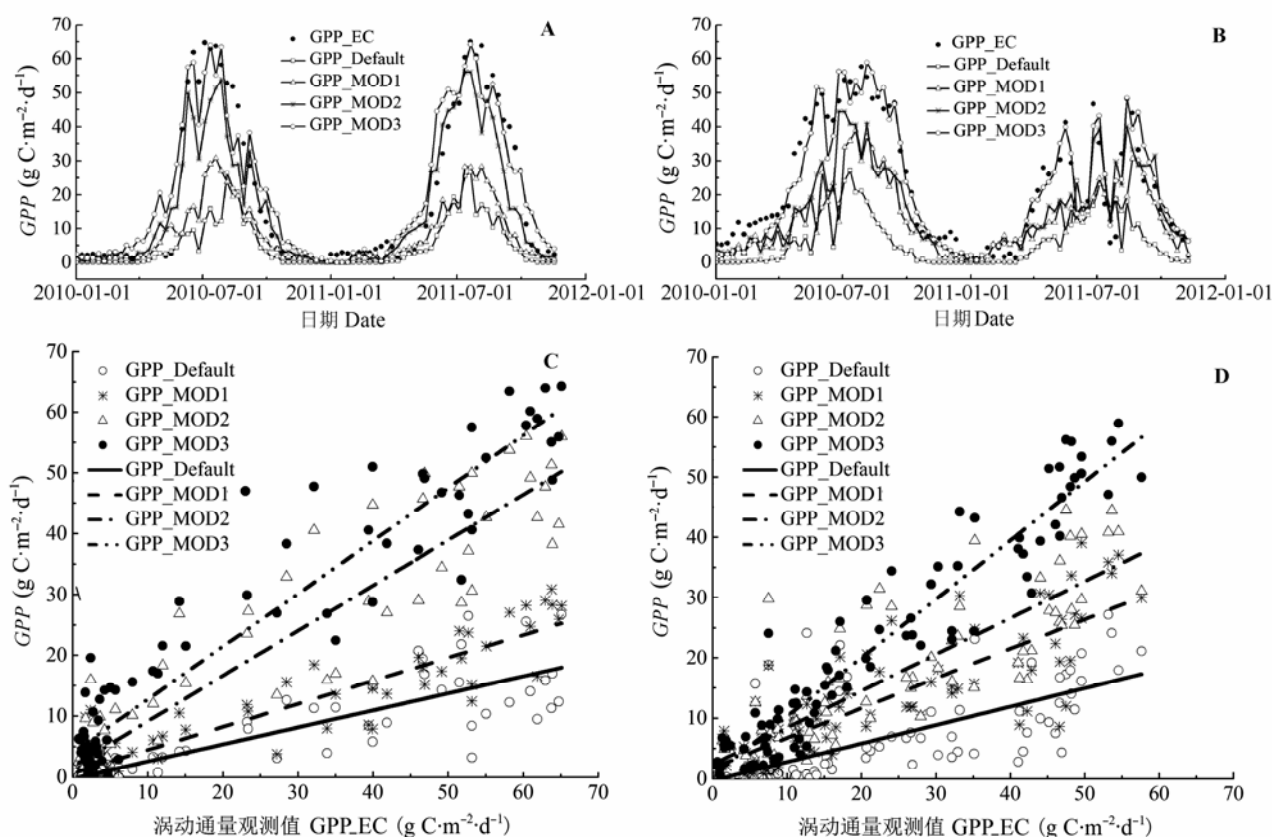


图5 阿柔站(A、C)和关滩站(B、D)原始中分辨率成像光谱仪总初级生产力(*GPP*)产品以及改进后结果对比图。GPP_Default, 原始中分辨率成像光谱仪总初级生产力产品; GPP_MOD1、GPP_MOD2、GPP_MOD3分别为文中介绍的3个对比实验。

Fig. 5 Comparisons of original and optimized gross primary productivity products at the Arou Station (A, C) and the Guantan Station (B, D). GPP_EC, eddy covariance measurements; GPP_Default, original MODIS GPP products; GPP_MOD1, GPP_MOD2, and GPP_MOD3 are the three comparative experiments described in the study.

100 km × 100 km的范围, 为与MOD_17对应, 原始粗分辨率产品插值到1 km存在误差, 利用观测得到的站点气象数据驱动模型时, 站点GPP结果得到一定改善。最大光能利用率: 它是光能利用率模型的重要参数, 利用标定后的参数重新计算GPP, 阿柔站的结果改进十分明显, 关滩站的GPP估算结果也有所提高。*fPAR*产品: 由于原始MODIS *fPAR*产品受到噪声干扰, 对GPP的估算造成一定影响, 利用GLASS *fPAR*重新估算的GPP在森林站点有较大提高。

3.2 黑河上游GPP空间分布及变化趋势分析

通过MOD_17模型在站点的改进及验证, 利用黑河上游1 km的气象驱动数据和流域植被类型图, 本研究针对黑河上游草地和森林进行了GPP的重新估算。图6所示为利用改进的MOD_17模型得到的2001–2012年黑河上游区域GPP的平均值, 由图6A中可以看出GPP的平均取值范围为0–1 213.11 g C·m⁻²·a⁻¹, 平均值为235.19 g C·m⁻²·a⁻¹, 整体分布呈现出东南高、西北低的特点, 西北地区主要为戈壁和少量高寒草甸, 森林和大部分草甸主要分布在中部和东南部。由GPP的变化趋势图(图6B)可以看出, 2001–2012年间GPP以9.58 g C·m⁻²·a⁻¹的平均速率呈上升趋势, 其中只有8.2%的植被GPP呈下降趋势, 下降区域的植被类型主要为高寒草甸。

为研究气候变化对黑河流域上游GPP时空变化的影响, 文中分析了2001–2012年间主要气候因子(年平均温度、年降水量和年平均VPD)的变化趋势。由图7可以得出, 2001–2012年间温度、降水和VPD

表现出明显的空间异质性。温度整体表现为升高的趋势, 平均增幅为0.054 °C·a⁻¹, 温度降低的区域主要集中在西北部的高山地区, 仅占黑河上游的13.7%, 升高的趋势分布在黑河上游大部分地区。黑河上游降水以2.73 mm·a⁻¹的平均速率表现出减少的趋势, 整个区域降水量无明显增加趋势。VPD的变化趋势以上升为主, 平均变化速率为1.109 Pa·a⁻¹。结合Lu等(2009)分析的1987–2002年黑河上游气候变化情况, 得出黑河上游总体气候变化状况趋于暖干化。

3.3 植被GPP对气候变化的响应

黑河上游2001–2012年间植被GPP与温度和降水的偏相关性分析的结果如图8所示, 温度总体为升高趋势, 与植被GPP之间具有很强的正相关, 影响显著的区域约占整体植被区域的3.1%, 但以西北高山为代表的地区, 温度的降低趋势并没有造成植被GPP的明显下降, 所以偏相关分析表现为负相关。降水与植被GPP大部分为微弱的负相关, 只有少数高寒草甸地区为正相关, 影响显著的区域约占整体植被区域的1.7%, 由此说明降水对植被(尤其是森林) GPP的影响并不显著, 这与陈正华等(2008)分析得出黑河上游NPP与降水相关性很小的结论类似。该结论与黑河上游典型的生态环境有关, 金博文(2007)的相关实验表明黑河上游祁连山区降水形态虽以降雨为主, 但冬季降雪受到相对高海拔地带低气温和森林等的影响将在地面积存, 春季气温回升后地面部分积雪将融化补给植被以及河川径流。

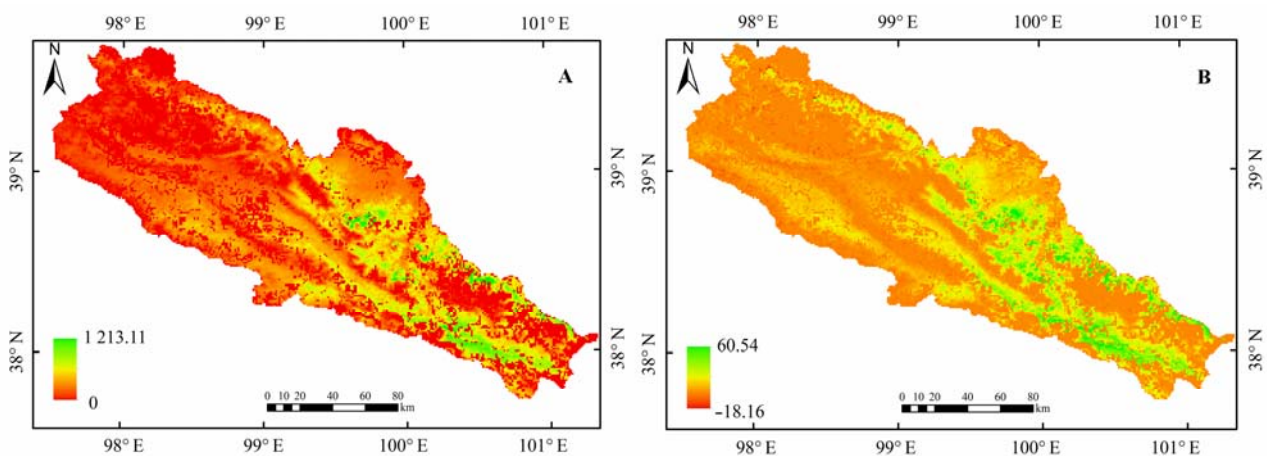


图6 2001–2012年平均总初级生产力(GPP, g C·m⁻²·a⁻¹)空间分布(A)和总初级生产力变化趋势(B)。

Fig. 6 Maps of the spatial distribution of annual mean gross primary productivity (GPP, g C·m⁻²·a⁻¹) (A) and the trend of changes (B) between 2001 and 2012.

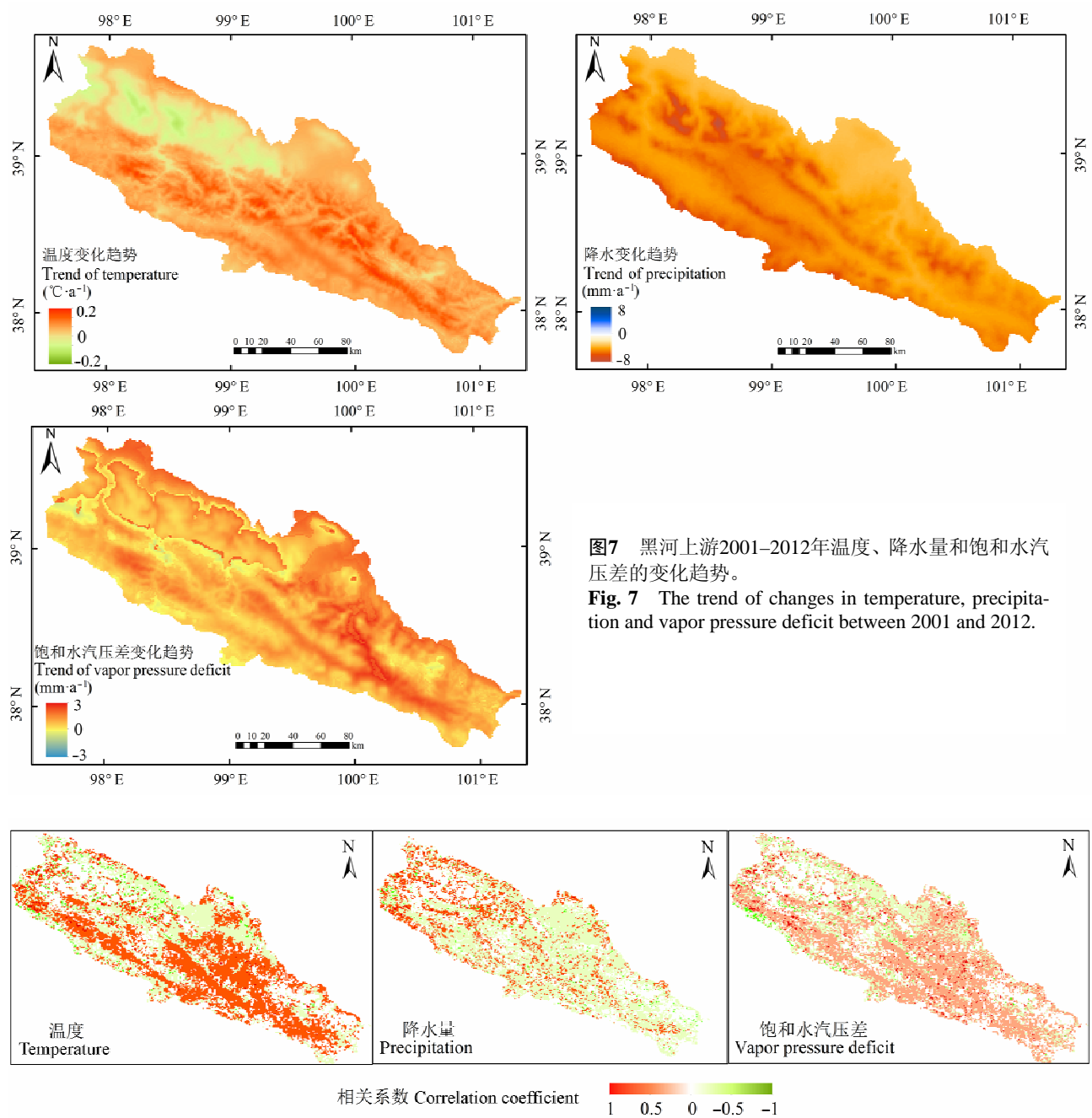


图8 2001–2012年黑河上游总初级生产力与气候因子偏相关性分析结果图。
Fig. 8 The maps of partial correlations between gross primary productivity and climatic factors in the upstream of Heihe River Basin between 2001 and 2012.

VPD与植被GPP大部分区域呈正相关, 偏相关系数主要集中在0–0.5范围内, VPD影响着植被气孔的闭合, VPD的增大能促进植被气孔张开, 有利于植被吸收水分进行光合作用, 但VPD超过一定阈值时会对植被的生长起抑制作用。

4 结论和讨论

本文基于阿柔和关滩站点的涡动通量观测数据,

验证了黑河上游2010–2011年原始MODIS GPP产品。通过对模型参数的改进, 在重新估算黑河上游2001–2012年时间序列GPP的基础上, 揭示了12年植被GPP的变化趋势, 分析了植被GPP对气候变化的响应机制。

(1) MODIS GPP原始产品在黑河上游主要植被类型站点均存在低估现象。本文通过3个对比实验分析得知模型估测偏差主要存在于模型本身的参数以

及模型输入参数,这与Wang等(2013)在黑河流域站点得出的结论一致。与以往研究不同的是,本文采用广义神经网络算法得到的LAI重新计算fPAR,比现有研究中采用滤波算法解决fPAR产品噪声的问题更有效,最终GPP的估测结果更接近涡动站点的观测值。

(2) MODIS GPP产品的改进可以通过3个方面实现:第一,充分利用已有通量组网的通量观测数据来校正模型参数;第二,对fPAR数据的改进可以利用已有的高质量产品,减小数据噪声对GPP估算的影响;第三,采用更加精细的植被类型图,因为不同树种、不同草地类型以及不同农田的参数差异都很大。

(3)涡动观测站点与遥感影像空间尺度的不匹配给模型模拟结果带来一定的不确定性,涡动观测的通量数据代表的是不规则源区内的通量,而基于遥感的光能利用率模型估算植被生产力都是基于规则像元。可通过估算得到涡动观测的有效源区,利用高分辨率遥感数据分别计算源区内每个像元的碳通量值,进行相关运算,得到与涡动相关在空间尺度上相匹配的通量值。

(4)利用改进的MOD_17模型估算了黑河上游时间序列植被GPP,2001–2012年间GPP以 $9.58\text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的平均速率呈上升趋势。由偏相关分析结果得出平均GPP与年平均温度和平均VPD相关关系显著,大部分区域为正相关;而与年降水量的关系并不显著,大部分区域表现为负相关,说明暖干化的气候变化趋势并未对GPP造成明显的负影响,气温的升高会导致祁连山冰雪融化加快,也为植被的生长提供了必需的水分,使得植被生长季延长,固碳能力加强。

综合MODIS GPP产品的现有研究,发现其在许多地区的站点都存在低估的现象,如Turner等(2006b)、Coops等(2007)的研究都验证了这一结论。本文选择生态环境敏感脆弱的寒旱区的不同植被类型站点为研究对象,对原始MODIS GPP产品进行了改进,详细描述了时间序列植被GPP的变化趋势及其与主要气候因子(年平均温度、年降水量和VPD)的关系,对于寒区和旱区天然林、草场保护具有重要意义。

基金项目 国家重点基础研究发展计划“973计划”

(2013CB733404)和中央级公益性科研院所基金(IFRIT201302)。

致谢 感谢寒区旱区科学数据中心提供气象数据、北京师范大学提供全球陆表参量LAI等产品。

参考文献

- Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, Ciais P, Jung M, Carvalhais N, Rödenbeck C, Arain MA, Baldocchi D, Bonan GB, Bondeau A, Cescatti A, Lasslop G, Lindroth A, Lomas M, Luysaert S, Margolis H, Oleson KW, Rouspard O, Veenendaal E, Viovy N, Williams C, Lan Woodward F, Papale D (2010). Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate. *Science*, 329, 834–838.
- Birkes D, Dodge Y (1993). *Alternative Methods of Regression*. John Wiley & Sons, New York. 228.
- Chen ZH, Ma QY, Wang J, Qi Y, Li J, Huang CL, Ma MG, Yang GJ (2008). Estimation of Heihe Basin net primary productivity using the CASA model. *Journal of Natural Resources*, 23, 263–273. (in Chinese with English abstract) [陈正华, 麻清源, 王建, 祁元, 李净, 黄春林, 马明国, 杨国靖 (2008). 利用CASA模型估算黑河流域净第一性生产力. *自然资源学报*, 23, 263–273.]
- Coops NC, Black TA, Jassal RS, Trofymow JA, Morgenstern K (2007). Comparison of MODIS, eddy covariance determined and physiologically modelled gross primary production (GPP) in a Douglas-fir forest stand. *Remote Sensing of Environment*, 107, 385–401.
- Coops NC, Ferster CJ, Waring RH, Nightingale J (2009). Comparison of three models for predicting gross primary production across and within forested ecoregions in the contiguous United States. *Remote Sensing of Environment*, 113, 680–690.
- Dai ZH, Birdsey RA, Johnson KD, Dupuy JM, Hernandez-Stefanoni JL, Richardson K (2014). Modeling carbon stocks in a secondary tropical dry forest in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Water, Air, & Soil Pollution*, 225, 1925.
- Desai AR, Richardson AD, Moffat AM, Kattge J, Hollinger DY, Barr A, Falge E, Noormets A, Papale D, Reichstein M, Stauch VJ (2008). Cross-site evaluation of eddy covariance GPP and RE decomposition techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 821–838.
- Dury M, Hambuckers A, Warnant P, Henrot A, Favre E, Ouberdous M, François L (2011). Responses of European forest ecosystems to 21st century climate: Assessing changes in interannual variability and fire intensity. *Forest-Biogeosciences and Forestry*, 4, 82–99.
- Guo Y, Li ZY, Chen EX, Tian X, Ling FL (2015). Estimating forest above-ground biomass in the upper reaches of Heihe River Basin using multi-spectral remote sensing. *Scientia*

- Silvae Sinicae*, 51(1), 140–149. (in Chinese with English abstract) [郭云, 李增元, 陈尔学, 田昕, 凌飞龙 (2015). 甘肃黑河流域上游森林地上生物量的多光谱遥感估测. 林业科学, 51(1), 140–149.]
- Heinsch FA, Reeves M, Votava P, Kang SY, Milesi C, Zhao MS, Glassy J, Jolly WM, Loehman R, Bowker CF, Kimball JS, Nemani RR, Running SW (2003). *GPP and NPP (MOD17A2/A3) Products, NASA MODIS Land Algorithm. MOD17 User's Guide*, 1–57. http://research.eeescience.utoledo.edu/lees/papers_pdf/MOD17UsersGuide.pdf. Cited: 2003-12-02.
- Jarvis PG, Leverenz JW (1983). Productivity of temperate, deciduous and evergreen forests. In: Lange OL, Nobel PS, Osmond CB, Ziegler H eds. *Physiological Plant Ecology IV*. Springer-Verlag, New York. 233–280.
- Jin BW (2007). *Measurement and Study on Climatological and Hydrological Effect and Ecological Function of Water Conservation Forest in Qilian Mountains*. PhD dissertation, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing. 41–48. (in Chinese with English abstract) [金博文 (2007). 祁连山水源涵养林的气候和水文效应及生态功能试验研究. 博士学位论文, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 北京. 41–48.]
- Li X, Ma MG, Wang J, Liu Q, Che T, Hu ZY, Xiao Q, Liu QH, Su PX, Chu RZ, Jin R, Wang WZ, Ran YH (2008). Simultaneous remote sensing and ground-based experiment in the Heihe River Basin: Scientific objectives and experiment design. *Advances in Earth Science*, 23, 897–914. (in Chinese with English abstract) [李新, 马明国, 王建, 刘强, 车涛, 胡泽勇, 肖青, 柳钦火, 苏培玺, 楚荣忠, 晋锐, 王维真, 冉有华 (2008). 黑河流域遥感—地面观测同步试验: 科学目标与试验方案. 地球科学进展, 23, 897–914.]
- Li XP (2013). *The Simulation of NPP Based on Remote Sensing and Its Temporal-Spatial Analysis Over Heihe River Basin*. Master degree dissertation, Shaanxi Normal University, Xi'an. 46–48. (in Chinese with English abstract) [李旭谱 (2013). 黑河流域NPP遥感估算及其时空变化特征分析. 硕士学位论文, 陕西师范大学, 西安. 46–48.]
- Long HL, Li XB, Huang LM, Wang H, Wei DD (2010). Net primary productivity in grassland ecosystem in Inner Mongolia and its relationship with climate. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 781–791. (in Chinese with English abstract) [龙慧灵, 李晓兵, 黄玲梅, 王宏, 魏丹丹 (2010). 内蒙古草原生态系统净初级生产力及其与气候的关系. 植物生态学报, 34, 781–791.]
- Lu L, Li X, Veroustraete F (2005). Estimation of net primary productivity of Heihe River Basin using remote sensing. *Journal of Desert Research*, 25, 823–830. (in Chinese with English abstract) [卢玲, 李新, Veroustraete F (2005). 黑河流域植被净初级生产力的遥感估算. 中国沙漠, 25, 823–830.]
- Lu L, Li X, Veroustraete F, Kang E, Wang J (2009). Analysing the forcing mechanisms for net primary productivity changes in the Heihe River Basin, northwest China. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 793–816.
- Nemani RR, Keeling CD, Hashimoto H, Jolly WM, Piper SC, Tucker CJ, Myneni RB, Running SW (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300, 1560–1563.
- Pan XD (2012). *Development of High Spatial and Temporal Resolution Meteorological Forcing Data in the Heihe River Basin: Model Simulation and Data Assimilation*. PhD dissertation, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou. 2–8. (in Chinese with English abstract) [潘小多 (2012). 黑河流域高分辨率大气驱动数据的制备: 模拟与数据同化. 博士学位论文, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州. 2–8.]
- Piao SL, Wang XH, Ciais P, Zhu B, Wang T, Liu J (2011). Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006. *Global Change Biology*, 17, 3228–3239.
- Plummer S (2006). On validation of the MODIS gross primary production product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 1936–1938.
- Ran YH, Li X, Lu L, Li ZY (2012). Large-scale land cover mapping with the integration of multi-source information based on the Dempster-Shafer theory. *International Journal of Geographical Information Science*, 26, 169–191. doi: 10.1080/13658816.2011.577745.
- Running SW, Nemani R, Glassy JM, Thornton PE (1999). *MODIS Daily Photosynthesis (PSN) and Annual Net Primary Production (NPP) Product (MOD17), Algorithm Theoretical Basis Document. Version 3.0*. University of Montana, SCF At-Launch algorithm ATBD Document. http://MODIS.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod16.pdf. Cited: 2015-07-03.
- Running SW, Thornton PE, Nemani R, Glassy J (2000). Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. In: Sala OE, Jackson RB, Mooney H eds. *Methods in Ecosystem Science*. Springer-Verlag, New York. 44–57.
- Turner DP, Ritts WD, Cohen WB, Gower ST, Running SW, Zhao MS, Costa MH, Kirschbaum AA, Ham JM, Saleska SR, Ahl DE (2006b). Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 102, 282–292.
- Wang XF (2012). *Terrestrial Ecosystem Productivity Simulation over Heihe River Basin*. PhD dissertation, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing. 2–8. (in

doi: 10.17521/cjpe.2015.0253

- Chinese with English abstract) [王旭峰 (2012). 黑河流域陆地生态系统生产力模拟研究. 博士学位论文, 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 北京. 2–8.]
- Wang XF, Ma MG, Li X, Song Y, Tan JL, Huang GH, Zhang ZH, Zhao TB, Feng JM, Ma ZG, Wei W, Bai YF (2013). Validation of MODIS-GPP product at 10 flux sites in northern China. *International Journal of Remote Sensing*, 34, 587–599.
- Wang XF, Ma MG, Song Y, Tan JL, Wang HB (2014). Coupling of a biogeochemical model with a simultaneous heat and water model and its evaluation at an alpine meadow site. *Environmental Earth Sciences*, 72, 4085–4096.
- Xiao ZQ, Liang SL, Wang JD, Chen P, Yin XJ, Zhang LQ, Song JL (2014). Use of general regression neural networks for generating the GLASS Leaf Area Index Product from time-series MODIS surface reflectance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52, 209–223.
- Yang FH, Lchii K, White MA, Hashimoto H, Michaelis AR, Votava P, Zhu AX, Huete A, Running SW, Nemani RR (2007). Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through support vector machine approach. *Remote Sensing of Environment*, 110, 109–122.
- Zhang YQ, Yu Q, Jiang J, Tang YH (2008). Calibration of Terra/MODIS gross primary production over an irrigated cropland on the North China Plain and an alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 14, 757–767.
- Zhou GS, Wang YH, Jiang YL, Yang LM (2002). Conversion of terrestrial ecosystems and carbon cycling. *Acta Phytocologica Sinica*, 26, 250–254. (in Chinese with English abstract) [周广胜, 王玉辉, 蒋延玲, 杨利民 (2002). 陆地生态系统类型转变与碳循环. 植物生态学报, 26, 250–254.]
- 责任编辑: 张扬建 责任编辑: 王 葳



植物生态学报官网



微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布



微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览