

基于改进 PT-hybrid 算法的地表潜热通量变化分析

周耀坤, 邢万秋*

(河海大学 水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 潜热通量 (LE) 影响陆地生态系统的水量平衡和能量收支。【目的】提高不同植被类型对应的地表潜热通量的反演精度对于探究生态水文过程具有重要的现实意义。【方法】本研究采用动态植被模型——LPJ-GUESS 模型, 引入表征植被占比的参数 f_v 对 PT-hybrid 潜热通量算法加以改进, 从而提高陆面蒸散发的反演能力。【结果】根据全球 49 个通量站点的实地观测 LE 验证改进后的算法, 改进算法所得 LE 值与实测值的决定系数 R^2 从 0.63 增加到 0.74, 均方根误差 $RMSE$ 从 17.1 W/m^2 降低到 11.7 W/m^2 。进一步分析 1982—2014 年全球陆地 LE 变化特征, 发现低纬度地区的 LE 均高于高纬度地区, 并且 LE 在同一纬度上也呈现出不同的分布趋势。【结论】改进后的模型对地表潜热通量模拟精度显著提高, 有助于精细刻画地表 LE 的时空分布特征。

关键词: PT-hybrid 算法; 动态植被模型; 潜热通量; 亚像元; 时空演变特性

中图分类号: P343

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020488

OSID:



周耀坤, 邢万秋. 基于改进 PT-hybrid 算法的地表潜热通量变化分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 107-113.

ZHOU Yaokun, XING Wanqiu. Calculating Latent Heat Flux from Soil Surface using the Improved PT-hybrid Algorithm[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 107-113.

0 引言

【研究意义】地表潜热通量 (LE) 是指从陆地表面向大气中水分蒸发和植被蒸腾的热通量, 对于理解地球表面能量收支和地表-大气相互作用具有重要意义^[1-2]。 LE 的准确模拟对于了解大范围内各生态系统的稳定性起着至关重要的作用。【研究进展】目前, 通过在全球范围内建立的涡流协方差通量塔和卫星观测站, 大量的 LE 模型和算法被开发以适应不同生态系统的要求^[3-5]。Priestley-Taylor (PT) 算法是一种较为简化的算法, 该算法避免了使用表面阻抗, 算法中参数产生的误差减少, 从而提高了 LE 估算的准确性^[6]。由于 PT 算法本身并没有考虑下垫面植被类型的影响, Yao 等^[7]基于 Merry 再分析数据和 Modis 卫星数据对 PT 算法进行了改进, 该研究在原有的 PT 算法中引入了下垫面不同的植被功能类型, 并给每一种植被类型率定了一套参数。研究表明, 考虑下垫面特征的 PT 算法能有效提高 LE 模拟的准确性。【切入点】然而, 目前大多数的算法都只考虑了单一像元, 即一个栅格内往往只考虑一种植被类型, 但在陆地生态系统较为复杂的区域, 考虑单一像元的算法会产生较大的误差^[8]。【拟解决的关键问题】为了避免这种误差, 本研究结合一种动态植被模型——LPJ-GUESS 模型, 并引入亚

像元法, 对 PT 算法进行改进, 利用改进的算法对全球陆地 LE 进行反演, 并分析全球植被与陆地 LE 的时空分布特征。

1 数据来源

1.1 气象数据和遥感数据

本文所选取的气象数据为欧洲天气预报中心 (ECMWF) 提供的空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的全球再分析气象数据集, 时间跨度为 1982—2014 年 (<http://apps.ecmwf.int/datasets/>)。

本文选取的遥感数据主要为美国航空航天局 (NASA) 提供的全球农业监测系统 (GIMMS) 全球 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 归一化植被指数 (NDVI) 1982—2014 年数据集 (<https://glam1.gsfc.nasa.gov/>)。本文选取的气象数据和遥感数据都具有长时间序列的优势, 满足本文的研究需求。

1.2 涡度通量数据

涡度通量数据主要用于验证和评价算法改进前后的性能。本研究采取 FLUXNET2015 数据集, 该数据集包括从全球多个区域通量站点收集的数据 (<https://fluxnet.fluxdata.org/data/fluxnet2015-dataset/>), 本次研究选取了其中 49 个通量站点, 如图 1 所示。数据主要包括 2012—2014 年的 LE 年值序列, 用于验证改进前后的算法。

1.3 其他数据

LPJ-GUESS 所使用的 CO_2 质量浓度数据来源于 1980—2000 年的冰芯观测^[9], 土壤类型数据来源于联合国粮食和农业组织土壤数据集。

投稿日期: 2020-08-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51809073); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (B200201005)

作者简介: 周耀坤 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事气候变化对水文水资源影响的研究。E-mail: zhouyaokun123@163.com

通信作者: 邢万秋, 女, 副教授。E-mail: 20170910@hhu.edu.cn

2 研究方法

2.1 LPJ-GUESS 模型介绍

LPJ-GUESS 模型是一种针对区域和全球应用进行优化的动态植被模型^[10]。模型在全球动态植被模型 LPJ-DGVM 的基础上发展而来,对物种个体观测水平的模拟进行了细化,该模型能够有效模拟气候变化下植被的瞬时响应,常用于描述各种植被地理分布格局的动态变化、生理过程、生物物理和生物地球化学过程等^[11]。模型主要输入数据有月平均气候(气温、降水和日照百分率)、年平均 CO₂ 质量浓度以及土壤类型数据。本研究基于该模型模拟地表分布最广泛的 5 种植被类型,落叶阔叶林(DBF)、落叶针叶林(DNF)、常绿阔叶林(EBF)、常绿针叶林(ENF)、稀树草原(GRA),分析地表植被功能类型变化对于陆地蒸发能力的影响。

$$LE = \phi \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) [k_0 + k_1 T_a + k_2 RH^{VPD} + (k_3 NDVI - k_4) VPD], \quad (1)$$

式中: LE 为潜热通量(W/m²); ϕ 为湿表面状况的 PT 系数,值为 1.26; Δ 为饱和蒸汽压曲线的斜率(kPa/°C); γ 为湿度比常数(kPa/°C); R_n 和 G 分别代表了太阳净辐射和土壤热通量(W/m²); k_i ($i=0, \dots, 4$) 是经验系数。其中, G 是由植被覆盖率 f_c 和 R_n 根据经验方法得到的,计算式为:

$$G = a_g (1 - f_c) R_n, \quad (2)$$

$$f_c = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}}, \quad (3)$$

式中: a_g 值为 0.18; $NDVI_{\min}$ 和 $NDVI_{\max}$ 分别为研究时段内的 $NDVI$ 的最小值和最大值,设定为常数: 0.05 和 0.95^[12]。

相比于其他物理算法而言,本研究选用 PT-hybrid 算法具有以下几点优势: ①该算法只需要 R_n 、 T_a 、 $NDVI$ 、 RH 和 VPD 等气象要素,简化了输入参数,更适用于长序列时间尺度下的 LE 模拟; ②该算法避

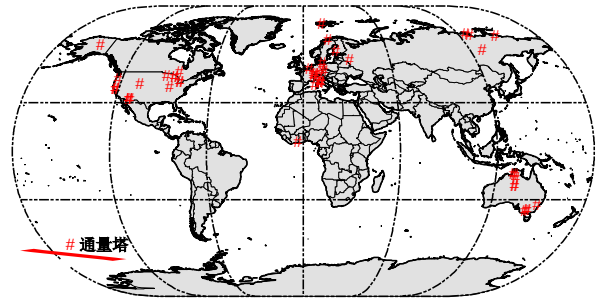


图 1 研究区 49 个涡度通量塔的空间分布

Fig.1 The spatial distribution of 49 eddy covariance flux tower sites used in this study

2.2 PT-hybrid 算法以及算法改进介绍

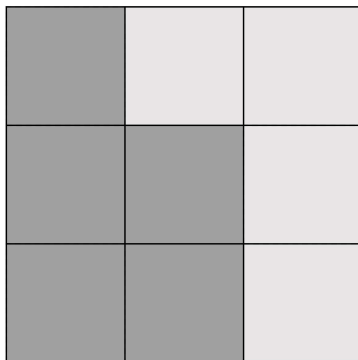
本研究是在最近的 PT-hybrid 算法基础上,考虑了垫面植被动态变化以及加入亚像元方法,对现有模型进行改进。PT-hybrid 算法是由 PT 模型发展而来,其计算式为:

免使用温度差或湿度差,并且不考虑空气动力和表面阻抗,通过削弱输入参数带来的误差大幅度减小了算法结果误差; ③该算法针对不同的垫面植被类型率定了不同的参数,如表 1 所示,从而提高了 LE 模拟的准确度。

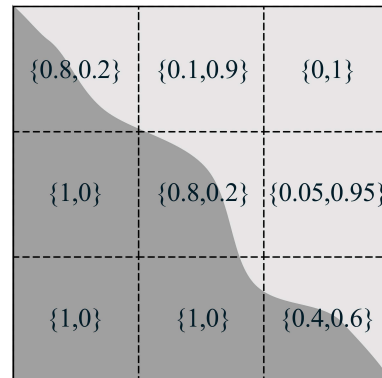
表 1 基于全球植被功能类型优化所得系数

Table 1 Coefficients based on global vegetation functional type optimization

植被功能类型	不同植被功能类型的系数				
	K_0	K_1	K_2	K_3	K_4
GRA	0.248 9	0.003 9	0.386 1	0.231 0	0.669 5
DNF	0.394 1	0.003 3	0.000 1	0.301 9	0.617 2
DBF	0.549 9	0.007 8	0.007 8	0.547 3	0.816 4
EBF	0.469 8	0.008 1	0.105 3	0.169 4	0.189 1
ENF	0.466 3	0.008 0	0.107 2	0.164 2	0.527 2



(a) 以往算法默认植被分布



(b) 实际植被分布

图 2 亚像元法解释图

Fig.2 Sketch map of sub-pixel method

然而在该算法中,输入的地表植被类型是静态且恒定的。考虑到垫面植被会因气候变化和人类活动

而发生变化,本研究引入动态变化的植被类型来代替土地覆盖类型产品作为算法驱动数据。另外,引入亚

像元法,避免了原算法运用单一像元在陆地生态系统较为复杂的地区而产生较大的误差,如图2所示。

图2(a)为以往算法输入的植被覆盖类型,一个栅格只考虑了一种植被类型,而大多数区域下垫面植被类型应呈现图2(b)的分布,因此,引入亚像元法将栅格细分,根据LPJ-GUESS模型的输出—不同

植被功能类型在每一个栅格的叶面积指数(LAI),用不同植被类型的叶面积指数占每一个栅格总叶面积指数的比重来表征不同植被功能类型在每一个栅格的占比,通过考虑同一栅格不同植被占比变化来减少算法误差。本研究引入参数 f_v 来表征不同植被功能类型的占比。公式为:

$$LE = \sum \phi \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) [k_0 + k_1 T_a + k_2 RH^{VPD} + (k_3 NDVI - k_4) VPD] \cdot f_v, \quad (4)$$

式中: f_v 是由LPJ-GUESS模型模拟得到的不同PFTs的LAI计算得到。 k_i ($i=0, \dots, 4$)是经验系数,如表1所示。

2.3 Mann-Kendall 显著性检验

Mann-Kendall 检验是一种检验水文过程趋势和其他相关物理变量的非参数方法,计算式为:

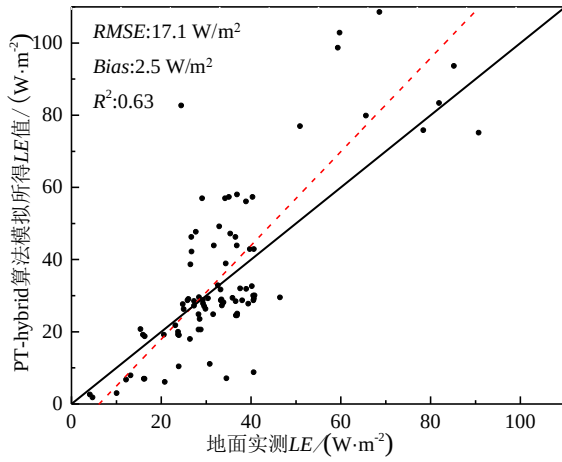
$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(x_k - x_j), \quad (5)$$

式中: x 为独立变量; n 为数据总量,并且满足:

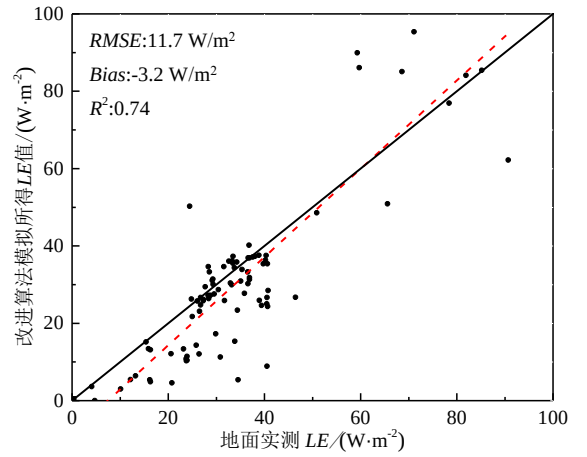
$$\text{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & x_k - x_j > 0 \\ 0 & x_k - x_j = 0 \\ -1 & x_k - x_j < 0 \end{cases} \quad (6)$$

统计量 S 接近正态分布,而统计量 Z 是一个标准正态变量,符合式(7):

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$



(a) PT-hybrid 算法



(b) 改进的算法

图3 基于49个通量站点的年平均LE验证

Fig.3 Comparison of annual LE observed from 49 flux towers and the corresponding estimated LE

为了进一步探究算法改进前后对于长时间序列模拟的效果,本文选取时间序列较长的6个代表性站点(AU-Rig, CA-TP3, IT-Tor, DE-Akm, BE-Lon, US-Prr)的1982—2014年均LE值进行重点分析。如图4所示,除了个别年份外,改进的算法与原算法模拟的LE都呈现一致的趋势性。总体而言,改进的算

法模拟结果要高于原算法的模拟结果。图5展示了上述6个站点下垫面不同植被占比对应的年际变化趋势,由于气候变化和人类活动的影响,区域植被类型在时间尺度上会发生变化。因此,本文提出在算法中引入亚像元法,即在同一栅格里考虑多种动态变化的植被类型,从而优化了算法的模拟。

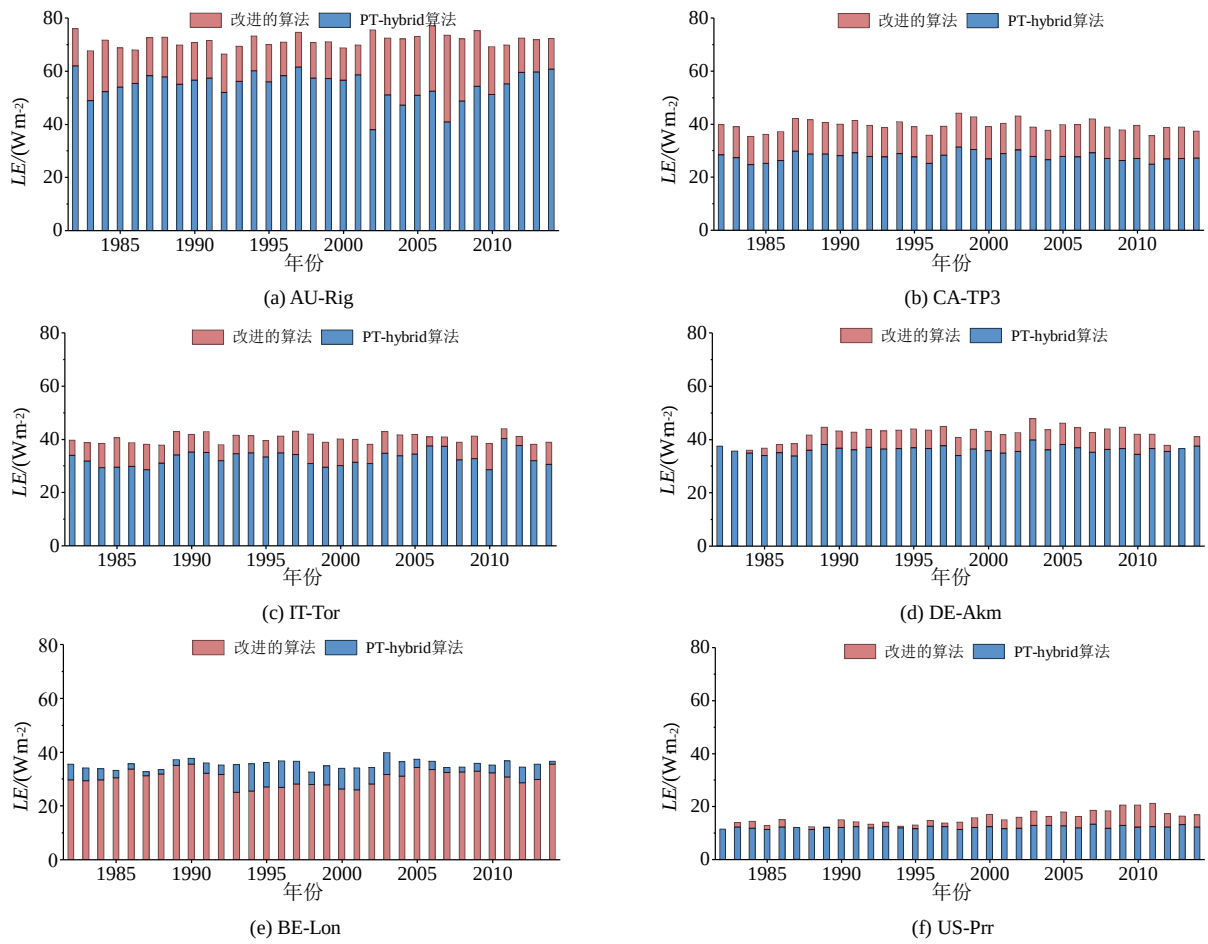


图 4 2 种算法在代表性站点的长时间序列模拟结果对比

Fig.4 Comparison of results of the two algorithms in the long time series simulations at representative sites

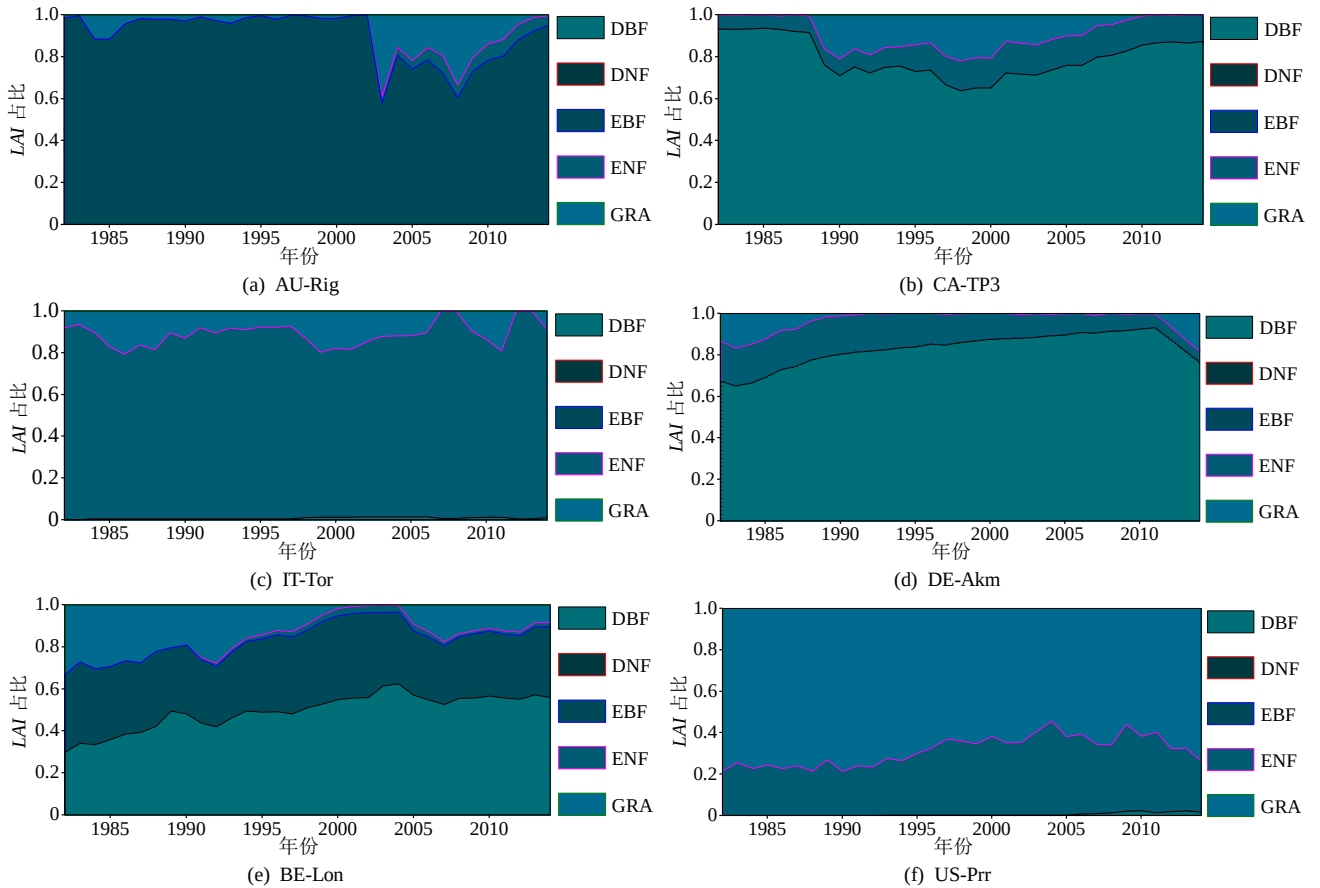


图 5 代表性站点在研究时段内下垫面不同植被功能类型的 LAI 占比变化

Fig.5 Example of a time series for LAI fraction of different PFTs simulated by LPJ-GUESS

3.2 全球 LE 的时空变化特征分析

本文将研究区分为 4 个时间段，分别为 1982—1990、1991—2000、2001—2010 年以及 2011—2014 年，重点从 4 个不同年代的角度分析全球潜热通量的变化。图 6 展示了 4 个年代的全球 LE 分布以及 MK 趋势性检验得到的 Z 值分布。结果表明， LE 显著增加的地区主要分布在北纬 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间，尤其是亚欧大陆的东北部，以及非洲中部地区。而在美国南部，亚欧大陆中部，南美洲和澳洲的大部分地区， LE 呈

下降趋势。从植被变化角度来看，美国南部地区和南美洲中部地区 LE 出现下降趋势是由于 EBF 的减少和 GRA 的增加导致的；而在澳洲，由于近些年澳洲山火频发^[13]，导致森林面积大幅减少，造成 LE 的急剧降低；反观亚欧大陆北部地区，由于全球气候变暖，造成北极冰川融化，导致北极地区林线进一步北移^[14]，而这一趋势在未来也会持续下去，因此亚欧大陆北部 LE 也会持续呈上升趋势。

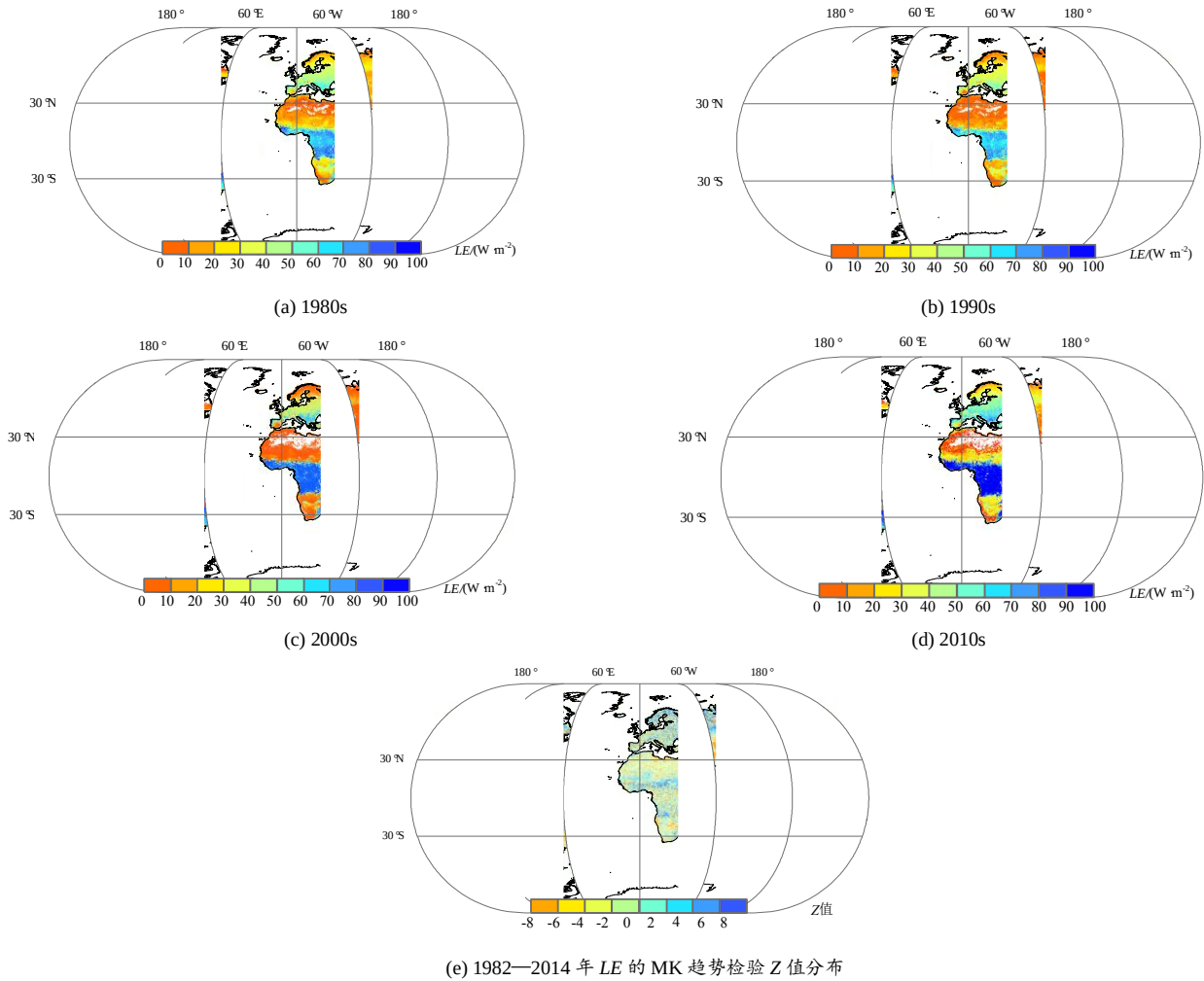
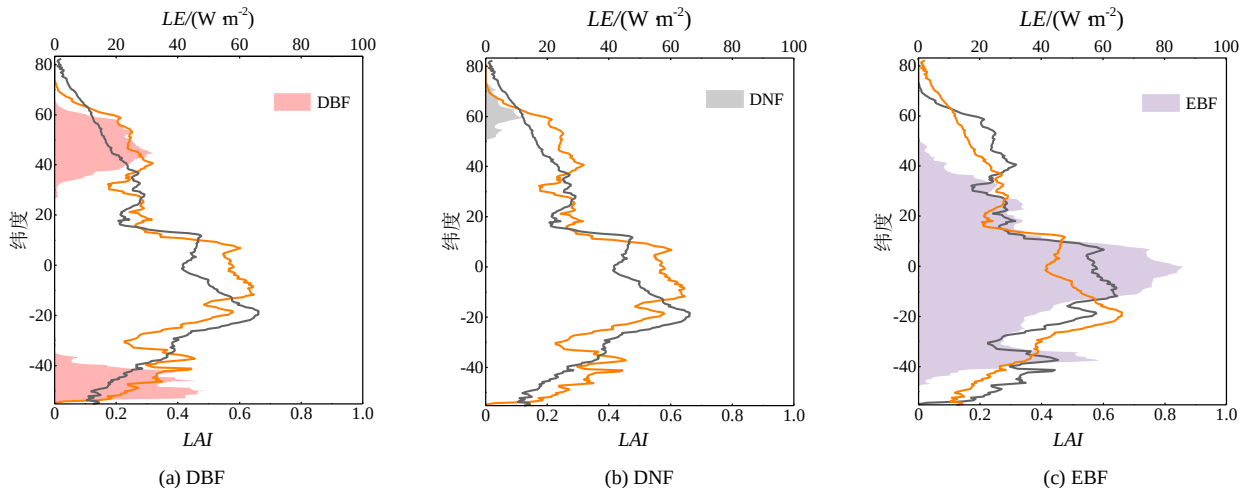


图 6 不同年代的年平均 LE 分布图及 LE 的 MK 趋势检验 Z 值分布

Fig.6 distributions of annual average LE in different decades and Z -value distribution of LE trend



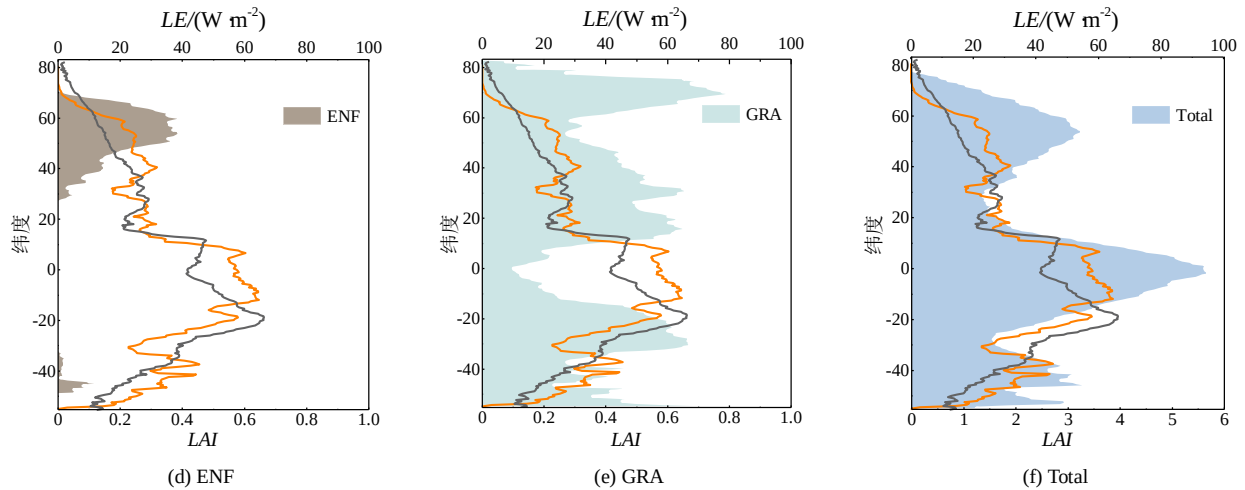


图7 不同PFTs的LAI以及2种算法模拟LE的全球纬度剖面

Fig.7 Global latitudinal profiles of LAI of various PFTs simulated by LPJ-GUESS and LE simulated by two algorithms

本文从不同纬度分析了植被和LE的关系。图7给出了改进前后2种算法模拟得到的LE与LPJ-GUESS模型模拟得到的各种植被类型在纬度上的分布。由图7可知,总叶面积指数LAI和LE在纬度上呈现很强的一致性,分别在南北纬中纬度地区和赤道附近出现了峰值,而DBF、DNF、ENF主要分布在南北纬40°~60°附近,EBF则主要分布在赤道附近,与此同时,GRA的分布与LE呈相反的趋势,与先前的研究结论一致^[15-16],由此可以表明,LE与不同PFTs在全球的分布密切相关。

4 讨论

本文引入LPJ-GUESS模型,模拟得到全球植被的动态变化过程,并对PT算法进行了改进。模拟得到的1982—2014年全球LE值为30~95 W/m²,与Yao等^[17],C Jiménez等^[18]对于全球LE的模拟的总体范围基本保持一致,但基于全球通量塔的地面实测LE验证,本文改进的算法拥有更好的模拟效果,原因在于本文在原算法的基础上做出2点改进:①采用LPJ-GUESS模型来获取全球植被的动态变化过程作为PT算法的输入条件,替代静态的下垫面植被类型;②研究采用亚像元法,对栅格植被进行细化,提高了栅格植被的丰度,从而提高算法模拟的精度。

但由于不同植被内在属性不同,导致了其对于LE的影响程度也不同,本文只考虑了不同植被功能类型对于LE的定性影响,并未从定量的角度进行探讨,因此对于植被与潜热通量关系的研究还有很大空间。此外,不同植被在不同季节的热通量变化也有很大区别,对于年内LE与植被的季节性研究也应纳入今后的考虑范围。

5 结论

1) 通过与全球49个通量塔实测数据的对比,验证了改进算法的精度,改进前后 R^2 从0.63增加到0.74,

同时RMSE从17.1 W/m²降低到11.7 W/m²,从而优化了算法的模拟效果。

2) 采用MK显著性检验方法分析了1982—2014年全球LE时空变化,其中亚欧大陆东北部以及非洲中部地区呈显著的增加趋势,而在亚欧大陆中部,南美洲和澳洲大分布地区,则呈显著的下降趋势。

3) 从纬度角度分析不同植被分布与LE的关系,发现总的叶面积指数和LE在纬度分布上呈较强的一致性,同时出现3个峰值,分别在南北纬40°~60°以及赤道附近。

参考文献:

- [1] XU J, YAO Y J, TAN K R, et al. Integrating latent heat flux products from MODIS and landsat data using multi-resolution Kalman filter method in the midstream of Heihe river basin of northwest China[J]. Remote Sensing, 2019, 11(15): 1 787.
- [2] MU Q Z, ZHAO M S, RUNNING S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1 781-1 800.
- [3] JUNG M, REICHSTEIN M, MARGOLIS H A, et al. Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2011, 116(G3): G00J07.
- [4] 杨宇娜, 汪季, 张成福, 等. 吉兰泰及周边地区蒸散发的时空变化规律[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(S2): 30-36.
YANG Yuna, WANG Ji, ZHANG Chengfu, et al. Spatial and temporal variations of evapotranspiration in Jilantai and its surrounding areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(S2): 30-36.
- [5] 张特, 刘冀, 董晓华, 等. 基于MOD16的渭河流域蒸散发时空分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(8): 121-128.
ZHANG Te, LIU Ji, DONG Xiaohua, et al. Spatiotemporal variation of evapotranspiration in Huan river basin using the MOD16 dataset[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(8): 121-128.
- [6] FISHER J B, TU K P, BALDOCCHI D D. Global estimates of the land-atmosphere water flux based on monthly AVHRR and ISLSCP-II

- data, validated at 16 FLUXNET sites[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(3): 901-919.
- [7] YAO Y J, LIANG S L, LI X L, et al. A satellite-based hybrid algorithm to determine the Priestley-Taylor parameter for global terrestrial latent heat flux estimation across multiple biomes[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 165: 216-233.
- [8] MYINT S W. Urban vegetation mapping using sub-pixel analysis and expert system rules: A critical approach[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(13): 2 645-2 665.
- [9] MCGUIRE A D, SITCH S, CLEIN J S, et al. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the Twentieth Century: Analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15(1): 183-206.
- [10] SMITH B, WARLIND D, ARNETH A, et al. Implications of incorporating N cycling and N limitations on primary production in an individual-based dynamic vegetation model[J]. Biogeosciences, 2014, 11(7): 2 027-2 054.
- [11] WHITLEY R, BERINGER J, HUTLEY L B, et al. Challenges and opportunities in land surface modelling of savanna ecosystems[J]. Biogeosciences, 2017, 14(20): 4 711-4 732.
- [12] ZHANG K, KIMBALL J S, MU Q Z, et al. Satellite based analysis of northern ET trends and associated changes in the regional water balance from 1983 to 2005[J]. Journal of Hydrology, 2009, 379(1/2): 92-110.
- [13] 李家国, 顾行发, 余涛, 等. 澳大利亚东南部森林山火 HJ 卫星遥感监测[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(10): 1 221-1 224.
- LI Jianguo, GU Xingfa, YU Tao, et al. Detection of Australian southeast forest fire using HJ satellite[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(10): 1 221-1 224.
- [14] ZHANG W X, MILLER P A, SMITH B, et al. Tundra shrubification and tree-line advance amplify arctic climate warming: Results from an individual-based dynamic vegetation model[J]. Environmental Research letters, 2013, 8(3): 034023.
- [15] LIANG T G, FENG Q S, CAO J J, et al. Changes in global potential vegetation distributions from 1911 to 2000 as simulated by the Comprehensive Sequential Classification System approach[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(11): 1 298-1 310.
- [16] 吴荣军, 邢晓勇. 不同植被条件下实际蒸散的变化特征及其影响因素: 以淮河流域为例[J]. 应用生态学报, 2016, 27(6): 1 727-1 736.
- WU Rongjun, XING Xiaoyong. Variation characteristics and influencing factors of actual evapotranspiration under various vegetation types: A case study in the Huaihe River Basin, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(6): 1 727-1 736.
- [17] YAO Y J, LIANG S L, XIE X H, et al. Estimation of the terrestrial water budget over northern China by merging multiple datasets[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519(Pt.A): 50-68.
- [18] C JIMÉNEZ, C PRIGENT, B MUELLER, et al. Global intercomparison of 12 land surface heat flux estimates[J]. Journal of Geophysical Research – Atmospheres, 2011, 116(D2).

Calculating Latent Heat Flux from Soil Surface Using the Improved PT-hybrid Algorithm

ZHOU Yaokun, XING Wanqiu *

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: 【Background】 Latent heat flux (*LE*) impacts carbon dynamics and energy budget in the terrestrial ecosystem. Its accurate estimation is essential to understanding energy budget and surface-atmosphere interactions on the Earth surface. Satellite imageries have been used to calculate *LE* at global scale, but most of them overlooked the impact of vegetation diversity at pixel scale. 【Objective】 Considering that carbon flow and heat flux in ecosystems are closely related through photosynthesis and that plants are diverse, calculating *LE* using sub-pixel data should improve its accuracy, especially for complex ecosystems. 【Method】 Here, a dynamic vegetation model, LPJ-GUESS, was proposed to improve the satellite-based PT-hybrid algorithm, by using a parameter f_v to represent the proportions of different PFTs in a pixel. 【Result】 Validation against ground-true data obtained from 49 flux tower sites in the world showed that the proposed model increased the square of correlation coefficient from 0.63 to 0.74, and reduced the root mean square error from 17.1 W/m² to 11.7 W/m². Estimation of the global *LE* from 1982 to 2014 revealed the proposed method was more effective for low latitude areas than for other areas, and that for areas on the same latitude, the *LE* showed complicated spatial distribution. 【Conclusion】 Sub-pixel method was coupled with the *LE* algorithm for the first time to calculate surface latent heat flux. It significantly improved the accuracy and can be used to estimate spatiotemporal distribution of *LE* at different scales.

Key words: PT-hybrid algorithm; dynamic vegetation model; latent heat flux; sub-pixel; spatial-temporal evolution characteristics

责任编辑: 赵宇龙