

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.006

基于多源产品的西南河流源区地表蒸散发时空特征

温馨¹, 周纪¹, 刘绍民², 马燕飞³, 徐自为², 马晋¹

(1. 电子科技大学资源与环境学院, 四川 成都 611731; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875;
3. 邯郸学院经济管理学院, 河北 邯郸 056005)

摘要: 基于5个地面通量站点观测数据, 对ET-EB、MOD16、GLEAM、Zhang-ET和GLDAS共5种地表温度蒸散发产品开展了验证工作, 继而选取精度较好的产品, 采用经验正交分解方法研究了西南河流源区2001—2013年地表蒸散发的时空变化特征。结果表明: 5种产品中, GLEAM的精度较好, 均方根误差为23.4 mm/月; 西南河流源区的地表蒸散发夏季最高, 冬季最低; 从东南向西北, 西南河流源区的地表蒸散发逐渐降低; 2001—2013年, 长江上游和黄河上游地表蒸散发均呈增加趋势, 黄河上游上升幅度最大; 整体上看, 比湿与源区地表蒸散发的相关性最强, 但不同流域地表蒸散发与气温、比湿和降水的相关性不同: 怒江流域、澜沧江流域、长江上游和黄河上游春秋两季的地表蒸散发与比湿相关性较强, 雅鲁藏布江流域、藏南诸河、青海湖水系春秋两季的地表蒸散发与气温的相关性较强; 源区地表蒸散发随着高程的增加而降低, 随着坡度的增加而增加, 在坡向为东南和西北时, 地表蒸散发较高。

关键词: 地表蒸散发; 遥感产品; 经验正交分解; 时空分布特征; 西南河流源区

中图分类号: S161.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2021)03-0032-11

Spatio-temporal characteristics of surface evapotranspiration in source region of rivers in Southwest China based on multi-source products // WEN Xin¹, ZHOU Ji¹, LIU Shaomin², MA Yanfei³, XU Ziwei², MA Jin¹ (1. School of Resources and Environment, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. School of Economics and Management, Handan University, Handan 056005, China)

Abstract: Based on the observation data of five surface flux stations, five kinds of evapotranspiration (ET) products of ET-EB, MOD16, GLEAM, Zhang-ET and GLDAS were verified. Then, the spatio-temporal variation characteristics of surface evapotranspiration in the source region of rivers in Southwest China from 2001 to 2013 were studied by the empirical orthogonal function method. The results show that among the five products, the accuracy of GLEAM is better, and the root mean square error is 23.4 mm/month. The surface evapotranspiration of the source region of rivers in Southwest China has the highest value in summer and the lowest value in winter. From the southeast to the northwest, the surface evapotranspiration of the source region of rivers in Southwest China decreases gradually. From 2001 to 2013, the evapotranspiration of the upper reaches of the Yangtze River and the upper reaches of the Yellow River showed an increasing trend, with the largest increase in the upper reaches of the Yellow River. On the whole, the correlation between specific humidity and surface evapotranspiration is the strongest. However, there are different correlations between surface evapotranspiration and temperature, specific humidity and precipitation in different watersheds. The correlation between surface evapotranspiration and specific humidity is strong in Nujiang River Basin, Lancang River Basin, upper reaches of Yangtze River and upper reaches of Yellow River in spring and autumn, while the surface evapotranspiration of Yarlung Zangbo River Basin, rivers in southern Tibet and Qinghai Lake water system has strong correlation with air temperature. The surface evapotranspiration of the source region of rivers in Southwest China decreases with the increase of elevation and increases with the increase of slope. When the slope direction is southeast and northwest, the surface evapotranspiration is higher.

Key words: evapotranspiration; remote sensing products; empirical orthogonal function; spatio-temporal distribution characteristic; source region of rivers in Southwest China

基金项目: 国家自然科学基金(91647104); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20100100)

作者简介: 温馨(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为地表蒸散发时空变化。E-mail: wx_rs17@163.com

通信作者: 周纪(1983—), 男, 教授, 主要从事定量遥感及无人机遥感研究。E-mail: jzhou233@uestc.edu.cn

西南河流源区位于具有地球“第三极”之称的青藏高原^[1],对全球气候变化的响应具有敏感性和快速性,同时受到大气圈、水圈、冰冻圈的影响,是中低纬度地区地-气热量调节的关键地区^[2-4]。源区孕育了黄河、长江、雅鲁藏布江、澜沧江等 7 条亚洲重要的河流,有着丰富的水资源,但水资源分布集中,水资源的开发利用难度较大^[5-6]。在全球气候变暖的背景下,高原地区的冰川消融正在加速,跨国界河流径流量的时空变化加剧,水资源分配模式的不稳定性逐年增加,这些变化已经引起了国内外学者的广泛关注^[7-10]。

地表蒸散发是能量平衡和水循环的重要组成部分,了解地表蒸散发的变化规律,对提高水资源利用效率、干旱治理、生态环境保护都具有重要的意义^[11-16]。目前蒸散发数据的获取主要有地面蒸散发观测和模型模拟两种手段^[17-18]。地面蒸散发的观测包括蒸渗仪法、液流法、波文比法、涡动相关法和闪烁仪法等,但因为地形、气候、植被类型和土壤性质等原因,站点蒸散发的观测无法捕捉到蒸散发在空间上的异质性^[19-20]。模型模拟方法包括水量平衡法、能量守恒法、互补相关理论、参考作物系数法等以水文学和气象学为基础的方法。随着遥感技术的兴起,获取大范围的特征参数成为可能,使蒸散发研究从站点走向区域成为现实。遥感技术为地表蒸散发模型模拟方法提供了新的驱动数据,用遥感手段进行区域尺度非均匀下垫面的蒸散发估算,已成为遥感应用领域的重要方向。

地表蒸散发在水资源管理中有着广泛的应用,在气候变化的背景下,水热条件的改变对西南河流源区生态格局分布、能源分配利用有着深刻的影响。目前,国内外与西南河流源区地表蒸散发有关的研究主要集中在青藏高原,包括区域蒸散发模拟估算、潜在蒸散发的时空特征分析^[4]和采用水量平衡法进行流域尺度蒸散发估算^[11],这些研究的主要目的是探究和发展适用于青藏高原或高原特殊生态系统的蒸散发算法或模型。如,Chang 等^[21]提出了一种改进的 MOD16 算法估算青藏高原高寒草甸的地表蒸散发;Fei 等^[22]利用 3 种不同的模型估算了青藏高原高山草原生态系统的蒸散发,发现参数考虑了土壤水分状况的 Katerji-Perrier 模型表现最好;Peng 等^[23]交叉比较了 6 种地表蒸散发产品在青藏高原的时空特征,发现 HOLAPS (high resolution land atmosphere parameters from space) 产品和 LandFlux-EVAL 产品的空间格局有相似之处,其他产品 (SEBS_{SRB-PU}、SEBS_{Chen}、PT_{SRB-PU}、PM_{SRB-PU}) 则表现出不同的空间

格局,但所有产品都可以很好地捕捉到蒸散发的季节变化规律。针对青藏高原的地表蒸散发时空变化开展的研究较少,研究方法主要为线性趋势法,如,尹云鹤等^[24]发现青藏高原大部分地区的实际蒸散发在过去 30 年呈上升趋势,主要受降水增加的影响;Gu 等^[25]发现青藏高原高寒草甸的蒸散发主要受降水的影响;Song 等^[26]发现青藏高原的地表蒸散发从东南向西北逐渐降低,相对湿度是青藏高原西北部地表蒸散发变化的主导因子。线性趋势法可以研究一个区域整体的变化趋势,经验正交分解 (empirical orthogonal function, EOF) 方法可以从像元尺度展现要素的时空特征,目前尚未有研究使用 EOF 方法探究西南河流源区地表蒸散发的时空特征。此外,在过去的研究中缺少对源区不同流域地表蒸散发量变化的研究。

本文基于 EOF 方法对西南河流源区地表蒸散发的时空特征进行研究,探究不同流域地表蒸散发的差异及其相关因子,以期揭示西南河流源区地表蒸散发的时空分布特征及其影响因素。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

西南河流源区位于北纬 25°~40°、东经 74°~104°之间,主要包括青藏高原东部、东南部和南部及其毗邻地区,是我国西南诸河的发源地。按照流域划分,可以将西南河流域源区分为雅鲁藏布江流域、澜沧江流域、河西走廊内陆河(南部部分)、长江上游、怒江流域(包括伊洛瓦底江)、黄河上游、藏南诸河及青海湖水系共 8 个一级流域。该地区地表覆盖类型包括林地、草地、农用地、城市及建设用地、水体、冰川积雪、未分类区共 7 类(图 1)。按照海拔高度,源区大致可以分为 5 个区间,如图 2 所示,源区大部分地区的海拔在 3 000 m 以上。

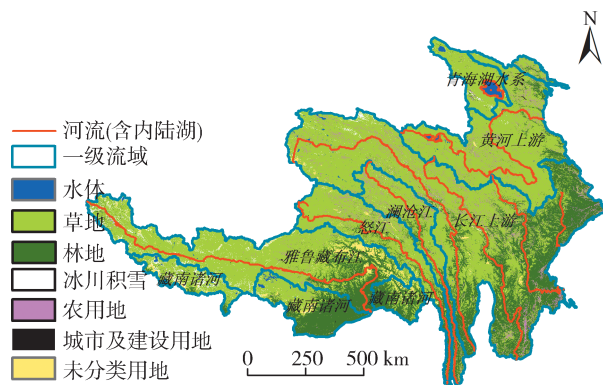


图 1 西南河流源区地表覆盖类型及流域概况

Fig.1 Land cover types and general situation of basin of source region of rivers in Southwest China

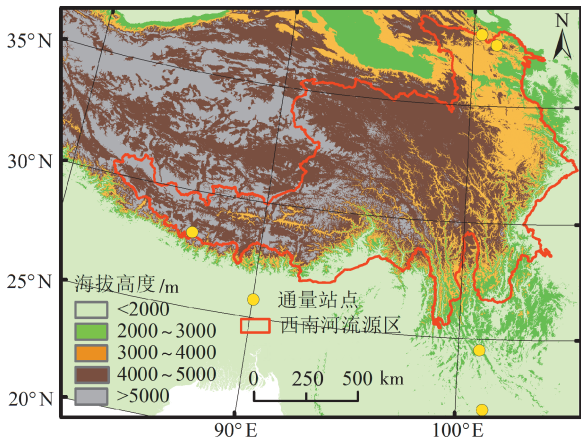


图2 西南河流源区高程分布与通量站点位置

Fig.2 Elevation distribution and flux site location of source region of rivers in Southwest China

1.2 数据来源

1.2.1 通量站点观测数据

采用5个站点通量系统的观测数据对地表蒸散发产品进行站点尺度的评估,由于源区内通量站点较少,且观测数据缺乏,因此补充了源区东南方向最近的两个站点:哀牢山站和西双版纳站(图2)。其中,阿柔站的数据来自黑河流域水文气象网^[27-29],珠峰站的数据来自青藏高原科学数据中心^[30-33](<http://www.tpdatabase.cn>),海北站、哀牢山站和西双版纳站的数据来自中国通量观测研究联盟(<http://www.chinaflux.org/>)。观测仪器为涡动相关仪,主要观测数据包括感热、潜热通量,对数据预处理后得到站点的月蒸散发值。各站点的基本信息如表1所示。

1.2.2 地表蒸散发产品

本研究采用的地表蒸散发产品包括 ET-EB^[34]、MOD16^[35]、GLEAM (global land evaporation amsterdam model)^[36]、Zhang-ET^[37]和 GLDAS(global land data assimilation system)产品^[38]。ET-EB 为月产品,空间分辨率 0.05°;MOD16 为 8 天合成产品,空间分辨率为 1 km;GLEAM 为逐日产品,空间分辨率为 0.25°;Zhang-ET 为月产品,空间分辨率为 8 km;GLDAS 为月产品,空间分辨率为 0.25°。所有产品预处理后合成到月尺度上进行分析。

a. ET-EB 产品。Chen 等^[9]基于 Su^[39]提出的

基于地表能量平衡的单层模型 SEBS 优化形成了 ET-EB。ET-EB 基于输入的空气温度与遥感地表温度来获得地气温差进行感热计算,另外通过一个基于植被覆盖度的动态热量传输附加阻尼 kB^{-1} 模型,改进了空气动力学阻抗中附加阻抗计算。地表能量平衡公式如下:

$$R_n = G_o + H + \lambda_E \quad (1)$$

式中: R_n 为净辐射通量; G_o 为土壤热通量; H 为感热通量; λ_E 是潜热通量。

b. MOD16 产品。MOD16 由蒙大拿大学密苏拉分校地球动态数值模拟研究组研发,其主要输入的变量包括气象数据、FPAR(光合有效辐射吸收比例)和 LAI 数据集,以及一些辅助数据例如土壤成分等,产品覆盖范围为有植被区域,不包括水体、城市等无植被覆盖区域。MOD16 计算基于依据能量平衡和紊流扩散原理的 Penman-Monteith (P-M) 公式^[40],其计算公式如下:

$$\lambda_E = \frac{sA + \rho C_p (e_{sat} - e)/r_a}{s + \gamma(1 + r_s/r_a)} \quad (2)$$

式中: s 为饱和水汽压与温度的曲线斜率; A 为可利用能量,植被覆盖度可计算冠层和土壤表面分别获取的能量; ρ 为空气密度; C_p 为空气定压比热; γ 为干湿表常数; e_{sat} 和 e 分别为饱和水汽压和实际水汽压; r_a 和 r_s 分别为空气动力学阻抗和表面阻抗。

c. GLEAM 产品。GLEAM 产品由荷兰阿姆斯特丹大学研发,计算了蒸散发(ET)的所有组分:植被蒸腾(E_t)、冠层截留蒸发(E_i)、裸土蒸发(E_b)、雪升华蒸发(E_s)和水面蒸发(E_w)。主要基于 Priestley-Taylor(P-T)公式:

$$\lambda_E = \alpha_{PT} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G_o) \quad (3)$$

式中: α_{PT} 为 P-T 常数; Δ 为饱和水汽压-空气温度的斜率。

该模型计算所用的数据主要来源于卫星观测,包括降水量数据、土壤水分和植被光学厚度数据、辐射通量、气温数据和雪水当量数据。

d. Zhang-ET 产品。Zhang-ET 产品基于改进的 P-M 公式对冠层蒸腾和土壤蒸发进行量化,利用归一化植被指数(NDVI)定义全球不同生态群落的冠

表1 通量观测站点的基本信息

Table 1 Basic information of flux observation sites

站 点	经度	纬度	高程/m	下垫面类型	使用的时间段
阿 柔	100°27'53.1"E	38°2'39.8"N	3033	高寒草地	2013 年
海 北	101°19'E	37°37'N	3190	高寒草地	2003—2007 年
哀牢山	101°1'E	24°32'N	2450	常绿阔叶林	2013 年
西双版纳	101°15'55"E	21°55'39"N	750	热带雨林	2003—2007 年
珠 峰	86°34'E	28°13'N	4276	裸地	2008—2010 年

层导度,并使用 P-T 方法对开放水域蒸发进行量化。使用了 GIMMS NDVI、NCEP/NCAR 再分析资料以及 NASA/GEWEX 等数据作为输入。

e. GLDAS 产品。GLDAS 是美国国家航空航天局戈达德航天飞行中心和美国国家海洋与大气管理局国家环境预测中心联合发展的,融合了地面和卫星观测数据的全球陆面数据模拟系统,该系统用了包括 Noah、Mosaic、VIC(variable infiltration capacity)和 CLM(common land model)等多个国际上流行的陆面模式。本文使用的是 GLDAS_NOAH025_M 的地表蒸散发数据。

1.2.3 气象参数

气象参数来自中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集,下载自国家青藏高原科学数据中心。该数据集的时间分辨率为 3 h,空间分辨率 0.1°。本研究中使用的数据包括 2001—2013 年的 3 种气象要素:近地面气温(瞬时近地面 2 m 气温,单位:K)、近地面空气比湿(单位:kg/kg)和地面降水率(3 h 平均降水率,单位:mm/h)。利用降水率与时间乘积求出降水量,最后将各数据预处理到月尺度。

2 研究方法

本文使用了 ET-EB、MOD16、GLEAM、Zhang-ET 和 GLDAS 共 5 种地表蒸散发产品,采用站点数据验证后选出精度较好的产品研究西南河流域地表蒸散发的时空变化及其影响因子,利用两种不同类型的 EOF 方法,分别突出源区地表蒸散发的时间特征和空间特征。为了进一步分析影响流域的地表蒸散发的气象因子,基于偏相关分析方法对流域的地表蒸散发与 3 种气象要素分别进行相关分析。

2.1 地表蒸散发产品的精度检验

直接利用地面的通量观测数据对地表蒸散发产品进行检验,这是最为常用的对蒸散发产品进行检验的方法。根据经纬度提取 5 个产品在站点相应位置的蒸散发值与实测值对比,用泰勒图^[41]在像元尺度上评价了不同产品的精度,由于通量仪观测范围较大,5 种产品中 MOD16 产品空间分辨率较高,因此采用范围内 3 × 3 像元的均值与观测值进行对比^[42],其他产品分辨率较低,像元包含范围大提取单个像元值作为代表。泰勒图的评价指标包括均方根误差(root mean square deviation, RMSD)、标准差(standard deviation, SD)、相关系数 r (correlation coefficient)。

2.2 EOF 方法

EOF 方法由 Pearson 提出,20 世纪 50 年代

Lorenz 将该方法引入大气科学领域,随后被广泛应用至今,是大气、海洋以及地球物理科学分析中的有力工具。EOF 方法能对气象要素场进行时空分解,分解为相互正交的空间模态和时间系数。

在进行 EOF 分解前,Paden 等^[43]提出了两种对数据的距平处理方法:时间距平和空间距平。对原始数据的空间距平为

$$X'_{ij} = X_{ij} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m X_{kj} \quad (4)$$

式中: X'_{ij} 为每个像元减去每幅图像平均值的时间序列数据; i 为像元在原始场矩阵中的行数; j 为像元在原始场矩阵中的列数; m 为一幅图像的像元(要素)个数; k 为与像元 X_{ij} 同一时间序列的其他像元。空间距平可以在一定程度上反映要素场的空间分布特点,描述一些持久性的特征^[44]。在空间距平的基础上进行的 EOF 分析又称为梯度 EOF。

在时间距平的基础上进行的 EOF 分析又称为协方差 EOF,时间距平得到的时间系数可以反映相应空间模态随时间的权重变化。对原始数据的时间距平为

$$X'_l = X_{ij} - \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n X_{lj} \quad (5)$$

式中: n 为时间序列; l 为像元 X_{ij} 在 2001 年 1 月至 2013 年 12 月之间的月时间序列。

EOF 分解后得到的结果只有通过了检验才是有效的。North 等^[45]的研究指出,在 95% 置信度水平下的特征根误差为

$$\Delta\lambda = \lambda \sqrt{\frac{2}{N^*}} \quad (6)$$

式中: λ 为特征根; N^* 为数据的有效自由度。将 λ 按顺序带入,依次检查,并且标记误差范围,当相邻两个特征值 λ_j 和 λ_{j+1} 没有重叠时,认为两个特征值是有差别的,如果前后两个特征值的误差范围有重叠部分,那么认为它们是没有显著差别的。

由于本文使用的地表蒸散发产品相比于站点观测的气象要素来说,要素点的数目远大于观测时间序列,即 $n \gg m$,在计算空间模态和时间系数时采用时空转换^[46]方法。

2.3 偏相关分析

偏相关分析可以在对其他变量的影响进行控制的条件下,权衡多个变量中某两个变量之间线性相关程度。在分析变量 x_1 和 x_2 之间的偏相关系数时,当控制了变量 x_3 的线性作用后, x_1 和 x_2 之间的一阶偏相关系数定义为

$$r_{12(3)} = \frac{r_{12} - r_{12}r_{23}}{\sqrt{1 - r_{13}^2} \sqrt{1 - r_{23}^2}} \quad (7)$$

式中 r_{12} 、 r_{23} 、 r_{13} 分别为两个变量间的简单相关系数。二阶偏相关系数可由一阶偏相关系数求得。

3 结果与分析

3.1 站点尺度数据检验

图3为各产品在不同站点的精度检验结果,其中横轴和纵轴黑线为标准差(SD),纵轴蓝色虚线为相关系数(r),绿色虚线圆弧为均方根误差(RMSD)。可以看出,不同产品、不同站点的精度不同,其中阿柔站:Zhang-ET产品的RMSD最低(17.19 mm/月),相关系数最高($r=0.96$);海北站:除ET-EB外其余4种产品验证结果精度较高,其中GLEAM产品的RMSD最低(20 mm/月),相关系数最高($r=0.92$);哀牢山站:MOD16、GLDAS、GLEAM 3种产品的验证结果精度较高,其中GLDAS的RMSD最低(20.31 mm/月),GLEAM的相关系数最高($r=0.91$);西双版纳站:MOD16、GLDAS、GLEAM 3种产品的验证结果精度较高,其中GLDAS的RMSD最低(20 mm/月),相关系数最高($r=0.80$);珠峰站:除Zhang-ET外其余的4种产品验证结果精度较高,其中GLEAM的RMSD最低(20 mm/月),MOD16的相关系数最高($r=0.87$)。总体上,GLEAM与站点观测值的匹配程度较好,RMSD为23.4 mm/月,与各站点相关系数均在0.7以上,且标准差与观测值较为接近;其次是MOD16和GLDAS,RMSD分别为24.6 mm/月和26.7 mm/月;而ET-EB与站点的匹配程度较低,RMSD为34.5 mm/月,在海北站和哀牢山站与观测值的SD相差较大。

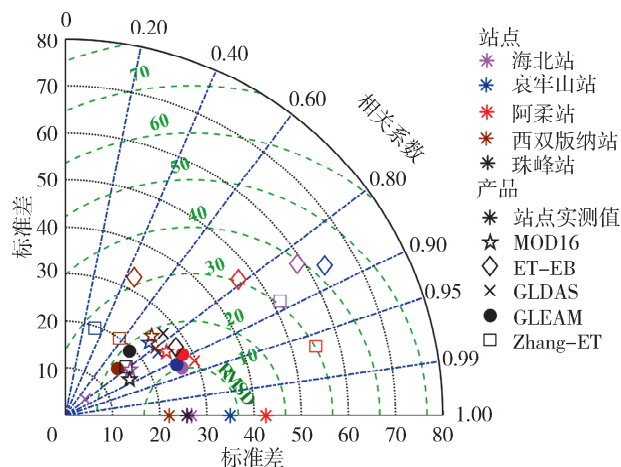


图3 5种产品在海北站、哀牢山站、阿柔站、西双版纳站及珠峰站的精度检验结果

Fig.3 Accuracy test results of five products at Haibei, Ailaoshan, Arou, Xishuangbanna and Qomolangma stations

ET-EB产品基于surface energy balance system (SEBS)模型理论,假定正午附近遥感瞬时蒸发比在一天之内恒定的方法估算地表蒸散发^[44],所以反演

大气在稳定和非稳定状态的转换时刻的流量误差较大^[47]。而地表蒸发率由感热计算得到,在计算的过程中带入了感热的误差,造成地表蒸散发反演的不确定性。在计算时,SEBS模型不区分土壤和植被,但实际的下垫面类型并不单一,从而也造成了误差^[48]。另一方面,产品采用MOD11C3和MYD11C3的月平均值来代表地表温度,只有晴空条件才能获得较好的数据,而产品模型中地表蒸散发的计算对地表温度数据有着较高的要求,这也是ET-EB产品不确定性较大的可能原因。

在以往的研究中,GLEAM的产品质量已被多次验证。Michel等^[49-50]基于站点流量数据、再分析资料、水量平衡原理对PM-MOD、SEBS、PT-JPL和GLEAM 4种模型进行了评估,评估结果显示PT-JPL模型和GLEAM的效果最好;Yang等^[51]利用8个流量站点数据对GLEAM产品在中国区域的精度进行了验证,其中海北站与阿柔站与本研究使用的站点相同,但验证的时间段不同,其研究结果表明GLEAM在中国区域的精度可靠。结合前人的研究和本研究的验证结果,研究选取精度较好的GLEAM产品进行源区地表蒸散发的时空特征分析。

3.2 地表蒸散发的空间分布

3.2.1 不同流域的地表蒸散发

为了研究西南河流源区不同流域地表蒸散发的时空变化特点,利用GLEAM产品对不同流域的旬平均地表蒸散发展行了分析。

西南河流源区不同流域2001—2013年的旬平均地表蒸散发如图4所示,不同流域的地表蒸散发年内变化一致并且有明显的季节特征。澜沧江流域、怒江流域、藏南诸河的地表蒸散发在7月中旬达到峰值;其他流域地表蒸散发在8月下旬达到峰值。各流域在1月上旬和12月中下旬地表蒸散发最低,其中青海湖水系和黄河上游在这几个旬内地表蒸散

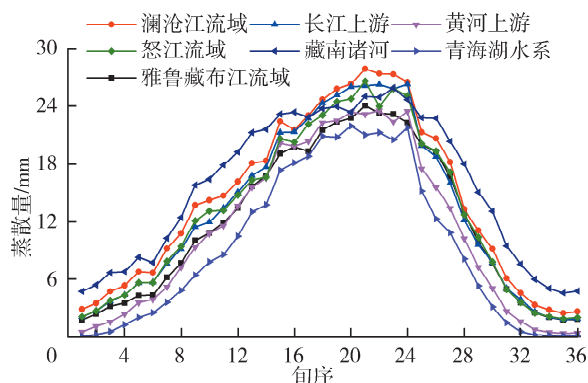


图4 GLEAM产品不同流域的旬平均蒸散发
Fig.4 Ten-day mean evapotranspiration of GLEAM in different basins

发不足 1 mm;6 月上旬到 9 月上旬,长江上游和澜沧江流域蒸散发较高,最高达到 27.89 mm。总的来说,按地表蒸散发旬平均蒸散量由高到低排序:藏南诸河(15.71 mm)、澜沧江流域(14.28 mm)、长江上游(13.18 mm)、怒江流域(13.05 mm)、雅鲁藏布江流域(12.03 mm)、黄河上游(11.12 mm)、青海湖水系(9.33 mm)。

3.2.2 地表蒸散发的空间分布特征

2001—2013 年 5 种产品的年平均蒸散发空间分布格局相似,呈现出南高北低的分布特点,具体以 GLEAM 产品在季节上展开分析,结果如图 5 所示。可见,春夏秋冬 4 个季节地表蒸散发的空间分布一致,南部地表蒸散发明显高于北部,受海拔和地表覆盖类型影响明显。结合图 2 进行分析,源区的地表蒸散发大致可以分为 4 个区间:地表蒸散发高值区,集中在藏南诸河及澜沧江、雅鲁藏布江、雅砻江、大渡河的下游等 2000 m 以下的低海拔区,这里降水充沛,日照充足,气温较高,主要地表覆盖类型为林地;地表蒸散发次高值区,集中源区东南部 2000 ~ 3000 m 海拔高度;地表蒸散发较低区,集中在源区东北部 3000 ~ 4000 m 海拔高度,这里的地表蒸散发略低于东南部;地表蒸散发最低区,集中在源区中部、北部,这里也是源区海拔最高的地区,主要地表覆盖类型为草地。

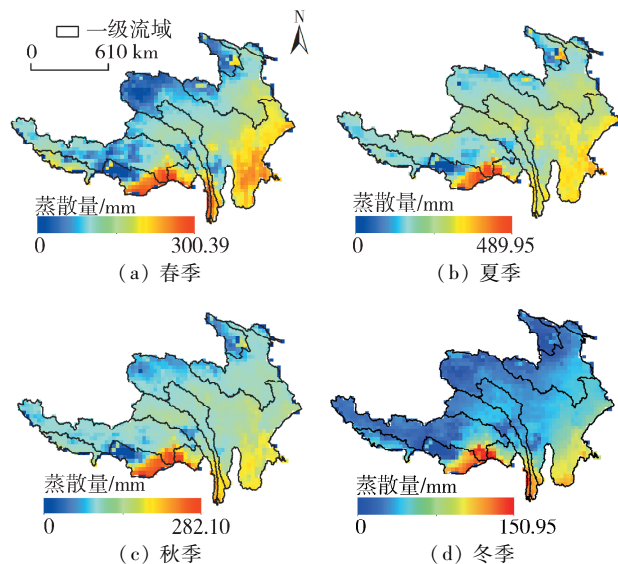


图 5 西南河流源区地表蒸散发多年平均季节空间分布
Fig. 5 Seasonal spatial distribution of surface ET in source region of rivers in Southwest China

为进一步分析源区地表蒸散发在月尺度上的时空特征,对 2001—2013 年西南河流源区 GLEAM 产品进行梯度 EOF 分解(图 6),虽然空间模态的值并不直接代表地表蒸散发的高低,但可以反映地表蒸散发的分布特征,空间模态与时间系数同号表示地

表蒸散发较高,异号则表示地表蒸散发较低。分解得到前 3 个模态的累计方差贡献率达到了 92.8%,且都通过了 North 检验。第一空间模态的方差贡献率达到了 84.19%,可以很好地代表地表蒸散发的空间分布特征,这里只分析第一空间模态。

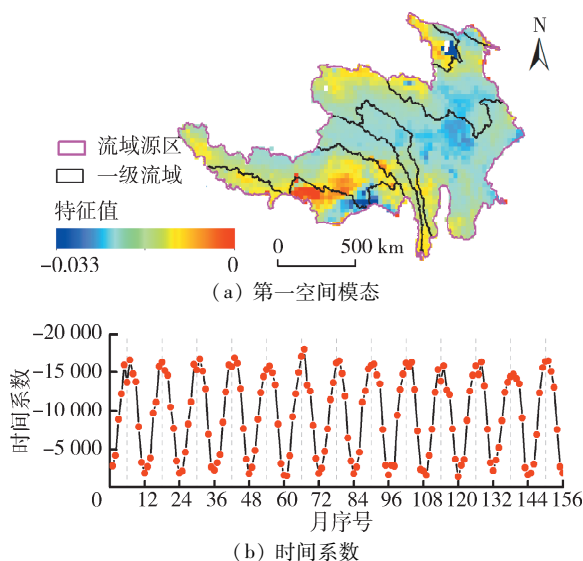


图 6 梯度 EOF 分解的第一空间模态及时间系数
Fig. 6 First spatial mode and time coefficient of gradient EOF decomposition

第一空间模态(图 6(a))是对地表蒸散发空间梯度的反映,是源区地表蒸散发的典型场,与源区多年平均地表蒸散发的空间分布一致。特征值以藏南诸河、长江上游流域南部为强正值中心向北递减,这说明源区南部的地表蒸散发高于北部,这主要由于源区南部降水充沛,主要地表覆盖类型为林地,蒸腾作用较强,所以地表蒸散发更高;绝对值最高的地区出现是藏南诸河一带,表示这里地表蒸散发的变化程度更显著。第一空间模态的时间系数(图 6(b))均为负值,并不随着时间推移发生正负变化,这说明源区地表蒸散发北低南高的空间分布格局不会随着时间发生变化,是一种固定的空间特征;时间系数在 5—8 月振幅最大,这表示每年 5—8 月是源区空间差异较明显的月份;受到复杂气候条件的影响,在 2002 年、2004—2005 年、2007 年和 2010—2013 年时间系数出现了双峰,这表示地表蒸散发在低谷点的月份空间差异弱于邻近月份。

3.3 地表蒸散发的时间变化

为进一步探究源区地表蒸散发随时间的变化特征,分别从流域尺度(图 7)和像元尺度(图 8)对西南河流源区地表蒸散发随时间的变化进行分析。源区各流域年平均地表蒸散发的变化趋势如图 7 所示,年尺度源区地表蒸散量从高到低排序为:藏南诸河、澜沧江、雅鲁藏布江、长江上游、怒江、黄河上游、

青海湖水系,其顺序与旬尺度一致。对流域年地表蒸散发进行线性趋势拟合,只有长江上游和黄河上游两个流域的地表蒸散发线性趋势均达到 0.05 显著水平,呈显著上升趋势。长江上游上升幅度为 1.8 mm/a,黄河上游上升幅度为 2.3 mm/a,其他流域地表蒸散发均未发现显著变化趋势。

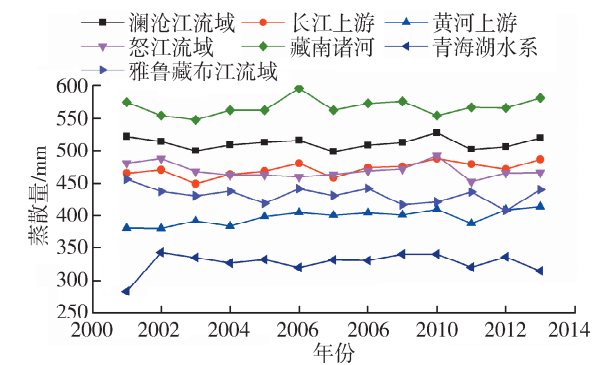


图 7 西南河流源区各流域年平均地表蒸散发
Fig. 7 Annual average evapotranspiration of different basins in source region of rivers in Southwest China

协方差 EOF 分解可以表征要素随时间变化的特征。一种现象越强烈,协方差 EOF 分解后其空间模态的幅值越高,模态对应的时间振幅表示特定现象的重要性。对源区地表蒸散发进行协方差 EOF 分解,分解后前 3 个空间模态的方差贡献率达到了 93.65%,说明 EOF 分解的收敛速度很快,并且前 3 个模态均通过了 North 检验。第一空间模态的方差贡献率为 89.06%,具有很好的代表性,这里分析方差贡献率最大的第一空间模态。

第一空间模态(图 8(a))源区特征向量均为负值,表明 2001—2013 年源区地表蒸散发的变化具有

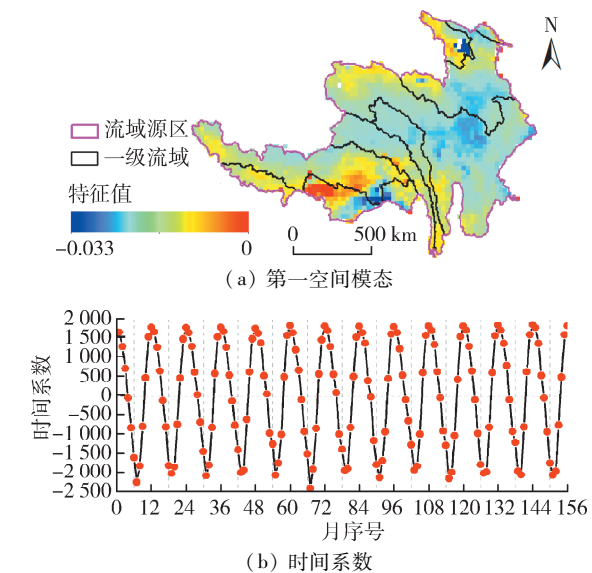


图 8 协方差 EOF 分解的第一空间模态及时间系数
Fig. 8 First spatial mode and time coefficient of covariance EOF decomposition

全区一致性。绝对值高值区出现在藏南诸河一带,表明该地区地表蒸散发的变化程度较大。结合时间系数(图 8(b))分析,时间系数呈周期变化,地表蒸散发具有明显的季节特征;每年 4—9 月时间系数与空间模态同为负,源区太阳辐射强,土壤含水量多,植被生长密集,蒸腾作用强,这段时间源区地表蒸散发较高;10 月至次年 3 月时间系数与空间模态异号,源区土壤含水量少,可利用能量低,这段时间源区地表蒸散发较低;源区地表蒸散发年内变化呈单峰格局,高峰出现在每年 7 月。

3.4 地表蒸散发与气象因子的关系

区域内的降水量、温度和湿度等气候条件一定程度上会影响到区域能量供给和水汽输送条件。温度差异驱动水分从液态转为气态,蒸散发面上的水汽压与周围空气水汽压之间的差值是驱动水汽从地表蒸散发的主要动力之一,将区域实际蒸散发与气象因子做相关分析,对于了解区域蒸散发的分布特征和变化趋势有重要的意义。

对 2001—2013 年 GLEAM 产品在西南河流源区的月平均地表蒸散发与降水、气温(近地面 2 m 气温)和比湿(近地面空气比湿)做相关分析,结果如图 9 所示。源区的地表蒸散发与 3 种气象要素相关性的年内变化相似,在夏季地表蒸散发与 3 种气象要素的相关性最强;源区地表蒸散发与比湿的相关性强于降水和气温。

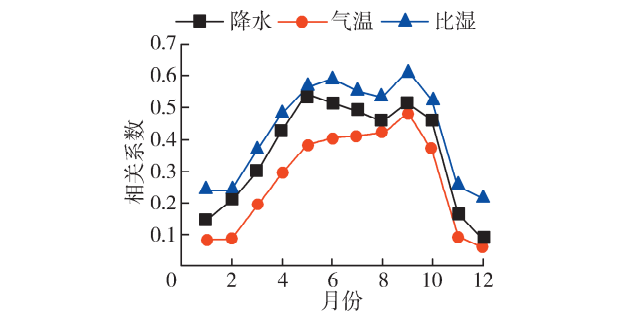


图 9 源区月平均地表蒸散发与不同气象因子的相关系数
Fig. 9 Correlation coefficients between monthly mean surface evapotranspiration and different meteorological factors in source region

为了进一步探究源区不同流域与气象因子的相关性,对 2001—2013 年 GLEAM 各流域不同季节的地表蒸散发与降水、气温、比湿 3 种气象因子做偏相关分析。偏相关系数反映了在控制其他两个气象因子的线性影响的条件下单个气象因子与地表蒸散发两变量间的线性相关性,图 10 为 2001—2013 年各流域的月地表蒸散发与不同气象因子的偏相关系数热力图。由图 10 可见,长江上游的地表蒸散发在春秋两季与比湿呈正相关关系,在夏冬两季与降水呈

正相关关系,但在冬季与气温的相关性更强;黄河上游的地表蒸散发在所有季节均与气温正相关(除冬季外,与气温的相关系数均大于0.5,呈显著相关关系),在秋季与比湿的相关性更强;澜沧江流域的地表蒸散发在春秋两季与比湿呈显著正相关关系,在夏冬两季与气温呈正相关关系,在不同季节均与降水无相关关系;怒江流域的地表蒸散发在春秋两季与气温正相关,在夏季与比湿正相关,在不同季节均与降水无显著相关关系;雅鲁藏布江和藏南诸河的地表蒸散发在春秋两季与气温的相关系最强(相关系数均大于0.5,呈显著相关关系),在冬季与降水的相关性更强,藏南诸河的地表蒸散发在不同季节均与比湿无显著相关关系;青海湖水系的地表蒸散发在春秋与气温呈正相关关系,在夏季与比湿呈正相关关系。

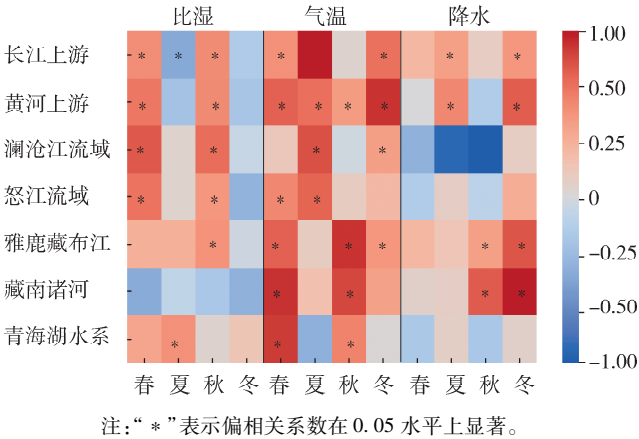


图 10 2001—2013 年各流域的月地表蒸散发与不同气象因子的偏相关系数热力图

Fig. 10 Heat map of partial correlation coefficients between monthly average evapotranspiration and meteorological factors in different basins during 2001-2013

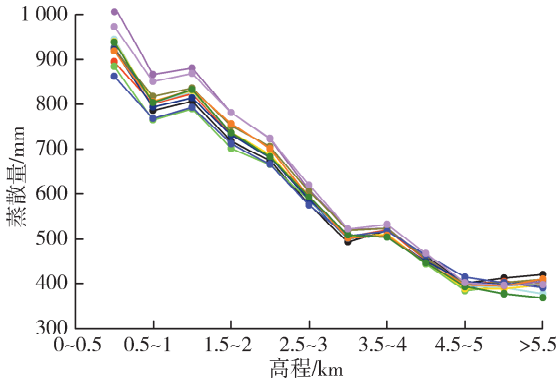
藏南诸河、澜沧江流域、长江上游、黄河上游、雅鲁藏布江流域和怒江流域降水充沛,陆面水供给充足,蒸散发主要受气温等大气能量因素的驱动;青海湖水系处于半干旱区,陆面比较干旱,所以主要受到陆面能量的影响(本文以近地面空气比湿间接体现)。对2001—2013年各流域年平均降水量、气温、比湿进行线性趋势拟合发现,藏南诸河的降水量呈显著上升趋势,澜沧江流域、长江上游、黄河上游、雅鲁藏布江流域和怒江流域的年平均气温呈显著上升趋势(0.01K/a左右),这与各流域蒸散发的变化趋势一致,从侧面证明了西南河流源区的主要流域的地表蒸散发主要受降水和气温等因素的影响。

3.5 地表蒸散发与地形因子的关系

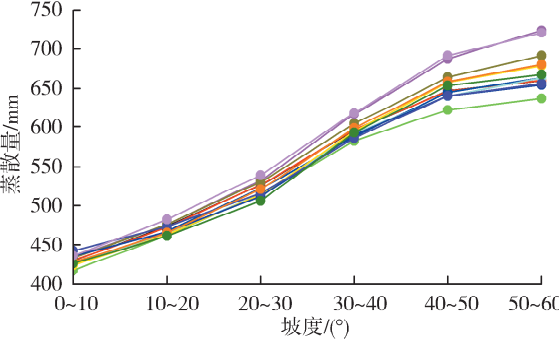
除气象因子外,地形因子也会影响区域地表蒸散发。将高程每500 m划分为一个区间,坡度每10°

划分为一个区间,坡向每15°划分为一个区间(以正北为0°,坡向方向基于顺时针方向角度增加),统计不同区间内西南河流源区的平均地表蒸散发,分析不同地形因子与地表蒸散发的关系。

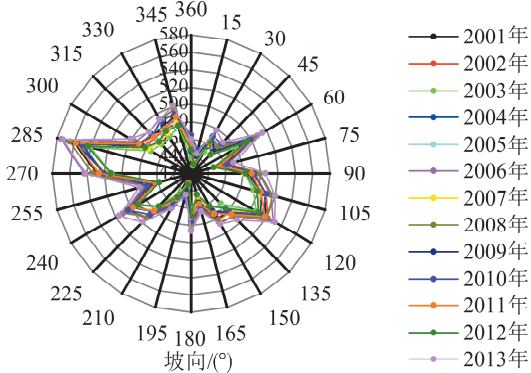
对不同高程区间的年平均地表蒸散发进行统计,结果如图11(a)所示。2001—2013年不同高程区间地表蒸散量随高程呈梯度状变化且变化规律一致,在海拔2500 m以下区域2006年和2013年的地表蒸散发高于其他年。整体来看西南河流源区的地表蒸散发随着海拔的升高而降低,但在1000~1500 m区间和3500~4000 m区间出现了两个微弱的抬升。在高程小于500 m时,年均地表蒸散发最



(a) 不同高程区间



(b) 不同坡度区间



(c) 不同坡向区间(单位:mm)

图 11 2001—2013 年不同高程、坡度、坡向的年平均地表蒸散发

Fig. 11 Annual average surface evapotranspiration of different elevation, slope and aspect during 2001-2013

高,在高程大于 5 500 m 的区域,地表蒸散发最低,两个高程区间的年平均地表蒸散量差值最高达 576 mm。研究区坡度集中在 0 ~ 60°之间,不同坡度区间的年平均地表蒸散发如图 11 (b) 所示,各年变化规律一致,其中 2006 年和 2013 年在不同坡度区间的地表蒸散量均高于其他年。总体来说,随着坡度的增加地表蒸散发逐渐变高,在坡度小于 40°的区间,地表蒸散发随着坡度增加的趋势较为明显,约为每 10°增加 55. 21 mm;在坡度大于 40°之后,地表蒸散发的增加趋势变缓,约为每 10°增加 31. 81 mm。研究区不同坡向区间地表蒸散发的变化如图 11 (c) 所示,竖线对应数字代表该值减 15°至该值的一个坡度区间。各年地表蒸散发在不同坡向区间的变化一致总体上是西侧(坡向小于 180°)地表蒸散量高于东侧(坡向大于 180°),其中坡向在西北 15°方向内及东南 30°方向内的地表蒸散发较高,而西南侧、东北侧的地表蒸散发较低。研究区地表蒸散发于差异主要体现在东南与西北方向,与北侧、南侧(即阳坡阴坡)无明显关系。

4 结 论

a. 按流域来看,地表蒸散量从高到低依次为:藏南诸河、澜沧江、雅鲁藏布江、长江上游、怒江、黄河上游、青海湖水系。

b. 从空间分布来看,西南河流源区地表蒸散发受海拔和地表覆盖类型的影响,呈现东南高西北低的分布特征,藏南诸河一带是源区地表蒸散发最高的地区。

c. 按时间变化规律来看,2001—2013 年源区地表蒸散发呈显著增加趋势;源区地表蒸散发年内变化呈单峰型,每年 7 月达到峰值;藏南诸河是源区地表蒸散发变化程度最大的地区;青海湖水系的地表蒸散发上升幅度最大。

d. 比湿与源区地表蒸散发的相关性最强,在不同的流域,流域的地表蒸散发与比湿、气温、降水 3 种气象要素的相关性强弱不同。

e. 源区地表蒸散发在不同的高程、坡度、坡向区间存在着明显的差异。地表蒸散发随着高程的增加而降低,不同高程区间蒸散发差异较大;地表蒸散发随着坡度的增加而增加,在小于 40°的坡度区间,这种增加趋势最为明显;东南侧和西北侧的地表蒸散发最高。

参考文献:

[1] QIU J. China: the third pole [J]. Nature, 2008, 454 (7203): 393-396.

[2] 王珂,王娜,雍斌. 青藏高原原羌塘内流区降水时空特征 [J]. 水资源保护, 2019, 35 (3): 29-36. (WANG Ke, WANG Na, YONG Bin. Analysis of spatio-temporal characteristics of precipitation in Qiangtang inner flow area of Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (3): 29-36. (in Chinese))

[3] YANG Kun, YE Baisheng, ZHOU Degang, et al. Response of hydrological cycle to recent climate changes in the Tibetan Plateau [J]. Climatic Change, 2011, 109 (3/4): 517-534.

[4] WANG Weiguang, LI Jingxing, YU Zhongbo, et al. Satellite retrieval of actual evapotranspiration in the Tibetan Plateau: components partitioning, multidecadal trends and dominated factors identifying [J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 65-72.

[5] 洛桑·灵智多杰. 青藏高原水资源的保护与利用 [J]. 资源科学, 2005, 27 (2): 23-27. (LUOSANG Lingzhiduojie. Utilization and protection of water resources in the Qinghai-Tibet plateau [J]. Resources Science, 2005, 27 (2): 23-27. (in Chinese))

[6] 张小磊, 杨梅学. 基于 GAME-Tibet IOP 的青藏高原蒸散研究 [J]. 地理科学, 2010, 17 (6): 929-935. (ZHANG Xiaolei, YANG Meixue. Evapotranspiration in the Tibetan Plateau based on GAME-Tibet IOP data [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 17 (6): 929-935. (in Chinese))

[7] 马耀明, 胡泽勇, 田立德, 等. 青藏高原气候系统变化及其对东亚区域的影响与机制研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29 (2): 207-215. (MA Yaoming, HU Zeyong, TIAN Lide, et al. Study progresses of the Tibet Plateau climate system change and mechanism of its impact on East Asia [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29 (2): 207-215. (in Chinese))

[8] 李志斐. 气候变化对青藏高原水资源安全的影响 [J]. 国际安全研究, 2018 (3): 42-63. (LI Zhifei. Analysis of the effects of climate change on water resources security in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of International Security Studies, 2018 (3): 42-63. (in Chinese))

[9] CHEN Baoxiong, ZHANG Xianzhou, TAO Jian, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2014 (189/190): 11-18.

[10] AN Chunchun, FAN Jianrong, ZHANG Yanfen, et al. Characterizing the responses of vegetation to climate change in the Tibet Plateau using remote sensing data [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2018, 12 (1): 1.

[11] LI Xiuping, WANG Lei, CHEN Deliang, et al. Seasonal evapotranspiration changes (1983-2006) of four large basins on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2015, 119 (23): 79-95.

- [12] VINUKOLLU R K, WOOD E F, FERGUSON C R, et al. Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data; evaluation of three process-based approaches [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115 (3): 801-823.
- [13] 左德鹏, 徐宗学, 李景玉, 等. 气候变化情景下渭河流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. 水科学进展, 2011, 22 (4): 455-461. (ZUO Depeng, XU Zongxue, LI Jingyu, et al. Spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration in the Weihe River basin under future climate change[J]. Advances in Water Science, 2011, 22 (4): 455-461. (in Chinese))
- [14] 童瑞, 杨肖丽, 任立良, 等. 黄河流域 1961—2012 年蒸散发时空变化特征及影响因素分析[J]. 水资源保护, 2015, 31 (3): 16-21. (TONG Rui, YANG Xiaoli, REN Liliang, et al. Temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in the Yellow River Basin during 1961-2012 and analysis of its influence factors [J]. Water Resources Protection, 2015, 31 (3): 16-21. (in Chinese))
- [15] 张洪泉. “红旗河”调水方案的制约因素与中国西北干旱治理对策[J]. 水资源保护, 2018, 34 (4): 8-11. (ZHANG Hongquan. Potential pitfalls in “Hongqi River” water transfer proposal and drought management in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (4): 8-11. (in Chinese))
- [16] 粟晓玲, 梁箴. 关中地区气象水文综合干旱指数及干旱时空特征[J]. 水资源保护, 2019, 35 (4): 17-23. (SHU Xiaoling, LIANG Zheng. Meteorology-hydrology drought index and spatial and temporal characteristics of drought in Guanzhong area [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (4): 17-23. (in Chinese))
- [17] 冯景泽, 王忠静. 遥感蒸散发模型研究进展综述[J]. 水利学报, 2012, 39 (8): 914-925. (FENG Jingze, WANG Zhongjing. A review on evapotranspiration estimation models using remotely sensed data [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 39 (8): 914-925. (in Chinese))
- [18] 宋璐璐, 尹云鹤, 吴绍洪. 蒸散发测定方法研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31 (9): 1186-1195. (SONG Lulu, YIN Yunhe, WU Shaohong. Advancements of the metrics of evapotranspiration [J]. Progress in Geography, 2012, 31 (9): 1186-1195. (in Chinese))
- [19] RAMOELO A, MAJOZI N, MATHIEU R, et al. Validation of global evapotranspiration product (MOD16) using flux tower data in the African Savanna, South Africa [J]. Remote Sensing, 2014, 6 (8): 942-945.
- [20] 夏浩铭, 李爱农, 赵伟, 等. 遥感反演蒸散发时间尺度拓展方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (24): 162-173. (XIA Haomin, LI Ainong, ZHAO Wei, et al. Review of temporal scale expansion for evapotranspiration retrieved by remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31 (24): 162-173. (in Chinese))
- [21] CHANG Yaping, QIN Dahe, DING Yongjian, et al. A Modified MOD16 algorithm to estimate evapotranspiration over alpine meadow on the Tibetan Plateau, China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 561: 16-30.
- [22] FEI Peng, YOU Quangang, XIAN Xue, et al. Evapotranspiration and its source components change under experimental warming in alpine meadow ecosystem of Qinghai-Tibet Plateau [J]. Ecological Engineering, 2015, 84: 653-659.
- [23] PENG Jing, LOEW A, CHEN Xuelong, et al. Comparison of satellite-based evapotranspiration estimates over the Tibetan Plateau [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20 (8): 3167-3182.
- [24] 尹云鹤, 吴绍洪, 赵东升, 等. 1981—2010 年气候变化对青藏高原实际蒸散的影响[J]. 地理学报, 2012, 67 (11): 1471-1481. (YIN Yunhe, WU Shaohong, ZHAO Dongsheng, et al. Impact of climate change on actual evapotranspiration on the Tibetan Plateau during 1981-2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67 (11): 1471-1481. (in Chinese))
- [25] GU Song, TANG Yanhong, CUI Xiaoyong, et al. Characterizing evapotranspiration over a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2008, 113 (D8): 693-702.
- [26] SONG Lulu, ZHUANG Qianlai, YIN Yunhe, et al. Spatio-temporal dynamics of evapotranspiration on the Tibetan Plateau from 2000 to 2010 [J]. Environmental Research Letters, 2017, 12 (1): 014011.
- [27] LIU Shaomin, LI Xin, XU Ziwei, et al. The Heihe integrated observatory network: a basin-scale land surface processes observatory in China [J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17 (1): 1-21.
- [28] LIU Shaomin, XU Ziwei, WANG Weizhen, et al. A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2011, 15 (4): 1291-1306.
- [29] LI Xin, CHENG Guodong, LIU Shaomin, et al. Heihe Watershed allied telemetry experimental research (HiWATER): scientific objectives and experimental design [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94 (8): 1145-1160.
- [30] MA Yaoming, ZHONG Lei, WANG Binbin, et al. Determination of land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau by using the MODIS and in-situ data [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 20 (11): 10461-10469.
- [31] MA Yaoming, KANG Shichang, ZHU Liping, et al. Tibetan

- p>observation and research platform-atmosphere-land interaction over a heterogeneous landscape[J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2008,89(10):1487-1492.
- [32] 马耀明. 中国科学院珠穆朗玛峰大气与环境综合观测研究站:一个新的研究喜马拉雅山区地气相互作用过程的综合基地[J]. 高原气象,2007,26(6):1141-1145. (MA Yaoming. An introduction to atmospheric and environmental comprehensive observation and research station on Mt. Qomolangma, Chinese Academy of Sciences;a new base for the study of atmosphere-land interaction over the Himalaya Area. Plateau Meteorology, 2007,26(6):1141-1145. (in Chinese))
- [33] MA Yaoming, MA Weiqiang, ZHONG Lei, et al. Monitoring and modeling the Tibetan Plateau's climate system and its impact on East Asia [J]. Scientific Reports,2017,7:44574.
- [34] CHEN X L, SU Z, MA Y M, et al. Development of a 10 year (2001-2010) 0.1° dataset of land-surface energy balance for mainland China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,2014,14(23):14471-14518.
- [35] 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): 1781-1800.
- [36] MIRALLES D G, HOLMES T R H, JEU R A M D, et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations [J]. Hydrology & Earth System Sciences,2011,15(2):453-469.
- [37] ZHANG K, KIMBALL J S, NEMANI R R, et al. A continuous satellite-derived global record of land surface evapotranspiration from 1983 to 2006 [J]. Water Resources Research,2010,46(9):W09522.
- [38] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U E A, et al. The global land data assimilation system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society,2004,85(3):381-394.
- [39] SU Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2002,6(1):85-99.
- [40] 冯怡,薛联青,张敏,等. 基于两种 SPEI 序列的淮河流域干湿特征变化[J]. 水资源保护,2019,35(1):39-44. (FENG Yi, XUE Lianqing, ZHANG Min, et al. Change of dry-wet characteristics in Huaihe River Basin based on two SPEI sequences [J]. Water Resources Protection, 2019,35(1):39-44. (in Chinese))
- [41] TAYLOR K E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2001, 106 (D7): 7183-7192.
- [42] TANG Ronglin, SHAO Kun, LI Zhaoliang, et al. Multiscale validation of the 8-day MOD16 evapotranspiration product using flux data collected in China [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing,2015,8(4):1478-1486.
- [43] PADEN C A, ABBOTT M R, WINANT C D. Tidal and atmospheric forcing of the upper ocean in the Gulf of California: 1. sea surface temperature variability [J]. Journal of Geophysical Research Oceans,1991,96(C10): 18337-18359.
- [44] LAGERLOEF G S E, BERNSTEIN R L. Empirical orthogonal function analysis of advanced very high resolution radiometer surface temperature patterns in Santa Barbara Channel [J]. Journal of Geophysical Research Oceans,1988,93(C6):6863-6873.
- [45] NORTH G R, BELL T L, CAHALAN R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Monthly Weather Review,1982,110(7):699.
- [46] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [47] 高彦春,龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报,2008,12(3):515-528. (GAO Yanchun, LONG Di. Progress in models for evapotranspiration estimation using remotely sensed data [J]. Journal of Remote Sensing, 2008,12(3):515-528. (in Chinese))
- [48] 易永红,杨大文,刘钰,等. 区域蒸散发遥感模型研究的进展 [J]. 水利学报, 2008 (9): 1118-1124. (YI Yonghong, YANG Dawen, LIU Yu, et al. Review of study on regional evapotranspiration modeling based on remote sensing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008 (9): 1118-1124. (in Chinese))
- [49] MICHEL D, JIMÉNEZ C, MIRALLES D G, et al. The WACMOS-ET project-part 1: tower-scale evaluation of four remote-sensing-based evapotranspiration algorithms [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2016, 20 (2): 803-822.
- [50] MIRALLES D G, JIMÉNEZ C, JUNG M, et al. The WACMOS-ET project-part 2: evaluation of global terrestrial evaporation data sets [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2016,20(2):823-842.
- [51] YANG Xiuqin, YONG Bin, REN Liliang, et al. Multi-scale validation of part evapotranspiration products over China via ChinaFLUX ET measurements [J]. International Journal of Remote Sensing,2017,38(20):5688-5709.

(收稿日期:2019-11-19 编辑:王 芳)

