

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.014

金沙江流域实际蒸散发时空分布特征及其影响因子

鞠艳^{1,2}, 张珂¹, 李炳锋¹, 陶然^{1,3}, 张菁^{1,4}, 吴星宇¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017;
3. 水利部南京水利水文自动化研究所, 江苏 南京 210012; 4. 湖北省荆门市气象台, 湖北 荆门 448000)

摘要:通过 GRACE 重力卫星观测数据和 GLDAS 陆面模式同化数据重构金沙江流域实际蒸散发, 采用质量守恒约束降尺度方法提升 GRACE 重力卫星陆地水储量观测数据的空间分辨率; 基于水量平衡方法, 重建了金沙江流域 2002—2016 年的子流域尺度逐月实际蒸散发, 分析了金沙江流域实际蒸散发的时空变化特征以及影响实际蒸散发的主要驱动因子。结果表明: 重建的实际蒸散发与 7 种蒸散发产品的可靠性均较高, 其中与 NOAH 产品的平均差和均方根误差最小, 与 PLSH 产品的相关系数较好, 为 0.82; 金沙江流域多年平均实际蒸散发量为 447.30 mm, 空间分布上自西北向东南逐渐增加。2002—2016 年蒸散发呈不显著的增加趋势; 各土地利用类型蒸散发中, 林地蒸散发的增加速率最大, 草地的增加速率最小; 金沙江流域实际蒸散发主要受降水和气温影响, 受风速影响次之, 受归一化植被指数和相对湿度的影响较小。

关键词:实际蒸散发; 时空分布; 土地利用; GRACE 卫星; 金沙江流域

中图分类号:TV11 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0104-07

Spatiotemporal distribution of actual evapotranspiration and its influencing factors in the Jinsha River Basin // JU Yan^{1,2}, ZHANG Ke¹, LI Bingfeng¹, TAO Ran^{1,3}, ZHANG Jing^{1,4}, WU Xingyu¹ (1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Jiangsu Hydraulic Science Institute, Nanjing 210017, China; 3. Nanjing Automation Institute of Water Conservancy and Hydrology, Ministry of Water Resources, Nanjing 210012, China; 4. Jingmen Meteorological Station of Hubei Province, Jingmen 448000, China)

Abstract: The actual evapotranspiration in the Jinsha River Basin was reconstructed using the GRACE observations and the GLDAS-assimilated data. A downscaling method with the constraint condition of mass conservation was used to improve the spatial resolution of GRACE data of land water storage. The sub-basin-scale monthly actual evapotranspiration in the Jinsha River Basin from 2002 to 2016 were reconstructed based on the water balance method. The spatiotemporal characteristics and dominant influencing factors of actual evapotranspiration were analyzed. The results show that the reconstructed actual evapotranspiration has high quality and compares well with seven satellite evapotranspiration products. Among them, the reconstructed actual evapotranspiration has the smallest mean deviation and root mean square error with NOAH products and the highest correlation coefficient (0.82) with PLSH products. The multi-year mean actual evapotranspiration in the Jinsha River Basin was 447.30 mm, with a gradual increasing trend from the northwest to the southeast. From 2002 to 2016, the actual evapotranspiration showed an insignificant increasing trend. Of all the land use types, woodlands had the largest increasing rate of actual evapotranspiration, while grasslands had the lowest increasing rate. The actual evapotranspiration in the Jinsha River Basin was mainly affected by precipitation and temperature, followed by wind speed, and was least affected by NDVI and relative humidity.

Key words: actual evapotranspiration; spatiotemporal distribution; land use; GRACE satellites; the Jinsha River Basin

实际蒸散发(ET_A)是指一个区域内,各种水热和下垫面条件下,土壤蒸发、水面蒸发、冰雪升华蒸

发以及植被蒸腾的总和^[1],连接着水、碳、能量循环以及大气循环,是全球气候系统的重要组成部分

基金项目:国家自然科学基金(51879067);中国高校基本科研业务费项目(B220203051)

作者简介:鞠艳(1996—),女,助理工程师,硕士,主要从事水文水资源研究。E-mail:747030693@qq.com

通信作者:张珂(1979—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:kzhang@hhu.edu.cn

分^[2-3]。实际蒸散发是直接参与水文循环的重要变量,受地形、气候、下垫面等影响,也是陆面生态过程的关键参数^[4]。准确估算区域实际蒸散发及其变化对区域水资源评定、水分利用效率、干旱预测等具有重要影响^[5]。

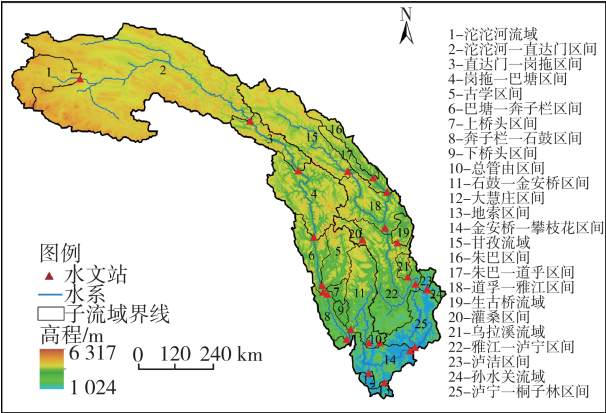
近年来,通过遥感数据反演区域蒸散发,在一定程度上减少了传统观测方法的局限性^[6-7],但在非均匀下垫面条件下,仍存在分辨率效应问题^[8],导致一些区域能量循环不闭合。水量平衡方法不受影响,具有普遍适用性^[9]。利用 GRACE 卫星反演陆地水储量变化,解决了在年内尺度上忽略水储量变化而带来的区域蒸散发估算偏差问题,为复杂地区的蒸散发估算提供了有效途径。韩项等^[10]结合 GRACE 数据的水量平衡方法模拟了汾沁地区 2003—2015 年的蒸散发量及其时空特征,并探讨了其年际波动与温度、降水之间的关系;Li 等^[11]基于地表和大气的水量平衡方法估算了青藏高原源头蒸散发量及其不确定性;温馨等^[12]基于 GLEAM 蒸散发产品,分析了西南河源区不同流域的旬平均地表蒸散发,并通过经验正交分解法研究了源区蒸散发的时空变化特征;段娅楠等^[13]基于气象站点观测资料,结合彭曼公式计算了雅鲁藏布江流域的潜在蒸散发,并分析了其对 4 种气象因子的敏感性;詹明月等^[14]基于 CMIP6 的 12 个全球气候模式分析了 SSP1-2.6、SSP2-4.5 和 SSP5-8.5 情景下,长江流域 2020—2099 年实际蒸散发的时空变化及其影响因素。

目前,针对蒸散发的研究主要集中在北部干旱半干旱地区^[15],高寒地区由于缺乏监测资料^[16]研究相对较少。金沙江流域地处青藏高原腹地,自然生态环境较差,水文气象资料空间代表性较差,对区域水文循环研究有一定的限制。本文基于 GRACE 卫星的水量平衡方法,结合流域内 25 个水文站的流量数据,分析金沙江流域 2002—2016 年的实际蒸散发时空变化特征,通过趋势分析和归一化多元线性回归分析其影响因素,以为金沙江水资源管理、生态环境保护提供参考。

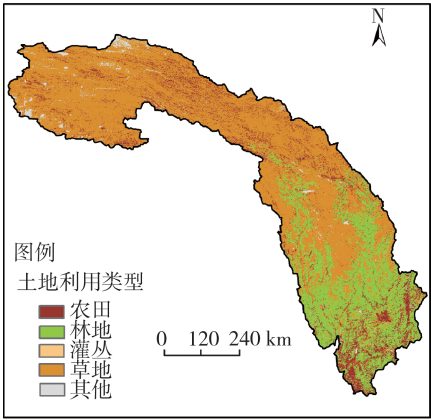
1 研究区概况

金沙江位于长江流域上游,其流域主要包括通天河和雅砻江流域(图 1(a))。受地形的影响,流域呈瘦长形分布,与岷江和澜沧江流域相邻。金沙江流域位于 90°E ~ 103°E、24°N ~ 36°N 之间,地处青藏高原和四川盆地之间,总面积为 38.75 万 km²,约占长江流域面积的 26%。金河江流域横跨 4 个省(自治区),主要位于青海、西藏、四川和云南的交界

处,地形地貌多为高山,地势由西北向东南降低,海拔在 1 024 ~ 6 317 m 之间。受东南和西南季风的共同影响,多年平均气温在 4 ~ 12℃ 之间,多年平均降水量为 617 mm,多年平均流量约为 4 750 m³/s,多年平均辐射量约为 16 MJ/(m² · d)。



(a) 主要水文站及子流域分布



(b) 土地利用类型分布

图 1 金沙江流域主要水文站、子流域及土地利用类型分布
Fig. 1 Locations of hydrological stations, sub-basins, and map of land use types in the Jinsha River Basin

流域内土地利用类型众多,主要包括农田、林地、灌丛、草地等(图 1(b)),土壤类型主要是草甸土、高钙土等地带性土壤和盐土、风沙土等非地带性土壤。流域内水文站主要有沱沱河、直达门、岗拖、巴塘、古学、奔子栏等 25 个(图 1(a))。根据 DEM 和拓扑关系提取金沙江地区子流域,共划分为 25 个子流域(图 1(a))。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

采用的数据主要包括实测数据和遥感数据。其中,实测数据包括流量和降水数据;遥感数据包括 GLDAS V2.1 版本陆面模式同化数据(<http://earthdata.nasa.gov>)、GRACE RL05 版本重力卫星水储量数据(<http://grace.jpl.nasa.gov>)、7 种国际通

用的蒸散发产品以及中国气象数据网提供的气温、风速数据 (<http://data.cma.cn>)。具体数据信息见表 1。

2.2 研究方法

2.2.1 实际蒸散发重建方法

本文的实际蒸散发通过水量平衡方法来进行计算：

$$ET_R = P - R - \Delta S \tag{1}$$

式中： ET_R 为重建的实际蒸散发,mm; P 为降水量,mm; R 为径流深,mm; ΔS 为月水储量的变化,mm。由于水循环要素(P 、 R 和 ΔS)来自地面测量和卫星观测,这些数据中包含了测量随机误差和数据处理误差,后续研究中进行深入探讨。

在面积超过 4 万 km² 的较大的空间区域尺度上,GRACE 数据可以较为准确地反映流域内陆地水储量情况,当研究区面积较小时,GRACE 数据的分辨率不够精细,无法准确获取小流域下的水储量结果。本文利用 0.25°×0.25°分辨率的 GLDAS 水储量数据与 1°×1°分辨率的 GRACE 数据匹配,再将偏差矫正,获取研究区的 0.25°×0.25°的陆地水储量数据。首先基于面积权重,将 0.25°×0.25°分辨率的 GLDAS 数据升尺度到 1°×1°分辨率,使之与 GRACE 数据有相同的空间分辨率,计算公式为^[2]

$$S_M = \frac{\sum (S_i a_i)}{\sum a_i} = \frac{\sum (S_i a_i)}{A} \tag{2}$$

式中： S_M 为升尺度得到的 1°×1°分辨率的 GLDAS 水储量,mm; S_i 为第 i 个流域 0.25°×0.25°分辨率网格的规范化的 GLDAS 水储量,mm; a_i 为第 i 个流域内 0.25°×0.25°网格的面积,m²; A 为 1°×1°分辨率网格的总面积,m²。

假定 GRACE 数据为“真值”,在相同分辨率下,将两者之间的总水量差(BA)基于水量权重进一步分配到网格中：

$$b_i = \frac{BA \frac{S_{oi} a_i}{\sum (S_{oi} a_i)}}{a_i} = \frac{BAS_{oi}}{\sum (S_{oi} a_i)} \tag{3}$$

式中： b_i 为偏差,mm; B 为 1°×1°分辨率下 GLDAS 和 GRACE 之间的偏差; S_{oi} 为第 i 个流域 0.25°×0.25°分辨率的 GLDAS 水储量,mm。

逐月水储量变化 ΔS_m 为当月的最后 1 d 与前 1 月的最后 1 d 的差：

$$\Delta S_m = S'_{i,m} - S'_{i,m-1} \tag{4}$$

式中 $S'_{i,m}$ 、 $S'_{i,m-1}$ 分别为第 i 个流域第 m 月和第 $m-1$ 月最后 1 d 的经过误差修正的水储量,mm。

2.2.2 统计评估方法

为了验证该重建方法下的蒸散发结果的可靠性和准确性,本文采用了几种统计指标来衡量其与 7 种蒸散发产品的准确度,包括平均差(MD)、均方根差(RMSE)和相关系数(r)。数据波动大小采用总体标准差(σ)、变异系数(C_v)和极差来衡量。

2.2.3 时空变化分析与归因分析

时空变化分析采用 Mann-Kendall (M-K) 趋势分析方法,权衡变化趋势的系数为 β ,具体方法详见文献[22]。

归因分析将蒸散发与各影响因素(降水、气温、风速、湿度和归一化植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI))进行归一化多元线性回归分析,得到的标准回归系数用于区分各影响因素对蒸散发的影响,选取标准回归系数最高的影响因素作为影响该像元蒸散发变化的主导因子,计算公式如下：

表 1 多源数据信息

Table 1 Information of multi-source satellite products

数据用途	变量	数据集名称	空间分辨率	时间分辨率	时间跨度	数据来源
蒸散发重建	降水	CGDPA	0.25°×0.25°	d	1982 年后	国家气象信息中心
	流量			d	2002—2016 年	水文年鉴
	陆地水储量	GRACE	1°×1°	月	2002—2017 年	Tapley 等 ^[17]
	土壤水、积雪	GLDAS	0.25°×0.25°	月	1979 年后	Rodell 等 ^[18]
蒸散发(模式同化)		GLDAS CLM	1°×1°	月	1979 年后	Rodell 等 ^[18]
		GLDAS MOS	1°×1°	月	1979 年后	
		GLDAS NOAH	1°×1°	月	1979 年后	
		GLDAS VIC	1°×1°	月	1979 年后	
蒸散发评估		MET	0.5°×0.5°	月	1982—2013 年	Jung 等 ^[19]
	蒸散发(遥感)	MODIS	0.05°×0.05°	月	2000—2014 年	Mu 等 ^[20]
		PLSH	8 km×8 km	月	1983—2015 年	Zhang 等 ^[21]
影响因素分析	气温、降水	CGDPA	0.25°×0.25°	月	1982 年后	国家气象信息中心
	相对湿度、风速	GLDAS	0.25°×0.25°	月	1979 年后	Rodell 等 ^[18]
	NDVI	MODIS	1 km×1 km	月	2000 年后	Mu 等 ^[20]

$$\frac{ET - \overline{ET}}{\sigma_{ET}} = \beta_0 + \beta_1 \frac{x_1 - \overline{x_1}}{\sigma_1} + \beta_2 \frac{x_2 - \overline{x_2}}{\sigma_2} + \dots + \beta_n \frac{x_n - \overline{x_n}}{\sigma_n} \quad (5)$$

式中: $\overline{ET}$ 为多年平均蒸散发, mm; σ_{ET} 为多年蒸散发的标准差; x_n 为第 n 个影响因子年值; $\overline{x_n}$ 为第 n 个影响因子的多年平均值, mm; σ_n 为第 n 个影响因子的标准差; β_0 为误差项; β_n 为第 n 个影响因子的标准回归系数。采用 F 检验对上述多元线性回归方程进行显著性检验, 若显著性水平 $P < 0.05$, 则认为该像元 ET 与影响因子的关系显著。

3 结果与讨论

3.1 不同遥感蒸散发产品对比

为了进一步说明 ET_R 结果的可靠性, 图 2 给出了 ET_R 与 GLDAS 4 种陆面模式的蒸散发产品数据 (ET_{CLM} 、 ET_{MOS} 、 ET_{VIC} 、 ET_{NOAH}) 以及基于不同算法得到的 3 种蒸散发产品数据 (ET_{MET} 、 ET_{MODIS} 、 ET_{PLSH}) 的泰勒图和相关系数图。从泰勒图可以看出, GLDAS 4 种模式的蒸散发数据中, ET_R 与 ET_{NOAH} 的 3 种统计指标结果最好, r 最大、SD 和 RMSE 均最小, 分别为 0.86、11.68 mm/月 和 1.62 mm/月; 基于不同算法的 3 种蒸散发产品中, 与 ET_{MET} 的 SD 和 RMSE 较小, 分别为 14.54 mm/月 和 1.73 mm/月; 与 ET_{PLSH} 的相关系数最大, 为 0.82。由此可以推断, 该降尺度方法下基于水量平衡估算的实际蒸散发结果是有一定可靠性的。

为了说明考虑水储量变化的重要性, 本文基于水平衡方程重建了未考虑水储量变化的蒸散发产品的数据 ET_{P-R} , 分析了 ET_R 和 ET_{P-R} 的一些分布状态参数, 结果如表 2 所示。与 ET_{P-R} 相比, ET_R 的标准

表 2 ET_R 与 ET_{P-R} 计算结果统计对比

Table 2 Statistical comparison between ET_R and ET_{P-R}

产品	标准差/ mm	变异 系数	极差/ mm	偏度	峰度	极端值 占比/%
ET_R	22.61	0.57	100.43	0.70	0.02	3.82
ET_{P-R}	22.81	0.62	101.07	0.95	0.21	7.05

差、变异系数均较小, 离散程度较低, 波动较小; 极差也较小; 偏度和峰度较小, 右偏的程度较小, 与正态分布的差异较小; ET_R 极端值占 3.82%, 比 ET_{P-R} 的极端值占比减少 45.8%, 数据分布较为集中, 异常值和错误值较少。综上可以看出, 计算水储量变化的蒸散发结果, 能有效捕捉蒸散发的高值, 减少异常值的出现, 减少不确定性和误差。

3.2 实际蒸散发时空变化分析

2002—2016 年金沙江流域实际蒸散发的时空分布特征如图 3 所示, 可以看到, 金沙江流域多年平均实际蒸散发量为 447.30 mm, 变化范围在 190 ~ 830 mm 之间, 空间分布为自西北部向东南部逐渐增加的趋势。金沙江流域实际蒸散发变异空间分布存在差异性 (图 3(b)), 上游离散程度较小, 下游离散程度较大。蒸散发比较稳定的区域面积占 29.3%, 变异系数为 0.67, 主要分布在流域西南部; 蒸散发很不稳定的区域面积占 12.7%, 变异系数为 1.14, 主要分布在流域中下游。流域蒸散发空间分布格局受限于水热和光照等条件, 越往流域的下游, 越能获得更多的光照、降水和热量, 越能促进植被生长, 蒸腾作用越强, 下游蒸散发量也就越多。

为探究不同土地利用类型下金沙江流域实际蒸散发的分布, 本文提取了金沙江流域各类土地利用类型进行分析。土地利用类型数据来自科技部 863 计划“全球地表覆盖遥感制图与关键技术研究”重点科研项目。对金沙江流域进行分类, 概化为农田

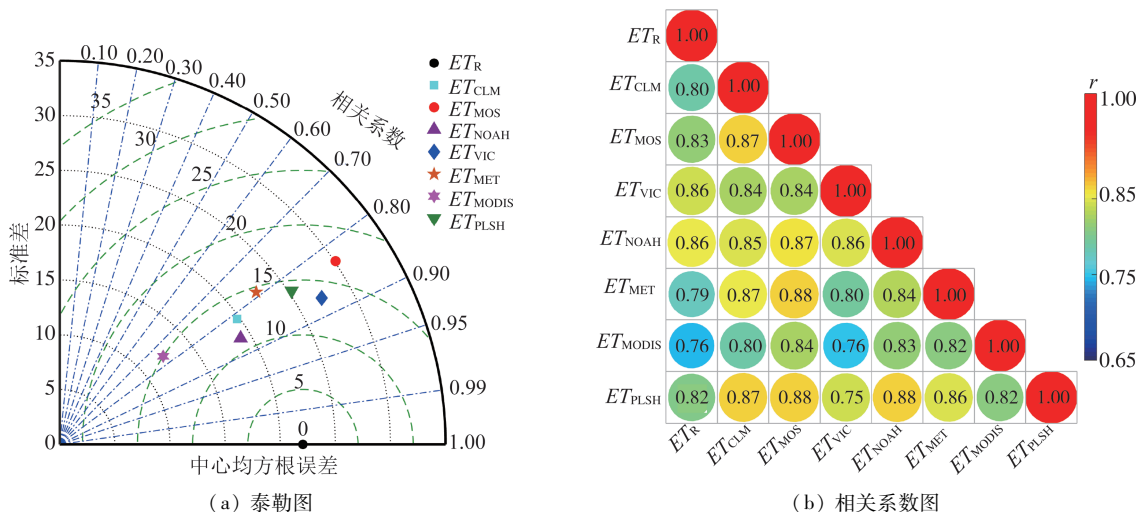
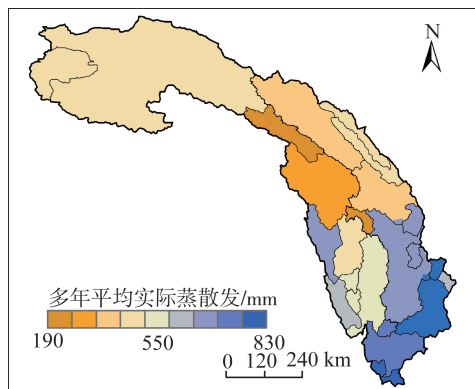
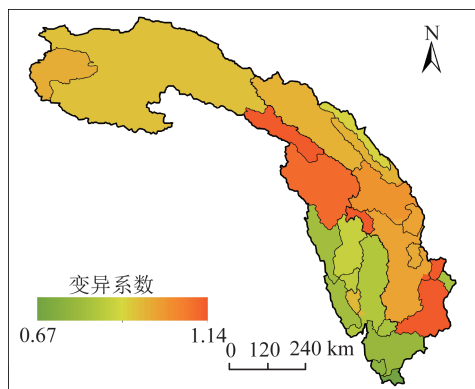


图 2 ET_R 与蒸散发产品的泰勒图和相关系数图

Fig. 2 Taylor diagram and correlation coefficient diagram of ET_R and other products



(a) 多年平均实际蒸散发



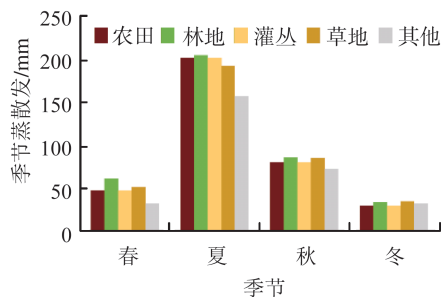
(b) 变异系数

图3 多年平均实际蒸散发和变异系数空间分布

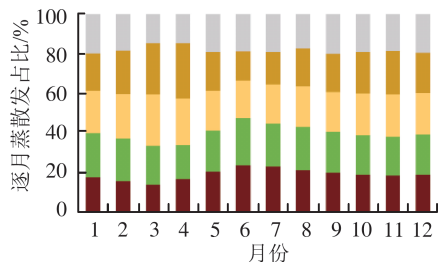
Fig.3 Spatial distributions of multi-year average actual evapotranspiration and variation coefficient of actual evapotranspiration

(11.73%)、林地(21.02%)、灌丛(21.13%)、草地(43.81%)以及其他(2.31%)。将2000年、2005年、2010年和2015年的土地利用类型图与实际蒸散发结果拟合,计算得到了各类土地利用类型不同时序下的蒸散发结果,其中年均蒸散发从大到小依次为林地(424.96 mm)、灌丛(411.04 mm)、农田(403.87 mm)、草地(397.46 mm)和其他(395.95 mm),季节和月蒸散发如图4所示。

不同土地利用类型的蒸散发大小与土地利用类型的面积占比具有不一致的表现,草地占金沙江流域总面积的43.81%,相当于林地面积的2.08倍,但是林地的年均蒸散发比草地的多6.92%。究其原因,一是林木根系吸水用于蒸腾作用,二是高郁闭度的林木树冠覆盖的低矮植物蒸散发量也较大。从图4(a)可以看出,夏季农田、林地和灌丛的蒸散发量较大,草地较小,夏季由于气温较高,降水增多丰富,日照时数长,农作物系数较大,农田蒸散发量较大;秋季林地和草地的蒸散发量较大,农田蒸散发量减少,由于农作物秋季成熟收割,蒸散发减少;进入冬季,农田、林地、灌丛等蒸散发量几乎相同,冬季气温降低,降水偏少,日照时数减少,作物处于枯萎



(a) 季节蒸散发



(b) 月蒸散发

图4 不同时序下不同土地利用类型的蒸散发结果

Fig.4 Evapotranspiration of different land use types with different time scales

期,农作物系数变小,蒸散发量减少,并且不同土地利用类型之间蒸散发差异明显减小。从图4(b)可以看出,各土地利用类型蒸散发变化呈典型的单峰型分布,1—4月草地和林地占比最大,5—8月农田和林地占比最大,9—12月灌丛和林地占比最大,林地和草地蒸散发在植物生长季占比较大,在封冻期较少,其他土地利用类型月变化不大。

3.3 实际蒸散发变化的影响因子

金沙江流域蒸散发变化与区域水热条件变化和植被分布有密切关系,同时与气象动力因素也有一定的联系,因此本文选用水分条件(降水、相对湿度)、热力学条件(气温)、动力学条件(风速)以及NDVI作为影响金沙江流域实际蒸散发的主要因子进行分析,如表3所示。

表3 实际蒸散发与各影响因子的相关性

Table 3 Correlation between actual evapotranspiration and various influencing factors

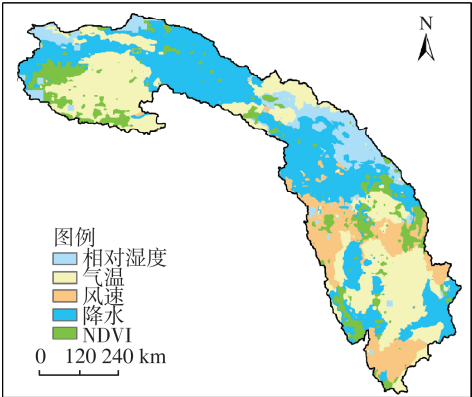
季节	降水	气温	风速	相对湿度	NDVI
春季	0.189	0.321	0.430	0.042	0.167
夏季	0.538 *	0.506	0.567	0.034	0.332
秋季	0.513 *	0.533 *	0.149	0.054	0.418
冬季	0.115	0.401	0.559 *	-0.119	0.196
年均	0.399	0.473	0.536 *	0.033	0.220

注: * 表示显著相关,通过置信度95%的检验($P < 0.05$)。

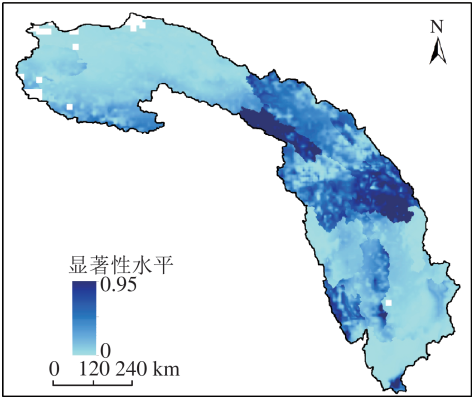
由表3可以看出,各影响因子与实际蒸散发大部分为正相关,其中风速与实际蒸散发显著正相关,相对湿度与实际蒸散发相关性最小。各季节实际蒸散发变化的主要控制因子也不相同,风速是春季蒸

散发增加的主要驱动力;夏季气温升高,降水增多,降水和风速成为实际蒸散发增加的主要控制因素;秋季,气温成为秋季蒸散发的主要影响因素;冬季降水对实际蒸散发的影响降低,风速与实际蒸散发显著相关,成为主要影响因素。

采用简单的相关分析,仅能判断单个因子对蒸散发的影响,不能综合判断各影响因子对蒸散发变化的相对重要性,采用归一化多元线性回归分析方法综合分析主导影响。图5 为各主导因子的空间分布和显著性检验,结果表明,直达门以上流域主要受降水和气温的影响,零星伴有 NDVI 的影响,影响都较显著;直达门-巴塘区间以及道孚至雅江站以上,主要受降水和相对湿度的不显著影响;雅江-攀枝花区间,蒸散发受多种因素影响,占主导作用的是气温和风速;古学区间、泸宁-桐子林区间、孙水关流域主要受降水的不显著影响。



(a) 主导因子



(b) 显著性水平

图5 实际蒸散发主导因子及显著性水平的空间分布
Fig.5 Spatial distributions of dominant influencing factors of actual evapotranspiration and significance level

金沙江流域空间异质性较强,因此从“广度”和“程度”两个方面来研究影响因子对蒸散发的影响。所谓“广度”是指逐网格对5个因子进行单个影响因子对蒸散发的简单相关性分析;所谓“程度”即对归一化多元线性回归的结果,逐网格统计各个影响

因子的面积占比。最后,综合选择面积占比最大且正相关占比最大的因子作为影响蒸散发变化的主导因子。由表4 可以看出,各主导因子面积占比从大到小为降水、气温、风速、NDVI、相对湿度,各影响因子与蒸散发正相关面积占比从大到小为相对湿度、风速、降水、气温、NDVI。5 种影响因子与蒸散发均呈正相关关系,其中相对湿度、风速和降水正相关的面积占比较大,均达到80% 以上。

表4 实际蒸散发主导因子及相关性面积占比
Table 4 Actual evapotranspiration dominant factors and correlation area proportion

主导因子	面积占比/%		
	主导因子	正相关	负相关
NDVI	10.87	62.87	37.13
降水	35.85	80.70	19.30
风速	11.90	85.66	14.34
气温	31.75	78.20	21.80
相对湿度	9.63	88.27	11.73

金沙江流域源头地处青藏高原腹地,自然条件较差,气温较低,影响植被生长,植被恢复较慢,而降水增加能使相对湿度增加,促进植被生长,蒸腾作用加强,蒸散发与降水和气温绝大多数地区呈现为正相关关系。同时,平均横向风速越大,有利于水汽疏散,促进大气中的水气循环交换,有利于蒸发作用,从而导致蒸散发速率变快,因而风速与蒸散发变化大部分地区都呈正相关关系。综合来看,金沙江流域主要受降水和气温影响较多,这两者占主导作用,风速次之,受 NDVI 和相对湿度的影响较小。

4 结 论

a. 利用降尺度方法的水量平衡下的蒸散发结果有一定的可靠性。7 种蒸散发产品之间比较,可以看出 ET_{NOAH} 和 ET_{PLSH} 与 ET_R 相关性较好,考虑水储量变化的蒸散发结果,能有效捕捉蒸散发的高值,减少异常值的出现,减少不确定性和误差。

b. 金沙江流域多年平均实际蒸散发量为447.30 mm,空间分布上表现为自西北向东南逐渐增加的趋势。从年际分布来看,流域内各类土地利用类型的年均蒸散发从大到小依次为林地、灌丛、农田、草地和其他;从季节分布来看,夏季,农田、林地和灌丛的蒸散发量较多;从年内分布来看,各土地利用类型蒸散发呈现典型的单峰型分布。

c. 各影响因子与金沙江实际蒸散发均呈正相关关系,各主导因子对实际蒸散发影响从大到小为降水、气温、风速、NDVI 和相对湿度。综合来看,金沙江流域主要受降水和气温影响较多,风速次之,受 NDVI 和相对湿度的影响较小。

参考文献:

- [1] 邱丽莎,张立峰,何毅,等. 2000—2018 年祁连山蒸散发时空变化及影响因素[J]. 水土保持研究,2020,27(3):210-217. (QIU Lisha,ZHANG Lifeng,HE Yi,et al. Spatiotemporal variations of evapotranspiration and influence factors in Qilian Mountain from 2000 to 2018 [J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(3):210-217. (in Chinese))
- [2] 张珂,鞠艳,李致家. 金沙江流域实际蒸散发遥感重建及时空特征分析[J]. 水科学进展,2021,32(2):182-191. (ZHANG Ke, JU Yan, LI Zhijia. Satellite-based reconstruction and spatiotemporal variability analysis of actual evapotranspiration in the Jinshajiang River Basin, China[J]. Advances in Water Science,2021,32(2):182-191. (in Chinese))
- [3] 张菁,张珂,王晟,等. 陕甘宁三河源区 1971—2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):288-294. (ZHANG Jing,ZHANG Ke,WANG Sheng,et al. Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the three river source area of the Shaanxi-Gansu-Ningxia contiguous region from 1971 to 2017 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(3):288-294. (in Chinese))
- [4] 曹易,张珂,李致家,等. 宁夏三河源地区 2000—2017 年水循环关键要素时空变化分析[J]. 水文,2021,41(3):88-94. (CAO Yi,ZHANG Ke,LI Zhijia,et al. Study on spatiotemporal variability and changes of key water cycle elements in the Three River Source Area of Ningxia from 2000 to 2017[J]. Journal of China Hydrology,2021,41(3):88-94. (in Chinese))
- [5] 刘堃,何祺胜,荆琛琳,等. 基于机器学习的蒸散量插补方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):109-115. (LIU Kun, HE Qisheng, JING Chenlin, et al. Gap filling method for evapotranspiration based on machine learning [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (2): 109-115. (in Chinese))
- [6] 李晓媛,于德永. 蒸散发估算方法及其驱动力研究进展[J]. 干旱区研究,2020,37(1):26-36. (LI Xiaoyuan, YU Deyong. Progress on evapotranspiration estimation methods and driving forces in arid and semiarid regions [J]. Arid Zone Research, 2020, 37 (1): 26-36. (in Chinese))
- [7] 张珂,牛杰帆,李曦,等. 洪水预报智能模型在中国半干旱半湿润区的应用对比[J]. 水资源保护,2021,37(1):28-35,60. (ZHANG Ke, NIU Jiefan, LI Xi, et al. Comparison of artificial intelligence flood forecasting models in China's semi-arid and semi-humid regions[J]. Water Resources Protection,2021,37(1):28-35,60. (in Chinese))
- [8] 周偶,彭志晴,辛晓洲,等. 非均匀地表蒸散发遥感研究综述[J]. 遥感学报,2016,20(2):257-277. (ZHOU Ti, PENG Zhiqing, XIN Xiaozhou, et al. Remote sensing research of evapotranspiration over heterogeneous surfaces;a review [J]. Journal of Remote Sensing,2016,20(2):257-277. (in Chinese))
- [9] 闫俊杰,付秀东,赵玉,等. 2001—2015 年伊犁河谷草地蒸散发时空变化分析[J]. 水土保持研究,2019,26(6):184-190,197. (YAN Junjie, FU Xiudong, ZHAO Yu,et al. Spatiotemporal variation of evapotranspiration in the grassland of Yili Valley from 2001 to 2015 [J]. Research of Soil and Water Conservation,2019,26(6):184-190,197. (in Chinese))
- [10] 韩项,尹云鹤,吴绍洪,等. 汾沁地区蒸散模拟及其时空变化特征[J]. 资源科学,2018,40(8):1658-1671. (HAN Xiang, YIN Yunhe, WU Shaohong, et al. Evapotranspiration simulation and its spatio-temporal variation characteristics in Fenqin Region [J]. Resources Science,2018,40(8):1658-1671. (in Chinese))
- [11] LI Xueying, LONG Di, HAN Zhongying, et al. Evapotranspiration estimation for Tibetan Plateau headwaters using conjoint terrestrial and atmospheric water balances and multisource remote sensing [J]. Water Resources Research,2019,55(11):8608-8630.
- [12] 温馨,周纪,刘绍民,等. 基于多源产品的西南河流源区地表蒸散发时空特征[J]. 水资源保护,2021,37(3):32-42. (WEN Xin,ZHOU Ji,LIU Shaomin,et al. Spatio-temporal characteristics of surface evapotranspiration in source region of rivers in Southwest China based on multi-source products[J]. Water Resources Protection,2021,37(3):32-42. (in Chinese))
- [13] 段娅楠,季璇,郭若愚,等. 雅鲁藏布江流域潜在蒸散发的气候敏感性及其变化的主导因子分析[J]. 水土保持研究,2020,27(2):261-268. (DUAN Yanan,JI Xuan, GUO Ruoyu, et al. Analysis on the sensitivity and dominant meteorological factors identification of potential evapotranspiration variation in Yarlung Zangbo River Basin [J]. Research of Soil and Water Conservation,2020,27(2):261-268. (in Chinese))
- [14] 詹明月,王国杰,陆姣,等. 基于 CMIP6 多模式的长江流域蒸散发预估及影响因素[J]. 大气科学学报,2020,43(6):1115-1126. (ZHAN Mingyue,WANG Guojie, LU Jiao,et al. Projected evapotranspiration and the influencing factors in the Yangtze River Basin based on CMIP6 models [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2020,43(6):1115-1126. (in Chinese))

(下转第 153 页)

- Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark[J]. Journal of Hydrology, 2003, 280(1/2/3/4): 52-71.
- [18] HE Wei, ZHANG Jian, YU Xiaodong, et al. Effect of runoff variability and sea level on saltwater intrusion: a case study of Nandu River Estuary, China[J]. Water Resources Research, 2018, 54(12): 9919-9934.
- [19] 宋芳, 秦华鹏, 陈斯典, 等. 深圳河湾流域水污染源解析研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2019, 55(2): 317-328. (SONG Fang, QIN Huapeng, CHEN Sidian, et al. Water source apportionment of pollutions in Shenzhen Bay Basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(2): 317-328. (in Chinese))
- [20] 董斯齐, 黄翀, 李贺, 等. 粤港澳大湾区 2015—2019 年入海河口水质变化趋势[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 48-55. (DONG Siqi, HUANG Chong, LI He, et al. Change trend of water quality in estuaries of Guangdong, Hong Kong and Macao Greater Bay Area from 2015 to 2019[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 48-55. (in Chinese))
- [21] 梁志宏, 陈秀洪, 罗欢, 等. 深圳湾水质时空分布特征及污染源解析[J]. 水资源保护, 2020, 36(4): 93-99. (LIANG Zhihong, CHEN Xiuhong, LUO Huan, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of water quality in Shenzhen Bay and pollution source analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 93-99. (in Chinese))
- [22] 蔡阳扬, 岑竞仪, 欧林坚, 等. 夏秋季珠江口水域 COD、DO、营养盐分布特征及其富营养化评价[J]. 暨南大学学报(自然科学与医学版), 2014, 35(3): 221-227. (CAI Yangyang, CEN Jingyi, OU Linjian, et al. Distribution characteristics of COD, DO and nutrients in Pearl River Estuary and its eutrophication assessment in summer and autumn[J]. Journal of Jinan University (Natural Science & Medicine Edition), 2014, 35(3): 221-227. (in Chinese))
- [23] 方神光. 水质扩散系数在伶仃洋水域水体交换中的影响分析[J]. 海洋科学进展, 2012, 30(2): 177-185. (FANG Shengguang. Analysis of effect of water quality diffusion coefficient on water exchange in the Lingdingyang Bay[J]. Advances in Marine Science, 2012, 30(2): 177-185. (in Chinese))
- [24] 王扬, 李瑞杰, 盛建明, 等. 灌河口近岸海域污染物迁移扩散的数值模拟[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(3): 381-385. (WANG Yang, LI Ruijie, SHENG Jianming, et al. Numerical simulation of transportation and diffusion of pollutants in nearshore of Guanhe Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(3): 381-385. (in Chinese))
- [25] TAKEOKA H. Fundamental concepts of exchange and transport time scales in a coastal sea[J]. Continental Shelf Research, 1984, 3(3): 311-326.
- [26] CUCCO A, UMGIESSER G. Modeling the Venice Lagoon residence time[J]. Ecological Modelling, 2006, 193(1/2): 34-51.

(收稿日期: 2021-10-12 编辑: 施业)

(上接第 110 页)

- [15] 郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 等. 基于 MODIS 蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 45-52. (GUO Xiaotong, MENG Dan, JIANG Bowu, et al. Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021, 48(3): 45-52. (in Chinese))
- [16] 徐冉, 铁强, 代超, 等. 雅鲁藏布江奴下水文站以上流域水文过程及其对气候变化的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 288-293. (XU Ran, TIE Qiang, DAI Chao, et al. Study on hydrological process in upper basin of Brahmaputra River from Nuxia Hydrological Station and its response to climate change[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2015, 43(4): 288-293. (in Chinese))
- [17] TAPLEY B D, BETTADPUR S, RIES J C, et al. GRACE measurements of mass variability in the earth system[J]. Science, 2004, 305(5683): 503-505.
- [18] RODELL M, HOUSER P R, JAMBOR U, et al. The global land data assimilation system[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2004, 85(3): 381-394.
- [19] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature, 2010, 467(7318): 951-954.
- [20] MU Qiaozhen, HEINSCH F A, ZHAO Maosheng, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4): 519-536.
- [21] ZHANG Ke, 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.
- [22] 蔡涛. 基于 Mann-Kendall 方法的大凌河中上游 1956—2016 年降水变化特性分析[J]. 人民珠江, 2018, 39(11): 83-88. (CAI Tao. Analysis of precipitation variations in the middle and upper reaches of the Dalinghe River Basin from 1956 to 2016 based on the Mann-Kendall method[J]. Pearl River, 2018, 39(11): 83-88. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-07 编辑: 俞云利)