DOI: 10.5846/stxb202001240174

詹云军,章文,严岩,王辰星,荣月静,朱捷缘,卢慧婷,郑天晨.长江流域实际蒸散发演变趋势及影响因素.生态学报,2021,41(17):6924-6935. Zhan Y J,Zhang W,Yan Y,Wang C X,Rong Y J,Zhu J Y,Lu H T,Zheng T C.Analysis of actual evapotranspiration evolution and influencing factors in the Yangtze River Basin.Acta Ecologica Sinica,2021,41(17):6924-6935.

长江流域实际蒸散发演变趋势及影响因素

詹云军¹,章 文^{1,2},严 岩^{2,*},王辰星²,荣月静²,朱捷缘^{2,3},卢慧婷^{2,3},郑天晨^{2,3}

- 1 武汉理工大学,资源与环境工程学院,武汉 430070
- 2 中国科学院生态环境研究中心,城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085
- 3 中国科学院大学,北京 100049

摘要:长江流域是我国重要的水资源供给区域,流域生态系统的水资源供给不仅服务于流域内部,同时也通过南水北调服务于北方部分地区。实际蒸散发作为地表水文循环重要环节会直接影响到生态系统的水资源供给服务能力。在全球气候变暖与地表环境变化的背景下,分析长江流域实际蒸散发的演变趋势与成因,对于我国水资源供给和生态安全的保障有着重要的意义。在对比 GLEAM_v3.2a、MOD16、GLDAS_Noah2、ERA_Interim 四种常用蒸散发数据集精度的基础上,选择精度最优的 GLEAM_v3.2a 数据集,通过分段线性拟合、逐步回归和相关性分析了 1981—2017 年间长江流域地表实际蒸散发演变趋势和影响因素。结果表明:(1)长江流域实际蒸散发的演变具有明显的阶段性,1981—1997 年为不显著下降阶段,下降速率为-0.02 mm/a,下降区域主要分布在长江流域西北和东部部分子流域,1998—2017 年为全流域显著上升阶段,上升速率为 1.94 mm/a;(2)日照时数下降速率减缓、植被指数增加速率升高是长江流域实际蒸散发阶段性变化的主要原因,气温突增、风速回升在长江流域实际蒸散发的长期增加趋势中也起到了重要的正向作用;(3)1998—2017 年间,长江流域生态系统水资源供给服务量在实际蒸散发显著增加的影响下有所下降,流域西部地区下降趋势明显,旱情加剧;(4)建议在长江流域西部干旱地区优先加强对本地原生林的保护,同时在生态修复工程中选择针叶乔木等蒸腾能力弱的树种,以缓解旱情加剧的趋势。

关键词:实际蒸散发;生态系统服务;气候变化;植被;长江流域

Analysis of actual evapotranspiration evolution and influencing factors in the Yangtze River Basin

ZHAN Yunjun¹, ZHANG Wen^{1,2}, YAN Yan^{2,*}, WANG Chenxing², RONG Yuejing², ZHU Jieyuan^{2,3}, LU Huiting^{2,3}, ZHENG Tianchen^{2,3}

- 1 College of Resources and Environmental Engineering Wuhan University of Techology, Wuhan 430070, China
- 2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Beijing 100085, China
- 3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Yangtze River Basin is an important water resource supply area in China. The water resource supply service of the river basin ecosystem not only serves the interior of the river basin, but also serves parts of the north through the South-to-North Water Transfer Project. As an important part of the surface hydrological cycle, actual evapotranspiration will directly affect the ability of the ecosystem to provide water resources. Under the background of climate and surface environment changes, analysis of the evolutionary trend and causes of actual evapotranspiration in the Yangtze River Basin has important referential significance for the protection of water resources and ecological security in China. Based on the comparison of the accuracy GLEAM_v3.2a, MOD16, GLDAS_Noah2, and ERA_Interim four evapotranspiration data sets,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502102)

收稿日期:2020-01-24; 网络出版日期:2021-06-11

^{*}通讯作者 Corresponding author.E-mail: yyan@ rcees.ac.cn

we select the GLEAM_v3.2a data set with the best accuracy to analyze the evolution trend and influencing factors of the actual evapotranspiration in the Yangtze River Basin from 1981 to 2017. The results show that: (1) the evolution of the actual evapotranspiration in the Yangtze River Basin is staged. 1981—1997 was an insignificant decline stage with a decline rate of -0.02 mm/a. The decline area was mainly distributed in the northwest and eastern parts of the Yangtze River Basin. 1998—2017 was a significant rising stage of the whole basin, with an increasing rate of 1.94 mm/a. (2) The decreasing rate of sunshine hours and the increasing rate of vegetation index are the main reasons of periodic changes of the actual evapotranspiration in the Yangtze River Basin. The sudden increases of temperature and wind speed have also played the positive role in the long-term increase trend of actual evapotranspiration in the Yangtze River Basin. (3) Between 1998 and 2017, the water yield of ecosystem in Yangtze River Basin decreased due to the significant increase in actual evapotranspiration. The decline in the western region of the river basin was obvious, and the drought situation was intensified. (4) It is recommended to preferentially strengthen the protection of native forests in the arid areas in the western part of the Yangtze River Basin, and to select tree species with weak transpiration ability such as coniferous trees in afforestation projects, to alleviate the trend of increasing drought.

Key Words: actual evapotranspiration; ecosystem services; climate change; vegetation; Yangtze River Basin

实际蒸散发包括植被蒸腾和水分蒸发,是指土壤-植被-大气系统中的水汽交换量与过程,与生态系统服务、生态安全格局息息相关。在全球陆地降水中实际蒸散发的占比高达 60%—65%^[1],其量的变化会直接影响到地表生态系统的水资源供给服务能力;同时实际蒸散发作为连接地表植被气孔行为、水碳交换的纽带,控制着地表植被生态系统的格局以及净初级生产力等关键生态过程^[2]。在气候变化逐渐加剧和人类活动不断加强的背景下,评估区域实际蒸散发的响应变化与成因,对于区域社会—经济—自然复合生态系统的可持续发展有着重要的意义。目前大尺度的实际蒸散发并不能通过观测直接获取,模型模拟是实际蒸散发数据的主要获取手段。Yan 基于冠层导度过程模型分析出了全球陆地实际蒸散发整体上升的线性趋势^[3];李修仓等使用平流—干旱模型发现在气温日较差和日照时数的下降是珠江流域实际蒸散发减少的主要原因^[4];刘健通过互补相关模型发现由于太阳辐射和风速的下降,鄱阳湖流域早期的蒸散发呈现出下降趋势^[5];刘冲使用WaSSI-C生态水文模型计算出了鄱阳湖流域实际蒸散发 1983—2011 年间的上升趋势,并认为植被恢复是主要原因^[6]。综合已有的文献可以看出,气象要素和地表植被是实际蒸散发的重要影响因素,在全球气候变化逐渐加强,生态修复工程大力推行的背景下,我国各区域实际蒸散发的时空格局也可能会发生改变。

长江流域是我国重要的水资源供给区域,随着南水北调工程的建设,其重要性得到了进一步的提升。由于流域内水资源时空分配不均,长江流域旱涝灾害频发^[7-8],水资源供给服务能力不稳定。实际蒸散发是流域生态系统水资源供给服务能力的直接影响因素^[1],分析长江流域实际蒸散发的变化趋势与成因对于流域的水资源管理有着重要的意义。Gao^[9]和Wang^[10]发现20世纪60年代至20世纪末期间,受到日照时数下降的影响,长江流域实际蒸散发呈现出下降的趋势。早期关于长江流域实际蒸散发的研究在趋势分析方面较少考虑实际蒸散发演变趋势的阶段特性,在影响因素分析方面仅分析了气象因素的影响,忽略了地表环境变化的作用。随着我国退耕还林工程和农业效率的提高,21世纪以来长江流域地表植被覆盖度快速增长^[11],同时流域内气候变化仍在进一步加剧,20世纪90年代流域内出现了气温突增的状况^[12]。在气候和地表环境变化的综合影响下,近几十年来长江流域实际蒸散发的响应状况目前仍然未知。本文基于水量平衡原理对GLEAM_v3.2a^[13]、MOD16^[14]、GLDAS_Noah2^[15]、ERA_Interim^[16]四种已公开发布的实际蒸散发模型计算结果数据集在长江流域的精度进行了对比验证,选取精度最高的实际蒸散发数据集,使用分段线性拟合、逐步回归、相关性分析等方法分析了 1981—2017 年间长江流域实际蒸散发演变趋势及主导因素,研究为长江流域的生态服务评估、生态安全保障的相关研究提供科学的依据与参考。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

长江发源于青藏高原唐古拉山脉各拉丹冬峰,全长 6397 km,流域面积 180 万 km²,涉及了中国 19 个省、自治区、直辖市,涵盖人口约为 4 亿。流域内地形地貌复杂多样,整体上呈现出西北高东南低的三级阶梯状分布态势(图 1)。气候上,流域由西向东横跨了青藏高寒区、西南热带季风气候区、华中亚热带季风气候区,多年平均气温约为 15℃,东高西低、南高北低的;多年平均降雨量约为 1120 mm,降水量的空间分布极不均匀,自东南向西北呈减小趋势。作为中国第一长河,长江流域内部水系发达,湖泊众多,水资源丰富,流域内的江都水利枢纽和丹江口水库被选为南水北调水利工程东线和中线的水源地,分别于 2013 年末和 2014 年末开始向中国北方水资源匮乏地区调水,截止 2019 年年末累计调水 300 亿 m³[17]。由于水资源分布的极不均匀和极端气候的频繁出现,长江流域也是我国旱涝灾害频发的地区[7-8],有研究显示气候的变化对流域内旱涝灾害的发生有驱动的作用[18-19]。

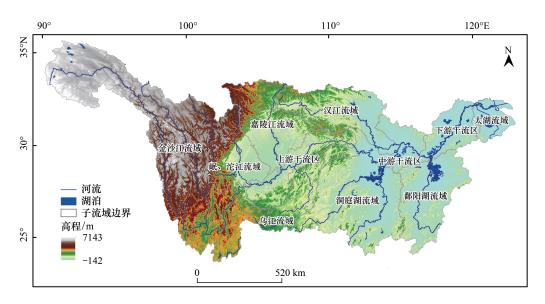


图 1 长江流域地形状况与子流域分布

Fig.1 Topographical conditions and sub-basin distribution in the Yangtze River Basin

1.2 研究数据

本次研究的数据来源分别是英国布里斯托大学(https://www.gleam.eu/)GLEAM_v3.2a、美国蒙大拿大学(http://www.ntsg.umt.edu/project/modis/mod16.php)MOD16、美国国家航空航天局(https://search.earthdata.nasa.gov/search)GLDAS_Noah2、和欧洲中期天气预报中心(https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim)ERA_Interim 四种实际蒸散发数据集,所选数据集概况如表 1 所示。用于蒸散发数据集精度评价的径流量数据来源于长江泥沙公报(http://www.cjw.gov.cn/z-wzc/bmgb/)。气象站点监测数据下载自中国气象数据网(http://www.nmic.cn/site/article/id/29086.html),具体包括降水量、气温、风速、相对湿度以及日照时数监测数据,植被归一化指数数据取自美国国家航空航天局提供的 VIP 数据集(1981—2014年)和MOD13数据集(2015—2017年)。在进行数据分析之前,首先在ArcGIS平台上,对气象站点监测数据进行空间插值,对实际蒸散发数据和植被归一化指数数据进行拼接、裁剪、重投影、重采样、加和等预处理,最终将所有数据的坐标与投影均转化为WGS84与Albert等积投影,时空间分辨率统一为1a与1km,用于进一步的数据分析。

表 1 四种实际蒸散发数据集的基本概况

Table 1 Basic overview of four actual evapotranspiration data sets

数据集名称 Dataset name	时间分辨率 Time resolution	空间分辨率 Spatial resolution	时间跨度 Time span	数据集名称 Dataset name	时间分辨率 Time resolution	空间分辨率 Spatial resolution	时间跨度 Time span
GLEAM_v3.2a	1 d	0.25°	1981—2017	GLDAS_Noah2	1月	0.25°	2000—2017
MOD16	8 d	1 km	2000—2014	ERA_Interim	1 d	0.25°	1979—2017

2 研究方法

2.1 水量平衡原理

本文中水量平衡原理主要应用于蒸散发数据集的精度验证和讨论部分长江流域生态系统水资源供给服务的计算,水量平衡原理的计算公式如下:

$$P = R + ET + C \tag{1}$$

式中,P 为流域年降水量,mm;R 为流域年径流量,同时也可以表示流域生态系统的水资源供给服务量^[20],mm;ET 为年实际蒸散发,mm;C 为流域地面及地下储水量的变化量,mm,在年度或多年尺度上,C 可以忽略不计^[1]。

在蒸散发数据集的对比验证过程中,本文基于水量平衡原理,计算了验证时段内四个数据集的平均绝对误差 MAE、相对绝对误差 MRAE、均方根误差 RMSE 三项误差指标以及相关系数指标 r。误差指标可以描述各蒸散发模拟数据集相对的误差大小,而 r 则可表示各数据集所描绘的长江流域实际蒸散发变化趋势与现实状况的吻合程度。四项指标的计算方法在相关文献[21]中有详细说明,在此不做赘述。

2.2 流域实际蒸散发演变趋势的分析方法

分段线性回归是 Shao 等提出的一种线性回归模型,它能检测出时间序列数据趋势变化的 m 个突变点,识别出研究时间范围内 m+1 个有着不同线性变化趋势的时间段^[22]。本研究同时选用线性回归和分段线性回归法,分析长江流域实际蒸散发及其影响因素的整体与阶段变化趋势状况。分段线性回归方程如下:

$$\begin{cases} ET_{t} = a_{1}t + b_{1}(0 < t < CP_{1}) \\ ET_{t} = a_{j}t + b_{j}(CP_{j-1} < t < CP_{j}) \\ ET_{t} = a_{m+1}t + b_{m+1}(t > CP_{j}) \end{cases}$$
(2)

回归方程中,t 表示年份,取值区间为研究的时间范围; ET_i 表示年份为 t 时流域 ET 的拟合值; CP_j (Change Point)表示分段线性回归法中检测出的第 j 个趋势突变点,0 < j < m; a_j 和 b_j 分别表示第 j 个分段中,回归方程的斜率和常数项, a_j 可以表征第 j 个时间段内,流域实际蒸散发的线性变化趋势。拟合优度 R^2 和显著性检验指标 P 是两个常用的统计检验指标,本文采用以上两个指标对趋势分析结果进行检验。

2.3 实际蒸散发变化的成因分析方法

本文采用逐步回归分析和相关性分析的方法,探究气象与植被因素对流域实际蒸散发趋势的影响。逐步回归分析法可以保证最后所得的回归模型中所有的影响因子都具有显著性,以建立最优回归方程,对实际蒸散发的变化进行归因。最优回归方程如下:

$$Y = a_0 + a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_k X_k + \varepsilon$$
 (3)

式中, a_0 为常数项; a_1 ,…, a_k 为各人选自变量的标准化回归系数,能够表示了各自变量对因变量变化的相对影响大小; X_1 ,…, X_k 为人选最终回归方程的自变量;Y为因变量。

3 研究结果及分析

3.1 长江流域实际蒸散发数据集的精度对比验证

在区域尺度实际蒸散发的研究中,时空连续的实际蒸散发数据必不可少,为了满足这一需求,许多学者开

展了大尺度实际蒸散发模型模拟的研究,目前为止,已有多种长时间序列的实际蒸散发数据集被发布,例如GLEAM_v3.2a、MOD16、GLDAS_Noah2、ERA_Interim、JRA55^[23]等。在众多的数据集中,MOD16 数据集因其易获取、空间分辨率高、精度较好的优点,在国内各流域实际蒸散发的研究中应用较多^[24-27]。考虑到实际蒸散发数据的可获取性和研究结果的可靠性,本文基于水量平衡原理,使用 2005—2013 年间的降水量空间插值数据与长江泥沙公报中的径流量数据,计算了金沙江流域、嘉陵江流域、乌江流域、汉江流域、洞庭湖流域、鄱阳湖流域的年实际蒸散量,基于此评价了 GLEAM_v3.2a、MOD16、GLDAS_Noah2、ERA_Interim 四种蒸散发数据集的精度,并在长江流域尺度上对比了年实际蒸散量模型模拟值与水量平衡计算值的年际变化状况,结果如图 2 所示。在 4 种蒸散发数据集中,ERA-Interim 三项误差指标值最大,其均方根误差 RMSE 高达 201.24 mm,高于 MOD16 在全球 26 个流域的检验结果(RMSE = 194 mm)^[28];GLDAS-Noah2、GLEAM-v3.2a、MOD16 数据

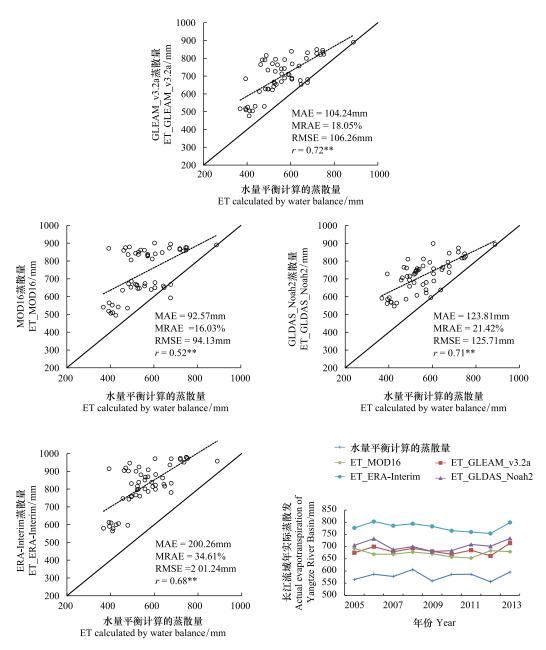


图 2 四种蒸散发数据集在长江流域的精度验证与年际变化对比

Fig 2 Accuracy verification and interannual variation comparison of four evapotranspiration data sets in the Yangtze river basin ET:蒸散发 Evapotranspiration

集的误差较小,RMSE 均小于 MOD16 在全球 26 个流域的检验结果,其中 MOD16 蒸散发数据集的误差最小,但其对应的相关系数也最低,GLEAM-V3.2a 数据集的误差虽然略高于 MOD16 数据集,但其相关系数 r 最高。综合考虑的 MAE、MRAE、RMSE 以及 r 四项精度评价指标,认为 4 种蒸散发数据集中,GLEAM-v3.2a 数据集最能反映出长江流域 ET 的实际时空格局状况。因此,本文最终选用 GLEAM-v3.2a 数据集,用于长江流域 ET 时空格局与成因的分析。

3.2 长江流域实际蒸散发的演变趋势

基于 GLEAM-V3.2a 实际蒸散发数据,使用线性趋势分析与分段线性趋势分析 1981—2017 年间长江流域实际蒸散发的变化趋势,结果如图 3 所示。线性趋势分析的结果显示,在 1981—2017 年间,长江流域实际蒸散发呈现出 1.16 mm/a 的显著上升趋势(P<0.01,R²=0.39),而分段线性趋势分析的结果(R²=0.47)表明,在 1981—2017 年间,长江流域实际蒸散发的线性趋势在 1997 年左右存在突变点,1981—1997 年间长江流域实际蒸散发以 0.02 mm/a 线性趋势不显著下降(P>0.05),1998—2017 年间长江流域实际蒸散发则以 1.94 mm/a 的线性趋势显著上升(P<0.01)。对比线性趋势分析和分段线性趋势分析的拟合优度 R²,可以发现分段线性趋势分析的结果能够更加精确的描绘出长江流域实际蒸散发的变化趋势。Gao 和 Wang 的研究[9-10] 也发现早期长江流域内实际蒸散发呈现出下降的线性趋势,这点与本文的分段线性趋势分析中 1981—1997 年间的趋势分析结果—致。此外,为了进一步验证分段线性趋势分析中 1998—2017 年间的显著上升趋势结果,本文使用 2000—2017 年中国水资源公报和中国泥沙公报中的降水量、径流量数据,基于水量平衡原理计算了长江流域 ET 的变化趋势(2013 年年末南水北调工程正式通水,但年均约 60 亿 m³ 的跨流域调水量在长江径流量多年均值中占比不到 1%[17],故忽略其对 ET 计算的影的分段线性趋势分析结果(1.94 mm/a)非常接近,证明了本文趋势分析结果的可靠性。

实际蒸散发的变化趋势在长江流域内部具有一定的空间差异性。以突变点 1997 年为时间间隔,计算 1981—2017 年、1981—1997 年、1998—2017 年三个时间段内长江子流域实际蒸散发的变化趋势,结果如图 4、表 2。在 1981—1997 年间,11 个长江子流域的 ET 变化趋势均不显著,ET 不显著下降的区域主要集中在长江流域西北部(金沙江流域、岷沱江流域、嘉陵江流域、汉江流域)和东部地区(太湖流域、鄱阳湖流域),下速率在-0.77—-0.03 mm/a之间,ET 不显著上升区域主要分布在干流区域、乌江流域以及洞庭湖流域,上升速率在 0.38—1.23 mm/a之间;1998—2017 年间,所有子流域 ET 均呈现出增长的趋势,显著增长的区域主要集中在西北部分子流域(岷沱江流域、嘉陵江流域、汉江流域)以及上游干流区和鄱阳湖流域,其中嘉陵江增长速率最大,为 3.39 mm/a。从整个研究时间范围(1981—2017 年)来看,在 11 个子流域中,除了西北部的金沙江流域、岷沱江流域不显著外,其他子流域实际蒸散发均呈显著增长的趋势,增长速率的高值区主要集中在中、下游干流区和鄱阳湖流域、增长速率均超过了 1.8 mm/a。

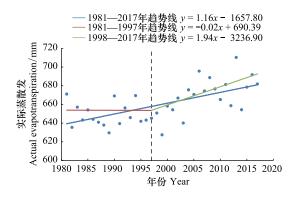


图 3 1981—2017 年间长江流域实际蒸散发演变趋势 Fig. 3 The trends of actual evapotranspiration in the Yangtze River Basin from 1981 to 2017

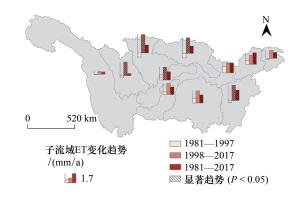


图 4 长江子流域 1981—2017 年间实际蒸散发变化趋势 Fig.4 Trends of actual evapotranspiration in sub-basins of Yangtze River from 1981 to 2017

表 2 长江子流域 1981—2017 年间实际蒸散发变化趋势

Table 2 Trends of actual evapotranspiration in sub-basins of Yangtze River from 1981 to 2017

子流域 Sub basin	1981—1997	1998—2017	1981—2017	子流域 Sub basin	1981—1997	1998—2017	1981—2017
金沙江 Jinshajiang	-0.03	0.51	0.45	汉江 Hanjiang	-0.83	2.87 **	1.35 *
岷沱江 Mintuojiang	-0.36	2.53 *	0.43	中游干流 Middle mainstream	1.23	1.88	1.85 **
嘉陵江 Jialingjiang	-0.77	3.39 **	1.47 **	下游干流 Lower mainstream	0.72	1.71	2.14 **
乌江 Wujiang	0.46	2.04	1.41 **	太湖 Taihu Lake	-0.19	1.48	1.12 **
上游干流 Upper mainstream	0.38	2.39 *	1.55 **	鄱阳湖 Poyang Lake	-0.36	2.81 *	1.92 **
洞庭湖 Dongting Lake	0.82	2.27	1.51 **				

^{*:}P<0.05; **:P<0.01;其它标准化系数不显著

3.3 长江流域气象与植被因素演变趋势

气候因素和下垫面植被的状态是影响实际蒸散发过程的重要因素,在探究长江流域蒸散发演变趋势成因之前,有必要预先分析气象要素与植被状况的变化趋势,以便于理解各影响因素作用于实际蒸散发的过程与机制。基于气象监测站点气象数据的空间插值结果和植被归一化指数数据,使用线性趋势分析的方法,分析了长江流域气象与植被要素在 1981—2017 年、1981—1997 年、1998—2017 年 3 个时间段内的变化趋势,结果如表 3 所示。在 1981—2017 年间,长江流域内植被归一化指数呈现出显著上升的趋势,且 1998—2017 年内的上升速率要显著高于 1981—1997 年;1981—2017 年间气温也显著上升,但在 1981—1997 年、1998—2017 年两个时段内,气温上升的趋势并不显著,这间接说明气温在 1997 年左右存在着突增的状况,钟晨晨在研究中也发现了这一现象[12];日照时数在整个研究时间范围内保持着下降趋势,但下降趋势有所减缓;而风速、降水、湿度的变化趋势都具有阶段性,前期(1981—1997 年)长江流域风速和降水量有所下降,相对湿度有所升高,但后期(1998—2017 年)风速和降水量则呈现出上升的趋势,相对湿度有所下降。

表 3 1981—2017 年间长江流域气象与植被要素的变化趋势

Table 3 The trends in meteorological and vegetation elements in the Yangtze River Basin from 1981 to 2017

时间 Time	植被归—化指数 Normalized difference vegetation index(/10a)	日照时数 Sunshine hours/ (h/a)	气温 Temperature/ (℃/a)	风速 Wind speed/ (m s ⁻¹ a ⁻¹)	降水量 Precipitation/ (mm/a)	相对湿度 Relative humidity/ (%/a)
1981—2017	24.120**	-1.836	0.034 **	-0.005 **	0.822	0.005
1981—1997	8.714 *	-2.775	0.012	-0.014 **	-2.612	0.009
1998—2017	33.773 **	-0.355	0.019	0.060 **	1.335	-0.100

^{*:}P<0.05; **:P<0.01;其它趋势不显著

3.4 长江流域实际蒸散发影响因素分析

气候要素能够改变水汽传输环境、影响能量供给的条件,进而决定着实际蒸散发可能达到的最大量,而下垫面上生长的植被则分别作为截流蒸发和蒸腾效应的过程载体,会进一步影响实际蒸散发量的大小^[1]。近三十多年以来,长江流域实际蒸散发及其气象、植被影响要素呈现出了明显的阶段性变化,为了探究不同阶段长江流域实际蒸散发演变主要影响因素的时空演替状况,本文使用逐步回归分析和皮尔森相关性分析的方法分别在长江流域和子流域的尺度上探究了不同阶段气象与植被要素在蒸散发演变过程中的重要性。

根据逐步回归分析结果(表 4)可以发现,在长江流域尺度上,实际蒸散发的主要影响因素具也有阶段性变化。在 1981—1997 年间,6 个影响要素中仅有日照时数入选最终回归方程,标准化系数为 0.470(P<0.05),日照时数的下降是长江流域实际蒸散发下降的主要原因,日照时数的下降会减少地表蒸散发的能量来源,进而削弱地表蒸发蒸腾的过程, Wang^[10]在研究中也得出了相似的结论; 1998—2017 年间,植被归一化指数 NDVI 和日照时数入选了逐步回归方程,标准化回归系数分别为 0.768、0.551(P<0.01),说明在这一阶段的植被恢复对长江流域的蒸散发过程有明显的正向促进作用。植被的增长会增加蒸散发过程的降雨截流蒸发量与植被蒸腾量,虽然日照时数的下降对实际蒸散发有抑制效应,但在植被恢复的主导下,长江流域实际蒸散发

仍呈现了出显著上升的趋势。整体上来看,1981—2017年间,植被恢复是长江流域实际蒸散发显著增长的主导因素,其标准化回归系数最高,为0.805(*P*>0.01)。

在子流域尺度上,本文基于皮尔森相关系数,分析 了各子流域内气象与植被要素在不同阶段与实际蒸散 发的相关性,结果如图 5-7、表 5-7 所示。在 1981-1997年间,日照时数在长江大部分子流域内与实际蒸 散发呈显著正相关关系,西北部的岷沱江、嘉陵江、汉江 流域以及东南区域的鄱阳湖流域主要受到日照时数下 降的影响,实际蒸散发量有所减少。而在干流区、乌江 流域、洞庭湖流域内,实际蒸散发在日照时数、植被、降 水、气温等因素的综合作用下,呈现出上升的趋势。太 湖流域与其他子流域有所区别,其实际蒸散发仅与植被 归一化指数显著相关,通过分区统计发现太湖流域的植 被归一化指数在这一阶段有所下降(张亮在分析长江 流域植被覆盖度时空变化时也得出了一致的结论[29]), 地表植被退化是太湖流域实际蒸散发下降的主要原因。 在 1998—2017 年间,除了洞庭湖、鄱阳湖、太湖流域外, 长江大部分子流域中植被归一化指数与实际蒸散发显 著正相关或正相关系数最大,植被恢复是长江流域这些 地区实际蒸散发上升的重要原因。洞庭湖、鄱阳湖流域 实际蒸散发在这一时期仅与相对湿度显著负相关,太湖 流域实际蒸散发则仅与气温显著正相关。此外风速、日 照时数在嘉陵江、乌江、上游干流区对蒸散发也有较大 的影响。在整个研究时间范围(1981-2017年)上来 看,植被恢复是所有子流域实际蒸散发上升的重要原 因,风速的回升对西部部分子流域实际蒸散发的升高也 有较大的正向作用。在大部分子流域中,气温在 1981-1997年、1998-2017年两个时段内与实际蒸散 发的相关性并不明显,但在更长的时段(1981-2017

表 4 长江流域实际蒸散发与其影响因素的逐步回归分析结果
Table 4 Stepwise regression analysis of actual evapotranspiration and its influencing factors in the Yangtze River Basin

	meters in the rungize in	er Busin
时间 Time	逐步回归方程 人选要素 Enter factors	标准化系数 Standardized coefficient
1981—2017	植被归一化指数	0.805 **
	日照时数	0.407 **
1981—1997	日照时数	0.470 *
1998—2017	植被归一化指数	0.768 **
	日照时数	0.551 **

*:P<0.05: **:P<0.01:其它标准化系数不显著

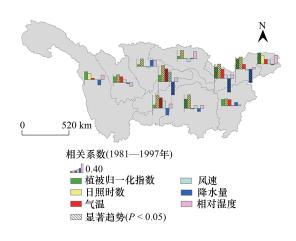


图 5 1981—1997 年长江子流域实际蒸散发与气象、植被因素相 关性分析

Fig. 5 Correlation Analysis of Actual Evapotranspiration and Meteorological and Vegetation Factors in the Yangtze River Basin from 1981 to 1997

年)上与实际蒸散发显著相关,这可能是由于气温在 1981—1997 年、1998—2017 年两个时段内变化并不显著,在 1997 年左右突增的状况导致的,说明气温的突增现象在长江流域实际蒸散发的长期升高趋势中仍起到较大的促进作用。

表 5 1981—1997 年长江子流域实际蒸散发与气象、植被因素的相关系数

Table 3 Correlation coefficient of Actual Evapotranspiration and Meteorological and Vegetation Factors in the Yangtze River Basin from 1981 to 1997

子流域 Sub basin	植被归一化指数 Normalized difference vegetation index	日照时数 Sunshine hours	气温 Temperature	风速 Wind speed	降水量 Precipitation	相对湿度 Relative humidity
金沙江 Jinshajiang	0.40	0.31	0.08	0.00	-0.26	0.23
岷沱江 Mintuojiang	0.30	0.39 **	0.29	0.14	-0.06	-0.17
嘉陵江 Jialingjiang	0.09	0.37 **	0.01	-0.07	0.31	0.29
乌江 Wujiang	0.16	0.64 **	0.51 *	0.36	-0.34	0.21

续表

子流域 Sub basin	植被归一化指数 Normalized difference vegetation index	日照时数 Sunshine hours	气温 Temperature	风速 Wind speed	降水量 Precipitation	相对湿度 Relative humidity
上游干流 Upper mainstream	0.33	0.81 **	0.64 **	0.48 *	-0.65 *	0.20
洞庭湖 Dongting Lake	0.46 *	0.67 **	-0.03	0.15	-0.16	0.15
汉江 Hanjiang	0.13	0.42 **	0.02	-0.14	0.04	0.36
中游干流 Middle mainstream	0.56 *	0.70 **	0.46	0.17	-0.68 *	0.18
下游干流 Lower mainstream	0.51 *	0.59 *	0.24	-0.05	-0.67 *	0.08
太湖 Taihu Lake	0.54 *	0.42	0.23	0.20	-0.05	0.42
鄱阳湖 Poyang Lake	0.32	0.35 **	0.31	0.02	0.18	0.05

^{*:}P<0.05; **:P<0.01; 其它标准化系数不显著

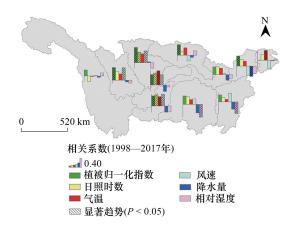


图 6 1998—2017 年长江子流域实际蒸散发与气象、植被因素相 关性分析

Fig. 6 Correlation Analysis of Actual Evapotranspiration and Meteorological and Vegetation Factors in the Yangtze River Basin from 1998 to 2017

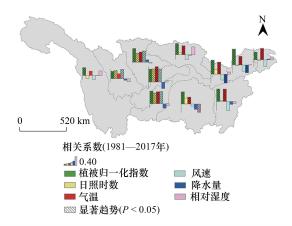


图 7 1981—2017 年长江子流域实际蒸散发与气象、植被因素相 关性分析

Fig. 7 Correlation Analysis of Actual Evapotranspiration and Meteorological and Vegetation Factors in the Yangtze River Basin from 1981 to 2017

表 6 1998—2017 年长江子流域实际蒸散发与气象、植被因素的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of Actual Evapotranspiration and Meteorological and Vegetation Factors in the Yangtze River Basin from 1998 to 2017

子流域 Sub basin	植被归—化指数 Normalized difference vegetation index	日照时数 Sunshine hours	气温 Temperature	风速 Wind speed	降水量 Precipitation	相对湿度 Relative humidity
金沙江 Jinshajiang	0.30	-0.27	-0.03	0.02	-0.07	0.15
岷沱江 Mintuojiang	0.63 **	0.42	0.31	0.62 **	-0.09	-0.14
嘉陵江 Jialingjiang	0.76 **	0.52 *	0.44	0.59 **	0.05	-0.27
乌江 Wujiang	0.51 *	0.56 *	0.46 *	0.59 **	-0.31	-0.29
上游干流 Upper mainstream	0.52 *	0.59 **	0.71 **	0.51 *	-0.32	-0.10
洞庭湖 Dongting Lake	0.42	0.38	0.24	0.28	-0.42	-0.63 **
汉江 Hanjiang	0.53 *	0.17	0.37	-0.28	-0.11	0.22
中游干流 Middle mainstream	0.38	0.39	0.32	0.07	-0.28	-0.18
下游干流 Lower mainstream	0.50 *	0.33	0.25	-0.45	-0.5 *	-0.37
太湖 Taihu Lake	0.01	0.30	0.49 *	-0.40	-0.03	0.06
鄱阳湖 Poyang Lake	0.34	0.21	0.12	0.43	-0.37	-0.57 **

^{*:}P<0.05; **:P<0.01; 其它标准化系数不显著

表 7 1981—2017 年长江子流域实际蒸散发与气象、植被因素的相关系数

Table 5 Correlation coefficient of Actual Evapotranspiration and Meteorological and Vegetation Factors in the Yangtze River Basin from 1981 to 2017

子流域 Sub basin	植被归—化指数 Normalized difference vegetation index	日照时数 Sunshine hours	气温 Temperature	风速 Wind speed	降水量 Precipitation	相对湿度 Relative humidity
金沙江 Jinshajiang	0.39 *	-0.14	0.22	-0.19	-0.01	0.23
岷沱江 Mintuojiang	0.36 *	0.41 *	0.25	0.46 **	-0.08	-0.15
嘉陵江 Jialingjiang	0.68 **	0.45 *	0.51 **	0.56 **	0.12	-0.05
乌江 Wujiang	0.63 **	0.52 *	0.59 **	0.61 **	-0.22	-0.10
上游干流 Upper mainstream	0.64 **	0.65 *	0.76 **	0.64 **	-0.33	0.07
洞庭湖 Dongting Lake	0.60 **	0.29	0.35 *	-0.11	-0.27	-0.41 *
汉江 Hanjiang	0.56 **	0.12	0.45 **	-0.23	-0.02	0.39
中游干流 Middle mainstream	0.69 **	0.24	0.60 **	-0.29	-0.43 *	0.11
下游干流 Lower mainstream	0.78 **	-0.03	0.43 **	-0.31	-0.39 *	0.01
太湖 Taihu Lake	0.38 *	-0.05	0.56 **	-0.34	0.04	0.14
鄱阳湖 Poyang Lake	0.62 **	0.06	0.61 **	-0.45	-0.15	-0.10

^{*:}P<0.05; **:P<0.01;其它标准化系数不显著

4 讨论

实际蒸散发作为地表水能循环的关键环节已得到了广泛的关注,但早期的相关研究中[9-10]较少考虑区域 实际蒸散发变化趋势的阶段性。结合早期 $Gao^{[9]}$ 和 $Wang^{[10]}$ 的研究结果可以发现,长江流域实际蒸散发的演 变趋势具有明显的阶段性,从20世纪60年代开始的显著下降[9],到20世纪末下降趋势有所减缓,再到进入 21世纪后流域实际蒸散发显著上升(图3)。20世纪60年代以来,长江流域气温一直具有上升的趋势,实际 蒸散发量在气温升高的促进下理应有所增加,但日照时数的下降减少了地表蒸散过程的能量来源,导致 20 世 纪末之前,长江流域实际蒸散发在气温升高的情况下仍呈现下降趋势[10]。随着时间的推移,长江流域日照时 数下降趋势有所减缓,而长江流域植被生态系统由于农业效率的提升和植树造林工程的推行[11,29],质量有了 显著的提高(表2),受到植被变化的主要影响,自20世纪末以来,长江流域实际蒸散发显著增加,茂盛的植被 使得植被蒸腾量和降水截留蒸发量有所增加,同时气温持续升高、风速由降转升(表2)也在一定程度上促进 了流域实际蒸散发的升高。影响因素对实际蒸散发的作用存在着空间差异性,这不仅体现在长江流域内部 (图 5—7),同时也存在于不同流域之间。曹文旭等[30]基于 Budyko 假设发现气候变化在潮河流域实际蒸散 发 1961—2009 年间的增长趋势中起到主导作用,贡献率高达 80%,而植被变化的贡献率仅为 20%,与本文相 比,实际蒸散发影响因素分析结果存在明显差异。本文认为这一状况可能与流域间干湿状况的差异以及影响 因素变化程度的大小有关, zhang[31]在研究中发现黄流域的蒸散发大小主要受到水分的限制,而珠江流域的 实际蒸散发则对太阳辐射量变化更为敏感;而张丹等[32]基于 Budyko 假设发现,在降水、潜在蒸散发、地表环 境三个要素中,我国干旱流域对降水最为敏感,湿润流域对地表环境参数敏感性最强。

实际蒸散发的持续升高会直接影响到长江流域生态系统的水资源供给服务能力,基于水量平衡原理,结合 GLEAM 实际蒸散发和降水量插值数据,可以计算出长江流域生态系统水资源供给服务量在实际蒸散发显著增加背景下的变化趋势,结果如表 8 所示。21 世纪以来,长江流域的年降水量变化趋势并不显著(表 2),年实际蒸散发量显著增加(图 3),导致了流域生态系统水资源供给服务总量呈现出下降的趋势。流域东部地区受到降水量增加的影响,水资源供给量有所增加,气候有暖湿化的趋势,而西部地区水资源供给量的变化趋势与流域整体一致,有所减少,区域旱情加剧,这与黄涛^[33]的研究结果一致。长江流域西部地区是我国生态修复工程实施的主要区域之一,1997—2006 年间云南地区由于植树造林工程的实施,森林覆盖率由 34%增长

到了50%^[34],植树造林能够增强区域生态系统固碳释氧、水土保持等生态服务功能,但同时也会削弱区域生态系统的水资源供给能力。相较于本地的原生林,快速生长的人类造林有着更强的蒸散能力^[35],在区域旱情加剧的背景下,建议在长江流域西部干旱地区的生态保护与修复过程中,优先加强对当地原生植被的保护,同时在植树造林、退耕还林工程中,选择针叶乔木等蒸腾能力较弱的树种,以减少植被耗水量,缓解旱情加剧的趋势。

表 8 1998—2017 年间长江流域生态系统水资源供给服务量变化

Table 8 Changes in water yield of the ecosystem in the Yangtze River Basin from 1998 to 2017

流域名称 Basin name	水资源供给服务量的变化速 Variation rate of water yield/(mm/a)
长江流域 Yangtze river basin	-0.623
金沙江流域 Jinshajiang river basin	-2.667
岷沱江流域 Mintuojiang river basin	-1.391
嘉陵江流域 Jialingjiang river basin	-0.975
乌江流域 Wujiang river basin	-3.088
上游干流流域 Upper mainstream river basin	-2.535
洞庭湖流域 Dongting Lake basin	-1.141
汉江流域 Hanjiang river basin	-1.838
中游干流流域 Middle mainstream river basin	0.191
下游干流流域 Lower mainstream river basin	9.115
太湖流域 Taihu Lake basin	8.506
鄱阳湖流域 Poyang Lake basin	2.142

5 结论

本文对从多个实际蒸散发模型模拟数据集进行了精度对比验证,然后基于精度最优的数据集,分析了1981—2017年间长江流域实际蒸散发的趋势与成因。结果表明:

- (1)在GLEAM_v3.2a、MOD16、GLDAS_Noah2、ERA_Interim 四种蒸散发数据集中,GlEAM_v3.2a 的综合精度最高;
- (2)长江流域实际蒸散发具有先减后增的阶段性变化趋势。在 1981—1997 年间,长江流域实际蒸散发以 0.02 mm/a 的速率不显著减少,减少的区域主要集中在长江流域西北部和长江流域东部;在 1998—2017 年间长江流域实际蒸散发以 1.94 mm/a 的速率显著增加,所有子流域实际蒸散发均有所增加;整体上,在 1981—2017 年间,长江流域实际蒸散发以 1.16 mm/a 的速率显著增加;
- (3)1981—1997年间,长江流域西北部和东部区域的实际蒸散发主要受到太阳辐射量下降的影响,蒸散发有所下降,而干流区、乌江以及洞庭湖区域由于受到日照时数、降水量、植被状况等因素的综合影响,在日照时数下降的情况下,实际蒸散发仍有所上升;1998—2017年间,植被恢复是长江流域大部分区域实际蒸散发上升的重要原因,东南地区的洞庭湖、鄱阳湖流域实际蒸散发主要受到相对湿度的影响,此外西部部分子流域中,风速的回升对实际蒸散发的增加也起到了促进作用。气温在长江流域实际蒸散发的短期(1981—1997年、1998—2017年)阶段性变化中与实际蒸散发的相关性并不明显,但在其长期(1981—2017年)的变化趋势中,气温仍起到非常重要的作用;
- (4)受到实际蒸散发显著增加的影响,长江流域生态系统水资源供给服务总量在 1998—2017 年间有所下降,流域内部生态系统水资源供给服务量呈现出西部减少、东部增加的趋势;
- (5)生态系统水资源供给服务量的减少会使得长江流域西部缺水地区旱情加剧,建议在长江流域西部地区加强对本地原生林的保护,同时在植树造林、退耕还林等生态修复工程中优先选择针叶乔木等蒸腾能力较弱的树种,以降低植被的耗水量,缓解区域干旱加剧的趋势。

参考文献 (References):

- [1] 邱国玉, 熊育久. 水与能: 陆地蒸散发、热环境及其能量收支. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 王海波,马明国. 基于遥感和 Penman-Monteith 模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算. 生态学报, 2014, 34(19): 5617-5626.
- [3] Yan H, Yu Q, Zhu Z C, Myneni R B, Yan H M, Wang S Q, Shugart H H. Diagnostic analysis of interannual variation of global land evapotranspiration over 1982-2011; assessing the impact of ENSO. Journal of Geophysical Research, 2013, 118(16): 8969-8983.
- [4] 李修仓,姜彤,温姗姗,王艳君,邱新法.珠江流域实际蒸散发的时空变化及影响要素分析.热带气象学报,2014,30(3):483-494.
- [5] 刘健, 张奇, 许崇育, 翟建青, 靳晓莉. 近 50 年鄱阳湖流域实际蒸发量的变化及影响因素. 长江流域资源与环境, 2010, 19(2): 139-145.
- [6] 刘冲, 齐述华, 汤林玲, 何蕾. 植被恢复与气候变化影响下的鄱阳湖流域蒸散时空特征. 地理研究, 2016, 35(12): 2373-2383.
- [7] 王琼. 1962—2011 年长江流域极端气温和降水事件变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.
- [8] 于文金,周鸿渐,占达颖,邵明阳,李北群,江志红.长江流域旱涝灾害特征研究.灾害学,2013,28(3):42-47.
- [9] Gao G, Chen D L, Xu C Y, Simelton E. Trend of estimated actual evapotranspiration over China during 1960-2002. Journal of Geophysical Research, 2007, 112 (D11); D11120.
- [10] Wang Y J, Liu Bo, Su B D, Zhai J Q, Gemmer M. Trends of calculated and simulated actual evaporation in the Yangtze River basin. Journal of Climate, 2011, 24(16): 4494-4507.
- [11] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C, Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. Nature Sustainability, 2019, 2(2): 122-129.
- [12] 钟晨晨,崔宁博, 谭畅, 冯禹. 近 53a 长江流域气温的时空变化特征分析. 灌溉排水学报, 2016, 35(12): 88-96.
- [13] Miralles D G, Holmes T R H, De Jeu R A M, Gash J H, Meesters A G C A, Dolman A J. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(2): 453-469.
- [14] Mu Q Z, Zhao M S, Running S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [15] 李汇文, 王世杰, 白晓永, 唐红, 操玥, 王明明, 吴路华. 西南近 50 年实际蒸散发反演及其时空演变. 生态学报, 2018, 38(24): 8835-8848.
- [16] 刘蓉, 文军, 王欣. 黄河源区蒸散发量时空变化趋势及突变分析. 气候与环境研究, 2016, 21(5): 503-511.
- [17] 王浩, 郁静娴. 千里水脉润北方. (2019-12-12)[2020-01-10]. http://politics.people.com.cn/n1/2019/1212/c1001-31502192.html.
- [18] 何丽,吴宜进,但长军,薜怀平.近百年全球气温变化对长江流域旱涝灾害的影响.中国农业气象,2007,28(4):364-366,370-370.
- [19] 廖玉芳, 赵辉, 彭嘉栋, 吴贤云, 张剑明, 段丽洁. 洞庭湖区旱涝灾害加剧的气象成因. 灾害学, 2016, 31(1): 29-32, 54-54.
- [20] 戴尔阜, 王亚慧. 横断山区产水服务空间异质性及归因分析. 地理学报, 2020, 75(3): 607-619.
- [21] 姚冠泽, 王卫光, 李进兴. 汉江流域多种遥感蒸散发产品评估. 中国农村水利水电, 2018, (5): 103-108.
- [22] She D X, Xia J, Zhang Y Y. Changes in reference evapotranspiration and its driving factors in the middle reaches of Yellow River Basin, China. Science of the Total Environment, 2017, 607-608; 1151-1162.
- [23] Kobayashi S, Ota Y, Harada Y, Ebita A, Moriya M, Onoda H, Onogi K, Kamahori H, Kobayashi C, Endo H, Miyaoka K, Takahashi K. The JRA-55 reanalysis: general specifications and basic characteristics. Journal of the Meteorological Society of Japan, 2015, 93(1): 5-48.
- [24] 吴桂平, 刘元波, 赵晓松, 叶春. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征. 地理研究, 2013, 32(4): 617-627.
- [25] 杨秀芹, 王磊, 王凯. 基于 MOD16 产品的淮河流域实际蒸散发时空分布. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1343-1352.
- [26] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 979-988.
- [27] 邓兴耀, 刘洋, 刘志辉, 姚俊强. 中国西北干旱区蒸散发时空动态特征. 生态学报, 2017, 37(9): 2994-3008.
- [28] Vinukollu R K, Wood E F, Ferguson C R, Fisher J B. Global estimates of evapotranspiration for climate studies using multi-sensor remote sensing data: Evaluation of three process-based approaches. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(3): 801-823.
- [29] 张亮, 丁明军, 张华敏, 文超. 1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析. 自然资源学报, 2018, 33(12): 2084-2097.
- [30] 曹文旭, 张志强, 查同刚, 王盛萍, 郭军庭, 许行. 基于 Budyko 假设的潮河流域气候和植被变化对实际蒸散发的影响研究. 生态学报, 2018, 38(16): 5750-5758.
- [31] Zhang Q, Xu C Y, Chen Y D, Ren L L. Comparison of evapotranspiration variations between the Yellow River and Pearl River basin, China. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2011, 25(2): 139-150.
- [32] 张丹, 梁康, 聂茸, 顾人颖. 基于 Budyko 假设的流域蒸散发估算及其对气候与下垫面的敏感性分析. 资源科学, 2016, 38(6): 1140-1148.
- [33] 黄涛,徐力刚,范宏翔,孟元可.长江流域干旱时空变化特征及演变趋势.环境科学研究,2018,31(10):1677-1684.
- [34] Yang H, Luo P, Wang J, Mou C X, Mo L, Wang Z Y, Fu Y, Lin H H, Yang Y P, Bhatta L D. Ecosystem evapotranspiration as a response to climate and vegetation coverage changes in northwest Yunnan, China. PLoS One, 2015, 10(8): e0134795.
- [35] 曹恭祥,王绪芳,熊伟,王彦辉,于澎涛,王云霓,徐丽宏,李振华.宁夏六盘山人工林和天然林生长季的蒸散特征.应用生态学报,2013,24(8):2089-2096.