

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.044.

刘赛艳, 张以弛, 胡嘉玮, 等. 基于 EOF 的淮河流域潜在蒸散发时空演变特征研究[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 264-273.

LIU Saiyan, ZHANG Yichi, HU Jiawei, et al. Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Potential Evapotranspiration in Huai River Basin Based on Empirical Orthogonal Function Analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 264-273.

# 基于 EOF 的淮河流域潜在蒸散发时空演变特征研究

刘赛艳<sup>1</sup>, 张以弛<sup>1</sup>, 胡嘉玮<sup>1</sup>, 解阳阳<sup>1,2</sup>

(1.扬州大学 水利科学与工程学院, 江苏 扬州 225009; 2.扬州大学 现代农村水利研究院, 江苏 扬州 225009)

**摘 要:**[目的] 揭示流域潜在蒸散发( $ET_0$ )时空演变规律, 阐明淮河流域  $ET_0$  变化的主要原因, 为淮河流域水资源管理、干旱评估及农业用水评估和规划等提供参考研究。[方法] 基于淮河流域内及其周边 29 个气象站点 1960—2020 年逐日实测气象数据, 采用 Penman-Monteith 公式、Mann-Kendall 法研究了  $ET_0$  的基本变化趋势, 并运用经验正交函数分解法(EOF)分解了流域各站点组成的  $ET_0$  矩阵, 得到流域年和四季  $ET_0$  气象场的时空分布结构, 通过分析典型分布模态对应的时间系数揭示了流域  $ET_0$  气象场的变化规律。[结果] 流域年  $ET_0$  多年均值为 858.4 mm, 除春季外, 其他三季和年  $ET_0$  均呈下降趋势。流域年  $ET_0$  整体以同增同减、流域西北和东南区域反相变化两种空间分布模态为主, 其中, 模态一以 1980 年为界, 有从“全流域高  $ET_0$ 。”的空间分布形式转变为“全流域低  $ET_0$ 。”的显著变化趋势; 模态二也有从“西北  $ET_0$  偏高东南  $ET_0$  偏低”向“西北  $ET_0$  偏低东南  $ET_0$  偏高”的显著变化趋势。流域四季  $ET_0$  整体以同增同减的空间分布为主, 流域年  $ET_0$  空间分布模态的转变主要是由夏季  $ET_0$  的空间模态转变造成的。[结论] 淮河流域  $ET_0$  时空变化存在明显的季节和区域性差异, 夏季  $ET_0$  对年  $ET_0$  的变化贡献率最大, 显著减少的日照时数和风速是导致流域存在“蒸发悖论”的主要原因, 未来可针对性地加强夏季蒸散发的实际观测和研究。

**关键词:** 淮河流域; 潜在蒸散发; 经验正交函数; 时空分布

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0264-10

## Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Potential Evapotranspiration in Huai River Basin Based on Empirical Orthogonal Function Analysis

Liu Saiyan<sup>1</sup>, Zhang Yichi<sup>1</sup>, Hu Jiawei<sup>1</sup>, Xie Yangyang<sup>1,2</sup>

(1.College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;

2.Modern Rural Water Conservancy Research Institute, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

**Abstract:**[Objective] The aim of this study is to reveal the temporal and spatial evolution of potential evapotranspiration ( $ET_0$ ) and clarify the main causes of  $ET_0$  change in the Huai River basin, then to provide reference research for water resources management, drought assessment and agricultural water use assessment and planning in this basin. [Methods] Based on the daily meteorological data of 29 meteorological stations in and around the Huai River basin from 1960 to 2020, the basic change trend of  $ET_0$  was studied by using Penman-Monteith formula and Mann-Kendall method, and the  $ET_0$  matrix composed of each station in the basin was decomposed by empirical orthogonal function decomposition (EOF), and the spatial and temporal distribution structure of  $ET_0$  meteorological field in the basin of the year and four seasons was obtained. By analyzing the time coefficient corresponding to the typical distribution mode, the change law of  $ET_0$  meteorological field in the basin was revealed. [Results] The annual mean value of  $ET_0$  in the basin was 858.4 mm. Except in spring, the  $ET_0$  of other three seasons and of the year showed a downward trend. The annual  $ET_0$  of the basin mainly

收稿日期: 2022-10-27

修回日期: 2022-11-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(52009116); 江苏省高效节能大型轴流泵站工程研究中心开放课题(ECHEAP014); 江苏省自然科学基金项目(BK20200958; BK20200959); 中国博士后科学基金项目(2018M642338); 扬州大学本科生科创基金(2022 年扬州大学水利学院 13 号)

第一作者: 刘赛艳(1990—), 女, 江西东乡人, 博士, 讲师, 主要从事水文过程研究。E-mail: Liusaiyan@yzu.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

had two spatial distribution modes: the same increase and decrease, and the reverse change in the northwest and southeast regions of the basin. Among them, the first mode was bounded by 1980, with a significant change trend from the spatial distribution form of ‘high  $ET_0$  in the whole basin’ to ‘low  $ET_0$  in the whole basin’; Mode 2 also had a significant change trend from ‘higher  $ET_0$  in the northwest and lower  $ET_0$  in the southeast’ to ‘lower  $ET_0$  in the northwest and higher  $ET_0$  in the southeast’. The spatial distribution of  $ET_0$  in the four seasons took the same increase and decrease as the main trend as a whole. The change of annual  $ET_0$  spatial distribution mode was mainly caused by the change of summer  $ET_0$  spatial mode. [Conclusion] There were obvious seasonal and regional differences in the spatiotemporal changes of  $ET_0$  in the Huai River basin. Summer  $ET_0$  had the largest contribution to the annual  $ET_0$  change. Significantly reduced sunshine hours and wind speed were the main reasons for the existence of the ‘evaporation paradox’ in the basin. In the future, the actual observation and research of summer evapotranspiration should be strengthened pertinently.

**Keywords:** Huai River Basin; potential evapotranspiration; empirical orthogonal function; spatiotemporal distribution

潜在蒸散发( $ET_0$ )是水文循环的重要组成部分,它是指在水分供应充足的条件下,某一固定下垫面可能达到的最大蒸散发量,又可称为区域的蒸散发能力。作为水量平衡和能量平衡过程中重要的驱动因素<sup>[1]</sup>, $ET_0$ 与大气循环、水循环和碳循环紧密相连<sup>[2-3]</sup>。因此,准确估算区域  $ET_0$ ,明确其时空分布特征和演变趋势,不仅有利于揭示水文循环演变与气候变化的响应关系<sup>[4]</sup>,而且对区域实际蒸散发分析、干旱评估、水资源管理<sup>[5]</sup>、农业生产<sup>[6-7]</sup>、植被恢复等<sup>[8]</sup>具有重要的现实意义。

近几十年以来,我国气候变化显著, $ET_0$ 也随之发生变化。不同地区  $ET_0$  的演变趋势及其对气候变化的响应已成为当前的研究热点。例如,高歌等<sup>[9]</sup>综合研究了中国十大流域  $ET_0$  的演变特征,发现中国绝大多数流域  $ET_0$  在年尺度、季尺度上均呈现减少趋势,且此趋势在南方地区流域尤为显著。尹云鹤等<sup>[10]</sup>在此基础上进行了归因分析,并按不同地形、气候条件明晰了  $ET_0$  变化主导因子的区域特征和季节特征。此外,史建国<sup>[11]</sup>、王琼<sup>[12]</sup>、郭雯雯<sup>[13]</sup>、陈海芳<sup>[14]</sup>等也分别在黄河流域、长江流域、渭河流域和第二松花江流域开展了相关研究,不仅揭示了各流域  $ET_0$  时空演变特征,而且分析了  $ET_0$  对气候因子的敏感性及其驱动力。这些研究表明, $ET_0$  既受气候因素影响,又受地理条件制约,其时空演变特征在不同的区域和时间尺度上均存在显著差异。然而,当前有关  $ET_0$  时空分布的研究大多从观测站点历史资料出发,通过计算面  $ET_0$  及其变化特征值描述流域  $ET_0$  的时间演变特征,或通过对各站点  $ET_0$  的特征值进行空间插值表征流域  $ET_0$  的空间变化特征,从流域

整体气象变量场的角度揭示长时间尺度  $ET_0$  的时空演变规律的研究并不多见。

淮河流域地处我国南北过渡带,人口稠密、工农商业活动繁荣、水土资源开发利用程度较高。目前有关淮河流域  $ET_0$  的研究成果较少,已有研究的时间也较为久远。因此,本文拟采用 Penman-Monteith 法、Mann-Kendall 趋势检验以及经验正交函数分解(EOF)法,估算淮河流域不同时间尺度的  $ET_0$ ,并揭示其时空变化特征,尤其是其空间分布结构的变化规律,以期为淮河流域水资源管理、干旱评估及农业用水评估和规划等提供参考。

## 1 研究区概况及数据来源

淮河流域(111°55′—121°20′E, 30°55′—36°20′N)位于我国东部地区,发源于河南省桐柏山、伏牛山区,干流自西向东流经河南、安徽、山东、江苏四省,于扬州三江营汇入长江。淮河流域总面积达 27 万 km<sup>2</sup>,范围较广,支流众多。流域地处我国南北气候、高低纬度、海陆两相分界区域<sup>[15]</sup>。淮河以北属于暖温带区,淮河以南属于北亚热带区,年平均气温为 11~16℃,降雨量为 500~1 000 mm,山区降水多于平原、沿海降水多于内陆。流域冬春干旱少雨,夏秋高温多雨,冷暖、旱涝转变急剧,加之淮河地区人口密集、土地及水资源开发程度深,干旱、洪涝等自然灾害易发,造成的经济、社会影响较大。

研究采用中国气象数据网(<http://data.cma.cn/wa>)提供的淮河流域内部及周边 29 个气象站点 1960—2020 年的逐日观测资料,包括平均气温、平均气压、日照时数、最高气温、最低气温、平均相对湿度和平均风速。研究区域为淮河全流域,见图 1。由图



前  $p$  个特征向量的累计方差贡献率可由下式计算:

$$G = \sum_{i=1}^p \lambda_i / \sum_{i=1}^m \lambda_i \tag{8}$$

式中:  $G$  表示前  $p$  个特征向量的累计方差贡献率。

为规避实际资料中可能出现的随机数或者任何异常、虚假数据混入 EOF 分析过程, 需要判断特征值的误差。利用统计检验可得出在 95% 置信度水平下的特征值的误差为:

$$\Delta \lambda = \lambda \sqrt{2/n} \tag{9}$$

式中:  $\Delta \lambda$  为特征值  $\lambda$  的误差范围。通过对  $\lambda$  的按序检验和误差范围标记, 当相邻两个特征根的误差范围没有重合时, 即通过 North 显著性检验, 也就是说特征值所对应的经验正交函数的分解结果具有物理意义。

3 结果与分析

3.1 淮河流域 ET<sub>0</sub> 时间序列基本变化趋势

基于 Penman-Monteith 公式, 得到淮河流域 1960—2020 年季节和年时间尺度的 ET<sub>0</sub> 时间序列。其中, 季节尺度的划分为: 3—5 月为春季, 6—8 月为夏季, 9—11 月为秋季, 12 月至次年 2 月为冬季。

统计相关特征值可知, 淮河流域近 61 年来年 ET<sub>0</sub> 在 742.1~997.0 mm 范围内波动, 多年平均值为 858.4 mm, 最高值和最低值分别出现在 1966 年和 2003 年。四季 ET<sub>0</sub> 中, 夏季 ET<sub>0</sub> 多年平均值最大为 344.4 mm, 春季次之为 247.2 mm, 秋季为 182.8 mm, 冬季最少为 83.9 mm, 分别占流域年 ET<sub>0</sub> 的 40.1%, 28.8%, 21.3%, 9.8%。由此可见, 春夏两季 ET<sub>0</sub> 占全年 ET<sub>0</sub> 的 68.9%, 对淮河流域年 ET<sub>0</sub> 的贡献率最大。绘制出淮河流域 1960—2020 年的年 ET<sub>0</sub> 和四季 ET<sub>0</sub> 的时间序列图, 结果见图 2。由图 2 可知, 除春季外, 淮河流域年 ET<sub>0</sub> 以及夏秋冬三季 ET<sub>0</sub> 均呈波动式减少的特点。

采用 Mann-Kendall 趋势检验法对流域年 ET<sub>0</sub> 和四季 ET<sub>0</sub> 进行趋势检验, 结果见表 1。由表 1 可知, 淮河流域 1960—2020 年年 ET<sub>0</sub> 呈现显著下降趋势, 下降速率为 10.10 mm/10 a。四季中仅春季 ET<sub>0</sub> 呈现不显著上升趋势, 上升速率为 3.26 mm/10 a。夏、秋、冬三季 ET<sub>0</sub> 均呈现下降趋势, 且夏季 ET<sub>0</sub> 呈显著下降趋势, 秋冬季 ET<sub>0</sub> 均表现为不显著下降趋势, 下降速率分别为 10.71 mm/10 a, 1.6 mm/10 a, 0.96 mm/10 a。有必要指出, 春季为多数农作物生长的关键期, 农业需水量较大, 潜在蒸散量的上升易使干旱发生的风险增大, 对农业生产和相关水资源的利用存在一定不利影响, 建议相关部门采取相应措施积极应对。

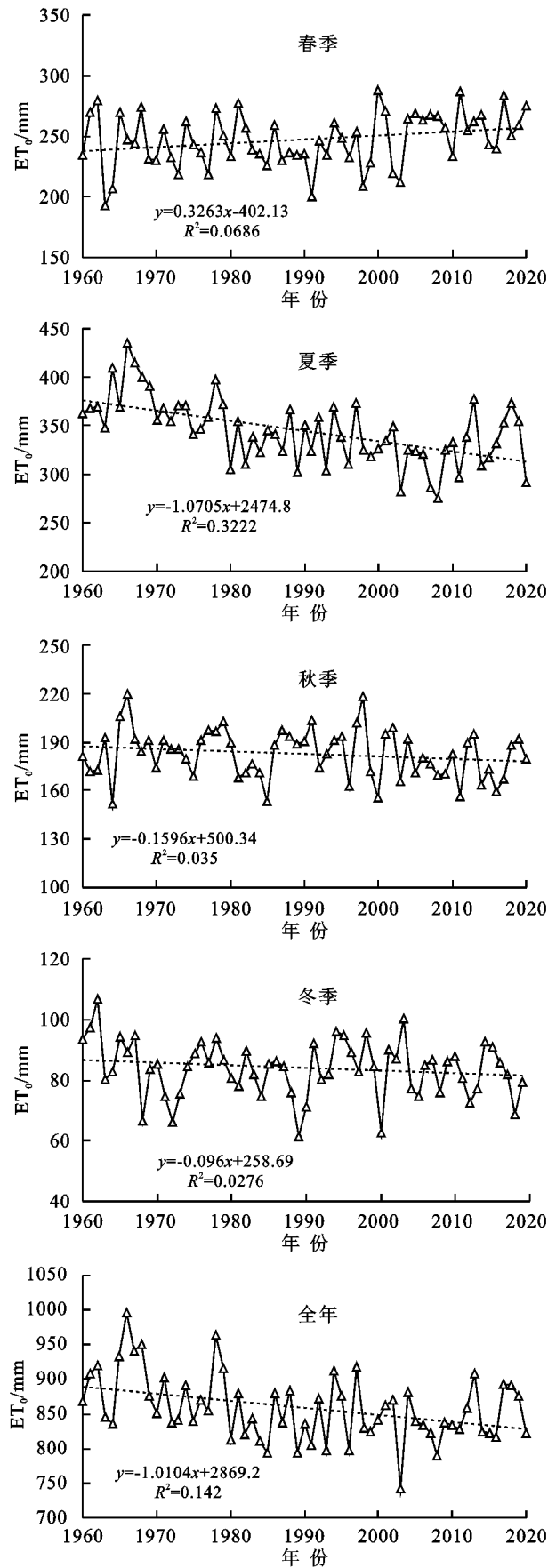


图 2 1960—2020 年淮河流域全年及四季 ET<sub>0</sub> 时间变化过程线  
Fig. 2 Variation of annual and seasonal ET<sub>0</sub> of the Huai River basin during 1960—2020



表 1 淮河流域四季及全年 ET<sub>0</sub> 趋势检验

Table 1 Annual and seasonal ET<sub>0</sub> trend test of the Huai River basin

季节	Z 值	显著性	$\beta(10\text{ a})$
春	1.81	不显著	3.26
夏	-4.30	显著	-10.71
秋	-1.43	不显著	-1.60
冬	-1.17	不显著	-0.96
全年	-2.81	显著	-10.10

3.2 淮河流域年 ET<sub>0</sub> 空间模态演变特征

3.2.1 淮河流域年 ET<sub>0</sub> 的空间分布特征 对淮河流域 1960—2020 年 ET<sub>0</sub> 的数据进行距平处理,处理后的数据按气象站×年份的形式组成 29×61 的数据矩阵,并对该矩阵进行 EOF 分解,结果见表 2。由表 2 可知,前 4 个特征值的累计方差贡献率达到了 85.37%,但只有前 2 个特征值的误差范围不重叠,通过了 North 显著性检验,累计方差贡献率接近 76.83%,因此这 2 个特征值所对应的特征向量可以很好地解释 1960—2020 年淮河流域年 ET<sub>0</sub> 的空间分布。将第一个特征值对应的特征向量在空间上的分布称作模态一,第 2 个特征值对应的特征向量在空间上的分布称为模态二。

由表 2 可知,模态一特征向量的方差贡献率为 68.04%,是所有模态贡献率的最高值,因此可认为模态一是淮河流域年 ET<sub>0</sub> 气象场主要的空间分布形式。模态二特征向量的方差贡献率为 8.79%,因此是

淮河流域年 ET<sub>0</sub> 气象场次要的空间分布形式。根据以上分析,明确淮河流域年 ET<sub>0</sub> 气象场主要有 2 种类型,即全流域一致型和东南—西北反位相型。

表 2 淮河流域年 ET<sub>0</sub> 的 EOF 部分分解结果

Table 2 EOF partial decomposition results of annual ET<sub>0</sub>

in the Huai River basin

统计量 模态	特征值	方差	累计方差	误差范围*	
		贡献率/%	贡献率/%	下限	上限
1	67647.84	68.04	68.04	49882.65	85413.03
2	8741.999	8.79	76.83	6446.238	11037.76
3	5528.176	5.56	82.39	4076.406	6979.946
4	2964.451	2.98	85.37	2185.948	3742.954

注: \* 表示在 95%置信度水平下。

基于 ArcGIS 10.3 操作平台,绘制出淮河流域年 ET<sub>0</sub> 模态一和模态二的空间分布图,结果见图 3。由图 3A 可知,模态一中特征向量的分量值均为正值,说明 1960—2020 年淮河流域年 ET<sub>0</sub> 变化趋势具有高度的统一性,也就是说淮河流域年 ET<sub>0</sub> 的变化呈现出同时增大或同时减小的分布特征。高值中心位于流域中游地区的宝丰站一带和商丘—亳州—阜阳站一带,说明这两个地区年 ET<sub>0</sub> 变化幅度显著,具有相对不稳定性。低值中心位于流域下游地区,表明该地区年 ET<sub>0</sub> 变化较小。整体而言,淮河流域中游西部和北部地区的年 ET<sub>0</sub> 变化程度远大于下游地区,中游东部及沂沭泗水为过渡区。

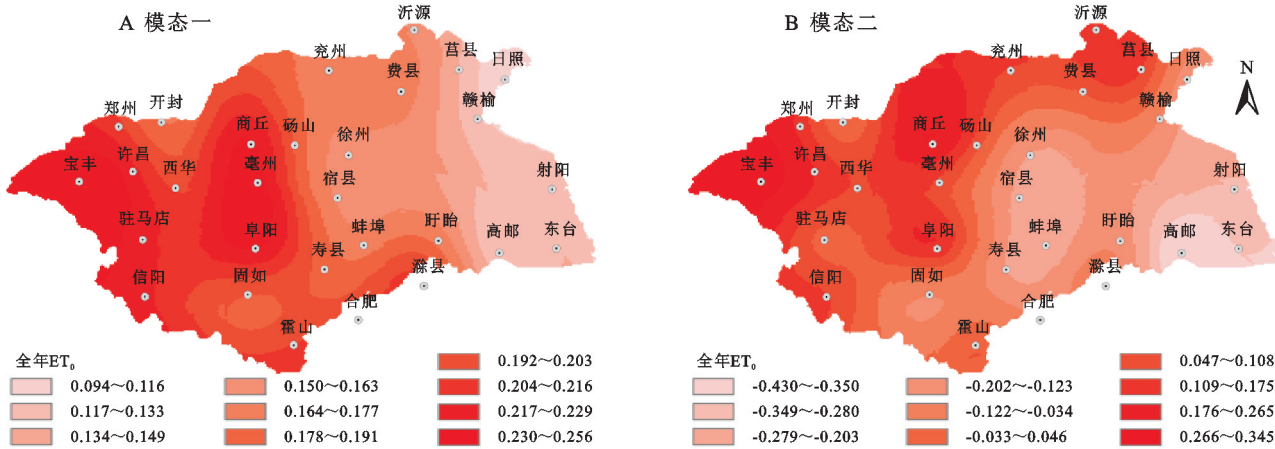


图 3 淮河流域年 ET<sub>0</sub> 空间分布 EOF 模态图

Fig. 3 The first (left) and second (right) mode of EOF spatial distribution of ET<sub>0</sub> in the Huai River basin

由图 3B 可知,淮河流域年 ET<sub>0</sub> 模态二中特征向量的分量值一半为正,一半为负,空间分布大致以固始、亳州、砀山、费县、莒县一带为界,向西北为正值区,向东南为负值区,正值中心位于流域上游宝丰站一带,次正值中心出现在中游商丘站附近及沂沭泗北部区域,负值中心出现在下游高邮站一带。这说明淮河流域年 ET<sub>0</sub> 模态二呈现出西北—东南、内陆—沿海的反相分布模式,表现为中上游地区年 ET<sub>0</sub> 增大时下游地区减小,或中上

游地区年 ET<sub>0</sub> 减小而下游地区增大。此外,特征向量值自西北向东南依次减小,说明淮河流域年 ET<sub>0</sub> 的变化也呈现出由西北向东南递减的趋势。

3.2.2 淮河流域年 ET<sub>0</sub> 的时间分布特征 采用每年时间系数绝对值的极大值所对应的特征向量作为本年典型的 ET<sub>0</sub> 空间分布特征,可以得到 4 种类型的分布情况:全流域高 ET<sub>0</sub>,全流域低 ET<sub>0</sub>,西北 ET<sub>0</sub> 偏高而东南 ET<sub>0</sub> 偏低、西北 ET<sub>0</sub> 偏低而东南 ET<sub>0</sub> 偏

高。统计分析 61 年的年  $ET_0$  的 4 种气象场空间分布表现类型年份分布, 结果见表 3。

由表 3 可以看出, 全流域  $ET_0$  偏高的年份共有 17 a, 全流域  $ET_0$  偏低的年份共有 23 a, 流域西北部  $ET_0$  偏高而东南部偏低的年份共为 5 a, 流域西北部  $ET_0$  偏低而东南部偏高的年份也为 5 a。总体而言, 61 年来年  $ET_0$  空间分布模式以模态一为主, 占总年数的 65.6%; 模态二的空间分布模式出现了 10 次, 占总年数的 16.4%, 另外零星分布的不典型模态共出现 11 a, 在总年数中

占 18.0%。由此可见, 4 种空间表现类型年份分布进一步反映了淮河流域年  $ET_0$  分布模式是以模态一为主, 模态二为次要  $ET_0$ 。气象场的空间分布类型, 这与特征向量所反映的典型模态分布是基本一致的。此外, 还可以发现以 1980 年为界, 1960—1979 年淮河流域普遍以全流域高  $ET_0$  或西北  $ET_0$  偏高而东南  $ET_0$  偏低的空间分布模式为主; 而 1980 年之后, 全流域年  $ET_0$  偏低的年份出现频率大幅增长, 且  $ET_0$  数值减小趋势明显, 这和 3.1 节的结果是一致的。

表 3 淮河流域年  $ET_0$  4 种空间表现类型年份分布

Table 3 Annual distribution of four spatial performance types of $ET_0$ in the Huai River basin							
模态	$ET_0$ 空间表现类型	时期					
		1960—1969	1970—1979	1980—1989	1990—1999	2000—2009	2000—2020
模态一	全流域高 $ET_0$	1961, 1962, 1965, 1967, 1968	1971, 1974, 1978, 1979	1986, 1988	1994, 1997		2013, 2018, 2019
	全流域低 $ET_0$			1980, 1982, 1984, 1985, 1987, 1989	1990, 1991, 1993, 1996, 1998, 1999	2003, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009	2011, 2014, 2015, 2016, 2020
模态二	西北偏高东南偏低	1960, 1969	1970, 1972, 1977				
	西北偏低东南偏高	1964			2004	2010, 2012, 2017	

淮河流域年  $ET_0$  第一模态及第二模态的时间系数图见图 4。由图 4 可知, 淮河流域年  $ET_0$  模态一、二的时间系数均呈正负交替变化, 正值表示该年  $ET_0$  较高, 负值表示  $ET_0$  较低, 表明淮河流域在年尺度上呈现干湿交替的现象。其中, 模态一、二的时间系数趋势斜率均小于零, 采用 Mann-Kendall 趋势检验法对这两个序列趋势进行显著性检验, 得出统计量分别为  $-3.19$ ,  $-4.69$ , 通过了 99% 的显著性水平检验, 说

明时间系数序列有逐年显著减小的趋势, 即模态一有从“全流域高  $ET_0$ 。”的空间分布形式转变为“全流域低  $ET_0$ 。”的趋势, 表明 61 年来淮河流域  $ET_0$  呈现显著下降趋势; 模态二有从“西北  $ET_0$  偏高而东南  $ET_0$  偏低”向“西北  $ET_0$  偏低而东南  $ET_0$  偏高”的趋势, 表明 61 年来流域西北部(中游, 上游及沂沭泗水部分地区)  $ET_0$  呈现增加趋势, 而流域东南部(下游地区等) 有减少的趋势。

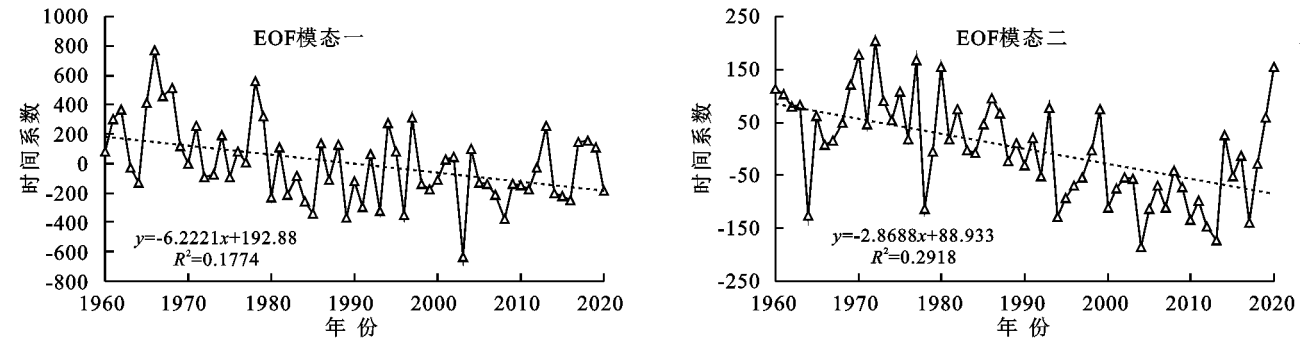


图 4 淮河流域 1960—2020 年  $ET_0$  第一、第二模态时间系数分布

Fig. 4 Time coefficient distribution of  $ET_0$  first and second modes in the Huai River basin from 1960 to 2020

3.3 淮河流域四季  $ET_0$  空间模态演变特征

3.3.1 淮河流域四季  $ET_0$  的空间分布特征 将淮河流域四季平均  $ET_0$  进行 EOF 分解并整理, 结果见表 4。由该表可以看出, 淮河流域春、夏、秋、冬季  $ET_0$  均只有第一个特征值通过显著性检验。

表 4 还表明, 淮河流域春季  $ET_0$  第一个特征向

量的方差贡献率为 79.68%, 夏季  $ET_0$  第一个特征向量的方差贡献率为 75.11%, 秋季  $ET_0$  第一个特征向量的方差贡献率为 75.49%, 冬季  $ET_0$  第一个特征向量的方差贡献率为 84.28%。因此, 各选取第一模态分析淮河流域四季  $ET_0$  的主要空间分布模式。

绘制淮河流域四季  $ET_0$  气象场第一模态空间分

布图(图5)。由图5可知,淮河流域四季 $ET_0$ 的第一模态特征向量分量值均为正值,表明1960—2020年,淮河流域四季节 $ET_0$ 变化趋势一致,均呈现出同增同减的空间分布特征。具体而言:春季高值中心出现在流域中游地区,除霍山站一带及许昌站相对周围站点较低以外,中游大部地区春季 $ET_0$ 变化显著;特征向量值由于海陆位置和纬度的变化而向下游和沂沭泗地区递减。夏季高值中心出现在信阳—霍山站和阜阳—亳州站一带,低值中心出现在沂沭泗地区,呈现出自西南向东北递减的趋势,表明夏季 $ET_0$ 的变化程度由西南向东北减小。秋季高值中心位于宝丰—驻马店站和阜阳—亳州站一带,表明淮河上中游地区秋季 $ET_0$ 变化较显著;低值中心位于下游射

阳—高邮站附近,表明淮河下游秋季 $ET_0$ 变化较小。冬季 $ET_0$ 特征向量值呈现显著的西南—东北方向递减的分布特征,表明淮河流域冬季 $ET_0$ 变化程度由西南向东北、由内陆向沿海逐渐降低。

表4 淮河流域四季 $ET_0$ 的EOF部分分解结果

Table 4 EOF partial decomposition results of seasonal  $ET_0$  in the Huai River basin

统计量	最大	方差	误差范围*	
季节	特征值	贡献率/%	上限	下限
春	14135.14	79.68	10423.07	17847.21
夏	33136.52	75.11	24434.45	41838.60
秋	6733.49	75.49	4965.19	8501.79
冬	2555.95	84.28	1884.72	3227.17

注: \*表示在95%置信度水平下。

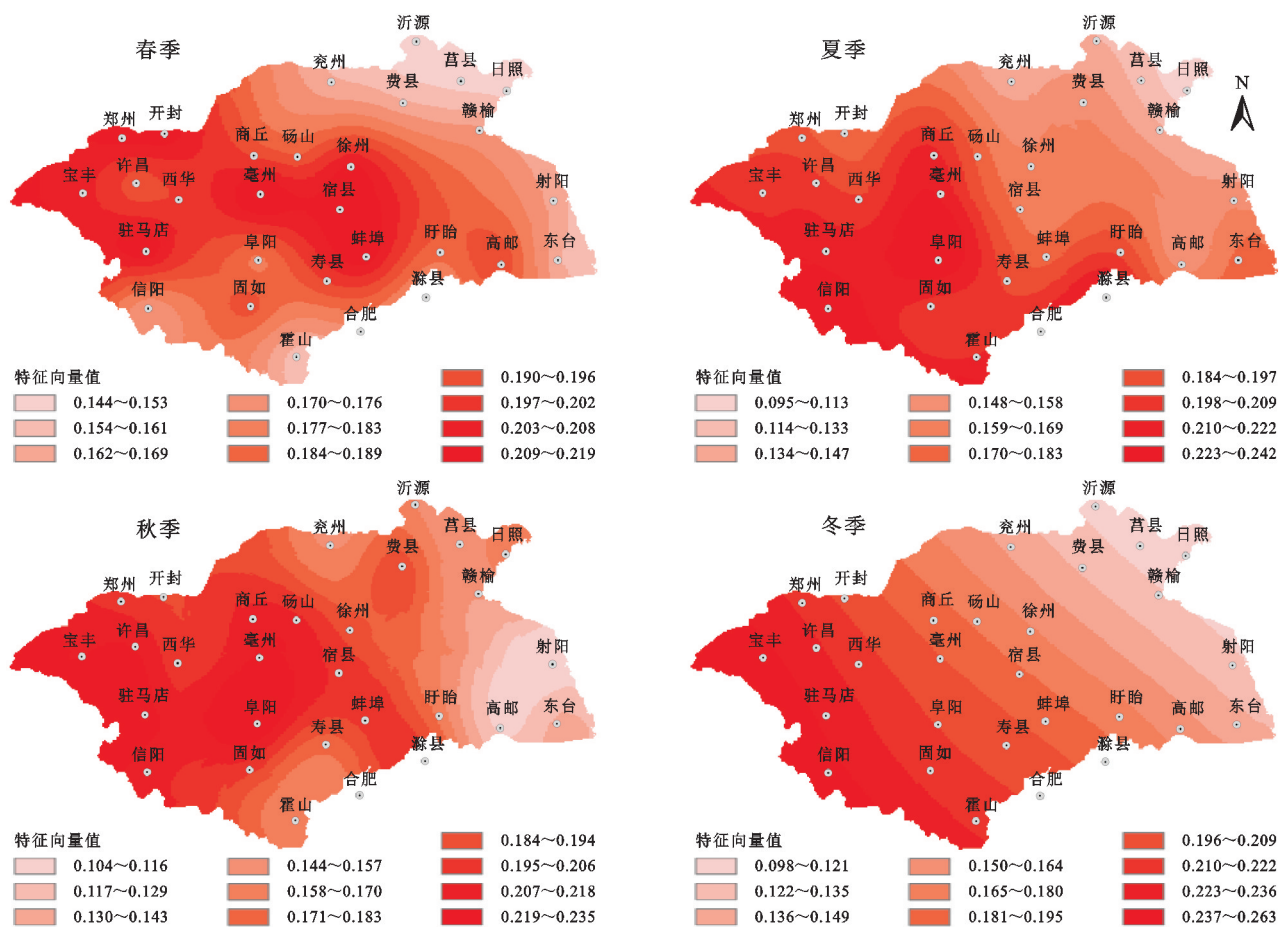


图5 淮河流域四季 $ET_0$ 空间分布EOF第一模态图

Fig. 5 First Mode of EOF spatial distribution of  $ET_0$  in four seasons in the Huai River basin

3.3.2 淮河流域四季 $ET_0$ 的时间分布特征 统计分析淮河流域四季 $ET_0$ 的空间表现类型年份分布情况,结果见表5。由表5可知:淮河流域四季全流域 $ET_0$ 偏高和偏低所占的年份非常接近,春季两类年份分别为22 a和21 a,夏季两类年份分别为19 a和22 a,秋季两类年份分别为21 a和20 a,冬季两类年份分别为26 a和24 a。同增同减年份占总年份的68.3%以上,因此进一步反映了第一模态是淮河流域

四季 $ET_0$ 的主要空间分布模式。此外,淮河流域夏季 $ET_0$ 的空间变化类型同样是以1980年为界,由全流域 $ET_0$ 偏高年份向全流域 $ET_0$ 偏低年份进行转变。结合表3可知,淮河流域年 $ET_0$ 空间表现形式的转变主要是由夏季 $ET_0$ 空间模态变化造成的。

图6表示的是淮河流域四季 $ET_0$ 第一模态的时间系数图。由图6可知,除春季外,淮河流域夏、秋、冬三季 $ET_0$ 模态一的时间系数趋势斜率均小于零,

表明此三季的时间系数序列有逐年减小的趋势,即四季 ET<sub>0</sub> 模态一有从“全流域高 ET<sub>0</sub>。”的空间分布形式转变为“全流域低 ET<sub>0</sub>。”的形式。由于春、夏、秋、冬三季 ET<sub>0</sub> 模态一的时间系数的 Mann-Kendall 趋势统

计量分别为 1.81,−4.50,−1.44,−1.40,因此进一步表明淮河流域夏季 ET<sub>0</sub> 呈显著减少趋势,秋冬季 ET<sub>0</sub> 呈不显著减少趋势,而春季 ET<sub>0</sub> 则呈不显著增加趋势,这和表 1 的研究结果是一致的。

表 5 淮河流域四季 ET<sub>0</sub> 空间表现类型年份分布

Table 5 Annual distribution of spatial expression types of ET <sub>0</sub> in four seasons in the Huai River basin		时期					
季节	ET <sub>0</sub> 空间表现类型	1960—1969	1970—1979	1980—1989	1990—1999	2000—2009	2000—2020
春	全流域高 ET <sub>0</sub>	1961,1962,1965,1969	1974,1978	1981,1986	1994	2000,2001,2004,2005, 2006,2007,2008	2011,2013,2014,2017, 2019,2020
	全流域低 ET <sub>0</sub>	1960,1963,1964,1969	1970, 1972, 1973, 1977	1980, 1984, 1985, 1987	1990, 1991, 1993, 1996,1998,1999	2002,2003	2010
夏	全流域高 ET <sub>0</sub>	1960, 1961, 1962, 1964, 1965,1966,1967,1968,1969	1971, 1973, 1974, 1978,1979	1988	1994,1997		2013,2018
	全流域低 ET <sub>0</sub>			1980, 1982, 1984, 1987,1989	1991,1993,,1996, 1998,1999	2000,2003,2004,2005, 2006,2007,2008,2009,	2011,2014,2015,2020
秋	全流域高 ET <sub>0</sub>	1963,1965,1966,1967	1971, 1976, 1977, 1978,1979	1987,1988	1990, 1991, 1995, 1997,1998	2001,2002,2004	2013,2019
	全流域低 ET <sub>0</sub>	1961,1962,1964	1975	1981, 1982, 1984, 1985	1996,1999	2000,2003,2005,2008, 2009	2011,2014,2015,2016, 2017
冬	全流域高 ET <sub>0</sub>	1960, 1961, 1962, 1965, 1966,1967	1975, 1976, 1977, 1978,1979	1982,1986	1991, 1994, 1995, 1996,1998	2001,2002,2003,2007, 2009	2010,2014,2015
	全流域低 ET <sub>0</sub>	1963,1968	1971,1972,1973	1980, 1981, 1983, 1984,1988,1989	1990,1992,1993	2000,2004,2005,2008	2011,2012,2013,2017, 2018,2019

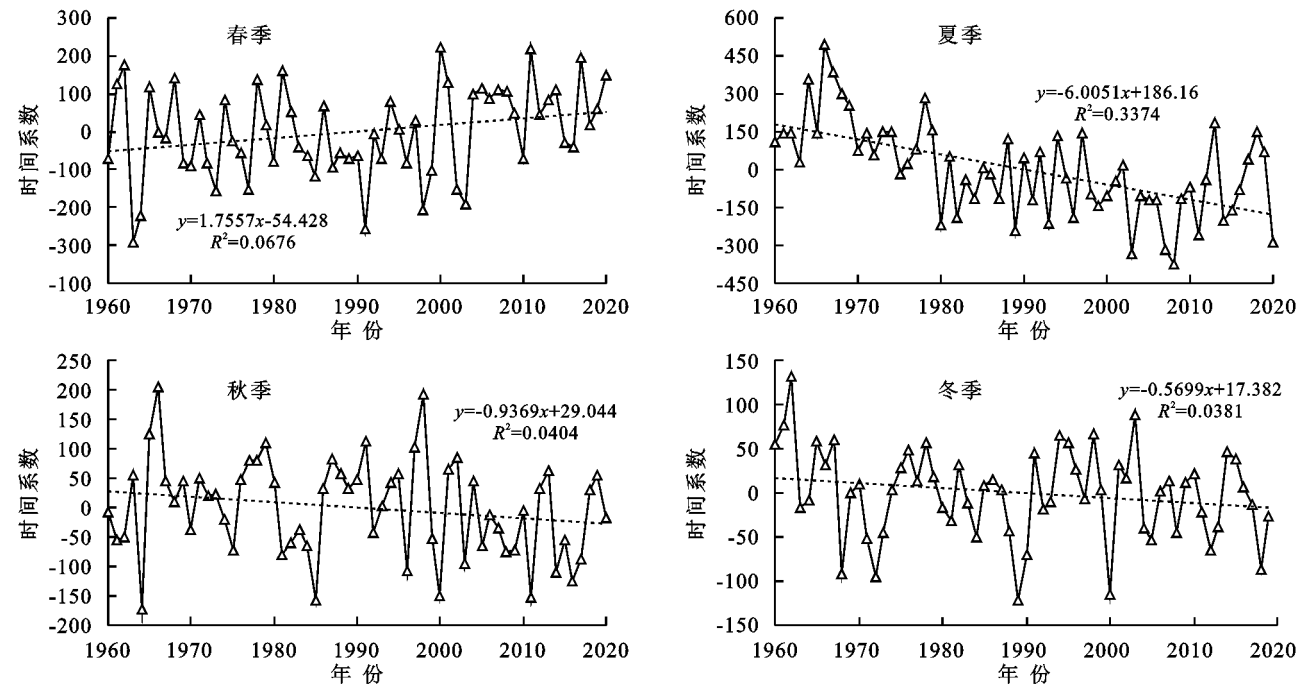


图 6 淮河流域 1960—2020 四季 ET<sub>0</sub> 第一模态时间系数分布

Fig. 6 Time coefficient distribution of the first mode of ET<sub>0</sub> in the four seasons of 1960—2020 in the Huai River basin

3.4 讨论

3.4.1 淮河流域 ET<sub>0</sub> 空间模态变化的物理意义探讨

通过对流域各站点组成的 ET<sub>0</sub> 矩阵进行分解,得到淮河流域年和四季 ET<sub>0</sub> 气象场的时空分布结构,

并通过对典型分布模态对应的时间系数开展研究,得到了流域 ET<sub>0</sub> 气象场的变化规律。由于 EOF 本质上是从原变量场序列中逐一提取代表原变量场的各主要周期振荡信号型<sup>[19]</sup>,特征值可解释为气象场序



列的振荡型分解。因此,  $ET_0$  的空间模态可以解释为原始  $ET_0$ 。气象场序列周期振荡型的一种分解, 不同的分量序列对应着时间域上不同的振荡型, 而其空间函数数值大小则代表了这种振荡型主要来源于哪些站点, 或者说哪些站点对这种振型贡献率更高。 $ET_0$  的空间结构实际上代表的是  $ET_0$  气象场序列的各种振荡源的空间分布区域, 而不是对气象要素场数值在水平地理空间上分布的分型区划。 $ET_0$  气象场的变化规律实际上也反映了原  $ET_0$  序列周期震荡信号的变化。

3.4.2 淮河流域  $ET_0$  变化的影响因素分析 通过分析淮河流域  $ET_0$  的变化趋势发现, 淮河流域年  $ET_0$  总体上存在显著的下降趋势, 下降程度存在明显的季节和空间差异。采用 Mann-Kendall 趋势检验法对淮河流域年日照时数、风速和平均气温时间序列进行检验, 得到它们的统计量分别为: -6.62, -4.22, 4.02, 均通过了 99% 的显著性检验。这表明淮河流域也存在“蒸发悖论”现象, 而全球变暗引起日照时数的显著减少<sup>[20]</sup>是导致淮河流域年  $ET_0$  变化的一大影响因素; 另一方面, 流域风速及季风势力的减弱<sup>[20]</sup>也会导致淮河流域  $ET_0$  的变化。

为了进一步明确气象因素对淮河流域  $ET_0$  变化的贡献程度, 采用敏感系数分析法<sup>[13]</sup>得到了日照时数、风速和平均温度对年  $ET_0$  的贡献率, 其空间分布见图 7。以贡献率最大对应的气象因子作为影响年  $ET_0$  变化的主导因子。从图 7 可知, 除了沂沭泗水和下游边缘区域少数气象站外, 淮河流域年  $ET_0$  变化的主导因子多为日照时数和风速, 且各气象因子对  $ET_0$  变化的贡献率按绝对值大小降序排列为: 风速(0.67) > 日照时数(0.19) > 平均气温(0.11)。因此, 进一步表明了日照时数和风速的显著减少是导致流域“蒸发悖论”存在的主要原因。

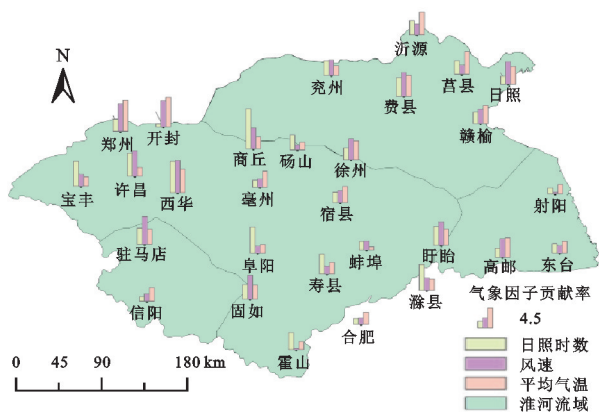


图7 各气象因子对淮河流域年  $ET_0$  的贡献率空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of contribution rate of meteorological factors to annual  $ET_0$  in the Huai River basin

## 4 结论

本文以淮河流域  $ET_0$  为研究对象, 采用经验正交分解函数 EOF, Mann-Kendall 趋势检验等方法研究了该流域 1960—2020 年年  $ET_0$ 、四季  $ET_0$  的时空分布特征, 得出以下结论:

(1) 淮河流域年  $ET_0$  多年平均值为 858.4 mm, 除春季外, 其他三季和年  $ET_0$  均呈减少趋势, 其中夏季和年  $ET_0$  呈显著减少趋势, 表明淮河流域也存在“蒸发悖论”现象, 且流域显著减少的日照时数和风速是导致流域“蒸发悖论”存在的主要原因。

(2) 淮河流域年  $ET_0$  主要有 2 种空间分布类型, 4 种空间分布表现形式。其中年  $ET_0$  模态一同增同减、变化趋势具有高度的统一性, 以 1980 年为界, 模态一有从“全流域高  $ET_0$ ”的空间分布形式转变为“全流域低  $ET_0$ ”的显著变化趋势; 年  $ET_0$  模态二呈西北—东南、内陆—沿海的反相分布模式, 且年  $ET_0$  模态二的变化也有从“西北  $ET_0$  偏高而东南  $ET_0$  偏低”向“西北  $ET_0$  偏低而东南  $ET_0$  偏高”的显著变化趋势。

(3) 淮河流域四季  $ET_0$  主要呈现出同增同减的空间分布特征, 具有 2 种空间分布表现形式, 且四季  $ET_0$  空间变化程度存在明显的季节和区域性差异。其中, 淮河流域夏季  $ET_0$  的空间变化类型同样是以 1980 年为界, 由全流域  $ET_0$  偏高年份向全流域  $ET_0$  偏低年份进行转变, 表明淮河流域年  $ET_0$  空间表现形式的转变主要是由夏季  $ET_0$  的空间变化造成的。

## 参考文献

- [1] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588.  
Liu C M, Zhang D. Temporal and spatial change analysis of the sensitivity of potential evapotranspiration to meteorological influencing factors in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 579-588.
- [2] 郭小娇, 石建省. 水分蒸散发研究国内外进展与趋势[J]. 地质论评, 2019, 65(6): 1473-1486.  
Guo X J, Shi J S. Global review of the research progress and trend of evapotranspiration[J]. Geological Review, 2019, 65(6): 1473-1486.
- [3] 杨泽龙, 李艳忠, 白鹏, 等. 1980—2020 年中国九大流域蒸散发及其组分时空评估[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(5): 889-901.  
Yang Z L, Li Y Z, Bai P, et al. Spatial-temporal dynamics of evapotranspiration and its components in nine river basins in china from 1980 to 2020 based on gleam-et products[J]. Journal of Geo-Information Science, 2022, 24(5): 889-901.

- [4] 王焕,梅再美.贵州省地表蒸散发时空变化及其与气候因子的关系[J].水土保持研究,2020,27(5):221-229.  
Wang H, Mei Z H. Spatiotemporal changes of evapotranspiration and their relationship with climate factors in Guizhou Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(5):221-229.
- [5] Fu J, Gong Y Q, Zheng W W, et al. Spatial-temporal variations of terrestrial evapotranspiration across China from 2000 to 2019[J]. Science of the Total Environment, 2022,825:153951.
- [6] 姜宇,杜崇,孙海宁,等.气候变化条件下黑龙江省作物生长季潜在蒸散发量时空变化特征及其敏感性分析[J].水电能源科学,2018,36(5):6-9.  
Jiang Y, Du C, Sun H N, et al. Temporal and spatial variations of potential evapotranspiration and their sensitivity in crop growth season in Heilongjiang Province under climate change[J]. Water Resources and Power, 2018,39(5):6-9.
- [7] Gao X, Peng S, Wang W, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of reference evapotranspiration trends in Karst Area: A case study in Guizhou Province, China [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2016,128(5):677-688.
- [8] 曹永强,刘明阳,李元菲,等.不同潜在蒸散发估算方法在辽宁省的适用性分析[J].资源科学,2019,41(10):1780-1790.  
Cao Y Q, Liu M Y, Li Y F, et al. Applicability of six potential evapotranspiration estimation methods in Liaoning Province[J]. Resources Science, 2019,41(10):1780-1790.
- [9] 高歌,陈德亮,任国玉,等.1956—2000 年中国潜在蒸散发量变化趋势[J].地理研究,2006,25(3):378-387.  
Gao G, Chen D L, Ren G Y, et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000[J]. Geographical Research, 2006,25(3):378-387.
- [10] 尹云鹤,吴绍洪,戴尔阜.1971—2008 年我国潜在蒸散发时空演变的归因[J].科学通报,2010,55(22):2226-2234.  
Yin Y H, Wu S H, Dai E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971—2008[J]. Chinese Science Bulletin, 2010,55(22):2226-2234.
- [11] 史建国,严昌荣,何文清,等.黄河流域潜在蒸散发量时空格局变化分析[J].干旱区研究,2007(6):6773-6778.  
Shi J G, Yan C R, He W Q, et al. Study on spatiotemporal change of evapotranspiration in the Yellow River Basin[J]. Arid Zone Research, 2007(6):6773-6778.
- [12] 王琼,张明军,潘淑坤,等.长江流域潜在蒸散发量时空变化特征[J].生态学杂志,2013,32(5):1292-1302.  
Wang Q, Zhang M J, Pan S K, et al. Spatiotemporal variation patterns of potential evapotranspiration in the Yangtze River Basin of China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(5):1292-1302.
- [13] 郭雯雯,黄生志,赵静,等.渭河流域潜在蒸散发时空演变与驱动力量化分析[J].农业工程学报,2021,37(3):81-89.  
Guo W W, Huang S Z, Zhao J, et al. Spatio-temporal dynamics and driving forces of potential evapotranspiration in the Wei River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021,37(3):81-89.
- [14] 陈海芳,杨国范,林茂森,等.第二松花江流域潜在蒸散发时空变化及其影响因素[J].水土保持研究,2021,28(5):238-244,253.  
Chen H F, Yang G F, Lin M S, et al. Spatiotemporal changes and affecting factors of potential evapotranspiration in the Second Songhua River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(5):238-244.
- [15] 芮广军,孙朋,杨会宁,等.1959—2018 年淮河流域干湿格局时空动态研究[J].中国水土保持科学,2022,20(4):74-83.  
Rui G J, Sun P, Yang H N, et al. Spatio-temporal dynamics of dry-wet patterns in the Huaihe River Basin from 1959 to 2018[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022,20(4):74-83.
- [16] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56[R]. Rome: Fao, 1998.
- [17] Lorenz E N. Seasonal and irregular variations of the Northern Hemisphere sea-level pressure profile [J]. Journal of Meteorology, 1951,8(1):52-59.
- [18] 周凯,王义民.基于 EOF 的渭河流域干旱时空分布特征研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2020,48(1):146-154.  
Zhou K, Wang Y M. Temporal and spatial distribution of drought in the Weihe River Basin Based on EOF[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition,2020,48(1):146-154.
- [19] 丁裕国,梁建茵,刘吉峰. EOF/PCA 诊断气象变量场问题的新探讨[J].大气科学,2005,29(2):307-313.  
Ding Y G, Liang J Y, Liu J F. New Research on diagnoses of meteorological variable fields using EOF/PCA [J]. Chinese Journal of Atmospheric Science, 2005,29(2):307-313.
- [20] Sergio, M, Vicente-Serrano, et al. Sensitivity of reference evapotranspiration to changes in meteorological parameters in Spain(1961—2011)[J]. Water Resources Research, 2014,50(11):8458-8480.