

# 山东省主要水循环要素演变特征分析

刘 健<sup>1,2,3</sup>,王大勇<sup>1,2,3</sup>,夏 军<sup>4,5</sup>,李 璨<sup>6</sup>,吴梦宇<sup>4,5</sup>,张宏杰<sup>4,5</sup>,李妍妍<sup>1,2,3</sup>

(1. 山东省水利科学研究院; 2. 山东省水网调度与水资源高效利用重点实验室;  
3. 农村供水安全保障山东省工程研究中心; 4. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室;  
5. 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室(武汉大学); 6. 水发规划设计有限公司)

**摘要:**为探究山东省水文情势变化,综合应用 Mann-Kendall 趋势检验、重标极差分析和偏相关分析等方法研究了 1980—2018 年山东省区域降水、实际蒸散发和径流等水循环关键要素的时空变异特征和演变规律。结果表明:1980 年后山东省降水量、实际蒸散发量及径流深均波动上升,其中实际蒸散发量和径流深增加趋势显著,年尺度上增长率分别为 1.64 mm/a 和 2.32 mm/a;春、冬两季实际蒸散发量呈现显著增加趋势,增长率分别为 0.84 mm/a( $p < 0.01$ )和 0.10 mm/a( $p < 0.05$ ),春、夏两季径流深亦显著增加,增长率分别为 0.50 mm/a( $p < 0.01$ )和 1.50 mm/a( $p < 0.05$ );实际蒸散发量和径流深显著增加区域的 Hurst 指数基本大于 0.5,表明两要素增长持续性强;降水对径流有显著正向促进作用,贡献率高达 72.3%,是影响径流变化的主导因子,降水和叶面积指数变化共同对实际蒸散发产生正向促进作用。

**关键词:**水循环要素;演变特征;统计分析;偏相关分析;山东省

**Analysis of evolution characteristics of major hydrological cycle elements in Shandong Province//Liu Jian<sup>1,2,3</sup>, Wang Dayong<sup>1,2,3</sup>, Xia Jun<sup>4,5</sup>, Li Can<sup>6</sup>, Wu Mengyu<sup>4,5</sup>, Zhang Hongjie<sup>4,5</sup>, Li Yanyan<sup>1,2,3</sup>** (1. Water Research Institute of Shandong Province; 2. Shandong Key Laboratory of Water Network Dispatching and Efficient Utilization; 3. Shandong Engineering Research Center for Rural Water Supply Security; 4. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University; 5. Hubei Key Laboratory of Water System Science for Sponge City Construction (Wuhan University); 6. Shuifa Planning and Design Co., Ltd.)

**Abstract:** To investigate the evolution of the hydrological regime in Shandong Province, this study utilized the Mann-Kendall trend test, rescaled range analysis, and partial correlation analysis to characterize the spatiotemporal variability of key hydrological cycle elements, namely precipitation, actual evapotranspiration, and runoff from 1980 to 2018. The results indicated that all three elements exhibited fluctuating upward trends. Notably, actual evapotranspiration and runoff depth increased significantly, with annual growth rates of 1.64mm/a and 2.32mm/a, respectively. Seasonally, actual evapotranspiration showed a significant increase in spring (0.84mm/a,  $p < 0.01$ ) and winter (0.10mm/a,  $p < 0.05$ ), while runoff depth increased significantly during spring (0.50mm/a,  $p < 0.01$ ) and summer (1.50 mm/a,  $p < 0.05$ ). The Hurst indices for areas with significant increases in evapotranspiration and runoff depth were generally above 0.5, suggesting strong persistence in these rising trends. Precipitation was identified as the dominant driver of runoff changes, exerting a significant positive effect with a contribution rate of 72.3%. Meanwhile, variations in both precipitation and leaf area index jointly contributed to the increase in actual evapotranspiration.

**Key words:** hydrological cycle elements; evolution characteristics; statistic analysis; partial correlation analysis; Shandong Province

近年来全球气候变化和人类活动深刻影响了水循环过程,全球和区域极端水文事件频发<sup>[1]</sup>。已有研究表明,全球水循环加速<sup>[2]</sup>,干旱缺水与极端风暴、洪水共存,区域尺度水循环变化的复杂性与不确定性进一步增加<sup>[3]</sup>,直接影响人类社会的安全与

发展,给区域水安全带来了严峻挑战<sup>[4-5]</sup>。如何认识气候变化与人类活动双重作用下的水循环要素演变规律及水资源可持续开发利用,已成为当下水资源安全保障面临的主要问题之一<sup>[6-7]</sup>。

山东省毗邻黄海和渤海,地处暖温带季风气候

基金项目:山东省重点水利科技项目(SDSLKJ2024003)

作者简介:刘健(1980—),男,正高级工程师,博士,主要从事气候变化与水资源、水环境研究。E-mail:water\_liujian@163.com

通信作者:夏军(1954—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:xiajun666@whu.edu.cn

区,受季风的影响气候多变<sup>[8-9]</sup>。作为我国经济强省和粮食大省<sup>[10]</sup>,山东省水资源分布高度不均,人均水资源占有量远低于全国平均水平,供需矛盾尤为突出。黄河作为山东省的重要客水来源,正常年份来水量呈减少趋势,使得水资源供需形势更加紧张。20世纪80年代以来,山东省变暖趋势明显<sup>[11]</sup>,伴随城市化水平的不断提高,山东省降水的不稳定性和波动性普遍加剧<sup>[12]</sup>,径流演变的复杂性进一步增加<sup>[13]</sup>。已有研究表明,山东省极端气候事件的频率和强度呈增加趋势<sup>[14]</sup>,暴雨、干旱等事件进一步加剧了水资源开发利用的难度,也给经济社会发展和农业生产带来严重影响。2000年,山东省发生了严重的春夏连旱,济南、烟台、威海等地相继采取了定时限量供水措施<sup>[15]</sup>,其他地区也面临不同程度的缺水问题,水资源短缺已成为制约山东经济高质量发展的重要瓶颈之一。山东省水资源现状不仅关系到本省的发展,还对南水北调东线工程的规划实施及效益发挥着至关重要的作用<sup>[16]</sup>,如何科学开发和高效利用山东省水资源,缓解供需矛盾,已成为当前亟待解决的战略任务。

现阶段,针对山东省水资源演变情势的研究主要集中在降水和气温趋势以及极端气候事件归因分析<sup>[17-20]</sup>,对蒸散发、径流的研究相对较少,且多聚焦于单一水文要素或过程<sup>[11]</sup>,研究范围往往局限于部分流域或河段<sup>[21-22]</sup>,对全省范围内的综合性研究相对较少。降水、蒸散发和径流作为水循环的关键要素,其变化反映了气候和下垫面条件的动态变化,也决定着区域水资源的演变方向。基于此,本文结合山东省独特的水文地理特征,采用多种统计分析方法系统分析1980—2018年山东省降水、实际蒸散发和径流深的长期演变特征,旨在揭示其时空变化规律及潜在驱动机制,以期为山东省科学管理水资源、缓解旱涝灾害风险、服务生态文明建设提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

山东省地处中国东部沿海、黄河下游,跨黄河、淮河、海河三大流域,分为半岛和内陆两部分,总面积15.8万 $\text{km}^2$ ,人口众多,是中国重要的农产品基地。区域位于暖温带季风气候区,除半岛东部及东南沿海地区受海洋调节,其余地区大陆性气候明显<sup>[23]</sup>;全省四季分明,降水集中在夏季,冬季寒冷干燥<sup>[24]</sup>。山东省下辖16个地级市,地势总体上西南高、东北低,中部山地突起,西南、西北低洼平坦,东部缓丘起伏(图1)。受气候、地形等因素影响,山东省年内年际降水时空分布不均,资源性缺水 and 工程

性缺水并存,人均水资源占有量不足全国的1/6<sup>[25]</sup>,水资源供需矛盾突出。

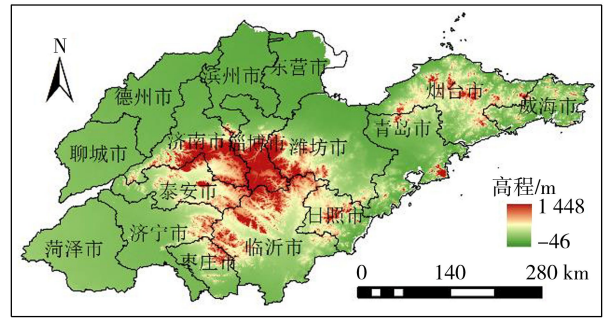


图1 山东省地形及行政区分布

Fig. 1 Topography and administrative district distribution of Shandong Province

### 1.2 数据来源

本文研究的主要水循环要素包括降水、实际蒸散发及径流,而潜在蒸散发和叶面积指数(leaf area index, LAI)则应用于水循环要素驱动机制的分析,研究数据见表1。其中,逐月降水数据来源于CN05.1格点化观测数据集<sup>[26]</sup>,该数据集基于中国2400余个气象站点观测数据,在常用的降水格点产品中,具有较高的质量<sup>[27]</sup>,已被广泛应用于水文循环及极端事件演变等研究<sup>[28-30]</sup>。逐月实际蒸散发及逐年潜在蒸散发选用荷兰阿姆斯特丹大学研发的基于卫星数据再分析的GLEAM(global land evaporation Amsterdam model, <https://www.gleam.eu>)产品,该产品应用广泛,在模拟蒸散发的年际变异上具有较高的准确性<sup>[31]</sup>。在针对中国区域的蒸散发产品评估中,GLEAM数据与基于水量平衡方法计算的蒸散发和站点观测数据对比,表现良好<sup>[32-33]</sup>。逐月径流数据来源于中国天然径流深格点数据集CNRD v1.0<sup>[34]</sup>和VIC-CN05.1<sup>[35]</sup>,二者都采用了可变渗透能力(VIC)模型,模拟的核心是自然状态下的产流过程,旨在还原剔除大规模人类活动影响(如灌溉、跨流域调水、水库调蓄)后的天然径流状况,已被广泛应用于区域水文情势变化研究<sup>[36-38]</sup>。CNRD v1.0径流演变趋势与《山东省水资源公报》的地表水资源量数据一致,但存在系统性高估;VIC-CN05.1与《山东省水资源公报》数据更为接近,但是年限较短。因此,本文基于VIC-CN05.1数据集,采用分位数映射(quantile mapping, QM)偏差校正方法对CNRD v1.0数据进行了逐格点校正。校正后的CNRD v1.0径流数据与公报高度一致,相关系数可达0.898( $p < 0.001$ ),均方根误差(RMSE)为26.6 mm,百分比误差(PBIAS)为10.15%。LAI数据来自GLASS(Global Land Surface Satellite, <https://glass.hku.hk/download.html>)。所有数据通

表 1 研究数据

Table 1 Research data

数据名称	变量	时间分辨率	空间分辨率(经度×纬度)/(°)	时间跨度
CN05.1	降水量	月	0.25×0.25	1980—2018年
GLAEAM	实际蒸散发、潜在蒸散发	月、a	0.1×0.1	1980—2018年
CNRD v1.0	径流深	月	0.25×0.25	1961—2018年
VIC-CN05.1	径流深	d	0.25×0.25	1961—2015年
GLASS	LAI	8d	0.05×0.05	1982—2018年

过双线性插值法将空间分辨率统一插值至  $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

## 2 研究方法

### 2.1 趋势检验方法

利用森氏斜率(Sen's slope)方法和线性回归方法联合判定时间序列的长期变化趋势<sup>[39]</sup>,同时使用Mann-Kendall(M-K)趋势检验对水循环要素进行趋势显著性检验。M-K趋势检验是一种非参数统计方法,已被广泛应用于水文气象数据的趋势分析<sup>[40]</sup>。本文取显著性水平为0.05,对应的检验统计量 $|Z| > 1.96$ 。

采用校正后的重标极差分析方法计算序列的Hurst指数( $H$ ),在M-K检验的基础上,结合Hurst指数定量描述时间序列的长程依赖性。重标极差分析方法是一种非线性科学预测方法,适用于正态分布和非正态分布序列<sup>[41]</sup>。Hurst指数范围为0~1,当 $H > 0.5$ 时,表示序列的未来趋势与过去一致,且 $H$ 越接近于1,趋势的持续性越强;当 $H < 0.5$ 时,表示序列的未来趋势与过去相反,表现出反持续性,且 $H$ 越接近于0,趋势的反持续性越强; $H = 0.5$ ,则表示序列的未来趋势与过去的事件没有显著关联<sup>[42]</sup>。

### 2.2 偏相关分析

在多元相关分析中,偏相关分析是一种能反映两个变量间真正联系的简单有效的统计方法,已被广泛应用于揭示不同变量的变化机制<sup>[43]</sup>。在偏相关分析中,可以排除其他要素的干扰,只评估单一变量对实际蒸散发或径流的影响程度。偏相关系数( $R_p$ )的值为 $[-1, 1]$ ,正值和负值分别表示正相关和负相关;绝对值越大,表明变量间联系越紧密。偏相关系数的平方被定义为该变量的贡献率( $C$ ),表示去除其他变量的影响后,该变量可解释目标变量变化的比例<sup>[44]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 水循环要素演变规律

#### 3.1.1 空间分布格局

如图2所示,山东省降水量呈现南多北少、东多

西少、由东南至西北递减的分布趋势。东南地区年降水量最大,年均降水量超过800 mm,半岛地区次之,而鲁西和鲁北内陆地区年降水相对较少,尤其是聊城、德州等地的年均降水量低于600 mm。单季降水量最大值出现在夏季,最大可达500 mm;冬季降水量最小,仅为15~50 mm,并且低降水区( $< 30$  mm)由鲁西北向东南扩展至临沂北部。山东省实际蒸散发总体分布呈现出东南高、西北低的趋势,绝大多数区域的年均实际蒸散发量为500~700 mm。鲁南地区实际蒸散发量较大,与MOD16A2产品的空间分布结果较为一致<sup>[45]</sup>;而鲁西北地区实际蒸散发量较小,可能是受限于当地水资源禀赋,且降水较少。此外,沿海少数区域及济宁四湖区域,由于水面较大,实际蒸散发量较大。受雨热同期影响,夏季是山东省实际蒸散发量最大的季节,全省实际蒸散发普遍超过200 mm,约占年实际蒸散发的50%。春季实际蒸散发量略大于秋季,不仅归因于春季降水量大于秋季,还可能与山东省内以农作物为主的植被类型有关<sup>[8]</sup>。春季农业灌溉频繁,作物生长旺盛;秋季作物收割,植被蒸腾减弱。冬季实际蒸散发量最小,为18~47 mm,主要受冬季低温影响,水面与土壤冻结,蒸散发作用减弱,表现出明显的季节差异。

径流空间分布呈现出显著的空间异质性,整体为东南沿海地区较大,西北内陆地区较小,年均径流深为20~305 mm。东南部临沂、枣庄、日照等地的大部分区域年均径流深超过150 mm;半岛地区次之,年均径流深超过100 mm;西北内陆聊城、德州、滨州等地年均径流深不足30 mm。东南部及半岛地区径流深大,可能与较大的降水量和水系发达的地理条件相关,而西北部低值区则主要受降水不足以及较多蒸散发的影响。季节尺度上,夏季径流深最大(11~175 mm),秋季次之(4~77 mm),冬季径流深最小(不超过30 mm)。径流深的季节分布与年均分布较为一致,且在济南与泰安交界区域,径流深明显大于周边地区。一方面,该交界地带地处泰山山脉附近,山地地形及植被覆盖良好,有助于涵养水源并调节降水向径流转化,且易形成典型的山前汇流地带;另一方面,山前地带地下水补给作用一定程度上增

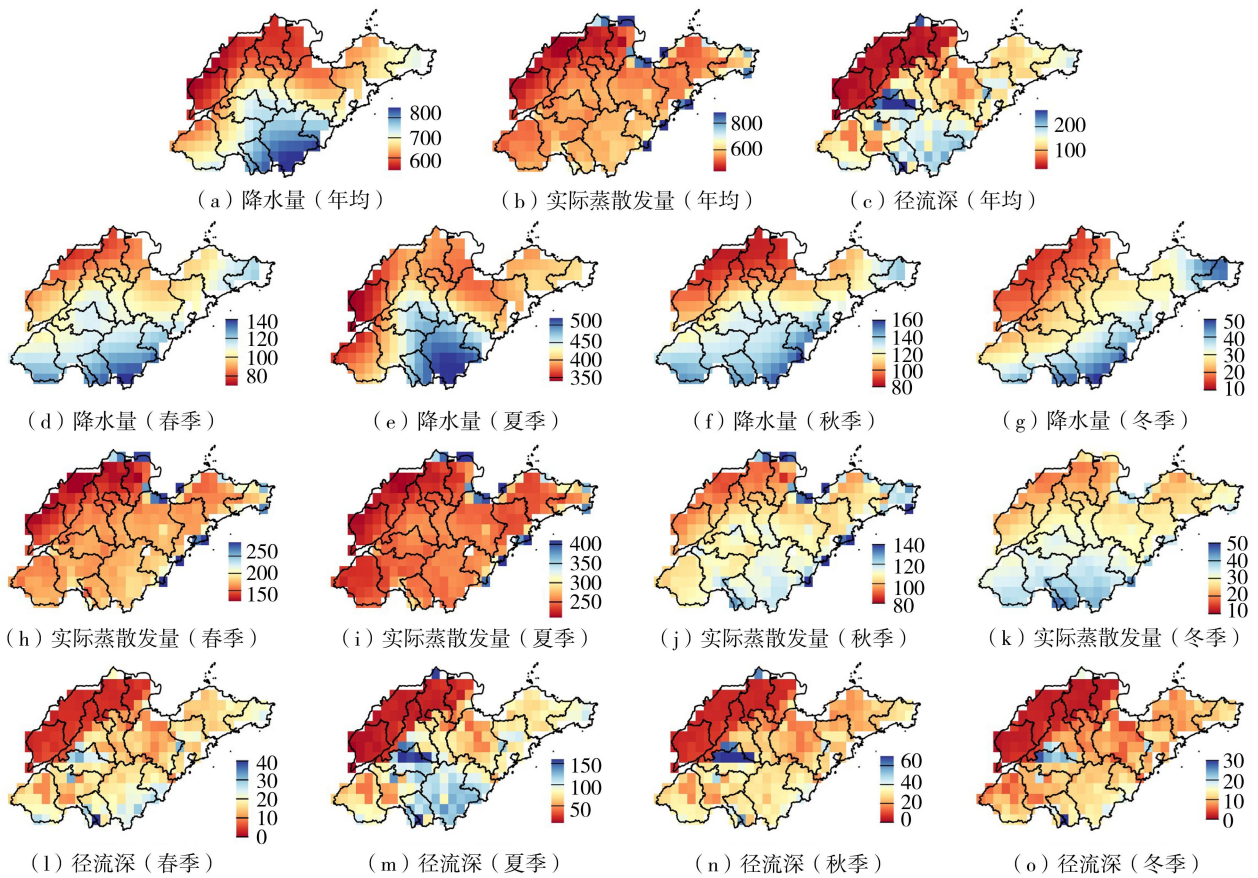


图2 1980—2018年山东省年均和季节尺度水循环要素空间分布(单位:mm)

Fig. 2 Spatial distributions of multi-year average and seasonal scale hydrological cycle elements in Shandong Province from 1980 to 2018 (unit: mm)

大了局地径流深。总体而言,由于实际蒸散量与径流深受供水条件即降水量、土壤含水量等的影响较大,实际蒸散量和径流深的空间格局与降水量相似<sup>[46]</sup>。山东省内水资源分配时空不均,降水、蒸散发、径流均集中在夏季,冬季最为干燥,蒸发也较少。夏季降水和径流集中,容易导致洪涝灾害;冬春季干旱问题明显,对农业灌溉和生态系统的稳定性构成威胁。

### 3.1.2 时间演变趋势

图3为1980—2018年山东省水循环要素的时间演变过程,结果表明,三要素均表现出一定程度的增加趋势。利用Sen's slope方法计算降水量、实际蒸散量和径流深的增长率,分别为2.78、1.64、2.32 mm/a,线性回归方法得到的相应值分别为2.87、1.76、1.34 mm/a,其中,实际蒸散量和径流深呈显著增加趋势( $p < 0.05$ )。20世纪80年代以来,山东省年降水量在400~1000 mm之间波动,年际变幅较大,趋势不显著。径流与降水的波动变化较为一致,均在1989—1990年、2002—2003年出现突增。20世纪90年代以前,径流深普遍较小,这主要是由于该时期山东省主要河流年径流深逐渐减

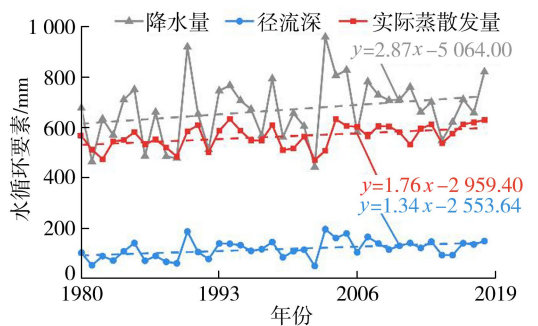


图3 山东省水循环要素逐年序列

Fig. 3 Annual sequences of hydrological cycle elements in Shandong Province

小<sup>[47]</sup>。总体而言,1980—2018年降水增长大于蒸散发,区域径流深波动上升,向有利的趋势发展。此外,2002年降水量、蒸散发量和径流深均急剧减小至历年最低值。相关资料<sup>[48]</sup>显示,2002年山东省鲁西北、鲁西南以及黄河故道等平原地区遭遇严重旱情,降水不足,进一步引发土壤水分亏缺和径流减少。极端气候事件对区域水文要素变化具有显著影响,在未来水资源管理中需特别关注旱涝灾害的预警和调控,确保农业生产和生态环境的可持续发展<sup>[11]</sup>。

进一步分析1980—2018年山东省水循环要素

在季节尺度上的变化趋势。如图 4(图中×表示通过 0.05 显著性检验。下同)所示,春、冬两季山东省实际蒸散发量呈现显著变化趋势,平均增长率分别为 0.84 mm/a( $p<0.01$ )和 0.10 mm/a( $p<0.05$ )。总体而言,年尺度上全省实际蒸散发量呈缓慢变化趋势,增长率为-0.5~4 mm/a,春季增速略大于冬季,且分别有 68.4%、68.8%、12.1%的区域在年尺度、春季、冬季表现出显著增加。在年尺度上,鲁西北的德州、聊城和济南等区域实际蒸散发增加较快,但与其对应的历史时期蒸散发反而较小。春季青岛、潍坊和聊城等部分区域实际蒸散发呈现出显著的增加趋势,但对应的 Hurst 指数介于 0.4~0.5 之间,表明该区域未来实际蒸散发变化可能出现反持续性,即当前增加趋势未来可能减弱或发生方向性调整;其余大部分区域  $H>0.5$ ,表明山东省年尺度和春季实际蒸散发将持续增加。冬季几乎全域  $H>0.5$ ,但大部分区域的实际蒸散发趋势并不显著,仅在鲁西北、济宁、临沂及沿海少数地区呈现显著缓慢增加。这表明山东省在年尺度上实际蒸散发的增加可能由春季实际蒸散发的增加驱动。

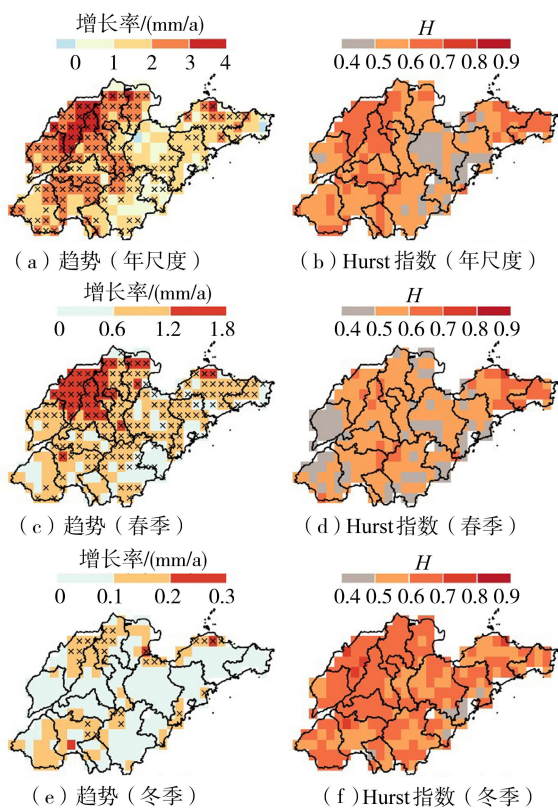


图 4 山东省实际蒸散发量在年尺度与春、冬两季的变化趋势

Fig. 4 Trends of actual evapotranspiration in Shandong Province at annual scale and during spring and winter

图 5 为 1980—2018 年山东省径流深在年尺度与春、夏两季变化趋势的空间分布。年尺度上全省

径流深呈增加趋势,大部分区域增加较为平缓,增长率为 1~2 mm/a,威海、泰安和济南等地径流深增加尤为显著,增长率超过 5 mm/a,其多年平均径流深也较大。全省范围内径流深显著增加的区域占比 33.8%,主要分布在鲁东北(威海、烟台、青岛)、鲁西北(东营、滨州、德州)、鲁西南(菏泽、济宁)及鲁中(济南、泰安、枣庄)地区,这些显著增加区域的径流变化率也相对较高。从 Hurst 指数分布来看,大部分区域  $H>0.5$ ,表明年径流深变化趋势具有一定的持续性;特别是在显著增加的区域, $H>0.6$ ,表明未来这些区域的径流深将持续性增长; $H<0.5$ 的区域分布较为零散,通常对应不显著的径流变化。德州与济南交界地带的少数格点径流深呈显著增加趋势,但 Hurst 指数为 0.4~0.5,表明未来该区域的径流深不依赖或较少依赖于历史值,可能会下降。

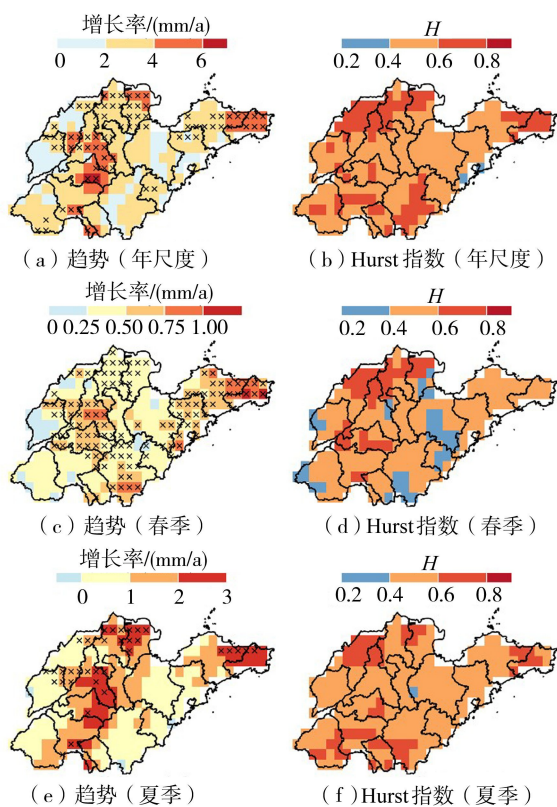


图 5 山东省径流深在年尺度与春、夏两季的变化趋势  
Fig. 5 Trends of runoff depth in Shandong Province at annual scale and during spring and summer

春、夏两季节径流深的平均增长率分别为 0.50 mm/a( $p<0.01$ )和 1.50 mm/a( $p<0.05$ )。春季径流深的变化趋势分布较年尺度更为均匀,全省 51.9%的区域径流深显著增加,增长率不超过 1.25 mm/a。除菏泽外,其他地区径流变化均具有显著性。 $H<0.5$ 的区域主要集中在鲁南、鲁东地区,其中,历史径流深显著增加的临沂、济南、潍坊、青岛等地(变化率为 0.25~0.75 mm/a)未来的增加

趋势可能减弱,这可能与实际蒸散发的增加有关。鲁西北地区 Hurst 指数普遍高于 0.7,且径流深呈显著增加趋势,表明径流深的增加在这些区域具有较强的持续性。夏季径流深增加略大于春季,但只有 14.8% 的地区呈显著增加趋势,且在分布上与年尺度显著增加区域对应。总体而言,虽然春季径流深在部分地区可能减小,但预计未来年尺度上径流深将持续缓慢增加。

### 3.2 水循环要素驱动机制

为探究气候和植被因素对蒸散发和径流的共同影响,计算实际蒸散发和径流与降水、潜在蒸散发及 LAI 的偏相关系数,结果如表 2 所示。降水是影响径流变化的主导因子,对径流有显著的正向促进作用,降水与径流深的偏相关系数为 0.85,对径流深的贡献率高达 72.3%,能够解释径流量年际变化的主要部分。从图 6(a) 可以看出,两者在 99.55% 的区域呈现出显著的正相关关系,且在德州、聊城、济南、滨州的部分区域  $0.2 < R_p < 0.6$ ,其余地区  $R_p > 0.7$ 。径流深与潜在蒸散发的关系则非常弱,偏相关系数仅为  $-0.02$ ,潜在蒸散发对径流贡献率几乎为 0,即潜在蒸散发对径流的影响可以忽略。在面平均尺度上,径流深与 LAI 呈显著正相关关系,但偏相关系数较低,为 0.42, LAI 对径流的贡献率为 17.6%。尽管植被截流和蒸腾在一定程度上会减少产流,但植被覆盖的增加通常会通过改善土壤结构、增强下渗、减少土壤侵蚀和表土流失等方式对径流产生积极的作用。不同区域植被变化对水文过程的影响结果并不一致,图 6(b) 表明只有 14.35% 的格点径流深与 LAI 呈现显著正相关关系,主要集中在泰安和济南地区,这也进一步印证了泰山山脉处较高的植被覆盖率有助于涵养水源和调节降水向径流转化。

实际蒸散发与降水和 LAI 均呈显著正相关关系,偏相关系数分别为 0.34、0.39,降水和 LAI 对实际蒸散发的贡献率分别为 11.6%、15.2%。降水增加时,土壤表层水分得到补给,为土壤蒸发提供了更多的可用水分; LAI 增大时,植被蒸腾作用增强,进一步提高了区域实际蒸散发量,因此,降水和 LAI 共同对实际蒸散发产生正向促进作用。从贡献率来看,这两者并非主导因素,表明其他因素如温度、土

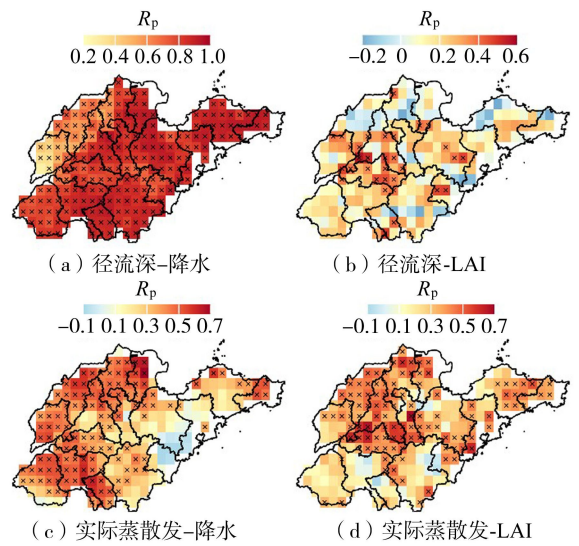


图 6 偏相关系数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of partial correlation coefficients

壤湿度、地形地貌、人类活动(土地利用、灌溉等)的综合驱动可能对山东省区域蒸散发影响更大。图 6(c) 表明,在空间分布上,60.81% 的区域显示出降水对实际蒸散发的显著正向促进作用,主要集中在鲁西地区和威海、临沂等地,与区域水资源禀赋不足,受水分限制的背景一致。鲁东部多山区和丘陵,较平原地区降水量的极端变化更为复杂、频繁,此外城市化进程较快,进一步加剧了蒸散发响应变化的复杂性,因此,这些区域实际蒸散发与降水表现出不显著相关。53.15% 区域显示出 LAI 对实际蒸散发的显著正向促进作用,主要集中在鲁中部、西北部和东北部;尽管少数区域两者呈现出负相关关系,但并不显著。潜在蒸散发对实际蒸散发的贡献率几乎为 0,一方面,这与山东省多年平均潜在蒸散发分布东北多、西南少,在空间上与实际蒸散发表现为反相对应状态有关<sup>[46]</sup>;另一方面,也说明了气象驱动的蒸散发潜力未能有效转化为实际蒸散发,反映出山东省存在一定的水分限制及潜在的供需失衡风险。

## 4 讨论

山东省降水量存在明显的地区差异,随纬度及离海岸距离的增加而减小。这是由于夏季风的南北推移导致华北地区夏季降水随着纬度的升高而减少;同时胶东半岛伸入黄海,海洋对沿岸地区的降水产生显著的增强作用<sup>[11]</sup>。实际蒸散发和径流的

表 2 偏相关系数及贡献率

Table 2 Partial correlation coefficients and contribution rates

要素	$R_p$			C/%		
	降水	潜在蒸散发	LAI	降水	潜在蒸散发	LAI
实际蒸散发	0.34( $p=0.04$ )	-0.03( $p=0.88$ )	0.39( $p=0.02$ )	11.6	0.09	15.2
径流深	0.85( $p=0.00$ )	-0.02( $p=0.90$ )	0.42( $p=0.01$ )	72.3	0.04	17.6

分布格局与降水类似,这与多年平均尺度上的水量平衡假设一致<sup>[49]</sup>。蒸散发作为水、能源和碳循环之间的联系,在农业生产和水资源管理中发挥着重要作用<sup>[46]</sup>。与张国华等<sup>[13]</sup>研究得出1961—2008年实际蒸散发呈现下降趋势不同,本文研究得出,1980—2018年山东省大部分区域实际蒸散发呈现显著上升趋势,但增速缓慢,不超过4 mm/a。径流作为生产生活用水的主要来源,是水资源合理开发与优化配置的基础。山东省降水对径流具有显著的主导作用,与省内河流多为雨源型相对应。在年尺度上,径流与LAI呈较弱的正相关关系,与庄会波等<sup>[50]</sup>的结论一致。2001—2020年,人类活动导致山东省植被覆盖面积增加7.5%<sup>[51]</sup>,推动了区域蒸散发和径流的部分增长。尽管植被覆盖持续改善,但其对径流的影响在不同时空尺度上具有显著差异。值得注意的是,本文所用径流产品反映的是剔除灌溉、跨流域调水等人类活动影响后,由气候和下垫面条件决定的天然产流特征。因此,本文揭示的降水对径流的主导性驱动关系可理解为自然系统内的响应机制,有助于厘清自然变率下山东省径流的本底响应<sup>[52]</sup>,为辨识和评估人类活动对水循环的额外影响提供重要的参考。研究显示气候因子仍主导着天然径流的变异,从侧面说明,人类活动主要通过改变水资源的空间配置,而非完全改变自然产流总量来适应需求。

区域蒸散发和径流不仅受气候和植被的影响,还与土地利用类型、下垫面理化性质、土壤湿度和相对湿度等条件密切相关<sup>[53-55]</sup>,这些影响因素有待进一步探究。在水文模型中,土壤湿度作为关键状态变量,不仅影响蒸散发过程,还控制着地表径流与地下水补给,其动态变化对水循环模拟的准确性至关重要<sup>[56]</sup>。山东省农业灌溉、水库调蓄及跨流域调水(如南水北调、引黄工程)等大规模人类活动频繁,水网建设体系密集,显著改变了河川径流的时空分布格局。未来研究应更加关注水网框架下地表水及地下水资源的多要素协同优化<sup>[57]</sup>,以完整揭示自然与人为因素对山东省水循环的复合影响。

## 5 结 论

a. 山东省降水和径流分布的空间异质性较实际蒸散发更强,但三要素均呈现出东南高、西北低的特征,且季节差异显著。降水、实际蒸散发、径流均集中在夏季,冬季较为干燥,实际蒸散发和径流深最小。山东济南及泰安交界处虽非东部沿海区域,其径流深仍较其他区域偏大。

b. 1980—2018年,山东省年降水量、径流深、

实际蒸散发量均呈增加趋势,并在2002年均急剧减小至历年最低值;实际蒸散发量和径流深的变化趋势显著,年增长率分别为1.64 mm/a和2.32 mm/a,显著增长区域占比分别为68.4%和33.8%。

c. 实际蒸散发和径流增加具有一定的持续性。实际蒸散发量在春、冬两季呈显著增加趋势,平均增长率分别为0.84 mm/a( $p < 0.01$ )和0.10 mm/a( $p < 0.05$ ),德州、聊城和济南等地增速较快;径流深在春、夏两季有显著趋势,平均增长率分别为0.50 mm/a( $p < 0.01$ )和1.50 mm/a( $p < 0.05$ ),增速较快的区域主要分布在鲁东北、鲁西北、鲁西南及鲁中,春季显著增长区域占比高达51.9%。

d. 降水是影响径流的主导因子,两者间的偏相关系数为0.85,降水的贡献率高达72.3%,对径流有显著正向促进作用;面平均径流与LAI呈显著正相关关系,但该关系仅在14.35%的区域成立;降水和LAI共同对实际蒸散发产生正向促进作用,但并非主导因子。

## 参考文献:

- [1] Du Haibo, Alexander L V, Donat M G, et al. Precipitation from persistent extremes is increasing in most regions and globally [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(11):6041-6049.
- [2] Durack P J, Wijffels S E, Matear R J. Ocean salinities reveal strong global water cycle intensification during 1950 to 2000 [J]. *Science*, 2012, 336(6080):455-458.
- [3] Lemordant L, Gentine P, Swann A S, et al. Critical impact of vegetation physiology on the continental hydrologic cycle in response to increasing CO<sub>2</sub> [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16):4093-4098.
- [4] 徐宗学, 卢兴超, 施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2025, 45(1):1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2025, 45(1):1-9. (in Chinese))
- [5] 刘丁蓉, 杨凯, 孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. *水利经济*, 2024, 42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in Pearl River Delta urban agglomeration [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2024, 42(4):23-29. (in Chinese))
- [6] Gradiyanto F, Parmantoro P N, Suharyanto. Impact of climate change on Kupang River flow and hydrological

- extremes in Greater Pekalongan, Indonesia [J]. *Water Science and Engineering*, 2025, 18(1): 69-77.
- [7] 陈婷, 夏军, 邹磊. 汉江上游流域水文循环过程对气候变化的响应[J]. *中国农村水利水电*, 2019(9): 1-7. (Chen Ting, Xia Jun, Zou Lei. The response of the upstream hydrological cycle process to climate change in the upper Hanjiang River Basin [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(9): 1-7. (in Chinese))
- [8] 刘海红, 殷淑燕, 许丽婷, 等. 山东省极端气候和人类活动对不同植被类型 NDVI 的影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(21): 8780-8792. (Liu Haihong, Yin Shuyan, Xu Liting, et al. Effects of extreme climate and human activities on NDVI (normalized difference vegetation index) of different vegetation types in Shandong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(21): 8780-8792. (in Chinese))
- [9] 张晏铭, 郑小童. 两类厄尔尼诺事件对次年山东夏季降水的影响研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2024, 54(2): 12-22. (Zhang Yanming, Zhen Xiaotong. Impacts of two types of el niño on summer rainfall in Shandong [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2024, 54(2): 12-22. (in Chinese))
- [10] 张筠. 基于 CASA 模型的山东省植被 NPP 时空格局变化及其驱动因素研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021.
- [11] 韩玮, 韩永红, 杨沈斌. 1961—2011 年山东气候资源及气候生产力时空变化特征[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(3): 425-434. (Han Wei, Han Yonghong, Yang Shenbin. Spatial-temporal change of climate resources and climatic productivity in Shandong Province during 1961-2011 [J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(3): 425-434. (in Chinese))
- [12] 邹瑾, 李君, 高理. 气候变暖下山东省月尺度极端降水的时空变化特征[J]. *山东科学*, 2023, 36(4): 104-113. (Zou Jin, Li Jun, Gao Li. Characteristics of spatiotemporal variation of monthly-scale extreme precipitation in Shandong Province under climate warming [J]. *Shandong Science*, 2023, 36(4): 104-113. (in Chinese))
- [13] 张国华, 郭磊, 刘健, 等. 山东省陆面实际蒸发量估算及变化特征分析[J]. *人民黄河*, 2014, 36(10): 26-29. (Zhang Guohua, Guo Lei, Liu Jian, et al. Estimation and variation characteristics of land actual evapotranspiration in Shandong Province [J]. *Yellow River*, 2014, 36(10): 26-29. (in Chinese))
- [14] 刘玄, 唐培军, 吴同帅, 等. 山东省极端气候指数变化特征研究[J]. *水利水运工程学报*, 2022(2): 40-50. (Liu Xuan, Tang Peijun, Wu Tongshuai, et al. Study on the characteristics of extreme climate indices in Shandong Province [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(2): 40-50. (in Chinese))
- [15] 奚秀芬, 郑世芳, 汤子东. 2000 年山东半岛春夏干旱分析及对策[J]. *山东气象*, 2001, 21(2): 9-11. (Xi Xiufen, Zheng Shifang, Tang Zidong. The analysis and countermeasures for spring and summer drought of Shandong Peninsula in 2000 [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2001, 21(2): 9-11. (in Chinese))
- [16] 兀泽坤, 李爱民. 南水北调东线工程运行前后山东省水储量变化分析[J]. *人民黄河*, 2024, 46(7): 72-78. (Wu Zekun, Li Aiming. Analysis of changes of terrestrial water storage in Shandong Province before and after south-to-north water diversion project [J]. *Yellow River*, 2024, 46(7): 72-78. (in Chinese))
- [17] 徐玮平, 孟祥新, 顾伟宗, 等. 山东春季极端低温与前冬北大西洋海温的关系[J]. *干旱气象*, 2022, 40(2): 202-211. (Xu Weiping, Meng Xiangxin, Gu Weizong, et al. Relationship between extremely low temperature in spring in Shandong Province and North Atlantic SST in preceding winter [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2022, 40(2): 202-211. (in Chinese))
- [18] 欧阳婧怡, 黄菲, 许士斌, 等. 1949—2019 年影响山东的热带气旋时空分布及极端降水和大气环流异常[J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(4): 1-10. (Ouyang Jingyi, Huang Fei, Xu Shibin, et al. Spatial and temporal distribution of tropical cyclones affecting Shandong as well as the extreme precipitations and atmospheric circulation anomalies from 1949 to 2019 [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2021, 41(4): 1-10. (in Chinese))
- [19] 董旭光, 周强, 刘焕彬, 等. 山东夏季极端热事件变化特征分析[J]. *海洋气象学报*, 2020, 40(3): 60-76. (Dong Xuguang, Zhou Qiang, Liu Huanbin, et al. Analysis on spatio-temporal characteristics of summer extreme hot events in Shandong from 1961 to 2019 [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2020, 40(3): 60-76. (in Chinese))
- [20] 曹倩, 黄菲, 欧阳婧怡, 等. 1969—2020 年夏季山东极端暴雨事件的时空特征及其影响环流分型[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(4): 1-12. (Cao Qian, Huang Fei, Ouyang Jingyi, et al. Temporal and spatial patterns of shandong extreme rainstorm events in summer and their weather circulation types from 1969 to 2020 [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2024, 54(4): 1-12. (in Chinese))
- [21] 侯恩光, 王如岩, 张靖, 等. 沂河流域山东段径流演变特征及影响因素分析[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(6): 947-955. (Hou Enguang, Wang Ruyan, Zhang Jing, et al. Analysis of runoff evolution characteristics and influencing factors in shandong section of Yihe River Basin [J]. *Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2022, 53(6): 947-955. (in Chinese))
- [22] 程甜甜, 李赛, 张兴刚, 等. 山东药乡小流域降雨径流关系研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 34-37. (Cheng Tiantian, Li Sai, Zhang Xingang, et al. Study on the relationship between rainfall and runoff in Yaoxiang small

- watershed of Shandong Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation* 2016,30(2):34-37. (in Chinese))
- [23] 陈一. 山东省降水蒸发时空变化特征及水资源演变影响因素研究[D]. 济南:山东大学,2021.
- [24] 高雅琦,肖莺,秦鹏程,等. 2022年长江上游流域夏季干旱气候特征及成因分析[J]. *中国防汛抗旱*,2023,33(3):12-17. (Gao Yaqi,Xiao Ying,Qin Pengcheng, et al. Climatic characteristics and cause analysis on the summer drought in the upper reaches of the Yangtze River [J]. *China Flood & Drought Management*, 2023, 33(3): 12-17. (in Chinese))
- [25] 李璨,王建众,唐克银. 山东强化水资源最大刚性约束的实践与思考[J]. *中国水利*,2020(13):45-48. (Li Can, Wang Jianzhong, Tang Keyin. Practice and exploration on strengthening the role of rigid water resources constraint in Shandong Province [J]. *China Water Resources*,2020(13):45-48. (in Chinese))
- [26] 吴佳,高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比[J]. *地球物理学报*,2013,56(4):1102-1111. (Wu Jia, Gao Xuejie. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013,56(4):1102-1111. (in Chinese))
- [27] Wu Jia, Gao Xuejie, Giorgi F, et al. Changes of effective temperature and cold/hot days in late decades over China based on a high resolution gridded observation dataset [J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(S1): 788-800.
- [28] 李光轩,赵钟楠,李原园,等. 气候变化下西北内陆河典型流域出山径流变化归因分析[J]. *水资源保护*,2026,42(1):152-161. (Li Guangxuan, Zhao Zhongnan, Li Yuanyuan, et al. Attribution analysis of mountainous runoff evolution in typical basins of northwest inland rivers under climate change [J]. *Water Resources Protection*, 2026, 42(1): 152-161. (in Chinese))
- [29] Wu Mengyu, She Dunxian, Zhang Qin, et al. Leveraging emergent constraints to reduce uncertainty in future compound drought and heatwave events across mainland China [J]. *Journal of Hydrology*, 2025, 661: 133551.
- [30] 沈龙,吴南,罗煜宁,等. 气候变化下1960—2020年长江源区水文气象要素变化趋势[J]. *水资源保护*,2026,42(1):22-29. (Shen Long, Wu Nan, Luo Yining, et al. Change trends of hydro-meteorological elements in the Yangtze River Source Region from 1960 to 2020 under climate change [J]. *Water Resources Protection*, 2026, 42(1): 22-29. (in Chinese))
- [31] 陈永喆,崔艳红,张才金,等. 变化环境下黄河流域内蒙古段植被与水文要素的时空协同演变[J]. *水资源保护*,2024,40(2):141-149. (Chen Yongzhe, Cui Yanhong, Zhang Caijin, et al. Spatio-temporal co-evolution of vegetation and hydrological elements under a changing environment in the Inner Mongolia Section of the Yellow River Basin [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(2): 141-149. (in Chinese))
- [32] 魏玲娜,孙小淞,董建志,等. 中国外流流域实际蒸散发变化趋势及多源蒸散产品评估[J]. *水科学进展*,2025,36(3):383-396. (Wei Ningna, Sun Xiaosong, Dong Jianzhi, et al. Spatiotemporal trends of actual evapotranspiration and evaluation of multi-source evapotranspiration products in China's exorheic basins [J]. *Advances in Water Science*, 2025, 36(3): 383-396. (in Chinese))
- [33] Shi Xinrong, She Dunxian, Xia Jun, et al. The intercomparison of six 0.1° × 0.1° spatial resolution evapotranspiration products across mainland China [J]. *Journal of Hydrology*, 2024, 633: 130949.
- [34] Miao Chiyuan, Gou Jiaojiao, Fu Bojie, et al. High-quality reconstruction of China's natural streamflow [J]. *Science Bulletin*, 2022, 67(5): 547-556.
- [35] Miao Yue, Wang Aihui. A daily 0.25° × 0.25° hydrologically based land surface flux dataset for conterminous China, 1961-2017 [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125413.
- [36] Wang Zhenwei, Chang Jianxia, Wang Yimin, et al. Temporal and spatial propagation characteristics of meteorological drought to hydrological drought and influencing factors [J]. *Atmospheric Research*, 2024, 299: 107212.
- [37] Bai Xuelian, Zhao Wenzhi. Impacts of climate change and anthropogenic stressors on runoff variations in major river basins in China since 1950 [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 898: 165349.
- [38] Miao Yue, Wang Aihui. Evaluation of routed-runoff from land surface models and reanalyses using observed streamflow in Chinese river basins [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2020, 34(1): 73-87.
- [39] 梁树超,翟保豫,李国庆,等. 叶尔羌河流域水文气象要素演变规律及其与水力发电量的关联度分析[J]. *长江科学院院报*,2025,42(2):23-28. (Liang Shuchao, Zhai Baoyu, Li Guoqing, et al. Change characteristics of hydrometeorological elements in the Yarkand River Basin and their correlations with hydroelectric power generation [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2025, 42(2): 23-28. (in Chinese))
- [40] 姜瑶,徐宗学,王静. 基于年径流序列的五种趋势检测方法性能对比[J]. *水利学报*,2020,51(7):845-857. (Jiang Yao, Xu Zongxue, Wang Jing. Comparison among five methods of trend detection for annual runoff series [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(7): 845-857. (in Chinese))
- [41] Huang Hao, Zhang Bo, Cui Yanqiang, et al. Analysis on the characteristics of dry and wet periods in the Yangtze

- River Basin [J]. *Water*, 2020, 12(11): 2960.
- [42] 宁忠瑞, 张建云, 王国庆. 1948—2016 年全球主要气象要素演变特征[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(9): 4085-4095. (Ning Zhongrui, Zhang Jianyun, Wang Guoqing. Variation and global pattern of major meteorological elements during 1948-2016 [J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(9): 4085-4095. (in Chinese))
- [43] Pan Shufen, Pan Naiqing, Tian Hanqin, et al. Evaluation of global terrestrial evapotranspiration using state-of-the-art approaches in remote sensing, machine learning and land surface modeling [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24(3): 1485-1509.
- [44] 景朝霞. 陆地蒸散发年际变化规律及其驱动机制[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [45] 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[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(5): 1343-1352. (Yang Xiuqin, Wang Lei, Wang Kai. Spatio-temporal distribution of terrestrial evapotranspiration in Huaihe River Basin based on MOD16 ET data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(5): 1343-1352. (in Chinese))
- [46] 赵桑, 陈少辉. 基于台站和 MOD16 数据的山东省蒸散及潜在蒸散时空变化[J]. *地理科学进展*, 2017, 36(8): 1040-1047. (Zhao Shen, Chen Shaohui. Spatiotemporal variations of evapotranspiration and potential evapotranspiration in Shandong Province based on station observations and MOD16 [J]. *Progress in Geography*, 2017, 36(8): 1040-1047. (in Chinese))
- [47] 封得华, 相华, 徐效涛. 山东省主要河流径流量变化情况[J]. *治淮*, 2018(4): 45-48. (Feng Dehua, Xiang Hua, Xu Xiaotao. Analysis of changes in runoff volumes of major rivers in Shandong Province [J]. *Harnessing the Huaihe River*, 2018(4): 45-48. (in Chinese))
- [48] 张胜平, 陈希村, 苏传宝, 等. 2002 年山东省严重干旱分析[J]. *水文*, 2004, 24(3): 42-45. (Zhang Shengping, Chen Xicun, Su Chuanbao, et al. Analysis of the severe drought of Shandong Province in 2002 [J]. *Journal of China Hydrology*, 2004, 24(3): 42-45. (in Chinese))
- [49] 虞畅, 金君良, 王国庆, 等. 黄河源区典型流域水文要素演变及其对气候变化的响应[J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2024, 22(5): 845-855. (Yu Chang, Jin Junliang, Wang Guoqing, et al. Evolution of hydrological elements in typical watersheds of the Yellow River source area and their response to climate change [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(5): 845-855. (in Chinese))
- [50] 庄会波, 季好, 高振勇, 等. 1998—2018 年山东省植被覆盖变化及其水文响应规律研究[J]. *中国农村水利水电*, 2021(10): 8-14. (Zhuang Hhuiibo, Ji Yu, Gao Zhenyong, et al. Research on vegetation cover changes and hydrological responses in Shandong Province from 1998 to 2018 [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(10): 8-14. (in Chinese))
- [51] 王亚晴. 山东省植被覆盖时空演化及其对气候变化和人类活动的响应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
- [52] 王宣宣, 刘欢, 胡鹏, 等. 基于水量平衡原理和 Budyko 假设的强人类活动干扰下西辽河流域径流衰减归因分析[J]. *水资源保护*, 2024, 40(6): 165-172. (Wang Xuanxuan, Liu Huan, Hu Peng, et al. Attribution analysis of runoff attenuation in the Xiliao River Basin under significant human interference based on water balance principle and Budyko hypothesis [J]. *Water Resources Protection*, 2024, 40(6): 165-172. (in Chinese))
- [53] 李铠峰, 赵超, 李文彧, 等. 气候变化及人类活动影响下永安溪河流水文健康响应[J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2025, 53(1): 25-30. (Li Kaifeng, Zhao Chao, Li Wenyu, et al. Hydrological health response of climate change and human activities impact of the Yong'an River [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(1): 25-30. (in Chinese))
- [54] 郭珈源, 孙旭杨, 刘金涛, 等. 基于 Budyko 理论的高寒山区流域径流演变归因分析[J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2025, 53(3): 22-29. (Guo Jiayuan, Sun Xuayang, Liu Jintao, et al. Attribution analysis of runoff evolution in cold alpine catchment based on Budyko theory [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2025, 53(3): 22-29. (in Chinese))
- [55] 徐宗学, 班春广, 张瑞. 我国主要河川径流演变规律与归因及其区域特征[J]. *水利水电科技进展*, 2024, 44(1): 1-8. (Xu Zongxue, Ban Chunguang, Zhang Rui. Evolution law, attribution and regional characteristics of runoff for major rivers in China [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2024, 44(1): 1-8. (in Chinese))
- [56] 江善虎, 江宏, 朱永卫, 等. 基于 PLS-SEM 的渭河流域径流演变效应解耦[J]. *水资源保护*, 2025, 41(5): 223-230. (Jiang Shanhu, Jiang Hong, Zhu Yongwei, et al. Runoff evolution effect decoupling in the Wei River Basin based on PLS-SEM [J]. *Water Resources Protection*, 2025, 41(5): 223-230. (in Chinese))
- [57] 侯凯, 李超群, 严登明, 等. 水网建设驱动地下水开发与保护关键技术[J]. *水资源保护*, 2026, 42(1): 59-69. (Hou Kai, Li Chaoqun, Yan Dengming, et al. Key technologies for groundwater development and protection driven by water network construction [J]. *Water Resources Protection*, 2026, 42(1): 59-69. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-06-24 编辑: 施业)