

基于 Budyko 假设与 SWAT 模型的大汶河流域 径流演变及归因分析

张雯¹, 王乐扬^{1,2,3}, 曹红⁴, 王卫光^{1,2,3}, 尚艳丽⁵, 耿福萍⁶

(1. 河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029;
5. 山东省泰安市水文中心, 山东 泰安 271001; 6. 山东省水文水资源勘测局, 山东 济南 250013)

摘要:【目的】定量解析气候变化和人类活动对大汶河流域径流衰减的作用机制,旨在为流域水资源适应性管理提供理论支撑。【方法】基于 CN05.1 气象数据集与实测径流资料,采用线性倾向估计、Mann-Kendall 参数检验、累积距平法和 Pettitt 突变检验系统分析大汶河流域水文气象要素趋势性和突变性。通过 Budyko 水量平衡方程与 SWAT 文模型构建双途径归因分析框架,对流域 1961—2020 年径流演变过程进行归因分析。【结果】①1961—2020 年大汶河流域年降水量、潜在蒸散发量和径流量均呈下降趋势,气温呈显著上升趋势,年径流序列于 1976 年发生突变,突变后径流量较基准期下降 49.76%。②基于 Budyko 假设的分析显示,降水、潜在蒸散发和下垫面对径流减少的贡献率分别为 19.06%、-12.83%和 93.33%。③SWAT 水文模型法结果显示,气候变化和人类活动对径流贡献率分别为 18.30%和 81.7%。【结论】两种方法均表明人类活动是导致大汶河流域径流减少的主要原因。研究成果可为未来大汶河流域水资源可持续调控与生态保护决策提供科学依据。

关键词:径流归因分析;Budyko 理论;SWAT 水文模型;大汶河流域

中图分类号:TV121.2

文献标识码:A

河川径流动态变化是环境变化影响水文循环过程的集中体现。张建云等^[1]研究指出,1956—2018 年黄河流域径流量出现上游弱减少、中下游明显减少趋势。河川径流量是自然和人为影响的综合结果,在全球变暖和人类活动深度干预的背景下,流域水循环过程呈现前所未有的复杂性与不确定性^[2]。揭示径流变化的驱动机制,定量辨析气候变化与人类活动的相对贡献,已成为水资源可持续管理的关键科学命题^[3]。

近年来,国内外学者在径流归因识别方面提出不同的研究方法,可以归纳为统计分析法、弹性系数法和水文模型法。赵阳等^[4]、府仁寿等^[5]、PIRNI A 等^[6]采用双累积曲线法分别分析了黄河、长江和塔扬河流域径流变化的驱动因素,此种方法缺乏一定的物理基础且需要较长的时间序列。基于

Budyko 假设的弹性系数法,物理概念清晰、计算高效透明,通过整合降水、潜在蒸散发与径流等要素间的关系,广泛应用于大中型尺度流域径流归因分析。例如,张丽梅等^[7]、严伟卿等^[8]和 GUAN X J 等^[9]分别以渭河、金溪和长江流域为研究区,使用基于 Budyko 假设的弹性系数法识别得出下垫面变化是流域径流减少的主要影响因素。水文模型法通过自然时期的水文数据校准得到水文模型参数,重建整个时期的天然径流,定量评估气候变化和人类活动对河流流量减少的贡献。例如,王国庆等^[10]、刘酌希等^[11]和 BAO Z X 等^[12]分别采用 RCCC-WBM (Research Center for Climate Change-Water Balance Model)、SWAT (Soil and Water Assessment Tool)和 VIC (Variable Infiltration Capacity)模型对汾河、洮河和海河流域进行径流变化归因分析。

收稿日期/Received: 2025-07-15

修回日期/Revised: 2025-08-29

基金项目:国家自然科学基金重点项目(U2243228, 52121006)。

第一作者:张雯(1999—),女,硕士研究生,从事从事水文水资源方面的研究。E-mail:wenzhang1663486@163.com。

通信作者:王乐扬(2000—),男,博士研究生,从事气候变化及水文水资源方面的研究。E-mail:yueyangwang413@163.com。

SWAT 水文模型因其对物理过程的系统性刻画而被广泛采纳,基于水热耦合平衡的 Budyko 假设也凭借其坚实的物理基础(如 FU 公式^[13]、CHOUDHURY-YANG 公式^[14-15]等)及对流域长时期平均水热耦合关系的描述,为径流变化归因构建了简洁而稳健的理论框架。将上述两种方法联用,既可以依托弹性系数法高效获取流域尺度的宏观归因信息,又能借助 SWAT 模型深入解析微观水文过程并实现关键变量的模拟与量化,两者相互补充印证,降低单一方法的不确定性,提升径流归因分析的科学与可靠性。

大汶河为黄河下游山东省境内最大支流,也是南水北调工程调蓄湖东平湖的重要水源。然而洪涝灾害频发,人类活动强度加剧,显著改变了流域内水循环节律和驱动机理,亟需识别流域水文过程演变的主导驱动因素、评估气候变化和各种人类活动对径流衰减的作用机制。故本研究以黄河下游大汶河流域为研究区,基于 Budyko 假设和 SWAT 模型分析大汶河流域径流衰减原因,以期为黄河流域水资源

优化配置、生态系统建设提供科学指导,为区域高质量发展提供重要水资源保障。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

大汶河流域位于我国黄河下游山东省境内,地处东经 116° ~118°,北纬 35.5° ~36.75°。该流域属于温带季风气候,夏季高温多雨、冬季寒冷干燥。大汶河流域东起鲁山、西至东平湖、北有泰山和小清河、南有蒙山和淮河,地势东高西低,山地和丘陵各占流域面积的 31%和 37%。大汶河干流全长 209km,河流总落差 362 m,是中国境内唯一一条自东向西的内陆河。流域内大汶口和戴村坝水文站将大汶河分为上、中和下游,其中下游戴村坝水文站的集水面积为 8 264 km²,约占整个大汶河流域面积的 97%。大汶河流域内有大、中型水库 24 座,水库总库容为 9.042 亿 m³,其中雪野和光明水库总库容为 3.25 亿 m³,约占总库容的 36%,研究区如图 1 所示。

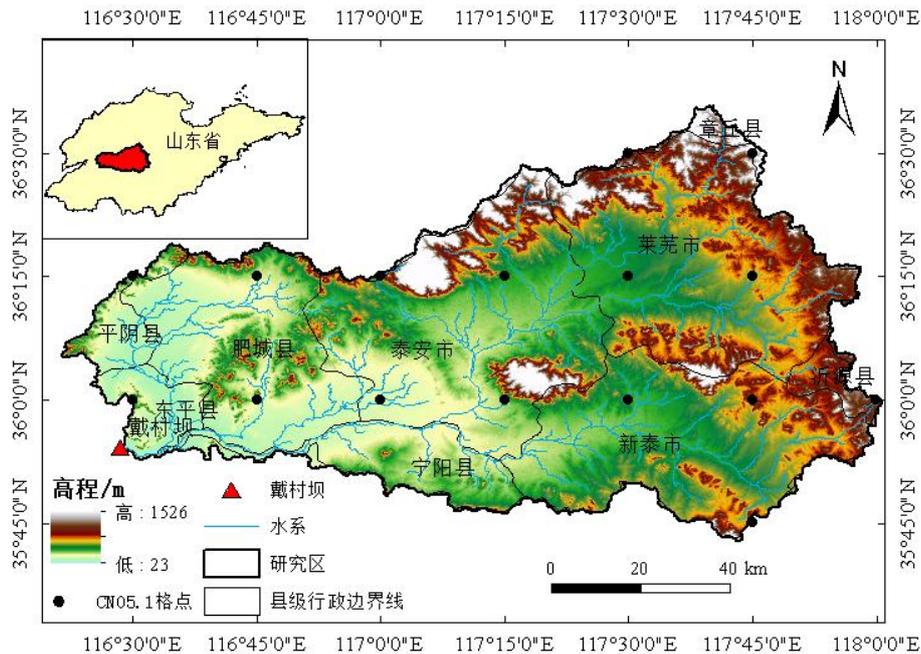


图 1 大汶河流域概况图

Fig.1 Overview of Dawen River Basin

1.2 数据来源

1961—2020 年气象数据采用吴佳等^[16]基于中国境内 2 400 个台站观测资料所构建的 CN05.1 格点数据集,此数据集来源于气象变化研究中心(<https://ccrc.iap.ac.cn/>)。戴村坝水文站 1961—2020 年的逐月径流量来源于《黄河流域水文年鉴》。潜在蒸散发数据采用修正的 Penman-Monteith 公式计算。1980—2020 年 5 期土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.dsac.cn/>)。土

壤数据来源于世界土壤数据库土壤数据集 HWSO(<http://www.fao.org/>),空间分辨率为 1 km。

2 研究方法

2.1 径流演变分析方法

本文采用线性回归法、Mann-Kendall 非参数检验法、累积距平法和 Pettitt 法来诊断水文序列的趋势性和突变性。Mann-Kendall 非参数检验法^[17]可以检验时间序列的趋势性及显著性,通过统计量 Z

的正负来判断上升或下降, Z 值的绝对值大于 1.96 ($\alpha=0.05$) 则认为时间序列趋势显著。累积距平法^[18]是计算序列距平值(观测值减均值)的累积和, 突变点对应曲线极值点或拐点。Pettitt 突变检验法^[19-20]是基于秩统计量寻找序列中单突变点, 统计量最大处为突变点。

2.2 Budyko 弹性系数法

2.2.1 水量平衡方程

基于 Budyko 假设的水量平衡方程为^[21]:

$$E/P = f(ET_0/P) = f(\varphi) \quad (1)$$

式中: P 为多年平均降水量, mm; E 为多年平均蒸散发量, mm; ET_0 为多年平均潜在蒸散发量, mm; φ 为干旱指数。

本文采用 Choudhury—Yang 推导的 Budyko 假设经验公式^[22-23]:

$$R = P - \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (2)$$

式中 n 为流域内下垫面特征参数, 与土壤、地形和土地利用等因素相关。

潜在蒸散发采用修正的 Penman-Monteith 公式^[24]计算:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (3)$$

式中: R_n 和 G 分别为净太阳辐射和土壤热通量, MJ/(m²·d); γ 和 Δ 分别为湿度计常数和饱和水汽压曲线的斜率, kPa/°C; T 为平均温度, °C; U_2 为 2 m 高处的风速, m/s; e_s 和 e_a 分别为饱和水汽压和实际的水汽压, kPa。

2.2.2 敏感性分析

径流变化的微分方程为:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_P \frac{dP}{P} + \varepsilon_{ET_0} \frac{dET_0}{ET_0} + \varepsilon_n \frac{dn}{n} \quad (4)$$

各因子的弹性系数为^[25]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_P &= \frac{(1 + \varphi^n)^{\frac{1}{n+1}} - \varphi^{n+1}}{(1 + \varphi^n)[(1 + \varphi^n)^{\frac{1}{n}} - \varphi]} \\ \varepsilon_{ET_0} &= \frac{1}{(1 + \varphi^n)[1 - (1 + \varphi^{-n})^{\frac{1}{n}}]} \\ \varepsilon_n &= \frac{\ln(1 + \varphi^n) + \varphi^n \ln(1 + \varphi^{-n})}{n(1 + \varphi^n)[1 - (1 + \varphi^{-n})^{\frac{1}{n}}]} \end{aligned} \quad (5)$$

式中 ε_P 、 ε_{ET_0} 和 ε_n 分别为降水、潜在蒸散发和下垫面弹性系数。

2.2.3 驱动因子贡献率计算

各驱动因子对径流的影响:

$$\Delta R_x = \varepsilon_x R \frac{\Delta x}{x} \quad (6)$$

式中: x 分别为 P 、 ET_0 和 n ; ΔR_x 为各驱动因子引起的径流变化量, mm; ε_x 为各因子的弹性系数; Δx 为突变点前后驱动因子的变化值, mm。

各驱动因子对径流变化的贡献率为:

$$\eta_x = \frac{\Delta R_x}{\Delta R} \times 100\% \quad (7)$$

式中: η_x 为各驱动因子贡献率; ΔR 为变化期较基准期的径流变化量, mm。

2.3 SWAT 水文模型法

SWAT 水文模型法的基本原理: 利用突变点将历史时期划分为基准期(近自然状态)与变化期(受双重影响), 使用基准期的气象、土地利用及土壤数据构建模型, 率定出反映自然条件的参数集, 保持率定的参数不变, 输入变化期的气象数据运行模型, 输出该时段在不受下垫面条件影响下的理论径流量。大汶河流域高程、子流域分布、土地利用类型分布和土壤类型分布见图 2。

分离气候变化和人类活动^[26]:

$$\begin{cases} \Delta R = R_2 - R_1 \\ \Delta R_C = R_{sim} - R_1 \\ \Delta R_H = \Delta R - \Delta R_C = R_2 - R_{sim} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} \eta_C = \frac{\Delta R_C}{\Delta R} \\ \eta_H = \frac{\Delta R_H}{\Delta R} \end{cases} \quad (9)$$

式中: ΔR 为变化期较基准期径流变化量, mm; R_1 为基准期实测平均径流, mm; R_2 为变化期实测平均流量, mm; R_{sim} 为模型模拟的多年平均流量, mm; ΔR_C 和 ΔR_H 为气候和下垫面变化引起的多年平均流量变化值, mm; η_C 和 η_H 分别为气候和人类活动对径流变化的贡献率。

选择纳什效率系数 NSE 和相关系数 R^2 两个指标作为评价模型模拟结果。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{1,i} - Q_{2,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{1,i} - \bar{Q}_1)^2} \quad (10)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Q_2 - \bar{Q}_2)(Q_1 - \bar{Q}_1) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_2 - \bar{Q}_2)^2 \sum_{i=1}^n (Q_1 - \bar{Q}_1)^2} \quad (11)$$

式中: Q_1 为实测径流量, m³/s; \bar{Q}_1 为实测径流量的均值, m³/s; Q_2 为径流模拟值, m³/s; \bar{Q}_2 为模型模拟值的

均值, m^3/s 。当模拟值和实测值两组数据满足 $R^2 > 0.6$ 、 $NSE > 0.5$ 时,则认为模型是适用的。

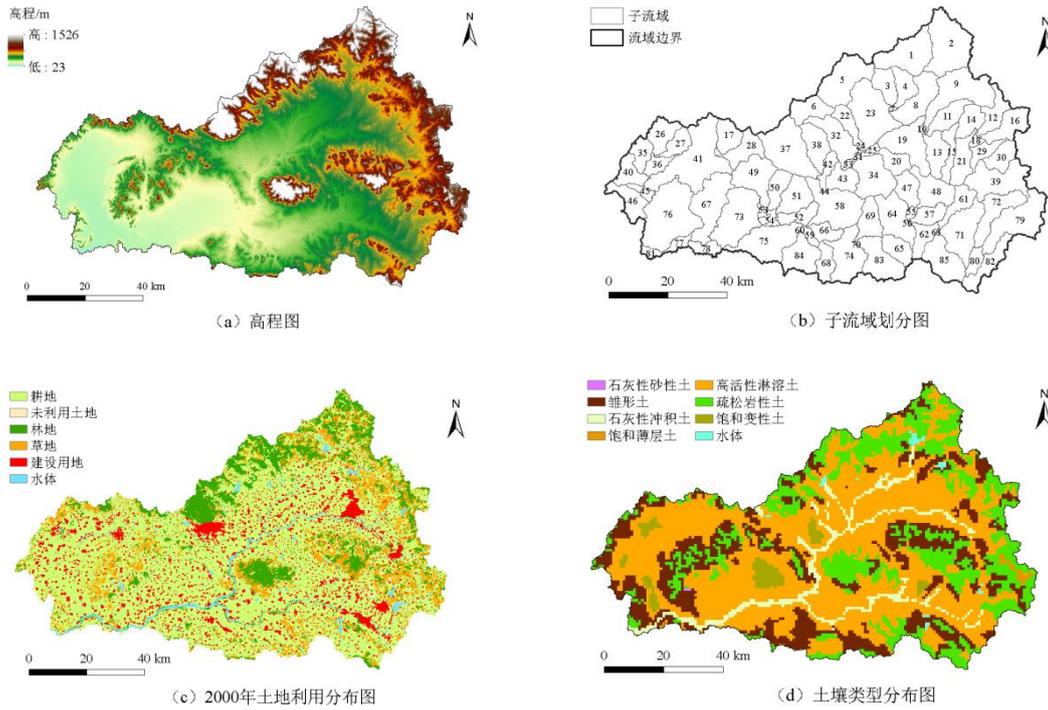


图 2 大汶河流域高程、子流域、土地利用和土壤类型分布

Fig.2 Distribution map of elevation, sub basins, land use, and soil types in the Dawen River Basin

3 结果与分析

3.1 气象要素演变分析

3.1.1 时间变化特征

大汶河流域气象要素年际变化趋势和年内变化特征见图 3 所示。结果表明,大汶河流域多年平均气温 $13.15\text{ }^{\circ}\text{C}$,年气温呈显著上升趋势,M-K 趋势检验 Z 值为 5.85 ,线性趋势率为 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ 年})$ 。从气温年内分配来看,全年高温主要集中在 6—8 月,低温主要发生在 1 月;流域多年平均降水 685.85 mm ,年降水量呈不显著下降趋势($Z=-0.006$),线性趋势率为 $6.88\text{ mm}/(10\text{ 年})$,1964 年降水量最多为

1246.88 mm ,2002 年降水量最少为 412.52 mm ,两者比值为 3.02 。从降水年内分配来看,降雨主要集中在 6—9 月,6—9 月平均降水量占多年平均降水量的 63.95% ;流域多年平均潜在蒸散发 1116.47 mm ,年潜在蒸散发量呈显著下降趋势($Z=-3.06$),线性趋势率为 $13.38\text{ mm}/(10\text{ 年})$,从潜在蒸散发年内来看,峰值主要集中在 4—8 月,冬季潜在蒸散量较少。

综上,三个气象要素相比较而言,年潜在蒸散发变化趋势较为明显。气温、降水和潜在蒸散发年内分配总体均呈先增后减趋势,峰值主要集中在 6—8 月,体现大汶河流域气象要素年内、年际分布不均的特性。

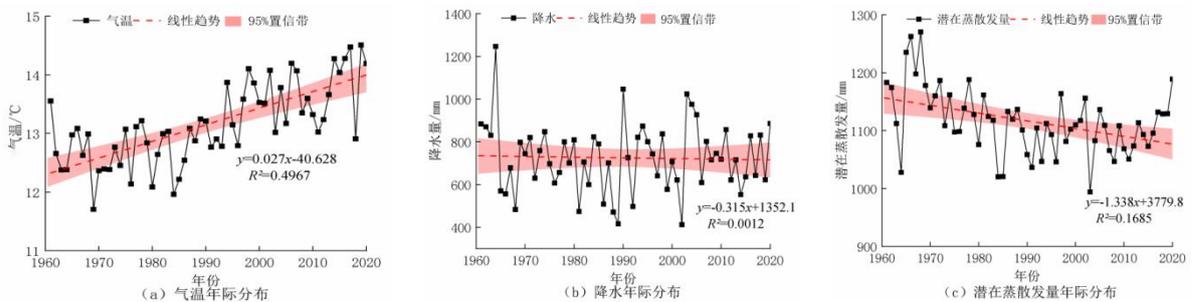


图 3 大汶河流域气象要素年际、年内变化

Fig.3 Inter-annual and intra-annual variations of meteorological elements in the Dawen River Basin

3.1.2 空间变化特征

1961—2020 年大汶河流域气温、降水和潜在蒸散发的空间分布如图 4 所示。1961—2020 年,多

年平均气温整体呈西高东低、南高北低,流域北部低海拔地区气温上升较为明显,变化趋势范围为 $0.30\sim 0.33\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ 年})$ 。年降水量整体呈南多北少、

东多西少,流域东北部降水变化趋势较为明显且为上升趋势,变化趋势范围为10.90~12.54 mm/(10年),西部地区降水呈下降趋势。年潜在蒸散发量整体呈

东多西少,流域西南部潜在蒸散发变化趋势较为明显且为下降趋势,变化趋势范围为-41.84~-20mm/(10年),东北地区变化较小呈上升趋势。

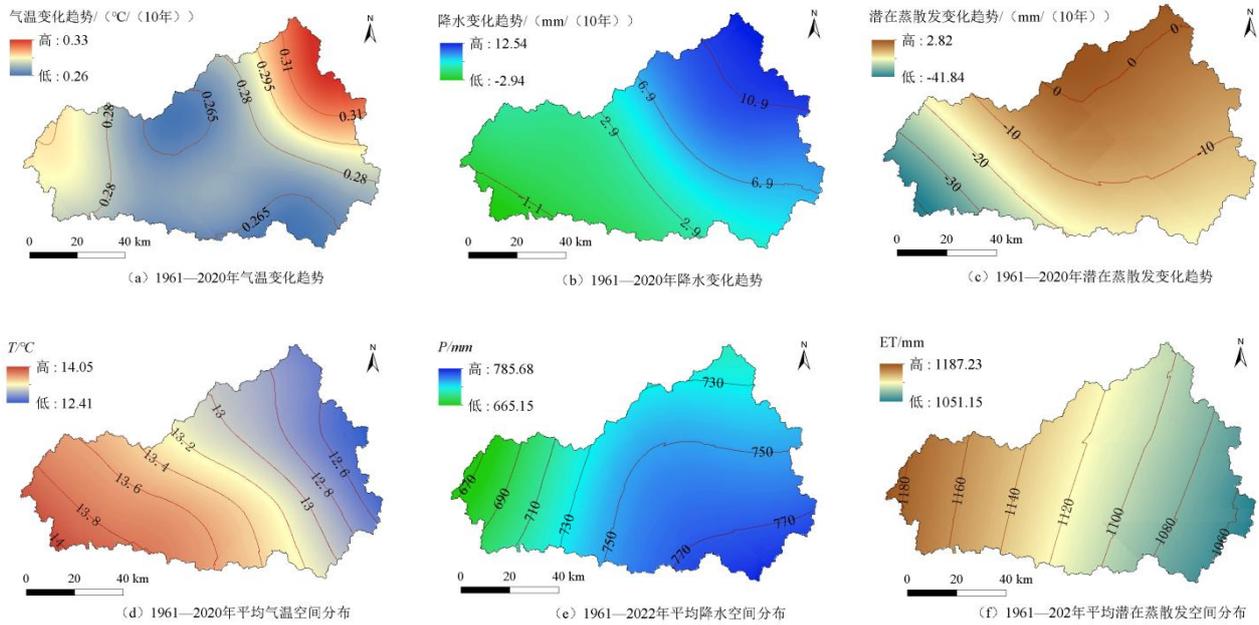


图4 大汶河流域1961—2020年气温、降水和潜在蒸散发空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution characteristics of temperature, precipitation, and potential evapotranspiration in the Dawen River Basin from 1961 to 2020

3.2 实测径流量趋势及突变分析

3.2.1 趋势分析

大汶河流域径流年际、年内变化如图5所示。大汶河流域多年平均径流为114.16 mm,流域径流年际、年内分配不均,年径流整体呈不显著下降趋势($Z=-1.49$),线性趋势率为17.58 mm/(10年),1964

年径流量最大为734.9 mm,据相关报告显示大汶河流域1964年发生罕见特大洪水,戴村坝最高洪峰流量6930 m³/s。流域径流集中在7—9月,7—9月平均径流量为90.04 mm,约占多年平均径流量的79.55%。

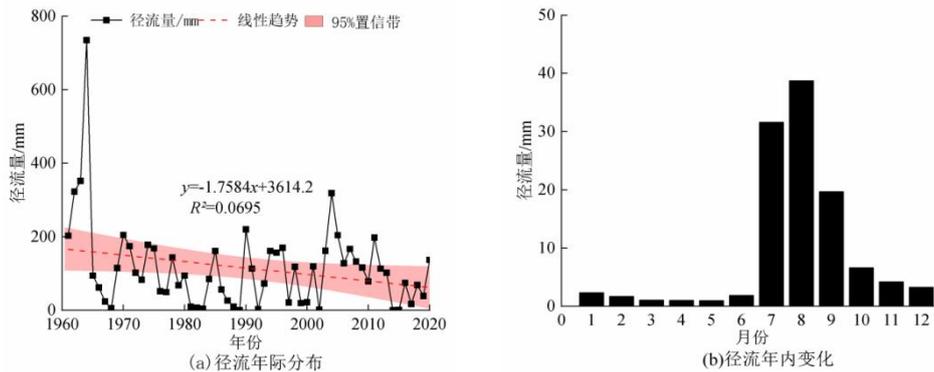


图5 大汶河流域年径流年际、年内变化

Fig.5 Inter annual and intra annual variations of annual runoff in the Dawen River Basin

3.2.2 突变分析

径流突变检验结果见图6。由图6(a)可知,1964年发生显著突变,因1964年大汶河流域发生特大洪水故去除跳跃点影响,在1976年发生突变,1976年后累积距平值呈波浪式下降;由Pettitt突变检验图6(b)得,1976年发生显著性突变($P=0.21 < 0.5$)。山东

省大型、中型水库“三查三定”资料汇编显示,20世纪70年代后大汶河流域流域内有9座大中型水库相继建成^[26-27]、农业灌溉区不断扩大、建设用地面积不断增加。结合各个检验方法的突变结果和流域相关资料,确定戴村坝水文站径流年际序列的突变年份为1976年。以突变点为界,将径流划分为基

准期(1961—1976年)和变化期(1977—2020年),基准期多年平均径流量为179.75 mm,变化期多年平

均径流为90.30 mm 较基准期减少49.76%。

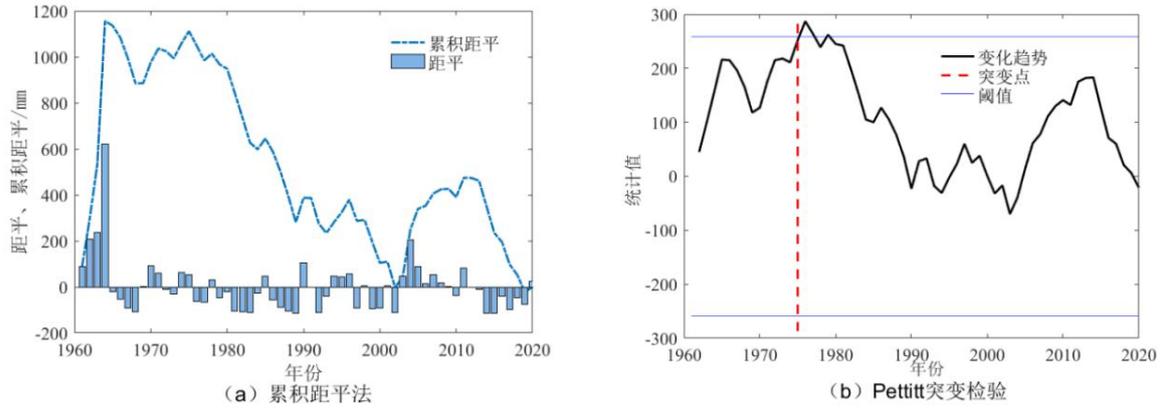


图6 大汶河流域年径流序列突变分析

Fig.6 Analysis of annual runoff sequence mutation in Dawen River Basin

3.3 径流归因分析

征值见表1,弹性系数及干旱指数的年际变化如图7所示。

3.3.1 基于Budyko假设的径流归因分析

1)敏感性分析。大汶河流域水文气象变量特

表1 大汶河流域水文气象变量特征值

Tab.1 Characteristics of hydrological and meteorological variables in the Dawen River Basin

时段	R/mm	P/mm	ET_0/mm	n	R/P	ET_0/P	弹性系数		
							ε_p	ε_{ET_0}	ε_n
1961—2020年	114.16	725.10	1116.47	2.03	0.16	1.54	2.57	-1.57	-1.60
1961—1976年	179.75	751.52	1160.92	1.52	0.24	1.54	2.08	-1.08	-1.34
1977—2020年	90.30	715.49	1099.8	2.32	0.13	1.54	2.86	-1.86	-1.73

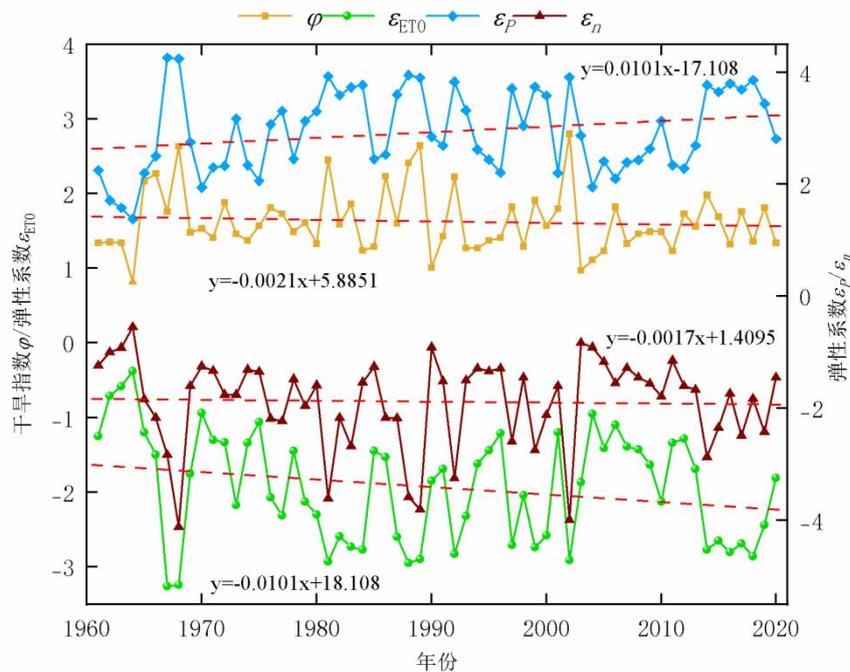


图7 弹性系数及干旱指数年际变化

Fig.7 Inter annual variation of elasticity coefficient and drought index

由表1和图7可知,全流域 n 平均值为2.03,变化期下垫面参数 n 较基准期增大。大汶河流域径流量与降水量呈正相关关系,与潜在蒸散发、下

垫面系数呈负相关,降水弹性系数范围为1.38~4.26、潜在蒸散发系数范围为-3.26~-0.38、下垫面弹性系数为-4.12~-0.55,说明降水量减少

1%径流量将减少 1.38%~4.26%、潜在蒸散发量增加 1%径流量将减少 0.38%~3.26%、流域下垫面参数增加 1%径流量将减少 0.55%~4.12%。从干旱指数和弹性系数的变化趋势来看,1961—2020 年干旱指数 ϕ 呈下降趋势,说明流域气候较暖湿,降水、潜在蒸散发和下垫面弹性系数的绝对值均呈上升趋势,表明径流对降水、潜在蒸散发和下垫面的敏感度上升。对比年降水量、年潜在蒸散发量和下垫面对径流量的影响可知年降水量对径流的影响最大,究其原因主要是大汶河流域降水是径流最直接的来源,流域降水年际变化大且季节分配不均,降水量的变化会对产流产生显著影响,

从而导致降水弹性系数绝对值较大。

2)径流驱动因子贡献率分析。不同驱动因子对径流变化的贡献率见表 2。基于 Budyko 假设所求得径流变化值与实测变化值相对误差在 15%之内,可进一步对径流进行归因分析。从整个时期来看,降水和下垫面引起大汶河流域径流分别减少了 14.59 mm 和 71.76 mm,潜在蒸散发引起大汶河流域径流增加了 9.82 mm,基准期较变化期,径流减少 89.45 mm,其中降水、潜在蒸散发和下垫面对径流变化的贡献率分别为 19.06%、-12.83%和 93.77%,下垫面对径流衰减的贡献最大。

表 2 不同驱动因子对径流变化的贡献率

Tab.2 Contribution rates of different driving factors to runoff changes

基准期	变化期	各因子导致的径流变化/mm				ΔR	相对误差/%	各因子贡献率占比/%		
		ΔR_P	ΔR_{ET_0}	ΔR_n	$\Delta R'$			η_P	η_{ET_0}	η_n
1961—1976 年	1977—2020 年	-14.59	9.82	-71.76	-76.52	-89.45	14.45	19.06	-12.83	93.77

根据 Budyko 假设所求出的径流变化值小于实际径流变化值,究其原因可能为 Budyko 假设中未能考虑全部可能因素,方程中气象要素仅考虑了降水量和潜在蒸散发量,降水的强度、频次和分布同样也会改变径流;人类活动只考虑了下垫面变化,下垫面参数 n 主要与土壤、植被、地形有关不能代表流域内全部人类活动,水利工程、取用水活动等人类活动也会对产汇流造成影响。

3.3.2 基于 SWAT 模型的径流归因分析

1)模型时段划分。本文虽应用累计距平法和 Pettitt 突变检验法识别出 1976 年为大汶河流域径流的突变点,但流域内的人类活动和气候变化是一个持续的动态过程。基于流域实际情况,发现 2000 年前后下垫面和气候均发生了显著变化。大汶河流域 5 期土地利用桑基图如图 8 所示,不同时期水文气象要素见表 3。

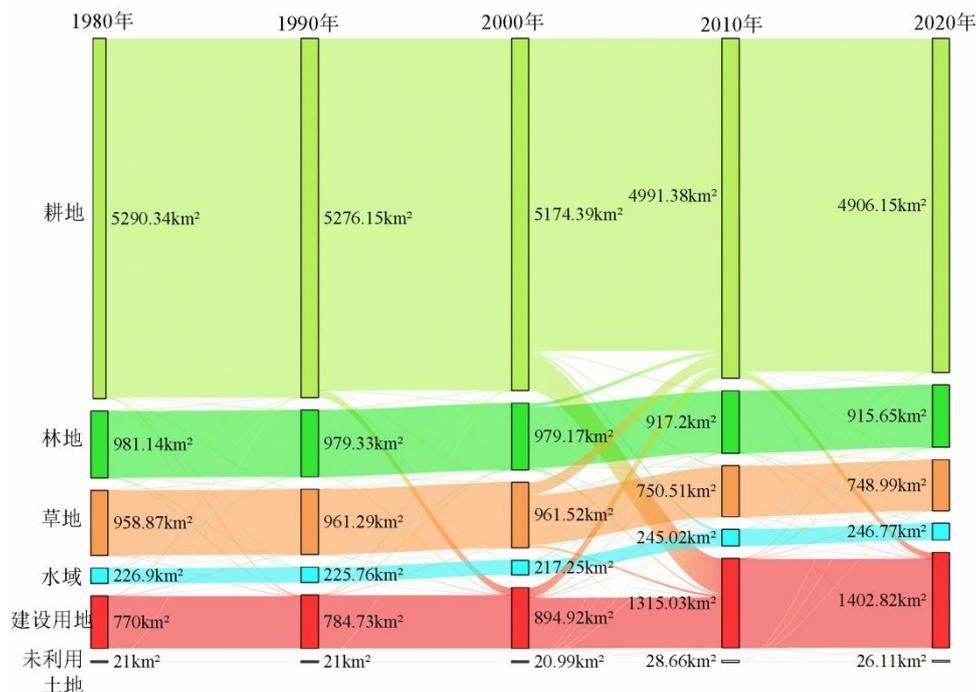


图 8 大汶河流域土地利用桑基图(1980、1990、2000、2010、2020 年)

Fig.8 Sankey diagrams of land use in the Dawen River Basin for five periods: 1980, 1990, 2000, 2010, and 2020

表3 不同时期水文气象要素

Tab.3 Hydro-meteorological elements in different periods

时期	年份	$T/^\circ\text{C}$	P/mm	ET_0/mm	R/mm
基准期	1961—1976年	12.62	751.53	1162.30	179.75
变化期	1977—2000年	13.01	697.18	1101.04	74.79
	2001—2020年	13.74	737.47	1098.32	108.92

从下垫面变化来看(图8),2001—2010年流域内耕地、林地和草地面积大幅度下降,而建设用地面积显著上升,流域内产汇流性质发生较大变化。从气候变化来看(表3),2001—2020年相较于1977—2000年,气候呈现出向“暖湿化”转变的特征,流域气温和降水量均呈上升趋势,潜在蒸散发量变化不明显。因此,将1977—2020年统一视为一个变化期会掩盖2000年后下垫面和气候变化对径流形成的影响,导致SWAT模型率定参数时无法同时很好地模拟前后两个阶段的

径流过程。

为提高模型的模拟精度和可靠性,本文采用多时段划分对模型参数进行率定。以1976年突变点将径流序列划分为基准期(1961—1976年)和变化期(1977—2020年)。其中,考虑到2000年前后下垫面和气候要素发生了显著改变,将变化期进一步细化为变化I期(1977—2000年)、变化II期(2001—2020年)。模型在各个时期均设置了2年的预热期。大汶河流域SWAT模型构建时段划分见表4。

表4 大汶河流域SWAT模型构建时段划分

Tab.4 Time division of SWAT model construction in Dawen River Basin

时期	年份	预热期	率定期	验证期
基准期	1961—1976年	1961—1962年	1963—1970年	1971—1976年
变化I期	1977—2000年	1977—1978年	1979—1990年	1991—2000年
变化II期	2001—2020年	2001—2000年	2003—2012年	2013—2020年

2) 模型参数的率定与验证。参数率定部分,采用SWAT-CUP中SUFI-2算法对模型参数进行率定,并按照敏感性结果调整参数范围。综合考虑

地形、地貌和相关研究,确定了16个敏感性较强和应用较多的参数,参数率定结果见表5。

表5 各个时期模型参数率定结果

Tab.5 Calibration results of model parameters in different periods

参数	参数名称	min	max	基准期	变化I期	变化II期
				(1961—1976年)	(1977—2000年)	(2001—2020年)
r_SOL_AWC().sol	土壤层有效水容重/(mm/mm)	-0.5	0.5	0.17	0.34	0.10
r_SOL_K().sol	土壤饱和水力传导度/(mm/h)	-0.8	0.8	-0.12	-0.80	-0.44
v_REVAPMN.gw	浅层含水层再蒸发产生基流的阈值深度/mm	0	500	408.55	42.89	415.22
v_GW_REVAP.gw	浅层地下水再蒸发系数	0.02	0.2	0.19	0.18	0.20
v_CH_N2.rte	河道曼宁系数	-0.01	0.3	0.02	0.06	0.13
v_CH_K2.rte	主河道河床有效水力传导度/(mm/h)	-0.01	500	98.59	71.07	205.63
r_SLSUBBSN.hru	平均坡长/m	-0.5	0.5	0.40	-0.24	0.42
v_EPCO.bsn	植物吸水补偿系数	0	1	0.93	0.11	0.79
v_ESCO.bsn	土壤蒸发补偿系数	0	1	0.83	0.40	0.35
v_OV_N.hru	坡面漫流的曼宁系数	0.01	30	0.61	19.63	7.44
v_CANMX.hru	最大冠层截留量/mm	0	100	30.81	10.59	94.86
r_CN2.mgt	SCS径流曲线系数	-0.2	0.2	0.03	-0.04	-0.11
v_ALPHA_BF.gw	基流a因子/d	0	1	0.65	0.58	0.62
v_GW_DELAY.gw	地下水延迟时间/d	0	500	3.30	340.82	493.24
v_GWQMN.gw	潜层含水层产生基流的阈值深度/mm	0	5000	842.87	4298.14	4988.06
r_SOL_BD().sol	土壤湿容重/(g/cm ³)	-0.6	0.6	-0.49	0.14	-0.14

由表5可得不同时期模型率定的参数值不同,究其原因因为人类活动干扰使各阶段参数发生阶段性变化。土地利用变化、水利工程修建运行等均会影响流域产流和汇流过程,从而使产流参数、汇流参数和蒸散发参数等发生变化。流域内水库通过蓄丰补枯调节水流过程,导致不同时期水库的蓄水量、下泄流量及蒸发损失量大幅波动,而跨区域引水直接截留了部分来水量,使实际参与产汇流的水量减少且时空分布失衡,流域内产汇流机制发生变化。这些人类活动的干预使得模型需动态调整参数(如土壤湿度、河道糙率、地下水延迟

时间等)以适配变化的边界条件。此外,水利工程运行阶段的季节性调度也进一步加剧了不同时期水文响应的差异性。因此,各个时期参数的变化是流域受人类活动干扰后模型所作出的调整。

月尺度径流量观测值和模拟值对比见图9,各时期模型评价指标结果见表6。由此可知,本文所建立的大汶河流域SWAT水文模型具有较好的适用性,模型模拟的径流序列与实测径流序列在时间上涨幅波动较为一致,各个时期模型评价指标均满足 $NSE>0.5$ 、 $R^2>0.6$ 。

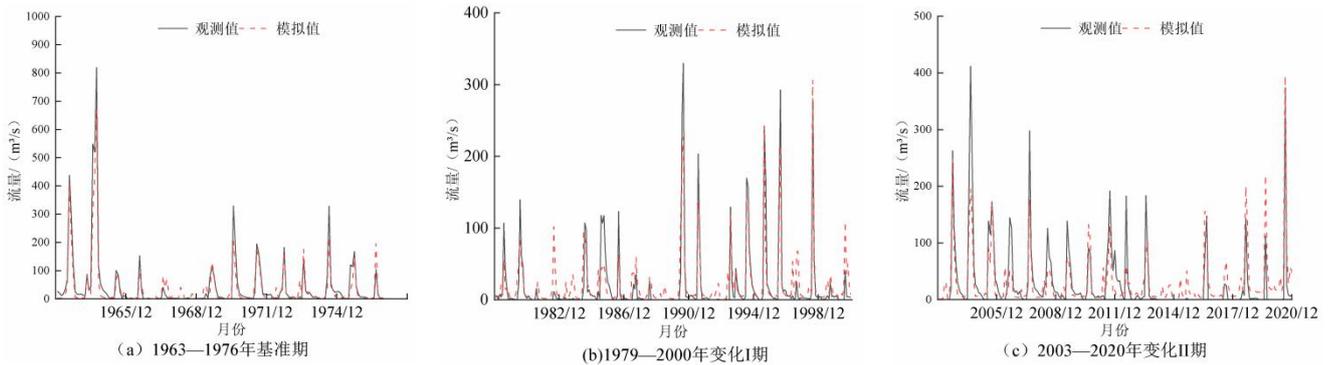


图9 大汶河流域月实测径流与模拟径流拟合结果

Fig.9 The fitting results of monthly measured runoff and simulated runoff in the Dawen River Basin

表6 各时期SWAT模型指标评价

Tab.6 Evaluation of SWAT model indicators in different periods

时期	NSE	R^2	
基准期	1963—1970年,率定期	0.94	0.97
	1971—1976年,验证期	0.80	0.91
	1963—1976年,完整期	0.92	0.92
变化I期	1979—1990年,率定期	0.72	0.86
	1991—2000年,验证期	0.86	0.93
	1979—2000年,完整期	0.80	0.81
变化II期	2003—2012年,率定期	0.71	0.89
	2012—2020年,验证期	0.66	0.90
	2003—2020年,完整期	0.71	0.84

3)径流驱动因素的量化归因研究。水文模型法定量分析气候变化和人类活动贡献率成果见表7。从各个时期来看,1977—2000年变化I期气候变化是径流主要驱动因子,气候变化贡献率为56.74%;2001—2020年变化II期人类活动贡献率为140.30%,表明此时期气候条件适宜促进径流增加但因人类活动强度大径流整体还呈衰减趋势。从整个变化期来看,变化期较基准期径流减少89.44mm,人类活动和气候变化对径流的贡献率分别为81.7%和18.3%,径流变化的主要原因为人类活动。

表7 径流变化贡献率计算

Tab.7 Calculation of contribution rate of runoff variation

时期	多年平均径流/mm		多年平均流量变化			贡献率/%	
	实测值	模拟值	ΔR	ΔR_C	ΔR_H	η_C	η_H
基准期(1961—1976年)	179.74	176.70	—	—	—	—	—
变化I期(1977—2000年)	74.79	134.34	-104.95	-45.40	-59.55	56.74%	43.26%
变化II期(2001—2020年)	108.92	208.28	-70.82	28.54	-99.36	-40.30%	140.30%
变化期(1961—2020年)	90.30	163.37	-89.44	-16.37	-73.07	18.30%	81.70%

4 讨论与结论

4.1 讨论

结合Budyko假设和SWAT水文模型结果综合

来看,基于Budyko假设的径流归因分析表明气候变化和人类活动对径流的贡献率为6.33%和93.77%,基于SWAT水文模型法则表明气候变化和人类活动对径流贡献率为18.30%和81.70%,两种

方法均体现人类活动是大汶河流域径流减少的主导因子。这与杨大文等^[25]、杨旭洋等^[27]的研究结果一致。与之不同的是本研究所采用的径流数据时间长,且在水文模型参数率定时为了进一步调高模型参数的准确性而采用多时段 SWAT 模型的构建,相比较单一方法的研究,“双方法互验”显著降低了归因结果的不确定性。

采用单一方法难以区分输入误差、参数误差和模型结构缺陷对结果的影响。Budyko 假设以能量平衡为基础,聚焦宏观气候控制下的蒸发潜力极限(干旱指数 ET_0/P),忽略下垫面异质性;而 SWAT 模型基于物理过程分布式模拟,考虑地形、土壤、植被等空间参数特征。二者分别代表“气候驱动”与“流域内部响应”两方面,形成交叉校验体系。当 Budyko 假设预测某区域潜在蒸散量较高时,若 SWAT 模型实际计算出径流量异常偏低,则提示可能存在未被考虑的人为干扰因素(如灌溉取水等)。这种矛盾信号可触发对数据或假设条件的重新审视。两种方法得出的归因结论可以相互比较和验证,若结果一致,则极大地增强了结论的可靠性;若不一致,则可深入排查数据问题、模型设置问题或对流域过程的理解偏差,从而推动更深入的分析,避免单一方法可能带来的误判。

本文中 Budyko 弹性系数法和 SWAT 水文模型法在大汶河流域径流归因分析中得出的气候变化和人类活动贡献率存在微小差异,主要由两种方法在模型结构与原理、输入数据与参数化以及对人类活动影响的考虑方式等多个方面的不同所导致的。Budyko 方法的简化性使其在宏观把握气候—径流关系方面具有一定优势,但忽略了流域内部的复杂性和人类活动的详细信息。而 SWAT 模型虽然能够更细致地模拟水文过程和人类活动影响,但也面临着数据需求大、参数化复杂以及人类活动与气候变化相互作用难以准确刻画等问题。在实际应用中,需要综合两种方法的优势,同时充分考虑其局限性,结合更多的实地观测数据和研究成果,对大汶河流域的径流变化进行更准确、全面的归因分析。本文仅从气候变化和人类活动两大类考虑,流域内各种人类活动繁杂难以量化,因此接下来应结合流域各种人类活动进一步深入分析径流特征变化的驱动机制。

4.2 结论

本文利用大汶河流域 1961—2020 年的水文气象资料,分析流域水文气象要素的演变特征,基于 Budyko 假设和 SWAT 水文模型法综合分析气候变化和人类活动对水文过程的影响,主要结论如下:

1)1961—2020 年大汶河流域气温呈显著上升趋势,线性倾向率为 $0.27\text{ }^\circ\text{C}/(10\text{ 年})$,降水量呈不显著下降趋势,线性倾向率为 $3.15\text{ mm}/(10\text{ 年})$,潜在蒸散发量呈显著下降趋势,线性倾向率为 $13.38\text{ mm}/(10\text{ 年})$ 。从空间来看,气温整体呈西高东低、南高北低,北部低海拔地区变化趋势明显;降水整体呈南多北少、东多西少,东北部变化趋势明显;潜在蒸散发整体呈东多西少,西南部变化趋势明显。

2)大汶河流域径流年际、年内分配不均,年平均径流以 $17.58\text{ mm}/(10\text{ 年})$ 的速率呈不显著下降趋势,并在 1976 年发生突变,变化期较基准期径流量减少 49.76%。

3)基于 Budyko 假设结果表明,下垫面变化是大汶河流域径流减少的主要原因,气候变化对径流贡献率为 6.33%,其中降水、潜在蒸散发对径流变化的贡献率分别为 19.06%、-12.83%,下垫面对径流贡献率为 93.77%;基于 SWAT 水文模型法表明气候变化和人类活动对径流的贡献率分别为 18.3%和 81.7%。两种方法交互验证均表明人类活动是大汶河流域径流衰减的主要原因。

参 考 文 献

- [1] 张建云,王国庆,金君良,等.1956—2018 年中国江河径流演变及其变化特征[J].水科学进展,2020,31(2): 153-161.[ZHANG J Y,WANG G Q,JIN J L,et al. Evolution and characteristics of river runoff in China from 1956 to 2018[J].Advances in Water Science, 2020,31(2):153-161.]
- [2] 王乐扬,张建云,宁忠瑞,等.环境变化对澜沧江出境水文过程变异的影响[J].水科学进展,2024,35(2): 313-324.[WANG L Y,ZHANG J Y,NING Z R,et al. The impact of environmental changes on the variability of hydrological processes exiting the LanCang river[J].Advances in Water Science,2024, 35(2):313-324.]
- [3] GUAN X,ZHANG J Y,YANG Q,et al.Quantifying the effects of climate and watershed structure changes on runoff variations in the Tao River basin by using three different methods under the budyko framework[J].Theoretical and Applied Climatology, 2023,151:953-966.
- [4] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21): 112-119.[ZHAO Y,HU C H,ZHANG X M,et al. Analysis of water and sediment situation and its causes in the Yellow River basin in the past 70

- years[J].Journal of Agricultural Engineering,2018, 34(21):112-119.]
- [5] 府仁寿,虞志英,金镠,等.长江水沙变化发展趋势[J].水利学报,2003(11):21-29.[FU R S,YU Z Y,JIN L,et al.Development trend of water and sediment changes in the Yangtze River[J].Journal of Water Resources, 2003(11): 21-29.]
- [6] PIRNIA A,GOLSHAN M,DARABI H,et al.Using the Mann–Kendall test and double mass curve method to explore stream flow changes in response to climate and human activities[J].Journal of Water and Climate Change,2019,10(4):725-742.
- [7] 张丽梅,赵广举,穆兴民,等.基于 Budyko 假设的渭河径流变化归因识别[J].生态学报,2018,38(21): 7607-7617.[ZHANG L M,ZHAO G J,MU X M,et al. Attribution identification of Weihe River runoff changes based on Budyko hypothesis[J].Chinese Journal of Ecology,2018,38(21):7607-7617.]
- [8] 严伟卿,刘冀,赵心睿,等.基于 Budyko 假设的金溪流域径流变化归因分析[J].水土保持研究,2023,30(3): 121-126.[YAN W Q,LIU J,ZHAO X R,et al. Attribution analysis of runoff changes in Jinxi River basin based on budyko hypothesis[J].Soil and Water Conservation Research,2023,30(3):121-126.]
- [9] GUAN X J,HUI Y S,HE J W,et al.Attribution analysis of climate and anthropic factors on runoff and vegetation changes in the source area of the Yangtze River from 1982 to 2016[J].Land,2021,10(6):612-612.
- [10] 王国庆,张建云,贺瑞敏.环境变化对黄河中游汾河径流情势的影响研究[J].水科学进展,2006,17(6): 853-858.[WANG G Q,ZHANG J Y,HE R M. Research on the impact of environmental changes on the runoff pattern of Fen River in the middle reaches of the Yellow River[J].Advances in Water Science, 2006,17(6):853-858.]
- [11] 刘酌希,陈鑫,管晓祥,等.变化环境下洮河流域径流变化归因[J].水土保持研究,2020,27(5):87-92.[LIU Z X,CHEN X,GUAN X,et al.Attribution of runoff changes in the Tao River basin under changing environments[J].Soil and Water Conservation Research,2020,27(5):87-92.]
- [12] BAO Z X,ZHANG J Y,WANG G Q,et al.Attribution for decreasing streamflow of the Haihe River basin,Northern China:climate variability or human activities?[J].Journal of Hydrology,2012,460/461: 117-129.
- [13] 傅抱璞.论陆面蒸发的计算[J].大气科学,1981,5(1): 23.[FU B P.On the calculation of land surface evaporation[J].Atmospheric Science,1981,5(1):23.]
- [14] CHOUDHURY B.Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology,1999,6(1):99-110.
- [15] YANG H B,YANG D W,LEI Z D,et al.New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J].Water Resources Research, 2008(3):44.
- [16] 吴佳,高学杰.一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比[J].地球物理学报,2013,56(4): 1102-1111.[WU J,GAO X J.A set of gridded daily observation data for the Chinese region and comparison with other data[J].Journal of Geophysics, 2013,56(4):1102-1111.]
- [17] 李志萍,宋钢,李云良,等.贾鲁河流域长期径流变化及定量归因分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2025,46(3):69-79,129.[LI Z P,SONG G,LI Y L, et al.Long term runoff changes and quantitative attribution analysis in the Jialu River Basin[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2025,46(3): 69-79,129.]
- [18] 黄建雄,冶运涛,曹引,等.黄河北干流水沙时空变化特征及协调性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(3):25-33.[HUANG J X,YE Y T,CAO Y, et al.Spatiotemporal variation characteristics and coordination analysis of flowing sediment in the northern mainstream of the Yellow River[J].Journal of Hohai University (Natural Science Edition),2024, 52(3):25-33.]
- [19] 严昌盛,王鹏,靳莉君,等.1961—2020 年黄河源区降水时空变化特征研究[J].水文,2024,44(5):84-91. [YAN C S,WANG P,JIN L J,et al.Study on the spatiotemporal variation characteristics of precipitation in the Yellow River source area from 1961 to 2020[J].Hydrology,2024,44(5):84-91.]
- [20] PETTITT A N.A Non-Parametric approach to the change-point problem[J].Journal of the Royal Statistical Society,1979,28(2):126-135.
- [21] 马明卫,王召航,王文川,等.基于 Budyko 假设的黄河源区径流演变与量化归因分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2023,44(3):53-60.[MA M

- W,WANG Z H, WANG W C,et al.Analysis of runoff evolution and quantitative attribution in the Yellow River source region based on budyko hypothesis[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition),2023,44(3):53-60.]
- [22] 王卫光,陆文君,邢万秋,等.黄河流域 Budyko 方程参数 n 演变规律及其归因研究 [J]. 水资源保护,2018,34(2):7-13. [WANG W G,LU W J,XING W Q,et al.Research on the evolution law and attribution of budyko equation parameter in the Yellow River Basin[J].Water Resources Protection,2018,34(2):7-13.]
- [23] 叶婷,石朋,钟华,等.基于 Budyko 假设和微分方程的淮上中游径流变化归因分析[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):25-32.[YE T,SHI P,ZHONG H,et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle reaches of Huaihe River based on Budyko's hypothesis and differential equation[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition),2022,50(5):25-32.]
- [24] 杨铭珂,贺中华,任荣仪,等.黔中地区潜在蒸散发的时空变化及对土地利用变化的响应[J].水资源与水工程学报,2021,32(3):106-117.[YANG M K,HE Z H,REN R Y,et al.The spatiotemporal changes of potential evapotranspiration in the central Guizhou region and its response to land use changes[J].Journal of Water Resources and Water Engineering,2021,32(3):106-117.]
- [25] 杨大文,张树磊,徐翔宇.基于水热耦合平衡方程的黄河流域径流变化归因分析[J].中国科学:技术科学,2015,45(10):1024-1034.[YANG D W,ZHANG S L,XU X Y.Attribution analysis of runoff changes in the Yellow River Basin based on the water heat coupling equilibrium equation[J].Chinese Science: Technical Science,2015,45(10):1024-1034.]
- [26] 刘罕奇,王婷婷,冯瑶,等.气候变化和水库运行对长江流域水文情势的影响预估 [J]. 地理学报,2025,80(1):41-60.[LIU H Q,WANG T T,FENG Y,et al.Estimation of the Impact of Climate Change and Reservoir Operation on the Hydrological Situation in the Yangtze River Basin[J].Journal of Geography,2025,80(1):41-60.]
- [27] 杨旭洋.变化环境下流域径流演变特征及归因分析研究 [D]. 西安:西安理工大学,2023.[YANG X Y. Research on the evolution characteristics and attribution analysis of watershed runoff under changing environment[D].Xi'an:Xi'an University of Technology,2023.]

Runoff Evolution and Attribution Analysis of the Dawen River Basin Based on Budyko Hypothesis and SWAT Model

ZHANG Wen¹, WANG Leyang^{1,2,3}, CAO Hong⁴, WANG Weiguang^{1,2,3}, SHANG Yanli⁵, GENG Fuping⁶

(1.College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3.Yangtze River Protection and Green Development Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4.Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 5.Hydrological Center of Tai'an City, Shandong Province, Tai'an 271001, China; 6.Shandong Provincial Hydrological and Water Resources Survey Bureau, Jinan 250013, China)

Abstract: **【Objective】** Quantitative analysis of the mechanisms by which climate change and human activities affect runoff attenuation in the Dawen River Basin aims to provide theoretical support for adaptive management of water resources in the basin. **【Methods】** Based on the CN05.1 meteorological dataset and measured runoff data, linear trend estimation, Mann Kendall test, cumulative anomaly method, and Pettitt method are used to systematically diagnose the trends and abrupt changes in hydro meteorological elements; Construct a dual pathway attribution analysis framework using Budyko's water balance equation and SWAT model to conduct attribution analysis on the runoff evolution process of the watershed from 1961 to 2020. **【Results】**(1)The results indicated that annual precipitation, potential evapotranspiration,

and runoff in the basin all exhibited declining trends over the study period, while temperature showed a rising trend. Additionally, the annual runoff sequence experienced a significant mutation in 1976, with post-mutation runoff decreasing by 49.76% relative to the baseline period. (2)The results based on the Budyko hypothesis indicate that precipitation, potential evapotranspiration, and underlying surface contribute 19.06%, -12.83%, and 93.33% to the reduction of runoff, respectively. (3)The analytical outcomes derived from the SWAT hydrological model reveal that climate change and anthropogenic activities account for 18.30% and 81.7% of the variations in runoff, respectively. **【 Conclusion 】** Both methodologies consistently indicate that human interventions constitute the primary driver behind the declining streamflow in the Dawen River Basin. These research findings serve as a robust scientific foundation for informing future decision-making processes regarding sustainable water resource management and ecological conservation strategies within the Dawen River Basin.

Keywords: runoff attribution analysis; Budyko theory; SWAT hydrological mode; Dawen River Basin