

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0085

白鹏, 刘小莽. 汾河流域径流减少因素的定量解析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(5): 842-850. BAI P, LIU X M. Quantitative analysis of runoff reduction factors in the Fenhe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(5): 842-850. (in Chinese)

汾河流域径流减少因素的定量解析

白鹏, 刘小莽

(中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 分析汾河流域 1981—2015 年气候、植被和人类取用水的演变特征。结果表明, 流域年降水和净辐射分别呈不显著($p>0.05$)增加和减少趋势, 叶面积指数显著($p<0.05$)增加, 人为取用水量波动增加, 实测年径流显著($p<0.05$)减少。基于分布式水文模型和因素去趋势方法定量解析降水、净辐射、温度、叶面积指数以及取用水对汾河年径流减少的贡献。结果表明, 取用水的增加是导致汾河径流减少的主要原因, 其次为温度、叶面积指数和净辐射的变化。在上述 4 个因素无趋势情景下, 实测年平均径流将分别增加 27.4%、14.4%、13.7% 和 2.1%。降水增加缓解了年径流的减少。在年降水无趋势的情景下, 实测年平均径流将减少 5.3%。上述研究结果可为汾河流域的水资源管理和规划提供参考。

关键词: 汾河; 水资源; 气候变化; 植被变绿; 径流; 归因

中图分类号: TV214 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



河川径流是全球许多地区人类用水的主要来源。河川径流的变化与人类的生存和发展息息相关。河川径流变化是气候和下垫面因素共同作用的结果, 是对流域内降水、辐射、土壤、地形和植被等诸多要素变化的响应^[1]。近几十年来, 全球气候和下垫面特征发生了显著的变化, 对陆表水资源的时空分布格局产生了深远影响。气候变化最显著的特征之一是气温的持续升高。根据世界气象组织报告, 2011—2020 年是有气象记录以来最暖的 10 年, 全球最暖的 7 个年份都出现在 2015 年以后^[2]。伴随着气温的升高, 气候系统也变得更不稳定, 表现特征之一是全球降水的时空变异性增强^[3]。根据“克劳修斯-克拉贝龙(Clausius-Clapeyron)”方程, 大气的水汽容纳能力随气温升高呈 7%/°C 的增长趋势^[4]。升温会增加大气中的水汽含量, 导致极端降水发生的概率增加。除气候变化外, 下垫面的变化也显著改变了陆表水资源的可利用量^[5]。植被作为

下垫面特征中最活跃、最易变的因素之一, 对水循环过程有着重要的影响。植被对水循环过程的影响可分为直接和间接两个方面。植被直接影响截留、入渗、蒸散发、土壤水及地下水等过程^[6]。植被变化引起地表反照率的变化, 改变地表辐射能量收支, 影响大气环流过程, 进而导致降水-径流过程的变化^[7]。科学认识环境要素变化对水文过程的影响机理, 定量评估河川径流对环境变化的响应规律, 对于区域水资源的管理和规划至关重要。

汾河是黄河第二大支流, 也是山西省的“母亲河”, 滋养了全省 1/4 的土地和 41% 的人口。近几十年来, 汾河流域的气候和下垫面要素都发生了显著的变化。流域年降水变化不显著, 但气温显著升高, 植被覆盖率显著增加^[8-9]。这些自然因素叠加人类用水的增长, 导致汾河流域的实测年径流显著减少^[10]。汾河干流入黄控制站河津站 1941—1990 年实测多年平均径流量为 13.70 亿 m³/a, 1991—2000 年下

收稿日期: 2022-04-03 修回日期: 2022-08-20 网络出版时间: 2022-09-28

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220927.0939.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979263;41922050)

作者简介: 白鹏(1983—), 男, 河北石家庄人, 副研究员, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: baip@igsnr.ac.cn

通信作者: 刘小莽(1983—), 男, 湖北黄冈人, 研究员, 博士, 主要从事水文水资源研究。E-mail: liuxm@igsnr.ac.cn

降到5.08亿 m^3/a , 2001—2010年仅为4.53亿 m^3/a ^[11]。汾河径流的锐减引发了下游断流、地下水超采等一系列不利后果,加剧了流域内部以及下游沿黄各省市水资源的供需矛盾^[12]。然而,以往研究缺乏对导致径流减少关键因素的定量解析,且多数研究针对实测径流演变原因开展分析^[10-12],不能解释流域天然径流量变化的原因。基于此,本研究以汾河河津站以上控制流域为研究区,基于分布式水文模型和人类用水数据深入解析汾河实测径流锐减的成因,定量分析降水、气温、净辐射和植被要素对天然径流变化的贡献,以期对流域水资源的管理和保护提供决策支持。

1 方法和数据

1.1 研究区

汾河流域地处山西省的中部和西南部,位于东经 $110^{\circ}30' \sim 113^{\circ}32'$,北纬 $35^{\circ}20' \sim 39^{\circ}00'$,东西宽188 km,南北长412.5 km,呈带状分布,面积39471 km^2 ,占全省面积的25.3%。汾河流域的地势特点是北高南低,西南为吕梁山,东面为太行山,干流由北而南纵贯山西中部,支流水系发育在两大山系之间。汾河流向自北向南,纵贯大半个山西,汇聚源自吕梁、太行两大山系的支流,穿越太原、临汾两大盆地,至运城市新绛县境急转西行,于禹门口下游万荣县荣河镇庙前村附近汇入黄河,河口高程368.0 m,河道总高差1308 m,平均纵坡1.12%,干流直线长度412.7 km。

1.2 方法

1.2.1 水文过程模拟

基于HIMS (hydro-informatic modeling system)模型对汾河流域的降水-径流过程进行模拟。HIMS模型是一个基于网格化的分布式水文模型,它耦合了水循环过程中的截留、蒸散发、下渗、土壤水动态、地下水补给及出流等关键环节,能够从微观和宏观尺度对流域水循环过程进行综合模拟^[13-14]。HIMS模型的产流模块采用一个基于降水和土壤湿度的经验超渗公式,该公式是基于西北干旱、半干旱地区大量野外人工降雨试验和小流域降水-径流资料分析基础上建立的,能够很好地反映干旱、半干旱地区超渗产流特性^[11]。HIMS模型引入遥感蒸散发模块PML (Penman-Monteith-Leuning)来考虑植被变化对蒸散发的影响。PML利用遥感的叶面积指数来分配能量在植被冠层和土壤的比例,进而

计算植被蒸腾和土壤蒸发^[15]。同时,HIMS模型模拟的根系层土壤湿度为PML蒸散发模块提供水分约束,有效地耦合了能量平衡和水量平衡原理来模拟蒸散发过程。径流在模型中被划分为两种成分,即:地表径流和地下径流。基于超渗公式计算的下渗水量补充非饱和含水层,进入非饱和含水层的土壤一部分消耗于蒸散发,一部分补充饱和含水层形成地下径流。两种径流成分进入河道后,采用一个三角汇流函数进行汇流计算^[16],得到流域出口径流量。详细的模型原理及公式见文献[13-15]。

HIMS模型水文过程描述明确、结构简单且对输入数据的要求较低。模型在国内外众多流域进行了广泛验证,取得了良好的效果^[17]。模型在日尺度上运行,包含8个参数。模型的气象输入数据包括日降水、温度、风速、湿度和净辐射,植被输入数据为叶面积指数(leaf area index, LAI)和反照率。净辐射数据通过FAO-56 Penman-Monteith^[18]方法求得,该方法的输入数据为日照时数、遥感反照率和气温数据。

1.2.2 模型参数优化与精度评价

基于1981—2000年河津站的径流逐月还原数据对模型参数进行自动率定,模型校正期为1981—1994年,验证期为1995—2000年,参数优化算法为遗传算法。遗传算法是一种基于自然基因和自然选择机制的全局寻优算法,该算法模拟自然界“择优汰劣”的法则,从大量的参数集中逐步筛选最优值。参数校正的目标函数为纳西效率系数(E_{NS})。评估指标为 E_{NS} 和相对偏差(B_r),其计算公式为

$$E_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (1)$$

$$B_r = \left(\frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim,i}}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} - 1 \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $Q_{obs,i}$ 是第*i*个月的观测值; $Q_{sim,i}$ 是第*i*个月的模拟值; \bar{Q}_{obs} 是观测序列的平均值; n 是月数。

1.3 数据来源与处理

1.3.1 数据来源

气象数据来源于国家气象局气象信息中心(<http://data.cma.cn/>),包括48个降水站和15个国家

标准气象站 1981—2015 年逐日的降水、气温、风速、湿度以及日照时数数据。基于专业的气象插值软件 Anusplin^[19] 将站点的气象数据插值成 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 的栅格数据。该软件能考虑地形变化对气象要素的影响,且不需要人为设置参数(如温度递减率),对于一些受地形影响较大的气象变量(如气温、风速等)有很好的插值效果。汾河入黄控制水文站河津站 1981—2015 年的实测径流数据来源于水利部发布的水文年鉴,河津站 1981—2000 年的逐月取用水量数据来源于全国第二次水利普查数据。

遥感的 LAI 和反照率数据均来源于 GLASS (Global Land Surface Satellite) 产品 (<http://www.glass.umd.edu/index.html>), 两类产品在空间上完整,没有缺失值,时间分辨率为 8 d,空间分辨率均为 0.05° ^[20-21]。1981 年的反照率数据仅包含 6 月以后的数据,6 月之前的数据直接采用 1982 年对应日期的结果。本文基于线性插值将 8 d 的植被数据插值为日数据以满足模型驱动的需求。高程数据来源于美国地调局,空间分辨率为 90 m 分辨率 (<http://srtm.csi.cgiar.org/>); 土地利用数据来源于国家地球系统科学数据中心 (www.geodata.cn)。用于评估 HIMS 模型蒸发模拟效果的数据来源于 GLEAM (Global Land Evaporation Amsterdam Model)^[22] 蒸散发产品 ([https://](https://www.gleam.eu)

www.gleam.eu), 该产品在全球众多地区开展了广泛的验证,验证结果证明了其可靠性^[23]。该产品时间分辨率为天,空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。

1.3.2 数据去趋势处理

本文基于去趋势 (detrending) 方法量化降水、净辐射、温度和植被因素 (LAI) 以及取用水量变化对汾河径流的贡献,收集了 1981—2000 年的取用水量和 1981—2015 年实测径流数据,2001—2015 年取用水量可通过 HIMS 模型模拟的“天然年径流量”和实测年径流差值得到。基于去趋势方法生成无趋势情景下的年取用水量序列,其与实际用水量在多年平均上的差值可以用来量化人类取用水量变化对实测径流的影响。在因素去趋势试验中,将原始输入数据驱动水文模型作为基准情景,再分别对其他 4 个变量 (降水、净辐射、温度和 LAI) 逐一进行去趋势,并作为输入驱动 HIMS 模型。基准情景和去趋势情景下径流模拟值的差异可归因为这一因素变化的影响。需要指出的是,某一去趋势的因素 (如气温) 驱动水文模型时,其他模型输入 (如降水、净辐射和 LAI) 均为原始数据。

去趋势方法是指在年尺度上去除变量的趋势项 (年序列趋势为零),保留变量的季节性波动。以降水数据 (图 1) 为例,具体的去趋势步骤^[24] 如下:

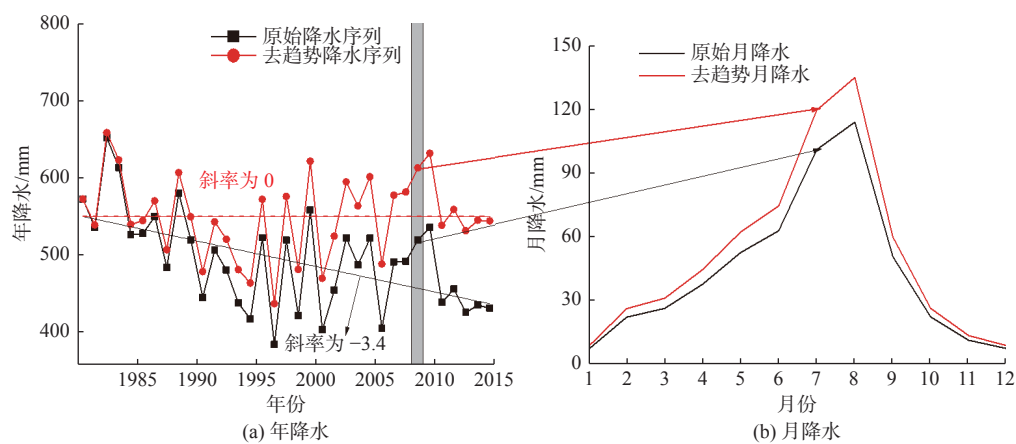


图 1 年降水、月降水序列去趋势

Fig. 1 Schematic diagram of detrending annual precipitation time series.

计算研究区每个栅格降水指数的年值序列 P_{ori,y_i} 以及趋势值 t_p 。

将每个栅格的降水年序列进行去趋势,得到去趋势的降水序列 P_{det,y_i} ,再计算 P_{det,y_i} 和 P_{ori,y_i} 的比值得到逐年的降水调整系数 C_{y_i} ,其中,

$$P_{det,y_i} = P_{ori,y_0} + t_p (y_0 - y_i) \quad (3)$$

式中: $y_i = 1981, 1982, \dots, 2015$; y_0 表示初始年,即 $y_0 = 1981$ 。

将逐日降水乘以该年的调整系数 C_{y_i} 得到去趋势的逐日降水序列。

以此类推,可以基于同样的方法对净辐射、气温和 LAI 进行去趋势处理。

2 结果和讨论

2.1 研究区气候、植被和径流的演变特征

汾河流域多年平均年降水量为 512.2 mm,降水

年际波动大,最小值出现在1986年(346.5 mm),最大值出现在2003年(657.1 mm),见图2(a)。1980—2015年,流域降水序列呈不显著($p>0.05$)的增加趋势,趋势值为0.89 mm/a。净辐射呈不显著减少趋势,趋势值为 $-0.05 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 。研究期内流域温度和LAI呈显著($p<0.05$)增加的趋势,趋势值分别为 $0.44 \text{ }^\circ\text{C}/(10\text{a})$ 和 $0.05 \text{ m}^2/(\text{m}^2\cdot 10\text{a})$,见图2(b)。1981—2015年,河津站观测的年径流呈显著减少的趋势,趋势值为 $-0.14 \text{ mm}/\text{a}$,见图3。实测径流与降水的波

动不一致,如最大降水年(2003年)对应的实测径流小于很多年份的径流量。实测年径流最大值出现在1996年(39.0 mm),最低值出现在2000年(3.89 mm),多年平均值为13.85 mm。汾河流域人类活动强烈,人为用水量占天然径流的比例较高(26.1%~86.5%,平均值为64.8%),除个别丰水年(如1988年)外,人类用水量均大于实测径流量。而且,人类用水量在1981—2000年呈显著上升的趋势,趋势值为 $0.38 \text{ mm}/\text{a}$ 。

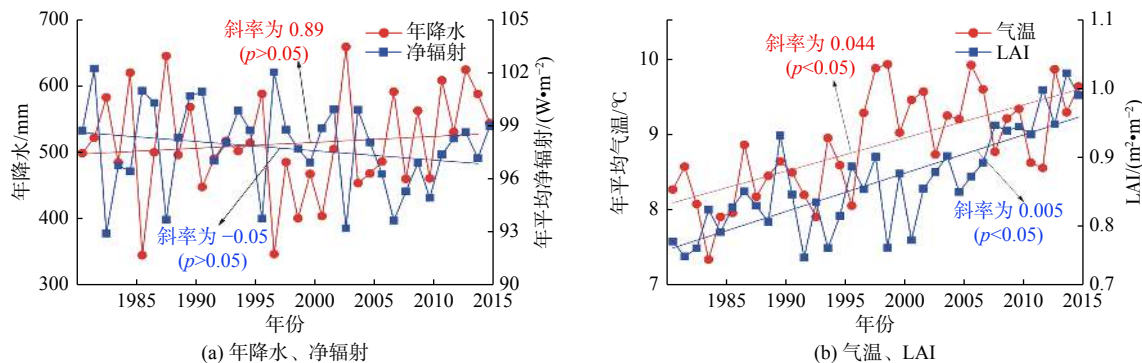


图2 汾河流域1981—2015年降水、净辐射、气温和LAI的年际变化

Fig. 2 The interannual variability of precipitation, net radiation, temperature, and LAI across the Fenhe River basin from 1981 to 2015

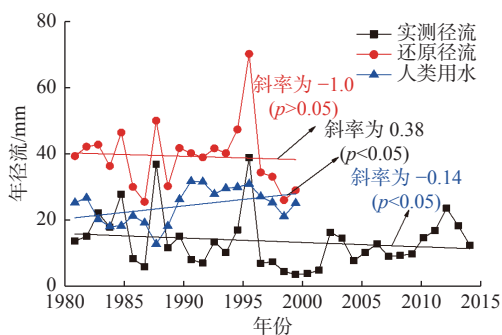


图3 汾河流域实测径流、还原径流以及人类用水的变化

Fig. 3 The interannual variability of observed runoff, natural runoff, and human water use in the Fenhe River basin

2.2 水文模型的校正和验证

HIMS模型不包含人类用水模块,因此只能对自然状态下的降水-径流过程进行模拟。将还原径流序列长度的2/3作为校正期(1981—1994年),其余年份作为验证期(1995—2000年)。图4展示了模型校正期和验证期HIMS模型的表现性。HIMS模型可以很好地模拟河津站天然径流的变化,校正期和验证期的 E_{NS} 分别为0.71和0.82, B_1 分别为12.8%和-6.3%。

除径流之外,还对HIMS模型模拟的蒸散发进行了评估。由于缺乏通量站点的蒸散发观测,基于一个国际上应用广泛的遥感蒸散发产品(即

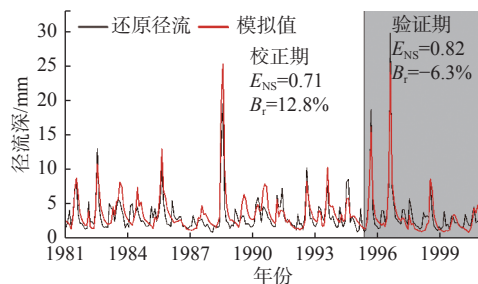


图4 HIMS模型在河津站校正期(1981—1994年)和验证期(1995—2000年)径流模拟的表现性

Fig. 4 The performance of the HIMS model in runoff simulations during the calibration (1981-1994) and validation (1995-2000) periods at the Hejin station

GLEAM)对HIMS模拟的蒸散发进行评估。由图5可知,HIMS和GLEAM估算的蒸散发在空间分布上有很好的 consistency,二者均显示蒸散发自北向南呈现递增的趋势。两个模型估算的流域平均逐月蒸散发值高度吻合, E_{NS} 高达0.92, B_1 仅为-5.3%(图6)。上述结果表明,HIMS模型可以很好地捕捉自然状态下汾河流域的降水-径流过程。

2.3 径流锐减因素的定量解析

2001—2015年的天然径流基于HIMS模型模拟得到,模型模拟的天然径流和实测径流的差值作为这一时期的人类用水量。图7展示了这一时期实

测径流、天然径流以及人类用水量(天然径流量和实测径流量的差值)的变化。天然径流的变化主要由降水主导,二者的年际波动较为一致,在这一时期天然径流有两个峰值,即 2003 年和 2013 年。同样得益于降水的增加,年实测径流在这一时期也呈增加的趋势。表 1 统计了不同时期人类用水量以及其占天然径流的比例。从年平均用水量看,2010—

2015 年最高(29.8 mm/a),其次为 1990—1999 年(28.3 mm/a)和 2000—2009 年(25.2 mm/a),1981—1989 年最低。从用水量占天然径流的比例看,2000—2009 年最高(72.6%),其次为 1990—1999 年(68.4%),1981—1989 年最低(53.0%)。总体上,研究期内人类取用水量呈波动增加趋势,丰水年用水量明显大于枯水年。

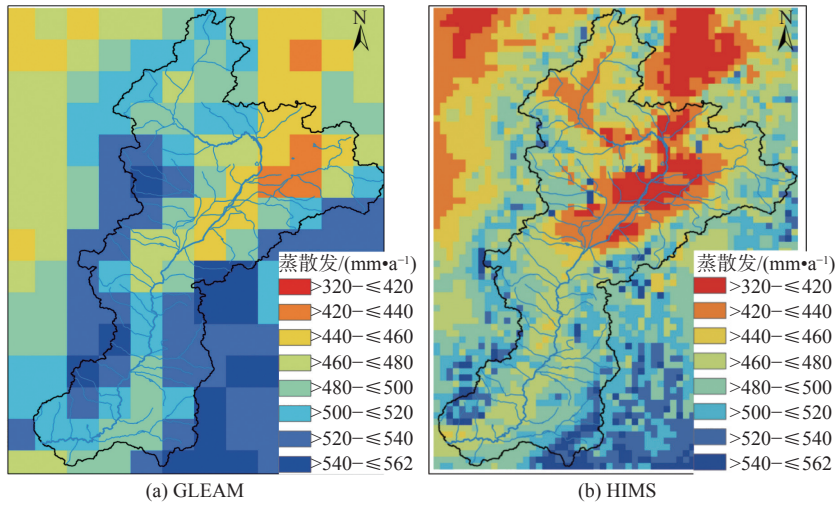


图 5 GLEAM 和 HIMS 模型估算的多年平均蒸散发空间分布

Fig. 5 Spatial patterns of mean annual evapotranspiration estimates from the GLEAM and HIMS models

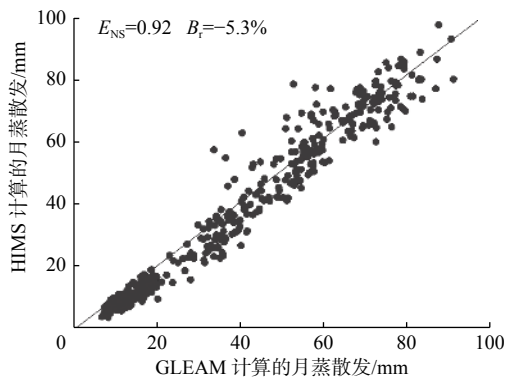


图 6 GLEAM 和 HIMS 模型模拟的流域平均月蒸散发的散点图

Fig. 6 Scatterplots of the basin-average monthly evapotranspiration estimates from the GLEAM and HIMS models

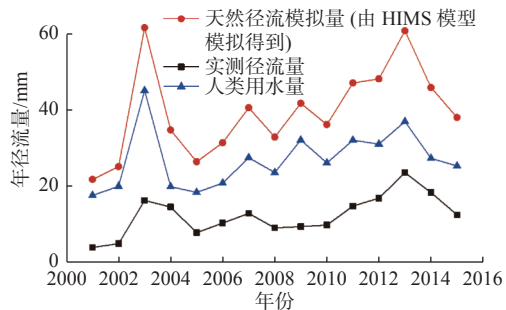


图 7 2001—2015 年汾河流域实测径流量、天然径流量以及人类用水量的变化

Fig. 7 The interannual variability of observed runoff, natural runoff, and human water use in the Fenhe River basin from 2001 to 2015

表 1 不同时期人类用水占天然径流的比例变化
Tab. 1 The percent of human water use to natural runoff during different periods

| 变量 | 1981—1989 年 | 1990—1999 年 | 2000—2009 年 | 2010—2015 年 |
|---------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Q /mm | 38.1 | 41.4 | 34.7 | 46.1 |
| ΔQ_{H} /mm | 20.2 | 28.3 | 25.2 | 29.8 |
| p /% | 53.0 | 68.4 | 72.6 | 64.6 |

注: Q 表示天然径流量, mm; ΔQ_{H} 表示人类用水量, mm; p 表示人类用水占天然径流的比例, %。

将 1981—2015 年的用水量时间序列进行去趋势处理,去趋势序列的多年平均值为 21.8 mm/a,原始序列的多年平均值 25.6 mm/a,其差值占实测多年平均径流(13.9 mm/a)的 27.4%。换言之,如果取用水量年序列不增加(无趋势),实测多年平均径流将增加 27.4%。

图 8 展示了研究期内降水、净辐射、温度和 LAI 变化对天然径流的贡献。降水变化对天然径流的贡献在流域上、下游表现不同,其在上游增加径流,在下游减少径流,见图 8(a)。全流域上,降水变化对天然径流的贡献为-1.83%,即在降水不增加(无趋势)的情景下,天然径流将减少 1.83%(0.72 mm/a)。净辐射变化对天然径流的影响相对较小,其贡献值为 0.72%(0.28 mm/a),且在上游地区

贡献值大于下游地区 [图 8(b)]。4 个变量中,温度和 LAI 变化对天然径流的贡献度较大,其贡献值分别为 5.05%(1.99 mm/a)和为 4.81%(1.90 mm/a) [图 8(c)~(d)],且温度变化对天然径流的贡献值自上游向下游递减。在温度和 LAI 无趋势的情

景下,天然年径流增加量分别占实测年径流的 14.4% 和 13.7%,而其他两个因素(降水和净辐射)引起的径流变化占实测年径流的比例分别为-5.3%和 2.1%。由此可见,温度和植被变化是导致汾河流域径流下降的关键因素。

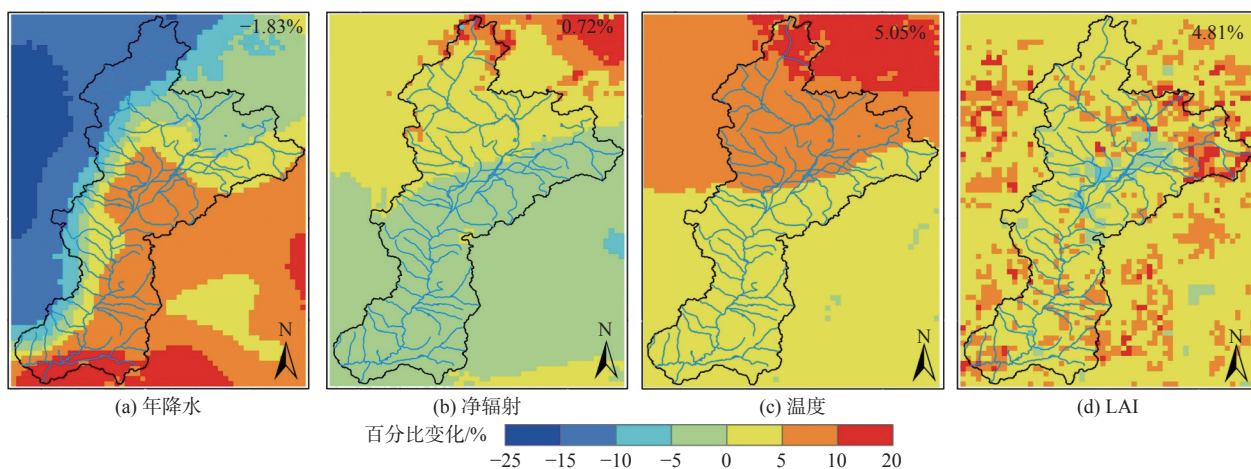


图 8 1981—2015 年降水、净辐射、温度和 LAI 对汾河流域天然径流变化的贡献

Fig. 8 The contribution of precipitation, net radiation, temperature, and LAI to the change in natural runoff across the Fenhe River basin from 1981 to 2015

注:正值表示该因素变化减少了天然径流,负值则意义相反。

2.4 讨论

汾河作为黄河第二大支流,其径流锐减加剧了流域内水资源的供需矛盾,并对黄河中下游的水沙演变过程及水生态环境产生了深远的影响^[25]。本文基于分布式水文模型和因素去趋势试验方法定量评估了降水、净辐射、植被以及人类取用水对汾河径流变化的贡献。研究发现,人类活动(取用水)是导致径流减少的首要因素,植被变化对径流减少的贡献要大于气候要素的贡献,这些结论与前人^[10-12]的研究结果基本一致。

评估结果的不确定性来源主要包括以下几个方面。第一,收集了流域内及周边的 15 个气象站来插值生成模型(除降水以外)的气象驱动数据,考虑到气象要素高度的空间变异性,观测站点的不足可能导致生成的气象驱动数据存在一定的误差。第二,HIMS 模型本身具有一定的不确定性,一些影响降水-径流转化的过程在模型中被简化(如地下水动态)或忽略(如融雪)。第三,汾河流域存在大量的灌溉农田和地下水井,中上游存在许多大、中型水库,因此,水利部门统计的人类取用水数据很难准确地反映真实的人类取用水数据。此外,在 2001—2015 年天然径流模拟过程中,HIMS 模型参数的校正期是 1982—1994 年。暗含的假设是校正期率定的模

型参数同样适用于预测期。尽管这一假设被广泛用于量化人类活动对径流的影响^[26-28],但是,在下垫面剧烈变化的情况下,这一假设可能不成立。这是因为一些模型的参数可能与下垫面条件有关。例如,植被恢复会增加土壤的储水能力和汇流时间^[29],而校正的静态参数无法动态响应环境要素的变化。上述因素可能引起径流模拟结果的不确定性,进而高估或低估人类取用水对径流变化的贡献。

在汾河径流持续减少的背景下,建议从开源和节流的角度加强汾河流域水资源的管理,实现流域水资源高效、可持续利用。开源方面,建议充分发掘雨水资源化潜力,利用雨水集流新材料、雨水标准化存储设施以及集雨补灌等技术收集雨水,同时对降雨-径流进行合理的调控利用,将地表径流转化为土壤有效水,为大规模植被恢复提供水源补给。节流方面,建议充分挖掘节水潜力,加强水资源需求管理,抑制不合理的用水需求。同时,建议在退耕还林工作中,科学化筛选造林、种草的品种,减少高耗水植物的种植面积。

3 结论

基于分布式水文模型 HIMS 和因素去趋势方法定量解析了自然和人为因素对汾河流域径流减少

的贡献。主要结论如下:

1981—2015年,汾河流域实测径流显著($p < 0.05$)减少,同时期的降水和净辐射分别呈不显著($p > 0.05$)增加和减少趋势,温度和LAI显著($p < 0.05$)增加,取用水量波动增加。

归因分析结果表明,取水量的增加是导致汾河径流减少的首要因素,在年取用水量无趋势的情景下,多年平均径流将增加27.4%。自然因素中,温度对汾河径流减少的贡献最大,其次为LAI,净辐射的贡献较小。在上述3个因素无趋势情景下,年平均径流将分别增加14.4%、减少13.7%和增加2.1%。降水的增加部分抵消了径流的减少,其对年平均径流变化的贡献为-5.3%。

随着全球变暖的加剧和退耕还林工程的持续,升温 and 植被恢复对汾河流域径流减少的贡献可能进一步增加。因此,建议流域水资源管理部门做好充分预案,应对枯水年水资源的供需矛盾。此外,水文模型的输入、结构、参数的不确定性都可能影响归因分析结果,采用多个模型对径流变化进行归因分析有助于减少结果的不确定性。

参考文献(References):

- [1] 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 气候变化和人类活动对河川径流影响的定量分析[J]. 中国水利, 2008(2): 55-58. (WANG G Q, ZHANG J Y, LIU J F, et al. Quantitative assessment for climate change and human activities impact on river runoff[J]. *China Water Resources*, 2008(2): 55-58. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2008.02.016.
- [2] 李丹, 罗美. 全球气候治理的中国角色: 人与自然生命共同体的视角[J]. 广西师范大学学报(哲学社会科学版), 2021, 57(4): 1-12. (LI D, LUO M. China's role in the global governance of climate change from the perspective of constructing the community of life for man and nature[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 2021, 57(4): 1-12. (in Chinese)) DOI: 10.16088/J. ISSN.1001-6597.2021.04.001.
- [3] 孔锋, 史培军, 方建, 等. 全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J]. 灾害学, 2017, 32(2): 165-174. (KONG F, SHI P J, FANG J, et al. Advances and prospects of spatiotemporal pattern variation of extreme precipitation and its affecting factors under the background of global climate change[J]. *Journal of Catastrophology*, 2017, 32(2): 165-174. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2017.02.029.
- [4] 黄丽娜, 高建芸, 蒋玉芸, 等. 福建省5到1440分钟不同短历时降雨事件的年最大雨强时空分布特征及可能原因[J]. 大气科学, 2018, 46(3): 247-293. (HUANG L N, GAO J Y, JIANG Y Y, et al. Spatial-temporal distributions of the annual maximum precipitation with the short duration of 5 to 1440 minutes over Fujian, China and associated possible causes[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 46(3): 247-293. (in Chinese)) DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.06.009.
- [5] 夏军, 翟金良, 占车生. 我国水资源研究与发展的若干思考[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 905. (XIA J, ZHAI J L, ZHAN C S. Some reflections on the research and development of water resources in China[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(9): 905. (in Chinese)) DOI: 10.1631/jzus.A1010009.
- [6] 陈腊娇, 朱阿兴, 秦承志, 等. 流域生态水文模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2011, 30(5): 535-544. (CHEN L J, ZHU A X, QIN C Z, et al. Review of eco-hydrological models of watershed scale[J]. *Progress in Geography*, 2011, 30(5): 535-544. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlxxjz.2011.05.003.
- [7] 肖登攀, 陶福祿, MOIWO J P. 全球变化下地表反照率研究进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1217. (XIAO D P, TAO F L, MOIWO J P. Research progress on surface albedo under global change[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(11): 1217. (in Chinese)) DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2011.11.1217.
- [8] 王登, 荐圣淇, 胡彩虹. 气候变化和人类活动对汾河流域径流情势影响分析[J]. 干旱区地理, 2018, 41(1): 25-31. (WANG D, JIAN S Q, HU C H. Impacts of climate change and human activities on runoff in Fenhe River basin[J]. *Arid Land Geography*, 2018, 41(1): 25-31. (in Chinese))
- [9] 王浩, 赵勇. 新时期治黄方略初探[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1291-1298. (WANG H, ZHAO Y. Preliminary study on harnessing strategies for Yellow River in the new period[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(11): 1291-1298. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190728.
- [10] 蔺彬彬, 张亚琼, 郭维维. 基于Budyko假设的汾河上游水源区径流衰减归因分析[J]. 中国农村水利水电, 2021(6): 86-90. (LIN B B, ZHANG Y Q, GUO W W. Attribution analysis of runoff attenuation in the upper reaches of the Fenhe River based on the Budyko hypothesis[J]. *China Rural Water and Hy-*

- dropower, 2021(6): 86-90. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2021.06.015.
- [11] 刘晓燕. 黄河近年水沙锐减成因[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (LIU X Y. The reasons for the sharp decrease of water and sediment in the Yellow River in recent years [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)) DOI: 9787030511591.
- [12] 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(6): 853-858. (WANG G Q, ZHANG J Y, HE R M. Impacts of environmental change on runoff in Fenhe River basin of the middle Yellow River[J]. *Advances in Water Science*, 2006(6): 853-858. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1001-6791.2006.06.017.
- [13] 刘昌明, 王中根, 郑红星, 等. HIMS 系统及其定制模型的开发与应用[J]. 中国科学: E 辑, 2008, 38(3): 350-360. (LIU C M, WANG Z G, ZHENG H X, et al. Development and application of the HIMS system with its custom function[J]. *Science in China: Series E*, 2008, 38(3): 350-360. (in Chinese)) DOI: 10.1007/s11431-008-0040-x.
- [14] 刘昌明, 王中根, 杨胜天, 等. 地表物质能量交换过程中的水循环综合模拟系统 (HIMS) 研究进展[J]. 地理学报, 2014, 69(5): 579-587. (LIU C M, WANG Z G, YANG S T, et al. Hydro-informatic modeling system: Aiming at water cycle in land surface material and energy exchange processes[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(5): 579-587. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlxb201405001.
- [15] BAI P, LIU X M, ZHANG Y Q, et al. Incorporating vegetation dynamics noticeably improved performance of hydrological model under vegetation greening[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 610-622. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.233.
- [16] LINDSTROM G, JOHANSSON B, PERSSON M, et al. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 201(1-4): 272-288. DOI: 10.1016/S0022-1694(97)00041-3.
- [17] 刘丽芳, 刘昌明, 王中根, 等. HIMS 模型蒸散发模块的改进及在海河流域的应用[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(10): 1339-1347. (LIU L F, LIU C M, WANG Z G, et al. Improvement of HIMS evapotranspiration module and its application in Haihe River basin[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(10): 1339-1347. (in Chinese)) DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150252.
- [18] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. FAO Irrigation and drainage paper No. 56 [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998, 56(97): e156.
- [19] HUTCHINSON M F, XU T. Anusplin version 4.2 user guide [R]. Centre for Resource Environmental Studies, The Australian National University, Canberra, 2004, 54.
- [20] MA H, LIANG S L. Development of the GLASS 250-m leaf area index product (version 6) from MODIS data using the bidirectional LSTM deep learning model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 273: 112985. DOI: 10.1016/j.rse.2022.112985.
- [21] LIU N, LIU Q, WANG L, et al. A statistics-based temporal filter algorithm to map spatiotemporally continuous shortwave albedo from MODIS data [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17, 2121-2129. DOI: 10.5194/hess-2117-2121-2013.
- [22] MARTENS B, MIRALLES D G, LIEVENS H, et al. GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture[J]. *Geoscientific Model Development*, 2017, 10(5): 1903-1925. DOI: 10.5194/gmd-2016-162.
- [23] MIRALLES D G, HOLMES T R H, DE JEU R A M, et al. Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(2): 453-469. DOI: 10.5194/hess-15-453-2011.
- [24] BAI P, LIU X M, ZHANG Y Q, et al. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): e2019WR027019. DOI: 10.1029/2019WR027019.
- [25] 原志华, 延军平, 刘宇峰. 1950 年以来汾河水沙演变规律及影响因素分析[J]. 地理科学进展, 2008, 27(5): 57-63. (YUAN Z H, YAN J P, LIU Y F. Analysis of the runoff and sediment development distribution and influencing factor of Fenhe River during the last 50 years[J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(5): 57-63. (in Chinese)) DOI: 10.11820/dlkxjz.2008.05.008.
- [26] WANG W G, SHAO Q X, YANG T, et al. Quantitative assessment of the impact of climate variability and human activities on runoff changes: A case study in four catchments of the Haihe River basin, China[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 27(8): 1158-1174. DOI: 10.1002/hyp.9299.
- [27] KONG D X, MIAO C Y, WU J W, et al. Impact assessment of climate change and human activities on net runoff in the Yellow River basin from 1951 to

- 2012[J]. *Ecological Engineering*, 2016, 91: 556-573. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.02.023.
- [28] WANG G S, XIA J, CHEN J. Quantification of effects of climate variations and human activities on runoff by a monthly water balance model: A case study of the Chaobai River basin in northern China[J]. *Water Resources Research*, 2009, 45(7): W00A11. DOI: 10.1029/2007WR006768.
- [29] 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 等. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2021, 51(7): 1080-1091. (ZHANG B Q, TIAN L, ZHAO X N, et al. 2021. Feedbacks between vegetation restoration and local precipitation over the loess plateau in China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 51(7): 1080-1091. (in Chinese)) DOI: 10.1360/SSTe-2020-0273.

Quantitative analysis of runoff reduction factors in the Fenhe River basin

BAI Peng, LIU Xiaomang

(Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Process, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Under the combined effect of climate change and human activities, there is a sharp decline in the Fenhe River runoff, which aggravates the shortage of water resources in the middle and lower Yellow River. To quantify the contribution of climatic factors, vegetation, and human water use to runoff reduction, the evolution above characteristics is carried out from 1981 to 2015 in the Fenhe River basin. A distributed hydrological model and a factor detrending method were used to quantitatively analyze the contribution of the changes in precipitation, net radiation, temperature, leaf area index, and human water use to the runoff reduction. The results revealed that annual precipitation and net radiation showed an insignificant ($p > 0.05$) increasing and decreasing trend during the study period. The annual temperature and leaf area index (LAI) showed a significant ($p < 0.05$) increasing trend and human water use showed a significant ($p < 0.05$) increasing trend. These factors jointly led to a significant ($p < 0.05$) decrease in annual runoff in the Fenhe river basin. The increase in human water use was the primary factor leading to the reduction of annual runoff. The observed mean annual runoff increased by 27.4% under the trend-free scenario of human water use. Warming and vegetation greening were the main natural factors causing runoff reduction, while the effect of net radiation was limited. Under the trend-free scenarios of the above three factors, the mean annual observed runoff increased by 14.4%, 13.7%, and 2.1%, respectively. The increase in annual precipitation partly alleviated the decrease in the annual runoff. The observed mean annual runoff decreased by 5.3% under the trend-free scenario of annual precipitation. The findings of this research may provide guidelines for water resources management and plan in the Fenhe River basin.

Key words: Fenhe River; water resource; climate change; vegetation greening; runoff; attribution