

基于 Budyko 理论的渭河上游生态建设区径流驱动因素量化分析

柯造成¹,马晓燕¹,马利国²,李占斌³,时 鹏³,李 鹏³

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050; 2. 大连理工大学建设工程学院,辽宁 大连 116024;
3. 旱区水工程生态环境全国重点实验室,陕西 西安 710048)

摘要:基于渭河上游 5 个水文站和 10 个气象站的实测数据,分析了黄土高原典型生态建设区渭河上游的水文序列非一致性和突变方法的适宜性;采用 6 种突变检验方法、交叉小波分析和 Budyko 理论等方法,探究了渭河上游 1980—2018 年年径流量演变规律及其影响因素。结果表明:渭河上游年径流量呈不显著下降趋势($p>0.05$),降水序列呈不显著上升趋势($p>0.05$),潜在蒸散发和温度序列呈显著上升趋势($p<0.05$),其中,径流序列和潜在蒸散发序列于 1993 年发生突变,降水序列于 2012 年发生突变,降水较径流突变点存在 10 a 滞后性;渭河上游各水文站长序列径流变化最适宜的突变检验方法为滑动 T 检验法;量化解析了下垫面、年降水量和潜在蒸散发量对渭河上游径流的贡献率,分别为 64.60%、37.87%、-2.47%;渭河上游径流的驱动因素是气候和人类活动的综合影响,下垫面变化是渭河上游径流变化的主导因素,其次是年降水量和潜在蒸散发。

关键词:径流演变;Budyko 理论;突变检验方法;量化分析;渭河上游

中图分类号:P333 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)04-0210-09

Quantitative analysis of runoff driving factors in ecological construction areas of upper reaches of the Wei River based on Budyko theory//KE Haocheng¹, MA Xiaoyan¹, MA Ligu², LI Zhanbin³, SHI Peng³, LI Peng³(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 3. State Key Laboratory of Eco-Hydraulic in Northwest Arid Region of China, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the measured data from 5 hydrological stations and 10 meteorological stations in the upper reaches of the Wei River, this study analyzed the non-stationarity of hydrological series and the suitability of change-point detection methods in the typical ecological construction areas of the Loess Plateau within the upper reaches of the Wei River. Using 6 change-point detection methods, cross-wavelet analysis, Budyko theory, and other approaches, it explored the evolutionary patterns of annual runoff and its influencing factors in the upper reaches of the Wei River from 1980 to 2018. The results show that the annual runoff in the upper reaches of the Wei River presented an insignificant decreasing trend ($p>0.05$), the precipitation series showed an insignificant increasing trend ($p>0.05$), while the potential evapotranspiration and temperature series exhibited significant increasing trends ($p<0.05$). Among them, the runoff series and potential evapotranspiration series experienced a change point in 1993, and the precipitation series had a change point in 2012, with 10 a lag between the change point of precipitation and that of runoff. The most suitable change-point detection method for long-series runoff changes at hydrological stations in the upper reaches of the Wei River is the moving T -test method. The contribution rates of the underlying surface, annual precipitation, and potential evapotranspiration to the runoff in the upper reaches of the Wei River were quantitatively analyzed, which were 64.60%, 37.87%, and -2.47%, respectively. The driving factors of runoff in the upper reaches of the Wei River are the comprehensive impact of climate and human activities. Changes in the underlying surface are the dominant factor affecting runoff changes in the upper reaches of the Wei River, followed by annual precipitation and potential evapotranspiration.

Key words: runoff evolution; Budyko theory; mutation detection methods; quantitative analysis; upper reaches of the Wei River

基金项目:甘肃省科技计划资助项目(25JRRA096);国家自然科学基金项目(4210070887);甘肃省重点研发计划项目(22YF7FA165, 23YF7FA165);高端外国专家引进计划项目(22JR10KA006)

作者简介:柯造成(1986—),男,副教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:kehc@lut.edu.cn

水资源是制约干旱和半干旱地区社会经济发展、生态保护和生态文明建设的关键因素。气候变化和频繁的人类活动加剧了世界各地的环境变化,了解气候变化、人类活动引起的土地利用类型、覆盖变化,以及变化环境下陆地水循环之间的相互作用,对于水文学、气象学和生态学等学科至关重要^[1]。

在全球气候变化背景下,流域径流变化的主要成因受到国内外众多学者的关注,而生态建设对流域下垫面改变引起径流变化的机理尚不清晰。径流变化的归因分析方法主要有:①统计回归分析法^[2];②基于 Budyko 假说的气候弹性法、全微分法和互补法^[3];③水文建模法^[4]。其中,Budyko 假说中分析型 Budyko 理论是源自水能平衡方程的分析和数学推理,而经验型 Budyko 理论则源自水文过程,更具具体的 Budyko 参数物理意义^[5]。基于这两种 Budyko 理论,许多学者开始研究环境对径流的影响,包括极端温度、净辐射和风等气候变化^[6],植被功能^[7],如叶面积指数变化^[8]和植被吸收光合有效辐射等生态过程,但是这些气候弹性法没有考虑不同 Budyko 理论的估值,大多只能在年尺度上分离和量化气候变化、人类活动对径流变化的贡献,在较小时空尺度上的应用受到限制。

在大多数研究中,Budyko 理论的参数在基准期和影响期保持不变,但气候变化和人类活动可能直接或间接影响方程参数^[9]。而在 Budyko 理论基础上建立的敏感性分析法具有更强的解释性、更高的准确率、更简单的结构以及较少的参数等优点^[10],因其对历史数据要求低、计算简单、可获得基本物理机制而被广泛采用,且该方法已被证明具有合理的可信度^[11],在我国的黄河流域、青藏高原和黄土高原等地区具有良好的适用性^[12]。例如,Li 等^[13]基于 Budyko 理论,探究了黄河流域径流变化的原因,结果表明,径流量对降水的变化较敏感,而径流量减少的主要原因是人类活动。师卫钊等^[14]基于 Budyko 理论,分析了嘉陵江流域径流变化的原因,结果表明,人类活动对嘉陵江流域径流量减少的贡献率为 50%~60%。

在全球范围内,特别是干旱和半干旱地区,径流量的减少可能导致关键的社会和生态问题,这些地区的水资源更容易受到气候变化的不利影响^[15-16]。目前,国内外学者针对水文气象序列突变提出了很多种方法,主要有 Mann-Kendall 法、有序聚类分析法、贝叶斯法、滑动 F 检验法、累积距平法、滑动平均法、滑动 T 检验法、Pettitt 检验法等。各方法原理与适用条件均不相同,故突变点识别存在差异。研究发现,有序聚类分析法、贝叶斯法、滑动 T 检验法

等适用于均值序列的检验,而滑动 F 检验法更适用于变差系数序列的检验,但检验效率较低^[17]。

本文采用多种突变检验方法,对渭河流域每一个水文站的水文要素进行突变检验,对比分析得出适用于该流域的突变检验方法。

渭河是黄河水量最大的一级支流,对整个黄河流域的生态安全具有重要意义。渭河上游地区是黄河流域最重要的典型生态建设区,受历史因素影响,该地区长期面临生态流量不足、生态环境自我调节功能弱化等问题。2000 年以来,渭河上游地区通过实施退耕还林还草工程、推进坡改梯治理、推广节水灌溉技术、发展特色林果产业等措施,有效改善了水土流失状况;同时强化湿地保护,建成了多个湿地公园和生态修复项目,显著提升了湿地生态功能和生物多样性保护成效;其总生态服务价值由 2006 年的 58.28 亿元增加到 2015 年的 88.17 亿元,增加了 51.29%。

本文以典型生态建设区渭河上游地区(北道水文站以上)为研究区,以实测的水文、气象以及土地利用等数据为依据,分析了水文和气象数据的趋势、突变和相关性,并采用 Budyko 理论进行敏感性和驱动因素的贡献率分析,以期为渭河上游水资源优化配置及合理利用提供科学理论依据。

1 研究区概况与数据来源

渭河上游地区主要指陇山以西的甘肃段($34^{\circ}42'N\sim 36^{\circ}20'N,104^{\circ}18'E\sim 107^{\circ}37'E$)。渭河起源于甘肃省渭源西南的鸟鼠山,流经甘肃、陕西和宁夏,最终汇入黄河。渭河上游甘肃段干流长 316 km,占渭河全长的 1/3,地处黄土高原,地形地貌以黄土丘陵为主,丘陵地貌面积占总面积的比例超过 70%,海拔在 900~2400 m 之间。渭河上游地区位于干旱和湿润之间的过渡带,属于温带大陆性季风气候区,降水量年内分配差异大,年平均降水量在 466~652 mm 之间,主要集中在 7—10 月,约占全年降水量的 60%以上,且多以短历时强降雨为主。平均气温在 8.4~11.4℃ 之间,年蒸发量在 1400~1600 mm 之间,平均相对湿度在 66%~68% 之间^[18]。研究区概况如图 1 所示。

采用渭河流域周边 10 个气象站 1980—2019 年逐日平均,最低、最高气温,平均风速,日照时数,平均相对湿度等数据,数据来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),缺测数据采用前后 2 d 平均值代替。

DEM 数据来源于地理空间数据云 ASTER GDEM 数据集(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率

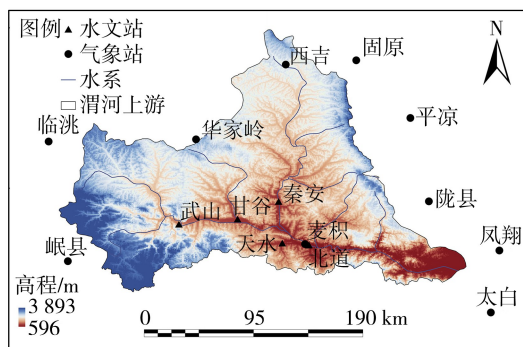


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

为 $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ 。ASTER GDEM (advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer global digital elevation model) 数据集是基于先进星载热发射和反射辐射仪器数据计算生成,在生成过程中,会进行去云处理,除去残余的异常值,纠正异常数据并取平均值作为最后像素值。该数据集由 10 亿个高程点组成,每个点都有 x 、 y 和 z 坐标,地形信息详尽。

水文资料和降水资料来自甘肃省水文局提供的北道、武山、秦安、天水、甘谷 5 个水文站和临洮、华家岭、岷县、固原、西吉、平凉、陇县、太白、凤翔、麦积 10 个气象站 1980—2018 年实测资料,水文站和气象站具体位置见图 1。

2 研究方法

2.1 Penman-Monteith 公式

对于潜在蒸散发 (PET) 的计算,FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 联合国粮食及农业组织) 提供的 Penman-Monteith (PM) 公式^[19]综合考虑了空气动力学和能量平衡理论,计算精度高,可直接应用于不同自然区域环境。

2.2 Thornthwaite 公式

Thornthwaite (Tho) 公式计算潜在蒸散发,考虑纬度因子基于月平均温度,具体公式见文献^[20]。

2.3 Pettitt 检验法

Pettitt 检验法^[21]是用来确定研究区降水和径流量时间序列数据突变点发生情况的一种非参数检测法。

2.4 有序聚类法

有序聚类法^[22]的实质是选取相对极小相似数值的方差平方和作为最优分割。选取 1 个参考年,将这一水文序列分成两组,求出这两组的离差平方和的总和,再找出最佳分割点,就是这一水文序列的突变点^[23]。

2.5 滑动 T 检验

滑动 T 检验的基本思路是:检验一组气候序列中两个数据集的平均值是否存在明显差异,以此判断两组数据之间是否存在明显差别。当两个数据集之间的平均差达到某个显著水平时,可以说该数据集已经发生了质的变化,出现了一个突变^[24]。

2.6 交叉小波分析

交叉小波分析能够反映两个时间序列的高能量区域和相位关系,利用小波压缩光谱可以在时域和频域上测量二者的局域相关性。对于两个平稳随机过程,交叉小波变换的标准化形式即为小波互相关函数^[25]。

2.7 Budyko 理论

a. 径流对气候和下垫面的弹性系数。根据 Choudhury 等^[26-27]基于 Budyko 理论提出的单参数 Budyko 方程计算 n (Budyko 理论中的参数) 的值。径流对于气候因素的反应程度可以通过弹性系数来衡量。计算方法参考文献^[28]。

b. Budyko 理论贡献率计算。Zhou 等^[29]基于降水与潜在蒸散发量相互独立的假设,推导出径流对降水和潜在蒸散发弹性系数间存在互补关系的理论方程。

3 结果与分析

3.1 水文、气象要素趋势和相关性

3.1.1 水文要素年际变化

根据渭河上游北道、甘谷、秦安、天水、武山 5 个水文站逐年径流变化数据,利用泰森多边形法对整个流域的径流量进行计算,结果如图 2 所示。由图 2(a)可知,渭河上游 1980—2018 年径流量平均值为 4.01 亿 m^3 ,年径流量下降趋势不显著 ($p > 0.05$),年径流量以每 10 a 0.5 亿 m^3 的速率减少。径流量最小值出现在 1997 年 (0.78 亿 m^3),最大值出现在 1984 年 (8.49 亿 m^3)。Hurst 指数为 0.88,表明未来一段时间内径流仍会呈现下降趋势,且下降趋势显著。

3.1.2 气象要素年际变化

渭河上游年平均降水量为 2410.50 mm,其年际变化情况见图 2(a)。年平均降水量以每 10 a 3.311 mm 的趋势上升,上升趋势不显著 ($p > 0.05$),Hurst 指数为 0.78,表明渭河上游年平均降水量未来上升趋势显著。

渭河上游年平均温度为 11.90℃,其年际变化情况见图 2(b)。温度上升趋势显著 ($p < 0.05$),平均以每 10 a 0.86℃ 的趋势上升,Hurst 指数为 0.86,表明温度未来上升趋势显著。

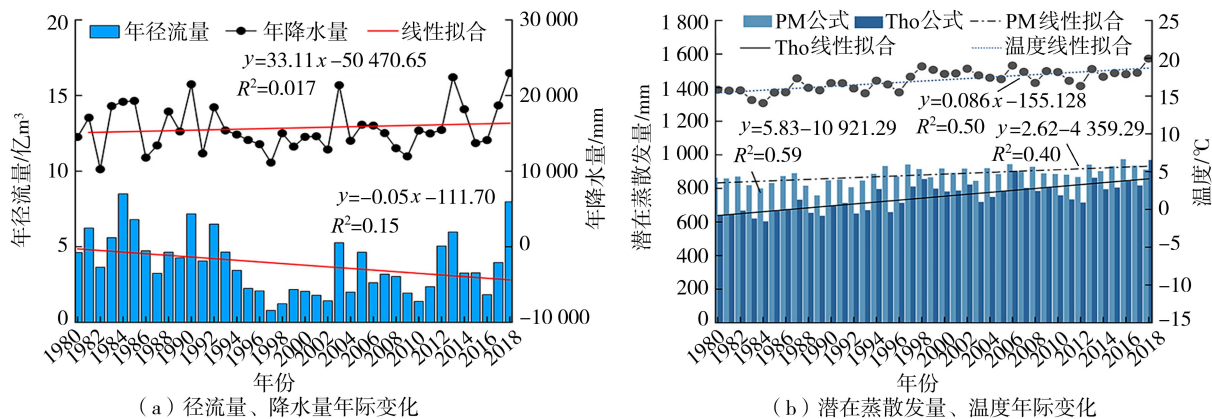


图2 渭河上游水文和气象要素年际变化

Fig. 2 Interannual variations of hydrological and meteorological elements in upper reaches of the Wei River

利用 PM 公式和 Tho 公式分别计算潜在蒸散发量,得到渭河上游年平均潜在蒸散发量,分别为 882.59、750.22 mm,其年际变化情况见图 2(b)。潜在蒸散发量上升趋势显著($p < 0.05$),PM 公式计算的潜在蒸散发量平均以 2.62 mm/a 的趋势上升,Tho 公式计算的潜在蒸散发量平均以 5.83 mm/a 的趋势上升。PM 公式 Hurst 指数为 0.860,Tho 公式为 0.864,均表明潜在蒸散发量未来上升趋势显著。

3.1.3 渭河上游水文、气象要素相关性

采用 Morlet 交叉小波函数分别对渭河上游的年径流量和年降水量进行小波变换,得到 1980—2018 年渭河上游的年径流量、年降水量及年潜在蒸散发量的交叉小波谱,结果如图 3 所示。

由图 3(a)可知,存在 1~7 a 和 8~10 a 的共振周期。在 5~6 a 的周期上,降水较径流滞后 30°左右(大约 1 月)。由图 3(d)可知,渭河上游降水对径

流的影响较大,降水与径流正相关性显著,高能量区占整个区域有效值的 70%。以 PM 公式计算潜在蒸散发情况,见图 3(b)(e)。可见,渭河上游潜在蒸散发和径流存在负相关的 5~9 a 共振周期,但大部分区域未在影响锥曲线内,影响并不明显。以 Tho 公式计算潜在蒸散发情况,见图 3(c)(f)。可见,渭河上游潜在蒸散发和径流存在 3~5 a 的不显著共振周期,潜在蒸散发与径流相关性不显著(正负都存在)。通过气象要素与径流的相关性分析,可知在气象要素中降水对径流变化的影响占主导作用。

3.1.4 PM 公式和 Tho 公式的不确定性

鉴于 PM 公式和 Tho 公式潜在的不确定性,研究结果可能存在一定的局限性。为全面评估研究结果的可靠性,对其不确定性进行分析。

PM 公式综合考虑了空气动力学和能量平衡理论,以能量平衡方程和水汽扩散理论为依据,考虑了

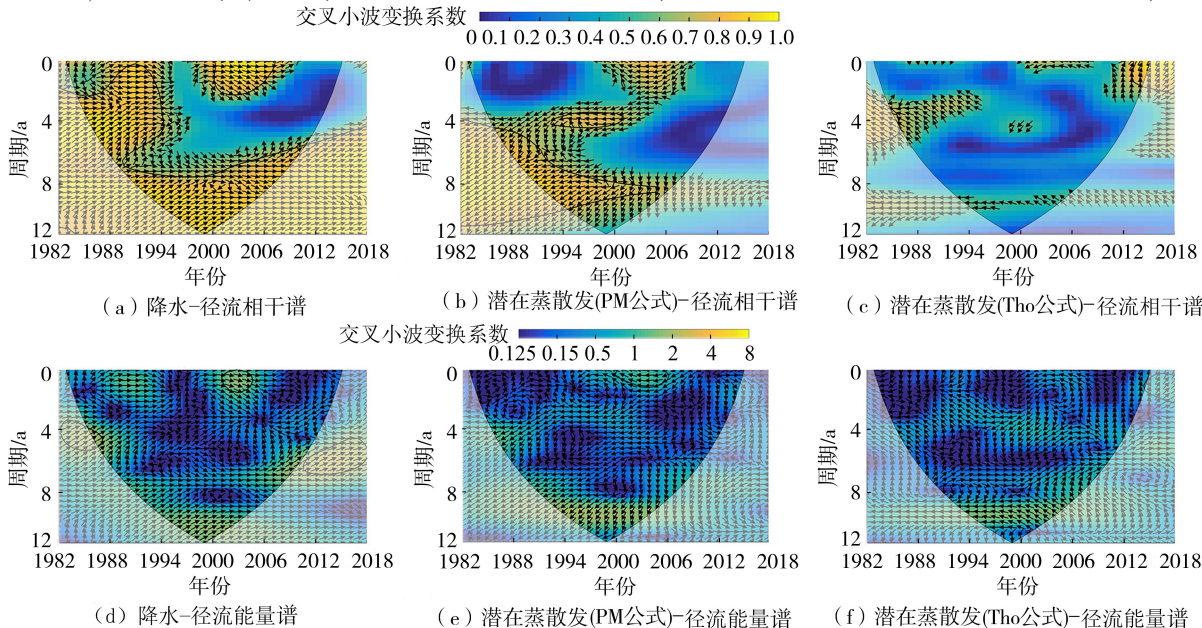


图3 渭河上游水文、气象要素交叉小波变换

Fig. 3 Cross wavelet transform of hydrological and meteorological elements in upper reaches of the Wei River

作物的生理特征和空气动力学参数的变化,计算准确且理论清晰,是目前世界上应用精度最高、最普遍的公式之一^[30],但该方法需要的气象数据较多,大部分地区很难提供完整的资料。Tho 公式属于温度法^[31],主要考虑温度对潜在蒸散发量的影响,对数据的要求低,以月尺度计算,是一种应用较为广泛的潜在蒸散发量计算方法,利用月平均温度和月平均白昼时间资料计算逐月潜在蒸散发量。

综合比较两种潜在蒸散发量计算方法,PM 公式平均潜在蒸散发的年际变化如图 4(a)所示,最小潜在蒸散发量出现在 1989 年,为 758.209 mm,最大潜在蒸散发量出现在 2016 年,为 973.84 mm。Tho 公式(图 4(a))中最小潜在蒸散发量出现在 1984 年,为 603.58 mm,最大潜在蒸散发量出现在 2018 年,为 968.53 mm。PM 公式计算的潜在蒸散发年际趋势的残差(R^2)小于 Tho 公式,即 PM 公式

效果更好。

分析两者的误差(图 4(b)),Tho 公式的误差波动较大且波动性更强,尤其是在 20 世纪 80 年代和 2000 年之后,误差值有时超过 20%;PM 公式的误差波动相对较小,且大部分时间保持在 -20%~0 之间,误差相对较小且更稳定。

根据渭河上游水文、气象要素相关性分析可知,以 Tho 公式计算的潜在蒸散发与径流的相关性不显著,在影响锥曲线内几乎无共振周期,而 PM 公式计算的潜在蒸散发与径流有 20%的相关性。综合比较认为 PM 公式计算方法更可靠。

3.2 年流径流量变化与突变方法的适宜性

渭河上游 1980—2018 年各水文站年径流量变化如图 5 所示,秦安、甘谷站径流量均呈显著下降的趋势($p < 0.05$),速率分别为每 10 a 0.05 亿、0.01 亿 m^3 。天水站径流量呈显著上升趋势($p <$

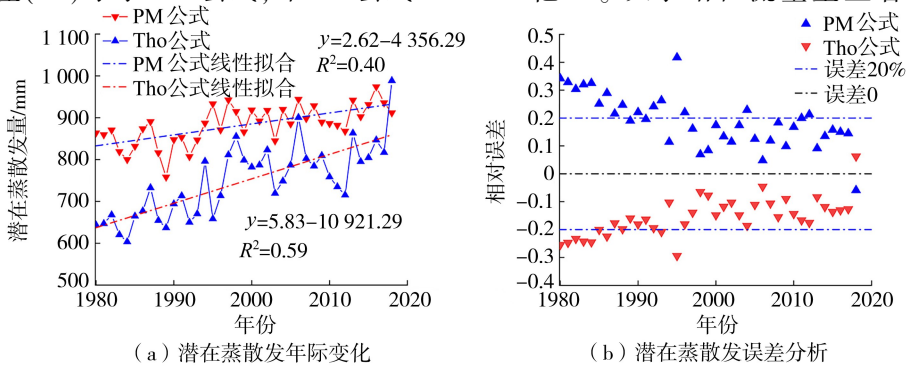


图 4 PM、Tho 公式不确定性分析

Fig. 4 Uncertainty analysis of AM、Tho formula

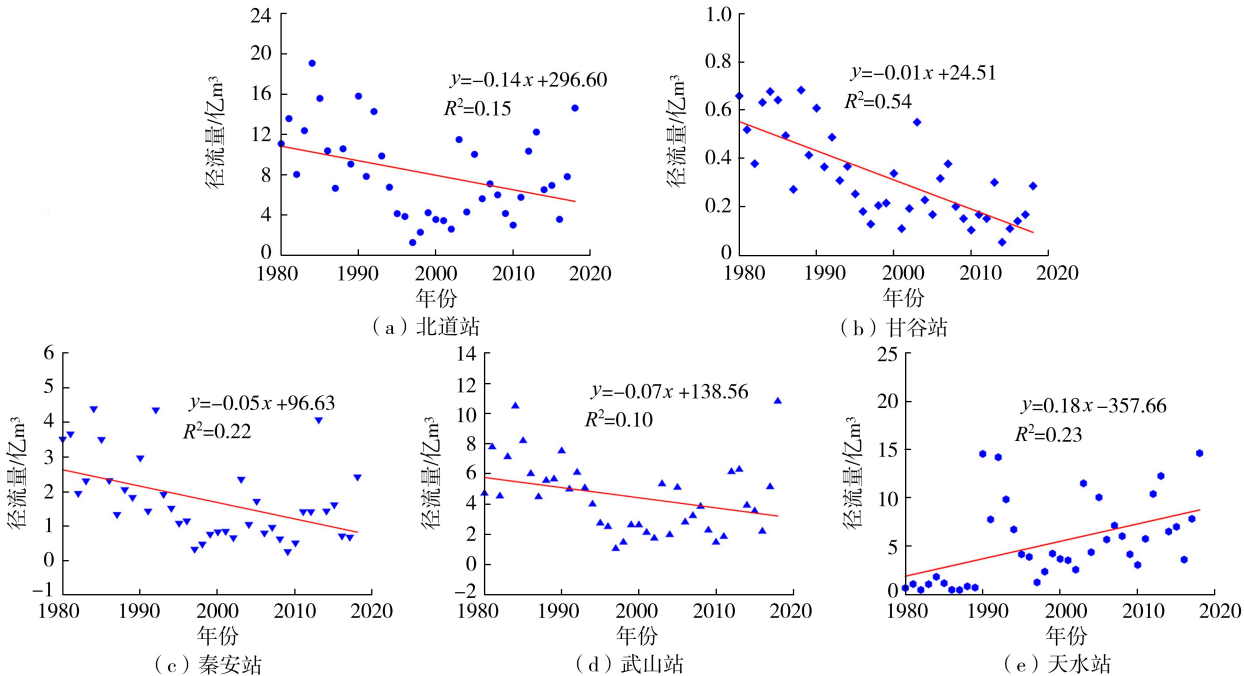


图 5 渭河上游干、支流径流量变化

Fig. 5 Changes in runoff volume in upper reaches of the Wei River

0.05),速率为每 10 a 0.18 亿 m³。北道站和武山站下降趋势不显著($p>0.05$),速率分别为每 10 a 0.14 亿、0.07 亿 m³。秦安站年径流量下降速率最大,北道站平均值最高,甘谷站下降速率最低且径流量最少。

采用不同的突变检验方法对渭河上游 5 个水文站(北道、甘谷、秦安、武山、天水)1980—2018 年的水文序列进行突变检验,发现同一要素采用不同的突变检验方法得到的突变点存在差异(表 1),故本文结合多种突变检验方法综合分析水文要素时间序列突变点,得出适宜渭河上游年径流量的突变方法。其中,北道站位于渭河干流上,与渭河上游径流量突变时间相近。综合分析渭河上游干、支流径流量的不同突变点,结果表明,滑动 T 检验法更适用于渭河上游。其中 4 个水文站的突变年份均在 1993 年,即 1993 年为渭河上游径流突变点。

3.3 渭河上游径流量驱动因素定量识别

根据突变检验的结果,确定基准期为 1980—1993 年,变化期为 1994—2018 年,计算影响流域径流三大因素的敏感性系数。基于 Budyko 理论的互补法,计算渭河上游各要素对径流变化的影响程度及贡献率。

3.3.1 敏感性

由表 2 可以看出:相对于基准期,渭河上游变化期潜在蒸散发量(E)以及径流深均增大,而降水量(P)减少了 567.47 mm,潜在蒸散发量和径流深分别增加了 69.01 mm 和 34.9 mm,下垫面特征值减少了 0.37;根据弹性系数值分析,渭河上游径流量与降水量之间存在正相关关系,而与潜在蒸散发量及 n 呈现负相关,即当 n 增大时,流域的径流深(R)会相应减少。与基准期相比,变化期各变量弹性系数 ε_p 从 1.78 减少到 1.37, ε_E 从-0.77 增大到-0.37, ε_n 从-2.18 增大到-1.42。结果表明:基准期,降水量每减

少 1 mm 会引起径流深减少 1.78 mm,潜在蒸散发量每增加 1 mm 会引起径流深减少 0.77 mm;变化期,降水量每减少 1 mm 会导致径流深减少 1.37 mm,潜在蒸散发量每增加 1 mm 会导致径流深减少 0.37 mm。

3.3.2 贡献率

定量分析 1994—2018 年(影响期)相较于 1980—1993 年(基准期),渭河上游径流量减少的贡献率。在整个时间段,降水量、下垫面所引起的渭河上游径流深分别增加了 29.16、50.50 mm,潜在蒸散发所引起的径流深减少了 1.92 mm。基准期到影响期渭河上游径流深共减少了 78.18 mm,其中下垫面改变、潜在蒸散发和降水对径流变化的贡献率分别为 64.60%、-2.47%和 37.87%。

在敏感性分析中,降水、潜在蒸散发、下垫面对径流量的敏感性均不相同,其中下垫面敏感性最高,降水次之。即下垫面变化是径流量变化的关键因素,且变化期降水对径流量的敏感程度相较于基准期有所减少。

在贡献率分析中,气候变化和下垫面改变是影响径流变化的两个主要因素,其中气候变化主要是降水和潜在蒸散发对径流的影响。通过对流域内年降水量的趋势分析可知,1980—2018 年流域的年降水量变化并不显著,表明渭河上游气候条件较为稳定。通过互补法计算,气候变化对渭河上游径流减少的影响占 35.4%,下垫面改变对径流变化的贡献率为 64.60%。因此,下垫面变化是渭河上游径流量减少的一个关键因素。

4 径流变化驱动因素分析

4.1 渭河上游径流变化

渭河上游降水序列 1970—2018 年较为稳定,无显著变化。其余水文气象要素序列在 1970—2018 年均呈显著下降趋势,这与唐骄宇等^[32]的研究

表 1 渭河上游各水文站突变检验

水文站	突变年份					
	Pettitt 检验法	有序聚类法	Man-Kendall 法	滑动 T 检验法	累积距平法	Bayes 检验法
北道	1994 年	1993 年	1986 年	1993 年	1993 年	1993 年
甘谷	1995 年	1992 年	1993 年	1992 年	1994 年	1992 年
秦安	1995 年	1992 年	1988 年	1993 年	1993 年	1992 年
天水	1990 年	1989 年	1989 年	1989 年	1989 年	1989 年
武山	1994 年	1993 年	1988 年	1993 年	1993 年	1993 年
渭河上游	1994 年	1993 年	1986 年	1993 年	1993 年	1993 年

表 2 渭河上游各影响因子敏感性系数

Table 2 Sensitivity coefficients of various impact factors in upper reaches of the Wei River

时段	E	R/mm	P/mm	n	R/P	E/P	ε_p	ε_E	ε_n
1980—1993 年	838.35	29.2	16056.74	0.94	0.0018	0.052	1.78	-0.77	-2.18
1994—2018 年	907.36	64.1	15489.27	0.57	0.0041	0.058	1.37	-0.37	-1.42

结果一致。北道、甘谷、秦安、武山站径流呈均下降趋势,其中甘谷站下降速率最快,北道站水量最大,综合多种突变方法得出各站点突变年份集中在 20 世纪交接年份,与唐骅宇等^[32-33]各干、支流径流突变结果相似,且认为滑动 T 检验法更适用于渭河上游。

4.2 渭河上游径流变化驱动因素

采用滑动 T 检验法检验渭河上游 1980—2018 年水文气象序列的变异点(通过比较 T 值和临界值 $t=\alpha/2$,可以判断时间序列在某个时间点是否存在突变),结果如图 6 所示。径流序列在 1993 年发生明显转折,即在 1993 年发生突变;降水序列在 2012 年发生突变;潜在蒸散发序列在 1993 年发生突变利用 Arcgis Pro 软件对土地利用空间数据进行处理,得到 2000—2020 年渭河上游各类土地利用类型所占的比例(表 3)。可知,不同土地利用类型面积从大到小为:耕地、草地、林地、建设用地、水域和未利用土地。在不同土地利用类型中,耕地与草地的面积占比居首位,2020 年耕地面积和草地面积分别为 13440、12801 km²。自 2000 年以来,渭河上游耕地面积占比减少(2.57%),林地面积(1.04%)、草地面积(1.01%)、水域面积(0.07%)、建设用地面积(0.81%)占比均增大,未利用土地面积占比无变化。

表 3 渭河上游不同土地利用类型占比

土地利用类型	土地利用类型占比/%				
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
耕地	45.73	45.90	44.91	44.58	43.16
林地	11.40	11.45	11.46	11.45	12.08
草地	40.10	40.61	40.71	40.66	41.11
水域	0.56	0.57	0.57	0.60	0.63
建设用地	1.92	2.01	2.02	2.34	2.73
未利用土地	0.28	0.28	0.33	0.37	0.28

n 值作为代表下垫面特征的参数,在考虑土壤、地形和植被等因素的同时,人类耗水对径流也存在一定的影响。本文对人类活动仅考虑了下垫面变化的影响。研究区土地利用类型中,林地和草地具有较高

的植被覆盖度和蒸散发强度,即具有较高的 n 值;建设用地具有较低的 n 值;水域的蒸散发量相对稳定,对 n 值的影响较小;未利用土地对 n 值的影响取决于其具体的土地条件,如土壤、植被覆盖度等。

从 2000—2020 年整个时段看,除耕地面积减少以外,其他 5 种土地利用类型面积均在增加。耕地面积减少,林地、草地面积增大,即 n 值增加;建设用地动态度远大于林地、草地动态度,整体上 n 值减小,与渭河上游径流驱动因素定量识别计算结果相一致。根据已有的栅格数据分别计算渭河上游 2000—2005 年、2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2020 年土地利用动态度(表 4),可见,①2000—2005 年,耕地面积的动态度为负值,表明渭河上游耕地面积有所减少;其他土地利用类型面积的动态度为正值,表明渭河上游其他土地利用类型的面积均有所增加,林地、草地面积小幅增加,建设用地面积也在增加;未利用土地面积的动态度为 0,说明在该时段内未利用土地面积基本保持不变。②2005—2010 年,耕地面积持续减少但速度放缓,其余土地利用类型面积都在增加。③2010—2015 年,耕地、林地、草地面积都在减少,其余土地利用类型(水域面积、建设用地和未利用土地)面积均在增加。④2015—2020 年,耕地面积快速减少,林地、草地和水域面积增加,建设用地急剧增加,未利用土地面积减少。

表 4 渭河上游不同土地利用类型动态度

土地利用类型	土地利用类型动态度/%				
	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年	2000—2020 年
耕地	-0.28	-0.08	-0.15	-0.77	-1.12
林地	0.08	0.01	-0.01	1.10	1.19
草地	0.25	0.05	-0.03	0.20	0.51
水域	0.11	0.11	1.24	2.15	2.40
建设用地	0.90	0.10	3.12	7.06	8.41
未利用土地	0.00	3.72	2.55	-2.75	0.47

总体上,耕地在总流域面积的比例逐渐减小,反

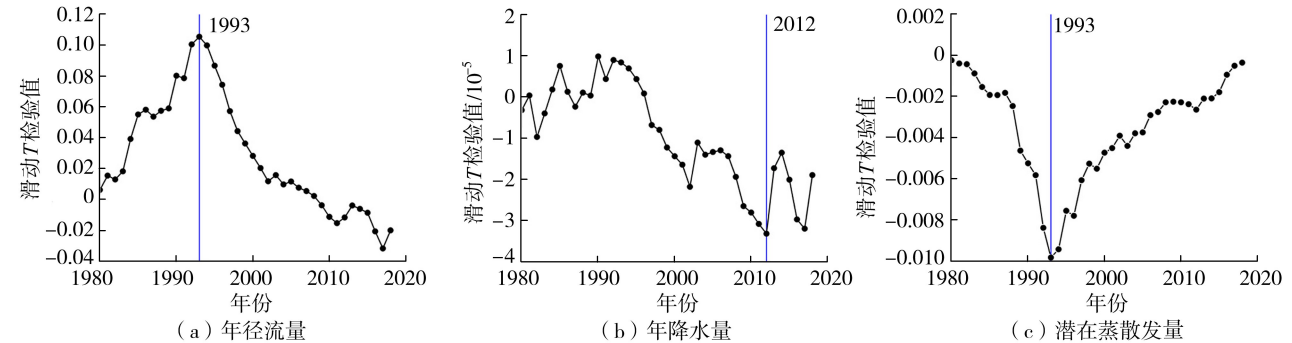


图 6 渭河上游水文、气象要素突变检验

Fig. 6 Analysis of sudden changes in hydrological and meteorological elements in upper reaches of the Wei River

映了渭河上游水土保持工作的初步成效。21 世纪以来,黄土高原大规模水土保持工程的成效陆续凸显,筑堤、引水灌溉和兴建水库等均会导致地表水滞留,从而增加了蒸散发量;黄河上游植被覆盖持续增加,地表覆被变好,流域变绿,也导致流域蒸散发量持续增加,进一步驱动了径流量的减少。渭河上游林地、草地均会导致径流量减少^[34]。

本文进一步揭示了渭河上游气象要素和径流的变化趋势,径流量与降水、潜在蒸散发、温度均符合线性关系,且降水与径流量关系更为密切,径流量的增加与降水的增加有直接关系。随着气温升高,径流与蒸发的增加为间接关联。采用 Budyko 理论,利用水量平衡原理,得出人类活动是影响渭河上游径流变化的主导因素,降水是影响径流变化关键因素的结论。

5 结 论

a. 渭河上游径流量在 1980—2018 年里以每 10 a 0.5 亿 m³ 的速度减少,且未来一段时间内径流量仍会呈现显著下降趋势。干流及各支流径流量除天水站呈上升趋势外,其余均呈下降趋势,其中甘谷站径流量下降速率最快,水量最小,北道站水量最大。综合多种突变方法,得出滑动 *T* 检验法更适用于判断渭河上游径流量突变点,各站点突变年份集中在 20 世纪交接年份,年径流量在 1993 年发生显著突变。

b. 渭河上游降水序列呈不显著上升趋势($p>0.5$),其他气象序列均随时间呈显著上升趋势($p<0.5$)。降水量序列在 2012 年发生突变,潜在蒸散发序列在 1993 年发生突变,降水较潜在蒸散发存在滞后性。渭河上游除耕地面积减少以外,其他 5 种土地利用类型面积均在增加。

c. 径流对各驱动因素的敏感性为人类活动大于降水大于潜在蒸散发。利用 Budyko 理论计算贡献率,其中,气候变化对径流变化的影响占 35.40%,降水占 37.87%,下垫面改变对径流减少的贡献率为 64.60%。这是气候和人类活动综合影响的结果,人类活动是渭河上游径流变化的主导因素,降水是关键因素。

参考文献:

[1] 沈嘉聚,杨汉波,刘志武,等. 长江上游径流对气象要素变化的敏感性分析[J]. 水资源保护,2023,39(1):119-126. (SHEN Jiaju, YANG Hanbo, LIU Zhiwu, et al. Sensitivity analysis of annual runoff to annual variation of meteorological elements in upper reaches of the Yangtze River[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (1): 119-126. (in Chinese))

[2] MA Zhenmei, KANG Shaozhong, ZHANG Lu, et al. Analysis of impacts of climate variability and human activity on streamflow for a river basin in arid region of northwest China [J]. Journal of Hydrology, 2008, 352: 239-249.

[3] XU Xiangyu, YANG Dawen, YANG Hanbo, et al. Attribution analysis based on the Budyko hypothesis for detecting the dominant cause of runoff decline in Haihe Basin [J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 530-540.

[4] WU Jingwen, ZHENG Haiyan, XI Yang. SWAT-based runoff simulation and runoff responses to climate change in the headwaters of the Yellow River, China [J]. Atmosphere, 2019, 10(9):509.

[5] FU Jianyu, LIU Bingjun, WANG Weiguang, et al. Evaluating main drivers of runoff changes across China from 1956 to 2000 by using different Budyko-based elasticity methods [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 329: 117070.

[6] LIN Xi, ZHANG Shengwei, ZHAO Xingyu, et al. Global thresholds for the climate-driven effects of vegetation restoration on runoff and soil erosion [J]. Journal of Hydrology, 2025, 647: 132374.

[7] MILLY P C, KAM J, DUNNE K A. On the sensitivity of annual streamflow to air temperature [J]. Water Resources Research, 2018, 54(4):2624-2641.

[8] ZHANG Sulei, YANG Yuting, MCVICAR T R, et al. An analytical solution for the impact of vegetation changes on hydrological partitioning within the Budyko framework [J]. Water Resources Research, 2018, 54(1):519-537.

[9] 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 Weiguang, LU Wenjun, XING Wanqiu, et al. Analysis of change and attribution of Budyko equation parameter *n* in Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(2):7-13. (in Chinese))

[10] 陈蒙恩,魏兴,周育琳,等. 基于 Budyko 假设的三峡库区蓄水前后径流变化归因识别 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(2):76-84. (CHEN Meng'en, WEI Xing, ZHOU Yulin, et al. Attribution identification of runoff change before and after impoundment in the Three Gorges Reservoir area based on Budyko hypothesis [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2):76-84. (in Chinese))

[11] ZHANG Yifan, PENG Jianzhuang, XU Hang, et al. An extended time-varying Budyko framework for quantifying the hydrological effect of vegetation restoration under climate variations at watershed scale [J]. Environmental Research, 2024, 251(2):118730.

[12] SU Tao, WANG Shuting, SUN Siyang, et al. Analysis of actual evapotranspiration changes in China based on multi-source data and assessment of the contribution of driving factors using an extended Budyko framework [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2023, 155: 1653-

- [13] LI Huijuan, SHI Changxing, ZHANG Yusheng, et al. Using the Budyko hypothesis for detecting and attributing changes in runoff to climate and vegetation change in the soft sandstone area of the middle Yellow River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 703: 135588.
- [14] 师卫钊,何毅,邵伟婷.嘉陵江上游径流变化及其影响因素归因分析[J].水土保持学报,2023,37(3):124-131. (SHI Weizhao, HE Yi, SHAO Yiting. Attribution analysis of runoff change and its influencing factors in the upper reaches of Jialing River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 124-131. (in Chinese))
- [15] TORABI H A, SADEGH M, BEHROOZ-KOOHENJANI S, et al. The mirage water concept and an index-based approach to quantify causes of hydrological changes in semi-arid regions [J]. Hydrological Sciences Journal, 2020, 65(2): 311-324.
- [16] 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))
- [17] 江善虎,任明明,章二子,等.基于非平稳 GEV 模型的黄河源区枯季径流演变特征分析[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):1-7. (JIANG Shanhu, REN Mingming, ZHANG Erzi, et al. Study on evolution characteristics of dry season runoff using a non-stationary GEV model in Source Region of the Yellow River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 1-7. (in Chinese))
- [18] 郭爱军,畅建霞,黄强,等.渭河流域气候变化与人类活动对径流影响的定量分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(8):212-220. (GUO Aijun, CHANG Jianxia, HUANG Qiang, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on runoff change in Weihe Basin[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2014, 42(8): 212-220. (in Chinese))
- [19] ALLAN R, PEREIRA L, MARTIN S. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[R]. FAO Irrigation and Drainage Paper. Rome:FAO,1998:56.
- [20] VICENTE-SERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZ-MORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [21] 郭爱军,畅建霞,王义民,等.近 50 年泾河流域降雨-径流关系变化及驱动因素定量分析[J].农业工程学报,2015,31(14):165-171. (GUO Aijun, CHANG Jianxia, WANG Yimin, et al. Quantitative analysis of the impacts of climate change and human activities on runoff change in Weihe Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(14): 165-171. (in Chinese))
- [22] 袁满,王文圣,叶濒麟.有序聚类分析法的改进及其在水文序列突变点识别中的应用[J].水文,2017,37(5):8-11. (YUAN Man, WANG Wensheng, YE Binlin. Improvement of sequential clustering method and its application to diagnose jump points of hydrological series [J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(5): 8-11. (in Chinese))
- [23] 管晓祥,张建云,鞠琴,等.多种方法在水文关键要素一致性检验中的比较[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(2):51-56. (GUAN Xiaoxiang, ZHANG Jianyun, JU Qin, et al. Comparison of consistency testing for key hydrological elements by using multiple statistical methods[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 51-56. (in Chinese))
- [24] 龚珺夫,李占斌,任宗萍.延河流域径流过程对气候变化及人类活动的响应[J].中国水土保持科学,2016,14(5):57-65. (GONG Junfu, LI Zhanbin, REN Zongping. Responses of runoff process to climate change and human activities in Yanhe River Basin [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(5): 57-65. (in Chinese))
- [25] 孙卫国,程炳岩.交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J].应用气象学报,2008(4):479-487. (SUN Weiguo, CHENG Bingyan. Application of cross wavelet transformation to analysis on regional climate variations [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008(4): 479-487. (in Chinese))
- [26] CHOUDHURY B. Evaluation of an empirical equation for annual evaporation using field observations and results from a biophysical model[J]. Journal of Hydrology, 1999, 216(1/2): 99-110.
- [27] YANG Hanbo, YANG Dawen, LEI Zhidong, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation [J]. Water Resources Research, 2008(3): 44.
- [28] 叶婷,石朋,钟华,等.基于 Budyko 假设和微分方程的淮河北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 Ting, SHI Peng, ZHONG Hua, et al. Attribution analysis of runoff change in the upper and middle Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 25-32. (in Chinese))

(下转第 227 页)

adjustment at the leading edge of a submerged aquatic canopy[J]. *Water Resources Research*. 2013, 49(9): 5537-5551.

[19] LEI Jiarui, NEPF H. Evolution of flow velocity from the leading edge of 2-D and 3-D submerged canopies[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 916:197.

[20] LIU Chao, HU Zhenghong, LEI Jiarui, et al. Vortex structure and sediment deposition in the wake behind a finite patch of model submerged vegetation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 144(2): 4017065.

[21] ZONG Lijun, NEPF H. Vortex development behind a finite porous obstruction in a channel[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, 691:368-391.

[22] CHUNG H, KOSEFF J. Turbulence structure and scales in canopy-wake reattachment[J]. *Physical Review Fluids*, 2021, 6:114605.

[23] YANG Qingjun, NEPF H. A turbulence-based bed-load transport model for bare and vegetated channels[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(19): 10428-10436.

[24] CHANG W Y, CONSTANTINESCU G, TSAI W F. Effect of array submergence on flow and coherent structures through and around a circular array of rigid vertical cylinders[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(3): 35110.

[25] NEPF H. Hydrodynamics of vegetated channels[J]. *Journal of Hydraulic Research*. 2012, 50(3): 262-279.

[26] POGGI D, PORPORATO A, RIDOLFI L, et al. The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence[J]. *Boundary Layer Meteorology*, 2004, 111(3): 565-580.

[27] THIELICKE W, STAMHUIS E J. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB[J]. *Journal of Open Research Software*, 2014, 2:1.

[28] NICOLLE A, EAMES I. Numerical study of flow through and around a circular array of cylinders[J]. *Journal of Fluid Mechanics*. 2011, 679:1-31.

[29] 姚春萍, 杨江龙, 汪精云, 等. 河流中低淹没度下刚性沉水植被阻力系数改进研究[J]. *水电能源科学*, 2024, 42(4): 62-66. (YAO Chunping, YANG Jianglong, WANG Jingyun, et al. Study of resistance coefficient of rigid vegetation in low submergence[J]. *Water Resources and Power*, 2024, 42(4): 62-66. (in Chinese))

[30] KOTHYARI U C, HASHIMOTO H, HAYASHI K. Effect of tall vegetation on sediment transport by channel flows[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47(6): 700-710.

[31] SONNENWALD F, STOVIN V, GUYMER I. Estimating drag coefficient for arrays of rigid cylinders representing emergent vegetation[J]. *Journal of Hydraulic Research*. 2019, 57(4): 591-597.

[32] WHITE F M. Viscous fluid flow[M]. New York: McGrawHill, 1991.

[33] ETMINAN V, LOWE R J, GHISALBERTI M. A new model for predicting the drag exerted by vegetation canopies[J]. *Water Resources Research*, 2017, 53(4): 3179-3196.

[34] TINOCO R O, COWEN E A. The direct and indirect measurement of boundary stress and drag on individual and complex arrays of elements[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(4): 1509.

(收稿日期: 2024-12-31 编辑: 胡新宇)

(上接第 218 页)

[29] ZHOU Sha, YU Bofu, ZHANG Lu, et al. A new method to partition climate and catchment effect on the mean annual runoff based on the Budyko complementary relationship[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(9): 7163-7177.

[30] 钟昊哲, 徐宪立, 张荣飞, 等. 基于 Penman-Monteith Leuning 遥感模型的西南喀斯特区域蒸散发估算[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(5): 1617-1625. (ZHONG Haozhe, XU Xianli, ZHANG Rongfei, et al. MODIS-driven estimation of regional evapotranspiration in Karst area of southwest China based on the Penman-Monteith-Leuning algorithm[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(5): 1617-1625. (in Chinese))

[31] 贾路, 于坤霞, 李占斌, 等. 秦岭山区潜在蒸散发时空变化及典型流域径流归因分析[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(24): 59-71. (JIA Lu, YU Kunxia, LI Zhanbin, et al. Spatiotemporal variation of potential evapotranspiration in the Qinling Mountain Areas and attribution analysis of typical watershed runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2024, 40(24): 59-71. (in Chinese))

[32] 唐骄宇. 渭河上游水文要素特征与非一致性演变规律分析[D]. 西安: 长安大学, 2023.

[33] 吴延锐. 变化环境下渭河上游河川径流统计非一致性物理溯源研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.

[34] 张晔, 侯精明, 龚佳辉, 等. 1980—2020 年渭河中上游流域土地利用演变及其对径流的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 231-237. (ZHANG Ye, HOU Jingming, GONG Jiahui, et al. Land use evolution and its impact on runoff response in middle and upper reaches of Weihe River Basin during 1980—2020[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 231-237. (in Chinese))

(收稿日期: 2024-09-26 编辑: 胡新宇)