

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.034; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.034.

宋阁庆, 马晓燕, 王茂林, 等. 基于 Budyko 理论的长江典型流域径流演变与归因分析[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 172-180.

Song Geqing, Ma Xiaoyan, Wang Maolin, et al. Runoff evolution and attribution analysis of typical river basins in the Yangtze River based on Budyko theory[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 172-180.

基于 Budyko 理论的长江典型流域径流演变与归因分析

宋阁庆¹, 马晓燕², 王茂林², 袁春慧², 杨陈², 王飞², 邓悦³

(1. 甘肃省水文站, 兰州 730030;

2. 兰州理工大学 能源与动力工程学院, 兰州 730050; 3. 扶风县水利工作站, 陕西 宝鸡 722999)

摘要: [目的] 探究变化环境下的长江典型流域径流演变和驱动因素, 量化气候变化及下垫面变化对流域径流变化的贡献率, 以为白水江流域水资源优化配置和流域治理提供科学依据。[方法] 采用 Mann-Kendall 趋势检验、交叉小波分析和 Budyko 理论等研究方法, 分析了白水江流域 1970—2016 年的年径流量演变规律及其影响因素。[结果] (1) 白水江流域年径流量呈显著 ($p < 0.05$) 下降趋势, 径流和降水突变年份均在 1994 年。(2) 白水江流域年径流量与年降水量呈正相关性关系, 径流深在影响期 (1995—2016 年) 相比基准期 (1970—1994 年) 对年降水量最敏感, 其次为潜在蒸散发量和下垫面参数。(3) 量化解析了下垫面、年降水量和潜在蒸散发量对白水江流域径流的贡献率, 其中, 下垫面贡献率为 46.14%, 降水量贡献率为 41.02%, 潜在蒸散发量贡献率为 12.84%。[结论] 1970—2016 年白水江流域年径流量和年降水量均呈下降趋势, 白水江流域径流的驱动因素是由于气候和人类活动的综合影响。降水是导致白水江流域径流减少的主要气候因素, 下垫面变化是白水江流域径流减少的一个关键因素。

关键词: Budyko 理论; 径流; 归因分析; 白水江流域

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0172-09

Runoff evolution and attribution analysis of typical river basins in the Yangtze River based on Budyko theory

Song Geqing¹, Ma Xiaoyan², Wang Maolin²,

Yuan Chunhui², Yang chen², Wang Fei², Deng Yue³

(1. Gansu Hydrometric Station, Lanzhou 730030, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Fufeng County Water Conservancy Workstation, Baoji, Shaanxi 722999, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the runoff evolution and driving factors in the typical Yangtze River basin under changing environment, to quantify the contribution rate of climate change and underlying surface change to the runoff change in the basin, and to provide scientific basis for the optimal allocation of water resources and basin management in the Baishuijiang River basin. [Method] Mann-Kendall trend test, cross wavelet analysis and Budyko theory were used to explore the evolution pattern of annual runoff and its influencing factors in Baishui River Basin from 1970 to 2016. [Results] (1) The annual runoff in the Baishui River Basin showed a significant ($p < 0.05$) decreasing trend, and the year of sudden changes in runoff and precipitation was all in 1994. (2) There was a positive correlation between annual runoff and annual precipitation in the Baishui River Basin. The runoff depth was the most sensitive to annual precipitation in the influence period (1995—2016) compared with the base period (1970—1994), followed by potential evapotranspiration and underlying surface parameters. (3) The contribution rates of underlying surface, annual precipitation and potential evapotranspiration to runoff in Baishui River Basin were

收稿日期: 2024-03-26

修回日期: 2024-05-24

资助项目: 甘肃水利科学试验研究及技术推广计划(甘水建管发[2022]59号); 国家自然科学基金资助(42367010)

第一作者: 宋阁庆(1982—), 男, 甘肃兰州人, 研究方向为水文学水资源学和径流洪水预测。E-mail: 13609305665@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

quantitatively analyzed. Among them, the contribution rate of underlying surface was 46.14%, the contribution rate of precipitation was 41.02%, and the contribution rate of potential evapotranspiration was 12.84%. [Conclusion] The annual runoff and annual precipitation in the Baishui River Basin showed a downward trend from 1970 to 2016. The driving factors of runoff in the Baishui River Basin were due to the combined effects of climate and human activities. Precipitation was the main climatic factor leading to the decrease of runoff in Baishui River Basin, and the change of underlying surface was a key factor for the decrease of runoff in Baishui River Basin.

Keywords: Budyko hypothesis; runoff; Attribution analysis; Baishuijiang River Basin

受全球变暖及日益增强的人类活动等因素的影响,流域水循环过程已发生明显改变,进而引发极端水文事件频发^[1]。这给区域经济的可持续发展、生态环境的保护和流域水资源的管理带来了巨大挑战^[2]。在全球变暖的影响下,加剧了降水、蒸发和径流的水文循环,从而改变水资源的时空分布,并对水资源的利用方式产生影响^[3]。因此,为了更好地管理水资源,分析在不断变化的环境下径流演变特征及驱动因素尤为重要。

全球变暖与人类活动对河川径流量有重要影响,对径流变化的贡献已成为研究的重点关注^[4]。然而,流域水文循环过程受降水、蒸发、下垫面条件等多种因素影响,其随机性、非线性和可变性更为复杂^[5]。目前国内外学者,对径流变化评估的方法有很多,如水文模型^[6]、经验统计^[7]和 Budyko 框架^[8]。Budyko 框架,是水文科学中研究流域水热耦合关系的重要方法,它认为流域实际蒸散量是潜在蒸散量与降水量的函数,时间尺度从最初的多年平均逐渐缩降到年际过程以及年内季节变化,函数形式从无参数型发展到有参数型^[9]。但是,这种方法在求偏导数时方法不唯一,其计算结果与实际观测结果存在一定的偏差^[10]。因此,Zhou 等^[11]应用互补关系模型,在 Budyko 假设的基础上将影响径流变化的因素分为气象因素和下垫面因素,从理论上消除误差,提高归因分析的准确度。与其他方法相比,在 Budyko 假设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^[12]。叶婷等^[13]基于 Budyko 框架,结果得出,人类活动对淮河中上游径流的贡献率达到 80% 以上。申滔滔^[14]基于 Budyko 假设,对漳河流域的径流变化进行分析,研究表明,气候变化和人类活动对径流变化的贡献率基本相同。师卫钊等^[15]基于 Budyko 假设,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减少的贡献率为 50%~60%。白水江流域为长江典型流域,其现阶段较关注洪水分析、暴雨和水电站

的开发等研究,对降水和径流相关性的研究很少。因此,本文采用 Mann-Kendall 趋势检验法、交叉小波函数法等方法分析白水江流域水文、气象要素演变特征,应用 Budyko 理论进行径流归因分析,量化气候因子和下垫面变化对径流的贡献率。本文对流域内生态用水、水库调度、水资源开发利用、国家自然保护区的建立等方面具有重要意义。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

白水江流域地处 32°36'—33°00' N, 104°16'—105°25' E(图 1),位于甘肃省南部,流域面积 8 316 km²,全长 287 km,发源于岷山脉东麓,天然落差 2 958 m,河床平均比降约为 10.3%,白水江,其上游流经四川省北部高原,下游位于甘肃省南部文县山林区,属于嘉陵江二级支流,白龙江一级支流^[16]。白水江干流(包括主要源头)从大录乡至青龙桥河段长 120.8 km,天然落差达到 1 326 m,河道平均比降为 11%。该区域水能资源丰富,是九寨沟县境内水电开发的重要河段^[17]。流域内气候温和宜人,涵盖暖温带半干旱气候、中温带气候以及寒温带季风气候。这些气候类型共同构成了流域内独特且丰富的气候环境。该地区年均气温 15.6 °C,年均降水量 932.5 mm,无霜期约 276 d^[18]。

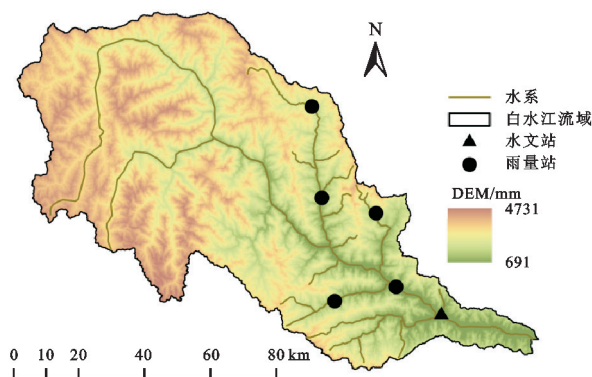


图 1 研究区 DEM 图

Fig. 1 The DEM of the study area

1.2 数据来源及预处理

本文使用的数据包括:年降水量数据、数字高程模型(DEM)、年径流量数据,详见表 1、2。

1.3 研究方法

1.3.1 Mann-Kendall 趋势检验法 在时间序列趋势分析中,Mann-Kendall 趋势检验法是一种非参数统计检验的方法^[19],它不要求样本服从某种特殊的分布,且检验效果不受异常值干扰。本研究采用 Mann-

Kendall 趋势检验法,对白龙江流域的降水和水文要素进行了趋势检验。

表 1 数据来源

Table 1 Data Source

数据类型	数据来源
降雨数据	甘肃省水文站
数字高程模型	http://www.geodata.cn
径流数据	甘肃省水文站

表 2 水文气象站点基本情况

Table 2 Basic information of hydrometeorological stations

站点	经度	纬度	数据长度	最大值	最小值	平均值
博峪	104.38	33.44	1970—2016	1981(184.0 mm)	1979(121.1 mm)	530.5 mm
中寨	104.42	33.19	1970—2016	1990(661.4 mm)	1997(356.4 mm)	487.7 mm
气象站 长草坝	104.60	33.15	1970—2016	1993(1046.5 mm)	2016(362.6 mm)	733.7 mm
铁楼寨	104.46	32.91	1970—2016	1990(817.9 mm)	1974(305.3 mm)	580.6 mm
文县	104.67	32.95	1970—2016	1990(590.9 mm)	2004(295.8 mm)	429.3 mm
水文站 尚德	104.82	32.88	1970—2016	1990(40.05 亿 m ³)	2002(21.66 亿 m ³)	30.62(亿 m ³)

1.3.2 R/S 分析法 R/S 分析法^[20]定义了极差 R 与标准差 S 。其比值即:

$$R(t)/S(t) = (Ct)^H \quad (1)$$

式中: H 即为 Hurst 指数。Hurst (H) 作为判断时间序列数据遵从随机游走还是有偏的随机游走过程的指标^[21]。

$H = 0.5$, 则代表未来序列随机独立; $0 \leq H < 0.5$, 代表反持续性; $H > 0.5$, 表现为与原有趋势一致的正持续性。

1.3.3 Pettitt 检验法 Pettitt 检验法利用 Mann-Whitney 的非参数统计量,通过对水文气象要素序列进行变异分析,可获得具有统计意义的变异点,并对突变点的显著性进行定量分析。其中 Mann-Whitney 非参数统计量为^[22]:

$$U_{(t,N)} = U_{(t-1,N)} + \sum_{i=1}^n \text{sng}(x_t - x_i) \quad (2)$$

$$(t=2,3,4,\dots,n)$$

根据其统计量可计算:

$$K_{t,N} = \max |U_{t,N}|, (1 \leq t \leq N) \quad (3)$$

$$p = 2 \exp[-6U_{(t,N)}^2 / (N^3 + N^2)] \quad (4)$$

$p \leq 0.05$ 时,数据存在突变点。

式中: x_1, \dots, x_n 为时间序列。

1.3.4 交叉小波分析 两个时间序列的连续小波变换,它们之间的交叉小波变换为 $W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s)$ 其中 s 为时滞, $W_n^{Y*}(s)$ 表示 $W_n^Y(s)$ 的复共轭。交叉小波功率谱为 $|W_n^{XY}(s)|$, 该值越大,两者之间的相关性越高。对于两个平稳随机过程,交叉小波变换的标准化形式可写为小波互相关系数^[23]:

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n [W_i^X(s) - \overline{W_i^X}(s)] [W_i^Y(s) - \overline{W_i^Y}(s)] \times \frac{1}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [W_i^X(s) - \overline{W_i^X}(s)]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n [W_i^Y(s) - \overline{W_i^Y}(s)]^2}} \quad (5)$$

本文选择 Morlet 小波为小波基函数。

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:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1} W_n^X(s))|^2}{S(s^{-1} |W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1} |W_n^Y(s)|^2)} \quad (6)$$

式中: S 表示平滑函数。Morlet 小波的平滑器可表示为:

$$S_{\text{time}}(\omega)|_s = (W_n(s) \cdot c_1 \frac{-t^2}{2s^2})|_s \quad (7)$$

$$S_{\text{time}}(\omega)|_s = (W_n(s) \cdot c_2 \Pi(0.6s))|_n \quad (8)$$

1.3.5 Budyko 理论

(1) 径流对气候和下垫面的弹性系数。采用 Choudhury^[24]和 Yang 等^[25]在 Budyko 理论上所提出的单参数 Budyko 方程以及流域水量平衡方程:

$$R = P - \frac{\text{PET}_0}{(P^n + \text{ET}_0^n)^{\frac{1}{n}}} \quad (9)$$

式中:潜在蒸散发量 ET_0 (mm);降水量 P (mm);径流深 R (mm);下垫面状况的参数 n 与地形因素、土地表面渗水能力和植被状况等密切相关, n 值的大小受到这些因素的影响^[26]。在式(9)中,已知 R, P 和 ET_0 , 参数 n 。

$$\text{令 } \epsilon_p = (dR/R)/(dP/P); \epsilon_{\text{ET}_0} = (dR/R)/(dP);$$

$\epsilon_n = (dR/R)(dn/n)$; $\varphi = ET_0/P$, 分别表示径流对降水、潜在蒸散发、下垫面的弹性系数和潜在蒸散发和降水量之比。该弹性系数可表明径流对各气候因素的敏感性大小, 径流对各变量的弹性系数为^[27]:

$$\epsilon_P = \frac{(1+\varphi^n)^{\frac{1+n}{n}} - \varphi^{n+1}}{(1+\varphi^n)[(1+\varphi^n)^{\frac{1}{n}} - \varphi]} \quad (10)$$

$$\epsilon_{ET_0} = \frac{(1+\varphi^n)^{\frac{1+n}{n}} - \varphi^{n+1}}{(1+\varphi^n)[1 - (1+\varphi^{-n})^{\frac{1}{n}}]} \quad (11)$$

$$\epsilon_n = \frac{\ln(1+\varphi^n) + \varphi^n \ln(1+\varphi^{-n})}{n[(1+\varphi^n) - (1+\varphi^{-n})^{\frac{1+n}{n}}]} \quad (12)$$

(2) Budyko 理论贡献率计算。Zhou 等^[11]通过假设 P 和 ET_0 相互独立, 提出径流对降水和潜在蒸散发的弹性系数具有互补关系的方程, 文中利用该方程计算贡献率, 该互补关系的方程为:

$$\frac{\partial R/R}{\partial P/P} + \frac{\partial R/R}{\partial ET_0/ET_0} = 1 \quad (13)$$

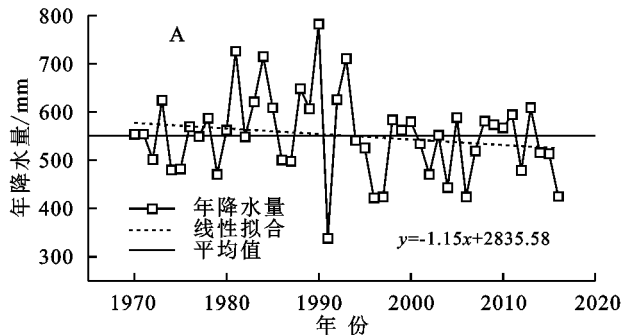
引入加权因子 α 来表征这种变化, 因为流域条件以及气候条件对径流改变的贡献不可分开, 即:

$$\Delta R = \alpha \left[\left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_1 \Delta P + \left(\frac{\partial R}{\partial ET_0} \right)_1 \Delta ET_0 + P_2 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right) + ET_{0,2} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial ET_0} \right) \right] + (1-\alpha) \left[\left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_2 \Delta P + \left(\frac{\partial R}{\partial ET_0} \right)_2 \Delta ET_0 + P_1 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right) + ET_{0,1} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial ET_0} \right) \right] \quad (14)$$

式中: α 的取值范围为 $[0, 1]$, 基于 Zhou 等^[11]的实际测算, α 取 0.5 时的模拟效果最好。

各变化量 (ΔR_x) 的计算公式分别如下:

$$\Delta R_P = \alpha \left[\left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_1 \Delta P \right] + (1-\alpha) \left[\left(\frac{\partial R}{\partial P} \right)_2 \Delta P \right] \quad (15)$$



$$\Delta R_{ET_0} = \alpha \left[\left(\frac{\partial R}{\partial ET_0} \right)_1 \Delta ET_0 \right] + (1-\alpha) \left[\left(\frac{\partial R}{\partial ET_0} \right)_2 \Delta ET_0 \right] \quad (16)$$

$$\Delta R_n = \alpha \left[P_2 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right) + ET_{0,2} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial ET_0} \right) \right] + (1-\alpha) \left[P_1 \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial P} \right) + ET_{0,1} \Delta \left(\frac{\partial R}{\partial ET_0} \right) \right] \quad (17)$$

式中: 下角标 1, 2 分别代表基准期和影响期。

贡献率 C_x :

$$C_x = \frac{\Delta R_x}{\Delta R} \times 100\% \quad (18)$$

2 结果与分析

2.1 白水江流域气象、水文要素时空分异

2.1.1 年降水量时空分异特征 利用 ArcGIS Pro 软件中的泰森多边形工具计算白水江流域的降水量。使用 Origin 2018, 对 1970—2016 年年降水量变化趋势进行分析 (图 2A), 并通过 Matlab 2016b, 使用 Mann-Kendall 趋势检验对其进行显著性检验。结合图 2A 可知, 白水江流域的年降水量在年际变化呈下降趋势, 年降水量的下降速率为 1.15 mm/a。白水江流域多年平均降水量为 550.916 mm, 最大值在 1990 年 (782.204 mm), 最小值在 1991 年 (38.187 mm)。通过 M-K 趋势分析, M-K 检验未通过置信水平 $\alpha = 0.05$ 的显著性检验, 表明白水江流域年降水量的下降趋势不显著。Hurst 指数 $H = 0.75$, 证明降水量未来保持下降趋势。

使用 Matlab 2016b 对白水江流域 1970—2016 (46 a) 年降水量进行 Pettitt 突变检验, 白水江流域年降水量序列通过 0.05 的显著性水平检验 (图 2B)。图中显示白水江流域突变发生的时间为 1994 年。

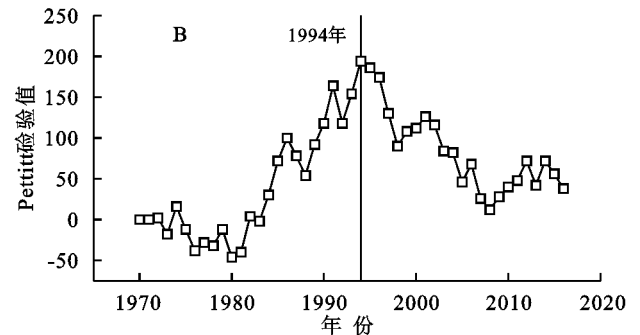


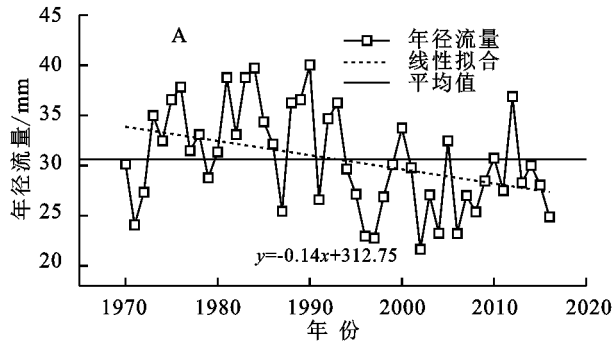
图 2 白水江流域年降水量分析

Fig. 2 Analysis chart of annual precipitation in Baishui River Basin

2.1.2 年径流量时空分异特征 使用 Origin 2018 作图软件绘制白水江流域 1970—2016 年年径流量的变化情况, 与对应年份进行线性拟合。同时, 绘制白

水江流域年径流量的年内分布 (图 3A)。从图 3A 可以看出, 在研究区间内白水江流域年径流量呈现下降趋势。白水江流域多年平均径流量为 30.626 亿 m^3 ,

最大值在 1990 年(40.051 亿 m^3),最小值在 2002 年(20.665 亿 m^3)。从线性拟合情况来看,年径流量呈现减小趋势,下降速率为 0.14 亿 m^3/a 。通过 MATLAB 2016b,使用 Mann-Kendall 趋势检验对径流序列进行显著性检验, Mann-Kendall 检验通过置信水平 $\alpha=0.05$,表明白水江流域年径流量下降趋势显



著。Hurst 指数 $H=0.84$,表明未来一段时间内年径流量仍会呈现显著下降趋势。

使用 MATLAB 2016b 对白水江流域 1970—2016(46 a)年径流量进行 Pettitt 突变检验(图 3B)。由图 3B 可知,白水江流域年径流量突变发生的时间为 1994 年,并通过 0.05 的显著性水平检验。

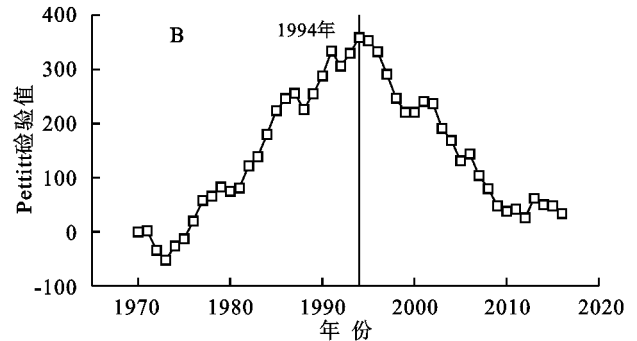


图 3 白水江流域年径流量分析

Fig. 3 Analysis chart of annual runoff in Baishui River Basin

2.2 白水江流域水文、气象要素相关性分析

小波能量谱与凝聚谱综合体现了相关性随时间、频率的变化。通过 MATLAB 2016b 对白水江流域径流与年降水量二者之间进行双时间序列的交叉小波变换和小波相关变换,得到交叉小波能量分析谱和小波凝聚谱(图 4)。图中,粗实线区域表示通过了 $\alpha=0.05$ 显著性检验,箭头表示它们之间的相关性。 $\rightarrow(\leftarrow)$ 表示影响因子与径流正相关(负相关), $\downarrow(\uparrow)$ 表示影响因子变化比径流变化提前 90° (落后 90°)(3 个月)。细弧线以内(小波影响锥)为有效值。由图

4B 得,白水江流域年径流量与年降水量呈明显的正相关性,表明流域内降水对径流具有持续性影响。由此可知,降水对径流变化起主导作用。

根据显著性检验结果,降水—径流相关性占整个小波影响锥区域内的约 70%,说明白水江流域的降水对径流补给起着主导作用。年均降水量—径流存在 1~3 a 与 4~7 a 的显著周期变化,在周期为 4~5 a 的较大值区域上,1992 年前后发生了共振周期的突变现象,即白水江流域在同一时刻经历了丰水和枯水周期的转变。

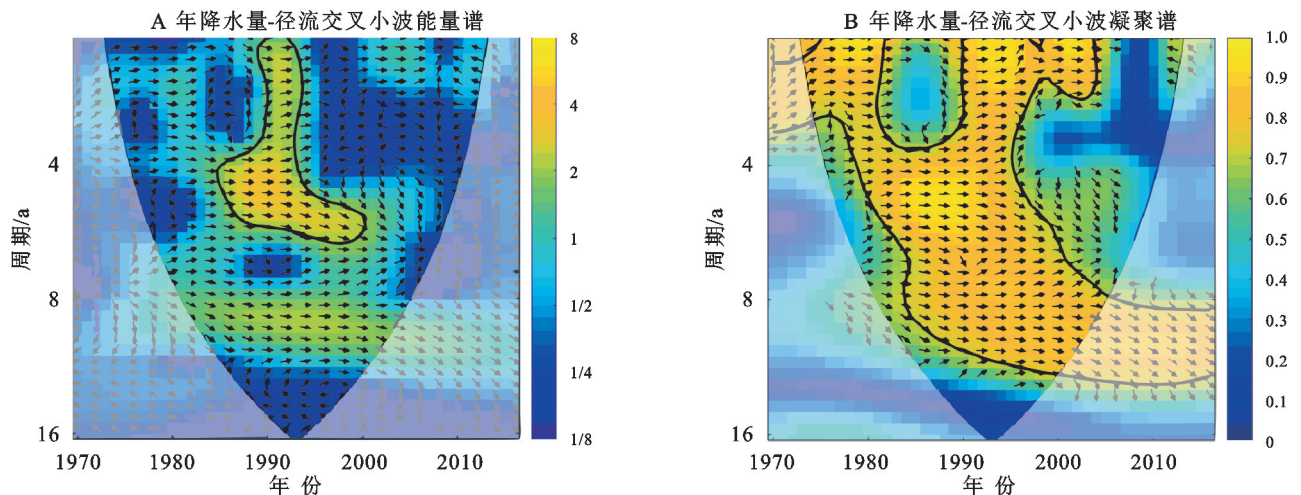


图 4 白水江流域年均降水量—径流交叉小波

Fig. 4 Annual precipitation-runoff cross-wavelet in the Baishui River basin

2.3 白水江流域气象、水文要素敏感性分析

根据突变检验的结果,确定基准期为 1970—1994 年,影响期为 1995—2016 年,利用公式(9)计算下垫面参数。利用公式(10),(11),(12)计算影响流

域径流的降水、潜在蒸散发、下垫面参数的弹性系数,结果见表 3。

由表 3 可知,影响期相对于基准期来说,潜在蒸发量增加了 137.79 mm,降水减少了 54.02 mm,径流

深减少了 84.90 mm,下垫面特征值则增加了 0.09;从弹性系数值可得,白水江流域径流变化量与 P 呈正相关、与 ET_0 和 n 值呈负相关。说明 P 增大,白水江流域径流深也增大; n 值增大,白水江流域径流深减小。影响期与基准期相比, ϵ_P 从 1.32 增大到 1.42;表明当降水量增加 10%时,1994 年前白水江流域径流

深会增加 13.2%,1994 年后白水江流域径流深会增加 14.2%。 ϵ_{ET_0} 从 -0.32 减小到 -0.42, ϵ_n 从 -0.88 减小到 -1.13,说明在影响期 ET_0 和 n 增加 10.0%时白水江流域径流深分别减少 4.2%和 11.3%。气候因子中, ET_0 对径流的敏感程度基本保持不变,这表明降水是影响径流变化的主要气候因素。

表 3 白水江流域影响径流的不同因素的敏感性系数

Table 3 Sensitivity coefficients of different factors affecting runoff in the Shui River basin

水文站	时段	ET_0	R/mm	P/mm	n	R/P	ET_0/P	ϵ_P	ϵ_{ET_0}	ϵ_n
尚德	1970—1994	1199.40	317.20	576.20	0.62	0.55	2.08	1.32	-0.32	-0.88
	1995—2016	1337.20	232.30	522.18	0.71	0.44	2.62	1.42	-0.42	-1.13

2.4 白水江流域径流变化归因分析

基于 Budyko 理论,利用互补关系方程式(13)计算贡献率 C 。由于流域条件以及气候条件对径流改变的贡献无法分开,使用公式(15),(16),(17)计算白水江流域各要素的变化量,最后使用公式(15)计算各个要素的贡献率,结果见表 4。由表 4 可知,降水量所引起的尚德站径流深减少了 37.84 mm,潜在蒸散发所引起的尚德站径流深减少了 11.04 mm 以及下垫面所引起的尚德站径流深减少了 39.54 mm,即白水江流域径流深共减少了 84.9 mm。其中在对径流变化的贡献率中,降水占比为 41.02%,潜在蒸散发占比为 12.84%,下垫面改变占比为 46.14%。

气候变化与人类活动是流域径流量变化的重要驱动因子,其中降水和潜在蒸散发是对径流影响的主要气候因素。这与 2.2 节白水江流域水文、气象要素相关性分析中,降水是影响径流主导因素的结果相一致。由 2.1 节对白水江流域年降水量的趋势分析可知,1970—2016 年的年降水量年际变化不显著,说明白水江流域的气候条件长期以来呈现出相对的稳定性。根据 Budyko 理论计算,气候变化导致的径流减少总量为 53.86%,降水占 41.02%。这表明在白水江流域径流减少的过程中,降水变化是主要的气候驱动因素。另一方面,下垫面改变对径流减少的影响贡献率达到了 46.14%。

表 4 白水江流域各影响因素对径流量变化的贡献率

Table 4 The contribution rate of various influencing factors to runoff change in Baishui River Basin

水文站	基准期	变化期	$\Delta R'/\text{mm}$	$\Delta R_P/\text{mm}$	$\Delta R_{ET_0}/\text{mm}$	$\Delta R_n/\text{mm}$	$C_P/\%$	$C_{ET_0}/\%$	$C_n/\%$
尚德	1970—1994	1994—2016	-85.97	-37.84	-11.04	-39.54	41.02	12.84	46.14

3 讨论

3.1 气候变化和人类活动对径流的影响

人类活动和气候因素对径流变化的影响显著,二者在其中所起的主导作用及贡献率大小一直是学术界及社会各界关注的焦点。徐宗学等^[28]研究西南河流源区径流驱动机制得出,雅鲁藏布江、三江源、怒江等地的径流量发生了明显的变化,而降雨又是其最重要的影响因素,这与本文研究结果相似。白水江流域径流受气候变化和人类活动的共同影响,其气候变化比人类活动对流域径流量变化的影响更显著。其中气候变化主要由降水量和潜在蒸散发变化这两个因素所影响,降水量的变化是最为重要的影响因素,这与陈蒙恩等在三峡库区蓄水前后径流变化归因识别研究中结果一致^[12]。同时水利工程运行、取用

水等人类活动也会对水文过程产生影响。而人类活动对径流量的影响主要体现在:(1) 用水量需求的增大。随着建设用地面积逐渐增大,人口增加,人类生活用水需求量增大,直接导致研究区径流量减少(表 5)。(2) 水利设施的建设。随着白水江流域梯级开发为典型的生态影响型工程以及流域内水利设施的完善,通过水库调度可以有效地消减洪峰,起到防洪排涝、合理供水的重要作用,对流域内耕地的灌溉起到积极作用。

白水江流域土地利用空间分布见图 5。林地为区域的主导土地利用类型,零散分布在流域的西北部,其面积占比 49.66%~49.92%。耕地其次,面积占比 42.13%~42.72%,主要集中在河谷水系附近,而草地多集中于生态区。未利用土地的面积占比 0.11%~0.34%,建设用地面积在 0.17%~0.28%波动。

2000—2020 年的土地利用转移矩阵(表 5)与和弦图(图 6)分析白水江流域的土地利用类型变化情况:2000—2020 年林地、草地和耕地面积均在增加,总转移面积转移 8 311 km²,其中耕地面积增加 301 km²,林地面积和草地面积分别增加了 3 096 km²,2 610 km²;其中 857 km²的草地和 182 km²耕地转变为林地。其建设用地、水域及未利用土地转化占比分

别为 0.19%,0.19%,0.31%。自 2000 年起,中国政府积极强化了水土保持综合治理工作,大力推动了退耕还林、还草等生态工程在全国范围内广泛实施,全国林地和草地面积实现了稳步增长,部分水利工程(兴建水库、引水灌溉、修建堤坝等)导致地表水长时间的停留,加大了蒸散发量^[29],白水江流域的林地、草地均会导致径流的减小。

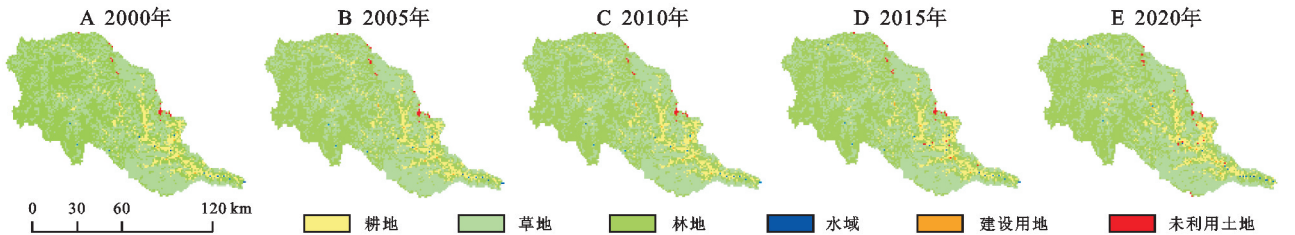


图 5 不同时期土地利用空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of land use in different periods

表 5 白水江流域 2000—2020 年土地利用转移矩阵

Table 5 Land Use Transfer Matrix of Baishui River Basin from 2000 to 2020

km²

土地利用类型	2000 年						总和
	耕地	草地	林地	水域	建设用地	未利用土地	
耕地	301	79	182	10	15	5	588
草地	72	2610	857	1	4	5	3549
林地	209	807	3096	5	4	7	4128
2020 年 水域	6	2	5	1	0	0	14
建设用地	5	0	2	0	2	0	9
未利用土地	0	3	7	0	0	13	23
总和	593	3501	4149	17	23	28	8311

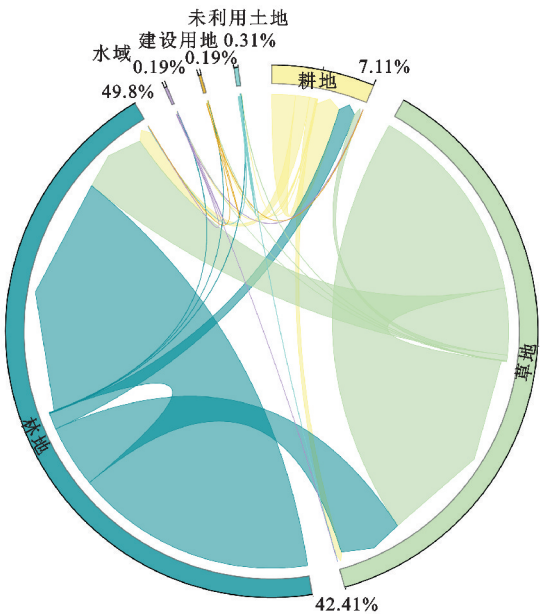


图 6 2000—2020 年土地利用和弦图

Fig. 6 Land Use Chords from 2000 to 2020

3.2 土地利用变化强度及转移关系动态度

动态度及综合动态度两个指标反映的白水江流域各土地利用类型变化强度见表 6。从综合动

态度来看,土地利用变化强度呈现非等速变化,土地利用类型变化综合动态度最大的为 2015—2020 年(0.13%/a),其次是 2010—2015 年(0.03%/a),2000—2005 年的值最小(0.008%/a)。从土地利用类型的动态度来看,建设用地的动态度变化最大,2010 年以后,建设用地动态度增加明显,2015—2020 年动态变化度为 15.385%/a,除建设用地外,其他土地利用类型动态变化度都较小,2015—2020 年水域面积有一定程度提升,水域面积可能受到季节更替等影响,数值有一定的波动。

土地利用类型发生明显变化主要有两个方面原因:一方面,水利工程建设,如白水江流域的梯级水电站开发,水利工程建设保障了耕地灌溉,使得耕地面积增加,从而使土地利用类型发生变化。另一方面,退耕还林还草工程实施以来,在改善生态环境的同时,植物截留对径流减少产生一定影响。通过改善农业管理技术并实施植被建设工程等人类活动,在局部可以有效提升植被覆盖率,从而使得流域内林地、草地面积增加^[30]。

表 6 各研究时段白水江土地利用变化动态度及综合动态度

Table 6 Land use change dynamics and comprehensive dynamics of Baishuijiang River in each study period %/a					
土地利用 类型	变化率				
	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2020 年	2000—2020 年
耕地	−0.204	−0.069	−0.379	0.844	0.040
草地	−0.006	0.023	−0.006	−0.276	0.066
林地	0.034	−0.01	−0.005	0.082	0.025
水域	0	0	1.429	2.667	1.071
建设用地	0	0	8.889	15.385	7.778
未利用土地	0	0	6.957	−1.935	1.087
综合	0.008	0.01	0.03	0.13	0.029

4 结 论

(1) 白水江流域年径流量呈显著下降趋势,年降水量呈不显著下降趋势。突变检验结果表明,白水江流域年径流量、年降水量的突变年份均在 1994 年。

(2) 相关性分析和周期性分析表明,年径流的变化呈现周期性,白水江流域年径流量与年降水量的高凝聚性正相关性显著,降水对径流变化起主导作用且降水对径流的影响具有持续性。白水江流域的年均降水量—径流存在 1~3 a 与 4~7 a 的显著周期变化,在高值区 4~5 a 的周期上,分别在 1992 年前后共振周期发生了突变,说明白水江流域在该时段发生了“丰”与“枯”周期的转变。

(3) 白水江流域径流归因分析表明,这一结果是由于气候和人类活动的综合影响。降水是导致白水江流域径流减少的主要气候因素,下垫面变化是白水江流域径流减少的一个关键因素。其中,气候变化对径流减少的影响占 53.86%,降水占 41.02%。下垫面改变对白水江流域径流减少的贡献率为 46.14%。

参考文献(References):

[1] Li L, Ni J R, Chang F, et al. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers[J]. Science Bulletin, 2020,65(1):62-69.

[2] Zhao Y, Cao W H, Hu C H, et al. Analysis of changes in characteristics of flood and sediment yield in typical basins of the Yellow River under extreme rainfall events [J]. Catena, 2019,177:31-40.

[3] Shi P, Bai L L, Zhao Z, et al. Vegetation position impacts soil carbon losses on the slope of the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2023,222:106875.

[4] Xia C C, Xu J H, Tian H Y, et al. Quantitative hydrological response to climate change and human activities in North and South Sources in upper stream of Qiantang River Basin, East China [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2022,44:101222.

[5] 刘远,李莹,郭增元,等.2022 年全球重大天气气候事件 [J].气象,2023,49(9):1142-1148.

Liu Y, Li Y, Guo Z Y, et al. Global significant weather

and climate events in 2022[J]. Meteorological Monthly, 2023,49(9):1142-1148.

[6] 汪飞,洪林,马田遥,等.基于 SWAT 模型的气候变化条件下诺敏河流域径流变化研究[J].水土保持研究, 2023,30(6):67-77.

Wang F, Hong L, Ma T Y, et al. Study on runoff change of Nuomin River Basin under climate change conditions based on SWAT model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023,30(6):67-77.

[7] 盛菲,刘士余,余敏琪,等.不同时间尺度濠水流域水沙变化及其驱动因素分析[J].水土保持学报,2023,37(3):201-207,217.

Sheng F, Liu S Y, Yu M Q, et al. Analysis of runoff and sediment variation and its driving factors in Lianshui watershed at different time scales[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(3):201-207,217.

[8] Wang W, Zhang Y Y, Tang Q H. Impact assessment of climate change and human activities on streamflow signatures in the Yellow River Basin using the Budyko hypothesis and derived differential equation[J]. Journal of Hydrology, 2020,591:125460.

[9] Cheng C W, Liu W Z, Mu Z T, et al. Lumped variable representing the integrative effects of climate and underlying surface system: Interpreting Budyko model parameter from earth system science perspective [J]. Journal of Hydrology, 2023,620:129379.

[10] 胡森,王润瑄,姬广兴.基于 Budyko 互补关系法的嘉陵江径流变化归因研究[J].华北水利水电大学学报:自然科学版,2023,44(6):49-57.

Hu M, Wang R X, Ji G X. Attribution of the runoff changes in Jialing River based on budyko complementary relationship method [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power: Natural Science Edition, 2023,44(6):49-57.

[11] Zhou S, Yu B F, Zhang L, 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.

[12] 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(02):76-84,245.
- Chen M E, Wei X, Zhou Y L, 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(02):76-84,245.
- [13] 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 Huaihe River based on Budyko hypothesis and differential equation [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2022,50(5):25-32.
- [14] 申滔滔.基于 Budyko 框架下漳河流域径流变化归因分析[D].河北邯郸:河北工程大学,2020.
- Shen T T. Attribution Analysis of Runoff Change in Zhanghe River Basin Based on Budyko Framework[D]. Handan, Hebei: Hebei University of Engineering, 2020.
- [15] 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 W Z, He Y, Shao Y T. 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.
- [16] 王莉,李克锋,李然.白水江干流梯级水电开发的水文情势变化分析[J].人民长江,2009,40(21):43-44,70.
- Wang L, Li K F, Li R. Analysis on hydrological regime for cascade hydropower development of the main stem of the Baishui River[J]. Yangtze River, 2009,40(21):43-44,70.
- [17] 杨晓波.白水江流域梯级引水式电站开发对生态环境的主要影响[J].环境保护与循环经济,2022,42(1):71-76.
- Yang X B. Main impact of cascade diversion power station development on ecological environment in Baishuijiang River Basin [J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2022,42(1):71-76.
- [18] Rong Z L, Liu X M, Zhao C Y, et al. Evaluating giant panda as a surrogate species for conservation co-occurring species in the Baishuijiang National Nature Reserve [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019,26(9):8939-8948.
- [19] Sinclair T R. "natural evaporation from open water, bare soil and grass" by Harold L. penman, *Proceedings of the royal society of london* (1948) A193:120-146[J]. Crop Science, 2019,59(6):2297-2299.
- [20] 王小杰,姜仁贵,解建仓,等.基于分形和 R/S 分析的渭河干流径流变化特征研究[J].水利水运工程学报,2019(1):102-108.
- Wang X J, Jiang R G, Xie J C, et al. Analysis of runoff variation characteristics in the mainstream of Weihe River based on fractal theory and R/S analysis method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(1):102-108.
- [21] 詹道江,徐向阳,陈元芳.工程水文学[M].4 版.北京:中国水利水电出版社,2010.
- Zhan D J, Xu X Y, Chen Y F. Engineering Hydrology [M]. 4th ed. Beijing: China Water & Power Press, 2010.
- [22] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Applied Statistics, 1979,28(2):126.
- [23] 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,2008,19(4):479-487.
- Sun W G, Cheng B Y. Application of cross wavelet transformation to analysis on regional climate variations[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2008,19(4):479-487.
- [24] 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.
- [25] 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, 2008,44(3):W03410.
- [26] 杨林,赵广举,穆兴民,等.基于 Budyko 假设的洮河与大夏河径流变化归因识别[J].生态学报,2021,41(21):8421-8429.
- Yang L, Zhao G J, Mu X M, et al. Attribution of runoff variations in Tao River and Daxia River based on Budyko Hypothesis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(21):8421-8429.
- [27] Xu X Y, Yang D W, Yang H B, 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.
- [28] 徐宗学,周祖昊,姜瑶,等.西南河流源区径流量变化规律及其未来演变趋势[J].水科学进展,2022,33(3):360-374.
- Xu Z X, Zhou Z H, Jiang Y, et al. Variation laws and future evolution trends of runoff in the headwaters region of Southwestern Rivers[J]. Advances in Water Science, 2022,33(3):360-374.
- [29] Ke Z Y, Tang J F, Sun J, et al. Influence of watershed characteristics and human activities on the occurrence of organophosphate esters related to dissolved organic matter in estuarine surface water[J]. The Science of the Total Environment, 2024,914:169956.
- [30] 张超正,孙小宇,张寒,等.基于土地利用变化的长江中游地区生态系统服务供需平衡研究[J].水土保持学报,2024,38(3).
- Zhang C Z, Sun X Y, Zhang H, et al. Supply-Demand Balance of Ecosystem Services in the Middle Reaches of the Yangtze River Based on Land Use Change [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(3). DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2024.03.017.