

岷江水文情势演变及生态响应分析

王鸿翔 王保良 陈昊 杨欢 郭文献

华北水利水电大学

摘要: 水文情势的自然波动是维系河流生态系统功能性的关键。然而以往的研究缺乏对岷江流域水文情势的全面评估,重点利用具有生态意义的指标来全面分析岷江流域水文情势的演变及生态响应。针对岷江流域本研究采用 Mann-Kendall 和 Pettitt 检验法判断水文突变年份。通过 2 个广义的生态指标(生态盈余、生态赤字),水文变化指标(IHA)和识别突变发生前后生态水文变异特征。借助水文变异程度(DO)和水文情势变化法(DHRAM)评估改变程度。结合 Budyko 水热耦合平衡理论量化生态水文变化的驱动因素。利用生物多样性指数(SI)来评估岷江水文情势变化下的生态响应。结果表明:(1)岷江流域水文情势在 1993 年发生突变。(2)岷江流域水文总体改变度达到 44%,综合评定为中度改变。(3)水文情势改变导致岷江流域生态盈余减少及生态赤字增大。(4)根据 Budyko 理论,发现人类活动对岷江流域年均径流变化的影响占比达到 54.20%,为主要影响因素,降雨影响占比为 43.88%,蒸发影响占比 1.92%,气候变化和人类活动共同导致岷江径流量降低 83.83 mm。(5)SI 指标表明人类活动的影响加快了生物多样性指数降低的趋势。研究可以为加强岷江流域生态环境保护和修复提供参考依据,并促进岷江水资源合理高效利用。

关键词: 岷江;生态盈余和赤字;Budyko;生态响应;归因分析

作者简介: 王鸿翔(1981~),女,教授,主要研究方向为水文水资源与生态水力学. E-mail:wanghongxiang@ncwu.edu.cn;
*郭文献, E-mail:guowenxian163@163.com

收稿日期: 2022-11-01

基金: 国家自然科学基金项目(51679090, 51609085, 51779094); 2016 年度河南省高校科技创新人才支持计划(16HASTIT024); 2016 年河南省科技攻关项目(162102110015); 贵州省水利厅 2020 年度水利科技项目(KT202008);

河流水文情势是保障河流生态功能的关键指标,它能够维持水资源可持续开发利用,也是众多生物生存和繁殖发展的基础[1]。近些年来,气候变化和人类活动等诸多因素导致河流生态功能退化,尤其是水库、大坝等大型水利工程建设,显著改变岷江流域的水文情势,并进一步影响到长江上游水文情势稳定和水文健康[2]。因此,评估支流流域水文系统的生态响应机制及归因分析是重要的研究内容。

目前国内外学者对于河流水文情势的定量分析进行了诸多探讨,最为学者们广泛应用的是分析河流整体水文情势变化的水文改变指标法(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)。该方法由 Richter 等[3]提出,归纳出 33 个水文改变指标,从而简化了常见的 170 多个水文指标,它利用河流流量变化与外界生态改变程度,得到流域整体的改变度。吕超楠等[4]对岷江流域水库建设改变输沙量、径流量进行了综合评估,得出流域内水文情势变化与水库建设有关的结论。尽管 IHA 中的 33 个指标已有较大简化,但指标之间相关性问题的解决仍然没有得到较好解决,且不能反映河道内生态流量的具体变化。为解决此问题, Vogel 等[5]基于流量历时曲线(Flow Duration Curve, FDC)的无维度生态指标分析法(生态盈余和生态赤字)来评价河道流量的盈余和缺失,并为每个指标建立目标与阈值(第 25 百分位和第 75 百分位)。顾西辉等[6]基于生态指标分析法评价了东江流域受水库影响后流域生态需水需求目标总的盈余和缺失变化过程。此外 Black 等[7]开发了 DO(Degree of Hydrologic Alteration)和

DHRAM(Dundee Hydrological Regime Assessment Method)评估水库对河流流态总体改变程度及造成河道生态系统的风险性大小。

河流水文情势演变归因分析是对河流水文状态全局评估的关键环节。Choudhury[8]和 Yang 等[9]基于 Budyko 理论提出了流域水热耦合平衡方程,将气候变化的影响细化为降雨和潜在蒸发,更加准确便捷地研究长时间序列下气候变化和人类活动对流域径流变化的贡献率。河流水文情势演变对生物多样性的影响程度是评估生态系统的重要目标。Yang 等[10]提出生物多样性指数(SI)概念且在河流生态学中得到广泛应用。Pettersson 等[11]进一步证明 SI 是检验生物多样性变化一种便捷可靠的方法。Zhu 等[12]利用 Budyko 水热耦合平衡方程和生物多样性指标(SI)对洞庭湖进行归因及生态影响分析。发现洞庭湖水文情势改变的主要原因是人类活动的影响(占比 50%~60%),降雨和蒸发是次要影响(占比 20%~30%);与建坝前相比,建坝后的平均流量和水位多样性指数分别下降了 9%和 8%。然而,目前缺乏对岷江水文情势改变前后的综合评估以及水文演变的归因和生态响应分析。

鉴于此,本研究从以下方面对岷江水文情势进行全面评估:(1)利用 Mann-Kendall 和 Pettitt 检验找出岷江流域中高场站自然流态下径流突变点,研究径流变化趋势并分析突变点前后不同时期径流对生态指标的影响。(2)采取生态指标分析法(生态盈余和生态赤字)和水文变化指标(IHA)对该区域的水文情势进行评价。(3)综合 DHRAM 和 DO 两者结合的评价方法对岷江水文情势改变度做出定量评价。(4)利用 Budyko 水热耦合平衡理论对岷江水文情势变化进行归因分析。(5)运用生物多样性指数(SI)对岷江进行生态响应评估分析。

1 研究对象和方法

1.1 研究区域和数据

岷江是长江上游重要的一级支流,发源于四川省中西部岷山南麓。流域面积 135 387 km²,干流全长 735 km,天然落差 3 560 m,全流域多年平均水资源总量为 953.6 亿 m³[13]。大渡河被认为是岷江最大的支流,含水量占据岷江一半以上,流域由岷江干流上游、青衣江与大渡河汇流而成[14]。近些年来,上游大型水利工程实施及人类活动影响改变了岷江上游河道天然的水文情势,影响较大的是具有年调节能力的紫坪铺水库及大渡河上具有季调节能力的瀑布沟水库[15]。而高场水文站位于大渡河与岷江交汇处,作为岷江下游出口河段控制站,其径流数据对研究岷江整条河流具有很强的代表性。

本文采用 1956~2019 年日径流量数据,数据来源于《长江流域水文年鉴》。气象数据选取 1956~2019 年都江堰、宜宾、内江、乐山、小金等 14 个气象站点逐日监测数据(气象站点分布详见图 1),数据来源于中国气象数据网站(<http://data.cma.cn/>)。(14 个气象站点数据已采用加和取均值的方法进行处理)

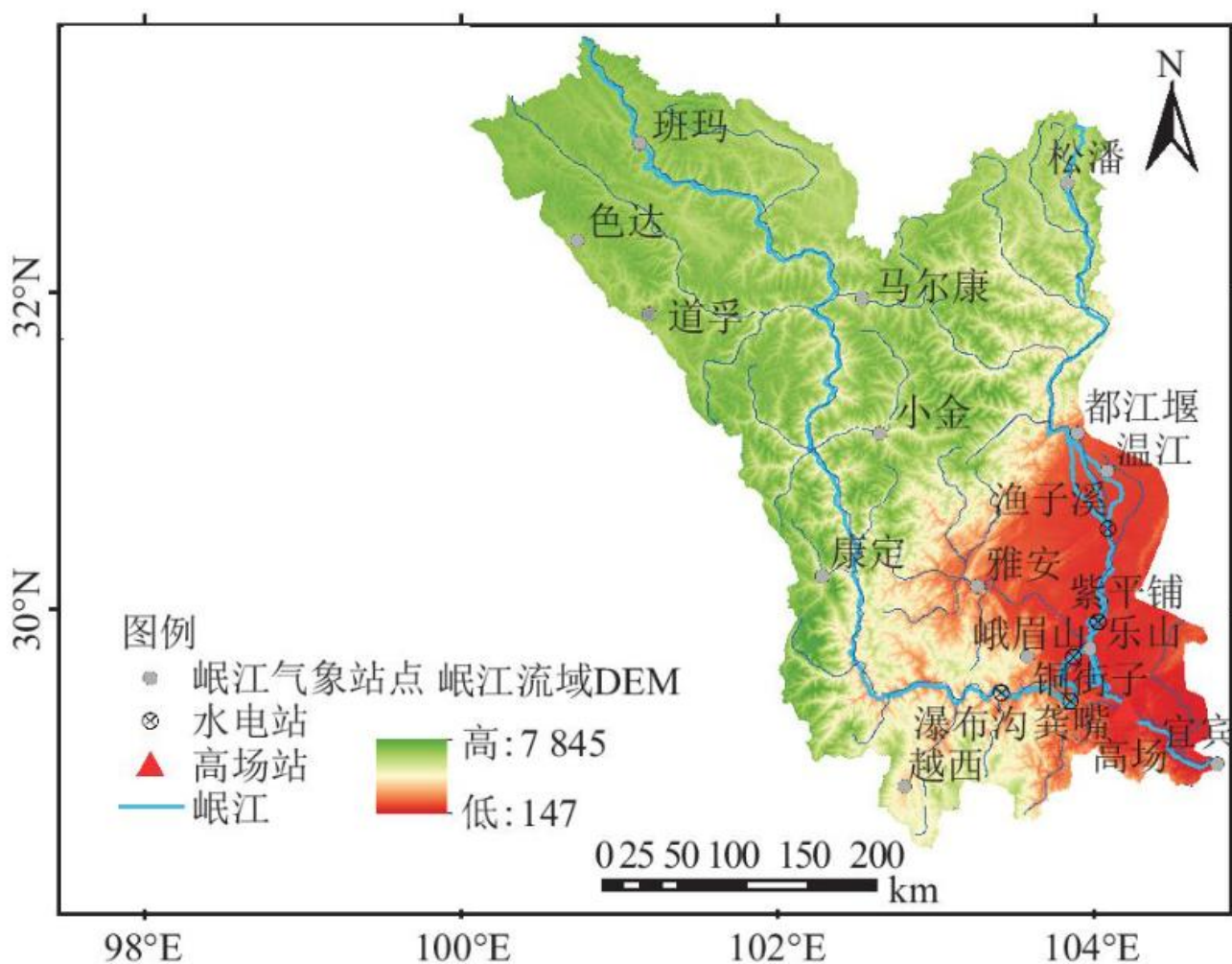


图1 岷江流域概况图

1.2 方法

1.2.1 Mann-Kendall 检验和 Pettitt 检验法

Mann-Kendall 检验被广泛用于对长时间序列降水、径流、气温等数据进行趋势性检验，检验范围广且计算简单。Pettitt 检验被广泛应用于单一突变点的检验，具有科学准确等特点。Mann-Kendall 与 Pettitt 检验均为非参数检验统计方法。两者综合不仅能够准确识别突变点，解决突变点缺失等情况。还能够完善单一检验方法所存在的一些弊端，更准确判断年径流序列在某一点是跳跃突变点还是平稳变化点。与此同时它对长时间序列水文数据进行的趋势性检验效果也比较显著。Mann-Kendall 与 Pettitt 理论以及具体计算过程见相应参考文献[16, 17, 18]。

1.2.2 生态指标分析法

生态盈余和生态赤字由 Vogel 等[5]基于流量持续时间曲线(Flow Duration Curve, FDC)所提出，用于评估流域内河流生态河道的流态变化。生态盈余和生态赤字的计算是基于流量历时曲线(FDC)，该曲线是由日流量数据和超过概率所构成，其超过概率表示为：

$$P_i=i/(n+1) \quad (1)$$

式中：n 为日流量数据降序排列的总天数；i 为秩次。

同时，利用日流量的径流数据也可以构造出年尺度和季尺度 FDC 曲线。Gao 等[19]提出把 75%和 25%分位数作为阈值。以此划定河流生态健康保护的临界范围，并将水文变异前的时段作为基准期。如图 2 所示，由给定的年或季节 FDC 和超过 75%分位数的 FDC 所围成的区域被定义为生态盈余，由给定的年或季节 FDC 和低于 25%分位数的 FDC 所围成的区域被定义为生态赤字。如果河流生态系统位于 25%和 75%分位数 FDC 之间，则被认为河流健康系统处于健康的范围。本次研究为了消除数量级差别较大的影响，对 75%分位数 FDC 和 25%分位数 FDC 下方面积做出归一化处理。

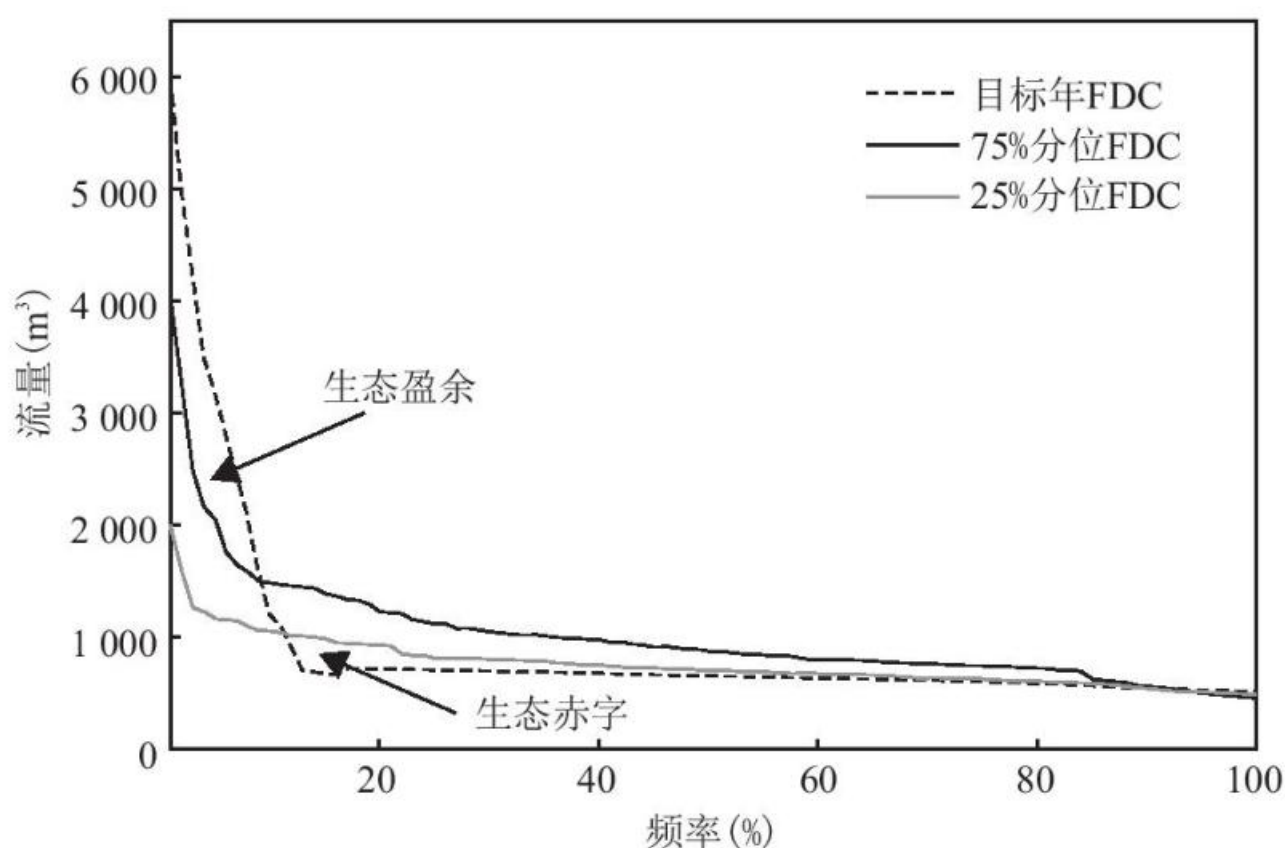


图 2 基于 FDC 的生态盈余和生态赤字定义

1.2.3 水文改变度评价

Richter 等[20]提出水文情势变化指标(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA)来反映河流生态水文情势状况，包含指标从流量、事件、频率、历时以及变化率 5 个方面(表 1)，可以定量分析人类活动对岷江水文情势影响程度，为估算河流生态流量序列提供依据。

Richter 等[3]基于 IHA 提出变化范围法(Range of Variability Approach, RVA)来评估河流的水文情势的改变情况，对于

单个水文指标的改变程度(Di)按下式计算：

$$D_i = \frac{P_0 - P_e}{P_e} \times 100\% \tag{2}$$

$$P_e = r P_t \tag{3}$$

式中：Di 为第 i 个指标的改变度；P0 和 Pe 分别表示第 i 个指标落入 RVA 阈值内的实际年数、预测年数；r 为比例系数，通常取 50%；Pt 表示受影响后的总年数。

$$D_0 = \left(\frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} D_i^2 \right)^{0.5} \tag{4}$$

当|D0|≥67%

时，认为水文参数属于高度改变；当 34%≤|D0|<67%时，认为水文参数属于中度改变；|D0|<34%时，认为水文参数属于低度改变。

表 1 (Indicators of Hydrologic Alteration, IHA) 参数指标

IHA 参数组	参数指标
月均值	每月流量、含沙量的平均值
年极值大小及历时	年均 1、3、7、30、90d 最小及最大流量(含沙量)、基流指数
年极值状况发生时间	年最大、最小 1 天发生的日期(罗马日)
高、低脉冲的频率及历时	每年高、低脉冲数以及脉冲持续时间的平均值
水沙条件变化率及频率	涨幅(上升率)、降幅(下降率)的年均值以及逆转次数

Black 等[7]在 2005 年提出另一个水文改变指标(DHRAM)。旨在评估人类活动引起的水文情势变化的程度和范围。对于 IHA 的 32 个水文指标中每一个都会产生平均值的绝对百分比变化和离差系数的绝对百分比变化。DHRAM 在 IHA 水文指标的基础上重新分配了水文指标的权重。把改变程度分为了 3 个等级：1 表示低度改变，2 表示中度改变，3 表示高度改变。DHRAM 将综合

影响程度分位 5 个等级, 1 表示水文情势未受到影响(生态系统处于无风险状态), 5 表示水文情势受到严重影响(生态系统处于严重风险状态)。根据 DHRAM 计算的得分情况, 分数值越小表示水文改变程度越低, 生态系统遭受风险的可能想越小[21]。在本次研究中, DHRAM 和 D0 两者共同作用被用来评估水文情势的水文变化程度, 并评估因为水文情势变化而对生态系统可能造成的风险等级[22]。

1.2.4 Budyko 理论

对于径流变化的归因分析, 本文采用 Budyko 水热耦合平衡理论, 流域的长期水量平衡可以表示为:

$$R=P-E-\Delta S \quad (5)$$

式中: R 为平均径流深 (mm); P 为平均降水量(mm); E 为平均实际蒸发量(mm); ΔS 为储水量变化 (mm)。在长时间尺度的径流变化中, ΔS 为 0。

Choudhury 和 Yang 等在 Budyko 假设的基础上, 并结合年蒸发经验公式, 应用量纲分析和数理统计的方法, 在年平均尺度上推导出水量平衡方程, 即:

$$R = P - \frac{P \times ET_0}{(P^n + ET_0^n)^{1/n}} \quad (6)$$

式中: n 为流域下垫面特征参数, 已知 R, P 和 ET_0 可以推出 n ; 又因为 P, ET_0 和 n 是相互独立的变量, 年径流量的全微分形式, 即:

$$dR = \frac{\partial R}{\partial P} dP + \frac{\partial R}{\partial ET_0} dET_0 + \frac{\partial R}{\partial n} dn \quad (7)$$

径流 R 对各个因子的敏感性可以用弹性系数按下式表示:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial R}{\partial x} \frac{x}{R} \quad (8)$$

x 可以表示为 P, ET_0 或 n ; 假设: 令 $\Phi=ET_0/P$; 则弹性系数计算如下:

$$\begin{aligned}
\varepsilon_P &= \frac{(1+\varphi^n)^{\frac{1}{n+1}} - \varphi^{n+1}}{(1+\varphi^n) \left[(1+\varphi^n)^{\frac{1}{n}} - \varphi \right]} \\
\varepsilon_{ET0} &= \frac{1}{(1+\varphi^n) \left[1 - (1+\varphi^{-n})^{\frac{1}{n}} \right]} \\
\varepsilon_n &= \frac{\ln(1+\varphi^n) + \varphi^n \ln(1+\varphi^{-n})}{n \left[(1+\varphi^n) - (1+\varphi^n)^{\frac{1}{n+1}} \right]}
\end{aligned} \tag{9}$$

根据径流对各影响因子的弹性系数，可对应求出相应因子对径流深引起的改变量：

$$\Delta R_x = \varepsilon_x \frac{R}{x} \Delta x \tag{10}$$

相加求和得到计算径流深变化量 $\Delta R'$ ，表达如下：

$$\Delta R' = \Delta R_P + \Delta R_{ET0} + \Delta R_n \tag{11}$$

各因子对径流改变的贡献率按以下公式计算：

$$\begin{aligned}
\eta_P &= \frac{\Delta R_P}{\Delta R'} \times 100\% \\
\eta_{ET0} &= \frac{\Delta R_{ET0}}{\Delta R'} \times 100\% \\
\eta_n &= \frac{\Delta R_n}{\Delta R'} \times 100\%
\end{aligned} \tag{12}$$

1.2.5 生态响应评估

本文采用生物多样性指数(SI)来表示岷江水文情势变化下的生态响应，生物多样性指数由 Yang 等[10]提出，以 IHA 指标为基础，采用遗传规划法，构建生物多样性指数与 IHA 指标的回归方程：

$$SI = \frac{D_{\min}/Min7 + D_{\min}}{W_3 + W_5 + Min3 + 2 \times Max3} + R_{rate} \tag{13}$$

式中：Dmin 是最小水位的儒略日；W3、W5 分别是 3、5 月的平均流量；Min3、Min7 分别是年最小 3、7 d 平均流量；Max3 是年最大 3 d 平均流量；Rrate 是涨水速率。

2 结果与分析

2.1 年均流量突变性检验分析

根据 MK 检验得到高场水文站 1956~2019 年径流量突变点, 如(图 3)所示。图中 UF 与 UB 两条曲线交点有 3 个, 突变时间分别为 1987、1988、1993 年。分析结果可知, 在 0.05 显著水平下, 统计量 Z_c 的值为-2.02, 可知该时间序列上该区域径流量呈显著减少趋势。 Z_c 的绝对值大于 1.96, 说明通过了 95%显著性检验。根据 Pettitt 检验得到高场水文站 1956~2019 年径流量突变检验结果, 如图 4 所示, 突变检验 p 的值为 0.04(小于 0.05), 结果表明该区域发生显著性突变, 且显著性突变点发生在 1993 年。结合 MK 检验和 Pettitt 检验, 进一步确定该区域 1993 年径流量发生显著性突变。

径流变化受气候改变和人类活动等多方面因素共同作用。分析该区域 1993 年发生改变的原因可知, 1993 年之前, 该区域水库建设较少且缓慢, 多以中小型水库为主。1993 年岷江流域控制范围内的铜街子水库投入使用, 在高场站的控制面积内对水文序列造成了显著改变, 使岷江下游高场站年均流量发生突变。1993 年之后, 中型和大型水库不断增多, 特别是 2003 年岷江上游瀑布沟水库及 2005 年紫坪铺水库等投入使用, 导致增多的平均库容远超之前时期总和, 形成了水库串联运行模式。这表明岷江流域自上世纪九十年代以来以大、中型水库修建及投入使用对其径流量变化产生显著影响。

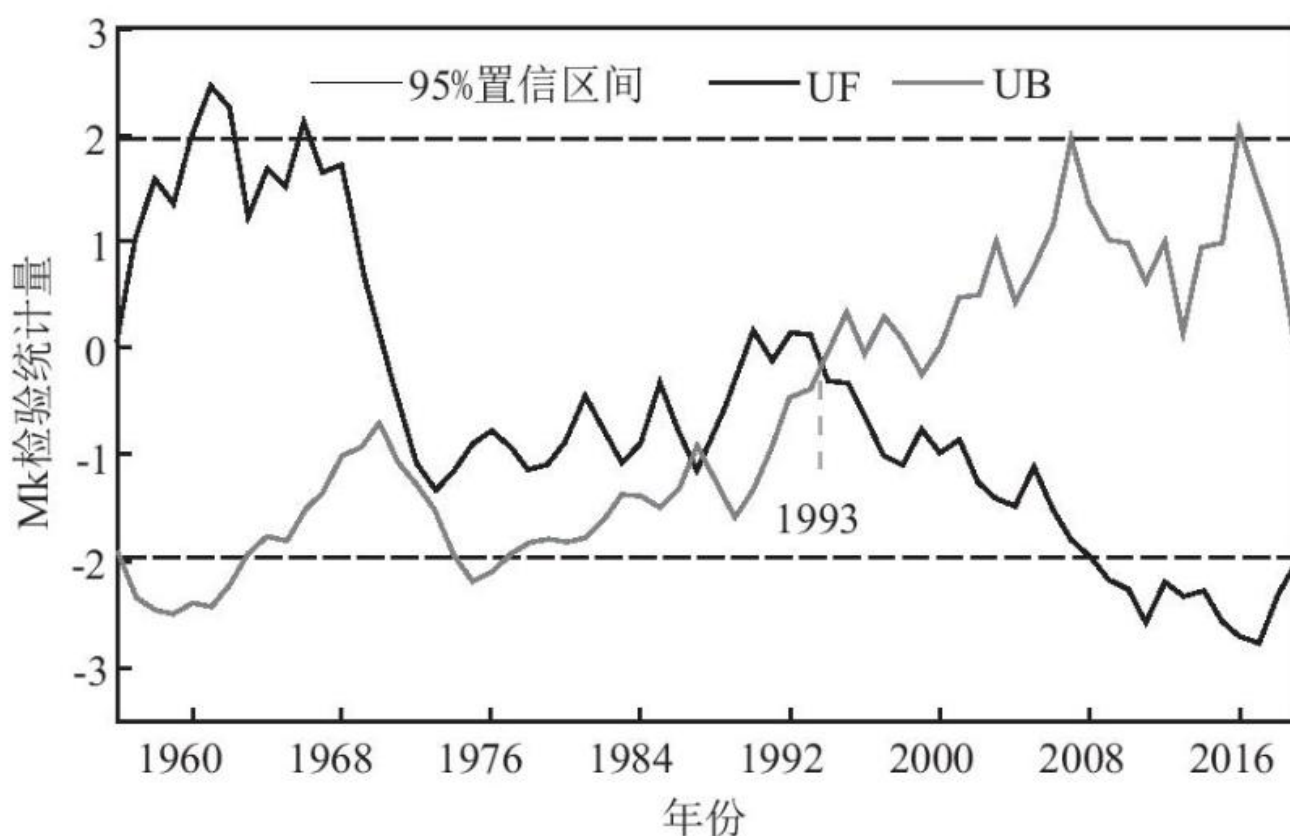


图 3 年径流量 MK 统计曲线图

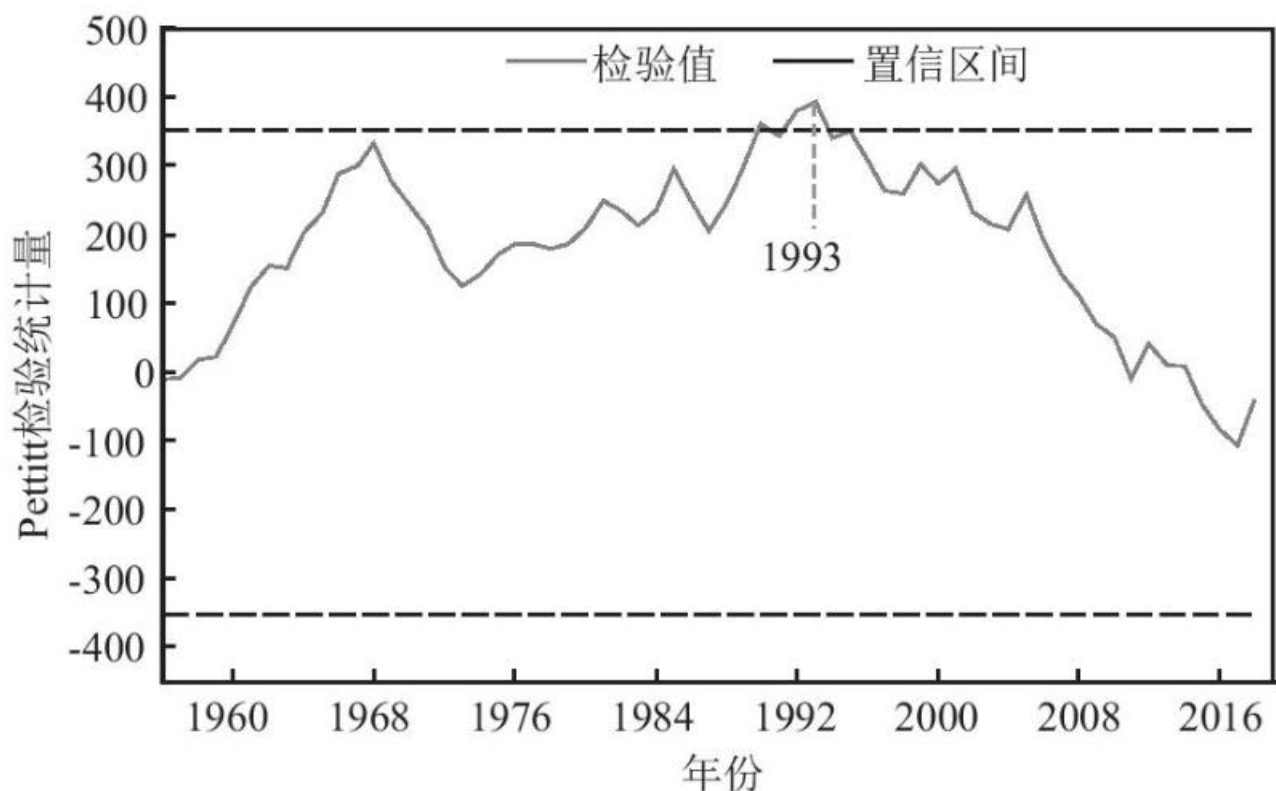


图 4 Pettitt 突变检验结果图

2.2 河道内生态指标变化结果分析

2.2.1 年尺度径流变化与 FDC 生态指标分析

本文研究高场水文站水文变化情况中参考 Gao 等做出的改进,把突变年份作为分界点,将 1956~1993 年期间高场水文站日流量数据作为基准期,代表天然产流。我们以年尺度 FDC 生态指标为基础研究 1956~2019 年高场水文站年径流长期变化情况,得到(图 5)所示的变化结果。其中年尺度 FDC 生态指标与降水距平之间具有显著相关关系,年生态盈余与降水距平呈现显著的正相关关系,年生态赤字与降水距平呈现显著负相关关系。初步表明降水导致径流增加会引起 FDC 生态流量指标变化。

我们以突变时期为分界点,突变前(1956~1993 年)自然流态下生态盈余要大于生态赤字,突变后(1994~2019 年)受气候变化和人类活动等多种因素影响导致生态赤字大于生态盈余。从长时间序列来看,年生态盈余变化幅度较小且呈现出减少趋势,而年生态赤字变化幅度较大且呈现出增加趋势。2000 年之后年生态赤字幅度变化最大,最高达到 0.24,与此同时,该时期降水骤减导致径流变小,引起年生态赤字增大。这也揭示了年 FDC 生态指标与降水距平导致的径流变化具有显著同步性变化规律,即径流量增大,生态盈余增加;径流量减小,生态赤字增加。这进一步阐述了 FDC 生态指标与径流变化的相互关系,同时表明气候变化是导致径流改变的驱动力。

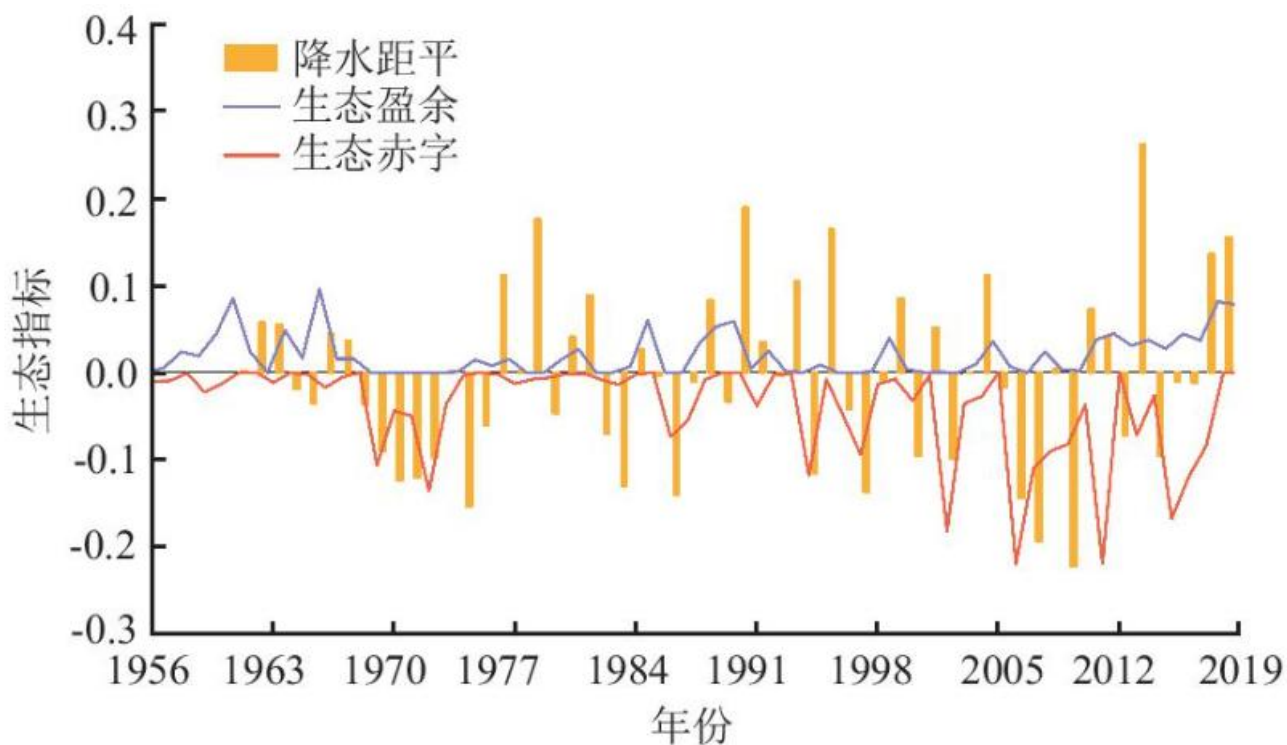


图 5 年尺度降水距平与生态指标变化结果

2.2.2 季尺度径流变化与 FDC 生态指标分析

为深入研究 FDC 生态指标与径流变化相关关系,我们绘制出(图 6)所示的季尺度降水距平与 FDC 生态指标变化结果。岷江流域内径流变化很大程度上受降水的影响,而降水导致的径流变化与 FDC 生态指标在不同季节相关性强弱不一。其中 FDC 生态指标与夏季降水距平相关关系最强,与春、秋、冬 3 个季节相关关系相对较弱。主要原因为夏季降水相对于其它 3 个季节较多,从而导致夏季径流量较大。变化结果可以看出季尺度 FDC 生态指标中生态盈余峰值集中出现在 2000、2006、2010 年,与年变化结果一致。这些峰值均出现在变化期(1994~2019 年),表明气候变化和人类活动干扰了该流域径流的变化。

人类活动中水库建设导致季节性生态指标出现一定变异性,分为两种类型。春、冬季节生态盈余增加,夏、秋季节生态赤字增加,与水库投入使用所引起的变化相同。岷江流域主汛期通常为 6~8 月,覆盖整个夏季,在此期间瀑布沟水库在防洪中发挥重要作用,紫坪铺水库起着辅助作用,能够缓解生态赤字的增加。汛期过后,为满足旱季用水需求,梯级水库需要切换到蓄水功能,这会导致生态赤字持续发生震荡。可以看出大型水库投入使用及串联水库的存在,已经逐渐成为影响生态指标变化的主要因素。

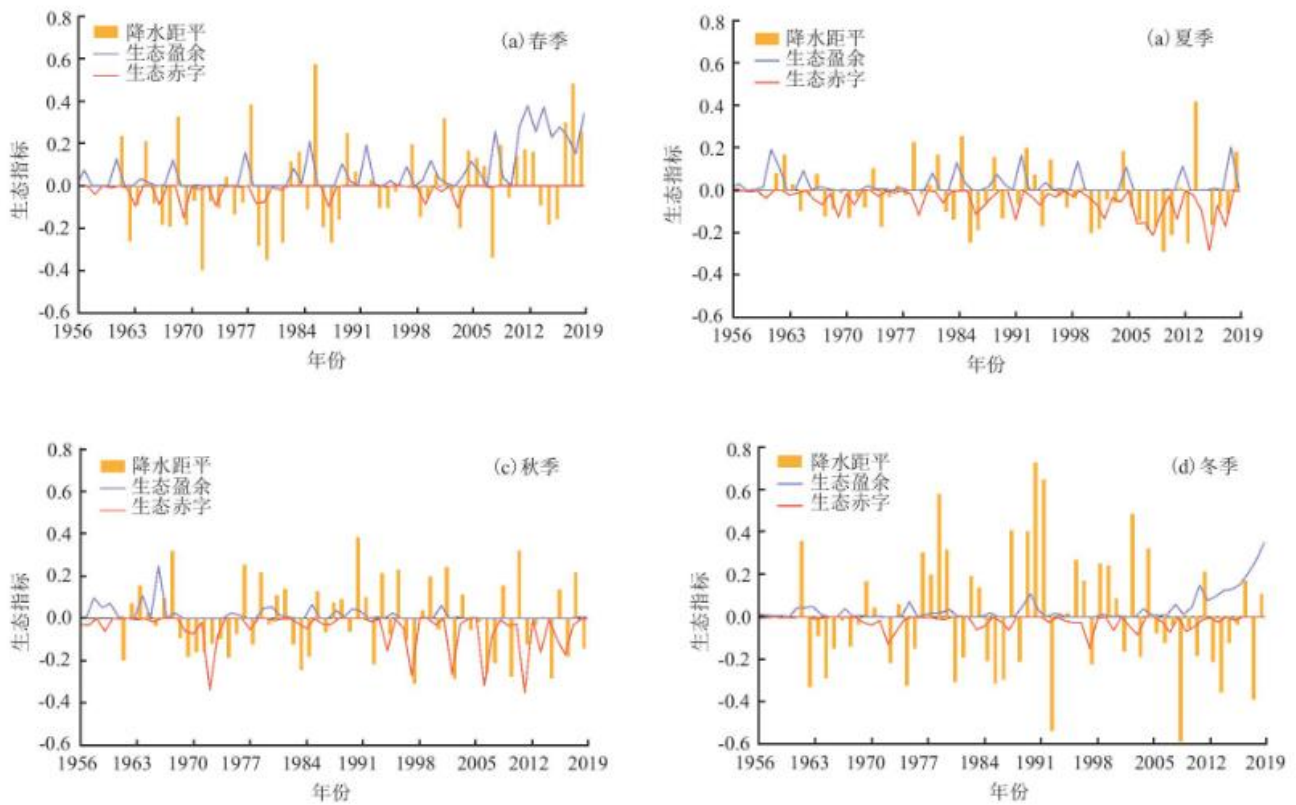


图6 季尺度降水距平与 FDC 生态指标变化结果

2.3 水文整体改变度分析

Richter 等[3]1997 年在 IHA 水文变化指标的基础上提出 RVA 指标分析法, 它利用建立的生态水文指标(表 1)评价河流水文情势变化情况。5 组 32 项水文指标改变度量化结果如(图 7)所示, 在 32 个水文指标当中, 高度改变指标 4 个, 占比 12%; 中度改变和低度改变指标均为 14 个, 各自占比 44%, 占据主导地位。在 14 个高度改变指标中, 下降率改变度最大, 达到 100%; 其次是逆转次数, 改变度达到 90%, 这对生态系统应对外界变化带来不利的影响。流量改变中 1、2、7、9、11、12 月、年均 3、30、90 d 最小流量、年均 1、90 d 最大流量、基流指数以及高低脉冲次数属于中度改变, 其余均为低度改变。

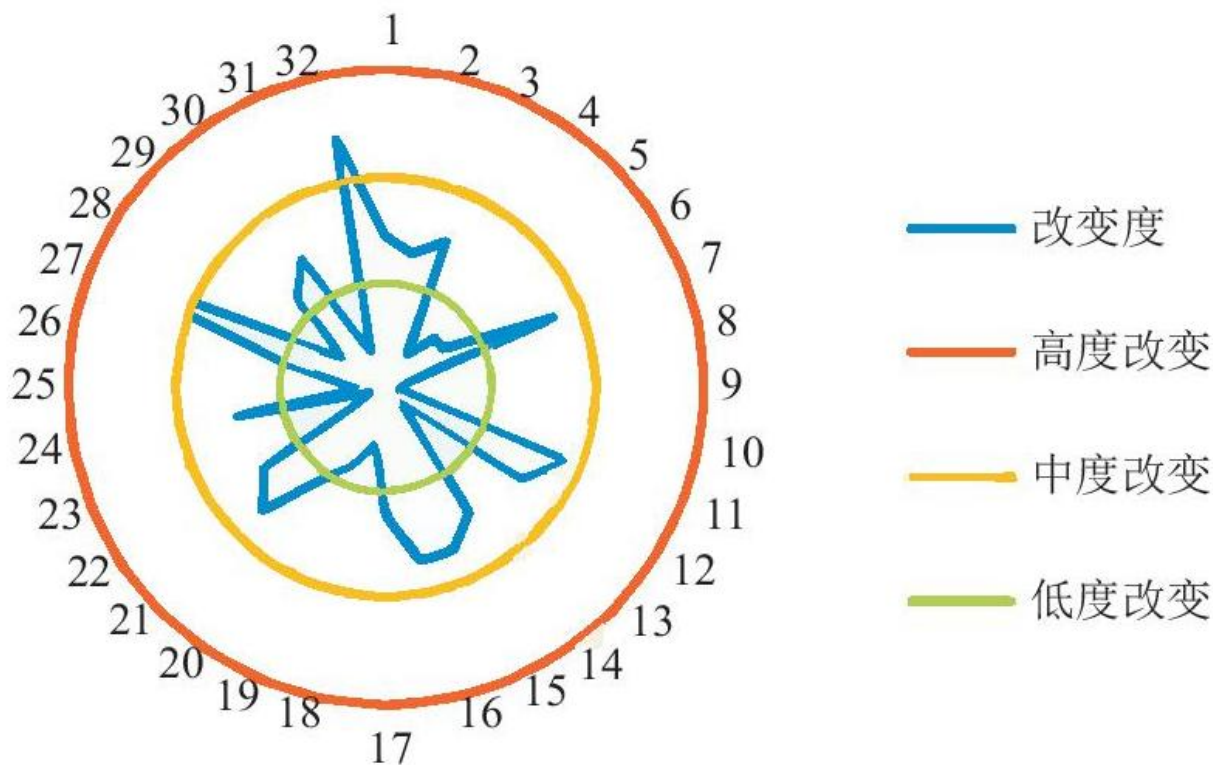


图 7 岷江水文改变度示意图

表 2 高场站流量序列整体水文改变度

水文站	各组指标的水文改变度					整体水文改变度 Do
	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	
高场	42 (M)	41 (M)	16 (L)	35 (M)	79 (H)	45 (M)

注：H 表示高度改变；M 表示中度改变；L 表示低度改变。

DHRAM 和 D0 的水文改变度计算结果如(表 3)所示。从 DHRAM 总体打分和结果来看，高场水文站 DHRAM 总得分为 3 分，改变等级为 2 级，属于低度改变；D0 为 45%，属于中度改变。考虑到 IHA 32 个水文改变指标中度和低度改变指标占比均为 44%，结合两种水文改变度评价方法，综合判定岷江流域水文情势改变程度为中度改变。

表 3 水库建成前后水文改变的总体评价：DHRAM 和 Do 结果

站点	IHA 分组	平均变化比例		影响点数		总点数	Do (%)
		均值	离差系数 CV	均值	离差系数 CV		

高场	1	14.1	64.4	0	1	3(4)	45
	2	25.3	67.5	0	0		
	3	2.1	18.9	0	0		
	4	45.1	55.4	1	1		
	5	20.7	25.2	0	0		

2.4 Budyko 结果分析

关于流量水文情势变化的归因分析主要采用 Budyko 水热耦合平衡理论。岷江流域多年平均降雨量、多年平均潜在蒸散发量、多年平均径流深、下垫面参数 n 、降雨、蒸发和人类活动的弹性系数的计算结果如(表 4)所示。

表 4 岷江水文气象特征值

时期	P(mm)	ET0(mm)	R(mm)	n	R/P	ET0/P	p	ET0	n
建坝前	1100.82	466.34	643.55	1.31	0.58	0.51	1.56	-0.39	-0.29
建坝后	1007.88	459.18	593.7	1.93	0.59	0.52	1.53	-0.4	-0.31

根据(表 4)可知，相比于建坝前，建坝后岷江流域的 P、R 和 ET0 均有所下降，下降速率分别为 8.44%、7.75%和 1.54%； n 有所增长，增长速率为 47.33%；干燥指数(ET0/P)和径流系数(R/P)较基准期略有升高。岷江流域径流在建坝后对降雨、潜在蒸发和下垫面的弹性系数分别为 1.53、-0.40 和 -0.31,表明降雨、潜在蒸发和下垫面增加 1%时，会引起径流深分别增加 1.53%、减少 0.40%和减少 0.31%；岷江流域径流深的变化与 P 呈正相关，与 ET0 和 n 呈负相关。由于弹性系数的绝对值大小反应径流对影响因子的敏感程度，根据结果显示，径流深对 P 变化最为敏感，对 n 变化最不敏感。

岷江流域各影响因子对径流变化的贡献率见(表 5)。根据(表 5)可知，降雨量引起高场站径流的变化量为-83.83 mm；潜在蒸散发量导致高场站径流深增加 3.68 mm；下垫面导致高场站径流减少 103.54 mm。下垫面变化对高场站径流变化的贡献率最大，为 54.20%；降雨量对高场站径流变化的贡献率次之，为 43.88%；潜在蒸散发量对高场站径流变化贡献率最低，为 1.92%。因此，下垫面变化是导致高场站径流减少的主要因素，降水量影响其次，潜在蒸散发量影响最小。

表 5 岷江径流变化归因分析结果

水文站	基准期	变化期	ΔRP (mm)	$\Delta RET0$ (mm)	ΔRn (mm)	ΔR (mm)	CP(%)	CET0(%)	Cn(%)
-----	-----	-----	------------------	--------------------	------------------	-----------------	-------	---------	-------

高场站	1956~1993	1994~2019	-83.83	3.68	-103.54	-49.85	43.88	1.92	54.2
-----	-----------	-----------	--------	------	---------	--------	-------	------	------

2.5 SI 指标分析

关于岷江流域水文情势变化的生态响应评估主要分析流量的生物多样性指数。1956~2019 年岷江的流量生物多样性指数的年际变化如(图 8)所示。根据 TRPW-MK 法检测结果，对于流量生物多样性指数，其标准化的检验统计量 $Z=-2.02$, $|Z|>1.96$ ($\alpha=0.05$ 时的临界值)。表明 1956~2019 年流量生物多样性指数呈下降趋势，并且通过显著性检验。根据平均流量生物多样性可以看出，自然流态下(1956~1993 年)生物多样性指数下降缓慢；随着 1993 年之后水利工程实施及串联水库运行，导致突变后岷江流域平均流量生物多样性指数下降趋势下降明显加快。

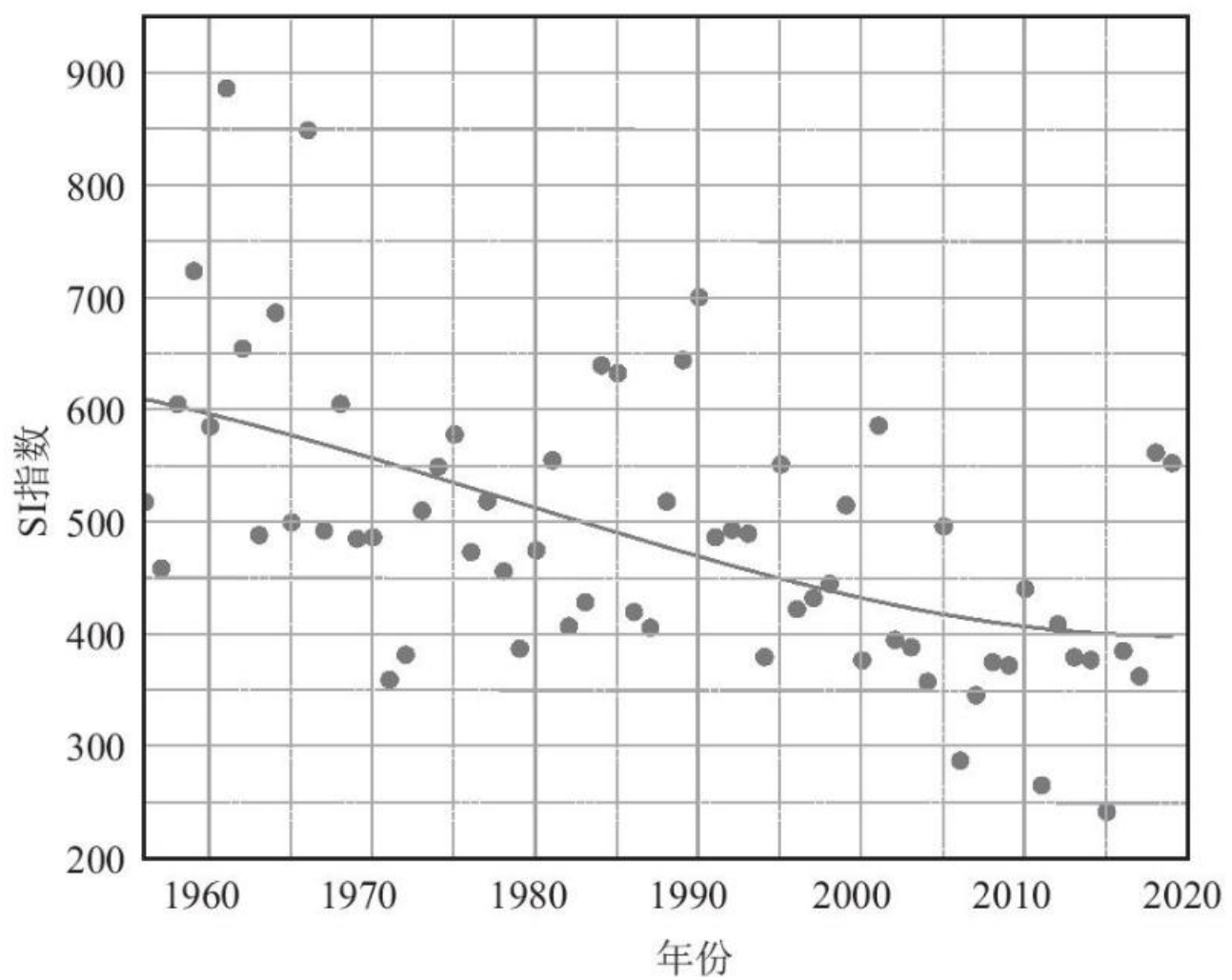


图 8 岷江生物多样性指数

3 讨论

3.1 水文情势变化及归因分析

自然状态下的水文波动是维持河流生态多样性和生态系统健康的重要过程。本文对岷江水文情势变化分析研究发现 1993 年为岷江水文变异年份, 根据对其水文情势的评估, 发现岷江整体水文改变程度为中度改变, 同时预示生态系统可能造成的风险处于中度等级。分析变化原因可知, 主要是气候变化和人类活动等多重因素的共同影响。

生态指标(FDC)变化分析表明岷江生态赤字呈现增加趋势, 而生态盈余呈现减少趋势。归因分析发现不同尺度下径流变化受到的影响因素权重不同, 研究表明年尺度下径流变化降水对其影响权重较大, 而季尺度下主要影响来自水库调节用水。根据本文 Budyko 分析结果可知, 降雨和下垫面变化是改变年尺度下径流变化的主要影响因素。杨雪琪等[23]基于 Budyko 假设对沂河流域径流变化归因进行识别, 进一步证实径流减少的主要原因是下垫面条件和降水的改变, 贡献率分别为 51.42%, 49.43%, 且随着经济社会发展, 下垫面条件改变对径流变化的影响越来越大。赵洪彬等[24]基于 FDC 生态指标对攀枝花站的水文情势进行评估, 结果发现季尺度下水文情势变化主要原因是水库影响, 且对于任何一个季节, 生态盈余和生态赤字整体都呈现出“低高低”的抛物线规律。张松等[25]基于生态径流指标的水文情势变化评估新方法, 进一步利用 12 个月生态盈余和 12 个月生态赤字构成的生态径流指标体系, 证实了建库前后每个月份都会对生态径流变化造成不同影响程度。康泽璇等[26]基于 IHA-RVA 法对大通河上中游水文节律变化进行研究, 结果发现由于水库建设及盆地的含水层存在, IHA 指标 1~12 月流量突变前后发生改变。分析多尺度下水文情势变化归因, 有利于应对水文情势变化带来的不同影响, 更好的维持河流正常生态功能及河流生态系统的健康基流量。

3.2 水文情势变化的生态响应

生态响应分析是应对河流水文情势演变对生态系统造成不利影响的重要评估形式。本文利用 SI 指标发现岷江在自然流态下生物多样性指数处于平稳变化, 随着人类活动的影响导致突变后生物多样性指数明显下降, 且人类活动干扰愈是强烈, 其下降趋势愈是快速。诸多学者对岷江流域物种丰富度、鱼类等的研究结果也印证了本研究的结论。如陈财等[27]通过像元分解法得出岷江流域植被覆盖度整体呈现波动向下减少趋势, 特别是 2008 年岷江流域内水库的维修及电站重建等人类活动越加频繁, 植被覆盖度变化较为明显, 减少面积占研究区的 26.4%, 进一步导致岷江流域植被覆盖度结构趋于恶化; 吕浩等[28]2018 年对岷江下游鱼类现状进行了研究, 调查发现 71 种鱼类, 与张春霖等[29]调查的 80 种相比, 鱼类种类数有所下降。综上所述, 岷江流域水文情势发生了中度改变, 并对当地的生物造成了负面影响, 本研究对其水文情势及生态响应的分析, 不仅帮助有关管理人员对岷江流域植被生态进行保护及科学合理地开发和利用岷江上游流域资源, 也进一步保护岷江流域的生物多样性。

4 结论

本次研究通过 5 种研究方法对岷江流域水文情势做了全面评估, 结果如下:

(1)M-K 和 Pettitt 检验综合表明 1993 年为岷江自然流态下的径流突变点, 说明岷江流域自 20 世纪 90 年代以来以大、中型水库修建对其径流产生影响显著。

(2)岷江流域年尺度 FDC 生态指标与降水距平有显著的相关关系, 说明该地区流量变化主要是由降水变化引起; 季尺度 FDC 生态指标显示夏季和年的变化情况有更好的一致性, 这是由于夏季高降水、高流量的影响, 使得夏季的降水和生态指标的变化情况最能代表整年的变化。

(3)利用 IHA-RVA 法、DHRAM 和 DO 改变度分析法综合分析可知, 岷江流域 32 个生态水文指标以中度和低度改变为主, 整体改变度为 44%, 属于中度改变。

(4)根据 Budyko 水热平衡方程计算径流对各影响因子的弹性系数, 发现人类活动影响的贡献率比降雨的贡献率多 10.32%, 表明人类活动极大影响了岷江流域的水文情势, 同时下垫面 n 的变化进一步表明气候变化对岷江流域径流的影响权重保持上升

的趋势。

(5) 岷江流域水文情势的改变也导致岷江生物多样性指数(SI)呈现出降低趋势,且变化期内(1994~2019年)降低速率加快,说明该期间人类活动对生态环境的影响权重较大。

参考文献

- [1] 白欣茹, 孟志龙, 高玉凤, 等. 基于多指标评价法的河流生态系统健康评价研究进展[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2022, 21(1):92-96. BAI X R, MENG Z L, GAO Y F, et al. Research progress of river ecosystem health assessment based on multi-index evaluation method[J]. Journal of Taiyuan Normal University (Natural Science Edition), 2022, 21(1):92-96.
- [2] 李光录, 樊立娟. 基于 IHA-RAV 法的长江源区生态水文情势变化[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(1):37-42, 50. LI G L, FAN L J. Study on ecohydrological regime change in headwaters of the Yangtze River by using indicators of hydrologic alteration and range of variability approach[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(1):37-42, 50.
- [3] RICHTER B, BAUMGARTNER J, WIGINGTON R, et al. How much water does a river need?[J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1):231-249.
- [4] 吕超楠, 金中武, 林木松, 等. 岷江流域水库建设对水沙输移的影响[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(8):9-15, 21. LV C N, JIN Z W, LIN M S, et al. Impact of reservoir construction on water and sediment transport in the Min River Basin[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(8):9-15, 21.
- [5] VOGEL R M, SIEBER J, ARCHFIELD S A, et al. Relations among storage, yield, and instream flow[J]. Water Resources Research, 2007, 43(5).
- [6] 顾西辉, 张强, 孔冬冬, 等. 基于多水文改变指标评价东江流域河流流态变化及其对生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(19):6079-6090. GU X H, ZHANG Q, KONG D D, et al. Based on multiple hydrological alteration indicators evaluating the characteristics of flow regime with the impact on the diversity of hydrophilic biology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(19):6079-6090.
- [7] BLACK A R, ROWAN J S, DUCK R W, et al. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive[J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2005, 15(5):427-446.
- [8] 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.
- [9] YANG H, YANG D, LEI Z, et al. New analytical derivation of the mean annual water-energy balance equation[J]. Water Resources Research, 2008, 44(3).
- [10] YANG Y C E, CAI X, HERRICKS E E. Identification of hydrologic indicators related to fish diversity and abundance: A data mining approach for fish community analysis[J]. Water Resources Research, 2008, 44(4).

-
- [11] PETERSSON M. Monitoring a freshwater fish population: Statistical surveillance of biodiversity[J]. *Environmetrics*, 1998, 9(2):139-150.
- [12] ZHU Y, WANG H, GUO W. The impacts of water level fluctuations of East Dongting Lake on habitat suitability of migratory birds[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 132:108277.
- [13] 郭文献, 周昊彤, 张丽, 等. 近 60 年来岷江水文情势评价[J]. *中国农村水利水电*, 2022(4):1-7. GUO W X, ZHOU H T, ZHANG L, et al. Evaluation of hydrological situation of Min River in the past 60 years, China[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2022(4):1-7.
- [14] 张雪芹, 徐晓明, 李想. 近 40 年增暖背景下岷江流域降水异常变化[J]. *自然灾害学报*, 2022, 31(4):44-56. ZHANG X Q, XU X M, LI X. Changes of abnormal precipitation with warming in the Min River Basin in the past 40 years[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(4):44-56.
- [15] 郭文献, 周昊彤, 张丽, 等. 岷江流域径流变化及成因分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(4):32-36. GUO W X, ZHOU H T, ZHANG L, et al. Analysis of runoff variation and causes in Min River Basin[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(4):32-36.
- [16] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3):245.
- [17] 张耀鑫, 姚传辉, 王刚. 基于 M-K 法与 SPI 指数的泰安降水量分析[J]. *海河水利*, 2022(4):97-100. ZHANG Y X, YAO C H, WANG G. Precipitation analysis in Tai'an based on M-K method and SPI index[J]. *Haihe Water Resources*, 2022(4):97-100.
- [18] 蓝云龙, 黎曙, 李霞, 等. 1956~2020 年黄河源区径流变化规律分析[J]. *陕西水利*, 2022(6):33-36, 39. LAN Y L, LI S, LI X, et al. Analysis on the change law of runoff in the source region of the Yellow River from 1956 to 2020[J]. *Shaanxi Water Resources*, 2022(6):33-36, 39.
- [19] GAO B, YANG D, ZHAO T, et al. Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008[J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 448/449:30-38.
- [20] RICHTER B D, BAUMGARTNER J V, POWELL J, et al. A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems[J]. *Conservation Biology*, 1996, 10(4):1163-1174.
- [21] 郭文献, 焦旭洋, 周昊彤, 等. 嘉陵江水文情势变化及其鱼类影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(4):805-813. GUO W X, JIAO X Y, ZHOU H T, et al. Hydrological regime alternation and fish influence in Jialing River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(4):805-813.
- [22] 周乐, 王瑞, 江善虎, 等. 生态相关水文指标的优选及其演变归因分析[J]. *生态学报*, 2022, 42(17):7068-7079. ZHOU L, WANG R, JIANG S H, et al. Optimal selection of the most ecologically relevant hydrological indicators and their evolutionary attributions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(17):7068-7079.
- [23] 杨雪琪, 武玮, 郑从奇, 等. 基于 Budyko 假设的沂河流域径流变化归因识别[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(2):100-106. YANG X Q, WU W, ZHENG C Q, et al. Attribution identification of runoff change in Yihe River Basin

based on budyko hypothesis[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(2):100-106.

[24] 赵洪彬,黄晓荣,周星宇,等.基于 FDC 生态指标的水文情势评价[J].中国农村水利水电,2020(9):100-104,111. ZHAO H B,HUANG X R,ZHOU X Y,et al.Hydrological situation evaluation based on FDC ecological indicators[J].China Rural Water and Hydropower,2020(9):100-104,111.

[25] 张松,郭晓明,周曼,等.基于生态径流指标的水文情势变化评估新方法[J].水力发电学报,2021,40(12):65-76. ZHANG S,GUO X M,ZHOU M,et al.New method for evaluating changes in hydrologic regimes based on eco-flows metrics[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(12):65-76.

[26] 康泽璇,王芳,刘扬,等.基于 IHA-RVA 法的大通河上中游水文节律变化[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(6):1065-1075. KANG Z X,WANG F,LIU Y,et al. Analysis of hydrological rhythm change based on IHA-RVA method in the upper and middle reaches of Datong River[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2022,20(6):1065-1075.

[27] 陈财,杨斌,李丹,等.岷江上游流域植被覆盖度时空变化分析[J].西南科技大学学报,2019,34(1):13-19. CHEN C, YANG B,LI D,et al.Temporal and spatial variation of vegetation coverage in the upper reaches of Min River[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology,2019,34(1):13-19.

[28] 吕浩,田辉伍,段辛斌,等.岷江下游干流段鱼类资源现状及其多样性分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(1):88-96. LV H,TIAN H W,DUAN X B,et al. Analysis of fish resources status and diversity in the lower reaches of the Min River[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(1):88-96.

[29] 张春霖,刘成汉.岷江鱼类调查及其分布的研究[J].四川大学学报(自然科学版),1957(2):221-247. ZHANG C L,LIU C H.A preliminary survey of the fishes of the Min River with some notes on their distribution[J].Journal of Sichuan University (Natural Science Edition),1957(2):221-247.