

冯胜航, 王党伟, 秦蕾蕾, 等. 金沙江流域径流变化特征及成因[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 248-257. FENG S H, WANG D W, QIN L L, et al. The characteristic and cause of runoff variation in Jinsha River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 248-257. (in Chinese)

金沙江流域径流变化特征及成因

冯胜航^{1,2,3}, 王党伟^{2,3}, 秦蕾蕾¹, 邓安军^{2,3}, 邢龙¹

(1. 中国长江三峡集团有限公司, 武汉 430010; 2. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048; 3. 中国水利水电科学研究院水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室, 北京 100048)

摘要: 基于金沙江流域近 60 a 的降雨和径流资料, 采用水量平衡法对天然径流量进行还原, 利用 Mann-Kendall 法及小波分析方法研究流域降雨量及天然径流量的变化趋势、周期及可能突变的年份, 分析天然径流的变化原因, 构建天然径流量与降雨量及归一化植被指数的相关关系式。结果表明: 金沙江流域降雨量和天然径流量总体呈周期性变化, 主周期均为 28 a, 与此同时降雨量和径流量均呈增加趋势, 降雨量每 10 a 相对增长幅度约 1.28%, 天然径流量每 10 a 相对增长幅度约 0.57%; 造成两者相对变幅差异较大的原因源于流域植被覆盖面积的增加; 考虑降雨及植被的综合影响, 建立天然径流与两者共同作用下的方程相关系数为 0.940, 其关系式为 $R=0.0177P^{1.691}/N^{0.923}$ 。研究成果可为金沙江流域水电开发和综合治理提供决策参考。

关键词: 径流; 降雨; 归一化植被指数; 变化特征; 成因分析; 金沙江流域

中图分类号: TV121.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0025

河川径流是地表水资源的主要表现形式, 在全球气候变暖及人类活动日趋加剧的大背景下, 变化环境对河川径流的影响研究已经成为科技工作者和流域管理者关注的热点问题^[1-3]。金沙江是长江上游干流河段, 水电开发条件优越。但金沙江下游水土侵蚀严重, 是长江流域水土防治重点区域, 20 世纪 90 年代地方政府陆续开展退耕还林工作, 流域植被得到恢复改善^[4-5]。同时, 金沙江流域也于该时期进入有计划的水电开发活动, 20 世纪末二滩水电站投产, 2010 年以来, 金沙江中下游干支流梯级水电站相继建成, 一定程度上影响了径流的年内和年际过程^[6-7]。因此, 开展金沙江流域年径流量的变化特征及成因研究对流域水资源持续利用具有重要意义。

目前已有不少学者^[8-10]针对金沙江流域的径流演变规律展开研究, 多年来流域实测径流整体呈现微弱上升, 流域降雨及温度也均呈现增加趋势。关于径流的影响因素分析, 现有文献显示主要有气候、下垫面条件、工程建设等方面。比如在气候方面金

沙江流域流量与降水量具有显著的正相关性, 但各区段径流与降雨具有时空演变的非一致性^[11-14]; 相对降雨而言流量对温度的响应变化不明显, 具体表现为流域多年冰雪融水补给量只有 15.5 亿 m^3 , 多年水面平均蒸散发量约 4 亿 m^3 , 两者相对于金沙江多年来千亿 m^3 级别的径流量占比较小, 温度变化对径流的影响相对有限^[15-16]; 少数研究^[17]引入太阳黑子、大气环流因子, 探究其对气候变化的作用, 从而研究径流的反馈响应, 但考虑到太阳黑子及大气环流因子受地域影响较大, 其对径流驱动的影响尚不明晰; 已有的多数研究^[18-20]仍然表明降水是流域径流变化的主要贡献因子。在下垫面条件方面, 近年来流域植被覆盖面积总体增加, 植被覆盖面积的增多会增加对降雨的截留及区域蒸散发作用, 通过根系持水还能改变土壤渗透能力, 从而直接影响流域径流的形成与演变^[21-22], 相关研究^[23-24]表明下垫面条件变化对金沙江流域径流减少的贡献率多达 17%~27%。在雅砻江二滩水电站、金沙江下游梯级水电站蓄水当年均有下游河流条件变化现象, 部分研究^[25-28]表

收稿日期: 2022-10-28 修回日期: 2023-02-06 网络出版时间: 2023-04-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230412.1038.013.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U2040217); 水利部泥沙科学与北方河流治理重点实验室开放基金项目(IWHR-JH-2020-A-05)

作者简介: 冯胜航(1997—), 男, 河南南阳人, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 2876447368@qq.com

通信作者: 王党伟(1982—), 男, 陕西乾县人, 正高级工程师, 博士, 主要从事水沙数值模拟研究。E-mail: wangdw17@126.com

示流域工程建设对金沙江下游区间径流减少的贡献量超过 70%。

综上所述可知:过往研究在气候因素方面着眼较多,认知较为系统全面;在下垫面植被覆盖及工程建设方面,多为定性相关分析或贡献剖析,且较少考虑人类生产生活取水对流域径流的影响。因此,本文将估算长时间序列水库工程及生产生活取水等人类活动对径流变化的影响量,基于实测径流对天然径流进行还原,从而将天然径流的影响因素缩小到降雨和植被变化中,然后再采用 Mann-Kendall 秩相关检验法及小波分析等方法,分析金沙江流域降雨量和天然径流量的变化趋势,建立天然径流量与降雨量和归一化植被指数的相关关系式,研究成果以期金沙江流域综合规划利用提供科学参考。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

金沙江流域位于长江上游,发源于唐古拉山脉各拉丹冬雪山西南侧,流经青、藏、川、滇、贵 5 省(自治区),流域广阔,支流众多,河川径流量丰富稳定。河流正源为沱沱河,经由南源当曲汇合后称通天河,向东南奔流至巴塘河口后始称金沙江,到四川盆地西南部接纳岷江为止,其间有雅砻江于攀枝花汇入。流域地形复杂多变,境内高山、峡谷、丘陵和盆地交错分布。受季风影响,流域气候具有显著区域性特征,植被类型丰富多样,从干旱河谷演变到森林、灌木、草甸直至高原荒漠。金沙江流域面积 49.5 万 km^2 (图 1),水能资源蕴含量高达 1.13 亿 kW,水能资源极为丰富。

1.2 数据来源

本研究采用的数据有:数字高程模型(digital elevation model, DEM)、降雨量、径流量和归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)。数据情况说明见表 1。DEM 用于提取流域河网及边界。为使研究区域降雨资料连续,对部分缺测雨量站的月降雨量进行了均值插补。屏山监测站点是金沙江流域出口控制站,位于向家坝坝址上游 28 km,因 2012 年向家坝电站蓄水遂改为水位站,2012—2019 年径流序列采用电站下游 2 km 处的向家坝监测站资料。NDVI 用来表征植被的覆盖状况,年植被指数数据集基于 SPOT/VEGETATION NDVI

卫星遥感数据,在月数据基础上采用最大值合成法生成。

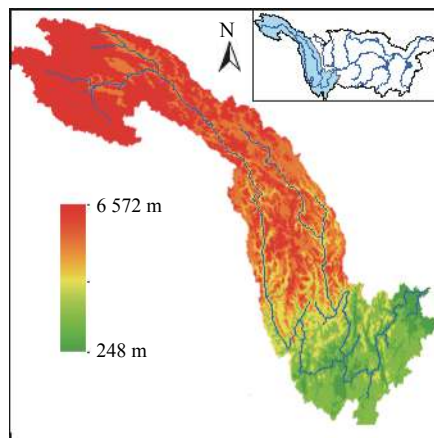


图 1 金沙江流域

Fig. 1 Schematic diagram of Jinsha River basin

表 1 研究数据及说明

Tab. 1 Research data and description

类型	来源	区域/站点	时间序列
DEM	地理空间数据云	金沙江流域	
降雨量	中国气象数据网	金沙江流域 31个气象站	1960—2019
径流量	长江水文局	屏山监测站	1960—2019
NDVI	中国科学院资源环境 科学与数据中心	金沙江流域	1998—2019

2 研究方法

2.1 趋势与周期分析方法

M-K 趋势检验的基本原理^[29]为:针对一组独立随机的时间序列 $x_i(i=1,2,\dots,n)$,定义检验统计量 S ,当 $n \geq 8$ 时,统计量 S 近似服从正态分布,均值 $E(S)=0$,方差 $\text{Var}(S)=n(n-1)(2n+5)/18$ 。进一步得到标准化正态统计量 Z 。在双边趋势检验中,对于给定的置信水平 α ,当 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$ 时,认为在置信水平下序列数据存在明显的上升或下降趋势。 Z 为正值时表示增加趋势,负值表示减少趋势。通常用 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$ 作为显著性标准,查正态分析表可知,当统计量 Z 的绝对值在大于等于 1.96、2.57 时分别表示该序列通过了置信度 95%、99% 的显著性检验。

M-K 突变检验的基本原理是,构造新的检验统计量 S_k ,均值 $E(S_k)=k(k-1)/4$,方差 $\text{Var}(S_k)=k(k-1)(2k+5)/72$,在此基础上定义统计量 $UF_k =$

$(S_k - E(S_k)) / \sqrt{\text{Var}(S_k)} (k = 1, 2, \dots, n)$, 由此计算得到的 UF_k 服从标准正态分布, $UF_k > 0$ 时说明序列为上升趋势, 反之则为下降趋势。同时将原时间序列逆序排列, 再按照上述方法计算统计量 UF'_k , 同时使 $UB_k = -UF'_{n-k+1} (k = 1, 2, \dots, n)$, 得到逆序序列统计量 UB_k 。给定显著性水平 α , 给出统计量 UF_k 和 UB_k 的时间序列曲线图, 当曲线 UF_k 超过显著性水平线, 即序列表示存在明显的变化趋势时, 如果曲线 UF_k 与 UB_k 的交叉点位于显著性水平线之间, 该点便是突变点的开始。

小波分析的基本思想是用一簇小波函数系表示或逼近某一信号或函数, 本文选取 Morlet 小波作为本研究的小波函数^[30]。连续小波变换 $W_x(a, b)$ 的定义为

$$W_x(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (a, b \in R, a \neq 0) \quad (1)$$

式中: $\varphi(t)$ 为给定的小波函数; $x(t)$ 为气象水文时间序列; a 是尺度因子, 表征小波的周期; b 是时间变换因子, 反映时间上的平移。 $\bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为 $\varphi(t)$ 经过伸缩和平移后的取其共轭得到的小波簇函数; $W_x(a, b)$ 为小波变换系数, 表述时间序列与该点所代表的小波函数的近似程度。

小波方差表示时间序列中各种尺度扰动的强度, 反映了能量随时间尺度的分布, 峰值处对应的尺度为该时间序列的主周期。连续小波方差的计算公式为

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_x(a, b)|^2 db \quad (2)$$

2.2 径流还原方法

径流还原采用水量平衡法, 水量平衡是基于流域内径流总量保持不变而得到的一种径流还原方法^[31], 其表达式为

$$W_n = W_m + W_s + W_{id} \quad (3)$$

式中: W_n 为还原后天然径流量; W_m 为实测径流量; W_s 是供水量; W_{id} 为水利工程蓄水和调水量。实测径流量由流域控制监测站获得。金沙江流域 1998—2019 年供水量采用《长江流域及西南诸河水资源公报》数据^[32], 1960—1997 年供水量由流域人口估算获得。具体估算过程如下: 基于中国人口公里网格分布数据^[33], 计算 2000、2005、2010、2015 年金沙江流域范围的居住人口, 辅以同年份的供水量, 计算 4

个年份的人均耗水量在 326~343 m^3 , 总体波动不大, 取其平均值 337 m^3 作为历史时期的人均耗水量; 同时, 结合统计年鉴, 依据 2000—2015 年 4 次金沙江流域人口数占西南青、藏、川、滇、贵等 5 省(自治区)的人口比例, 估算历史时期流域逐年居住人口数; 最后用人口数乘以人均耗水量, 得到历史时期金沙江流域逐年取水量。水利工程蓄水和调水量调用现有研究文献^[16,25]。

2.3 相关分析

本文采用皮尔逊相关分析及偏相关分析法用于判别径流影响因素之间的相关关系。皮尔逊相关分析主要用于探明两个因子间关系的紧密程度, 而偏相关分析是在扣除其他因素影响前提下进一步查明两个因子间的相关程度, 偏相关系数的具体计算公式^[34] 为

$$r_{ij \cdot h} = \frac{r_{ij} - r_{ih}r_{jh}}{\sqrt{1 - r_{ih}^2} \sqrt{1 - r_{jh}^2}} \quad (4)$$

式中: r_{ij} 是变量 x_i 与 x_j 的皮尔逊相关系数; $r_{ij \cdot h}$ 是变量 x_i 与 x_j 相对变量 x_h 的偏相关系数。

3 研究结果

3.1 降雨变化分析

基于金沙江流域 1960—2019 年 31 个气象站点的年降雨数据, 采用泰森多边形法计算面平均降雨量。泰森多边形法适用于流域内气象站或降雨量分布不均的情况, 以气象站代表面积比例作为计算权重系数, 能够兼顾因地形高程差异引起的降雨量分布不均衡的问题, 由此计算的流域多年面平均降雨量为 604.6 mm。流域内各站多年平均降雨量在 295~1 135 mm, 总体呈现上游往下游递增的变化过程, 比如长江源区玉树站年均降雨 492 mm, 金沙江下游昭觉站年均降雨 1 029 mm。

金沙江流域降雨量逐年变化过程、突变检验及小波分析结果见图 2。流域降雨量随时间序列呈增加趋势, 折线形态表现波动式上升, 每 10 a 平均增长幅度约 7.7 mm, 相对增长幅度为 1.28%。流域降雨量多年变差系数 0.08, 最小年降雨量为 1969 年的 513 mm, 最大年降雨量是 1998 年的 723 mm, 最大值与最小值的比值为 1.4, 单站丰水年与枯水年降雨量之比在 1.8~3.6。采用 M-K 方法计算的标准化正态变量 $Z=2.80$, 超出 99% 置信度检验, 认为流域降雨量在过去 60 a 间增加趋势明显。

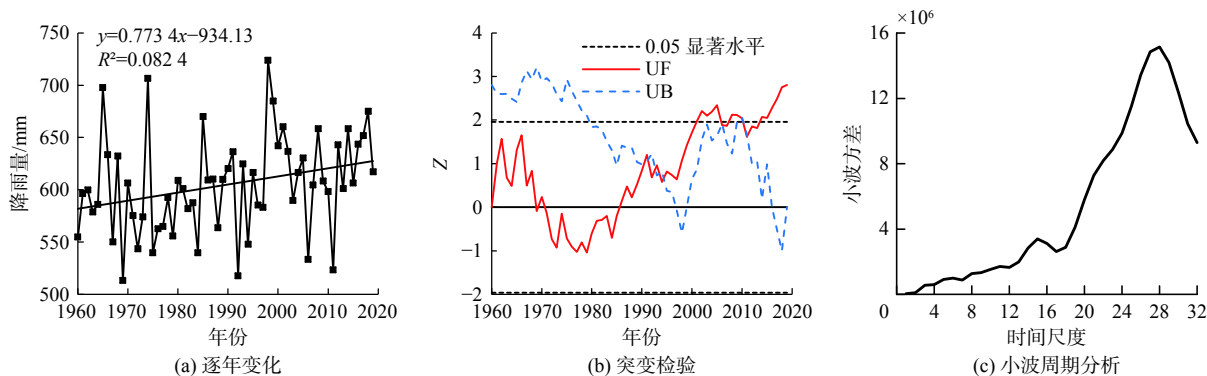


图2 金沙江流域降雨量逐年变化、突变及周期分析

Fig. 2 Annual variation, abrupt change and cycle analysis of precipitation in Jinsha River basin

突变检验结果显示:金沙江流域降雨量在20世纪60年代呈增加趋势,70年代至80年代中期转为减少趋势,80年代后期开始降雨量又变为上升趋势,直至21世纪初期突破95%显著性水平线,此后正序统计量UF维持在显著性水平线上下波动,在2010年代持续上升,在2018年通过99%置信度检验,增加趋势显著。在研究期内,正序统计量UF与逆序统计量UB在1990—1994年相交5次,随后通过95%显著性检验,初步认为年降雨量在1990年左右发生突变。小波分析结果表明,年降雨量在28a的周期振荡最强,小波方差最大,由此认为28a是金沙江流域年降雨量变化的主周期。

3.2 径流变化分析

3.2.1 天然年径流量还原计算

估算的金沙江流域逐年供水及还原天然径流量变化过程见图3,流域部分水库和引水工程的基

本情况见表2。需要说明的是,部分水库由于库容大,实际运用时往往需要两年才能蓄至正常蓄水位,针对此类水库,在做还原计算时,以水库当年实际蓄水量参与当年径流还原,余下的库容水量计入下一年的还原计算。以溪洛渡水库为例,正常蓄水位600m,相应库容115.74亿 m^3 ,2013年5月下闸蓄水,12月蓄水至汛限水位560m,对应库容69.23亿 m^3 ,至2014年9月,首次蓄水到正常蓄水位,工程进入正常运用。在溪洛渡水库参与还原计算过程中,第一阶段蓄水的69.23亿 m^3 计入2013年径流变化中,第二阶段蓄水的46.51亿 m^3 参与2014年的径流计算。牛栏江-滇池补水工程于2013年12月运行以来,每年约向滇池调水6亿 m^3 。另外,表中所列清水海、松华坝、布西、卡基娃水库库容为总库容,用总库容参与还原计算对结果影响不大。

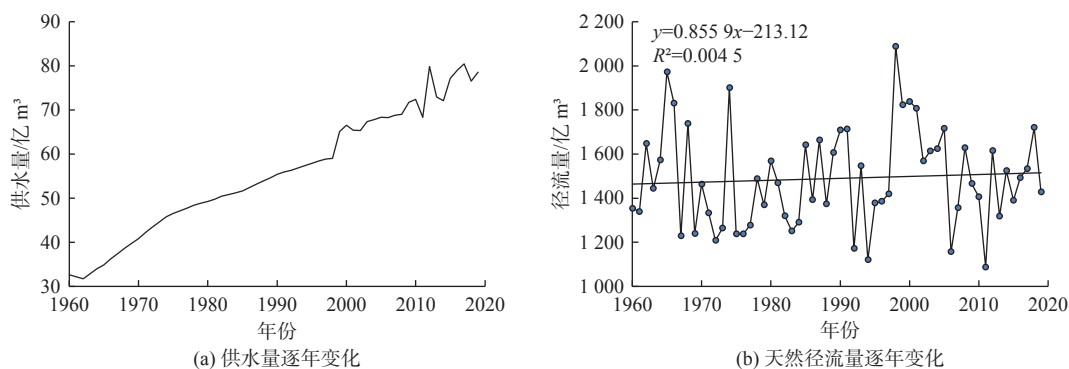


图3 金沙江流域供水及天然径流量逐年变化

Fig. 3 Annual variation of water supply and natural runoff in Jinsha River basin

3.2.2 天然径流量年际变化分析

屏山站天然径流量的年际变化特征和降雨量的分布情况类似,多年平均值为1490亿 m^3 ,变差系数0.148,年际差异不大。最大年径流量在1998年,最小年径流量在2011年,最大值是最小值的1.92

倍。径流量随时间序列呈上升趋势,每10a平均增长幅度约8.6亿 m^3 ,相对增长幅度约0.57%。屏山站天然年径流量计算的标准化变量 $Z=0.96$,认为金沙江流域天然径流量增加趋势不明显。

表 2 金沙江流域部分水库建设基本情况^[16,25]

Tab. 2 Basic situation of large-scale reservoir construction in Jinsha River basin^[16,25]

水库名称	水系	蓄水时间	正常蓄水位库容/亿m ³	水库名称	水系	蓄水时间	正常蓄水位库容/亿m ³
毛家村	以礼河	1966年	5.0	官地	雅砻江	2011年11月	7.5
清水海	牛栏江	1989年	1.5	向家坝	金沙江	2012年10月	49.8
松华坝	普渡河	1996年	2.2	龙开口	金沙江	2012年11月	5.1
渔洞	横江	1996年12月	3.6	溪洛渡	金沙江	2013年5月	115.7
二滩	雅砻江	1998年5月	57.9	锦屏一级	雅砻江	2013年7月	77.7
大桥	雅砻江	1999年6月	5.9	鲁地拉	金沙江	2014年2月	15.5
云龙	普渡河	2004年	4.0	观音岩	金沙江	2014年10月	20.7
青山嘴	龙川江	2009年8月	0.7	梨园	金沙江	2014年11月	7.3
布西	雅砻江	2010年9月	2.5	卡基娃	雅砻江	2014年12月	3.6
金安桥	金沙江	2010年10月	8.5	立洲	雅砻江	2015年11月	1.8
阿海	金沙江	2011年12月	8.1	牛栏江引水工程	牛栏江	2013年12月	6.0

天然径流量的突变检验及小波分析结果见图 4。突变结果显示,流域天然径流量 20 世纪 60 年代处于上升趋势,70 年代至 80 年代变化趋势表现为减少,从 90 年代开始又转为增加趋势,此后直至 21 世纪 10 年代径流量基本始终表现增加。UF 和 UB 统计量在研究期内相交 8 次,交点均位于 95% 显著性

水平线内,且 UF 统计量始终没有超过显著性水平线,认为天然径流量在研究期内不存在突变现象。小波分析结果显示,28 a 亦是天然径流量变化的第一主周期。金沙江流域降雨和天然径流的第一主周期保持一致。

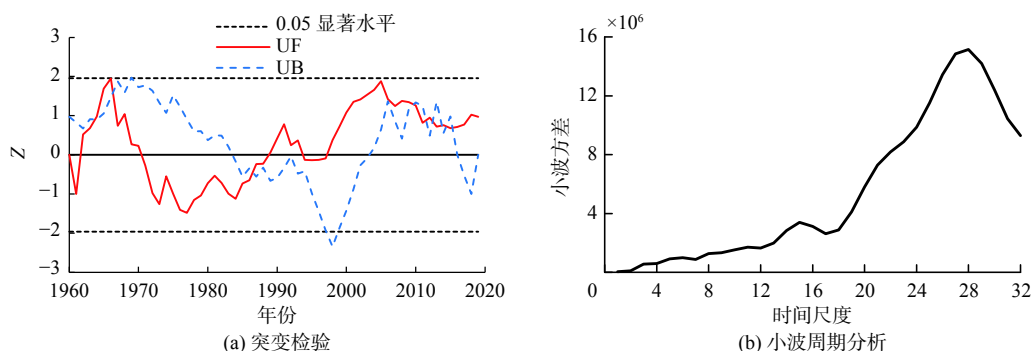


图 4 金沙江流域天然径流量的突变及周期分析

Fig. 4 Abrupt change and cycle analysis of natural runoff in Jinsha River basin

4 讨论

4.1 降雨变化

由降雨与天然径流的变化过程来看,研究期内两者折线变化过程基本一致,皮尔逊相关系数达到 0.877,相关度较高。结合降雨突变检验结果,将研究期划分为 1960—1989 年、1990—2019 年两段时期,点汇降雨量和天然径流量关系并进行拟合,发现降雨量 P 和径流量 R 具有良好的幂函数关系 $R = kP^\alpha$ (图 5)。系数 k 是年降雨径流双对数曲线的截距,表征不同时期相同降雨量下所对应的径流量大小,幂指数 α 为双对数曲线的斜率,表明在降雨

量变化相同情况下径流量的变化幅度。在前后两个研究时期,幂指数 α 略增加,系数 k 减小,说明 1990—2019 年相对前一时段同降雨量下产生的径流量减小,但其年际变化幅度增加;相关系数 r 由 0.874 增加到 0.891,降雨径流相关性略增加。

为进一步说明降雨与径流的关系及变化趋势,引入径流系数概念,径流系数是流域内某时段地表径流量与同时段降雨量的比值,反映降雨转变为径流的比例,综合表现了流域内自然和人类活动对降雨产流的影响。基于降雨和径流计算的径流系数变化过程见图 6,多年平均径流系数为 0.54,年际差异较小,每 10 a 平均变化幅度约为 -0.67%,年最大

值是最小值的 1.41 倍。计算降雨与径流系数的皮尔逊相关系数为 0.594, 相关性相对较低。径流系数的标准化变量 $Z=-0.87$, 没有达到 95% 置信度水平, 径流系数在近 60 年间下降趋势不明显。但应注意到, 自 1998 年开始径流系数呈现断崖式下跌, 计算近 20 年的标准化变量 $Z=-2.82$, 降低趋势明显, 表明近年来流域降雨转化为径流的比例显著降低。

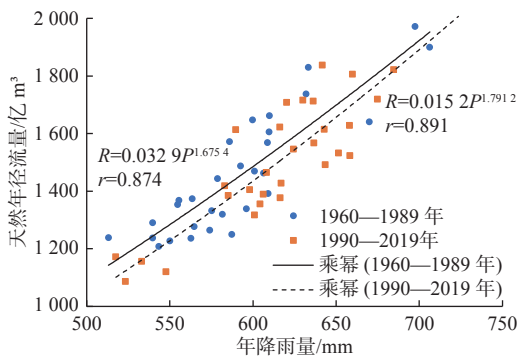
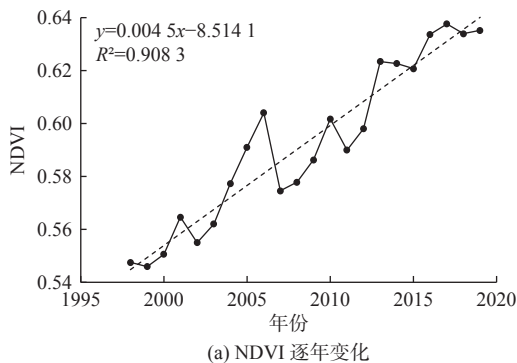
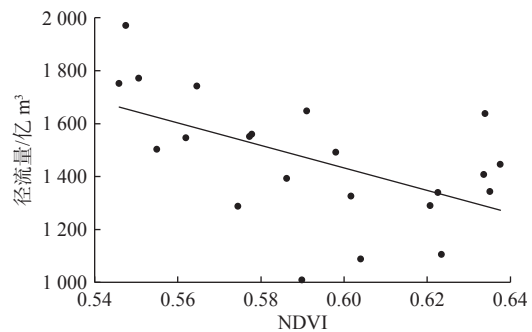


图 5 金沙江流域年降雨量与径流量关系

Fig. 5 The relationship between precipitation and runoff



(a) NDVI 逐年变化



(b) NDVI 与径流量关系

图 7 金沙江流域 NDVI 逐年变化及与径流的响应关系

Fig. 7 Annual variation of NDVI and its relationship with runoff in Jinsha River basin

计算近 20 a 降雨-径流(径流系数)及 NDVI-径流(径流系数)的皮尔逊相关系数及偏相关系数结果见表 3。相比皮尔逊系数, 扣除植被作用, 降雨、径流偏相关系数略增加, 增加幅度相对不大, 说明植被对两者的相关关系影响较小, 降雨对径流的驱动关系较为稳定, 这与黄河中游、永定河流域植被对降雨径流相关分析影响较大^[35-36]的情况有所区别。究其原因, 金沙江流域大部分属于湿润半湿润区, 降水条件丰沛, 植被覆盖面积增加虽然导致蒸腾作用加剧但相比降雨而言作用有限, 流域近年来实际蒸散发量在 329.2~430.6 mm, 年际变化总体呈增加趋势^[37-38], 但同期降雨量在 523.3~658.3 mm, 也表现增加趋势, 蒸散发量的变化幅度总体低于降雨量

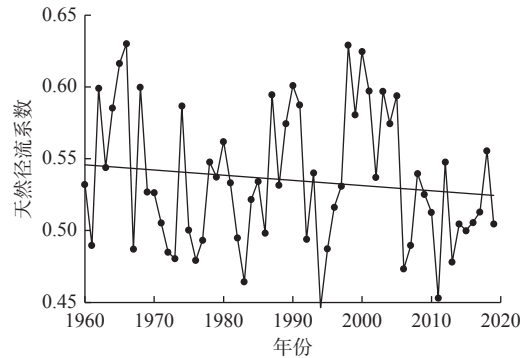


图 6 金沙江流域径流系数变化过程

Fig. 6 Runoff coefficient process in Jinsha River basin

4.2 植被变化

整理的金沙江流域 1998—2019 年的 NDVI 逐年变化及其与天然径流的响应关系见图 7。近 20 a 流域 NDVI 多年平均值为 0.592。计算的 NDVI 标准化变量 $Z=5.30$, 说明流域植被覆盖面积近年明显增加, NDVI 每 10 a 平均增长幅度为 0.045。由 NDVI 与天然径流的数据点分布可知, 径流变化与 NDVI 呈负相关。

变幅, 因此降雨变化量能够抵消掉蒸散发作用的变化量。扣除降雨作用, NDVI、径流的偏相关系数显著增加, 说明 NDVI 受降雨作用影响比较明显, 剔除降雨作用, 植被覆盖与径流的驱动关系变好。相比径流而言, 降雨、NDVI 与径流系数的相关性基本一致, 皮尔逊相关系数、偏相关系数差别均较小, 在消除彼此作用后与径流系数的相关性均仅略增加, 两者与径流系数的驱动关系均较为稳定。

综合以上分析, 金沙江流域天然径流量和降雨量具有显著正相关关系, 与植被覆盖呈现负相关性。年径流量和年降雨量回归相关系数较高, 同时其 M-K 趋势检验结果一致(年径流量和年降雨量序列均呈增加趋势), 进一步佐证金沙江流域降雨仍是驱动

径流变化的主要因素;但径流量的 10 a 相对增长幅度不足降雨量相应变幅的一半,径流系数近年来亦减小趋势显著,造成两者相对变幅差异的原因主要源于植被覆盖的增加。

表 3 降雨和 NDVI 与径流、径流系数的相关分析
Tab. 3 Correlation analysis of precipitation and NDVI with runoff and runoff coefficient

参考系数	相关系数	偏相关系数
降雨-径流	0.875	0.917
NDVI-径流	-0.502	-0.702
降雨-径流系数	0.637	0.679
NDVI-径流系数	-0.633	-0.676

4.3 天然径流与降雨、植被的相关关系

基于上述分析,建立天然径流量 R 、年径流系数 ϕ 与降雨量 P 和归一化植被指数值 N 的相关关系式,其形式为

$$Y = \alpha_0 P^{\alpha_1} N^{\alpha_2} \quad (5)$$

以 Y 表示天然径流量或径流系数,降雨及植被指数作为自变量, α_0 、 α_1 、 α_2 是拟合参数。基于金沙江流域 1998—2019 年的实测资料对上式回归计算,得到天然径流、径流系数与降雨和归一化植被指数的相关关系式为

$$R = 0.0177 P^{1.691} N^{-0.923} \quad (r = 0.940) \quad (6)$$

$$\phi = 0.003876 P^{0.690} N^{-0.927} \quad (r = 0.828) \quad (7)$$

径流回归方程相关系数 $r=0.940$, 拟合度较好,径流系数回归方程相关系数 $r=0.828$, 两者的回归方程及回归系数均通过了 0.01 的显著性检验。与降雨(植被)单因素分析相比,拟合得到的径流及径流系数相关方程相关系数均增加,尤其是径流系数与单因素建立相关性时,与两种因素的相关系数仅为 0.63 左右,而在考虑两种因素的综合作用下相关系数增加到 0.828,相关性增加明显,可见考虑降雨及植被的共同影响更能准确反映径流变化的实际情况。但相对径流而言,径流系数与降雨及植被双因素作用下的相关系数相对较低,说明径流系数还应存在着其他较为重要的影响因素。

5 结论

本文利用 Mann-Kendall 秩相关检验及小波分析等方法对金沙江流域降雨量和天然径流量的变化趋势、突变年份及周期变化进行了统计分析,并采用数理方法建立了天然径流量与降雨量及归一化植被指数的相关关系式,主要结论如下:

金沙江流域多年平均降雨量 604.6 mm,多年平均天然径流量 1 490 亿 m^3 ,两者均呈现增加趋势,但降雨量增加趋势明显,天然径流量增加趋势不显著,每 10 a 平均增长幅度分别为 7.7 mm、8.6 亿 m^3 ,相对增长幅度分别为 1.28%、0.57%;流域降雨量和天然径流量总体呈周期性变化,主周期保持一致均为 28 a,其中,降雨量在 1990 年左右发生突变,天然径流量无突变年份。

金沙江流域降雨量是引起径流量变化的主要因素;但天然径流量的 10 a 相对变幅较降雨量小,造成两者变幅差异的原因在于流域植被覆盖面积的增加;流域 NDVI 多年平均值为 0.592,增加趋势明显,每 10 a 平均增长 0.045。

与降雨(植被)单因素分析相比,径流与两者共同作用下所建立的关系式相关性增加,考虑降雨及植被的共同影响更能准确反映径流变化的实际情况。

随着全球气候变暖及流域水土防治工程的继续实施,温度对流域源头寒区河流的径流影响或许会增加。因此关于未来长时间序列下两者对径流演变的影响,有待结合数据进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 张建云,王国庆,金君良,等. 1956—2018年中国江河径流演变及其变化特征[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 153-161. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2020.02.001.
- [2] 裴宏伟,杨佳,张红娟,等. 变化环境下清水河流域径流演变特征及驱动力[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 1-13. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2020.0022.
- [3] 王庆明,姜珊,李森,等. 大河流域山区径流量衰减影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(4): 669-679. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0070.
- [4] 丁文荣. 金沙江下段植被 NDVI 变化趋势及其归因[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 107-112. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2017.01.018.
- [5] 张顾萍,陈国民,邵怀勇,等. 近16年金沙江流域植被覆盖时空特征及其对气候的响应[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1638-1648. DOI: 10.11870/cj-lyzyhj202107011.
- [6] 陈启会,张俊,侯雨坤,等. 近60年气候与土地利用变化对金沙江径流的影响[J]. 人民长江, 2018, 49(23): 47-53. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.23.009.
- [7] LONG L H, JI D B, LIU D F, et al. Effect of cascad-

- ing reservoirs on the flow variation and thermal regime in the lower reaches of the Jinsha River[J]. *Water*, 2019, 11(5): 1008. DOI: 10.3390/w11051008.
- [8] 刘晓婉. 金沙江流域气象因子特征及径流规律初步研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2016.
- [9] LU C H, DONG X Y, TANG J L, et al. Spatio-temporal trends and causes of variations in runoff and sediment load of the Jinsha River in China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(10): 2361-2378. DOI: 10.1007/s11629-018-5330-6.
- [10] WU Y Y, FANG H W, HUANG L, et al. Changing runoff due to temperature and precipitation variations in the dammed Jinsha River[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 582: 124500. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124500.
- [11] 卢璐, 王琼, 王国庆, 等. 金沙江流域近60年气候变化趋势及径流响应关系[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(5): 16-21. DOI: 10.3969/j.issn.1002-5634.2016.05.003.
- [12] 魏晓玥, 黄晓荣, 潘萃, 等. 金沙江上游近60年径流变化对气候的响应[J]. *水力发电*, 2019, 45(8): 12-17. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2019.08.004.
- [13] YIN J, YUAN Z, YAN D H, et al. Addressing climate change impacts on streamflow in the Jinsha River basin based on CMIP5 climate models[J]. *Water*, 2018, 10(7): 910. DOI: 10.3390/w10070910.
- [14] 张海荣, 周建中, 曾小凡, 等. 金沙江流域降水和径流时空演变的非一致性分析[J]. *水文*, 2015, 35(6): 90-96. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2015.06.016.
- [15] 谢自楚, 王欣, 康尔泗, 等. 中国冰川径流的评估及其未来50 a变化趋势预测[J]. *冰川冻土*, 2006(4): 457-466. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2006.04.001.
- [16] 张小峰, 闫昊晨, 岳遥, 等. 近50年金沙江各区段年径流量变化及分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(10): 2283-2292. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201810014.
- [17] 张敏, 黄晓荣, 王延珺. 金沙江流域径流演变过程及影响因素分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(7): 27-31. DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2022.20212119.
- [18] LIU X W, PENG D Z, XU Z X. Identification of the impacts of climate changes and human activities on runoff in the Jinsha River basin, China[J]. *Advances in Meteorology*, 2017, 4631, 381: 1-9. DOI: 10.1155/2017/4631831.
- [19] ZHANG D, WANG W S, YU S Y, et al. Assessment of the contributions of climate change and human activities to runoff variation: case study in four subregions of the Jinsha River basin, China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2021, 26(9): 05021024. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002119.
- [20] WANG L, CAO H, LI Y R, et al. Attribution analysis of runoff in the upper reaches of Jinsha River, China[J]. *Water*, 2022, 14(17): 2768. DOI: 10.3390/w14172768.
- [21] WEI X H, LI Q, ZHANG M F, et al. Vegetation cover: Another dominant factor in determining global water resources in forested regions[J]. *Global Change Biology*, 2018, 24(2): 786-795. DOI: 10.1111/gcb.13983.
- [22] LI H J, SHI C X, ZHANG Y S, 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135588.
- [23] DU J, SHI C X, ZHANG C D. Modeling and analysis of effects of precipitation and vegetation coverage on runoff and sediment yield in Jinsha River basin[J]. *Water Science and Engineering*, 2013, 6(1): 44-58. DOI: 10.3882/j.issn.1674-2370.2013.01.004.
- [24] ZHANG X F, YAN H C, YUE Y, et al. Quantifying natural and anthropogenic impacts on runoff and sediment load: an investigation on the middle and lower reaches of the Jinsha River basin[J]. *Journal of Hydrology:Regional Studies*, 2019, 25: 100617. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100617.
- [25] 袁晶, 许全喜. 金沙江流域水库拦沙效应[J]. *水科学进展*, 2018, 29(4): 482-491. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2018.04.004.
- [26] HUANG X R, GAO L Y, YANG P P, et al. Cumulative impact of dam constructions on streamflow and sediment regime in lower reaches of the Jinsha River, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2018, 15(12): 2752-2765. DOI: 10.1007/s11629-018-4924-3.
- [27] CHEN Q H, CHEN H, ZHANG J, et al. Impacts of climate change and LULC change on runoff in the Jinsha River basin[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(1): 85-102. DOI: 10.1007/s11442-020-1716-9.
- [28] 陈瑜彬, 张潇, 杨文发, 等. 梯级水库建设运行对河流径流影响定量化分析[J]. *人民长江*, 2021, 52(4): 116-123. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.04.018.
- [29] 史红玲, 胡春宏, 王延贵, 等. 淮河流域水沙变化趋势及其成因分析[J]. *水利学报*, 2012, 43(5): 571-579. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2012.05.007.
- [30] 刘笑彤, 蔡运龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析: 以通天河为例[J]. *北京大学学报*

- (自然科学版), 2014, 50(3): 549-556. DOI: [10.13209/j.0479-8023.2014.056](https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2014.056).
- [31] 魏茹生. 径流还原计算技术方法及其应用研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [32] 水利部长江水利委员会. 长江流域及西南诸河水资源公报[M]. 武汉: 长江出版社, 1998-2019.
- [33] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集[EB/OL]. 资源环境科学数据注册与出版系统, 2017.
- [34] 岳卫峰, 孟恺恺, 侯凯旋, 等. 河套灌区地下水埋深时空变异特征及其影响因素[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(5): 81-89. DOI: [10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2019.0113](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2019.0113).
- [35] 支童, 张洪波, 辛琛, 等. 秃尾河流域植被覆盖变化及其对径流的影响[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(2): 40-52. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2021.02.005](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2021.02.005).
- [36] 杜勇, 李建柱, 牛凯杰, 等. 1982—2015年永定河山区植被变化及对天然径流的影响[J]. *水利学报*, 2021, 52(11): 1309-1323. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20210201](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20210201).
- [37] 张珂, 鞠艳, 李致家. 金沙江流域实际蒸散发遥感重建及时空特征分析[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 182-191. DOI: [10.14042/j.cnki.32.1309.2021.02.003](https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2021.02.003).
- [38] 鞠艳, 张珂, 李炳锋, 等. 金沙江流域实际蒸散发时空分布特征及其影响因子[J]. *水资源保护*, 2022, 38(6): 104-110, 153. DOI: [10.3880/j.issn.10046933.2022.06.014](https://doi.org/10.3880/j.issn.10046933.2022.06.014).

The characteristic and cause of runoff variation in Jinsha River basin

FENG Shenghang^{1,2,3}, WANG Dangwei^{2,3}, QIN Leilei¹, DENG Anjun^{2,3}, XING Long¹

(1. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, State Key Laboratory of Watershed Water Cycle Simulation and Regulation, Beijing 100048, China; 3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Key Laboratory of Sediment Science and Northern River Training, Ministry of Water Resources, Beijing 100048, China)

Abstract: Jinsha River is the mainstream of the upper reaches of the Yangtze River, which originates from the Tanggula Mountains Galadan Snow Mountain. The river has superior hydropower development conditions, but it is also accompanied by serious soil erosion problems. In recent years, large-scale water and soil control and water conservancy project construction activities have been carried out in the Jinsha River basin (JRB), which has affected the intra-annual and inter-annual variation process of runoff to some extent. In the future, with the continuous demonstration and implementation of a series of major national strategic projects, the trend of water resources demand in JRB will rise significantly and continue to increase. Therefore, it is of great significance for the sustainable utilization of water resources to carry out the analysis and research on the characteristics and causes of runoff under the changing environment in the Jinsha River basin.

Based on 60 years of measured precipitation and runoff data of JRB, the impact quantity change process of long-term human activities such as reservoir projects and production and living water intake on runoff was estimated and the water balance method was used to calculate and restore the natural runoff. The Mann-Kendall test, wavelet analysis, and other mathematical statistics methods were used to study the variation trend, change cycle, and possible abrupt years of precipitation and natural runoff in JRB. At the same time, the concept of normalized vegetation index was introduced to analyze the variation causes of natural runoff, and the correlative relationship between natural runoff and the combined effect of precipitation and normalized difference vegetation index was constructed.

The results show that: (1) The average annual precipitation is 604.6 mm, and the average annual natural runoff is 149 billion m³ in JRB. Both of them show an increasing trend, but the increasing trend of precipitation is obvious, and the increasing trend of natural runoff is not significant. The corresponding ten-year average increment of precipitation and natural runoff is 7.7 mm and 860 million m³, and the ten-year relative increase percentage is 1.28% and 0.57%, respectively. The precipitation and natural runoff in JRB generally change periodically, and the main change cycle is consistent, which is 28 years. The precipitation has an abrupt point in 1990, and the natural runoff shows that there is no abrupt point. (2) The precipitation is the main impact factor causing runoff changes in JRB, but the relative increase percentage of natural runoff is smaller than that of precipitation. The reason for the difference in increased amplitude between the two research objects is mainly due to the increase of vegetation cover

in the basin. There is a negative correlation between vegetation cover and runoff change. Overall, the better the vegetation cover, the more pronounced the runoff attenuation. The average normalized difference vegetation index of JRB was 0.592, and the increasing trend was obvious, with a ten-year average annual increase of 0.045. (3) Compared with the single impact factor analysis of precipitation or normalized difference vegetation index, the established response relationship correlation between natural runoff and the combined effect of the two impact factors increases, and the correlation coefficient reaches 0.940. Considering the combined effect of precipitation and vegetation can more accurately reflect the actual situation of runoff change. The relationship between natural runoff and the combined effect of precipitation and normalized difference vegetation index is $R = 0.0177 P^{1.691} N^{-0.923}$. The research results can provide decision-making reference and scientific guidance for hydropower development and comprehensive management in JRB.

Key words: runoff; precipitation; normalized difference vegetation index; variation characteristic; cause analysis; Jinsha River basin

3月22日是第三十一届“世界水日”，第三十六届“中国水周”的宣传活动同步开启。联合国确定今年“世界水日”的主题是“加速变革”。结合黄河保护法将自今年4月1日起施行，我国纪念今年“世界水日”“中国水周”的活动主题是“强化依法治水 携手共护母亲河”。

来源：李国英.强化依法治水 携手共护母亲河——写在黄河保护法施行和2023年“世界水日”“中国水周”之际[N].人民日报,2023年03月22日(第16版)。