

嘉陵江流域水文特征分析与径流反推

郑倩¹, 孔令兮²

¹长江水利委员会水文局长江上游水文水资源勘测局合川分局, 重庆

²长江水利委员会水文局长江三峡水文水资源勘测局宜昌分局, 湖北 宜昌

收稿日期: 2024年5月8日; 录用日期: 2024年8月7日; 发布日期: 2024年8月28日

摘要

嘉陵江作为长江上游的重要支流, 其水文特征对区域生态环境和水资源管理具有深远影响。本研究旨在深入分析嘉陵江流域的水文特征, 揭示其变化规律及驱动机制, 以为水资源评估和管理提供科学依据。研究采用DEM数据和ArcGIS软件模拟分析地形水系, 结合CPC降水数据、水文站实测数据(1979~2019年)探讨降水和径流量的变化规律。通过子流域划分、河网生成、敏感性分析等方法, 评估了流域的水文平衡特征。结果显示, 嘉陵江流域河网密度为0.197 km/km², 与径流系数呈负相关, 且1984~2002年为降水减少期, 2003~2019年为降水增多期。流域的平均径流量呈减少趋势, 尤其是1979~1988年、1989~1998年。嘉陵江流域的水文特征受气候变化、人类活动的显著影响。降水量的减少是导致径流量减少的主要原因, 而河网密度的变化则反映流域水文条件的时空异质性。

关键词

嘉陵江, 水文特征, 径流反推, 水文资源, 径流系数

Analysis of Hydrological Characteristics and Runoff Inversion in Jialing River Basin

Qian Zheng¹, Lingxi Kong²

¹Hechuan Branch of Upper Changjiang River Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Changjiang Water Resources Commission Hydrology Bureau, Chongqing

²Yichang Branch of Changjiang River Three Gorges Hydrology and Water Resources Survey Bureau, Changjiang Water Resources Commission Hydrology Bureau, Yichang Hubei

Received: May 8th, 2024; accepted: Aug. 7th, 2024; published: Aug. 28th, 2024

Abstract

As an important tributary of the upper reaches of the Yangtze River, the hydrological characteristics of the Jialing River have a profound impact on regional ecological environment and water resource management.

作者简介: 郑倩, 籍贯: 重庆市涪陵区, 出生于 1996 年 5 月, 主要从事水文水资源方面的研究, Email: 47899690@qq.com

文章引用: 郑倩, 孔令兮. 嘉陵江流域水文特征分析与径流反推[J]. 水资源研究, 2024, 13(4): 424-432.

DOI: 10.12677/jwrr.2024.134049

This study aims to deeply analyze the hydrological characteristics of the Jialing River Basin, and reveal its changing patterns and driving mechanisms, and provide scientific basis for water resource assessment and management. The study used DEM data and ArcGIS software to simulate and analyze terrain and water systems, combined with CPC precipitation data and hydrological station measurement data (1979~2019) to explore the changes law in precipitation and runoff. The hydrological balance characteristics of the watershed were evaluated through methods such as sub watershed division, river network generation, and sensitivity analysis. The results show that the river network density in the Jialing River Basin is 0.197 km/km², and there is a negative correlation with the runoff coefficient. From 1984 to 2002 is a period of decreasing precipitation, while the period from 2003 to 2019 is increasing. The average runoff of the watershed showed a decreasing trend, especially from 1979 to 1988 and 1989 to 1998. The hydrological characteristics of the Jialing River Basin are significantly influenced by climate change and human activities. The decrease in precipitation is the main reason for the decrease in runoff, while the change in river network density reflects the spatio-temporal heterogeneity of hydrological conditions in the watershed.

Keywords

Jialing River, Hydrological Characteristics, Runoff Inversion, Hydrological Resources, Runoff Coefficient

Copyright © 2024 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

嘉陵江是长江上游的重要支流之一，流域面积约 16 万平方公里，流经陕西、甘肃、四川、重庆四省(市)，是我国水能资源最丰富的河流之一。嘉陵江流域的水文特征对流域内的生态环境、水资源开发利用、防洪减灾等方面有着重要的影响[1]。因此，深入分析嘉陵江流域的水文特征，揭示其变化规律、驱动机制，对于合理评估和管理嘉陵江流域的水文资源具有重要意义。嘉陵江流域的水文特征受到多种因素的影响，其中气候变化、人类活动是两个主要的影响因素。气候变化会导致流域的降水、蒸发、温度等气象要素的变化，从而影响流域的水量和水质。人类活动则会通过水利工程、土地利用、水污染等方式改变流域的水文过程和水文条件[2]。这两种因素的综合作用，使得嘉陵江流域的水文特征呈现出复杂的时空变化特征，需要采用科学的方法进行分析评价。

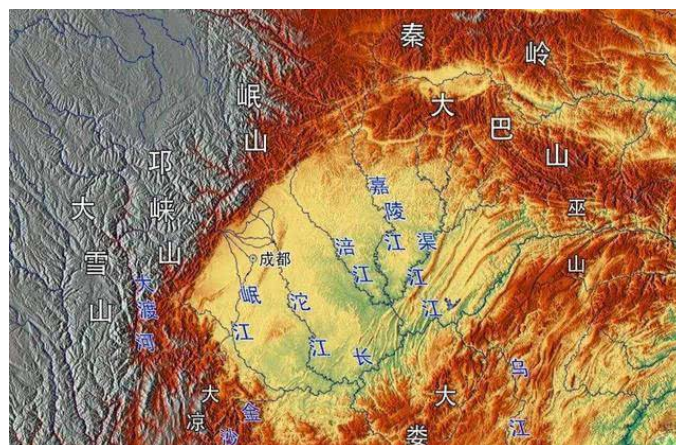


图 1. 嘉陵江流域位置图

2. 研究区概况

嘉陵江是长江上游左岸的主要支流，发源于秦岭南麓，流经甘肃、陕西、四川、重庆，于重庆市朝天门附近注入长江。研究区的经纬度范围为东经 102°30'~109°，北纬 29°40'~34°30'之间，流域面积为 16 万平方千米，在长江各大支流中居首位，其地形地貌复杂多样，地质灾害频发。属亚热带湿润季风气候，近年来气温上升，降水减少，冬季干旱。研究区地理位置如图 1 所示。

3. 数据资料与方法

3.1. 数据来源

基于 2019 年发布的 DEM 数据和 ArcGIS 软件，模拟分析嘉陵江流域的地形和水系，提取河流参数。利用 CPC 降水数据和水文站实测数据(1979~2019)，分析流域的降水和径流量的变化规律和水文平衡特征，探讨流域水文变化的影响因素和内在机制。

3.2. 研究方法

采用 ArcGIS 软件和 DEM 数据对嘉陵江流域进行了子流域划分和水系河网生成，提取河流形态、分级和纵

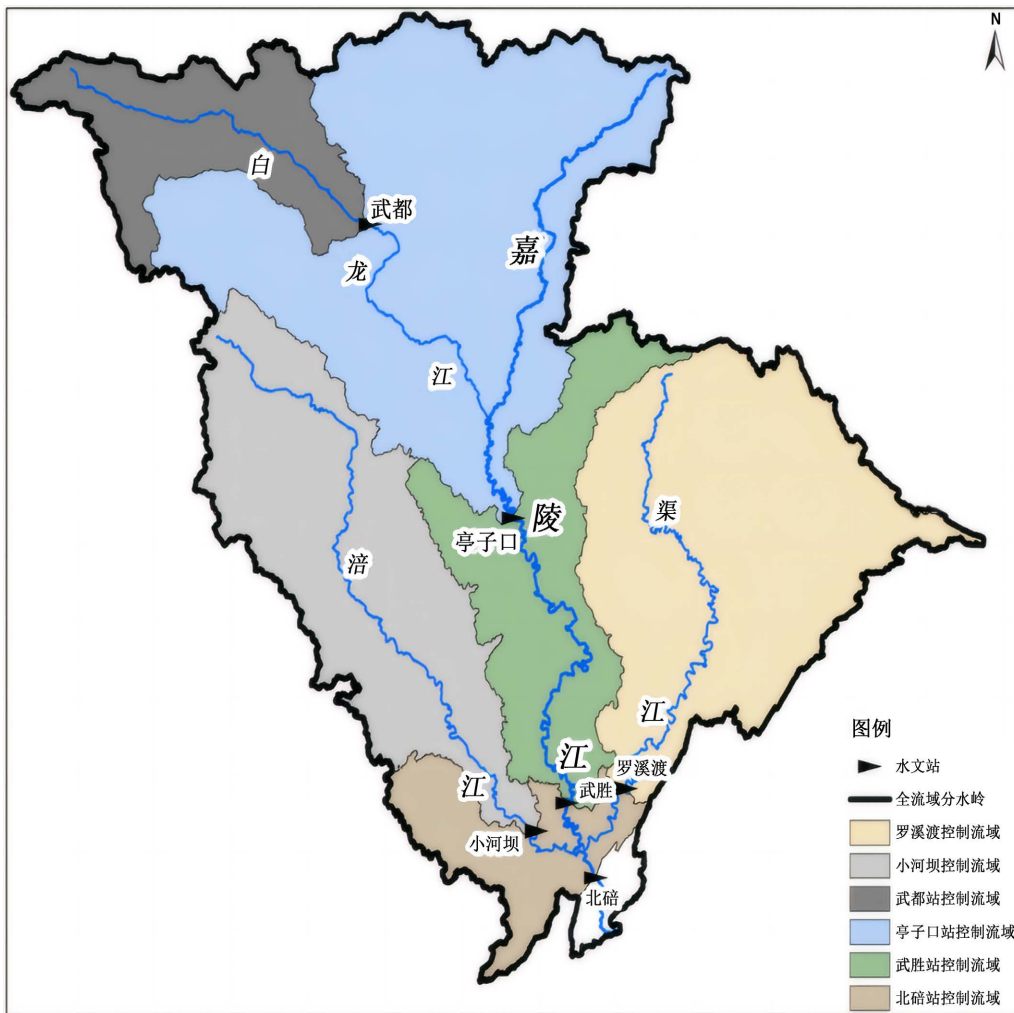


图 2. 划分水文单元

剖面等参数。同时，利用水文站的实测数据和 SWAT 水文模型的模拟数据，分析流域的降水和径流量的时空分布特征和水文平衡特征，进行敏感性分析、归因分析，揭示流域的水文变化的影响因素和内在机制[3]。

首先，DEM 数据经填洼处理后，利用 D8 算法确定水流方向，划分分水岭，界定嘉陵江流域及其子流域。水文站定位基础上划分四水文单元(图 2)分析各水文单元的降水量和径流量数据，探讨嘉陵江流域不同地区的水文特征和规律。

其次，采用集水面积阈值 16.2 km² 提取嘉陵江水系河网，河流总长与流域面积比值，即河网密度，由降水量、地形等多种因素决定。基于水文站点位置、自然界线计算河网密度，表 1、表 2 为两种方法得到的河网密度。

表 1. 根据水文站点位置划分的河网密度

水文点	主河道长度(km)	河网总长(km)	流域面积(km ²)	河网密度(km/km ²)
北碚	2940.40	30717.13	156,153	0.197
武胜	1533.3	15527.42	80,637	0.194
小河坝	557.70	6026.34	29,236	0.207
罗渡溪	639.47	7314.59	36,984	0.198

表 2. 根据自然流域边界划分的河网密度

流域名称	主河道长度(km)	河网总长(km)	流域面积(km ²)	河网密度(km/km ²)
渠江	603.2	7544.8	38,133	0.198
涪江	614.6	7380.2	35,764	0.21
干流	1198.6	10535.4	529,121	0.198
全流域		31269.8	1,598,899	0.197

从表 2 中可以看出，嘉陵江流域的河网密度为 0.197 km/km²。涪江流域地形平坦，支流呈树枝状，水系发育好。嘉陵江干流上游的河网密度低于下游，因为上游地形陡峭，下游地形平缓。渠江流域的河网密度与嘉陵江全流域最接近，因为渠江是嘉陵江的最大支流，占据了大部分流域面积[4]。河网密度与径流系数呈负相关，即河网密度越高，径流系数越低，这是因为河网密度高的地区，降水更容易形成河流径流，而河网密度低的地区，降水更容易形成地下水或蒸发。

4. 嘉陵江流域水文特征分析

4.1. 河流分级

采用斯特拉勒分级法将水系按照河流的汇合情况分为 7 个等级。计算各级水系的分叉比、河长比，分别表示水系的分支程度和河流的长度变化率。水系中 ω 级河流数目 N_ω 与高一级即 $(\omega+1)$ 级河流总数 $N_{\omega+1}$ 的比值称之为分叉比，用 R_b 来表示。水系中 ω 级河流的平均长度 L_ω 与比其低一级即 $(\omega-1)$ 级河流的平均长度 $L_{\omega-1}$ 的比值称之为河长比，用 R_L 表示。霍顿在 1945 年研究发现，河流的长度 (R_L) 几乎不随河流的级数而改变，自然所形成的水系河长比 $R_L = 1.5 \sim 3.5$ 之间，且 R_b 和 R_L 近似为常数。基于 Horton 定理估算水系分维系数，公式如下：

$$D_H = \max[1, 2 \log R_L / \log R_b]$$

根据公式得到各级水系的分叉比为 2.44~4.38，河长比为 1.84~2.51，进而得到全流域的分叉比为 3.39、河长比为 2.01。

基于霍顿定理计算嘉陵江流域的水系分维系数，分别为 1.84，属于壮年阶段，水系分维系数较大说明其流域形态更复杂，河网发育更好。

4.2. 河道纵剖面分析

根据嘉陵江流域的数字高程影像，在 ArcGIS 中提取主要河道的河床高程值，绘制河道剖面曲线图(图 3)，结合河道比降的计算可以得出以下结论：

嘉陵江流域河道纵剖面下凹，河流侵蚀强于构造抬升。河源的秦巴山区，三大构造单元交汇，地质复杂，河道陡峭，下凹曲度大，水能丰富。河流入四川盆地，地质简单，沉积岩为主，河道平缓，下凹曲度小。河道形态受岩石、水文、气候等影响。河道比降分别为 5.35%、4.36%、1.12‰、4.48%、0.45%。西侧涪江比降和凹曲度大于东侧渠江，与地形有关。西侧流经高原，山深河陡，侵蚀强，河床下切明显。东侧流经丘陵，地形平缓，侵蚀弱，河床下切轻微。干流比降为 1.8‰，上下游凹曲度差异大。嘉陵江流域是长江上游水土流失重点区，上游陇南 - 陕南地区和中下游最严重。上游黄土厚，坡陡河急，冲沟多，侵蚀大，泥石流多。干流上游为高山峡谷，崩塌多。涪江上游有盆周山地，滑坡多。盆周山地灾害多于盆中地区。

4.3. 降水量变化趋势

本文利用 CPC 逐日降雨量栅格数据和 MATLAB 编程，对嘉陵江流域 1979~2019 年的降水量和降水资源总量进行了计算和分析。结果表明，北碚水文站的年降水总量、年际变差系数能反映整个流域的降水变化特征，渠江流域的降水资源优于涪江流域。采用降水距平指数评价流域的干旱状况，如图 4 所示，该流域共有 12 年出现干旱，1984~2002 年为降水减少期，2003~2019 年为降水增多期。副热带高压的变化是影响流域降水的主要因素，同时也导致了降水的马太效应。

比较四个水文站的降水量差异，结果表明嘉陵江流域的年降水总量受集水面积的影响较大，流域年平均降水量能更好地反映水文单元间的降水状况。四个水文站中，罗渡溪站的年平均降水量最高，为 1095.41 mm。降水的空间分布呈现出东多西少，南多北少的特点。嘉陵江流域属于亚热带季风气候区，降水量分配不均匀，主要集中在 5~9 月，占全年的一半以上。北碚站以上流域的 5~9 月降水总量是全年的 78%，其中 6~9 月更为集中，是全年的 66%。10 月到次年 4 月的降水量很少，只占 24%。7 月降水最多，12 月降水最少，且相差很大，可见，嘉陵江流域夏季降水占比最大，春秋次之，冬季最小。

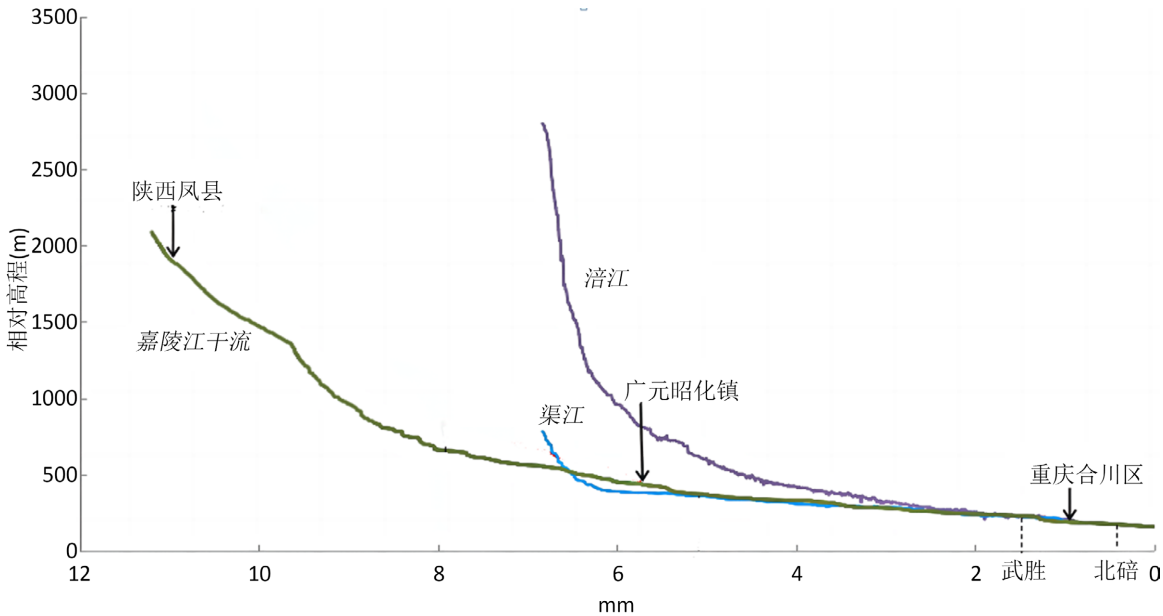


图 3. 河道纵剖面

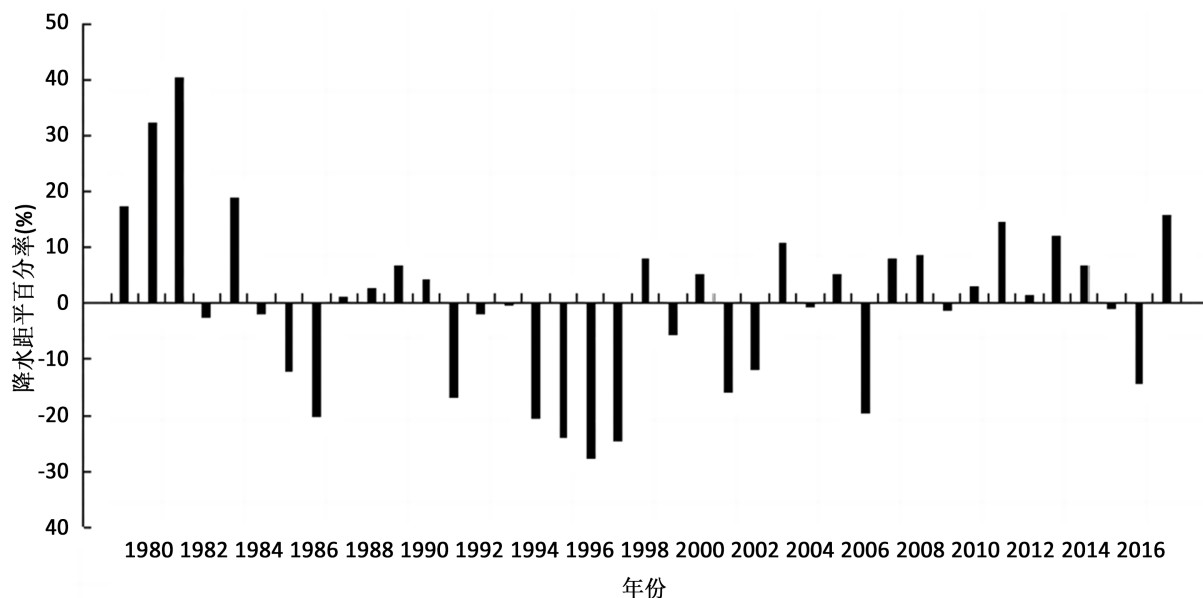


图 4. 降水距平指数

4.4. 径流量变化趋势

嘉陵江流域 1979~2019 年间的多年分时段平均径流量, 以及与年降水总量的关系。结果显示, 嘉陵江流域的平均径流量呈现出明显的减少趋势, 尤其是在 1979~1988 年和 1989~1998 年两个时段, 北碚站、武胜站的平均径流量分别减少了 124 亿 m^3 、55.6 亿 m^3 。同期, 嘉陵江流域的年降水总量也有所下降, 北碚站、武胜站的年降水总量分别下降了 231.79 亿 m^3 、86.76 亿 m^3 。这表明, 嘉陵江流域的年径流量减少的主要原因是河流流量的主要补给来源——年降水总量的减少。

嘉陵江流域的径流量受季节变化的影响很大, 年内分配不均匀。夏季是径流量的旺季, 冬季是径流量的淡季。流域总水文控制点北碚站的多年平均径流量为 657.5 亿 m^3 , 其中 7~10 月的径流量占全年的 68%, 7~9 月的径流量占全年的 56%。相反, 1~6 月和 11~12 月的径流量只占全年的 26%和 7.8%, 12 月至次年 3 月的径流量更是只占全年的 8%。嘉陵江流域的径流量季节变化还表现在最大值和最小值的差异上。最大值出现在 7 月, 为 139.23 亿 m^3 , 占全年的 22%; 最小值出现在 2 月, 仅为 8.9 亿 m^3 , 占全年的 1.3%。最大值是最小值的 16 倍。7 月的径流量高峰之后, 8 月的径流量明显下降了 37.5 亿 m^3 , 9 月的径流量又回升了 17.5 亿 m^3 , 形成了夏、秋两个汛期。

4.5. 径流系数

本文根据如下公式计算嘉陵江流域四个水文单元的年际、月际径流系数。由于数据的局限性。

$$a = \frac{y}{x}$$

其中, a 为径流系数, y 为径流深度, x 为降水深度。

嘉陵江流域各水文单元的 1979~2019 的年际径流系数计算结果见表 3。

嘉陵江流域的四站(北碚、武胜)的月径流系数变化较大, 表明该流域的径流量受到多种因素的影响。从上游到下游, 月径流系数的差值逐渐增大, 说明上游地区的径流量更加稳定, 而下游地区的径流量更加波动。在冬春季节, 两站均出现月径流系数大于 1 的情况, 意味着径流量超过降水量, 说明该地区的河流径流量不仅依赖

于降水，还有其他的补给方式，如地下水、冰雪融水、湖泊等。这些补给方式使得河流在降水不足的时候仍能保持一定的流量，维持河流的生态功能。因此，月径流系数大于 1 的月数越多，表明该地区的河流径流量补给来源更加多样，与嘉陵江流域的地理特征相符合。

表 3. 嘉陵江流域各水文单元年际径流系数

流域	年份	径流深度/mm	降水量/mm	径流系数
干流中游	1979~1988	383.66	1033.49	0.38
	1989~1998	326.83	891.65	0.37
嘉陵江全流域	1979~1988	454.67	983.49	0.47
	1989~1998	373.64	814.83	0.46
	1999~2008	360.99	844.33	0.43
涪江流域	1979~2019	528.83	769.81	0.67
渠江流域	1979~2019	622.41	1088.69	0.58

由于径流量数据不足，仅计算部分水文单位的逐月径流系数，结果见表 4。

表 4. 嘉陵江流域部分水文单元月际径流系数

月份	北碚站	武胜站
1 月	0.83	1.14
2 月	0.47	0.6
3 月	0.27	0.33
4 月	0.3	0.28
5 月	0.32	0.29
6 月	0.29	0.26
7 月	0.52	0.45
8 月	0.46	0.44
9 月	0.58	0.52
10 月	0.76	0.7
11 月	0.89	1.03
12 月	1.28	1.88

5. 径流量反推计算

5.1. 年径流量反推

基于径流系数、CPC 逐日降水量数据对嘉陵江流域各水文单元的径流量进行反推。分析结果表明，嘉陵江流域(北碚水文站以上)的径流量受降水量影响显著，1979~2019 年的变异系数为 0.17，其中 1981 年最大，1996 年最小。1979~1996 年的变异系数为 0.2，1997~2019 年的变异系数为 0.13，说明径流量的变化趋势与降水量一致，且下降更为明显。根据《水文情报预报规范》，1979~2019 年间有 4 个特丰水年和 5 个特枯水年，1991~2007 年间径流距平百分率多为负值，只有 1998 年为偏丰水年。1998 年由于径流量激增，导致嘉陵江流域发生严重

洪灾，嘉陵江洪峰与长江汇合后，造成洪水。

5.2. 月平均径流量推算

基于表 4 的月径流系数、CPC 逐月降水量数据推算月平均径流量的理论值，与实际值进行对比分析。结果表明，理论值和实际值的变化趋势基本一致，但存在一些差异。理论值在春季开始上升，7 月达到最大，呈现单峰形态，而实际值在 6 月至 9 月间出现两次峰值，呈现双峰形态。此外，理论值的增长速度相对较慢，而实际值的增长速度较快。这些差异可能与水文站的位置、降水量的分布、径流系数的计算方法等因素有关[5]。

6. 讨论

1) 降水与径流量的关系

嘉陵江流域的降水量在 1979~2019 年间经历了显著变化，尤其是 1984~2002 年的降水减少期，对径流量产生了直接影响。北碚站的数据显示这一时期降水量的减少导致径流量相应减少。2003~2019 年降水量增多，但年际变化趋于平稳，北碚站以上流域的 5~9 月降水总量占全年的 78%，季节性降水模式对径流量有决定性影响。夏季降水对径流量的重要性不容忽视，是流域水文特征的关键组成部分，表明气候变化对径流量有长期影响。

2) 河网密度与径流系数的关系

嘉陵江全流域河网密度为 0.197 km/km^2 ，研究结果显示河网密度、径流系数呈负相关关系，这与李威的研究结论符合。河网密度较高的地区可能有更低的径流系数，可能是因为降水更容易形成河流径流，而河网密度低的地区，降水更容易形成地下水或蒸发[6]。河网密度高的地区降水更易转化为径流，而低密度地区降水可能转为地下水或蒸发。

3) 水利工程的影响

干流中游 1979~1988 年的径流系数为 0.38，而 1989~1998 年略降至 0.37，可能是因为气候变化、水利工程建设对径流量的影响。张跃华等研究指出人类活动，尤其是水利工程建设，如大坝和水库，会改变河流的自然流动和水文周期，水利工程的蓄水、放水操作可能导致嘉陵江下游河段的径流量和水位发生变化，从而影响整个流域的水文特征[7]。刘扬扬等人的研究表明水电站的运行会改变水域形态、径流、水位、流速和泥沙等，使得枯水期流量增加、水位上升，丰水期流量减少、水位下降。具体到嘉陵江流域，亭子口电站等水利工程的运行对坝下河段水文情势产生了显著影响，调节了入库径流，改变了天然径流的时空分配过程，梯级水库的拦沙作用导致下游河段含沙量明显减少，对河床产生了一定的冲刷影响[8]。胡云华研究指出降雨量变化是嘉陵江流域径流、泥沙变化的直接因素，但人类活动导致的地表下垫面变化加剧了径流、泥沙变化[9]。

7. 结论

综上所述，本文以嘉陵江流域为例，利用 CPC 降水量数据，计算了各水文站的径流系数，并分析了其变化规律和影响因素。结论如下：

- 1) 年径流系数与降水量同步下降，说明降水量是主要影响因素，人类活动尤其是水利工程建设，如大坝和水库，会改变河流的自然流动和水文周期。
- 2) 月径流系数变化大，上游稳定，下游波动。冬春季节，月径流系数大于 1，说明河流径流量有其他补给方式，如地下水、冰雪融水、湖泊等。
- 3) 季节径流系数变化规律与月径流系数相似，但差异小，说明季节尺度上的径流形成受多种因素影响，如气温、蒸发、植被等。
- 4) 分时段径流系数反映了径流形成机制，1979~1996 年变异系数最大，可能与气候变化和人类活动有关。

1997~2019 年变异系数最小, 可能与水资源管理和保护有关。

参考文献

- [1] 常新雨. 雅砻江流域水文气象特征分析及径流预报研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [2] 和鹏飞. 沙颍河流域气象水文干旱演变特征分析[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 华北水利水电大学, 2019.
- [3] 严登明, 翁白莎, 李思诺, 等. 皖北地区水文要素演变特征分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(6): 58-63.
- [4] 孙鹏, 孙玉燕, 姚蕊, 等. 基于标准化径流指数的水文干旱特征分析: 以塔里木河为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 261-268.
- [5] 冯仁银. 尼日河干支流水文特征及年径流量丰枯分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 四川师范大学, 2021.
- [6] 李威. 基于 GIS 和 SWAT 模型的嘉陵江降雨径流模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆师范大学, 2015.
- [7] 张跃华. 嘉陵江流域径流量变化规律及其对气候变化的响应[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2012.
- [8] 刘扬扬, 李斐, 许秀贞. 嘉陵江中下游干流水电开发对水文情势的影响[J]. 人民长江, 2014(5): 10-15.
- [9] 胡云华. 嘉陵江流域水沙特征及其模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2014.