

# 嘉陵江汇流特性统计及分形分析

钟 亮<sup>1,2</sup>, 孙建云<sup>2</sup>, 韩正国<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

**摘要:**嘉陵江汇流特性对长江重庆河段的泥沙运动与河床演变影响重大。根据 1955~2011 年的原型实测水文资料,通过数理统计方法,分析了嘉陵江汇流比的变化趋势和频率分布特性,应用分形几何方法研究了日汇流过程曲线特征,提出采用分形汇流比  $R_D$  全面量化复杂汇流过程,并探讨了  $R_D$  的参数构成及变化规律。结果表明:嘉陵江日汇流比  $R$  的变幅随北碚站流量  $Q$  的增加而逐渐缩窄;各级流量对应的汇流比区间频率具有中间大、两端小的分布特性,累积频率分布曲线呈现两端平缓、中间陡峻的变化特点;分形汇流比  $R_D$  随流量的增大而增大,全年  $R_D$  与汛期  $R_D$  的变化规律基本一致,汛期汇流过程对全年汇流特征影响显著。

**关 键 词:**汇流特性;频率分布;分形汇流比;嘉陵江

中图法分类号:TV14

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.16.004

嘉陵江位于长江上游,自河源流经陕西、甘肃、四川和重庆 4 省市,于重庆朝天门汇入长江,干流全长 1 120 km,流域面积 15.67 万  $\text{km}^2$ ,是长江面积最大的一级支流。嘉陵江入汇长江是典型的支流入汇干流情况,支流入汇特性直接关系干支流的水面形态、流速分布和泥沙运动特征<sup>[1-2]</sup>。现有研究表明,嘉陵江水流入汇对长江重庆河段的水沙运动规律和船舶通行安全影响明显<sup>[3-5]</sup>,因而开展其汇流特性研究意义重大。汇流特性包括离散特性和连续特性,对于长江和嘉陵江的两江汇流特性问题,许光祥等分别基于 1957~1986 年间的部分年份和 1954~2011 年的实测资料,重点探讨了长江干流的汇流特性问题<sup>[6-7]</sup>,而对嘉陵江支流的汇流问题研究稍显薄弱,且均主要针对日汇流离散序列,没有考虑复杂连续汇流过程。傅军等认为,形成汇流过程的流量时间序列可视为动力系统的复杂行为,隐藏着深层次的自相似细节,具有分形特征;为此,基于 1975~1985 年的实测资料,重点分析了嘉陵江洪水期日流量过程的分形维数,发现各年分形维数存在较大差异<sup>[8]</sup>。然而,分形维数实际上只能体现汇流过程曲线的复杂性,无法反映汇流比的大小,因

此,仍需探讨连续汇流过程的量化问题。近年来,受上游径流量减少、水利工程拦沙、水土保持措施加强、河道泥沙淤积以及采砂等因素的影响,嘉陵江水沙条件发生了较大变化,尤以 1990 年后变化显著<sup>[9]</sup>。本文将采用近期实测资料,从汇流比统计分析和汇流过程分形分析两个角度,系统探讨嘉陵江汇流特性问题,研究成果对分析预测长江重庆河段乃至三峡库区的水沙运动规律与河床演变特性具有重要作用。

## 1 资料数据

嘉陵江北碚水文站集雨面积约占流域总面积的 99%,是嘉陵江流域的出口控制站。长江寸滩水文站位于嘉陵江与长江交汇口下游 7 km 处,是嘉陵江入汇后的长江干流水文控制站。长江朱沱水文站位于寸滩站上游约 154 km,是嘉陵江入汇前的长江干流水文控制站。各水文测站分布见图 1。为分析嘉陵江汇流特性,收集了寸滩站、朱沱站和嘉陵江北碚站近 50 a 的日流量资料,使用资料年限为 1955~2011 年,水文年计算时段选当年 4 月 1 日至翌年 3 月 31 日,本文所有年份均指水文年,共 57 年。定义寸滩站、朱沱站和北

碚站的流量分别为  $Q_c$ 、 $Q_z$  和  $Q$ ,为使汇流比计算更为合理,首先根据 3 站流量平衡关系( $Q_c = Q_z + Q$ ),在寸滩站流量不变的前提下,按同倍比缩放法修正朱沱站和北碚站流量,并采用修正后流量计算嘉陵江日汇流比  $R$ ,即  $R = Q/Q_c$ ,各水文年  $R$  的变化过程见图 2。



图 1 水文测站分布

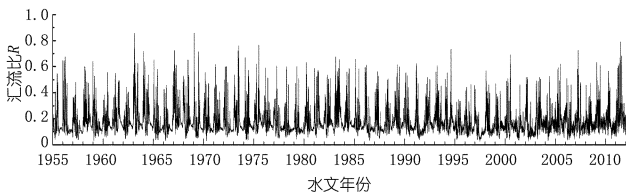


图 2 嘉陵江日汇流比变化过程

## 2 汇流比统计分析

### 2.1 汇流比随流量变化趋势

图 3 给出了嘉陵江各日汇流比  $R$  随北碚站流量  $Q$  的变化关系,由图可知, $R$  与  $Q$  的关系较为散乱,无固定的函数关系,同一流量对应不同的汇流比。

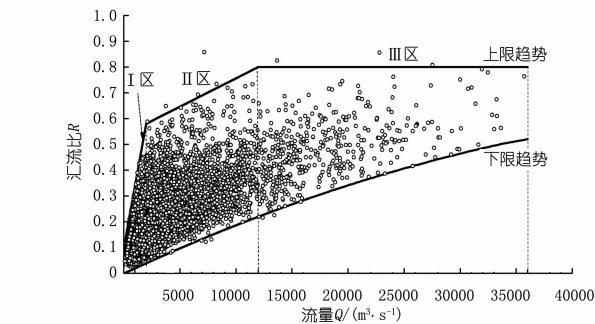


图 3 嘉陵江汇流比  $R$  随流量  $Q$  的变化

尽管如此,随着流量  $Q$  的增大,汇流比  $R$  的变化范围总体逐渐缩窄,各级流量对应汇流比的上、下限数值具有较为明显的变化规律,下限趋势基本随流量的增大呈 2 次曲线递增分布,上限趋势可根据流量不同分为 3 个区:① I 区,  $Q \leq 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ,区间右边界与嘉陵江北碚站 1955~2011 年的平均流量  $2\,081\text{ m}^3/\text{s}$  相当,对应小流量,汇流比  $R$  的上限值随流量  $Q$  呈线性陡增;② II 区,  $2\,000\text{ m}^3/\text{s} < Q < 12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ,对应中

流量,汇流比  $R$  的上限值仍随流量  $Q$  的增大而增大,但递增速度明显减小;③ III 区,  $Q \geq 12\,000\text{ m}^3/\text{s}$ ,对应大流量,汇流比上限值基本维持在 0.80 左右,变幅很小。表 1 进一步给出了各区汇流比上、下限的趋势方程。

表 1 汇流比上、下限趋势方程

区间	流量特征	流量范围/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	上限趋势方程	下限趋势方程
I 区	小流量	$Q \leq 2000$	$R = 2.421Q_1 + 0.096$	$R = -0.016Q_1^2 + 0.203Q_1 - 0.001$
II 区	中流量	$2000 < Q < 12\,000$	$R = 0.220Q_1 + 0.536$	
III 区	大流量	$Q \geq 12000$	$R = 0.80$	

注:表中  $Q_1 = Q/10000$ 。

### 2.2 汇流比频率分布特性

定义汇流比区间频率  $\Delta P = t/T$ ,其中  $t$  为位于  $R_1$  与  $R_2$  之间(汇流比  $R_1 < R_2$ ) 汇流比的出现天数, $T$  为总统计天数;定义汇流比累积频率  $P = \sum t/T$ ,其中  $\sum t$  为小于等于某汇流比的天数。下面分别探讨各级流量汇流比的区间频率分布特性和累积频率分布特性。

#### 2.2.1 区间频率分布特性

根据前文流量分级情况,绘制了各级流量对应的汇流比区间频率分布曲线(图 4)。由图 4 可见,汇流比区间频率分布具有如下特性:① 小流量时,汇流比  $R$  在 0.027~0.451 之间,平均值 0.141,最大频率对应的  $R$  为 0.115;汇流比  $0.1 \leq R \leq 0.2$  的区间频率为 70.9%;没有出现  $R > 0.5$  的情况,表明此时北碚站流量均小于朱沱站。② 中等流量时,汇流比  $R$  的变幅为 0.055~0.857,平均值 0.235,最大频率对应的  $R$  为 0.157;汇流比  $0.1 \leq R \leq 0.4$  的区间频率为 87.8%; $R > 0.5$  的频率仅占 2.2%,表明此时仅有极少天数的北碚站流量较朱沱站大。③ 大流量时,汇流比  $R$  的变化范围 0.215~0.855,平均值 0.476,最大频率对应的  $R$  为 0.405;汇流比  $0.3 \leq R \leq 0.6$  的区间频率为 80.3%;没有出现  $R < 0.2$  的情况,说明此时不会出现朱沱站流量大于北碚站流量 4 倍以上的情况; $R > 0.5$  的频率占 40.6%,可见北碚站流量大于朱沱站流量的概率明显增加。④ 全体流量中,汇流比  $R$  在 0.027~0.857 内变化,平均值 0.174,最大频率对应的  $R$  为 0.112;汇流比  $0.1 \leq R \leq 0.2$  的区间频率为 62.8%,全年出现 229 d; $R > 0.5$  的频率仅占 1.5%,说明统计年限范围内,北碚站流量大于朱沱站流量的时间平均每年仅有 5 d 左右。

#### 2.2.2 累积频率分布特性

根据各级流量对应的汇流比区间频率分布情况,绘制了累积频率分布曲线(图 5)。由图 5 可知:① 累

积频率分布曲线具有两端变化平缓,中间变化迅速的特点,说明汇流比区间频率中部较大且分布较为集中,极大和极小汇流比出现的频率较小;② 随着流量的增加,汇流比总体逐渐增大,区间频率相对变幅减小,其累积频率分布曲线也逐渐右移和变缓;③ 统计年限内全体流量的汇流比累积频率分布与小流量时的分布曲线较为一致,尤其是  $P \leq 30\%$  区段基本重合。

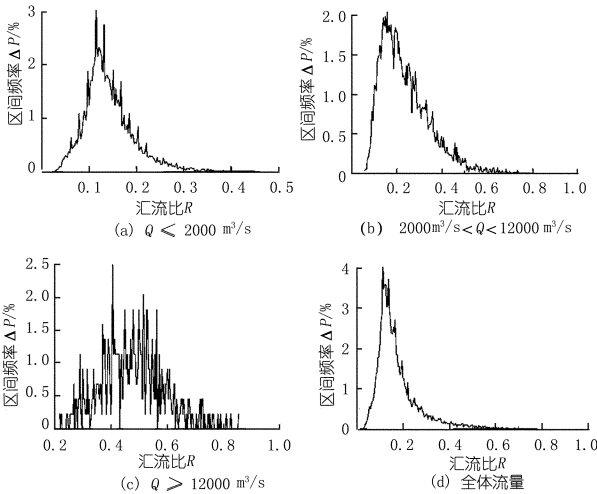


图 4 汇流比区间频率分布

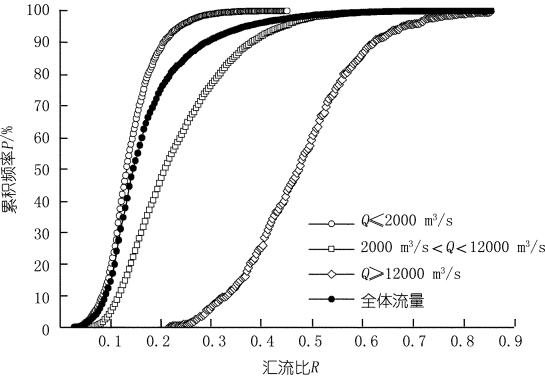


图 5 汇流比累积频率分布

定义频率汇流比  $R_p$  表示大于和等于该汇流比所占的天数占统计总天数(统计流量范围内)的  $p\%$ ,如  $R_{90}$  表示大于和等于该汇流比出现的概率为  $90\%$ ,以此类推。根据汇流比区间频率分布曲线和累积频率分布曲线,表 2 给出了各级流量的特征汇流比。

表 2 特征汇流比

流量范围/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	最小 $R$	$R_{90}$	$R_{75}$	$R_{50}$	$R_{25}$	$R_{10}$	最大 $R$	平均 $R$	$R_{fmax}$
$Q \leq 2000$	0.027	0.084	0.109	0.131	0.165	0.205	0.451	0.141	0.115
$2000 < Q < 12\,000$	0.055	0.117	0.151	0.208	0.292	0.380	0.857	0.235	0.157
$Q \geq 12\,000$	0.215	0.330	0.397	0.473	0.545	0.622	0.855	0.476	0.405
全体流量	0.027	0.090	0.113	0.145	0.199	0.289	0.857	0.174	0.112

注:① 平均  $R$  指统计流量范围内各日汇流比的平均值;②  $R_{fmax}$  指区间频率分布曲线峰值对应的汇流比,亦即出现次数最多的汇流比。

3 汇流过程分形分析

前文将日汇流比视为离散时间序列,采用数理统计方法探讨了嘉陵江汇流特性。然而,该方法仅仅体现了汇流比的统计分布规律,没有揭示汇流过程变化的复杂性。实际上,对于汇流比平均值、区间频率和累积频率等统计参数均完全相同的不同年份,其汇流过程可能存在较大差异;比如,统计年限内的 1959 年和 1987 年汇流比平均值均为 0.157,汇流比区间频率分布和累积频率分布也几乎一致,但其汇流过程却有较大不同(图 6)。

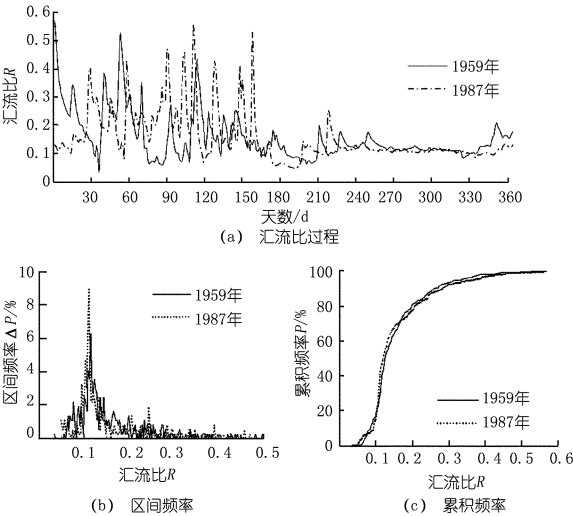


图 6 典型年份汇流比过程及其频率分布

汇流过程曲线形状的复杂性反映了流量脉动强度,研究显示<sup>[10]</sup>,流量脉动强度与移床力密切相关,脉动强度愈大,移床力也愈大,河道愈不稳定。因此,分析汇流过程的变化特征将有助于判断和预测河床稳定性。

图 2 显示,嘉陵江日汇流过程曲线具有较明显的不规则性、随机性和相似性。这类曲线一般是难以采用传统的欧氏几何方法来全面描述的,为此,本文将引入分形几何方法研究嘉陵江日汇流过程,基于连续的日汇流序列资料,从汇流过程复杂性的角度进一步探讨嘉陵江汇流特性。

3.1 分形量化参数

3.1.1 分形维数

分形维数是应用分形几何方法量化复杂对象的重要参数,前期研究表明,结构函数法最适用于复杂曲线的分形维数计算<sup>[11]</sup>。该方法获得的分形维数在数学上定义为关联维数,为此,本文采用结构函数法计算汇流过程曲线的分形维数。

结构函数法将汇流过程曲线视为一个汇流时间序

列  $R(t)$ , 定义结构函数  $S(r)$  为序列  $R(t)$  中相距为  $r$  的任意两点汇流比差值平方的算术平均值, 则序列  $R(t)$  的结构函数可写为

$$S(r) = E[R(t+r) - R(t)]^2 = cr^{4-2D} \quad (1)$$

其中,  $r$  亦称为区间尺度。选用不同的区间尺度  $r$ , 计算出相应的  $S(r)$ , 然后在双对数坐标系中对  $\ln r \sim \ln S(r)$  进行线性拟合, 若直线斜率为  $\alpha$ , 则汇流过程曲线的分形维数  $D = 2 - \alpha/2$ 。

### 3.1.2 分形汇流比

汇流过程曲线的复杂性可采用分形维数  $D$  来量化, 显然, 在平均汇流比相同的情况下, 不同分形维数的汇流过程曲线是千差万别的。同样, 在分形维数相同的情况下, 不同曲线的平均汇流比  $\bar{R}$  也可能完全不同; 可以设想, 若将某条曲线的各日汇流比同步放大若干倍, 很明显汇流比幅值增大了, 但汇流过程曲线的形状和复杂性并未改变, 因而其分形维数也就保持不变。可见, 仅仅采用分形维数  $D$  或平均汇流比  $\bar{R}$  均难以全面描述复杂汇流过程, 因而必须将两者结合起来。考虑到平均汇流比  $\bar{R}$  是汇流比测度参数, 可体现汇流比的绝对大小, 分形维数  $D$  是相似性度量参数, 可描述汇流过程曲线的复杂性和不规则性, 因此, 这里引入由这两个参数共同确定的分形汇流比  $R_D$  来描述汇流过程曲线, 结合前期研究成果<sup>[12]</sup>, 可将分形汇流比表示为  $R_D = \bar{R}D$ 。

图 6 中 1959 年和 1987 年汇流过程的分形汇流比  $R_D$  分别为 0.244 和 0.265, 从而克服了统计分析方法难以准确区分其汇流特性的不足。显然, 从参数构成来看,  $R_D$  既反映了汇流过程的复杂性, 也体现了汇流比的总体水平, 是全面表征汇流过程的综合参数。图 7 给出了 1955 ~ 2011 年间最大  $R_D$  和最小  $R_D$  所对应水文年的汇流过程曲线, 可见,  $R_D$  越大, 汇流比变化幅度和复杂性也明显增强, 因此, 分形汇流比  $R_D$  可较为全面地量化复杂汇流过程。

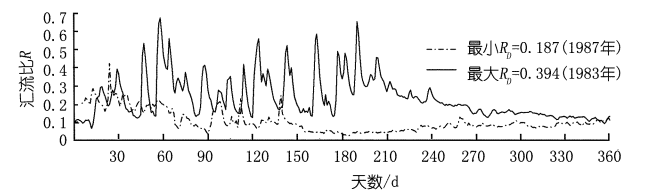


图 7 典型分形汇流比  $R_D$  的水文年汇流过程曲线

### 3.2 参数变化特点

根据统计时段 1955 ~ 2011 年内的嘉陵江日汇流比实测资料, 表 3 给出了各水文年全年、汛期 (5 ~ 10 月) 和非汛期 (11 ~ 4 月) 汇流比过程曲线的分形维数

$D$ 、平均汇流比  $\bar{R}$  和分形汇流比  $R_D$  计算结果, 下面分析其变化特点和规律。

表 3 汇流比过程曲线分形参数计算结果

水文年	全年			汛期 5 ~ 10 月			非汛期 11 ~ 翌年 4 月		
	$D$	$\bar{R}$	$R_D$	$D$	$\bar{R}$	$R_D$	$D$	$\bar{R}$	$R_D$
1955	1.604	0.156	0.250	1.610	0.185	0.298	1.582	0.149	0.236
1956	1.560	0.175	0.273	1.533	0.209	0.320	1.642	0.123	0.202
1957	1.626	0.138	0.224	1.630	0.154	0.251	1.610	0.120	0.193
1958	1.573	0.205	0.322	1.570	0.231	0.363	1.454	0.193	0.281
1959	1.557	0.157	0.244	1.576	0.164	0.258	1.545	0.136	0.210
1960	1.557	0.167	0.260	1.557	0.179	0.279	1.520	0.155	0.236
1961	1.536	0.211	0.324	1.551	0.229	0.355	1.406	0.183	0.257
1962	1.570	0.163	0.256	1.571	0.173	0.272	1.718	0.175	0.301
1963	1.592	0.227	0.361	1.573	0.273	0.429	1.561	0.197	0.308
1964	1.533	0.223	0.342	1.522	0.245	0.373	1.426	0.180	0.257
1965	1.500	0.154	0.231	1.533	0.164	0.251	1.735	0.126	0.219
1966	1.669	0.152	0.254	1.656	0.155	0.257	1.648	0.172	0.283
1967	1.617	0.238	0.385	1.651	0.261	0.431	1.622	0.226	0.366
1968	1.633	0.186	0.304	1.608	0.181	0.291	1.680	0.178	0.299
1969	1.526	0.169	0.258	1.487	0.176	0.262	1.568	0.149	0.234
1970	1.633	0.167	0.273	1.629	0.202	0.329	1.514	0.129	0.195
1971	1.626	0.165	0.268	1.637	0.182	0.298	1.600	0.163	0.261
1972	1.492	0.163	0.243	1.499	0.180	0.270	1.615	0.136	0.220
1973	1.600	0.197	0.315	1.592	0.245	0.390	1.596	0.136	0.217
1974	1.522	0.162	0.246	1.515	0.181	0.274	1.654	0.145	0.240
1975	1.515	0.207	0.314	1.507	0.239	0.360	1.550	0.182	0.282
1976	1.528	0.181	0.277	1.506	0.199	0.300	1.734	0.168	0.291
1977	1.565	0.154	0.241	1.554	0.160	0.249	1.691	0.135	0.228
1978	1.530	0.135	0.206	1.519	0.147	0.223	1.608	0.122	0.196
1979	1.542	0.145	0.224	1.537	0.172	0.264	1.484	0.114	0.169
1980	1.659	0.171	0.284	1.663	0.210	0.349	1.574	0.152	0.239
1981	1.584	0.200	0.317	1.578	0.231	0.365	1.687	0.159	0.268
1982	1.675	0.192	0.322	1.678	0.216	0.362	1.632	0.166	0.271
1983	1.668	0.236	0.394	1.674	0.297	0.497	1.563	0.170	0.266
1984	1.598	0.201	0.321	1.598	0.246	0.393	1.744	0.156	0.272
1985	1.580	0.172	0.272	1.576	0.194	0.306	1.682	0.153	0.257
1986	1.537	0.156	0.240	1.536	0.178	0.273	1.667	0.127	0.212
1987	1.685	0.157	0.265	1.696	0.190	0.322	1.791	0.122	0.218
1988	1.587	0.178	0.282	1.591	0.201	0.320	1.612	0.175	0.282
1989	1.575	0.199	0.313	1.571	0.215	0.338	1.410	0.171	0.241
1990	1.608	0.163	0.262	1.631	0.188	0.307	1.542	0.132	0.204
1991	1.598	0.139	0.222	1.595	0.163	0.260	1.605	0.111	0.178
1992	1.589	0.196	0.311	1.585	0.239	0.379	1.713	0.163	0.279
1993	1.587	0.196	0.311	1.572	0.218	0.343	1.651	0.181	0.299
1994	1.613	0.185	0.298	1.642	0.170	0.279	1.567	0.183	0.287
1995	1.560	0.144	0.225	1.546	0.151	0.233	1.641	0.139	0.228
1996	1.520	0.153	0.232	1.524	0.148	0.226	1.659	0.166	0.275
1997	1.718	0.109	0.187	1.639	0.107	0.175	1.500	0.098	0.147
1998	1.655	0.159	0.263	1.667	0.195	0.325	1.697	0.131	0.222
1999	1.645	0.151	0.248	1.639	0.151	0.247	1.646	0.143	0.235
2000	1.618	0.159	0.257	1.610	0.172	0.277	1.710	0.146	0.250
2001	1.643	0.128	0.210	1.616	0.127	0.205	1.654	0.141	0.233
2002	1.583	0.137	0.217	1.587	0.161	0.255	1.623	0.101	0.164
2003	1.639	0.188	0.308	1.648	0.216	0.356	1.668	0.164	0.273
2004	1.708	0.159	0.271	1.702	0.147	0.250	1.670	0.174	0.290
2005	1.570	0.184	0.289	1.544	0.197	0.304	1.772	0.175	0.310
2006	1.541	0.154	0.237	1.515	0.162	0.245	1.739	0.140	0.243

续表 3

2007	1.566	0.178	0.279	1.543	0.212	0.327	1.671	0.148	0.247
2008	1.618	0.166	0.269	1.623	0.174	0.282	1.726	0.159	0.274
2009	1.560	0.197	0.307	1.525	0.224	0.341	1.835	0.166	0.305
2010	1.671	0.174	0.291	1.616	0.210	0.339	1.866	0.135	0.252
2011	1.557	0.238	0.370	1.547	0.257	0.398	1.687	0.214	0.361

3.2.1 变化幅值

(1) 汛期。分形维数  $D$  变幅为 1.487 ~ 1.702, 均值 1.586; 平均汇流比  $\bar{R}$  变幅为 0.107 ~ 0.297, 均值 0.194; 分形汇流比  $R_D$  变幅为 0.175 ~ 0.497, 均值 0.307; 汛期  $R_D$  最大值出现在 1983 年, 最小值出现在 1997 年, 说明汛期汇流过程变化最剧烈和最平缓的年份分别为 1983 年和 1997 年, 与全年序列一致。

(2) 非汛期。分形维数  $D$  变幅为 1.406 ~ 1.866, 均值 1.631; 平均汇流比  $\bar{R}$  变幅为 0.098 ~ 0.226, 均值 0.154; 分形汇流比  $R_D$  变幅为 0.147 ~ 0.366, 均值 0.250; 非汛期  $R_D$  最大值出现在 1967 年, 最小值出现在 1997 年, 因此, 1967 年非汛期汇流过程变化最剧烈, 1997 年最平缓。

(3) 全年。分形维数  $D$  变幅为 1.492 ~ 1.718, 均值 1.591; 平均汇流比  $\bar{R}$  变幅为 0.109 ~ 0.238, 均值 0.174; 分形汇流比  $R_D$  变幅为 0.187 ~ 0.394, 均值 0.277; 全年  $R_D$  最大值出现在 1983 年, 最小值出现在 1997 年, 说明统计年限内 1983 年的汇流过程变化最剧烈, 1997 年变化最平缓。

3.2.2 年内变化特点

根据表 3 中的计算结果, 绘制了分形汇流比  $R_D$  随北碚站年径流量的变化规律 (图 8), 给出了不同时期分形汇流比  $R_D$  的变化过程 (图 9)。

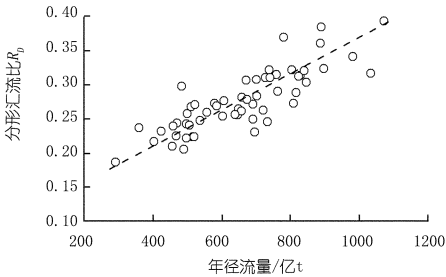


图 8  $R_D$  随年径流量的变化

由图可见: ① 分形汇流比  $R_D$  随年径流量的增大而增大, 丰水年  $R_D$  较大, 枯水年  $R_D$  较小; ② 总体而言, 汛期的  $R_D$  最大, 全年的  $R_D$  次之, 非汛期的  $R_D$  最小, 上述变化规律与图 3 走势是基本吻合的; ③ 全年  $R_D$  的变化与汛期  $R_D$  的变化过程较为一致, 峰谷基本对应, 两者  $D$  和  $R_D$  的相关性均很好, 说明汛期汇流过

程直接决定了全年汇流特征, 主导作用明显。

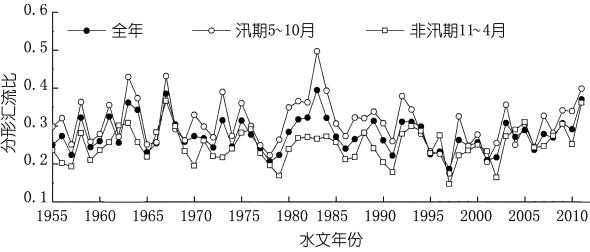


图 9 分形汇流比  $R_D$  变化过程

3.2.3 年际变化特点

图 10 给出了各年代汇流过程曲线参数变化, 数据显示, 各年代的汇流比参数具有如下变化规律。

(1) 分形维数  $D$ 。20 世纪 50 ~ 70 年代的  $D$  值在 1.564 ~ 1.580 之间变化, 变幅很小, 80 年代  $D$  值增加至 1.620, 此后逐渐减小, 最近 10 a 的  $D$  值为 1.598, 说明各年代汇流过程曲线的复杂性基本相当。

(2) 平均汇流比  $\bar{R}$ 。各年代的  $\bar{R}$  呈锯齿状变化, 60 年代、80 年代和最近 10 a 相对较大, 其值分别为 0.189, 0.185 和 0.173, 其余 3 个年代的  $\bar{R}$  则分别为 0.166、0.168 和 0.159, 1955 ~ 2011 年的平均汇流比为 0.174, 与最近 10 a 基本相等。

(3) 分形汇流比  $R_D$ 。 $R_D$  与  $\bar{R}$  呈现出相同的锯齿状变化趋势, 各年代的  $R_D$  分别为 0.260, 0.299, 0.263, 0.300, 0.256 和 0.276, 1955 ~ 2011 年的  $R_D$  为 0.277, 与最近 10 a 的  $R_D$  一致;  $\bar{R}$  和  $R_D$  的上述锯齿状变化趋势充分体现了水文过程的周期性变化特点; 此外,  $\bar{R}$  和  $R_D$  具有相同的变化规律, 说明对分形汇流比  $R_D$  而言, 平均汇流比  $\bar{R}$  是决定性因素, 分形维数  $D$  的作用相对稍弱。

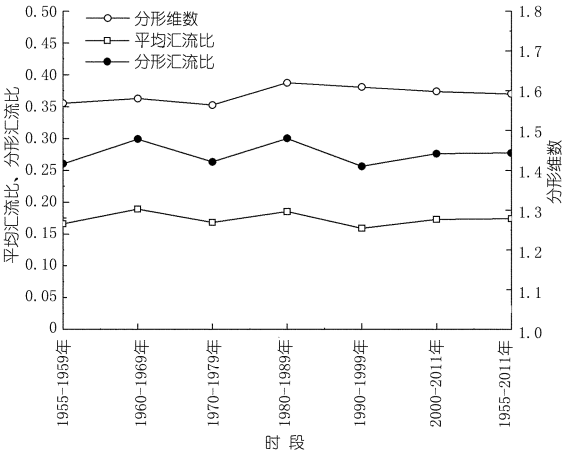


图 10 各年代汇流比参数变化

4 结论

本文基于 1955 ~ 2011 年的日流量实测资料, 采用

数理统计方法分析了嘉陵江汇流比的变化趋势和频率分布特性,应用分形几何方法研究了日汇流过程曲线特征,获得的主要结论如下。

(1) 嘉陵江日汇流比  $R$  的变幅随北碚站流量  $Q$  的增加而逐渐缩窄, $R$  下限值与  $Q$  呈 2 次连续递增函数关系, $R$  上限值与  $Q$  呈线性关系且其变化规律可分为 3 个区。

(2) 各级流量对应的汇流比区间频率呈现中间大、两端小的分布特性,累积频率分布曲线具有两端平缓、中间陡峻的特点。

(3) 提出采用分形汇流比  $R_D$  全面量化复杂汇流过程, $R_D$  由平均汇流比  $\bar{R}$  和汇流比曲线分形维数  $D$  共同组成,其中  $\bar{R}$  是体现汇流比绝对大小的测度参数, $D$  是描述汇流过程曲线复杂性和不规则性的度量参数,因而  $R_D$  对复杂汇流过程具有较好的综合表征作用。

(4) 分形汇流比  $R_D$  随年径流量的增大而增大,丰水年和汛期的  $R_D$  大,枯水年和非汛期的  $R_D$  小,全年  $R_D$  与汛期  $R_D$  的变化较为吻合,汛期汇流过程对全年汇流特征具有主导作用。

参考文献:

[1] 刘同宜,郭炜,詹磊. 90° 支流入汇区域时均流速分布特征试验研究[J]. 水科学进展,2009,20(4):485-489.

[2] 王协康,刘同宜,王宪业,等. 受支流入汇作用主河推移质运动演化特征试验研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2005,37(6):6-9.

[3] 王桂仙,陈稚聪. 嘉陵江入汇对长江重庆河段影响的分析[J]. 泥沙研究,1987,(4):1-11.

[4] 倪晋仁,惠遇甲,张国生. 嘉陵江入汇对重庆河段水力特征影响的水力学分析[J]. 泥沙研究,1991,(2):29-38.

[5] 陈稚聪,刘洪春,黑鹏飞. 长江重庆九龙坡河段泥沙淤积规律初步分析[J]. 泥沙研究,2009,(4):7-11.

[6] 许光祥,周华君. 长江嘉陵江交汇口汇流特性统计分析[J]. 重庆交通学院学报,1996,15(S):99-104.

[7] 许旭,付旭辉,徐威震. 长江嘉陵江汇流特性统计分析[J]. 人民长江,2014,45(15):32-35.

[8] 傅军,丁晶,邓育仁. 嘉陵江流域形态及流量过程分维研究[J]. 成都科技大学学报,1995,(1):74-80.

[9] 许全喜,陈松生,熊明,等. 嘉陵江流域水沙变化特性及原因分析[J]. 泥沙研究,2008,(2):1-8.

[10] 王兆印,吴永胜,刘芳. 水流移床力及河道运动动力学的初步探讨[J]. 水利学报,2002,(3):6-11.

[11] Zhong Liang, Zeng Feng, Xu Guangxiang. Comparison of fractal dimension calculation methods for channel bed profiles[J]. Procedia Engineering,2012,(28),252-257.

[12] 钟亮,许光祥. 河道床面粗糙度分形表征研究初探[C]// 第八届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集. 南京:河海大学出版社,2011:710-715.

(编辑:李 慧)

Study of confluence characteristics of Jialing River Basin based on statistic and fractal analysis

ZHONG Liang<sup>1,2</sup>, SUN Jianyun<sup>2</sup>, HAN Zhengguo<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The confluence characteristics of runoff at Jialing River estuary is important to the sediment transport and river bed evolution of Chongqing reaches of Yangtze River. Based on the observed hydrological data from 1955 to 2011, the variation trend and frequency distribution characteristics of the confluence ratio of Jialing River are analyzed by using the mathematical statistics method, and the continuous daily confluence process curves are studied by using the fractal geometry method; the comprehensive quantification of the complex confluence process is obtained by the fractal confluence ratio  $R_D$ , and the expression and variety law of  $R_D$  are discussed. The results show that: with the increase of the flow ( $Q$ ) at Beibei Hydrological Station, the variation amplitude of daily confluence ratio  $R$  gradually becomes small; the distribution curve of the interval frequency of confluence ratio under the flow at all levels is higher in the middle and lower at two ends, and the cumulative frequency curve is gentle at the both ends and steep in the middle; with the increase of flow,  $R_D$  increases, the variation of annual  $R_D$  and flood season  $R_D$  is generally consistent, and the confluence process in flood season influences the annual confluence characteristics markedly.

**Key words:** confluence characteristics; frequency distribution; fractal confluence ratio; Jialing River