

北江流域径流序列年内分配特征及其趋势分析^{*}

李 艳^{1 2 3}, 陈晓宏^{2 3}, 张鹏飞⁴

(1 广东商学院旅游与环境学院, 广东 广州 510320 2 中山大学水资源与
环境系, 广东 广州 510275 3 广东省近崖岸海洋工程重点实验室, 广东 广州 510275
4 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 73000)

摘 要: 以石角站 45 a 的实测月径流资料为基础, 研究了北江流域径流年内分配变化规律。通过计算径流年内分配不均匀性、集中程度、变化幅度等指标发现, 北江径流量具有显著的洪枯季节变化, 20 世纪 50、60 年代的径流年内分配较不均匀, 而 70 年代以来, 径流年内分配较为缓和。选用 db3 小波函数, 对各指标进行 3 层分解, 以尺度水平 3 下的低频系数单支重构序列观察各指标的变化趋势, 发现北江流域年内分配不均匀性指标显示为缓慢下降的趋势, 尤其是 70 年代以后, 这很可能是流域内人工水利设施对径流调节力度加大的缘故。对降雨序列的年内分配指标进行类似的分析后认为, 径流不均匀系数等指标在趋势上变化的原因是流域内人工水利设施对径流的调节力度加大了。

关键词: 径流; 年内分配; 北江; 小波

中图分类号: P333 TV121 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2007) 05-0113-04

径流的年内变化不仅对旱、涝灾害有着直接的影响, 同时与水资源的利用也有密切的关系^[1]。一方面, 河川径流的丰枯变化通常导致水资源供需关系的改变并影响水资源的开发利用; 另一方面, 河川径流的节律性变化影响着与其相关的一系列物理、化学和生物过程^[2]。在气候变化以及人类活动的驱动下, 河川径流的年内分布发生着相应的变化。径流在年内分配的情况不同, 对国民经济各部门的用水、水力发电、航运、水利工程的修建都具有重要的影响, 因此, 研究变化环境下的径流年内分配特征, 是水文特征变异性研究中的一项重要内容。而以往的研究大都侧重于径流序列的年际变化^[3], 这是因为由于人类活动对水资源的演化是一个渐变的过程, 因此以年为单位的径流过程演化规律能最好地体现人类活动对流域水循环变化的驱动过程和结果^[4]。如果从年内分配的角度来研究径流特征变异, 则从另一个尺度反映水文特征序列的时间变异性。

北江属珠江水系, 是广东省境内一条重要河流。本文以北江流域石角站 1956 - 2000 年实测月径流量序列为例, 计算了年内分配不均匀性、集中程度以及变化幅度等指标, 对这些指标进行小波分解, 以小波系数的变化特征来分析北江流域 45 a

来径流年内分配特征的变化规律。

1 数据来源

北江发源于江西省信丰县, 经大余县进入广东, 贯穿广东省的北部和中部, 流域面积 46 万多 km², 占珠江流域面积的 10.3%。石角站位于清远市石角镇, 至河口距离 52 km, 集水面积约 38 km², 是北江流域主要控制性水文站。本文所采用的石角站 45 a 实测月径流数据和北江流域降雨量数据来源于广东省水文局。

2 分析方法

2.1 年内分配特征指标计算

本文采用不均匀性、集中程度以及变化幅度等指标, 对径流年内分配特征进行描述。

2.1.1 不均匀性。采用径流年内分配不均匀系数 C_u 和径流年内分配完全调节系数 C_r ^[5] 分析径流的年内变化, 径流年内分配不均匀系数 C_u

$$C_u = \sigma / R \tag{1}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (R_i - R)^2}, R = \frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} R_i$$

式中, R_i 为各月径流量, R 为月平均径流量。由式 (1) 中可以看出, C_u 值越大, 表明年内各月径流

^{*} 收稿日期: 2006 - 10 - 23
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50579078)
作者简介: 李艳 (1978 年生), 女, 博士, 通讯联系人: 陈晓宏, E-mail: eesxh@mail.sysu.edu.cn
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

量相差越悬殊，径流年内分配越不均匀。

径流年内分配完全调节系数 C_r :

$$C_r = \frac{\sum_{i=1}^{12} \Phi_i (R_i - R)}{\sum_{i=1}^{12} R_i} \quad (2)$$
$$\Phi_i = \begin{cases} 0 & R_i < R \\ 1 & R_i \geq R \end{cases}$$

式 (2) 显示年内分配完全调节系数 C_r 与不均匀系数一样，越大表示年内分配越集中。

2.1.2 集中程度。可用集中度 C_n 和集中期 D 表达，即径流量年内分配集中的程度和集中的重心所出现的月份^[6-7]。

12 个月的分量和构成合成量的水平、垂直分量为:

$$R_x = \sum_{i=1}^{12} R_i \cos \theta_i, R_y = \sum_{i=1}^{12} R_i \sin \theta_i \quad (3)$$

合成量为: $R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ (4)

集中度: $C_n = R \sum_{i=1}^{12} R_i$ (5)

集中期: $D = \arctan (R_y / R_x)$ (6)

本文使用的是月径流资料，因此以 12 个月为准，不考虑 2 月份是 28 或 29 d 或者大月、小月，均视为同一个时段长，各月代表的角度 1 月为 15° 、2 月为 45° 、3 月为 75° ，以后各月均按 30 累加所得。考虑到平面三角学的基本原理，正弦、余弦值由于所在象限中所具有的正、负号不相同，集中期计算时不仅要视 R 的正、负，而且要视 R_x 、 R_y 的正、负号去决定 D 的大小及所在象限或其角度值。

2.1.3 变化幅度。本文采用相对变化幅度，即最大月平均径流量 $R_{\max}$ 、最小月平均径流量 $R_{\min}$ 与年平均径流量之比，分别称为极大比 $R_{\max}$ 和极小比 $R_{\min}$ ，计算公式为:

$$C_{\max} = R_{\max} / R, C_{\min} = R_{\min} / R \quad (7)$$

2.2 小波方法

小波分析具有强大的多尺度分辨功能，能识别出水文序列各种高低不同的频率成分。不同尺度下的低频成分表示水文序列在该尺度下的变化趋势。因此，通过小波变换，得到水文序列的低频系数，由低频系数的变化过程可识别出该尺度下的趋势变化^[8]。本文选择与待分析序列形态相近的 db3 小波函数进行离散小波变换。根据样本容量 n ，最多可以把序列分解成 $\log_2(n)$ 个频率级，即对于本时间序列，最多可以分解至第 5 层。一般情况下，经过两次以上的分解后，随机成分就会被分离出去，分解后的低频系数重构序列即可代表该径流序列的变化趋势^[9]。

3 结果分析

3.1 径流年内分配特征分布

将北江流域的实测月径流资料按式 (1) - (7) 进行计算，结果列于表 1。其中，集中期 D 用度数表示，如果以月份表示，则每月按 30° 计，可将度数换算到月，比如表 1 中多年平均的集中期 $D = 158.30$ 换算到月为 $\text{floor} (158.30 / 30) + 1 = 6$ floor 表示向下取整，日为 $158.30 - 150 = 8.3$ 即 6 月 8 - 9 日。

表 1 北江流域径流年内分配特征指标值
Tab. 1 Characteristic index value of annual runoff distribution in Beijiang basin

年份	年代	C_u	C_r	C_n	D	$R_{\max}$	$R_{\min}$
1956 - 1959	50	0.86	0.32	0.49	155.15	3.04	0.18
1960 - 1969	60	0.84	0.33	0.45	163.89	3.05	0.23
1970 - 1979	70	0.75	0.31	0.43	160.98	2.69	0.26
1980 - 1989	80	0.77	0.31	0.44	147.65	2.71	0.21
1990 - 1999	90	0.73	0.30	0.44	161.19	2.59	0.24
1956 - 2000	平均	0.78	0.31	0.44	158.30	2.78	0.23

表 1 显示，20 世纪 50、60 年代的 C_u 、 C_r 、 C_n 、 $R_{\max}$ 都大于多年平均，说明这段时期径流年内分配较不均匀，而 70、80、90 年代的 C_u 、 C_r 、 C_n 、 $R_{\max}$ 都小于或者等于多年平均，说明 70 年代以来，径流年内分配较为缓和。 D 和 $R_{\min}$ 两者的变化规律比较相似，在 60、70、90 年代指标值都大于等于多年平均，而 50、80 年代是小于多年平均的，说明 D 和 $R_{\min}$ 在趋势上有波动。

为了更清晰的观察北江流域径流年内分配特征的时间变化趋势，本文进一步运用小波分析方法对各项指标进行讨论。

3.2 径流年内分配特征的变化趋势

选用 db3 小波函数，对北江流域 45 a 径流年内分配特征指标进行 3 层分解，分解后的低频系数重构序列即可代表该指标序列的变化趋势。将原始信号和尺度水平 3 下的低频系数单支重构序列绘于图 1，可以看出径流年内分配特征的变化趋势。

从图 1(a、b、d) 中可以看出， C_u 、 C_r 、 C_n 的低频重构序列大体上呈现出一个缓慢下降的趋势，从表 1 中也可以应证这个结论，即 50、60 的 C_u 、 C_r 、 C_n 值大于 80、90 年代的值，说明北江流域径流年内分配不均匀程度呈下降的趋势，造成这种现象的一个很可能原因是人工措施对径流的调节能力加强了。集中期 D (图 1c) 的趋势波动较为显著，在 1983 年左右发生一个转折，1983 年后集中期逐

渐增大，即径流年内分配集中程度的重心向后推迟，由趋势序列上 1983 年的 145° （约 5 月下旬）推迟到 2000 年的 179° （约 6 月底 7 月初），说明径流最可调节的时期在发生变化。极大比 $C_{\max}$ （图 1e）在趋势上与 C_u 、 C_r 接近，而极小比 $C_{\min}$ （图

1f）在 1975 年以后出现下降 - 上升 - 下降的趋势。总体来说，北江流域 C_u 、 C_r 、 C_n 、 $R_{\max}$ 指标显示为缓慢下降的趋势，尤其是 70 年代以后，这很可能是流域内人工水利设施对径流调节力度加大的缘故。

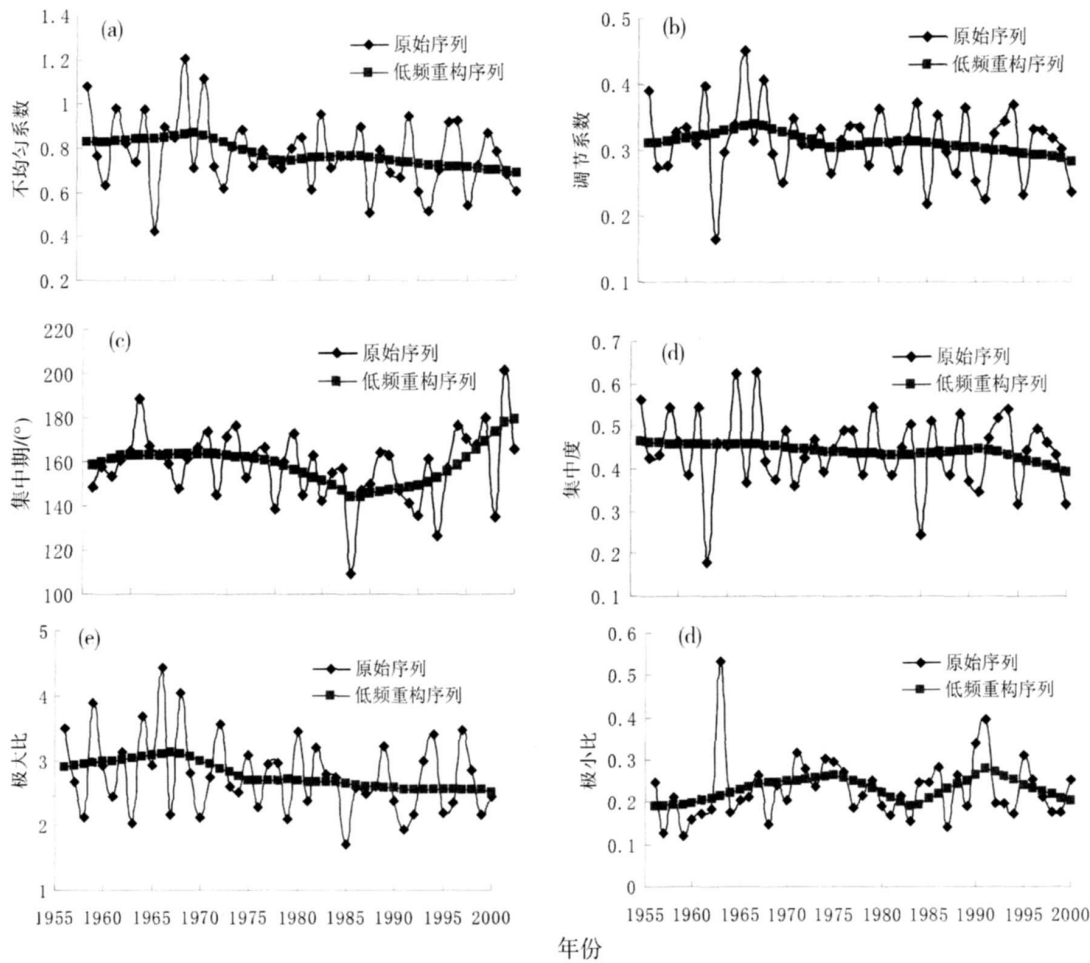


图 1 径流年内分配特征指标序列及其变化趋势
Fig. 1 Processes of annual runoff distribution indexes and their trends

为了找出北江流域径流年内分配指标变化的原因，本文对北江流域降雨序列进行了同样的计算。由图 2 可以看出，径流序列年内分配不均匀系数的线性变化趋势较降雨序列显著，前者下降的斜率较后者大，说明径流序列年内分配不均值系数在受到降雨影响的同时，还受到流域下垫面的影响。对 C_u 、 C_r 、 C_n 、 $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$ 指标进行类似的计算，发现得到的结论一致（图略），即径流年内分配指标变化的斜率较降雨年内分配指标变化的斜率大。

径流的年内分配不均匀性降低，说明流域对径流的调节能力加大了，人类修建的水利工程设施是加大对径流控制能力的重要原因。据了解，北江上游主要水库以 70 年代以后建成的居多^[10]，1999 年建成的飞来峡水库库容 $19.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，更是对清远

以下的北江河道径流起到一定的调节作用。70 年代后，流域内除修成了一批具有一定调节能力的水

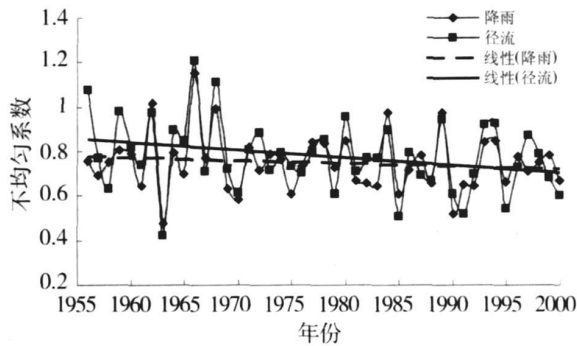


图 2 降雨和径流年内分配指标变化过程及其线性趋势
Fig. 2 Processes of distribution indexes of rainfall and runoff and their linear trends

库外,北江大堤的加固也影响了河道的调蓄调节。70年代后,北江大堤除完成了二次大培修外,每年均进行岁修。北江大堤加高加固建设,正是洪水进一步归槽并调整恢复的阶段,而且90年代中期开始,北江干流中游河道陆续修筑了孟洲坝、白石窑、飞来峡及濠里枢纽,其中孟洲坝、白石窑为日调节的径流式水利枢纽,梯级枢纽的建成影响了河道的水沙动力条件及径流演变特性。可见,水利工程的修筑、加固等人类活动是影响北江流域径流序列年内分配特征变化的一个重要原因。

4 结 论

以石角站45年的实测月径流资料为基础,研究了北江流域径流年内分配变化规律。通过计算径流年内分配不均匀性、集中程度、变化幅度等指标发现,北江径流量具有显著的洪枯季节变化,50、60年代的径流年内分配较不均匀,而70年代以来,径流年内分配较为缓和。选用db3小波函数,对各指标进行3层分解,以尺度水平3下的低频系数单支重构序列观察各指标的变化趋势,发现北江流域、、指标显示为缓慢下降的趋势,尤其是70年代以后,这很可能是流域内人工水利设施对径流调节力度加大的缘故。对降雨序列的年内分配指标进行类似的分析后认为,径流不均匀系数等指标在趋势上下降的原因是流域内人工水利设施对径流的调节力度加大了。

参考文献:

- [1] SHARMA R H, SHAKYA N M. Hydrological changes and its impact on water resources of Bagmati watershed Nepal [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(3-4): 315-322.
- [2] 郑红星, 刘昌明, 黄河源区径流年内分配变化规律分析[J]. 地理科学进展, 2003, 22(6): 585-590.
- [3] ISMAILOV G K, FEDOROV V M. Analysis of long term variations in the Volga Annual Runoff [J]. Water Resources, 2001, 28(5): 469-476.
- [4] 王浩, 王成明, 王建华, 等. 二元年径流演化模式及其在无定河流域的应用[J]. 中国科学: E辑, 2004, 34(增刊1): 42-48.
- [5] 燕华云, 杨贵林, 汪青春. 长江源区径流年内分配时程变化规律分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 526-529.
- [6] 杨远东. 河川径流年内分配的计算方法[J]. 地理学报, 1984, 39(2): 218-227.
- [7] 汤奇成, 程天文, 李秀云. 中国河川月径流的集中度和集中期的初步研究[J]. 地理学报, 1982, 37(4): 383-393.
- [8] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [9] 刘建梅, 王安志, 裴铁璠, 等. 杂谷脑河径流趋势及周期变化特征的小波分析[J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 49-55.
- [10] 罗宪林, 杨清书, 贾良文, 等. 珠江三角洲网河河床演变[M]. 广州: 中山大学出版社, 2002.

Research on Annual Distribution and its Trends of Runoff in Beijiang River, Guangdong

LI Yan^{1,2,3}, CHEN Xiao-hong^{2,3}, ZHANG Peng-fei⁴

(1. Department of Tourism and Environment, Guangdong University of Business Studies, Guangzhou 510320, China;
2. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
3. Guangdong Province Key Laboratory of Coastal Ocean Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;
4. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Lanzhou 730000, China)

Abstract Based on the monthly runoff data for 45 years of Shijiao station on Beijiang River, the annual distribution characteristics of runoff are studied. Several indices related to the attributes of unevenness, concentrate degree and amplitude of variation are calculated, and the results show that there have obvious fresh and drought seasonal changes and the runoff variation in 70's becomes moderate than before. Selected db3 wavelet to decompose each index for 3-layer, the single branch reconstruction series of low frequency coefficients in the lowest scale level show that trends of the indices of unevenness descend, especially after 70's. This may be the effect of strengthened manual water conservancy facilities. The analogous analysis on the indices of precipitation series draws the conclusion that the variation of the indices is the effect of regulation strengthened by the manual water conservancy works.

Key words runoff; annual runoff distribution; Beijiang River; wavelet