



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2016.02.018

卢裕景, 郭纯青, 代俊峰. 南流江流域降水序列周期特征及变化趋势[J]. 2016, 14(2): 99-104, 110.

LU Yur jing, GUO Chun qing, DAI Jun feng. Analysis on period characteristics and variation trends of rainfall series in Nanliujiang river[J]. 2016, 14(2): 99-104, 110. (in Chinese)

南流江流域降水序列周期特征及变化趋势

卢裕景, 郭纯青, 代俊峰

(桂林理工大学 环境科学与工程学院, 广西 桂林 541006)

摘要: 降水序列的变化规律和变化趋势是流域防洪抗旱时需要考虑的重要问题。以北部湾经济区南流江流域为例, 尝试利用小波分析和 R/S 分析方法研究年降水量周期特征和变化趋势。研究结果表明: 在短周期范围内, 南流江上游流域具有 3~ 8 a 的主周期, 未来年降水量出现减少的趋势; 中游流域具有 3~ 8 a 的主周期, 未来年降水量出现增加的趋势; 下游流域具有 5~ 8 a 的主周期, 未来年降水量出现增加的趋势。因此, 未来短期内南流江干流的防洪重心主要在于中下游流域, 需要预防突发性降雨。

关键词: 降水序列; 周期特征; 变化趋势; 小波分析; R/S 分析; 南流江流域

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)02-0099-06

Analysis on period characteristics and variation trends of rainfall series in Nanliujiang river

LU Yur jing, GUO Chun qing, DAI Jun feng

(College of Environmental and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: Variations and trends of rainfall series are important problems and should be paid attention before basic flood control and drought relief. By taking the Nanliujiang river basin of Beibu gulf economic region as an example, this paper used wavelet analysis and R/S analysis to investigate the period characteristics and variation trends of rainfall series. The results showed that the upper reaches of Nanliujiang river had an obvious period about 3 to 8 years, the annual rainfall tended to decrease in the future; the middle reaches of Nanliujiang river had an obvious period about 3 to 8 years, the annual rainfall tended to increase in the future; and the lower reaches of Nanliujiang river had an obvious period about 5 to 8 years, the annual rainfall tended to increase in the future. It was concluded that the flood control should focus on the middle and lower reaches of Nanliujiang river, and need to prevent unexpected rainfall.

Key words: rainfall series; period characteristic; variation trend; wavelet analysis; R/S analysis; reaches of Nanliujiang river

1 研究背景

水文系统受到天气系统、水文循环和人类活动对流域下垫面的影响, 在时空变化上具有高度非线性特点, 其内部水文要素的变化也相当复杂。水文过程是水文要素变化最为直接的表征, 它既受确

定性因素影响, 又受许多随机和不确定因素影响, 即水文序列包括确定成分和随机成分^[1]。传统研究方法是将水文序列作为单一时间尺度, 认为水文序列是平稳和线性序列, 忽略了序列整体(包括周期、趋势和跳跃)是否发生变异和变异程度进行判断及划分^[2]。如果单纯从线性角度或者近似为线性问题去

收稿日期: 2015-04-26 修回日期: 2015-07-23 网络出版时间: 2016-04-14
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160414.1457.022.html>
基金项目: 国家自然科学基金(41172230/D0213)

Fund: National Natural Science Foundation of China(41172230/D0213)

作者简介: 卢裕景(1991-), 男, 海南乐东人, 主要从事水文及水资源研究。E-mail: hnluyujing@126.com

通讯作者: 郭纯青(1955-), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 主要从事岩溶水资源、岩溶灾害等研究。E-mail: guochunqing99@aliyun.com

研究本质上是非线性的水文系列变化问题,是具有较大局限性的^[3]。

小波分析方法能够同时从时域和频域揭示多时间尺度变化特性,对水文序列各种周期强弱和分布情况有精确的预测^[4,5];R/S 分析方法则可以揭示时间序列的分形特征,定性地预测时间序列变化趋势,且分析结果的稳定性均不受序列是否呈现正态分布的影响^[6]。Labat^[7]研究表明小波分析适合多时间尺度变化特性和非平稳特性的水文时间序列研究;Persand N 等^[8]通过 R/S 分析法分析了径流序列的分形特征,指出了径流序列具有循环和趋势的变化特征。国内,桑燕芳等^[9,10]利用小波分析对水文序列周期项进行研究,结果显示小波分析方法可以克服传统分析方法的局限性,通过与其它随机水文分析方法联合应用,可有效提高水文序列确定成分识别结果的精度和可靠性;部分文献^[11,13]还定量描述了某地区降水量、径流量的分形特征,表明 R/S 分析可以判定降水量、径流量时间序列的分型结构和状态持续性,合理地预测未来变化的趋势。

本文利用北部湾经济区南流江流域六个主要单元雨量站的降水资料,尝试将小波分析方法和的 R/S 分析方法结合起来,探讨该流域年降水量序列的周期变化特征,预测流域年降水量未来发展趋势,为南流江流域防洪抗旱、风险分析提供参考依据。

2 研究区概况

南流江流域位于 108°-110°E 和 21°-22°N 之间,是桂南独立入海诸河中流程最长、流域面积最广、水量最丰富的河流^[14]。流域发源于玉林市大容山南麓,向西南流经北流、博白、浦北、合浦等市县,在合浦党江镇附近注入北部湾。流域中上游地势呈东北向西南倾斜,包括玉林盆地、博白盆地和南流江三角洲等地貌类型,主要支流有合江、马江、张黄江和武利江。

南流江流域属亚热带海洋季风气候区域,雨量充沛,流域总面积 9 155 km²,干流全长约 287 km,坡降 0.35‰。流域多年平均年降水量 1 500~1 800 mm,雨量多集中 4 月-9 月,降水量占全年的 80%。据资料显示^[15],南流江干流控制站常乐站洪峰流量在 3 000 m³/s 以上的洪水,均由 2~4 d 暴雨量所形成,涨洪历时平均约 60 h,洪峰持续时间 3~6 h。

3 资料与方法

3.1 资料来源

研究资料来源于 1963 年-2010 年南流江流域

雨量站的实测资料,原始资料取值为 24 h 间隔。表 1 为南流江研究站点及控制流域。

表 1 南流江研究站点及控制流域

Tab. 1 Stations and basins of Nanlijiang river

河段	站名	站址	东经	北纬	集水面积/km ²
上游	北流水文站	北流镇河泉村	110°22′	22°41′	约 1000
	横江水文站	玉林市樟木镇	110°03′	22°31′	约 1600
中游	陆川水文站	陆川县温泉镇	110°04′	22°19′	约 500
	博白水文站	博白县城厢镇	109°57′	22°17′	约 2800
下游	小江水文站	浦北县石埭镇	109°35′	21°59′	约 900
	合浦水文站	合浦县廉州镇	109°23′	21°48′	约 1400

3.2 研究方法

3.2.1 小波分析

小波分析(Wavelet Analysis)的基本思想是通过一簇小波函数系来表示时间信号函数^[16]。对于定义在实轴上、可测的平方可积函数空间给定的时间函数 $L^2(R)$, 信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的小波变换可表示为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

$(a \in R, b \in R, a \neq 0)$

式中: a 为频域参数或尺度因子,反映小波的周期长度; b 为时域参数或平移因子,反映时间上的平移; $W_f(a, b)$ 为小波变换系数,反映时域在频域上的分布和位相结构。

以时域参数 b 为横坐标、频域参数 a 为纵坐标,绘制小波变换实部时频分布图。实部时频分布图反映降水量在时域上的丰枯变化特性,其中正值表示降水量偏丰,负值表示降水量偏枯,正负值交界处的零值表示降水量丰枯变化的突变点。

将所有频域参数得到的小波变化系数的平方在时域参数积分,即为小波方差^[17]:

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

由式(2)可以对结果进行小波分析有效性检验,得到水文时间序列变化过程中存在的显著周期。以 $\text{Var}(a)$ 为纵坐标、 a 为横坐标绘制小波方差图,其峰值处所对应的时间序列为主要时间尺度,即主周期。

3.2.2 R/S 分析

R/S 分析(Rescaled Range Analysis)是英国学者 Hurst 总结尼罗河的多年水文资料,于 1951 年提出的一种处理时间序列分形结构的分析方法^[17]。R/S 分析遵循分数布朗运动,以长期相关和统计自相似为特点,具有循环和趋势双重特征^[18]。R/S 分

析基本思想是改变样本时间尺度大小,研究在不同时间尺度的统计特性变化规律,从而进行大小时间尺度间的相互转换^[9]。解决这个问题的关键是求出度量时序相关性和趋势强度的指标,即 Hurst 指数。具体的分析原理如下所述:

对于一个非随机过程,首先满足:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} = (c\tau)^H \quad (3)$$

式中: $\frac{R(\tau)}{S(\tau)}$ 为重标极差; τ 为时间跨度; c 为不依赖于 H 的变量,为一常数; H 为 Hurst 指数。

假设已知一时间序列 $\{\xi(t)\}_{t=1}^n$, 对于任意时间跨度 τ 为正整数 ($\tau \geq 1$), 则在 τ 内存在均值、累积离差、极差 $R(\tau)$ 和标准偏差 $S(\tau)$ 依次为:

$$\langle E\xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad (4)$$

$$X(t, \tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{u=1}^{\tau} [\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau}] \quad (5)$$

$$R(\tau) = \max_t X(t, \tau) - \min_t X(t, \tau) \quad (6)$$

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau}]^2} \quad (7)$$

式中: $\{\xi(t)\}_{t=1}^n$ 为相互独立、方差有限的随机序列。

以 $\lg\tau$ 为解释变量、 $\lg R(\tau)/\lg S(\tau)$ 为被解释变

量作散点图,利用最小二乘估计法拟合双对数坐标 $\lg R(\tau)/\lg S(\tau) \sim \lg\tau$ 趋势线,可知趋势线的斜率即为 Hurst 指数。对于不同的 Hurst 指数 ($0 \leq H \leq 1$), 存在三种情况: (1) 当 $H = 0.5$ 时, 时间序列为独立同分布的随机序列, 即时间序列各自独立, 完全随机, 与未来变化无关; (2) 当 $0 \leq H < 0.5$ 时, 时间序列具有反持续性, 即未来变化将与过去总体趋势相反, H 越接近 0, 反持续性越强; (3) 当 $0.5 < H \leq 1$ 时, 时间序列具有长程依赖性, 即未来变化与过去总体趋势相同, H 越接近 1, 持续性越强。

4 结果与分析

4.1 降水量周期变化特征

4.1.1 小波系数的时频分布

小波变换系数实部由时频分布图的概貌来表示,通过垂直向截取分析每年小波特征,水平向截取考察每种周期随时间的变化。图 1 为年降水量序列小波系数实部时频变化,可以看出:上游和中游年降水量时间序列主要周期变化规律具有趋同性,下游年降水量时间序列短周期略有不同,但是中长周期变化规律具有趋同性。

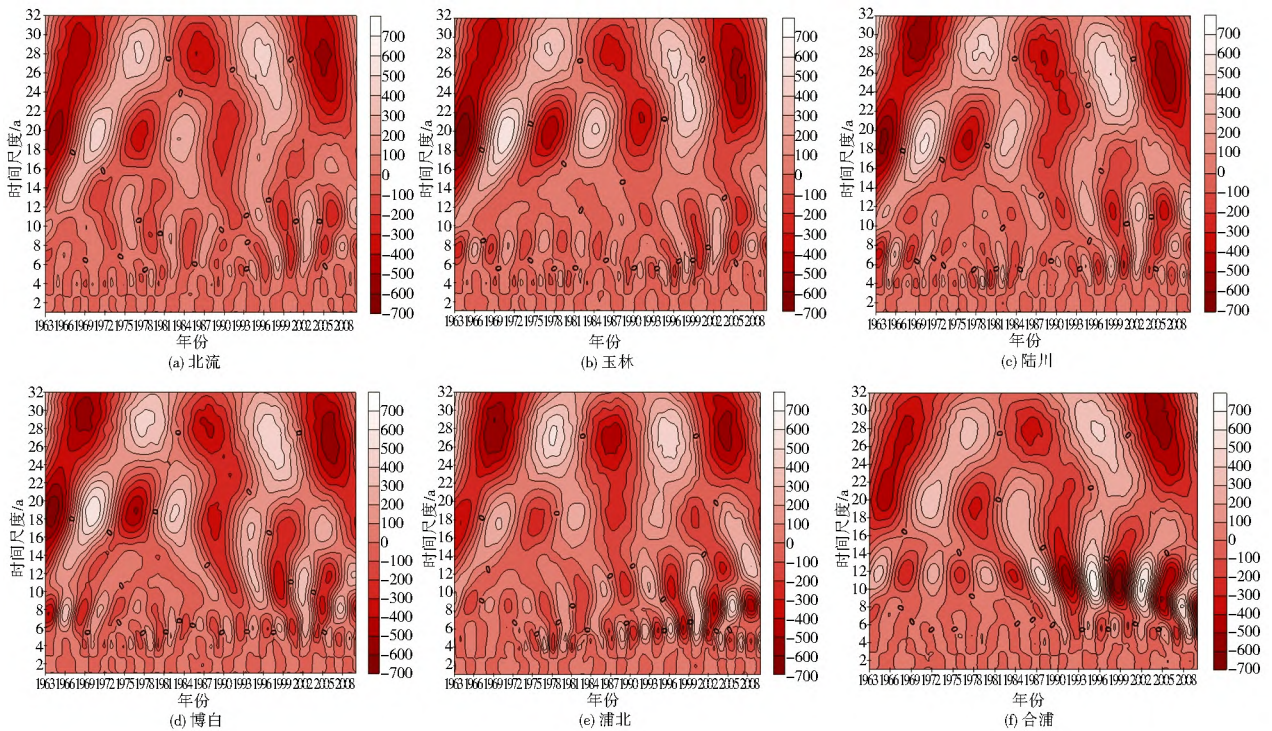


图 1 南流江流域 1963 年-2010 年降水量小波变换系数时频分布

Fig. 1 Wavelet transform coefficients of annual rainfall of Nanlijiang river during 1963-2010

对于上游流域,年降水量变化特征主要存在 3~10 a, 12~22 a, 23~30 a 三类尺度的周期变化规律。对应于时间尺度的交替,年降水量出现明显的突变特征,其中 3~10 a 尺度出现强烈震荡,其中心时间

尺度为 8 a 左右,丰枯相交替出现;12~22 a 表现十分明显,呈现丰枯交替循环,其中心时间尺度为 20 a 左右;23~30 a 表现也很突出,其中心时间尺度为 28 a 左右。

对于中游流域,年降水量变化特征主要存在 3~9 a, 14~24 a, 26~32 a 三类尺度的周期变化规律。对应于时间尺度的交替,年降水量出现明显的突变特征,其中 3~9 a 尺度出现强烈震荡,其中心时间尺度为 4 a 左右,丰枯相交替出现;14~24 a 和 26~32 a 表现都十分明显,中心时间尺度分别为 18 a 左右和 28 a 左右。

对于下游流域,浦北站的年降水量变化特征主要存在 4~9 a, 10~18 a, 26~30 a 的三类尺度周期变化规律。其中 4~9 a 尺度出现强烈震荡,其中心时间尺度为 6 a 左右,丰枯相交替出现;12~22 a 表现十分明显,呈现丰枯交替循环,其中心时间尺度为

18 a 左右;23~30 a 表现也很突出,其中心时间尺度为 28 a 左右。合浦站的年降水量变化特征主要存在 5~14 a, 16~32 a 的两类尺度周期变化规律。其中 5~14 a 尺度出现强烈震荡,其中心时间尺度为 12 a 左右,丰枯相交替出现;16~32 a 表现十分明显,呈现丰枯交替循环,其中心时间尺度为 28 a 左右。

4.1.2 小波方差检验

小波方差图不仅能反映小波系数实部随时间尺度的分布,而且能准确地检验出降水序列的主要周期。图 2 为南流江流域年降水量时间序列的小波方差图。

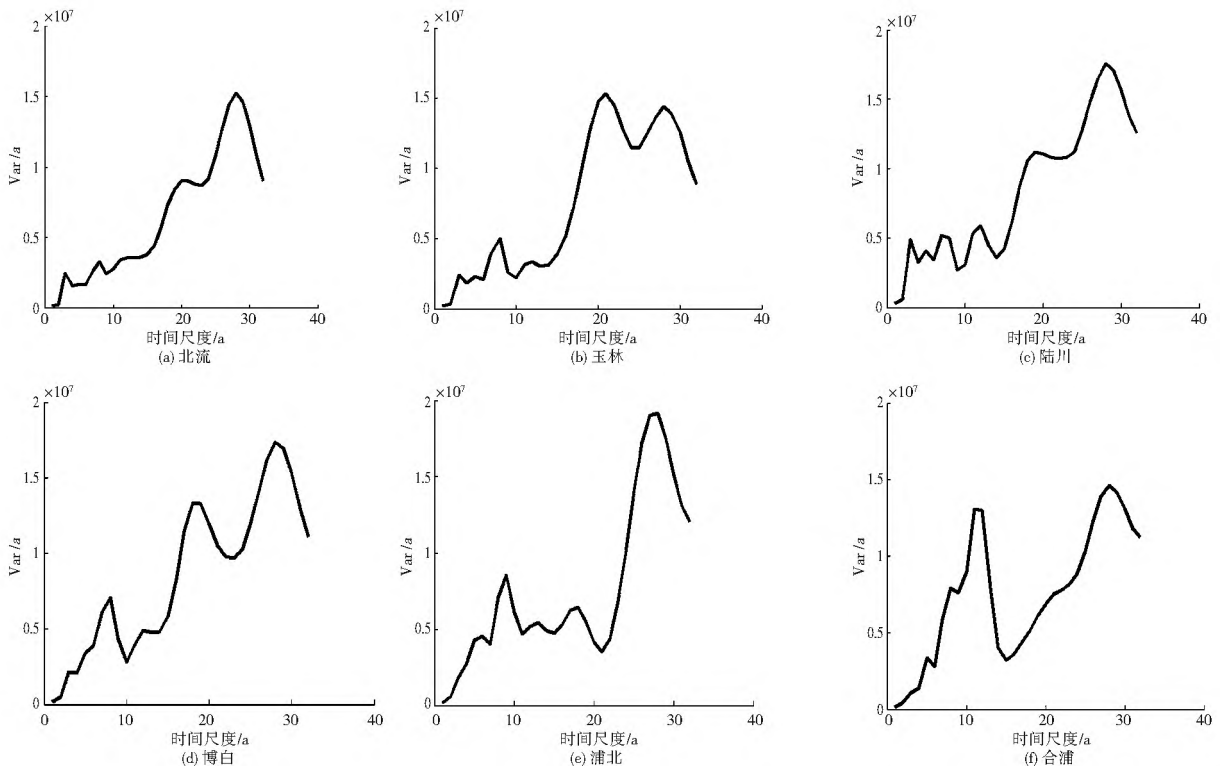


图 2 南流江流域年降水时间序列的小波方差图

Fig. 2 Wavelet variance diagram of annual rainfall time series of Nanliujiang river

由图 2 可以看出如下结果。

对于上游流域,北流站的年降水量存在不同时间尺度的四个较为明显的峰值。其中最大峰值对应着 28 a 的时间尺度,说明 28 a 的周期震荡最强,为年降水过程变化的第一主周期;20 a 时间尺度对应着第二峰值,为降水过程变化的第二主周期,同时还存在 8 a 和 4 a 的次周期。玉林站的年降水量存在不同时间尺度的五个较为明显的峰值。其中,最大峰值对应着 20 a 为年降水过程变化的第一主周期;28 a 时间尺度为降水过程变化的第二主周期,同时还存在 12 a、8 a 和 3 a 的次周期。

对于中游流域,陆川站的年降水量存在不同时间尺度的明显的峰值。其中最大峰值对应着 28 a

的时间尺度,说明 28 a 的周期为年降水过程变化的第一主周期;19 a 时间尺度为降水过程变化的第二主周期,同时还存在 12 a、8 a 和 3 a 的次周期。博白年降水量存在不同时间尺度的三个较为明显的峰值。其中,最大峰值对应着的主周期分别为 28 a、18 a 和 8 a,此外还存在 12 a 和 3 a 的次周期。

对于下游流域,浦北站的年降水量最大峰值对应着 28 a 的时间尺度,说明 28 a 的周期为年降水过程变化的第一主周期;8 a 时间尺度为降水过程变化的第二主周期,同时还存在 18 a、12 a 和 5 a 的次周期。合浦站的年降水量存在不同时间尺度的四个较为明显的峰值,其中最大峰值对应着 28 a 为年降水过程变化的第一主周期;12 a 时间尺度为降水过程

变化的第二主周期,同时还存在 8 a 和 5 a 的次周期(见表 2)。

表 2 南流江中下游流域年降水时间序列主要周期

Tab. 2 The periods of annual rainfall time series in middle and lower reaches of Nanlijiang river

河段	站名	短周期/a	中长周期/a	长周期/a
上游	北流	4~ 8	20	28
	玉林	8 左右	12~ 21	28
中游	陆川	3~ 8	19	28
	博白	8	12~ 18	28
下游	浦北	8	12~ 18	28
	合浦	5~ 8	12~ 20	28

4.2 降水量变化趋势分析

趋势分析主要用来分析降水序列顺序递增或递减的变化规律^[20]。由小波变换定义可以看出,尺度越大,对应频率越低,尺度越小,对应频率越高,因此信号的低频分量可以作为判断降水量历史变化趋势的指标。根据降水量的样本容量和小波函数特点,选择 db5 小波对降水量进行五层分解,从上到下分别显示了降水量原始信号 S 、小波分解的低频分量 a_5 和第 5 层 d_5 到第 1 层 d_1 的高频信号(图 3)。

通过图 3 中小波分解低频分量的曲线变化趋势来分析各站点降水量的历史变化趋势,并结合 R/S 分析原理求得 H 值来预测未来变换趋势,结果见表 3。

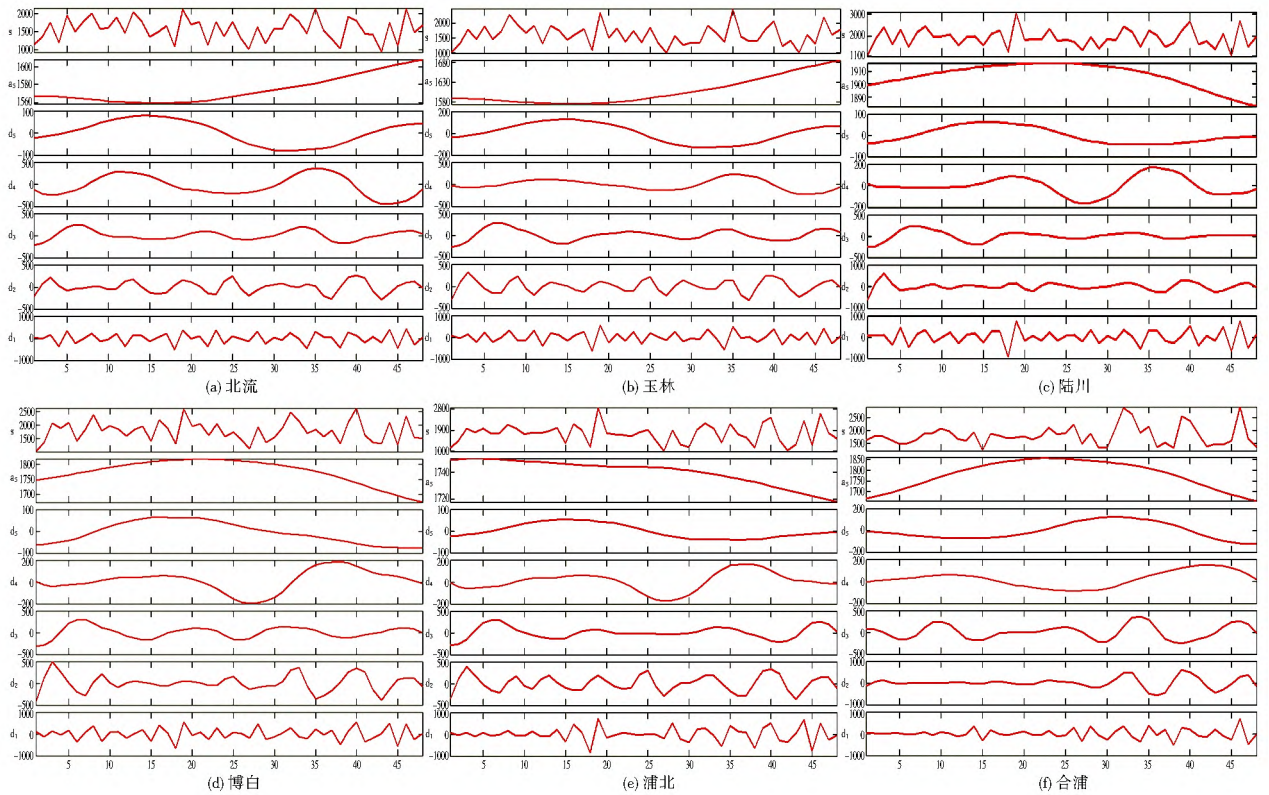


图 3 各站点年降水量历史变化趋势

Fig. 3 The historical variation tendency of annual rainfall

表 3 各站点降水量 Hurst 指数及其分析

Tab. 3 Hurst exponent and analysis of annual rainfall

河段	站名	历史变化趋势	H	R^2	未来变化趋势
上游	北流	增加	0. 214 6	0. 873 1	减少
	玉林	增加	0. 2724	0. 8448	减少
中游	陆川	减少	0. 302 7	0. 880 5	增加
	博白	减少	0. 2625	0. 9006	增加
下游	浦北	减少	0. 290 9	0. 881 8	增加
	合浦	减少	0. 2529	0. 9329	增加

图 3 显示,在最近的历史时期内,上游河段北流、玉林水文站降水趋势均呈现减少趋势,中游河段的陆川、博白水文站及下游河段浦北、合浦站水文站降水

趋势则表现出增加趋势;表 3 中根据 R/S 分析原理进行的线性回归拟合有较高的相关系数 R^2 值,说明年降水量存在较明显的 Hurst 现象,拟合效果比较好;降水量序列 Hurst 指数值在 0. 21~ 0. 29 之间,均小于 0. 5,表明存在负相关性和长期记忆性,未来一段时间内流域的降水量具有与过去相反的变化趋势;根据 R/S 原理,上游河段分别以北流、玉林水文站为代表,预计未来降水量会缓慢减少;中下游河段以陆川、博白、浦北、合浦水文站为代表,预计未来降水量会缓慢增加。总体来看,整个南流江流域降水量呈现比较明显的反持续性,即未来变化将与历史变化总体呈现相反趋势。

5 结语

利用南流江流域 1963 年—2010 年六个主要单元雨量站的年降水序列,通过小波分析和 R/S 分析结果可以预测在短周期范围内,南流江上游流域北流、玉林水文站具有 3~8 a 的主周期,且未来年降水量出现减少的趋势;中游流域博白、陆川水文站具有 3~8 a 的主周期,且未来年降水量出现增加的趋势;南流江下游流域浦北、合浦水文站具有 5~8 a 的主周期,未来年降水量出现增加的趋势。因此在未来 3~8 a 内,南流江干流的防洪重心主要在于中下游,需要采取必要的措施和对策,预防可能出现的突发性降雨。

本研究尝试利用小波分析年降水序列的变化周期后,只采用 R/S 分析对年降水序列变化趋势进行预测,是否可以将两种分析方法和其他方法结合进行对比分析需要做下一步的探讨,以提高结论的准确性和可行性。此外,本文采用以点代面的方式综合分析南流江干流流域情况,整体流域情况的降水序列周期特征和变化趋势受特殊规律气候条件和人类活动等综合因素作用下的影响,还有待于进行量化的研究。

参考文献(References):

[1] 桑燕芳,王栋,吴吉春,等.水文时间序列小波互相关分析方法[J].水利学报,2010,41(11):1172-1179.(SANG Yarrfang, WANG Dong, WU Ji chun, et al. Wavelet cross correlation method for hydrologic time series analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(11): 1172-1179. (in Chinese))

[2] 衡彤,王文圣,丁晶.降水量时间序列变化的小波特征[J].长江流域资源与环境,2002,11(5):466-470.(HENG Tong, WANG Wen sheng, DING Jing. Wavelet characteristics of the change in precipitation time series [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2002, 11(5): 466-470. (in Chinese))

[3] 张利平,王德智,夏军,等. R/S 分析在洪水变化趋势预测中的应用研究[J].中国农村水利水电,2005(2):38-40.(ZHANG Li ping, WANG De zhi, XIA Jun. Research on application of R/S analysis in the flood change tendency prediction[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005(2): 38-40. (in Chinese))

[4] 周元元,师长兴,范小黎.国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J].地理科学进展,2011,30(11):1362-1369.(ZHOU Yuan yuan, SHI Chang xing, FAN Xiao li. Advances in the research methods of abrupt changes of hydrologic sequences and their applications in drainage basins in China[J]. Progress in Geography, 2011, 30(11): 1362-1369. (in Chinese))

[5] 王文圣,丁晶,向红莲.水文时间序列多时间尺度分析的小波变换法[J].四川大学学报:工程科学版,2002,34(6):14-17.(WANG Wen sheng, DING Jing, XIANG Hong lian. Multiple time scales analysis of hydrological time series with wavelet

transform [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2002, 34(6): 14-17. (in Chinese))

[6] 牛奉高,刘维奇.分数布朗运动与 Hurst 指数的关系研究[J].山西大学学报:自然科学版,2010,33(3):380-383.(NIU Feng gao, LIU Wei qi. Relations of fractional brownian motion and hurst exponent [J]. Journal of Shanxi University: Natural Science, 2010, 33(3): 380-383. (in Chinese))

[7] Labat D. Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. Journal of Hydrology, 2005, 314(1-4): 275-288.

[8] Zhou Y, Persand N, Wang H. Scale invariance of daily runoff time series in agricultural watersheds [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006(10): 79-91.

[9] 桑燕芳,王中根,刘昌明.水文时间序列分析方法研究进展[J].地理科学进展,2013,23(1):21-30.(SANG Yarrfang, WANG Zhong gen, LIU Chang ming. Research progress on the time series analysis methods in hydrology [J]. Progress in Geography, 2013, 23(1): 21-30. (in Chinese))

[10] 桑燕芳,王栋.水文时间序列周期识别的新思路与两种新方法[J].水科学进展,2008,19(3):412-417.(SANG Yarrfang, WANG Dong. New idea and two new methods for identifying periodicities of hydrological time series [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 412-417. (in Chinese))

[11] 付亚丽.基于 R/S 分析的昆明城区降水量枯水预测[J].中国农村水利水电,2011(6):21-23.(FU Ya li. The forecasting of rair fall and dry years of Kunming City based on R/S analysis [J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(6): 21-23. (in Chinese))

[12] 周密,董楠楠.浑河干流径流变化及其驱动力分析[J].水电能源科学,2014,32(8):34-38.(ZHOU Mi, DONG Nan nan. Analysis of runoff variation and its related driving forces of main stream of Hunhe River [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(8): 34-38. (in Chinese))

[13] 赵雪花,安莉莉,袁旭琦.基于 HHT 和 R/S 分析的黄河上游年径流序列演变模式分析[J].水电能源科学,2013,31(7):9-12.(ZHAO Xue hua, AN Li li, YU AN Xu qi. Annual runoff series evolution of upper reaches of Yellow River based on Hilbert-Huang transform and R/S analysis [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(7): 9-12. (in Chinese))

[14] 代俊峰,张学洪,王敦峰,等.北部湾经济区入海河流径流变化分析[J].水电能源科学,2011,29(2):4-6.(DAI Jun feng, ZHANG Xue hong, WANG Dun qiu, et al. Analysis of distribution regularity of river flow discharge into Beibu Gulf Economic Region [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(2): 4-6. (in Chinese))

[15] 北海市防汛抗旱指挥部办公室.南流江中下游河库洪水联合调度方案[R].2010.(Passengers for Flood Control and Drought Relief Headquarters Office. South stream river on the downstream river flood joint operation scheme [R]. 2010. (in Chinese))

[16] 黄峰,夏自强,张楠.宜昌站主汛期流量及水温变化多时间尺度分析[J].水电能源科学,2010,28(4):16-18.(HU ANG Feng, XIA Zi qiang, ZHANG Nan. Multiple time scale analysis of discharge and water temperature variation in main flood season of Yichang Hydrologic Station [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(4): 16-18. (in Chinese))

(下转第 110 页)

- [13] 贾文雄. 近 50 年来祁连山及河西走廊降水的时空变化[J]. 地理学报, 2012, 67(5): 631-644. (JIA Wen xiong. Temporal and spatial changes of precipitation in Qilian Mountains and Hexi Corridor during 1960-2009 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(5): 631-644. (in Chinese))
- [14] ZHANG Yong yong, ZHANG Shi feng, ZHAI Xiao yan et al. Runoff variation and its response to climate change in the Three Rivers Source Region[J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(5): 781-794.
- [15] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999. (WEI Feng ying. Modern climate statistical diagnosis prediction technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999. (in Chinese))
- [16] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (XU Jian hu a. Mathematical methods in contemporary geography [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese))
- [17] 张峰, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 珠江上游流域近 55 年气温变化特征分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(2): 20-25. (ZHANG Feng, LEI Xiao hui, JIANG Yun zhong, et al. Analysis on character of temperature variation in upstream of Pearl River basin during 55 years [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(2): 20-25. (in Chinese))
- [18] 王莹, 苏永秀, 李政. 1961—2010 年广西气温变化对全球变暖的响应[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1707-1717. (WANG Ying, SU Yong xiu, LI Zheng. Responses of temperature change in Guangxi to global warming during 1961-2010 [J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28(10): 1707-1717. (in Chinese))
- [19] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征[J]. 气象学报, 2005, 63(6): 942-956. (REN Guo yu, GUO Jun, XU Ming zhi, et al. Climate changes of Chinese mainland over the past half century [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63(6): 942-956. (in Chinese))
- [20] 王兆礼, 陈晓宏, 张灵, 等. 近 40 年来珠江流域降水量的时空演变特征[J]. 水文, 2006, 26(6): 71-75. (WANG Zhao li, CHEN Xiao hong, ZHANG Ling, et al. Spatial-temporal change characteristics of precipitation in the Pearl River Basin in recent 40 years [J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(6): 71-75.
- [21] 张峰, 雷晓辉, 蒋云钟, 等. 近 55 年珠江上游流域降水演变规律[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(01): 49-54. (ZHANG Feng, LEI Xiao hui, JIANG Yun zhong, et al. Analysis of spatial and temporal precipitation variations for the upstream of Pearl River Basin during the past 55 years [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(1): 49-54. (in Chinese))
- [22] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 我国近 59 年日照时数变化特征及其与温度、风速、降水的关系[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(3): 389-398. (YU Hai yan, LIU Shu hua, ZHAO Na, et al. Variation characteristics of the sunshine duration and its relationships with temperature, wind speed, and precipitation over recent 59 years in China [J]. Climatic and Environmental Research, 2011, 16(3): 389-398. (in Chinese))
- [23] 伍红雨, 杜尧东, 潘蔚娟. 近 48 年华南日照时数的变化特征[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2011, 50(6): 120-129. (WU Hong yu, DU Yao dong, PAN Wei juan. The change characteristics of sunshine duration during the past 48 years in South China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2011, 50(6): 120-129. (in Chinese))

(上接第 104 页)

- [17] 姚治君, 姜丽光, 吴珊珊, 等. 1956-2011 年金沙江下游梯级水电开发区降水变化特征分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2014, 42(4): 289-296. (YAO Zhi jun, JIANG Li guang, WU Shan shan, et al. Analysis of characteristics of precipitation variation in cascade hydropower development zone in lower reaches of Jinsha River during period from 1956 to 2011 [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2014, 42(4): 289-296. (in Chinese))
- [18] 谢平, 雷红富, 陈广才, 等. 基于 Hurst 系数的流域降雨时空变异分析方法[J]. 水文, 2008, 28(5): 6-10. (XIE Ping, LEI Hong fu, CHEN Guang cai. A spatial and temporal variation analysis method of watershed rainfall based on Hurst coefficient [J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(5): 6-10. (in Chinese))
- [19] 马宗伟, 许友鹏, 钟善锦. 水系分形特征对流域径流特性的影响——以赣江中上游流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 163-169. (MA Zong wei, XU You peng, ZHONG Shan jin. Influence of river network fractal characteristic on runoff [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 163-169. (in Chinese))
- [20] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建, 等. 基于小波和 R/S 分析方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. 地理研究, 2012, 31(5): 811-820. (PAN Ya jing, WANG Yang lin, PENG Jian, et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang River: based on wavelet analysis and R/S analysis [J]. Geographical Research, 2012, 31(5): 811-820. (in Chinese))