

1961 – 2016 年南宁市年降雨量变化特征分析

杜懿^{1,2,3}, 麻荣永^{1,2,3}

(1. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004; 3. 广西大学 广西防灾减灾与工程安全重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要: 采用水文序列中常用的线性趋势线、距平分析、滑动平均、累积滤波器、Kendall 秩次相关和 R/S 分析等方法, 分析了南宁市 1961 – 2016 年间的年降雨量变化趋势, 此外还采用了 Mann – Kendall 和 Morlet 小波分析方法对序列的突变性和周期性进行了检验。结果表明: 1961 – 2016 年间, 南宁市年降雨量大致呈上升趋势, 但不明显, 且未来几年内降雨量极有可能继续增加; 近 10 年来, 年降雨序列突变频繁, 造成这一现象的原因可能是全球气候的变化; 1961 – 2016 年间年降雨量序列近似呈 13 a 的周期, 且可能潜在超过 30 a 的大周期, 但由于序列长度限制, 无法显现。

关键词: 水文序列; 降雨量; 趋势分析; 突变分析; 周期分析; 南宁市

中图分类号: P426.61⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)06-0050-06

Analysis of characteristics of annual precipitation in Nanning during 1961 – 2016

DU Yi^{1,2,3}, MA Rongyong^{1,2,3}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety of Ministry of Education, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Disaster Prevention and Engineering Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In this paper, the annual precipitation changing trend during 1961 – 2016 in Nanning was analyzed by using the linear tendency, anomaly percent, moving average curve, cumulative filter method, Kendall test method and R/S which are commonly used in hydrological sequence. In addition, Mann – Kendall and Morlet wavelet analysis method was adopted to test the mutability and periodicity of the sequence. The results show that from 1961 to 2016, Nanning annual precipitation roughly shows an upward trend, but not obvious, and it is very likely that rainfall will continue to increase in the next few years. In the recent 10 years, the annual rainfall series have changed frequently, which may be attributed to the global climate change. The annual precipitation sequence show the 13a – period, but there may be a larger period, though it is not shown. The 1961 – 2016 annual rainfall sequence is approximately 13 years and may potentially exceed the 30 – year cycle, but can not be visualized due to sequence length limitations.

Key words: hydrological sequence; precipitation; change trend; mutation analysis; cycle analysis; Nanning city

进入 21 世纪以来, 各种极端灾害性天气事件频繁发生, 严重影响和破坏了区域社会经济的发展。深入研究降雨量的演变趋势, 可为减轻干旱、洪涝等自然灾害对经济社会发展的不利影响提供气候依

据^[1-2], 还可以从较大的时空角度了解地区的降水变化规律, 有助于当地水利部门为防汛抗旱措施的提出及水资源的合理配置利用做出决策, 对保障当地人民生命财产安全、提高经济效益有着重大的意

收稿日期: 2017-06-22; 修回日期: 2017-07-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51369005); 广西防灾减灾与工程安全重点实验室系统性研究项目(2013ZDX04)

作者简介: 杜懿(1994-), 男, 安徽定远人, 硕士研究生, 主要从事水文不确定性分析研究。

通讯作者: 麻荣永(1955-), 男, 广西平果人, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要从事水文及水资源研究。

义^[3-6]。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

南宁市是广西首府,也是全国首批的 27 座重点防洪城市之一。南宁气候上属湿润的亚热带季风气候,年均降水量较为丰富,达 1 304.2 mm,但降雨量年内分布极不均匀^[7]。南宁市历史上遭受洪灾较

为频繁,据不完全统计仅 1907 – 2000 间可考证的洪峰流量大于 11 100 m³/s 的洪水就有 19 次,在南宁市迎来历史性快速发展机遇的同时,对其年降雨量的趋势变化分析显得较为迫切且具有重要的社会效益^[8]。

1961 – 2016 年间南宁市历年的降雨量数据如表 1 所示。所用数据均来自广西壮族自治区统计局提供的《广西统计年鉴》及《广西水资源公报》。

表 1 1961 – 2016 年南宁市年降雨量统计数据

年份	降雨量/ mm	年份	降雨量/ mm	年份	降雨量/ mm	年份	降雨量/ mm	年份	降雨量/ mm	年份	降雨量/ mm
1961	1550.4	1971	1443.5	1981	1377.5	1991	1196.1	2001	1778.6	2011	1352.3
1962	1194.9	1972	1036.0	1982	1446.9	1992	1270.2	2002	1523.1	2012	1413.0
1963	1119.1	1973	1630.4	1983	1221.8	1993	1250.2	2003	1297.6	2013	1599.0
1964	1005.5	1974	1453.7	1984	1024.2	1994	1748.8	2004	1282.9	2014	1309.0
1965	1423.4	1975	1195.6	1985	1656.2	1995	1174.1	2005	1119.2	2015	1339.0
1966	1331.6	1976	1277.4	1986	1797.1	1996	1338.6	2006	1305.9	2016	1515.0
1967	1539.2	1977	1406.1	1987	1455.4	1997	1299.1	2007	1198.5		
1968	1126.8	1978	1450.1	1988	1207.0	1998	1275.0	2008	1670.2		
1969	1367.8	1979	1193.1	1989	829.4	1999	1409.8	2009	1158.0		
1970	1398.1	1980	1305.0	1990	1187.2	2000	1050.3	2010	1461.2		

1.2 研究方法

分别采用了线性趋势线、距平分析、滑动平均、累积滤波器、Kendall 秩次相关以及 R/S 分析等多种方法对年降雨时间序列进行了趋势分析。此外还采用了 Mann – Kendall 法和 Morlet 小波来分析序列的突变和周期特征。

2 结果与分析

2.1 趋势分析

2.1.1 线性趋势线法 线性趋势线法是用直线斜率来表示增长趋势的一种外推预测方法,前提是假定降雨序列以恒定的速率增加或减少^[9]。1961 – 2016 年南宁市年降雨量变化趋势见图 1。

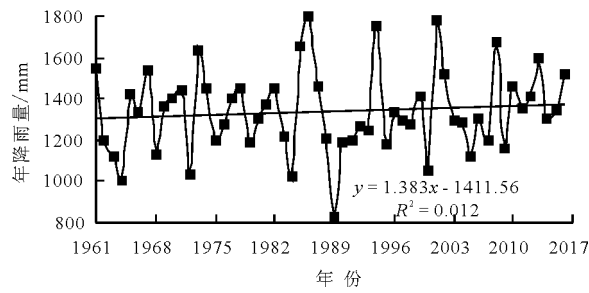


图 1 1961 – 2016 年南宁市年降雨量趋势线图

从图 1 中可以看出,在 1961 – 2016 年间南宁市年

降雨量呈小幅上升趋势。从趋势线的变化斜率来看,上升的幅度并不太大,大约每 10 年上升 13.8 mm。

2.1.2 距平分析法 距平是时间系列中某一个数值与平均值的差,距平百分率是对距平进行的标准化处理^[9]。降雨距平百分率反映了一段时期内水文要素偏离同期多年平均值的程度,能够直观地反映年际降水过程的波动情况^[10]。计算公式如下:

$$P = \frac{P_i - \bar{P}}{\bar{P}} \times 100\%, \bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

式中: P_i 为某年的降雨量,mm; $\bar{P}$ 为多年平均降雨量,mm; n 为时间序列长度, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ 。

分别做出南宁市 1961 – 2016 年年降雨量的距平百分率图与累积距平曲线,如图 2、3 所示。

由于我国不同地区、不同时段降水量差异较大,且降水空间分布不均,因此不同地区采用的降水距平百分率评价标准略有不同^[11]。本文采用的划分丰枯类型的标准见表 2。

图 2 显示,南宁市年降雨量在年际间呈现一定波动性,且距平百分率大致分布在 $\pm 40\%$ 之间,说明降雨量在丰、偏丰、平水、偏枯、枯 5 种状态之间均有分布。图 3 累积距平曲线显示,以 1987 年为界,大致可将年降雨序列划分为两个时段,且两时段序列

均有微弱增加趋势。

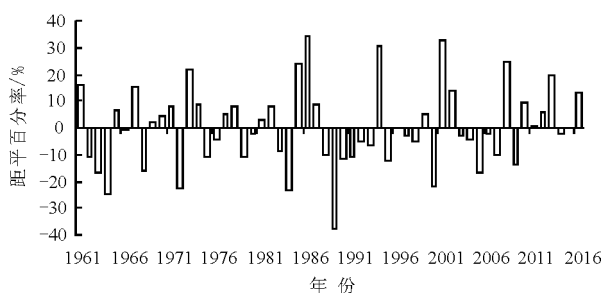


图2 1961—2016年南宁市年降雨量距平百分率图

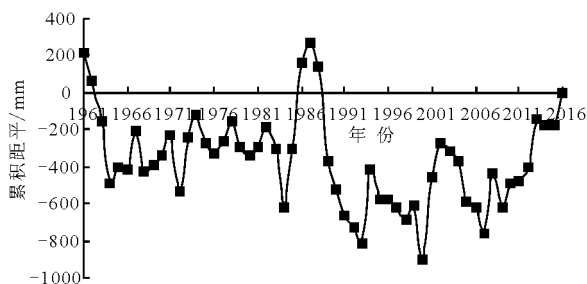


图3 1961—2016年南宁市年降雨量累积距平曲线

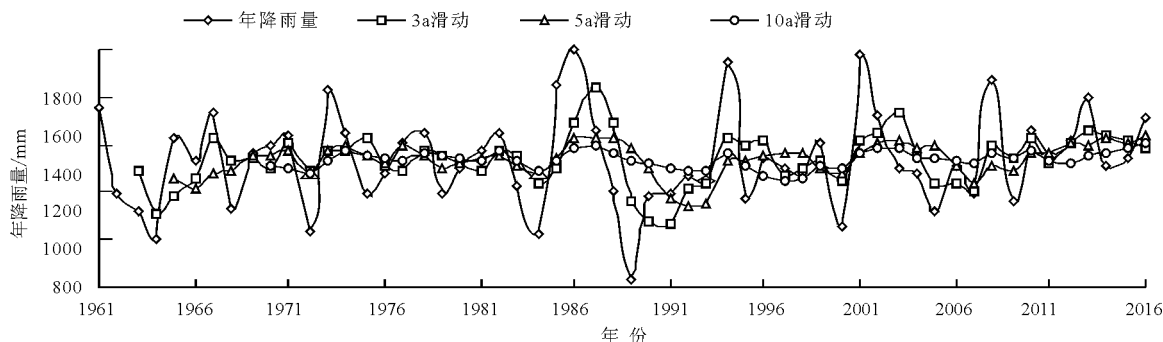


图4 1961—2016年南宁市年降雨量滑动平均曲线

2.1.4 累积滤波器法 累积滤波器法可用来定性分析时间序列的各阶段和整体变化趋势^[12],其计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n'} \left(\frac{P_i}{n'/\bar{P}} \right) \quad (3)$$

式中: S 为降雨时间序列累积值; P_i 为降雨量时间序列中第 i 个值, mm; $\bar{P}$ 为降雨量时间序列 n 的平均值, mm; n' 为序列长度, $n' = 1, 2, \dots, n-1, n$ 。采用累积滤波器法逐一计算降雨序列各年份的累积平均值 S 后, 绘制 S 随时间的变化曲线(图5), 根据 S 曲线的走向判断变化趋势。

从图5可以看出, 1961—2015 南宁年降雨量呈现小幅波动上升趋势。

2.1.5 Kendall 秩次相关法 Kendall 秩次相关法是提取气象序列变化趋势的有效工具之一, 可对序列的整体变化趋势作出定量评价^[13]。计算方法如下:

表2 降水量距平百分率气象等级划分表

等级	类型	降水距平百分率(年尺度)/%
1	丰水年	$P > 25$
2	偏丰年	$10 < P \leq 25$
3	平水年	$-10 < P \leq 10$
4	偏枯年	$-25 < P \leq -10$
5	枯水年	$P \leq -25$

2.1.3 滑动平均法 滑动平均法用确定时间序列的平滑值来显示变化趋势, 经滑动平均后, 序列中短于滑动长度的周期被削弱, 体现出变化趋势来^[9]。对样本量为 n 的序列, 其滑动平均序列表示为:

$$\hat{x}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k x_{i+j-1} \quad (j = 1, 2, \dots, n - k + 1) \quad (2)$$

式中: k 为滑动长度。本文选用 3、5、10a 滑动进行分析(图4)。

3、5、10 a 滑动平均曲线(图4)均显示, 南宁市年降雨序列呈波动趋势, 且随着滑动长度的增加, 降雨量变化曲线也越来越平缓。

$$Z = \frac{\tau}{\text{Var}(\tau)^{1/2}}, \quad \tau = \frac{4p}{n(n-1)} - 1$$

$$\text{Var}(\tau) = \frac{2(2n+5)}{9n(n-1)} \quad (4)$$

式中: Z 为 Kendall 秩次相关系数; τ 为肯德尔统计量; P 为降雨系列所有对偶观测值($R_j, R_i, j < i$) 中 $R_j < R_i$ 出现的次数总和; n 为降雨系列长度。

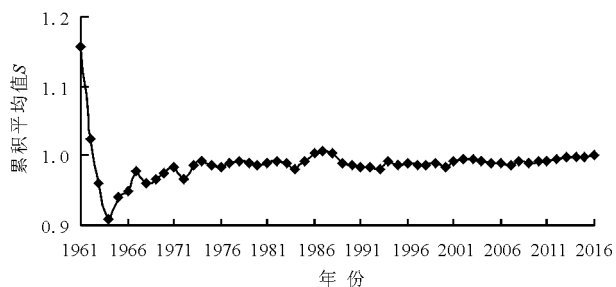


图5 1961—2016年南宁市年降雨量累积平均曲线

如果 $Z > 0$, 说明序列呈增加趋势, 反之呈减少趋势。对显著水平 $\alpha = 0.05$, 的临界检验值为 ± 1.96 , 且 $|Z|$ 越大, 序列变化越显著。计算得到 $Z = 0.92$, 故 1961 - 2016 年南宁市年降雨量呈上升趋势, 但不明显, 由于计算得到 $|Z| < 1.96$, 因而没有通过置信度 99% 的显著性检验。

2.1.6 未来趋势分析 R/S 法又称为重标极差分析方法, 最早由英国学者 Hurst 在分析尼罗河水文资料时提出^[14]。近年来, R/S 分析方法在时间序列分析中得到广泛应用, 其 Hurst 指数能很好地揭示时间序列中的趋势成分^[15-16]。R/S 分析方法计算简单, 基本原理与方法^[17]如下:

(1) 计算均值和累积离差

设时间序列 $\{x(t)\}$, $t = 1, 2, \dots, n$, 对于任意正整数 $\tau = 1$, 定义均值序列:

$$\bar{x}(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \quad \tau = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$x(t, \tau) = \sum_{i=1}^t [x(i) - \bar{x}(\tau)] \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (6)$$

(2) 计算极差、标准差及二者比值

$$R(\tau) = \max x(t, \tau) - \min x(t, \tau) \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (7)$$

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [x(t) - \bar{x}(\tau)]^2} \quad (8)$$

$$R(\tau)/S(\tau) = (\alpha\tau)^H \quad (9)$$

经对数变换可得: $\ln[R(\tau)/S(\tau)] = H \ln\tau + H \ln\alpha$, 其中 α 为常数; H 为 Hurst 指数。

根据时间序列 $\{x(t)\}$, 利用最小二乘法, 可得对应的直线回归方程, 直线的斜率即为 Hurst 指数。

Hurst 指数 $H(0 < H < 1)$, 存在以下几种情况^[18]: (1) 当 $H = 0.5$ 时, 序列是一个随机游动序列; (2) 当 $0 < H < 0.5$ 时, 系统为反持久性时间序列, 反映在降雨指标上则是降雨变化的总体趋势与过去相反, 且 H 值越接近于 0, 反持续性就越强; (3) 当 $0.5 < H < 1$ 时, 系统是一个持久性的序列, 反映今后降雨变化总趋势与过去相同, 且 H 值越接近于 1, 持续性就越强。

由图 6 可知, 该降雨时间序列的 Hurst 指数为 0.9713, 大于 0.5 且十分接近于 1, 说明南宁市未来几年降雨量呈增加的趋势十分强烈。

2.1.7 分析结果统计 由表 3 可见, 各种分析方法得出的降雨量变化趋势一致, 即在 1961 - 2016 年间南宁市年降雨量呈上升趋势, 但不显著。其中 Kendall 秩次相关法与其他几种方法相比, 能给出具体

的量化 Z 值, 可定量地分析降雨量的变化趋势。

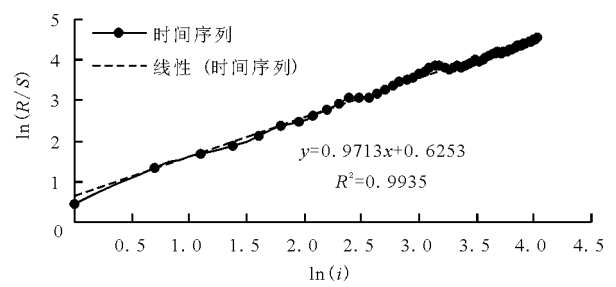


图 6 南宁市年降雨量的 R/S 分析

表 3 1961 - 2016 年南宁市年降雨量变化趋势

线性趋势线法 变化趋势	滑动平均法 变化趋势	累积滤波 波器法 变化趋势	Kendall 秩次相关法		
			变化趋势	Z 值	是否显著 ($\alpha = 0.05$)
上升	上升	上升	上升	0.92	否

此外, 由 R/S 分析可知, 未来几年南宁市年降雨量将很有可能继续增加。

2.2 突变分析

Mann - Kendall 法是由 Mann 于 1945 年提出的非参数统计检验方法, 在时间序列分析时, 该分析方法是世界气象组织推荐的非参数检验法, 现已广泛地用来分析降水、径流和气温等要素时间序列的变化情况^[19]。具体原理相关文献^[20-21]已有诸多介绍, 本文不再赘述。

利用 Mann - Kendall 法对南宁市年降雨量进行突变分析时, 绘制顺序统计曲线 UF_k 和逆序统计曲线 UB_k , 并根据置信水平计算临界直线。当 UF_k 或 UB_k 的值大于 0, 则表明降雨序列呈上升趋势, 小于 0 则呈下降趋势。当它们超过临界直线时, 表明上升或下降趋势显著。如果两条曲线出现交点, 且交点在临界直线之间, 那么交点对应的时刻就是突变开始时刻。

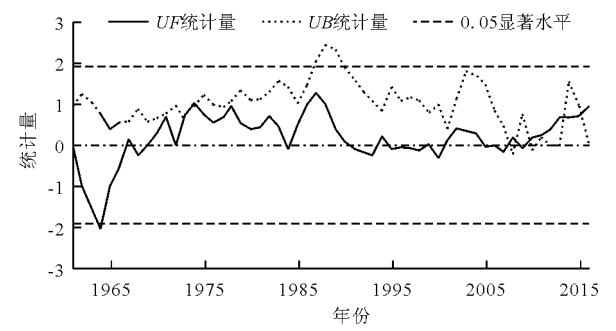


图 7 南宁市年降雨量序列 Mann - Kendall 统计量曲线

图 7 是利用 MATLAB 软件绘制的南宁市年降雨量突变分析图, 可见在 1987 年附近序列波动趋势

显著,此外绝大多数时间段内 UF_k 和 UB_k 的值均大于 0,说明年降雨呈增加趋势,但不明显。同时 UF_k 和 UB_k 存在多个交点,且主要集中在 2005 年以后,说明近 10 年来降雨序列突变频繁,这一现象可能与全球气候变化有关。

2.3 周期性分析

由于水文时间序列几乎都是非平稳的,使用常规的方法难以发现其内部隐含的发展规律,而小波分析可以对时间序列进行多尺度细化分析^[22]。对于 $f(t) \in L^2(R)$,连续小波变换^[23] 为:

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \bar{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (10)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为小波变换系数; a 为尺度因子(频率因子); b 为时间因子。

本文采用 Morlet 小波函数来分析降雨时间序列的周期,原因是 Morlet 小波在时域和频域上同时具有良好的局部化功能,可以对时间序列进行局部化分析^[24]。其定义为:

$$\varphi(t) = e^{ict} e^{-t^2/2} \quad (11)$$

式中: c 为常数且当 $c \geq 5$ 时 Morlet 小波就能近似满足允许性条件。将时间域上的关于 a 的所有小波变换的平方进行积分,即得小波方差:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (12)$$

小波方差图能够直观地反映波动的能量随尺度的分布情况,进而可以确定水文时间序列的主周期^[25-26],有关 1961-2016 年间南宁市年降雨量的小波方差图见图 8。

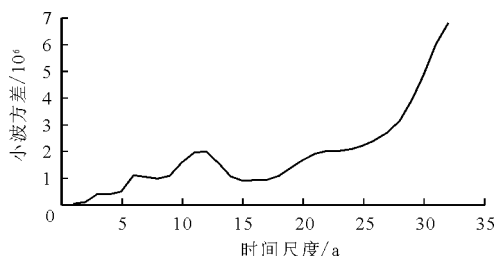


图8 南宁市年降雨序列的小波方差图

由图 8 可知,年降雨量序列小波方差存在 3 个明显的峰值,依次对应着 3、6 和 13 a 的时间尺度。其中,最大峰值对应着 13 a 的时间尺度,说明南宁市年降雨量 13 a 左右的周期振荡最为强烈,是序列的第一主周期。此外,该降雨序列可能还存在超过 30 a 的更大时间尺度的周期,但由于序列长度的限制,该周期未能得以显现。

3 结 论

(1) 1961-2016 年间南宁市年降雨量年际间呈波动变化,大体上呈上升趋势,但不明显,大约每 10 a 增加 13.8 mm 的降雨量;预计未来几年内,降雨量很有可能将继续增加。

(2) 近 10 年来,南宁市年降雨量序列突变频繁,造成这一现象的原因可能是全球气候变化的大环境背景。

(3) 1961-2016 年间南宁市年降雨量序列显示出以 13 a 为第一主周期的变化特征,此外还可能潜在超过 30 a 的大尺度周期,但由于序列长度的限制,本次检验未能体现。

(4) 通过本文的分析,可以对南宁市未来城市的水资源规划管理、洪涝灾害防治提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 施能,黄先香,杨 扬. 1948-2000 年全球陆地年降水量场趋势变化时空特征[J]. 大气科学,2003,27(6):971-982.
- [2] 代俊峰,王 娜,杜 君,等. 广西降雨量时空变异规律[J]. 水电能源科学,2013,31(6):6-9.
- [3] 徐海量,叶 茂,宋郁东,等. 塔里木河流域水资源变化的特点与趋势[J]. 地理学报,2005,60(3):487-494.
- [4] 孙 力,安 刚,高枫亭,等. 中国东北地区地表水资源与气候变化关系的研究[J]. 地理科学,2004,24(1):42-49.
- [5] 张济世,康尔泗,姚尽忠,等. 气候变化对洮河流域水资源的影响[J]. 中国沙漠,2003,23(3):263-267.
- [6] 颜 恒,秦 毅,李 璨,等. 山东省济宁市年降雨量演变与预测分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2011,42(4):520-526.
- [7] 张东龙. 基于 GIS 的南宁市城区洪涝灾害风险评价及时空演变研究[D]. 南宁:广西大学,2015.
- [8] 陆 勉. 基于灰色神经网络的郁江流域灾害性洪水预测[D]. 南宁:广西大学,2012.
- [9] 肖鹏嵩,代俊峰,王 娜. 广西降雨量变化趋势分析[J]. 节水灌溉,2013(2):38-40.
- [10] 韦 开,王全九,周蓓蓓,等. 基于降水距平百分率的陕西省干旱时空分布特征[J]. 水土保持学报,2017,31(1):318-322.
- [11] 王富强,王 雷. 基于降水距平百分率的河南省干旱特征分析[J]. 中国农村水利水电,2014(12):84-88.
- [12] 陈仁升,康尔泗,杨建平,等. 甘肃省河西地区近 50 年气象和水文系列的变化趋势[J]. 兰州大学学报(自然版),2002,38(2):163-170.
- [13] 李丽娟,郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析——以潮白河为例[J]. 地理学报,2000,

- 55(3):309-317.
- [14] 法尔科内. 分形几何数学基础及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [15] 顾维慧,吴洪军,乔晓波. R/S分析法在涟水县降水趋势预测中的应用[J]. 农业与技术,2013,33(10):204-206.
- [16] 何毅,杨太保,杜鹃,等. 基于GIS和RS的中亚阿拉套山脉近22a来冰川变化[J]. 水土保持研究,2013,20(6):130-134.
- [17] 胡小梅,贺天忠,陈湘海,等. 高关水库降雨序列R/S分析[J]. 水电与新能源,2014(1):53-55.
- [18] 张涵丹,卫伟,薛蕊. 基于R/S分析和Mann-Kendall检验的定西市气温降水变化特征[J]. 水土保持研究,2015,22(6):183-189.
- [19] 唐共地,包赢. 基于有序聚类分析法和Mann-Kendall法的水沙系列突变点研究[J]. 江淮水利科技,2015,(6):35-37.
- [20] 曹宇峰,刘高峰,王慧敏. 基于Mann-Kendall方法的淮河流域降雨量趋势特征研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),2014,37(5):477-480+485.
- [21] 王乐,刘德地,李天元,等. 基于多变量M-K检验的北江流域降雨趋势分析[J]. 水文,2015,35(4):85-90.
- [22] 于芷婧,郝颖坤. 沱江上游径流周期性与季节影响分析[J]. 长江科学院院报,2012,29(9):5-8+13.
- [23] 郭高轩,辛宝东,朱琳,等. 基于小波变换的北京地区1724~2009年降水量多尺度分析[J]. 水文,2012,32(3):29-33.
- [24] 祁顺杰,陈皓锐. Morlet小波在降雨的多时间尺度分析中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2010,8(3):79-82.
- [25] 李丹,郭亚萍,焦裕飞,等. 泗河流域径流特征与演变规律研究[J]. 中国农村水利水电,2016(10):91-94.
- [26] 张萍,秦天玲,冯倩,等. 基于小波分析的宜昌水文站径流演变规律研究[J]. 人民长江,2011,42(17):24-27.

(上接第49页)

- [10] Wheeler H, Evans E, Beddington J. Land use, water management and future flood risk[J]. Land Use Policy, 2009, 26(12):S251-S264.
- [11] 薛偲琦,张瑛,李一平,等. 基于SWMM的南京市内秦淮河中段管网排水能力分析[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5):169-173.
- [12] 唐清华,何沛英,朱志华,等. 已建城市排水管网的排涝能力评估方法[J]. 热带地理,2016,36(4):626-632.
- [13] 王祥,张行南,张文婷,等. 基于SWMM的城市雨水管网排水能力分析[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2011,33(1):5-8.
- [14] 张兆祥,杨帆,王大春. 淹没出流雨水管道应对内涝设计探讨[J]. 中国给水排水,2016,32(1):83-85+89.
- [15] 钱海平,陆敏博,韩素华. 城市雨水管道排水能力影响因素分析——以苏州市为例[J]. 净水技术,2016,35(2):80-83.
- [16] 张志军. 城镇排水系统设计运行中的若干问题探讨[J]. 中国给水排水,2010,26(6):45-48+51.
- [17] 芮孝芳,蒋成煜. 中国城市排水之问[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):1-5.
- [18] 谢莹莹. 城市排水管网系统模拟方法和应用[D]. 上海:同济大学. 2007.
- [19] 秦佳伟. 基于SWMM对雨水管网中调蓄池及雨水泵站优化设计的研究[D]. 衡阳:南华大学. 2015.
- [20] 李春林,胡远满,刘森,等. SWMM模型参数局部灵敏度分析[J]. 生态学杂志,2014,33(4):1076-1081.
- [21] 姚雨霖,任周宇,陈忠正,等. 城市给水排水. 第2版[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1986.
- [22] Kibler D F. Urban StormwaterHydrology[M]. American Geophysical Union's WaterResources Monograph,1982:48-60.
- [23] 岑国平,沈晋,范荣生. 城市设计暴雨雨型研究[J]. 水科学进展,1998,9(1):41-46.
- [24] 上海市建设和交通委员会. GB 50014-2006 室外排水设计规范(2014年版)[S]. 北京:中国计划出版社,2006.