

1951—2009 年北京市降水变化情势分析

朱龙腾^{1 2} 陈远生¹ 李 璐^{1 2} 王 瑛^{1 2} 蒋 蕾^{1 2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101 ; 2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 建立北京市 1951—2009 年的降水变化时间序列,采用经验模态分解(EMD)方法求出该序列的本征模态函数(IMF),分析原序列内在的多尺度振荡变化,综合运用 Mann-Kendall 法和 R/S 法分析原序列的突变以及未来趋势特征。结果表明,北京市降水变化序列主要由 IMF1、IMF2 和 IMF3 这 3 个本征模态构成,3~4 a、5~6 a、14 a 尺度的振荡变化对整个变化起主要作用,短期内,北京市年降水量有在波动中减少的趋势。1951 年来,降水序列整体上呈减少趋势,减少的突变年份是 1994 年,2005 年以后降水显著减少。从 M-K 与 R/S 方法的综合分析来看,在未来的长时间尺度上,北京市的年降水量整体上将在波动中不断增加。

关键词 降水变化时间序列;经验模态分解;Mann-Kendall 法;R/S 分析法;北京市

中图分类号 P333 **文献标识码** A **文章编号** 1004-6933(2012)03-0042-05

Analysis of precipitation variation trend in Beijing City from 1951 to 2009

ZHU Long-teng^{1 2}, CHEN Yuan-sheng¹, LI Lu^{1 2}, WANG Ying^{1 2}, JIANG Lei^{1 2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China ;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract : A time series of precipitation variation in Beijing City from 1951 to 2009 was built. The intrinsic mode functions (IMF) of the time series were calculated and the intrinsic multi-scale oscillation change was analyzed using the empirical mode decomposition (EMD) method. A combination of the Mann-Kendall method and the R/S method was used to analyze the features of mutation and the future trend of the original series. The results show the following : The time series of precipitation variation mainly consists of three intrinsic modes, including the IMF1, IMF2, and IMF3. The whole variation is mainly controlled by the oscillation variations at the scales of three to four years, five to six years, and 14 years. The precipitation over Beijing City has a declining trend in a short period. The time series of precipitation has shown a declining trend in general since 1951. The precipitation abruptly decreased in 1994 and decreased significantly from 2005 onward. Based on an integrated analysis with the Mann-Kendall and R/S methods, the annual precipitation over Beijing City will constantly increase in general over a long time scale in the future.

Key words : time series of precipitation variation ; empirical mode decomposition ; Mann-Kendall method ; R/S analysis method ; Beijing City

北京市是我国水资源紧缺最严重的城市之一,属于典型的资源型缺水城市。随着人口规模的不断扩大,经济和社会的快速发展,水资源已经成为制约北京市发展的一大瓶颈。北京市水务局的统计数据显示,北京市的人均水资源占有量已降至 100 m³,远远低于人均 1 000 m³ 的国际缺水警戒线,相当于国

际警戒线的 1/10,面临异常严峻的缺水形势。

为了缓解城市水资源日益尖锐的供需矛盾,北京市把污水资源化(中水回用等)、雨水利用等非传统水资源的开发利用当成重点来抓,其开发利用程度走在了国内前列。雨水利用不仅能够涵养水源、延缓滞洪、减少径流、缓解供排水压力,而且能够改善生态

环境,具有良好的经济效益、社会效益和环境效益^[1]。雨水利用工程的设计、规划和建设必须在充分考虑北京市降水时空变化特征的前提下进行,才能达到理想的效果。另外,对北京市多年降水变化规律以及未来趋势的分析研究,能为水资源管理部门在防洪、抗旱等方面提供决策支持,为城市给水排水系统的合理配置与生产、生活的合理安排提供依据,进而在一定程度上缓解北京市水资源紧缺的局面。

笔者利用北京市 1951—2009 年共的降水资料,构建年降水量变化时间序列,从降水量时间变化的角度探讨以下问题:①北京市降水量的多年变化的时间尺度;②在降水量的多年变化过程中显著增加或减少的突变年份;③北京市降水量未来的变化。

1 降水量变化的多尺度分析

1.1 多年变化的统计特征

1951—2009 年北京市降水序列的特征值:最小值为 261.4 mm(1965 年),最大值为 1 404.6 mm(1959 年),多年平均降水量为 589.2 mm,降水量的变差系数为 0.356,表明其年际变化较大。降水量的多年变化情况见图 1。由图 1 可见,1951 年以来,北京市的年降水量总体上呈现在波动中不断下降的变化趋势,且在 1999—2009 年,除 2008 年以外,其余年份的年降水量都小于多年平均降水量。

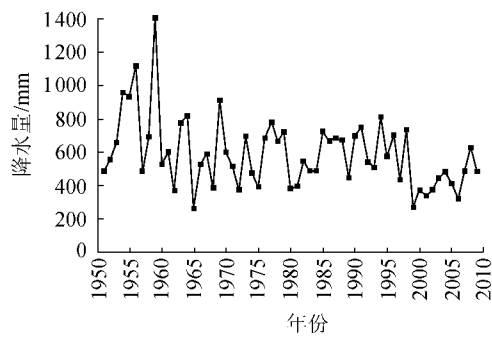


图 1 北京市 1951—2009 年降水量

1.2 EMD 方法简介

1998 年,Huang 提出的经验模态分解方法(EMD)可以很好地处理非平稳、非线性信号,而且是直观、直接、自适应和基于经验的^[2]。它将不同时间尺度的波动或趋势从原信号中逐级分解开来,从而产生具有不同特征尺度的一系列数据变化序列,其中每 1 个序列称为 1 个本征模态函数(intrinsic mode function,IMF),而原信号中的特征信息量包含在了各 IMF 分量之中。大量测试结果表明,目前 EMD 方法是在提取时间序列趋势方面的最好方法^[2]。EMD 方法分解出来的各 IMF 分量满足以下两个条件:①在整个数据序列中,极点数与零点数相等或者至

多相差 1 个;②在信号上的任意一点处,由局部极小值点和由局部极大值点各自确定的包络线的均值均为 0,即信号是关于时间轴局部对称的。

实际上,EMD 是一种循环迭代算法,其具体过程如下^[3]:

对任一信号 $S(t)$ 来说,首先需要确定出 $S(t)$ 上的所有极值点,然后将所有的极小值点和所有的极大值点分别用一条曲线连接起来,且这两条曲线间包含了所有的信号数据,将 $S(t)$ 的上、下包络线默认为这两条曲线。若这两条包络线的平均值是 m , $S(t)$ 和 m 的差为 h ,则有:

$$S(t) - m = h \quad (1)$$

把 h 当作新的 $S(t)$,重复以上过程,当 h 满足一定的条件(比如 h 的变化足够小)时停止循环,且记:

$$c_1 = h \quad (2)$$

把 c_1 当作一个 IMF 分量,再作:

$$S(t) - c_1 = r \quad (3)$$

把 r 当作新的 $S(t)$ 信号,重复以上循环过程,依次得到第 2 个 IMF 分量,第 3 个 IMF 分量,……。当 c_n 或者 r 满足给定的终止条件(比如分解出的 IMF 分量或趋势函数 r 足够小或者 r 成为单调函数)时,筛选的循环过程终止,得到分解式:

$$S(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r \quad (4)$$

式中: $S(t)$ 代表原信号序列; c_i 为本征模态函数 IMF 分量,代表不同时间尺度下的振荡序列; r 为趋势函数,表征信号的平均趋势。

EMD 方法与各种数字滤波器的设计、小波变换方法一样,都存在边界问题的处理。本文中的边界处理方法采用的是镜像对称延伸方法,能够很好地解决 EMD 分解过程中边界引起的上冲和下冲现象^[4]。

1.3 北京市降水量变化的 EMD 分析

图 2 为对北京市 1951—2009 年的降水量时间序列进行 EMD 分解后得出的 4 个 IMF 分量及其趋势分量 R ,表征了从高频到低频逐级分解原序列的过程。各 IMF 分量表征不同尺度的振荡变化,每一个 IMF 分量可能包含了不同尺度振荡变化的信息,但是就同一个时间段而言,不同的 IMF 分量却不会包含同一个尺度的波动信号。趋势分量 R 代表了整个序列总的趋势发展过程。从图 2(e)的趋势分量来看,自 1951 年以来,北京市的降水量整体在不断减少,其平均递减速度约为 4 mm/a。

研究各 IMF 分量相对于原时间序列的重要性时,一是依据各 IMF 分量振幅变化的量级(图 2 中的纵坐标)大小;二是用方差贡献来表现各分量相对于

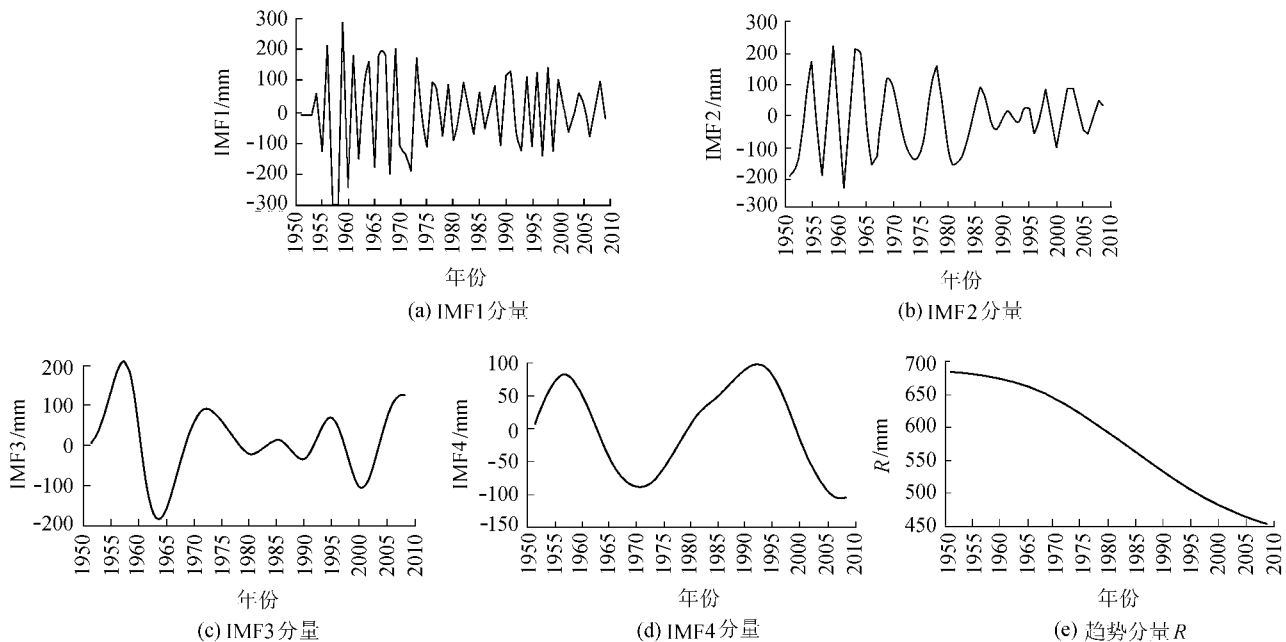


图2 北京市多年降水量变化的 IMF 分量及其趋势量

原序列的重要性。不同 IMF 分量平均周期及方差贡献率见表 1, R 的分差贡献率为 13.6%。图 2 中 IMF1、IMF2、IMF3 的振幅明显大于 IMF4 的振幅, 表 1 显示各 IMF 分量的方差贡献率依次递减。综合以上两点得出: 北京市多年降水量的变化主要由 IMF1、IMF2 和 IMF3 等 3 个较高频的振荡所决定。

表 1 IMF 分量平均周期及方差贡献率

分量	平均周期/a	方差贡献率/%
IMF1	3.1	37.9
IMF2	5.6	22.8
IMF3	14.0	16.2
IMF4	33.7	9.5

从图 2(a) 可以看出, IMF1 分量表示的是一个准 3~4 a 的周期性振荡, 且振幅变化最大, 能量最大, 对原序列的贡献最大。该尺度的周期性波动主要包括了 3 a 和 4 a 尺度的波动, 1951 年以来大致经历了 19.5 个周期的波动, 平均周期为 3.1 a。在该时间尺度下 (1951—1975 年) 的振幅最大, 且变化频率较快, 以 3 a 左右的周期性波动为主; 1976—1989 年振幅明显变小, 且变化频率相对变缓, 以 4 a 左右的周期性波动为主; 整个 20 世纪 90 年代中, 振幅有所回升, 但远小于变化的第 1 阶段, 频率增大, 以 3 a 左右的周期性波动为主; 进入 21 世纪, 振幅显著变小, 频率变缓, 4 a 左右的周期性波动比较显著。同时, 自 2002 年以来, 波动的幅度较为稳定, 说明北京市降水量在短期内可能不会发生大增或大减现象。

图 2(b) 表示的是一个准 5~6 a 的周期性振荡。1951 年以来大致经历了 10.5 个周期, 其平均周期为 5.6 a。5 a 左右的周期与 6 a 左右的周期交替出现, 振幅大小交替变化, 但是总体上是变小的, 其中

1987—1997 年的振幅显著变小, 说明这期间北京市的降水量较为稳定, 没有出现大的降雨灾害, 此后振幅变化增大, 频率减慢。

图 2(c) 表示的是一个平均周期为准 14 a 的周期性振荡大致经历了 4.25 个周期, 其振幅由大变小再到变大, 相对于 IMF1 与 IMF2 来说, 其振幅明显变小。说明北京市降水量在 14 a 左右的时间尺度上变化相对稳定。

北京市降水量的年际变化振荡由图 2(d) 的 IMF4 分量反映出来, 呈两峰一谷的大趋势。从 4 个 IMF 分量以及趋势分量在 2009 年以后的综合走向来看, 短期内北京市的年降水量呈在波动中减少的趋势。

2 突变及趋势分析

2.1 方法介绍

对时间序列突变及趋势分析研究的方法有很多种, 主要有小波理论分析法、Mann-Kendall 法、灰色系统分析法^[5]、滑动 t 检验法和 R/S 法等, 各种方法可以从不同的角度揭示突变及趋势变化的特征。本文综合运用 Mann-Kendall 和 R/S 法对北京市 1951—2009 年的降水序列进行突变及其未来趋势分析。

2.1.1 Mann-Kendall 法

Mann-Kendall 法 (简称 M-K) 是一种非参数统计检验方法, 其突出的优点是不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 计算比较方便。M-K 法能很好地揭示时间序列的突变及其趋势变化特征^[6]。其基本原理为:

对于时间序列 x (具有 n 个样本), 构造一秩序列如下:

$$d_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (5)$$

其中
$$r_i = \begin{cases} 1 & i > j \\ 0 & i \leq j \end{cases}$$

由此可见, d_k 是第 i 时刻数值大于第 j 时刻数值个数的累计数。

假定时间序列独立, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{d_k - E(d_k)}{\sqrt{V_{ar}(d_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中: $UF_1 = 0$, $V_{ar}(d_k)$ 及 $E(d_k)$ 分别是累计数 d_k 的方差和均值, 当 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 相互独立, 且具有相同连续分布时, 它们可以由式(7)推算出来:

$$E(d_k) = \frac{k(k-1)}{4} \quad (7)$$

$$V_{ar}(d_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (2 \leq k \leq n) \quad (8)$$

标准正态分布 UF_i 是按时间序列 x 的顺序 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 计算得到的统计量序列, 给定显著性水平 α , 查正态分布表, 若 $|UF_i| > U_\alpha$, 则表明时间序列存在明显的趋势变化特征。

按时间序列 x 的逆序 $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$ 再重复上述计算过程, 同时使 $UB_k = -UF_k$ ($k = n, n-1, \dots, 1$), $UB_1 = 0$ 。

这一方法不仅计算方便, 重要的是可以明确突变开始的时间, 并且指出突变的区域, 是一种常用的突变检验方法^[7]。

一般取显著性水平 $\alpha = 0.05$, 则临界值 $U_{0.05} = \pm 1.96$ 。将 UF_k 和 UB_k 这两个统计量序列曲线和 $y = \pm 1.96$ 两条直线绘在一张图上, 若 $UF_k > 0$, $UB_k > 0$, 那么表明时间序列呈上升趋势, 反之则呈下降趋势。如果它们超过临界直线, 表明上升或下降的趋势显著。突变的时间区域为超过临界线的范围。若 UF_k 和 UB_k 的两条曲线出现交点, 且交点在两条临界线之间, 则这个交点对应的时刻就是突变开始的时间。

2.1.2 R/S 方法

最早, 英国科学家在研究尼罗河多年水文观测资料时提出了 R/S 分析法——变标度极差分析法 (rescaled range analysis, 简称 R/S 分析), 它是一种新的统计方法。后来 Mandelbrot 与 Wallis 对该方法在理论上进行了进一步地补充完善, 使其成为研究时间序列的分形理论^[8]。该方法的基本原理为:

对于任意一个时间序列 $x(t)$ ($t = 1, 2, \dots$), 它的均值序列为:

$$y(\tau) = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x(t) \quad (\tau = 1, 2, \dots) \quad (9)$$

累计的离差为:

$$F(t, \tau) = \sum_{u=1}^t x(u) - y(\tau) \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (10)$$

极差为:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} F(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} F(t, \tau) \quad (F(t, \tau) = 1, 2, \dots) \quad (11)$$

标准差为:

$$S(\tau) = \left\{ \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} [x(t) - y(t)]^2 \right\}^{1/2} \quad (12)$$

最后由 R/S 分析发现, $R(\tau)$ 与 $S(\tau)$ 之间存在着一定的函数关系:

$$R(\tau)/S(\tau) = (C\tau)^H \quad (13)$$

式中: C 为常数; H 为赫斯特指数 $0 < H < 1$ 。

对方程(13)进行线性模拟可以得到赫斯特指数, 不同的 H 意味着时间序列有不同的趋势变化特征: 当 $H = 0.5$ 时, 表明时间序列是一个随机过程, 即序列是完全独立的; 当 $H > 0.5$ 时, 意味着未来的变化情况与过去一致, 即持续性, H 越大持续性越强^[9]; 反之, 当 $0 < H < 0.5$ 时, 意味着未来的变化情况与过去相反, 即反持续性, H 越小, 反持续性越强。

2.1.3 M-K 与 R/S 法的综合应用

M-K 法利用线性回归方法计算得出趋势方程, 以此来揭示时间序列的趋势变化特征, 其重点在于从定量的角度分析研究序列在某一时间段内的趋势变化特征, 并且能够清晰地反映出时间序列是上升趋势还是下降趋势。R/S 法通过线性模拟得出赫斯特指数 H , 该值能够揭示时间序列的分形特征。若 $H < 0.5$, 则序列未来的变化趋势与过去相反, 即具有反持续性; 若 $H > 0.5$, 则该序列未来的变化趋势与过去相同, 即持续性。该方法能够从定性的角度揭示时间序列过去与未来的趋势变化关系(相同或者相反), 但却不能揭示出时间序列过去的趋势变化特征。以上这两种方法各自都无法全面(定性定量结合)揭示出时间序列未来的趋势变化是上升还是下降。

针对这种情况, 笔者考虑综合运用 R/S 和 M-K 法来预测时间序列的未来趋势变化特征。首先, 利用 R/S 法求出赫斯特指数 H , 以此来揭示序列的持续性或反持续性特征; 然后, 运用 M-K 法分析研究时间序列过去的变化趋势, 同时给出统计量 UF 的值, 最后, 由以上两个统计量综合就可以得出未来的趋势特征^[10]。综上所述, 综合应用两种方法得出时间序列的未来趋势特征如表 2 所示。

表 2 时间序列的未来趋势特征

分类 UF	$H > 0.5$	$H < 0.5$
> 0	上升趋势	下降趋势
< 0	下降趋势	上升趋势

2.2 结果分析

2.2.1 降水量突变分析

图3为利用M-K法对北京市降水序列进行分析得到的检验计算图。从图3可见,1951—1964年的UF线大于0,北京市降水量处于增加期,尤其是1953—1956年,其UF值超过了信度线的上边界,增加趋势显著。1964年以来,UF线全部小于0,说明从1951年以来北京市降水量整体上呈下降趋势,而在2005年以后,UF值超出信度线,说明下降趋势明显。UF和UB线在1994年时有交点,且交点位于两条信度线之间,那么该交点即突变点,说明降水量在1994年开始突然下降,2005年以后尤其明显。

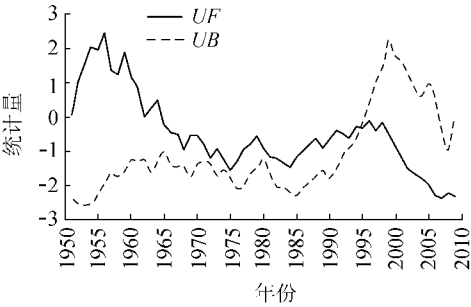


图3 北京市降水变化 M-K 检验计算

2.2.2 综合趋势分析

对北京市1951年以来的降水量序列进行R/S分析,来说明降水量序列未来的变化趋势。R/S法的分析结果:

$$R(\tau)/S(\tau) = (0.8109\tau)^{0.2882} \quad (14)$$

由方程式(14)可以得出 $H = 0.2882 < 0.5$,说明未来的降水量与1951—2009年有相反的变化趋势,即有反持续性特征。再依据M-K法分析其序列的变化趋势,得出 $UF = -2.315$, $|UF| > U_{0.05}$,结合图3说明该序列有显著的下降趋势,这与EMD方法中分解出来的R趋势分量的结果相一致。由H指数和UF统计量综合分析(参照表3)可得,北京市降水量未来有上升的趋势,且随着时间的变化,上升的趋势会越来越显著。

运用EMD方法对降水序列进行不同时间尺度的分解,预测到北京市降水量短期内呈在波动中下降的趋势,但这并不与由M-K法和R/S法综合应用得出的结论相悖,只是看待问题的时间尺度不同。综合以上3种方法得出,北京市的年降水量短期内呈在波动中下降的趋势,但从长时间尺度来看,未来的年降水量整体上呈现在波动中不断上升的趋势。北京市年降水量的这种趋势变化特征可以为北京市水资源的合理利用和有效管理提供科学的依据。

3 结 论

a. 北京市降水变化时间序列主要由IMF1、IMF2、IMF3这3个本征模态构成,说明,准3~4a、5~6a和14a的尺度振荡变化对整个序列的变化起主要作用。综合几个IMF分量及R趋势分量来看,短期内北京市的年降水量将在波动中不断减少。

b. 北京市降水量在1951—1964年处于增加期,1953—1956年增加的趋势显著;之后降水量一直处于减少期,1994年为降水量减少的突变年份,从2005年开始,减少的趋势更加明显。

c. 降水序列的赫斯特指数 $H = 0.2882$,M-K法中的统计量 $UF = -2.315$,综合来看,在未来的长时间尺度上,北京市的年降水量整体上呈在波动中不断增加的趋势,且随着时间的变化,增加的趋势将更加明显。

参考文献:

[1] 孙静,阮本清,张春玲.北京市降水量的时间变化分析[J].北京水务,2007(1):20-22.

[2] 刘会玉,林振山,张明阳.基于EMD的我国粮食产量波动及其成因多尺度分析[J].自然资源学报,2005,20(5):745-751.

[3] 高祥涛,李士进.基于经验模态分解的水文时间序列预测研究[J].水文,2009,29(3):66-68.

[4] 林振山,汪曙光.近四百年北半球气温变化的分析:EMD方法的应用[J].热带气象学报,2004,20(1):90-96.

[5] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002:338-347.

[6] 白晶,延军平,苏坤慧.1958—2007年秦岭南北气候变化的差异性分析[J].陕西师范大学学报,2010,38(6):98-105.

[7] 陈亚宁,徐长春,杨余辉,等.新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J].地理学报,2009,64(11):1331-1341.

[8] 马宏伟,王乃昂,李卓仑.近五十年石羊河流域气候变化的R/S分析[J].兰州大学学报,2010,46(4):42-45.

[9] 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.

[10] 于延盛,陈兴伟.R/S和Mann-Kendall法综合分析水文时间序列未来的趋势特征[J].水资源与水工程学报,2008,19(3):41-44.

(收稿日期 2011-10-26 编辑 徐娟)