

汾河流域汛期降水序列的多时间尺度分析

刘宇峰¹, 孙虎¹, 原志华², 李艳茹¹

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062; 2. 陕西国际商贸学院, 陕西 咸阳 712046)

摘要: 基于汾河流域 19 个气象站点 1959—2007 年汛期(6—9 月)的降水数据,采用小波分析、M—K 突变分析及其它数理统计方法,对汾河流域汛期降水量时间序列进行了多时间尺度特征分析。结果表明,近 49 a 来,流域汛期降水呈现减少趋势,递减率是 9.79 mm/10 a,其中 6 月份的降水呈现上升趋势,速率为 2.79 mm/10 a,7—9 月均表现出下降趋势,最明显的是 7 月份(速率为 -6.54 mm/10 a),7 和 9 月份降水明显减少是流域汛期降水量下降的主要原因;汛期降水在 1978 年以后发生突变,流域降水处于一个相对少雨的时期;汛期降水量存在 8~15 a 和 3~7 a 的特征周期,中心时间尺度为 2,5,10 和 12 a,其中约 5 a 的周期振荡最为强烈,是汛期降水变化的主要周期;根据 5 a 周期及其它特征周期的小波系数变化趋势,估计汾河流域在研究时间段以后近期内汛期降水量可能偏多。

关键词: 汛期; 降水序列; 小波分析; 汾河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)06-0121-05

中图分类号: P426.6

Time Series Analysis of Precipitation in Flood Season in Fenhe River Basin

LIU Yu-feng¹, SUN Hu¹, YUAN Zhi-hua², LI Yan-ru¹

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China;

2. Shaanxi International Commerce College, Xianyang, Shaanxi 712046, China)

Abstract: Based on the flood season(from June to September) precipitation data from 19 climatic stations within the Fenhe River Basin from 1959 to 2007, and using wavelet transform method, Mann—Kendall and other statistical methods, a time series analysis was made on the precipitation. The results showed that the precipitation in flood season in the Fenhe River basin showed a declining from 1959 to 2007, with an average velocity of -9.79 mm/10 a. However, the precipitation in June increased with a rate of 2.79 mm/10 a, while it decreased with a rate of -6.54, -2.69, -3.36 mm/10 a respectively in July, August and September. This indicated that the precipitation decreased in July and September was the main source of precipitation reduction in flood season. An abrupt change in the flood season precipitation appeared after 1978 when the basin underwent a period of little rain. From 1959 to 2007, there existed 8 to 15 years and 3 to 7 years cycles of precipitation series in flood season and the significant time-scale change were 2, 5, 10 and 12 year. But the 5 year scale was the main cycle because its oscillation was most strongly. According to the trend of the wavelet transform result, it can be estimated that there will more precipitation in flood season in the near future in the Fenhe River basin.

Keywords: flood season; precipitation series; wavelet analysis; Fenhe River basin

流域降水变化规律是水文水资源学研究的重点内容,也是流域气候变化的重要指标之一。降水变化与区域生态环境的发展变化及生态安全息息相关,它对区域水资源的开发利用、工农业生产及社会经济的发展具有重要影响。因此,利用实测气象资料研究区

域降水量的变化特征对于了解未来区域气候变化规律、合理开发和利用水资源、抗旱防涝等具有重要意义。

汾河流域位于黄土高原地区,由于历史上自然和人类活动等原因,流域水土流失严重,水量日趋减少,

收稿日期:2011-01-10

修回日期:2011-04-11

资助项目:长江水利委员会水土保持局项目“南水北调中线水源区水土保持预防保护工程对土壤侵蚀、植被恢复和饮水质量影响的研究”(105152)

作者简介:刘宇峰(1981—),男(汉族),山西省忻州市人,博士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: yfliu518@163.com。

通信作者:孙虎(1962—),男(汉族),陕西省西安市人,教授,博士生导师,主要从事水土保持研究。E-mail: kycjh6@snnu.edu.cn。

加之水体破坏严重,流域生态环境状况不容乐观^[1],这将严重制约区域经济和社会的发展,而且会给黄河中下游本已十分脆弱的生态环境带来不利影响。因此,研究汾河流域近几十年的降水变化特征对于流域的生态、经济及社会的发展具有重要的现实意义。近些年,许多气象研究者利用不同的气象资料,采用不同的数理统计方法对区域气候的变化进行了大量研究,取得了丰硕的成果^[2-15]。降水属于非平稳随机水文现象,降水序列具有趋势性、周期性和平稳随机性等多项特征^[16]。据已有的研究结果,在分析降水序列在不同时间尺度上的变化特性时,小波分析是一种有力的工具,它具有时频多分辨功能,能够同时在时域和频域上揭示降水信号的细微变化特征。因此,本研究以汾河流域为例,应用小波分析理论及其它数理统计方法对流域汛期降水量在不同时间尺度上的变化规律进行分析,期望为流域水库的调蓄和气候预测提供参考。

1 研究区概况

汾河是山西省境内最大的河流,也是黄河第二大支流。汾河流域控制面积 39 471 km²,占山西省总面积的 25.3%。该流域位于中纬度大陆季风气候带,气候南北差异较大。全流域多年平均降水量为 504.8 mm,年内降水主要集中于 6—9 月份(汛期),约占全年降水量的 70%^[17]。汾河流域位于黄土高原地区,从北往南地势由高变低,依据其河流地貌特点,常把汾河分为上、中、下游三部分:河源至太原市北郊区上兰村为上游,上兰村至洪洞县石滩为中游,洪洞县石滩至汾河入黄口为下游。

2 资料来源与方法

2.1 资料来源与预处理

研究所用的气象资料来源于山西省气象局,共选取流域具有代表性的 19 个地面观测站 1959—2007 年的汛期(6—9 月)降水资料,对于个别站点少数月份的资料缺失部分,分析时通过与邻近点的相关分析方法将所缺数据进行插补。利用 1959—2007 年汛期各站月降水量均值计算流域各年汛期降水量均值,为消除月际变化的影响,需对降水序列进行距平处理,得到降水距平时间序列,然后对降水距平序列进行突变分析及连续小波变换。

2.2 研究方法与原理

2.2.1 小波分析方法 波分析涉及到小波函数和小波变换,不仅能将水文时间序列的频率特征在时间域上展现出来,分析出其主周期,而且能清晰地给出

各种时间尺度(周期)的强弱和分布情况。

小波函数 $\psi(t)$ 为一平方可积函数,即 $\psi(t) \in L^2(R)$,它具有振荡特性,能够迅速衰减到零^[18],即:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad \text{或者} \\ C_G = \int_0^{+\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

式中: $\psi(\omega)$ 为 ψ 的傅里叶变换。目前有很多函数可以选用,如 Meryer 小波、Morlet 小波、Mexican hat 小波等,为了最大限度的利用原始数据信号,考虑到小波的容许性条件^[19],采用墨西哥帽小波 (Mexican hat (Mexh)) 函数对汾河流域汛期的降水距平序列进行连续小波变换,其小波形式为^[20]:

$$\psi(t) = (1-t^2)e^{(-t^2/2)} \quad (2)$$

式中: t ——时间。为了消除边界影响,对距平处理后的数据进行对称延展和小波变换^[21]。将小波函数进行伸缩和平移,得到连续小波:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (a, b \in R, a > 0) \quad (3)$$

小波变换的含义是把基本小波的函数 $\psi(t)$ 做位移后得到的连续小波在不同时间尺度 a 下与待分析信号 $f(t)$ 做内积,即:对于任意的函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为:

$$W_F(a, b) = \langle F(\omega), \psi_{a,b}(\omega) \rangle = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_R F(\omega) \psi^*(a\omega) d\omega \quad (4)$$

等效的频域表示为:

$$W_f(a, b) \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5)$$

式中: a ——尺度因子; b ——平移因子。 $W_f(a, b)$ ——小波变换系数,正的小波系数对应于偏多期,负的小波系数对应于偏少期,小波系数为零对应着突变点;小波系数的绝对值越大,表明该时间尺度变化越显著。通过小波系数的分析,可以识别降水序列多时间尺度演变特征。

另外,可以通过小波方差图来反映不同时间尺度信息的波动变化情况,对于离散时间序列,小波方差的计算公式为^[22]:

$$\text{var}(a) = \frac{1}{n} \sum_{b=1}^n |W_f(a, b)|^2 \quad (6)$$

式中: n ——样本, $W_f(a, b)$ —— $f(t)$ 在位置 b , 尺度 a 上小波系数。小波方差某一尺度上的峰值分别对应该尺度上的显著周期,当小波系数达到最大值时,小波函数的尺度与序列周期吻合的最好。

2.2.2 Mann—Kendall 法 Mann—Kendall 法是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数统计检验方法^[23]。

对于一个时间序列,定义其统计量:

$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i, (2 \leq k \leq n) \quad (7)$$

d_k 的均值、方差分别为: $E[d_k] = k(k-1)/1$, $\text{var}[d_k] = k(k-1)(2k+5)/72$, $(2 \leq k \leq n)$ 。

在时间序列随机独立的假设下,定义统计量 U :

$$U = \frac{d_k - E[d_k]}{\sqrt{\text{var}[d_k]}}, (k=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

U 为标准正态分布,取一定显著水平 α ,如果 $|U| > U_\alpha$,则时间序列有明显的变化趋势。按时间序列 x 逆序 $x_n, x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_1$;再重复上述过程,同时使 $\bar{U} = -U (k=n, n-1, \dots, 1) (k=n, n-1, \dots, 1)$ 。 U 和 $-\bar{U}$ 分别构成曲线 c_1 和 c_2 ,两条曲线在时间序列的某一部分发生交叉,交叉点便是突变点,如果突变点位于给定置信度水平线之间,则突变时间在统计意义上是显著的。

3 结果分析

3.1 汛期及各月降水的时间变化特征

图1为汾河流域1959—2007年汛期降水量距平图,为了解其年际变化趋势,对降水距平序列分别做了线性趋势估计及5点滑动平均处理。

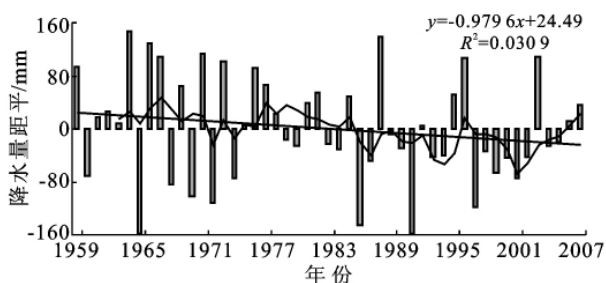


图1 汾河流域汛期降水量距平变化

注:直线为线性趋势,曲线为5点滑动平均。

由图1可以看出,汾河流域近49 a来汛期降水量存在明显的波动变化及显著的丰枯交替现象,但是降水总趋势是下降的,线性拟合递减率是9.79 mm/10 a。在过去的49 a间,有25 a降水量为正距平,降水偏多;有24 a为负距平,降水偏少。其中,在20世纪60年代以前,汛期降水距平基本均为正距平,处于降水偏多期,只有3 a出现负距平,且1965年负距平值最大,达到-159.04 mm,是最干旱的一年;20世纪70年代中期以前降水量表现出“偏多—偏少”的逐年交替现象,中期以后一直是处于偏多期直到1978年,1979年降水又出现负距平值。20世纪80年代,降水偏少年份有所增多,降水负距平为6 a,其中1986年负距平值最大,为-145.14 mm,是最干旱的年份。

进入20世纪90年代,降水负距平年份进一步增多,为7 a,最干旱年份出现在1991年,距平值为-158.73 mm,这是继1965年以来出现的第二次最为干旱的年份;在2000—2007年,也是表现出降水偏少年(5 a)多于降水偏多年(3 a)的现象,不过从2006年开始汛期降水有上升的趋势。从5 a的趋势滑动平均来看,流域汛期降水量基本上呈现波动下降的趋势,1967年以前为波动上升趋势,1967年以后直到2001年为波动下降趋势,2001年以后表现出明显的上升趋势。

从汛期各月(6—9月)的降水距平变化趋势来看(图略),只有6月份的降水呈现出上升趋势,上升速率为2.79 mm/10 a,而7—9月则均表现出下降趋势,表现最为明显的是7月份,下降速率为6.54 mm/10 a,变化最不明显的是8月份,以-2.69 mm/10 a的速度下降。由5 a趋势滑动平均分布可知,6月份降水主要经历了4次明显的波动,波峰依次出现在1974, 1981, 1991和2006年,波谷出现在1969, 1976, 1986和2001年;7月份降水经历了3次明显的波动,波峰年分别是1966, 1979和1998年,波谷年分别是1974, 1987和2006年;8月份出现3次主要的波动,波峰最大值在1996年,波谷最低值在2001年;9月份同样出现3次明显的波动,波峰波谷年份分别是1964, 1985, 2005年以及1974, 1981和1996年。从以上的分析可知,虽然汾河流域近49 a来6月份降水有上升趋势,但是由于7—9月份的降水都呈现出下降趋势,尤其是7和9月份,降水减少比较明显,这是流域汛期降水总趋势下降的主要原因。

3.2 汛期降水序列的突变分析

根据M—K突变检验法(图2),汾河流域汛期降水的正序列(c_1)基本上都超过了95% ($\alpha=0.05$)显著性水平的信度线,且正反序列曲线在信度线内有一个交叉点,则该点为降水突变点。突变的时间位于1978和1979年之间,说明汛期降水在1978年以后发生突变,正序列曲线一直为负值且呈现波动下降趋势,说明1978年以后汾河流域降水处于一个相对少雨的时期,且在2002年左右达到最低值,随后又表现为逐渐上升的趋势直到2007年,这意味着2007年以后短时期内还可能处于多雨期。

3.3 汛期降水序列变化的多时间尺度分析

对汾河流域1959—2007年汛期的降水距平序列用Mexican hat小波做连续小波变换,得到小波变换系数及实部时频结构图(图3),图中小波系数的正(实线)、负值(虚线)分别表示降水量的丰与枯,等值线中心对应的时间尺度为降水序列变化的主周期。

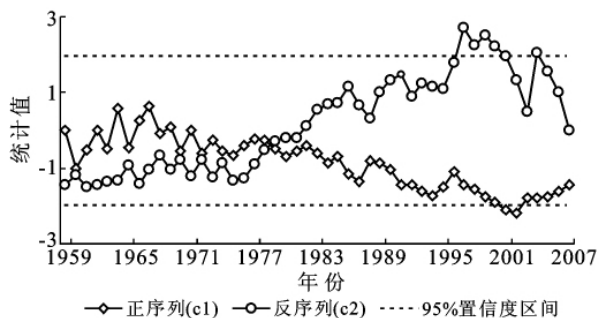


图 2 汾河流域降水时间序列突变

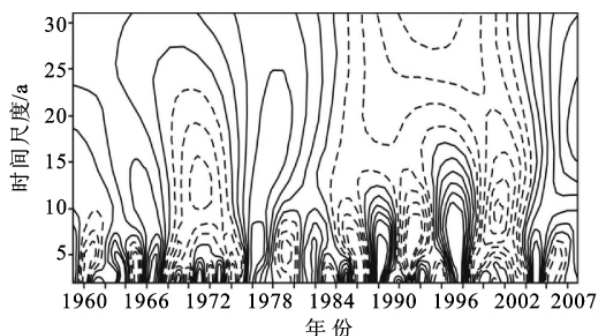


图 3 汾河流域小波系数实时频谱图

由图 3 可知,汾河流域汛期降水量存在多个时间尺度的周期变化,形成多个正负振荡中心。变化周期主要存在 2 种尺度,即大尺度(8~15 a)和小尺度(3~7 a)。对于 8~15 a 尺度而言,降水波动的能量中心有 2 个,中心坐标大致是(12,1972)和(10,1999),前者在时域尺度上影响的范围为 1967—1975 年左右,振荡中心约在 1972 年;后者在时域尺度上影响的范围为 1996—2003 年左右,振荡中心约在 1999 年。从其位相结构来看,20 世纪 60 年代,70 年代中后期、2004—2007 年为正向位,是降水偏多期;20 世纪 70 年代中期以前、80—90 年代以及 2000—2003 年为负相位,是降水相对偏少的时期。对于 3~7 a 尺度而言,其中心时间尺度在 5 a 左右,周期振荡相对显著,汛期降水经历了偏多期与偏少期至少 15 个丰枯循环交替;对于 3 a 以下时间尺度来说,周期振荡不明显,出现更多的降水偏多和偏少期循环交替,对应的突变点也增多。

图 4 为汾河流域汛期降水距平序列不同频率的小波方差。小波方差图反映的是波动能量随时间尺度的分布情况,它可以显示一个时间序列中各种时间尺度(周期)及其强弱(能量大小)随尺度的变化特征^[11],方差曲线极值处所对应的时间尺度为该序列的主要尺度,也即该时间序列中起主要作用的周期。从图 4 中可以看出,研究期间,汾河流域汛期降水距平在第 2,5,10 和 12 a 的小波方差峰值明显,说明 2,

5,10 和 12 a 是该时间序列的特征周期,其中 5 a 左右的周期振荡最强,说明 5 a 尺度为汛期降水变化的主周期。

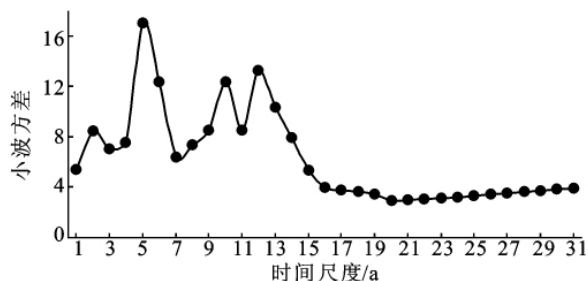


图 4 汾河流域降水时间序列的小波方差

在得到时间序列变化的主周期后,可以分析主周期对应的小波系数变化,从而了解降水时间序列未来的变化趋势。图 5 为主周期 5 a 尺度及其它特征周期(2,10,12 a)的小波系数图。小波系数的正负分别表示降水的丰枯。从 5 a 时间尺度来看,汾河流域汛期降水在近 49 a 来经历了“丰—枯”交替至少 16 个阶段,2006 年以后小波系数开始由负值变为正值;在 2,10 和 12 a 尺度上,2006 年以后的小波系数亦为正值,虽然在 10 和 12 a 年尺度上小波系数有由正变负的趋势,但是振幅较小。所以综合考虑,从 2007 年开始,汾河流域在近期其汛期降水量可能偏多。

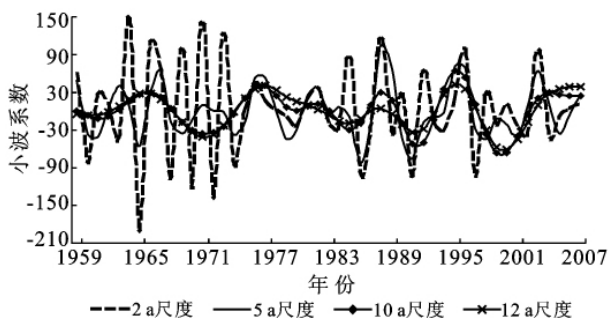


图 5 不同特征时间尺度的小波系数

4 结论

(1) 从汾河流域近 49 a 汛期降水的总趋势来看,降水序列呈现减少趋势,线性拟合递减率是 9.79 mm/10 a,49 a 来汛期降水减少了大约 47.97 mm;汛期各月降水所表现出的特点为 6 月份的降水呈现上升趋势,速率为 2.79 mm/10 a,7—9 月均表现出下降趋势,最明显的是 7 月份,下降速率为 6.54 mm/10 a,最不明显的是 8 月份,以 -2.69 mm/10 a 的速度下降,7—8 月份降水明显减少是流域汛期降水总趋势下降的主要原因。

(2) M—K 突变检测结果显示,汛期降水在 1978 年以后发生突变,流域降水处于一个相对少雨的时期,2002 年左右达到最低值,随后又表现为逐渐上升的趋势直到 2007 年,意味着 2007 年以后短时期内可能处于多雨期。

(3) 汾河流域汛期降水的变化周期主要存在 2 种尺度,即大尺度(8~15 a)和小尺度(3~7 a),中心时间尺度为 2,5,10 和 12 a,其中 5 a 左右的周期振荡最为强烈,是汛期降水变化的主要周期;根据 5 a 周期及其它特征周期的小波系数变化趋势,估计汾河流域在研究时间段以后近期内汛期降水量可能偏多。

[参 考 文 献]

- [1] 山西省水利厅. 汾河志[M]. 山西 太原:山西人民出版社,2006.
- [2] 田风霞,赵传燕,冯兆东. 黄土高原地区降水的空间分布[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2009,45(5):1-5.
- [3] 董全,陈星,陈铁喜,等. 淮河流域极端降水与极端流量关系的研究[J]. 南京大学学报:自然科学版,2009,45(6):790-801.
- [4] 张容焱,邓自旺,沈新勇,等. 福建春雨多时空尺度变化研究[J]. 南京气象学院学报,2009,32(1):121-127.
- [5] 王黎俊,刘彩虹,孙安平,等. 近 45 年青海省夏季降水异常特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(2):225-230.
- [6] 方建刚,毛明策,程肖霞,等. 陕西降水的正态分布特征分析[J]. 西北大学学报:自然科学版,2009,39(1):131-136.
- [7] 刘晓冉,李国平,范广洲,等. 我国西南地区 1960—2000 年降水资源变化的时空特征[J]. 自然资源学报,2007,22(5):783-792.
- [8] 吴香华,牛生杰,祁莉,等. 中国南方 6 省 1 月降水和极端低温的分布特征[J]. 大气科学学报,2009,32(6):807-814.
- [9] 张生军,王天明,王涛,等. 新疆近 50 a 来降水量时空变化及突变分析[J]. 中国沙漠,2010,30(3):668-674.
- [10] 王海梅,李政海,阎军,等. 锡林郭勒草原不同生态地理区降水周期变化特征的小波分析[J]. 水土保持通报,2010,30(5):46-49.
- [11] 胡乃发,王安志,关德新,等. 1959—2006 年长白山地区降水序列的多时间尺度分析[J]. 应用生态学报,2010,21(3):549-556.
- [12] 李春强,杜毅光,李保国,等. 1965—2005 年河北省降水量变化的小波分析[J]. 地理科学进展,2010,29(11):1340-1344.
- [13] 乔木,周生斌,卢磊. 艾比湖流域年径流变化特征分析[J]. 水土保持学报,2010,24(12):236-239.
- [14] 宗海锋,陈烈庭,张庆云. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定特征[J]. 大气科学,2010,34(1):184-194.
- [15] 徐新创,葛全胜,郑景云,等. 湖北省近 500 年区域干湿序列重建及其比较分析[J]. 地理研究,2010,29(6):1045-1054.
- [16] 吴中如,朱伯芳. 三峡水工建筑物安全监测与反馈设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,1999:181-183.
- [17] 杨士荣,张振国,付天清. 汾河中游存在的问题和治理措施[J]. 人民黄河,2001,23(1):42-44.
- [18] 马翠丽. 基于小波分析的长江入河口区水沙通量变异规律研究[D]. 上海:华东师范大学,2006.
- [19] 王红瑞,叶乐天. 水文序列小波周期分析中存在的问题及改进方法[J]. 自然科学进展,2006,16(8):1002-1007.
- [20] 级忠萍,谷德军. 广州近百年来气候变化的多时间尺度分析[J]. 热带气象学报,1999,15(1):48-55.
- [21] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 Matlab 7.0 实现[M]. 北京:电子工业出版社,2005:102-164.
- [22] Xu Y Q, Li S C, Cai Y L. Study of minfall variation based on wavelet analysis in the Hebei Plain[J]. Science in China D: Earth Science, 2004, 34(12): 1176-1183.
- [23] 符凉斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1999,16(4):21-26.