

# 东江中上游流域降水及暴雨日的气候变化特征

曾钦文<sup>1,2</sup>, 谢俊驹<sup>1,4</sup>, 巫燕辉<sup>3</sup>, 李思玲<sup>2</sup>

(1.成都信息工程大学, 成都 610225; 2.龙川县气象局, 广东 龙川 517300;

3.河源市气象局, 广东 河源 517000; 4.连平县气象局, 广东 连平 517100)

**摘 要:**利用 1965—2017 年东江中上游 8 个国家气象站的逐日降水量和暴雨日数资料,运用线性趋势法、相关分析法、Mann-Kendall 突变检验、滑动 t 检验、Morlet 小波分析等方法,分析了东江中上游降水量和暴雨日数的时空变化特征。结果表明:东江中上游年、汛期、前汛期降水量和暴雨日数呈不显著减少趋势,年、后汛期降水量和暴雨日数呈不显著增加趋势;年、汛期、前(后)汛期降水量和暴雨日数空间上呈西南多东北少的分布特征;汛期为降水量和暴雨发生的集中时段,且前汛期多、后汛期少;汛期降水在 1972 年、1986 年、2007 年发生突变,前汛期降水在 1971 年、2005 年发生突变,后汛期降水未发生突变;汛期暴雨日数在 2003 年、2008 年前后发生突变,前汛期暴雨日数在 1972 年、2004 年前后发生突变,后汛期暴雨日数在 2011 年前后发生突变;年降水量存在 2 a, 4~5 a, 8~10 a 的振荡周期,年暴雨日数存在 2~4 a, 5~6 a, 8~10 a 震荡周期,与年降水量周期有很好的对应性。

**关键词:**降水量; 暴雨日数; 东江中上游; 气候变化; 时空特征

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0129-08

## Characteristics of Climate Change of Precipitation and Rainstorm Days in the Middle and Upper Reaches of the Dongjiang River

ZENG Qinwen<sup>1,2</sup>, XIE Junju<sup>1,4</sup>, WU Yanhui<sup>3</sup>, LI Siling<sup>2</sup>

(1.Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225,

China; 2.Longchuan Meteorological Bureau of Guangdong Province, Longchuan, Guangdong 517300,

China; 3.Heyuan Meteorological Bureau of Guangdong Province, Heyuan, Guangdong 517000,

China; 4.lianping Meteorological Bureau of Guangdong Province, Lianping, Guangdong 517100, China)

**Abstract:**Based on the daily precipitation and rainstorm days of eight national meteorological stations in the middle and upper reaches of the Dongjiang River from 1965 to 2017, linear trend method, correlation analysis method, Mann-Kendall mutation test, sliding t test, Morlet wavelet analysis were used to analyze the time and space characteristics of precipitation and rainstorm days in the middle and upper reaches of the Dongjiang River. The results show that the precipitation and rainstorm days in the middle, upper flood season and the first flood season of Dongjiang River present no significant decrease trend, and the precipitation in the annual and post-flood seasons and the number of rainstorm days do not increase significantly; the annual, flood season, front (back) flood season precipitation and the number of rainstorm days more distribute in the south-west and more in the northeast. The flood season is the concentrated period of precipitation and heavy rain, and there are more pre-flood periods and less post-squat periods. The floods in the flood season had mutations in 1972, 1986 and 2007, and precipitation in the first flood season. Mutation occurred in 1971 and 2005, and there was no mutation in the post-rhodium precipitation. The number of rainstorm days in the flood season occurred in 2003 and around 2008. The number of rainstorm days in the first flood season changed in 1972 and around 2004. The number of rainstorm days in the flood season changed before and after 2011. The annu-

收稿日期:2018-10-29

修回日期:2018-11-25

资助项目:广东省气象部门青年英才助推计划项目(2015-151);广东省气象局科学技术研究项目(GRMC2018Q17);河源市社会发展科技计划项目(180628100222162);广东省河源市气象局气象科学技术研究项目(2017-02)

第一作者:曾钦文(1989—),男,广东梅州人,硕士,工程师,主要从事天气预报与气候变化研究。E-mail:403200385@qq.com

通信作者:巫燕辉(1972—),男,广东梅州人,学士,高级工程师,主要从事气象防灾减灾与气候变化研究。E-mail:1047963647@qq.com

al precipitation was 2 years, 4~5 years and 8~10 years. oscillation period during the 10 years, the number of annual rainstorm days has the 2~4 years, 5~6 years, and 8~10 years period, which has a good correspondence with the annual precipitation period.

**Keywords:** precipitation; rainstorm days; middle and upper reaches of Dongjiang River; climate change; temporal and spatial characteristics

降水是影响地球水资源循环和利用、农业生产、生态系统等的必要因素<sup>[1-3]</sup>,暴雨则是容易引发洪涝等灾害,给人民生活生产造成严重的经济损失,同时,降水对改变生态环境以及社会经济生活也有非常重要的影响<sup>[4-5]</sup>,研究区域降水量和暴雨的分布和变化特征,对于分析气候变化背景下的水循环以及气候预测等具有非常重要的意义<sup>[6-7]</sup>。19 世纪以来,由于气候变暖,水循环加快,降雨特征也发生了较大的变化,从而影响暴雨洪涝灾害风险的增加。因此,降水量和暴雨变化特征研究引起了国内外众多学者的关注<sup>[8-9]</sup>。许多学者从年、季等不同时间尺度<sup>[10-12]</sup>,采用线性回归、Mann-Kendall 检验、滑动平均等不同分析方法对不同地区的降水或暴雨的时空变化趋势进行了研究<sup>[13-14]</sup>。并得出许多有指导性意义的局地水文气候的特征,为当地合理使用水文资源有重要的意义。

东江流域地跨广东、江西两省,是珠江流域第三大水系,属亚热带季风气候,是江西南部地区、广东河源、惠州以及珠三角、香港等城市的重要供水水源<sup>[15-16]</sup>。近百年来,由于气候变化加剧,水资源循环加快,降水和暴雨特征也相应的发生了较大的变化,从而导致了东江流域地表径流和洪水的增加<sup>[17-19]</sup>。因此,研究气候变化对东江流域的影响,揭示局部水文气象变化特征及其演变规律,以期了解该流域的降水和暴雨气候变化特征,及充分了解和利用气候资源,保障东江流域的生态环境和防灾减灾提供参考。

## 1 资料和研究方法

### 1.1 研究区概况

东江流域地跨广东、江西两省,是珠江流域第三大水系,属亚热带季风气候,发源于江西省寻乌桫欏钵山,流经广东省、河源、惠州、到东莞经虎门入海,地势南低北高,海拔为 0~1 500 m,干流全长约 560 km,流域面积约  $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[20-21]</sup>。目前,东江中上游地区城市化程度较低,水土保持较好,是广东省水源涵养重点保护区。近年来,气候变化对东江中上游水资源循环有很大的影响,本研究选定为东江流域的中上游为研究对象。研究东江中上游流域降水量和暴雨日数的变化特征,为进一步研究东江流域水资源

循环等研究做铺垫。

### 1.2 数据来源与研究方法

本研究数据来源于中国气象局数据网(<http://data.cma.cn/>),选取 1965—2017 年东江中上游及其周边区域 8 个国家气象站的逐日降水数据作为基础资料,具体包括连平、新丰、和平、寻乌、龙川、龙门、东源、紫金国家气象站,所有站点数据均通过严格的质量控制,包括极值和时间一致性检验,数据的完整性和可靠性高;按照华南汛期划分标准:4—9 月为汛期,其中 4—6 月为前汛期,7—9 月为后汛期。暴雨日定义为日降水量  $\geq 50 \text{ mm}$  的降水日数;研究方法包括线性趋势法、相关分析法、5 a 滑动平均、Mann-Kendall 突变检验和滑动 t 检验突变点、Morlet 小波分析等方法<sup>[22-23]</sup>。同时,利用 ArcGIS 10.0 对东江中上游降水量和暴雨日数的空间变化做制图分析,趋势系数采用  $p < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 年降水和暴雨日的空间特征

从东江中上游年降水量的空间分布可知,年降水量总体呈西南多东北少的空间分布特征,其中,东北地区为 1 672~1 849 mm,西南地区为 1 937~2 202 mm,极大值出现在中游的龙门地区,为 2 202.1 mm;极小值为上游的寻乌地区,为 1 672.8 mm。根据年降水量年代际变化特征(表 1)可知,年降水量具有较明显的年代际变化特征,具体表现为 20 世纪 70 年代降水量最多,60 年代最少。除 80 年代外,其他年代气候倾向率均为正值,说明年代际内总体呈前后多,中间少的分布特征。

从东江中上游年暴雨日数的空间分布可知,年暴雨日数总体也呈东北少西南多的分布特征,跟年降水量空间分布具有有很好的对应性,其中,极大值也出现在中游的龙门地区,为 10.0 d,极小值则出现在上游的和平、寻乌地区,分别为 5.4 d,5.8 d。年暴雨日数空间分布大致为东北地区为 5~7 d,西南地区为 8~10 d。根据东江中上游年暴雨日数年代际变化(表 1)可知,年暴雨日数也有较明显的年代际变化特征,其中,20 世纪 80 年代最多,70 年代最少,除 60 年代、70 年代外,其他年代气候倾向率均为负值,表明

暴雨日数在年代际内总体呈前多后少的分布特征。就东江中上游年平均降水量和暴雨日数相关性检验来看,其相关系数为 0.865(通过了 0.005 显著性检验),说明东江中上游平均年降水量与年暴雨日数的时间分布上有较好的相关性。

2.2 年降水和暴雨日气候特征

图 1A 为 1965—2017 年东江中上游 8 个国家观测站空间平均年降水量的时间序列图。东江中上游平均年降水量为 1 828.8 mm,极大值为 2 699.2 mm,出现在 2 016 年,极小值为 1 181.2 mm,出现在 1991 年。

表 1 1965—2017 年东江中上游降水量和暴雨日数年代际平均变化

| 时间          | 降水量        |          |                     | 暴雨日数      |          |                    |
|-------------|------------|----------|---------------------|-----------|----------|--------------------|
|             | 平均值/<br>mm | 相关<br>系数 | 气候倾向率/<br>(mm/10 a) | 平均值/<br>d | 相关<br>系数 | 气候倾向率/<br>(d/10 a) |
| 20 世纪 60 年代 | 1740.9     | 0.066    | 114.0               | 6.7       | 0.125    | 2.125              |
| 20 世纪 70 年代 | 1958.5     | 0.101    | 103.1               | 6.5       | 0.009    | 0.045              |
| 20 世纪 80 年代 | 1896.6     | −0.527   | −492.9              | 8.1       | −0.667   | −4.424             |
| 20 世纪 90 年代 | 1814.4     | 0.020    | 25.0                | 6.8       | −0.078   | −0.591             |
| 21 世纪 00 年代 | 1750.9     | 0.002    | 19.7                | 6.8       | −0.156   | −1.356             |
| 21 世纪 10 年代 | 1977.3     | 0.305    | 398.6               | 7.2       | 0.147    | 2.619              |

图 1B 为 1965—2017 年东江中上游 8 个气象站空间平均后的年暴雨日数时间序列。平均年暴雨日为 7.0 d,极大值为 12.4 d,出现在 2016 年,极小值为 3.4 d,出现在 1991 年,年暴雨日极大(小)值出现的时间与年降水量的极值时间一致。平均年暴雨日呈现轻微增多趋势,

年降水量气候倾向率为 −1.818 mm/10 a,呈减少趋势,但减少趋势不显著(不能通过 0.05 显著性检验)。上游地区平均年降水量呈增多趋势,以寻乌为上游代表站,其气候倾向率为 38.610 mm/10 a(通过了 0.05 显著性水平检验),表明增多趋势较为显著。中游则呈减少趋势,以龙门为代表站,其气候倾向率为 −14.200 mm/10 a(不能通过 0.05 显著性检验),说明中游减少趋势不显著。具体到年降水量变化的空间分布上,除寻乌、和平、新丰呈增多趋势外,其余均呈现减少趋势,且东北地区的寻乌增多最为显著。

气候倾向率为 0.003 d/10 a,不能通过 0.05 显著性检验,说明增多趋势并不显著。从年暴雨日数空间分布可知,除寻乌、新丰地区暴雨日数略增多外,其余地区暴雨日数呈减少趋势,且与年降水量增多趋势一致,东北部的寻乌一带增多最为显著。

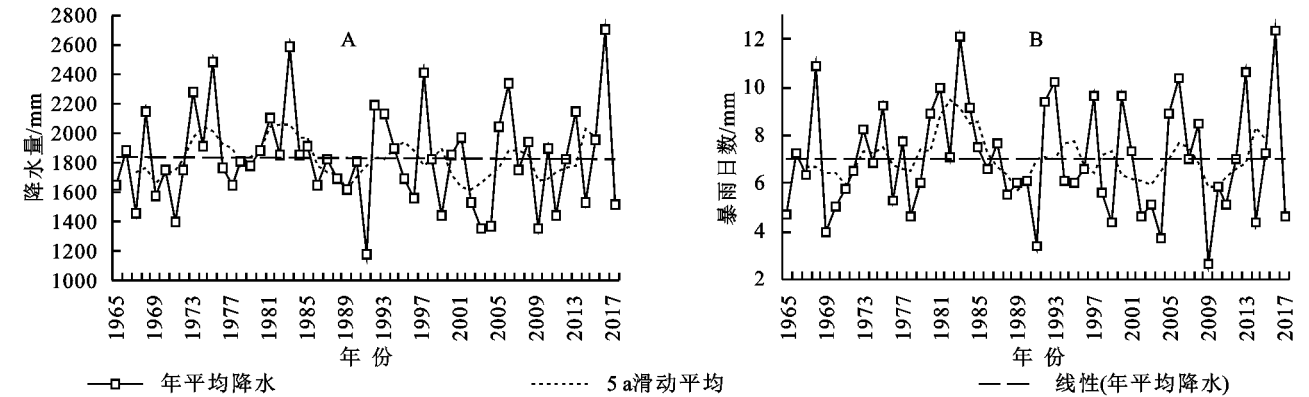


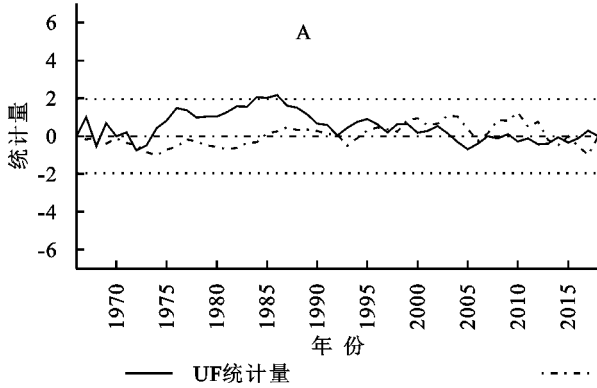
图 1 1965—2017 年东江中上游空间平均年降水量、暴雨日数时间演变

2.3 年降水和暴雨日突变分析

从 1965—2017 年东江中上游空间平均年降水量 Mann-Kendall 检验结果(图 2A)可知,在 2003 年之前,UF 的值大部分大于 0,说明年降水量在 2003 年之前,总体呈现上升趋势,但 UF 的值总体未超过信度的上限,说明上升趋势并不显著。2003 年之后,UF 的值大多在小于 0 范围内,说明年降水量在 2003 年之后,总体呈现下降趋势,但 UF 的值未超过信度

的下限,说明总体下降趋势也不显著。从 Mann-Kendall 检验结果还可以发现,在 0.05 的置信水平下,UB 与 UF 存在多个交点,并不能直观看出年降水量发生突变的年份,因此需进一步通过滑动 t 检验来验证,结合两种突变检验结果,表明年降水量在 1973 年前后、1991 年前后存在突变。  
从 1965—2017 年东江中上游暴雨日数 Mann-Kendall 检验结果(图 2B)可知,UF 的值总体未超过

信度的上限或下限,说明年暴雨日数上升或下降趋势也均不显著。年暴雨日数和年降水量的上升或下降趋势有很好的对应性,年暴雨日数也在 2003 年之前总体呈不显著的上升趋势,之后则呈不显著的下降趋势;



年暴雨日 UF 与 UB 曲线也均存在多个突变点,也初步判断为突变点,同样通过滑动 t 检验来进一步验证,通过两种检验方法表明,年暴雨日数在 2005 年前后、2008 年前后存在突变点。

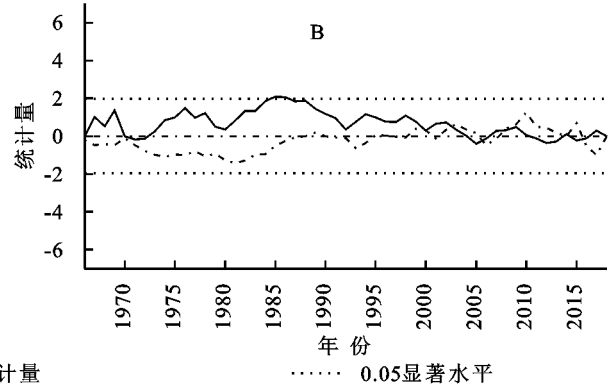


图 2 1965—2017 年东江中上游空间平均年降水量(A)、年暴雨日数(B)Mann-Kendall 检验

## 2.4 汛期降水和暴雨日数及年代际特征

从东江中上游流域汛期、前(后)汛期平均降水量的趋势变化图(图 3A,B,C)可知,汛期平均降水量为 1 405.9 mm,占年降水量的 76.9%,说明降水主要集中在汛期,其中,汛期平均降水量极大值为 1 998.3 mm,出现在 1 973 年,极小值为 883.7 mm,出现在 1991 年。从汛期降水变化趋势(图 3A)可知,汛期降水以  $-12.836 \text{ mm}/10 \text{ a}$  速率减少,相关系数为 0.081,不能通过 0.05 的显著性水平检验,表明汛期降水减少趋势并不显著。从 5 a 滑动平均曲线来看,1965—2017 年东江中上游的降水量总体上呈增减相间的波动趋势,其中 1975—1990 年减少趋势最明显。

近 53 a 平均前汛期降水量为 860 mm,占汛期总降水量的 61.2%,降水量极大值为 1 298.7 mm,出现在 2 005 年,极小值为 363.3 mm,出现在 2002 年。根据前汛期降水量变化趋势(图 3B)可知,前汛期降水量以  $-18.892 \text{ mm}/10 \text{ a}$  速率减少,相关系数为 0.135,不能通过 0.05 的显著性水平检验,表明前汛期降水量减少趋势也不显著。根据 5 a 滑动平均曲线(图 3B)可知,近 53 a 东江中上游前汛期降水量总体上呈现减少趋势的变化特征,主要表现为 1974—2001 年呈缓慢下降趋势,2002—2007 年呈缓上升趋势,之后又呈下降趋势。

近 53 a 平均后汛期降水量为 545.9 mm,占汛期总降水量的 38.8%,极大值为 768.1 mm,出现在 2013 年,极小值为 322.8 mm,出现在 1989 年。从后汛期降水量变化趋势(图 3C)可知,后汛期降水量以  $6.056 \text{ mm}/10 \text{ a}$  速率增加,相关系数为 0.067(不能通过 0.05 的显著性检验),表明后汛期降水增加趋势也不显著。从 5 a 滑动平

均变化趋势可知后汛期降水量总体上呈波动性增减趋势,且阶段性变化较为明显。

根据汛期降水量年代际平均变化可知(表 2),汛期降水量年代际变化较大,20 世纪 70 年代偏多,其他年代偏少;前汛期除 90 年代偏少外,其余年代相对偏多;后汛期则 20 世纪 90 年代偏多,80 年代明显偏少。

汛期暴雨日数为 6.0 d,占全年的 85.7%,出现暴雨日数最多的年份为 1968 年,为 10.8 d,最少的年份为 2009 年,为 1.9 d(图 3D)。从汛期暴雨日数变化趋势(图 3D)可看出,汛期暴雨日数以  $0.16 \text{ d}/10 \text{ a}$  的速率递减,且减少幅度小,减少趋势不明显(不能通过 0.05 的显著性检验)。从 5 a 滑动平均曲线来看,汛期暴雨日数总体上呈现波动性增减趋势,阶段性变化较明显。

前汛期平均暴雨日数为 4.0 d,占汛期的 66.7%,出现暴雨日数最多的年份为 1968 年,为 7.8 d,最少的年份为 1999 年、2002 年,均为 1.1 d(图 3E)。从前汛期暴雨日数变化趋势(图 3E)可看出,前汛期暴雨日数以  $-0.18 \text{ d}/10 \text{ a}$  的速率减少,减少幅度同样较小,且减少趋势不明显。从 5 a 滑动平均曲线来看,前汛期暴雨日数总体上也呈波动性增减趋势,阶段性变化也较明显。

后汛期平均暴雨日数为 2.0 d,出现暴雨日数最多的年份为 1997 年,为 5.0 d,最少的年份为 1965 年,为 0.3 d(图 3F)。从后汛期暴雨日数变化趋势(图 3F)可看出,后汛期暴雨日数以  $0.02 \text{ d}/10 \text{ a}$  的速率递增,但不能通过 0.05 的显著性检验,说明后汛期暴雨日数增加趋势不明显。从 5 a 滑动平均曲线来看,后汛期暴雨日数总体上也呈波动性增减趋势,阶段性波动较大。

根据汛期暴雨日数年代际平均变化可知(表 2),汛

期平均暴雨日数年代际总体变化不大,大致为 20 世纪 60 年代略偏多,21 世纪 10 年代略偏少;前汛期平均暴雨日 4.0 d,年代际变化幅度较大,大致为 20 世纪 80 年代

较多,为 5.0 d,90 年代较少,为 3.1 d;后汛期平均暴雨日 2.0 d,年代际变化也较大,其中 20 世纪 90 年代较多,为 2.5 d,80 年代相对较少,仅为 0.6 d。

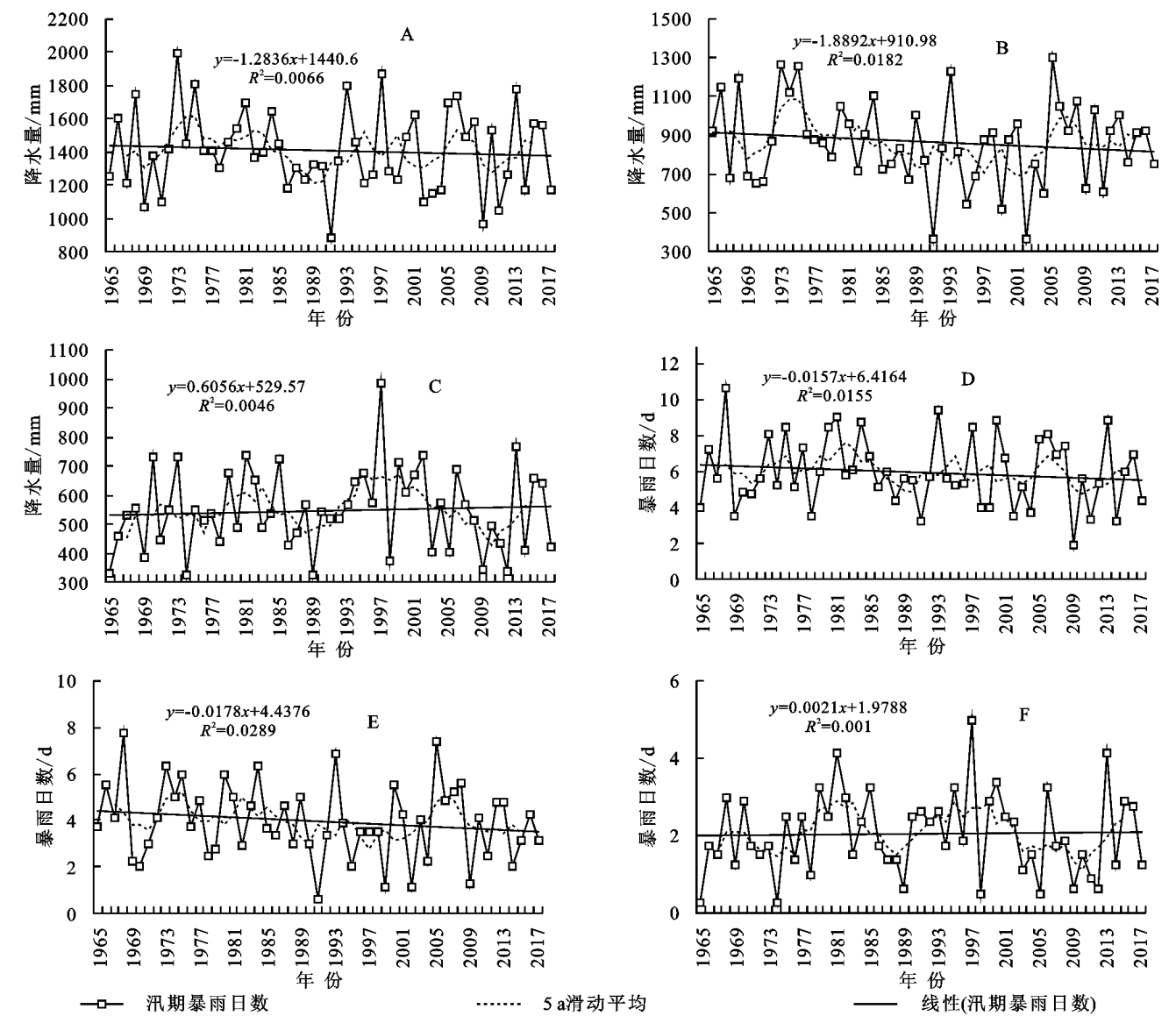


图 3 1965—2017 年东江中上游空间平均汛期降水(A)、前汛期降水(B)、后汛期降水(C)和  
汛期暴雨日数(D)、前汛期暴雨日数(E)、后汛期暴雨日数(F)时间演变

## 2.5 汛期降水和暴雨日数空间变化

2.5.1 汛期降水空间变化 1965—2017 年东江中上游汛期、前汛期和后汛期降水量的空间分布特征总体相似,且与前面分析的年降水量空间分布特征也大致相似,均表现为由东北向西南方向逐渐增大的分布特征。汛期、前汛期、后汛期降水量极大值区均出现在西南地区的龙门地区,分别为1 700.8 mm,1 152.2 mm 和 618.6 mm,低值区为上游的寻乌地区,分别为 1 246.2 mm,751.8 mm 和 488.6 mm。汛期、前(后)汛期降水量变化趋势在空间分布上存在一定的区域性差异性,其中汛期和前汛期在中游上多表现出减少趋势,最大减幅均出现在龙门地区,分别为-32.26

mm/10 a 和-34.44 mm/10 a,但总体减少趋势并不显著;后汛期变化趋势则表现为增多趋势,最大增幅则出现在寻乌地区,为 18.21 mm/10 a,增多趋势较为显著。而位于东部的龙川、紫金则出现轻微的减弱趋势,减幅介于-4.24~-2.22 mm/10 a。

2.5.2 汛期暴雨日数空间变化 汛期、前(后)汛期暴雨日数空间分布特征也总体相似,且与前面分析的年暴雨日数、汛期、前(后)汛期降水量的空间分布特征也有很好的对应性,极大值均出现在西南部的龙门地区,且呈由东北向西南方向逐渐增大的分布特征。出现这种分布特征主要是受地形因素影响:因西南地区地处九连山脉的迎风坡,导致西南风输送上来的暖

湿气流容易在迎风坡造成辐合抬升,从而形成大范围降水,且西南角还处于九连山和青云山所形成的喇叭口地形当中,受喇叭地形所形成的狭管效应,也非常有利于水汽在该处的辐合抬升,再加上天气系统的叠加影响,则非常容易产生强降水,从而导致西南部为降水和暴雨日数的大值区。

表 2 1965—2017 年东江中上游汛期降水量及暴雨日数年代际平均变化

| 年代          | 降水量/mm |        |       | 暴雨日/d |     |     |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-----|-----|
|             | 汛期     | 前汛期    | 后汛期   | 汛期    | 前汛期 | 后汛期 |
| 20 世纪 60 年代 | 1376.5 | 925.6  | 450.8 | 6.2   | 4.7 | 1.6 |
| 20 世纪 70 年代 | 1473.7 | 924.8  | 549.0 | 5.9   | 4.0 | 1.9 |
| 20 世纪 80 年代 | 1329.8 | 1007.0 | 322.8 | 5.6   | 5.0 | 0.6 |
| 20 世纪 90 年代 | 1366.0 | 755.4  | 610.7 | 5.7   | 3.1 | 2.5 |
| 21 世纪 00 年代 | 1400.9 | 850.6  | 550.3 | 6.0   | 4.2 | 1.9 |
| 21 世纪 10 年代 | 1384.8 | 864.3  | 520.5 | 5.5   | 3.6 | 1.9 |
| 1965—2017 年 | 1405.9 | 860.0  | 545.9 | 6.0   | 4.0 | 2.0 |

汛期、前(后)汛期暴雨日数变化趋势在空间分布上也存在一定的区域性差异,其中汛期和前汛期除东北部的寻乌地区外,其余均表现为减少趋势,但减少趋势不显著;后汛期变化趋势则表现为北部的寻乌和西部的连平、新丰地区呈增多趋势,其余地区均呈减少趋势,其中东北部的寻乌增多较为显著。

2.6 汛期降水量和暴雨日数突变分析

从 1965—2017 年东江中上游汛期((图 4A)、前汛期((图 4B)、后汛期((图 4C)降水量 Mann-Kendall 检验结果可知,在置信度 0.05 水平下,东江中上游汛期、前汛期和后汛期降水整体呈不显著增加或减少趋势。其中,汛期、前汛期降水出现多个突变点,振荡剧烈。

观察 UF 线((图 4D)可知,汛期降水量在 1987 年之前,UF 曲线大部分位于大于 0 的范围内,1987 年之后 UF 曲线均处于小于 0 的范围,说明 1987 年之后,汛期降水量总体呈下降趋势(图 4A),但均未超出信度,说明汛期降水增加或减少趋势不显著。结合滑动 t 检验(图 4G)判断突变,可知汛期降水量在 1972 年、1986 年、2007 年发生突变。

前汛期降水量(4B)则 UF 线在 1986 年之前大部分位于大于 0 的范围内,1986 年之后,UF 曲线则均在小于 0 的范围内,说明 1986 年之后,前汛期降水量总体呈下降趋势(图 4B),与汛期降水量变化有很好的对应性。结合滑动 t 检验(图 4H)判断突变,可知前汛期降水量在 1971 年、2005 年发生突变。

后汛期降水量(8 c)在置信度 0.05 水平下,UF 曲线一直在大于 0 的范围内,说明后汛期降水量总体呈上升趋势,但大部分并未超过信度,说明上升趋势

总体不显著。结合滑动 t 检验(图 4I)判断突变,可知后汛期降水量未发生突变。

在置信度 0.05 水平下,汛期暴雨日数(图 4D)、前汛期暴雨日数((图 4E),UF 和 UB 两条曲线出现多个交点,说明汛期、前汛期暴雨日数存在多个突变点,振荡剧烈。观察汛期暴雨日数 UF 线(4D)可知,2003 年之前,UF 值大于 0 或者很少小于 0,2003 年之后 UF 小于 0 或者很少大于 0,且均未超出信度,说明 1965—2003 年的汛期暴雨日数呈上升趋势,2003 年之后总体呈下降趋势,但总体上升或下降趋势不显著。结合滑动 t 检验(图 4J)判断突变,可知汛期暴雨日数在 2003 年、2008 年前后发生突变。

前汛期暴雨日数(图 4E)则在 1991 年之前,UF 值大于 0 或者很少小于 0,1991 年之后,UF 值均小于 0,且均未超出信度,说明 1965—1991 年的前汛期暴雨日数总体呈上升趋势,1991 年后总体呈下降趋势,但总体上升或下降趋势也不显著。结合滑动 t 检验(图 4K)判断突变,可知前汛期暴雨日数在 1972 年、2004 年前后发生突变。

后汛期暴雨日数(图 4E)在置信度 0.05 水平下,UF 和 UB 两条曲线在 2011 年前后出现交点,结合滑动 t 检验(图 4L)进一步判断突变,可知后汛期暴雨日数确实在 2011 年前后发生突变。观察图中 UF 线可以看出,UF 值均大于 0,说明后汛期暴雨日数总体呈上升趋势,且大部分置于信度之间,说明上升趋势也总体不显著。

2.7 小波分析

对东江中上游年平均降水量和年暴雨日数的时间序列进行 Morlet 复数小波变换(图 5)。结果显示,东江中上游平均年降水量存在 2 a、4~5 a、8~10 a 周期变化,其中,8~10 a 为最明显,2 a 的小周期振荡变化具有全域性的特征。对应的小波方差可知,8~10 a 为年降水量的第 1 主周期、4~5 a、2 a 为次周期。年暴雨日数则存在 2~4 a、5~6 a、8~10 a 周期变化。与年降水量的周期有很好的对应性。其中 2~4 a 的振荡周期具有全域性的变化特征,5~6 a 主要在 21 世纪年代之后最为明显,而 8~10 a 振荡周期在 70 年代初至 90 年代末最为明显。

3 结论

(1) 近 53 a 东江中上游年降水量呈现出并不显著的减少趋势,减少速率为 1.818 mm/10 a,年暴雨日数则呈不显著增加趋势,增加速率为 0.003 d/10 a。汛期、前(后)汛期降水量和暴雨日数的变化趋势有所不同,但有很好的对应性,其中汛期、前汛期降水量和暴雨日数均呈不显著减少趋势,后汛期降水量和暴雨日数则呈不显著增加趋势。

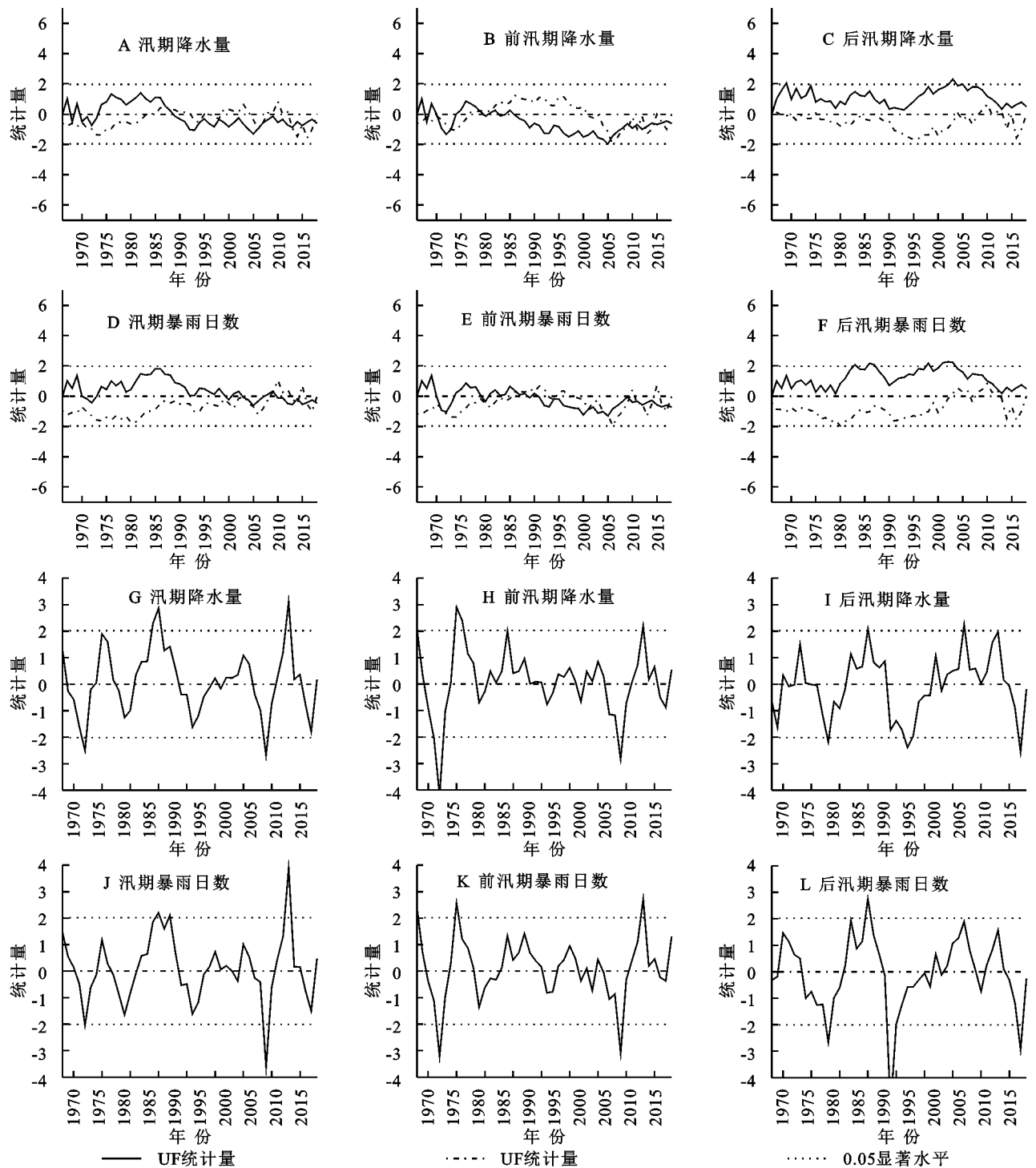


图 4 1965—2017 年东江中上游空间平均降水量、暴雨日数 Mann—Kendall 检验和 t 检验

(2) 近 53 a 东江中上游年、汛期、前(后)汛期降水量和暴雨日数总体呈西南多东北少的分布,其中降水量和暴雨日数极大值区在西南部的龙门地区,极小值区在东北部的寻乌、和平地区;降水量和暴雨日数趋势变化在中游总体表现为不显著的减少趋势,上游地区则表现为较为显著的增多趋势。

(3) 汛期是东江中上游降水和暴雨发生的集中时段,近 53 a 年东江中上游降水量和暴雨主要出现在汛期。且前汛期多、后汛期少,其中汛期降水量占全年的 76.9%、

暴雨日数占全年的 85.7%,且降水量和暴雨主要集中在前汛期,分别占汛期的 61.2%,66.7%。

(4) 近 53 a 东江中上游年、汛期、前(后)汛期降水量和暴雨日数年代际变化较为明显。汛期降水量在 1972 年、1986 年、2007 年发生突变。前汛期降水量在 1971 年、2005 年发生突变。后汛期降水量未发生突变。汛期暴雨日数在 2003 年、2008 年前后发生突变。前汛期暴雨日数在 1972 年、2004 年前后发生突变。后汛期暴雨日数在 2011 年前后发生突变。

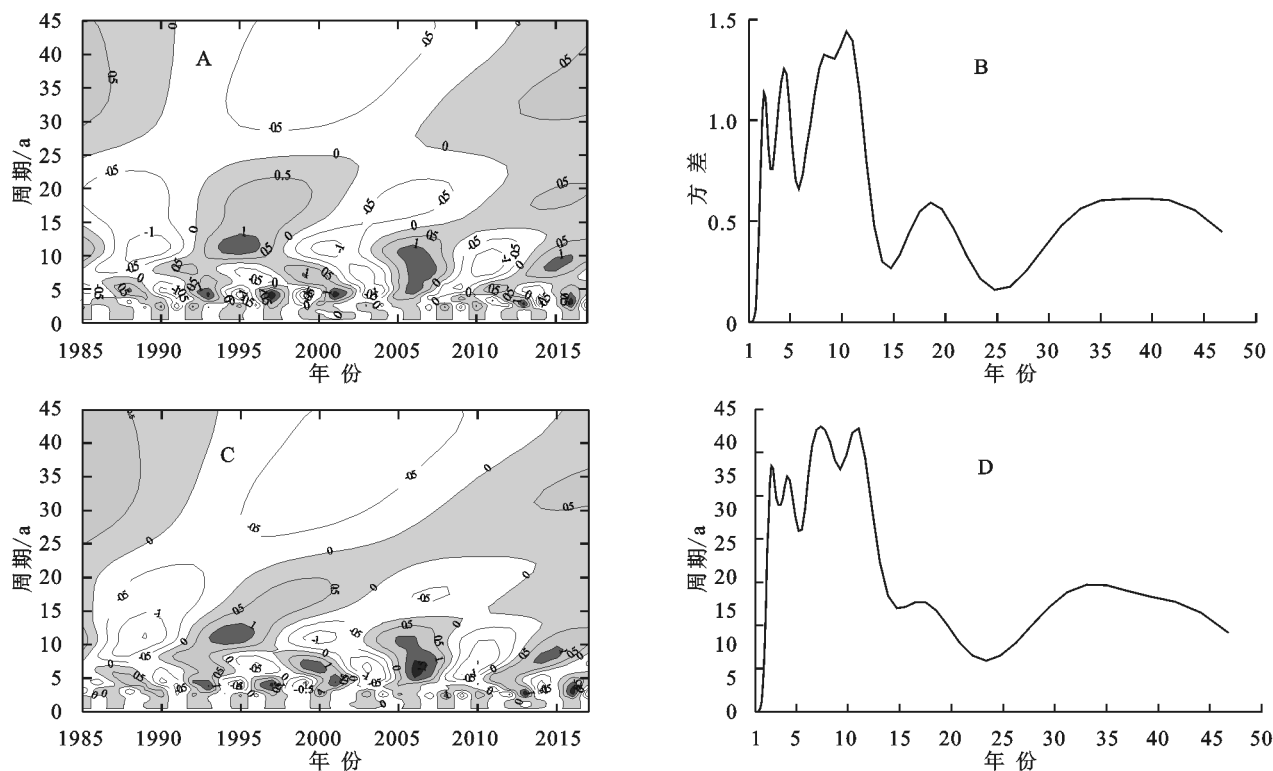


图 5 1965—2017 年东江中上游空间平均年降水量和年暴雨日数的 Morlet 小波分析及小波方差

(5) 东江中上游平均年降水量存在 2 a, 4~5 a, 8~10 a 的振荡周期, 其中, 8~10 a 为最明显, 2 a 的小周期振荡变化具有全域性的特征。年暴雨日数则存在 2~4 a, 5~6 a, 8~10 a 振荡周期, 与年降水量的周期有很好的对应性, 其中 2~4 a 的振荡周期具有全域性的变化特征。

#### 参考文献:

- [1] 来文立, 宋进喜, 章杰, 等. 近 60 a 渭河流域降水特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(6): 1106-1112.
- [2] 徐利岗, 周宏飞, 李彦, 等. 中国北方荒漠区降水稳定性与趋势分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 792-799.
- [3] 常远勇, 侯西勇, 毋亭, 等. 1998—2010 年全球中低纬度降水时空特征分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(4): 475-484.
- [4] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 240-243.
- [5] 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征[J]. 应用气象学报, 2000, 11(3): 322-327.
- [6] 王晓霞, 徐宗学, 阮本清. 天津市降水量变化趋势的时空分布特征[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(9): 92-96.
- [7] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降雨变化趋势分析[J]. 地理研究, 2006, 25(1): 27-34.
- [8] 薛燕, 韩萍, 冯国华. 半个世纪以来新疆降水和气温的变化趋势[J]. 干旱区研究, 2003, 20(2): 127-130.
- [9] 施能, 陈绿文, 封国林, 等. 1920—2000 年全球陆地降水气候特征与变化[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 435-443.
- [10] 肖滢, 宇如聪, 原伟华, 等. 横断山脉中西部降水的季节演变特征[J]. 气象学报, 2013, 71(4): 643-651.
- [11] 万日金, 吴国雄. 江南春雨的时空分布[J]. 气象学报, 2008, 66(3): 310-319.
- [12] 白虎志, 董文杰. 华西秋雨的气候特征及成因分析[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 884-889.
- [13] 徐利岗, 周宏飞, 李彦, 等. 中国北方荒漠区降水稳定性与趋势分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 792-799.
- [14] 周正朝, 胡娜娜, 周华. 西安市气温和降水变化趋势分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 27-34.
- [15] 董满宇, 王炳钦. 近 50 年东江流域极端降水事件变化特征[J]. 资源科学, 2013, 35(3): 521-529.
- [16] 陈晓宏, 王兆礼. 东江流域土地利用变化对水资源的影响[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2010, 46(3): 311-316.
- [17] 石教智, 陈晓宏, 林汝颜. 东江流域降水序列的混沌特征分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2006, 45(4): 111-115.
- [18] 刘德地, 陈晓宏. 东江流域降水场时空分布特征分析[J]. 水文, 2008, 28(2): 82-86.
- [19] 董满宇, 江源, 李俞萍, 等. 近 46 年来东江流域降水变化趋势分析[J]. 水文, 2010, 30(5): 85-90.
- [20] 张健枫, 伍永秋, 潘美慧, 等. 东江上游地貌特征与水系结构关系分析[J]. 资源科学, 2010, 35(3): 496-504.
- [21] 董满宇, 江源, 廖剑宇, 等. 近 50 年东江流域极端降水事件变化特征[J]. 资源科学, 2010, 35(3): 521-529.
- [22] 曹广超, 付建新, 李玲琴, 等. 1960—2014 年祁连山南坡及其附近地区气温时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 88-96.
- [23] 李小丽, 敖天其, 黎小东, 等. 古蔺县近 50 年来降水序列趋势分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(6): 140-144.