

巴音河流域德令哈市气象站近60年来 降水变化特征分析

文广超^{1,2}, 王文科¹, 段磊¹, 李一鸣¹, 赵家辉¹, 赵振³

(1. 长安大学旱区水文与生态效应教育部重点实验室, 陕西西安710054; 2. 河南理工大学资源环境学院, 河南焦作454000; 3. 青海省环境地质勘查局, 青海西宁810007)

摘要: 基于1956–2013年德令哈气象站逐月降水资料, 借助标准化降水指数(*SPI*)表征干旱, 运用线性趋势分析、Mann–Kendall趋势检验、Mann–Kendall突变检测、滑动 t 突变检验、Morlet小波变换、R/S分析等方法, 分析近60年来其降水及干旱特征。结果表明: 20世纪80年代之前处于降水偏少期, 20世纪80年代至今处于降水偏多期, 且呈现出上升趋势, 冬季降水变化相对平稳, 秋季降水波动较大; 近60年来, 年及各季节降水量呈显著上升趋势, 年降水量上升率为21.16 mm/(10a), 夏季降水量上升趋势明显, 上升率为12.35 mm/(10a); 年及各季降水量存在显著的3~9年的短周期和18~28 a的长周期变化; 降水距平和*SPI*显著相关, 干旱呈减弱趋势, 干旱变化的周期为5 a和18 a。巴音河流域降水量的变化具有持续性, 未来降水将保持增多趋势, 干旱呈减弱趋势。

关键词: 标准化降水指数; 降雨量变化; Mann–Kendall检验; 小波分析; 巴音河流域

中图分类号: TV125 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2018)01-0018-07

Analysis on variation characteristics of precipitation for recent 60 years in Delingha weather station of Bayin River Basin

WEN Guangchao^{1,2}, WANG Wenke¹, DUANG Lei¹, LI Yiming¹, ZHAO Jiahui¹, ZHAO Zhen³

(1. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. School of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. Environmental Geological Exploration Bureau of Qinghai Province, Xining 810007, China)

Abstract: Based on monthly precipitation data from Delingha weather station during the period of 1956–2013, the drought was characterized by means of standardized precipitation index (*SPI*), and this paper analyzed the different temporal scale variation characteristic of precipitation and drought by using the methods of linear trend, Mann–Kendall trend test and abrupt change check, sliding t -test, Morlet wavelet transformation, R/S analysis and standardized precipitation index. The results indicated as follows: Rainfall was below normal level before 1980s, and was above normal level after 1980s, showing an upward trend. The winter precipitation variation was relatively stable. Precipitation in autumn experienced a great fluctuation. Annual and seasonal precipitation showed a significantly increasing trend in recent 60 years. The increasing rate of annual precipitation was 21.16 mm/(10a), the trend of summer precipitation was the most obvious, and its increasing rate was 12.35 mm/(10a). There were not only the 3–9a short-term periodic changes of annual and seasonal precipitation, but also the 18–28a longterm periodic changes. Correlation analysis shows that *SPI* and Rainfall anomaly were significantly correlated and there was a downward trend in drought severity, two periodic oscillation of droughts were found, including 5a period and 18a period. There was a continuance for precipitation in Delingha weather station of Bayin River basin, in the future, it will

收稿日期: 2017-07-21; 修回日期: 2017-09-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41230314); 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室中心开放基金项目(2014G1502022); 柴达木盆地循环经济试验区重点地区(德令哈)地下水勘查项目(1212011220975); 柴达木盆地巴音河—塔塔河流域1:5万水文地质调查项目(121201011000150019)

作者简介: 文广超(1979-), 男, 河南西平人, 博士研究生, 研究方向为水文学及水资源。

maintain an increasing trend, and however, the drought severity will keep a downward trend.

Key words: standardized precipitation index; precipitation change; climate change; Mann - Kendall test; wavelet analysis; Bayin River Basin

1 研究背景

IPCC 第四次(2007)和第五次(2013)评估报告^[1-2]指出,全球气候变暖将改变降水的时空分布特征和水文循环过程,进而影响水资源时空分布格局。降水作为水循环的重要组成部分,是开展水资源合理开发利用等的重要依据,研究降水的时空演变特征,对分析水循环对全球气候变暖的响应具有重要的意义^[3]。

近年来,众多学者对中国西北地区降水特征开展了大量研究^[4-7],施雅风等^[8]指出,西北气候自 1987 年突然变化开始,由暖干向暖湿转型,降水量显著增加;王晖等^[9]分析了中国西北地区东部 54 个气象站的降水资料,指出中国西北地区东部降水量呈现微弱下降趋势;黄小燕等^[10]分析了中国西北地区 1960 - 2011 年 111 个观测站的气象资料,认为近年来西北全区年降水量变化呈现微弱上升趋势,平均每年上升 0.17mm;任国玉等^[11]研究指出,在最近的半个多世纪,西北地区降水量存在明显的上升趋势,特别是 21 世纪的前 10 年,降水上升趋势更加明显;邵雪梅等^[12]、黄磊等^[13]、刘洪滨等^[14]对基于树木年轮资料重建的德令哈地区近千年来降水量的分析,认为德令哈地区降水量突变与东亚夏季风的年代际变化有密切联系,该地区近千年年降水量变化存在显著的多尺度周期变化特征,近 200 年则以准 120a 的周期振荡为主;马季芳^[15]分析了德令哈市 1971 - 2012 年的气候特征,认为年及四季降水量均呈现增多趋势,夏季降水增多最明显;刘波等^[16]预估了德令哈地区 2016 - 2075 年气候变化,分析了气温及降水的总体趋势、年代际变化及突变特征。然而,已有的研究中,基于实测降水资料,分析巴音河流域近 60 年来降水量与干旱特征的较少。巴音河作为德令哈市的“母亲河”,是德令哈市社会经济生活的基础资源,随着经济社会的快速发展,流域水资源开发利用的矛盾日益突出。在全球气候变暖的背景下,深入研究巴音河流域降水量与干旱变化特征,对流域水资源合理开发利用、生态环境保护具有重要意义。

2 研究区概况

巴音河流域位于青藏高原的东北部,柴达木盆地的东北边缘,跨柴达木盆地和祁连山山地两大地貌单元,境内山川湖盆相间。巴音河流出口后,经黑石山

水库与白水河汇合,流经山前平原大部分泄露补给地下水,至洪积扇前缘溢出地表,形成泉集河,最终补给可鲁克湖、托素湖和尕海,流域总面积 17 608 km²^[17-18],见图 1。据德令哈气象站资料,巴音河流域多年平均气温 3.9℃,多年平均降水量 169.3 mm,多年平均蒸发量 2 036.3 mm。流域干旱少雨、蒸发量大、日照充足,属于典型的高原荒漠半荒漠干旱气候^[18-19]。

3 数据与方法

3.1 数据来源

降水数据为德令哈市气象站地面降水要素的月平均观测资料,时间为 1956 年 1 月 - 2013 年 12 月。季节划分方法为:春季(3 - 5 月)、夏季(6 - 8 月)、秋季(9 - 11 月)、冬季(12 - 翌年 2 月)。

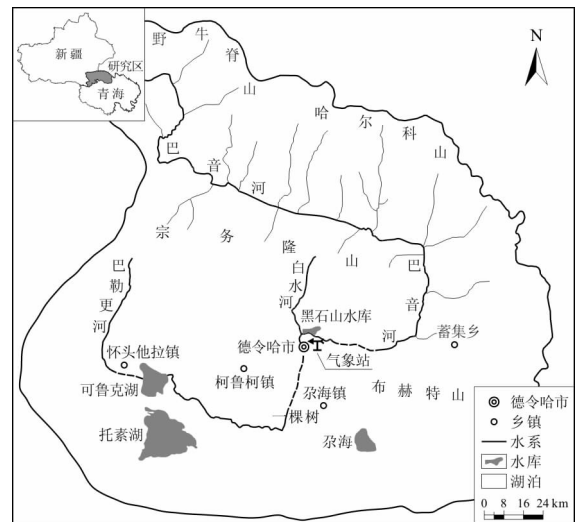


图 1 巴音河流域示意图

3.2 分析方法

本文采用线性拟合分析方法^[20-21]判断降水要素的变化趋势;采用 Mann - Kendall 方法检验变化趋势的显著性^[22-24];采用 Mann - Kendall 方法和滑动 t 检测法检验降水序列的突变点^[22,25-26];采用小波分析方法检验降水序列变化的周期性^[25,27];采用 R/S 方法分析降水的持续性^[28];采用标准化降水指数 (SPI)^[29-30]分析 12 个月时间尺度的干旱特征。

4 结果与分析

4.1 降水的变化趋势

4.1.1 降水的年代际变化 图 2 给出了近 60 年来

全年及四季降水量的年代距平(年代降水量平均值-多年平均降水值)变化特征。

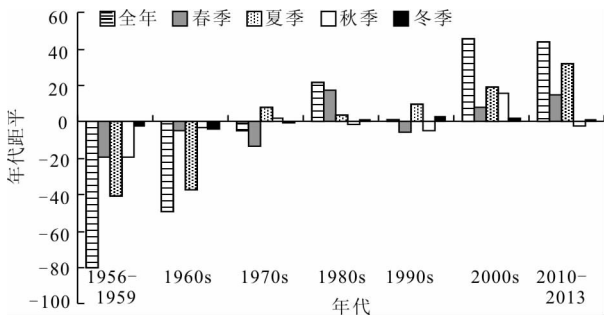


图2 1956-2013年降水量年代距平特征

由图2可以看出,1956-2013年全年降水量总体呈增加趋势,存在明显的年代际变化特征,20世纪70年代末期之前多以干旱为主,20世纪80年代后降水量整体呈现增加趋势,进入21世纪,雨水明显增多。春季在20世纪70年代末期之前及20世纪90年代为干旱期,20世纪80年代为明显的多雨期;夏季在20世纪60年代末期之前为干旱期,进入21世纪为明显的多雨期;秋季相对少雨,仅在21世纪的前10年为多雨期,降水量波动较大;冬季降水量变化相对平稳。

4.1.2 降水的年际及季节变化 图3给出了降水量年际和季节变化特征,由图3可知,1956-2013年年降水量以 $21.16 \text{ mm}/10\text{a}$ 的气候倾向率呈显著($\alpha = 0.001$)上升趋势,四季降水量倾向率分别为 4.56 、 12.35 、 3.12 、 $1.24 \text{ mm}/10\text{a}$,均呈现上升趋势,夏季倾向率最大,冬季降水倾向率最小。夏季通过

$\alpha = 0.001$ 的显著性水平检验,春、秋、冬季通过 $\alpha = 0.05$ 的显著水平检验。

4.2 降水的 Mann-Kendall 趋势检验

基于 Mann-Kendall 方法计算了降水量变化趋势(用 M 值表示),全年及四季的 M 值分别为 4.55 、 2.60 、 3.74 、 1.87 、 3.23 ,由 M 值可知,1956-2013年年际和季节降水量均呈显著增加趋势,全年、春季、夏季、冬季降水量均通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著水平检验,秋季降水量通过了 $\alpha = 0.1$ 的显著水平检验。

4.3 降水的突变分析

Mann-Kendall 突变判别曲线(见图4)表明,1956-2013年年降水突变发生在1973年,利用滑动 t 检验法^[10],对突变点进行突变检验,通过 $\alpha = 0.01$ 的显著水平检验,突变前平均降水量为 118.1 mm ,突变后平均降水量为 195.3 mm ,突变后降水量比突变前降水量增加了 77.2 mm 。

春季降水在 0.01 的显著水平下在1981年发生突变,突变后降水量比突变前降水量增加了 19.8 mm 。夏季降水在 0.01 的显著水平下在1973年发生突变,突变后降水量比突变前降水量增加了 48.0 mm 。秋季降水量的 Mann-Kendall 突变判别曲线中 UF 和 UB 曲线有3个交点,分别在1976、1991、1995年,利用滑动 t 检验法对突变点进行信度检验,在 0.01 的显著水平下未发生突变。冬季降水在 0.01 的显著水平下在1976年发生突变,突变后降水量比突变前降水量增加了 4.7 mm 。从上述分析可以看出,20世纪70年代前后,降水量明显变化,夏季降水量与年降水量突变规律一致。

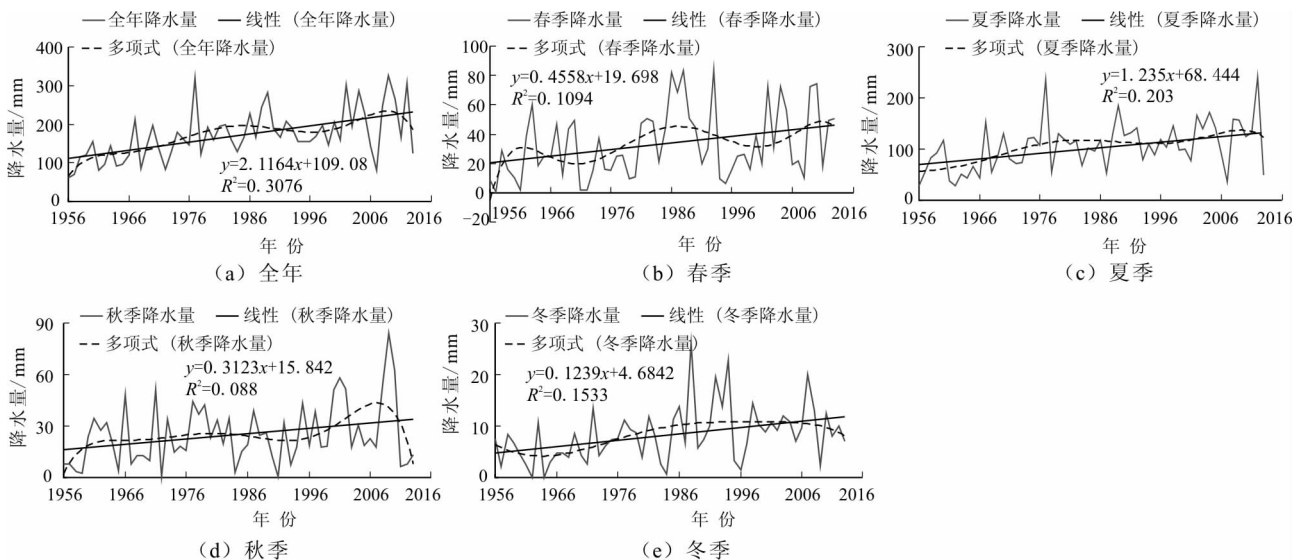


图3 1956-2013年降水量年际和季节变化特征

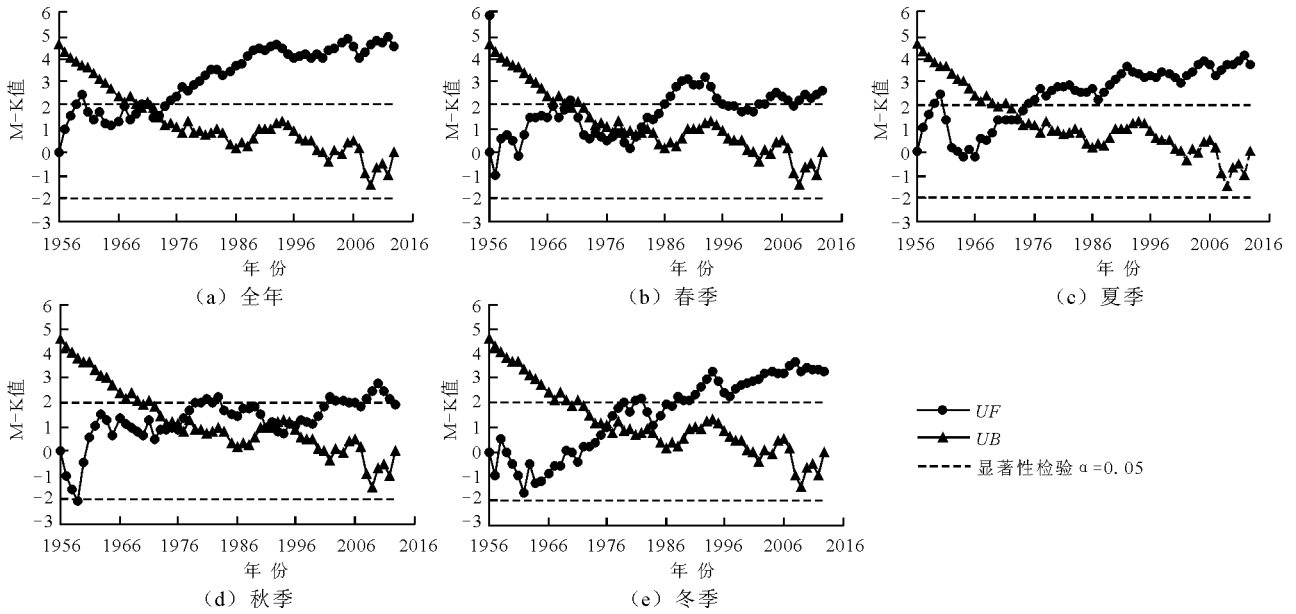


图 4 1956 - 2013 年年及季节降水量 Mann - Kendall 突变判别曲线

4.4 降水量变化的周期性分析

1956 - 2013 年年及季节降水量在不同时间尺度下的震荡周期见图 5, 图 5(a) 为年降水量小波系数实部等值线图, 图中实线为大于或等于零的等值线, 表示降水处于较多阶段; 图中虚线为小于零的等值线, 表示降水处于较少阶段; 图 5(b) 为全年降水量小波方差图, 用来确定降雨演化过程中存在的主周期。从图 5(a) 和 5(b) 可以看出, 年降水存在 3、5、9、18 a 的震荡周期, 18 a 的周期震荡最强, 为流域降水变化第一主周期。从图 5(a) 可以看出, 在各时间尺度下, 2013 年以后小波系数实部等值线均为正相位, 且等值线未闭合, 推测未来一段时间巴音河流域将处于年降水偏多期。

从图 5(c) ~ 5(f) 四季降水小波系数实部等值线可知, 春季降水存在 6、9、19 a 的震荡周期; 夏季降水存在 5、9、18、28 a 的震荡周期, 18 和 28 a 左右的周期震荡显著; 秋季降水存在 4 和 11 a 的震荡周期, 11 a 的周期震荡较明显; 冬季降水存在 5、10、27 a 的震荡周期, 10 和 27 a 的周期震荡最强。结合四季降水小波方差图(图略), 由小波系数实部等值线闭合情况可知, 未来一段时间, 四个季节的降水量将处于偏多期。

4.5 降水的持续性分析

为了分析降水变化的持续性, 基于 R/S 方法计算了年及季节的 Hurst 指数, 结果见表 1。从表 1 可以看出, 年际及各季降水量的 Hurst 指数 H 均大于 0.5, 说明将维持原来的变化趋势, 由前面的分析可

知, 1956 - 2013 年降水量的年际及季节变化均呈增长趋势, 因此, 未来年及各季降水量将维持原来的增长趋势。

表 1 1956 - 2013 年降水量的年及各季节的 Hurst 指数

$\ln t$ 与 $\ln(R/S)$ 双对数回归方程	Hurst 指数 (H)
年降水量: $y = 0.8201x - 0.3464$	0.82
春季降水量: $y = 0.732x - 0.178$	0.73
夏季降水量: $y = 0.713x - 0.2269$	0.71
秋季降水量: $y = 0.6373x - 0.1414$	0.64
冬季降水量: $y = 0.8076x - 0.3266$	0.81

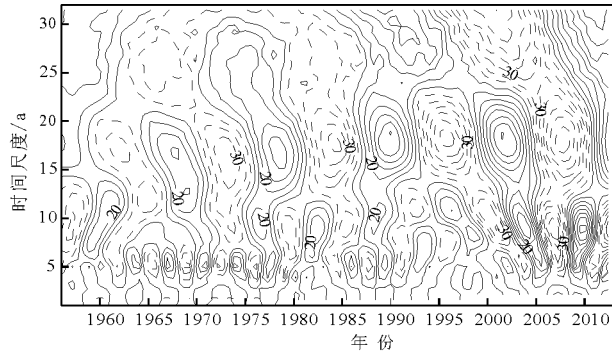
4.6 干旱的变化特征

基于 1956 - 2013 年的降水实测数据, 在 12 个月的时间尺度下, 计算了标准化水体指数 (SPI), SPI 随时间变化的趋势见图 6。由图 6 可知, 1956 - 2013 年 SPI 呈波动上升, 1973 年之前(包括 1973 年)之前, SPI 多数处于负值区, 普遍处于干旱期, 1972 年为极端干旱年; 1973 年之后, SPI 上升多为正值, 转为相对湿润期, 但 1978、1984、2007、2013 年的 SPI 值明显为负值, 表明德令哈地区这些年处于干旱期, 其中 2007 年为极度干旱年, 全年降水量仅为 80.8 mm, 旱情仅次于 1972 年(82.5 mm), SPI 指数分析的干旱事件与实际一致。

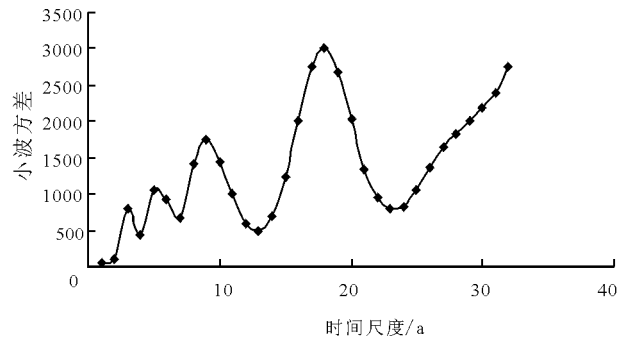
比较降水量距平与 SPI , 两者相关系数为 0.99, 说明降水距平和 SPI 密切相关, 可用于反映近 60 年来干旱的变化规律。利用 Mann - Kendall 法检验对 SPI 进行突变分析(图略), 由 UF 、 UB 曲线交点位置可知干旱突

变的年份为1973年。由 UF 曲线可知,1975年以后, SPI 值增长趋势明显,超过了显著水平0.05临界线,20世纪90年代以后,这种增长趋势甚至超过了0.001显著性水平,表明 SPI 上升趋势显著,干旱缓解趋势明显。基于小

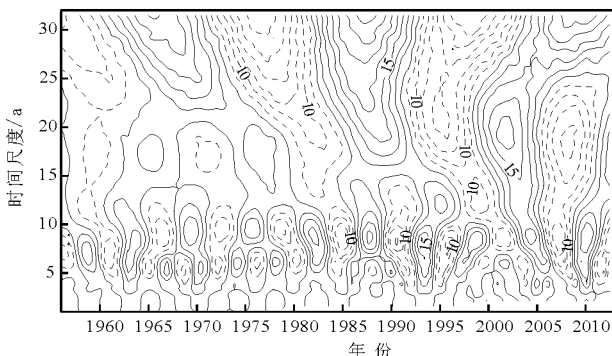
波分析,借助于小波系数等值线图(图略)和小波方差图(图略),可知 SPI 指数存在5、18 a的震荡周期,这与郭慧等^[31]研究我国西部地区降水的时空变化特征得出的结论基本一致。



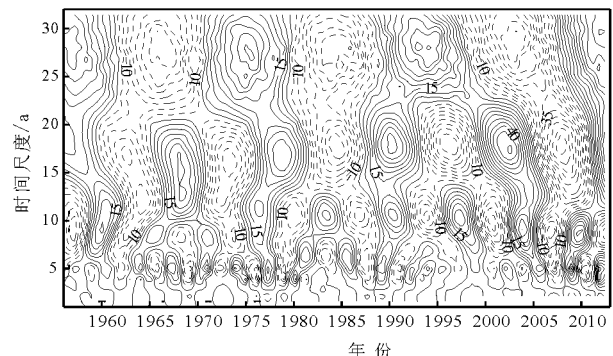
(a) 年降水量小波系数实部



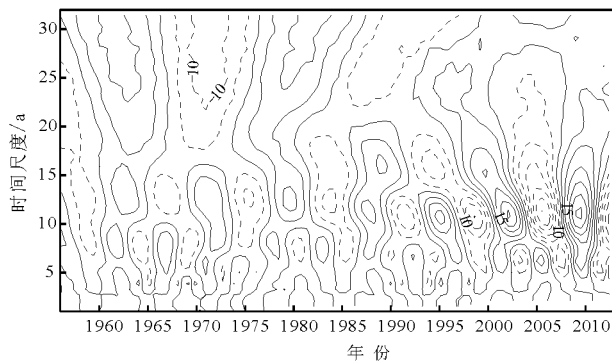
(b) 全年降水量小波方差图



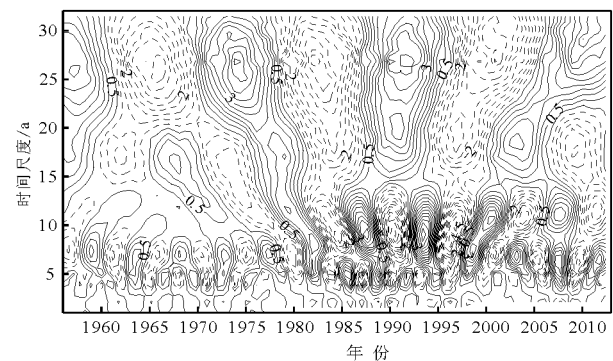
(c) 春季



(d) 夏季

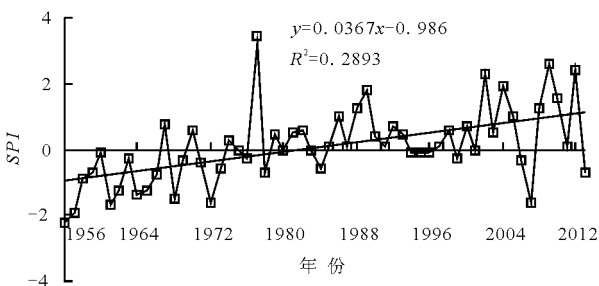


(e) 秋季



(f) 冬季

图5 年及四季降水量 Morlet 小波系数实部及全年降水量小波方差图

图6 1956 - 2013年标准化水体指数(SPI)年际变化

5 讨论

(1) 德令哈气象站位于巴音河流域的中部,在空间上具有一定的代表性,这与邵雪梅等^[12]通过对比德令哈与格尔木、乌兰、大柴旦等站点同时期降水量资料后,得到的德令哈气象站站点对其所在的区域具有一定的代表性结论一致,德令哈气象站降水量的变化,可以反映巴音河流域降水变化特征。

(2) 线性趋势分析表明:1956 - 2013年际及

四季降水量均呈上升趋势,夏季降水倾向率最大。该结论与相关学者对我国西北地区降水量特征研究所得结论一致^[32-34],与黄磊等^[13]基于树木年轮资料重建的德令哈近千年来降水量变化特征和马季芳^[15]根据实测资料分析的降水量变化特征相似,但降水倾向率幅度与前人有差异,主要原因可能是所使用的时间长度不一致。

(3) 基于 Mann - Kendall 方法的突变分析表明,年际和夏季降水量在 1973 年左右发生了突变,春季降水量在 1981 年前后发生了突变,冬季降水量在 1976 年前后发生了突变,均通过了 0.01 的置信度检验。20 世纪 60 年代发生了气候突变,宋燕等^[35]的研究表明,突变发生在 1967 年前后;黄磊等^[13]认为德令哈降水量超过 95% 显著性水平的突变出现在 1964 年。这与本文结论有差异,可能是由于研究过程中使用数据及研究尺度不同所致。

(4) 小波分析表明,降水量年际及四季均存在显著的周期变化特征,既存在 3 ~ 9 a 的短周期,也存在 18 ~ 28 a 的长周期。陈志昆等^[36]在对中国西北地区 128 个气象站 1971 - 2009 逐月降水资料分析的基础上,认为西北地区降水异常区普遍存在 3 ~ 5 a 左右的短周期和 10 和 20 a 左右的长周期,这与本文结论基本一致。刘洪斌等^[14]分析了德令哈地区近千年来年降水量变化特征,得出德令哈地区年降水量变化存在显著的多周期变化特性,与本文结论一致。但由于数据来源及研究尺度的差异,得出的震荡周期略有差异。

6 结 论

(1) 年代际分析表明,20 世纪 80 年代之前年、春季、夏季、冬季处于降水偏少期,20 世纪 80 年代至今处于降水偏多期,且降水总体上呈上升趋势,冬季降水变化相对平稳。

(2) 线性趋势及 Mann - Kendall 趋势检验表明,近 60 年来年与四季降水量呈上升趋势,年降水量气候倾向率为 21.16 mm/10a,四季降水量倾向率分别为 4.56、12.35、3.12、1.24 mm/10a,均呈现上升趋势,夏季降水倾向率最大,冬季倾向率最小。R/S 分析表明,年及季节降水量具有持续性,未来将维持增长趋势。

(3) 突变分析表明,在 0.01 的显著水平下,年、春季、夏季和冬季降水均发生了由少到多的显著突变,秋季降水无显著突变。年和夏季降水突变均发生在 1973 年,说明夏季降水对全年降水影响较大,

春季降水突变发生在 1981 年,冬季降水突变发生在 1976 年,秋季降水无显著突变。

(4) 小波分析表明,降水存在多周期变化的特征;夏季降水的周期性变化特征与年降水变化特征相似,说明夏季降水对年降水量的变化有重要的影响;除秋季外,其它降水均存在 18 ~ 28 a 的长周期变化。从主震荡周期看,未来一段时间年及四季将处于年降水偏多期。

(5) 相关分析表明, SPI 指数和降水量距平密切相关(相关系数 0.99),可用于反映 1956 - 2013 年干旱及降水特征。M - K 检验表明,1956 - 2013 年 SPI 指数上升趋势显著,干旱呈减弱趋势,1973 年为突变年;干旱变化具有周期性,小波分析表明干旱变化的周期为 5 和 18 a。

参考文献:

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change 2013: The physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 庄晓翠,杨森,赵正波. 新疆阿勒泰地区降水变化特征分析[J]. 干旱区研究, 2012, 29(3): 487 - 494.
- [4] 陈豫英,冯建民,陈楠,等. 西北地区东部可利用降水的时空变化特征[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 56 - 66.
- [5] 董斯扬,薛娴,徐满厚,等. 气候变化对青藏高原水环境影响初探[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 841 - 853.
- [6] 马新平,尚可政,李佳耘,等. 1981 - 2010 年中国西北地区东部大气可降水量的时空变化特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 448 - 455.
- [7] 赵丽,韩雪云,杨青. 近 50 a 西北干旱区极端降水的时空变化特征[J]. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(1): 19 - 26.
- [8] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152 - 164.
- [9] 王晖,隆霄,马旭林,等. 近 50 a 中国西北地区东部降水特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 712 - 718.
- [10] 黄小燕,李耀辉,冯建英,等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1359 - 1370.
- [11] 任国玉,袁玉江,柳艳菊,等. 我国西北干燥区降水变化规律[J]. 干旱区研究, 2016, 33(1): 1 - 19.
- [12] 邵雪梅,黄磊,刘洪滨,等. 树轮记录的青海德令哈地区千年降水变化[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2004, 34(2): 145 - 153.
- [13] 黄磊,邵雪梅,刘洪滨. 青海德令哈地区千年来降水量

- 的突变分析[J]. 地理学报, 2006, 61(7): 713 - 719.
- [14] 刘洪滨, 邵雪梅, 黄磊, 等. 青海省海西州德令哈地区近千年年来年降水量变化特征分析[J]. 第四纪研究, 2005, 25(2): 176 - 183.
- [15] 马季芳. 德令哈市近40年气候特征分析[J]. 青海气象, 2014(4): 2 - 5.
- [16] 刘波, 刘金胜, 束龙仓, 等. SRES A1B情景下德令哈盆地2016 - 2075年气候变化预估[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 232 - 238.
- [17] 严应存, 校瑞香, 肖建设, 等. 青海省巴音河流域LUCC遥感调查及驱动分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 276 - 283.
- [18] 李健, 王建军, 黄勇, 等. 青海德令哈市巴音河流域水资源开发利用[J]. 干旱区研究, 2009, 26(4): 483 - 489.
- [19] 尹常亮, 姚檀栋, 田立德, 等. 德令哈大气水汽中 $\delta^{18}\text{O}$ 的时间变化特征——以2005年7月~2006年2月为例[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008, 38(6): 723 - 731.
- [20] 白松竹, 李春芳, 王磊. 近45年5 - 9月阿勒泰地区强降水气候变化趋势与突变特征[J]. 暴雨灾害, 2009, 28(1): 84 - 87.
- [21] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of precipitation and drought data in Serbia over the period 1980 - 2010 [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 494(12): 32 - 42.
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [23] KISI O, AY M. Comparison of Mann - Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 513(5): 362 - 375.
- [24] GOCIC M, TRAJKOVIC S. Analysis of changes in meteorological variables using Mann - Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 100(1): 172 - 182.
- [25] 高妍, 冯起, 李宗省, 等. 1957 - 2012年讨赖河流域降水变化特征[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 275 - 282.
- [26] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482 - 493.
- [27] 邱海军, 曹明明, 曾彬. 基于小波分析的西安降水时间序列的变化特征[J]. 中国农业气象, 2011, 32(1): 23 - 27.
- [28] 庄晓翠, 赵正波, 杨森, 等. 西北干旱区阿勒泰地区暖季干湿气候变化及R/S分析[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 259 - 265.
- [29] 洪兴骏, 郭生练, 周研来. 标准化降水指数SPI分布函数的适用性研究[J]. 水资源研究, 2013, 2(1): 33 - 41.
- [30] 谢培, 顾艳玲, 张玉虎, 等. 1961 - 2015年新疆降水及干旱特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 332 - 339.
- [31] 郭慧, 李栋梁, 林纾, 等. 近50多年来我国西部地区降水的时空变化特征[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1165 - 1175.
- [32] 陈冬冬, 戴永久. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 923 - 935.
- [33] 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.
- [34] 李延林, 许存平, 许显花, 等. 近50a青海黄南州降水变化特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 854 - 861.
- [35] 宋燕, 季劲均. 60年代亚非夏季风十年尺度的突变[J]. 大气科学, 2001, 25(2): 200 - 208.
- [36] 陈志昆, 张书余, 雒佳丽. 中国西北地区降水异常的气候分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(6): 1874 - 1883.