

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0097

孙秋慧,徐国宾,马超,等.基于SPI干旱指数的海口市干旱变化特征研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(4):58-65,81.
SUN Q H, XU G B, MA C, et al. Study on the characteristics of drought in Haikou City based on standardized precipitation index[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 58-65, 81. (in Chinese)

基于SPI干旱指数的海口市干旱变化特征研究

孙秋慧,徐国宾,马超,陈亮

(天津大学,水利工程仿真与安全国家重点实验室,天津300354)

摘要:根据海口市8个雨量站1970-2012年的逐日降雨资料,采用降雨平均和SPI(标准化降水指数)平均两种不同的SPI处理方案计算了三个时间尺度(3、6、12个月)的SPI值。将两种处理方案在不同时间尺度上计算所得的干旱情况与实际干旱情况做了比较,选择适用于海口市干旱评估的处理方案,应用Mann-Kendall检验, Morlet小波分析方法分析了海口市1970-2012年间各季节的干旱变化趋势和年干旱变化周期。结果显示:降雨平均方案更适用于评估海口市的干旱情况;海口市不同程度的干旱发生频率高达56%,多发生在春、秋两季,频率分别为51%和41%,秋季特旱发生频率为14%;海口市整体干旱有加重趋势且秋季加重趋势明显;海口市干旱具有13 a左右的第一主周期,4 a和22 a的第二、三周期。研究结果可为海口市干旱评估和预报以及制定抗旱减灾措施提供参考。

关键词: SPI(标准化降水指数); 干旱特征; Mann-Kendall检验; 小波分析; 海口市

中图分类号: P467 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)04-0058-08

Study on the characteristics of drought in Haikou City based on standardized precipitation index

SUN Qiuhui, XU Guobin, MA Chao, CHEN Liang

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: According to the daily rainfall data of the eight rainfall stations in Haikou City from 1970 to 2012, we used two different SPI processing schemes, (1) SPI calculated from all station averaged precipitation (precipitation mean) and (2) mean of all SPI calculated from precipitation at individual stations (SPI mean), to calculate the SPI values at 3-, 6- and 12-month scales. We compared the drought situation reflected by the two schemes at each month scale with the actual drought situation and selected the suitable scheme for drought evaluation in Haikou City. We used the Mann-Kendall test and Morlet wavelet analysis method to analyze the change trend and the cycle of drought change in Haikou City from 1970 to 2012. The results showed that precipitation mean is more suitable to evaluate the drought situation in Haikou. From 1970 to 2012, the occurrence frequency of droughts of different degrees in Haikou City was as high as 56%, especially in spring and autumn, where the frequency was 51% and 41% respectively. The occurrence frequency of extreme droughts in autumn was 14%. The general drought situation in Haikou City was aggravating, and the trend was especially obvious in autumn. The drought in Haikou had a first main cycle of about 13 years, a second main cycle of 4 years, and a third main cycle of 22 years. The results can provide a reference for drought evaluation and forecasting and the development of drought relief measures in Haikou City.

Key words: SPI(Standardized Precipitation Index); drought characteristic; Mann-Kendall test; wavelet analysis; Haikou City

收稿日期: 2018-01-10 修回日期: 2018-06-04 网络出版时间: 2018-06-14
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.tv.20180614.0644.004.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51621096)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51621096)

作者简介: 孙秋慧(1990),女,河北邢台人,博士研究生,主要从事水资源、水生态环境研究。E-mail: sunqiuhi@tju.edu.cn

通讯作者: 徐国宾(1956),男,河北石家庄人,教授,博士生导师,主要从事水沙调度与环境生态工程研究。E-mail: xuguob@sina.com

干旱,广泛发生于世界各地的气象灾害,给人民的生命财产带来极大的危害。为了监测和量化干旱程度,许多研究学者提出了各种各样的气象干旱指数,如:降水量距平百分率(Pa)、相对湿润度指数(M)、帕默尔干旱指数($PDSI$)、标准化降水指数(SPI)等。其中, SPI 因其可量化不同时间尺度的降水量赤字且只需要降雨资料、计算简单易行、不依赖于土壤水分条件或不利地形的影响而被研究者广泛应用^[1-21]。黄晚华等^[1]采用 SPI 为干旱指标,分析了秦岭—淮河以南、青藏高原以东的广大南方地区季节性干旱时空变化规律,研究表明,中国南方干旱程度在时间尺度上呈不同程度的增加趋势,春旱和秋旱有加重的趋势,而夏旱和冬旱有减轻的趋势。李伟光等^[2]证明了利用 Γ 分布拟合海南岛不同尺度降水量的可行性,并得出不同时间尺度 SPI 值结合使用可以准确判断海南岛旱季和雨季不同类型干旱的开始、持续时间及严重程度的结论。Joshi等^[3]应用 SPI 作为气象干旱指标分析了印度141 a(1871—2012年)30个降雨分区各种干旱变量,并应用离散小波变换结合Mann-Kendall测试分析了与干旱变量相关联的趋势和周期,结果表明,在20世纪下半叶,印度东北和中部的干旱发生显著增加,干旱变化趋势受短期(2~8 a)和年代际(16~32 a)周期影响显著。Zhou和Liu^[4]以1957—2014年13个雨量站记录的鄱阳湖盆地月降水量为例,研究了由各个站的降水计算所有 SPI 的平均值(SPI 平均)和 SPI 从全站平均降水(降水平均)计算所得两种处理方案在评估干旱中产生的差异,结果表明对于鄱阳湖盆地, SPI 平均方案相比于降水平均方案可以更准确地突出极端事件,因而应用 SPI 平均值方案对其进行评估更合适。

以往关于干旱趋势、干旱周期的研究区域大多是北方干旱地区^[14-19],也有一些学者对贵州、云南、四川等西南地区进行研究^[20-22],但少有应用 SPI 对海南省或海口市的干旱特征与周期做研究。海南岛一年四季均有干旱发生,冬春季节为季节性干旱,夏秋两季降水的时间分布不均会发生短暂干旱^[23]。干旱频发,使得干旱成为海南省发生频率高,影响范围广、持续时间长的灾害性天气,长期困扰着海南省的工农业生产。研究海口市的干旱变化特征对海口市以及整个海南省的经济可持续发展与水资源可持续利用管理有重要意义。因此,本文针对海南省海口市,首先利用海口市1970—2012年43 a的降雨资料,比较分析了 SPI 平均法和降雨平均法两种不同的 SPI 处理方案对于评估海口市干旱的适用性,

接着以最适宜评估海口市干旱特征的方案,求解分析了各季节各等级干旱发生频率、变化趋势和干旱周期,以期探讨未来一段时期的干旱状况,为制定农业种植计划和准确预报干旱变化提供参考。

1 研究区域概况及数据方法

1.1 研究区域概况及数据来源

海口市位于东经 $110^{\circ}10'$ — $110^{\circ}41'$,北纬 $19^{\circ}32'$ — $20^{\circ}05'$ 之间,总面积 $3\,134.84\text{ km}^2$,其中陆地面积 $2\,304.84\text{ km}^2$,占73.52%,整体地势平缓,西北部和东南部较高,中部较低,北部多为沿海小平原。全市地貌主要由山丘、台地和平原组成,基本分为北部滨海平原区,中部沿江阶地区,东部、南部台地区,西部熔岩台地区。地表主要为第四纪基性火山岩和第四系松散沉积物,呈较大面积分布,土壤类型以土壤蓄水保水能力弱的玄武岩砖红壤、火山灰幼龄砖红壤、砂页岩砖红壤、带状潮沙泥土与滨海沙土为主。

海口市地处低纬度热带北缘,属于热带季风海洋性气候,受热带海洋季风气候和区域地形的影响,海口市降雨主要集中在5月—10月的台风季节,多以台风雨、季风槽雨和锋面雨为主。春季温暖少雨多旱,夏季高温多雨,秋季多台风暴雨,冬季干燥少雨但北方有冷空气南下侵袭时有连阴雨天气。全年日照时间长,辐射能量大,年平均日照时数约 $2\,225.2\text{ h}$,年太阳辐射量可达到 $1\,200\,000\text{ kcal/m}^2$ 左右;年平均气温约 $24.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低平均气温 $18.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,年平均降水量约 $1\,696.6\text{ mm}$,年平均蒸发量约 $1\,847.7\text{ mm}$,平均相对湿度83%。常年以东北风和东南风为主,年平均风速 3.4 m/s 。

根据《中国气象干旱大典·海南卷》和海南省水资源公报记载,1970—2012年期间,海口市多次发生干旱,其中较为典型的有:1971—1974年连续4年冬春连旱;1977—1980年连年出现大旱,1977年1月中旬至5月下旬,海口、屯昌、定安、文昌、琼海、万宁等市县冬春连旱,连续旱日79~131 d,各地各月降雨量比常年偏少,出现罕见的大旱;1977年9月中旬至1978年3月中旬,白沙、澄迈、昌江、海口等市县连续旱日166~178 d;1978年10月中旬至1979年5月下旬,通什(今五指山)、乐东、定安、海口、崖县(今三亚)、文昌、澄迈、东方等市县连续旱日137~187 d;1979年10月至1980年5月,海南岛遭受持续8个月的大旱。1983年11月初至1984年4月下旬,海南岛绝大部分地区冬春连旱;1986年9月中旬至10月,全岛秋旱严重;1996年冬春连旱,夏旱明显;2004年9月份到2005年的5月份全省

大部分地区出现持续高温少雨天气, 全省各地降雨量累计仅为 122.8~513 mm, 2004 年因旱直接经济损失 6.51 亿元。2010 年, 1 至 9 月部分市县降雨量偏少, 局部发生不同程度的旱情, 损失粮食 3.04 万吨, 直接经济损失 3.11 亿元。

本文采用的数据为海口市水文局提供的 1970-2012 年逐日降雨资料。为保证气象站点数据序列的完整性, 剔除了在研究时段内缺测年份大于一年的站点, 并对缺测年份小于一年的数据通过与其具有良好的相关性的邻近气象站建立线性回归关系进行插值。结合海口市的区域面积和地形最后选用了海口市海口、龙塘、丁荣、凤潭、岭北、铁炉、新德与枫杞, 8 个较有代表性的雨量站 1970 年 1 月 1 日-2012 年 12 月 31 日的逐日降雨数据资料。研究中以日降雨量 $P \geq 1$ mm 作为有效降雨。研究区域和 8 个雨量站的泰森多边形分布图见图 1。



图 1 研究区域与 8 个雨量站的泰森多边形分布
Fig. 1 Study area and the Ty son polygons distribution of the eight rainfall stations

1.2 研究方法

1.2.1 标准化降水指数(SPI)及其计算方法

标准化降水指数(SPI)是先求出降雨量分布概率, 然后进行正态标准化而得。计算方法^[24]如下:

$$SPI = z = s \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{[(d_3 t + d_2) t + d_1] t + 1.0} \quad (1)$$

式中: $t = \sqrt{\ln \frac{1}{p}}$, p 为式(2)或式(3)求得的概率, 并且当 $p > 0.5$ 时, $p = 1 - p$, $s = 1$; 当 $p \leq 0.5$ 时, $s = -1$, $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

$$p(x < x_0) = \int_0^{x_0} \frac{1}{\beta^r \Gamma(r)} x^{r-1} e^{-x/\beta} dx, x > 0 \quad (2)$$

$$p(x = 0) = m/n \quad (3)$$

$$\Gamma(r) = \int_0^{\infty} x^{r-1} e^{-x} dx \quad (4)$$

其中: $\beta > 0$, $r > 0$ 分别为尺度和形状参数, β 和 r 可用极大似然估算方法求得:

$$\hat{r} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4A/3}}{4A} \quad (5)$$

$$\hat{\beta} = x/\hat{r} \quad (6)$$

$$A = \lg x - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg x_i \quad (7)$$

式中: 随机变量 x 为某一时段的降水量; x_i 为降水量资料样本; x 为降水量多年平均值; n 为计算序列的长度即总样本数; m 为降水量为 0 的样本数。

根据国家气象干旱等级标准, 划分为 5 个等级, 各级干旱指标见表 1。

表 1 标准化降水指数(SPI)干旱等级划分

Tab. 1 The table of SPI level

等级	类型	SPI 值
1	无旱	$-0.5 < SPI$
2	轻旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$
3	中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$
4	重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$
5	特旱	$SPI \leq -2.0$

1.2.2 降雨平均方案与 SPI 平均方案及其计算方法

降雨平均方案指在计算区域 SPI 值时先利用泰森多边形法将各个雨量站的降雨量平均, 后利用平均降雨量计算 SPI 值。SPI 平均方案指在计算区域 SPI 值时先利用各个雨量站的降雨量分别求得 SPI 值, 后利用泰森多边形法将各个雨量站的 SPI 值做平均。泰森多边形法的权重 ω 如式(8)所示。

$$\omega_i = \frac{S_i}{Area}, \sum_{i=1}^n S_i = Area, \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (8)$$

平均降雨量可用式(9)表达。

$$P = \sum_{i=1}^n \omega_i \times P_i \quad (9)$$

SPI 平均如式(10)所示。

$$SPI = \sum_{i=1}^n \omega_i \times SPI_i \quad (10)$$

2 降雨平均方案与 SPI 平均方案对比分析

据相关文献^[2, 23, 25]及对海南岛旱情资料的分析可知, 海南岛雨季为 5 月-10 月, 旱季为 11 月-次年 4 月, 因而用 3 个月时长计算短期时间系列时采用 2 月-4 月、5 月-7 月、8 月-10 月、11 月-次年 1 月, 即 SPI-4 月、SPI-7 月、SPI-10 月、SPI-1 月代表春、夏、秋、冬四个季节; 用 6 个月时长计算中期时间系列时采用 5 月-10 月、11 月-4 月, 即 SPI-10 月、SPI-4 月代表旱、雨两季。用 12 个月时长计

算长期时间系列时采用 1 月 - 12 月, 即用 $SPI-12$ 代表年干旱情况。应用上述两种方法分别计算得出降雨平均方案与 SPI 平均方案下的春、夏、秋、冬四个季节与旱、雨两季及年 SPI 值, 发现在 SPI 平均方案下, 不论哪个尺度情况, 都没有特旱发生, 这与历史实际干旱记录不符。 SPI 平均方案降低了极端干旱的程度。选出两者最为突出的干旱年份作比较, 比较结果见表 2。由表 2 知, 降雨平均方案更符合实际干旱情况。降雨平均方案准确的反映了 1986 年少见的秋旱、1996 年的冬春连旱和明显夏旱、2004 年和 2010 年的两大严重干旱年等典型干旱事件。

3 海口市干旱特征分析

3.1 干旱的时序变化趋势

3.1.1 线性回归法分析干旱的时序变化趋势

由线性回归法分析海口市降雨平均方案各时间尺度的干旱时序变化趋势, 给出了线性回归方程, 见

图 2。线性回归方程的斜率为正表示干旱趋势减弱, 反之若为负则表示干旱加强; 斜率的绝对值越大, 说明趋势越明显, 反之若斜率绝对值接近 0, 则表示趋势不明显。

春(图 2(a))、夏(图 2(b))、秋(图 2(c))、冬(图 2(d)) 四季的线性回归方程斜率分别为 -0.0047 、 0.0102 、 -0.0393 、 0.0117 , 春、秋干旱趋势加强, 夏、冬干旱趋势减弱, 但除秋季 SPI 值下降趋势明显以

表 2 降雨平均方案与 SPI 平均方案得出的干旱年份比较

Tab. 2 The comparison of drought years obtained from the results of precipitation mean and SPI mean

时间尺度	降雨平均方案	SPI 平均方案
春季	1996、1977、1985、1994、2009	1970、1973、2011、1994、2002
夏季	1996、1982、1994、2004	1970、1975、1979、1983
秋季	1986、2004、2010、1976	1973、2004
冬季	1973、1783、1977、1990	1977、1989
旱季	1973、1983、1996、2009、1976	1973、1977、1980
雨季	1986、2004	2004、2006
年	1997、2000、2008、2009、2010	1982、2009、2010

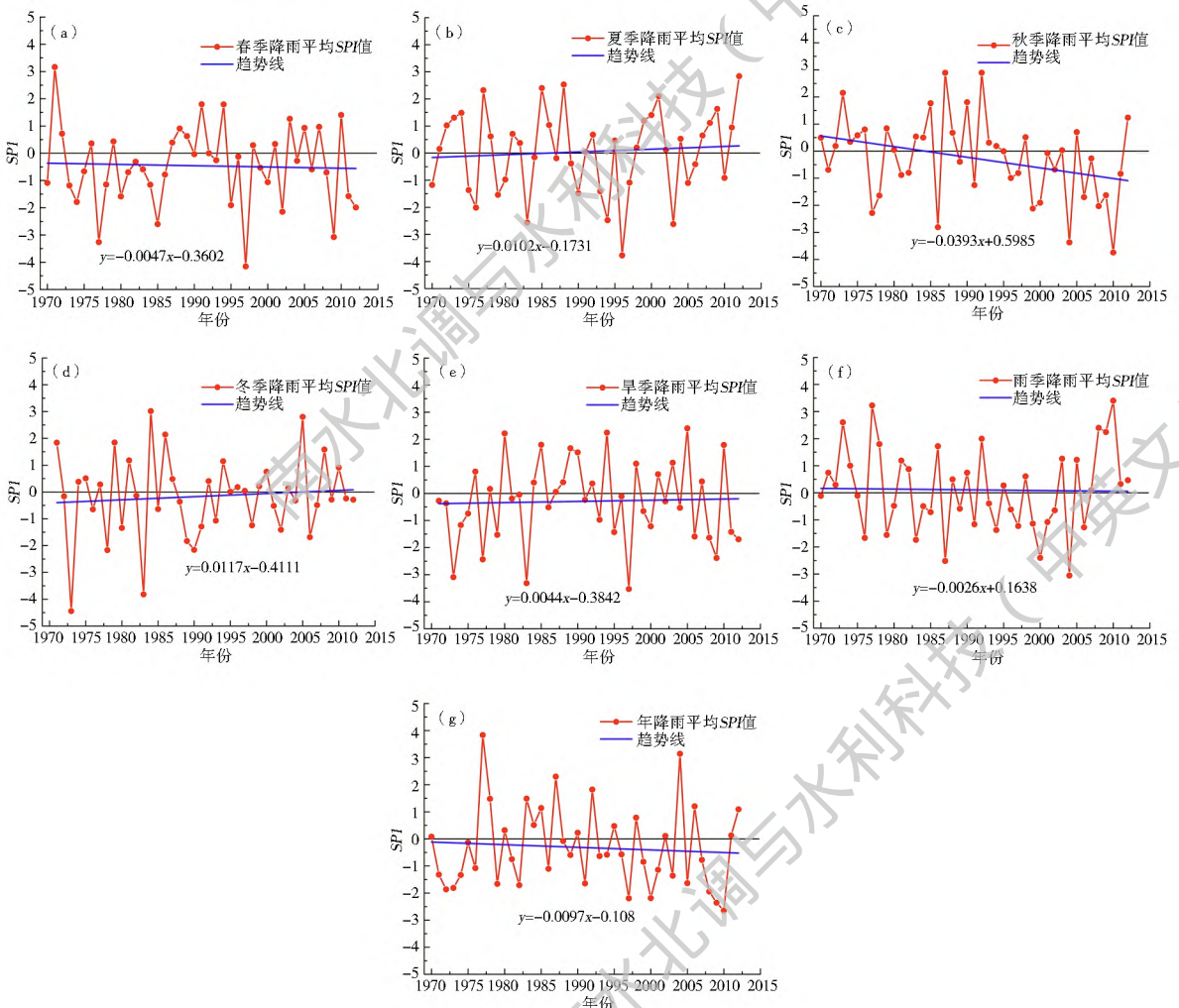


图 2 降雨平均方案计算所得各尺度的 SPI 值所反映的干旱情况: (a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季、(e) 旱季、(f) 雨季、(g) 年

Fig. 2 The drought condition reflect by SPI value obtained from precipitation mean at each time scale:

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) dry season, (f) wet season, (g) annual

外,春、夏、冬三个季节的 SPI 值变化趋势不明显。秋季正是早稻收获和晚稻播种的季节,未来海口市对于秋季干旱的防范应加强。

旱(图 2(e))、雨(图 2(f))两季及年(图 2(g)) SPI 值回归方程斜率分别为 0.0044、-0.0026、-0.0097,斜率绝对值都接近 0,由此知海口市 1970-

2012 年期间,旱、雨两季及年 SPI 值变化趋势不明显。

3.1.2 M-K 法分析干旱的时序变化趋势

应用 M-K 法^[26]分别对 1970-2012 年海口市 8 个雨量站春、夏、秋、冬四季,干湿两季以及年计算尺度下降雨平均方案 SPI 值趋势性进行分析,结果见图 3。

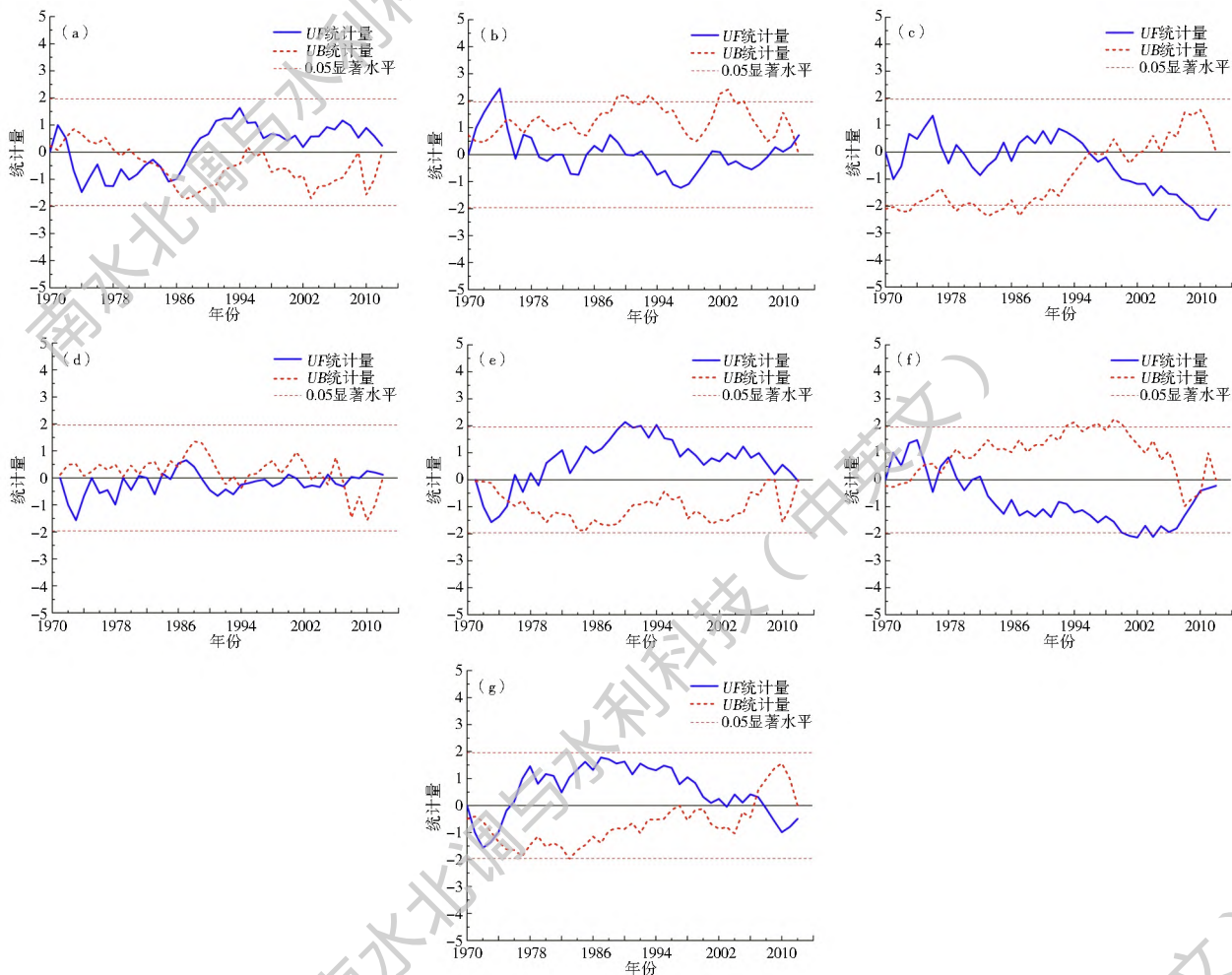


图 3 海口市 1970-2012 年间不同计算尺度的 SPI 值 MK 检验结果:(a) 春季、(b) 夏季、(c) 秋季、(d) 冬季、(e) 旱季、(f) 雨季、(g) 年

Fig. 3 MK test results of SPI value of each time scale during 1970-2012 in Haikou: (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) dry season, (f) wet season, (g) annual

春季(图 3(a)) SPI 值的总体变化趋势大体上经历了先下降后上升的过程。1972-1987 年年末为下降趋势,即这段时间气候趋向于干旱,但趋势不明显;1988-2012 年为上升趋势,气候发展趋势为变湿润,但趋势不明显。此外,从 UF 和 UB 曲线的交点可看出, SPI 序列在 1984 年左右发生了一次突变,突变后 SPI 值转为上升,即春季气候朝湿润方向发展,但趋势不明显。夏季(图 3(b)) SPI 值的总体变化过程大致为先升后降。1970-1978 年 SPI 值为上升,且上升达到 5% 显著性水平,趋势明显;1979-2012 年 SPI 值为下降,但趋势不明显。从 UF 和 UB 曲线的交点可看出, SPI 序列在 1975

年与 2011 年发生了两次突变,1975 年突变后 SPI 值逐渐下降,即夏季 1978 年之前湿润趋势明显,之后开始朝干旱趋势发展但趋势不明显;2011 年突变后 SPI 值逐渐上升,即夏季 2011 年之后干旱趋势减弱但趋势不明显。秋季(图 3(c)) SPI 值在 1996 年发生了一次突变,突变后 1996-2012 年 SPI 值快速下降,下降趋势明显,达到 5% 显著性水平,即秋季 1996 年之后干旱趋势加重。冬季(图 3(d)) SPI 值从 1970-2012 年,基本上处于下降趋势,但趋势不明显,在 2007 年有一个突变点, SPI 值转为上升趋势。即海口市冬季干旱趋势有减弱的趋势,但不明显。

分析旱、雨两季的SPI值变化趋势(图3(e)与图3(f))知,旱季与雨季刚好呈现出相反的变化趋势。1970-1978年与1979-2012年,旱季SPI序列由下降趋势变为上升趋势且上升达到5%显著性水平,上升趋势明显;雨季SPI序列由上升趋势变为下降趋势且下降达到5%显著性水平,下降趋势明显。在从UF和UB曲线的交点可看出,旱、雨两季SPI序列均在1975年发生突变,突变后旱季SPI值转为上升,雨季SPI值转为下降。

分析年尺度的SPI值变化趋势(图3(g))知,从

1970-2012年43a间,干旱或湿润趋势不明显,1970-1975年为下降趋势,1976-2007年为上升趋势,2008-2012年又转为下降趋势。其中在1974年和2007年发生两次突变。

3.2 SPI干旱的周期分析

利用小波分析法,采用复数Morlet小波分析海口市年尺度SPI值序列的多时间尺度特征,依据结果分别绘制小波系数实部、模和模平方的等值线图以及小波方差图,见图4。

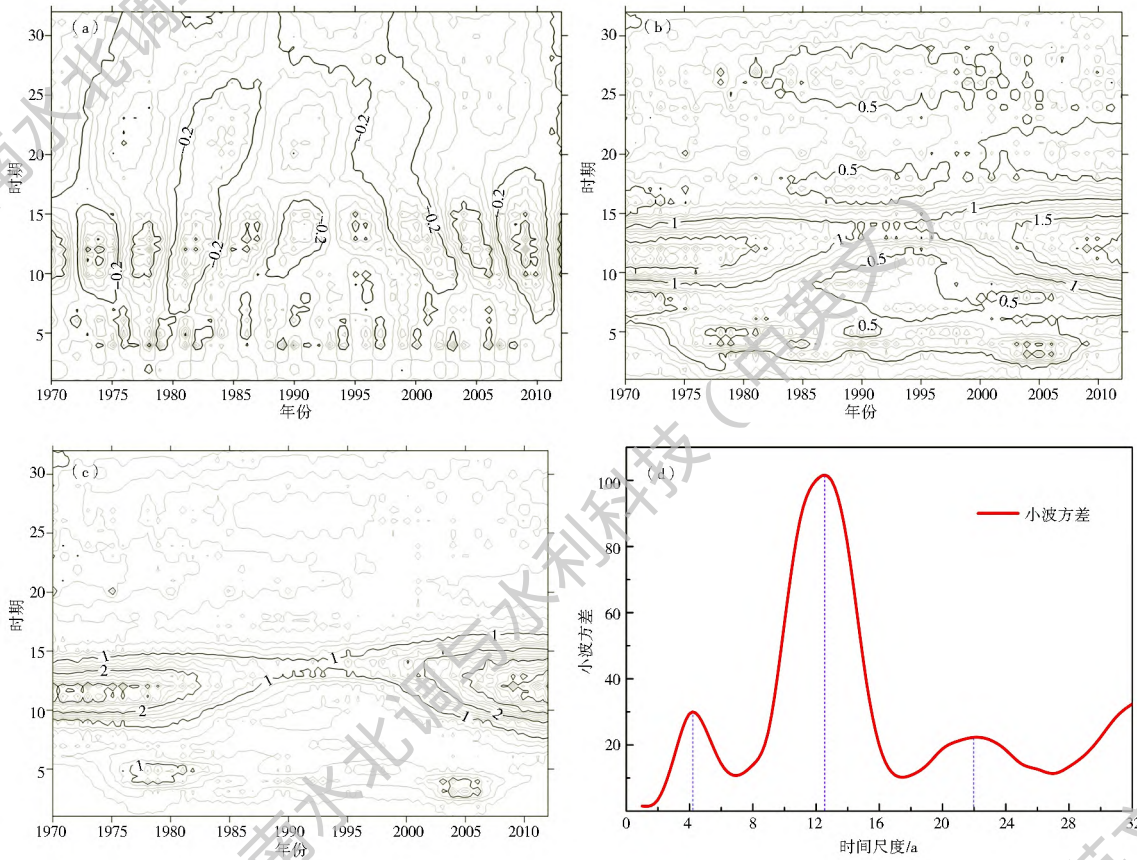


图4 小波系数实部、模和模的平方的等值线图以及小波方差图:(a)小波系数实部等值线图、(b)小波系数模等值线图、(c)小波系数模平方等值线图、(d)小波方差图

Fig. 4 The diagrams of the real part of the wavelet coefficients, wavelet coefficient module, wavelet coefficient module squared, and wavelet variance: (a) the real part of the wavelet coefficients, (b) wavelet coefficient module, (c) wavelet coefficient module squared, (d) wavelet variance

由小波系数实部等值线图(图4(a))可以看出,海口市年尺度SPI值变化存在多个明显的时间特征尺度。从始至终13a、4a的年际小尺度表现十分明显,其次从1970-1990年存在22a左右的大尺度。由小波系数模等值线图与小波系数模平方等值线图(图4(b)与图4(c))反映出的不同时段各时间尺度所对应信号的强弱可以看出,10到15a之间的时间尺度变化较强,发生于1970-2012年整个序列。由小波方差图(图4(d))可以看出,年SPI值序列存在3个较为明显的峰值,依次对应着4a、13a和22a的时间尺度。其中,最大峰值对应13a的时

间尺度,说明13a左右的周期震荡最强,为区域年干旱变化的第一主周期;4a时间尺度对应着第二峰值,为区域年干旱变化的第二主周期;22a时间尺度对应着第三峰值,为区域年干旱变化的第三主周期。上述3个周期的波动控制着海口市干旱在整个时间域内的变化特征。

绘制干旱演变的第一、第二和第三主周期小波变换实部变化过程图(图5)以分析干湿变化特征。13年特征时间尺度下(图5(a)),大约经历了5个干湿转换期,海口市干旱时段为1972-1976年、1980-1984年、1988-1993年、1998-2002年、2006-

2011 年; 4 年特征时间尺度下(图 5(b)), 大约经历了 15 个干湿转换期, 海口市三个较为突出的干旱时段为 1978-1980 年、1988-1990 年、2002-2004 年、

22 年特征时间尺度下(图 5(c)), 大约经历了 3 个干湿转换期, 海口市干旱时段为 1970-1973 年、1980-1988 年、1994-2002 年、2010-2012 年。

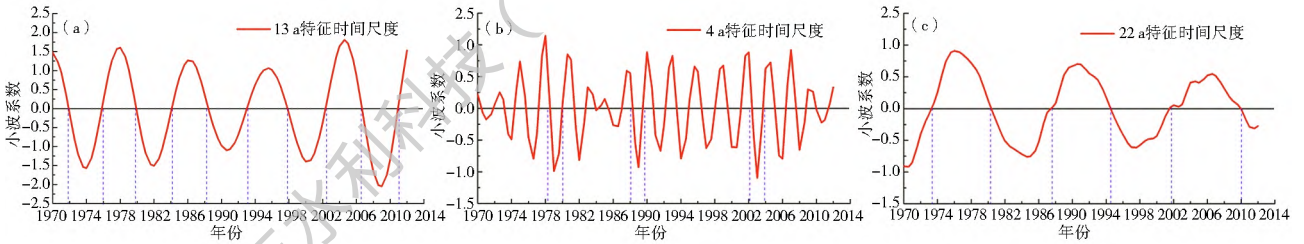


图 5 海口市年 SPI 值序列不同特征时间尺度小波变换实部变化过程图: (a) 13 a、(b) 4 a、(c) 22 a

Fig. 5 Change process of the real part of wavelet transform of annual SPI value sequence at different characteristic time scales in Haikou: (a) 13 years, (b) 4 years, (c) 22 years

3.3 各等级干旱发生频率

不同计算尺度下, 海口市 8 站点降雨平均 SPI 值反映出的海口市各等级干旱发生频率如图 6 所示。由图 6 可知海口市一年四季均可能发生干旱, 干旱多发生在春、秋两季, 频率分别为 51%、41%。相对与其他季节, 秋季是特旱高发季, 频率为 14%, 即平均 6 a 发生一次特大干旱事件。从 6 个月旱、雨季尺度来看, 雨季也应注重干旱的预防, 旱季要预防特大干旱发生。年尺度发生不同等级干旱的频率为 56%, 即平均 2 a 发生一次干旱事件。

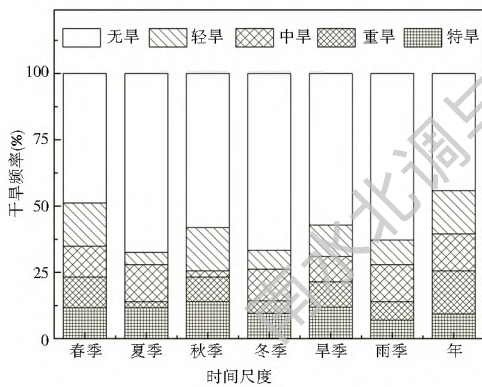


图 6 不同时间尺度各等级干旱频率图

Fig. 6 The drought frequency of each grade at each time scale

4 结论

对海口市旱情分析表明, 降雨平均方案更适用于评估海口市的干旱情况。SPI 平均方案降低了极端干旱的程度, 不符合实际干旱情况, 降雨平均方案可准确的反映出典型干旱年份的干旱事件, 与历史实际干旱记录吻合。利用降雨平均方案计算所得的 SPI 值, 采用统计分析、趋势分析、小波分析等方法分析海口市干旱变化特征, 得出以下结论。

(1) 从干旱发生频率来看, 海口市不同程度的干旱发生频率高达 56%, 即平均 2 年发生一次干旱事

件, 春、秋两季干旱发生频率高达 51%、41%, 秋季特旱发生频率为 14%, 即平均 6 年发生一次特大秋旱事件。海口市干旱频发与其热带季风海洋性气候及地形地貌息息相关, 气候特点导致降水量虽大但季节分布不均, 红壤土及多石灰岩的地貌导致土壤蓄水保水能力弱, 降水易形成径流流失。政府部门应给予足够的重视, 积极制定工程管理措施防旱抗旱。

(2) 从干旱趋势来看, 海口市整体干旱趋势增强, 尤其是秋季, 干旱加重趋势明显。分析秋季干旱加强的原因, 可能有两个方面: 一是降雨相对集中, 大部分降雨量集中在某一场或某几天的降雨时间, 即极端降雨事件增加造成降雨量时间分布不均, 二是前期土壤、农作物蒸发消耗大, 造成土壤水分缺乏。秋季对于海南一年两熟或三熟的种植结构来说是正是需水旺盛期, 此时发生干旱对农作物生长发育影响较大, 且可能进一步影响到其他行业用水, 应加强防范。

(3) 海口市干旱具有 13 a 左右的第一主周期, 4 a 和 22 a 的第二、三周期。预计下一个干旱期会在 2018-2022 年, 政策制定者需相应及时地调整生产生活模式, 合理规划水资源配置, 做好种植计划, 以减轻对农作物带来的不利影响。

参考文献(References):

- [1] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59. (HUANG W H, YANG X G, LI M S, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 50-59. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.07.009.
- [2] 李伟光, 陈汇林, 朱乃海, 等. 标准化降水指标在海南岛干旱监测中的应用分析[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(1): 178-182. (LI W G, CHEN H L, ZHU N H, et al. Analysis of

- drought monitoring on hainan island from standardized precipitation index[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2009, 17(1): 178-182. (in Chinese) DOI: 1671-3990(2009)01-0178-05.
- [3] JOSHI N, GUPTA D, SURYAVANSHI S, et al. Analysis of trends and dominant periodicities in drought variables in India: A wavelet transform based approach [J]. Atmospheric Research, 2016, 182: 200-220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.030>.
- [4] ZHOU H, LIU Y. SPI Based meteorological drought assessment over a Humid Basin: Effects of processing schemes[J]. DOI: 2016, 8(9): 373. 10.3390/w8090373.
- [5] ZHANG Q, LU W, CHEN S, et al. Using Multifractal and wavelet analyses to determine drought characteristics: A case study of Jilin Province, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 125(3): 1-12. DOI: 10.1007/s00704-016-1781-2.
- [6] IONITA M, SCHOLZ P, CHELCEA S. Assessment of droughts in Romania using the standardized precipitation index[J]. Natural Hazards, 2016, 81(3): 1483-1498. DOI: 10.1007/s11069-015-2141-8.
- [7] ZAKHEM BA, KATTAA B. Investigation of hydrological drought using cumulative standardized precipitation index (SPI 30) in the eastern Mediterranean region (Damascus, Syria) [J]. Journal of Earth System Science, 2016, 125(5): 1-16. DOI: 10.1007/s12040-016-0703-0.
- [8] TOSU NOGLU F, CAN I. Application of copulas for regional bivariate frequency analysis of meteorological droughts in Turkey[J]. Natural Hazards, 2016, 82(3): 1457-1477. DOI: 10.1007/s11069-016-2253-9.
- [9] BANDYOPADHYAY N, SAHA A K. A comparative analysis of four drought indices using geospatial data in Gujarat, India [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2016, 9(5): 1-11. DOI: 10.1007/s12517-016-2378-x.
- [10] THOMAS T, JAISWAL R K, GALKATE R, et al. Drought indicators based integrated assessment of drought vulnerability: A case study of bundelkhand droughts in Central India [J]. Natural Hazards, 2016, 81(3): 1-26. DOI: 10.1007/s11069-016-2149-8.
- [11] DJERBOU AI S, SOUAG-GAMANE D. Drought forecasting using neural networks, wavelet neural networks, and stochastic models: Case of the algerois basin in North Algeria[J]. Water Resources Management, 2016, 30(7): 2445-2464. DOI: 10.1007/s11269-016-1298-6.
- [12] ACHCAR J A, COELHO-BARROS E A, SOUZA R M D. Use of non-homogeneous poisson process (NHPP) in presence of change points to analyze drought periods: A Case Study in Brazil [J]. Environmental and Ecological Statistics, 2016(3): 1-15. DOI: 10.1007/s10651-016-0345-z.
- [13] RAHMAN M R, LATEH H. Meteorological drought in Bangladesh: Assessing, Analysing and hazard mapping using SPI, GIS and monthly rainfall data [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(12): 1-20. DOI: 10.1007/s12665-016-5829-5.
- [14] 唐尧, 孙睿. 基于气象和遥感数据的河南省干旱特征分析[J]. 自然资源学报, 2013, 28(4): 646-655. (TANG X, SUN R. Drought characteristics in Henan Province with meteorological and remote sensing data [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(4): 646-655. (in Chinese) DOI: 1000-3037(2013)04-0646-10.
- [15] 王帅兵, 李常斌, 杨林山等. 基于标准化降水指数与Z指数的洮河流域干旱趋势分析[J]. 干旱区研究, 2015, 32(3): 565-572. (WANG S B, LI C B, YANG L S, et al. Drought trend analysis based on standardized precipitation index and the Z index in the Tao river Basin [J]. Arid Zone Research, 2015, 32(3): 565-572. (in Chinese) DOI: 10.13866/j.azr.2015.03.21.
- [16] 张岳军, 郝智文, 王雁, 等. 基于SPEI和SPI指数的太原多尺度干旱特征与气候指数的关系[J]. 生态环境学报, 2014(9): 1418-1424. (ZHANG Y J, HAO Z W, WANG Y, et al. Multi-scale characteristics of drought based on SPEI and SPI in association with climate index in Taiyuan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014(9): 1418-1424. (in Chinese) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.09.006.
- [17] 梁哲军, 王玉香, 董鹏, 等. 山西南部季节性干旱特征及综合防御技术[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 281-286. (LIANG Z J, WANG Y X, DONG P, et al. Characteristics of seasonal drought and integrated drought preventing techniques in South Shanxi [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4): 281-286. (in Chinese) DOI: 1000-7601(2016)04-0281-06.
- [18] 谭学志, 粟晓玲, 邵东国. 基于SPI的陕西关中地区气象干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 224-229. (TAN X Z, SU X L, SHAO D G. Analysis of spatial and temporal characteristics of meteorological drought in Guanzhong Region of Shaanxi Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 224-229. (in Chinese) DOI: 1000-7601(2011)02-0224-06.
- [19] 王刚, 严登华, 申丽霞, 等. 近55年以来漳河流域干旱演变特征[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 1-5. (WANG G, YAN D H, SHEN L X, et al. Drought evolution characteristics in the Zhangwei River Basin in recent 55 years [J]. South to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 1-5. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2014.04.001.
- [20] 冯禹, 崔宁博, 徐燕梅, 等. 贵州省干旱时空分布特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(8): 82-86. (FENG Y, CUI N B, XU Y M, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of meteorological drought in Guizhou Province [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(8): 82-86. (in Chinese) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2015.261.
- [21] 杨晓静, 左德鹏, 徐宗学. 基于标准化降水指数的云南省近55年旱涝演变特征[J]. 资源科学, 2014, 36(3): 473-480. (YANG X J, ZUO D P, XU Z X. Characteristics of drought and floods analyzed using the standardized precipitation index in Yunnan Province during the past 55 years [J]. Resources Science, 2014, 36(3): 473-480. (in Chinese) DOI: 1007-7588(2014)03-0473-08.

(下转第81页)

- DUAN Z, WANG W M, et al. Water resources evolution and its influence analysis in Dawen River Basin under the changing environment[J]. Yellow River, 2015, 37(1): 67-69. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2015.01.017.
- [18] 田甜, 黄强, 郭爱军, 等. 基于标准化降水蒸散指数的渭河流域干旱演变特征分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(2): 16-27. (TIAN T, HUANG Q, GUO A J, et al. Drought evolution characteristics in Wei River Basin based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(2): 16-27. (in Chinese) DOI: 10.11660/slfdx.b.20160202.
- [19] 代稳, 吕殿青, 李景保, 等. 1951-2014年洞庭湖水沙阶段性演变特征及驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 142-150. (DAI W, LYU D Q, LI J B, et al. Evolution characteristics and driving factors of runoff and sediment changes in Dongting Lake during 1951-2014[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 142-150. (in Chinese) DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2017.02.02.
- [20] 赵天力, 雷德义, 胡彩虹. 新村流域径流变异诊断及影响因素定量分析[J]. 人民黄河, 2016, 38(9): 19-23. (ZHAO T L, LEI D Y, HU C H. Diagnose and analysis of variation and its inflect factors in Xincun Watershed[J]. Yellow River, 2016, 38(9): 19-23. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2016.09.006.
- [21] 燕华云, 杨贵林, 汪青春. 长江源区径流年内分配时程变化规律分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4): 526-529. (YAN H Y, YANG G L, WANG Q C. Change of annual runoff distribution in the headwaters of the Yangtze River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(4): 526-529. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2006.04.010.
- [22] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [23] KENDALL M G. Rank Correlation Method[M]. London: Charles Griffin, 1975.
- [24] 李玮, 段利民, 刘廷玺, 等. 1961-2015年内蒙古高原内陆河东部流域极端降水时空变化特征分析[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2153-2165. (LI W, DUAN L M, LIU T X, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation from 1961 to 2015 in the Eastern Inland River Basin of Inner Mongolian Plateau[J]. Resource Science, 2017, 39(11): 2153-2165. (in Chinese) DOI: 10.18402/resci.2017.11.13.
- [25] XU J H, CHEN Y N, LI W H, et al. Long term trend and fractal of annual runoff process in mainstream of Tarim River[J]. Chinese Geographical Science, 2008, 18(1): 77-84. DOI: 10.1007/s11769-008-0077-6.
- [26] 曹明亮, 张弛, 周惠成, 等. 丰满上游流域人类活动影响下的降雨径流变化趋势分析[J]. 水文, 2008, 28(5): 86-89. (CAO M L, ZHANG C, ZHOU H C, et al. Analysis of changing trend of rainfall and runoff under the influence of human activities in upstream of Fengman Watershed[J]. Journal of China Hydrology, 2008, 28(5): 86-89. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2008.05.021.
- [27] 姚章民, 杜勇, 张丽娜. 珠江流域暴雨天气系统与暴雨洪水特征分析[J]. 水文, 2015(2): 85-89. (YAO Z M, DU Y, ZHANG L N. Analysis of storm weather system and flood characteristic in Pearl River Basin[J]. Journal of China Hydrology, 2015(2): 85-89. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0852.2015.02.018.

(上接第 65 页)

- [22] 文博. 四川省干旱时空分布特征研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2014. (WEN B. Research on temporal and spatial distribution of drought in Sichuan Province[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2014. (in Chinese))
- [23] 李伟光, 易雪, 车秀芬, 等. 海南岛干湿概况与干旱发生特征[J]. 气象研究与应用, 2011, 32(s2): 53-54. (LI W G, YI X, CHE X F, et al. Characteristics of drought and overview of wet and dry in hainan island[J]. Journal of Meteorological research and application, 2011, 32(s2): 53-54. (in Chinese) DOI: 1673-8411(2011)S2-0053-02.
- [24] 余国云. 丰水区域缺水期水资源调度研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (SHE G Y. Study on water resources scheduling in high water shortage period[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [25] 王胜, 吴坤梯, 陈明. 1961年以来海南岛降水变化趋势分析[J]. 气象研究与应用, 2006, 27(1): 24-27. (WANG S, WU K T, CHEN M. Analysis for precipitation change trend of Hainan Island since 1961[J]. Journal of Guang Xi Meteorology, 2006, 27(1): 24-27. (in Chinese))
- [26] 刘梅, 魏加华, 王峰. 渭河流域降水时空变化与干旱特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 193-197. (LIU M, WER J H, WANG F. Spatiotemporal variations of precipitation and drought characteristics in Wei River Basin[J]. South to North Water Transfer and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 193-197. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nstsdqk.2015.02.001.