

引用格式:刘佳旭,李丽娟,李九一,等.1954–2014年云南省降水变化特征与潜在的旱涝区域响应[J].地球信息科学学报,2016,18(8):1077–1086.
[Liu J X, Li L J, Li J Y, et al. 2016. Characteristics of precipitation variation and potential drought-flood regional responses in Yunnan province from 1954 to 2014 Journal of Geo-information Science, 18(8):1077–1086.] DOI:10.3724/SP.J.1047.2016.01077

1954–2014年云南省降水变化特征与潜在的旱涝区域响应

刘佳旭^{1,2}, 李丽娟^{1*}, 李九一¹, 王志勇^{1,2}, 陈素景^{1,2}, 张 凯^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

Characteristics of Precipitation Variation and Potential Drought-Flood Regional Responses in Yunnan Province From 1954 to 2014

LIU Jiayu^{1,2}, LI Lijuan^{1*}, LI Jiuyi¹, WANG Zhiyong^{1,2}, CHEN Sujing^{1,2} and ZHANG Kai^{1,2}

1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of CAS, Beijing 100049, China

Abstract: Analyzing the characteristics of spatio-temporal variability of precipitation is very important to prepare against droughts and floods. Based on the monthly rainfall data from 1954 to 2014 collected from 32 meteorological sites in Yunnan province, the spatio-temporal variability of the precipitation and drought-flood regional responses were analyzed using the linear regression, RBF spatial interpolation, wavelet analysis, R/S analysis and Z-index. The results show that the precipitation of 3 seasons, except for the spring, has indicated a fluctuant downward trend, and the annual rainfall tends to decrease at a rate of 8.1 mm/10a in the last 61 years in Yunnan province, moreover, the results of wavelet analysis and Hurst index reveal that the precipitation will maintain a decreasing trend in the future. The average annual rainfall decreases gradually from Xishuangbanna to Lijiang-Diqing. Furthermore, the historical precipitation has a primarily downward trend, while secondly an increasing trend in partial areas. Interestingly, the spatial distribution of the decreasing trend has shown a characteristic of symmetry, but the spatial distribution of the increasing trend seems randomly scattered. The periodic oscillation of the annual rainfall is concentrated in the expectant of 2 years, 6 years, 8 years, 18 years and 28 years, and especially in expectant 28 years it has the strongest energy. The rate of drought trend ($K_L=0.359$) is faster than that of flood trend ($K_I=-0.071$), and the downward trend of the annual precipitation can also explain this phenomenon. There are 5 sub-prefectures that the droughts appear more often than the other states in Yunnan province, and which are Diqing, Dehong, Xishuangbanna, Honghe and Chuxiong. In addition, there are 3 sub-prefectures and 2 cities where floods appear frequently, which are Nujiang, Dali, Wenshan, Puer and Shaotong.

Key words: precipitation; drought-flood; wavelet analysis; Z-Index; R/S analysis; Yunnan province

*Corresponding author: LI Lijuan, E-mail: lilj@igsnr.ac.cn

摘要: 本文基于云南省1954–2014年32个气象站点逐月降水量资料,采用线性倾向估计法、径向基函数空间插值法、小波分析法、R/S分析法、Z指数法,分析了61年的云南省降水序列、旱涝情态的时间特征和空间格局。结果表明:在此期间除春季外,其余各季节降水量均呈现减少态势,年降水量总体以8.1 mm/10 a的速率减少,并且在未来一段时间内将保持减少趋势。多年平均降水量由云南省南部的西双版纳州向西北部的丽江市–迪庆州一带逐步减少;年降水量存在准2 a、准6 a、准8 a、准18 a、准28 a的周期性特征,且以准28 a为主周期;干旱化趋势增加速率较快($K_L=0.359$),印证了降水减少态势,洪涝化趋势减小速率相对较慢($K_I=-0.071$);旱灾易发地区主要涉及5个州,分别为迪庆州、德宏州、西双版纳州、红河州、楚雄州;洪涝易发地区涉及3州2市,依次为怒江州、大理州、文山州、普洱市及邵通市。

关键词: 降水;旱涝;小波分析;Z指数;R/S分析;云南省

收稿日期:2015-08-03;修回日期:2015-09-11.

基金项目:国家科技重大专项专题(2013ZX07102-006-04);国家自然科学基金项目(91547114)。

作者简介:刘佳旭(1990–),男,辽宁铁岭人,博士生,研究方向为水文水资源。E-mail: liujx.12b@igsnr.ac.cn

*通讯作者:李丽娟(1961–),女,吉林市人,博士,研究员,主要从事水文与水资源研究。E-mail: lilj@igsnr.ac.cn

1 引言

在全球平均地表温度升高了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1880–2012年)^[1]、全球变暖的背景下,极端降水事件也相应增多^[2],致使众多地区旱涝灾害频繁发生,给人类的生产、生活带来极大影响。干旱、洪涝是中国主要的气象灾害,尤其是干旱,因其出现频率高、持续时间长、波及范围广,历来被人们所关注。旱涝灾害与降水的多少、分布有直接的联系,降水条件的变化还会影响生态系统空间结构^[3]、人类社会经济系统的格局,对人类发展和生态稳定将会造成更大的影响^[4]。因此,对降水时空变异特性、旱涝格局进行研究,不仅可提高抗旱和防洪减灾能力,为提高生态系统结构稳定性做贡献,还能为人类社会经济发展格局的布置、建设提供决策支持^[5]。

目前,许多学者已对降水的时空变异特征及旱涝格局进行了研究,李丽娟等^[6]运用地质统计学的普通 Kriging 法对无定河流域 67 个雨量站数据进行了插值分析及空间变异研究;王璐璐等^[7]采用小波分析方法对海河流域的降水进行了周期性分析;何艳虎等^[8]采用 SPI 和 Z 指数 2 种方法对东江流域近 50 年的旱涝时空格局进行对比分析研究,结果表明,Z 指数对极端旱涝等级具有更好的指示作用;冯新灵等^[9]运用分形理论中的 R/S 分析法对中国近 50 年的降水进行趋势性分析。上述学者对降水空间变异特征及旱涝水平从不同角度进行了研究,但都没有能够将二者结合分析。由于降水的多少、分布是旱涝灾害发生的根本原因,因此,同时研究降水的时空变异特性和旱涝空间格局的响应具有重要意义。在云南省,也少有学者将降水特征与旱涝格局进行结合分析,缪启龙和肖伟^[10]较早地对云南省降水量进行距平场分析;尤卫红等^[11]和郑建萌等^[12]运用小波分析法对云南省降水量进行了周期性分析;刘丽和陶云^[13]对云南极端强降水事件频数进行了时空分布特征诊断;杨晓静等^[14]基于 SPI 对云南省近 55 年旱涝演变特征进行了分析。

空间分析、周期性研究是对事物进行认知、理解和评价的重要方法与手段^[15–16]。自 2009 年开始云南省遭遇连续 4 年大旱,其影响范围之广、持续时间之长均为历史少有现象,因此在全球气候变化大背景下研究云南省旱涝演变特征具有重要意义。目前,对云南省降水的时空变化、旱涝格局特征的全面、详细研究还有待深入,故本文针对上述站点

数量较少、时间序列长度较短、研究内容较为单一等问题,开展了云南省降水变化特征、旱涝格局响应研究。

2 研究区地理特征与数据源

2.1 地理特征

云南省地处中国西南边陲($21^{\circ}9'\sim 29^{\circ}15'\text{ N}$, $97^{\circ}32'\sim 106^{\circ}12'\text{ E}$ 之间),设有地级市 8 个、少数民族自治州 8 个;全境总面积 $39.4\times 10^4\text{ km}^2$,占中国陆地总面积的 4.1%,居全国第 8 位。全省土地面积中,山地约占 84%,高原、丘陵约占 10%,盆地、河谷约占 6%。地势主要为西北高、东南低,平均海拔 2000 m 左右,最高海拔 6740 m (卡瓦格博峰),最低海拔 76.4 m (河口县的元江河谷)。云南地处低纬度高原,地理位置特殊,地形地貌复杂。另外,气候也很复杂,主要受南孟加拉高压气流影响形成高原季风气候,全省大部分地区具有冬暖夏凉,四季如春的气候特征。多年平均降水量为 1110 mm,且年内和区域内部分配不均,风向以偏西南风为主;主要河流包括澜沧江,金沙江和南盘江等(图 1)。

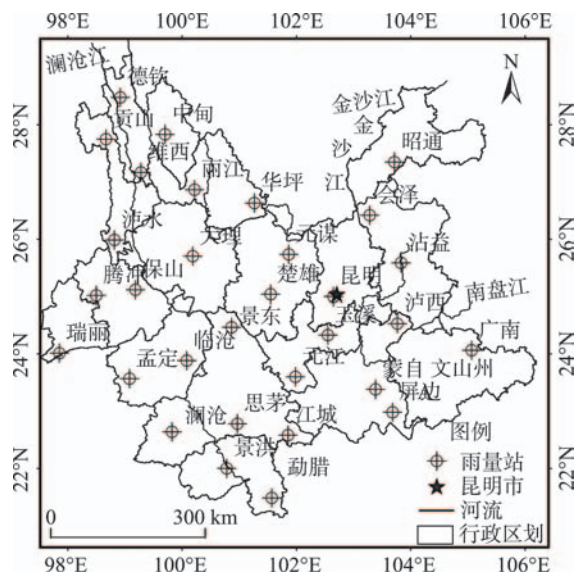


图 1 研究区概况及气象站分布

Fig. 1 Basin profile and the distribution of meteorological stations in the study area

2.2 数据来源

本文选择“中国气象科学数据共享服务网”提供的云南省内各气象站降水量数据,通过剔除系列较短、完整性较差的部分站点后,保留 32 站(图 1),时间系列从 1954–2014 年,61 年的月尺度数据资料,

对个别站点缺测、漏测的数据,查找“藏滇国际河流水文资料”补充,及采用临近2-3个站点的相关性分析,通过插值得得。

3 降水特征分析方法

3.1 线性倾向估计法

线性倾向估计法为常用的一元线性回归模型,用于分析时间序列的增、减趋势及变化幅度。其回归常数和系数可由最小二乘法估计,相关系数(趋势系数) r (式(1))表征因变量 y 与自变量 t 的相关性大小, r 越趋近于1相关性越好,越趋于0,则相关性越差。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}} \quad (1)$$

由于 r 的概率密度函数正好符合 T 分布的密度函数(式(2)),因此可用 T 检验来对其进行显著性检验,自由度为 $n-2$,给定显著性水平 $\alpha=0.1$,若 $|T|>1.67$,则表明变化趋势显著(通过90%的显著性检验)^[17-18]。

$$T = r \times \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (2)$$

3.2 小波分析法

该方法用于识别降水系列的周期性特征。小波分析在傅里叶变换的基础上引入了窗口函数,允许把一个时间序列分解为时间和频率的贡献,对于给定的母小波函数 $\Phi(t)$,时间系列 $f(t)$ 的小波变换离散式如式(3)所示。

$$W_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{i=1}^n f(i\Delta t) \Phi\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right) \quad (3)$$

式中: $W_f(a,b)$ 为小波系数; a 为频率参数,表示波动的周期性; b 为时间参数,表示波动在时间上的平移特性; Δt 为取样间隔^[19-21]。

将关于 a 的时间域上的所有小波变换系数 W_f 的平方和进行积分,即可求得小波方差 Var (式(4))。

$$Var(a) = \sum_{i=1}^n (W_f(a,b))^2 \quad (4)$$

小波方差 $Var(a)$ 随尺度 a 的变化过程称为小波方差图。该图反映了波动的能量随时间尺度的分

布,可分辨出某一时段的主导周期成分^[22-23]。

3.3 R/S分析法

R/S分析法又称为重新标度的极差分析(Rescaled Range Analysis),最早由英国学者Hurst提出^[24],随后由Mandelbrot和Wallis^[25-26]等从理论上对该方法进行了补充与完善,通常用于分析时间序列的分形特征和长期记忆过程^[27-28]。

实际的时间序列 $\{x(t)\} (t=1,2,\dots,n)$,对于任意自然数 $\tau \geq 1$,定义均值序列为 x_τ 、累计离差序列为 $X(t,\tau)$ 、极差序列为 $R(\tau)$ 、标准差序列为 $S(\tau)$ 、具体计算公式分别如式(5)–(8)所示。

$$x_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} x(i) \quad (5)$$

$$X(t,\tau) = \sum_{i=1}^{\tau} [x(i) - x_\tau] \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (6)$$

$$R(\tau) = \max X(t,\tau) - \min X(t,\tau) \quad (7)$$

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (x(i) - x_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Hurst研究发现极差序列与标准差序列存在特定的函数关系(式(9))。

$$R(\tau)/S(\tau) = (\alpha\tau)^H \quad (9)$$

式中: α 为常量; H 为Hurst指数。不同的 H 值范围代表系列的不同意义: $H=0.5$,表明时间序列完全独立、随机分布,前后变化无相关性; $0.5 < H < 1$,表明时间序列具有持久性或长期记忆特性,未来的变化趋势与原系列趋势一致; $0 < H < 0.5$,表明未来的变化趋势与原系列趋势相反(反持续性);且 H 越接近于1,持续性越强; H 越接近于0,反持续性越强^[29]。

3.4 Z指数法

该方法可从降水量角度表征某一区域的潜在旱涝程度,此处的“潜在”是指旱涝发生的可能性。旱涝一般是降水、下垫面和社会发展情况共同作用的结果,但由于下垫面情况不断变化及社会发展因子难以确定,加上数据资料匮乏,难以全面考虑众多因素来分析旱涝情形。鉴于降水作为旱涝的主要因子和先决条件,本文仅从降水量的角度来分析潜在的旱涝程度响应。一般来讲,年降水量 P 不服从正态分布,而是服从Person-III型分布,当对降水量序列进行正态化处理后,可以将概率密度函数从Person-III型分布转变成以 Z 为变量的标准正态分布^[30],如式(10)–(12)所示。

$$Z_j = \frac{6}{C_s} \times \left(\frac{C_s \Phi_j}{2} + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (10)$$

$$C_s = \frac{\sum_{j=1}^n (p_j - \bar{p})^3}{n\sigma^3} \quad (11)$$

$$\Phi_j = \frac{p_j - \bar{p}}{\sigma} \quad (12)$$

式中： Z_j 为某一站点第 j 年的 Z 指数； C_s 为偏态系数； Φ_j 为降水量标准化变量； p_j 为第 j 年降水量； n 为系列长度； \bar{p} 为降水系列均值， σ 为系列标准差，可由式(13)–(14)计算。

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_j \quad (13)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (p_j - \bar{p})^2} \quad (14)$$

鞠笑生等^[31]在盛承禹等^[32]单站研究的基础上，给出了区域旱涝情况的评价方法(式(15)、(16))和指标(表1)。

$$I = \frac{1}{m} (2k_1 + k_2 + k_3) \times 100\% \quad (15)$$

$$L = \frac{1}{m} (2k_7 + k_6 + k_5) \times 100\% \quad (16)$$

表1 旱涝等级指标

Tab. 1 Drought-flood level indicators

单站等级指标			区域等级指标		
Z指数	等级	类型	指标	等级	类型
$Z > 1.645$	1	重涝	$I > 50$	1	大涝
$1.037 < Z \leq 1.654$	2	大涝	$35 < I \leq 50$	2	涝
$0.842 < Z \leq 1.037$	3	偏涝	$3 < (I-L) \leq 35$	3	偏涝
$-0.842 < Z \leq 0.842$	4	正常	$ I-L \leq 3$	4	正常
$-1.037 < Z \leq -0.842$	5	偏旱	$3 < (L-I) \leq 35$	5	偏旱
$-1.654 < Z \leq -1.037$	6	大旱	$35 < L \leq 50$	6	旱
$Z \leq -1.654$	7	重旱	$L > 50$	7	大旱

式中： k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_5 、 k_6 、 k_7 分别为研究区内旱涝等级为1、2、3、5、6、7级的站点数目， m 为区域站点总数。

4 结果分析

4.1 降水时空变化特征分析

4.1.1 降水时间变化特征

(1)四季降水时间变化特征。云南省春季降水量呈现增加趋势(4.8 mm/10 a)，其余各季节降水量

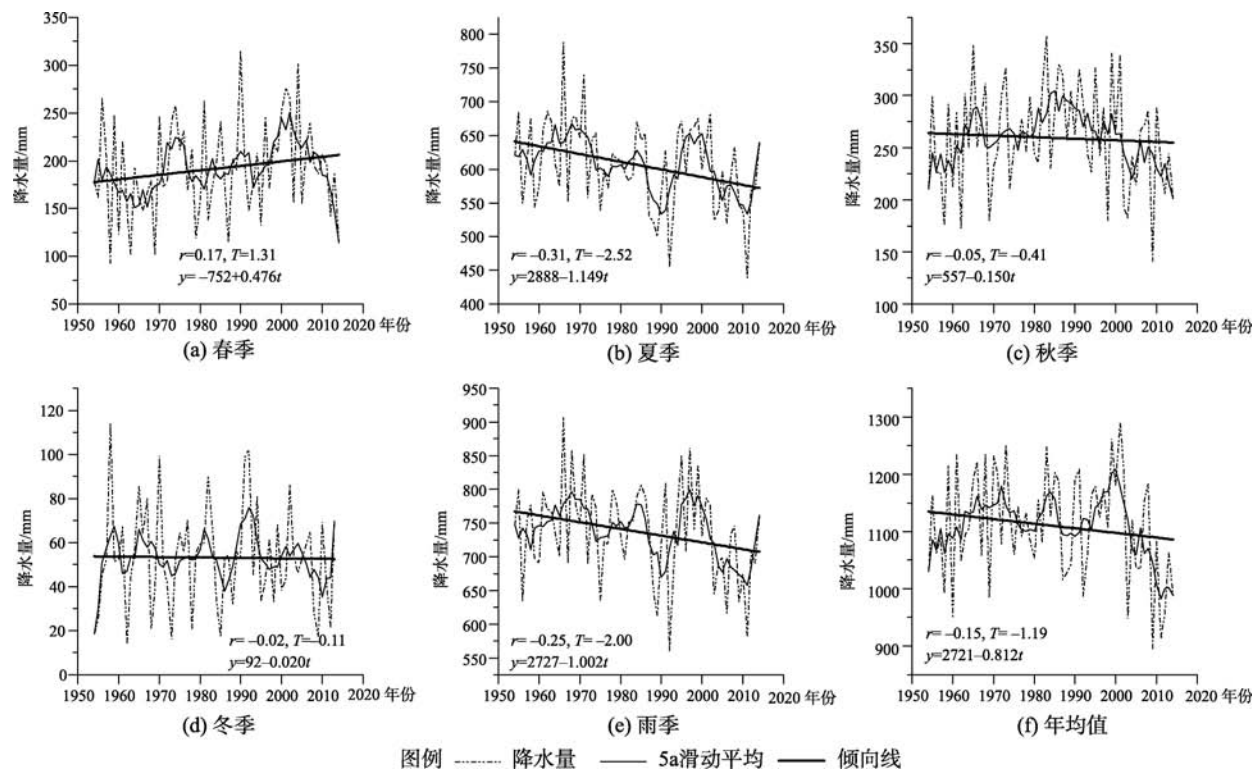


图2 不同时间尺度的降水变化趋势

Fig. 2 Changing trends of precipitation at different time scales

都为下降趋势,其中,夏季倾向率最大(11.5 mm/10a),冬季最小(0.2 mm/10 a);在四季中,仅夏季的变化趋势显著($|T_{\text{夏}}|=2.52>1.67$),其余各季变化趋势均未通过置信度为90%的显著性检验(图2)。从5年滑动平均曲线来看,各季节变化阶段、趋势各不相同,春季主要呈现出“下降(1965年)→上升(1975年)→下降(1993年)→上升(2002年)→下降(2014年)”过程,夏季主要表现为“上升(1969年)→下降(1990年)→上升(1998年)→下降(2011年)→上升(2014年)”过程,秋季主要表现为“上升(1965年)→下降(1976年)→上升(1985年)→下降(2014年)”过程,冬季降水变化过程波动较多,升降主体趋势为“上升(1960年)→下降(1987年)→上升(1993年)→下降(2010年)→上升(2014年)”过程;综合来看,云南省降水的下降趋势处于主导地位。

(2)雨季和年平均降水时间变化特征。云南省雨季和年均值降水量均呈现减少趋势,倾向率分别为10.0 mm/10a(显著)和8.1 mm/10 a(不显著)。从5年滑动平均曲线来看,雨季过程与夏季过程基本一致,年平均雨量主要表现为“上升(1973年)→下降(1980年)→上升(1985年)→下降(1991年)→上

升(2001年)→下降(2014年)”过程;综合分析图2可知,云南省1954–2014年降水量呈现下降趋势,主要是夏季、秋季降水减少引起了雨季和年降水的下降过程,尽管春季降水呈现上升态势,但对年降水的趋势影响贡献不大。

4.1.2 降水空间分布特征

在插值过程中,为使边界部分插值更加准确、合理,增加了云南省周边地区的一些气象站数据资料(16个),利用各站点均值资料,采用径向基函数(Radial Basis Function)方法进行空间插值计算。

云南省各季节降水量多少不一,主要表现为夏季降水量最多,其次为春季、秋季,冬季最少(图3)。从空间分布情况来看,四季、雨季和年均的降水量总体布局情况十分相似,主要表现为等雨量线由南部(西双版纳州)向西北部(丽江市、迪庆州)一带逐步减少,南部普洱市、西双版纳州、红河州一带通常为降水高值地带,且易于在普洱市的江城站和澜沧站形成降水高值区,此外,在怒江州贡山站附近形成相对高值区;降水低值地带主要分布于云南省北部(昆明市、楚雄市)及西北部(丽江市及迪庆州一带),易于在迪庆州北部德钦站附近形成降水低值

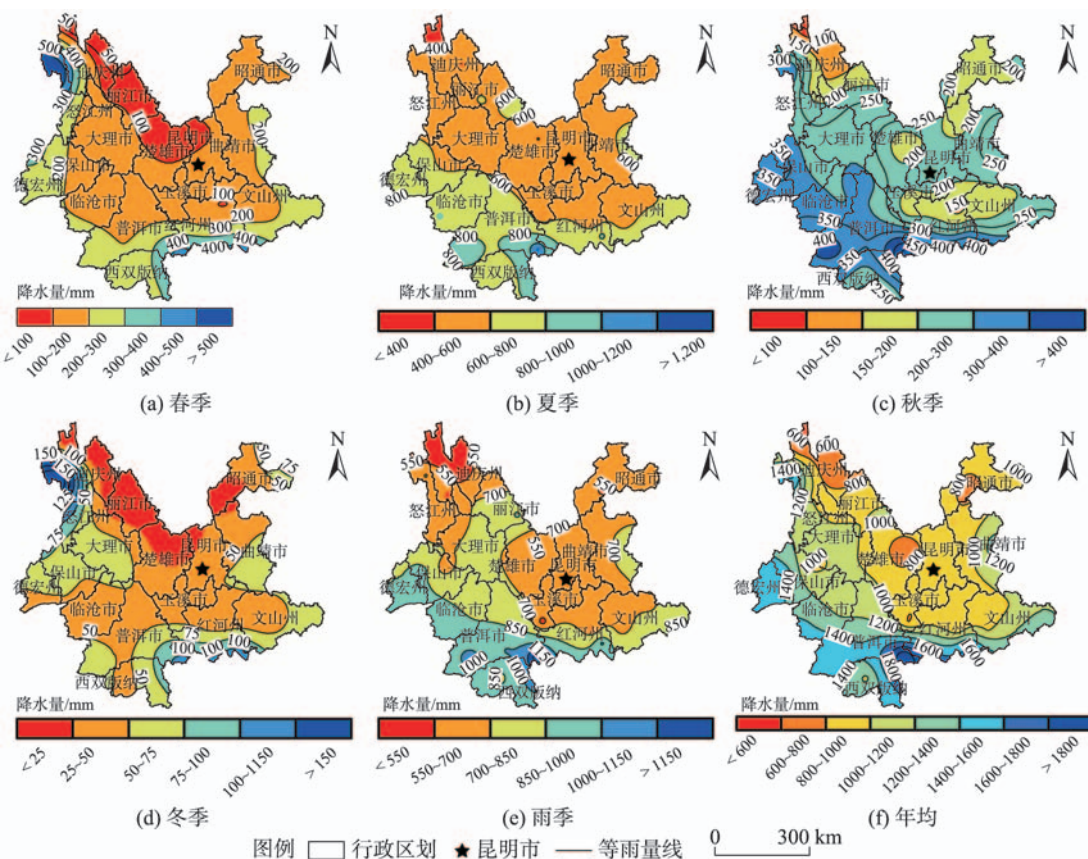


图3 不同时间尺度的降水量空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of precipitation at different time scales

区。上述降水格局的形成原因,可以从风向和地形2个方面来解释,云南省主要受控于南孟加拉高压气流,易受到偏南季风影响,西北部地区地势相对较高,地形起伏较大,对携带水汽的风抬升作用明显,局地地形效应显著;因此,才形成了南多北少,局地高值的降水分配格局。

云南省降水量历史趋势呈现减少趋势,且具有一定对称性特征(图4)。呈减少趋势的地区空间分布具有一定地带性规律特征,其中处于 $-1\sim 0$ mm/a区间的地区较为集中,分布于云南省中部地区,呈现为NNW-SSE方向的条带,由此区域边界分别向西南、东北方向依次减少,降水趋势分别经历 $-1\sim -2$ mm/a, $-2\sim -3$ mm/a条带区域,以及局地 $-3\sim -4$ mm/a(孟定和沾益周边),其中孟定站的历

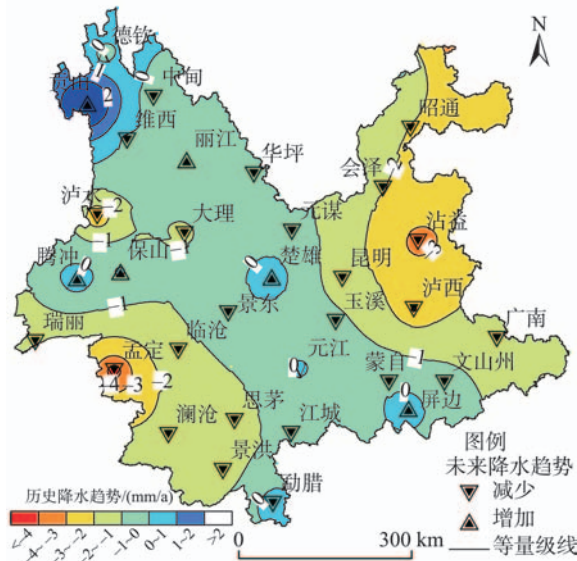


图4 降水量变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of precipitation trends

史趋势小于 -4 mm/a,为云南省降水量历史趋势减小幅度最大的地区。呈现增加趋势的地区空间分布较为零散,无明显规律,主要包括丽江、保山、元江、屏边、勐腊、楚雄、腾冲、贡山等站点周边地区,其中贡山地区降水量趋势增幅最大(大于2 mm/a),其他地区多数处于 $0\sim 1$ mm/a区间。

4.2 降水周期性特征

利用Morlet小波^[33-34],对云南省降水的周期性特征进行分析,利用小波系数的实部和方差可展示出降水系列的周期性振荡特性(图5)。图5(a)中,等值线为正(红色实线)表示降水较多时期,处于1970年前后及2000年前后;等值线为负(蓝色点划线)表示降水较少时期,处于1960年前后、20世纪80年代及21世纪初期。此外,在不同的时间尺度上,正负相位交替性变化较为明显,周期性振荡比较强烈;在年际尺度上,主要存在5~6年和8~9年的振荡周期;在年代际尺度上,主要存在16~18年和28年左右的周期振荡。结合图5(b)可看出,在年际尺度上,存在着2.5、5.8和8.3年的周期;在年代际尺度上,存在17.5、27.8年的周期,以准28年周期为主导,振荡最为强烈。

由图5(a)分析可知,2014年后云南省正处于16~18年和28年长周期的少降水期,且刚刚度过少水期的核心时段;对于短周期5~6年,2014年也正处于该短周期的末尾1/4处。因此,可以表明云南省总体降水量水平,在未来的近期年份内仍将维持偏少态势。

4.3 降水持续性特征

利用Hurst指数判定云南省各个气象站点及不

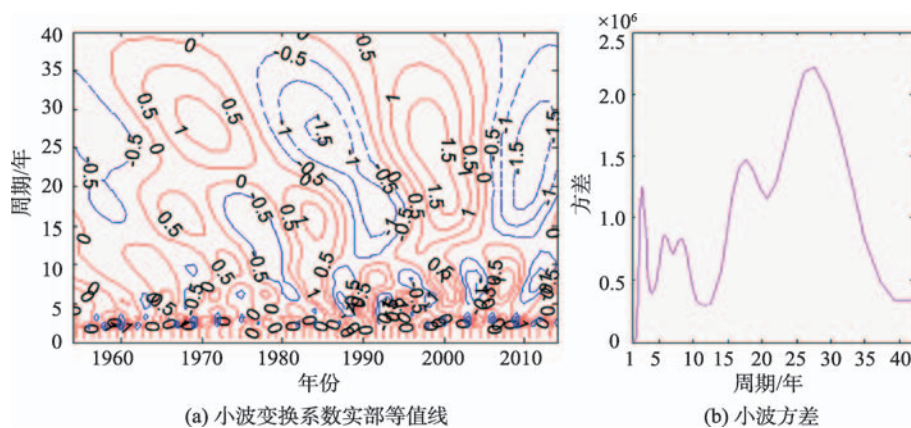


图5 小波分析结果

Fig. 5 The result of wavelet analysis

表2 降水系列的R/S分析结果
Tab. 2 The result of R/S analysis for precipitation series

序号	站点	H	R ²	历史趋势	未来趋势
1	德钦	0.74	0.98	减	减
2	贡山	0.78	0.98	增	增
3	玉溪	0.61	0.88	减	减
4	中甸	0.66	0.96	减	减
5	沾益	0.63	0.95	减	减
6	广南	0.67	0.97	减	减
7	文山州	0.66	0.95	减	减
8	屏边	0.59	0.96	增	增
9	澜沧	0.64	0.98	减	减
10	蒙自	0.55	0.89	减	减
11	江城	0.62	0.94	减	减
12	元江	0.58	0.88	增	增
13	勐腊	0.47	0.80	增	减
14	思茅	0.53	0.88	减	减
15	景洪	0.89	0.96	减	减
16	临沧	0.62	0.94	减	减
17	景东	0.62	0.87	减	减
18	孟定	0.87	0.94	减	减
19	泸西	0.71	0.83	减	减
20	瑞丽	0.56	0.93	减	减
21	维西	0.53	0.90	减	减
22	楚雄	0.70	0.91	增	增
23	昆明	0.63	0.95	减	减
24	元谋	0.56	0.95	减	减
25	大理	0.55	0.94	减	减
26	保山	0.57	0.97	增	增
27	泸水	0.74	0.90	减	减
28	昭通	0.72	0.89	减	减
29	丽江	0.61	0.95	增	增
30	华坪	0.51	0.92	减	减
31	腾冲	0.84	0.91	增	增
32	会泽	0.78	0.90	减	减
全省	春季	0.72	0.94	增	增
	夏季	0.76	0.97	减	减
	秋季	0.72	0.95	减	减
	冬季	0.42	0.85	减	增
	雨季	0.62	0.97	减	减
	年值	0.70	0.91	减	减

同时间尺度的降水持续性特征,在32个站点中(表2,图4),H指数小于0.5的仅有勐腊站(0.47),未来变

化趋势与历史趋势相反,其余站点则保持原系列趋势;各站点R²均大于0.8,相关性较好;历史变化趋势呈现减少趋势的居多(24个),增加趋势的仅有8个站点;未来变化趋势依然是以呈现减少态势的站点为主(25个),增加趋势的站点为7个(分布于云南省中部地区,处于NNW-SSE方向的条带内)。从云南省整体角度分析,仅冬季(0.42)的H指数小于0.5,未来变化趋势与其历史趋势相反;各季节、雨季、年值的R²均大于0.85,相关性更好;仅春季的历史变化趋势为增加态势,且在未来还会继续保持增加趋势;在未来趋势变化中,春季和冬季的趋势有增加态势,其余季节、雨季和年尺度的降水量都将维持继续减少的趋势。从年尺度结果来看,云南省降水量具有明显的Hurst现象,且R/S结果与小波分析结果一致,达到相互印证的目的,表明了云南省年降水量具有持续性特征,在未来一段时间内降水量将保持减少趋势。

4.4 旱涝格局响应

利用Z指数从降水量角度来评价云南省整体旱涝水平(图6)。1954–2014年,云南省雨涝指标I有减少趋势($K_I=-0.071$,图6(a)),干旱指标L有增加趋势($K_L=0.359$,图6(b)),且干旱趋势增加速率大于雨涝减小速率,符合降水量呈现逐年减少趋势的结果。云南省发生大涝年9年,涝的年10年,大旱年10年,旱的年4年,其余共计28年(图6(c),等级标准见表1);旱情较为严重的时段分布于1960年前后、1990年前后、2004年前后,以及2009年以后;洪涝较为严重的时段主要分布于20世纪60年代末至70年代初,以及21世纪初期。

为探索云南省旱涝空间格局态势,选择各站点除去正常年外出现频率最高的旱涝等级进行径向基函数(RBF)法空间插值(图7)。云南省旱、涝地区具有一定的交替性,其中,旱灾易发区主要分布在西北部德钦–中甸站一带,西部瑞丽–腾冲站片区,西南部澜沧–景洪–勐腊站沿线地带,东南部泸西–蒙自站片区,以及北部元谋–楚雄站片区;洪涝易发区主要分布于东南部屏边–文山州–广南站一带,孟定–临沧–思茅–元江–玉溪站沿线以北地带,会泽–邵通以北片区,大理–华坪–丽江站片区,以及贡山站局部点区。从行政区划角度,旱灾易发地区主要涉及迪庆州北部,德宏州西部,西双版纳州西南部,红河州东部及东北部,楚雄州北部等地区;洪

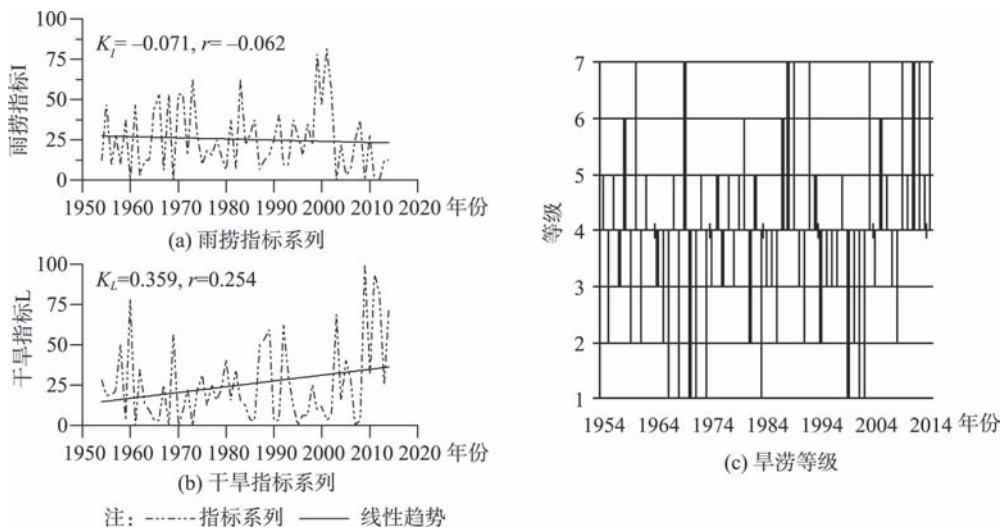


图6 区域旱涝指数变化及旱涝等级

Fig. 6 Changing trends and grades of the regional flood and drought indices

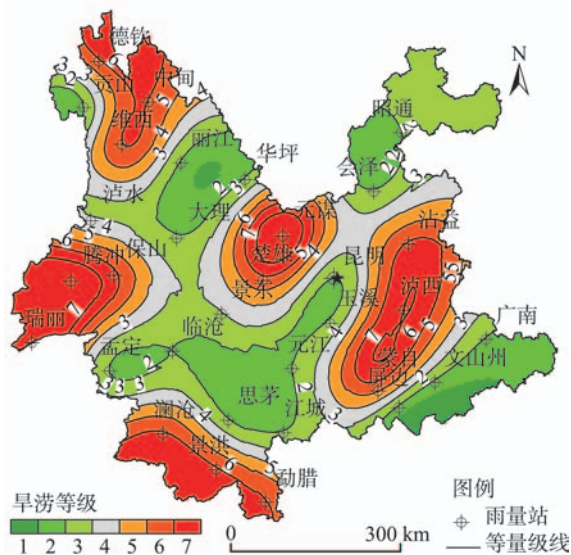


图7 旱涝等级空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of grades for droughts and floods

涝易发地区主要涉及怒江州北部,大理州东北部,普洱市南部大部分,文山州南部边缘,及邵通市西南部等地区。

5 结论

(1)1954–2014年云南省降水量呈现减少趋势,降水倾向率为8.1 mm/10 a。仅春季降水量呈现增加趋势,其余各季节降水量都为下降趋势。年平均

雨量主要表现为“上升–下降–上升–下降–上升–下降”过程。

(2)云南省降水量空间分布不均,但总体分布较为稳定,降水量由西双版纳州向丽江市–迪庆州一带逐步减少,在江城–澜沧站片区易形成降水高值区,降水低值区主要分布于云南省北部及西北部一带,以及德钦站周边。此外,历史变化趋势以减少为主,局部增加为辅,且减小趋势空间分布具有一定对称性,增加趋势地区分布零散。

(3)云南省年降水量的变化存在多个振荡周期,年际尺度上主要存在准2年、准6年、准8年的周期;在年际尺度上存在准18年、准28年的长周期,且以准28年长周期为主导;小波分析和Hurst指数结果均表明,云南省年降水量在未来一段时间内将保持减少趋势。

(4)云南省干旱趋势增加速率快于洪涝趋势减小速率,在未来一段时间内,干旱发生的频率将有所增加,洪涝发生频率相应减少。旱灾易发区主要包括2带3片,洪涝易发区主要包括2带2片1点。从行政区划角度,旱灾易发地区涉及迪庆州、德宏州、西双版纳州、红河州、楚雄州5个州,洪涝易发地区涉及3州2市(怒江州、大理州、文山州、普洱市、邵通市等)。

参考文献(References):

[1] 秦大河,Thomas Stocker. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J].气候变化研究进展,2014,10(1):1-

6. [Qin D H, Thomas Stocker. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2014,10(1):1-6.]
- [2] Zheng P N, Li Z Q, Bai Z P, *et al.* Influence of climate change to drought and flood[J]. Disaster Advances, 2012, 5(4):1331-1334.
- [3] Houghton R A, Skole D L, Nobre C A, *et al.* Annual fluxes or carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon[J]. Nature, 2000,403(6767):301-304.
- [4] Dobson A P, Bradshaw A D, Baker A J M. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation biology[J]. Science, 1997,277(5325):515-522.
- [5] 刘佳旭,李丽娟,李九一,等.滇池流域降水时空变异特征分析[J].地球信息科学学报,2015,17(4):451-461. [Liu J X, Li L J, Li J Y, *et al.* An analysis on the spatio-temporal variability of precipitation in Dianchi basin[J]. Journal of Geo-Information Science, 2015,17(4):451-461.]
- [6] 李丽娟,王娟,李海滨.无定河流域降雨量空间变异性研究[J].地理研究,2002,21(4):434-440. [Li L J, Wang J, Li H B. Analysis of the spatial variability of rainfall in Wuding river basin[J]. Geographical Research, 2002,21(4): 434-440.]
- [7] 王璐璐,延军平,王鹏涛,等.海河流域不同等级降水时空变化特征及其影响[J].资源科学,2015,37(4):690-699. [Wang L L, Yan J P, Wang P T, *et al.* Spatial-temporal variation in precipitation for different categories and impacts in the Haihe river basin[J]. Resources Science, 2015,37(4):690-699.]
- [8] 何艳虎,陈晓宏,林凯荣,等.东江流域近50年旱涝时空演变特征[J].地理科学,2014,34(11):1391-1398. [He Y H, Chen X H, Lin K R, *et al.* Characteristic of the spatio-temporal distribution of droughts and floods in the Dongjiang basin in recent 50 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 2014,34(11):1391-1398.]
- [9] 冯新灵,罗隆诚,冯自立.中国近50年降水变化趋势及突变的Hurst指数试验[J].干旱区地理,2009,32(6):859-866. [Feng X L, Luo L C, Feng Z L. Hurst index experiment on precipitation change trend and mutation of China in the near 50 years [J]. Arid Land Geography, 2009, 32(6):859-866.]
- [10] 缪启龙,肖伟.云南省40年降水的基本特征[J].气象科学, 1995(3):293-299. [Liao Q L, Xiao W. The basic precipitation features of Yunnan province in recent 40 years[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 1995,3:293-299.]
- [11] 尤卫红,段旭,杞明辉.连续小波变换在云南近百年气温和降水变化分析中的应用[J].高原气象,1999,18(1):48-55. [You W H, Duan X, Qi M H. Continuous wavelet transforms and their applications to surface air temperature and yearly precipitation variations in Yunnan during last one hundred years[J]. Plateau Meteorology, 1999,18 (1):48-55.]
- [12] 郑建萌,任菊章,张万诚.云南近百年来温度雨量的变化特征分析[J].灾害学,2010,25(3):24-31. [Zheng J M, Ren J Z, Zhang W C. Analysis on variation characteristics of temperature and rainfall in Yunnan in the last 100 years[J]. Journal of Catastrophology, 2010,25(3):24-31.]
- [13] 刘丽,陶云.云南省汛期极端强降水事件的气候特征[J].干旱气象,2012,30(1):15-20. [Liu L, Tao Y. Climatic characteristics of extremely heavy precipitation events in flood season in Yunnan province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2012,30(1):15-20.]
- [14] 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 droughts and floods analyzed using the standardized precipitation index in Yunnan province during the past 55 years [J]. Resources Science, 2014,36(3):473-480.]
- [15] 王劲峰,李连发,葛咏,等.地理信息空间分析的理论体系探讨[J].地理学报,2000,55(1):92-103. [Wang J F, Li L F, Ge Y, *et al.* A theoretic framework for spatial analysis [J]. Acta Geographica Sinica, 2000,55(1):92-103.]
- [16] Chang K. Introduction to geographic information systems [M]. New York: McGraw-Hill, 2010.
- [17] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007. [Wei F Y. Statistical diagnosis and prediction technology of modern climate[M]. Beijing: China Meteorological Press,2007.]
- [18] 姚治君,姜丽光,吴珊珊,等.1956-2011年金沙江下游梯级水电开发区降水变化特征分析[J].河海大学学报(自然科学版),2014,42(4):289-296. [Yao Z J, Jiang L G, Wu S S, *et al.* Analysis of characteristics of precipitation variation in cascade hydropower development zone in lower reaches of Jinsha River during period from 1956 to 2011[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2014,42(4):289-296.]
- [19] Percival D B, Walden A T. Wavelet methods for time series analysis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [20] 邵晓梅,许月卿,严昌荣.黄河流域降水序列变化的小波分析[J].北京大学学报(自然科学版),2006,42(4):503-509. [Shao X M, Xu Y Q, Yan C R. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow river basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006,42 (4):503-509.]

- [21] 李森,夏军,陈社明,等.北京地区近300年降水变化的小波分析[J].自然资源学报,2011,26(6):1001-1011. [Li M, Xia J, Chen S M, *et al.* Wavelet analysis on annual precipitation around 300 years in Beijing area[J]. Journal of Natural Resources, 2011,26(6):1001-1011.]
- [22] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998,79(1):61-78.
- [23] 吴洪宝,吴蕾.气候变率诊断和预测方法[M].北京:气象出版社,2005. [Wu H B, Wu L. Diagnosis and prediction method of climate change rate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005.]
- [24] Hurst H E. Long-term storage of reservoirs[J]. Trans Am Soc Civ Eng, 1951,116:772-785.
- [25] Mandelbrot B B, Wallis J R. Some long-run properties of geophysical records[J]. Water Resources Res., 1969,5(2): 321-340.
- [26] Mandelbrot B B, Wallis J R. Robustness of the rescaled range R/S in the measurement of noncyclic long-run statistical dependence[J]. Water Resources Res., 1969,5(5): 967-988.
- [27] Demetris Koutsoyiannis. Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics[J]. Hydrological Sciences Journal, 2003,48(1):3-24.
- [28] 陈彦光.基于Matlab的地理数据分析[M].北京:高等教育出版社,2012. [Chen Y G. Geographic data analysis based on Matlab [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012.]
- [29] 江田汉,邓莲堂.Hurst指数估计中存在的若干问题——以在气候变化研究中的应用为例[J].地理科学,2004,24(2):177-182. [Jiang H T, Deng L T. Some problems in estimating a Hurst exponent — A case study of applications to climatic change [J]. Scientia Geographica Sinica, 2004,24(2):177-182.]
- [30] Kife G W. Frequency and Risk Analysis in Hydrology. Colorado: Water Resources Publication, 1978.
- [31] 鞠笑生,杨贤为,陈丽娟,等.我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J].应用气象学报,1997,8(1):27-34. [Ju X S, Yang X W, Chen L J, *et al.* Research on determination of station indexes and division of regional flood/drought grades in China[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 1997,8(1):27-34.]
- [32] 盛承禹,陆渝蓉,汤克靖,等.中国气候总论[M].北京:科学出版社,1986. [Sheng C Y, Lu Y R, Tang K J, *et al.* China's climate statement [M]. Beijing: Science Press, 1986.]
- [33] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005. [Wang W S, Ding J, Li Y Q. Wavelet analysis on hydrology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.]
- [34] De Jongh I L M, Verhoest N E C, De Troch F P. Analysis of a 105-year time series of precipitation observed at Uccle, Belgium[J]. International Journal of Climatology, 2006,26(14):2023-2039.