

吉曹翔,李崇,陈鹏心,等. 沈阳市降水量正态分布检验及其时空变化特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(6): 954-962. [JI Caoxiang, LI Chong, CHEN Pengxin, et al. Normal Distribution Test and Space-time Characteristics of Precipitation in Shenyang of Liaoning Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(6): 954-962], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0954

沈阳市降水量正态分布检验及其时空变化特征

吉曹翔¹, 李崇¹, 陈鹏心¹, 班伟龙¹,
白冰², 宋晓巍¹, 金字³, 梁红¹

(1. 辽宁省沈阳市气象局, 辽宁 沈阳 110168; 2. 甘肃省气象信息与技术装备保障中心, 甘肃 兰州 730020; 3. 辽宁省沈阳市沈北新区气象局, 辽宁 沈阳 110135)

摘要:利用辽宁沈阳市1960—2017年5个国家级气象站逐月降水量资料,分析沈阳市不同时间尺度降水的时空分布特征,并采用偏度-峰度系数和S-W检验法,对沈阳市降水量的正态性分布进行检验。结果表明,除新民外,沈阳市其他地区年降水量均满足正态分布;春季降水量的正态性最好,冬季降水量基本不满足正态分布;月降水量的正态性较差,经过正态变换后的正态性均得到明显改善。沈阳市年平均降水量呈自东南向西北逐渐递减的空间分布特征,且近58 a来年降水量整体呈微弱减少趋势。

关键词:沈阳;降水量;正态性分布;正态变换

文章编号:1006-7639(2018)06-0954-09 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-06-0954

中图分类号:P423.36

文献标志码:A

引言

降水是最基本的气象要素,是决定天气、气候特征的关键因子,对区域水资源时空分布、生态环境形成与演变以及农业生产等起着决定性作用^[1]。因此,降水的时空分布与人类的生产生活密切相关,一直是气象研究的重要课题^[2-4]。降水作为天气、气候特征的重要要素,在资料的非均一性检验^[5-6]、短期气候预测和气候变化^[7]等研究中,往往需要降水时间序列满足正态分布,但实际上降水序列并不能很好地满足正态分布,因此开展降水量的正态分布研究具有重要的理论和现实意义。

在全球气候变暖背景下,极端天气、气候事件频发,特别是降水的时空分布格局发生了明显变化,降水量的区域分异具有更大的不确定性^[8-9],给人类生存环境造成重大影响,降水的正态分布特征研究受到高度重视。国内外学者针对不同区域尺度的降水量正态性特征进行了研究^[7,10-17],发现服从正态分布的降水量具有明显的季节性和地域性,不同地

区的降水量资料存在差异,正态性检验结果也不尽相同。

辽宁省沈阳市春、冬季降水严重缺少,易形成干旱,而夏季强降水较集中,易造成洪涝灾害。在全球气候变暖背景下,沈阳市降水资料的正态性分布特征如何?全市各站点是否一致?为此,本文利用1960—2017年沈阳市5个气象站逐月降水资料,采用偏度-峰度系数和S-W检验法,对不同时间尺度降水量的正态性分布进行检验,同时分析区域降水变化特征,以期对沈阳市降水的气候预测提供理论基础。

1 资料与方法

1.1 研究区域概况

沈阳市位于辽宁省辽河平原中部(41°12'N—42°17'N,122°25'E—123°48'E),全市辖新民、辽中、康平、法库4县(市),以及和平、皇姑、大东、浑南、沈北、苏家屯、沈河、铁西和于洪等9区组成的城区

收稿日期:2017-10-25;改回日期:2018-09-20

基金项目:沈阳市气象局2016年山洪地质灾害防治气象保障工程和沈阳市气象局研究项目“基于ArcGIS Engine的气象要素可视化的设计与实现”共同资助

作者简介:吉曹翔(1985—),男,江苏海安人,工程师,主要从事气象信息网络维护工作. E-mail:316526613@qq.com.

通信作者:梁红(1966—),女,辽宁沈阳人,高级工程师. E-mail:syzmj@sina.com.

(图1)。境内以平原为主(主要集中在新民、辽中以及城区中西部),山地、丘陵集中在东北部(法库中部及东北部、康平中南部及西北部、沈北东部以及浑南东部),地势由东北向西南逐渐倾斜。该区属于温带季风型大陆性气候,四季分明,温差较大,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨。

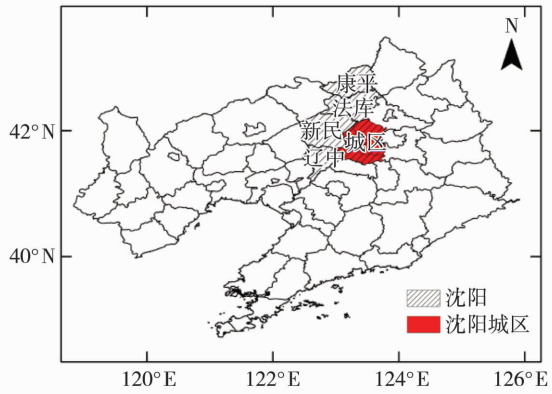


图1 沈阳地区的地理位置

Fig. 1 Location of Shenyang area of Liaoning Province

1.2 资料

目前,沈阳市共有7个国家级气象站,其中沈北新区和苏家屯建站较晚,无法满足统计学要求,其余5站降水资料的起始年份均集中在1950年代末,为统一时间尺度,选用浑南(44 m)、新民(26 m)、辽中(13 m)、法库(106 m)和康平(89 m)5站1960—2017年逐月降水资料,对其正态性分布特征进行分析。另外,还使用了DEM高程数据(来源于地理空间云平台),空间分辨率为90 m。

1.3 方法

正态性检验的方法主要包括 χ^2 优度检验、S-W检验、D检验、偏度-峰度系数等。本文主要结合偏度-峰度系数和S-W检验法,对近58 a沈阳市降水量的正态性分布进行分析。其中,显著性水平 α 取0.05,若 $P < 0.05$,则否定原假设,认为序列总体呈非正态分布。

1.3.1 偏度-峰度系数

偏度系数是描述数据分布形态的统计量,反映总体取值分布的对称性,偏度的绝对值越大,其分布形态的偏斜程度越大。峰度系数是描述总体中所有取值分布形态陡缓程度的统计量。峰度的绝对值越大,其分布形态的陡缓程度与正态分布的差异程度越大。该检验法可以消除样本容量引起的偏度和峰度偏差。

对于样本数为 n 的时间序列 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$,偏度系数 g_1 和峰度系数 g_2 分别定义为:

$$\begin{cases} g_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \\ g_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 - 3 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, $s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

式中: \bar{x} 、 s 分别为时间序列的均值、标准差。

在样本数足够大时,如果样本服从正态分布,则其偏度、峰度系数也服从正态分布,且数学期望为0,均方差 s_{g_1} 、 s_{g_2} 分别为:

$$\begin{cases} s_{g_1} = \sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}} \\ s_{g_2} = \sqrt{\frac{24n(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}} \end{cases} \quad (2)$$

假设序列服从正态分布,在置信度 $\alpha = 0.05$ 的条件下,当 $|g_1| > 1.96s_{g_1}$ 或 $|g_2| > 1.96s_{g_2}$,拒绝假设,认为序列不服从正态分布;否则,假设成立,认为序列服从正态分布^[18-19]。本文降水资料的样本长度 $n = 58$,根据公式(2),则 $1.96s_{g_1} = 0.599$ 、 $1.96s_{g_2} = 1.110$,即当 $|g_1| \leq 0.599$ 且 $|g_2| \leq 1.110$ 时,认为序列服从正态分布。以此作为检验沈阳降水资料正态特征的标准,若原始样本数据不服从正态分布,则对数据进行正态化变换,从而使变换后的数据服从或接近正态分布。

1.3.2 S-W 检验

S-W检验是目前公认的序列正态性检验效果较好的方法之一,该方法不需要大样本数据,小样本数据就能推断序列总体是否符合正态分布特征。利用S-W检验原假设 H_0 的过程:先将检验样本值按升序排列,即 $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$,再计算S-W检验的统计量 W ,其公式如下:

$$W = \frac{\left[\sum_{i=1}^{[n/2]} a_i(W) (x_{(n-i+1)} - x_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: \bar{x} 为样本平均数; $a_i(W)$ 为检验系数,可根据 n 和 i ,查找Shapiro-Wilk系数表获得; $[n/2]$ 表示 $n/2$ 的整数部分。本文显著性水平 α 取0.05,如果 $W \geq 0.05$,则表示接受原假设,满足正态分布;否则拒绝原假设,不满足正态分布^[20]。

1.3.3 Box-Cox 正态化变换

统计方法中使用的变量多数是基于正态分布的假定,但在实际研究中存在正态性较差的情况,因此需要将原始序列数据转换为满足正态分布的变量。

Box - Cox 正态化变换是在有效保留原始数据信息的基础上,通过数学变换,使变换后的数据服从正态分布的一种方法。该方法变换简单,且不丢失数据信息^[21]。常用的正态化变换方法有对数变换、平方根变换、立方根变换等^[22]。本文将对不满足正态分布的沈阳地区降水量数据进行上述 3 种变换处理,并检验变换后数据的正态性特征。由于对数变换要求原始数据不能为 0,然而沈阳地区降水量在 1—4 月、12 月均存在 0 值情况,故针对月降水量数据只做平方根和立方根变换。变换公式如下:

$$\text{平方根变换: } x'_i = \sqrt{x_i + 0.5} \quad (4)$$

$$\text{立方根变换: } x'_i = \sqrt[3]{x_i} \quad (5)$$

$$\text{对数变换: } x'_i = \ln x_i \quad (6)$$

式中: x_i 为降水量原始序列数据, x'_i 为变换处理后的序列数据。

2 结果与分析

2.1 辽宁沈阳市降水量正态分布特征

2.1.1 年降水量

表 1 列出 1960—2017 年沈阳市各站点年降水量的正态分布检验结果。可以看出,沈阳市各站年降水量偏度系数均大于 0,为正偏,偏度系数平均为 0.459,其中新民偏度系数最大为 0.618,浑南最小为 0.184,且 4 站(新民除外)的年降水量偏度系数均小于 0.599;除浑南、法库峰度系数为负值外,其余 3 站均为正值,峰度系数绝对值最大的是浑南,最小的是法库,且均小于 1.110,可见,除新民外,其他 4 站年降水量均满足偏度 - 峰度系数正态性检验的条件。根据 S - W 检验法,沈阳市各站年降水量均满足正态分布。综合上述 2 种方法的检验结果,得出新民年降水量不符合正态分布。

从新民站年降水量的箱线图(图 2)看出,1960—2017 年新民年降水量的中位数为 577.6 mm,多年平均为 590.2 mm,共出现 2 次较大异常值,分别为 1042.3 mm(2010 年)和 1012.7 mm(1994 年)。与中位数、平均值相比,1994、2010 年降水量出现较大偏差,从而使其严重偏离正态分布。

表 1 1960—2017 年辽宁沈阳市各气象站年降水量的偏度 - 峰度系数及 S - W 检验统计

Tab. 1 The statistics of skewness and kurtosis coefficients and Shapiro - Wilk test of annual precipitation in Shenyang during 1960 - 2017

站名	偏度系数	峰度系数	W 检验值	是否满足正态
浑南	0.184	-0.211	0.916	是
新民	0.618	0.105	0.062	否
辽中	0.586	0.023	0.083	是
法库	0.421	-0.010	0.133	是
康平	0.487	0.078	0.404	是

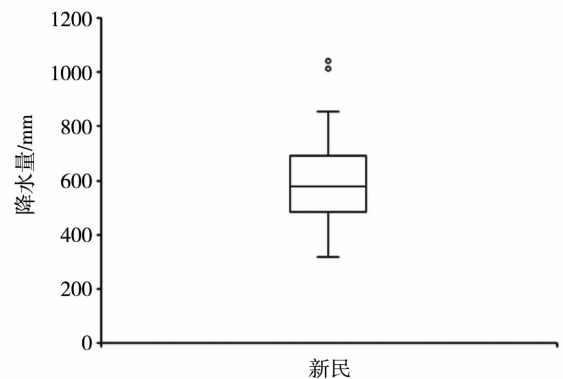


图 2 1960—2017 年新民年降水量箱线图
Fig. 2 The box plot of annual precipitation in Xinmin of Shenyang during 1960 - 2017

进一步对新民年降水量做 Box - Cox 变换,并对变换后的数据做正态检验,结果见表 2。从表 2 中看出,新民年降水量的偏度系数由 0.618 分别降到 0.302、0.199 和 -0.008,偏度系数的绝对值均小于 0.599,且峰度系数的绝对值均小于 1.110。结合 W 检验值,表明变换后的新民年降水量满足正态性分布。

2.1.2 季节降水量

从 1960—2017 年沈阳市各站点季节降水量的正态分布检验(表 3)看出,沈阳市各季节降水量的 S - W 检验通过率为 50%,偏度 - 峰度检验通过率为 35%。不同季节对比看出,春季降水量的正态性检验效果最好,S - W 和偏度 - 峰度正态性检验通过率均为 60%,其中浑南、辽中和法库 3 站春季降

表 2 正态化变换后的新民年降水量的偏度 - 峰度系数及 W 检验值

Tab. 2 The skewness and kurtosis coefficients and W value of Shapiro - Wilk test of annual precipitation transformed by different methods in Xinmin of Shenyang

站名	平方根变换			立方根变换			对数变换		
	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值
新民	0.302	-0.353	0.404	0.199	-0.447	0.541	-0.008	-0.556	0.649

表 3 辽宁沈阳市各站点季节降水量的偏度 - 峰度系数及 W 检验值

Tab. 3 The skewness and kurtosis coefficients and W value of Shapiro - Wilk test of seasonal precipitation in Shenyang of Liaoning Province

站名	春季			夏季			秋季			冬季		
	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值
浑南	0.588	0.356	0.222	0.238	-0.704	0.284	0.608	-0.012	0.072	0.752	0.068	0.010
新民	0.758	0.240	0.005	0.827	0.247	0.008	0.541	-0.204	0.122	1.465	3.464	0.000
辽中	0.342	-0.564	0.212	0.407	-0.341	0.200	0.623	-0.349	0.005	1.203	1.412	0.000
法库	0.532	-0.207	0.314	0.614	0.696	0.199	1.261	2.580	0.001	1.023	0.203	0.000
康平	0.614	-0.217	0.038	0.639	0.176	0.102	0.470	-0.410	0.177	1.049	0.596	0.000

水量均满足正态分布;夏季和秋季降水量的正态性检验效果次之,通过率均为 40%;冬季降水量的正态性最差,且 5 站均不满足正态分布。这是因为冬季降水量偏少,偏度系数存在强烈向低值偏向的情况^[15]。从站点对比来看,浑南、辽中站季节降水量的正态性通过率最高为 50%,其他站点季节降水量正态性检验通过率最低仅为 25%,未通过正态性检验的序列大多是偏度系数未达到阈值。

另外,从冬季降水量的箱线图(图 3)看出,1960—2017 年浑南、新民、辽中和康平站冬季降水

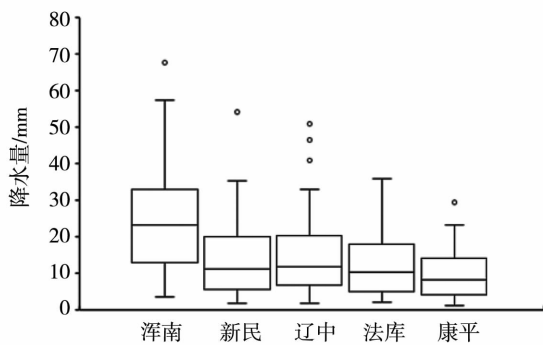


图 3 1960—2017 年沈阳各站冬季降水量箱线图

Fig. 3 Box chart of winter precipitation at each station of Shenyang during 1960 - 2017

量均存在异常值,辽中共出现 3 次,分别为 50.8 (2005 年)、46.4 (2008 年)和 40.9 mm (1979 年),浑南、新民和康平各出现 1 次异常值。

由于沈阳各站冬季降水量均不满足正态分布特征,这给冬季降水气候预测带来很大难度。因此,对冬季降水量进行平方根、立方根及对数变换,并对变换后的数据分别计算偏度 - 峰度系数及 W 检验值。从表 4 中看出,经过正态变换后的沈阳市冬季降水量的正态性特征得到明显改善,平均偏度系数由 1.098 分别下降到 0.391、0.156 和 -0.326,变换后的偏度系数绝对值均在 0.599 以下;平均峰度系数的绝对值由 1.149 分别下降到 0.433、0.520 和 0.537,均在 1.110 以下。结合偏度 - 峰度系数检验及 W 检验值,沈阳冬季降水量经 Box - Cox 变换后均能满足正态分布,且经立方根变换后,正态性优化效果最为明显,这主要是因为原始数据经过开立方根后差异最小。因此,针对冬季降水量气候预测,可以优先考虑进行立方根变换,从而提高冬季降水气候预报准确率。

2.1.3 月降水量

利用偏度 - 峰度系数和 S - W 检验方法,对近 58 a 沈阳市月降水量进行正态性检验。从表 5 中看

表 4 正态变换后的沈阳市各站冬季降水量的偏度 - 峰度系数及 W 检验值

Tab. 4 The skewness and kurtosis coefficients and W value of Shapiro - Wilk test of winter precipitation transformed by different methods at each station of Shenyang

站名	平方根变换			立方根变换			对数变换		
	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值
浑南	0.188	-0.651	0.560	-0.012	-0.067	0.728	-0.453	-0.244	0.255
新民	0.477	-0.030	0.115	0.202	-0.489	0.355	-0.298	-0.693	0.205
辽中	0.422	-0.304	0.226	0.155	-0.522	0.612	-0.398	-0.364	0.262
法库	0.472	-0.648	0.052	0.270	-0.792	0.127	-0.158	-0.791	0.227
康平	0.397	-0.580	0.149	0.166	-0.730	0.431	-0.324	-0.594	0.278

表 5 辽宁沈阳市各站月降水量偏度 - 峰度系数及 W 检验值
Tab. 5 The skewness and kurtosis coefficients and W value of Shapiro - Wilk test of monthly precipitation at each station of Shenyang

月份	浑南			新民			辽中			法库			康平		
	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值
1	1.558	2.947	0.000	2.169	5.454	0.000	2.271	6.370	0.000	1.824	3.863	0.000	2.039	4.876	0.000
2	1.425	1.351	0.000	2.253	6.081	0.000	1.992	3.573	0.000	1.465	1.060	0.000	1.722	2.789	0.000
3	1.841	4.185	0.000	1.692	3.413	0.000	1.820	3.721	0.000	2.265	6.709	0.000	2.563	9.579	0.000
4	0.350	-0.322	0.250	1.594	4.031	0.000	0.520	-0.379	0.034	1.318	2.471	0.000	1.410	2.740	0.000
5	1.119	2.109	0.003	1.149	1.596	0.000	0.981	1.415	0.009	1.127	1.569	0.001	1.112	1.108	0.001
6	0.477	-0.194	0.109	0.771	0.155	0.010	0.440	-0.411	0.100	1.223	1.253	0.000	1.133	1.853	0.002
7	0.446	-0.737	0.035	0.885	0.557	0.004	1.081	1.687	0.003	0.512	-0.254	0.040	0.874	0.133	0.002
8	0.535	-0.434	0.040	1.451	1.782	0.000	0.575	-0.546	0.007	1.161	1.196	0.000	0.969	0.175	0.000
9	0.866	1.439	0.038	1.005	0.521	0.001	0.862	-1.120	0.026	1.919	6.100	0.000	0.814	-0.213	0.001
10	0.949	0.813	0.004	1.214	0.979	0.000	1.239	1.278	0.000	1.722	4.373	0.000	1.615	3.290	0.000
11	2.171	6.945	0.000	1.964	5.914	0.000	1.581	3.380	0.000	2.222	6.845	0.000	3.229	15.263	0.000
12	0.753	-0.420	0.000	1.379	1.237	0.000	1.582	2.319	0.000	1.430	1.814	0.000	1.946	4.942	0.000

出,沈阳市月降水量的正态性特征较差,多数月份不服从正态性分布,浑南、新民、辽中、法库和康平站各月降水量均为正偏,偏度系数平均分别为 1.041、1.461、1.245、1.516 和 1.619,均高于阈值 0.599。其中,浑南 4、6、7、8 月降水量通过正态性检验,辽中 4、6 月降水量通过正态性检验,法库 7 月降水量通过正态性检验。结合 W 检验值发现,仅浑南 4、6 月降水量通过正态性检验。

综上所述发现,沈阳市月降水量的变化较年、季节降水量更为明显,故月降水量的非正态性特征明显,尤其是新民和康平两站。从新民月降水量箱线图(图4)看出,近58 a新民各月降水量均存在异常

值,且 8 月出现异常值的次数最多为 3 次(中位数为 109.4 mm,平均值为 130.7 mm),分别为 447.6 (1994 年)、419.7 (1964 年)和 343.4 mm (1997 年),严重偏离中位数和平均值。

针对新民和康平月降水量进行 Box - Cox 正态化变换,考虑到月降水量存在 0 mm 的情况,仅做平方根和立方根变换,然后对变换结果进行偏度 - 峰度系数计算及 S - W 检验。从表 6 中看出,新民月降水量正态变换后的平均偏度系数绝对值分别为 0.549 和 0.217,小于阈值 0.599,满足正态性分布。综合偏度 - 峰度系数及 W 检验值,发现平方根变换后的新民 4—7 月和 9—10 月降水量服从正态性分布,正态性通过率为 50.0%;立方根变换后的降水量,除 4、8、10 月,其余月份均服从正态性分布,正态性通过率为 75.0%。康平月降水量正态变换后的平均偏度系数绝对值分别为 0.398 和 0.187。综合偏度 - 峰度系数及 W 检验值,发现经平方根变换后的康平 4—8 月和 10 月降水量服从正态性分布,正态性通过率为 50.0%;立方根变换后的月降水量,大多数月份(1、4 月除外)服从正态性分布,正态性得到明显改善,正态性通过率为 83.3%。需要指出的是,正态变换方法不可能将所有非正态分布数据变换为正态分布数据,康平 1 月降水量数据经过平方根和立方根变换后依然不满足正态分布,还需进一步研究其他正态变换方法。可见,康平 1 月降水气候预测是预报的难点之一。

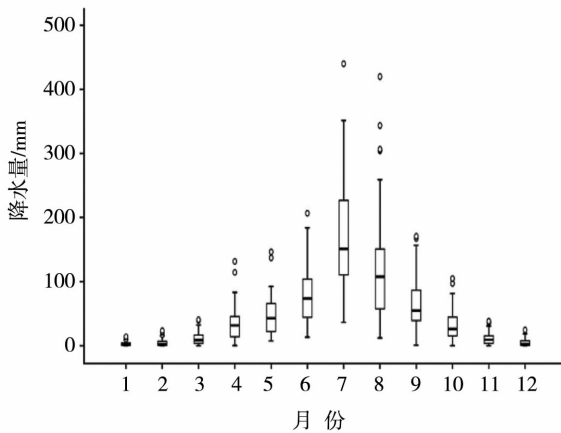


图 4 1960—2017 年沈阳市新民月降水量箱线图
Fig. 4 Box plot of monthly precipitation at Xinmin station of Shenyang during 1960 - 2017

表 6 沈阳市新民和康平月降水量正态变换后的偏度 - 峰度系数及 W 检验值

Tab.6 The skewness and kurtosis coefficients and W value of Shapiro - Wilk test of monthly precipitation transformed by two kinds of method at Xinmin and Kangping stations of Shenyang

月份	新民						康平					
	平方根变换			立方根变换			平方根变换			立方根变换		
	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值	偏度	峰度	W 值
1	1.162	0.930	0.000	<u>0.012</u>	<u>-0.286</u>	<u>0.151</u>	0.997	0.691	0.000	-0.197	-0.524	0.041
2	1.082	0.783	0.000	<u>0.086</u>	<u>-0.491</u>	<u>0.249</u>	0.066	0.925	0.000	<u>-0.078</u>	<u>-0.512</u>	<u>0.151</u>
3	0.608	0.036	0.101	<u>-0.224</u>	<u>0.143</u>	<u>0.902</u>	1.566	0.937	0.019	<u>0.006</u>	<u>0.698</u>	<u>0.966</u>
4	<u>0.179</u>	<u>0.455</u>	<u>0.195</u>	-0.533	0.825	0.042	<u>0.213</u>	<u>0.102</u>	<u>0.282</u>	-0.876	1.471	0.005
5	<u>0.398</u>	<u>-0.173</u>	<u>0.275</u>	<u>0.142</u>	<u>-0.410</u>	<u>0.664</u>	<u>0.438</u>	<u>-0.203</u>	<u>0.313</u>	<u>0.197</u>	<u>-0.411</u>	<u>0.759</u>
6	<u>0.194</u>	<u>-0.541</u>	<u>0.642</u>	<u>-0.02</u>	<u>-0.554</u>	<u>0.818</u>	<u>0.228</u>	<u>0.303</u>	<u>0.549</u>	<u>0.015</u>	<u>0.050</u>	<u>0.763</u>
7	<u>0.254</u>	<u>-0.303</u>	<u>0.358</u>	<u>0.031</u>	<u>-0.389</u>	<u>0.476</u>	<u>-0.500</u>	<u>0.425</u>	<u>0.148</u>	<u>0.266</u>	<u>-0.608</u>	<u>0.352</u>
8	0.716	0.102	0.028	<u>0.425</u>	<u>-0.170</u>	<u>0.324</u>	<u>-0.502</u>	<u>0.383</u>	<u>0.098</u>	<u>0.147</u>	<u>-0.549</u>	<u>0.298</u>
9	<u>0.150</u>	<u>0.139</u>	<u>0.491</u>	<u>-0.389</u>	<u>1.077</u>	<u>0.210</u>	-0.656	0.166	0.456	<u>-0.194</u>	<u>-0.269</u>	<u>0.605</u>
10	<u>0.419</u>	<u>-0.064</u>	<u>0.237</u>	-0.464	1.886	0.058	<u>0.367</u>	<u>0.649</u>	<u>0.107</u>	<u>0.107</u>	<u>0.523</u>	<u>0.587</u>
11	0.755	0.482	0.030	<u>-0.144</u>	<u>0.528</u>	<u>0.537</u>	2.343	1.069	0.003	<u>-0.093</u>	<u>0.649</u>	<u>0.477</u>
12	0.668	-0.581	0.000	<u>-0.138</u>	<u>-0.847</u>	<u>0.068</u>	0.210	0.879	0.000	<u>-0.071</u>	<u>-0.669</u>	<u>0.130</u>

注:下划线的数值满足正态分布

综上所述,经 Box - Cox 变换后,月降水量序列的正态性均有较大改善。其中,对于新民和康平站冬季各月降水量,采用立方根变换的效果明显优于平方根,可利用立方根变换后的数据对冬季各月降水量进行气候预测,而春季 4 月降水量平方根变换效果优于立方根,故 4 月降水量应优先考虑采用平方根变换的数据进行降水气候预测。

2.2 辽宁沈阳市降水量时空分布特征

利用 2.1 研究结果,将不满足正态性检验的异常值予以剔除,从而研究沈阳市不同时间尺度的降水量变化特征。

2.2.1 降水量年变化特征

1960—2017 年,沈阳市年平均降水量 604.8 mm,年平均降水量最小值出现在 2006 年(411.1 mm),最大值出现在 2010 年(928.2 mm),降水量的年际波动较大,整体呈微弱下降趋势,平均每 10 a 减少 2.0 mm;从 5 a 滑动平均来看,降水量的年代际变化明显,呈“偏少 - 偏多 - 偏少 - 偏多 - 偏少 - 偏多”的阶段变化,1960 年代、1970 年代后期到 1980 年代初期、2000 年代偏少,而 1970 年代中前期、1980 年代中期、2010 年代初期偏多(图 5)。

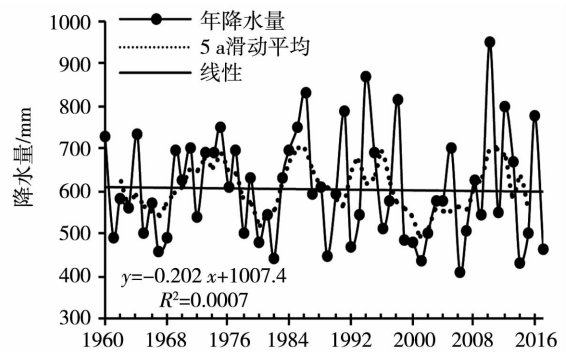


图 5 1960—2017 年辽宁沈阳市降水量年变化
Fig.5 Annual change of precipitation in Shenyang of Liaoning Province from 1960 to 2017

考虑到地形的作用,对研究区内年均降水量进行空间插值,回归方程为:

$$Y = -2132.54 + 86.87006X_1 - 190.198X_2 + 0.880247X_3, R^2 = 0.9888 \quad (7)$$

式中:Y、X₁、X₂、X₃ 分别为年降水量(mm)、经度、纬度及高程(m)。

根据公式(7),对沈阳市年均降水量进行空间插值(图 6),可以看出,沈阳市年均降水量呈自东南向西北递减的分布特征,这主要因为沈阳西北部地区(康平、新民、法库)靠近内蒙古科尔沁沙地南缘,土地沙化严重,水汽条件较差,不易

于降水产生,而东部地区属于长白山余脉,呈东北—西南向,受地形影响,迎风面气流抬升,容易形成降水。

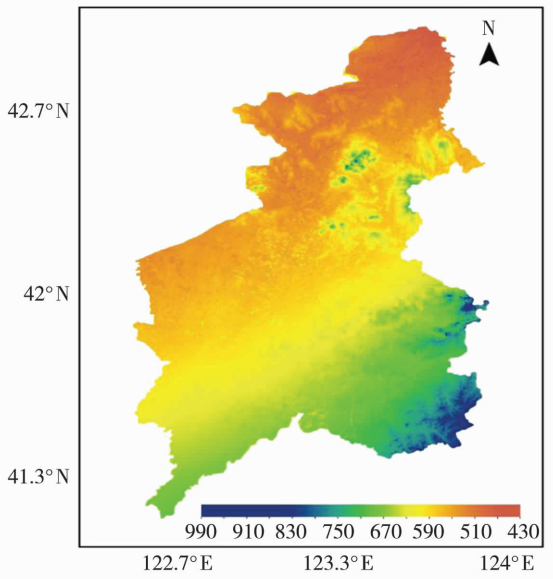


图6 辽宁沈阳市年平均降水量空间分布(单位:mm)
Fig.6 Spatial distribution of interpolated annual average precipitation in Shenyang of Liaoning Province (Unit:mm)

2.2.2 降水量季节变化特征

受季风、热带气旋等因素影响,沈阳市降水量的季节分布极不均匀。春季平均降水量 94.2 mm, 占全年的 15.8%, 春季降水对玉米等农作物的播种十分有利;受东南季风影响,沈阳市降水主要集中在夏季,夏季平均降水量 382.2 mm, 占年降水量的六成以上;秋季降水量占全年的 17.6%, 而冬季降水量最少,仅占全年的 2.5% (表 7)。

表7 1960—2017 年辽宁沈阳市降水量的季节分布
Tab.7 Seasonal distribution of precipitation in Shenyang of Liaoning Province during 1960 - 2017

季节	降水量/ mm	占全年 百分比/%	线性倾向率/ (mm · a ⁻¹)
春季	94.2	15.8	0.3096
夏季	382.2	64.1	-0.4738
秋季	104.9	17.6	-0.3006
冬季	14.7	2.5	0.1461*

注: * 表示通过 0.05 的显著性检验。

1960—2017 年沈阳市夏季和秋季降水量呈下降趋势,气候倾向率分别为 -4.738、-3.006 mm · (10 a)⁻¹,

而春季和冬季降水量则呈上升趋势,气候倾向率分别为 3.096、1.461 mm · (10 a)⁻¹,春季和冬季降水量的增加可减少春旱的发生,有利于农作物的生长发育(表 7)。

采用同样的方法(线性回归方程)对四季降水量分别进行空间插值(图 7),发现沈阳市四季降水量的空间分布与年降水量类似,同样存在自东南向西北递减的分布特征,康平的四季降水量均最少,浑南的四季降水量均最多。康平、法库与新民夏季降水量相差不大,辽中与浑南夏、秋季降水量相差不大。

2.1.3 降水量月变化特征

表 8 是沈阳市 1960—2017 年月平均降水量分布及变化趋势。可以看出,沈阳市降水量具有明显的月变化特征,月降水量呈现典型的单峰型分布,峰值出现在 7 月,降水量为 163.8 mm, 占年降水量的 27.0%, 8 月降水量次之,为 138.7 mm, 占年降水量的 22.9%, 1—2 月和 12 月降水量较小,且波动不明显,不足年降水量的 2.0%, 该时段降水形式多以雪或雨夹雪为主。近 58 a 来,沈阳市各月降水量的变化趋势不尽相同,1、4、7—9 月降水量呈减少趋势,其他月份则呈增加趋势,但均未通过显著性检验。

表8 1960—2017 年辽宁沈阳市降水量月分布及其变化趋势

Tab.8 Monthly change of precipitation and its climatic tendency rate in Shenyang during 1960 - 2017

月份	降水量/ mm	占年降水量的 百分比/%	线性倾向率/ (mm · a ⁻¹)
1	3.9	0.6	-0.0025
2	5.4	0.9	0.1079
3	12.1	2.0	0.1003
4	33.4	5.5	-0.0031
5	49.5	8.2	0.2905
6	84.5	13.9	0.2914
7	163.8	27.0	-0.3777
8	138.7	22.9	-0.2978
9	59.9	9.9	-0.6351
10	35.1	5.8	0.1409
11	13.7	2.3	0.1225
12	5.9	1.0	0.0652

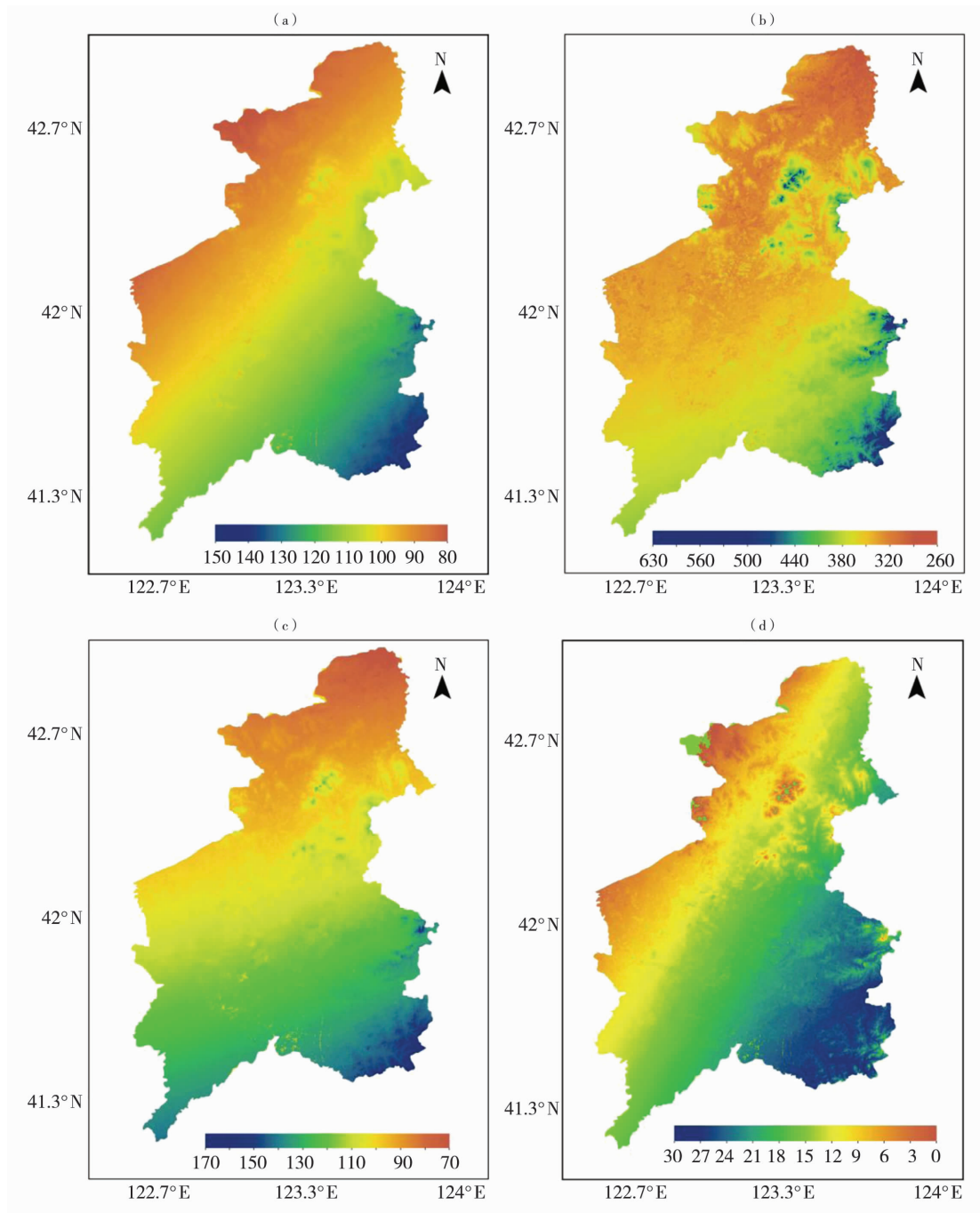


图 7 辽宁沈阳市四季降水量插值分布(单位:mm)

(a) 春季,(b) 夏季,(c) 秋季,(d) 冬季

Fig.7 Spatial distribution of interpolated seasonal precipitation in Shenyang of Liaoning Province (Unit:mm)

(a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter

3 讨 论

利用偏度 - 峰度系数和 S - W 正态检验法,可以很好地揭示沈阳不同时间尺度降水量的正态性分布特征。由于年降水量为年尺度的累积,有统计效应,相对消除了月降水分布的非正态性现象^[13]。沈阳市大部分地区年降水量服从正态性分布,这

与前人的研究结论基本一致^[10-17]。其中,新民年降水量未通过正态性检验,主要是 1960—2017 年该地区降水量多次出现异常高值,如 1994 年 8 月降水量为 447.6 mm,出现暴雨过程 1 次(69.6 mm),大暴雨过程 2 次(160.0、139.5 mm);2010 年 7 月降水量 439.8 mm,出现大暴雨过程 2 次(147.2、187.6 mm),可见夏季个别月份极端强降水异常偏多是造成新民

年降水量非正态性特征的原因。

胡文东等^[12]、方媛等^[16]采用 χ^2 优度检验法,分别对 1951—2004 年和 1960—2008 年银川 4 个气象站点年、月降水量进行正态性检验,发现年降水量服从正态性分布,而月降水量的正态性分布特征相差较大,月降水量正态性通过率分别为 6.3% 和 64.6%。可见,同一地区不同时间段的月降水量正态性分布特征可能不尽相同。对比银川^[16]、兰州^[17] 降水量的正态性分布,沈阳月降水量的正态性通过率最低,这可能与研究时段较长有关。

有研究表明^[10],我国东北地区东部和西北部、云南部分地区的降水量基本符合正态分布,其原因是这些区域的气候基本属于季风性气候;而具有大陆性气候的西北地区、华北和东北地区西部,其降水量严重偏离正态分布。沈阳东部地区(浑南)地处长白山余脉,受地形影响,迎风面气流抬升易形成降水,属于温带季风性气候;而西北部地区(康平、新民、法库)靠近内蒙古科尔沁沙地南缘,水汽条件较差,大陆性气候特征明显。因而,浑南降水量的正态性特征优于其他地区。

4 结 论

(1) 近 58 a 来,沈阳大部分地区的年降水量服从正态分布特征,其中 60% 的站点春季降水量通过正态性检验;夏季和秋季降水量的正态性通过率均为 40%,未通过正态性检验的可能与夏、秋季的局地极端强降水有关;冬季降水量的正态性最差,5 站均不服从正态性分布,这可能与冬季降水量偏少有关。沈阳月降水量的正态性特征较差,基本都不满足正态性分布,其中新民月降水量的正态性最差,而浑南月降水量的正态性相对较好。

(2) 沈阳市年、季、月降水量均为正偏,经 Box - Cox 正态性变换后,其正态性特征有明显改善。其中,年降水量经过正态性变换后均通过正态性检验;季节降水量正态性最差的冬季降水量,经正态性变换后,其正态性通过率从 0% 上升到 100%;经过正态性变换,月降水量的正态性通过率同样得到提升。

(3) 沈阳地区不同时间尺度的降水量均呈自东南向西北逐渐减少的空间分布规律。1960—2017 年,沈阳市年降水量平均为 604.8 mm,夏季降水量最大,为全年的六成以上(382.2 mm);年降水量整体呈微弱下降趋势,其中春季和冬季降水量呈上升趋势,而夏季和秋季降水量呈下降趋势,且季节内的月降水量变化趋势不尽一致。

(4) 概率统计预报在降水气候预测和分析中占

有重要地位,常用的降水气候预测模型要求数据满足正态性分布,必须事先对数据进行检验。因而,沈阳季、月降水量的非正态性特征可能会制约降水气候预测的准确性。

参考文献:

- [1] 翟盘茂,邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响[J]. 气候变化研究进展, 2005,1(1):16-18.
- [2] 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):322-330.
- [3] 许崇海,罗勇,徐影. 全球气候模式对中国降水分布时空特征的评估和预估[J]. 气候变化研究进展,2010,6(6):398-404.
- [4] 杨金虎,江志红,王鹏祥,等. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. 气候与环境研究,2008,13(1):75-83.
- [5] WANG X L, WEN Q H, WU Y H. Penalized maximal t - test for detecting undocumented mean change in climate data series[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2007,46(6):916-931.
- [6] 王秋香,李庆祥,周昊楠,等. 中国降水序列均一性研究及对比分析[J]. 气象,2012,38(11):1390-1398.
- [7] WIJNGAARD J B, KLEIN TANK A M G, KÖNNEN G P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitations series[J]. International Journal of Climatology, 2003,23:679-692.
- [8] 王英,曹明奎,陶波,等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究,2006,25(6):1031-1041.
- [9] 韩晖,孟丽霞. 甘肃省近 46 a 年降水结构空间变化分析[J]. 干旱气象,2010,28(1):30-34.
- [10] 曹杰,陶云. 中国的降水量符合正态分布吗?[J]. 自然灾害学报,2002,11(3):115-120.
- [11] 方建刚,毛明策,程肖侠. 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.
- [12] 胡文东,陈晓光,李艳春,等. 宁夏月、季、年降水量正态性分析[J]. 中国沙漠,2006,26(6):963-968.
- [13] 陈学君,胡文超,杨瑜峰,等. 甘肃降水量正态性分析[J]. 干旱气象,2013,31(1):107-112.
- [14] 陶云,段旭. 云南降水正态分布特征的初探[J]. 气象科学, 2003,23(2):161-167.
- [15] 王纪军,任国玉,匡晓燕,等. 河南省月和年降水量正态性分析[J]. 气候与环境研究,2010,15(4):522-528.
- [16] 方媛,李培月. 银川市降水量正态分布特征[J]. 水利科技与经济,2010,16(8):873-875.
- [17] 白冰,陆登荣,陈学君,等. 兰州地区降水量正态分布特征[J]. 干旱气象,2014,32(1):123-127.
- [18] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京:气象出版社, 2000:19-27.
- [19] 张超,郭秉赓. 计量地理[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 1995.
- [20] 梁小筠. 正态性检验[M]. 北京:中国统计出版社,1997.
- [21] BOX G E P, COX D R. An analysis of transformations[J]. Royal Statistical Society: Series B (Methodological), 1964,26(2):211-252.
- [22] 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.

(下转至 989 页)