

山地新城降水时空演变规律分析^{*} ——以重庆市渝北区为例

张沁, 张守平, 杨清伟

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要:【目的】以重庆市渝北区为例探讨山地新开发地区的降水时空演变规律。【方法】运用线性回归法、Mann-Kendall法、小波分析法和反距离加权法分析了渝北区1979—2019年的降水时空演变规律。【结果】1) 渝北区年降水量倾向率为 $3.65 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 1979—1996年降水量变化平缓, 1996—2014年降水量出现多个波谷和波峰, 2014年后降水量又呈上升趋势。2) 降水量在春、秋季呈上升趋势, 在夏季呈缓慢下降趋势, 在冬季变幅不大; 降水量在丰、枯水期呈上升趋势, 且降水量上升趋势在丰水期强于在枯水期。3) 全年、丰水期降水天数起伏变化小, 暴雨和大雨发生天数增加。4) 在22 a特征时间尺度上, 降水量经历3个丰-枯转换期; 在13 a特征时间尺度上, 降水量经历4.5个周期的丰-枯变化。5) 年降水量在空间分布上呈西南向东北、东南部递增趋势, 与春、冬季降水量空间分布规律相似; 夏季降水量空间分布呈中心高值区域向四周递减趋势; 全年降水以中雨为主, 中雨天数的空间分布规律与年降水量的相似, 而大、暴雨天数的空间分布与夏季降水量的相似。【结论】渝北区年降水量呈明显上升趋势, 丰水期对降水的影响明显大于枯水期, 今后由降水引发的城市积水事件可能增加; 年降水量和中雨天数的最大值出现在该区东南部, 大、暴雨天数的最大值出现在该区中部。

关键词: 降水量; 突变检测; 小波分析; 时空分布; 渝北区; 重庆

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2022)02-0056-13

气候变化受自然环境与人类活动的影响而具有区域差异性^[1-2]。降水作为衡量气候变化的重要因子, 它的时空分布特征影响着全球及各地区的社会经济发展。近些年来, 中国大部分地区出现的极端气候事件不断增多^[3]。2000年以来, 中国平均每年发生200多起不同程度的城市内涝灾害, 其中有137个城市1年内涝灾害超过3次^[4], 仅2016年中国就有28省(自治区、直辖市)1508县遭受内涝灾害, 直接经济损失约1469.2亿元^[5], 洪涝灾害甚至扩散到沈阳、西安等年降水量较少的东北、西北地区城市。另外, 中国北部如河北、河南的局部地区气候呈严重干旱趋势; 南部地区气候呈变干趋势; 东部大面积区域气候则呈更加湿润趋势^[6]。因此, 研究某地区的降水变化, 对减少当地因洪涝、干旱引起的灾害损失和可持续地开发利用当地水资源具有重要意义。

众多学者对中国不同地区降水的时空分布特征做了大量研究, 例如张琪等人^[7]发现: 1960—2007年西南地区降水量总体上呈弱减少的趋势, 且存在明显的准16 a周期变化; 年降水量空间分布呈“东多西少”, 夏季降水量空间分布呈“西多东少”, 冬季降水量空间分布与夏季的情况相反; 小雨和中雨的天数呈减少趋势, 而大雨和暴雨天数呈增加趋势。郑祚芳等人^[8]基于1971—2010年北京地区的降水资料分析了降水的局地城市效应, 得出北京地区受快速城市化的影响, 降水量以 $0.912 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 的倾向率下降, 强降水日数增加, 不同季节的局地降水分布形态不同。折远洋等人^[9]利用1958—2015年河西地区日降水资料分析了该区域的降水时空变化特征, 发现最大连续降水日数和降水强度均呈增加趋势, 且这一增加趋势在秋季更为明显。

重庆市渝北区设立于1994年, 位于重庆市中心城区。该区在设立之初即有着“小城市大农村”的城市特点, 之后20余年间不断以城市带动农村的发展模式向城乡一体化的现代经济社会结构转变。城市化进程的加剧使得渝北区土地在短期内由生态柔性土地迅速转变为人工不透水土地, 加上山地城市气候的多样性和地形的特殊性, 极易诱发内涝灾害。该地区曾在2015年发生暴雨内涝。然而, 关于类似渝北区这类山地城市新开发区的降水研究较少, 目前更多的是有关整个重庆市或者下属其他区县而降水研究。例如孙宇辉等人^[10]通过对重庆市

* 收稿日期: 2021-10-21 修回日期: 2021-12-14 网络出版时间: 2022-04-12 16:37

资助项目: 国家自然科学基金(No. 52179059); 交通行业重点实验室开放基金(No. Yk220001-6)

第一作者简介: 张沁, 女, 实验师, 博士, 研究方向为水资源水环境, E-mail: 523897929@qq.com

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20220411.1649.002.html>

1961—2011年的气候资料进行分析,发现研究区降水量以 $1.5\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的倾向率波动下降,空间上呈东南向西北递减的趋势。万敏等人^[11]分析重庆市北碚区1961—2010年的降水资料后发现,研究区年降水量呈增加趋势,且西北部区域高于东北、西南部区域,存在准13~15 a的年代际周期和4~6 a的短周期。本研究以典型的山地新城渝北区为研究对象,利用收集到的该区1979—2019年降水序列实测资料,运用线性回归法、Mann-Kendall法、小波分析法、反距离加权法(IDW)等方法对研究区的年、季节、丰枯和不同强度的降水天数进行时空演变规律分析,从而进一步认识研究区的局地短期降水时空特征,为当地局地减灾防灾、水资源开发利用与保护提供依据,并为其其他山地新城的降水研究提供参考资料。

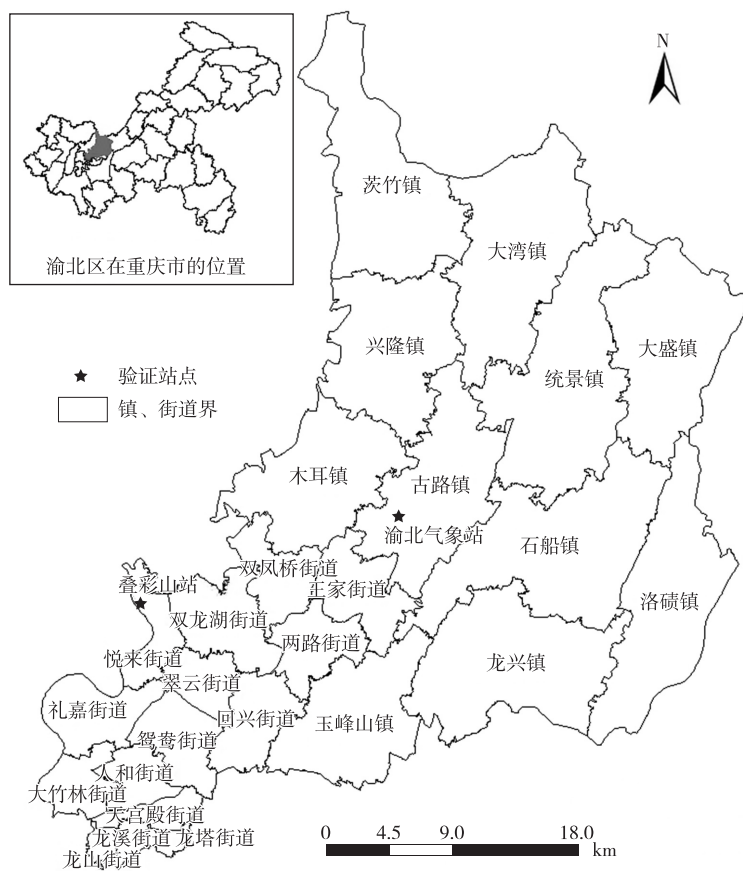
1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区域概况

重庆市渝北区地处青藏高原和长江中下游平原的过渡地带,位于北纬 $28^{\circ}10'\sim 32^{\circ}13'$ 、东经 $105^{\circ}17'\sim 110^{\circ}11'$ 之间(图1),东与长寿区毗邻、西连合川区、北碚区,南邻江北区,同沙坪坝区、南岸区和巴南区隔江相望,北接四川省华蓥市,总面积 $1\,452.03\text{ km}^2$ 。渝北区具有典型山地城市特征,地势从西北向东南缓慢倾斜,起伏较大。该区南部多浅丘,海拔 $155\sim 450\text{ m}$;中部为低山,海拔 $450\sim 800\text{ m}$;北部为中山,海拔 $800\sim 1\,460\text{ m}$ 。截至2019年,渝北区常住人口达219.15万人,人口增长率为 8.32% ,城镇化率 84.22% ^[12]。渝北区内过境主要河流是长江和嘉陵江,其中长江沿该区东南边境流过,嘉陵江沿该区西南边境流过,有后河汇入。渝北区气候为亚热带湿润季风气候,四季分明,年平均气温约 18°C ,年平均日照时数为 $1\,340\text{ h}$ 。

1.2 数据来源

渝北区降水数据主要来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。中国气象数据网可提供渝北气象站以及相邻气象站的日气象数据如气温、日照、湿度、风速等。本研究选取渝北气象站1979—2019年共41年的降水数据来分析研究区降水演变规律,对个别缺失的数据按照线性回归法进行插补。



注:底图来源于重庆市规划和自然资源局网站(<http://ghzrzyj.cq.gov.cn/>),审图号:渝S(2020)080号,下同

图1 重庆市渝北区行政区划及地理位置

Fig. 1 The administrative division and geographical position of Yubei district, Chongqing

2 研究方法

2.1 线性回归法

线性回归法通过基于所建降水量序列和与之相应的时间序列之间的线性回归方程来确定时间序列是否具有递增或递减趋势,序列的趋势变化率可通过线性方程的斜率表示^[13]。降水量 x 随时间 t 变化的线性回归方程如下:

$$x = a + bt,$$

其中 a 、 b 是回归系数,依据回归方法计算出。若 $b > 0$,表示降水量随时间延长而增加;若 $b < 0$,则降水量随时间延长而减小。

2.2 Mann-Kendall 法

Mann-Kendall 法是一种非参数检验法,因具有结构简单,计算方便的特点,故广泛被用于降水、气温、径流等水文、气象要素的变异检验与趋势分析中。在该方法中,时间序列不受特殊异常值的干扰,也不需遵从特定的分布^[14],故而适用于非正态分布的数据检验^[15]。在 Mann-Kendall 法中,首先假设存在一组水文气象时间序列 $X=(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$,对它标准化的检验统计量计算公式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V_s}}, S > 0 \\ 0, S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V_s}}, S < 0 \end{cases}, S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, x_j - x_i > 0 \\ 0, x_j - x_i = 0 \\ -1, x_j - x_i < 0 \end{cases}。$$

其中: S 为正态分布,均值为 0, V_s 为统计量的反差,根据 Hamed 提出的修正 Mann-Kendall 法,其中方差可以合理排除序列自相关的干扰。修正后的方差公式表示如下:

$$V_s^* = V_s \times \frac{n}{n_s^*}, \frac{n}{n_s^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \times \sum_{i=1}^n (n-i)(n-i-1)(n-i-2)\rho_s(i)。$$

其中: $V_s = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$, $\rho_s(i)$ 为自相关序列系数。

2.3 小波分析法

小波分析是指用一簇小波系列函数来表示或接近某一函数或信号,能够快速衰减到 0、同时具有震荡性的基小波函数 $\Psi(t)$,它可利用时间轴的移动或尺度的变化组成一簇函数关系^[16]:

$$\Psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)。$$

其中: $a, b \in R, a \neq 0$; $\Psi_{a,b}(t)$ 为子小波; a 为尺度因子,代表小波周期长度; b 表示平移因子,代表时间尺度的平移。

对于给出的有限能量信号 $f(t) \in L^2(R)$,它的连续小波变换(Continue wavelet transform)表示如下:

$$W_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_R f(t) \overline{\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt。$$

式中: $W_f(a, b)$ 表示小波变换系数, $f(t)$ 为一个平方或信号可积函数, a 为伸缩尺度, b 为平移参数, $\overline{\Psi\left(\frac{x-b}{a}\right)}$ 为 $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 的共轭复函数。

小波方差(V_a)利用小波系数的平方值在 b 域上积分来对信号中不同周期存在的主要时间和时间尺度扰动的相对强度进行确定,即主周期^[17-19],具体公式如下:

$$V_a = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db。$$

2.4 IDW

水资源时空分布不均导致降水空间分布差异性较大,多采用空间雨量站观测值来模拟降水空间分布^[20]。研究发现,山地城市降水受复杂地形、海拔、坡度、大气条件等因素的影响,降水空间分布较为复杂^[21]。目前降水量空间插值的方法较多,但由于研究区地形地貌的差异性和降水数据在时空分布上的不均匀性,导致各插值方法得到的结果会有一定差异。协克里格(Kriging)插值方法虽然考虑了高程、坡度及坡向因素的影响,但对于多山地、丘陵且地形复杂的地区,它的插值精度反而没有 IDW 高^[22-23];就单个站点的插值而言,克里格插值法的效果也不一定优于 IDW^[24]。为此,本研究本文采用 ArcGIS IDW 对 1979—2019 年渝北区的年平均降水量、季节平均降水量以及不同强度降水天数的资料进行空间插值。IDW 计算公式如下:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^p} Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^p}}。$$

其中: $Z(x)$ 是待预测点 x 的插值结果; $Z(x_i)$ 是研究区样本点 $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ 的实测值; D_i 是预测点 x 与各已

知样点 x_i 之间的距离; p 是距离的幂,在降水插值中常用系数 p 等于 $2^{[25]}$ 。

3 结果与分析

3.1 降水量时间变化

3.1.1 降水量的年际、年内和季节演变规律 图2显示,1979—2019年渝北区降水量呈上升趋势,年降水量倾向率为 $3.65 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。1979—2019年渝北区降水量在 $800 \sim 1500 \text{ mm}$ 范围内,年平均降水量为 1133.9 mm ,降水量最大值出现在2015年,为 1448.7 mm ;降水量最小值出现在2001年,为 814.8 mm ;前者约为后者的1.8倍。

1979—2019年,渝北区多年平均月降水量分布如图3所示。由该图可知,渝北区各月降水量差异较大,月降水量变化范围为 $20.3 \sim 199 \text{ mm}$,其中:6月降水量最大,为 198.8 mm ,占全年降水总量的 17.2% ;1月降水量最小,为 20.3 mm ,占全年降水总量的 1.76% ;前者约为后者的9.8倍。

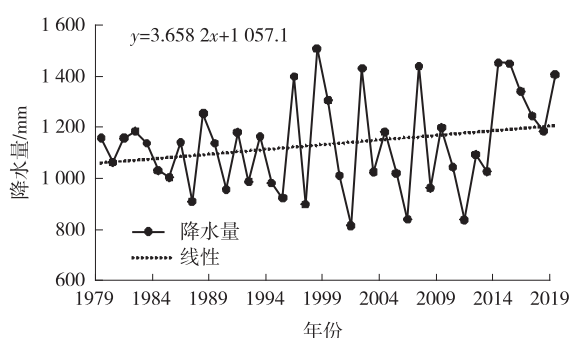


图2 渝北区年降水量变化

Fig. 2 Annual precipitation change of Yubei district

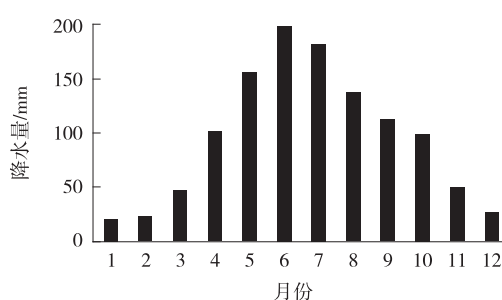


图3 渝北区多年平均月降水量分布

Fig. 3 Distribution of perennial mean monthly precipitation in Yubei district

渝北区1979—2019年季节降水量变化情况如图4所示。从年内分配来看,渝北区四季降水量差异较大,夏季多年平均降水量为 506.9 mm ,为全年降水总量的 44.89% ;冬季多年平均降水量为 65.9 mm ,为全年降水总量的 5.84% 。渝北区冬夏两个极端的降水情况易导致雨水设施在两季不能充分发挥调蓄作用:冬季雨量少则雨水设施不能物尽其用,造成浪费;夏季因为强降水等极端天气使雨水设施调蓄容量不足,易发生内涝。

为分析渝北区四季降水量的年际变化规律,统计得到该区不同季节降水量年际变化(图5),其中:春季降水量呈上升趋势,倾向率为 $1.46 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,年值变化范围为 $137 \sim 435 \text{ mm}$;降水量占比最大的夏季降水量呈缓慢下降趋势,倾向率为 $-0.31 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,年值变化范围为 $238 \sim 847 \text{ mm}$;秋季降水量呈上升趋势,倾向率为 $1.75 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,年值变化范围为 $157 \sim 460 \text{ mm}$;降水量占比最小的冬季降水量变化幅度不大,倾向率仅为 $0.067 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,年值变化范围为 $40.4 \sim 104 \text{ mm}$ 。

对丰水期和枯水期降水量分配特征作进一步的分析,认为渝北区每年的5月到9月为丰水期,每年12月到次年4月为枯水期,由此得到丰、枯水期年际降水量变化如图6所示。渝北区丰水期的降水量相对集中,约占全年降水量的 76.8% ;而枯水期主要在西风带干冷气团和局地内陆水汽再蒸发补给的影响下^[26-27],导致这一时期的降水量明显比丰水期的更低,约占全年的 10.2% 。1979—2019年渝北区降水量在丰、枯水期均呈上升趋势,增加率分别为 2.09 和 $1.27 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。因此,降水量的增加趋势在丰水期较在枯水期更明显,说明丰水期对渝北区年降水量的影响更大。

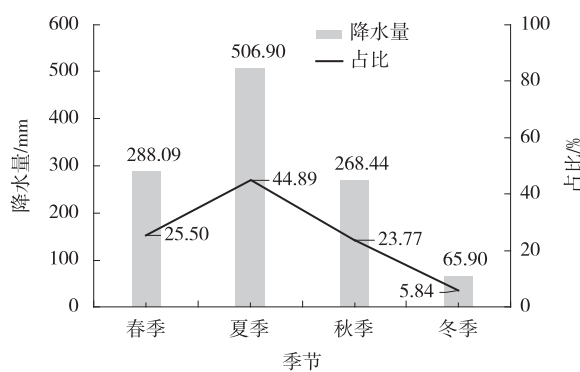


图4 渝北区不同季节平均降水量分布

Fig. 4 Distribution of perennial mean monthly precipitation in Yubei district

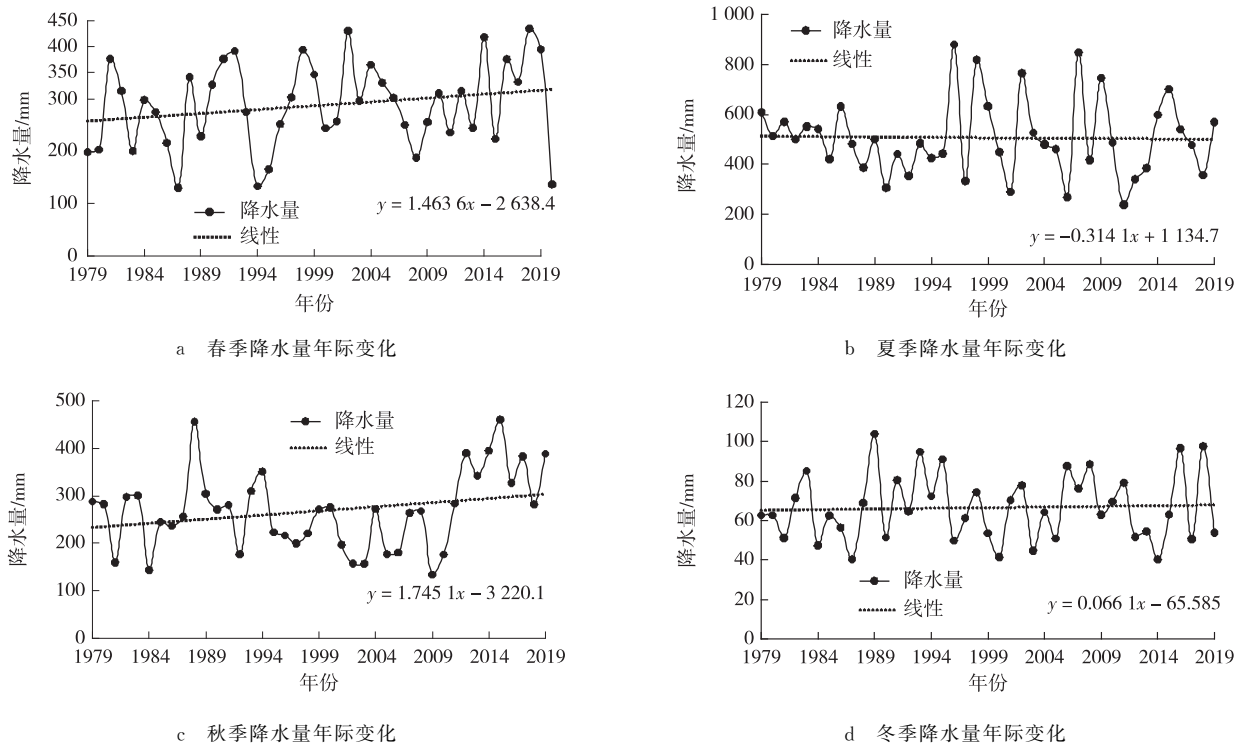


图 5 渝北区不同季节降水量年际变化

Fig. 5 Interannual variation of precipitation in different seasons of Yubei district

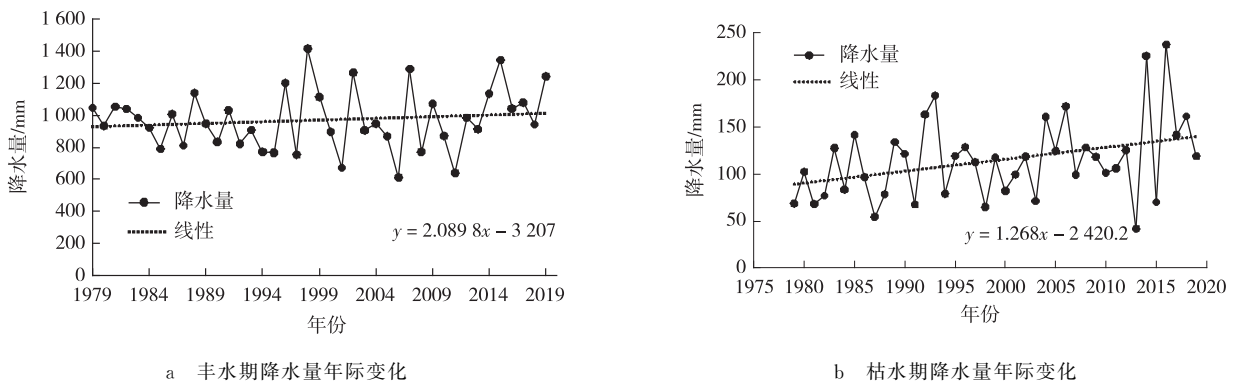


图 6 渝北区丰、枯水期降水量年际变化

Fig. 6 Interannual variation of precipitation during wet and dry season of Yubei district

3.1.2 不同强度降水天数的年际变化 重庆市最新的内涝防治设计重现期一般地区为 50 a, 重要地区为 100 a^[28], 一旦发生短时暴雨事件, 短时间内不会引起积水。因此, 通过对 1979—2019 年渝北区日降水量变化进行分析, 可为研究区暴雨的时空变化研究提供重要数据支持。1979—2019 年渝北区全年及丰水期的降水天数的年际变化曲线如图 7 所示。自 1979 年以来, 渝北区全年和丰水期的降水天数呈缓慢下降趋势, 但变化不大。为分析渝北区暴雨发生情况, 同时统计了 1979—2019 年当地日降水量分别超过 25 和 50 mm (分别对应大雨和暴雨) 的降水天数 (图 8)。结果显示: 自 1979 年以来, 渝北区大雨和暴雨出现天数均呈缓慢增加趋势;

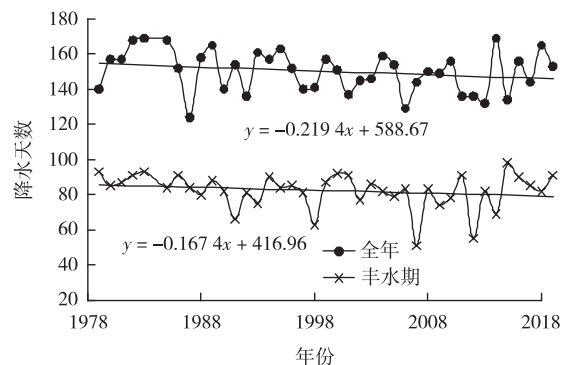


图 7 渝北区全年及丰水期的降水天数

Fig. 7 Annual and wet season precipitation days of Yubei district

日降水量小于或等于 25 和 50 mm 的降水天数则呈明显下降趋势。结合图 7 可知,1979—2019 年渝北区全年降水天数变化起伏不大,但是大雨或暴雨发生天数有所增加,因此由降水引起的城市积水事件发生概率将有所上升。

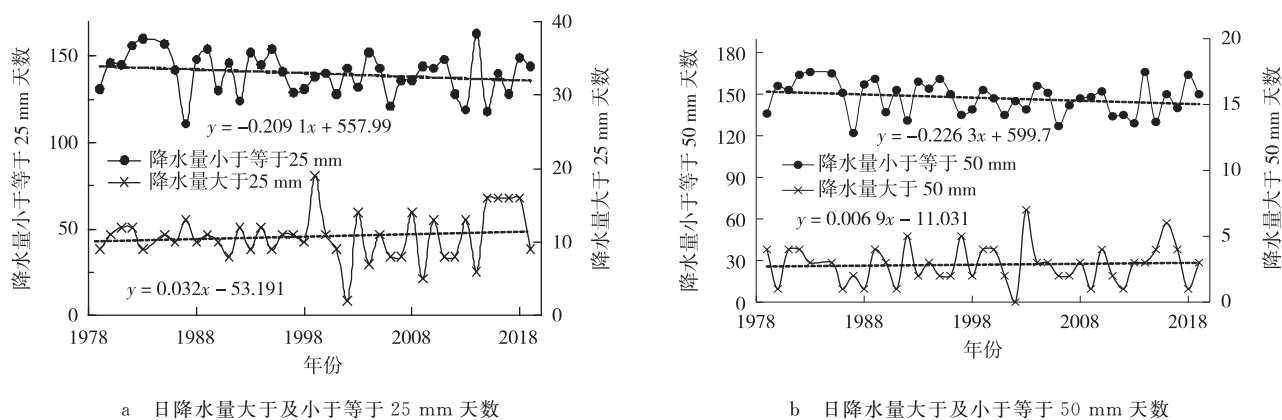


图 8 渝北区日降水量大于及小于等于 25 或 50 mm 的降水天数

Fig. 8 The daily precipitation days greater than or equal to 25 or 50 mm of Yubei district

3.2 降水量的突变检测

对 1979—2019 年渝北区年降水量进行 Mann-Kendall 法分析,结果如图 9 所示:UF 曲线呈波动缓慢上升趋势,均在置信区间内;在 2013 年前后,UF 和 UB 曲线发生了相交,说明 2013 年前后年降水量出现突变。1979—2019 年渝北区年降水量距平变化如图 10 所示,可知渝北区在这一时期的年降水量距平百分比有正有负,大部分在 $-28\% \sim +28\%$ 之间波动,说明渝北区的年降水量具有明显变化差异性。年降水量距平最大值出现在 2014 年,为 318.2 mm;最小值出现在 2001 年,为 -319.1 mm。从突变检验与累积距平两种方法所得结果可知:渝北区 1996 年前大多数年份降水量小于多年平均值,变化平缓;1996 年后当地降水量呈波动上升趋势,在 1996—2014 年出现多个波谷和波峰(在 2001,2006 和 2011 年出现波峰);2014 年后当地降水量呈上升趋势。

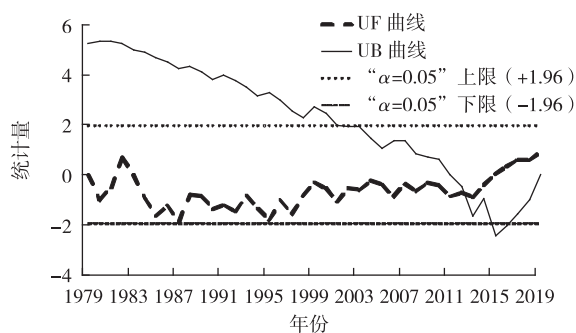


图 9 渝北区年降水量 Mann-Kendall 突变曲线

Fig. 9 Annual precipitation Mann-kendall mutation curves of Yubei district

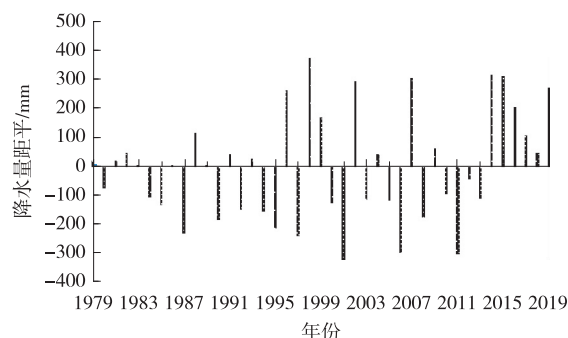


图 10 渝北区年降水量距平变化

Fig. 10 Annual precipitation anomaly of Yubei district

同样地,对 1979—2019 年渝北区各季节降水量进行 Mann-Kendall 法分析,结果如图 11 所示:渝北区春、夏、秋、冬季的降水量分别在 2004,2013,2014 和 2009 年前后出现突变。对 1979—2019 年渝北区全年和各季节降水量进行统计得到全年和季节降水量距平的年际变化特征。从图 12 可知,20 世纪 80 年代的渝北区降水量小于多年降水量平均值,降幅达 104.8 mm,减少率为 9.46%;在 20 世纪 90 年代以及从 2010—2019 年两个时间阶段,渝北区降水量均高于多年降水量平均值,特别是 2010 年后降水量较多年降水量平均值增加了 98.7 mm,增加率达 8.9%,说明 2010—2019 年是渝北区的丰水期;2000—2009 年间的降水量基本与多年降水量平均值持平,略有减少。从季节上来看,2010—2019 年渝北区的夏季和冬季降水量分别低于多年夏季和冬季平均降水量,其中夏季降水量比多年夏季平均降水量减少了 35.98 mm,减少率为 7.24%。在上述同一时期,渝北区春季和秋

季降水量均分别高于多年春季和秋季平均降水量,增加率分别为 12.2% 和 42.3%。总体来看,除冬季外,春、夏、秋季对渝北区全年降水量变化均有一定影响。

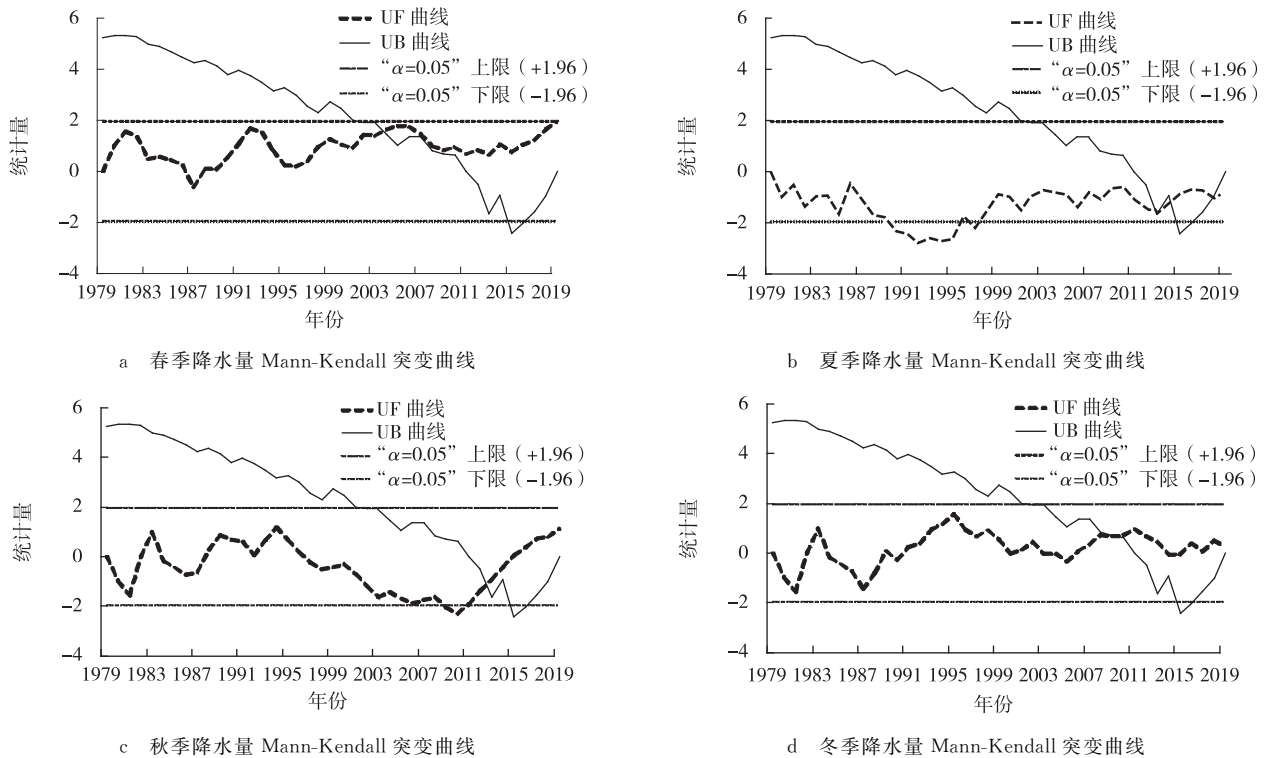


图 11 渝北区各季节降水量 Mann-Kendall 突变曲线

Fig. 11 Seasonal precipitation Mann-Kendall mutation curves of Yubei district

3.3 降水量的周期变化

由于小波系数实部等值线图能表示降水序列在时间尺度中的分布及在不同时间域的周期变化情况,预测降水在不同时间尺度的演变趋势,故用小波分析法对渝北区 1979—2019 年年降水量变化进行分析。为了能较准确地反映小波系数实部等值线图在渝北区降水多时间域分析中的作用,同时使用 Surfer 12.0 软件进行修饰和处理,得到 1979—2019 年渝北区年降水量小波系数实部等值线图(图 13)。从该图可见,在 20 世纪 80—90 年代,图中出现了负值区,表明这一时期渝北区降水量偏少。在 1979—2019 年渝北区的年降水量周期变化分布中,存在多时间尺度特征,主要有 14~20 a, 6~10 a 和 4~6 a 共 3 种时间尺度,这 3 种尺度的周期变化分布相对密集且强烈;此外,年降水量周期在 10~18 a 时间尺度上出现准 8 次震荡,在 20~30 a 尺度上发生了丰-枯交替的准 5 次震荡。同时,还可以得出渝北区年降水量在 1979—2019 年的 10~18 a 和 20~30 a 两个时间尺度的周期变化均表现出全域性和稳定性,而 3~10 a 尺度的年降水量周期变化在 1990 年之后表现相对稳定。

为得到在渝北区降水量变化过程中存在的主周期,通过小波方差图显示降水时间序列中波动能量随年尺度的分布情况来进行分析。从图 14 中可以看出有 4 个峰值较为明显,它们的时间尺度依次是 22, 13, 8 和 4a, 其中:22 a 的时间尺度对应最大峰值,那么在 22 a 左右(即 2001 年)的周期震荡最强,为渝北区年降水量变化的第一主周期;第二峰值对应 13 a(即 1992, 2005 和 2018 年)的时间尺度,为降水量变化的第二主周期;第三峰值分别对应着 8 a(即 1987, 1995, 2003, 2011 和 2019 年)和 4 a 的时间尺度,它们依次为降水量变化的第三和第四主周期。以上结果表明降水量在渝北区 1979—2019 年间的变化特征受上述 4 个周期的波动控制。

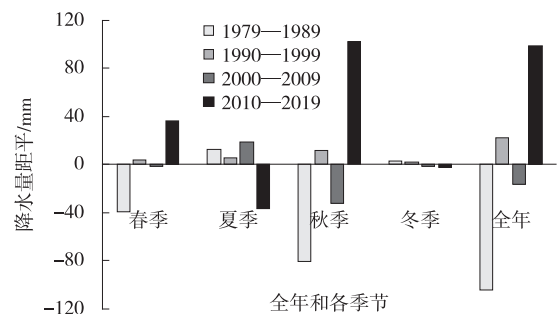


图 12 渝北区全年和各季节降水量距平的变化

Fig. 12 Annual and seasonal precipitation anomaly variations of Yubei district

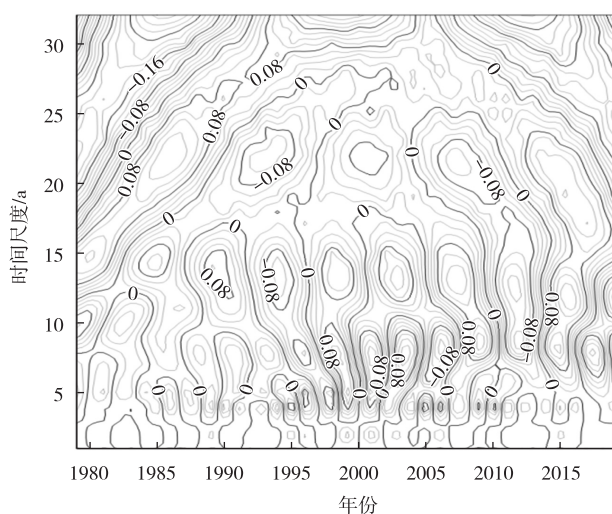


图13 渝北区降水量小波系数实部等值线图

Fig. 13 Wavelet coefficient real part contour map of precipitation in Yubei district

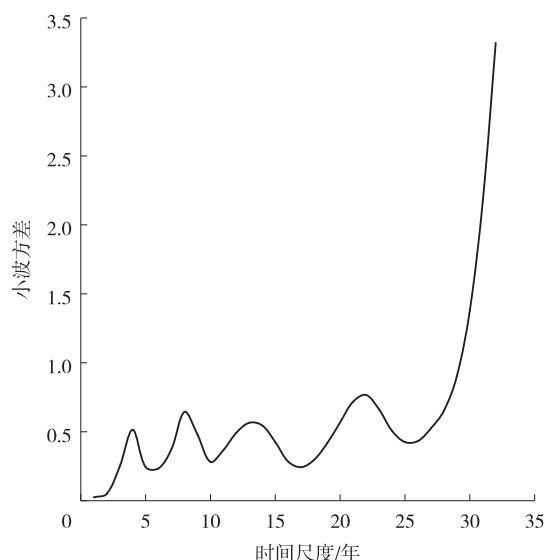


图14 渝北区降水量小波方差

Fig. 14 Precipitation wavelet variance of Yubei district

图15是渝北区1979—2019年降水量小波系数模等值线图。时间域中不同时间尺度变化周期所对应的能量密度分布可以用小波系数的模值来表示;小波系数模值越高,说明它所对应的时段或尺度的周期性越强。在渝北区降水演化过程中,18~32 a时间尺度模值最高,表明该时间尺度周期变化最大;18~22 a时间尺度的周期变化大小次之;其他时间尺度的周期性变化很小。

小波能量谱即不同周期的震荡能量,可通过小波系数的模方反映得到。由渝北区1979—2019年降水量小波系数模方等值线图(图16)可以看出,25~32 a时间尺度的周期性最明显、能量最强,但在1995年前它的周期变化具有局部性;10~15 a时间尺度能量分布较弱,而周期分布较明显,在1995—2019年几乎占据整个地区的研究时域。

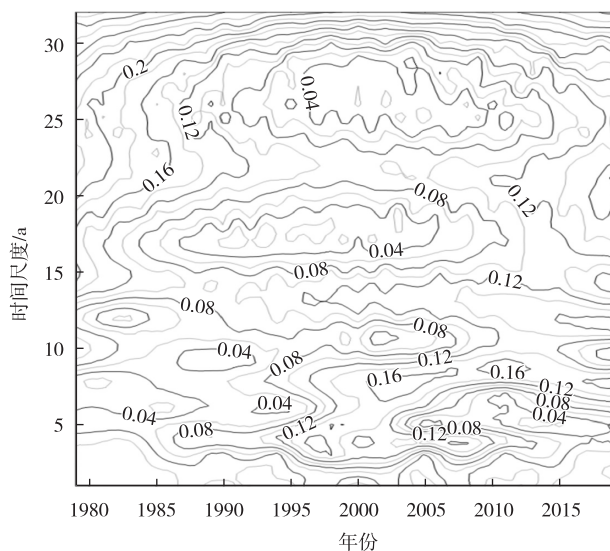


图15 渝北区降水量小波系数模等值线图

Fig. 15 Wavelet model contour map of precipitation in Yubei district

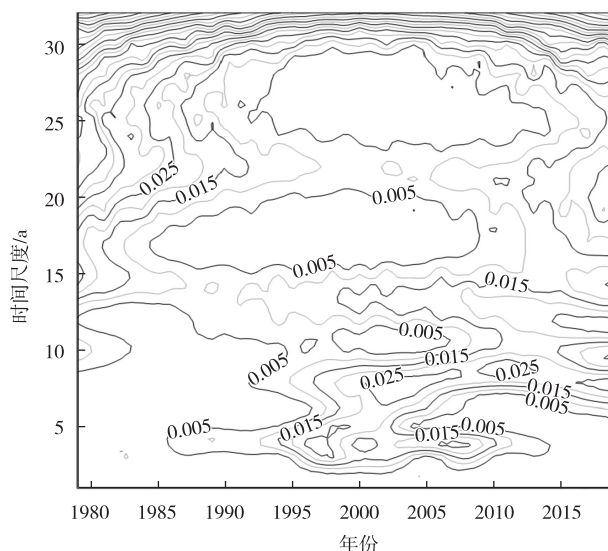


图16 渝北区降水量小波系数模方等值线图

Fig. 16 Wavelet model square contour map of precipitation in Yubei district

在小波方差检验的结果的基础上,得到了渝北区年降水量演变的第一和第二主周期小波系数(图17),由此可以得出不同的时间域中的区域降水量丰-枯变化特征和平均周期变化。从图17a发现在22 a特征时间尺度

上,区域降水量变化大概经历了 3 个丰-枯转换期,降水量变化平均周期为 13.5 a 左右;从图 17b 得出在 13 a 特征时间尺度上降水量大概经历 4.5 个周期的丰-枯变化,降水量的平均变化周期为 9 a 左右。

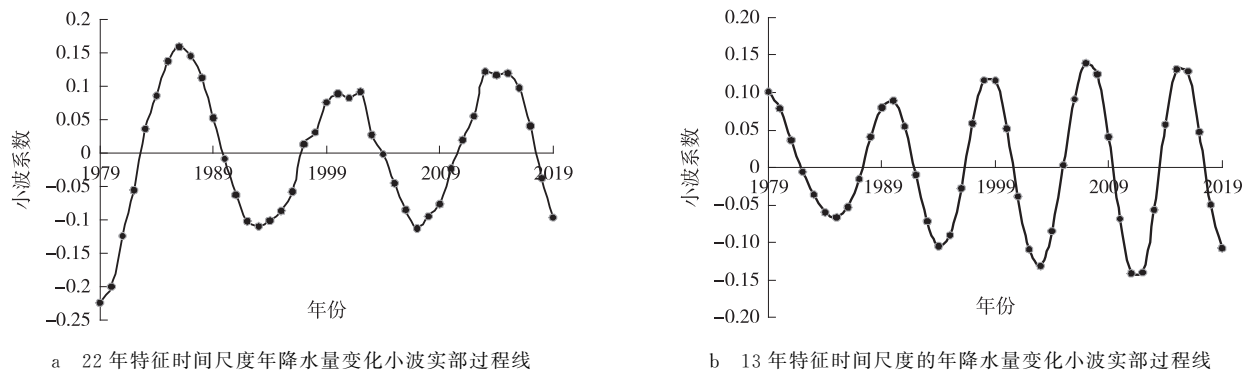


图 17 渝北区 22 年和 13 年特征时间尺度的年降水量变化小波实部过程线
Fig. 17 The real part of wavelet process lines of annual precipitation change in 22 a and 13 a characteristic time scales of Yubei district

3.4 降水量的空间分布

3.4.1 误差分析 为了对插值展布结果进行验证,选取研究区 2017 年 2 个气象站点即渝北气象站、叠彩山站(图 1)的实测降水数据作为验证数据,通过独立点检测的方法对结果进行误差检验。由表 1 可知:2 个站点的月降水量平均误差为 8.27%;夏季平均误差(10.18%)最大,其次为春季、冬季的平均误差(分别为 8.54%和 7.31%)、秋季平均误差最小(7.04%)。从月份上看,8 月的平均误差最大(11%),其次为 6 月的平均误差(10.77%),10 月的平均误差最小(5.14%)。分析其中原因,应该是夏季迎风坡受东南季风的影响降水较强,这种局地地形的影响在插值展布中不能充分体现,从而误差较降水量小的月份大。叠彩山站平均误差(8.4%)略大于渝北气象站(8.1%),可能是因该站点位于研究区中西部且周边地形较复杂、海拔较高所致。由此可见,降水受地形地貌和局地气候条件等多因素影响,相互作用非常复杂;因此预测值与实测值存在一定误差,但在可接受范围内。

表 1 IDW 与实测月降水量的相对误差
Tab. 1 The relative errors between IDW and measured monthly precipitation

站点	测量结果及误差	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
渝北气象站	实测月降水量/mm	20.3	24.1	47.1	101.7	155.8	198.8	182.0	137.1	112.1	99.2	50.3	27.0
	IDW 法月降水量/mm	22.0	26.1	43.6	111.6	167.5	223.3	197.6	151.4	107.0	94.0	45.8	25.4
	误差/%	8.45	8.45	-7.51	9.69	7.54	12.32	8.57	10.45	-4.55	-5.24	-8.97	-5.93
叠彩山站	实测月降水量/mm	19.7	23.2	51.1	101.7	155.8	198.0	174.4	153.2	157.2	102.5	46.1	27.0
	实测月降水量/mm	18.8	25.0	46.6	109.9	170.9	216.3	190.0	135.5	137.1	97.3	43.5	29.4
	误差/%	-4.47	7.86	-8.75	8.08	9.69	9.22	8.97	-11.56	-12.79	-5.04	-5.64	8.73
平均误差/%		6.46	8.15	8.13	8.89	8.62	10.77	8.77	11.00	8.67	5.14	7.30	7.33

3.4.2 年平均降水量的空间特征 利用 ArcGIS IDW 展布得到 1979—2019 年渝北区的年平均降水量空间分布图(图 18),从中可以看出,渝北区年平均降水量在空间上呈西南向东北、东南部递增趋势。年平均降水量最大的是位于渝北区明月山东侧的太盛镇和洛碛镇,达 1 164 mm,这是因为该区域位于迎风坡,受夏季东南季风的影响较大;次降水中心位于渝北区木耳镇靠近新桥水库区域,年平均降水量约 1 133 mm,这可能与当地修建水库后水域面积增加从而对局地的湿度、降雨等气候变化产生一定影响有关;年降水量最小的区域位于渝北区西南部即人为活动最密集的的人和和大竹林两个街道,其中原因可能与该区域位于铜锣山西南部的背风坡有关。总体看来,渝北区由于坡度、海拔、大气、人工开发等因素的影响,降水量存在一定的时空分布差异性,但区域内年降水量相差不大(1 085.3~1 164.09 mm),降水较为充沛。

3.4.3 季节平均降水量的空间特征 渝北区 1979—2019 年各季节的平均降水量空间分布如图 19 所示。夏季平

均降水量最高,在 433.70~541.4 mm 之间,并呈中心高值区域向四周递减趋势。其次是春季平均降水量,在 280.61~351.17 mm 之间,它的空间分布规律与年平均降水量的情况相似(图 18)。秋季平均降水量低于春季平均降水量,在 250.16~278.88 mm 之间,高值中心位于东部明月山的北部;其中原因可能是渝北区受到西风带影响,夏季东南季风减弱,因此中部和西南部的降水减少。冬季平均降水量在 60.26~77.20 mm 之间,它的空间分布规律与年降水量空间分布规律相似,其中西南部降水量最低(平均值为 62.3 mm)。

3.4.4 平均年不同强度降水天数空间特征 渝北区 1979—2019 年不同强度降水天数空间分布见图 20。研究区内年平均中雨发生天数空间分布表现为东南部多于西北、东北部:东南部区域年平均中雨发生数为 107 d,西北部区域年平均中雨发生数为 104 d;这一空间分布规律与渝北区年平均降水量空间分布相似,说明渝北区年降水量中做主要贡献的是中雨。大雨和暴雨发生天数均呈西北部地区向东南部和西南部地区递减趋势:西北地区平均暴雨发生数可达 3.7 d,平均大雨发生数为 11 d;西南和东南地区平均暴雨发生数为 2.3 d,平均大雨发生数为 9.5 d,这一点与渝北区夏季平均降水量空间分布较为类似,也进一步说明渝北区夏季降水以暴雨和大雨为主。

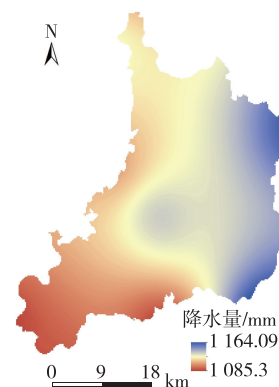


图 18 渝北区年平均降水量空间分布
Fig. 18 Spatial distribution of annual precipitation in Yubei district

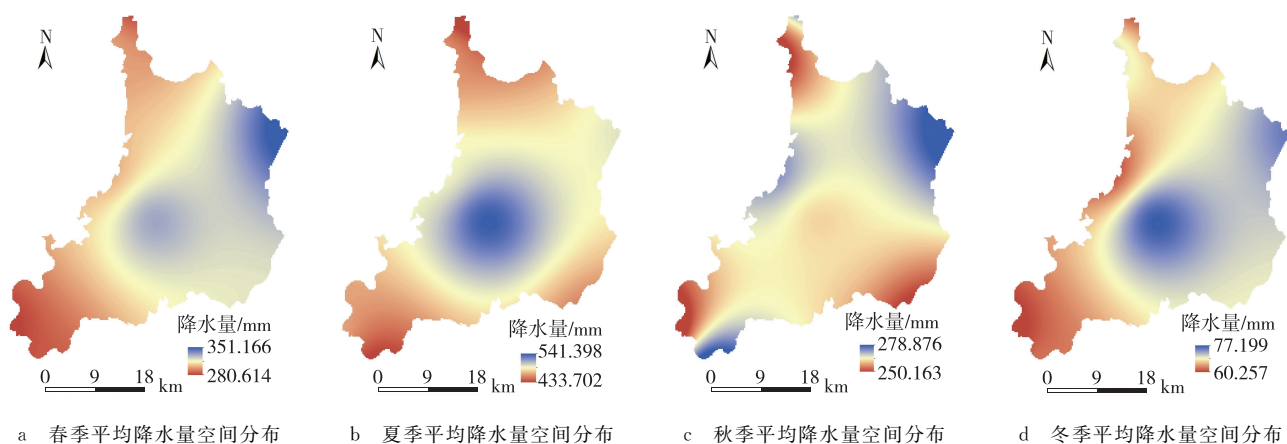


图 19 渝北区四季平均降水量空间分布

Fig. 19 Average precipitation spatial distribution of four seasons in Yubei district

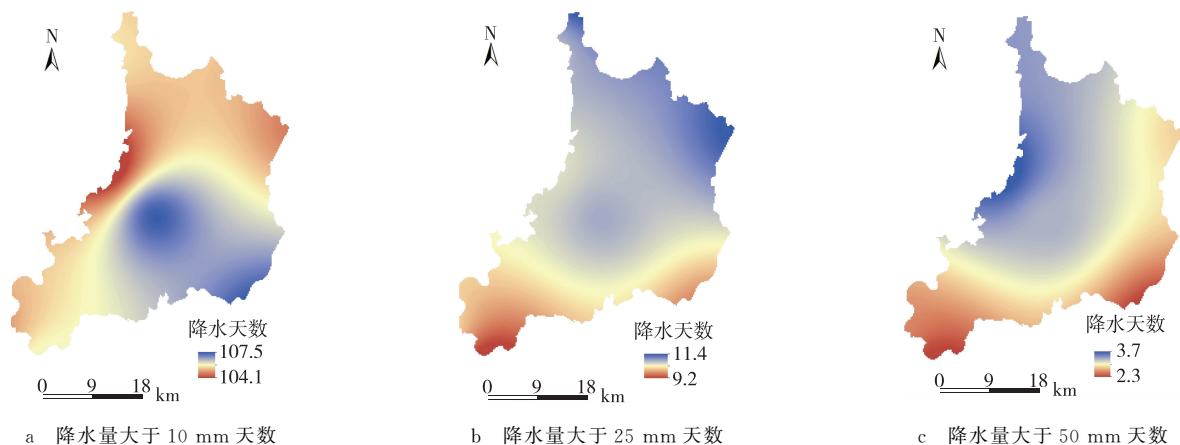


图 20 渝北区不同强度降水天数分布

Fig. 20 Distribution of precipitation days with different intensities in Yubei district

4 结束语

通过上述对有关山地新城渝北区 1979—2019 年降水时空演变规律的分析,可以归纳得到以下主要结果:

1) 渝北区年降水量倾向率为 $3.65 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 1979—1996 年降水量变化平缓, 1996—2014 年降水量出现多个波谷和波峰, 2014 年降水量后又呈上升趋势。

2) 1979—2019 年渝北区降水量在春、秋季呈上升趋势, 在夏季呈缓慢下降趋势, 在冬季变幅不大, 2010—2019 年夏、冬季的降水量均低于多年夏、冬季平均降水量, 春、秋季降水量均高于多年春、秋季平均降水量; 在 1979—2019 年, 渝北区降水量在丰、枯水期呈上升趋势, 且丰水期对降水量的影响明显比枯水期更大。

3) 渝北区全年、丰水期的降水天数起伏变化不大, 但是暴雨和大雨发生的天数有所增长。

4) 渝北区降水量的变化特征受 22, 13, 8 和 4 a 共 4 个周期的波动控制; 在 22 a 特征时间尺度上, 降水量经历 3 个丰-枯转换期; 在 13 a 特征时间尺度上, 降水量经历 4.5 个周期的丰-枯变化。

5) 渝北区年降水量在空间分布上呈西南向东北、东南部递增趋势, 与春、冬季降水量空间分布规律相似, 夏季呈中心高值区域向四周递减趋势; 中雨天数分布规律为东南部多于西北、东北部, 大雨和暴雨天数分布规律与之相反; 全年降水以中雨为主, 夏季降水以暴雨和大雨为主。

总之, 渝北区年降水量呈明显上升趋势, 丰水期对降水的影响明显大于枯水期, 今后由降水引发的城市积水事件可能增加; 年降水量和中雨天数的最大值出现在该区东南部, 大、暴雨天数的最大值出现在该区中部。需要强调的是, 渝北区的降水与区域内复杂的下垫面情况和大气环境等因素密切相关, 还需进一步探求更精确的插值方法, 同时结合地形地貌、大气条件等影响因素, 多尺度综合分析该区域的降水时空演变规律。

参考文献:

- [1] 段祥佩, 魏兴萍, 刘迅. 1961—2014 年重庆市降水量的时空变化特征[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2018, 35(6): 40-48.
DUAN X P, WEI X P, LIU X, et al. Spatial and temporal characteristics of precipitation in Chongqing from 1961 to 2014[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2018, 35(6): 40-48.
- [2] 于赢东, 杨志勇, 刘永攀, 等. 变化环境下海河流域降水演变研究综述[J]. 水文, 2010, 30(4): 32-35.
YU Y D, YANG Z Y, LIU Y P, et al. Review of study on precipitation of Haihe river basin under changing environment[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4): 32-35.
- [3] 徐宗学, 刘琳, 杨晓静. 极端气候事件与旱涝灾害研究回顾与展望[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(1): 66-74.
XU Z X, LIU L Y, YANG X J. Study on extreme climate events and drought/flood disasters: review and prospect[J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(1): 66-74.
- [4] 吴玉成. 我国城市内涝灾害频发原因分析[J]. 中国防汛抗旱, 2011, 21(6): 7-8.
WU C Y. Analysis on the causes of frequent urban waterlogging disaster in China[J]. China Flood & Drought Management, 2011, 21(6): 7-8.
- [5] 央广网. 国家防总介绍防汛抗旱情况: 1508 县遭受洪涝灾害[EB/OL]. (2016-07-14)[2021-12-14]. http://china.cnr.cn/ygxw/20160714/t20160714_522677912.shtml?from=timeline.
CNR News. State flood control headquarters introduced the flood control and drought relief: 1508 county was hit by flood disaster[EB/OL]. (2016-07-14)[2021-12-14]. http://china.cnr.cn/ygxw/20160714/t20160714_522677912.shtml?from=timeline.
- [6] SHEFFIELD J, WOOD E F, RODERICK M L. Little change in global drought over the past 60 years[J]. Nature, 2012, 491(7424): 435-438.
- [7] 张琪, 李跃清. 近 48 年西南地区降水量和雨日的气候变化特征[J]. 高原气候, 2014, 33(2): 372-383.
ZHANG Q, LI Y Q. Climatic variation of rainfall and rain day in southwest China for last 48 years[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 372-383.
- [8] 郑祚芳, 高华, 王在文, 等. 北京地区降水空间分布及城市效应分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2): 522-529.
ZHENG Z F, GAO H, WANG Z W, et al. Analysis on spatial distribution of precipitation in Beijing and its city effect[J]. Plateau Meteorology, 2014, 33(2): 522-529.
- [9] 折远洋, 杨波, 尚清芳, 等. 近 58 年河西地区降水事件的连续性特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 139-145.

- SHE Y Y, YANG B, SHANG Q F, et al. Characteristics of continuity of precipitation events in recent 58 years in Hexi area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 139-145.
- [10] 孙宇辉, 韦杰, 黄小燕. 近 50 年重庆市气候干湿变化时空特征[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(5): 11-17.
SUN Y H, WEI J, HUANG X Y. Spatio-temporal characteristics of dry-wet condition in Chongqing in the past five decades[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2016, 33(5): 11-17.
- [11] 万敏, 李家启, 张爽, 等. 北碚区降水时空分布及变化趋势分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(7): 122-128.
WAN M, LI J J, ZHANG S, et al. On analysis of temporal-spatial distribution and change trend of precipitation in Beibei[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2013, 38(7): 122-128.
- [12] 重庆市渝北区人民政府. 2019 年渝北区国民经济和社会发展统计公报[R]. 重庆: 重庆市渝北区人民政府, 2020.
The People's Government of Yubei, Chongqing. 2019 national economic and social development statistical bulletin of Yubei district[R]. Chongqing: The People's Government of Yubei, Chongqing, 2020.
- [13] 宋廷山. 应用统计学 Excel 为分析工具[M]. 成都: 西南财经大学出版社, 2006.
SONG T S. Application of statistical Excel as analysis tool[M]. Chengdu: Southwestern University of Finance and Economics Press, 2006.
- [14] BURN D H, CUNDERLIK J M, PIETRONIRO A. Hydrological trends and variability in the Liard river basin[J]. Hydrological Sciences Journal, 2004, 49(1): 53-67.
- [15] 李丽娟, 郑红星. 华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析: 以潮白河为例[J]. 地理学报, 2000, 55(3): 309-317.
LI L J, ZHENG H X. Characteristics and driving forces of annual runoff changes for rivers in north China: a case study in the Chaobaihe river[J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(3): 309-317.
- [16] 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. Modern technology of statistics diagnosis and forecast for climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [17] 张剑明, 黎祖贤, 章新平. 长沙近 50 年来降水的多时间尺度分析[J]. 水文, 2007, 26(6): 78-80.
ZHANG J M, LI Z X, ZHANG X P. Multiple timescale analysis of precipitation in Changsha city during last 50 years[J]. Journal of China Hydrology, 2007, 26(6): 78-80.
- [18] 郑爱勤, 王文科, 段磊, 等. 渭河流域基流及降雨的多尺度特征和突变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 144-148.
ZHENG A Q, WANG W K, DUAN L, et al. Multiscale characteristics and abrupt change of baseflow and precipitation series of Wei river[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(6): 144-148.
- [19] 米热古力·艾尼瓦尔, 海米提·依米提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 等. 基于小波分析的伊塞克湖水位变化特征[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1): 168-172.
MIREGULI AINIWAER, HAIMITI YIMITI, MAIMAITITUERXUN AIZEZI, et al. Water level variations of Issyk-Kul lake based on wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 168-182.
- [20] 邓霞, 董晓华, 薄会娟. 基于 SRTM DEM 的月降雨量空间插值研究[J]. 灾害与防治工程, 2009(2): 55-60.
DENG X, DONG X H, BO H J. Research on rainfall spatial interpolation based on SRTM DEM[J]. Disaster and Control Engineering, 2009(2): 55-60.
- [21] ZHANG K X, PAN S M, CAO L G, et al. Spatial distribution and temporal trends in precipitation extremes over the Hengduan mountains region, China from 1961 to 2012[J]. Quaternary International, 2014, 349: 346-356.
- [22] 彭波, 钟仕全, 苏旭芳, 等. 漓江流域降雨量空间插值精度分析[J]. 气象研究与应用, 2011, 32(4): 30-33.
PENG B, ZHONG S Q, SU X F, et al. Analysis on rainfall spatial interpolation precision in Lijiang river basin[J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2011, 32(4): 30-33.
- [23] 彭洋, 查良松. 安徽省降雨量空间分布方法[J]. 地理空间信息, 2010, 8(1): 67-69.
PENG Y, ZHA L S. Method for spatial interpolation of precipitation in Anhui[J]. Geospatial Information, 2010, 8(1): 67-69.
- [24] 李金洁, 王爱慧. 基于西南地区台站降雨资料空间插值方法的比较[J]. 气候与环境研究, 2019, 24(1): 50-60.
LI J J, WANG A H. Comparison of spatial interpolation methods based on monthly precipitation observation data of station in southwest China[J]. Climatic and Environmental Research, 2019, 24(1): 50-60.
- [25] LLOYD C D. Assessing the effect of integrating elevation data into the estimation of monthly precipitation in Great Britain[J]. Journal of Hydrology, 2005, 308(1/2/3/4): 128-150.
- [26] 温艳茹, 王建力. 重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系[J]. 环境科学, 2016, 37(7): 2462-2469.
WEN Y R, WANG J L. Variations of stable isotope in precipitation and its atmospheric circulation effect in Chongqing[J].

Environmental Science, 2016, 37(7): 2462-2469.

- [27] 李维杰, 王建力, 王家录. 西南地区不同地形降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1132-1142.

LI W J, WANG J L, WANG J L. Characteristics of the stable isotopes in precipitation and the source of water vapor in different terrain in the Southwest region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5): 1132-1142.

- [28] 重庆市住房和城乡建设委员会. 中心城区排水防涝专项规划(修编)[R]. 重庆: 重庆市住房和城乡建设委员会, 2022.

Commission of Housing and Urban-Rural Development of Chongqing. Special planning of drainage and waterlogging prevention in central urban area(revised)[R]. Chongqing: Commission of Housing and Urban-Rural Development of Chongqing, 2022.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Spatiotemporal Evolution of Precipitation in Mountainous Cities: A Case Study of Yubei District, Chongqing

ZHANG Qin, ZHANG Shouping, YANG Qingwei

(Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,

National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: [Purposes] Taking Yubei district of Chongqing as an example to explore the spatial-temporal evolution of precipitation in the newly developed mountainous areas. [Methods] The temporal and spatial variation characteristics of precipitation were studied in Yubei, Chongqing from 1979 to 2019 by using linear regression method, inverse distance weighting method, wavelet analysis method and geostatistical interpolation method. [Findings] The annual precipitation of Yubei district was increased by 3.52 mm/a, and the precipitation changed gently from 1979 to 1996, troughs and peaks appeared alternately from 1996 to 2014, then showed an upward trend after 2014. The precipitation increased in spring and autumn, decreased slowly in summer, and changed little in winter, it showed an increasing trend in wet season and dry season, and the increasing trend in wet season was greater than that in dry season. The total days of annual precipitation and precipitation in wet season fluctuated little, but the days of heavy rain and storm increased. The precipitation went through 3 periods of wet-dry transition on the 22-year characteristic time scale, and which were 4.5 periods of wet-dry transition on the 13-years characteristic time scale. The spatial distribution of precipitation showed an increasing trend from southwest to northeast and southeast, which was similar to spring and winter, the central area with high value decreased to all sides in summer. The annual precipitation was mainly moderate rain, the spatial distribution of moderate rain days was similar to that of annual precipitation, but the spatial distribution of heavy rainfall days was similar to that of summer precipitation. [Conclusions] The annual precipitation of Yubei district showed a significant upward trend, and the influence of wet season on precipitation was significantly greater than that of dry season. The urban water-logging caused by precipitation might increase. The maximum annual rainfall and moderate rainfall days appeared in the southeast, while the maximum number of heavy rain and storm days appeared in the middle of the district.

Keywords: precipitation; mutation detection; wavelet analysis; temporal and spatial distribution; Yubei district; Chongqing

(责任编辑 方 兴)