

1960—2013年重庆市气温变化特征分析*

秦旭梅¹, 魏兴萍¹, 陈亮², 吴倩云¹

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆401331; 2. 河南大学环境与规划学院, 河南开封475004)

摘要:【目的】深入了解重庆市气温变化的时空分布格局。【方法】利用重庆市34个气象台站1960—2013年的逐日气温资料,采用线性倾向估计、滑动 t 检验、Mann-Kendall突变检验以及Morlet小波等方法分析重庆市气温变化特征。【结果】1960—2013年重庆市的区域增温速率为 $0.008\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$;四季气温也均呈上升趋势,其中秋季增幅最大,夏季最小;年平均气温存在显著的2~4 a周期变化,年均温年代际变化具有阶段性,2000年前有降温的趋势,其中1980—1989年为低温期,2000年气温突变后为升温期;季节均温年代际变化表现为:春季、秋季、冬季呈“降温—增温—降温”的变化过程,夏季则只有“降温—增温”的变化趋势;气温增温速率在空间分布上由西向东逐渐升高,巫溪达到最高值,为 $0.056\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。【结论】1960—2013年重庆市的区域年平均气温略有上升,四季升温趋势存在差异;气温年代际变化具有阶段性:低温期、过渡期、升温期,2000年为重庆市气温突变年;气温增温趋势总体呈由西向东逐渐递增的空间分布格局。

关键词:重庆市;气温变化;突变检验;小波分析

中图分类号: P423.3

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2017)06-0040-09

当前,全球气候变暖已成为毋庸置疑的事实。IPCC第5次评估报告《Climate Change 2013: The Physical Science Basis》的决策者摘要(Summary for policymakers, SPM)指出:1880—2012年全球地表均温约升高 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$,呈持续上升趋势,且近些年的增速有增加趋势;过去30年(1983—2012年),全球地表增暖幅度居1850年以来最高水平^[1]。此外,大量数据与研究结果表明,最近100余年来中国平均气温变化与全球平均气温变化趋势极为相似^[2-3]。特别是从1970年开始的增温,增幅高于全球平均增温水平^[4]。同时,这种气候变化是不均匀的^[5],具有明显的地区差异性。重庆市地处中国西南地区、四川盆地东部,是东部平原到青藏高原的一个过渡区,受复杂地形和多重气候系统影响,天气气候异常复杂,气温变率较大^[6]。

气候变化对人类生产生活具有极大的影响,近些年来,不少学者对重庆市的气温变化做了很多研究。就变化趋势而言,不同学者的研究结果也不尽相同。唐晓萍等人^[7]基于线性趋势系数的研究表明1961—2010年间重庆市气温呈上升趋势;而李永华等人^[8]研究表明1959—2001年整个时间域气温呈下降趋势;刘晓冉等人^[6]研究发现重庆市温度变化具有阶段性:1961—1985年明显降低,1986—2006年明显增加,而年平均最低气温近46年整体上升趋势明显^[6]。同时,也有研究表明,重庆市各季节多年平均气温增减存在不同的模式^[6]。此外,还有不少研究关注气温的空间变化。从空间上看,重庆市西部、东南部偏南地区以及东北部大部地区增温显著^[7]。郭渠等人^[9]运用EOF,REOF等方法对重庆市夏季最高气温的空间分布变化特征进行研究后认为:夏季极端最高气温的异常空间分布可分为重庆市西部、东南部、东北部、中部4个关键区,且2~4 a的周期振荡明显,并同区域性增暖呈明显的正响应关系。鉴于多数学者侧重于对重庆市年平均气温的整体变化趋势或极端气候变化进行研究,本研究选取1960—2013年的重庆市逐日气温资料,分析重庆市气温时空演变特征,以期为更深入地了解重庆市气候变化提供基础资料。

1 资料与方法

1.1 研究区域与数据来源

重庆市位于东经 $105^{\circ}11'\sim 110^{\circ}11'$ 、北纬 $28^{\circ}10'\sim 32^{\circ}13'$,地处中国西南部、长江上游,面积约 $8.24\times 10^4\text{ km}^2$;地

* 收稿日期:2016-09-29 修回日期:2017-10-08 网络出版时间:2017-11-10 15:40

资助项目:国家自然科学基金(No.41202135);重庆市自然科学基金(No.CSTC2012jjA80008;No.CSTC2016jcyjA0150)

第一作者简介:秦旭梅,女,研究方向为水土保持与生态建设,E-mail:13320211485@163.com;通信作者:魏兴萍,教授,E-mail:xingpingwei@126.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20171110.1540.026.html>

势由南北向长江河谷逐级降低,呈平行峡谷状;北部、东部及南部分别是大巴山、巫山、武陵山、大娄山,西北部和中部以低山、丘陵为主^[10]。重庆市气候温和,春早冬暖,夏热秋凉;空气湿润,降水充沛;日照时间短,无霜期长,云雾多,属亚热带季风性湿润气候。本研究的数据资料来源于重庆市气象部门提供的重庆市34个气象站点1960—2013年的日平均气温数据资料,各站点的缺测数据采用临近站点的观测数据用多元回归插值补齐。

1.2 研究方法

在对数据资料进行均一化检验和差值订正的基础上,本研究采用线性倾向估计、滑动 t 检验、Mann-Kendall法、Morlet小波等方法分析重庆市1960—2013年气温变化特征,同时分析不同季节的气温变化速率和距平气温。季节划分方法为:春季为3—5月,夏季为6—8月,秋季为9—11月,冬季为12月—翌年2月。

1.2.1 线性倾向估计 建立一元线性回归方程 $x_j = a + bt_i, i = 1, 2, \dots$ 。其中: x_j 为气候要素序列, t_i 为时间序列(本研究中为1960—2013年); a 为回归常数, b 为回归系数, a 和 b 用最小二乘法进行估计^[11]。

1.2.2 滑动 t 检验 滑动 t 检验是通过考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变的方法。对于气候序列 x ,人为设置某一时刻为基准点,基准点前后两段子序列 x_1 和 x_2 的样本分别为 n_1 和 n_2 ,两段子序列的平均值

分别为 \bar{x}_1 和 \bar{x}_2 ,方差分别为 s_1^2 和 s_2^2 ,则 $t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$ 。其中 $s = \sqrt{\frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}}$,进行滑动的连续计算,可得到

t_j 序列,绘制曲线^[11]。

1.2.3 Mann-Kendall 突变检验 Mann-Kendall法是一种非参数统计检验方法,亦称无分布检验^[11]。设气候序列为 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$,表示第 i 个样本 x_i 大于 x_j 的累计数,定义一个统计量 $s_k = \sum_{i=1}^k r_i, k = 2, 3, \dots, n$ 。其中

$r_i = \begin{cases} 1, & \text{当 } x_i > x_j \\ 0, & \text{当 } x_i \leq x_j \end{cases}, j = 1, 2, \dots, i$ 。在原序列随机独立的假定下, s_k 的均值方差分别为 $E(s_k) = \frac{k(k-1)}{4}$,

$\text{var}(s_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$ 。将 s_k 标准化,有 $U_{F_k} = (s_k - E(s_k)) / \sqrt{\text{var}(s_k)}$ 。这里 U_{F_k} 为标准正态分布,它的概

率 $\alpha_1 = \text{prob}(U > U_{F_k})$ 可以通过计算或查表获得;判定结果是否具有统计学意义的 α 值为0.05($u_{0.05} = 1.96$)。

若 $U_{F_k} > U_\alpha$,则表明气候序列呈具有统计学意义的变化趋势。按气候序列 x 的逆序列 $(x_n, x_{n-1}, \dots, x_1)$,再重复上面的过程,同时使 $U_{B_k} = -U_{F_k}, k = n, n-1, \dots, 0$ 。若 U_F 大于0,则表明序列呈上升趋势,若 U_F 小于0,则表明呈下降趋势,当超过置信水平 α 时,表明上升(下降)趋势具有统计学意义。如果 U_F 和 U_B 两条曲线出现交点,且交点位于置信区间内,那么交点对应的时刻即是突变开始的时刻。

1.2.4 小波分析 通过小波函数Morlet对重庆市近50年气温变化的时间序列进行连续小波变化^[11]。小波函数为: $\psi(t) = e^{ict} e^{-\frac{t^2}{2}}$ 。其中 c 为常数, i 为虚数。小波变换系数公式为:

$$\omega_f(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle。$$

式中: $\omega_f(a, b)$ 为小波变换系数; $\psi(t)$ 称为基本小波或母小波; $\langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle$ 表示内积; a 为尺度伸缩因子; b 是时间平移尺度; $\psi_{a,b}(t)$ 是 $\psi(t)$ 收缩和平移成的一族函数,称为连续小波。且有 $\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right); a, b \in$

$\mathbf{R}, a > 0$ 。小波方差计算公式为 $\text{var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega_f(a, b)|^2 db$ 。小波功率谱是否具有统计学意义,用红噪声或白噪声标准谱进行检验,检验方法前人已做了大量说明,此处不再赘述。

1.2.5 IDW 插值 IDW插值算法^[12]也称反距离权重法,即以插值点和样点间的距离为权重进行加权平均,算式如下:

$$z = \left[\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{d_i^p} \right] / \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} \right]。$$

其中: z 为第 i 个样点的观测值; d_i 为插值点到第 i 个样点的距离; n 为参与插值的样点数目; p 为用于计算距离权重的幂指数。

2 结果分析

2.1 气温年际变化

1960—2013 年重庆市年均温增幅仅为 $0.008\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ (未通过 0.1 的信度检验)。在此期间,重庆市多年平均气温为 $17.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;最低年均温为 $16.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1982 年),比多年平均气温低 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$;最高年均温为 $18.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2006 年),比多年平均气温高 $1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 1)。

1960—2013 年重庆市春季气温变化范围为 $15.5\sim 19\text{ }^{\circ}\text{C}$,春季气温最高为 $19.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1969 年),最低为 $15.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1996 年);

夏季气温在 $25\sim 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间变化,最高气温为 $28.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2006 年),最低为 $25.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1982 年);秋季气温变化范围为 $16\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温为 $19.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2006 年),最低温为 $16.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1981 年);冬季气温在 $6\sim 9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间变化,最高温为 $9.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1986 年),最低温为 $6.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1976 年)。总体上看,1960—2013 年重庆市四季气温均表现出不同程度的升温趋势,秋季增幅最大,夏季最小(图 2)。

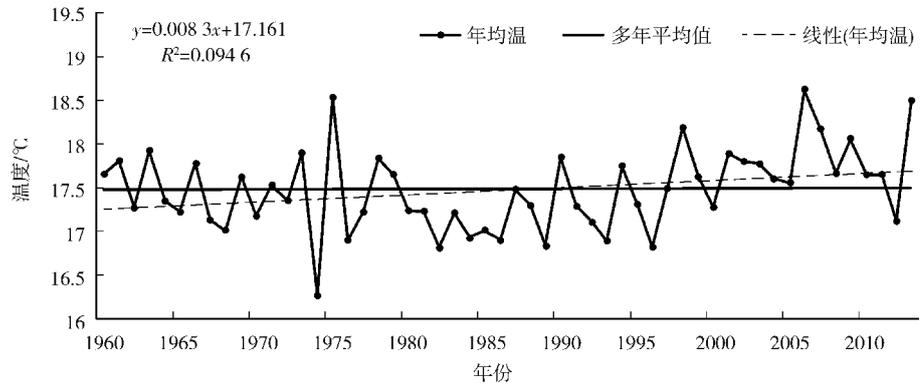
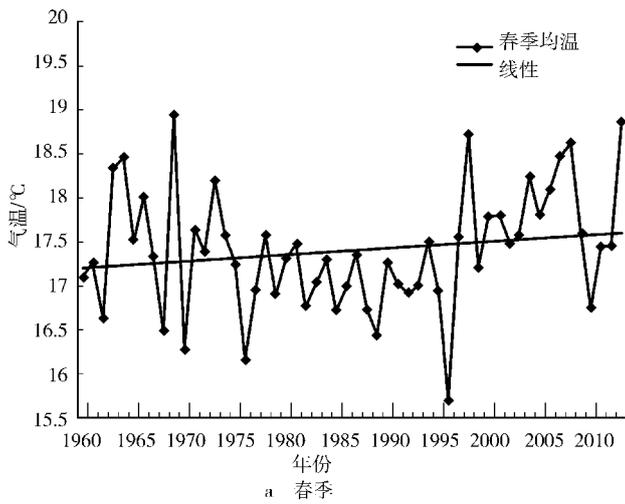
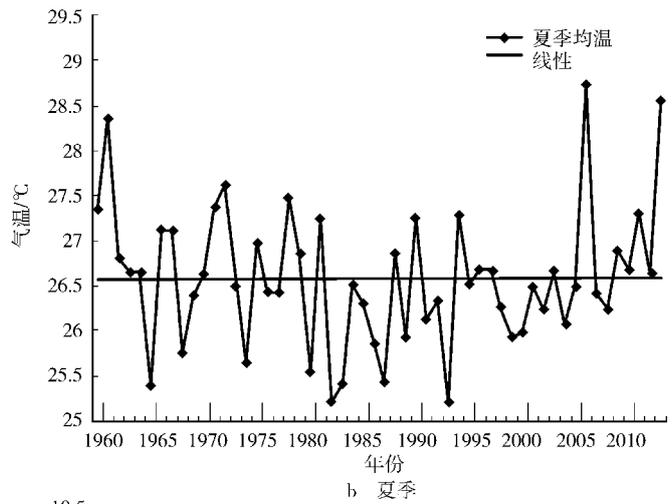


图 1 重庆市气温年变化图

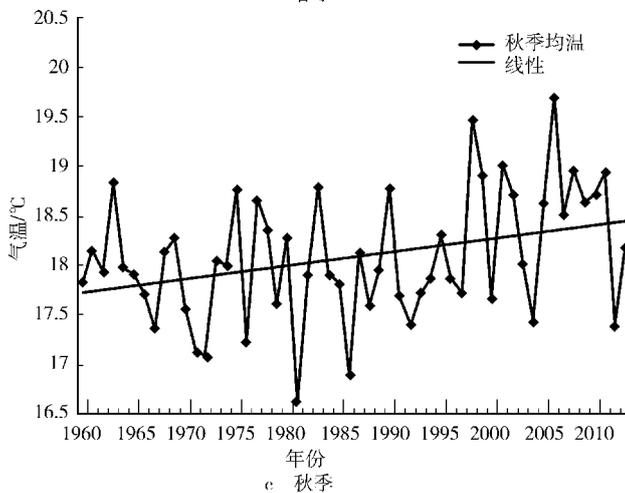
Fig. 1 Variation of the annual temperature in Chongqing city



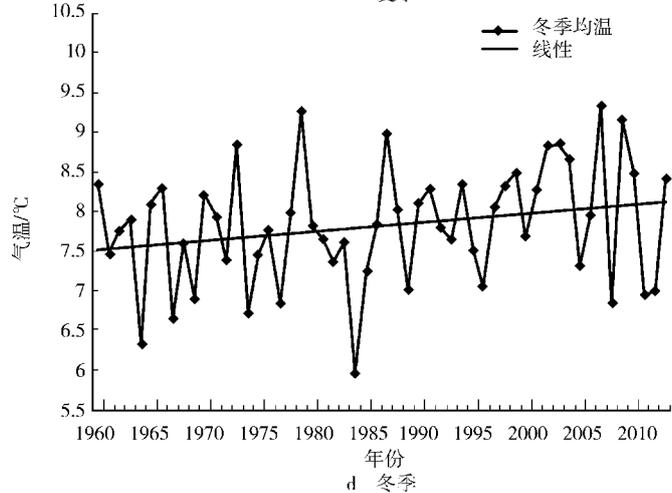
a 春季



b 夏季



c 秋季



d 冬季

图 2 重庆市气温季节变化图

Fig. 2 Variation of the seasonal temperature in Chongqing city

2.2 气温的年代际变化

1960—2013年重庆市气温表现出明显的年代际变化特征(封二彩图3)。总体来看,2000年以前的气温(温度距平值为负)低于2000年后的气温(温度距平值为正)。20世纪80年代全年和四季气温均明显低于1960—2013年平均气温(全年气温距平值为 $-0.381\text{ }^{\circ}\text{C}$),为低温期;2000年以来(2000—2013年)全年和四季气温均明显高于多年平均气温(2000—2009年和2010—2013年的全年气温距平值分别为 $0.368, 0.251\text{ }^{\circ}\text{C}$),为升温期;1960—1979年和1990—1999年两阶段的年均气温与多年平均气温相接近(1960—1969年、1970—1979年和1990—1999年气温距平值分别为 $-0.001, -0.04$ 和 $-0.045\text{ }^{\circ}\text{C}$)且四季气温增减不同,为气温过渡期。

从各季节的气温年代际变化来看,春季、秋季、冬季的气温呈“降温—增温—降温”的过程:1980—1989年的最低,2000—2010年的最高,2010年后的再次降低。夏季气温则呈现出先降温再增温的过程:1960—1969年的夏季气温和1970—1979年的差异不大,1980—1989年的降至最低值,进入20世纪90年代以后夏季气温开始上升,在2010—2013年夏季气温达到最高值。另外,从各年代四季气温与多年平均值的关系来看,低温期和升温期四季气温分别明显低于和高于多年平均值,而过渡期则较为复杂。在过渡期,春季气温在1960—1969年高,在1970—1979年和1990—1999年低;夏季在1960—1979年高,在1990—1999年低;秋季气温在1960—1979年低于多年气温平均值,在1990—1999年高于多年气温平均值;冬季气温在过渡期各年代均高于多年气温平均值。

2.3 气温的空间变化

采用IDW插值法对重庆市34个气象站点年、季节气候倾向率进行内插,得到重庆市气温变化空间分布图(封二彩图4)。重庆市年气温变化率只有万盛、奉节和巫溪三地通过了0.05的信度检验。而季节气温变化只有巫溪四季的气温倾向率以及万盛、奉节的春季、冬季的气温变化超过了0.05的信度检验,呈增温趋势;巴南的秋季以及云阳夏、秋两季气温变化率超过0.1的信度检验,降温趋势具有统计学意义。

1960—2013年重庆市年均温呈上升趋势,且气温倾向率在空间上分布呈现由西部向东部逐渐递增的趋势。气温上升幅度较大的地区主要集中于渝东北,主要包括巫溪、奉节、巫山等地;升温中心为巫溪,升温幅度为 $0.056\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。此外,以黔江、万盛为中心的地区升温也较高,升温幅度范围为 $0.016\sim 0.025\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。以忠县、石柱、綦江、大足、合川等地为中心的,气温变化率为负值,在 $-0.0086\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 范围内波动,呈轻微的降温趋势。重庆市不同季节气温空间变化趋势为:1)春季气温总体呈小幅增温趋势,增速为 $0.0075\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$;局部地区出现降温趋势。渝东北地区增温幅度偏大;巫溪作为最高升温中心点,增幅达 $0.0625\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。出现降温的地区有巴南、大足、合川、綦江、忠县、云阳、石柱等7个地区,其中巴南温度变化最快,达到 $-0.0121\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ (封三彩图5a)。2)在夏季,大部分地区气温变化幅度不大,气温平均增速为 $0.0002\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$,但也有个别地区变幅较大。以巫溪为中心的地区升温较快,变化幅度为 $0.0432\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$;降温幅度最大的是云阳,变化幅度为 $-0.0222\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ (封三彩图5b)。3)秋季气温总体呈较为平缓的降温趋势,变化幅度为 $-0.0058\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。以巫溪、奉节和巫山为中心的渝东北大部分地区以及渝西万盛、铜梁和璧山的小部分地区气温呈不明显的上升趋势,其中巫溪升温最快,变化幅度达 $0.0318\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。降温幅度最大的是云阳,变化幅度达 $-0.022\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ (封三彩图5c)。4)冬季气温是重庆市四季气温中增暖最快的,增速达 $0.0122\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。此期间的气温空间分布呈条带状特征;增温幅度总体上由西南向东北递增,在中东部出现以忠县、石柱等地为中心的低值区。增温速率最大的是巫溪,达 $0.062\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。此外,重庆市在冬季也出现了降温区,包括巴南、潼南、大足三地(封三彩图5d)。

2.4 年均温突变特征

重庆市年平均气温等级滑动 t 统计量曲线表明(图6),子序列 $n=10\text{ a}$ 时,在1999年处 t 值通过0.01的具有统计学意义的水平检验($|t_{0.01}|=3.17$),统计量曲线在1999年也由下降转为上升趋势,表明在1999年前后重庆市气温可能发生了升温变暖的转变。通过重庆市年平均气温Mann-Kendall突变检验曲线(图7)可以看出:1)在1962年和1965—2003年, U_F 值小于0,呈降温趋势;其中在1984—1989年、1991—1993年以及1995年, U_F 值小于 -1.96 ,降温趋势明显。2)在1960—1961年、1963—1964年以及2004—2013年, U_F 值大于0,气温上升。3)曲线 U_F 在置信区间内与 U_B 曲线在1995—2002年间有1个交点。结合上述两种方法可知,重庆市年平均气温在2000年可能发生了突变。

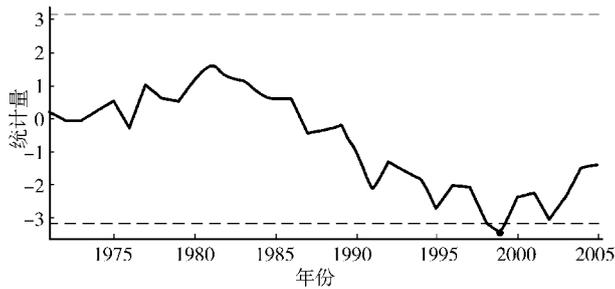


图 6 重庆市年均温等级滑动 t 统计量曲线($\alpha=0.05$)

Fig. 6 The annual average temperature hierarchical sliding t statistics curve ($\alpha=0.05$) in Chongqing city

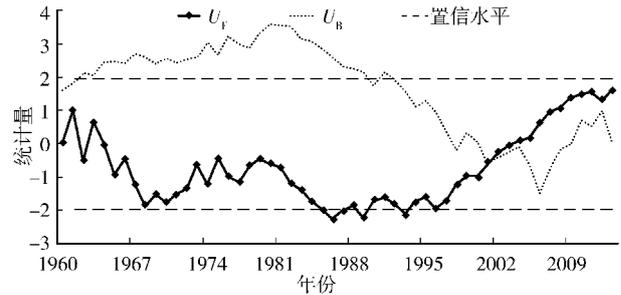


图 7 重庆市年平均气温 Mann-Kendall 突变判别曲线

Fig. 7 Mann-Kendall test curve of annual mean temperature in Chongqing city

2.5 年均温周期变化分析

封三彩图 8 为 1960—2013 年重庆市年均温的 Morlet 小波变换图以及小波功率谱图。由封三彩图 8a 可以看出 1960—2013 年重庆市的年均温主要以 2~4 a 的周期变化为主。为了进一步确定周期在不同时间、不同尺度的变化,对 1960—2013 年重庆市的年均温做了小波功率谱分析,并进行信度检验(实线部分通过 95% 的信度检验)。从封三彩图 8b 可见,16 a 内的周期通过统计学检验,是可信的;此外,在 20 世纪 70 年代重庆市年均温主要是以 2~3 a 的周期变化,在 20 世纪 90 年代以后则以 3~4 a 的周期变化最为明显。

3 讨论

3.1 气温时间变化

从总体趋势来看,气象数据时段不同对整体趋势有影响。经分析,当研究数据始于 1957—1961 年时,很多研究认为由此 50 余年来的重庆市气温增速在 $0.002 \sim 0.010 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间^[6,8,15-18](表 1),本研究结果($0.008 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$)显然符合这一结论。而周梦甜等人^[19]在 1971—2010 年时间尺度上的研究则认为重庆市气温增速为 $0.020 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$,原因是 1960—1970 年重庆市气温变化平缓。就四季温度变化情况而言,众多研究结果表明秋冬增温快,这与本研究结果一致;但本研究中没有发现其他研究中夏季降温的趋势,这可能是 2000 年后特别是 2010 年后夏季气温升高影响了夏季温度变化趋势。总体而言,1960—2013 年重庆市的气温变暖与全球和全国变暖趋势一致,但增温速度低于 20 世纪后半叶全国平均增温水平($0.022 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$)^[13],同时重庆市四季均温增速也与全国的情况相似,但增幅低于全国的水平——后者在春、夏、秋、冬季分别为 $0.023, 0.012, 0.019, 0.036 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[13]。以上结果符合全国增温强度由北向南降低,长江流域南部区域气温增速低于全国的结论^[7]。

就年代变化特征而言,1960—2013 年重庆市气温变化具有明显增温阶段和降温阶段,但不同学者得到的增、降温时间区间不同。比如刘晓冉等人^[6]认为 1961—1985 年和 1986—2006 年分别为降温与增温阶段,张天宇等人^[20]也得到类似的结论;周浩等人^[15]认为降温和增温阶段应以 1989 年为界进行划分;白莹莹等人^[21]的研究认为 1961—1996 年重庆市气温变化不明显,1997—2006 年为增温阶段。之所以产生上述差异,可能与研究采用的气象站点数量有关:认为 1985 年为分界点的研究采用了 30 个气象站的数据,认为 1996 年为分界点的研究采用了 32 个气象站的数据,而认为 1989 年为分界点的研究采用了 34 个(表 1)。总体而言,与同期全国和北方地区持续增温的趋势不同,20 世纪下半叶中国北纬 35° 以南、东经 100° 以东地区是一个气温变冷区^[22],直到 20 世纪 90 年代后期该区域才开始明显增暖^[21]。本研究中重庆市 2000 年前温度距平值为负,2000 年后为正的结论符合该区域气温变化特征。同时,基于重庆市 34 个气象站 1960—2013 年共 54 年的数据,本研究认为 2000 年前重庆市的气温偏低期也存在低温和过渡两个阶段。20 世纪 80 年代为低温期是学术界的共识^[6,15],在全球变暖背景下,这一异常现象已引起许多学者的注意,并对产生原因进行了分析。有研究认为这一阶段重庆市工业快速发展,人类活动产生的 SO_2 气体受地形等影响难以散发,高温潮湿等气候特征促进了 SO_2 气体向硫酸盐气溶胶转化,对流层底层气溶胶粒子不断堆积使得地面太阳辐射减少,引起降温^[23];此外,20 世纪 80 年代南亚高压位置的异常变动也与川渝盆地盛夏气温偏低密切相关^[24]。同时,2000 年以来重庆市的气温升高也逐渐成为研究的重点,尤其是 2006 年百年一遇的夏季异常高温的现象备受关注^[25]。另据气象模型预测,2000 年以来重庆市的增温过程在今后可能持续,如 IPCC 预测 2011—2099 年较长的时间范围内重庆市都将呈增温趋势^[20]。

表 1 1960—2013 年重庆市气温变化研究情况
Tab. 1 Studies on the change of temperature in Chongqing from 1960 to 2013

时间阶段	气象站个数/ 均温类型	年、倾向率/ 季节 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$)	气温变化阶段*			突变点 (年份)	参考 文献	
			阶段 1	阶段 2	阶段 3			
1961—2006	30/月均温	年	0.003	1961—1985/−0.028	1986—2006/0.044	—	1979,1996	
		春	−0.003	1961—1985/−0.041	1986—2006/0.061	—		
		夏	−0.009	1961—1985/−0.043	1986—2006/0.040	—	[6]	
		秋	0.010	1961—1985/−0.011	1986—2006/0.061	—		
		冬	0.013	1961—1985/−0.008	1986—2006/0.018	—		
1960—2005	34/日均温	年	0.002	1960—1989/−0.035	1989—2001/0.085	2001—2005/−0.08	2000	[15]
1961—2008	34/日均温	年	0.007	—	—	—		
		春	0.006	—	—	—		
		夏	−0.008	—	—	—		
		秋	0.014	—	—	—		
		冬	0.015	—	—	—		
1961—2010	34/月均温	年	0.010	—	—	—	1995	
		春	0.006	—	—	—		
		夏	−0.004	—	—	—		
		秋	0.017	—	—	—		
		冬	0.019	—	—	—		
1960—2007	34/日均温	夏	−0.007	—	—	—		
		秋	0.012	—	—	—	[27]	
1971—2010	34/年均温	冬	0.017	—	—	—		
		年	0.020	—	—	—	[19]	
1961—2006	32/日均温	年	—	1961—1996/—	1997—2006/0.034	—	1997	[21]
1957—2006	34/日均温	年	0.003	—	—	—		[17]
1961—2007	30/年均温	年	—	1961—1985/−0.027	1986—2007/0.034	—		[20]
1961—2006	34/日均温	年	0.004	—	—	—		[18]
		年	0.008	—	—	—	2000	
		春	0.008	—	—	—		
1961—2013	34/日均温	夏	0.001	—	—	—		本研究
		秋	0.014	—	—	—		
		冬	0.011	—	—	—		

注: * 一栏下方的数据“/”前为时间阶段,“/”后为与之对应的倾向率(单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$);表中“—”表示文献中未提及。

气候突变是指一种稳定气候状态经短时间跳跃式地转变成另一种稳定气候状态的现象^[26]。很多学者基于不同时间尺度和不同数量气象站数据基础上采用各种方法对重庆市近数十年的气温突变现象做了大量研究,结果不尽相同。虽然各研究所采用的数据和时间尺度不同,但多数研究认为这一期间的重庆市气温突变点在 1995—2000 年的时间段内^[6,8,15,21],本研究中 2000 年为 1960—2013 年气温变化突变点的结果与前人研究相符。另外,也有研究指出 1979 年是气温的突变点^[6],但本研究中 1979 年气温突变现象不明显。

3.2 气温空间变化

1960—2013 年重庆市绝大部分地区年均温呈上升趋势(只有万盛、奉节和巫溪三地通过了 0.05 的信度检

验),这与多数研究的结果一致^[16-17]。前人研究认为重庆市东北部与东南部为主要增温区^[8,17],升温中心为巫溪($0.056\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$)^[16],其次为中部地区^[21]。此外,西部地区增温也比较明显^[17],但增速低于东中部地区。仅在奉节、云阳、石柱、渝北、巴南、大足、合川、潼南等地区为降温趋势(1961—2008年)^[16],这些结果均与本研究中年均气温增速由西部向东部逐渐加快的规律相一致。就空间气温变化差异的形成原因来看,有研究认为重庆市1971—2010年的气温空间变化受地形影响非常明显:西部地区海拔低、地形和缓、气温倾向率低,而东北和东南部地区海拔高,地势起伏大,增温明显——在总体上表现出起伏地形下局部地区气候的复杂性^[17,28]。

4 结论与展望

本研究利用重庆市34个气象站1960—2013年的逐日气温资料,采用线性倾向估计等方法分析了这一时期重庆市气温变化特征,得到如下结论:

1) 1960—2013年重庆市年均温呈缓慢上升趋势,平均每100a升高 $0.82\text{ }^{\circ}\text{C}$;四季气温也表现出增温变暖的过程,秋季增幅最大,夏季最小;重庆市年、季节平均气温增速都明显低于全国平均水平。

2) 1960—2013年重庆市年平均气温年代际变化总体呈先降温后增温趋势,1960—1999年气温偏低,进入21世纪后,气温明显升高变暖;除夏季呈现先降温后增温的趋势外,其余季节均温都呈现出“降温—增温—降温”的趋势。

3) 1960—2013年重庆市气温变化的空间分布总体上呈现出由西向东逐渐递增的趋势,其中增温最明显的是以巫溪、奉节为中心的渝东北地区,在忠县、石柱、綦江、大足、合川等地为中心的地区则呈轻微的降温趋势。

4) 1960—2013年,重庆市平均气温存在2~4a的周期变化,在2000年重庆市气温发生突变,由降温转为增温。

本研究对1960—2013年重庆市的连续气温变化特征进行了详细分析。由于气候变化是一个漫长而复杂的过程,不同尺度的研究得出的研究结果具有差异性,后续应继续探索和研究,以获得更长时间尺度和更完整的数据充实和丰富重庆市气温变化的研究。另外,由于部分站点数据存在缺失,虽然本研究对数据资料进行了均一化检验并且采用差值订正法进行订正,但可能仍存在一些误差,这对长期气温变化规律及趋势的分析有一定局限。此外,影响区域气温变化的因素众多。在全球气温变化的大背景下,重庆市气温变化受到所处的独特地理位置、半封闭式的地形、局地大气环流、下垫面性质等自然因素和土地利用方式的变更、城市“热岛效应”等人为因素的共同影响,天气气候异常复杂。而且到目前为止,人类对于气候变化的预测仍然存在一些不准确性,所以有关气候变化的影响因素以及对未来气候的预测,还需进行深入的探索研究。

参考文献:

- [1] 沈永平,王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
SHEN Y P, WANG G Y. Key findings and assessment results of IPCC WGI fifth assessment report[J]. Journal of Glaciology Geocryology, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [2] 唐国利,任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 791-798.
TANG G L, REN G Y. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China[J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4): 791-798.
- [3] 王绍武,姚檀栋. 近百年中国年气温序列的建立[J]. 应用气象学报, 1998, 9(4): 392-401.
WANG S W, YAO S D. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 1998, 9(4): 392-401.
- [4] 左洪超,吕世华,胡隐樵. 中国近50年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 238-244.
ZUO H C, LÜ S H, HU Y J. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(2): 238-244.
- [5] 王绍武,叶瑾琳. 近百年全球气候变暖的分析[J]. 大气科学, 1995, 19(5): 545-553.
WANG S W, YE J L. An analysis of global warming during the last one hundred years[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1995, 19(5): 545-553.
- [6] 刘晓冉,程炳岩,张天宇,等. 近46年重庆地区气温变化特征分析[J]. 高原山地气象研究, 2009, 29(1): 39-43.
LIU X R, CHENG B Y, ZHANG T Y, et al. Characteristics of temperature change in Chongqing during 1961—2006[J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2009, 29(1): 39-43.
- [7] 郭渠,孙卫国,程炳岩,等. 重庆夏季极端最高气温的时空变

- 化特征分析[J].西南大学学报(自然科学版),2009,31(5):99-105.
- GUO Q,SUN W G,CHENG B Y,et al.Temporal and spatial feature analyses of summer extreme high temperatures in Chongqing[J].Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2009,31(5):99-105.
- [8] 唐晓萍,陈志军,何泽能.1961—2010 年重庆地区气温和总辐射变化分析[J].高原山地气象研究,2013,33(3):43-47.
- TANG X P,CHEN Z J,HE Z N.Analysis of temperature and total radiation trend in Chongqing area during 1961—2010 [J].Plateau and Mountain Meteorology Research,2013,33(3):43-47.
- [9] 李永华,高阳华,韩逢庆,等.重庆地区气温与降水量变化特征及对 NPP 的影响[J].应用气象学报:2007,18(1):73-79.
- LI Y H,GAO Y H,HAN F Q,et al.Features of annual temperature and precipitation variety with the effects on NPP in Chongqing[J].Journal of Applied Meteorological Science,2007,18(1):73-79.
- [10] 蒋智,况明生.重庆地区近 57 年降水量变化特征及其影响分析[J].亚热带水土保持,2009,21(2):9-13.
- JIANG Z,KUANG M S.Analysis on the characteristics of precipitation variability & effects in recent fifty-seven years in Chongqing area[J].Subtropical Soil and Water Conservation,2009,21(2):9-13.
- [11] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2 版.北京:气象出版社,2007.
- WEI F Y.Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology[M].2nd ed.Beijing:China Meteorological Press,2007.
- [12] 范玉洁,余新晓,张红霞,等.降雨资料 Kring 与 IDW 差值对比分析—以漓江流域为例[J].水文,2014,34(6):61-66.
- FAN Y J,YU X X,ZHANG H X,et al.Comparison between Kring interpolation method and inverse distance weighting tension for precipitation data analysis;taking Lijiang river basin as a study case[J].Journal of China Hydrology,2014,34(6):61-66.
- [13] 任国玉,郭军,徐铭志,等.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2005,63(6):942-956.
- REN G Y,GUO J,XU M Z,et al.Climate changes of China's mainland over the past half century[J].Acta Meteorologica Sinica,2005,63(6):942-956.
- [14] 易湘生,尹衍雨,李国胜,等.青海三江源地区近 50 年来的气温变化[J].地理学报,2011,66(11):1451-1465.
- YI X S,YIN Y Y,LI G S,et al.Temperature variation in recent 50 years in the Three-River headwaters region of Qinghai province [J].Acta Geographica Sinica,2011,66(11):1451-1465.
- [15] 周浩,杨宝钢,程炳岩.重庆近 46 年气候变化特征分析[J].中国农业气象,2008,29(1):23-27.
- ZHOU H,YANG B G,CHENG B Y.Analysis of characteristics of climate change over last 46 years in Chongqing [J].Chinese Journal of Agrometeorology,2008,29(1):23-27.
- [16] 陈欢.重庆气候变化基本特征与极端气候事件的研究[D].兰州:兰州大学,2009.
- CHEN H.Primary character of climate change and the research on extreme weather-climate events in Chongqing [D].Lanzhou:Lanzhou University,2009.
- [17] 赵文虎,孙卫国,程炳岩.近 50 年川渝地区的气温变化及其原因分析[J].高原山地气象研究,2008,28(3):59-67.
- ZHAO W H,SUN W G,CHENG B Y.Analysis of the temperature variations and it's reason in Sichuan and Chongqing [J].Plateau and Mountain Meteorology Research,2008,28(3):59-67.
- [18] 叶香.重庆近极端气温和极端降水异常特征分析[D].南京:南京信息工程大学,2008.
- YE X.Analysis of anomaly characteristics on extreme temperature and extreme precipitation over Chongqing during 1961—2006[D].Nanjing:Nanjing University of Information Science & Technology,2008.
- [19] 周梦甜,李军,何君,等.起伏地形对气温时空分布的影响—以重庆市为例[J].水土保持通报,2016,36(5):346-351.
- ZHOU M X,LI J,HE J,et al.Effects of rugged terrain on spatial and temporal distribution of temperature-taking Chongqing city as a case study[J].Bulletin of Soil and Water Conservation,2016,36(5):346-351.
- [20] 张天宇.重庆气候变化与科技行动[J].中国科技投资,2009,8(7):49-51.
- ZHANG T Y.Climate change and technology in Chongqing[J].China Venture Capital,2009,8(7):49-51.
- [21] 白莹莹,高阳华,张焱,等.气候变化对重庆高温和旱涝灾害的影响[J].气象,2010,36(9):47-54.
- BAI Y Y,GAO Y H,ZHANG Y,et al.Impact of climate change on high-temperature,drought and flood disasters of Chongqing[J].Meteorological Monthly,2010,36(9):47-54.
- [22] 陈隆勋,朱文琴,王文,等.中国近 45 年气候变化的研究[J].气象学报,1998,56(3):257-270.
- CHEN L X,ZHU W Q,WANG W,et al.Studies on climate change in China in recent 45 years[J].Acta Meteorologica Sinica,1998,56(3):257-270.
- [23] 郭渠,孙卫国,程炳岩,等.重庆市气温变化趋势及其可能原因分析[J].气候与环境研究,2009,14(6):646-656.
- GUO Q,SUN W G,CHENG B Y,et al.The trend of temperature variation and its possible causes in Chongqing[J].Climatic and Environment Research,2009,14(6):646-656.
- [24] 苏东玉,李跃清,张虹娇.川渝盆地气温年代际变化的大气

- 环流特征对比分析[J].四川气象,2006,26(3):1-7.
- SU D Y, LI Y Q, ZHANG H J. Temperature decadal change of atmospheric circulation characteristics analysis over Sichuan and Chongqing basin [J]. Journal of Sichuan Meteorology, 2006, 26(3): 1-7.
- [25] 陈红, 卫捷, 孙建华, 等. 2006年夏季主要天气系统及环流特征分析[J]. 气候与环境研究, 2007, 12(1): 8-19.
- CHEN H, WEI J, SUN J H, et al. The weather and its circulation in summer of 2006[J]. Climate and Environmental Research, 2007, 12(1): 8-19.
- [26] 郭志梅, 缪启龙, 李雄. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征的研究[J]. 地理科学, 2005, 25(4): 448-454.
- GUO Z M, MOU Q L, LI X. Variation characteristics of temperature over northern China in recent 50 Years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(4): 448-454.
- [27] 郭渠. 重庆地区夏季高温天气的诊断分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- GUO Q. Diagnostic analysis of summer high temperature weather in Chongqing area[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2009.
- [28] 何志明. 基于分布式模拟的重庆市起伏地形下气温时空演变分析[D]. 重庆: 重庆师范大学, 2013.
- HE Z M. Space-time characteristics of temperature change in rugged terrain of Chongqing based on distributed modeling[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2013.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Analysis of Temperature Characteristics in Chongqing City from 1960 to 2013

QIN Xumei¹, WEI Xingping¹, CHEN Liang², WU Qianyun¹

(1. College of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 400131;

2. College of Environment and Planning, Henan University, Henan Kaifeng 475004, China)

Abstract: [Purposes] In order to understand the temporal and spatial distribution patterns of temperature change in Chongqing city. [Methods] Based on the daily average air temperature data of 34 meteorological stations covered the Chongqing city, using linear trend analysis method, moving t test method, Mann-Kendall test method and Morlet wavelet method, the characteristics of climate change were analyzed in recent 50 years in Chongqing city. [Findings] The results showed that: the annual mean temperature increase rate in this region was $0.008\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ in recent 50 years. In addition, the temperatures, in all seasons, showed increasing trends, which intensified dramatically in autumn and ebbed in summer? The climate change interval analysis revealed that the annual mean temperature fluctuated significantly with the interval of 2~4 years. Besides, the decade change of annual mean temperature had the stage characteristics. During the period before 2000, it showed a decreasing trend, during that period, the low temperature period was from 1980 to 1989 while the heating up period occurred after an abrupt temperature change in 2000. The decade change of seasonal mean temperature was “decrease—increase”, the decadal variation of three seasonal (except autumn) mean temperature showed the “decrease—increase—decrease” trend, but it was “decrease—increase” in autumn. The annual mean temperature increase rates in the spatial distribution showed gradually increasing trend from west to east. The annual mean temperature increase rate in Wuxi was the highest, and the rate was $0.056\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$. [Conclusions] The climate in this region showed a slight warming trend in recent 50 years. There were differences in the warming trend during four seasons. The decade change of annual mean temperature in Chongqing city in recent 50 years had phases: low temperature period, transitional period, temperature increasing period. An abrupt change from low temperature to high temperature occurred in 2000. Temperature increasing trends in the spatial distribution showed gradually increasing trend from west to east.

Keywords: Chongqing city; climate change; abrupt change test method; morlet wavelet method

(责任编辑 方 兴)