

文章编号: 2096-1618(2020)05-0579-05

# 1960–2018 年成都市区气温变化特征分析

赵福燕<sup>1,2</sup>, 王 凌<sup>1,2</sup>, 陈中钰<sup>1,2</sup>

(1. 四川省气象探测数据中心, 四川 成都 610072; 2. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610072)

**摘要:**采用温江国家基准气候站 1960–2018 年月平均气温资料, 经过新旧站点海拔订正, 利用趋势分析、Mann-Kendall 法及滑动  $t$  检验、功率谱分析等方法, 研究在全球气候变暖背景下成都市区气温变化特征。结果表明: 成都市区近 59 年平均气温总体上升趋势十分明显, 气候倾向率为  $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ , 20 世纪 60–80 年代中期为震荡下降倾向, 之后呈显著上升趋势, 21 世纪 10 年代为近 59 年最暖年代; 成都市区年平均气温在 1997 年附近发生增暖性突变, 突变后平均气温较突变前增加了  $0.91\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 增温倾向非常显著; 对气温距平通过 db3 小波进行带通滤波后分析可以确定年平均气温变化存在 4 年的主周期。

**关键词:** 气温变化; M-K 检验; 功率谱分析; 成都市区

**中图分类号:** P423.3

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.05.017

## 0 引言

全球近百年以来呈明显增温趋势<sup>[1-2]</sup>。中国气温变化对全球变暖的响应受到国内许多学者大量深入、细致地研究<sup>[3-4]</sup>, 同时气候变暖所带来的危害以及对人类社会的深远影响也得到广泛探讨<sup>[5]</sup>。中国地域广阔, 不同区域所处气候类型不尽相同, 即使在同一气候带内, 由于地形多变, 气温的变化特征也不一定相同, 所以针对国内各个地方气温变化趋势特征的分析层出不穷<sup>[6-8]</sup>。

成都市地处青藏高原东侧, 四川盆地西部, 市区位于四川盆地盆底平原之中, 周边地貌复杂, 属亚热带季风气候, 春早、夏热、秋凉、冬暖是成都市主要气候特征。21 世纪以来, 成都市气温变化与之前具有明显不同的特点, 气温上升趋势较快, 但目前学者对成都市气温研究所采用的大都是 2010 年之前的观测资料<sup>[9-11]</sup>, 分析的时间跨度也相对有限。当前, 成渝经济圈作为中国经济增长第四极呼之欲出, 将近年的气温资料加入一并研究, 可以更充分地了解成都市区气候变化趋势的最新特点, 对于科学利用气候资源, 合理指导农业产业结构升级, 优化制造业和服务业的布局, 促进区域经济健康良性发展有一定的积极作用。

采用数理统计方法, 研究成都市近 59 年来的气温演变特征, 分析成都市区气温变化的最新特点, 并对其与国内其他区域气候变化的联系进行一定程度的探讨。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料来源与处理

选取 1960 年 1 月至 2018 年 12 月成都市温江国家基准气候站逐月平均气温为研究对象。期间, 温江站经历 6 次迁址, 前 5 次迁站, 新旧站点距离很近, 海拔高度相差均在 3 m 以内; 最近一次迁址距离稍远, 但仍处同一气候区, 根据赵晓莉等<sup>[12]</sup>提出的海拔每升高 100 m, 气温下降  $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 以温江站现址的海拔高度为基准点, 将前 6 个观测站点的气温数据进行海拔订正。订正后, 将温江站与周边邻近未迁址观测站点(大邑站、双流站、新都站)近 59 年气温的变化趋势和发生突变时间进行对比, 发现基本吻合。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 最小二乘法

采用最小二乘法并辅以 5 年滑动平均来分析成都市区平均气温的年际变化趋势, 并对其进行显著性检验, 同时利用年代平均曲线分析成都市区气温年代际变化特征。

#### 1.2.2 突变理论

突变理论研究一直存在争议, 如检测方法不当, 可能会得出错误结论。Mann-Kendall (M-K) 法检验是一种非参数的突变检验法, 样本无需遵从特定分布, 且不受个别异常值的干扰, 检验范围较宽, 定量化程度较高, 能够明确突变的区域和突变开始的时间; 滑动  $t$  检

验是通过观察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变。本文利用 M-K 法和滑动  $t$  检验共同检验气温突变情况,并参照严格的显著水平进行检验,以期得出正确的结论。

1.2.3 周期分析

功率谱分析是以傅里叶变换为基础的频域分析方法,根据不同频率波的方差贡献诊断出序列的主要周期。小波分析也称多分辨率分析,高频信号对应时域中的快变成分;低频信号代表原始信号的变化趋势,其特点就是用较小的尺度对信号进行细致观察,用较大的尺度对信号作概貌观察。通过功率谱分析并结合紧支撑正交小波分析方法对年平均气温进行周期演变分析。

2 结果与分析

2.1 气温年际变化特征

从图 1 可见,成都市区 1960–2018 年年平均气温为 15.54 ℃ (以下简称历年平均),气温倾向率为 0.21 ℃/10 a,低于全国增温速率 0.25 ℃/10 a<sup>[13]</sup> 和东北–华北区的 0.27 ℃/10 a,远低于东北区的 0.37 ℃/10 a 和西北区的 0.34 ℃/10 a,高于东南区的 0.15 ℃/10 a 和中南区的 0.14 ℃/10 a,明显高于西南区的 0.14 ℃/10 a<sup>[14]</sup>,远高于四川盆地的 0.027 ℃/10 a<sup>[11]</sup>,也高于成都市其他观测站(大邑站、双流站、新都站)的 0.18 ℃/10 a,这可能是受到城市热岛效应的影响。这表明成都市区在四川盆地乃至整个西南区对全球增温的响应更为显著。成都市区平均气温变化趋势通过 0.001 显著性水平检验(见表 1),说明成都市区平均气温上升趋势是显著的。

基于最小二乘法的线性变化趋势线只能从整体上粗略分析气温变化情况,而年平均气温曲线图由于收到随机扰动项干扰,难以用于判断气温变化趋势。滑动平均作为一种拟合方法,相当于低通滤波器,近年来被广泛应用于确定时间序列的变化趋势。文中对成都市区年平均气温进行 5 年滑动平均,分析得出,成都市区气温在近 59 a 呈“降–升–降–升”的变化趋势,20 世纪 60 年代初至该年代末期(1968 年)为变冷期;经过 70 年代初期小幅上升后,70 年代中期–80 年代中期气温恢复为下降趋势,并于 1984 年达到最低值;80 年代中后期之后,增暖趋势非常显著。如忽略 60 年代末期–70 年代初(1973 年)的平均气温小幅上升,则 60 年代以来,成都市年平均气温只经历了 2 次变化趋势,1960 年至 80 年代中期是下降趋势,之后转为上升趋势。由 5 年滑动平均曲线还可看出,1960–1974 年 5

年滑动平均曲线处线性趋势线上方、历年平均线下方,说明平均气温在此阶段高于年平均趋势,但低于历年平均;1975–1998 年 5 年滑动平均曲线表现为一较长时期的低值区,不仅大幅低于趋势线,且明显低于历年平均(1997、1998 与历年平均基本重叠),是否发生突变,有待下文进一步检验;1999 年以后 5 年滑动平均曲线又位于趋势曲线上方,大幅高于历年平均。在近 59 a,高于历年平均的共有 26 a,1997 年以后就有 21 a (只有 2010 年略低于历年平均),占 81%,这表明此阶段增温有出现突变的可能。

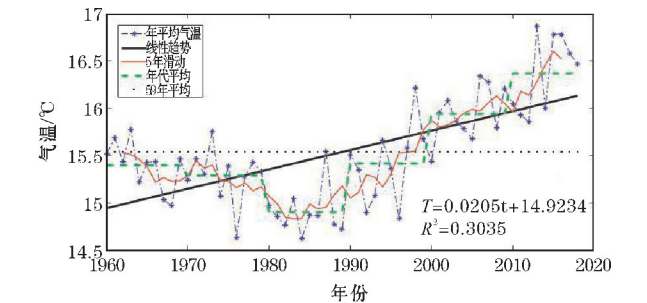


图 1 成都市区年平均气温变化趋势

从 1960–2018 年气温的变化趋势看,1984 年气温最低,之前 24 a 为下降趋势,之后 34 a 为明显增温趋势,故可以 1984 年为界将气温进行分段研究。由表 1 可知,近 34 a 气温增速明显加快,气温倾向率为 0.52 ℃/10 a,比近 59 a 的 0.205 ℃/10 a 增加了 1.5 倍之多,年平均气温变化的相关系数特别强为  $r=0.854$ ,通过了 0.001 的显著性水平检验,气温在 34 a 内上升了约 1.77 ℃。1960–1984 年的气温倾向率为  $-0.278$  ℃/10 a,并通过了 0.01 的显著性水平检验,表明这个时段气温呈下降趋势,且达到显著性水平,此期间气温下降了约 0.7 ℃。1960–1984 年平均气温为 15.24 ℃,1985–2018 年平均气温为 15.75 ℃,增加了 0.51 ℃。这与西南地区的气温变化趋势存在较为明显的差别,但无论是最高值和最低值出现的时间,还是变化趋势持续的时期与方向均与整个东南区平均气温变化十分接近<sup>[14]</sup>,具体原因,有待进一步探讨。

表 1 分阶段气温变化情况

| 时段          | 平均气温/℃ | 气温倾向率/(℃/10 a) | 相关系数     |
|-------------|--------|----------------|----------|
| 1960–2018 年 | 15.54  | 0.205          | 0.625 ** |
| 1960–1984 年 | 15.24  | –0.278         | –0.632 * |
| 1985–2018 年 | 15.75  | 0.52           | 0.854 ** |

注: \* 通过 0.01 显著性水平检验, \*\* 通过 0.001 显著性水平检验。

2.2 气温年代纪变化特征

利用气温的年代平均曲线,可对各年代气温进行

直观性分析,便于研究气温年代纪变化特征。由气温的年代平均结果(图 1)可知,20 世纪 60 年代–90 年代,各年代气温均值全部低于历年平均,21 世纪初–10 年代,年代气温均值高于历年平均。具体来看,20 世纪 60 年代气温较历年平均稍低,有 8 a 气温低于历年平均,占比 80%;70 年代气温又稍低于 60 年代气温,共有 9 a 气温低于历年均值,占比高达 90%;80 年代气温明显低于 70 年代气温,降幅近 0.39 ℃,比历年平均低约 0.64 ℃,为近 59 a 最冷的一个年代;90 年代气温略低于历年平均,但显著高于 80 年代气温,增幅接近 0.52 ℃,是近 59 a 来相邻两个年代最大温差,表明此年代可能发生增暖性突变。21 世纪初,气温明显高于 20 世纪 90 年代,增幅环比略有减小,其中有 9 a 气温高于历年平均(只 2000 年气温略微低于历年平均),占比 90%;21 世纪 10 年代,各年气温均大幅高于历年平均,较前一个年代气温增幅约 0.43 ℃,为近 59 a 来相邻两个年代第二大温差,也是近 59 a 来最暖的年代,其中 2013 年气温达 16.87 ℃,为 1960 年以来最暖的年份。1960–2018 年共有 12 a 气温高于 16 ℃,其中 11 a 是在 21 世纪,说明成都市区继 20 世纪 90 年代大幅增温后,21 世纪依然处于十分明显的增温趋势。

2.3 气温突变时间分析

图 2(a)是采用 M-K 方法对成都市区年平均气温变化趋势的突变检验结果。气温的正向序列曲线 UF 在 20 世纪 60 年代初至 80 年代中期位于 0 线以下,1984–1992 年(除 1991 年外)甚至低于 0.01 显著性水平临界值(−1.96 信度线),说明此时段气温呈较为明显的下降趋势,但 UF 与 UB 在上、下信度线之间并无交点,表明气温下降趋势并未形成突变。90 年代以后,UF 曲线呈单边上升态势,于 2000 年上穿 0 线,2005 年突破 +1.96 信度线,甚至在 2007 年超过了 0.001 显著性水平(+2.56 信度线),表明此时段成都市区增温趋势十分显著。同时可见,UF 曲线与 UB 曲线在上、下信度之间有 1 个交点,说明存在增暖性突变,突变开始时间在 1997 年前后。考虑到 M-K 方法并不能完全确定突变发生的时间,所以对成都市区 1960–2018 年气温变化辅以滑动  $t$  检验加以验证。取子序列长度 4 a,8 a,11 a 分别对气温进行滑动  $t$  检验,结果显示(见图 2b)成都市区气温突变发生在 1996–1997 年,与 M-K 方法得出的结论基本一致。可见 1960 年以来成都市区气温只有一个为增暖性突变在 1997 年附近,突变时间落后全国大部分地区,与青藏高原突变时间相近<sup>[15]</sup>。

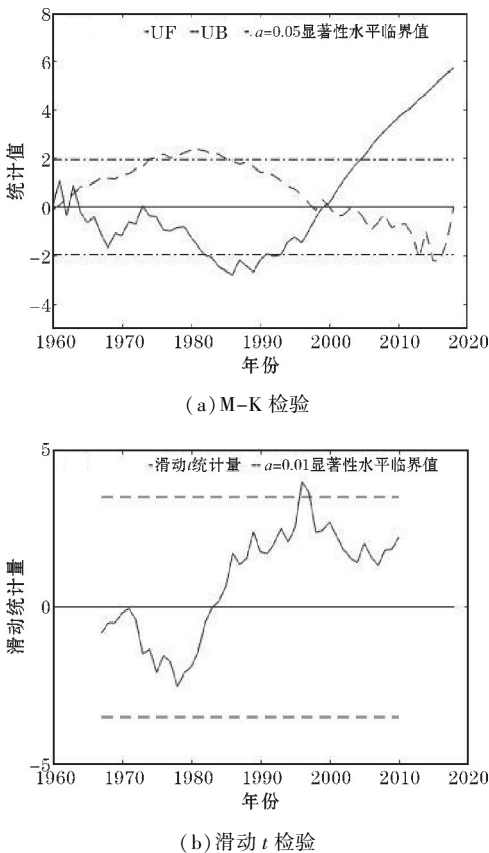


图 2 成都市区年平均气温突变

表 2 以 1997 年为分界点,把气温分成两个时段进行分析。1960–1997 年平均气温为 15.21 ℃,1998–2018 年平均气温为 16.12 ℃,上升幅度十分明显约 0.91 ℃。1997 年突变开始后,气温倾向率为 0.417 ℃/10 a,是 1960–2018 年的两倍之多,并通过了 0.01 的相关系数显著性水平检验,增温趋势加快。

表 2 突变前后气温变化情况

| 时段          | 平均气温/℃ | 气温倾向率/(℃/10 a) | 相关系数     |
|-------------|--------|----------------|----------|
| 1960–2018 年 | 15.54  | 0.205          | 0.625*** |
| 1960–1997 年 | 15.21  | −0.097         | −0.325*  |
| 1998–2018 年 | 16.12  | 0.417          | 0.65**   |

注: \* 表示通过 0.05 显著性水平检验, \*\* 表示通过 0.01 显著性水平检验, \*\*\* 表示通过 0.001 显著性水平检验。

2.4 气温变化周期分析

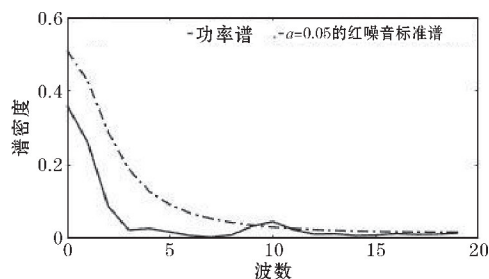
采用基于傅里叶变换的功率谱方法对成都市区年平均气温距平进行周期变化分析,结果见功率谱曲线图(图 3)。由图 3(a)可见,在波数为 10 处,即周期长度为 3.8 a 处,功率谱估计值为一峰值,超过 0.05 显著性水平红噪音标准谱,因此,3.8 a 是第一显著周期,也就是说成都市区年平均气温显著存在 4 a 左右的震荡周期。另外在波数为 4~5 处,即周期为约 8 a 处左右



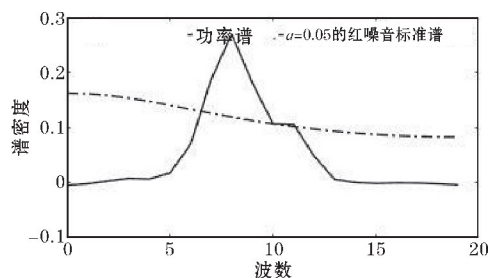
还有一峰点,但谱估计值没有超过标准谱,所以成都地区年平均气温还存在8 a左右的震荡周期,但并不显著。一般来说,时间序列是由低频部分(趋势项)和高频部分(扰动项)组成,为更细致观察气温的周期演化,利用db3(三阶紧支撑正交小波)分解平均气温距平序列,通过带通滤波器将不同频率的信息成份提取出来,对其利用功率谱方法进行分析,以确定该频率对应的周期是否显著。当气温距平只留下0.25~0.5频带信息成份后(图3c),在波数为8~9处,功率谱估计值为峰区,并远超过标准谱,说明气温确有明显的4 a左右的变化周期;当气温距平只留下0.125~0.25频带

信息成份后(图3d),在波数为4~5处,功率谱估计值为峰区,也超过标准谱,即表明气温有8 a左右的变化周期,只不过经过3层分解,该波段信息成份在原始气温距平信息中所占比重大幅降低,故而在年平均气温距平的功率谱分析图中虽有体现,但未能通过显著性检验。

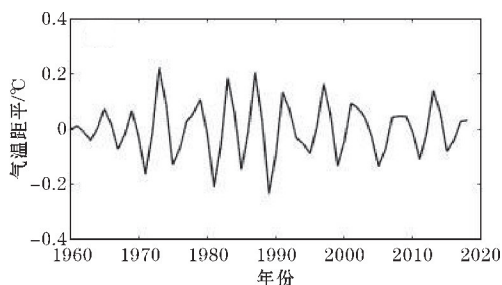
由上可知,无论是采用基于傅里叶变换的功率谱方法,还是通过功率谱方法与紧支撑正交小波分析方法相结合对年平均气温进行周期演变分析,均可得出近59 a成都市区年平均气温显著存在4 a左右的震荡周期。



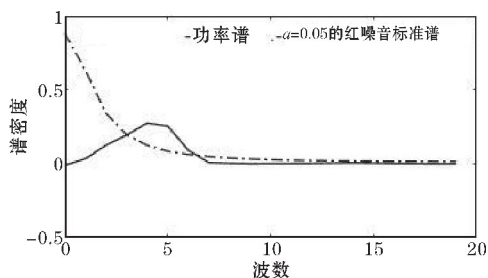
(a) 气温距平功率谱曲线



(c) 气温距平第二层高频部分功率谱



(b) 气温距平第二层高频部分



(d) 气温距平第二层高频部分功率谱

图3 成都市区年平均气温距平功率谱分析

### 3 结论与讨论

通过分析1960–2018年成都市区年平均气温,结论如下:

(1)成都市区近59 a平均气温总体上存在显著上升趋势,气温倾向率为 $0.21^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。20世纪60–80年代中期为震荡下降倾向,之后上升趋势非常明显。21世纪10年代为20世纪60年代以来最暖的年代。

(2)M-K法与滑动 $t$ 检验分析结果说明成都市区年平均气温在1997年附近发生增暖性突变,突变后增温趋势加快。

(3)基于傅里叶变换的功率谱曲线图显示近59 a成都市区年平均气温变化的主周期约为4 a。

21世纪是成都市区自1960年以来最暖的时段,同丁一汇等<sup>[16–17]</sup>对青藏高原的研究结果大体一致,与中国年平均气温变化趋势<sup>[18–19]</sup>存在较大差异;成都市

区与青藏高原增暖突变发生的时间也十分接近<sup>[3]</sup>,属于中国突变时间发生较晚的区域<sup>[20]</sup>,说明成都市气候很可能受盆地、青藏高原和城市化的共同影响。气温演变周期似乎与南方涛动有关<sup>[21]</sup>,另外,准8年的变化周期并不显著,同西南地区的演变周期有一定区别<sup>[22]</sup>。值得关注的是,成都市区气温的变化特征与中国西南地区有所不同,却同东南地区表现出惊人的一致,具体原因,留待以后进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 欧先交,曾兰华.从过去全球变化看当今全球变暖[J].嘉应学院学报(自然科学),2011,29(11):79–84.
- [2] 马亚维,任哲,王英俊.近百年来全球气温长期变化趋势分析[J].山东气象,2014,137(34):21–24.

- [3] 董李丽,李清泉,丁一汇. 全球变暖背景下我国春季气温的时空变化特征[J]. 气象,2015,41(10):1177–1189.
- [4] 范兰,吕昌河,杨彪. 近15a中国气温变化趋势分析[J]. 沙漠与绿洲气象,2014,8(5):34–38.
- [5] 姚玉璧,张强,王劲松,等. 中国西南干旱对气候变暖的响应特征[J]. 生态环境学报,2014,23(9):1409–1417.
- [6] 韩翠华,郝志新,郑景云. 1951–2010年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展,2013,32(6):887–896.
- [7] 曾钦文,罗瑞婷,曾思亮,等. 河源地区气温变化特征及其与 ENSO 的关系[J]. 中低纬山地气象,2018,43(3):63–67.
- [8] 罗贵东,王英,唐雪峰. 达州市1960–2009年温度变化特征. 2014. 贵州气象,38(1):34–36.
- [9] 郝丽萍,何金海,方之芳,等. 成都市近33年候气温变化的研究[J]. 四川气象,2007,27(1):17–20.
- [10] 冯新灵,罗隆诚,邱丽丽. 成都未来气候变化趋势的 R/S 分析[J]. 成江流域资源与环境,2008,17(1):83–87.
- [11] 陈吉琴,钱伶俐. 四川盆地1961–2000年气温的变化分析[J]. 长江工程职业技术学院学报,2013,30(4):12–15.
- [12] 赵晓莉,苑跃,陈中钰,等. 四川部分台站迁移新旧站址观测资料对比评估[J]. 高原山地气象研究,2014,34(2):72–76.
- [13] 任国玉,初子莹,周雅清,等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究,2005,10(4):701–716.
- [14] 陈权亮,任景轩,晁华,等. 20世纪50年代以来我国气温的区域变化[J]. 安徽农业科学,2010,38(7):3571–3574.
- [15] 郑然,李栋梁,蒋元春,等. 2015. 全球变暖背景下青藏高原气温变化的新特征[J]. 高原气象,34(4):153–1539.
- [16] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告(1):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展,2006,2(1):3–8.
- [17] 郝振纯,孙乐强. 我国1961–2009年气温变化规律分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2011,39(6):595–601.
- [18] 许艳,唐国利,张强. 基于均一化格点资料的全球变暖趋缓期中国气温变化特征分析[J]. 气候变化研究进展,2017,13(6):569–577.
- [19] 徐群. 全球气温趋势和近期中国气候灾害的成因分析和展望[J]. 气象科学,2010,30(5):582–590.
- [20] 卢爱刚,康世昌,庞德谦,等. 全球升温下中国各地气温变化不同步性研究[J]. 干旱区地理,2009,32(4):506–511.
- [21] 符涂斌. 埃尔尼诺/南方涛动现象与年际气候变化[J]. 大气科学,1987,11(2):209–220.
- [22] 刘晓冉,李国平,范广洲,等. 西南地区近40a气温变化的时空特征分析[J]. 气象科学,2008,28(1):30–36.

## Analysis on the Characteristics of Temperature Change in Chengdu from 1960 to 2018

ZHAO Fuyan<sup>1,2</sup>, WANG Ling<sup>1,2</sup>, CHEN Zhongyu<sup>1,2</sup>

(1. Sichuan provincial Meteorological Observation and Data Centre, Chengdu, 610072, China; 2. Heavy Rain and Drought-Flood Disaster in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, 610072, China)

**Abstract:** Based on the monthly average temperature data of Wenjiang national benchmark climate station from 1960 to 2018, after altitude correction of new and old stations, the characteristics of temperature change in Chengdu under the background of global warming are studied by trend analysis, Mann Kendall method, sliding  $t$  test, power spectrum analysis and other methods. The results show that the average temperature of Chengdu in the past 59 years has an obvious upward trend, with a climate tendency rate of  $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ . From the 1960s to the mid-1980s, there was a trend of concussion and decline, then a significant upward trend, and the decade of the 21st century was the warmest in nearly 59 years; The annual average temperature in Chengdu City had a sudden change of warming in 1997, and the average temperature after the change increased by  $0.91\text{ }^{\circ}\text{C}$  compared with that before the change, and the trend of warming was very significant; The annual level can be determined by the analysis of db3 wavelet band-pass filtering that there is a main period of 4 years for the change of average temperature.

**Keywords:** temperature change; M-K test; power spectrum analysis; Chengdu City