

1906-2015年武汉市温度变化序列重建 与初步分析

闫军辉^{1,2,3}, 刘浩龙², 葛全胜², 郑景云², 郝志新^{2*}, 王义民^{1,4}

(1. 信阳师范学院 气候与环境演变重点实验室, 河南 信阳 464000; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 信阳师范学院 地理科学学院, 河南 信阳 464000; 4. 信阳师范学院 南北过渡带研究中心, 河南 信阳 464000)

摘要: 本文利用1906-2015年武汉月平均最高与最低气温资料, 重建了过去110年武汉市年平均气温距平序列, 分析了其年代际尺度的变化特征。主要结论为: ①过去110年武汉市经历了“暖—冷—暖”3个多年代际波动, 其中1906-1946年与1994-2015年气候相对温暖, 1947-1993年则气候相对寒冷; ②在年代际尺度上, 武汉市存在多次显著增温和降温过程, 其中增温速率最快的30年和50年分别出现在1980-2009年和1960-2009年; 最快降温速率则出现在1928-1957年和1925-1974年; ③过去110年武汉市年均温发生了3次跃变, 其中由冷转暖的跃变出现在20世纪20年代初和90年代中后期, 而由暖转冷的跃变则出现在40年代; ④武汉市年均温变化与全球/北半球和中国的变化趋势基本一致, 但变幅偏大。此外, 全球增暖停滞现象在武汉市最近十几年也有所体现。

关键词: 温度重建; 变化速率; 跃变; 气候变化; 武汉

1 引言

随着大气中CO₂等温室气体的浓度不断增加, 气候变化问题已成为国际社会和世界各国政府共同关注的重大全球性问题。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告(AR5)指出, 1880-2012年全球平均陆地和海洋表面温度升高了0.65~1.06°C (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013)。在中国, 近百年(1909-2011年)陆地区域平均增温0.9~1.5°C, 最近五六十年全国年平均气温上升速率约0.21~0.25°C/10a, 增温幅度高于全球平均水平(《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2015)。随着全球增暖及人类活动的加剧, 陆地表层格局也发生相应的变化(吴绍洪等, 2015), 中国

不同地区升温过程出现明显的区域差异和不同步性(韩翠华等, 2013)。相较于全球尺度, 区域尺度的气候变化对局地影响更为重要和直接, 因此区域气候变化研究已引起广泛关注(赵国永等, 2015; 闫军辉等, 2014; 闫军辉等, 2017)。有关中国及其子区域过去百年气候变化研究, 已有不少成果问世(林学椿等, 1995; 王绍武等, 1998; 唐国利等, 2005; 闻新宇等, 2006; 彭嘉栋等, 2014)。例如, 有学者基于小波分析方法研究了中国澳门近百年的地表温度变化, 结果表明年/季节平均温度存在2~5年周期(冯瑞权等, 2010); 也有学者分析了天津近百年平均和极端温度变化, 指出天津过去百年平均气温显著上升, 且冬、春季增温趋势最显著, 过去50年的平均最高和最低气温、连续最长暖日天数和冷夜天数较

收稿日期: 2017-02; 修订日期: 2017-07。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501051, 41630529, 41401171); 信阳师范学院南湖学者奖励计划青年项目; 信阳师范学院博士科研启动基金(0201403) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41501051, No.41630529, No.41401171; Nanhu Scholars Program for Young Scholars of Xinyang Normal University; Doctor Foundation of Xinyang Normal University, No.0201403]。

作者简介: 闫军辉(1983-), 男, 河北定州人, 讲师, 主要从事全球变化研究, E-mail: yanjh2015@126.com。

通讯作者: 郝志新(1975-), 女, 内蒙古赤峰人, 研究员, 研究方向为全球变化, E-mail: haozx@igsnr.ac.cn。

引用格式: 闫军辉, 刘浩龙, 葛全胜, 等. 2017. 1906-2015年武汉市温度变化序列重建与初步分析[J]. 地理科学进展, 36(9): 1176-1183. [Yan J H, Liu H L, Ge Q S, et al. 2017. Reconstruction and analysis of annual mean temperature of Wuhan for the 1906-2015 period[J]. Progress in Geography, 36(9): 1176-1183.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.09.014

前50年明显偏少(郭军等, 2011)。武汉市位于长江中游, 属北亚热带地区; 同时受东亚冬季风强弱变化影响, 冬季温度呈现明显的年—年代际变化。尽管已有部分学者对武汉市过去百年的温度变化进行研究(郑祚芳等, 2002; 任永建等, 2010), 但多基于器测时期月平均气温资料, 由于观测时制与时次变化等原因, 导致结果存在一定程度的不均一性(唐国利等, 2005)。基于此, 本文拟参照国际上通行的方法, 利用武汉市及周边地区建站以来的月平均最高和平均最低气温计算月平均气温, 重建过去110年武汉市年平均温度变化序列, 并分析变化特征。研究结果不仅对深入理解该地气候变化规律有重要意义, 还可为校准武汉及周边地区历史时期的物候资料提供背景数据。

2 资料和方法

2.1 资料来源

本文所用资料为武汉及中国东部地区部分站点(宜昌、徐州、安庆、芷江、南京、济南、长沙、上海等)建站以来月平均气温、月平均最高与最低气温。按照来源不同, 可分为两部分: 1951年以来数据直接下载于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>), 1951年以前资料源自原中央气象局和中国科学院地球物理研究所联合出版的《中国气温资料》。查武汉市平均气温的观测时间可知, 1951年以前月均温是基于计算逐个观测时次的平均值得到, 如1906-1929年每日观测3次(6时、14时和21时), 1930-1933年为8次(3时、6时、9时、12时、15时、18时、21时和24时), 1947-1950年24次(每小时观测1次), 月均温分别取3次、8次和24次平均值。

由于战争和社会动乱等原因, 武汉市1951年以前的资料存在不同程度的缺失: 月平均气温缺失资料主要分布在1938年下半年及1941-1946年, 共缺失81个月, 占全部资料的6.1%; 月平均最高、最低气温缺失值均集中于1937-1938年、1941-1946年以及1906年前半年, 共缺失103个月, 占全部资料的7.8%(表1)。中国和全球(北半球)温度变化资料分别来源于Jones等(2012)和唐国利等(2005)重建的全球(半球)和中国过去百年温度序列1906年以来的部分。冬季风指数资料来自于丁一汇等(2014)定义的东亚冬季风指数。

2.2 缺失资料的插补

数据的缺失会影响气候变化的分析精度, 为获得武汉市过去110年连续的温度序列, 本文采用回归订正法对缺失的月均温(由月最高和最低气温计算得到)进行逐月插补。具体做法为: 若月最高或最低气温缺失而该月月均温(基于每日不同观测时次得到)存在, 则用该月月均温进行插补; 否则选取周边月平均最高和平均最低资料相对完整的站点进行插补。具体做法是: 基于1951-2015年武汉及周边站点月平均最高和最低气温, 首先计算资料缺失月份的站点与周边资料完整站点间的相关性; 然后利用相关性最高的站点对缺失值进行插补; 最后得到武汉市1906-2015年年均温距平(相对于1971-2010年)序列。统计表明, 103个资料缺失月份与参考站点相关月份的相关系数在0.706~0.997之间, 其中, 40个月份的相关系数在0.9以上, 41个在0.8以上(二者合计占缺失月份78.6%)。估计方程的标准误差在0.15~0.93之间, 回归方程全部通过0.001显著性检验(表1)。

2.3 研究方法

由于1950年前后的资料在观测方法、统计方法上存在差异, 由此得到的年平均气温序列在时间上并不均一(唐国利等, 2005), 如日平均气温统计方法上, 华中地区利用4次观测值计算的年均温比利用3次观测值计算的年均温高0.2℃以上(刘小宁等, 2005)。考虑到1961-2010年该地区年均温升温率为0.15℃/10a(《华中区域气候变化评估报告》编写委员会, 2013), 0.2℃的差距不可忽视。为减少因观测时制与时次产生的序列不均一性, 提高1950年前后资料的可比性, 本文参照国际上通行的方法, 以平均最高和平均最低气温的平均值来计算月平均气温。研究表明, 该方法获得的平均气温与常规获得的温度值在增温速率及距平上没有明显差异(唐国利等, 2007)。

为精确地分析过去110年武汉年均温的阶段变化特征, 本文采用最优分割法对距平序列进行冷暖时段划分。该方法是对一批有序数据进行分段的统计方法, 分段的结果使段内数据之间的差异最小, 而各段之间的差异最大; 为分析武汉市年均温的变化速率和突变特征, 采用滑动方法分别计算每30年和50年时间尺度的线性趋势, 并采用最小二乘法拟合其线性倾向率; 利用滑动 t 方法检测其在

表1 1906-2015年武汉气象站缺失资料插补

Tab.1 Interpolation of missing data at Wuhan meteorological station, 1906-2015

<i>MISS</i>	<i>REF.</i>	<i>r</i>	<i>SSE</i>	<i>MISS</i>	<i>REF.</i>	<i>r</i>	<i>SSE</i>
06/01, 37/01, 38/01	武汉	0.992	0.197	37/08	武汉	0.987	0.182
41/01, 43/01	徐州	0.865	0.772	38/08	长沙	0.765	0.734
42/01	安庆	0.951	0.475	41/08, 43/08	徐州	0.798	0.693
44/01, 45/01, 46/01	芷江	0.864	0.770	42/08	安庆	0.882	0.537
06/02, 37/01, 38/02	武汉	0.997	0.180	44/08, 45/08	青岛	0.709	0.805
41/02, 43/02	徐州	0.953	0.671	46/08	南京	0.855	0.592
42/02	安庆	0.981	0.432	37/09	武汉	0.991	0.162
44/02, 45/02	济南	0.907	0.928	38/09	长沙	0.796	0.736
46/02	南京	0.952	0.671	41/09, 43/09	徐州	0.744	0.811
06/03, 37/03, 38/03	武汉	0.996	0.152	42/09	安庆	0.890	0.555
41/03, 43/03	徐州	0.887	0.813	44/09, 45/09	上海	0.740	0.819
42/03	安庆	0.966	0.452	46/09	南京	0.826	0.687
44/03, 45/03	芷江	0.878	0.837	37/10	武汉	0.993	0.155
46/03	南京	0.928	0.651	38/10	长沙	0.867	0.655
06/04, 37/04, 38/04	武汉	0.995	0.152	41/10, 43/10	徐州	0.855	0.687
27/04, 46/04	长沙	0.910	0.617	42/10	安庆	0.938	0.457
41/04	安庆	0.952	0.456	44/10, 45/10	芷江	0.818	0.757
42/04, 43/04, 44/05, 45/05	上海	0.869	0.743	46/10	南京	0.890	0.599
06/05, 37/05	武汉	0.992	0.169	37/11	武汉	0.991	0.193
38/05, 46/05	长沙	0.891	0.601	38/11, 41/11, 43/11	芷江	0.899	0.641
41/05, 43/05, 44/05, 45/05	芷江	0.833	0.732	42/11	安庆	0.940	0.500
42/05	安庆	0.958	0.379	44/11, 45/11	济南	0.801	0.876
06/06, 37/06	武汉	0.988	0.173	46/11	长沙	0.920	0.572
38/06, 46/06	长沙	0.761	0.716	37/12	武汉	0.990	0.211
41/06, 43/06, 44/06, 45/06	上海	0.706	0.781	38/12, 44/12, 45/12	芷江	0.892	0.682
42/06	安庆	0.897	0.487	41/12, 43/12	徐州	0.893	0.678
37/07	武汉	0.991	0.156	42/12	安庆	0.953	0.460
42/07	安庆	0.902	0.511	46/12	长沙	0.894	0.677
38/07, 41/07, 43/07, 44/07, 45/07, 46/07	上海	0.763	0.766				

注: *MISS*为缺失月份(如06/01表示1906年1月), *REF.*为插补时参考站点;回归方程建立时段为1951-2015年, *r*为两气象站之间的相关系数, *SSE*为估计值的标准误差;所有方程均通过了0.001显著性检验。

20和30年尺度上的转折点位置,滑动 t 方法是通过考察两组样本平均值的差异是否显著来检验气候平均态的转折,转折点反映了年代际尺度上气候均值的跃变。

3 结果与分析

3.1 武汉年均温冷暖变化

图1为1906-2015年武汉市年平均气温距平(相对于1971-2010年)曲线。过去110年武汉市年平均气温为17.3℃,最高温出现在2007年(19.11℃),较

1971-2010年年均值高2.03℃;最低温出现在1969年(15.8℃),较1971-2010年平均值低1.28℃。总体而言,过去110年武汉市年均温大体经历了“暖—冷—暖”的多年代波动。利用最优分割法可将其分为3个时段:1906-1946年和1994-2015年为相对温暖期,1947-1993年则相对较冷。

1906-1946年武汉市相对较暖,年均温的多年平均值较1971-2010年高0.34℃。其中最暖年和最冷年分别出现在1914年(距平值1.05℃,下同)和1910年(-0.53℃),均出现在20世纪10年代。年代尺度上,最冷的年代出现在1909-1918年(0.02℃),

最暖年代为1932-1941年(0.61℃),二者相差0.59℃。1947-1993年则相对较冷,绝大多数年份的年均温均为负距平,多年平均值-0.28℃,过去110年武汉市最冷年就出现在这一时期。最冷的10年出现在1967-1976年,年代均值为-0.56℃,比最暖的10年(1957-1966年)低0.44℃。1994年开始,武汉市温度开始迅速升高,进入过去百年中的第2个温暖时段,多年(1994-2015年)平均值为0.93℃,2007年是过去110年中武汉市最暖的一年。在年代上,最暖年代为1998-2007年,其年代均温(1.44℃)比最冷年代(2006-2015年)高0.71℃。比较上述3个时段年均温的标准差可知,1994-2015年年平均气温的标准差最大,1947-1993年寒冷时段的标准差最小,表明武汉市年均温在温暖时段的波动更为剧烈(表2)。

3.2 变化速率

1906-2015年武汉市年均温呈微弱增暖趋势,

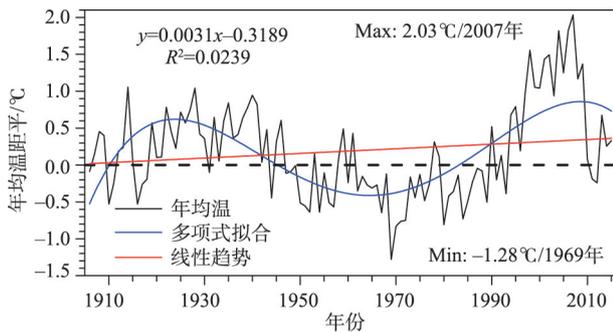


图1 1906-2015年武汉市年平均气温长期变化 (虚线为1971-2000年均值)

Fig.1 Change in annual mean temperature of Wuhan, 1906-2015 (The dotted line indicates the average of the reference period 1971-2000)

表2 1906-2015年武汉年平均气温冷暖时段划分及特征
Tab.2 Division and characteristics of cold and warm episodes by mean temperature of Wuhan, 1906-2015

冷暖时段	1906-1946	1947-1993	1994-2015
气候特征	相对温暖	相对寒冷	相对温暖
平均值/℃	0.34	-0.28	0.93
标准差/℃	0.42	0.37	0.65
最冷年/(距平/℃)	1910/-0.53	1969/-1.28	2012/-0.24
最暖年/(距平/℃)	1914/1.05	1990/0.52	2007/2.03
最冷年代	1909-1918	1967-1976	2006-2015
最冷年代距平/℃	0.02	-0.56	0.73
最暖年代	1932-1941	1957-1966	1998-2007
最暖年代距平/℃	0.61	-0.12	1.44

变暖速率为0.31℃/100 a,低于同期全球平均增温速率,也低于中国平均增温速率。尽管百年尺度上变暖趋势不显著,但在多年代尺度上存在多次显著增暖和变冷趋势。图2为武汉市年均温在30和50年尺度上的滑动变化速率。从30年尺度上看,过去110年武汉最大增暖速率出现在1980-2009年,变暖速率为2.67±0.48℃/30 a(95%置信区间,下同);过去110年间,滑动30年增暖速率超过1℃/30 a的时段共有18个,起始年全部出现在1968-1985年。最大30年降温速率发生于1928-1957年,线性趋势为-1.23±0.48℃/30 a,滑动30年降温速率低于1℃/30 a的时段有6个,起始年除1934年之外均出现在1925-1929年。在50年尺度上,武汉最大增暖速率出现在1960-2009年,变暖速率2.20±0.50℃/50 a。最大降温速率则发生于1925-1974年,降温速率为-1.40±0.35℃/50 a。以上分析也显示,最大30 a和50 a增温速率绝对值几乎为最大降温速率的2倍,表明过去110年武汉市温度变化呈不对称变化。

3.3 跃变

1906-2015年武汉市年均温距平序列的跃变分析见图3。为避免由于人为选择子序列长度导致的跃变点漂移,本文选取10年和15年2个子序列长度来分析年均温的转折点,滑动t统计量超过99%置信线的峰值即为跃变年。从图中可以看出,在20年尺度上(子序列长度为10),自1916年以来,t统计量超过0.01显著性水平的峰值点有3个,其中1920年和1997年为正值,1947年为负值,表明在20年尺度

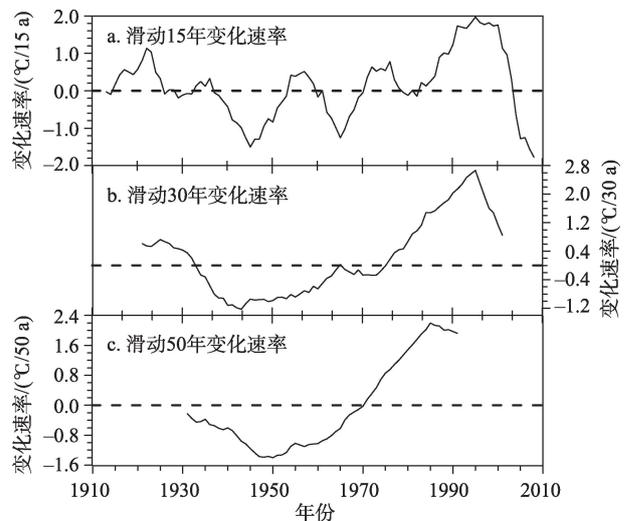


图2 不同时间尺度上武汉市年平均气温滑动线性速率
Fig.2 Moving average linear trends of Wuhan annual mean temperature at different temporal scales

上(子序列为10),武汉市年均温在多年代尺度上出现过3次明显的转折,在1920和1997年发生了由冷转暖的跃变,于1947年经历过一次由暖转冷的明显跃变;在30年尺度上(子序列长度为15), t 统计量超过0.01显著性水平的峰值点同样有3个,表明武汉市年均温同样出现3次明显的转折,1921和1994年发生由冷转暖的明显跃变,而自1942年起,武汉年均温明显由暖转冷。

3.4 季节变化

图4为1906-2015年武汉市夏季和冬季平均温度变化。由图可知,过去110年武汉市夏季和冬季平均温度的冷暖变化与年平均温度相似,均经历了“暖—冷—暖”的多年代波动,但起迄时间存在差异。经过最优分割方法分析的武汉市温度变化阶段结果显示:夏季第一个相对温暖阶段1906-1967年,持续时间较冬季和年平均温度变化的暖期偏长,而相对寒冷阶段1968-1993年偏短;第二个相对温暖阶段则与冬季和年均持续时间相当(表3)。

在变化速率上,夏季和冬季最快30年增温速率分别为0.075°C/a(1980-2009年)和0.083°C/a(1974-2003年),略低于最快30年平均气温变暖速率

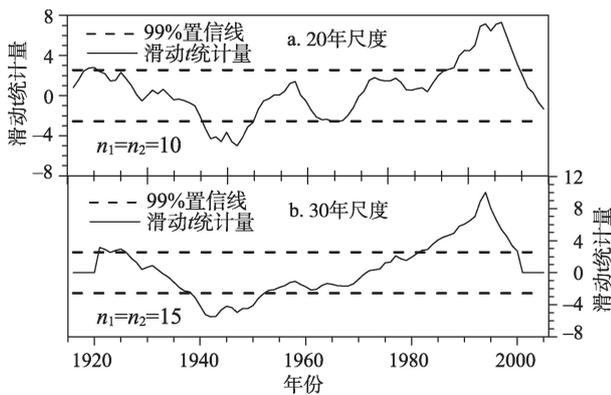


图3 武汉年均温在20年和30年尺度上突变时间检测
(n_1 与 n_2 分别为子序列长度)

Fig.3 Detection of abrupt change of Wuhan annual mean temperature at 20 and 30-year temporal scales
(n_1 and n_2 refers the length of subseries)

(1980-2009年,0.089°C/a),夏、冬季最大30年降温速率分别为-0.047°C/a(1927-1956年)和-0.043°C/a(出现在1939-1968年),略快于年平均气温最大30年降温速率(1928-1957年,-0.041°C/a)。夏季最快增暖和降温速率发生时间与年均温一致,而冬季最快增暖时段较年均温提前,最快降温时段较年均温推迟。

滑动 t 检验结果显示,夏季平均气温20年与30年尺度上暖转冷的跃变时间推迟,而冷转暖的跃变时间提前;冬季平均气温虽未检测出暖转冷的跃变,但冷转暖的跃变时间较年均温提前(表3)。

4 讨论

武汉与中国、北半球和全球尺度温度变化曲线见图5,4条曲线均进行标准化处理(将1906-2015年逐年距平值除以标准差)。相关分析显示,武汉年

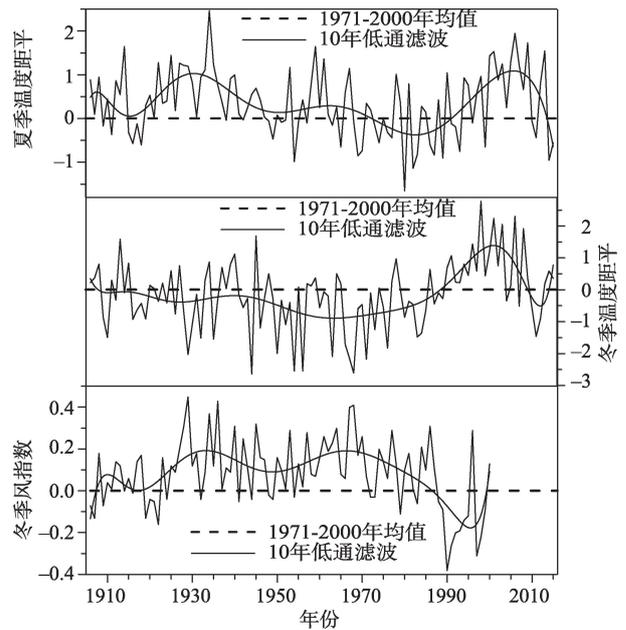


图4 1906-2015年武汉市夏季和冬季温度变化
Fig.4 Change in summer and winter mean temperatures of Wuhan, 1906-2015

表3 1906-2015年武汉市季节变化特征

Tab.3 Seasonal mean temperature variations of Wuhan, 1906-2015

季节	阶段变化			变化速率/(°C/a)		跃变点	
	暖期	冷期	暖期	增温	降温	20年尺度	30年尺度
夏季	1906-1967	1968-1993	1994-2015	0.075	-0.047	1925, 1937, 1999	1922, 1937, 1994
冬季	1906-1949	1950-1989	1990-2015	0.083	-0.043	1990	1988
年均	1906-1946	1947-1993	1994-2015	0.089	-0.041	1920, 1947, 1997	1921, 1942, 1994

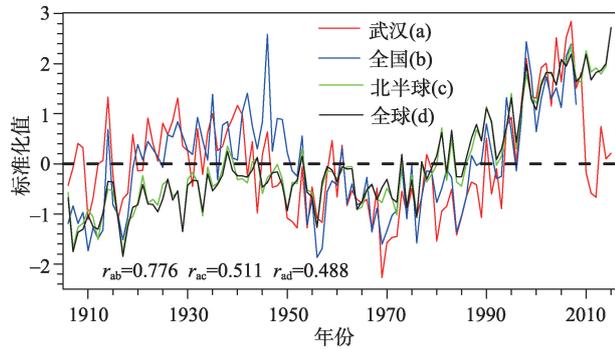


图5 不同空间尺度年平均气温变化对比^①

Fig.5 Comparison of annual mean temperature variations between different spatial scales

均温与其他3条曲线变化同步,如20世纪20-40年代和20世纪末暖峰、20世纪60-70年代冷谷均一一对应,相关系数分别为0.776(与中国)、0.511(与北半球)和0.488(与全球,且均通过 $\alpha=0.001$ 显著性水平检验)。然而武汉市温度变化幅度(暖峰与冷谷的差值)较其他3条曲线偏大;中国和北半球/全球尺度的温度在20世纪80年代中期开始迅速增暖,而武汉市直到90年代初才开始显著变暖,呈现出明显的区域特性。

中国近百年温度变化研究表明,20世纪80年代中期以后的平均气温与30-40年代基本持平(林学椿等,1995;王绍武等,1998;唐国利等,2005;闻新宇等,2006)。本文研究表明,尽管武汉1980-1999年平均温度(-0.08°C)较1930-1949年(0.36°C)偏低,但武汉市第2个温暖时段无论是最冷年(代)、最暖年(代),均高于第1个温暖时段。在变化速率上,无论是30年尺度,还是50年尺度,1950年以后的增暖速率均明显高于1950年以前。

已有研究表明,自1998年以来全球地表温度在最近的15年内几乎没有增加,出现“增暖停滞”的现象(Met Office, 2013)。中国大陆年平均气温在剔除城市化影响后和全球平均特征基本一致(《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会,2015)。类似的增暖停滞现象在武汉也有体现,无论在30年尺度还是50年滑动尺度,年均温速率均在2009年发生转折,之后变暖速率逐年下降。在15年滑动尺度上,从1997年开始,武汉市年均温变化开始由正转负(图2c)。

在年代际尺度上,中国冬季气温和寒潮变化与东亚冬季风的强弱相对应(丁一汇等,2014)。过去110年,武汉市冬季温度变化与东亚冬季风指数变化呈明显反相位关系:20世纪20年初期至90年代后期,东亚冬季风偏强,武汉市冬季气温偏低;而随着90年代后期开始东亚冬季风逐渐减弱,武汉市冬季温度也发生了由冷转暖的跃变。

5 结论

利用武汉市建站以来月平均气温和月平均最高、最低气温资料,建立了过去110年武汉市年平均气温序列,并分析了其时间变化特征,主要结论如下:

(1) 过去110年武汉市年均温经历了“暖—冷—暖”的多年代波动:1906-1946年与1994-2015年为相对温暖期,前者与1971-2010年温暖程度相当,后者较1971-2010年高 0.93°C ;1947-1993年则相对较冷,较1971-2010年低约 0.28°C 。

(2) 在多年代尺度上,武汉年均温存在多次显著增暖和降温过程。在30年尺度上,最大变暖和变冷速率分别出现在1980-2009年和1928-1957年,变化速率分别为 $2.67\pm 0.48^{\circ}\text{C}/30\text{a}$ 和 $-1.23\pm 0.48^{\circ}\text{C}/30\text{a}$;增暖和降温最快的50年分别出现在1960-2009年和1925-1974年,变化速率分别为 $2.20\pm 0.50^{\circ}\text{C}/50\text{a}$ 和 $-1.4\pm 0.35^{\circ}\text{C}/50\text{a}$ 。

(3) 在20年尺度上,武汉市年均温在1920和1997年发生了由冷转暖的跃变,于1947年经历过一次由暖转冷的明显转折;在30年尺度上,1921和1994年发生由冷转暖的跃变,而自1942年起,武汉气温明显由暖转冷。

(4) 武汉市年均温变化与全球/北半球和中国相比,趋势基本一致但幅度稍大;全球增暖停滞在武汉也有所体现。在30年和50年尺度上,武汉市年均温变化速率自2009年起发生转折;15年尺度变化速率自1997年开始由正转负。

致谢:感谢国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn>)提供部分近代气温数据。

^① (a)为本文重建的1906-2015年武汉市年均温;(b)为中国年平均气温,资料来源于来自唐国利等(2005);(c)和(d)分别为北半球和全球年均温,资料来自Jones et al(2012)。

参考文献(References)

- 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2015. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社. [Editorial Committee for the Third China's National Assessment Report on Climate Change. 2015. The third China's national assessment report on climate change[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系[J]. 气象学报, 72(5): 835-852. [Ding Y H, Liu Y J, Liang S J, et al. 2014. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change[J]. Acta Meteorologica Sinica, 72(5): 835-852.]
- 冯瑞权, 吴池胜, 王婷, 等. 2010. 澳门近百年气候变化的多时间尺度特征[J]. 热带气象学报, 26(4): 452-462. [Feng R Q, Wu C S, Wang T, et al. 2010. Multiple time scales analysis of climate variation in Macau during the last 100 years[J]. Journal of Tropical Meteorology, 26(4): 452-462.]
- 郭军, 任国玉, 任雨. 2011. 近100年天津平均气温与极端气温变化[J]. 高原气象, 30(5): 1399-1405. [Guo J, Ren G Y, Ren Y. 2011. Changes of mean and extreme temperatures in Tianjin in recent 100 years[J]. Plateau Meteorology, 30(5): 1399-1405.]
- 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 2013. 1951-2010年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展, 32(6): 887-896. [Han C H, Hao Z X, Zheng J Y. 2013. Regionalization of temperature changes in China and characteristics of temperature in different regions during 1951-2010[J]. Progress in Geography, 32(6): 887-896.]
- 《华中区域气候变化评估报告》编写委员会. 2013. 华中区域气候变化评估报告决策者摘要及执行摘要2012[M]. 北京: 气象出版社. [Editorial Committee for Central China's Assessment Report on Climate Change. 2013. Assessment report on climate change for Central China: Summary for policymakers and executive summary 2012[M]. Beijing, China: China Meteorological Press.]
- 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 1995. 中国近百年温度序列[J]. 大气科学, 19(5): 525-534. [Lin X C, Yu S Q, Tang G L. 1995. Series of average air temperature over China for the last 100-year period[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 19(5): 525-534.]
- 刘小宁, 张洪政, 李庆祥. 2005. 不同方法计算的气温平均值差异分析[J]. 应用气象学报, 16(3): 345-356. [Liu X N, Zhang H Z, Li Q X. 2005. Analyses on average temperature difference resulted from different calculation methods [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 16(3): 345-356.]
- 彭嘉栋, 廖玉芳, 刘珺婷, 等. 2014. 洞庭湖区近百年气温序列构建及其变化特征[J]. 气象与环境学报, 30(5): 62-68. [Peng J D, Liao Y F, Liu J T, et al. 2014. Construction of temperature series in recent 100 years and its changes over Dongting Lake region[J]. Journal of Meteorology and Environment, 30(5): 62-68.]
- 任永建, 陈正洪, 肖莺, 等. 2010. 武汉区域百年地表气温变化趋势研究[J]. 地理科学, 30(2): 278-282. [Ren Y J, Chen Z H, Xiao Y, et al. 2010. Surface air temperature change of last 100 years over Wuhan region[J]. Scientia Geographica Sinica, 30(2): 278-282.]
- 唐国利, 丁一汇. 2007. 由最高最低气温求算的平均气温对我国年平均气温序列影响[J]. 应用气象学报, 18(2): 187-192. [Tang G L, Ding Y H. 2007. Impacts of the average air temperature derived from maximum and minimum temperatures on annual mean air temperatures series of China [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 18(2): 187-192.]
- 唐国利, 任国玉. 2005. 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, 10(4): 791-798. [Tang G L, Ren G Y. 2005. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China[J]. Climatic and Environmental Research, 10(4): 791-798.]
- 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 等. 1998. 近百年中国年气温序列的建立[J]. 应用气象学报, 9(4): 392-401. [Wang S W, Ye J L, Gong D Y, et al. 1998. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 9(4): 392-401.]
- 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 2006. 英国CRU高分辨率格点资料揭示的20世纪中国气候变化[J]. 大气科学, 30(5): 894-904. [Wen X Y, Wang S W, Zhu J H, et al. 2006. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution grid data[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 30(5): 894-904.]
- 吴绍洪, 赵艳, 汤秋鸿, 等. 2015. 面向“未来地球”计划的陆地表层格局研究[J]. 地理科学进展, 34(1): 10-17. [Wu S H, Zhao Y, Tang Q H, et al. 2015. Land surface pattern study under the framework of Future Earth[J]. Progress in Geography, 34(1): 10-17.]
- 闫军辉, 刘浩龙, 郑景云, 等. 2014. 长江中下游地区1620年的极端冷冬研究[J]. 地理科学进展, 33(6): 835-840. [Yan J H, Liu H L, Zheng J Y, et al. 2014. The extreme cold winter of 1620 in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Progress in Geography, 33(6): 835-840.]
- 闫军辉, 周晓, 刘明华, 等. 2017. 1951-2015年信阳极端温度

- 事件变化及其对全球变暖的响应[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 30(1): 82-86. [Yan J H, Zhou X, Liu M H, et al. 2017. Study on extreme temperature events in Xinyang during 1951- 2015 and their response to climate change[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 30(1): 82-86.]
- 赵国永, 韩艳, 闫军辉, 等. 2015. 信阳市城区四季变化特征研究[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 28(4): 529-532. [Zhao G Y, Han Y, Yan J H, et al. 2015. Studies on the characteristic of four seasons variation in Xinyang City[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 28(4): 529-532.]
- 郑祚芳, 祁文, 张秀丽. 2002. 武汉市近百年气温变化特征[J]. 气象, 28(7): 18-21, 37. [Zheng Z F, Qi W, Zhang X L. 2002. The character of temperature variation of Wuhan City during recent 95 years[J]. Meteorological Monthly, 28 (7): 18-21, 37.]
- Intergovernmental Panel on Climate Change. 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Working group I Contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press.
- Jones P D, Lister D H, Osborn T J, et al. 2012. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010[J]. Journal of Geophysical Research, 117(D5): D05127.
- Met Office. 2013. The recent pause in global warming (1): What do observations of the climate system tells us [EB/OL]. 2014-08-14 [2016-12-22]. <http://www.metoffice.gov.uk/research/news/2013/recent-pause-in-warming>.

Reconstruction and analysis of annual mean temperature of Wuhan for the 1906–2015 period

YAN Junhui^{1,2,3}, LIU Haolong², Ge Quansheng², ZHENG Jingyun², HAO Zhixin^{*}, WANG Yimin^{1,4}

(1. Key Laboratory of Climate Change & Environmental Evolution, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, Henan, China; 2. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. College of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, Henan, China; 4. Research Center of North and South Transition Zone in China, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, Henan, China)

Abstract: Based on the monthly maximum and minimum temperature data at Wuhan meteorological station in 1906-2015, annual mean temperature during the 110 years was reconstructed and the temporal change was analyzed. The main conclusions are: (1) Annual mean temperature of Wuhan showed multi-decadal variations. Two warm periods were experienced during 1906-1946 and 1994-2015; and between 1947 and 1993, annual mean temperature was relatively low. (2) At multi-decadal temporal scales, annual mean temperature of Wuhan showed several significant warming and cooling trends. The largest warming trends at 30- and 50-year scales were detected during 1980-2009 and 1960-2009, with linear trends amounting to 2.67 ± 0.48 °C/30a and 2.20 ± 0.50 °C/50a, respectively. The strongest cooling trends for the same temporal scales were detected for 1928-1957 and 1925-1974, with linear trends being -1.23 ± 0.48 °C/30a and -1.40 ± 0.35 °C/50a, respectively. (3) During the 110 years, there existed three abrupt changes in Wuhan annual mean temperature. During the early 1920s and the mid-late 1990s, temperature of Wuhan turned from cold to warm conditions. In the 1940s, the change was to the opposite. (4) Comparing temperature change of Wuhan with global, hemispheric, and China's country scales, the temperatures showed similar temporal evolution, with Wuhan exhibiting greater amplitude of change. The recent pause in global warming was also observed in Wuhan.

Key words: temperature reconstruction; rate of change; abrupt change; climate change; Wuhan City