

引用格式:王斌,李鹏,徐国策,等. 中国一级流域年气温的时空变化特征[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 152-163. [Wang B, Li P, Xu G C, et al. Temporal and spatial variation characteristics of annual temperature in China's first-level basin[J]. Resources Science, 2019, 41(1): 152-163.] DOI :10.18402/resci.2019.01.14

中国一级流域年气温的时空变化特征

王 斌, 李 鹏, 徐国策, 成玉婷, 赵宾华, 魏 芳

(西安理工大学省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘 要:气温的差异是造成自然景观和生态环境差异的主要因素之一。本研究采用全国一级流域735个气象站点1951—2013年气温资料,利用相对差分法、Hurst指数等方法对年气温的时空变化特征进行分析。结果表明:全国年气温总体呈显著升高趋势,但长江区中部年气温变化不显著。全国、辽河、海河、淮河、黄河、长江、西南诸河、东南诸河和珠江区均存在区域年气温的最佳代表性气象站点,分别为铁干里克、彰武、乐亭、菏泽、海源、井冈山、加查、武夷山市和柳州。代表性气象站点的年气温可以用以快速评估流域年气温均值的变化特征。全国一级流域年气温变化的主周期大致为25~28年。近20~30年是研究期内的偏暖期,Hurst指数分析表明在未来相当长一段时期内,全国绝大部分地区的气温会呈现为升高趋势。“哈尔滨-北京-石家庄-西安-重庆-贵阳”连线附近年气温与年降水量主要呈(极)显著负相关关系,该连线接近于“胡焕庸线”,“胡焕庸线”附近的气候研究对中国生态环境保护 and “一带一路”倡议具有重要意义。

关键词:一级流域;最佳代表性气象站点;气温;时空变化

DOI :10.18402/resci.2019.01.14

1 引言

气温在人类社会各个方面的作用不言而喻,近年来,全球气温明显变化异常^[1-4]。1951—2004期间,中国的气温增加速率达到了0.25℃/10a,明显高于同期全球气温的增加速率,在此期间中国大部分地区的气温都在变暖^[5]。秦大河等^[6]指出1950年以来的全球气候变暖有一半以上是由人类活动造成的,而且未来全球气候变暖仍将继续。最近50年观测到的大部分增暖可归因于人类活动^[7]。在总趋势升高的基础上,气温变化趋势存在准周期振荡^[8]。叶笃正等^[9]指出地球环境在不同的时间尺度上有所不同,最紧迫的是几十年甚至是至几百年的尺度变化,因为它与当代甚至几代人的生活环境有关。IPCC第五次工作报告^[10]指出,1980—2012年是工业革命以来最温暖的30年。综合来看,无论是全球性还是地区性的气温状况,在过去的几个世纪里都没

有发生大的根本性变化,其变化主要表现在近年来的增温过程,而大自然变化的速度又远超出人类现阶段的预测能力,因此,评价气温的变化特征仍处于一个初级阶段,未来相当长一段时期内的气温变化预测还会持续下去。同时,气温变化对于农业、社会经济、政府政策等的发展有着举足轻重的作用,史印山等^[11]指出,河北平原气温变化与冬小麦产量有很好的对应关系。现在的关于农业、社会经济、能源等的政策都是基于过去对于现今的预测,在新的气候条件下,这些都显得适应性不足,这就必须重新调整相关政策,从而影响地区社会经济的发展,受气候变化影响最大的莫过于环境生态脆弱的地区^[12],如西北地区。因而,研究气候变化仍是一个比较热门的课题。

中国地幅辽阔,东西南北跨度大,研究区域整体气温变化特征难度较大,如何快速评估某区域内

收稿日期:2017-11-07,修订日期:2018-10-15

基金项目:国家“十三五”科技支撑计划资助项目(2016YFC0402404)。

作者简介:王斌,男,陕西咸阳人,硕士生,主要从事旱区水文与水资源和水土保持的研究。E-mail: wenwu9264@163.com

通讯作者:徐国策, E-mail: xuguoce_x@163.com

2019年1月

的气温整体变化特征是一个比较棘手的问题。Vachaud在1985年提出了时间稳定性的概念,认为特定位置的某些特征可以在一段时间内代表一个区域的平均特征^[13]。国内许多研究者从不同角度证实了这一观点^[14-18]。利用时间稳定性找到某区域气温变化的代表性点,用以代表该区域的平均气温变化特征,可以很好的解决上述问题。在水文资料分析中,通常是以一级流域为基础。虽然一级流域间的大小有所差别,但可以通过流域间的共性问题,如上述时间稳定性问题,得到一级流域上的特征变化,同时,一级流域水文资料较为完整,因此,本研究选取全国一级流域分析其年气温时空变化特征,基于时间稳定性概念确定了一级流域年气温的最佳代表性气象站点,为快速评估流域年气温均值的变化提供了依据。

2 研究区流域划分与数据来源、研究方法

2.1 研究区流域划分与数据来源

根据全国水资源综合规划,将一级流域分为松花江、辽河、海河、淮河、东南诸河、黄河、长江、珠江、西北诸河和西南诸河等10个区^[19](图1)。该一级流域分区保持了大江大河的完整性,是常用的全国水资源统一分区资料,以利于在一个相当长的时期内各项水利规划都采用统一的基本资料。气温数据来自中国气象科学数据共享服务网^[19](<http://data.cma.cn>),数据集为1951—2013年全国一级流域内735个气象站点的年气温数据集,同时在研究

年气温及年降水量相关性的地理分布时采用了中国气象科学数据共享服务网的“与年气温同系列的降水数据集”。中国一级流域分级数据集来源于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据共享服务平台—湖泊—流域科学数据中心^[19](<http://lake.geodata.cn>),由于缺乏港澳台地区相关资料,故其不参与分析计算。

2.2 研究方法

研究方法主要采用数理统计和地理信息系统(GIS)空间统计方法,应用变异系数(CV)、时间稳定性^[20]、Hurst指数^[21,22]、距平^[23]和Morlet小波分析^[24]等计算方法,并结合GIS对气温时空变化特征进行研究。时间稳定性分析用相对差分法确定区域的年气温代表性位置点。一级流域和代表性气象站点的气温周期性变化采用Morlet小波分析方法。主要用到以下指标:根据Nielson等(1985)的分类系统: $CV < 10\%$ 时为弱变异, $10\% \leq CV < 100\%$ 时为中等变异, $CV \geq 100\%$ 时为强变异^[25];代表性位置点的选取一方面是平均相对差分(Mean Relative Difference, MRD)必须接近0,越接近于0,表明气象站的年气温越能代表区域的年平均气温,气象站点的年气温MRD值在 ± 0.05 之间可以被视作接近0;另一方面是相对差分的标准差(Standard Deviation of Relative Difference, SDRD)值较小^[20],代表性站点的SDRD值必须小于区域SDRD的平均值;通过R/S(Rescaled Range Analysis)分析计算Hurst指数值,当 $H = 0.5$ 时表明所研究的序列是一个随机序列, $0 < H < 0.5$ 时表明所研究的序列是一个反持久序列, $0.5 < H < 1.0$ 表明所研究的序列是一个持久性序列;以年气温距平百分率 $\pm 5\%$ 为指标,分为气温距平百分率 $> 5\%$ 为高温年、 $-5\% \sim 5\%$ 之间为中温年、 $< -5\%$ 为低温年三种类型。

3 结果及分析

3.1 全国一级流域的气温变化特征

1951—2013年全国及一级流域年气温统计特征见表1,全国1951—2013年年平均气温为 11.1°C ,年平均气温高于全国的一级流域是淮河、长江、东南诸河和珠江区。全国年气温最大值出现在1998年中沙群岛的珊瑚岛站,为 27.9°C ;最小值出现在1969年长白山天池站,为 -8.6°C 。一级流域年气温总体随纬度的升高而逐渐降低,相同纬度区域随经



图1 中国一级流域划分

Figure 1 First-level basin regions in China

注:此图根据国家测绘地理信息局标准地图

(审图号:GS(2016)1570号)绘制而成,底图无修改。

表1 1951—2013年全国及一级流域年气温统计特征

Table 1 Summary statistics of annual temperature in nationwide and first-level basin from 1951 to 2013

一级流域	站点数	年平均气温/℃	最大值(站点/年份)/℃	最小值(站点/年份)/℃	CV/%
全国	735	11.1	27.9(珊瑚岛/1998)	-8.6(天池/1969)	61
松花江	65	2.4	7.7(长春/2007)	-6.9(图里河/1969)	114
辽河	40	7.5	12.3(大连/2007)	1.2(长白/1965)	24
海河	38	10.4	15.5(新乡/2006)	-5.3(五台山/1956)	35
淮河	46	14.0	17.2(六安/2006)	10.0(成山头/1969)	10
黄河	90	7.5	15.8(泾河/2013)	-5.5(玛多/1965)	55
长江	180	14.2	23.2(元谋/1960)	-7.3(托托河/1985)	36
西北诸河	111	6.0	16.3(吐鲁番/2007)	-6.4(巴音布鲁克/1984)	68
西南诸河	57	10.1	24.8(元江/2012)	-3.4(那曲/1963)	72
东南诸河	36	17.7	22.6(漳州/2007)	8.1(天目山/1976)	15
珠江	72	20.7	27.0(三亚/1998)	13.1(安顺/1976)	13

注:CV为年气温空间变异系数。

度的增大而逐渐升高,珠江区年平均气温最高,松花江区年平均温度最低。松花江区年气温空间变异系数为114%,属于强变异,其他一级流域及全国年平均气温空间变异系数均在10%~72%之间,属于中等变异。一级流域变异系数基本呈东南沿海向西北内陆递增的趋势。此外,西北诸河和西南诸河区年气温空间变异系数远大于除松花江区以外的其他地区,表明西北诸河和西南诸河区年气温空间变异相对较大,这主要与其所处的地理位置和区域面积有关。总之,全国年气温空间分布极不均匀,不同一级流域间年气温时空变化存在一定差异。

3.2 年气温变化的空间特征分析

3.2.1 年气温序列变化趋势的空间分布

全国735个气象站点1951—2013年的年气温

趋势显著性水平如表2所示,同时结合3.3.1章节气温距平分析,松花江、辽河、海河、淮河、西北诸河和西南诸河区的年气温总体呈极显著升高趋势($p < 0.01$),不同一级流域内仅有3~7个站点气温变化趋势不显著,松花江和西北诸河区均仅有1个年气温显著降低的站点,其他四个一级流域内均没有年气温显著降低的站点。长江区中部,即陕西南部、四川东部、重庆、湖北西部、云南北部的站点年气温总体变化趋势不显著。珠江和东南诸河区的年气温也呈显著升高趋势。总之,除长江区之外,其他一级流域年气温变化趋势不显著的站点数极少,表明全国一级流域的年气温总体呈显著升高趋势。

3.2.2 全国一级流域的代表性气温站点

计算全国及一级流域年气温的平均相对差分

表2 气温趋势显著性水平站点数量

Table 2 The station number of temperature trend significance level

一级流域	0.001水平显著	0.01水平显著	0.05水平显著	0.1水平显著	不显著
松花江	59	1	1	1	3
辽河	31	4	1	1	3
海河	29	2	0	0	7
黄河	65	5	4	2	14
淮河	35	3	3	0	5
长江	93	26	18	7	36
西北诸河	99	3	3	0	6
西南诸河	39	10	2	1	5
东南诸河	25	1	1	2	7
珠江	40	13	6	5	8

(MRD)及其相应的标准差(SDRD),用以定量确定区域的年气温最佳代表性位置点。全国及一级流域年气温的平均相对差分见图2,全国、松花江、辽河、海河、淮河、西北诸河、西南诸河、黄河、长江、东南诸河和珠江区的年气温MRD值极差分别为5.14、5.14、1.12、1.61、0.32、3.17、2.46、2.57、1.90、0.70和0.55。一级流域年气温MRD值的极差大小总体与流域年气温的变异系数大小相一致。较小的年气温MRD值极差可能与流域的大小、位置和气候一致性等因素有关。此外,图2还表明松花江区年气温SDRD值最大,其次是珠江、东南诸河、淮河、长江、辽河和海河,最后是黄河、西南诸河和西北诸河区,说明年气温SDRD值由东部沿海向内陆逐渐增大。SDRD值可以表征某一位置点年气温随时间变化的程度,因此,东部沿海一级流域年气温随时间变化的程度较内陆区一级流域小,这与一级流域的海陆位置有关,水体比热较陆地大,海洋对气温的调节能力更强。

全国、辽河、海河、淮河、黄河、长江、西南诸河、东南诸河和珠江区均存在区域年气温的最佳代表性气象站点,分别为铁干里克、彰武、乐亭、菏泽、海源、井冈山、加查、武夷山市和柳州。彰武、乐亭、菏泽、海源、井冈山、加查、武夷山市和柳州气象站点的年气温MRD值分别为0.00、0.03、0.01、0.00、0.00、-0.01、0.01和0.00,均在 ± 0.05 之间。SDRD值分别为0.03、0.03、0.01、0.03、0.01、0.02、0.01和0.01,均小于相应一级流域年气温SDRD的平均值,满足成为代表性气象站点的两个条件。全国一级流域年气温代表性气象站点的个数不同,辽河、海河、淮河、黄河、长江、西南诸河、东南诸河和珠江区的年气温代表性气象站点个数分别为2、2、17、4、9、1、13和15个。另外,松花江和西北诸河区不存在年气温代表性气象站点,表明年气温代表性气象站点的数量与区域气象站点的个数无关,而应该与气象站点所在的位置有关,年气温代表性气象站点所在位置应具有区域的平均特征。

3.2.3 年气温的空间分布

根据温度年份划分指标,分别选取研究期内2007年、1979年和1956年作为高温年、中温年和低温年的代表年份。提取多年平均气温值和三个代表年份的年气温值进行插值,得到多年平均气

温、高温年、中温年、低温年,见图3(第157页)的年气温分布。

1951—2013期间的多年平均气温空间分布大致以淮河—秦岭—青藏高原东南边缘沿线为界,与中国1月 0°C 等温线和800 mm等降水量线大体一致,界线以南气温高于 15°C ,是中国高温区域的主要分布地区,界线以北是中国低温区域的主要分布区,气温最高区域主要集中在珠江和西南诸河区的云南部分。另外,以塔里木盆地为中心的区域年气温在西北地区相对较高,气温范围在 10°C ~ 15°C 之间;松花江和西北诸河区青藏高原的年气温基本在 5°C 以下,是全国年气温的最低区域。全国年气温总体变化趋势为青藏高原以东的全国其它地区($\text{E}103^{\circ}$ — $\text{E}135^{\circ}$)气温随纬度的升高而逐渐降低。

在三个不同年型的年气温分布中,长江区源头地区多年平均气温基本低于 0°C 。全国年气温在高温年(2007年)和中温年(1979年)的气温带分布差异较小,主要变化位于 15°C ~ 20°C 的区域。2007年 15°C ~ 20°C 的区域明显较1979年增加, 10°C ~ 15°C 区域的界线从秦岭—淮河一线向北扩大至河北省及天津地区。此外,2007年新疆西部地区出现了年气温 15°C ~ 20°C 的区域。以武汉和重庆为中心(图3c全国中部地区“发髻状”区域,见第157页)的 15°C ~ 20°C 年温度区域在中温年和高温年没有发生显著变化。低温年(1956年)的年气温明显较低,秦岭—淮河线以北地区的年气温基本均在 5°C 以下,全国最高年气温为 16.2°C ,零下区域绝大部分集中在西北诸河和西南诸河区的青藏高原部分。不同代表年份的年气温空间分布表明全国气温变化主要发生在中国中部和东部的黄河、长江、淮河和海河区,最高年温度的珠江区和最低年温度的西北诸河区青藏高原部分没有发生明显的年气温区域变化。

3.3 年气温变化的时间特征分析

3.3.1 年气温的距平序列分析

气温距平是计算时期内逐年气温相对整个分析时期内年气温平均值的差值(图4,见第158页)。从气温距平的正负变化来看,松花江、辽河、海河和淮河区在20世纪90年代以前气温距平基本为负值,而90年代以后基本为正值,表明这4个区域在90年代之后为年气温的偏暖期,并且比90年代之前

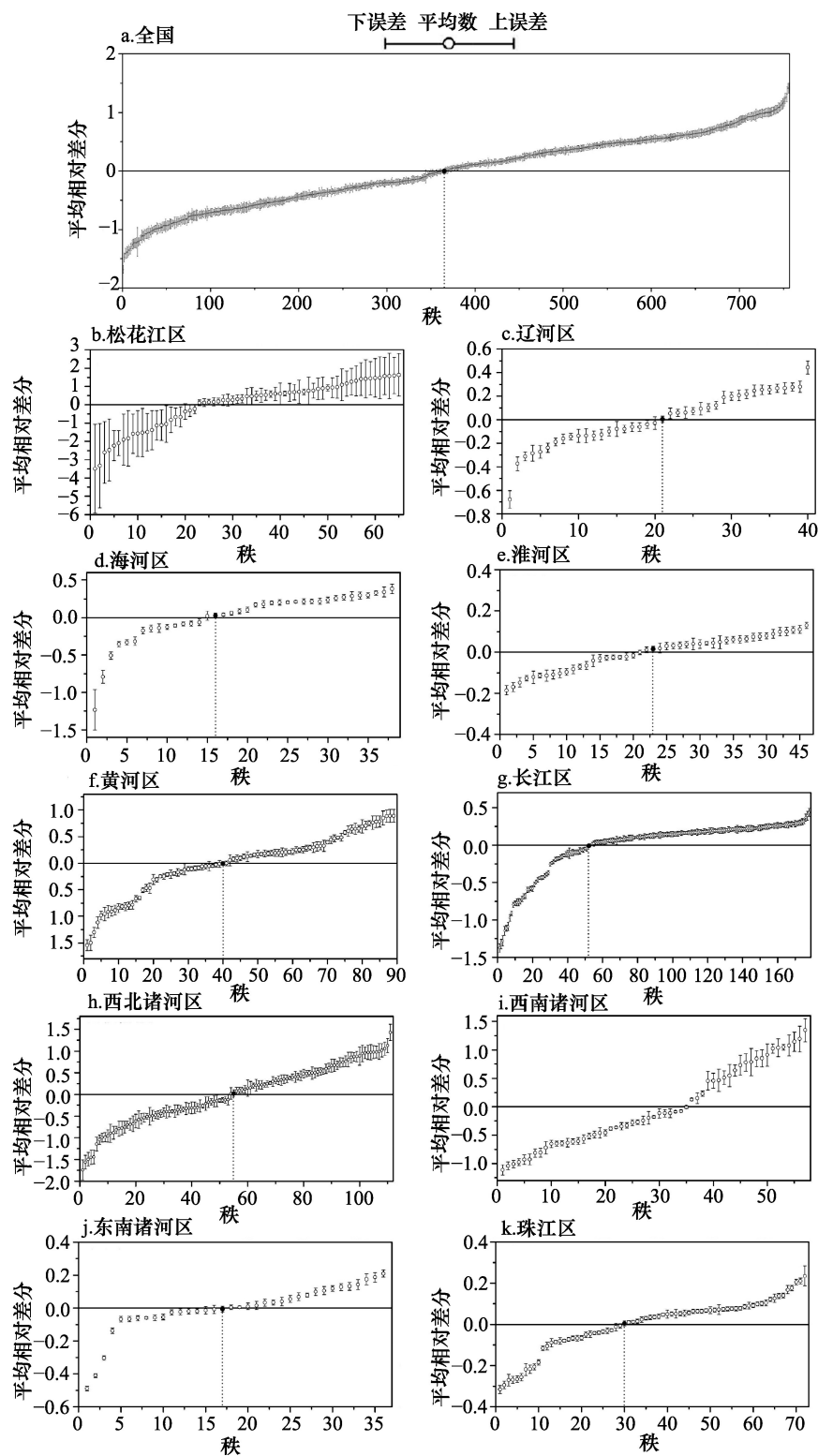


图2 全国及一级流域年气温的平均相对差分

Figure 2 Mean relative difference of annual temperature in nationwide and first-level basin

注:竖线代表标准差,黑点为最佳代表性位置点。

2019年1月

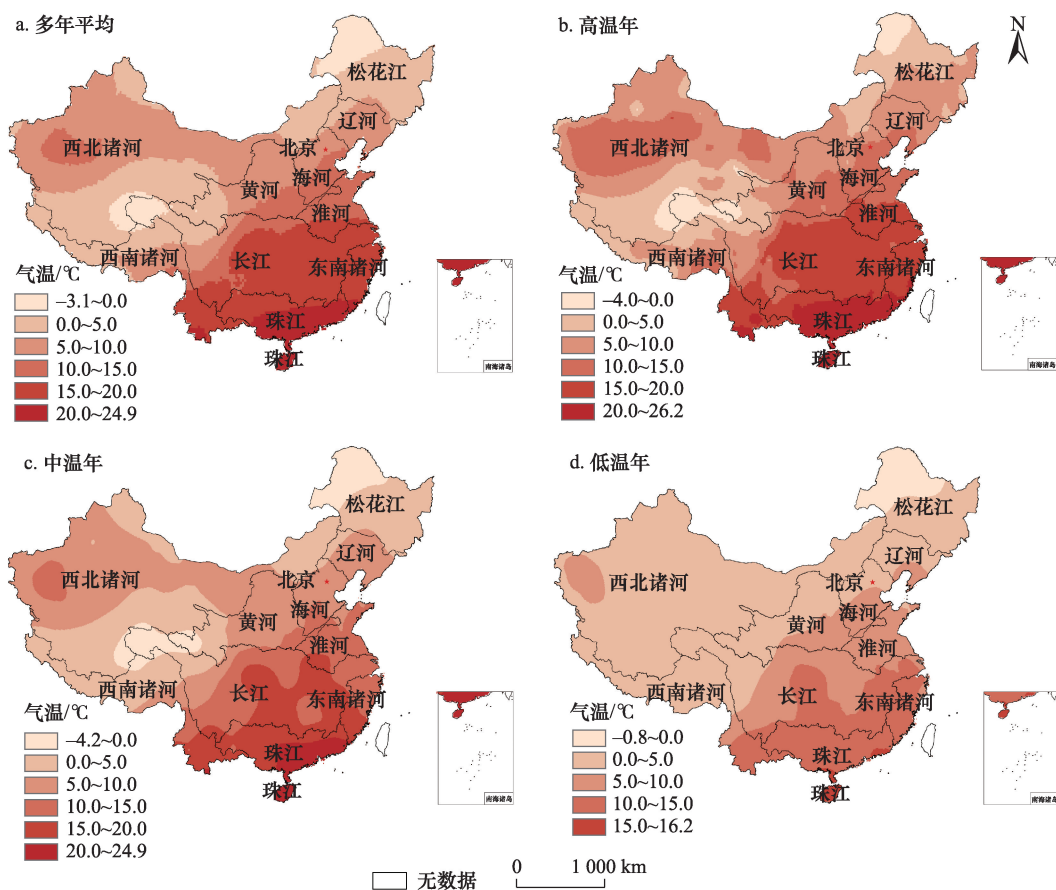


图3 全国一级流域多年平均气温和三个代表年份气温的空间分布

Figure 3 The spatial distribution of the average annual temperature and the three representative years' temperature in national first-level basin

注:此图根据国家测绘地理信息局标准地图(审图号:GS(2016)1570号)绘制而成,底图无修改。

的年气温有较大幅度的升高。松花江、辽河和海河区在1956年与1970年左右年气温距平相对整个研究期最低,属于偏冷年份。西北诸河、黄河和长江区在20世纪60年代之前和90年代之后的气温距平基本为正值,属于研究期内的偏暖期,大致在1960—1987期间是研究期内的偏冷期,说明中国的中纬度地区在研究期内的气温变化过程为先下降并保持在较为稳定的偏冷状态,在这之后气温开始回暖并逐渐保持稳定。东南诸河和珠江区大致在1990—2000年期间的年气温距平呈正负交替变化,在2000年以后年气温距平为正值,说明2000年以后是东南诸河和珠江区的偏暖期,而且东南诸河区年气温距平在1990年之前基本为负,是持续时间较长的偏冷期。西南诸河区年气温在整个研究期内总体呈降低趋势,在1960以前表现为正的距平序列。从年气温距平的波动幅度来看,淮河、长江和

珠江区的年气温距平变化幅度基本是在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内,表明这4个一级流域在研究期内的年气温变化差异较小。辽河、海河、黄河、西北诸河和东南诸河区的年气温距平变化幅度在 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 以内。松花江和西南诸河区的年气温距平变化幅度相对较大,分别在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 和 $\pm 6^\circ\text{C}$ 以内,其中西南诸河区的年气温呈现10年际尺度的变化差异,在研究期的前10年与后50年变化幅度差异大。从最近十几年的年气温距平来看,松花江、海河、黄河和东南诸河区的年气温距平在 $+1^\circ\text{C}$ 上下波动变化,辽河、淮河、长江、西北诸河和珠江区的年气温距平在 $+0.5^\circ\text{C}$ 上下波动变化,西南诸河区的年气温距平在 -1°C 上下波动变化,表明近年来气温的变化呈现较为平稳的变化过程,没有较大的气温差异。同时,年气温距平变化幅度呈现随纬度升高而逐渐增大的趋势,即年气温的变化幅度随纬度的升高而增大。

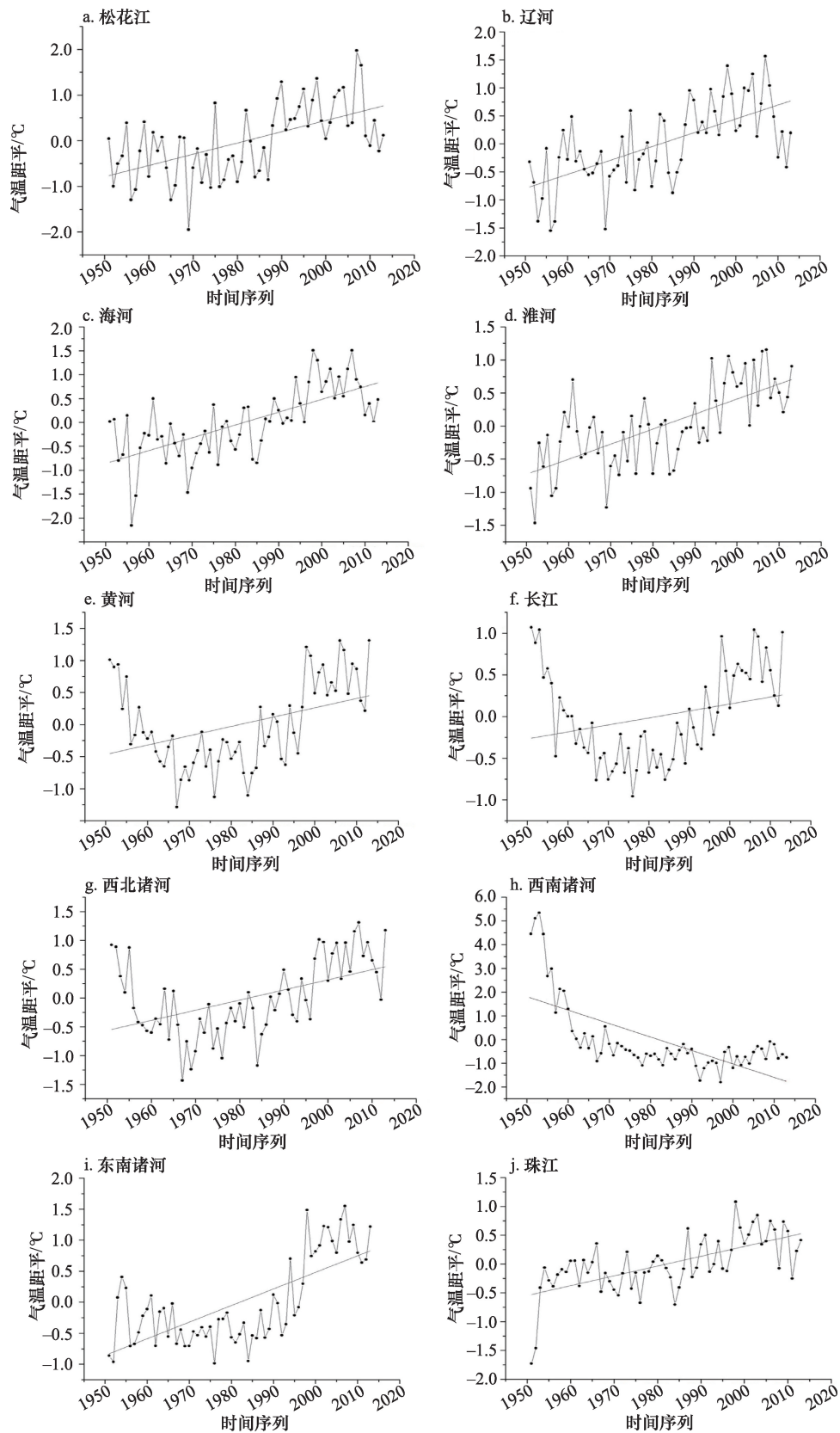


图4 全国一级流域的年气温距平变化趋势

Figure 4 Anomaly changes of annual temperature in national first-level basins

2019年1月

综合来看,全国一级流域的年气温在研究期内出现多次波动过程,但总体表现为上升趋势(西南诸河除外),不同地区的冷暖期存在一定的差异。近20~30年是整个研究期的偏暖期,说明中国气温也呈变暖趋势,且纬度越高变暖趋势越明显。

3.3.2 气温的变化趋势分析

计算一级流域及其最佳代表性气象站点的Hurst指数(表3),最佳代表性气象站点和其所属一级流域的Hurst指数均大于0.5,表明1951—2013年间全国、一级流域和最佳代表性站点的年气温变化均为持久性序列,即全国、一级流域和最佳代表性气象站点的年气温未来变化趋势与过去的变化趋势相一致。除长江(气温显著增加)和西南诸河区(气温极显著减少),其他一级流域和最佳代表性站点的气温历史变化趋势均表现为极显著增加,同样在未来一段时间内气温也将表现为升高趋势。除西南诸河区与加查的年气温变化趋势不一致外,其他一级流域及其最佳代表性站点的年气温变化趋势均一致;西南诸河区和加查的气温变化趋势差异主要是因为加查的年气温时间序列是1991—2013年,而西南诸河区的年气温时间序列是1951—2013年,西南诸河区1991—2013年的年气温也呈极显著升高趋势($p < 0.01$)。全国、一级流域和最佳代表性站点的年气温历史变化趋势和未来变化趋势相同,最佳代表性气象站点能够反映所在区域的年气温变化趋势。

3.3.3 气温的周期性分析

小波分析是进行温度尺度变化分析的有效手段,可以分析全国、一级流域和最佳代表性站点的年气温时间序列周期性,确定年气温序列的变化周期(图5)。全国、一级流域和最佳代表性站点的年气温小波方差图均有两个峰值,大致为40~43年和25~28年(分别为第一主周期和第二主周期),年气温序列在第一主周期的周期性最强。全国及一级流域的第二主周期大致为25年,最佳代表性气象站的第二主周期也大致在25年。全国、一级流域、彰武站、柳州站的第一主周期在43年左右,铁干里克、乐亭、菏泽、海源、井冈山、加查和武夷山市的第一主周期在40年左右。从63年的时间尺度来看,25~28年的周期性作为年气温序列的周期性较为妥当,

表3 1951—2013年年平均气温序列的R/S

分析及未来趋势判断

Table 3 R/S analysis of annual temperature sequence and future trends from 1951 to 2013

一级流域	H	R^2	历史变化趋势	未来变化趋势
全国	0.877	0.976	增加(极显著)	升高
铁干里克	0.998	0.977	增加(极显著)	升高
松花江	0.906	0.968	增加(极显著)	升高
辽河	0.930	0.974	增加(极显著)	升高
彰武	0.947	0.978	增加(极显著)	升高
海河	0.882	0.947	增加(极显著)	升高
乐亭	0.863	0.949	增加(极显著)	升高
淮河	0.869	0.979	增加(极显著)	升高
菏泽	0.543	0.960	增加(极显著)	升高
黄河	0.883	0.975	增加(极显著)	升高
海源	0.980	0.984	增加(极显著)	升高
长江	0.857	0.978	增加(显著)	升高
井冈山	0.831	0.984	增加(极显著)	升高
西北诸河	0.892	0.977	增加(极显著)	升高
西南诸河	0.858	0.977	减少(极显著)	降低
加查	0.792	0.983	增加(极显著)	升高
东南诸河	0.885	0.986	增加(极显著)	升高
武夷山市	0.833	0.980	增加(极显著)	升高
珠江	0.866	0.981	增加(极显著)	升高
柳州	0.916	0.985	增加(极显著)	升高

其相较40~43年的可靠性高,同时最佳代表性站点与其所属区域的年气温主周期总体一致,即便有所偏差,但也基本在2~3年以内,这主要是由最佳代表性站点与其所属区域的年气温序列长度不同造成的。因此,最佳代表性气象站点能够反映其所属区域年气温序列的周期性。

3.4 气温与降水量相关性的地理分布

气温与降水量相关性的地理分布见图6(第161页),图6显示,中国气温和降水量总体无显著相关性,显著相关关系的站点主要为负相关关系,降水与气温呈(极)显著负相关的站点主要集中在“哈尔滨-北京-石家庄-西安-重庆-贵阳”附近,这与郭渠等^[26]研究的重庆气温与降水量存在明显的负相关关系结果相一致。“哈尔滨-北京-石家庄-西安-重庆-贵阳”连线与“胡焕庸线^[27,28]”较为接近或部分重合,而“胡焕庸线”不仅仅是中国人口密度的分界线,基本上也是中国半干旱与半湿润地区的分界线。“胡焕庸线”同时也是气候变化的产物,从而提出一个

问题,在全球气候变化的背景下,这条影响中国人口分布、经济格局分布的线是否会发生变化^[29-31],这

也就意味着“哈尔滨-北京-石家庄-西安-重庆-贵阳”连线附近的气温降水关系一方面可能会对人口

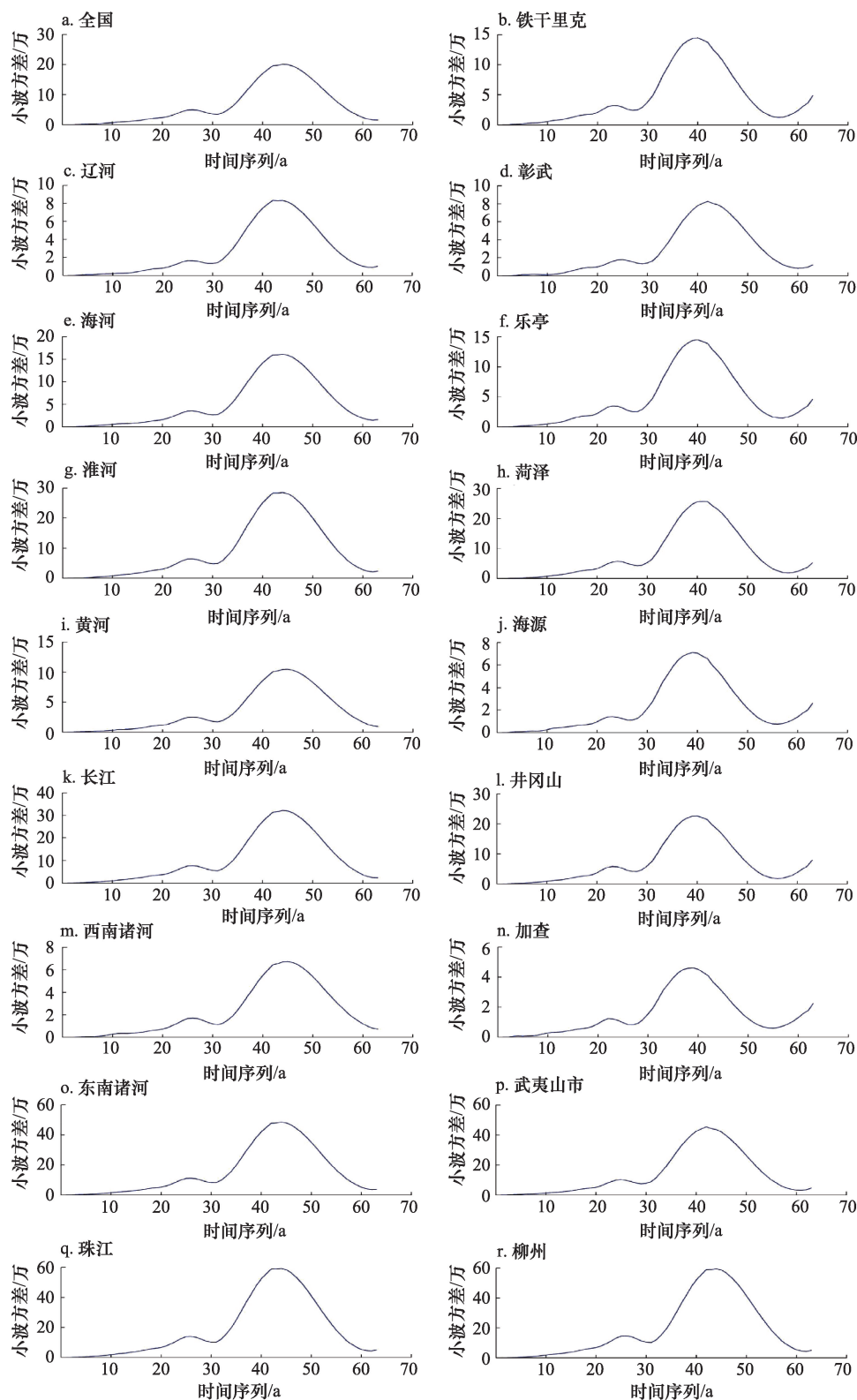


图5 年气温序列的小波方差分布

Figure 5 Wavelet variance of annual temperature sequence

2019年1月

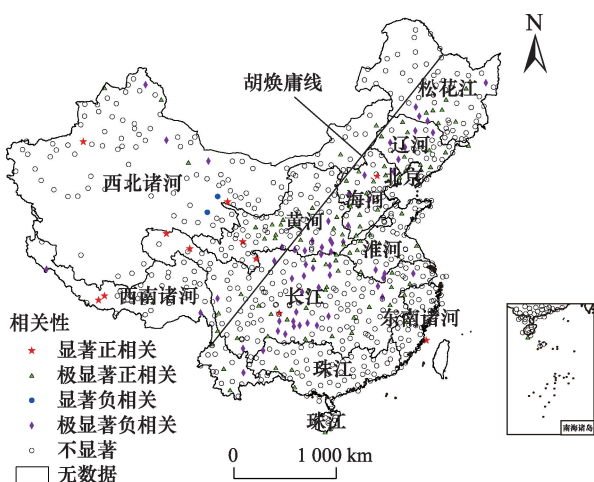


图6 气温与降水量相关性的地理分布

Figure 6 The geographical distribution of the correlation between temperature and precipitation

注:此图根据国家测绘地理信息局标准地图

(审图号:GS(2016)1570号)绘制而成,底图无修改。

密度的分布产生一定的影响,一方面可能会通过影响政策对社会经济、农业等产生影响等等。那么,“哈尔滨-北京-石家庄-西安-重庆-贵阳”附近区域的气候研究和预测对于中国生态环境保护和一带一路战略具有重要意义。

4 结论与讨论

本研究基于一级流域内的全国735个气象站点数据,利用相对差分法、Hurst指数等方法揭示了全国1951—2013年气温的时空变化特征,同时分析了气温与降水的相关性在地理上的分布情况,结论如下:

1951—2013年全国年气温总体呈显著升高趋势,但长江区中部年气温变化不显著;气温距平序列和Hurst指数分析表明基本在全国范围内近20~30年是研究期内的偏暖期,在未来相当长一段时期内,气温总体会呈升高趋势,其中在西南诸河区气温变化呈极显著降低趋势($p < 0.001$),预测其未来气温仍然呈下降趋势;全国及一级流域年气温的25~28年周期性可信度较高。

在全国、辽河、海河、淮河、黄河、长江、西南诸河、东南诸河和珠江区均存在年气温的最佳代表性气象站点,分别为铁干里克、彰武、乐亭、菏泽、海源、井冈山、加查、武夷山市和柳州,在松花江和西北诸河区不存在年气温的最佳代表性气象站点。气温序列的变化趋势和周期性分析表明最佳代表

性气温站点能够代表所属流域气温序列的平均变化趋势和周期性。根据代表性气象站,可以快速评估流域气温均值的变化,而不必进行全流域资料的统计分析,进而节省了大量时间。

降水与气温呈(极)显著负相关的站点主要位于“哈尔滨-北京-石家庄-西安-重庆-贵阳”连线附近,与“胡焕庸线”较为接近或部分重合。研究“胡焕庸线”附近的气候变化对于分析该区域内的社会、经济、人文等情况变化具有重要意义,从而为这些地区的未来人类生产生活和社会发展提供一定的参考价值。

最佳代表站点的确定是根据Vachaud等^[13]的理论,如果一个样点的MRD(Mean Relative Difference)接近于0并且SDRD(Standard Deviation of Relative Difference)较小,那么这个样点就是可以选取的代表性点,同时,SDRD的值在 ± 0.05 范围内是可以被认作是接近于0。在研究气温的距平序列分析时,近年来气温变化波动浮动较小,处于一种升高“停滞”状态,这与预测气温总体趋势呈显著($p < 0.01$)升高状态似乎有所相悖,这是有待继续深入的地方,并且由于气候的变化程度远超过人类能够预测的能力,因而这种预测在一定程度上具有不确切性。虽然具有一定的不确切性,但是由于人类活动,近年来因为全球变暖导致的气候变化的事实,这是可以肯定的。所以在今后研究气候变化的同时也要充分考虑到这些不确切性^[12],以适应当前的气候变化对于人类生产生活等的影响。本研究对于气候研究提供了一定的补充,对于将气候要素变化与社会发展相联系具有一定的指导意义。

参考文献(References):

- [1] 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. [Han C H, Hao Z X, Zheng J Y. Regionalization of temperature changes in China and characteristics of temperature in different regions during 1951—2010[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(6): 887—896.]
- [2] 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. [Ren G Y, Chu Z Y, Zhou Y Q, et al. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 701—716.]
- [3] 王绍武. 近百年我国及全球气温变化趋势[J]. 气象, 1990, 16

- (2): 11–15. [Wang S W. Variations of temperature in China for the 100 years period in comparison with global temperatures [J]. *Meteorological Monthly*, 1990, 16(2): 11–15.]
- [4] 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.]
- [5] 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等. 近54年中国地面气温变化[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 717–727. [Ren G Y, Xu M Z, Chu Z Y, et al. Changes of surface air temperature in China during 1951–2004[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 717–727.]
- [6] 秦大河, Thomas Stocker, 259名作者和TSU(驻伯尔尼和北京). IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1–6. [Qin D H, Stocker T, 259 Author and TSU (Bern & Beijing). Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2014, 10(1): 1–6.]
- [7] 董磊华, 熊立华, 于坤霞, 等. 气候变化与人类活动对水文影响的研究进展[J]. 水科学进展, 2012, 23(2): 278–285. [Dong L H, Xiong L H, Yu K X, et al. Research advances in effects of climate change and human activities on hydrology[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(2): 278–285.]
- [8] 宋连春. 近40年我国气温时空变化特征[J]. 应用气象学报, 1994, 5(1): 119–124. [Song L C. Characteristics of temperature in spatial and temporal variation in China during recent 40 years [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 1994, 5(1): 119–124.]
- [9] 叶笃正, 符淙斌. 全球变化的主要科学问题[J]. 大气科学, 1995, 18(5): 598–513. [Ye D Z, Fu C B. Major issues of global change sciences [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, 18(5): 598–513.]
- [10] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis, the Summary for Policymakers of the Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [11] 史印山, 王玉珍, 池俊成, 等. 河北平原气候变化对冬小麦产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1444–1447. [Shi Y S, Wang Y Z, Chi J C, et al. Impact of climate change on winter wheat production in the Hebei Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(6): 1444–1447.]
- [12] 叶笃正. 人类活动引起的全球性气候变化及其对我国自然、生态、经济和社会发展的可能影响[J]. 中国科学院院刊, 1986, (2): 18–26. [Ye D Z. Global climate change caused by human activities and its possible impact on China's natural, ecological, economic and social development [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 1986, (2): 18–26.]
- [13] Vachaud G, Silans A P D, Balabanis P, et al. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1985, 49(4): 822–828.
- [14] Grayson R B, Western A W. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response [J]. *Journal of Hydrology*, 1998, 207(1–2): 68–82.
- [15] Brocca L, Melone F, Moramarco T, et al. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy[J]. *Geoderma*, 2009, 148(3): 364–374.
- [16] Wei H, Shao M G, Reichardt K. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation [J]. *Science Society of America Journal*, 2010, 74(3): 762–773.
- [17] Xu G, Ren Z, Li P, et al. Temporal persistence and stability of soil water storage after rainfall on terrace land [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, DOI: 10.1007/s12665-016-5780-5.
- [18] Xu G, Li Z, Li P. Spatial Patterns and Stability of Soil Water Content in Forested Slope and Terraced Area on the Loess Plateau, China[C]. Vienna Austria: EGU General Assembly Conference, 2016.
- [19] 高歌, 许崇育. 1961–2010年中国十大流域水分盈亏量时空变化特征[J]. 地理学报, 2015, 70(3): 380–391. [Gao G, Xu C Y. Characteristics of water surplus and deficit change in 10 major river basins in China during 1961–2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(3): 380–391.]
- [20] 徐国策, 刘海波, 申震洲, 等. 洛惠渠灌区地下水电导率时间稳定性分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 115–121. [Xu G C, Liu H B, Shen Z Z, et al. Temporal stability of groundwater electrical conductivity in Luohuiqu irrigation district [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 115–121.]
- [21] Li X. The wavelet estimation of Hurst coefficient in hydrological time series [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 30(8): 21–25.
- [22] Xie P, Chen G, Lei H. Hydrological alteration analysis method based on Hurst coefficient [J]. *Journal of Basic Science & Engineering*, 2009, 17(1): 32–39.
- [23] 徐新良, 王靓, 蔡红艳. “丝绸之路经济带”沿线主要国家气候变化特征[J]. 资源科学, 2016, 38(9): 1742–1753. [Xu X L, Wang L, Cai H Y. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Silk Road Economic Belt[J]. *Resources Science*, 2016, 38(9): 1742–1753].
- [24] Grossmann A, Morlet J. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape [J]. *Siam Journal on Mathematical Analysis*, 1984, 15(4): 723–736.
- [25] Nielsen D R, Bouma J. Soil Spatial Variability [M]. Wageningen: Pudoc, 1985.
- [26] 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]. *Meteorological and Environmental Research*, 2009, 14(6): 646–656.]
- [27] 胡焕庸. 中国人口之分布—附统计表与密度图[J]. 地理学报, 1935, (2): 33–74. [Hu H Y. Distribution of China's population: with statistical tables and density maps [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1935, (2): 33–74.]
- [28] 陈明星, 李扬, 龚颖华, 等. 胡焕庸线两侧的人口分布与城镇化格局趋势—尝试回答李克强总理之问[J]. 地理学报, 2016, 71(2): 179–193. [Chen M X, Li Y, Gong Y H, et al. The population distribution and trend of urbanization pattern on two sides of Hu

- Huanyong population line: a tentative response to Premier Li Keqiang [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 71(2): 179–193.]
- [29] 王铮, 张丕远, 周清波. 历史气候变化对中国社会发展的影响: 兼论人地关系[J]. 地理学报, 1996, (4): 329–339. [Wang Z, Zhang P Y, Zhou Q B. The impacts of climate on the society of China during historical times [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, (4): 329–339.]
- [30] Wu J. Agent-based simulation of the spatial evolution of the historical population in China [J]. *Journal of Historical Geography*, 2011, 37(1): 12–21.
- [31] 王铮, 乐群, 夏海斌, 等. 中国2050: 气候情景与胡焕庸线的稳定性[J]. 中国科学: 地球科学, 2016, 46(11): 1505–1514. [Wang Z, Yue Q, Xia H B, *et al.* China 2050: climate scenarios and stability of Hu-line[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2016, 46(11): 1505–1514.]

Temporal and spatial variation characteristics of annual temperature in China's first-level basin

WANG Bin, LI Peng, XU Guoce, CHENG Yuting, ZHAO Binhua, WEI Fang

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Temperature is one of the main factors causing the difference between the natural landscape and the ecological environment. Based on the annual temperature data of 735 meteorological stations during the period from 1951 to 2013 in China's first-level basin, the relative difference method, Hurst index and other methods were employed to identify the temporal and spatial variation characteristics of annual temperature. The results illustrated that the annual temperature in China generally showed a significant upward trend, but the annual temperature in the middle of the Yangtze River region did not change significantly. The whole China, Liao River, Hai River and Huai River, Yellow River, Yangtze River, Southwest River, Southeast River, and Pearl River region all existed the best representative meteorological sites for annual temperature. The best representative meteorological sites were Tieganlike, Zhangwu, Laoting, Heze, Haiyuan, Jinggangshan, Jiacha, Wuyishan, and Liuzhou, respectively. The main period of annual temperature change in first-level basin regions in China is approximately 40~50 years. The last 20~30 years were the warmer period, Hurst index analysis showed that the temperature will continue to rise in future for the most parts of China. The annual temperature and the annual precipitation near the connection of “Harbin- Beijing- Shijiazhuang- Xi'an- Chongqing- Guiyang” exhibited a (highly) significant negative correlation. The connection is close to “Hu Line.” The study of the climate near “Hu Line” is of great significance to the ecological environment protection and the Belt and Road strategy of our country. The Hurst index analysis, Mann-Kendall test, and Morlet wavelet analysis of the annual temperature series demonstrate that the best representative meteorological stations can reflect the regional annual temperature trends and major cyclical changes. The method of estimating the annual average temperature of a region using the annual temperature of a representative meteorological site is meaningful. The method is also of great significance for rapid assessment of regional mean annual precipitation and scaling scales.

Key words: first-level basin; the best representative meteorological sites; temperature; temporal and spatial variation