

中国台站冬夏季气温、降水的气候变化特征及其显著性检验

段明铿*, 李欣, 王盘兴

南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室, 江苏 南京 210044

* 联系人, E-mail: mingkeng@sina.com

2020-02-20 收稿, 2020-04-07 接受

国家重点研发计划项目(2016YFA0600703); 国家自然科学基金资助项目(41675056; 41991283)

摘要 利用1951—2010年中国160站气温、降水资料,分析中国代表性台站冬季和夏季气温、降水的气候值及气候变率在前后30 a的差异,并对结果使用不同方法进行显著性检验。结果表明,季气温气候平均值的变化总体与全球增暖一致,以升温为主,但夏季在秦岭以南及长江中游地区出现显著局部变冷现象;季气温气候变率的变化相对较小,冬季总体不显著,夏季仅有少数台站显著。降水的气候变化总体不明显,季降水气候值变化的空间分布复杂,冬季南方地区、夏季东部地区总体增加,冬、夏季降水气候变率的变化均不显著。理论检验方法(t 检验、 F 检验)与随机模拟方法(EMC法)的显著性检验结果,对气温的差别较小、对降水的差别较大,这与样本距平序列是否服从正态分布有关。EMC法可在确保样本统计特征不变的情况下,通过多次随机模拟,无需考虑其理论统计分布特征,使检验结果更为可靠。

关键词
气温;
降水;
气候变化;
显著性检验;
经验蒙特卡洛方法

季、月平均气温和总降水量是与单站热量和水分有关的两个最重要的气候状态参数。当统计区间大于30 a时,平均气温和总降水量的多年平均值和均方差被称为气候值和气候变率,是表征单站气候和气候异常平均状态的两个统计量。通过两者在不同统计时段结果的分析,可以揭示该站的气候变化基本特征。

在全球变暖背景下,国内外学者围绕气温和降水的气候变化开展了大量的研究工作。IPCC(2013)第五次评估报告指出,近60余年来的观测结果显示出的气候变化是千年来前所未有的,1880—2012年间全球地表气温比以往上升了0.85℃,而2003—2013年间地表气温又比1850—1900年平均升高了0.78℃。我国气候变暖速率1909年以来高于全球平均值,每百年升温0.9~1.52℃;自1951年以来,中国平均气温上升了1.38℃,上升速度为每10 a 0.23℃,20世纪80年代以来的升温尤为显著;降水量变化趋势不明显,但呈现出明显的空

间差异(《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会,2015;丁一汇和王会军,2016;Ren et al.,2017;黄建平等,2019)。对我国台站地面气温和降水资料的分析均表明,50年代以来我国气温总体呈逐渐升高的趋势,但不同区域不同季节的增温速率和增温幅度存在差别(王遵娅等,2004;任国玉等,2005a;翟盘茂和邹旭恺,2005)。这些研究大都发现长江中游和西南部分地区存在气温下降的情况,但对这种变化的显著性缺少定量的分析。从季节的角度看,秋季和冬季气温的变化比较相似,80年代初开始呈现明显增暖趋势;春季和夏季气温的变化较相似,气温波动的幅度和变化趋势较小,冬季和夏季降水的年代际变化更相似(任国玉等,2005b)。有研究还发现,长江中下游和西北地区西部的部分区域有降水量明显增加的趋势,而东北东南部、华北和西北东部的部分地区降水量减少趋势显著(Liu,2005;翟盘茂和邹旭恺,2005)。此外,受到东亚夏季风年代际减弱的影响,1980年前后气温和降水均出现了不同

引用格式: 段明铿, 李欣, 王盘兴. 2020. 中国台站冬夏季气温、降水的气候变化特征及其显著性检验[J]. 大气科学学报, 43(5): 888-896.

Duan M K, Li X, Wang P X. 2020. Climate change characteristics and significance tests of temperature and precipitation of China weather stations in winter and summer[J]. Trans Atmos Sci, 43(5): 888-896. doi: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200220001. (in Chinese).

程度的年代际转折,降水的变化尤其明显。我国东部地区降水异常出现了从“北旱南涝”到“南涝北旱”转型,而西部干旱半干旱地区的降水则有持续增加的趋势(Liu, 2005; 王遵娅, 2007; 施晓晖和徐祥德, 2008; Day et al., 2018)。

从方法的角度看,目前围绕气候变化特征的研究主要针对整个时间序列,通常采用线性趋势、最小二乘法、样条平滑曲线等方法进行分析,这些方法基本都能够可靠地揭示气候变化的信号(Mitchell et al., 2001; 翟盘茂和李蕾, 2014; Hegerl et al., 2006)。当然,近年来也有研究者尝试用一些新的方法来检测气候变化的信号,例如人工智能(AI)和深度学习方法等(Barnes et al., 2018; Sippel et al., 2020)。实际上,鉴于目前观测资料的长度,完全可以从“气候”的定义出发,通过对足够长时段(如30 a)资料的统计对比,揭示气候变化的特征。除此之外,对气候值和气候变率等气候变化特征的分析,必须要考虑显著性检验的问题。常用的方法是使用 t 检验、 F 检验等理论检验方法,对时间序列的均值及其距平序列模方是否存在显著差异做出判断。直接用这些方法对统计量做显著性检验的前提是样本的统计量服从已知某种理论分布。对于分析对象(季温度、降水)而言,研究表明,它们不一定来自正态母体;因此,统计量不一定服从学生氏 t 分布、 F 分布(施能和陈辉, 1988; 谢瑶瑶等, 2011)。根据谢瑶瑶等(2011)的分析,中国160站季气温样本距平序列服从正态分布的站数占总站数比例近90%,且分布的冬、夏季节差异甚小;季降水样本距平序列服从正态分布的站数占总站数比例不足50%,冬季明显低于夏季(站数约为夏季一半)。因此,理论检验方法适用于中国多数站季气温均值、模方差异的显著性检验(仍有10%以上的站不适用),而对半数以上站季降水均值、模方差异的显著性检验则不适用(冬季高达74%)。因此需要考虑使用更为可靠的显著性检验方法,特别是对降水的分析。

综上,有必要进一步对我国气温、降水在不同时段的气候变化特征进行比较,并使用恰当的显著性检验方法对结果进行检验。因此,将利用中国160站60 a(1951—2010年)平均气温和总降水量资料,分析冬(12月—次年2月)、夏(6—8月)两季中国160站的单站气候值和气候变率在前30 a(1951—1980年)和后30 a(1981—2010年)变化的差异,并比较不同检验方法所呈现的显著性检验结果的差别。

1 资料和方法

1.1 资料

资料为国家气候中心提供的中国160站1951—2010年间逐月气温和降水量资料。根据研究需要,将资料处理成季平均气温和季降水总量序列进行计算。

1.2 方法

将某台站气温或降水的60 a序列记为 x ,再将其分为长度分别是 n_1 、 n_2 的两个子序列 x_1 、 x_2 (右下标 $k=1, 2$ 为子序列序号,1为前30 a,2为后30 a), $n_1+n_2=n=60$ a。各序列对应的气候平均值为 \bar{x} 、 \bar{x}_k ,均方差为 σ 、 σ_k ,距平序列模方 $s=n\sigma^2$ 、 $s_k=n_k\sigma_k^2$ (分别是 x 、 x_k 的自由度为 $n-1$ 、 n_k-1 的 χ^2 统计量)。据此还可进一步得到子序列的均值差绝对值 $d=|\bar{x}_2-\bar{x}_1|$ 、模方和 $s'=s_1+s_2$ 、模方比 $r=s_2/s_1$ 。这里的比较对象是均值 \bar{x}_1 、 \bar{x}_2 以及模方 s_1 、 s_2 。下面重点介绍分析中涉及的两类显著性检验方法。

1) t 检验、 F 检验

为分析均值 \bar{x}_1 、 \bar{x}_2 及模方 s_1 、 s_2 是否存在显著差异或是否发生显著变化,构造两个统计量 t 、 f :

a) 学生氏 t 变量

$$t = \frac{\sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} (\bar{x}_2 - \bar{x}_1)}{\sqrt{\frac{(s_1 + s_2)}{(n-2)}}} = 29.5d/\sqrt{s'} \quad (1)$$

其自由度为 $n-2$; t 变量用于 \bar{x}_1 、 \bar{x}_2 是否存在显著差异的检验。取信度 $\alpha=0.05$,查表可知, $t_{\alpha=0.05}(58)=2.002$ 。

b) f 变量

$$f = \frac{s_2/(n_2-1)}{s_1/(n_1-1)} = r \quad (2)$$

其分子、分母自由度均为 n_2-1 、 n_1-1 ; f 用于模方 s_1 、 s_2 是否存在显著差异的检验。信度 $\alpha=0.05$ 时查表可知 $f_{\alpha=0.05}(29, 29)=1.861$ 。

若样本序列来自正态无相关母体,则(1)式中的统计量服从自由度 $n-2=58$ 的 t 分布,(2)式中的统计量 f 服从分子、分母自由度分别为 n_2-1 、 n_1-1 的 F 分布。在给定信度 α 下,可确定其临界值 $t_{\alpha}(2n-2)$ 、 $f_{\alpha}(n_1-1, n_2-1)$,从而对序列 x_1 、 x_2 的均值 \bar{x}_1 、 \bar{x}_2 及其距平序列模方 s_1 、 s_2 是否存在显著差异做出判断。

2) 经验蒙特卡洛方法

蒙特卡洛(Monte Carlo)方法(简记为MC法), 又称随机模拟(Random Simulation)方法, 可用于对母体分布未知的样本序列的统计量作显著性检验(梁宗巨等 2001)。早在20世纪70年代, MC法便用于气象学中相关分析、EOF分析的显著性检验(Lund, 1970; Neumann et al., 1977; Barnett and Preisendorfer, 1978); 之后, MC法得到更广泛的应用(Livezey and Chen, 1983; Iwasaka and Wallace, 1995; Shen and Lau, 1995); 施能(1996)、施能和魏凤英(1997)首先在国内介绍了该方法在气象统计分析中的应用。在早期应用MC法的气象学文献中, 一般用随机数产生程序产生的随机数序列来模拟样本序列; 实际上, 此时的随机数序列仍然满足某种理想化的统计分布, 如正态分布。后来, Iwasaka and Wallace(1995)提出了将样本序列时序随机打乱的方式产生随机场序列。这种方式的优点是可保证样本的统计特征(分布、数字特征)不变, 使之尽可能地接近于母体。这里使用后一种方法相对于 t 检验、 F 检验等理论统计方法, 将之称为“经验蒙特卡洛(EMC)方法”。具体分析步骤如下:

a) 将序列 x 随机排序 L 次 (L 取 1 000 或更大), 得 x 的第 l 次随机模拟, 记为 $x_l = (x_{lj}, j=1 \dots 60)$;

b) 将 x_l 平分成长为 $n=30$ 的前后两个子序列 x_{l1}, x_{l2} ; 由此, 求出其均值 $\bar{x}_{l1}, \bar{x}_{l2}$ 和距平序列模方 s_{l1}, s_{l2} , 进而算出子序列的均值差绝对值 $d_l = |\bar{x}_{l2} - \bar{x}_{l1}|$ 、模方和 $s'_l = s_{l1} + s_{l2}$ 、模方比 $r_l = s_{l2}/s_{l1}$, 按 (1) 和 (2) 式求 x_l 的统计量

$$t_l = 29.5d_l / \sqrt{s'_l}, f_l = s_{l2}/s_{l1} = r_l \quad (3)$$

c) 将序列 $t_l, l=1 \dots L$ 和 $f_l, l=1 \dots L$ 作非升值排序, 得新序列(序数为 h)

$$t_h, h=1 \dots L, f_h, h=1 \dots L \quad (4)$$

对信度 α 得统计量 t, f 的临界值 $t_\alpha = t_{h_\alpha}, f_\alpha = f_{h_\alpha}, h_\alpha = \alpha L$ 。取 $\alpha = 0.05, L = 1\ 000$, 则有 $h_\alpha = 50, t_{0.05} = t_{50}, f_{0.05} = f_{50}$ 。

d) 若 x 的统计量 $t \geq t_\alpha$ ($t \leq -t_\alpha$), 则判断 \bar{x}_2 显著大于(小于) \bar{x}_1 ; 若 $f \geq f_\alpha$ ($f \leq 1/f_\alpha$), 则判断 s_2 显著大于(小于) s_1 ; 否则 \bar{x}_2, s_2 较 \bar{x}_1, s_1 无显著增大。

关于 EMC 法检验中随机排序次数 L 的取值, 涉及样本容量 n 及要检验的统计量。实际计算表明, 只要随机模拟方法合理, 取 $L \geq 10^3$ 做 EMC 法显著性检验, 就可以得到可靠的结果(王蕊等, 2009; 谢瑶瑶等, 2011)。

2 气温前、后 30 a 气候变化特征及其显著性检验

对中国 1951—2010 年 160 站季气温的前、后 30 a 均值(即气候值)和模方(即气候变率)的变化情况分别进行分析。

对均值而言, 中国气温气候变化总体与全球增暖的趋势保持一致。冬季全国 160 站温度变幅的算术平均值为 $1.05\text{ }^\circ\text{C}$, 在所有 160 个台站中仅有 7 个台站表现为降温 ($d < 0$), 且降幅均非常小, 最大降幅仅为 $0.25\text{ }^\circ\text{C}$, 统计不显著, 这些台站主要位于云南、贵州、四川和广西地区; 其余台站均表现为升温 ($d > 0$), 其中我国三北地区的增温最为明显, 有三个增温中心分别位于东北、华北和西北地区(图 1a), 最大升幅达 $2.77\text{ }^\circ\text{C}$ (黑龙江呼玛站)。从变化的显著性来看, 用两种检验方法(信度均为 0.05)得到的显著变化台站数与总台站数之比(以下简称占比)均非常高, 其中通过 t 检验的台站共 118 个, 占比 73.8%, 通过 EMC 检验的台站共 115 个, 占比 71.9%(表 1), 可见两种检验方法得到的结果差别不大, 这也从一个侧面说明多数站点的冬季气温是服从正态分布的。与冬季相比, 夏季气温升高的幅度相对较低(全国 160 站温度变幅的算术平均值为 $0.29\text{ }^\circ\text{C}$), 一致性也相对较弱(图 1b), 与丁一汇和王会军(2016)给出的结论基本一致, 发生显著增暖的地区主要集中在东北、华北、西南和华南地区, 最大增幅为 $1.47\text{ }^\circ\text{C}$ (云南德钦站), 明显小于冬季; 同时, 与全球增暖的大趋势相反, 还在秦岭以南及长江中游地区出现了大片显著变冷的区域, 温度最大降幅达 $1.16\text{ }^\circ\text{C}$ (湖北郧县站), 这与任国玉等(2005a, 2005b)、王遵娅等(2004)以及翟盘茂和邹旭恺(2005)采用不用方法得到的结果一致。与这些研究结果不同的是, 我们的检验结果表明, 这个区域的降温是显著的。根据 Ren et al.(2012)的研究, 其成因可能与这些地区气溶胶浓度和云量的增加有关。从显著性检验的统计结果看, 夏季气温通过 t 检验的台站共 84 个, 其中升温 75 个(占比 46.9%), 降温 9 个(占比 5.6%), 通过 EMC 法检验的台站共计 85 个, 其中升温 76 个(占比 47.5%), 降温 9 个(占比 5.6%), 两种检验方法的差异同样不明显。

与季气温的气候变化相比, 前、后 30 a 气候变率(模方)的变化要小得多。总体而言, 可认为冬季气候变率的变化(图 2a)并不显著, 通过 EMC 法检验的台站仅有 7 个, 其中 4 个变率显著增大, 3 个变

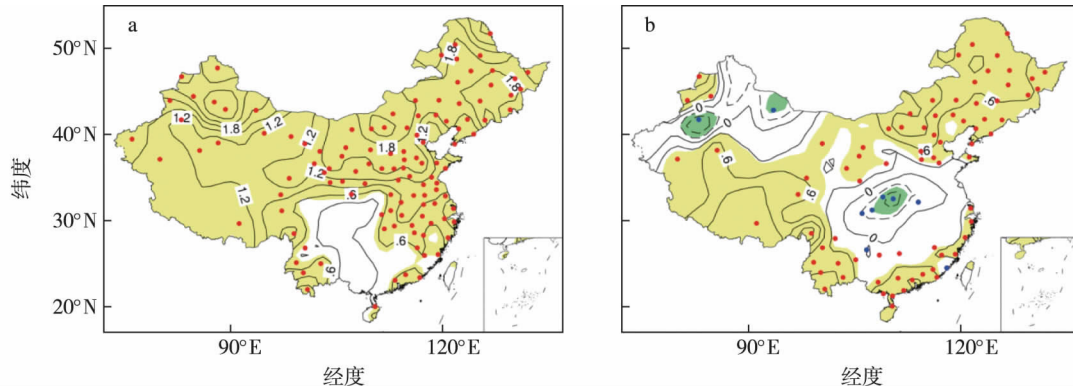


图1 1951—2010年冬季(a)、夏季(b)中国160站气温前、后30a均值的差值分布(等值线为后30a均值减去前30a均值的差值,单位:℃;黄色(绿色)区域表示通过0.05信度的 t 检验,红色(蓝色)圆点表示通过0.05信度的EMC检验)

Fig.1 Difference distribution of mean temperature at 160 stations in China in (a) winter and (b) summer between the former and later 30 years from 1951 to 2010 (The isoline is the difference of the later-30-year-averaged temperature minus the former-30-year-averaged temperature with the unit of $^{\circ}\text{C}$; The yellow (green) areas indicate the regions passing t -test at 0.05 significance level; The red (blue) dots indicate the stations passing the EMC test at 0.05 significance level)

表1 1951—2010年中国160站前、后30a季气温的均值和模方发生显著变化的站数

Table 1 The number of stations with significant changes in the mean and squared variance of seasonal temperature at 160 stations in China between the former and later 30 years from 1951 to 2010

季节	检验方法	均值			模方		
		$\bar{x}_2 \gg \bar{x}_1$	$\bar{x}_1 \gg \bar{x}_2$	重合站	$s_2 \gg s_1$	$s_1 \gg s_2$	重合站
冬季	t 检验或 F 检验	118	0		7	11	
	EMC 法	115	0	115/0	4	3	3/3
夏季	t 检验或 F 检验	75	9		32	6	
	EMC 法	76	9	75/9	18	2	18/2

注:重合站指的是用两种检验方法得到的显著变化站点中重合的站数,斜线左(右)侧为后30a显著大于(小于)前30a的站数。

率显著减小(表1),且从图2a可以看出这些台站的分布并不集中。相对而言,通过 F 检验的台站较多,达到18个(其中变率显著增大台站7个,显著减小台站11个),主要位于青藏高原东南部、新疆南部和内蒙古中部区域。根据相关研究(Livezey and Chen, 1983; Lu et al., 2009),当信度为0.05时,通过随机模拟显著性检验方法的站点总数必须大于或等于13时,通过显著性检验的测站所采用的样本母体才可认为是服从正态分布的。这里根据EMC法的检验结果(7站通过显著性检验),冬季气温是不满足正态分布的。此外还可以看出,通过 F 检验和EMC法检验台站差异较大,统计表明仅有6个台站在两种检验方法下均是显著的(表1),根据1.2节的讨论,这也从另一个侧面印证了上述冬季气温正态分布特征的结论,反过来也说明在这种情况下使用 F 检验方法得到的结果很可能是不可靠的。结合前面的气候值差异分析结果可以看出,整体而言

我国冬季气温平均值增加,但气候变率变化不大。夏季的气温变率相对于冬季整体增大,前、后30a的差异也更为明显,以变率增大为主,增幅大值区位于东北大部、华北西北部,以及青藏高原地区,呈东北-西南走向,其两侧区域的增幅相对较小(图2b)。与冬季相同,夏季气温的气候变率增幅最大的是西藏拉萨站,模方比 r 达到了4.08。夏季气温变率差异通过 F 检验的站数共有38个(占比23.8%),其中32个显著增大,6个显著减小;通过EMC法检验的站数共有20个(占比12.5%),其中18个显著增大,2个显著减小,分别为新疆乌鲁木齐站(模方比为0.22)和贵州兴仁站(模方比为0.42)。结合夏季气温气候值的变化可知,在我国东北、华北区域主要表现为气温平均值增高的同时,还伴随着年际振荡增大,而在秦岭以南及长江中游地区,以及新疆地区,则出现了气温平均值降低,变率减小的情况。

就两种显著性检验的结果而言,由于中国160

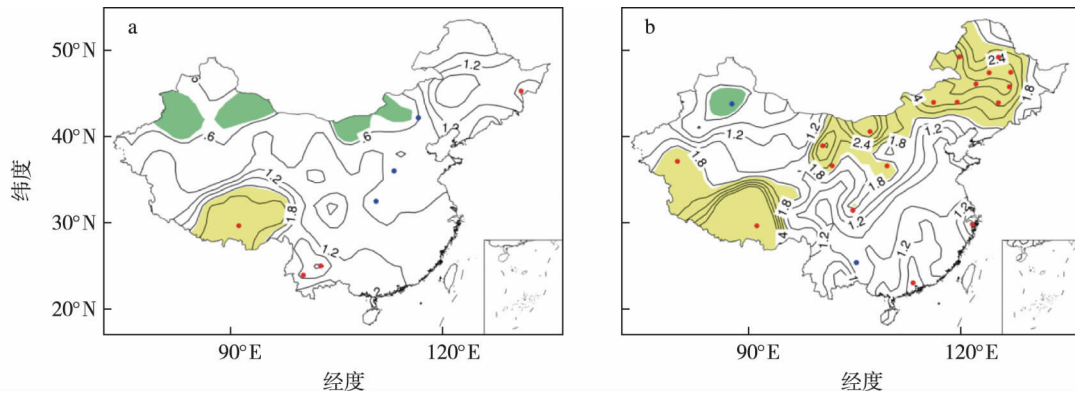


图2 1951—2010年冬季(a)、夏季(b)中国160站气温前、后30a模方的比值分布(等值线为后30a模方与前30a模方的比值;黄色(绿色)区域表示通过0.05信度的F检验,红色(蓝色)圆点表示通过0.05信度的EMC检验)
 Fig.2 Ratio distribution of squared temperature variance at 160 stations in China in (a) winter and (b) summer between the former and later 30 years from 1951 to 2010 (The isoline is the ratio of the later-30-year squared variance to the former-30-year squared variance; The yellow (green) areas indicate the regions passing F-test at 0.05 significance level; The red (blue) dots indicate the stations passing the EMC test at 0.05 significance level)

站季气温样本距平序列服从正态分布的站数占比非常高(谢瑶瑶等,2011),所以在进行显著性检验时采用理论检验方法得到的结果与采用EMC法得到的结果差别甚小,特别对均值的检验。对模方的检验结果差别相对较大,冬季气温模方通过EMC检验的台站数不超过13个,说明样本中不服从正态分布的部分台站(约10%)数据可能对结果有所影响;夏季EMC法检验结果均包含于F检验结果中(表1)。另外需要注意的是,图1、图2中均出现了t检验、F检验结果(阴影)与EMC法检验结果(圆点)的重合情况与表1的统计数据不一致的情况,这是由于使用台站数据绘图时使用插值函数造成的。

3 降水前、后30a气候变化特征及其显著性检验

接下来分别分析中国1951—2010年160站季降水前、后30a间的气候值(总降水量)和气候变率(方差)的差异状况。

与气温不同,前、后30a间的我国冬季降水总量的变化局域性特征更为显著,主要表现为秦岭—淮河以南的东部地区,以及新疆西北部的降水增加,东北与华北交界地区,以及川藏滇交界地区的降水减少(图3a),全国160站降水总量变幅的算术平均值为5.34mm,最大增幅约为33mm(广西梧州站)。进一步考虑这些差异的显著性可知,共有10个台站(占比6.25%)通过t检验,9个台站(占比5.62%)通过EMC法检验(表2)。EMC法检验得到的两个降水总量显著降低的台站(天津站、内蒙古多伦站)

均位于东北与华北交界区域,尽管这个区域的季降水总量降幅并不大(约4.5mm),但由于降水总量偏小,所以依然表现出显著的降水总量下降特征。同样的,由于通过随机模拟显著性检验方法的站点总数小于13,所以冬季降水是不满足正态分布的,基于正态分布的t检验结果是不可靠的。相对于冬季,夏季降水的局域性更为显著,尽管降水总量变幅的算术平均值相对较低(3.36mm),但不同区域的差别却更加明显,这也与夏季降水时空变化较大的特征一致。降水变化幅度较大的区域主要位于除东北以外的我国东部地区(图3b),表现出了20世纪70年代末以来降水异常“南涝北旱”转型的特征(王遵娅,2007),其中增幅最大的区域位于广东、福建沿海地区(大于100mm,但未通过显著性检验),以及江浙沪沿海地区(约为90mm,通过显著性检验);降幅最大的区域则位于环渤海地区(大于100mm)。从显著性检验结果(表2)来看,两种方法得到的结果差别并不明显。

图4给出了冬季和夏季的降水量气候变率的变化情况,可见,冬季降水变率增大的区域主要位于华南地区、内蒙古中部、新疆西北部以及青藏高原东部(图4a),结合总降水量的变化情况,可以看出后30a华南地区 and 新疆西北部地区的冬季降水量不仅总量增大,而且年际变率也有增大的趋势;广东榕江站的降水总量差异和变率差异同时通过了信度为0.05的EMC法检验。冬季降水变率显著减少的区域主要位于东北地区中部,另外新疆吐鲁番站的冬季降水变率也是显著减小的。两种检验方法得到的

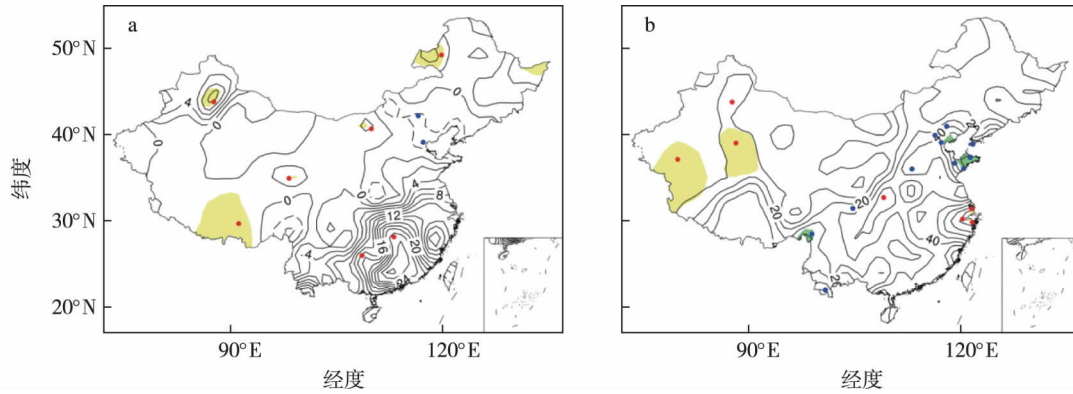


图3 1951—2010年冬季(a)、夏季(b)中国160站降水前、后30a总量的差值分布(等值线为后30a均值减去前30a均值的差值,单位:mm;黄色(绿色)区域表示通过0.05信度的 t 检验,红色(蓝色)圆点表示通过0.05信度的EMC检验)

Fig.3 Difference distribution of total precipitation at 160 stations in China in (a) winter and (b) summer between the former and later 30 years from 1951 to 2010 (The isoline is the difference of the later-30-year-averaged total precipitation minus the former-30-year-averaged total precipitation with the unit of mm; The yellow (green) areas indicate the regions passing t -test at 0.05 significance level; The red (blue) dots indicate the stations passing the EMC test at 0.05 significance level)

表2 1951—2010年中国160站前、后30a季降水总量和模方发生显著变化的站数

Table 2 The number of stations with significant changes in the mean and squared variance of seasonal total precipitation at 160 stations in China between the former and later 30 years from 1951 to 2010

季节	检验方法	总量			模方		
		$\bar{x}_2 \gg \bar{x}_1$	$\bar{x}_1 \gg \bar{x}_2$	重合站	$s_2 \gg s_1$	$s_1 \gg s_2$	重合站
冬季	t 检验或 F 检验	8	2		40	12	
	EMC法	7	2	7/1	13	5	13/5
夏季	t 检验或 F 检验	6	10		13	15	
	EMC法	7	11	6/10	9	2	8/1

注:重合站指的是用两种检验方法得到的显著变化站点中重合的站数,斜线左侧为后30a显著大于前30a站数,右侧为后30a显著小于前30a站数。

显著变化台站数有明显差别,共有52站通过 F 检验(占比32.5%),仅有18站通过EMC法检验(占比11.3%),但通过EMC法检验的18个台站均包含在 F 检验结果(表2)中。夏季降水变率的变化相对弱于冬季,仍以增大为主,显著增大的区域主要位于华南地区南部、东北地区西北部以及新疆南部,降水模方比最大的台站是新疆若羌站,比值 r 达到了11.92;显著减小的区域(台站)主要位于河套西部地区。从模方比的季节差异看,冬夏季降水变率变化的基本不重合,仅有东北西北部的若干区域存在冬夏季降水变率均增大的情况,特别是内蒙古海拉尔站冬季和夏季的降水气候变率均显著增大。不同于冬季,夏季降水总量显著变化的区域基本不与降水变率显著变化的区域重合。两种检验方法在夏季得到的结果同样差别明显,通过 F 检验的台站共28个

(占比17.5%)通过仅有11站通过EMC法检验(占比6.9%),但其中只有9个台站的结果重合(表2)。

对于两种显著性检验方法在降水分析结果显著性检验中的表现,由于季降水总量样本距平序列服从正态分布的站数占比在夏季不足50%,冬季仅为26%(谢瑶瑶等,2011),所以 t 检验、 F 检验等理论检验方法并不适用,由表1可以看出,两种方法对季降水总量的检验结果差别不大,但对降水变率的检验结果有明显差异。但如果从重合站统计结果来看,两种方法得到的结果之间差别还是比较明显的,这一点也可以从图3、图4的显著变化站点分布可以看出。

4 结论与讨论

利用中国160站60a(1951—2010年)冬、夏两

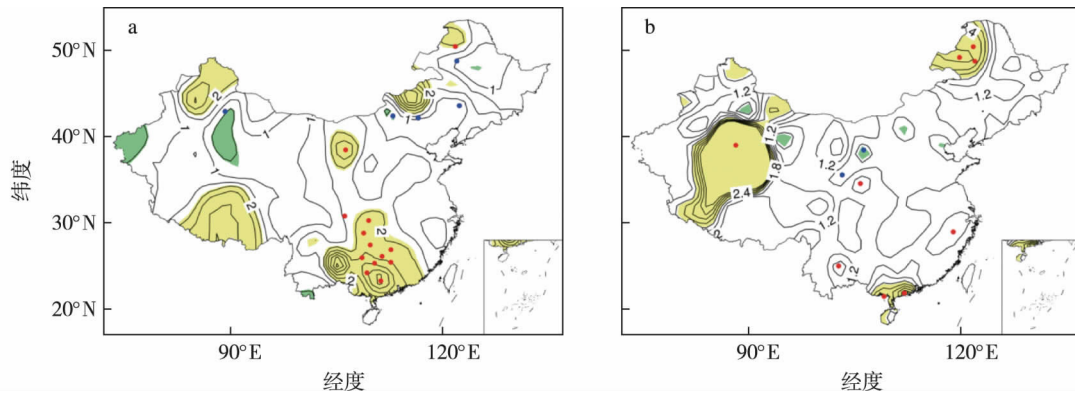


图4 1951—2010年冬季(a)、夏季(b)中国160站降水前、后30a模方的比值分布(等值线为后30a模方与前30a模方的比值;黄色(绿色)区域表示通过0.05信度的F检验,红色(蓝色)圆点表示通过0.05信度的EMC检验)
 Fig.4 Ratio distribution of squared total precipitation variance at 160 stations in China in (a) winter and (b) summer between the former and later 30 years from 1951 to 2010 (The isoline is the ratio of the later-30-year squared variance to the former-30-year squared variance; The yellow (green) areas indicate the regions passing F-test at 0.05 significance level; The red (blue) dots indicate the stations passing the EMC test at 0.05 significance level)

季平均气温和总降水量资料,分析了前、后30a各站季平均气温和季总降水量的气候值、气候变率的变化,并讨论了两种不同显著性检验方法对分析结果的影响。得到如下结论:

1) 中国台站季平均气温气候平均值的变化总体与全球增暖一致,相对来说冬季的一致性更强。冬季前、后30a气候值在全国范围内基本均表现为升温,其中发生显著变化的台站共115个;夏季共有85个台站温度发生显著变化,其中显著升温的有76个(以上均基于EMC法检验结果),秦岭以南及长江中游地区有显著的局部变冷。季气温气候变率的变化相对较小,冬季的变化总体不显著,夏季共有18个台站的变率显著增大,主要出现在东北、华北区域。

2) 中国台站季降水前、后30a气候值的变化总体表现空间分布复杂,冬季南方地区、夏季东部地区总体增加,具有“南涝北旱”的异常特征;气候变率的变化总体不显著,特别是夏季。统计结果表明,气候值和气候变率发生显著变化的站数均在20站以下,占比均小于12%(基于EMC法检验结果),明显小于季气温,所以总体而言冬、夏季降水的气候变化均不明显。

3) 从理论检验方法(*t*检验、*F*检验)与随机模拟方法(EMC法)对分析结果的显著性检验来看,相对来说两者对气温的显著性检验结果差别较小,这与季气温样本距平序列服从正态分布的站数占比高有直接关系。反之,当分析对象的统计分布严重偏离理论分布(如降水)时,应当谨慎选择适当的显著性检验方法,这样才能确保结果的可靠性。EMC法的优势在于无需考虑样本统计分布特征是否接近理论统计分布,可利用多次随机模拟的方式,保证样本统计特征不变,保证其尽可能地接近于母体,从而使检验结果更为可靠。

需要指出的是,本文研究所使用的中国160站逐月气温和降水资料未经过均一化处理,可能存在因观测台站迁移、观测仪器和观测高度变更等因素导致的误差,因此本文所揭示的显著气候变化信号可能会受到资料非均一性的影响。此外,台站数量较少,空间分布不均(特别是西部地区),可能也会对结果的可靠性产生不利影响。未来,可使用台站数量更多,观测时间更长,经过均一化处理的高质量观测资料对这一问题进行更为深入全面的验证和分析。

参考文献(References)

Barnes E, Anderson C, Ebert-Uphoff I. 2018. An AI approach to determining the time of emergence of climate change [M] // Proceeding of the 8th International Workshop on Climate Informatics: CI 2018: 19-22.
 Barnett T P, Preisendorfer R W. 1978. Multifield analog prediction of short-term climate fluctuations using a climate state vector [J]. *J Atmos Sci*, 35 (10): 1771-1787.
 Day J A, Fung I, Liu W H. 2018. Changing character of rainfall in Eastern China, 1951—2007 [J]. *PNAS*, 115(9): 2016-2021.
 《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]. 2版. 北京: 科学出版社. Editorial Board of “the Third

- National Climate Change Assessment Report” 2015. Third National Climate Change Assessment Report [M]. 2nd Ed. Beijing: Science Press. (in Chinese).
- 丁一汇, 王会军, 2016. 近百年中国气候变化科学问题的新认识 [J]. 科学通报, 61(10): 1027-1041. Ding Y H, Wang H J, 2016. Newly acquired knowledge on the scientific issues related to climate change over the recent 100 years in China [J]. Chin Sci Bull, 61(10): 1027-1041. (in Chinese).
- Hegerl G C, Karl T R, Allen M, et al., 2006. Climate change detection and attribution: beyond mean temperature signals [J]. J Climate, 19(20): 5058-5077.
- 黄建平, 陈文, 温之平, 等, 2019. 新中国成立 70 年以来的中国大气科学研究: 气候与气候变化篇 [J]. 中国科学(地球科学), 49(10): 1607-1640. Huang J P, Chen W, Wen Z P, et al., 2019. Review of Chinese atmospheric science research over the past 70 years: climate and climate change [J]. Sci Sin Terrae, 49(10): 1607-1640. (in Chinese).
- IPCC, 2013. Climate change 2013: the physical science basis [R]. // Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press: 1535.
- Iwasaka N, Wallace J M, 1995. Large scale air sea interaction in the Northern Hemisphere from a view point of variations of surface heat flux by SVD analysis [J]. J Meteor Soc Japan, 73(4): 781-794.
- 梁宗巨, 王青建, 沈宏安, 2001. 世界数学通史(下) [M]. 沈阳: 辽宁教育出版社. Liang Z, Q Wang Q, Shen H, 2001. World general history of mathematics(2) [M]. Shenyang: Liaoning Education Press. (in Chinese).
- Liu B H, 2005. Observed trends of precipitation amount, frequency, and intensity in China, 1960—2000 [J]. J Geophys Res, 110(D8): D08103.
- Livezey R E, Chen W, 1983. Statistical field significance and its determination by Monte Carlo techniques [J]. Mon Wea Rev, 111(1): 46-59.
- Lu C H, Guan Z Y, Wang P X, et al., 2009. Detecting the relationship between summer rainfall anomalies in eastern China and the SSTA in the global domain with a new significance test method [J]. J Ocean Univ China, 8(1): 15-22.
- Lund I A, 1970. A Monte Carlo method for testing the statistical significance of a regression equation [J]. J Appl Meteor, 9(3): 330-332.
- Mitchell J, Karoly D, Hegerl G, et al., 2001. Detection of climate change and attribution of causes [M]. // Houghton J, Ding Y, Griggs D, Climate change 2001: the scientific basis. Cambridge: Cambridge University Press: 695-738.
- Neumann C J, Lawrence M B, Caso E L, 1977. Monte Carlo significance testing as applied to statistical tropical cyclone prediction models [J]. J Appl Meteor, 16(11): 1165-1174.
- 任国玉, 徐铭志, 初子莹, 等, 2005a. 近 54 年中国地面气温变化 [J]. 气候与环境研究, 10(4): 717-727. Ren G, Xu M, Chu Z, et al., 2005a. Changes of surface air temperature in China during 1951—2004 [J]. Climatic and Environmental Research, 10(4): 717-727. (in Chinese).
- 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等, 2005b. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. 气象学报, 63(6): 942-956. Ren G, Guo J, Xu M, et al., 2005b. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. Acta Meteorologica Sinica, 63(6): 942-956. (in Chinese).
- Ren G Y, Ding Y H, Zhao Z C, et al., 2012. Recent progress in studies of climate change in China [J]. Adv Atmos Sci, 29(5): 958-977.
- Ren G Y, Ding Y H, Tang G L, 2017. An overview of mainland China temperature change research [J]. J Meteor Res, 31(1): 3-16.
- Shen S, Lau K M, 1995. Biennial oscillation associated with the East Asian summer monsoon and tropical sea surface temperatures [J]. J Meteor Soc Japan, 73(1): 105-124.
- 施能, 1996. 气候诊断研究中 SVD 显著性检验的方法 [J]. 气象科技, 24(4): 5-6. Shi N, 1996. Significance test method of SVD in climate diagnosis research [J]. Meteor Sci Technol, 24(4): 5-6. (in Chinese).
- 施能, 陈辉, 1988. 论我国季、月降水量的正态性和正态化 [J]. 气象, 14(3): 9-13. Shi N, Chen H, 1988. On normality and normalization of monthly and seasonal precipitation in China [J]. Meteorology, 14(3): 9-13. (in Chinese).
- 施能, 魏风英, 1997. 气象场相关分析及合成分析中蒙特卡洛检验方法及应用 [J]. 南京气象学院学报, 20(3): 355-359. Shi N, Wei F Y, 1997. Monte Carlo test used in correlation and composite analysis of meteorological fields [J]. J Nanjing Inst Meteor, 20(3): 355-359. (in Chinese).
- 施晓晖, 徐祥德, 2008. 1951—2002 年全球陆地气温和降水的年代际趋势转折特征 [J]. 自然科学进展, 18(9): 1016-1026. Shi X, Xu X, 2008. The inter-decadal trend characteristics of the global land temperature and precipitation during 1951—2002 [J]. Progress in Natural Science, 18(9): 1016-1026. (in Chinese).
- Sippel S, Meinshausen N, Fischer E M, et al., 2020. Climate change now detectable from any single day of weather at global scale [J]. Nat Clim Chang, 10(1): 35-41.
- 王蕊, 王盘兴, 吴洪宝, 等, 2009. 小波功率谱 Monte Carlo 显著性检验的一个简易方案 [J]. 南京气象学院学报, 32(1): 140-144. Wang R, Wang P X, Wu H B, et al., 2009. A simple scheme of Monte Carlo significance test for wavelet power spectrum [J]. J Nanjing Inst Meteor, 32(1): 140-144. (in Chinese).
- 王遵娅, 2007. 中国夏季降水的气候变率及其可能机制研究 [D]. 北京: 中国科学院. Wang Z, 2007. Climate variability of summer rainfalls in China and the possible mechanism [D]. Beijing: Chinese Academy of Science. (in Chinese).
- 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等, 2004. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. 气象学报, 62(2): 228-236. Wang Z Y, Ding Y H, He J H, et al., 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [J]. Acta Meteorol Sin, 62(2): 228-236. (in Chinese).
- 谢瑶瑶, 李丽平, 王盘兴, 等, 2011. 中国气温和降水序列年代际分量的显著性检验 [J]. 大气科学学报, 34(4): 467-475. Xie Y Y, Li L P, Wang P

- X et al. 2011. Significance test on interdecadal components of temperature and rainfall series in China [J]. *Trans Atmos Sci* ,34(4) : 467-475. (in Chinese) .
- 翟盘茂, 邹旭恺. 2005. 1951—2003年中国气温和降水变化及其对干旱的影响 [J]. *气候变化研究进展* ,1(1) : 16-18. Zhai P M ,Zou X K. 2005. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951—2003 [J]. *Progressus Inquisitiones De Mutat Clim* ,1(1) : 16-18. (in Chinese) .
- 翟盘茂, 李蕾. 2014. IPCC第五次评估报告反映的大气和地表的观测变化 [J]. *气候变化研究进展* ,10(1) : 20-24. Zhai P M ,Li L. 2014. Observed atmosphere and surface climate changes in the IPCC fifth assessment report [J]. *Progressus Inquisitiones De Mutat Clim* ,10(1) : 20-24. (in Chinese) .

Climate change characteristics and significance tests of temperature and precipitation of China weather stations in winter and summer

DUAN Mingkeng ,LI Xin ,WANG Panxing

Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD) /Key Laboratory of Meteorological Disaster , Ministry of Education (KLME) /Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC) ,Nanjing University of Information Science & Technology ,Nanjing 210044 ,China

Based on the temperature and precipitation data of 160 stations in China from 1951 to 2010 ,this paper analyzed the climate average and climate variability of temperature and precipitation in winter and summer at the representative stations in China ,as well as their differences between the former and later 30 years. Furthermore ,the differences are tested by two different types of significance test methods. Results show that the change of climate average of seasonal temperature is generally consistent with the global warming ,mainly warming up ,but a significant local cooling phenomenon occurs in the south of Qinling Mountains and the middle reaches of the Yangtze River in summer. The change of climate variability of seasonal temperature is relatively small ,and the overall change in winter is not significant ,and only a few stations change significantly in summer. The climate change of seasonal total precipitation is not obvious on the whole. The spatial distribution of seasonal precipitation climate value changes is complex ,and it increases in southern China in winter and eastern China in summer ,while the changes of climate variability of winter and summer precipitation are not significant. For the differences of significance test results between the theoretical test method (t -test and F -test) and the stochastic simulation method (EMC (empirical Monte Carlo) method) ,they are small for the temperature and relatively large for the precipitation ,which is related to whether the sample anomaly series obeys the normal distribution. Under the condition that the statistical characteristics of the samples remain unchanged ,the EMC method can make the test results more reliable by multiple random simulations without considering the theoretical statistical distribution characteristics of the samples.

air temperature; precipitation; climate change; significance test; empirical Monte Carlo method

doi: 10. 13878/j.cnki.dqkxxb.20200220001

(责任编辑: 张福颖)