

东北地区近百年气候变化及突变检测

孙风华¹ 袁健¹ 路爽²

1 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110016

2 沈阳市气象局, 沈阳 110016

摘要 利用沈阳、大连、营口、长春、哈尔滨、黑河 6 个代表站 1905~2001 年的月平均气温和月降水观测数据, 建立了东北地区近百年来季、年的气温和降水序列。对所建温度和降水序列分别与同一区域内 26 个代表站的温度序列和 51 个代表站的降水序列近 40 年同期资料做了相关分析, 检验了序列的代表性。在所建序列的基础上, 分析了东北地区百年气温的年代、年和季节等不同时间尺度的变化特点和地域分布特征, 以及百年降水量的变化规律, 采用谱分析方法探讨了序列的周期性变化特征, 并采用 Mann-Kendall 和 Yamamoto 方法对经过滑动平均的气温和降水序列进行了突变分析。

关键词 东北地区 气候特征 周期变化 突变检测

文章编号 1006-9585 (2006) 01-0101-08 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

The Change and Test of Climate in Northeast China over the Last 100 Years

SUN Feng-Hua¹, YUAN Jian¹, and LU Shuang²

1 *Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110016*

2 *Shenyang Meteorological Bureau, Shenyang 110016*

Abstract The air temperature and precipitation data used by this paper come from six weather stations in Northeast China from 1905 to 2001. These stations all have temperature and precipitation observation about 100 years, they are Shenyang, Dalian, Yingkou, Changchun, Harbin and Heihe. The temperature time series in the area are represented by the average temperature of the six station during 1905—2001. For checking up its representation, correlativity between the average of six stations and the average of twenty six stations was made in this area. The correlative coefficient is very high. The temperature and precipitation time series were applied to analyse the yearly and seasonally climate change in the area. using the method of spectrum analyse, the characteristic of seasonal change of this series was discussed. The connection between the temperature change in Northeast China and the temperature increase of the other area was studied. The climate jumps of annual temperature and precipitation series were tested using Mann-Kendall and Yamamoto methods during the last 100 years in Northeast China.

Key words Northeast China, climate characteristic, periodicity change, jump test

1 引言

近百年来, 全球气候变暖并日趋加剧已成为

公认的事实, 但在总的变暖趋势中却有起有伏, 有渐变和突变, 且气候变化的区域性和季节性差异显著^[1]。气候变暖将对植被的生长和分布产生

收稿日期 2004-02-12 收到, 2005-02-18 收到修定稿

资助项目 科技部公益类专项“气候变暖对东北极端气候事件影响”项目

作者简介 孙风华, 女, 1963 年出生, 学士, 副研究员, 主要从事区域气候变化研究。E-mail: sfh3910839@sina.com

直接影响;反之,植被也影响气候变化,两者相互作用,关系密切。全球气候变暖将对区域性气候格局产生重大影响。各区域变暖的速率和时空分布虽有很大差异,但总的说来,变暖趋势具有北方较南方明显,冬季较其他季节明显的特点。东北地区处于北半球的中高纬度,也是我国纬度最高的地区,冬季气候寒冷漫长,是我国气候变化最明显的区域。东北地区气候变化即受到全球气候变暖的影响,又具有地域性特点,因此对该区域气候变化进行研究,其结果具有很强的代表性。

由于气候变化与人类活动和生产密切相关,因此对其变化及可预报性的研究是全球关注的热点。近百年来的气候变化更是人们关注的焦点,其主要原因有两个:一是近百年来人类活动对环境造成了严重的破坏,使得气候变暖的趋势更为严峻,由此给人类带来了极端的气象灾害;二是20世纪初陆续有了一些仪器观测记录,其定量研究结果更为可信,使得人们能正确的认识气候变化规律,探索更好的预测预报方法。本文利用尽可能多的仪器观测记录,对东北区域的气候变化进行较为全面的分析,以便更清楚地了解东北地区近百年来的气候变化事实。主要内容包括气温、降水的年和季节百年变化规律,区域性变化特点分析,变化周期及气候突变检测等。

本文以东北地区6个代表站1905~2001年近百年的月、年平均气温和降水量资料为基础,建立了季、年气候变化序列,采用一元回归分析方法分析了东北地区近百年的气候变化趋势,以及气候变化的季、年际、年代际的变化特点。结果表明:东北地区的气温变化有其本身特点,百年增温趋势明显,但增温过程有强有弱,各季增温幅度也不相同,冬季增温较为明显,夏季基本持平,若不考虑近几年较强的增温,总体还有下降的趋势。

2 资料选取及插补订正

东北地区具有较为密集的气象观测网,但大多数观测站是建国以后建立的,有近百年气象观测记录的站点为数不多。本文所用数据为本区域具有近百年观测历史且具代表性的6个气象站的

气温和降水观测记录,其分别为沈阳、大连、营口、长春、哈尔滨和黑河(均在20世纪初开始有气象观测)。据调查,6个站均有迁站记录,但位置变化不大,因此只对资料序列做了海拔高度订正,以观测资料最长段观测场所处位置的海拔高度为准,订正值取 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ 。对于40年代普遍缺失数据采用自回归方法重建。应用订正后的6站月平均气温和降水数据,对东北地区近百年的基本气候变化事实和演变规律进行分析。

3 年代、年和季节的变化规律

3.1 序列的建立和代表性检验

分别以其上6个气象站1905~2001年的年平均气温和降水量代表本区的气候变化序列。类似的,分别以春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)和冬季(12~2月)的6站平均值建立该区域的各季气候变化序列。由于站点较少,首先对其代表性做检验:选取时段长达40年均均匀分布在东北区域内的26个代表测站的年平均温度序列,与6站相应时段的温度序列进行了相关分析。图1a为两个年平均温度序列的变化曲线,可以看出,两者的40年平均温度值相差较大,26站平均值为 $3.87\text{ }^{\circ}\text{C}$,6站平均值为 $5.92\text{ }^{\circ}\text{C}$,相差 $2.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。两者平均温度的差值虽然很大,但只是有一个固定的差值,并不影响增温趋势变化的一致性,两者距平变化曲线基本吻合(图略),两温度序列相关系数达0.985,证明有很好的代表性。基于降水的空间不均匀性要比温度大很多,增加了降水的对比站点数。在区域内选择均匀分布的51个站点的平均降水序列进行对比,同一时段40年的6站和51站降水序列变化见图1b。两序列的差异要比温度的大,但相关系数也达到了0.892,代表性也较好。据以上分析,6站温度和降水变化代表性都很好,以其为代表研究该区域气温和降水变化的总体特征和趋势是完全可行的。

3.2 气温变化

图2a~c分别为东北地区1905~2001年夏季、冬季和年的平均气温变化。从年序列曲线来看,东北地区百年升温趋势十分明显,进入20世纪80年代以后升温最为剧烈。就20世纪而言,

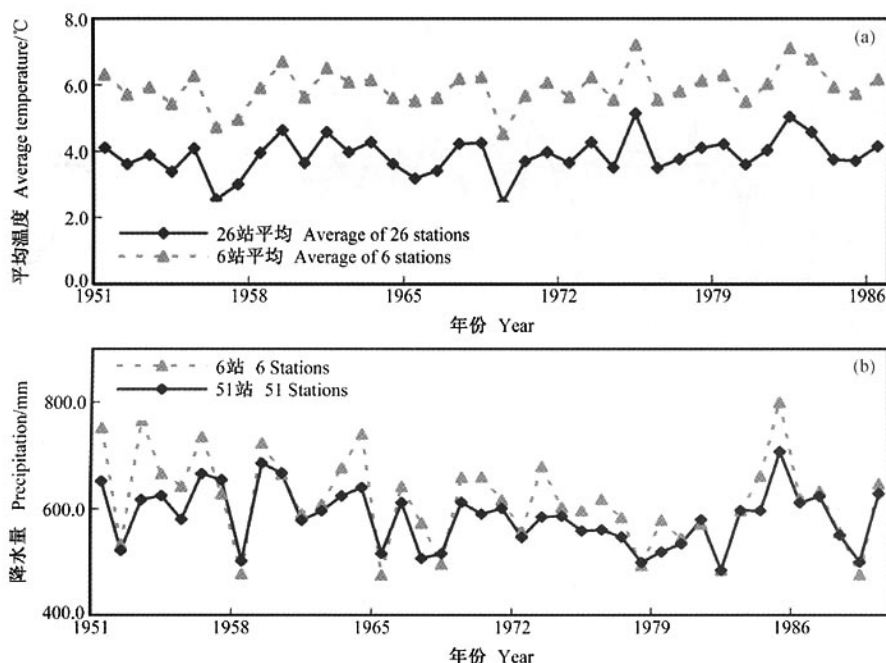


图1 26站和6站平均温度(a)、51站和6站降水(b)序列的对比

Fig. 1 The contrast of temperature (a) and precipitation (b) between 6 stations and 26 stations

升温为起伏式上升：世纪初为最冷期，随后一直到40年代为持续升温期，且达到并超过了平均水平；50年代左右为次高峰期，相对高温持续到50年代中期；以后气温开始逐渐下降，50年代中期至70年代中期为一相对冷期，气温处于平均线以下；70年代中期开始升温，近20年来东北地区升温剧烈，80年代气温达到平均线，80年代中期就已超过第一峰值，目前已远远高出第一峰值。

冬季也呈明显的升温趋势，但基本为持续性升温，没出现相对冷期和相对暖期。冬季气温近20年升温趋势十分明显，与年变化较为一致。夏季气温变化与年和冬季气温变化截然不同，后半世纪与前半世纪相比，不仅没有升温，反而表现为降温趋势。20世纪20年代初到60年代初为夏季高温期，气温均在平均线以上；60年代初至90年代中期为夏季低温期，气温均在平均线以下；但90年代中期以来，也表现为剧烈升温趋势。春季和秋季气温变化趋势（图略）与冬季气温变化趋势较为相似，但升温幅度要小得多。

表1为每隔10年分段的平均气温距平（最后7年为一时间段），可以定量看出百年气温的变化

规律：在70年代中期以前基本为负距平，以后至今为正距平，且逐步升高，升幅越来越大，1995~2001年距平已达到 $+1.09^{\circ}\text{C}$ 。温度序列随年代呈明显的2波2谷分布：最冷期为世纪初10年，次冷期为1945~1975年间；最暖期为世纪末，次暖期在1935~1944年间。随着时间推移，暖期和冷期的气温都大幅度上升。因此，气温是起伏式上升的。

利用功率谱分析方法分析了东北百年温度序列的周期性变化特征。序列是一明显的红噪声过程。取样本长度 $N=97$ ，最大落后步长 $m=18$ ，得出主周期有两个：2.3年（准两年振荡）和4.2年。两者以准2年周期振荡更为明显，超过了95%的显著水平。

3.3 降水变化

对各季节和年的百年降水序列分析表明：伴随百年明显的增温趋势，降水有相应的减少趋势。但各季节降水的变化并不与温度的增减一一对应。春、秋、冬季降水均减少，但以秋季降水减少最为明显；四季中只有夏季降水略有增加，斜率为正值。比较而言，基本符合气温增加、降水减少，

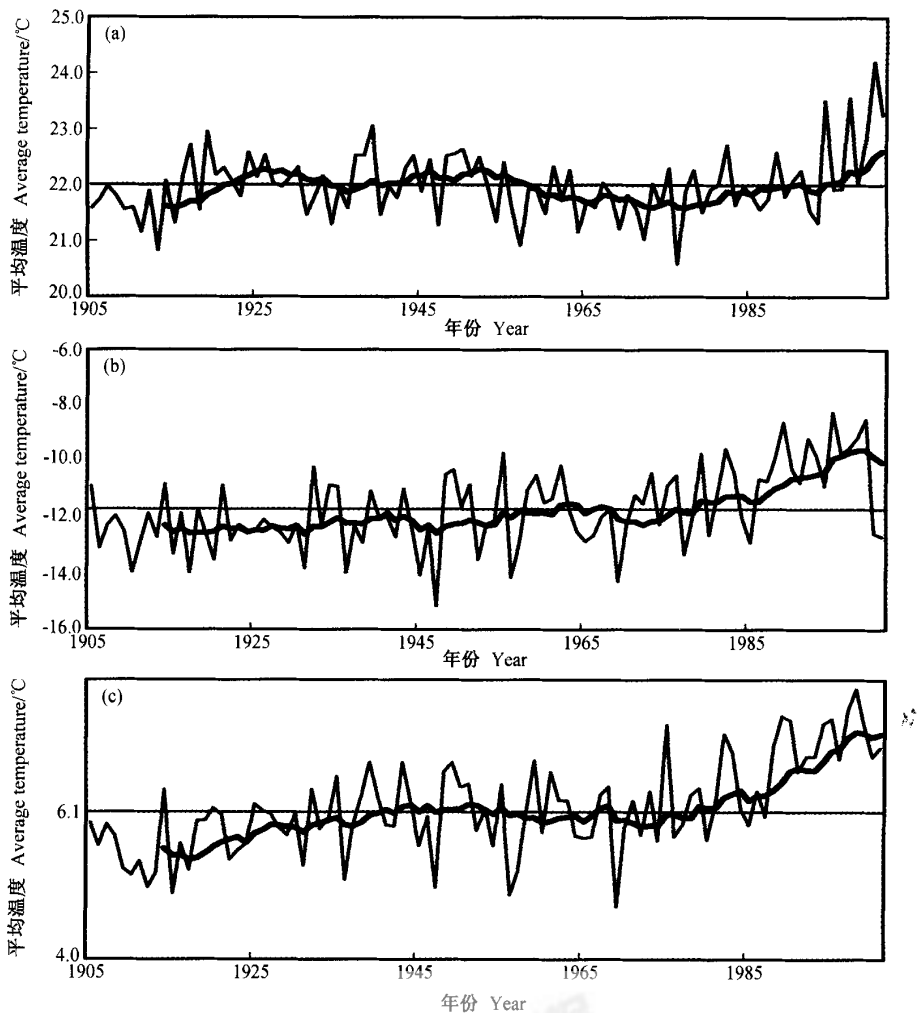


图 2 东北地区百年气温的夏季 (a)、冬季 (b) 和年 (c) 变化 (细实线为平均气温序列, 粗实线为低通滤波值, 横线为序列的平均值)
Fig. 2 The temperature changes in summer (a), winter (b), and annual (c) in Northeast China during the last 100 years (thin solid line—average temperature; thick solid line—low pass filter; level line—the average of series)

表 1 东北近百年气温距平 (TA) 年代际分布

Table 1 The decade temperature anomalies (TA) for the last 100 years in Northeast China

℃

	1905~1914	1915~1924	1925~1934	1935~1944	1945~1954	1955~1964	1965~1974	1975~1984	1985~1994	1995~2001
TA	-0.61	-0.53	-0.22	0	-0.12	-0.16	-0.29	0.21	0.62	1.09

反之降水增加的规律。但增温最明显的冬季, 降水量减少不是最显著。图 3 为降水量减少最明显的秋季、降水量略有增加的夏季及年降水量的百年变化及趋势。由年降水量的滑动平均曲线 (粗实线) 可以看出降水的年变化: 20 世纪 50~70 年代是降水较丰富时期, 1920~1930 年、1974~1983 年是 2 段降水较少期, 80 年代中期至今有增

加的趋势。总之降水量阶段性起伏较大, 而不象年平均气温那样基本保持持续性增加。

4 东北地区气候变化的区域性特点

在全球增温的大环境下, 东北地区气候具有本身独特的变化规律和不同的分布特征。经对比

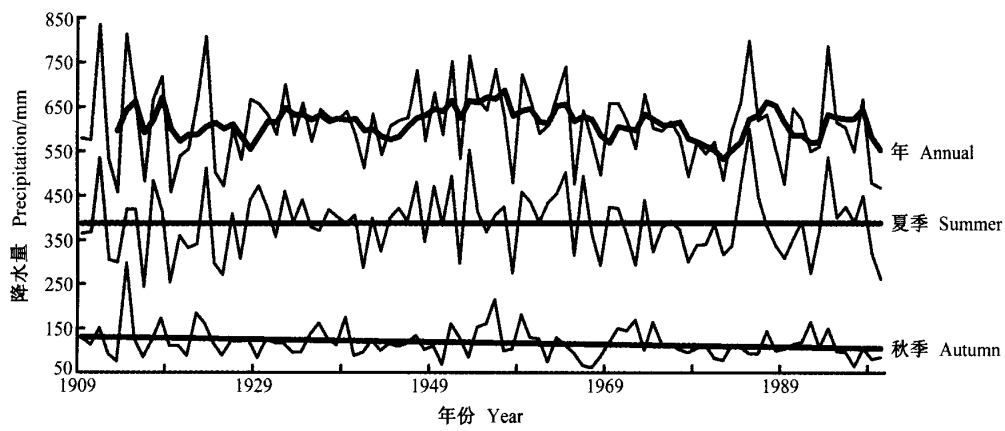


图3 东北百年降水的秋季、夏季和年变化

Fig.3 The precipitation changes in autumn (lower), summer (middle), and annual (upper) in Northeast China during the last 100 years

分析，可更清楚地认清该地区的气候变化特点。

4.1 与全球及全国气候变暖规律的对比

国内外已有许多专家学者对全球平均气温序列变化趋势做过详尽的分析，得出明确的结论^[2~5]。东北地区百年气温序列与全球年平均气温序列相比，它们在20世纪20年代和70年代都为气温上升期，世纪初为最冷期，近20年为最暖期。但全球变化在50年代左右没有表现出明显的相对暖期，60年代左右也没有表现出相对冷期，而是在升温之后保持一定水平，然后又开始升温。研究表明，包括城市和农村站的全球气温序列百年增温趋势是 $0.70\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ a})^{-1}$ ，东北为 $1.43\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ a})^{-1}$ ，大约是全球增温率的2倍。20世纪全球陆地平均降水有微弱的上升趋势^[6]，而东北区域的降水呈相反分布，略有减少。

与近百年全国气温和降水的气候变化比较，东北地区气温变化与全国百年气温变化的冷暖期基本一致，不同的是全国近20年的增温幅度与40年代的增温幅度基本持平，而东北地区近20年来表现出前所未有的强烈地增温趋势。全国百年增温率约为 $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ a})^{-1}$ ，与之相比，东北的 $1.43\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ a})^{-1}$ 的增温率要高出很多，为全国增温率的3倍，这充分说明东北地区的确是气候变化敏感区。

据王绍武等人^[5]的研究，近百年全国降水没有明显的变化趋势，基本持平。那么，比较而言，东北地区在全国属具有干旱化特征的地区，气温增加，降水减少，出现暖干化趋势。

4.2 区域内增温强度的分布及对比

区域内气温的变化已有一些研究^[7,8]，表2为东北地区年、季和各代表站年平均气温序列的一元线形回归趋势斜率。从季节上看，近百年东北冬季增温非常强烈，斜率为0.0244，平均10 a增温 $0.244\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；夏季百年温度序列趋势线基本水平，增温主要体现在1995年以后。从区域上看，在东北地区内没有表现出增温幅度随纬度变强的趋势，沈阳的增温幅度要大于哈尔滨和长春，其10 a增温率为0.181，哈尔滨次之为 $0.171\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ a})^{-1}$ ，长春增温幅度最小为 $0.101\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ a})^{-1}$ 。沿海地区与内地比较，内地的增温幅度要大于沿海，大连是6个城市中（沈阳、大连、营口、哈尔滨、长春、黑河）增温幅度最小的地区。

5 东北地区的气候突变

把突变概念和理论应用于气候变化的研究，是近代气候学一个新的研究方向，对于认识气候

表2 年、季节和各代表站百年气温趋势斜率

Table 2 Slope of temperature in season and annual during the last 100 years

	年	冬季	夏季	沈阳	哈尔滨	长春	黑河	大连	营口
	Annual	Winter	Summer	Shenyang	Harbin	Changchun	Heihe	Dalian	Yingkou
斜率 Slope	0.0143	0.0244	0.0034	0.0181	0.0171	0.0101	0.0109	0.0100	0.0151

变化的性质具有重要意义。气候突变有不同的分类^[9,10], 我们利用突变理论研究第一类突变, 即均值突变, 以期对气候变化的本质有进一步的认识。

5.1 方法概述

采用 2 种分析方法。

一是 Mann-Kendall 方法^[11]。对于平稳随机序列 $X_i (1 \leq i \leq N)$, 构造统计量

$$U(d_K) = \frac{d_K - E[d_K]}{(\text{Var}[d_K])^{1/2}},$$

式中 $d_K = \sum M_i$, M_i 是 1 至 i 之间小于 X_i 的样本数, 即 $M_i = \{X_j: j < i \text{ 且 } X_i < X_j\}$ 。 $E[d_K]$ 为均值, $\text{Var}[d_K]$ 为方差。在原序列随机平稳假设下, d_K 的分布渐进正态, $U(d_K)$ 则为标准正态分布。其概率 α 可以通过计算或查表获得。给定显著水平 α_0 , 若 $\alpha > \alpha_0$, 则接受序列无变化的原假设; 若 $\alpha < \alpha_0$, 则拒绝原假设。把 $U(d_K)$ 沿时间轴绘成曲线 C_1 。而后将序列反向, 计算出 $U(d_K)$, 绘成曲线 C_2 , 若 C_1 与 C_2 交叉点位于置信区间内, 则此点即为突变点的开始。当 C_1 存在明显的变化

趋势、超过置信线时, 或是突变增加, 或是突变减少。

二是 Yamamoto 方法^[12]。这种方法通过信噪比来检验不同时段平均值的显著差异。定义

$$\frac{S}{N} = \frac{E[X_1] - E[X_2]}{S_1 + S_2}$$

式中 $E[X_1]$ 、 $E[X_2]$ 、 S_1 、 S_2 分别代表两个不同时段平均值和方差。做比较的时段 n_1 和 n_2 可根据需要设定, 它们的取值影响 S/N 的显著水平, 一般对一连续随机变量均匀分段, 即 n 取等值。对于研究对象着眼于百年内的年代际突变可取 $n=10$, 则 $S/N > 1$ 时达到 95% 的信度水平, 确定为突变; $S/N > 2$ 时, 确定为强突变。

5.2 结果分析

为保证序列的平稳性, 对 1905~2001 年的温度及 1909~2001 年的降水做 5 年滑动平均处理, 建立分析序列, 进行气候突变检测。

Mann-Kendall 方法未检测出气温百年变化的突变点 (图 4a), 对百年年降水量序列检测出在 1976 年左右有一减少突变 (图 4b), 但并不显著。

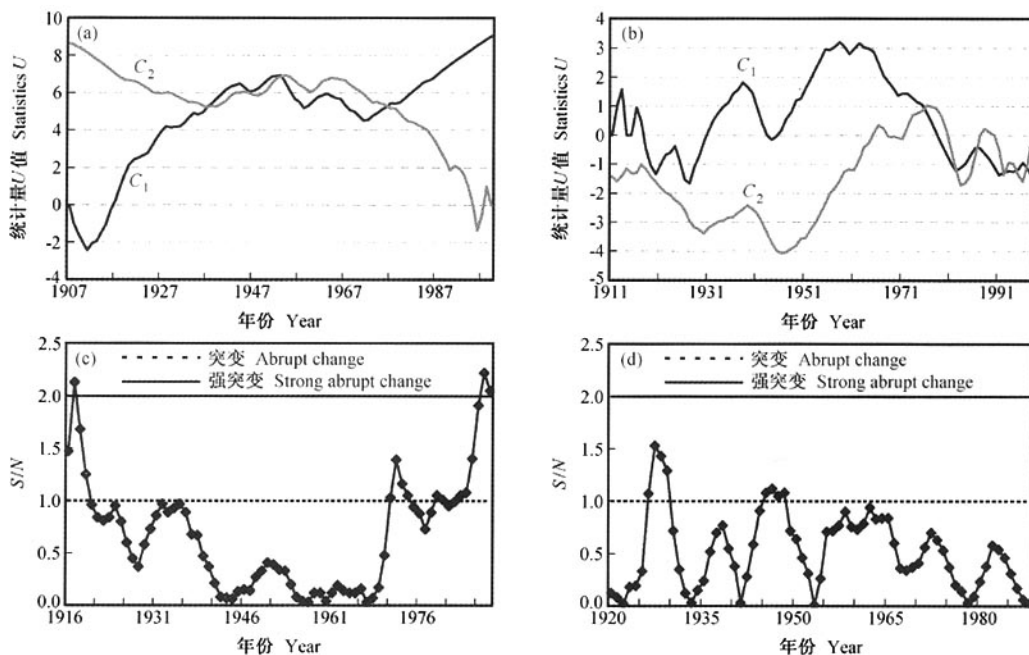


图 4 百年序列突变的 Mann-Kendall ($n=10$) 气温 (a) 和降水 (b)、Yamamoto 气温 (c) 和降水 (d) 检测

Fig. 4 The examinations of abrupt change points for temperature and precipitation series by Mann-Kendall and Yamamoto methods during the last 100 years

考虑在研究百年气候变化中关心的是年代际的气候突变, 所以在做 Yamamoto 检测时, 对于研究对象着眼于百年内的年代际突变可取 $n=10$ (结果见图 4c、d)。则 $S/N>1$ 时达到 95% 的信度水平, 确定为突变; $S/N>2$ 时, 确定为强突变。由此可见, 气温在 20 世纪有 4 次突变过程, 其中 2 次为强突变。20 年代初为强突变, S/N 值达到 2.13, 80 年代后期为最强突变, S/N 值达到 2.22; 另外还有两次突变过程, 发生在 70 年代初和 80 年代初, S/N 值分别为 1.39 和 1.05。近 20 年来, 突变的频率及强度均有明显增强。降水突变共发生 2 次, 分别在 20 年代末和 40 年代中期, 信噪比为 1.53 和 1.12。相对气温而言, 降水突变较弱, 频率较低, 近 50 多年来没有明显的突变过程发生。就两种方法比较而言, Yamamoto 方法较为敏感。

6 结论

(1) 与同区域多站温度和降水序列比较, 所选 6 站的年平均温度和降水序列代表性较好, 完全可以用其变化来代表东北地区的温度和降水变化。

(2) 东北近百年表现为明显的增温趋势, 但为起伏式上升, 序列曲线为两波两谷型。随时间的推移, 第二次的谷值和峰值都远高于第一次的谷值和峰值。年降水有减少趋势。

(3) 各季节百年气候变化有很大的不同。冬季增温非常强烈。夏季在 1995 年以前不仅没有升温, 反而有明显降温趋势。夏季气温前半世纪基本为高于平均值的暖期, 后半世纪基本为低于平均值的冷期。但在 1995 年以后, 夏季气温急剧升高, 春秋两季的升温趋势与冬季类似, 但幅度小得多。各个季节降水变化也有明显的不同, 除夏季降水有微弱增加趋势外, 其余三季降水均为减少趋势, 而以秋季降水减少趋势最为明显。

(4) 东北百年气温变化与全球气候比较, 既有相同处, 也有差异。相同处是两者的升温期、最冷期和最暖期相同; 不同处是全球气温变化曲线不是两波两谷型, 而是在第一次升温后, 维持一段时期又开始第二次升温。东北区域内, 增温强度不随纬度增大, 各代表站中, 纬度较低的沈

阳增温最强。另外, 内地增温强度大于沿海地区。

(5) 经功率谱分析, 序列变化的主要周期有 2 个, 分别为 2.3 年和 4.2 年, 其中 2.3 年周期超过 95% 的显著水平。

(6) 用 Yamamoto 方法检测出 20 世纪气温发生 4 次突变, 且 2 次为强突变; 降水发生 2 次突变。Mann-Kendall 方法未检测出气温突变, 降水有一不显著的突变。

参考文献

- [1] 章名立, 曾昭美, 季劲均. 全球增暖过程中亚洲东部区域气候的特点. 地理学报, 1996, **51** (6): 518~526
Zhang Mingli, Zeng Zhaomei, Ji Jinjun. Characters of regional temperature in east asia during global warming period. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 1996, **51** (6): 518~526
- [2] Wallace J M, Zhang Y, Bajuk L. Interpretation of interdecadal trends in Northern Hemisphere surface air temperature. *J. Climate*, 1996, **9**: 249~259
- [3] Vinnikov K Ya, Groisman P Ya, Lugin K M. Empirical on contemporary global climates. *J. Climate*, 1990, **3**: 662~677
- [4] 李崇银, 朱锦红, 孙照渤. 年代际气候变化研究. 气候与环境研究, 2002, **7** (2): 209~219
Li Chongyin, Zhu Jinhong, Sun Zhaobo. The study interdecadal climate variation. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 209~219
- [5] 王绍武, 蔡静宁, 朱锦红, 等. 中国气候变化的研究. 气候与环境研究, 2002, **7** (2): 137~143
Wang Shaowu, Cai Jingning, Zhu Jinhong. Studies on climate change in China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 137~143
- [6] Hulme M. Estimating global changes in precipitation. *Weather*, 1995a, **50**: 34~42
- [7] 任国玉, 周薇. 辽东半岛本世纪气温变化的初步研究. 气象学报, 1994, **52** (4): 493~498
Ren Guoyu, Zhou Wei. A preliminary study on temperature change since 1905 over liaodong peninsula, northeastern china. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1994, **52** (4): 493~498
- [8] 闫敏华, 邓伟, 马学慧. 大面积开荒扰动下的三江平原近 45 年气候变化. 地理学报, 2001, **56** (2): 159~170
Yan Minhua, Deng Wei, Ma Xuehui. Climate variation in the Sanjiang Plain disturbed by large scale reclamation during the last 45 years. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2001, **56** (2): 159~170

- [9] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 1992, **16** (4): 482~493
Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of climate abrupt change. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1992, **16** (4): 482~493
- [10] 符淙斌. 气候突变现象的研究. 大气科学, 1994, **18** (3): 373~384
Fu Congbin. Studies on the observed abrupt climatic change. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1994, **18** (3): 373~384
- [11] Berger W H, Labeyrie L D. abrupt climatic change, evidence and implications. *Mathematical and Physical Sciences*, 1987a, **216**: 173~183
- [12] Yamamoto R T, Iwashima T, Sanga N K. Climatic jump, a hypothesis in climate diagnosis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1985a, **63**: 1157~1160

第五届全国气象、环境与健康学术研讨会 征文通知

由中国科学院资源环境与科学技术局、国家自然科学基金委员会地球科学部和生命科学部、军事医学科学院等单位联合主办的第五届“气象、环境与健康学术研讨会”拟于2006年10月中旬在辽宁省丹东市召开。现征集论文。

一、会议征文范围

1. 天气气候和生态环境变化与人体健康;
2. 大气环境与流行病学和环境医学;
3. 空气污染和空气质量的医学评价;
4. 室内、室外空气污染对人体器官影响的有关问题与对策;
5. 某些疾病(流感, 禽流感, SARS等)的环境与气象预测;
6. 空气质量与竞技体育。

二、论文征集时间及要求

请于2006年6月30日前将论文摘要(500~1000字)通过E-mail或邮局寄至会议秘书处。

三、联系地址及联系人

联系地址: 北京 9804 信箱 中国科学院大气物理研究所, 邮政编码 100029

联系人: 周肖森, 电话: 82013200, E-mail: zxs@mail.iap.ac.cn

程文君, 电话: 62041394, E-mail: cwj@mail.iap.ac.cn

第五届“气象、环境与健康学术研讨会”秘书处