

近 40 年内蒙古候平均气温变化趋势^{* 1}

裴 浩¹⁾²⁾ Alex Cannon³⁾ Paul Whitfield³⁾ 郝 璐⁴⁾

¹⁾(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094) ²⁾(内蒙古自治区气象局, 呼和浩特 010051)

³⁾(加拿大气象局, 温哥华 V6C 3S5) ⁴⁾(北京师范大学地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘 要

基于 1964—2003 年内蒙古有关台站的逐日气温数据, 对前 20 年(1964—1983 年)和后 20 年(1984—2003 年)的候平均气温中值进行了对比, 并利用 *k*-means 方法进行了候平均气温变化趋势的聚类分析, 旨在阐明内蒙古气温变化的时空特点和规律。研究结果表明: 内蒙古全境年平均气温普遍上升, 没有下降的现象。不同地区、不同季节气温变化格局不同, 北部变暖比南部更为明显, 冬季和夏末秋初变暖出现得更频繁。绝大部分地区大多数候平均气温都有所上升, 而且候平均气温变化存在纬向地带性。大多数台站四季里都有一些显著升温的候, 显著升温在冬季发生得更频繁。同时, 有少数几个候出现气温下降的现象, 但未达到显著下降的程度。内蒙古绝大部分地区候最高、最低气温都有所升高, 但二者的差值在缩小。候最低气温出现时间有所提前, 候最高气温出现时间有提前也有推迟, 但总体上不同地区候最高、最低气温出现时间更加同步。因此, 候最高、最低气温的时空均一性有所增强。候最高气温出现时间与候最低气温出现时间的间隔有扩大迹象。总之, 全球气候变暖降低了气温的季节和地区差异。

关键词: 气温变化; 候平均气温; 聚类分析; 内蒙古

引 言

全球气候变暖是当今气候研究的热点^[1-3]。内蒙古气候的多样性和敏感性, 及其对经济社会和可持续发展的影响, 使许多学者关注该区域的气候和气候变化。气候是自然和人类生存环境的组成部分, 所以它一定会对自然生态系统和经济社会产生影响^[4]。气候变化既有正面效应又有负面影响, 为了解这些影响, 宏观和微观研究都是必要的。

乌云娜等研究指出, 内蒙古的沙地和沙漠表现出变暖和变干的趋势, 20 世纪 60 年代以来, 气温逐渐上升, 80 年代后升温加速, 90 年代升温速度更快^[5]。白美兰等研究表明, 1951—2004 年内蒙古东部气温明显升高^[6]。裴浩等基于气温月值的研究表明, 1965—2001 年浑善达克沙地大部年均温和季均温都有上升趋势^[7]。Li 等研究指出, 过去 20 年里, 锡林郭勒盟中部有气候变暖的趋势, 冬季尤为明显, 这使得春季的干旱更为严重, 因此典型草原的初级生产力表现出下降趋势^[8]。针对内蒙古基于高时间分辨率气象数据的研究相对较少。严中伟等利用温度、降水和风速日值, 研究了极端气候变化格局^[9]。Song 等基于 1971—2000 年的 11 d 时段的气温和降

水值, 进行了聚类分析, 得到了中国气候变化分区图, 并指出中国大部地区温度显著上升, 夏季风变化明显^[10]。

大多有关内蒙古气候和气候变化的研究基于年、季和月数据, 对候、旬和 11 d 的数据分析相对较少。同时, 多数研究集中在对气候变化敏感或生态、经济意义较大的区域。事实上, 候平均气温不仅常常用来作为划分四季的标准, 而且在农业生产以及采暖期确定等气象服务中也有重要作用, 因此研究候平均气温及其变化具有特殊意义。气候变化除了描述区域和全球尺度的气候变化机制, 季节推移还具有生态、社会和经济意义^[11]。本研究主要基于 1964—2003 年候平均气温, 期望得到前、后两个 20 年内蒙古时间分辨率更高的温度变化时空格局, 为气候变化基础研究及相关部门应对气候变化提供参考。

1 研究区域简介

内蒙古自治区地处我国北疆, 横跨三北, 主体位于蒙古高原南部, 东南部分是松辽平原的北部, 面积为 $118.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。从东向西分布着大兴安岭、阴山和贺兰山山脉。主要河流有黄河、西辽河和嫩江。

* 中国气象局气候变化专项项目(CCSF2006-17)与 2007 年中加气象局高级管理培训项目共同资助。

2008-10-29 收到, 2009-03-06 收到再改稿。

内蒙古的气候、植被和土壤有明显地带性,气候类型多样,大部分地区属季风性气候,西部是大陆性气候。从东向西分布着半湿润、半干旱和干旱气候,它们对应的植被分别是森林、草原和荒漠,对应的土壤分别是棕壤、栗钙土和漠土;从北向南分布着寒温带、中温带和暖温带,它们对应的植被分别是针叶林、阔叶林,或中温草原、暖温草原,对应的土壤分别是灰化土、棕壤、栗钙土或漠土。

2 数据与方法

一般地,常以统计方法检验时间序列是否有不连续点或是否有跃变现象出现来确定跃变点。本研究采用 TREND 软件^[9]综合分析内蒙古地区 1964—2003 年 40 年期间温度在统计上的显著跃变点。TREND 是一种进行趋势检测的软件,包括 WMO 推荐的 M-K 等 12 种趋势分析方法^[12-14],本文主要采用其中的 Student's 方法。跃变检验表明:内蒙古地区 40 年期间温度有显著的跃变($\alpha < 0.01$),即 1964—1983 年的年平均气温明显低于 1984—2003 年。

数据来源于内蒙古气象信息中心 47 个台站 1964—2003 年 40 年日平均气温地面观测资料。将 40 年划分为 1964—1983 年和 1984—2003 年前、后两个 20 年。一年被划分成 73 个候(5 d),较高时间分辨率可以使气候变化分析更为细致,使聚类间邻接关系更为清晰。Whitfield 等研究表明:使用较短的时间段有利于气候变化空间聚类之间的分离^[11,15]。通过使用较短时间段数据,可以获得比使

用月值更为详细的分析结果。

数据的处理方法与 Whitfield 等^[16]和 Song 等^[10]的相似。

首先,计算前、后两个 20 年的 73 候的气温平均值,然后计算两个 20 年各候的中值,进而获得各候两个 20 年之间的中值差。之所以使用中值,是因为它对特殊值的影响不敏感^[17],可以更好地反映两个 20 年各自的平均状态。

其次,利用 Mann-Whitney U 非参数方法检验两个 20 年候值之间差异的显著程度,并计算每个候的显著程度 $1 - p$ (p 是置信概率)。利用 Katsavounidis 等的最大归一化方法,初始化 k -means 聚类算法,得到台站候平均气温变化聚类^[18]。聚类的最佳数量由 I_{Calinski} 指数^[19]、 I_{SS} 指数^[20]、痕迹 I_{W} 指数^[21]和 I_{DB} 指数^[22]确定。

其中, I_{Calinski} 指数如下:

$$I_{\text{Calinski}} = \frac{B_{\text{trace}} / (k - 1)}{W_{\text{trace}} / (n - k)} \quad (1)$$

式(1)中, k 为聚类个数; B_{trace} 表示资料点所属聚类中心点至全体资料中心点之欧氏距离,表示所有聚类间的分离程度; W_{trace} 表示资料点至所属聚类中心点的欧氏距离,即聚类内部的紧密程度。

I_{DB} 指数利用聚类间离散程度与聚类内聚程度作为衡量依据,其式如下:

$$I_{\text{DB}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{j, i \neq j} \left(\frac{S_{i,j} + S_{j,i}}{d_{ij,t}} \right) \quad (2)$$

式(2)中, k 为聚类个数; S_{ij} 为隶属于群聚 i 的资料点至聚类 i 重心的平均欧氏距离。

第三,利用极图^[23](图1)表示各候平均气温中

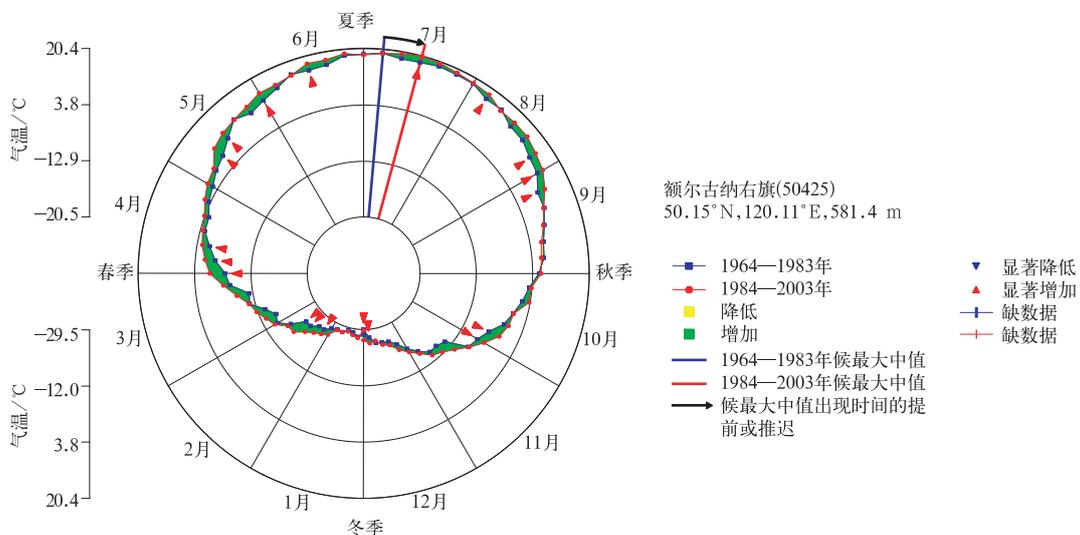


图1 额尔古纳右旗候平均气温极图

Fig. 1 The pentad temperature polar plots of Ergunayouqi

值和两个 20 年之间的中值差。

第四,利用箱须图(box and whisker plot)表现每个聚类的中值、中值差和显著程度 $1-p$ 。为了方便描述,对前、后两个 20 年候平均气温变化的显著程度做了定义(表 1)。

表 1 前、后两个 20 年气温变化显著程度定义
Table 1 The terms used to describe the degree of the changes between the two 20-year periods

变化程度	$ 1-p $
显著	>0.95
近于显著	$(0.9, 0.95]$
明显	$(0.50, 0.90]$
轻微	$(0.00, 0.50]$

3 气温变化的聚类分析

3.1 聚类的最佳数量和空间格局

3.1.1 聚类的最佳数量

4 种确定最佳聚类数量的指数计算结果表明:基于候平均气温差值的最佳聚类数量应该是 5 个。每个聚类内各台站的候平均气温变化趋势相似。在聚类分析结果的基础上,可以获得聚类的空间分布图(图 2)。

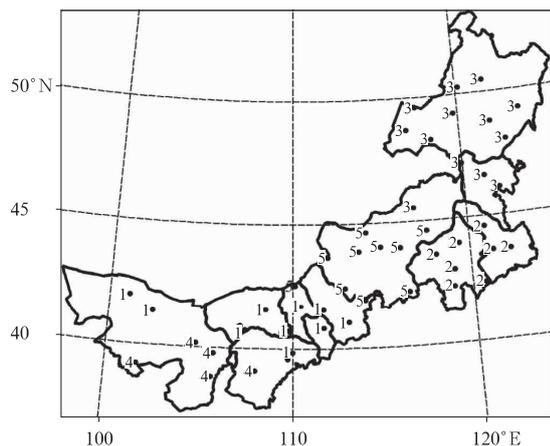


图 2 候气温变化聚类的空间分布图

Fig. 2 The spatial distribution map of the pentad temperature change clusters

3.1.2 候气温变化聚类的空间分布

从北向南依次描述气温变化聚类(T_i)的空间分布。

聚类 T3:包括呼伦贝尔市、兴安盟和锡林郭勒盟的东北部。植被地带属森林带和草原带,有大面积的湿地,其东南部以农田为主。它位于内蒙古的

最北部,大兴安岭东北—西南向横亘其中。

聚类 T5:包括锡林郭勒盟大部分地区、乌兰察布市的东部、北部和包头市北部。它位于草原带,阴山山脉东—西向分布其中。

聚类 T2:包括通辽市、赤峰市和锡林郭勒盟的东南角。它位于草原带中,但大部分土地已开垦为农田。

聚类 T1:包括乌兰察布市的南部、呼和浩特市、包头市大部、鄂尔多斯市北部、巴彦诺尔市和阿拉善盟的北部。

聚类 T4:包括鄂尔多斯市南部和阿拉善盟大部。主体位于内蒙古最南部的荒漠区。

从气温变化聚类的空间分布可以看出:气温变化存在纬向地带性。聚类 T5 和 T2 分布于同一纬度带内,却形成两个聚类,可能是由于二者间海拔的明显差异。

3.2 气温显著变化的候

就一个聚类的整体特性而言,大多数候表现出升温,而且有些候是显著升温。只有少数候表现出降温,但没有显著降温。5 个聚类都在第 19 候(4 月 1—5 日)、第 31 候(5 月 31 日—6 月 4 日)、第 57 候(8 月 8—12 日)和第 72 候(12 月 22—26 日)出现显著升温($\alpha < 0.01$)(表 2);同时,在第 9 候(2 月 10—14 日)和第 49 候(8 月 29—9 月 2 日)附近有几个显

表 2 各聚类中显著增温的候

Table 2 The pentads with significant temperature increases in clusters

时序	聚类 T1	聚类 T2	聚类 T3	聚类 T4	聚类 T5
第 7 候	✓	✓	✓		✓
第 8 候	✓	✓	✓		
第 9 候	✓	✓	✓	✓	
第 10 候			✓		
第 11 候	✓	✓	✓		
第 19 候	✓	✓	✓	✓	✓
第 21 候			✓		
第 31 候	✓	✓	✓	✓	✓
第 37 候				✓	
第 39 候	✓				
第 46 候					✓
第 48 候	✓			✓	
第 49 候		✓	✓		✓
第 50 候	✓	✓	✓		✓
第 57 候	✓	✓	✓	✓	✓
第 60 候		✓	✓		
第 72 候	✓	✓	✓	✓	✓
第 73 候	✓	✓	✓	✓	

注:✓表示显著增温。

著和近于显著的增温候。

由此可见,变暖更频繁地出现于冬季(第72—73候,第6—11候)、夏末秋初(第48—51候),这两个时段中有两个以上的候表现出显著或近显著升温。聚类T3有14个显著升温的候,聚类T2和T1各有12个显著升温的候,聚类T4和T5各有8个显著升温的候。

3.3 聚类的候气温

聚类T2的最高气温出现在第42候,其他聚类的最高气温都出现在第40候。同时,聚类T3和T4的最低气温出现在第4候,聚类T1和T5的最低气温出现在第3候,聚类T2的最低气温出现在第3候和第4候。从北向南,温度大于0℃的候从

40个增加到48个。相邻候之间的气温差在0℃附近时较大,在仲夏和隆冬时较小。另外,从北向南相邻候之间的气温差有加大的趋势。

3.4 候最低、最高气温出现时间及其变化

候最高、最低温度出现时间及其变化在一定程度上反映了气候和气候变化情况。

3.4.1 候最低气温出现时间

前20年中,各台站的候最低气温出现的时间有明显的不同,它们分别出现于第1,3,4,5,6,7,72候和第73候(图3a);在后20年中,几乎所有台站候最低气温都集中出现于第3候和第1候,只有个别几个台站的候最低温度出现于第2,4候和第5候(图3b)。

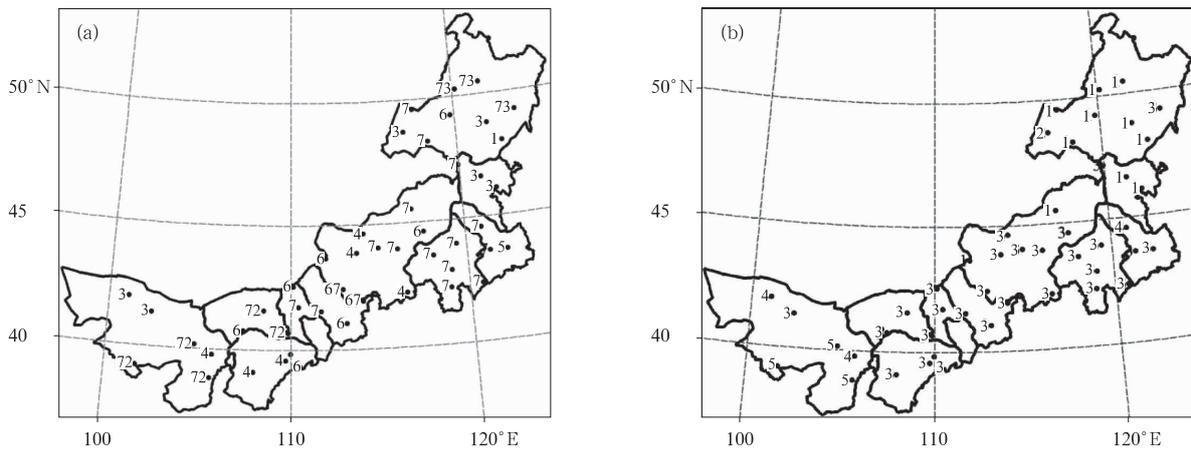


图3 前20年(a)与后20年(b)候最低气温出现时间

Fig. 3 The timing of the pentad minimum temperature in the first 20-year period (a) and the second 20-year period (b)

在聚类T3中,绝大多数台站的候最低气温出现在第1候,只有两个台站的候最低气温出现在第2候和第3候。聚类T5,T2和T1,各自仅有1个台站的候最低气温没有出现在第3候。聚类T4的情况相对复杂,其东部台站的候最低气温出现在第3候,西部台站的候最低气温出现在第5候。

3.4.2 候最高气温出现时间

前、后20年候最高气温出现时间明显不同。前20年中,候最高温度出现的时间分散在第36,38,40,41,42候和第43候(图4a);但在后20年中,大多数台站的候最高温度出现的时间则集中在第40候和第41候,仅个别几个台站的候最高温度出现在第39候和第42候(图4b)。

几乎所有台站的候最高气温都有所升高,仅聚

类T3中西南角的1个站和聚类T4北部的1个站的候最高气温有所下降。聚类T3,T5和T2的候最高气温出现时间,通过推迟或提前的方式都向第40候集中,聚类T1西北角台站候最高气温出现时间,保持在第40候。相反,聚类T4和T1候最高气温出现时间从第40候推迟到第41候。

候最高气温出现时间有趋于同步趋势,这可能暗示着天气、气候系统发生了一定变化。内蒙古东部和中部决定候最高气温的天气、气候系统的多样性降低,候平均气温同质性加强。这有可能是由于气候变暖使天气、气候系统的运动加速或其影响范围扩大的结果。但在西部候平均气温异质性似乎有所增强,则反映出气候变暖效应的空间差异。这些变化应该与气候变暖大背景下夏季风、副热带高压

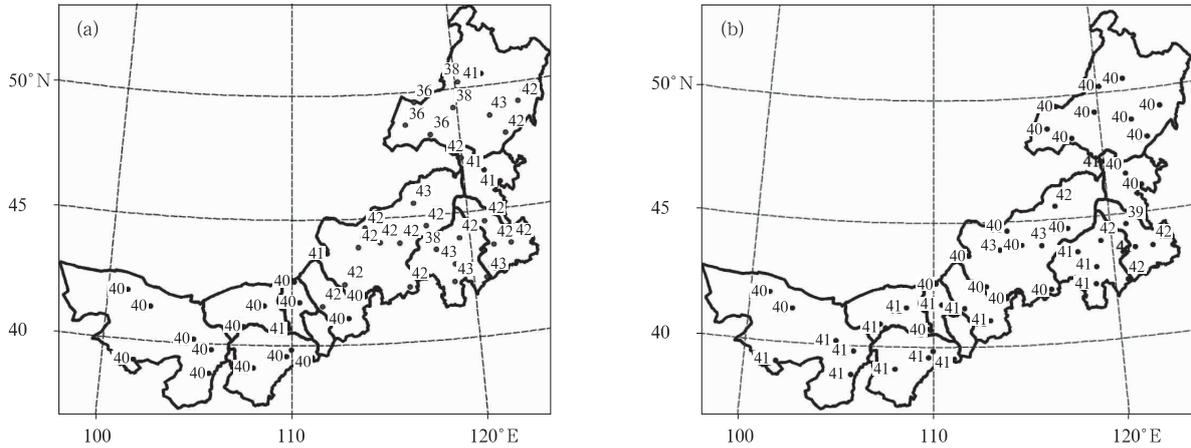


图 4 前 20 年(a)与后 20 年(b)中候最高气温出现时间

Fig. 4 The timing of the pentad maximum temperature in the first 20-year period (a) and the second 20-year period (b)

或西风带变化有一定关联。

3.4.3 候最高、最低气温增量

绝大多数台站的后 20 年的候最低气温要高于前 20 年的候最低气温,后 20 年的候最高气温要高于前 20 年的候最高气温,除了聚类 T3 西南角的 1 个站和聚类 T4 北部边缘的 1 个站,候最高、最低气温都有所升高。同时,前、后两个 20 年的候最低气温增量大于候最高气温增量。因此,候最高气温和候最低气温的差值变小。

人们已得到高纬度地区对全球变暖响应最明显的证据^[24]。本项研究和有关研究都表明:内蒙古北部的变暖比南部更为明显。因此,可以推论,全球气候变暖降低了气温的时空差异。

3.4.4 最低、最高气温候的时间间隔

通过对比前、后两个 20 年的最低、最高气温候的时间间隔,发现前 20 年中这种时间间隔大多数台站是 34~36 候,有些台站是 29,31~33,37,38,40 候和 41 候(图略);后 20 年中这种时间间隔大多数台站是 37~39 候,相对少数几个台站是 35,36 候和 41 候(图略)。同时,大多数台站的最低、最高气温候的时间间隔变长,11 d 数据的分析结果也是如此,但其时间间隔比候数据的结果更集中地分布于某一长度。

3.5 气温变化聚类特性

自北向南气温变化聚类的特性描述如下(图略)。

聚类 T3:前、后两个 20 年的候气温差值图表明:全年 73 个候中有 60 个候的气温上升。最大升

温出现在第 11 候,增量接近 5°C ,这是 5 个聚类中最大的增量;最大的降温出现在第 2 候,减量为 -0.65°C ,这是 5 个聚类中最小的减量。可以看出,最大的增量和减量都出现在冬季。从各台站的气温极图可以发现,在第 1,29,37,51 候或其附近,所有台站出现降温现象。最南端 4 个台站在第 24 候出现降温。

$1-p$ 指数图表明:在第 7—11,19,31,49—50,57,60 候和第 72—73 候出现显著增温,在第 27 候和第 48 候出现近显著增温(但在其他聚类中这两个候只表现出明显或轻微的增温)。同时,在上述各候附近还有明显增温的候。在第 23 候有轻微的增温(但在其他聚类中表现出明显的降温)。另外,在第 37,45 候和第 53 候或其附近有轻微的降温。

这意味着冬季升温最为明显,夏季显著升温的候相对较少。该聚类的大部分地区仲夏甚至是候气温下降(但不是显著下降),相似的情况也发生于该聚类的某些部分的 5 月和 9 月。

在该聚类的西北部候最高气温出现的时间从第 36,38 候推迟到第 40 候,但在其他部分则从第 41,42 候和第 43 候提前到或靠近第 40 候。候最高气温出现的时间有向第 40 候集中的趋势。

聚类 T5:全年 73 个候中有 61 个候的温度上升。最大的升温出现在第 8 候,增量接近 4°C ;最大的降温出现在第 23 候,减量为 -2.3°C ,这是 5 个聚类中最大的减量。可以看出,最大的增量和减量分别出现在冬季和春季。虽然该聚类中所有台站都没有显著降温候,但四季都有降温的候。各台站在

第 16 候或第 17, 23, 26 候和第 37 候都出现了降温。

1- p 指数图表明: 在第 7, 19, 31, 46, 49—50, 57 候和第 72 候出现显著增温, 在第 8, 11, 13, 48 候和第 73 候出现近显著增温。同时, 在上述显著增温候的附近还有明显增温的候。另外, 在第 23 候和第 26 候有明显的降温。

只有该聚类中部的 2 个台站的候最高气温的出现时间从第 42 候推迟到第 43 候, 其他大多数台站候最高气温出现时间都从第 41, 42 候提前到第 40 候, 或保持在第 40 候。从这些变化可以看出, 候最高气温出现时间提前都向第 40 候集中, 推迟的都远离第 40 候(图略)。

聚类 T2: 全年 73 个候中有 57 个候温度上升。最大的升温出现在第 7 候, 增量接近 3.4°C ; 最大的降温出现在第 23 候, 减量为 -2.1°C 。可以看出, 最大的增量和减量分别出现在冬季和春季。

1- p 指数图表明: 在第 7—9, 11, 19, 31, 49—50, 57, 60 候和第 72—73 候出现显著增温, 在第 10, 22 候和第 48 候出现近显著增温。同时, 在上述显著增温候的附近还有明显增温的候。另外, 在第 23, 38, 52, 63 候和第 66 候有明显的降温, 在第 2, 16, 24, 29, 36 候或附近、第 54 候或附近和第 67 候或附近有轻微的降温, 各台站在第 2 候或附近都有一更小的降温。

只有该聚类西北角台站的候最高气温出现时间推迟, 其他大多数台站候最高气温出现时间都从第 42, 43 候提前到第 41 候或第 42 候, 或保持在第 42 候。从这些变化可以看出, 不论候最高气温出现时间提前或推迟, 它们都在向第 41 候集中, 也可以理解为向第 40 候靠近(图略)。

聚类 T1: 全年 73 个候中有 64 个候气温上升。最大升温出现在第 73 候, 增量接近 3.7°C ; 最大降温出现在第 23 候, 减量为 -1.85°C 。可以看出, 最大的增量和减量分别出现在冬季和春季。

1- p 指数图表明: 在第 7—9, 11, 19, 31, 39, 48, 50, 57 候和第 72—73 候出现显著增温, 在第 6 候和第 49 候出现近显著增温。同时, 在上述显著增温候附近还有明显增温候。另外, 各台站在第 23 候都有明显降温, 有轻微降温的候散布在春、夏、秋三季, 冬季没有降温的候出现。

大多数台站候最高温度的出现时间都从第 40 候推迟到第 41 候, 西部的 2 个台站保持在第 40 候未动, 东部的 2 个台站提前到第 39 和 40 候。

聚类 T4: 全年 73 个候中有 58 个候的温度上升。最大的升温出现在第 7 候, 增量接近 3.0°C ; 最大的降温出现在第 23 候, 减量为 -0.95°C 。同样, 最大的增量和减量分别出现在冬季和春季。

1- p 指数图表明: 在第 9, 19, 31, 37, 48, 57 候和第 72—73 候出现显著增温, 在第 6—8 候和第 11 候出现近显著增温。同时, 在上述显著增温候的附近还有明显增温的候。另外, 只有在第 23 候都有明显的降温, 冬季没有出现降温的候。

所有台站的候最高气温的出现时间都从第 40 候推迟到第 41 候(图略)。

3.6 5 d 和 11 d 气温极图的比较

5 d 和 11 d 气温极图具有相似的格局, 但 11 d 极图会平滑掉显著升温、降温和候最高气温出现时间的变化, 这些在 5 d 极图中都可以看见。11 d 极图的格局相对简单和清晰, 5 d 极图的格局更为复杂, 不同区域之间的区别更明显。

较低时间分辨率的数据会掩盖前后两个 20 年差异的细节, 使用不同时间分辨率数据有时会得到不同的结果。同时, 高时间分辨率数据的处理分析较为复杂和困难。

3.7 5 d 和 11 d 气温变化聚类空间格局的比较

5 d 和 11 d 聚类的组成台站是不同的。5 d 气温变化聚类(图 2)比 11 d 气温变化聚类(图 5)的空间整齐性更好, 且各聚类中的台站数相对均匀。

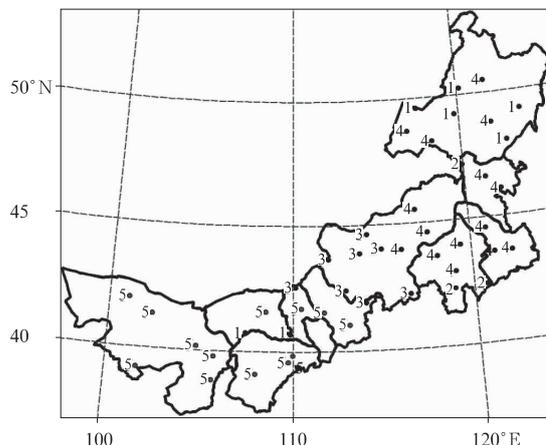


图 5 11 d 气温变化聚类空间分布

Fig. 5 The spatial distribution map of 11-day temperature change clusters

3.8 前、后两个 20 年年平均气温比较

比较前、后两个 20 年的年平均气温中值, 内蒙古全境年平均气温普遍上升, 没有降温现象。

观测资料显示,1964—1983 年内蒙古年平均气温以每年 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的速率上升,而 1984—2003 年以每年 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的速率上升,表现出明显的上升趋势。

最大增温出现在气温变化聚类 T3 中,次大增温出现在气温变化聚类 T1 中,接下来是气温变化聚类 T5 的北部,而气温变化聚类 T2, T5 的南部、T1 的北部和 T4 的东部的增温相对较小(图 6)。

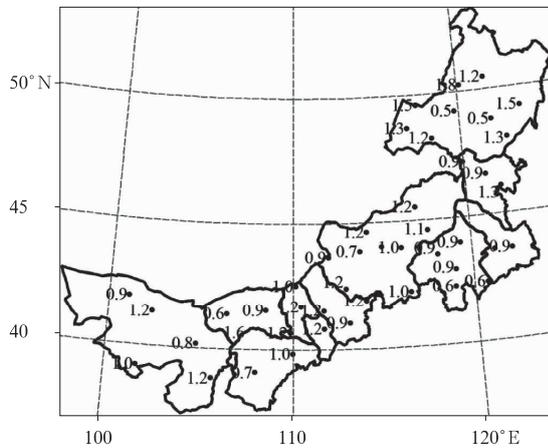


图 6 后、前两个 20 年年平均气温中值的差值(单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 The median differences of annual mean temperature between the two 20-year periods(unit: $^{\circ}\text{C}$)

4 结 论

通过对比分析内蒙古 1964—2003 年 40 年中前、后两个 20 年时段气温以及聚类分析,得到如下结论:

1) 内蒙古全境年平均气温普遍上升,没有下降的现象,北部变暖比南部更为明显。绝大部分地区大多数候平均气温都有所上升,而且候平均气温变化存在纬向地带性。大多数台站四季里都有一些显著升温的候,但显著升温在冬季发生得更为频繁,变暖更频繁地出现于冬季(第 72—73 候,第 6—11 候)和夏末秋初(第 48—51 候)。同时,也存在候气温下降现象,但仅出现在几个候中,而且没有显著的候气温下降。

2) 内蒙古几乎所有地区后 20 年的候最高、最低气温分别高于前 20 年最高、最低温度。候最高气温与候最低气温的差在缩小。候最高、最低气温的时空均一性有所增强。候最低气温出现时间有所提前,且不同地区间更加同步。内蒙古东部和中部,候最高气温出现时间不论是提前或是推迟,都向第 40 候靠拢;但在西部候最高气温出现时间却由第 40 候

推迟到第 41 候。候最高气温出现时间与候最低气温出现时间的间隔有扩大迹象。候最高气温出现的时间通过推迟和提前趋于同步,即气温的时空差异性减小。内蒙古东部和中部候最高气温的同质性加强,但在西部异质性有所增强。这些变化应该与气候变暖大背景下,夏季风、副热带高压或西风带的变化有一定的关联。

参 考 文 献

- [1] 邹旭恺,张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. 应用气象学报,2008,19(6):679-687.
- [2] 边多,杜军. 近 40 年西藏“一江两河”流域气候变化特征. 应用气象学报,2006,17(2):169-175.
- [3] 缪启龙,许遐祯,潘文卓. 南京 56 年来冬季气温变化特征. 应用气象学报,2008,19(5):620-626.
- [4] 张家诚. 中国气候总论. 北京:气象出版社,1991:1-2.
- [5] 乌云娜,裴浩,白美兰. 内蒙古土地沙漠化与气候变化和人类活动. 中国沙漠,2002,22(3):292-297.
- [6] 白美兰,郝润全,邱瑞琦. 内蒙古东部区近 54 年气候变化对生态环境演变的影响. 气象,2006,32(6):31-36.
- [7] 裴浩,张世源,敖艳青. 浑善达克沙地的气候分析. 气象科技,2005,14(3):34-38.
- [8] Li Zhenqing, Liu Zhenguo, Chen Zuozhong, et al. The effects of climate changes on the productivity in the Inner Mongolia steppe of China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2003, 12(1): 4-10.
- [9] 严中伟,杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局. 气候与环境研究,2000,5(3):267-272.
- [10] Song L C, Cannon A J, Whitfield P H. Changes in seasonal patterns of temperature and precipitation in China during 1971-2000. *Adv Atmos Sci*, 2007,24(3):459-473.
- [11] Whitfield P H, Hall A W, Cannon A J. Changes in the seasonal cycle in the circumpolar Arctic, 1976-1995: Temperature and precipitation. *Arctic*, 2004, 57(1): 80-93.
- [12] <http://www.toolkit.net.au/cgi-bin/>.
- [13] Kundzewicz Z W, Robson A. Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Climate Program—Water, WMO/UNESCO, WCDMP-45, WMO/TD 1013, Geneva,2000:157.
- [14] Grayson R B, Argent R M, Nathan R J, et al. Hydrological Recipes: Estimation Techniques in Australian Hydrology. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Australia, 1996:125.
- [15] Whitfield P H, Bodtker K, Cannon A J. Recent variations in seasonality of temperature and precipitation in Canada 1976-95. *International Journal of Climatology*, 2002, 22: 1617-1644.
- [16] Whitfield P H. Linked hydrologic and climate variations in British Columbia and Yukon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2001, 67 (1-2): 217-238.
- [17] Gonick Larry, Smith Woollcott. The Cartoon Guide to Statistics. New York: Harper Resource, 1993.
- [18] Katsavounidis I, Kuo C C J, Zhang Zhen. A new initializa-

- tion technique for generalized Lloyd iteration. *IEEE Signal Processing Letters*, 1994, 1(10), 144-146.
- [19] Calinski R B, Harabasz J. A dendrite method for cluster analysis. *Communication in Statistics*, 1974, 3: 1-27.
- [20] Scott A J, Symons M J. Clustering methods based on likelihood ratio criteria. *Biometrics*, 1971, 27: 387-397.
- [21] Milligan G W, Cooper M C. An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. *Psychometrika*, 1985, 50(2):159-179.
- [22] Davies D L, Bouldin D W. A cluster separation measure. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1979, 1: 224-227.
- [23] Whitfield P H, Cannon A J. Polar plotting of seasonal hydrologic and climatic data. *Northwest Sci*, 2000, 74(1): 76-80.
- [24] IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

Pentad Average Temperature Changes of Inner Mongolia During Recent 40 Years

Pei Hao¹⁾²⁾ Alex Cannon³⁾ Paul Whitfield³⁾ Hao Lu⁴⁾

¹⁾ (College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094)

²⁾ (Inner Mongolian Meteorological Bureau, Huhhot 010051)

³⁾ (Meteorological Services of Canada, Environment Canada, Vancouver, BC V6C 3S5)

⁴⁾ (School of Geography and Remote Sensing, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract

In order to understand characteristics of the pentad average temperature changes from 1964 to 2003 in Inner Mongolia, daily temperature records of 47 meteorological stations are analyzed. According to the results of the jump point tests, this 40 years are divided into two 20-year periods, the first 20-year period is from 1964 to 1983, and the second is from 1984 to 2003. From these daily temperature data, the pentad (5 days) average temperature is calculated, and then the pentad average temperature of the second 20-year period is compared with that of the first 20-year period at 5-day interval (pentad). Then the cluster analysis is done. First, the stations are classified into 5 clusters using 4 optimal determining indices. Based on *k*-means method and the pentad average temperature differences between the two periods, clustering analysis is conducted, so the spatial pattern of the pentad average temperature differences clusters are obtained. By analyzing the polar plots of the pentad average temperatures, it is clear that the patterns of the pentad average temperature changes are different in different regions and seasons. The warming in north is more obvious than in south, and it happens more frequent in winter, late summer to early fall than in other seasons. The pentad average temperature in most of the stations rises most of the time, and the spatial distribution of the pentad temperature changes clusters shows that there is a zonation along the latitude. Significant warming most frequently appears in winter. Meanwhile, there are a few pentads that show cooling, but not quite significant. Both the maximum and minimum pentad temperature rise, but the differences between them decrease. The timings of the minimum temperature pentads are earlier in the second 20-year period, and the timings of the maximum temperature pentads are earlier or later, while the timings of the minimum and maximum temperature pentads are more synchronic, so the temporal and spatial evenness of the minimum and maximum temperature pentads enhances. In addition, most of the stations show that the durations between the maximum and minimum temperature pentads are longer in the second 20-year period than that in the first 20-year period. From these results, it can be concluded that the global warming may reduce the seasonal and regional temperature differences. The medians of the annual average temperatures of the first 20-year period and the second 20-year period are compared, indicating that the annual average temperatures rise all over Inner Mongolia, and no temperature decrease is found.

Key words: temperature change; pentad average temperature; clustering analysis; Inner Mongolia