

1981~2016年蒙古国气温变化特征研究

赵恩博

哈尔滨师范大学, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2022年8月20日; 录用日期: 2022年9月20日; 发布日期: 2022年9月29日

摘要

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第四次评估报告指出, 1906~2005年全球平均气温上升 0.74°C 。IPCC第五次评估报告中指出, 1880~2016年全球平均地表温度增加了约 0.85°C 。过去30年, 全球地表持续升温, 温度的上升幅度高于1850年以来的任何时期。蒙古-西伯利亚高压的变化对我国气候也有着一定程度的影响。蒙古国既是“一带一路”倡议“中蒙俄经济走廊”的重要组成部分, 也是受全球气候变化影响显著的区域。本文下载了CRU再分析数据(Climatic Research Unit, 简称CRU) 1981~2016年全球近地面2 m逐月平均气温数据, 进行处理后采用线性回归分析和M-K检验法分析可以得出: 1) 20世纪80年代以来蒙古国陆地气温变化速率平均为 $0.526^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 呈极显著升高趋势($P < 0.01$), 年平均气温增加了 1.894°C 。2) 20世纪80年代以来蒙古国陆地气温变化突变点为1988年。3) 蒙古国陆地超过83%的地区气温上升超过了 1.5°C , 蒙古国陆地超过88%的地区气温呈显著上升趋势。

关键词

蒙古国, 再分析数据, M-K检验法, 气温变化

The Study on the Characteristics of Temperature Change in Mongolia from 1981 to 2016

Enbo Zhao

Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Aug. 20th, 2022; accepted: Sep. 20th, 2022; published: Sep. 29th, 2022

Abstract

According to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, the

average global temperature rose by 0.74°C between 1906 and 2005. According to the fifth assessment report of the IPCC, the global average surface temperature increased by about 0.85°C from 1880 to 2016. The earth's surface has continued to warm over the past 30 years, with temperatures rising by more than at any time since 1850. Mongolia is not only an important part of the One Belt And One Road China-Mongolia-Russia economic corridor, but also a region significantly affected by global climate change. The Mongolian-Siberian high also has a certain degree of influence on our climate. This article download the CRU reanalysis data (Climatic Research Unit, referred to as "CRU") 1981~2016 world nearly 2 m monthly mean temperature data on the ground, after processed using linear regression analysis and M-K test were used to analyze the results: 1) since the 1980s, the average land temperature change rate in Mongolia was $0.526^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($P < 0.01$), the annual average temperature increased by 1.894°C . 2) The abrupt change point of land temperature in Mongolia since 1980s was 1988. 3) The temperature of more than 83% of the land areas in Mongolia increased by more than 1.5°C , and the temperature of more than 88% of the land areas in Mongolia showed a significant increasing trend.

Keywords

Mongolia, Reanalysis Data, Mann-Kendall Method, The Temperature Change

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

全球气候变暖将会引起海平面上升(Zhao L, 2016) [1], 农业生产受限(Lizana X C, 2017) [2], 生物多样性锐减(Pontes-Da-Silva E, 2018) [3], 经济发展减缓(Neves S T, 2018) [4]等, 甚至影响疾病传播威胁人类健康(Jing H, 2018; Rossati A, 2017) [5]。因此, 全球气候变暖已成为全球关注的焦点。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第四次评估报告指出, 1906~2005 年全球平均气温上升 0.74°C ; 但从区域和季节尺度上看, 气温上升的速率具有明显差异。北半球中纬度冬春季节气温上升速率较快。IPCC 第五次评估报告中指出, 1880~2016 年全球平均地表温度增加了约 0.85°C 。2018 年 IPCC 发布了《全球升温 1.5°C 特别报告》, 该报告显示预计全球气温在 2030 年至 2052 年间会比工业化之前水平升高 1.5°C 。近 30 年, 全球地表持续升温, 温度的上升幅度高于 1850 年以来的任何时期, 1986 到 2016 年已经形成了一个气候态。

蒙古-西伯利亚高压是冬季控制亚洲大陆近地面大气环流及气候要素的最重要环流系统[6], 蒙古-西伯利亚高压是半永久性大气环流系统, 冬季蒙古高压位于蒙古-西伯利亚地区, 环流中心位于蒙古国西部(90°E , 45°N), 中心气压超过 1034 hPa (王力群, 2008) [7], 其影响范围涵盖了除黄河长江上游地区以外的整个中国(丁一汇, 温市耕, 李运锦, 1991) [8]。当蒙古-西伯利亚高压偏强, 面积偏大时, 高层东亚大槽加深, 脊加强, 西伯利亚地区对应有下沉运动, 从而使得近地面气温降低, 偏反气旋异常继而能引导北方高纬地区偏冷空气南下, 导致东亚大部分地区出现不同程度降温, 严重的地区则发生极端低温事件(谢星昀, 2018) [9], 也易造成京津冀豫 $\text{PM}_{2.5}$ 污染(李亚云, 2017) [10]。到目前为止, 有众多学者对蒙古-西伯利亚高压的时空变化和突变特征及影响做了研究, 但对于蒙古国气候变化的研究很少。蒙古国简称“蒙古”, 位于中国和俄罗斯之间, 是“一带一路”倡议“中蒙俄经济走廊”的重要组成部分。基于此本文采用 CRU 再分析数据研究了 1981~2016 年蒙古国气温变化的空间差异性, 为研究全球气候变化提供依据, 为东亚地区农业发展和大气污染现象问题做贡献。

2. 数据与方法

2.1. 数据

本文选择了 University of East Anglia (UEA) 的气候研究所的 Climatic Research Unit (CRU) 再分析数据。该数据集不包括卫星观测数据，也不运用模式同化，仅利用数学方法对数据源进行了整合与插值，具有空间覆盖率较大、分辨率较高且无缺测月地表气候要素的优点。CRU 再分析数据起始年份为 1901 年，空间为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 经纬网格覆盖所有陆地。本文选择了 1981~2016 年全球近地面 2 m 逐月平均气温数据；采用 ArcGIS 软件中的 Spatial Analyst Tools 工具箱的 Map Algebra 工具中的 Raster Calculator 进行计算。将蒙古国 20 世纪 80 年代以来的 CRU 再分析数据集的逐月数据汇总成 20 世纪 80 年代以来的逐年数据。计算得出蒙古国年际气温的变化与四季气温的变化。

2.2. 方法

2.2.1. 气温变化趋势方法

趋势分析方法是长期趋势预测的主要方法，它假定历史数据的趋势将在未来一段时间内持续下去。根据连续性原理，依据时间序列的发展趋势，配合合适的曲线模型，对未来趋势进行外推预测，模型选择的恰当与否直接影响预测的精准度。时间序列的气温长期变化趋势采用线性倾向估计方法分析 (Li Xiangge, 2015) [11]，建立气温变量 (y) 与所对应时间 (x) 的一元线性回归方程：

$$y_i = ax_i + b, (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中 a 为线性回归系数，表示气温要素变化速率； b 为常数。 a 值正负分别表示气温随时间变化呈上升或下降趋势，即 a 为正值表示气温呈上升趋势， a 为负值表示气温呈下降趋势。

2.2.2. Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法是一种非参数统计方法，其优点是对于时间序列自然事件的趋势性分析，具有不受样本值、分布类型等的影响，并被世界气象组织推荐而广泛应用 [12]。Mann-Kendall 检验中，原假设 H_0 为原序列 (x_1, x_2, \dots, x_n) 无变化趋势，备择假设 H_1 是原序列有增大或减少变化趋势，为双边检验，构造秩序列 S_k 。

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i, (k = 2, 3, \dots, n) \quad (2)$$

$$\text{式中：} r_i = \begin{cases} 1 & x_i \geq x_j \\ 0 & x_i < x_j \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, i。$$

定义统计变量：

$$UF_k = \frac{[S_k - E(S_k)]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}}, k = 2, 3, \dots, n$$

$$E(S_k) = \frac{k(k-1)}{4}$$

$$\text{var}(S_k) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72} \quad (3)$$

UF_k 为标准正态分布，它是按时间序列 x 顺序 x_1, x_2, \dots, x_n 计算出的统计量序列， $UF_1 = 0$ 。对于给定显著性水平 α ，在这里取显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。若 $|UF_k| > \mu_\alpha$ ，则表明原序列存在明显的趋势变化，绝对

值越大,趋势越明显。将上述方法逆向使用,时间序列逆序排列为 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 ,重复相同的操作,得到 UB_k ,满足 $UB_k = -UF_k, k = 1, 2, 3, \dots, n, UB_n = 0$ 。这一方法的优点在于不仅计算简便,而且可以明确突变开始的时间,并指出突变区域,因此,是一种常用的突变检测方法[13]。

3. 结果与分析

3.1. 蒙古国气温变化特征分析

3.1.1. 年气温变化特征分析

蒙古国 1981~2016 年多年平均气温为 0.49°C ,通过线性趋势分析蒙古国 1981~2016 年 CRU 再分析数据,计算得出蒙古国 1981~2016 年气温时间变化趋势方程为 $y = 0.0526x - 0.4838$ ($R^2 = 0.2217$),得出蒙古国年平均气温线性变化倾向率为 $0.526^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。蒙古国年平均气温增加了 1.894°C ,总体气温呈极显著上升趋势($P < 0.01$)。蒙古国 1981~2016 年多年平均最高气温为 7.31°C ,通过线性趋势分析蒙古国 1981~2016 年 CRU 再分析数据,计算得出蒙古国 1981~2016 年气温时间变化趋势方程为 $y = 0.0512x + 6.367$ ($R^2 = 0.2089$),得出蒙古国年平均气温线性变化倾向率为 $0.512^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。总体气温呈极显著上升趋势($P < 0.01$)。蒙古国 1981~2016 年多年平均最低气温为 -6.47°C ,通过线性趋势分析蒙古国 1981~2016 年 CRU 再分析数据,计算得出蒙古国 1981~2016 年气温时间变化趋势方程为 $y = 0.0429x - 7.2623$ ($R^2 = 0.3112$),得出蒙古国年平均气温线性变化倾向率为 $0.429^\circ\text{C}/10\text{a}$ 。总体气温呈极显著上升趋势($P < 0.01$)。由图 1,蒙古国气温空间分布均呈现出南高北低,东高西低,且西部部分地区出现高值的特点。

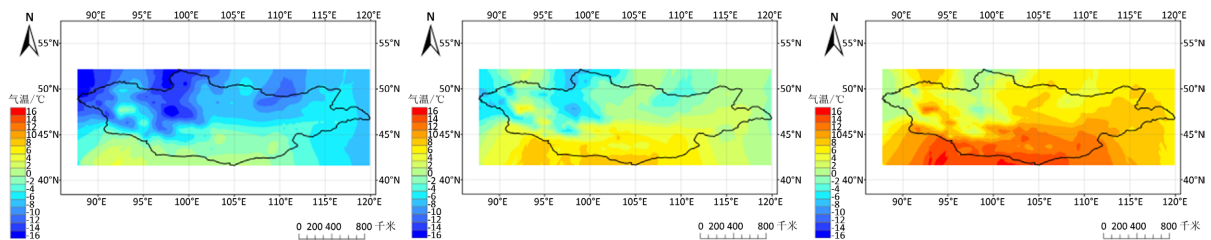


Figure 1. Minimum temperature, average temperature and maximum temperature in Mongolia from 1981 to 2016

图 1. 1981~2016 年蒙古国最低气温, 平均气温, 最高气温图

由图 2,可以通过 UF 曲线看出在 1981~1983 年蒙古国年平均气温呈上升趋势,在 1983~1986 年气温呈短暂的下降趋势。UF 曲线与 UB 曲线的交点相交于 1988 年附近,说明蒙古国年平均气温增加突变点在 1988 年,蒙古国年平均气温在 1988 年以后持续上升。

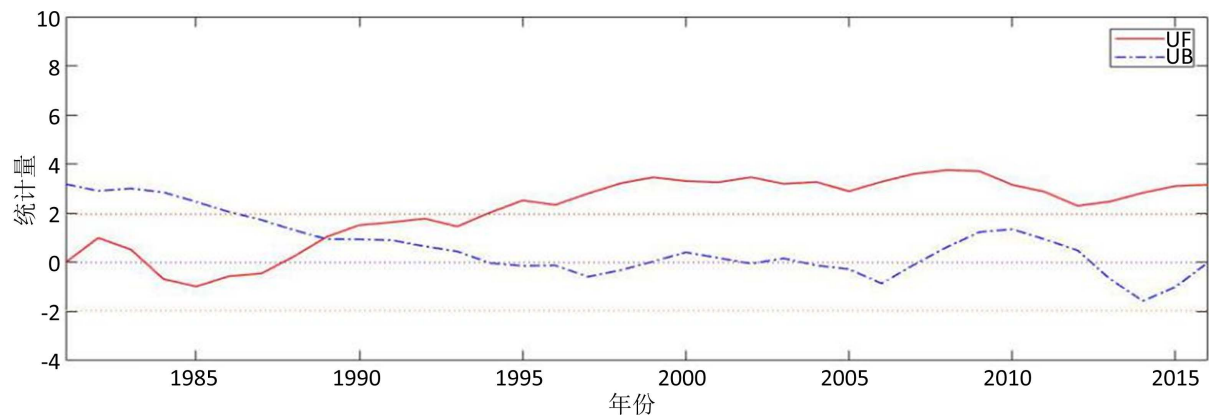


Figure 2. Mann-Kendall test of annual mean temperature in Mongolia During 1981~2016

图 2. 1981~2016 蒙古国年平均气温突变检验图

3.1.2. 四季气温变化特征分析

蒙古国 1981~2016 年春夏秋冬四季平均气温分别为 1.80℃、16.62℃、0.59℃、-17.95℃，通过线性趋势分析蒙古国 1981~2016 年 CRU 再分析数据，计算得出蒙古国 1981~2016 年春季气温时间变化趋势方程 $y = 0.0624x + 0.6408$ ($R^2 = 0.2622$)，得出蒙古国春季平均气温线性变化倾向率为 0.624℃/10a，蒙古国春季平均气温增加了 2.246℃，总体气温呈极显著上升趋势($P < 0.01$)；蒙古国 1981~2016 年夏季气温时间变化趋势方程 $y = 0.0714x + 15.301$ ($R^2 = 0.4175$)，得出蒙古国夏季平均气温线性变化倾向率为 0.714℃/10a，蒙古国夏季平均气温增加了 2.570℃，总体气温呈极显著上升趋势($P < 0.01$)；蒙古国 1981~2016 年秋季气温时间变化趋势方程 $y = 0.0461x - 0.2657$ ($R^2 = 0.1724$)，得出蒙古国秋季平均气温线性变化倾向率为 0.461℃/10a，蒙古国秋季平均气温增加了 1.660℃，总体气温呈显著上升趋势($0.01 < P < 0.05$)；蒙古国 1981~2016 年冬季气温时间变化趋势方程 $y = -0.0248x - 17.5$ ($R^2 = 0.0164$)，得出蒙古国冬季平均气温线性变化倾向率为 -0.248℃/10a，蒙古国冬季平均气温增加了 -0.893℃，总体气温呈不显著下降趋势($P > 0.05$)。

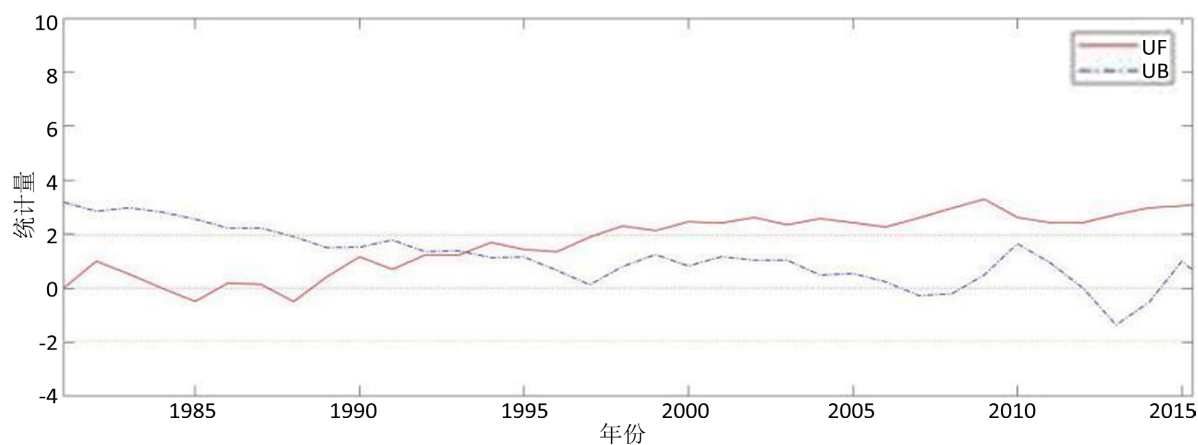


Figure 3. Mann-Kendall test of spring mean temperature in Mongolia during 1981~2016

图 3. 1981~2016 蒙古国春季平均气温突变曲线图

由图 3，可以通过 UF 曲线看出在 1981~1983 年蒙古国春季平均气温呈上升趋势，在 1983~1987 年曲线在均值附近波动。1988~2016 年以后一直呈上升趋势。UF 曲线与 UB 曲线的交点相交于 1993 年附近，说明蒙古国春季平均气温增加突变点在 1993 年，蒙古国春季气温在 1993 年以后持续上升。

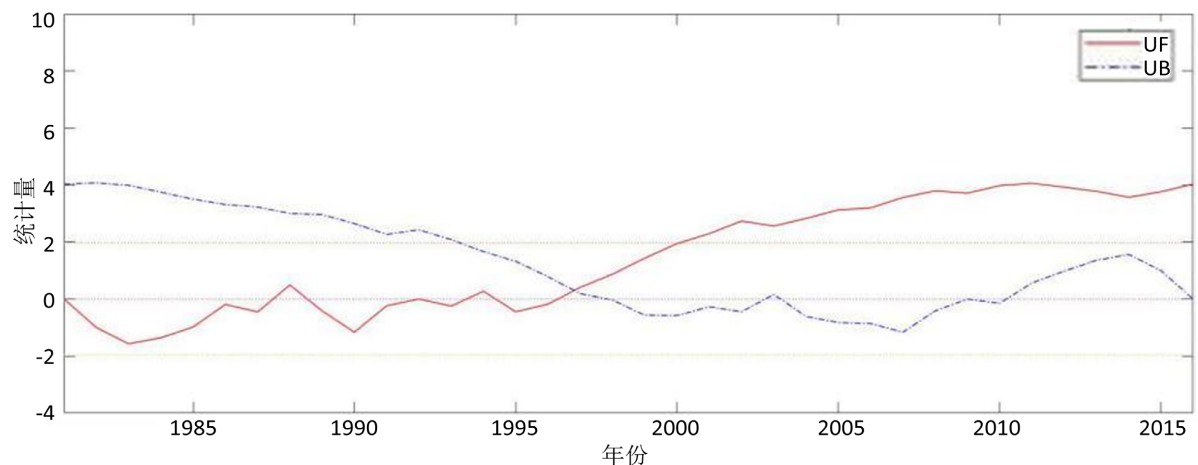


Figure 4. Mann-Kendall test of summer mean temperature in Mongolia during 1981~2016

图 4. 1981~2016 蒙古国夏季平均气温突变曲线图

由图4, 可以通过UF曲线看出在1981~1986年蒙古国夏季平均气温呈下降趋势, 在1986~1995年曲线在均值附近波动。1996~2016年一直呈上升趋势。UF曲线与UB曲线的交点相交于1996年附近, 说明蒙古国夏季平均气温增加突变点在1996年, 蒙古国夏季气温在1996年以后持续上升。

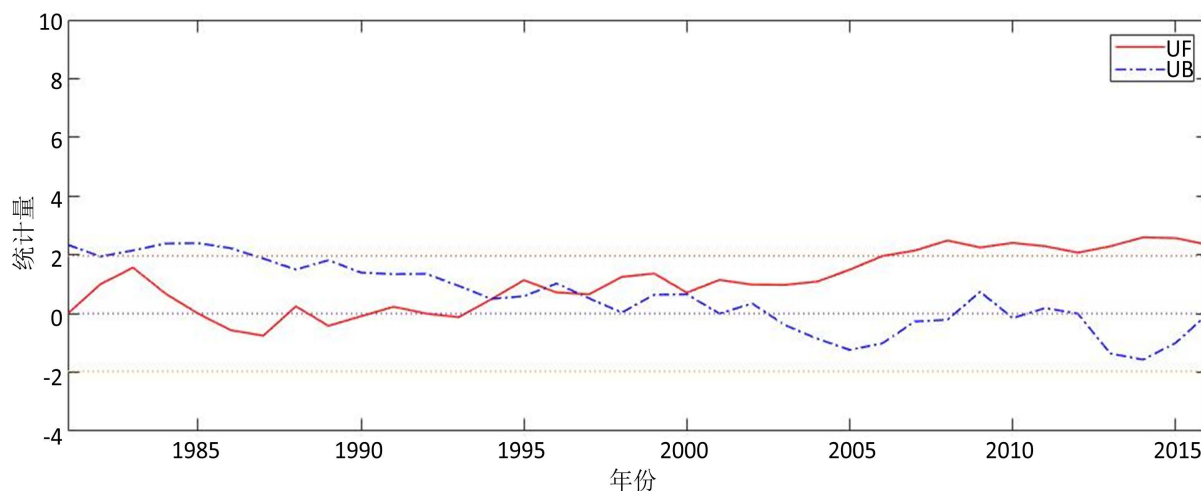


Figure 5. Mann-Kendall test of autumn mean temperature in Mongolia during 1981~2016

图5. 1981~2016 蒙古国秋季平均气温突变曲线图

由图5, 可以通过UF曲线看出在1981~1985年蒙古国秋季气温一直在均值以上, 这说明在这一时间段蒙古国气温呈短暂上升趋势。1986~1989年又出现更为短暂的下降趋势。1990~1993年曲线在均值附近波动。在1994~1996年3年间UF曲线与UB曲线相交了3次, 气温突变了三次, 在1996年之后气温呈显著上升趋势。

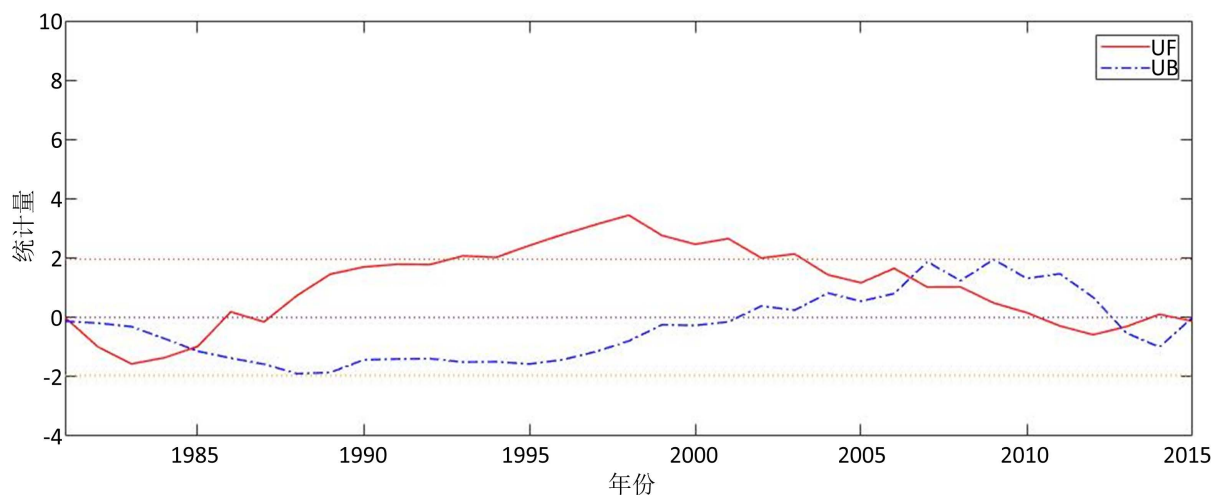


Figure 6. Mann-Kendall test of winter mean temperature in Mongolia during 1981~2016

图6. 1981~2016 蒙古国冬季平均气温突变曲线图

由图6, 可以通过UF曲线看出在1981~1987年蒙古国冬季气温一直呈下降趋势。1987~2010年蒙古国气温呈上升趋势。2010~2016年蒙古国气温呈下降趋势。1981~2016年, 正序曲线UF与反序曲线UB相交了3次, 表明蒙古国1981~2016年冬季气温变化了3次。1984年为气温上升突变点, 2006年为气温下降突变点, 2014年为气温上升突变点。

3.2. 蒙古国气温空间变化特征分析

气温空间变化特征分析

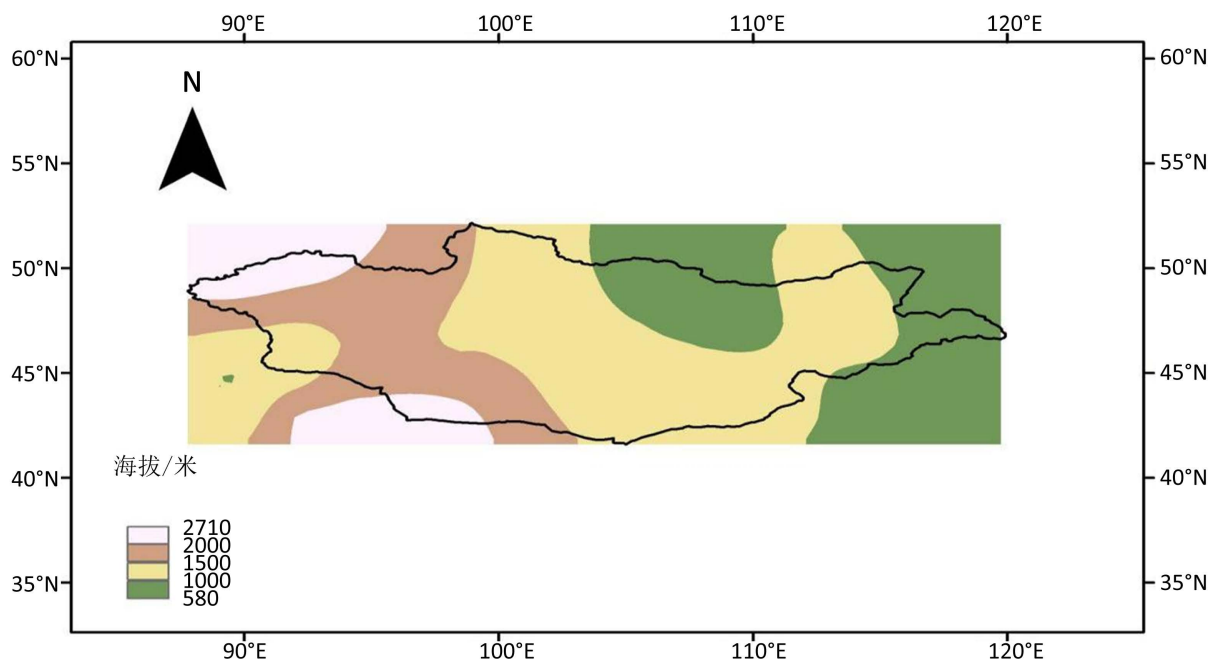


Figure 7. Elevation map of Mongolia

图 7. 蒙古国高程图

蒙古国地势大体呈自西向东逐渐降低的趋势，平均海拔为 1300 米，最低处为 580 米，海拔最高为 2710 米(见图 7)，中部和东部多为戈壁和荒漠，平均海拔超过 1000 米，西北部山地有少数林地，主要是阿尔泰山脉。蒙古国的主要山脉有西北-东南走向的阿尔泰山，平均海拔超过 1500 米，位于蒙古国西部；杭爱山，位于蒙古国中部，西北-东南走向海拔超过 1000 米；蒙古国东部的肯特山脉，东北西南走向山势平缓，平均海拔 1500 米左右。

本文利用 ArcGIS 软件将 1981~2016 年逐年数据进行处理，对数据进行逐点逐年的计算，得出蒙古国空间变化中各点的气温增加值的变化与相关性显著水平，展现出蒙古国近 30 年气温变化的空间特征。

图 8 中红色点覆盖区域为 36 年来年平均气温增加超过 2℃的地区。一共有 342 个红色点，占总数比例的 46.09%，这说明蒙古国自 20 世纪 80 年代以来平均气温上升超过 2℃的面积占全国总面积将近一半。这些地区在蒙古国的中部、西部、南部，包括了杭爱山区大部，阿尔泰山区大部，及蒙古国部分荒漠、戈壁、草原。黄色点覆盖区域为 36 年来年平均气温增加超过 1.5℃又小于 2℃的地区。一共有 279 个黄色点，占总数比例的 37.60%，这说明蒙古国自 20 世纪 80 年代以来平均气温上升大于 1℃小于 1.5℃的地区超过全国总面积的三分之一。这些地区位于肯特山区东北，位于蒙古国中部地区、西南地区，少数黄色点在蒙古国东北边境。蓝色点覆盖区域为 36 年来年平均气温增加低于 1.5℃的地区。一共有 121 个蓝色点，占总数比例的 16.31%，这说明蒙古国自 20 世纪 80 年代以来平均气温上升低于 1.5℃的地区不到全国总面积的六分之一。这些地区全部位于蒙古国北部边境。

图 9 中红色点为 36 年来年平均气温增加值通过相关性检验($P < 0.01$)的地区。一共有 500 个红色点，占总数比例的 67.39%，这说明蒙古国自 20 世纪 80 年代以来平均气温呈极显著增加的地区占全国总面积的三分之二。这些地区在蒙古国的中部、西部，包括了杭爱山区大部，阿尔泰山区大部以及蒙古国南方

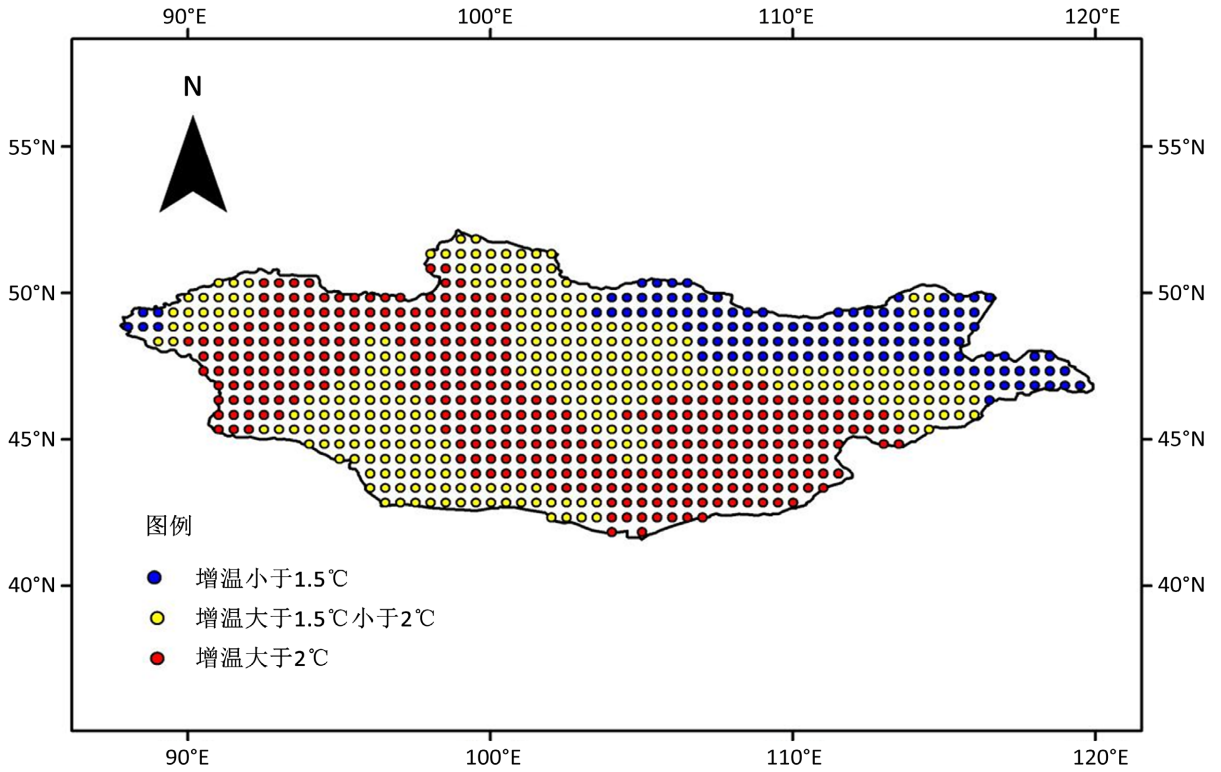


Figure 8. Spatial variation of temperature change in Mongolia
图 8. 蒙古国气温空间变化值图

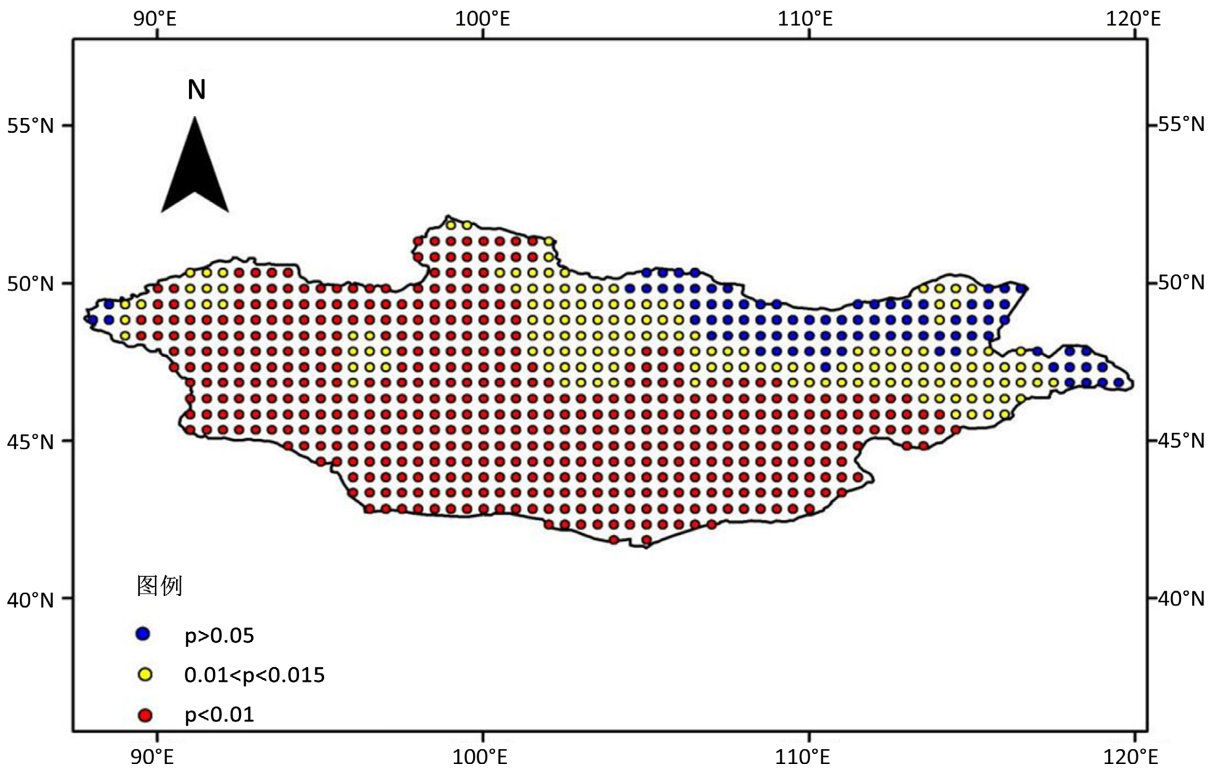


Figure 9. Correlation analysis chart of temperature change in Mongolia
图 9. 蒙古国气温空间变化相关性分析图

地区。黄色点为 36 年来年平均气温增加值通过相关性检验($0.01 < P < 0.05$)的地区。一共有 154 个黄色点, 占全国总面积的五分之一, 这说明蒙古国自 20 世纪 80 年代以来平均气温呈显著增加的地区接近全国总面积九成。黄色点的区域主要在蒙古国北部地区与东部地区, 还有少部分位于阿尔泰山区与杭爱山区之间。蓝色点为 36 年来年平均气温增加值没有通过相关性检验($P > 0.05$)的地区。一共有 88 个蓝红色点, 仅占总数比例的一成, 这说明蒙古国自 20 世纪 80 年代以来平均气温呈不显著增加的地区占全国总面积的一成。这些地区在蒙古国的东北部、北部, 位于肯特山区东北。

4. 讨论

4.1. 数据来源问题

截至目前, 国际上已经发布了 20 多套的气温再分析数据, 本文采用的是 CRU 数据集。研究中的计算结果可能会根据不同数据集产生不同的结果。国际上还有的比较好的数据集有 NCEP-R2 再分析数据, ERA Interim 再分析数据, RA-55 再分析数据等。马晓波(1995)利用蒙古 25 个台站 52 年月平均气温资料(1940~1991 年)分析了蒙古的气温变化趋势, 结果表明, 52 年来蒙古国年平均气温以 $0.0190^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的速率上升, 冬、春季和秋季气温呈上升趋势, 冬季上升速率最大, 为 $0.0540^{\circ}\text{C}/\text{年}$; 夏季气温以 $-0.0110^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的速率下降[14]。由于数据源与时间区间的不同, 本文的结论也与前人的研究相比: 年平均气温、春季气温、秋季气温都呈显著上升趋势。夏季气温、冬季气温的情况有所不同。根据蒙古国 1940~1991 年气象站的数据: 蒙古国 1940~1991 年冬季以 $0.0540^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 速率上升且上升速率最大; 夏季气温以 $-0.0110^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的速率下降。根据 CRU 再分析数据集: 蒙古国 1981~2016 年冬季气温以 $-0.0248^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的速率下降, 总体气温呈不显著下降趋势($P > 0.05$); 夏季气温以 $0.0714^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 的速率上升且上升速率最大。

4.2. 计算方法问题

本文运用线性预测的方法计算了蒙古国四季气温变化与年际气温变化, 线性预测与气温计算的匹配度高, 但是也只能作为一个短期的预测计算。其中, 蒙古国冬季气温的变化没有通过相关性检验。Mann-Kendall 突变检验方法多用于降水量与径流量的计算, 本文中蒙古国秋季、冬季气温出现了多个突变点, 其中的一些突变点很有可能是伪突变点, 需结合其他突变检验方法才能确定准确突变年限。本研究的蒙古国气温变化的计算结果中, 秋季气温变化于冬季气温变化均出现了多个突变点。不同的是, 秋季气温突变点是连续的 3 年, 出现在 1994~1996 年间; 冬季的突变点时间间隔较秋季长, 这也可能是蒙古国冬季气温变化没有通过相关性检验的原因之一。

5. 结论

1) 1981~2016 年蒙古国年平均气温为 0.49°C , 年平均气温线性变化倾向率为 $0.526^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 年平均气温增加了 1.894°C , 总体气温呈极显著上升趋势($P < 0.01$)。蒙古国四季气温倾向率由高到低依次是夏季、春季、秋季、冬季。

2) 蒙古国年平均气温增加突变点在 1988 年, 蒙古国年气温在 1988 年以后持续上升。蒙古国春季平均气温增加突变点在 1993 年, 蒙古国春季气温在 1993 年以后持续上升。蒙古国夏季平均气温增加突变点在 1996 年, 蒙古国夏季气温在 1996 年以后持续上升。蒙古国秋季平均气温在 1994~1996 年间突变了三次, 在 1996 年之后气温呈显著上升趋势。蒙古国冬季平均气温变化了 3 次。1984 年为气温上升突变点, 2006 年为气温下降突变点, 2014 年为气温上升突变点。

3) 蒙古国陆地超过 46% 的地区气温上升超过了 2°C , 蒙古国陆地超过 83% 的地区气温上升超过了 1.5°C ; 蒙古国陆地超过 67% 的地区气温呈极显著上升趋势, 蒙古国陆地超过 88% 的地区气温呈显著上升趋势。

参考文献

- [1] Zhao, L.Y., Ding, R. and Moore, J.C. (2016) The High Mountain Asia Glacier Contribution to Sea-Level Rise from 2000 to 2050. *Annals of Glaciology*, **57**, 223-231. <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A049>
- [2] Lizana, X.C., Avila, A., Tolaba, A. and Martinez, J.P. (2017) Field Responses of Potato to Increased Temperature during Tuber Bulking: Projection for Climate Change Scenarios, at High-Yield Environments of Southern Chile. *Agricultural and Forest Meteorology*, **239**, 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.012>
- [3] Pontes-da-Silva, E., Magnusson, W.E., Sinervo, B., Caetano, G.H., Miles, D.B., Colli, G.R., Diele-Viegas, L.M., Fenker, J., Santos, J.C. and Werneck, F.P. (2018) Extinction Risks Forced by Climatic Change and Intraspecific Variation in the Thermal Physiology of a Tropical Lizard. *Journal of Thermal Biology*, **73**, 50-60. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.01.013>
- [4] Sequeira, T.N., Santos, M.S. and Magalhães, M. (2018) Climate Change and Economic Growth: A Heterogeneous Panel Data Approach. *Environmental Science and Pollution Research*, **25**, 22725-22735. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2305-7>
- [5] Huang, J., Li, G.X., Liu, Y., Huang, J., Xu, G.Z., Qian, X.J., Cen, Z.D., Pan, X.C., Xu, A.M., Guo, X.B. and He, T.F. (2018) Projections for Temperature-Related Years of Life Lost from Cardiovascular Diseases in the Elderly in a Chinese City with Typical Subtropical Climate. *Environmental Research*, **167**, 614-621. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.08.024>
- [6] 龚道溢, 王绍武. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究[J]. 地理学报, 1999, 59(2): 125-133.
- [7] 王力群. 蒙古高压的周期变化和突变特征研究[C]//中国气象学会 2008 年年会第二届研究生年会分会场论文集. 2008: 235-243.
- [8] 丁一汇, 温市耕, 李运锦. 冬季西伯利亚高压动力结构的研究[J]. 气象学报, 1991, 49(4): 430-439.
- [9] 谢星昉. 中国冬季极端低温特征及其在全球增暖 1.5℃与 2℃下的预估[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
- [10] 李亚云. 中国东部 PM2.5 典型污染天气自组织分类与集成预报[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [11] Li, X.G. and Hu, N. (2015) *Practical Meteorological Statistical Method*. China Meteorological Press, Beijing.
- [12] 杨正华. 石羊河流域降水特征值及其变化分析[J]. 水利规划与设计, 2016(5): 23-25.
- [13] 神祥金, 吴正方, 杜海波. 近 50 年来吉林西部半干旱区气候变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(2): 190-196.
- [14] 马晓波. 50 年来蒙古国与北半球的气温变化[J]. 高原气象, 1995(3): 348-358.