

1981~2020年北半球冬季气温变化对降雪量的影响

王玮琪

哈尔滨师范大学地理科学学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2026年2月10日; 录用日期: 2026年3月6日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

全球变暖背景下, 北半球冬季气温和降雪量变化对全球气候系统具有重要影响。本文基于CRU和ERA5再分析数据, 采用趋势分析、Mann-Kendall突变检验和相关性分析等方法, 系统研究了1981~2020年北半球冬季气温和降雪量的时间变化特征及其相互关系。结果表明: (1) 1981~2020年北半球冬季平均气温为 0.43°C , 呈显著上升趋势($P < 0.05$), 变化速率为 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 40年间气温升高约 1.2°C , 于1996年发生显著突变, 突变后气温较突变前升高 0.66°C ; (2) 北半球年平均降雪量为 117.28 mm , 呈显著下降趋势($P < 0.05$), 变化速率为 $-2.24\text{ mm}/10\text{a}$, 40年间降雪量减少约 8.96 mm , 同样在1996年发生突变性减少, 突变后较突变前减少 5.75 mm ; (3) 北半球年平均气温与年降雪量呈极显著负相关关系($r = -0.49, P < 0.01$), 气温每升高 1°C , 降雪量平均减少约 3.44 mm 。研究揭示了全球变暖背景下北半球冬季“暖干化”趋势, 气温上升导致降雪量减少, 为理解气候变化对北半球冬季降雪的影响机制提供了科学依据。

关键词

北半球, 冬季气温, 降雪量, 气候变化

Impact of Winter Temperature Changes on Snowfall in the Northern Hemisphere from 1981 to 2020

WeiQi Wang

College of Geographical Science, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: February 10, 2026; accepted: March 6, 2026; published: March 19, 2026

Abstract

Under the background of global warming, changes in winter temperature and snowfall in the Northern Hemisphere have significant impacts on the global climate system. Based on CRU and ERA5 re-analysis data, this study systematically investigates the temporal variation characteristics of winter temperature and snowfall in the Northern Hemisphere from 1981 to 2020 and their relationship using trend analysis, Mann-Kendall mutation test, and correlation analysis. The results indicate that: (1) The average winter temperature in the Northern Hemisphere from 1981 to 2020 was 0.43°C , showing a significant upward trend ($P < 0.05$) with a rate of $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$. The temperature increased by approximately 1.2°C over the 40 years, with a significant mutation occurring in 1996. After the mutation, the temperature increased by 0.66°C compared to the period before the mutation. (2) The average annual snowfall in the Northern Hemisphere was 117.28 mm , showing a significant downward trend ($P < 0.05$) with a rate of $-2.24\text{ mm}/10\text{a}$. Snowfall decreased by approximately 8.96 mm over the 40 years, also experiencing a significant mutation decrease in 1996. After the mutation, snowfall decreased by 5.75 mm compared to the period before the mutation. (3) There is a highly significant negative correlation between the average annual temperature and annual snowfall in the Northern Hemisphere ($r = -0.49$, $P < 0.01$). For every 1°C increase in temperature, snowfall decreases by an average of approximately 3.44 mm . This study reveals a “warming and drying” trend in Northern Hemisphere winters under global warming, where rising temperatures lead to reduced snowfall, providing a scientific basis for understanding the impact mechanism of climate change on winter snowfall in the Northern Hemisphere.

Keywords

Northern Hemisphere, Winter Temperature, Snowfall, Climate Change

Copyright © 2026 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

降雪是北半球中高纬度地区重要的气候要素和水资源形式，对区域水循环、生态系统平衡和社会经济发展具有深远影响[1]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出，1850~2020 年全球地表温度上升约 1.1°C ，北半球升温幅度更为显著[2]。气温升高直接影响降水相态转换，改变降雪的时空分布格局[3]。目前关于气温变化对降雪影响的研究，不同学者关注的区域和时段有所不同。Brown 等研究发现，1967~2018 年北半球春季积雪覆盖面积以每 10 年 2.5% 的速率显著下降[4]。Krasting 等基于气候模式预估 21 世纪末北半球降雪量将减少，且高纬度地区预计会增加[5]。然而，也有研究发现部分地区降雪量呈增加趋势。1960~2020 年青藏高原冬季降雪量以 0.0735 mm/a ($P < 0.001$) 的速率增加[6]。1961~2017 年东北地区年降雪量以 $1.93\text{ mm}/10\text{a}$ ($P < 0.01$) 的速率显著增加[7]。1961~2017 年新疆北部地区的年平均降雪量以 $5.69\text{ mm}/10\text{a}$ ($P < 0.01$) 的速率显著增加[8] 这些研究结果的差异性表明，气温变化对降雪的影响具有明显的区域差异性和复杂性。全球变暖背景下，不同地区降雪总体呈下降趋势，但由于不同学者所用研究数据、研究区域和时段不同导致研究结果略有差异。本文想在此基础上了解 1981~2020 年北半球冬季气温对降雪量变化的影响。深入研究北半球气温变化对降雪量的影响具有重要的科学价值和现实意义。降雪是北半球重要的淡水资源储存形式，其变化直接关系到春夏季河流径流和农业灌溉[9]-[11]。积

雪覆盖通过反照率反馈机制影响区域和全球气候系统[12]。降雪变化对冰冻圈稳定性、山地生态系统和冬季产业经济产生重要影响[13]。因此,明确气温-降雪关系对于应对气候变化、保障水安全和制定适应策略具有重要意义。因此,本文基于 ERA5、CRU 再分析数据,系统研究 1981~2020 年北半球气温与降雪量的时间变化特征及其相关关系。

2. 数据来源

2.1. CRU 再分析资料

CRU (Climatic Research Unit)气温数据是由英国东英吉利大学气候研究中心发布的全球陆地气温格点数据集,该数据集基于全球气象站观测资料,经过质量控制和插值处理生成。CRU 数据具有时间序列长、质量可靠、空间覆盖全面等优点,已被广泛应用于全球和区域气候变化研究中[11]。本文使用 CRU TS 4.06 版本数据,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$,时间范围为 1979 年 1 月~2020 年 12 月。数据来源网址:

<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>

ERA5 降雪再分析资料

ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)是欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的第五代全球大气再分析数据集,是目前分辨率最高、质量最优的再分析产品之一。ERA5 采用先进的数据同化系统,整合了大量卫星观测、地面观测和探空观测资料[12]。本文使用 ERA5 月平均降雪量数据(单位:米水当量),空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间范围为 1979 年 1 月~2020 年 12 月。数据来源网址:<https://cds.climate.copernicus.eu/>。

2.2. 研究方法

2.2.1. 线性趋势分析法

采用线性趋势分析方法分析降雪量的变化特征。建立降雪量(y)与所对应时间(x)的一元线性回归方程。具体计算公式如下:

$$y = ax + b \quad (1)$$

式中: a 为线性回归系数,表示降雪量变化速率。 a 为正值表示降雪量呈上升趋势, a 为负值表示降雪量下降趋势,用 t 检验确定方程是否具有显著性。

2.2.2. Mann-Kendall 突变检验法

针对具有 N 个样本量的时间序列($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$)构造一秩序列:

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

S_k 表示累计序列, r_i 表示 $x_i > x_j (1 \leq j \leq i)$ 的样本累计数。当 $r_i = 1$ 时, $x_i > x_j$; 当 $r_i = 0$ 时, $x_i < x_j$; $j = 1, 2, \dots, i$ 。在时间序列随机独立假设定义下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E_{(S_k)}]}{\sqrt{Var_{(S_k)}}} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

$$E_{(S_k)} = \frac{n(n+1)}{4} \quad (4)$$

$$Var_{(S_k)} = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (5)$$

其中 $UF_1 = 0$, $E_{(S_k)}$ 、 $Var_{(S_k)}$ 分别为 S_k 的均值和方差。

UF 是按照时间正序绘制的曲线, UB 则是按照时间逆序绘制的曲线, 在给定置信水平 α , 若两条趋势线 UF 和 UB 在 $-\alpha$ 与 α 限定区间内存在交点, 则说明此交点为曲线变化的突变点; 若突变点对应的数值大于或小于 0, 则表明该数据存在明显的突变上升或突变下降趋势。

2.2.3. 相关分析法

皮尔逊相关系数简是用于度量两个变量 x 和 y 之间的相关(线性相关), 其值介于 -1 与 1 之间。本文主要建立主要降雪量与气温之间的关联。具体计算公式如下:

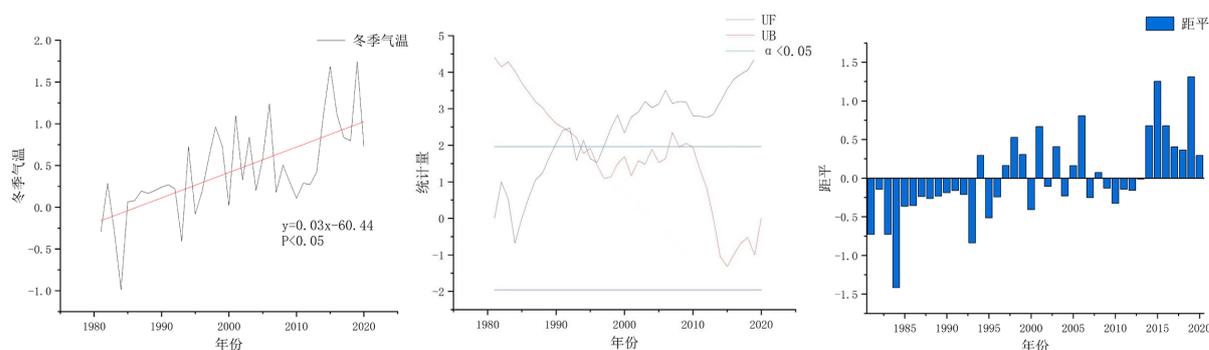
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中 r 为 x 、 y 两变量的相关系数, n 为研究时段的年数, 当 $r > 0$ 时, 表示两个变量之间呈正相关关系; 当 $r < 0$ 时, 表示两个变量之间呈负相关关系。

3. 结果分析

3.1. 北半球气温时空变化特征

统计分析 1981~2020 年北半球冬季平均气温变化特征。结果表明, 1981~2020 年北半球冬季平均气温为 0.43°C , 介于 -0.99°C ~ 1.74°C 之间。冬季最高气温出现在 2019 年, 为 1.74°C ; 年均最低气温出现在 1984 年, 为 -0.99°C ; 40 年间冬季平均最大温差为 2.73°C 。通过趋势分析发现(图 1(a)), 1981~2020 年北半球冬季平均气温呈显著上升趋势($P < 0.05$), 变化速率为 $0.30^\circ\text{C}/10\text{a}$, 40 年间气温升高了约 1.2°C 。MK 检验结合距平图分析发现(图 1(b)、图 1(c)), 1981~2020 年北半球冬季平均气温于 1996 年发生显著突变, 突变后气温显著高于突变前。1979~1996 冬季平均气温为 0.04°C , 1997~2020 年冬季平均气温为 0.70°C , 突变后气温升高了 0.66°C 。距平分析显示, 1981~1996 年大部分年份为负距平, 1996 年后多为正距平, 表明北半球冬季进入明显的暖期。

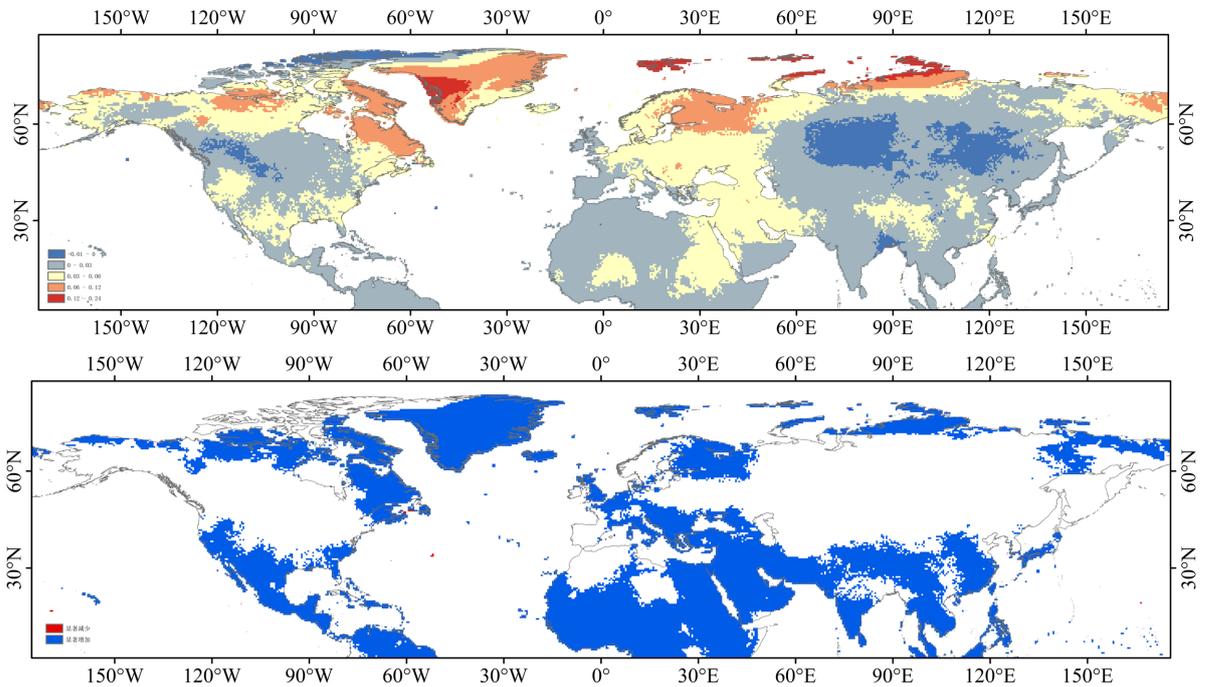


注: 从左至右依次为趋势变化(a)、MK 检验图(b)、距平图(c)。

Figure 1. Winter temperature changes in the Northern Hemisphere from 1981 to 2020

图 1. 1981~2020 年北半球冬季气温变化图

基于 1981~2020 年北半球冬季气温数据, 绘制了气温变化趋势空间分布图(图 2(a)、图 2(b))结果表明, 1981~2020 年北半球冬季整体呈显著升温趋势, 高纬度地区, 尤其是北极及其周边区域, 增温速率最大。中纬度地区, 大部分地区呈现出较快的增温趋势, 为。低纬度地区增温幅度相对较小, 气温变化趋势较为平缓, 为。由此看出, 北半球冬季气温变化的空间格局, 总体符合全球变暖的特征。



注：依次为趋势变化(a)、显著性图(b)。该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为GS(2021)5443号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 2. Spatial distribution of winter temperature changes in the Northern Hemisphere from 1981 to 2020

图 2. 1981~2020 年北半球冬季气温空间变化图

3.2. 北半球降雪量时空变化特征

分析 1981~2020 年北半球年降雪量变化特征。结果表明，1981~2020 年北半球年平均降雪量为 117.28 mm，介于 109.81 mm~124.04 mm 之间。年降雪量最大值出现在 1982 年，为 124.04 mm；最小值出现在 2009 年，为 109.80 mm；40 年间年降雪量最大差值为 14.24 mm。趋势分析显示(图 2(a))，1981~2020 年北半球年降雪量呈显著下降趋势($P < 0.05$)，变化速率为 $-2.24 \text{ mm}/10\text{a}$ ，40 年间降雪量减少了约 8.96 mm。MK 检验结果显示(图 2(b))，北半球年降雪量于 1996 年发生突变性减少。1981~1996 年平均降雪量为 120.73 mm，1996~2020 年平均降雪量为 114.98 mm，突变后降雪量减少了 5.75 mm。距平分析(图 2(c))显示，1981~1996 年多为正距平，1996 年后负距平年份明显增多，表明北半球进入降雪减少期。

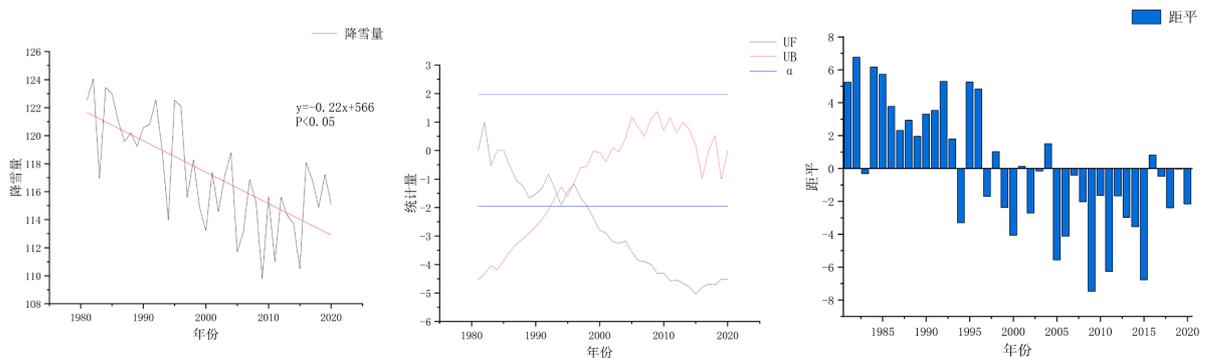
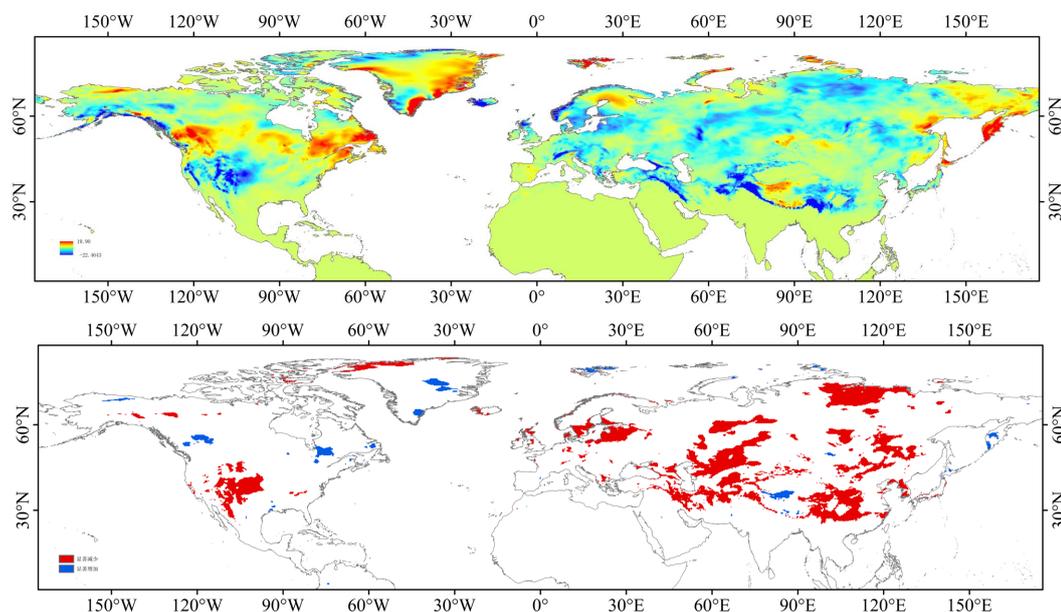


Figure 3. Snowfall changes in the Northern Hemisphere from 1981 to 2020

图 3. 1981~2020 年北半球降雪量变化图

分析 1981~2020 年北半球年降雪量空间变化特征(图 4(a)、图 4(b)), 北半球冬季降雪量空间变化分布呈现出明显的空间异质性。大部分显著减少区域分布在北半球中低纬度, 可以看出该区域随着冬季气温升高, 降雪量逐渐减少。少部分地区, 降雪量呈现出增加趋势, 主要分布在中高纬度地区。



注: 依次为趋势变化(a)、显著性图(b)。注: 该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2021)5443 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 4. Spatial distribution of snowfall changes in the Northern Hemisphere from 1981 to 2020

图 4. 1981~2020 年北半球温度空间变化图

3.3. 气温与降雪量的相关关系分析

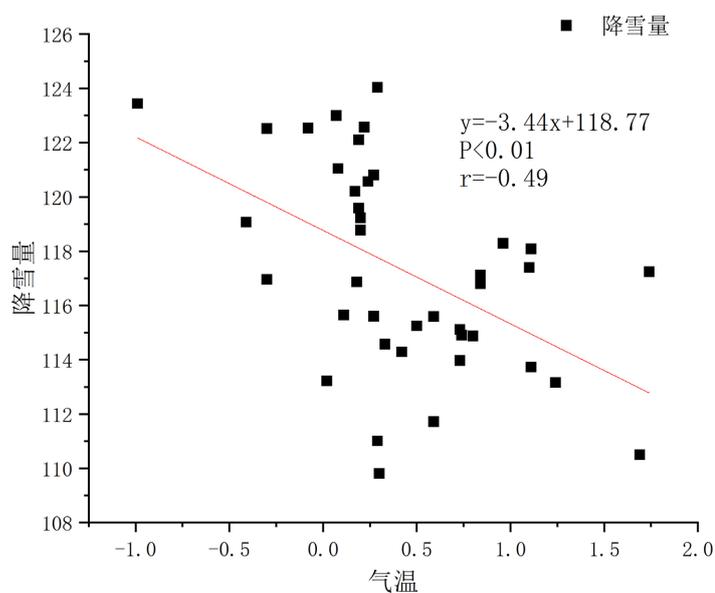
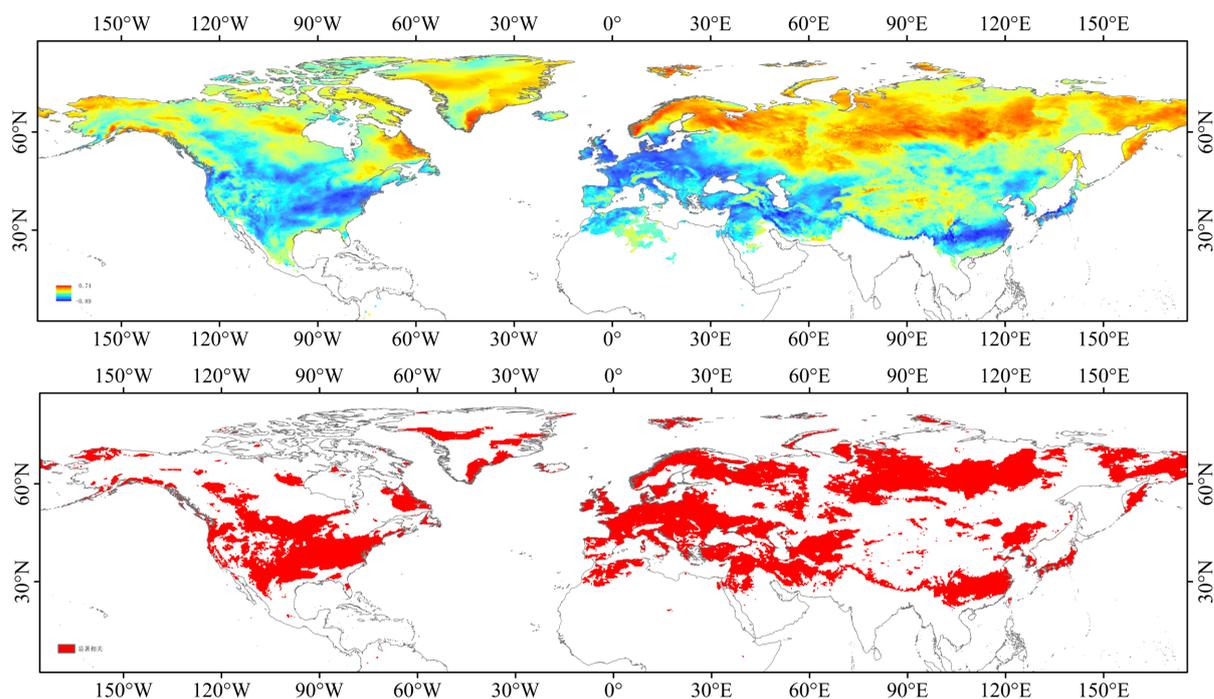


Figure 5. Fitted map of winter temperature and snowfall in the Northern Hemisphere from 1981 to 2020

图 5. 1981~2020 年北半球冬季气温 - 降雪拟合图

MK 突变结果显示气温与降雪量的突变时间均发生在 1996 年, 说明气温是影响降雪量变化的关键因子。计算 1981~2020 年北半球年平均气温与年降雪量的相关系数(图 5)。结果显示, 年平均气温与年降雪量呈极显著负相关关系, 相关系数 $r = -0.49$ ($P < 0.01$)。进一步通过散点图拟合分析(图 5), 根据回归方程, 气温每升高 1°C , 降雪量平均减少约 3.44 mm 。由此看出, 随着气候变暖, 降雪量呈减少趋势, 气温每升高 1°C , 降雪量减少 3.44 mm 。

气温与降雪量相关系数的空间分布(图 6)呈现出规律性的纬度地带性特征, 相关系数介于 $-0.88\sim-0.74$ 之间, 整体相关性较为显著。在中低纬度及其他大部分地区, 负相关系数占主导, 反映出气温升高导致降雪减少的空间特征, 随着气温升高降雪减少。



注: 依次为相关系数(a)、显著性图(b)。注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2021)5443 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 6. Spatial distribution of correlation coefficients between temperature and snowfall from 1981 to 2020

图 6. 1981~2020 年气温与降雪相关系数空间分布

4. 结论

本文利用再分析数据研究 1981~2020 年北半球降雪与气温时间变化特征, 与已有相关研究相比进一步明确了北半球气温变化特征, 为明确全球变暖背景下降雪量变化特征做出参考与贡献, 北半球降雪量时间变化特征具体如下: 1) 北半球冬季气温呈显著上升趋势。1981~2020 年北半球冬季平均气温为 0.43°C , 呈显著上升趋势($P < 0.05$), 变化速率为 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, 40 年间气温升高约 1.2°C 。气温于 1996 年发生显著突变, 突变后气温较突变前升高 0.66°C , 北半球冬季进入明显暖期。2) 北半球降雪量呈显著下降趋势。1981~2020 年北半球年平均降雪量为 117.28 mm , 呈显著下降趋势($P < 0.05$), 变化速率为 $-2.24\text{ mm}/10\text{a}$, 40 年间降雪量减少约 8.96 mm 。降雪量于 1996 年发生突变性减少, 突变后较突变前减少 5.75 mm , 北半球进入降雪减少期。3) 气温与降雪量的突变时间均发生在 1996 年北半球年平均气温与年降雪量呈极显著负相关关系($r = -0.49$, $P < 0.01$), 气温每升高 1°C , 降雪量平均减少约 3.44 mm 。全球变暖背景下北半

球冬季气候特征发生显著变化研究表明, 在全球变暖背景下, 北半球冬季呈现“暖干化”趋势, 气温持续升高导致降雪量持续减少, 这对区域水资源、生态环境和社会经济发展具有重要影响。

参考文献

- [1] Wieder, W.R., Kennedy, D., Lehner, F., Musselman, K.N., Rodgers, K.B., Rosenbloom, N., *et al.* (2022) Pervasive Alterations to Snow-Dominated Ecosystem Functions under Climate Change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **119**, e2202393119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2202393119>
- [2] IPCC (2021) Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- [3] Dai, A. (2008) Temperature and Pressure Dependence of the Rain-snow Phase Transition over Land and Ocean. *Geophysical Research Letters*, **35**, L12802. <https://doi.org/10.1029/2008gl033295>
- [4] Brown, R., Derksen, C. and Wang, L. (2010) A Multi-Data Set Analysis of Variability and Change in Arctic Spring Snow Cover Extent, 1967-2008. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **115**, D16. <https://doi.org/10.1029/2010jd013975>
- [5] Krasting, J.P., Broccoli, A.J., Dixon, K.W. and Lanzante, J.R. (2013) Future Changes in Northern Hemisphere Snowfall. *Journal of Climate*, **26**, 7813-7828. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00832.1>
- [6] 申红艳, 乔少博, 封国林, 龚志强, 温婷婷, 冯晓莉. 青藏高原冬季降雪特征及相关环流分析[J]. 高原气象, 2024, 43(4): 841-854.
- [7] 周晓宇, 赵春雨, 崔妍, 等. 1961-2017年中国东北地区降雪时空演变特征分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 766-779.
- [8] Yang, T., Li, Q., Liu, W., Liu, X., Li, L. and De Maeyer, P. (2020) Spatiotemporal Variability of Snowfall and Its Concentration in Northern Xinjiang, Northwest China. *Theoretical and Applied Climatology*, **139**, 445-464.
- [9] Barnett, T.P., Adam, J.C. and Lettenmaier, D.P. (2005) Potential Impacts of a Warming Climate on Water Availability in Snow-Dominated Regions. *Nature*, **438**, 303-309. <https://doi.org/10.1038/nature04141>
- [10] Mote, P.W., Li, S., Lettenmaier, D.P., Xiao, M. and Engel, R. (2018) Dramatic Declines in Snowpack in the Western US. *npj Climate and Atmospheric Science*, **1**, Article No. 2. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0012-1>
- [11] Aygün, O., Kinnard, C. and Campeau, S. (2019) Impacts of Climate Change on the Hydrology of Northern Midlatitude Cold Regions. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, **44**, 338-375. <https://doi.org/10.1177/0309133319878123>
- [12] Hall, A. and Qu, X. (2006) Using the Current Seasonal Cycle to Constrain Snow Albedo Feedback in Future Climate Change. *Geophysical Research Letters*, **33**, L03502. <https://doi.org/10.1029/2005gl025127>
- [13] Chapagain, B.P., Poudyal, N.C., Bowker, J.M., Askew, A.E., English, D.B.K. and Hodges, D.G. (2018) Potential Effects of Climate on Downhill Skiing and Snowboarding Demand and Value at U.S. National Forests. *The Journal of Park and Recreation Administration*, **36**, 75-96. <https://doi.org/10.18666/jpra-2018-v36-i2-8365>