

1961~2022年松花江流域降雪变化特征研究

魏雪妍

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11日; 录用日期: 2026年3月6日; 发布日期: 2026年3月19日

摘要

基于ERA5再分析逐日降雪量资料, 本文分析了1961~2022年松花江流域降雪量和降雪日数的时空演变特征及其对气候变暖的响应。结果表明, 流域多年平均年降雪量为32.56 mm, 呈极显著增加趋势, 并在2008年发生由少到多的突变, 突变后降雪量较突变前增加40%; 降雪量对1987年气温突变响应敏感。多年平均年降雪日数为24.49 d, 变化趋势不显著, 且未检测到明显突变, 对气温升高响应不敏感。空间分布上, 降雪量和降雪日数均呈东北部和南部多、西部和中部少的格局, 高值区位于小兴安岭东侧及长白山南段西侧, 低值区位于松嫩平原腹地及大兴安岭南段。空间趋势显示, 降雪量在流域东部、北部及西部显著增加, 而降雪日数在相同区域显著减少, 中部地区变化均不显著。时空耦合特征表明, 松花江流域降雪量的增加主要源于单次降雪强度的增强, 而非降雪频率的增多。研究结果可为区域水资源管理及气候变化适应提供科学依据。

关键词

ERA5, 松花江流域, 降雪量, 降雪日数, 时空变化, 趋势分析

Study on the Variation Characteristics of Snowfall over the Songhua River Basin from 1961 to 2022

Xueyan Wei

School of Geographic Sciences, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: February 11, 2026; accepted: March 6, 2026; published: March 19, 2026

Abstract

Based on the ERA5 reanalysis daily snowfall data, this study analyzes the spatiotemporal evolution characteristics of snowfall amount and snowfall days over the Songhua River Basin from 1961 to 2022, as well as their responses to climate warming. The results show that the multi-year mean

annual snowfall amount in the basin is 32.56 mm, exhibiting an extremely significant increasing trend (2.47 mm/10a, $P < 0.01$), with an abrupt change from low to high occurring in 2008. After the abrupt change, the snowfall amount increased by 40% compared to that before the change. The snowfall amount shows a sensitive response to the temperature abrupt change in 1987, with a lag of approximately 21 years. The multi-year mean annual snowfall days are 24.49 d, with no significant trend (-0.23 d/10a, $P > 0.05$) and no detectable abrupt change, indicating an insensitive response to temperature increase. Spatially, both snowfall amount and snowfall days exhibit a pattern of “more in the northeast and south, less in the west and central” regions. High-value areas are located on the eastern side of the Lesser Khingan Mountains and the western side of the southern section of the Changbai Mountains, while low-value areas are distributed in the hinterland of the Songnen Plain and the southern Greater Khingan Mountains. Spatial trend analysis reveals that snowfall amount has increased significantly in the eastern, northern, and western parts of the basin, whereas snowfall days have decreased significantly in the same regions, with no significant changes in the central plain area. This spatiotemporal coupling characteristic of increasing amount but decreasing days indicates that the increase in snowfall amount over the Songhua River Basin is primarily attributed to the enhancement of single snowfall event intensity, rather than an increase in snowfall frequency. The findings can provide scientific basis for regional water resource management and climate change adaptation.

Keywords

ERA5, Songhua River Basin, Snowfall Amount, Snowfall Days, Spatiotemporal Variation, Trend Analysis

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

在全球气候变暖背景下,降水的时空格局正在发生显著变化,其中雪作为固态降水的重要组成部分,其变化趋势尤其受到关注[1]。东北地区的农业生产、生态环境及社会经济活动对降雪具有高度敏感性[2]-[4]。一方面,降雪是维系土壤墒情、保障春播的重要水源;另一方面,其发生频率与强度的异常变化,也可能诱发连锁性的灾害风险。

IPCC 第六次评估报告明确指出,自 1850~1900 年以来,全球地表平均温度已上升约 1°C [5]。同时已有研究表明,1961~2022 年东北地区年平均气温升温速率为 $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,高于全国乃至全球近 50 年同期平均升温速率[6],导致东北地区降雪格局发生深刻变化,主要表现为降雪量和降雪强度显著增加,降雪日数显著减少,这种减少主要归因于微量降雪日数和小雪日数的显著减少[7]-[9]。现有研究多聚焦于极端强降雪事件,且松花江流域是东北地区乃至全国重要的粮食产区,同时也是气候变化最敏感的区域之一。因此,本文聚焦松花江流域,旨在通过揭示该流域降雪事件的时空分异规律,深化对气候变暖背景下固态降水响应过程的认识,更能为优化农业生产布局与冰雪灾害风险防范策略提供直接的科学依据,兼具重要的理论价值与实践意义。

2. 数据与方法

2.1. 数据

本文数据源自欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)

发布的第五代全球再分析资料 ERA5 [10]。该数据集通过同化大量地面、探空、卫星等历史观测资料, 提供了自 1950 年以来覆盖全球的高时空分辨率气象要素场, 已被广泛应用于气候变化检测、水循环研究等领域。数据可通过哥白尼气候变化服务(Copernicus Climate Change Service, C3S)气候数据存储库免费获取。本文选取了覆盖松花江流域的 ERA5 逐日降雪量数据集, 时间范围为 1961~2023 年, 空间为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 经纬网格覆盖所有陆地。为适应水文循环的季节性规律, 本文将水文年定义为当年 7 月 1 日至次年 6 月 30 日, 并以日降雪量 $\geq 0.1 \text{ mm}$ 作为有效降雪日的判别阈值, 该阈值与多数气象业务规范一致, 能有效滤除非实质性降雪事件。后续分析均基于上述预处理后的数据集展开。

2.2. 方法

2.2.1. 趋势分析

长时间序列数据往往存在着某种长期趋势, 分析这种长期趋势就是拟合一条恰当的趋势线, 用以概括地反映长期趋势的变化态势[11]。方程如下:

$$y = ax + b \quad (2-1)$$

式(2.1)中, a 值为正表示呈上升趋势, a 值为负呈下降趋势。采用 t 检验对线性趋势进行统计检验, 通过显著性水平检验说明变化趋势显著, 否则认为变化趋势为正常的气候波动[12]。

2.2.2. Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 法是一种非参数检验方法, 其优点是不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰[13] [14]。方法概述如下:

对于具有 n 个样本量的时间序列 x , 构造秩序列:

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

其中:

$$r_i = \begin{cases} 1(x_i > x_j) \\ 0(x_i \leq x_j) \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2-3)$$

可见, 秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于第 j 时刻数值的累计数。在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{Var(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (2-4)$$

其中: $UF_1 = 0$; $E(S_k)$, $Var(S_k)$ 分别是累计数 S_k 的均值和方差, 在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立, 且有相同连续分布时, 它们可由下式算出:

$$E(S_k) = \frac{n(n+1)}{4} \quad (2-5)$$

$$Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (2-6)$$

UF_i 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, 给定显著性水平 α , 若 $UF_i > U_\alpha$ 则表明序列存在明显的趋势变化。按时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 , 再重复上述过程, 使 $UB_k = -UF_k$, $k = n, n-1, \dots, 1$, $UB = 0$ 。

2.2.3. 方差分析法

单因素方差分析用来研究一个控制变量的不同水平是否对观测变量产生了显著影响[15]。以 F 检验来判断差异是否显著，公式为：

$$F = \frac{\frac{SS_A}{r-1}}{\frac{SS_E}{n-1}} \quad (2-7)$$

其中 SS_A 为组间离差平方和， SS_E 为组内离差平方和，若 $F > F_{\alpha/2}(r-1, n-r)$ ，则表明差异显著，反之则无显著差异。

3. 结果与分析

3.1. 松花江流域降雪量时间分布及变化趋势特征

1961~2022 年松花江流域多年平均降雪量为 32.56 mm，年降雪总量介于在 13.3 到 81.59 mm 之间，其中最高值出现在 2010 年，最低值出现在 1975 年，两者相差 68.29 mm。从年际变化来看(图 1(a))，1961~2022 年松花江流域降雪量呈现极显著增加趋势，变化速率为 2.47 mm/10a ($P < 0.01$)。降雪量的年际变异系数为 0.36，表明其相对变率较大，年际波动较为明显。Mann-Kendall 突变检验结果(图 1(b))结合距平分析(图 1(c))显示，松花江流域降雪量序列在 2008 年发生突变，1961~2007 年为相对偏少年，多年平均降雪量为 29.69 mm；2008~2022 年为相对偏多期，多年平均降雪量为 41.56 mm，突变后较突变前增加了 11.87 mm，占突变前的 40%。为探究降雪量变化对气候变暖的响应，进一步将其与已知的气温突变年份进行对比分析。根据已有研究结果，1987 年为气温突变年[16]。方差分析表明，1987 年前后两个阶段降雪量存在显著差异。结果表明，说明尽管降雪突变时间晚于气温突变，但降雪量对气温升高仍表现出敏感响应。

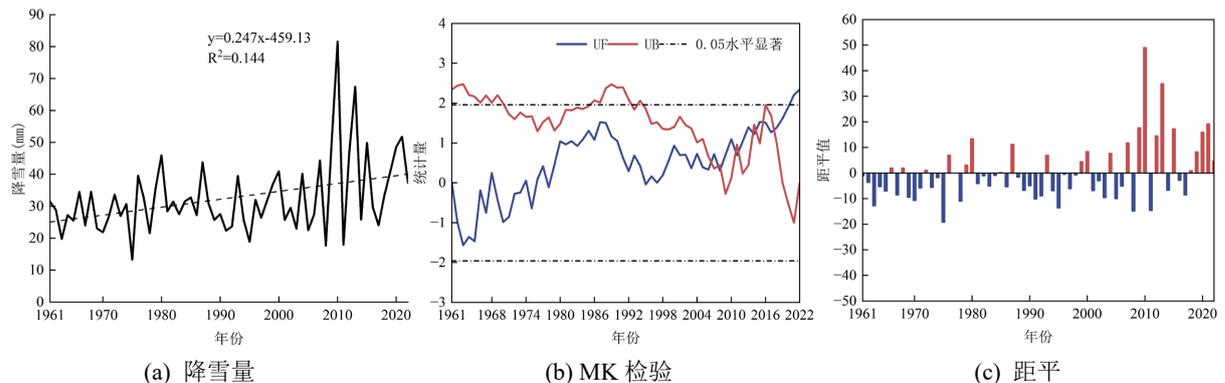


Figure 1. Spatial distribution, Mann-Kendall test, and anomaly of annual snowfall over the Songhua River Basin from 1961 to 2022

图 1. 1961~2022 年松花江流域年降雪量分布(a)、突变检验(b)及距平(c)

3.2. 松花江流域降雪量空间分布及变化趋势特征

基于 1961~2022 年 ERA5 降雪量资料分析表明(图 2)，松花江流域 62 年气候平均年降雪量呈现出显著的空间异质性，总体呈现东北部和南部多、西部和中部少的分布格局。高值区主要分布于小兴安岭东侧及长白山山脉南段西侧，低值区则分布于松嫩平原腹地及大兴安岭南段。从空间变化趋势来看(图 3)，1961~2022 年间松花江流域降雪量呈现出明显的区域性差异响应。其中，流域东部、北部及西部的大部分

地区降雪量呈显著增加趋势($P < 0.05$), 尤其是流域东部增势最为突出, 而流域中部的平原则表现为趋势不显著或微弱波动。

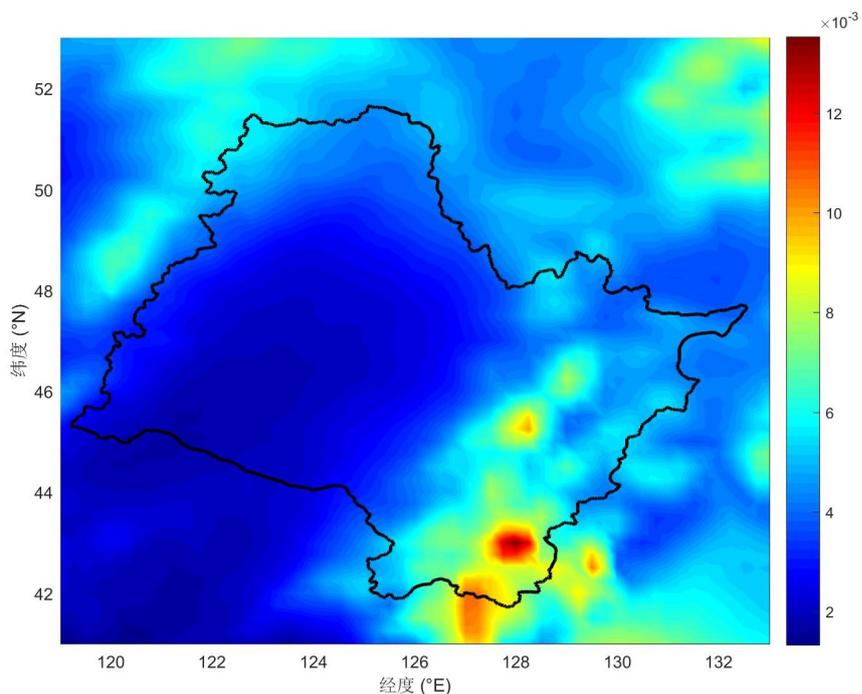


Figure 2. Spatial distribution of multi-year mean annual total snowfall over the Songhua River Basin (1961~2022)
图 2. 松花江流域多年平均年总降雪量空间分布(1961~2022 年)

松花江流域年总降雪量趋势 (1961~2022) 单位: m/10年

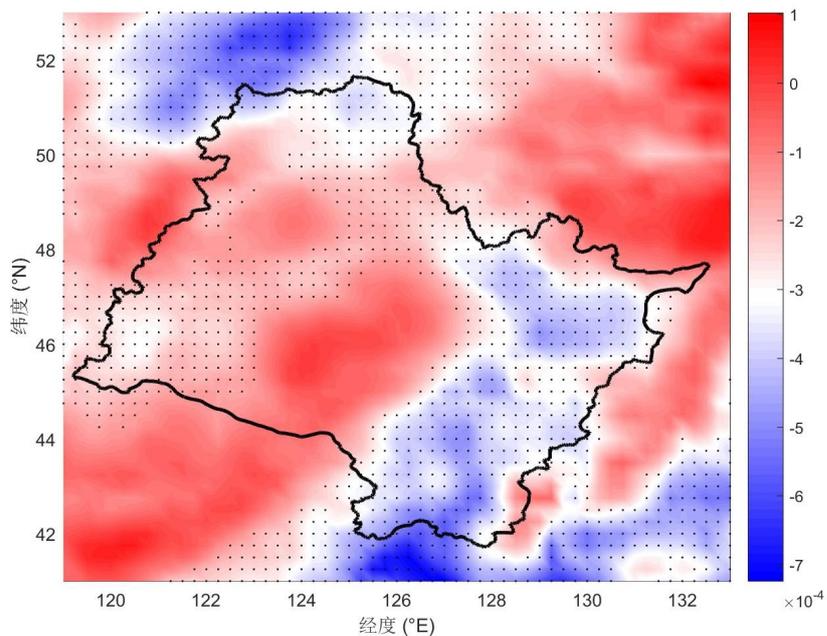


Figure 3. Spatial distribution of trends in annual total snowfall over the Songhua River Basin (1961~2022)
图 3. 松花江流域年总降雪量变化趋势空间分布(1961~2022 年)

3.3. 松花江流域降雪日数时间分布及变化趋势特征

1961~2022年松花江流域多年平均降雪日数为24.49 d, 年降雪总日数介于在14.24到44.27 d之间, 其中最高值出现在2010年, 最低值出现在2016年, 两者相差30.03 d。从年际变化来看(图4(a)), 1961~2022年松花江流域降雪日数无明显变化趋势, 变化速率为 $-0.23 \text{ d}/10\text{a}$ ($P > 0.05$)。降雪日数的年际变异系数为0.21, 表明其相对变率较大, 年际波动较为明显。Mann-Kendall 突变检验结果(图4(b))结合距平分析(图4(c))显示, 松花江流域降雪日数序列未发生显著突变。为探究降雪日数变化对气候变暖的响应, 进一步将其与已知的气温突变年份进行对比分析。根据已有研究结果, 1987年为气温突变年[16]。方差分析表明, 1987年前后两个阶段降雪日数无显著差异。结果表明, 研究时段内松花江流域降雪日数对气温升高响应不敏感。

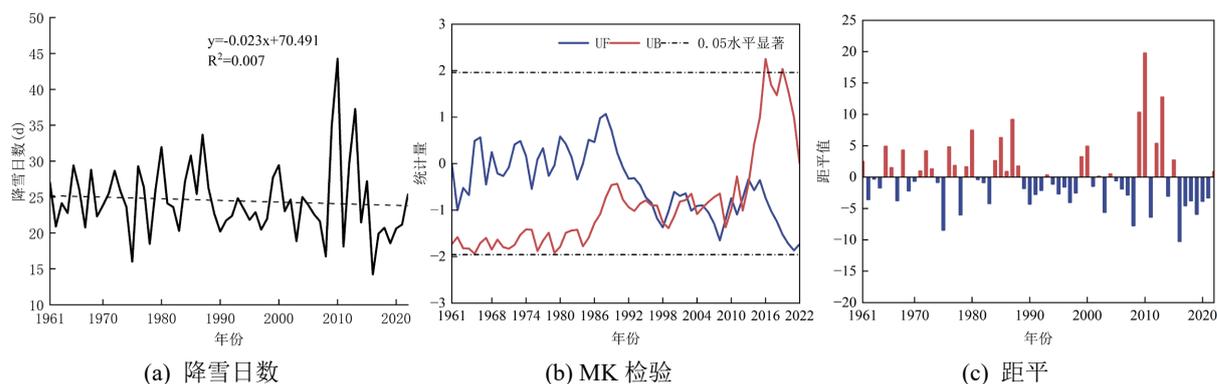


Figure 4. (a) Spatial distribution, (b) Mann-Kendall test, and (c) anomaly of annual snowfall day over the Songhua River Basin from 1961 to 2022

图 4. 1961~2022 年松花江流域年降雪日数分布(a)、突变检验(b)及距平(c)

3.4. 松花江流域降雪日数空间分布及变化趋势特征

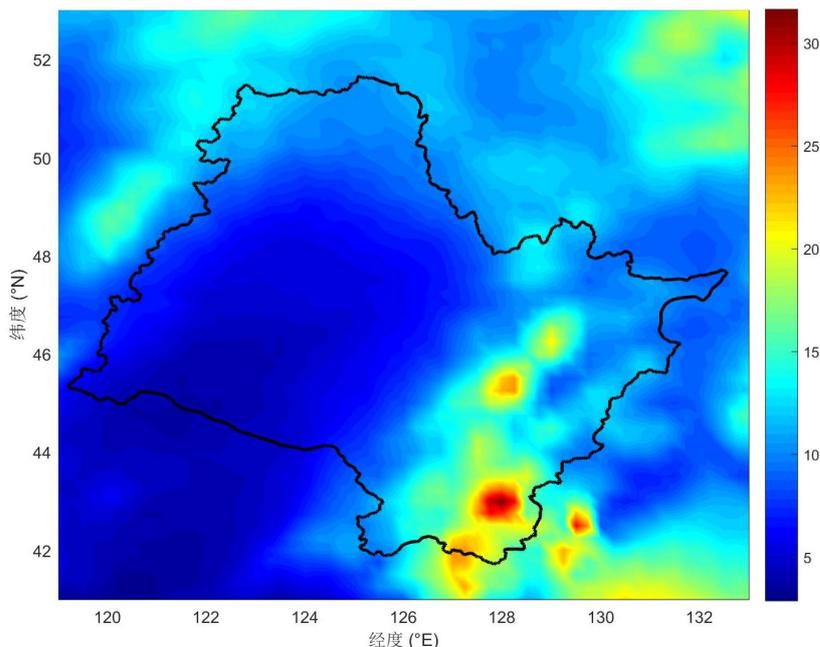


Figure 5. Spatial distribution of multi-year mean annual snowfall days over the Songhua River Basin (1961~2022)

图 5. 松花江流域多年平均年降雪日数空间分布(1961~2022 年)

基于 1961~2022 年 ERA5 逐日降雪量资料, 本文分析了松花江流域降雪日数的气候特征及其变化趋势。结果表明(图 5), 松花江流域 62 年气候平均年降雪日数呈现出显著的空间异质性, 整体表现为东北部和南部偏多、西部和中部偏少的分布格局。降雪日数与降雪量的空间分布具有较高的一致性。高值区主要集中在小兴安岭东侧以及长白山山脉南段西侧, 低值区则分布于松嫩平原腹地及大兴安岭南部一带。从长期变化趋势来看(图 6), 1961~2022 年间松花江流域降雪日数存在明显的区域性差异响应。其中, 流域东部、北部及西部大部分地区降雪日数呈显著减少趋势($P < 0.05$), 以东部地区减少最为明显; 而流域中部的平原则表现为趋势不显著或呈微弱波动变化。

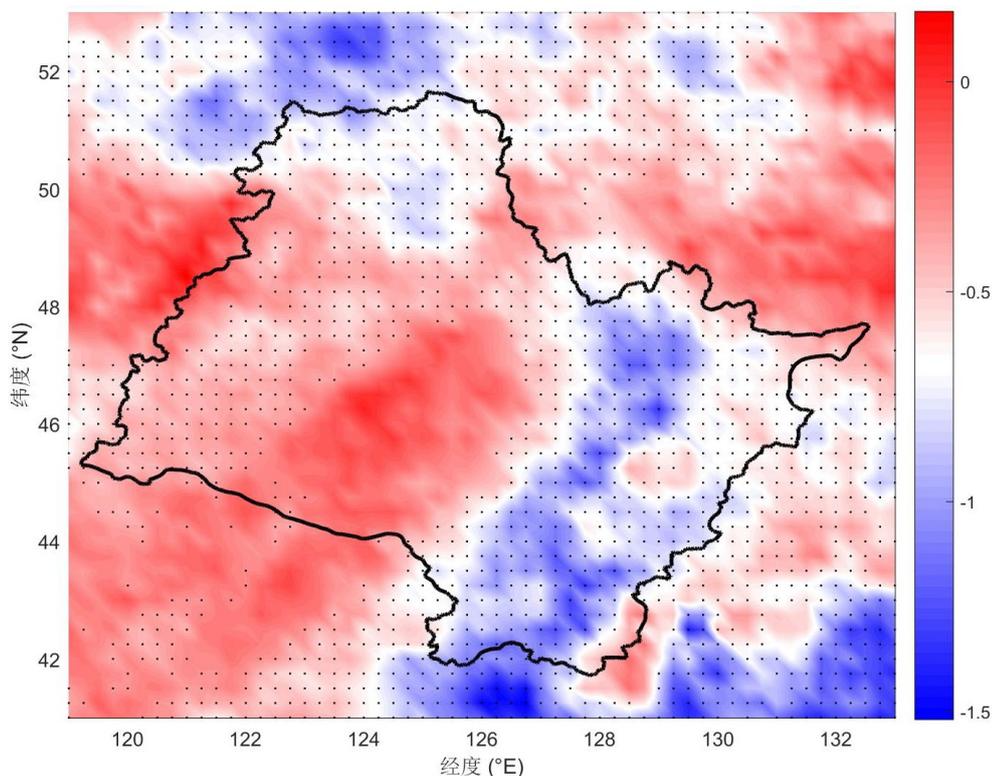


Figure 6. Spatial distribution of trends in annual snowfall days over the Songhua River Basin (1961~2022)
图 6. 松花江流域年降雪日数变化趋势空间分布(1961~2022 年)

4. 讨论

4.1. 数据来源问题

本研究采用的 ERA5 再分析资料是目前国际上应用最广泛的全球高分辨率再分析产品之一。相较于传统的地面观测资料, ERA5 具有空间覆盖完整、时间序列长、物理量协调一致等优势, 特别适用于区域尺度水文气候变化的系统分析。然而, 再分析资料毕竟是通过数值模式同化观测数据生成的产品, 其在复杂地形区域的降雪量估算仍存在一定不确定性。本文将降雪日阈值设定为 0.1 mm, 与气象业务规范一致, 可在一定程度上规避微量降雪识别误差带来的影响。未来若能结合高分辨率区域气候模式模拟或卫星反演资料开展多源数据融合与交叉验证, 将有助于进一步提高研究结论的可靠性。

4.2. 局限性与展望

首先, 在降雪机制方面, 本文尚未定量分析气温、水汽、环流等因素对降雪变化的贡献。后续可引

入物理诊断分析方法。其次,本研究未深入探讨降雪变化对春季融雪径流、农业土壤墒情等的潜在影响,而这些正是降雪水文效应的关键环节。未来可结合分布式水文模型,评估降雪格局变化对松花江流域水资源量的影响。最后,本研究识别出降雪量对气温突变存在滞后响应,但其物理机制尚需通过气候模式敏感性试验进一步验证。

5. 结论

本文基于 ERA5 再分析逐日降雪量资料,系统分析了 1961~2022 年松花江流域降雪量和降雪日数的时空分布特征、长期变化趋势及其对气候变暖的响应,主要结论如下:

(1) 降雪量方面,松花江流域多年平均年降雪量为 32.56 mm,年际波动明显,最高值出现在 2010 年,最低值出现在 1975 年。1961~2022 年间,流域平均降雪量呈极显著增加趋势,线性倾向率达 2.47 mm/10a ($P < 0.01$)。Mann-Kendall 突变检验表明,降雪量序列在 2008 年发生由少到多的突变,突变后平均降雪量较突变前增加了 11.87 mm,增幅达 40%。与已有研究揭示的气温突变年份对比发现,气温突变前后两个阶段降雪量存在显著差异,表明降雪量对气候变暖具有敏感响应,但突变时间滞后于气温突变约 21 年。

(2) 降雪日数方面,流域多年平均年降雪日数为 24.49 d,年际变幅为 14.24~44.27 d,最大值与最小值分别出现在 2010 年和 2016 年。1961~2022 年间降雪日数无明显趋势变化,线性倾向率仅为 -0.23 d/10a ($P > 0.05$),且未检测到显著突变点。以 1987 年气温突变为界,前后两个阶段降雪日数均值无显著差异,说明降雪日数对气温升高的响应不敏感。

(3) 空间分布上,降雪量与降雪日数的气候态分布高度一致,均呈现东北部和南部多、西部和中部偏少的格局。高值区主要位于小兴安岭东侧及长白山山脉南段西侧,低值区则分布于松嫩平原腹地及大兴安岭南段。

(4) 空间变化趋势表现出明显的区域差异。降雪量在流域东部、北部及西部大部分地区呈显著增加趋势($P < 0.05$),尤以东部增幅最为突出;而流域中部平原地区趋势不显著。与之相反,降雪日数在流域东部、北部及西部大部分地区呈显著减少趋势($P < 0.05$),东部减少最为明显,中部地区同样无明显变化。降雪量增加、降雪日数减少的空间特征进一步印证了降雪强度的增强。

参考文献

- [1] Bai, L., Shi, C., Shi, Q., Li, L., Wu, J., Yang, Y., et al. (2019) Change in the Spatiotemporal Pattern of Snowfall during the Cold Season under Climate Change in a Snow-dominated Region of China. *International Journal of Climatology*, 39, 5702-5719. <https://doi.org/10.1002/joc.6182>
- [2] 韩冬荟, 赵金媛, 胡琦, 等. 东北地区粮食作物产量变化特征及其对气象干旱的响应研究[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(3): 188-200.
- [3] 刘智明. 1980-2016 年四子王旗降雪变化特征及其对农牧业的影响[J]. 现代农业科技, 2018(11): 203, 5.
- [4] 孙继松梁, 陈敏, 廖晓农. 北京地区一次小雪天气过程造成路面交通严重受阻的成因分析[J]. 大气科学, 2003(6): 1057-1066.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) Climate Change 2021—The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [6] 《东北区域气候变化评估报告: 2020》编写委员会. 东北区域气候变化评估报告: 2020[M]. 北京: 气象出版社, 2021.
- [7] 周晓宇, 赵春雨, 崔妍, 等. 1961-2022 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): 766-79.
- [8] 王丽娜, 王团团, 祝青林, 等. 1961-2013 年大连地区降雪变化及成因分析[J]. 气象与环境学报, 2015, 31(5): 128-33.
- [9] 王颖, 赵春雨, 严晓瑜, 等. 1961-2007 年辽宁省降雪量和降雪日数的气候变化特征[J]. 冰川冻土, 2011, 33(4):

729-37.

- [10] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., *et al.* (2020) The ERA5 Global Reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146**, 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [11] Cai, Y., Yao, C., Lu, X., Zheng, F. and Qin, W. (2023) Dynamic Comparative Analysis of Different Types of Precipitation Caused by Landfalling Strong Typhoons over South China. *Atmospheric Research*, **289**, Article ID: 106740. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106740>
- [12] 贾俊平. 统计学[M]. 第7版. 北京: 中国人民大学出版社, 2018.
- [13] Partal, T. and Kahya, E. (2006) Trend Analysis in Turkish Precipitation Data. *Hydrological Processes*, **20**, 2011-2026. <https://doi.org/10.1002/hyp.5993>
- [14] Hirsch, R.M. and Slack, J.R. (1984) A Nonparametric Trend Test for Seasonal Data with Serial Dependence. *Water Resources Research*, **20**, 727-732. <https://doi.org/10.1029/wr020i006p00727>
- [15] 邹祎. SPSS 软件单因素方差分析的应用[J]. 价值工程, 2016, 35(34): 219-222.
- [16] 陈玉颖. 黑龙江省降水构成对气候变暖的响应特征分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.