

南四湖地区 1951—2020 年气温短期波动特征及其影响

刘杰^{1,2}, 何云川¹, 邓建明^{1,2*}, 汤祥明^{1,2}, 姚昕³

1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008

2. 中国科学院大学, 北京 100049

3. 聊城大学 地理与环境学院, 聊城 252000

摘要: 为探究南四湖地区气温短期波动的逐月、季节和年际变化特征, 并进一步分析 2013—2020 年气温短期波动对空气质量的影响, 利用南四湖地区 1951—2020 年最高气温 (T_{\max})、平均气温 (T_{mean}) 和最低气温 (T_{\min}) 的逐日数据, 基于均方差方法、分段线性回归、广义可加模型和 Mann-Kendall 趋势检验等进行分析。结果表明: (1) 南四湖地区 1951—1990 年 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的波动幅度下降趋势显著 ($P < 0.01$), 降幅分别为 0.166、0.107 和 0.129 $^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$; 1991—2020 年 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的波动幅度上升趋势不显著 ($P > 0.05$)。 (2) 南四湖地区 1951—1990 年气温短期波动季节差异明显, 冬季和春季波动降幅均显著 ($P < 0.05$), 而夏季仅 T_{\max} 的波动降幅显著 ($P < 0.05$); 1991—2020 年气温波动无明显季节差异 ($P > 0.05$)。 (3) 南四湖地区 T_{\max} 的逐月波动幅度最大, T_{\min} 次之, T_{mean} 最小。1951—1990 年, T_{\max} 在 1、2 和 6 月波动幅度下降趋势显著 ($\tau < 0$, $P < 0.05$), T_{\min} 在 1、3、4 和 6 月波动幅度下降趋势显著 ($P < 0.05$); 1991—2020 年 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的逐月波动幅度趋势均不显著 ($P > 0.05$)。 (4) 南四湖地区 T_{\min} 的逐月短期波动对 AQI ($P < 0.05$) 和空气污染物 ($P < 0.01$) 影响显著。研究揭示了南四湖地区气温短期波动变化规律及其对空气质量的影响, 为南四湖地区空气污染防控和生态调控提供理论基础。

关键词: 南四湖地区; 气温短期波动; 均方差; 广义可加模型; 空气质量

Characteristics and impacts of short-term temperature fluctuations in the Nansi Lake region from 1951 to 2020

LIU Jie^{1,2}, HE Yunchuan¹, DENG Jianming^{1,2*}, TANG Xiangming^{1,2}, YAO Xin³

1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China

Abstract: Background, aim, and scope Located across Shandong, Henan, Jiangsu, and Anhui provinces, the Nansi Lake region has prominent ecological environment characteristics. Moreover, the Nansi Lake is a vital

收稿日期: 2022-09-06; 录用日期: 2022-10-15; 网络出版: 2022-10-30

Received Date: 2022-09-06; **Accepted Date:** 2022-10-15; **Online first:** 2022-10-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41971146); 中国科学院南京地理与湖泊研究所青年科学家小组项目 (E1SL002)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41971146); Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences Foundation (E1SL002)

通信作者: 邓建明, E-mail: jmdeng@niglas.ac.cn

Corresponding Author: DENG Jianming, E-mail: jmdeng@niglas.ac.cn

引用格式: 刘杰, 何云川, 邓建明, 等. 2025. 南四湖地区 1951—2020 年气温短期波动特征及其影响 [J]. 地球环境学报, 16(2): 194–205. <https://cstr.cn/32259.14.JEE222083>.

Citation: Liu J, He Y C, Deng J M, et al. 2025. Characteristics and impacts of short-term temperature fluctuations in the Nansi Lake region from 1951 to 2020 [J]. *Journal of Earth Environment*, 16(2): 194–205. <https://cstr.cn/32259.14.JEE222083>.

regulation and storage lake in the China South-to-North Water Diversion Eastern Route Project. Studying the characteristics of short-term temperature fluctuations in the Nansi Lake region is of great significance for understanding the response of the ecological environment to climate change in this region. Therefore, this study explored monthly, seasonal, and interannual variations of the short-term temperature fluctuations, and their effects on air quality from 2013 to 2020 in the Nansi Lake region. **Materials and methods** The daily maximum temperature (T_{\max}), mean temperature (T_{mean}) and minimum temperature (T_{\min}) in the Nansi Lake region from 1951 to 2020 were analyzed by the root mean square (RMS), piecewise linear regression, generalized additive models and Mann-Kendall trend test. The warming mutation points in the Nansi Lake region were analyzed by piecewise linear regression. Then the short-term temperature fluctuation amplitudes before and after the warming mutation points were analyzed by the RMS method. Both the generalized additive models and the Mann-Kendall trend test were used to reveal the long-term trends of the short-term temperature fluctuation amplitudes in the Nansi Lake region, and to further analyze the impact of short-term temperature fluctuation amplitudes on air quality. **Results** (1) Annually, the fluctuation amplitudes of T_{\max} , T_{mean} , and T_{\min} decreased significantly from 1951 to 1990 ($P < 0.01$), the slope was 0.166, 0.107 and $0.129 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, respectively. While no clear trends were found from 1991 to 2020 ($P > 0.05$). (2) Seasonally, the fluctuation amplitudes of T_{\max} , T_{mean} , and T_{\min} in winter and spring decreased significantly ($P < 0.05$) from 1951 to 1990. However, only T_{\max} fluctuation amplitudes decreased significantly in summer ($P < 0.05$). The seasonal difference in temperature fluctuation amplitudes was not significant from 1991 to 2020 ($P > 0.05$). (3) The monthly fluctuation amplitudes of T_{\max} in the Nansi Lake region were the largest, and followed by fluctuation amplitudes of T_{\min} , the fluctuation amplitudes of T_{mean} were the smallest. From 1951 to 1990, the fluctuation amplitudes of T_{\max} in January, February, and June decreased significantly ($\tau < 0$, $P < 0.05$), as well as the fluctuation amplitudes of T_{\min} in January, March, April, and June ($P < 0.05$). From 1991 to 2020, the monthly fluctuation amplitudes of T_{\max} , T_{mean} , and T_{\min} were not significant ($P > 0.05$). (4) The short-term fluctuation amplitudes of T_{\min} in the Nansi Lake region had a significant impact on AQI (correlation analysis, $P < 0.05$) and air pollutants (correlation analysis, $P < 0.01$). **Discussion** Climate change would not only lead to an increase in mean temperature but also an increase in temperature fluctuations. The current study analyzed the long-term trends of temperature fluctuations. Compared with long-term temperature change, short-term temperature fluctuations would significantly impact aquatic ecosystems, air quality, and so on. The RMS was suitable for the short-term temperature fluctuation analysis and would provide a new idea for future climate-related research. The short-term temperature fluctuations showed a downward trend from 1951 to 1990 in the Nansi Lake region, indicating that the temperature fluctuations became gentle and the temperature became more stable. Previous studies found that the intra-seasonal variability of T_{mean} in winter showed a linear weakening trend from 1961 to 2018 in China, and the RMS was generally greater than $3.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$. It was weaker from the late 1980s to 2004 and stronger after 2005. In this study, the RMS of T_{mean} was generally greater than $2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ in winter from 1951 to 2020 in the Nansi Lake region and was lower in 2007 ($2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$), and the long-term temperature fluctuations showed a sawtooth shape. Several studies suggested that seasonal temperature fluctuations had weakened due to global warming. This study found that the short-term temperature fluctuations were not significant from 1991 to 2020 in the Nansi Lake region. Compared with 1951 to 1990, the seasonal temperature fluctuations were weakened. Recently, the short-term temperature fluctuations were relatively large in the Nansi Lake region, which might lead to an increase in extreme hydrological events, aggravation of lake heat waves, and aggravation of water eutrophication. **Conclusions** (1) From 1951 to 1990, the short-term temperature fluctuation amplitudes in winter and spring showed a downward trend, and the short-term change of temperature tended to be stable. (2) The short-term fluctuation amplitudes of T_{\min} had a great impact on air quality. The short-term fluctuation amplitudes of T_{\min} were significantly positively correlated with AQI, NO_2 , CO, $\text{PM}_{2.5}$, and PM_{10} , but negatively correlated with O_3 .

Recommendations and perspectives The intensity and frequency of short-term temperature fluctuations in the Nansi Lake region had increased in recent years. It was expected that the impact on the ecological environment would be more significant. While paying attention to global warming, follow-up research should also consider the impact of short-term temperature fluctuations on the ecological environment, and formulate corresponding strategies to mitigate the negative impact of temperature fluctuations.

Key words: the Nansi Lake region; short-term temperature fluctuations; root-mean-square (RMS); generalized additive models; air quality

《IPCC 全球升温 1.5 °C 特别报告》指出目前估计的人为全球变暖正在以 $0.2\text{ °C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速度增加, 在一些地区和季节, 气候变暖超过全球年平均水平, 甚至超过北极地区的 2—3 倍 (IPCC, 2018)。近年来, 生态环境对气候变化的响应更加明显 (van de Waal et al., 2010; O'Reilly et al., 2015)。在全球变化影响下气温“过山车”发生频率更高, 温度波动会更加剧烈。气候变化不仅会导致平均温度升高, 也会导致气温波动幅度增大。目前国内外广泛关注平均气温的长期变化趋势 (Dhorde et al., 2009; 刘凯等, 2020), 然而气温往往是波动的, 相较于气温的长期变化, 短期的气温波动对水生生态系统 (Pushkar' et al., 2010; Pacifici et al., 2015) 和空气质量 (Ikram, 2015) 等会产生显著影响。已有研究通过为期 15 d 的实验发现当气温波动较大时, 生物多样性和生态系统功能之间关系的斜率更陡, 表明生物多样性丧失对生态系统功能的负面影响比环境稳定时更强 (Bestion et al., 2021)。温度波动对空气质量和呼吸系统疾病存在季节性影响, 极大程度温度升高对北京市 AQI 的影响较大, 且极大程度温度降低会导致夏季和冬季滞后期 AQI 的大幅升高, 显著影响滞后期的空气质量 (Ikram, 2015)。

许多研究应用不同方法探究气温短期波动变化规律。例如: 以 7 d 为时间窗口评估 1951—2019 年中国气温短期波动频率和幅度, 指出长期气温的短期波动在 1990 年以前主要呈下降趋势 (He et al., 2022)。基于隔日温差对中国 1957—2015 年春季短期气温波动及其长期变化趋势进行分析 (彭凯等, 2019); 但气温产生波动不仅仅体现在相邻两天, 所以该方法不能较好地衡量不同时间尺度下的气温波动过程。均方差 (root-mean-square, RMS) 方法是计算衡量数据波动幅度的常用方法, 通常用来分析紊流大小 (Zhang et al., 2018) 和波动幅度变化 (严华生等, 2001)。已

有研究分析了 1960—2009 年中国冬季气温的年际 RMS 分布特征, 发现中国北方的 RMS 普遍大于南方, 即北方气温波动更大 (房一禾, 2012)。而利用中国 1961—2018 年冬季逐日平均气温 RMS 分析冬季气温季节内变率特征, 发现季节内变率总体呈线性减弱趋势 (申红艳等, 2021)。RMS 方法可以消除季节性影响, 并能够在逐月到逐年范围内分析气温短期波动, 为此后相关气候研究提供一种新思路。

南四湖地区地跨山东、河南、江苏和安徽四省, 生态环境特点突出, 该区域地面组成物质疏松、水土流失严重、水资源短缺、空气污染也较为严重; 且南四湖是南水北调东线工程中重要的调蓄湖泊, 拥有大量的湿地等重要生态系统, 对当地经济、社会发展以及生态环境改善发挥着十分重要的作用, 研究南四湖地区气温短期波动特征对认识该地区生态环境对气候变化的响应具有重要意义。本研究根据逐月 RMS 值定义气温短期波动幅度大小, 利用南四湖地区 1951—2020 年逐日气温观测数据, 首先通过分段线性回归 (piecewise linear regression) 对南四湖地区变暖突变点进行识别, 然后使用 RMS 方法并通过广义可加模型 (generalized additive models, GAM) 和 Mann-Kendall 趋势检验 (M-K 检验) 对比分析变暖突变点前后的气温短期波动特征, 揭示南四湖地区气温短期波动的变化规律, 进一步分析气温短期波动对空气质量的影响, 为南四湖地区空气污染防控和生态调控提供理论基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况与数据来源

南四湖地区 (图 1) 属暖温带冬夏季风气候区, 地跨山东、河南、江苏、安徽四个省 (杨秀芹等, 2008; 刘君德, 2012)。利用南四湖地区兖州站 (54916)、砀山站 (58015)、徐州站

(58027)、邳州站(58026)、定陶站(54909)和费县站(54929)6个国家气象观测站1951—2020年最高气温(T_{\max})、平均气温(T_{mean})和最低气温(T_{\min})的逐日数据。逐日气温数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>)。

气象站点分布在各方位,可以较好地覆盖南四湖地区,具有代表性。2013—2020年逐月空气质量(AQI、SO₂、NO₂、CO、O₃、PM_{2.5}和PM₁₀)数据来自中国空气质量在线监测分析平台(<https://www.aqistudy.cn/historydata/>)。

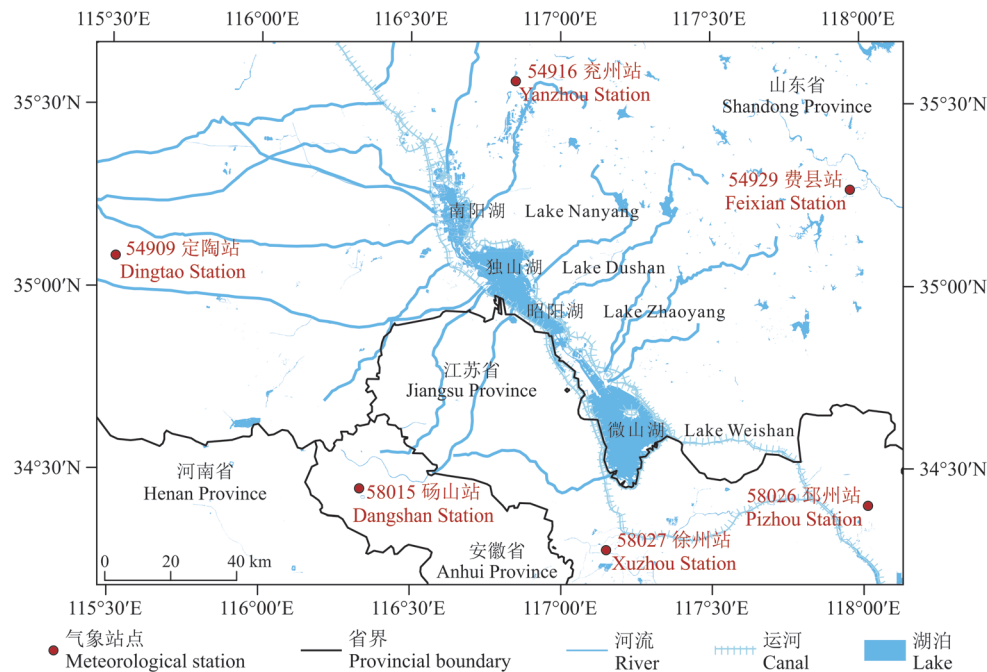


图1 南四湖地区气象站点分布示意

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Nansi Lake region

1.2 研究方法

为避免气温年内自然变动的影 响,首先将原始逐日气温数据进行距平计算,得到逐日气温距平值,再进行下一步分析。距平值越大,表明每日气温波动越大,气温变化越不稳定。根据逐日气温距平值的离散程度定义气温短期波动幅度大小,即通过逐月 RMS 表征月尺度气温短期波动幅度大小;并通过 τ 值的大小表征月尺度气温短期波动幅度升降。RMS (式中记为 W) 计算公式如下:

$$W = \sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 \div n}, i=1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中: X_i 为第 i 天的气温距平值; n 为每月的天数; W 为各月均方差,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

数据处理使用 R-4.4.0 (<https://www.R-project.org/>) 完成,分段线性回归通过 SiZer 包中“piecewise.linear”函数实现 (Sonderegger, 2022-07-09), 计算 RMS 值通过 seewave 包中“rms”函

数实现 (Sueur et al., 2008)。RMS 逐月差异采用 M-K 检验 (Sun et al., 2016), 主要使用 Kendall 包中“Mann kendall”函数计算 τ 值 (McLeod, 2022-03-20), 使用 ggplot2 包 (Wickham, 2009) 绘图。RMS 的季节和年平均值长期变化趋势采用 GAM 模型进行分析, 主要通过 mgcv 包中“gam”函数实现 (Wood, 2006), 根据调整后的 r^2 (r^2_{adj}) 和 P 值评估模型的拟合优度和显著性 (邓建明等, 2015)。使用 psych 包 (<https://CRAN.R-project.org/package=psych>), 通过“corr.test”函数计算 RMS 与 AQI 和空气污染物之间的 Spearman 相关系数 R 和显著性 P 值; 使用 pheatmap 包 (Kolde, 2019-01-04) 绘制相关性热图并标记显著性。

2 结果与分析

2.1 南四湖地区 1951—2020 年气温突变特征

通过分段线性回归对南四湖地区 1951—2020 年平均气温和气温滑动 K 值 (以 5 a 为时间窗口的

气温滑动平均值)进行分析,发现南四湖地区在1985—1990年发生了变暖突变,在这一时间段前后增温模式有较大差异,且1990年后的变暖速率($0.293\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$)是1990年前($0.145\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$)

的2倍多。因此,以1990年为界分为2个时间段对比分析南四湖地区近70a逐月、季节和年际气温短期波动特征(图2),揭示南四湖地区气温短期波动变化规律及其影响。

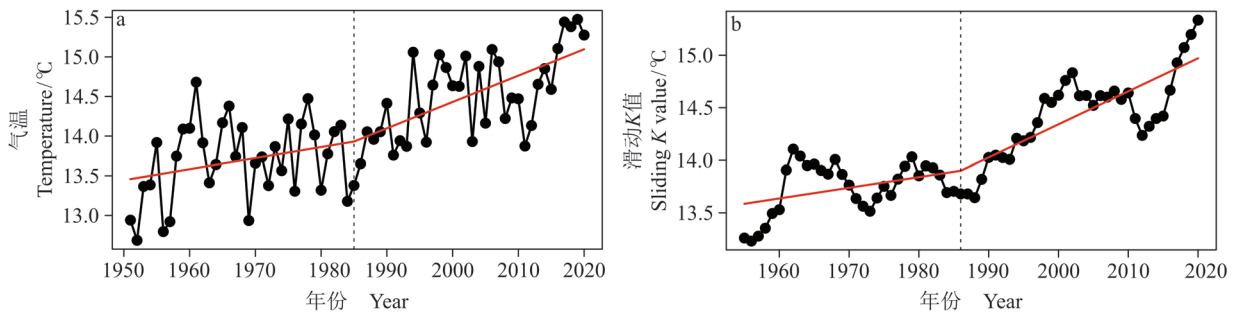


图2 南四湖地区1951—2020年平均气温变化特征
Fig. 2 Variation characteristics of average temperature in the Nansi Lake region from 1951 to 2020

2.2 南四湖地区 RMS 年内变化特征

总体来看,南四湖地区1951—2020年 T_{\max} 的逐月波动幅度最大, T_{\min} 次之, T_{mean} 最小。1—12月,气温短期波动幅度逐月RMS先减小后增加。1951—1990年,2、3和4月的 T_{\max} 短期波动幅度相对较大,RMS值均大于 $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;8月的 T_{\max} 短期波动幅度最小。2、3、4和12月的 T_{mean} 短期波动幅度相对较大,RMS值均大于 $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;9月的 T_{mean} 短期波动幅度最小。1、2、11和12月的 T_{\min}

短期波动幅度相对较大,RMS值也均大于 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$;7月的 T_{\min} 短期波动幅度最小(图3)。

1991—2020年,2、3月的 T_{\max} 短期波动幅度相对较大,RMS值均大于 $4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;8月的 T_{\max} 短期波动幅度最小。2、3和4月的 T_{mean} 短期波动幅度相对较大,RMS值均大于 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}$;8月的 T_{mean} 短期波动幅度最小。1、2、3、4、11和12月的 T_{\min} 短期波动幅度相对较大,RMS值也均大于 $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;6月的 T_{\min} 短期波动幅度最小(图3)。

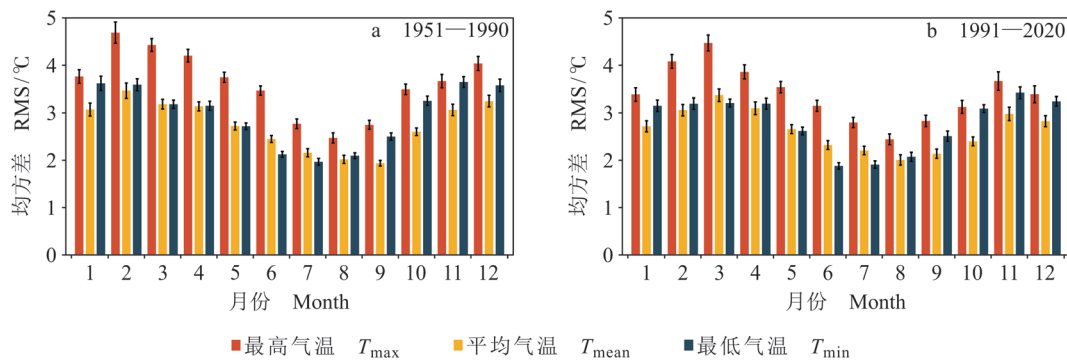


图3 南四湖地区RMS年内变化特征
Fig. 3 Variation characteristics of intra-annual RMS in the Nansi Lake region

2.3 南四湖地区 RMS 长期变化特征逐月差异检验

1951—1990年南四湖地区, T_{\max} 在10月波动幅度呈上升趋势(M-K检验,下同)($\tau > 0, P > 0.05$);而在其余各月波动幅度均呈下降趋势,其中,在1、2和6月的波动幅度下降趋势显著

($\tau < 0, P < 0.05$) (图4a)。 T_{mean} 在5、9月波动幅度呈上升趋势($\tau > 0, P > 0.05$);而在其余各月波动幅度均呈下降趋势($\tau < 0, P > 0.05$) (图4c)。 T_{\min} 在各月中波动幅度均呈下降趋势($\tau < 0$),其中,在1、4和6月波动幅度下降趋势显著

($P < 0.05$), 在3月波动幅度下降趋势极显著 ($P < 0.01$) (图4e)。

1991—2020年南四湖地区, T_{\max} 在3、4和11月波动幅度呈下降趋势 ($\tau < 0, P > 0.05$); 在其余各月波动幅度均呈上升趋势但不显著 ($\tau > 0, P > 0.05$) (图4b)。 T_{mean} 在9—12月波动幅

度呈下降趋势 ($\tau < 0, P > 0.05$); 而在其余各月波动幅度均呈上升趋势但不显著 ($\tau > 0, P > 0.05$) (图4d)。 T_{\min} 在6、9、10和12月波动幅度均呈下降趋势 ($\tau < 0, P > 0.05$); 而在其余各月波动幅度均呈上升趋势但不显著 ($\tau > 0, P > 0.05$) (图4f)。

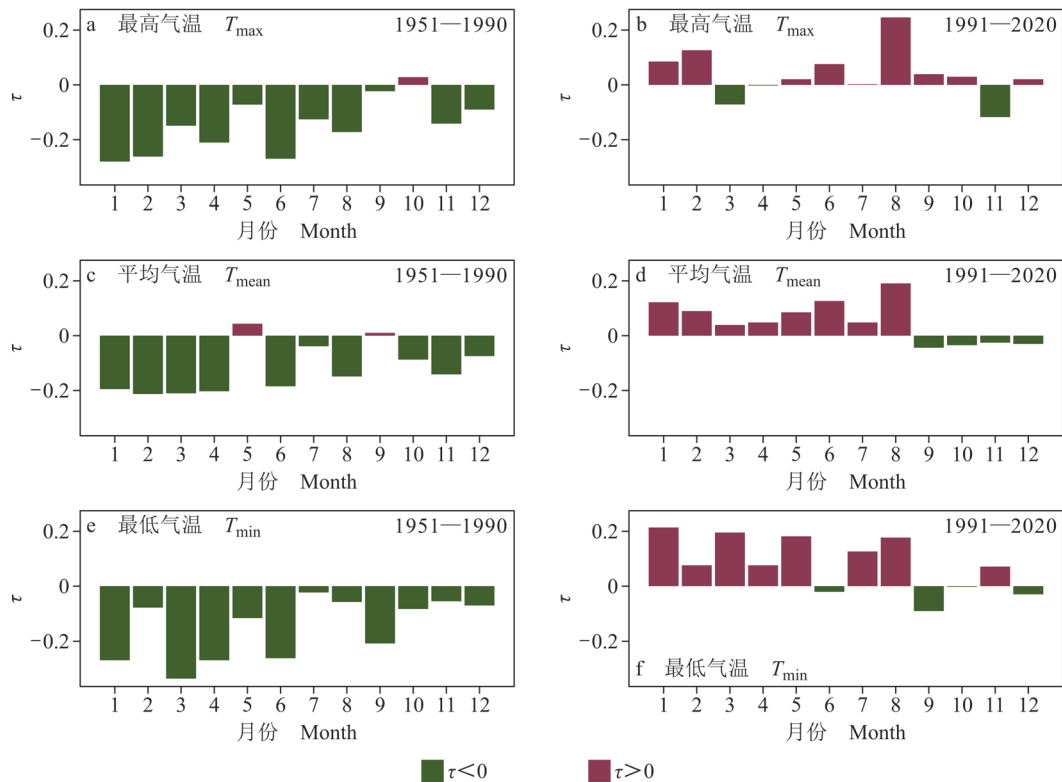


图4 南四湖地区1951—2020年 τ 变化特征

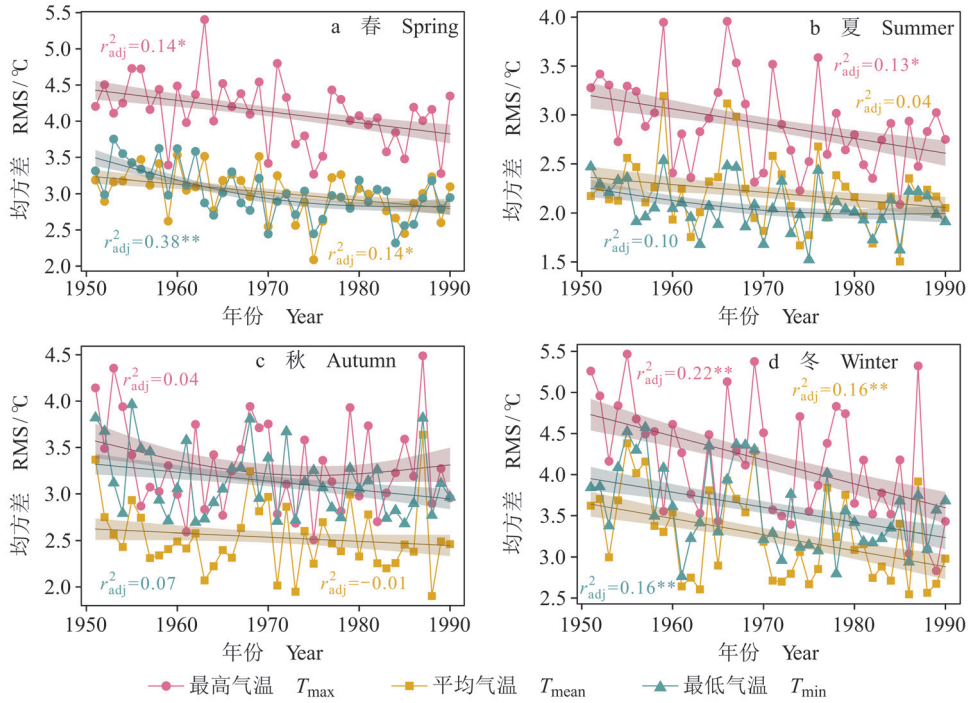
Fig. 4 Variation characteristics of τ in the Nansi Lake region from 1951 to 2020

2.4 南四湖地区RMS季节平均值长期变化特征

1951—1990年南四湖地区气温短期波动季节差异明显, 冬季和春季 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的短期波动降幅均显著(GAM, 下同)(冬: r_{adj}^2 分别为0.22、0.16、0.16, $P < 0.01$; 春: r_{adj}^2 分别为0.14、0.14、0.38, $P < 0.05$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$); 冬季 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的短期波动降幅分别为0.291、0.194和0.183 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 春季 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 短期波动降幅分别为0.176、0.123和0.181 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。夏季 T_{\max} 短期波动降幅显著($r_{\text{adj}}^2=0.13, P < 0.05$), 为0.156 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 而 T_{mean} 和 T_{\min} 短期波动降幅不显著($P > 0.05$), 分别为0.078、0.065 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。秋季 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的短期波动降幅均不显著

($P > 0.05$), 分别为0.057、0.045和0.097 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ (图5)。

1991—2020年南四湖地区气温短期波动无明显季节差异, 春季、夏季和冬季的短期波动幅度上升但不显著($P > 0.05$), 而秋季短期波动降幅也不显著($P > 0.05$)。春季 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的短期波动增幅分别为0.024、0.026和0.128 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。夏季 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的短期波动增幅分别为0.076、0.062和0.033 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。秋季 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 短期波动降幅分别为0.020、0.010和0.017 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。冬季 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 短期波动增幅分别为0.011、0.115和0.012 $^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ (图6)。

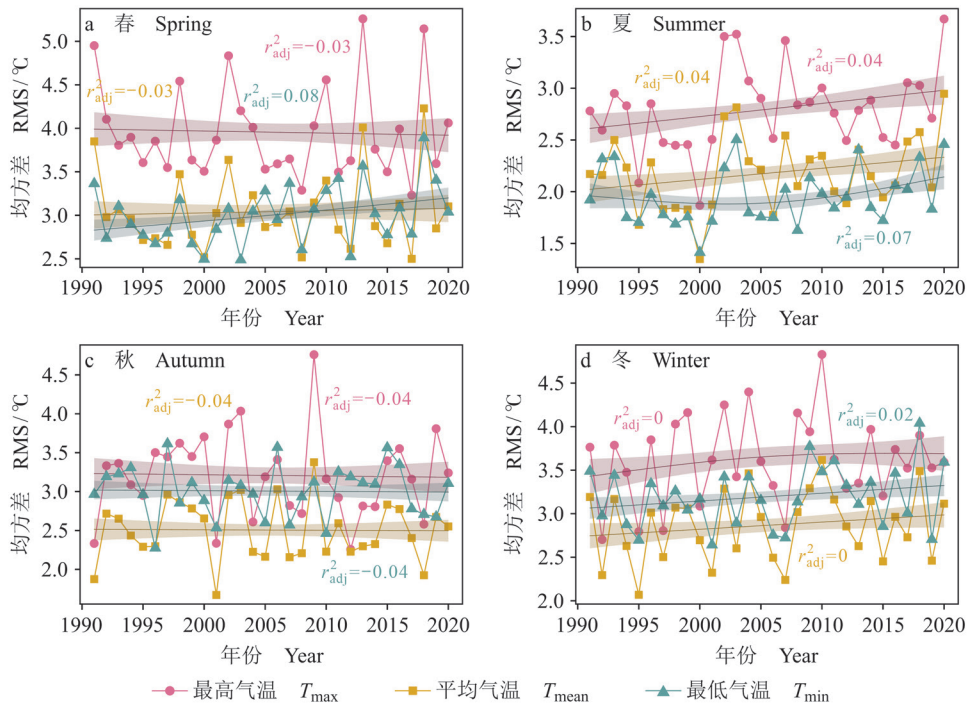


实线表示 GAM 模型估计的长期趋势，阴影区域是估计的标准误差。**: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$ 。

The solid line represents the long-term trends estimated by GAM, and the shaded area represents the standard error of the estimate. **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$.

图 5 南四湖地区 1951—1990 年 RMS 季节平均值长期变化特征

Fig. 5 Long-term variation characteristics of the seasonal average value of RMS in the Nansi Lake region from 1951 to 1990



实线表示 GAM 模型估计的长期趋势，阴影区域是估计的标准误差。

The solid line represents the long-term trends estimated by GAM, and the shaded area represents the standard error of the estimate.

图 6 南四湖地区 1991—2020 年 RMS 季节平均值长期变化特征

Fig. 6 Long-term variation characteristics of the seasonal average value of RMS in the Nansi Lake region from 1991 to 2020

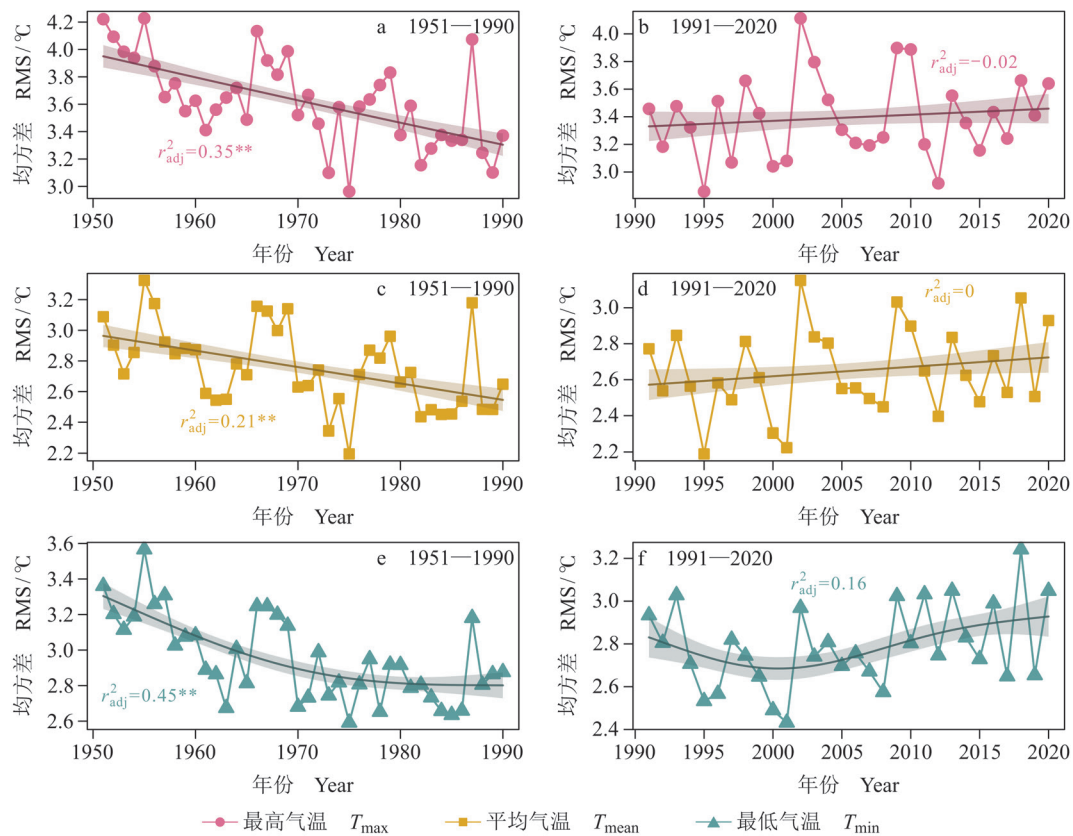
2.5 南四湖地区 RMS 年平均值长期变化特征

1951—2020年南四湖地区 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的 RMS 均呈先下降后上升趋势。1951—1990年 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的 RMS 逐年下降,且下降趋势极显著 (r_{adj}^2 分别为 0.35、0.21、0.45, $P < 0.01$),说明短期气温变化逐渐变得平稳,短期波动降幅分别为 0.166 、 0.107 和 $0.129 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ (图 7a、7c、7e)。

1991—2020年 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的 RMS 逐年上升但不显著 ($P > 0.05$),说明短期气温变化愈发剧烈,短期波动增幅分别为 0.077 、 0.052 和 $0.068 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ (图 7b、7d、7f)。

2.6 南四湖地区气温短期波动对空气质量参数的影响

根据南四湖地区 2013—2020年逐月 RMS 与空气质量参数相关性分析,逐月 $\text{RMS}_{T_{\min}}$ (最低气温的短期波动)与 AQI ($P < 0.05$)、 NO_2 ($P < 0.001$)、CO ($P < 0.01$)、 $\text{PM}_{2.5}$ ($P < 0.001$) 和 PM_{10} ($P < 0.001$) 呈显著正相关关系,而与 O_3 呈显著负相关关系 ($P < 0.001$)。逐月 $\text{RMS}_{T_{\text{mean}}}$ (平均气温的短期波动)与 O_3 呈显著负相关关系 ($P < 0.05$),而与 PM_{10} 呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。逐月 $\text{RMS}_{T_{\max}}$ (最高气温的短期波动)与 AQI 和空气污染物无显著相关性 (图 8)。



实线表示 GAM 模型估计的长期趋势,阴影区域是估计的标准误差。**: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$ 。

The solid line represents the long-term trends estimated by GAM, and the shaded area represents the standard error of the estimate. **: $P < 0.01$, *: $P < 0.05$.

图 7 南四湖地区 1951—2020 年 RMS 年平均值长期变化特征

Fig. 7 Long-term variation characteristics of the annual average value of RMS in the Nansi Lake region from 1951 to 2020

3 讨论

3.1 1990 年气温变暖突变分析

南四湖地区在 1990 年前后存在气温变暖突变,且增温模式有较大差异 (图 2)。已有研究

发现中国各地升温速率在 1990 年左右达到峰值,并指出长期气温的短期波动在 1990 年以前主要呈下降趋势 (He et al., 2022)。中国北方地区平均气温、平均日最高气温、平均日最低气温大多在

20 世纪 80 年代中后期发生了一次较显著的变暖突变(郭志梅等, 2005)。在江苏, 作为大气蒸发能力指标的参考蒸散量随着气候变暖而下降, 在 1990 年之前呈下降趋势, 但在 1990—2019 年呈上升趋势(Qin et al., 2021a)。分段线性回归结果表明南四湖地区 1951—2020 年气温突变点在 1985—1990 年(图 2)。基于此, 以 1990 年为界分为 1951—1990 年和 1991—2020 年两个时间段进行南四湖地区气温短期波动趋势分析较为合理。

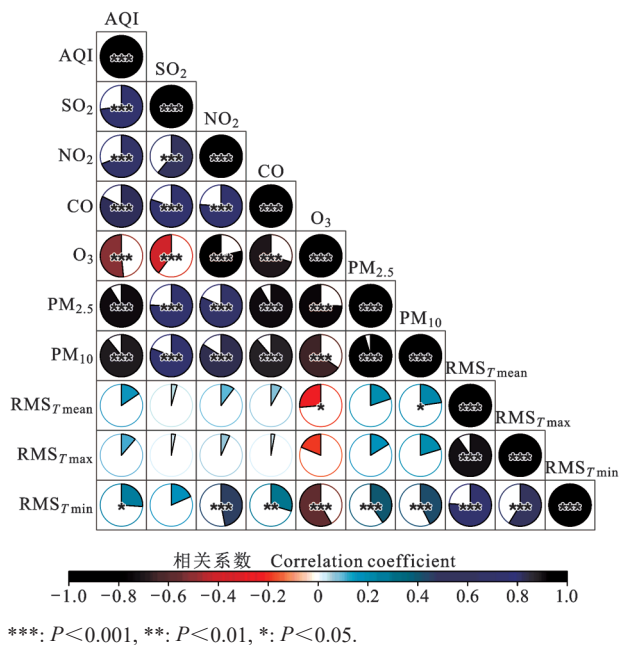


图 8 南四湖地区 2013—2020 年逐月 RMS 与空气质量参数相关性分析

Fig. 8 Correlation analysis of monthly RMS and air quality parameters in the Nansi Lake region from 2013 to 2020

3.2 气温短期波动特征及其影响因素

南四湖地区 1951—1990 年气温短期波动幅度呈下降趋势, 说明气温波动趋于平缓, 气温愈加稳定; 而 1991—2020 年气温短期波动幅度整体呈上升趋势, 说明气温波动更加剧烈, 气温更不稳定(图 7)。已有研究分析了 1960—2009 年中国冬季气温的年际 RMS 分布特征, 发现中国北方的 RMS 普遍大于南方, 即北方气温波动更大, 且全国 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 的 RMS 分别在 0.8—2.2 °C、0.8—2.4 °C 和 0.9—2.7 °C(房一禾, 2012)。基于隔日温差研究发现 1990 年前后中国春季 T_{mean} 的短期波动幅度呈相反的变化趋势, 即在 1990 年前呈下降趋势, 1990 年后呈上升趋势(彭凯等,

2019)。通过分析中国气温长期变化趋势, 发现自 1990 年以后气温明显上升, 1998—2017 年平均气温增幅为 $0.304 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ (Li et al., 2020)。中国 1961—2018 年冬季 T_{mean} 的季节内变率总体呈线性减弱趋势, RMS 普遍大于 $3.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 进一步研究发现, 20 世纪 80 年代中期前冬季气温季节内变率较强, 20 世纪 80 年代后期至 2004 年较弱, 而在 2005 年后变强(申红艳等, 2021)。而本研究发现南四湖地区 1951—2020 年冬季 T_{mean} 的 RMS 普遍大于 $2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 且在 2007 年较低 ($2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$), 长期波动趋势呈锯齿状。受全球变暖的影响, 气温的季节性波动有所减弱(Yan et al., 2001; Zhao et al., 2018)。本研究还发现南四湖地区 1991—2020 年各季节短期波动上升幅度虽不显著, 但各季节气温波动较大, 且相较 1951—1990 年, 气温的季节性波动减弱(图 5 和图 6)。近年来中国多个地区春季气温短期波动幅度较大, 如气温“过山车”“倒春寒”现象。春季气温高频变化, 短期波动幅度大, 与人们体感的“春如四季”说法相符, 即“春夏秋冬随机切换”(张敏, 2019)。

中国春季气温波动天数与经纬度呈显著正相关, 且纬度的影响更为明显(彭凯等, 2019)。中国冬季季节内气温变率与冬季平均环流异常有关, 如北大西洋涛动呈负位相特征, 西伯利亚高压偏强时, RMS 较大; 且在中国北方及东部地区(包含南四湖地区), RMS 与海平面气压显著正相关(申红艳等, 2021)。相关研究表明城市化水平也会影响气温波动, 城市化水平越高的地区, 气温波动越剧烈, 气温越不稳定(Cayan and Douglas, 1984; Englehart and Douglas, 2003)。现有研究主要分析了城市化对最高气温波动的影响, 然而对最低气温短期波动的影响因素需进一步探究。已有研究发现城市化对年最低气温影响较小, 而对年最高气温的影响较大(郭丽香等, 2012)。同样有研究表明最高气温受城市化的影响最大, 说明最高气温波动幅度增加有可能与城市化有关(黄宏涛等, 2016)。

3.3 气温短期波动对生态环境的影响

南四湖地区气温短期波动对该区域空气质量会产生一定的影响, T_{\min} 的逐月短期波动与 AQI、 NO_2 、CO、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 均呈显著正相关, 而与 O_3 呈显著负相关(图 8)。夏季 NO_2 和 CO 等浓度较低, $\text{RMS}_{T_{\min}}$ 也较低, 即在月时间尺度上,

T_{\min} 的短期波动与 NO_2 和 CO 等呈现出相同的变化趋势。 T_{\min} 的逐月短期波动越大, AQI 与 NO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度预计越高, 这将进一步加剧南四湖地区空气污染, 并可能导致生态环境恶化, 影响生态系统、生物多样性和人体健康 (Lovett et al., 2009; Geng et al., 2021)。研究发现极大温度升高对北京市 AQI 的影响较大, 且极大温度降低会导致夏季和冬季滞后期内 AQI 的大幅升高, 显著影响滞后期的空气质量 (Ikram, 2015)。

区域性气候异常通过正反馈机制同样会加剧水体富营养化, 即通过加强内部养分循环和加剧蓝藻水华 (Qin et al., 2021b)。近年来南四湖地区气温短期波动较大, 可能会导致极端水文事件发生的概率增加, 湖泊热浪加剧 (Woolway et al., 2021), 进而加剧水体富营养化 (刘雪梅和章光新, 2022)。在快速的气候变化下, 人为干扰驱动的生物多样性丧失, 使人类迫切需要了解气温短期波动将如何影响生态系统的功能。后续研究在关注全球气候变暖的同时, 还应考虑气温短期波动对生态环境的影响, 并制定相应的策略减缓气温波动带来的负面影响。

4 结论

通过分析南四湖地区 1951—2020 年气温短期波动趋势, 得出以下结论:

(1) RMS 季节和年平均值长期变化趋势显示: 1951—2020 年南四湖地区气温短期波动幅度先下降后上升。1951—1990 年 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 波动幅度呈显著下降趋势, 即气温短期波动趋于平稳。1991—2020 年 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 波动幅度呈上升趋势, 即气温短期波动愈加剧烈。

(2) RMS 年内变化趋势表明: 1951—2020 年 1—12 月南四湖地区 T_{\max} 波动最大, T_{\min} 波动次之, T_{mean} 波动最小。2、3 和 4 月气温短期波动较大, 即冬末春初气温短期波动较为剧烈, 更易引发湖泊高温热浪等; 6、7、8 和 9 月气温短期波动较小, 即夏季和秋初气温短期波动较为平稳, 利于生物生长。

(3) 逐月 RMS 长期变化趋势显示: 1951—1990 年南四湖地区 T_{\max} 在 1、2 和 6 月波动幅度下降趋势显著, T_{mean} 下降趋势不显著, T_{\min} 在 1、3、4 和 6 月波动幅度下降趋势显著, 即冬春季气

温短期波动幅度主要呈下降趋势, 气温短期变化趋于平稳。1991—2020 年 T_{\max} 、 T_{mean} 和 T_{\min} 波动幅度上升趋势虽不显著, 但气温短期波动愈加剧烈。

(4) T_{\min} 的逐月短期波动对空气质量具有较大影响。 T_{\min} 的逐月短期波动与 AQI、 NO_2 、 CO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 显著正相关, 而与 O_3 显著负相关。

致谢: 感谢刘嘉协助绘制南四湖地区概况图。

参考文献

- 邓建明, 秦伯强, 王博雯. 2015. 广义可加模型在 R 中的快捷实现及蓝藻水华预测分析中的应用 [J]. 生态学杂志, 34(3): 835–842. [Deng J M, Qin B Q, Wang B W. 2015. Quick implementing of generalized additive models using R and its application in blue-green algal bloom forecasting [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 34(3): 835–842.]
- 房一禾. 2012. 中国冬季气温变化特征及其与大气环流和海温的关系 [D]. 南京: 南京信息工程大学. [Fang Y H. 2012. Variation characteristics of winter temperature in China and its relations with atmospheric circulation and SST [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology.]
- 郭丽香, 章新平, 吴华武, 等. 2012. 城市化对湖南长沙气温的影响 [J]. 干旱气象, 30(3): 380–386. [Guo L X, Zhang X P, Wu H W, et al. 2012. The influence of urbanization on temperature in Changsha of Hunan Province [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 30(3): 380–386.]
- 郭志梅, 缪启龙, 李雄. 2005. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征的研究 [J]. 地理科学, 25(4): 448–454. [Guo Z M, Miao Q L, Li X. 2005. Variation characteristics of temperature over northern China in recent 50 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 25(4): 448–454.]
- 黄宏涛, 吴荣军, 王晓云, 等. 2016. 城市化对珠三角地区气温及日较差的可能影响 [J]. 气象, 42(7): 847–856. [Huang H T, Wu R J, Wang X Y, et al. 2016. Effect of urbanization on temperature and diurnal temperature range in Pearl River Delta [J]. *Meteorological Monthly*, 42(7): 847–856.]
- Ikram M. 2015. 温度波动对空气质量和呼吸系统疾病的季节性影响研究 [D]. 北京: 北京理工大学. [Ikram M. 2015. Study on the seasonal effects of temperature fluctuations on air quality and respiratory disease [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology.]
- 刘君德. 2012. 大辞海: 中国地理卷 [M]. 上海: 上海辞书出版社. [Liu J D. 2012. Dacihai: Chinese geography

- volume [M]. Shanghai: Shanghai Dictionary Press.]
- 刘凯, 聂格格, 张森. 2020. 中国 1951—2018 年气温和降水的时空演变特征研究 [J]. *地球科学进展*, 35(11): 1113–1126. [Liu K, Nie G G, Zhang S. 2020. Study on the spatiotemporal evolution of temperature and precipitation in China from 1951 to 2018 [J]. *Advances in Earth Science*, 35(11): 1113–1126.]
- 刘雪梅, 章光新. 2022. 气候变化对湖泊蓝藻水华的影响研究综述 [J]. *水科学进展*, 33(2): 316–326. [Liu X M, Zhang G X. 2022. A review of studies on the impact of climate change on cyanobacteria blooms in lakes [J]. *Advances in Water Science*, 33(2): 316–326.]
- 彭凯, 邓建明, 张运林, 等. 2019. 1957—2015 年我国春季短期温度波动规律 [J]. *气候与环境研究*, 24(1): 125–134. [Peng K, Deng J M, Zhang Y L, et al. 2019. Short-term temperature fluctuation in the spring in China during 1957—2015 [J]. *Climatic and Environmental Research*, 24(1): 125–134.]
- 申红艳, 温婷婷, 封国林, 等. 2021. 中国冬季气温季节内变率特征及环流分析 [J]. *气象*, 47(3): 327–336. [Shen H Y, Wen T T, Feng G L, et al. 2021. Characteristics and circulation analysis of intraseasonal variability of winter temperature in China [J]. *Meteorological Monthly*, 47(3): 327–336.]
- 严华生, 李艳, 樊毅, 等. 2001. 热带太平洋和印度洋海温年际变化的均方差分析 [J]. *热带气象学报*, 17(4): 391–397. [Yan H S, Li Y, Fan Y, et al. 2001. Mean square deviation analysis of sst interannual variability in tropical Pacific and Indian Ocean [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 17(4): 391–397.]
- 杨秀芹, 钟平安, 夏可政. 2008. 1960—2005 年南四湖流域气候变化趋势及其突变分析 [J]. *冰川冻土*, 30(5): 801–806. [Yang X Q, Zhong P A, Xia K Z. 2008. Analysis of the climate change tendency and abrupt climate change in Nansihu Basin over 1960—2005 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(5): 801–806.]
- 张敏. 2019. 我国逐日气温高频变化特征及其影响因子研究 [D]. 上海: 华东师范大学. [Zhang M. 2019. High-frequency daily temperature variability over China and its contributing factors [D]. Shanghai: East China Normal University.]
- Bestion E, Haegeman B, Codesal S A, et al. 2021. Phytoplankton biodiversity is more important for ecosystem functioning in highly variable thermal environments [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(35): e2019591118. DOI: 10.1073/pnas.2019591118.
- Cayan D R, Douglas A V. 1984. Urban influences on surface temperatures in the southwestern United States during recent decades [J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(11): 1520–1530.
- Dhorde A, Dhorde A, Gadgil A S. 2009. Long-term temperature trends at four largest cities of India during the twentieth century [J]. *The Journal of Indian Geophysical Union*, 13(2): 85–97.
- Englehart P J, Douglas A V. 2003. Urbanization and seasonal temperature trends: observational evidence from a data-sparse part of North America [J]. *International Journal of Climatology*, 23(10): 1253–1263.
- Geng G N, Zheng Y X, Zhang Q, et al. 2021. Drivers of PM_{2.5} air pollution deaths in China 2002—2017 [J]. *Nature Geoscience*, 14(9): 645–650.
- He Y C, Deng J M, Zhang Y L, et al. 2022. Variation in short-term temperature fluctuations across China during the past 60 years [J]. *Chinese Geographical Science*, 32(4): 563–579.
- IPCC. 2018. Global Warming of 1.5 °C [R]. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kolde R. (2019-01-04) [2024-05-26]. Pheatmap: pretty heatmaps [EB/OL]. <https://CRAN.R-project.org/package=pheatmap>.
- Li Q X, Dong W J, Jones P. 2020. Continental scale surface air temperature variations: experience derived from the Chinese region [J]. *Earth-Science Reviews*, 200: 102998. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102998.
- Lovett G M, Tear T H, Evers D C, et al. 2009. Effects of air pollution on ecosystems and biological diversity in the eastern United States [J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1162: 99–135.
- McLeod A I. (2022-03-20) [2024-05-26]. Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test [EB/OL]. <https://CRAN.R-project.org/package=Kendall>.
- O'Reilly C M, Sharma S, Gray D K, et al. 2015. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe [J]. *Geophysical Research Letters*, 42(24): 10773–10781.
- Pacifici M, Foden W B, Visconti P, et al. 2015. Assessing species vulnerability to climate change [J]. *Nature Climate Change*, 5: 215–224.
- Pushkar V Y, Zdanovich V V, Kelekhsaev M Z. 2010. The

- impact of short-term fluctuations of temperature on the production indices of aquatic animals: *Oreochromis niloticus* (L.) and *Pistia stratiotes* (L.) [J]. *Inland Water Biology*, 3(3): 282–290.
- Qin B Q, Deng J M, Shi K, et al. 2021b. Extreme climate anomalies enhancing cyanobacterial blooms in eutrophic Lake Taihu, China [J]. *Water Resources Research*, 57(7): e2020WR029371. DOI: 10.1029/2020WR029371.
- Qin M S, Zhang Y, Wan S Q, et al. 2021a. Impact of climate change on “evaporation paradox” in province of Jiangsu in southeastern China [J]. *PLoS One*, 16(2): e0247278. DOI: 10.1371/journal.pone.0247278.
- Sonderegger D. (2022-07-09) [2024-05-26]. SiZer: significant zero crossings [EB/OL]. <https://CRAN.R-project.org/package=SiZer>.
- Sueur J, Aubin T, Simonis C. 2008. Seewave, a free modular tool for sound analysis and synthesis [J]. *Bioacoustics*, 18(2): 213–226.
- Sun W Y, Mu X M, Song X Y, et al. 2016. Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960—2013 under global warming [J]. *Atmospheric Research*, 168: 33–48.
- van de Waal D B, Verschoor A M, Verspagen J M, et al. 2010. Climate-driven changes in the ecological stoichiometry of aquatic ecosystems [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 8(3): 145–152.
- Wickham H. 2009. Ggplot2: elegant graphics for data analysis [M]. New York: Springer.
- Wood S N. 2006. Generalized additive models: an introduction with R [M]. New York: Chapman and Hall/CRC.
- Woolway R I, Jennings E, Shatwell T, et al. 2021. Lake heatwaves under climate change [J]. *Nature*, 589: 402–407.
- Yan Z W, Jones P D, Moberg A, et al. 2001. Recent trends in weather and seasonal cycles: an analysis of daily data from Europe and China [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D6): 5123–5138.
- Zhang Y H, Tang C H, Nepf H. 2018. Turbulent kinetic energy in submerged model canopies under oscillatory flow [J]. *Water Resources Research*, 54(3): 1734–1750.
- Zhao C L, Chen J G, Du P, et al. 2018. Characteristics of climate change and extreme weather from 1951 to 2011 in China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(11): 2540. DOI: 10.3390/ijerph15112540.
- ~~~~~
- (上接 177 页)
- Jin Z D, Wang S M, Shen J, et al. 2001. Chemical weathering since the little ice age recorded in lake sediments: a high-resolution proxy of past climate [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(7): 775–782.
- Kapp P, Pelletier J D, Rohrmann A, et al. 2011. Wind erosion in the Qaidam Basin, Central Asia: implications for tectonics, paleoclimate, and the source of the Loess Plateau [J]. *GSA Today*, 21(4/5): 4–10.
- Li G Q, Chen F H, Xia D S, et al. 2018. A Tianshan Mountains loess-paleosol sequence indicates anti-phase climatic variations in arid Central Asia and in East Asia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 494: 153–163.
- Li G Q, Zhang H X, Liu X J, et al. 2020. Paleoclimatic changes and modulation of East Asian summer monsoon by high-latitude forcing over the last 130, 000 years as revealed by independently dated loess-paleosol sequences on the NE Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews*, 237: 106283. DOI: 10.1016/j.quascirev.2020.106283.
- Liu X J, Cong L, Li X Z, et al. 2020. Climate conditions on the Tibetan Plateau during the Last Glacial Maximum and implications for the survival of paleolithic foragers [J]. *Frontiers in Earth Science*, 8: 606051. DOI: 10.3389/feart.2020.606051.
- Liu X M, Hesse P, Liu T S, et al. 1998. High resolution climate record from the Beijing area during the last glacial-interglacial cycle [J]. *Geophysical Research Letters*, 25(3): 349–352.
- Qiang M, Lang L, Wang Z. 2010. Do fine-grained components of loess indicate westerlies: insights from observations of dust storm deposits at Lenghu (Qaidam Basin, China) [J]. *Journal of Arid Environments*, 74(10): 1232–1239.
- Ramisch A, Lockot G, Habertzettl T, et al. 2016. A persistent northern boundary of Indian summer monsoon precipitation over Central Asia during the Holocene [J]. *Scientific Reports*, 6: 25791. DOI: 10.1038/srep25791.
- Xu H, Liu B, Wu F. 2010. Spatial and temporal variations of Rb/Sr ratios of the bulk surface sediments in Lake Qinghai [J]. *Geochemical Transactions*, 11: 3. DOI: 10.1186/1467-4866-11-3.