

近59年环渤海地区气温集中指数变化特征分析

邬铭法^{1,2}, 董旭光^{1,2*}, 陈乐奇^{1,2}

¹山东省气象防灾减灾重点实验室, 山东 济南

²山东省气候中心, 山东 济南

收稿日期: 2024年2月8日; 录用日期: 2024年3月6日; 发布日期: 2024年3月13日

摘要

文章利用环渤海地区各省和直辖市276个国家气象站1961~2019年历年逐日平均气温观测数据, 研究了环渤海地区及各分区的TCI (Temperature Concentration Index)时空演变规律和变化特征, 及TCI与地理因子、大尺度环流指数的相关关系。结果表明: 环渤海地区累年平均TCI呈大致的纬向分布型, 由南向北TCI逐渐增大。2000年以来, 各地TCI明显减小, 山东中南部和河北南部一带小于12.5。历年平均TCI的气候倾向率为 $-0.156 (10a)^{-1}$, 通过了0.05显著性水平检验, 减小趋势显著。仅承德站TCI有不明显的增大变化趋势, 共计91.3% (252站)的台站历年TCI减小趋势显著。平均TCI与海拔高度、纬度、经度的气候趋势系数分别为0.638、0.887、0.403, 均通过了0.05显著性水平检验, 呈显著的正相关关系。

关键词

平均气温, 气温集中指数, 环流指数, 时空变化

Analysis of Variation Characteristics of Temperature Concentration Index in Surrounding Bohai Sea Area in Recent 59 Years

Mingfa Wu^{1,2}, Xuguang Dong^{1,2*}, Leqi Chen^{1,2}

¹Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Shandong, Jinan Shandong

²Shandong Climate Center, Jinan Shandong

Received: Feb. 8th, 2024; accepted: Mar. 6th, 2024; published: Mar. 13th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 邬铭法, 董旭光, 陈乐奇. 近 59 年环渤海地区气温集中指数变化特征分析[J]. 气候变化研究快报, 2024, 13(2): 221-229. DOI: 10.12677/ccrl.2024.132023

Abstract

In this paper, based on the data of daily average temperature in 1961~2019 from 276 national meteorological stations in surrounding Bohai Sea area, temporal-spatial evolution and change characteristics of annual Temperature Concentration Index (TCI) in surrounding Bohai Sea area and its sub-regions were analyzed using monthly temperature data. Additionally, the correlation between TCI and geographical factors and large-scale circulation index was investigated. The results revealed that the annual average TCI showed roughly zonal distribution pattern and gradually increased from southern to northern in surrounding Bohai Sea area. All regions of TCI decreased significantly since 2000 and TCI in middle and southern Shandong, Southern Hebei was less than 12.5. The climate tendency rate of annual average TCI was $-0.156 (10a)^{-1}$ and the decreasing trend passed the 0.05 significance test and showed a significant decreasing trend. The decreasing trend of annual average TCI of 91.3% of all stations was significant except insignificantly increasing trend of annual average TCI in Chengde. Correlation coefficients between average TCI and altitude, latitude, and longitude were 0.638, 0.887, and 0.403, respectively, which passed the 0.05 significance level test and showed a significant positive correlation.

Keywords

Average Temperature, Temperature Concentration Index, Circulation Index, Temporal-Spatial Change

Copyright © 2024 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

20 世纪中叶以来, 气候变暖有 95% 以上的概率可认为是由人类影响造成的, 温室气体浓度增加将加剧变暖。气候变暖会导致全球气候系统其他气象要素的变化, 研究表明, 过去 50 多年全球陆地表面气温比海洋表层水温升高更为明显, 陆地上升温最明显的区域是亚洲中高纬度地区, 陆地上的显著升温会改变当地生态系统结构、农业生产方式、水循环和降水结构等。因此, 不同区域气温长期变化的研究已成为全球气候变化研究的热点, 是气候变化研究的基础性工作。

中国不同区域气温变化的研究结果表明, 近百年来, 中国气候变暖趋势与全球变化基本一致(唐国利等, 2012; 韩翠华等, 2013) [1] [2], 在气候变暖趋势线上叠加有 2 个冷期和 2 个暖期(丁一汇等, 2014) [3]。中国最低气温增暖趋势显著, 北方地区白天温度极端偏高日数增多, 夜间温度极端偏低日数减少。在高纬度地区, 气温上升幅度更明显(宋辞等, 2012) [4], 同时, 冬季气温变暖趋势高于夏季(虞海燕等, 2011) [5]。关于气温变化的研究方法, 前期研究多采用年、季、月等不同固定时段的气温资料分析气温时空变化, 在气温集中度和年内非均匀变化方面的研究较少见, 申红艳等(2012) [6]通过定义冬季持续低温过程集中度(LTCD)和集中期(LTCP), 分析了青海高原冬季持续低温集中程度的变化特征。本文参考国际上广泛使用的降水集中指数 PCI 计算方法, 使用了环渤海地区各站日平均气温 $\geq 5.0^{\circ}\text{C}$ 的气温集中指数, 简称 TCI (Temperature Concentration Index), 它可以较好地表征 $\geq 5.0^{\circ}\text{C}$ 的气温在年内的集中程度和非均匀性变化。

环渤海地区地处我国中东部沿海地区, 自 20 世纪 80 年代以来, 气温显著上升, 降水明显减小, 干旱和缺水问题突出。环渤海地区属暖温带季风气候区, 冬季寒冷, 夏季炎热, 区域内下垫面特征复杂,

各地气温时空变化差异较大(苗正伟等, 2019) [7], 但关于气温集中指数 TCI 方面的研究成果极少见, 因此, 本文利用环渤海地区 276 个气象站 1961~2019 年历年逐日平均气温观测数据, 研究了 TCI 的时空变化规律。本文亦分析了 TCI 与地理因子的相关关系, 这对进一步深入认识区域气候变暖特征和物理机制具有一定的指导意义。

2. 资料和方法

2.1. 资料

采用环渤海地区沿海各省市 356 个国家气象观测站 1961~2019 年逐日平均气温观测数据, 气温数据来源于中国气象局国家气象信息中心。为了保证逐日平均气温数据真实有效, 进一步进行了平均气温观测数据的气候极值检验、时间一致性、空间一致性、完整率等检验, 保证历年逐日平均气温总数据量达 95% 以上。对于个别台站, 逐日平均气温分别缺失数据超过 5% 的年份被剔除。对于缺失数据少于 5% 的年份, 缺失数据通过线性回归进行插值。另外, 剔除了缺少 5 年以上观测数据的台站。同时, 考虑到气象站逐日平均气温观测数据的时间序列长度和完整性, 最终确定 276 个气象站逐日平均气温数据作为研究对象进行 TCI 的统计分析, 选取的气象站点和地形空间分布见图 1, 气象观测站点空间分布相对较均匀, 各地 TCI 分析结果能够较好地代表当地气温变化的实际情况。另外, 选用海拔高度、纬度、经度等地理因子, 分析 TCI 与各地理因子可能存在的相关关系。

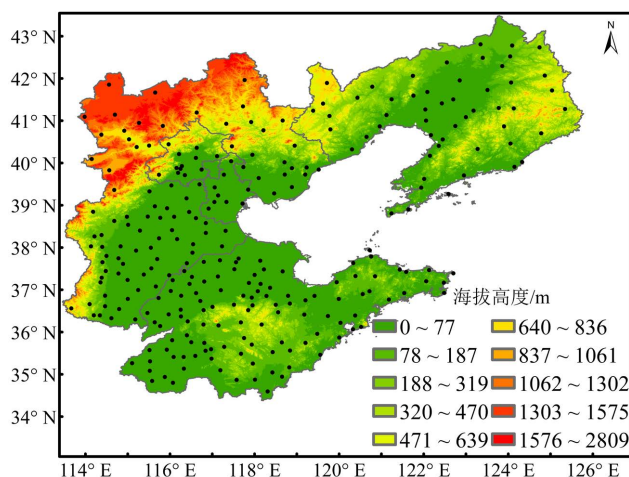


Figure 1. Topographic characteristics and spatial distribution of used meteorological stations in surrounding Bohai Sea area
图 1. 环渤海地区地形特征及使用的气象观测站点空间分布

2.2. 气温集中指数(TCI)

参考 Zhang 等(2003) [8]使用的降水集中指数(PCI)的计算方法, 本文定义了气温集中指数(TCI), 其定义为:

$$TCI = \frac{\sum_{i=1}^{12} t_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{12} t_i\right)^2} \times 100 \quad (1)$$

上式中: t_i 为环渤海地区每个气象站历年第 i 月 $\geq 5.0^\circ\text{C}$ 的累积气温。如果 $\geq 5.0^\circ\text{C}$ 的逐日平均气温都出现在一个月, 计算的 TCI 为 100, 如果 $\geq 5.0^\circ\text{C}$ 的逐日平均气温均匀地分配在 12 个月中, 则 TCI 达到最

小值。参考 PCI 结果，定义当 $TCI \leq 10$ 时，表示年气温的月分配较为均匀，当 $11 \leq TCI < 20$ 时，表示年气温具有季节性，即年内气温具有一定的集中性，当 $TCI \geq 20$ 时，表示该地区年气温在年内的分配具有异常集中性，气温的月变化很大(见表 1)。通过给定年份逐月 $\geq 5.0^\circ\text{C}$ 的气温可得出该年的 TCI 值。计算得到的 TCI 时间平均值，是所选时段各年 TCI 的算术平均值，而环渤海地区的 TCI 为该区域中各站点年 TCI 值的区域平均。

Table 1. Indicative meaning of changes in Temperature Concentration Index (TCI)

表 1. 气温集中指数(TCI)变化的指示含义

变化范围	气温变化
0~10	月分配均匀
11~20	具有一定集中性
20~100	异常集中

2.3. 相关分析和空间插值方法

选用相关分析方法(董旭光等, 2018) [9]分析环渤海地区各站 1961~2019 年 TCI 累年平均值与海拔高度、经度、纬度等地理因子的相关关系，探讨各地不同地理因子对 TCI 变化的影响。选用克里格插值方法对各地 TCI 时空分布和变化及相关系数进行插值。

3. 结果分析

3.1. TCI 的空间分布

1961~2019 年环渤海地区累年平均 TCI 在 12.2 (邹城)~18.3 (康保)之间(图 2)，呈大致的纬向分布，由南向北 TCI 逐渐增大。山东南部 TCI 相对最小，小于 12.5，京津冀中南部和山东大部 TCI 在 12.6~14.0 之间，辽宁中南部一般在 14.1~15.5 之间，北部则大于 15.6，京津冀北部地区 TCI 超过 15.6，部分地区超过 17.0。

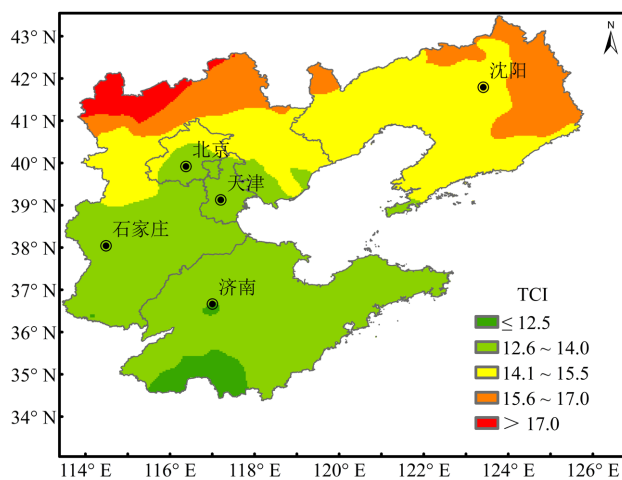


Figure 2. Spatial distribution of average TCI in surrounding Bohai Sea area during 1961~2019

图 2. 1961~2019 年环渤海地区平均 TCI 空间分布

3.2. TCI 的历年变化

1961~2019 年环渤海地区历年平均 TCI 为 13.8，历年平均 TCI 呈波动减小的变化特征(图 3(a))，气候

倾向率为 $-0.156 (10a)^{-1}$ ，通过了 0.05 显著性水平检验，减小趋势显著。2000 s 以前，TCI 多大于平均值，其中 1962 年最大，为 14.84，其次为 1969 年，为 14.78，其他各年均小于 14.5，2000 s 以后则多小于平均值，其中 2004 年最小，为 12.77。1960 s 平均 TCI 相对较大，平均为 13.9，其后逐年代际减小，2010 s 最小，为 13.4。京津冀地区、辽宁、山东历年平均 TCI 分别为 13.9、15.1、12.9，历年平均 TCI 均呈波动减小的变化特征(图 3(b)~3(d))，气候倾向率分别为 $-0.152 (10a)^{-1}$ 、 $-0.122 (10a)^{-1}$ 、 $-0.174 (10a)^{-1}$ ，均通过了 0.05 显著性水平检验，减小趋势显著。各地 2000 s 之前的历年平均 TCI 多大于平均值，京津冀地区 TCI 逐年代际减小，其中 1969 年最大，为 15.3，2004 年最小，为 13.0，辽宁 TCI 在 1970 s 最大，2010 s 最小，2010 年前后辽宁历年平均 TCI 波动较大，最大值出现在 2010 年，为 15.8，最小值出现在 1998 年，为 14.0，山东历年 TCI 减幅最大，减小趋势最明显，1961 年 TCI 最大，为 14.3，2004 年最小，为 11.8。

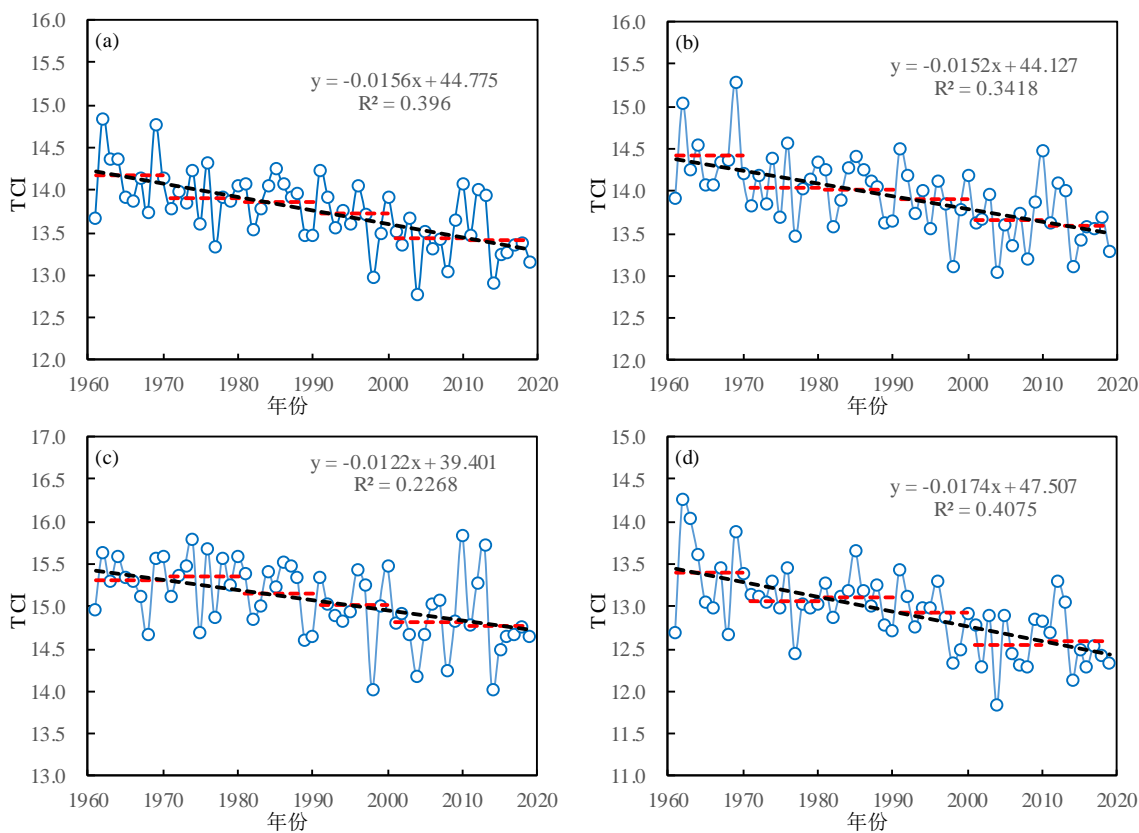


Figure 3. Annual variation of regional average TCI in surrounding Bohai Sea area (a), Jing-Jin-Ji (b), Liaoning (c), and Shandong (d) during 1961~2019

图 3. 1961~2019 年环渤海地区(a)、京津冀(b)、辽宁(c)、山东(d)区域平均 TCI 历年变化

3.3. TCI 的年代际空间分布

环渤海地区各年代际平均 TCI 空间分布见图 4，可见，各年代际平均 TCI 空间分布类似，均以京津冀中南部和山东大部地区的 TCI 相对较小， $\geq 5.0^{\circ}\text{C}$ 的气温相对集中，京津冀北部、辽宁北部和东部 TCI 相对较大， $\geq 5.0^{\circ}\text{C}$ 的气温相对分散，但各年代际平均 TCI 随时间变化差异明显。1960 s 各地 TCI 均大于 12.5，在所有年代际中 TCI 在 12.6~14.0 的面积最小，1970 s 的 TCI 在 12.6~14.0 的面积明显扩大，1960 s 和 1970 s 的 TCI 大于 15.6 的面积相对最大，2000 年以来 TCI 在 15.6~17.0 之间和大于 17.0 的面积均显著减小，仅出现在京津冀北部和辽宁东北部部分地区。1960 s~1980 s 环渤海地区各年代际 TCI 小于 12.5 的

地区极少，1990 s 在山东南部和济南附近开始出现 TCI 小于 12.5 的地区，2000 年以来 TCI 小于 12.5 的地区范围明显扩大，主要出现在山东中南部和河北南部一带。整体上看，环渤海地区 $\geq 5.0^{\circ}\text{C}$ 的气温随时间变化逐渐增多，导致 TCI 逐渐减小。

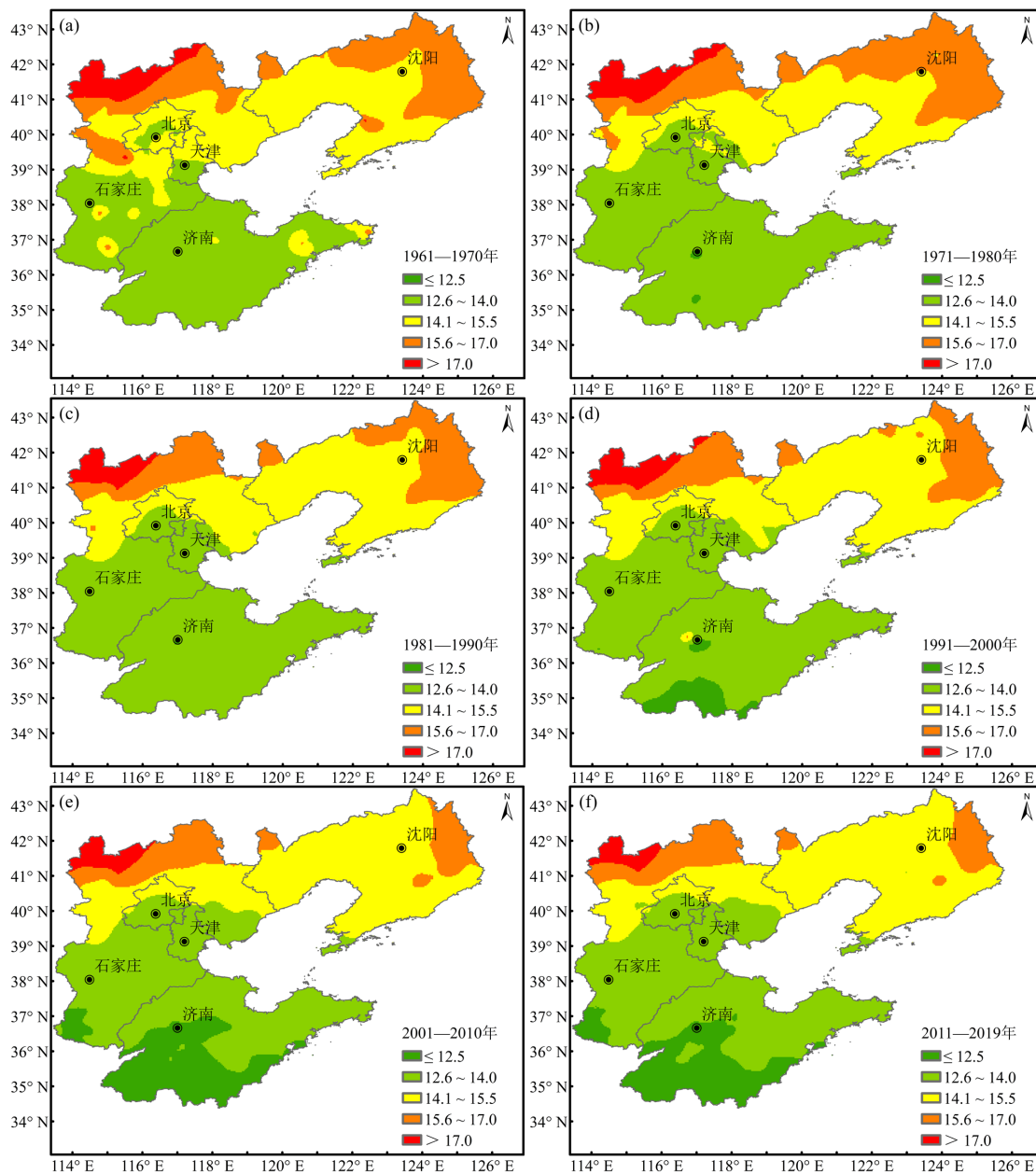
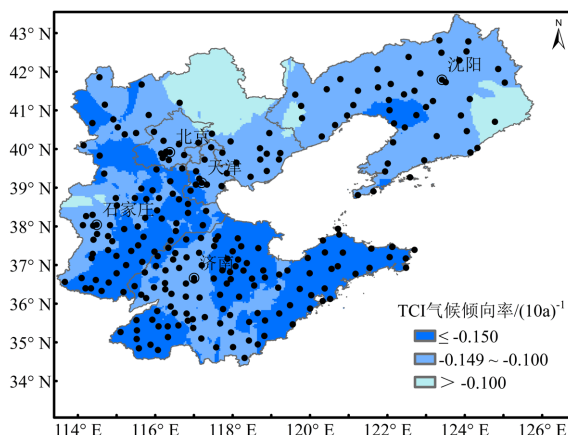


Figure 4. Spatial distribution of average TCI across different decades in surrounding Bohai Sea area during 1961~2019
图 4. 1961~2019 年环渤海地区各年代际平均 TCI 空间变化

3.4. TCI 的变化趋势

1961~2019 年环渤海地区各地历年 TCI 气候倾向率在 $-0.634 (10a)^{-1}$ (曲周)~ $-0.007 (10a)^{-1}$ (承德)之间(图 5)，仅承德站 TCI 有不明显的增大变化趋势，其他 275 站均呈减小变化趋势，其中共计 91.3% (252 站)的台站历年 TCI 减小变化趋势通过了 0.05 显著性水平检验，减小趋势显著。京津冀中东部、山东中东部和

西南部、辽宁中部沿海地区减小趋势最明显，小于 $-0.150 (10a)^{-1}$ ，京津冀北部和辽宁东部地区减小趋势相对较小，大于 $-0.100 (10a)^{-1}$ 。环渤海地区大部分地区 TCI 显著减小，表明当地 $\geq 5.0^{\circ}\text{C}$ 的气温增多，间接反映出环渤海地区平均气温有升高的变化趋势，这与当前气候变暖背景下，全球大部分地区的气温变化趋势类似。气温升高一方面表现为极端高温事件增多，另一方面表现为农作物可生长周期延长，对环渤海地区作物育种、产量预报、种植区域布局等方面产生了显著影响(赵广才，2010；康西言等，2015) [10] [11]。



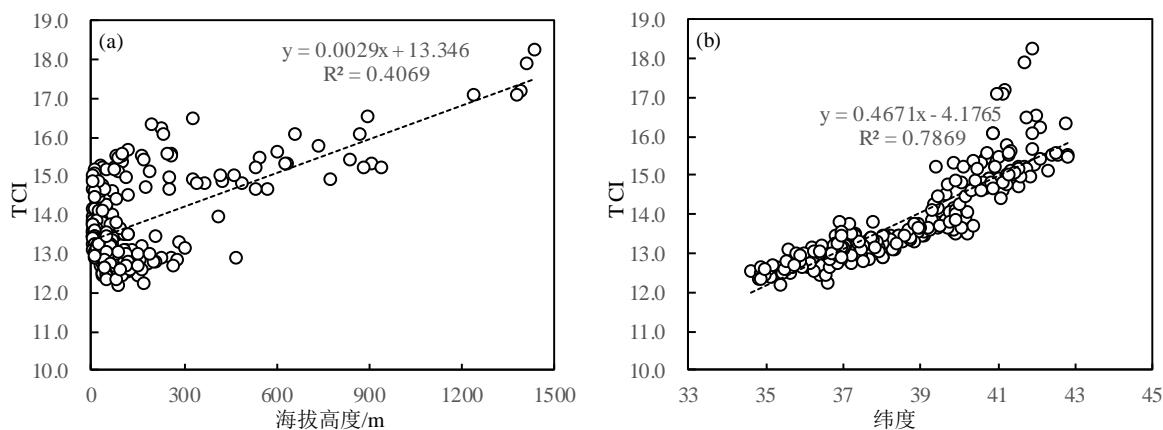
注：单位： $(10a)^{-1}$ ，黑色圆点代表变化趋势显著的站点，通过了 0.05 的显著性水平检验。

Figure 5. Spatial distribution of TCI climate tendency rate in surrounding Bohai Sea area during 1961~2019

图 5. 1961~2019 年环渤海地区 TCI 气候倾向率空间分布

3.5. TCI 对地理因子的响应

气温的变化受大气环流、下垫面、地理位置等诸多因素的影响，不同地区的气温变化趋势存在明显差异。为进一步分析不同地区的 TCI 变化，采用相关分析对环渤海地区各地平均 TCI 和海拔高度、纬度、经度等地理因子之间的关系进行研究(图 6)。由图 6(a)~6(c)可见，年平均 TCI 与海拔高度、纬度、经度的气候趋势系数分别为 0.638、0.887、0.403，均通过了 0.05 显著性水平检验，呈显著的正相关关系。环渤海地区大多数站点海拔高度低于 300 m，TCI 一般在 12.0~16.0 之间，随着海拔高度升高，TCI 也明显增大，站点海拔高度超过 1200 m 时，TCI 超过 17.0，表明高(低)海拔地区 $\geq 5.0^{\circ}\text{C}$ 气温年内分布更加集中(分散)，环渤海地区纬度越高(越低)， $\geq 5.0^{\circ}\text{C}$ 气温年内分布越集中(分散)，经度对 TCI 的影响明显小于海拔高度和纬度。



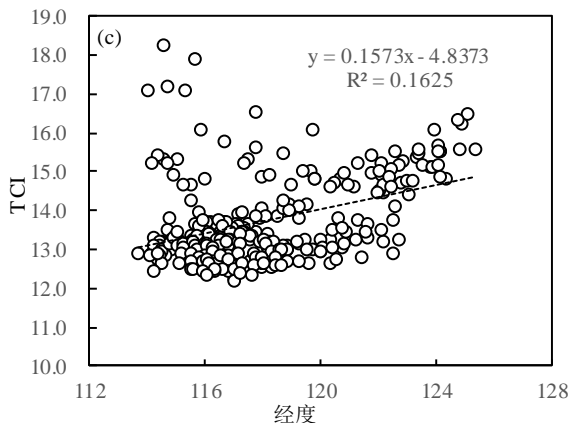


Figure 6. Correlation between TCI and altitude (a), latitude (b), and longitude (c) in surrounding Bohai Sea area during 1961~2019

图 6. 1961~2019 年环渤海地区各地平均 TCI 与海拔高度(a)、纬度(b)、经度(c)的相关关系

TCI 变化趋势值与海拔高度、纬度、经度等地理因子的气候趋势系数分别为 0.096、0.197、0.055，均呈正相关关系，其中 TCI 变化趋势值与纬度的相关性通过了 0.05 显著性水平检验，呈显著的正相关关系。在高纬度地区，TCI 变化趋势值相对更小。TCI 变化趋势值与海拔高度、经度的变化没有显著的相关性。

4. 结论

1) 环渤海地区累年平均 TCI 呈大致的纬向分布型，由南向北 TCI 逐渐增大。2000 年以来，各地 TCI 明显减小，山东中南部和河北南部一带小于 12.5。

2) 历年平均 TCI 呈波动减小的变化特征，气候倾向率为 $-0.156 (10a)^{-1}$ ，通过了 0.05 显著性水平检验，减小趋势显著。仅承德站 TCI 有不明显的增大变化趋势，共计 91.3% (252 站)的台站历年 TCI 减小变化趋势通过了 0.05 显著性水平检验，减小趋势显著。

3) 平均 TCI 与海拔高度、纬度、经度的气候趋势系数分别为 0.638、0.887、0.403，均通过了 0.05 显著性水平检验，呈显著的正相关关系。TCI 变化趋势与海拔高度、纬度、经度等气候趋势系数分别为 0.096、0.197、0.055，仅 TCI 变化趋势与纬度的相关性通过了 0.05 显著性水平检验，呈显著的正相关关系。

基金项目

环渤海区域科技协同创新基金项目——黄渤海区域性大风过程灾害风险评估技术和应用研究(QYXM202206)；山东省气象局科研项目——雷暴日数据重构及基于 ARIMA-SVM 雷电趋势预测研究(2023sdqxm03)。

参考文献

[1] 唐国利, 罗勇, 黄健斌, 等. 气候变暖在继续[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(4): 235-242.
 [2] 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 1951-2010 年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展, 2013, 32(6): 887-896.
 [3] 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 835-852.
 [4] 宋辞, 裴韬, 周成虎. 1960 年以来青藏高原气温变化研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1505-1509.

-
- [5] 虞海燕, 刘树华, 赵娜, 等. 1951-2009年中国不同区域气温和降水量变化特征[J]. 气象与环境学报, 2011, 27(4): 1-11.
- [6] 申红艳, 王冀, 马明亮, 等. 青海高原冬季持续低温集中程度的气候特征及其成因[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1394-1402.
- [7] 苗正伟, 李娜, 路梅, 等. 1961~2017年京津冀地区极端气温指数时空变化分析[J]. 北京师范大学(自然科学版), 2019, 55(3): 369-380.
- [8] Zhang, L.J. and Quan, Y.F. (2003) Annual Distribution Features of the Yearly Precipitation in China and Their Inter-annual Variations. *Acta Meteorological Sinica*, **17**, 142-163.
- [9] 董旭光, 邱粲, 李娟, 等. 1981-2016年山东陆地观测最大风速变化特征[J]. 海洋气象学报, 2018, 38(2): 87-95.
- [10] 赵广才. 中国小麦种植区划研究(一) [J]. 麦类作物学报, 2010, 30(5): 886-895.
- [11] 康西言, 董航宇, 姚树然. 基于气象因子的冬小麦发育期预报模型[J]. 中国农业气象, 2015, 36(4): 465-471.