

DOI: 10.20103/j.stxb.202310112198

董丽洁, 王晓利, 桂峰, 侯西勇. 基于 MODIS 数据的中国东部地区海陆温差时空变化特征. 生态学报, 2024, 44(14): 6097–6110.

Dong L J, Wang X L, Gui F, Hou X Y. Spatial and temporal characteristics of land-sea temperature difference in eastern China based on MODIS data. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 6097–6110.

基于 MODIS 数据的中国东部地区海陆温差时空变化特征

董丽洁^{1,2,3,4}, 王晓利^{2,3,4,*}, 桂 峰¹, 侯西勇^{2,3,4}

1 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 舟山 316022

2 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003

3 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室, 烟台 264003

4 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东省海岸带环境过程重点实验室, 烟台 264003

摘要: 海陆温差是海-陆间热力对比的重要表征, 对区域乃至全球气候产生重要影响。研究基于 2001—2021 年中分辨率成像光谱仪 (MODIS) 遥感数据, 研究了中国东部地区地表温度、海表温度以及海陆温差的时空变化及区域差异特征。结果表明: 2001—2021 年中国东部地区地表温度和海表温度均呈显著上升趋势, 上升幅度分别为 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 夜间地表温度和海表温度的上升态势更突出; 各季节中, 冬季地表温度和夏季海表温度增幅最大, 分别达 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($P < 0.05$); 空间上, 中国东部地表温度总体呈南高北低的格局特征, 海表温度则表现出从东北向西南递增、近岸低于远岸的特征。研究时段内, 中国东部地区海陆温差通常为负值, 海表温度总体高于地表温度, 且离海岸线越近的缓冲区范围内海陆温差越小; 100 km、200 km 和 300 km 缓冲区范围内年际海陆温差总体呈减小趋势, 其中 100 km 缓冲区范围内的降幅最大; 各季节中, 春季和冬季海陆温差呈减小趋势, 夏季和秋季的呈增大趋势; 空间上, 以 30°N 为界, 以北和以南区域的海陆温差分别呈减小和增大趋势。
关键词: 中分辨率成像光谱仪 (MODIS); 地表温度; 海表温度; 海陆温差; 时空特征

Spatial and temporal characteristics of land-sea temperature difference in eastern China based on MODIS data

DONG Lijie^{1,2,3,4}, WANG Xiaoli^{2,3,4,*}, GUI Feng¹, HOU Xiyong^{2,3,4}

1 Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China

2 Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

3 Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

4 Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China

Abstract: The temperature disparity between sea and land plays a pivotal role in assessing thermal distinctions, exerting a significant influence on regional and even global climate. This study utilized MODIS remote sensing data spanning from 2001 to 2021 to investigate temporal and spatial variations, as well as regional disparities, in land surface temperature, sea surface temperature, and the land-sea temperature difference in Eastern China. The findings revealed noteworthy increases in both surface temperature and sea surface temperature in Eastern China during 2001—2021, with increments of $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ and $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$, respectively. The upward trend in nighttime temperatures was more prominent. Seasonally, the

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41901133); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA19060205); 中国科学院海洋大科学中心前沿重点部署项目 (COMS2020Q07)

收稿日期: 2023-10-11; **网络出版日期:** 2024-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xlwang@yic.ac.cn

significant magnitudes were observed in winter for surface temperature and in summer for sea surface temperature, each experiencing increments of $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ and $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, respectively ($P<0.05$). Spatially, Eastern China typically exhibited a pattern of higher land surface temperatures in the southern regions and lower temperatures in the northern areas. Sea surface temperatures escalated from the northeast to the southwest, with near-shore sea temperatures being lower than those further offshore. The land-sea temperature difference in Eastern China consistently exhibited negative values, signifying that sea surface temperatures generally exceeded surface temperatures from 2001 to 2021. Moreover, the closer to the coastline, the smaller land-sea temperature difference the buffer zone. The interannual variation in land-sea temperature difference across the 100 km, 200 km, and 300 km buffer regions displayed a general declining trend, with the most substantial decline within the 100 km buffer zone. Seasonally, the land-sea temperature difference showed a decreasing trend in spring and winter, while an increasing trend in summer and autumn. Additionally, the land-sea temperature difference generally decreased in the north and increased in the south of 30°N .

Key Words: MODIS; land surface temperature; sea surface temperature; land-sea temperature difference; spatiotemporal characteristics

政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次气候变化评估报告(AR6)指出,相较于 1850—1900 年,2011—2020 年全球平均地表温度(Land Surface Temperature, LST)和海表温度(Sea Surface Temperature, SST)分别上升了约 $1.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1]。全球气候持续暖化,但陆地增温幅度明显大于海洋增温幅度,导致海陆增温出现差异,进而对全球气候系统和环境变化产生显著影响^[2]。例如,海陆温差(Land-Sea Temperature Difference, LSTD)改变引起气候极值的变化,增加大气持水量,导致极端气候的频次和强度增加,继而引发气象灾害及其次生灾害^[3-4]。海陆温差变化也对海洋生态系统产生显著影响,温差异常打破海洋生物生存的水环境平衡,导致渔业资源受损,最终影响水产品供给等^[5-6]。因此,探究海陆温差变化可为全球升温背景下沿海地区气象灾害防治、气候变化风险评估以及可持续发展等提供科学参考。

海陆温差是指海洋和陆地之间的温度差异,即地表温度和海表温度的差值,是海-陆间热力对比的重要表征^[7]。研究海陆温差变化首先需要获悉地表温度和海表温度的变化特征。近 20 年来,全球地表温度以 $0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的增幅持续攀升,其中北极、俄罗斯和欧洲地区增温态势最突出,增温速率分别达 $0.72\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[8]。我国地表温度也呈显著上升趋势,2001—2020 年的温度增幅为 $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,升温区约占国土面积的 78%^[9]。在中小尺度区域上地表温度的增加态势也较明显,例如,基于 MODIS 遥感数据的研究发现,我国粤港澳大湾区、天山北坡城市群以及江浙沪地区地表温度的增幅分别为 $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[10-12]。针对海表温度变化的研究发现,1900—2019 年全球海表温度平均增温速率为 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,其中 2010—2019 年的增温速率达 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[13],远高于历史时期的平均水平。中小尺度区域上的海表温度也以增温为主,例如,1993—2019 年地中海、黑海及波罗的海海表温度分别以 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.71\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的速率增加^[13];1980—2019 年中国沿海海表温度的上升速率为 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,其中,黄海和东海海表温度增幅较高,分别为 $0.28\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,渤海和南海海表温度上升速率均为 $0.22\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ^[14]。

就海陆温差而言,Sutton 等^[15]基于 20 个 CMIP5 气候模式模拟发现 1961—1990 年全球海陆增温比介于 1.36—1.84 之间。Day 等^[16]和 He 等^[17]通过对 ERA 及 NCEP-NCAR 再分析资料进行分析,发现 1979—2014 年北极以及西伯利亚等高纬度地区海陆增温比呈显著增加趋势,陆地温度增温速度明显快于海洋。黄海东等^[18]采用 1951—2015 年气象站点和 HadISST 再分析资料分别构建了中国西南地区与孟加拉湾、南海、东海三个海域的海陆温差序列,发现与孟加拉湾和东海的海陆温差均呈先增大后减小的变化趋势,与南海的海陆温差呈逐渐增大的趋势。中国东部地区是亚欧大陆和西太平洋之间的过渡地带,海陆相互作用强烈,自然环境复杂多变^[19],是海陆温差变化最突出、最具代表性的区域之一。已有研究发现,中国东部陆海同时增温,增

温比值一般在 0—1 之间,地表增温速率高于海表增温速率,海陆温差变化总体呈减小趋势,变化幅度具有明显的季节和年代际特征^[7, 20—23]。

上述研究在全球、区域以及局地尺度地表温度、海表温度和海陆温差变化研究方面取得了重要进展,提高了人们对全球变暖背景下海陆温度及其差异变化的认识。然而,在海陆温差变化分析方面,已有研究通常采用不同的陆、海温度数据源用以研究海陆温差及其变化,如,地面气象站观测数据和再分析资料等,海陆温度数据源不统一^[7, 22—23],可能对海陆温差的研究结果带来一定的不确定性。再者,针对中国东部,离海岸线不同距离范围内全天、白天以及夜间的海陆温差及其变化特征的对比以及纬向的区域差异研究尚属空白。鉴于此,本文采用兼具陆、海温度产品的 MODIS 遥感数据探究中国东部地区地表温度、海表温度以及海陆温差的时空变化及其区域差异特征,以期沿海地区应对气候变化和灾害风险管理提供科学参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

聚焦中国东部地区,以海岸线为界,向陆、向海分别建立 100 km、200 km 和 300 km 的缓冲区,将所有缓冲区囊括在内的空间范围定义为研究区,简称中国东部地区。以 5°为纬度梯度值划分子区域,从北至南依次包括北渤海区(I 区)、渤海区(II 区)、黄海区(III 区)、北东海区(IV 区)、南东海区(V 区)和南海区(VI 区)共 6 个子区域(图 1),其中 I—III 区为北部海区;IV—VI 区为南部海区。

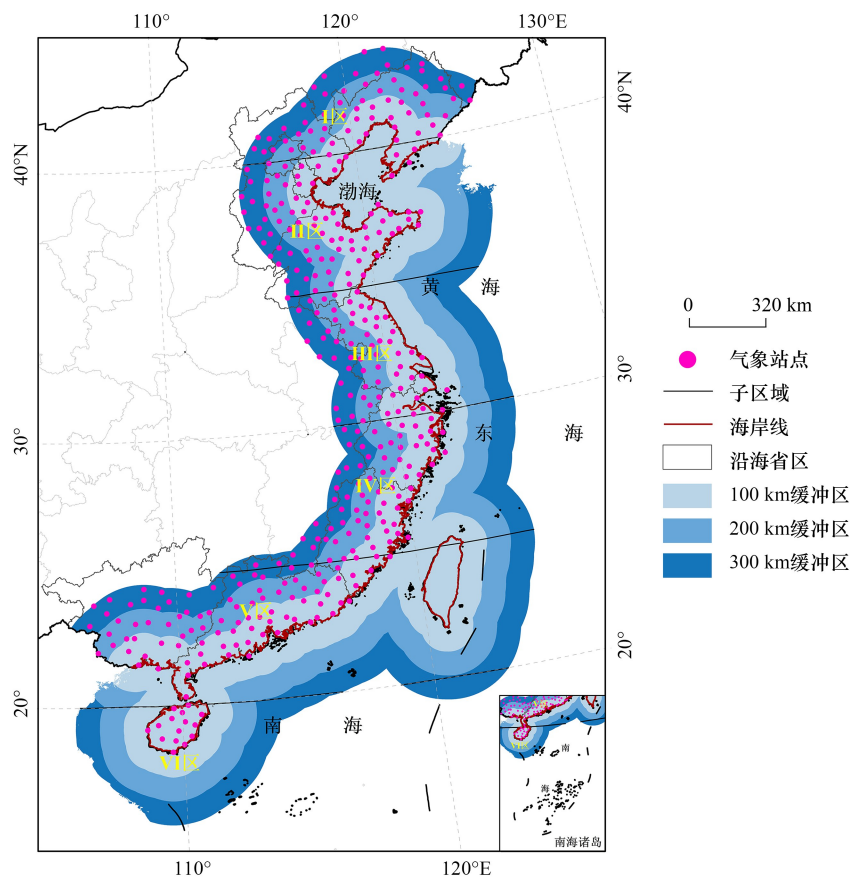


图 1 研究区地理位置和气象站点分布

Fig.1 Location of the study area and distribution of meteorological stations

I—VI 区分别代表北渤海区、渤海区、黄海区、北东海区、南东海区、南海区

中国东部地区纵跨 29 个纬度带,区域内自然环境复杂、气候类型多样,具有明显的海陆过渡性气候特

征^[24]。研究区内分布有环渤海、长三角和珠三角三大城市群,人口密度大、城市化水平高、经济发展迅猛,是气候变化的敏感区和影响显著区。

1.2 数据来源与预处理

地表温度数据采用 NASA (<https://ladweb.modaps.eosdis.nasa.gov>) 提供的 MODIS Terra 地表温度产品 MOD11A2,时间分辨率为 8 d,空间分辨率为 1 km,包含 2001—2021 年的白天(LST_Day)和夜间(LST_Night)地表温度数据。海表温度数据采用 NASA 水色卫星网站(<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov>)提供的 MODIS Terra 海表温度三级月尺度产品 MODIS_L3,空间分辨率为 4 km,包含 2001—2021 年的白天(SST_Day)和夜间(SST_Night)海表温度数据。

利用 MODIS 重投影工具 MRT(MODIS Reprojection Tool)对原始遥感影像数据进行拼接和投影转换。利用 ArcGIS 10.7 完成地表温度数据的真实值计算,采用均值法将其合成为月、季和年尺度数据。基于双线性插值方法对海表温度数据进行重采样,将海表温度和地表温度数据的空间分辨率统一至 1 km^[25],采用均值法将月尺度海表温度数据合成为季和年尺度海表温度。最终得到 2001—2021 年中国东部地区地表和海表温度月、季和年尺度时序数据集。

1.3 研究方法

1.3.1 地表温度数据重建

受云、雨等大气因素的干扰,MODIS 地表温度数据通常存在数据缺失现象。基于 MRT 提取数据质量控制文件对地表温度遥感数据进行质量分析,发现中国东部白天和夜间地表温度缺失数据的占比分别介于 13%—26%和 11%—22%之间,南方沿海地区的数据缺失尤为严重。采用 Yao 等^[26]提出的估算温差法(Estimation of the temperature difference,ETD)对地表温度数据进行重建。数据重建主要步骤包括:定义相关影像和目标影像并计算两者之间的差值以获得差值影像;定义恰当的空间窗口,采用加权函数估算重建差值影像中的缺失值;将重建的差值影像加上相关影像,得到重建后的目标影像。地表温度数据重建之后,发现南方沿海地区仍有极少数区域存在数据空白现象,采用 2001—2021 年同一日期的多年平均地表温度对空白区域进行数据填补。

为了检验地表温度数据的重建效果,选取研究区内 399 个气象站点 2001—2021 年日平均气温的观测数据进行精度验证。气象观测数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn>),气象站点分布如图 1 所示。采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE)和 Pearson 相关系数 r 作为精度评价指标。总体而言,基于 ETD 方法重建的中国东部地表温度数据精度较高(表 1),其中,全区尺度上重建数据与观测数据之间的 RMSE 为 0.35 °C, MAE 为 0.33 °C, r 为 0.96($P<0.01$);子区域尺度上重建数据与观测数据之间的 RMSE 和 MAE 均小于 1.01 °C, r 大于 0.84($P<0.01$),北方沿海地区地表温度的重建效果优于南方沿海地区。

表 1 实测数据与重建数据精度验证

Table 1 Experimental data and reconstructed data accuracy verification

评价指标 Evaluation metrics	I 区 Region I	II 区 Region II	III 区 Region III	IV 区 Region IV	V 区 Region V	VI 区 Region VI	全区 Entire region
RMSE	0.60	0.52	0.33	1.01	0.98	0.79	0.35
MAE	0.56	0.47	0.25	0.99	0.95	0.77	0.33
r	0.96 **	0.94 **	0.90 **	0.84 **	0.90 **	0.90 **	0.96 **

RMSE:均方根误差 Root mean square error; MAE:平均绝对误差 Mean absolute error; r : Pearson 相关系数 Pearson product-moment correlation coefficient; * *:变化趋势通过置信度 99%的显著性检验水平; I—VI 区分别代表北渤海区、渤海黄海区、黄海区、北海海区、南海海区、南海区

1.3.2 海陆温差计算

将海岸线视为海陆分界线,海陆温差定义为陆地地表温度与海洋海表温度的差值,计算公式如下所示:

$$\Delta T_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_{\text{land}j} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{\text{seaj}} \quad (1)$$

式中, ΔT_j 为海陆温差, $j=1, 2, 3$, 分别代表 100 km、200 km 和 300 km 缓冲区; $T_{\text{land}j}$ 为地表温度多年均值, m 为区域内地表温度像元个数, T_{seaj} 为海表温度多年均值, n 为区域内海表温度像元个数。

1.3.3 趋势分析

基于一元线性回归方程计算中国东部地区海陆温差的变化趋势及变化幅度, 公式如下:

$$y = at + b \quad (2)$$

式中, y 为海陆温差; t 为时间; a 为年际变化率。需要特别说明的是, 当海陆温差为负值时, 其年际变化率为正(负)表明海陆温差在减小(增大); 当海陆温差为正值时, 其年际倾向率为正(负)表明海陆温差在增大(减小)。

基于线性回归法在空间像元尺度上计算 2001—2021 年中国东部地表温度和海表温度的多年变化趋势, 公式如下:

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times T_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n T_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (3)$$

式中, Slope 为年际变化率; n 为总年数 ($n=21$); i 为时间序列值; T_i 为第 i 年的平均温度; 当 Slope > 0 时, 表明温度呈上升趋势; 当 Slope < 0 时, 表明温度呈下降趋势。采用 F 检验对温度变化的趋势进行显著性检验, $P < 0.05$ 表明变化趋势显著。

2 结果与分析

2.1 地表温度时空变化特征

2.1.1 地表温度时间变化趋势

2001—2021 年中国东部地区及各子区域地表温度年际及各季节多年均值和年际倾向率如表 2 所示。研究时段内, 中国东部地区年际全天地表温度呈显著上升趋势, 增幅为 0.34 °C/10a; 各子区域中 II 区和 III 区的地表温度显著增加, 增幅分别为 0.62 °C/10a 和 0.61 °C/10a。年际白天地表温度仅在 II 区和 III 区呈显著上升趋势, 年际倾向率分别为 0.69 °C/10a 和 0.71 °C/10a。中国东部地区全区及其各子区域年际夜间地表温度均呈显著上升趋势, 其中 II 区和 III 区的增温幅度最大, 均超过了 0.50 °C/10a。

就各季节而言, 春季全天地表温度总体呈上升趋势, 仅全区和 III 区的变化趋势通过了显著性检验, 增幅分别为 0.43 °C/10a 和 0.77 °C/10a; 除 V 区和 VI 区以外, 中国东部及其子区域白天地表温度均呈上升趋势, 仅 III 区的增温趋势显著; 夜间地表温度整体呈增加趋势, 北部沿岸的增温趋势更显著。夏季, 除 I 区白天地表温度呈下降趋势以外, 全区及各子区域全天、白天和夜间地表温度均呈上升趋势, 且 II 区和 III 区的升温态势更突出。秋季, 各子区域地表温度变化趋势的显著性整体上不明显, 仅 II 区、III 区和 VI 区夜间地表温度呈显著上升趋势。冬季, 除 VI 区以外, 全区及各子区域地表温度均呈增加态势, 其中, II 区和 III 区白天地表温度的上升幅度最突出, 年际倾向率分别达 0.99 °C/10a 和 0.98 °C/10a。相对来说, 2001—2021 年中国东部地区冬季地表温度的增幅最大, 各子区域中 II 区和 III 区的升温态势更突出, 夜间地表温度的增温幅度更大。

2.1.2 地表温度空间格局特征

2001—2021 年中国东部地区地表温度多年均值的空间分布如图 2 所示。中国东部地区地表温度总体呈南高北低的空间格局特征。年际全天、白天及夜间地表温度的多年均值分别介于 0.41—28.66 °C、4.63—35.60 °C 和 -5.10—24.48 °C 之间。地表温度最高值通常位于台湾西部地区(V 区)和海南(VI 区), 最低值多位于北渤海东北部地区(I 区)。

表 2 2001—2021 年中国东部地区年际和各季节地表温度多年均值/℃与年际倾向率/(℃/10a)

Table 2 Multi-year average and decadal trend rate of annual and seasonal land surface temperature in eastern China during 2001—2021

地表温度 LST		I 区		II 区		III 区		IV 区		V 区		VI 区		全区	
		Region I		Region II		Region III		Region IV		Region V		Region VI		Entire region	
		均值	倾向率	均值	倾向率	均值	倾向率	均值	倾向率	均值	倾向率	均值	倾向率	均值	倾向率
		Ma	Rat	Ma	Rat	Ma	Rat	Ma	Rat	Ma	Rat	Ma	Rat	Ma	Rat
年际	LST	8.99	0.23	13.60	0.62 *	15.93	0.61 *	17.80	0.22	21.07	0.16	24.03	0.11	16.14	0.34 *
Annual	LST_Day	15.74	-0.02	20.03	0.69 *	20.61	0.71 *	21.78	0.09	24.83	-0.01	27.97	-0.12	21.13	0.24
	LST_Night	2.26	0.48 *	4.17	0.55 *	11.24	0.52 *	13.82	0.36 *	17.32	0.33 *	20.09	0.34 *	11.15	0.43 *
春季	LST	11.72	0.58	15.43	0.59	16.32	0.77 *	18.21	0.29	21.93	0.15	25.93	0.06	17.41	0.43 *
Spring	LST_Day	20.95	0.54	23.62	0.64	21.97	0.88 *	22.71	0.17	25.87	-0.14	30.42	-0.28	23.49	0.33
	LST_Night	2.48	0.63 *	7.23	0.55 *	10.67	0.66 *	13.70	0.41	17.99	0.46	21.44	0.40	11.32	0.53 *
夏季	LST	23.34	0.03	25.82	0.73 *	26.18	0.53 *	25.03	0.10	25.73	0.27 *	26.29	0.45 *	25.25	0.32 *
Summer	LST_Day	29.22	-0.21	31.33	0.82 *	30.20	0.69 *	28.71	0	29.08	0.17	29.86	0.35	29.64	0.23 *
	LST_Night	17.47	0.37 *	20.32	0.63 *	22.17	0.38 *	21.34	0.30	22.37	0.38 *	22.71	0.54 *	20.86	0.42 *
秋季	LST	9.20	-0.03	13.99	0.37	17.27	0.36	19.03	0.15	21.99	0.05	23.78	0.22	16.92	0.15
Autumn	LST_Day	15.26	-0.25	20.03	0.27	22.07	0.27	23.01	-0.06	25.79	-0.15	27.31	0.01	21.73	-0.05
	LST_Night	3.15	0.21	7.94	0.46 *	12.47	0.45 *	15.05	0.37	18.18	0.26	20.25	0.44 *	12.11	0.34 *
冬季	LST	-8.27	0.41	-0.86	0.78	3.92	0.79 *	8.93	0.37	14.63	0.19	20.14	-0.32	4.98	0.45 *
Winter	LST_Day	-2.47	0.10	5.12	0.99 *	8.21	0.98 *	12.68	0.37	18.54	0.15	24.29	-0.57	9.66	0.44
	LST_Night	-14.08	0.72	-6.84	0.54	-0.36	0.60	5.19	0.38	10.72	0.23	15.98	-0.06	0.30	0.45 *

LST:地表温度 Land surface temperature;LST_Day:白天地表温度 Daytime land surface temperature;夜间地表温度 Nighttime land surface temperature;Ma: 多年均值 Multi-year average;Rat: 年际倾向率 Decadal trend rate; * 表示变化趋势通过置信度 95%的显著性检验水平

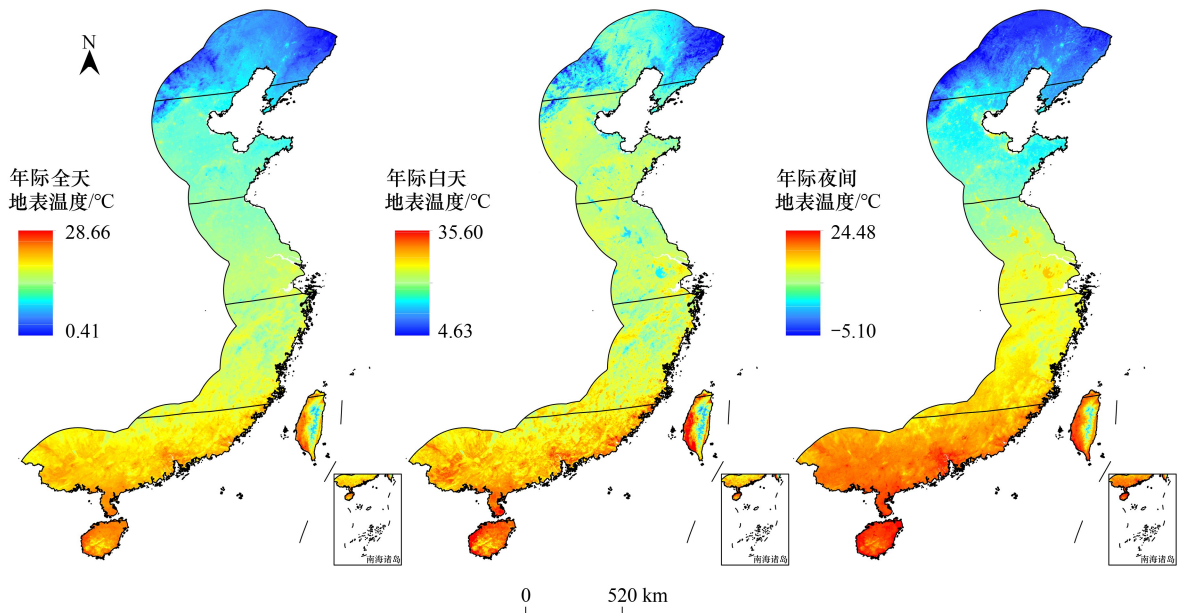


图 2 2001—2021 年中国东部地区地表温度多年均值的空间分布
Fig.2 Spatial distribution of multi-year average in land surface temperature in eastern China during 2001—2021

2001—2021 年中国东部地区地表温度年际倾向率的空间分布特征如图 3 所示。约 38.88%的区域年际全天地表温度呈显著上升趋势,主要分布在渤海沿岸(II 区)、黄海沿岸(III 区)以及珠江三角洲地区(V 区);仅 1.67%的区域地表温度呈显著下降趋势,基本位于 V 区。就年际白天地表温度而言,温度显著增加区域(约 27.67%)主要位于 II 区和 III 区,温度显著下降区域(约 6.86%)多分布在 I 区和 V 区。约 53.27%的区域

夜间地表温度呈显著上升趋势,仅 1.41% 的区域夜间地表温度呈显著下降趋势,零星分布于广西西北部(V 区)。

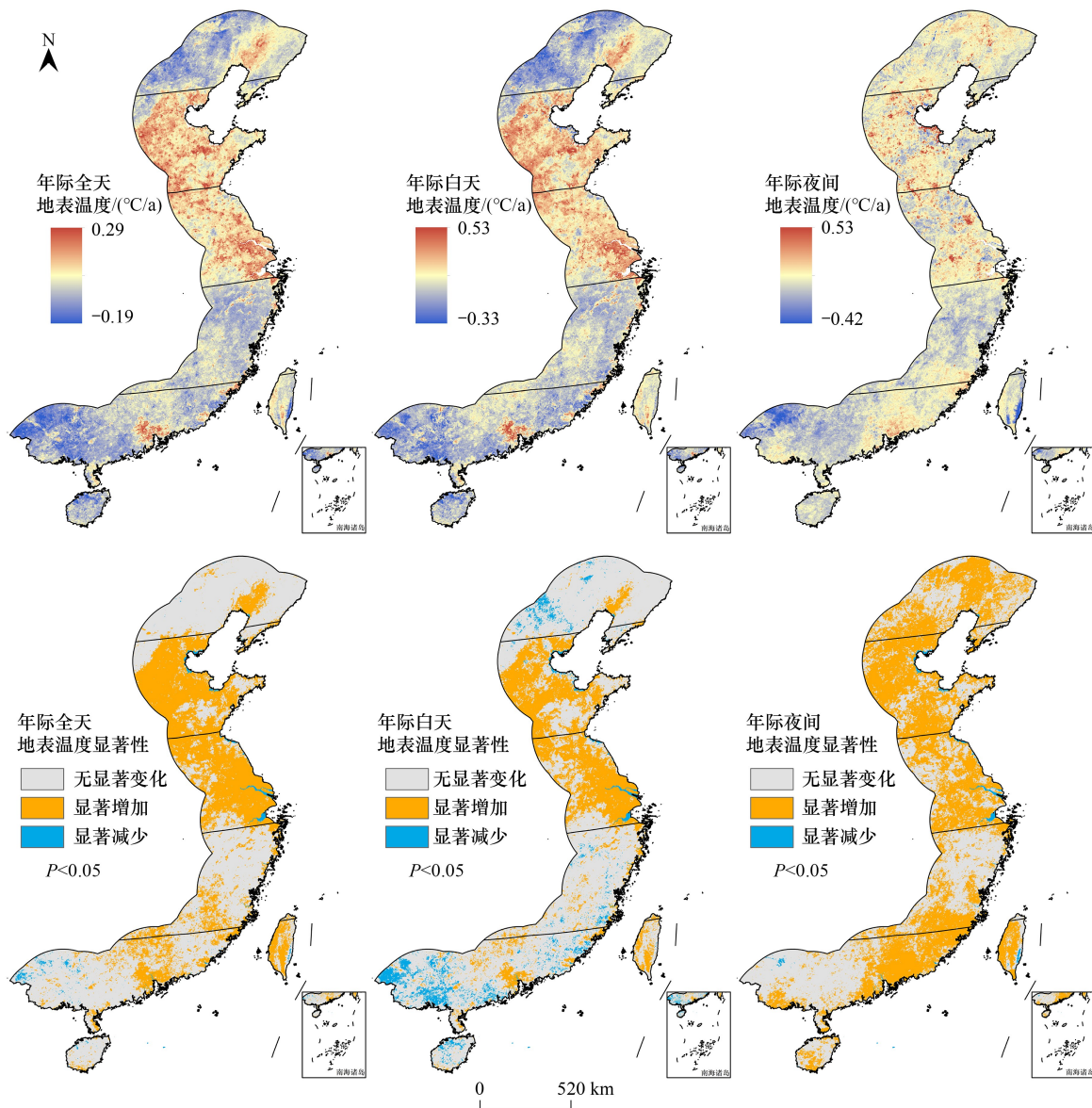


图 3 2001—2021 年中国东部地区地表温度年际倾向率的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of decadal trend rate in land surface temperatures in eastern China during 2001—2021

2.2 海表温度时空变化特征

2.2.1 海表温度时间变化趋势

2001—2021 年中国东部及各子区域海表温度年际及各季节多年均值和年际倾向率如表 3 所示。研究时段内,中国东部年际全天海表温度呈显著上升趋势,增幅为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;各子区域年际全天海表温度均呈上升趋势,仅 I 区和 III 区的趋势不显著。全区及各子区域年际白天和夜间海表温度均呈显著上升趋势(I 区和 III 区除外),其中,II 区海表温度的上升幅度最大,年际白天和夜间海表温度倾向率分别为 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.49\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

就各季节而言,春季全区及各子区域全天、白天以及夜间海表温度总体呈上升趋势,但变化趋势均未通过显著性检验。夏季,除 III 区以外,全区及其他子区域全天、白天和夜间海表温度均呈显著上升趋势,其中, I 区

和Ⅱ区的升温态势最突出,海表温度增幅均超过了 0.70 ℃/10a。秋季,全区及各子区域全天、白天和夜间海表温度均呈上升趋势,仅Ⅰ区和Ⅲ区的变化趋势未通过显著性检验。冬季,除Ⅰ区海表温度呈下降趋势以外,其他区域全天、白天和夜间海表温度均呈上升趋势,但变化趋势基本不显著。比较发现,2001—2021 年中国东部夏季海表温度增幅最大,各子区域中Ⅱ区及Ⅳ—Ⅵ区海表温度的增温趋势更明显,夜间海表温度上升态势更突出。

表 3 2001—2021 年中国东部年际和各季节海表温度多年均值/℃ 与年际倾向率/(℃/10a)

海表温度 SST		Ⅰ区 Region I		Ⅱ区 Region II		Ⅲ区 Region III		Ⅳ区 Region IV		Ⅴ区 Region V		Ⅵ区 Region VI		全区 Entire region	
		均值	倾向率	均值	倾向率	均值	倾向率	均值	倾向率	均值	倾向率	均值	倾向率	均值	倾向率
		Ma	Rat	Ma	Rat	Ma	Rat	Ma	Rat	Ma	Rat	Ma	Rat	Ma	Rat
年际	SST	13.10	0.05	14.05	0.43 *	17.55	0.24	22.70	0.26 *	25.96	0.32 *	26.92	0.30 *	22.57	0.32 *
Annual	SST_Day	13.25	-0.03	14.25	0.38 *	17.89	0.09	22.88	0.23 *	26.11	0.30 *	27.09	0.27 *	22.76	0.27 *
	SST_Night	12.94	0.14	13.85	0.49 *	17.20	0.38	22.52	0.30 *	25.79	0.34 *	26.76	0.33 *	22.38	0.36 *
春季	SST	7.01	0.19	8.37	0.35	12.62	0.34	19.76	0.17	25.03	0.26	26.26	0.23	20.11	0.26
Spring	SST_Day	7.56	-0.03	8.78	0.30	13.06	0.26	20.02	0.16	25.23	0.21	26.53	0.17	20.38	0.22
	SST_Night	6.47	0.42	7.96	0.42	12.17	0.42	19.51	0.18	24.83	0.30	26.19	0.28	19.84	0.31
夏季	SST	23.02	0.71 *	22.71	0.77 *	24.91	0.33	27.48	0.30 *	28.99	0.40 *	29.40	0.37 *	27.27	0.43 *
Summer	SST_Day	23.26	0.70 *	22.92	0.72 *	25.21	0.24	27.66	0.25 *	29.18	0.40 *	29.58	0.36 *	27.47	0.41 *
	SST_Night	22.78	0.73 *	22.50	0.83 *	24.62	0.42	27.30	0.35 *	28.81	0.39 *	29.23	0.38 *	27.07	0.46 *
秋季	SST	16.65	0.30	18.86	0.42 *	21.85	0.31	25.24	0.30 *	27.23	0.41 *	27.93	0.40 *	24.95	0.38 *
Autumn	SST_Day	16.79	0.26	18.90	0.36 *	21.96	0.26	25.33	0.34 *	27.33	0.39 *	28.04	0.37 *	25.04	0.36 *
	SST_Night	16.52	0.26	18.82	0.46 *	21.73	0.28	25.15	0.34 *	27.14	0.46 *	27.81	0.43 *	24.86	0.41 *
冬季	SST	1.88	-0.19	5.96	0.32	10.56	0.25	18.15	0.24 *	22.51	0.20	23.96	0.23 *	17.79	0.22 *
Winter	SST_Day	1.90	-0.11	6.11	0.32	10.83	0.12	18.31	0.24	22.66	0.18	24.16	0.21	17.96	0.19
	SST_Night	1.85	-0.26	5.82	0.32	10.29	0.37	17.98	0.25	22.36	0.22	23.77	0.22	17.62	0.25

SST:海表温度 Sea surface temperature; SST_Day:白天海表温度 Daytime sea surface temperature; 夜间海表温度 Nighttime sea surface temperature

2.2.2 海表温度空间格局特征

2001—2021 年中国东部海表温度多年均值的空间分布如图 4 所示。中国东部海表温度整体呈从东北向西南递增,近岸海域海表温度低于远岸海域的特征。年际全天、白天及夜间海表温度多年均值分别介于 11.41—28.40 ℃、11.21—30.70 ℃ 和 11.11—28.18 ℃ 之间。年际全天、白天和夜间海表温度空间分布特征较一致,最高值通常位于南海海区(Ⅵ区),最低值多位于北渤海海区(Ⅰ区)。

2001—2021 年中国东部海表温度年际倾向率的分布特征如图 5 所示。约 69.42% 的区域海表温度呈上升趋势,渤海海区(Ⅱ区)的增幅相对较高;约 1.16% 的区域海表温度呈显著下降趋势,零星分布于渤海(Ⅱ区)和黄海海区(Ⅲ区)的近岸海域。就白天海表温度而言,约 55.38% 和 1.31% 的区域海表温度分别呈显著上升和下降趋势,其空间分布特征与全天海表温度的分布较为一致。夜间海表温度呈显著增加的区域较为广泛,比例达 75.56%,其主要位于渤海海区(Ⅱ区)和东海以南海区(Ⅴ和Ⅵ区);仅 0.83% 的区域夜间海表温度呈显著下降趋势。

2.3 海陆温差时空变化特征

基于地表温度和海表温度数据序列计算得到 2001—2021 年中国东部及其子区域年际和各季节全天海陆温差的多年均值和年际倾向率,如表 4 所示。2001—2021 年中国东部年际全天海陆温差均为负值,100 km、200 km 和 300 km 缓冲区全区年际海陆温差多年均值分别为-3.50 ℃、-5.24 ℃、-6.43 ℃,表明离海岸线越近海陆温差越小。从变化趋势看,北部和南部海区海陆温差分别呈减小和增大趋势,仅Ⅲ区各缓冲区范围内的海陆温差减小趋势显著。就各季节海陆温差均值而言,除Ⅰ—Ⅲ区春季和夏季海陆温差为正值外,其他区域各季节的基本为负值,也呈现离海岸线越近海陆温差越小的特征。从各季节海陆温差的变化率来看,仅夏季Ⅰ区海陆温差的减小趋势显著,其他各季节全区及各子区域年际全天海陆温差变化趋势均不显著。综合分析

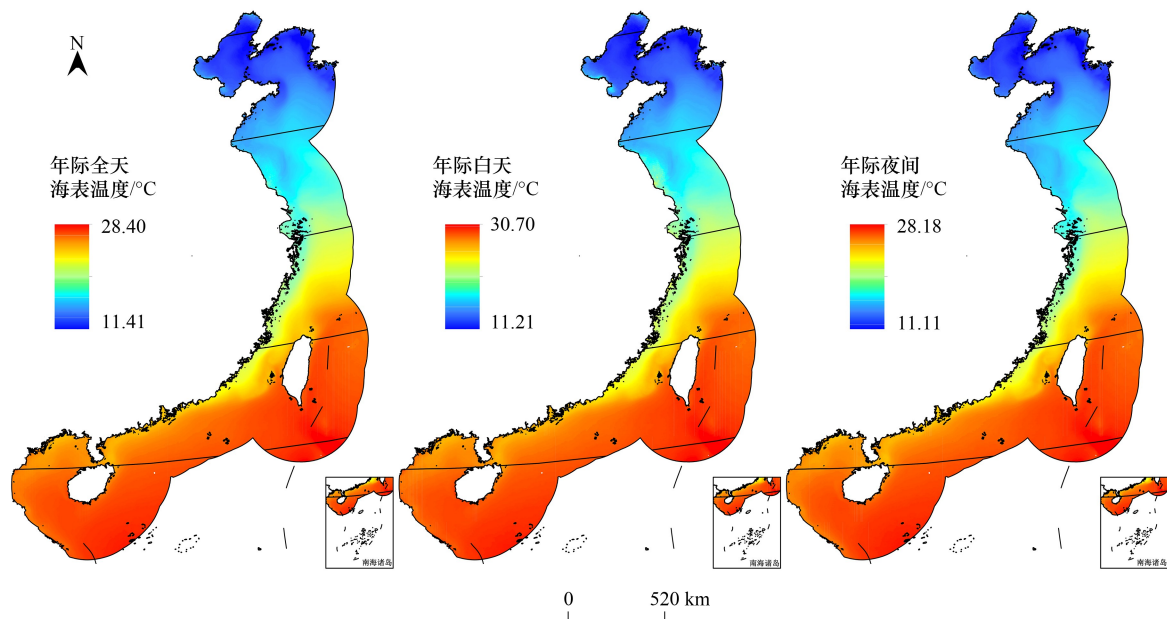


图 4 2001—2021 年中国东部海表温度多年均值的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of Multi-year average in sea surface temperatures in eastern China during 2001—2021

发现,2001—2021 年中国东部年际全天海陆温差变化率总体呈减小趋势,其中,100 km 缓冲区范围内的降幅最大;春季和冬季的全天海陆温差呈减小趋势,夏季和秋季的呈增大趋势。

表 4 2001—2021 年中国东部年际和各季节全天海陆温差多年均值/°C 与年际倾向率/(°C/10a)

Table 4 Multi-year average and decadal trend rate of annual and seasonal all-day land-sea temperature difference in eastern China during 2001—2021

海陆温差 LSTD	缓冲区/km Buffer area	I 区 Region I		II 区 Region II		III 区 Region III		IV 区 Region IV		V 区 Region V		VI 区 Region VI		全区 Entire region	
		均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat
年际 Annual	100	-2.81	0.30	-0.24	0.19	-1.03	0.48 *	-3.80	-0.03	-3.53	-0.06	-2.63	-0.19	-3.50	0.08
	200	-3.38	0.23	-0.36	0.18	-1.43	0.39 *	-4.69	-0.05	-4.34	-0.12	-2.78	-0.19	-5.24	0.04
	300	-4.10	0.18	-0.45	0.18	-1.62	0.38 *	-4.90	-0.04	-4.88	-0.16	-2.89	-0.19	-6.43	0.02
春季 Spring	100	5.73	0.38	7.04	0.27	3.28	0.49 *	-0.60	0.08	-1.82	-0.08	-0.14	-0.15	0.31	0.14
	200	5.34	0.38	7.16	0.26	3.50	0.48	-1.43	0.12	-2.59	-0.01	-0.26	-0.16	-1.49	0.16
	300	4.70	0.39	7.06	0.25	3.70	0.43	-1.53	0.06	-3.09	-0.11	-0.43	-0.17	-2.70	0.17
夏季 Summer	100	0.75	-0.52 *	3.01	-0.05	1.12	0.21	-2.09	-0.13	-2.91	0	-2.89	0.14	-1.04	-0.03
	200	0.52	-0.58 *	3.14	-0.05	1.21	0.21	-2.46	-0.21	-3.05	-0.09	-3.06	0.10	-1.62	-0.08
	300	0.32	-0.68 *	3.12	-0.04	1.28	0.21	-2.45	-0.20	-3.27	-0.12	-3.12	0.08	-2.02	-0.11
秋季 Autumn	100	-5.96	-0.21	-4.62	-0.02	-3.82	0.01	-5.50	-0.14	-4.20	-0.19	-4.04	-0.27	-5.53	-0.15
	200	-6.67	-0.31	-4.75	-0.05	-4.36	0.04	-6.10	-0.15	-4.78	-0.28	-4.10	-0.23	-6.98	-0.20
	300	-7.45	-0.36	-4.87	-0.04	-4.57	0.09	-6.21	-0.19	-5.24	-0.36	-4.15	-0.18	-8.03	-0.23
冬季 Winter	100	-7.95	0.80	-6.01	0.38	-4.03	0.53 *	-6.79	0.07	-5.13	0.07	-3.43	-0.48	-7.47	0.24
	200	-8.91	0.67	-6.67	0.42	-5.71	0.48	-8.56	0.09	-6.87	0.03	-3.67	-0.50	-10.71	0.23
	300	-10.15	0.60	-6.83	0.45	-6.63	0.55	-9.21	0.13	-7.88	0.01	-3.83	-0.54	-12.83	0.23

LSTD:海陆温差 Land-sea temperature difference

2001—2021 年中国东部年际和各季节白天海陆温差平均值和年际倾向率如表 5 所示。除 IV 区、V 区和全区外,其他区域各缓冲区范围内年际白天海陆温差多年均值以正值为主;III 区和 V 区呈显著增大趋势,VI 区呈显著减小趋势。从各季节来看,全区及各子区域春季和夏季白天海陆温差均为正值,秋季和冬季多为负值,

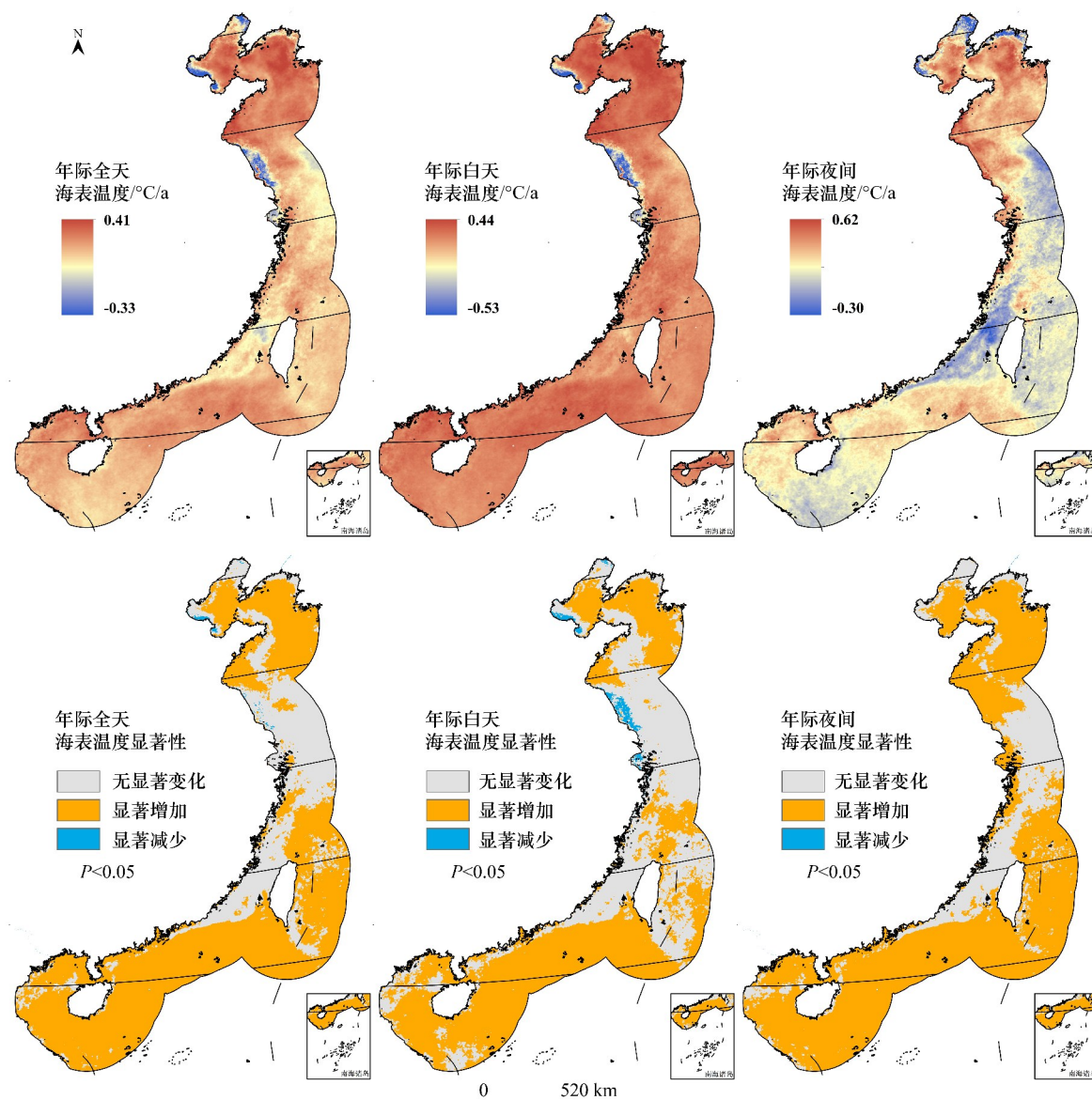


图5 2001—2021年中国东部海表温度年际倾向率的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of decadal trend rate in sea surface temperatures in eastern China during 2001—2021

且表现出离海岸线越近的缓冲区范围内海陆温差越小的特征;Ⅲ区春季和夏季及Ⅰ区和Ⅴ区秋季白天海陆温差呈显著增大趋势,Ⅰ区夏季及Ⅲ区和Ⅵ区冬季白天海陆温差呈显著减小趋势,其余区域各季节白天海陆温差变化均不显著。比较而言,2001—2021年中国东部100 km缓冲区范围内白天海陆温差呈增大趋势,200 km和300 km缓冲区范围内白天海陆温差呈减小趋势;各季节中,春季和秋季的白天海陆温差呈增大趋势,夏季和冬季的呈减小趋势;各子区域中,Ⅲ区白天海陆温差的变化趋势更显著。

2001—2021年中国东部各子区域年际和各季节夜间海陆温差平均值和年际倾向率如表6所示。研究区夜间海陆温差多年均值为负值,离海岸线越近的缓冲区范围内海陆温差越小。就变化率而言,仅夏季Ⅰ区和Ⅵ区的海陆温差分别呈显著增大和减小趋势,其他季节各区域夜间海陆温差以减小趋势为主,但变化趋势均不显著。整体来看,2001—2021年中国东部各缓冲区夜间海陆温差的变化趋势与全天的相一致,变化率总体呈减小趋势,100 km缓冲区范围内的降幅最大;各季节中,春季和冬季的夜间海陆温差呈减小趋势,夏季和秋季的呈增大趋势。

表 5 2001—2021 年中国东部年际和各季节白天海陆温差多年均值/℃与年际倾向率/(℃/10a)

Table 5 Multi-year average and decadal trend rate of annual and seasonal daytime land-sea temperature difference in eastern China during 2001—2021

海陆温差 LSTD	缓冲区/km Buffer area	I 区 Region I		II 区 Region II		III 区 Region III		IV 区 Region IV		V 区 Region V		VI 区 Region VI		全区 Entire region	
		均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat
年际	100	3.54	0.27	5.88	0.34 *	2.98	0.94 *	0.14	-0.13	0.11	-0.23 *	1.14	-0.38 *	1.09	0.07
Annual	200	2.95	0.11	5.94	0.30	2.73	0.69 *	-0.89	-0.15	-0.74	-0.28 *	1.01	-0.39 *	-0.59	0.05
	300	2.48	0.08	5.78	0.31	2.74	0.62 *	-1.10	-0.14	-1.29	-0.31 *	0.88	-0.40 *	-1.63	0.03
春季	100	14.28	0.69	14.97	0.45	8.33	0.87 *	3.92	0.06	2.02	-0.37	4.19	-0.43	5.87	0.12
Spring	200	13.82	0.60	15.05	0.37	8.60	0.74 *	2.89	0.01	1.16	-0.41	4.08	-0.44	4.17	0.10
	300	13.39	0.57	14.84	0.34	8.90	0.62 *	2.70	0.02	0.65	-0.39	3.89	-0.46	3.11	0.11
夏季	100	5.76	-0.70 *	8.29	0.13	4.76	0.51 *	1.55	-0.28	0.31	-0.10	0.52	0.06	2.96	-0.03
Summer	200	5.71	-0.81 *	8.43	0.09	4.83	0.49 *	1.08	-0.35	0.11	-0.20	0.36	0.03	2.42	-0.11
	300	5.96	-1.01 *	8.41	0.11	4.99	0.45 *	1.06	-0.35	0.09	-0.24	0.28	0.01	2.17	-0.18
秋季	100	-0.37	-0.49 *	1.24	0.03	0.56	0.11	-1.55	-0.40	-0.72	-0.39 *	-0.66	-0.44 *	-1.04	-0.30
Autumn	200	-1.03	-0.63 *	1.20	0.02	0.11	0.04	-2.25	-0.38	-1.07	-0.48 *	-0.69	-0.41	-2.41	-0.37
	300	-1.54	-0.69 *	1.20	0.02	0.12	0.02	-2.32	-0.42	-1.53	-0.54 *	-0.73	-0.36	-3.31	-0.40
冬季	100	-2.08	0.62	-0.33	0.54	-0.40	1.03 *	-3.05	0.08	-1.31	0	0.50	-0.73 *	-3.08	0.31
Winter	200	-3.18	0.35	-0.87	0.62	-1.90	0.82 *	-5.04	0.09	-3.10	0	0.30	-0.76 *	-6.29	0.27
	300	-4.37	0.21	-0.99	0.70 *	-2.62	0.86 *	-5.64	0.13	-4.12	0.01	0.13	-0.78 *	-8.32	0.25

表 6 2001—2021 年中国东部年际和各季节夜间海陆温差多年均值/℃与年际倾向率/(℃/10a)

Table 6 Multi-year average and decadal trend rate of annual and seasonal nighttime land-sea temperature difference in eastern China during 2001—2021

海陆温差 LSTD	缓冲区/km Buffer area	I 区 Region I		II 区 Region II		III 区 Region III		IV 区 Region IV		V 区 Region V		VI 区 Region VI		全区 Entire region	
		均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat	均值 Ma	倾向率 Rat
年际	100	-9.15	0.33	-6.42	0.04	-5.05	0.02	-7.74	0.06	-7.17	0.11	-6.39	0.01	-8.08	0.08
Annual	200	-9.72	0.35	-6.59	0.06	-5.59	0.09	-8.48	0.06	-7.93	0.05	-6.56	0.01	-5.24	0.04
	300	-10.68	0.35	-6.68	0.06	-5.96	0.14	-8.70	0.06	-8.48	0.01	-6.66	0.01	-11.23	0.07
春季	100	-2.81	0.05	-0.90	0.08	-1.78	0.11	-5.12	0.22	-5.67	0.21	-4.48	0.12	-5.25	0.16
Spring	200	-3.12	0.16	-0.73	0.14	-1.59	0.22	-5.74	0.26	-6.34	0.21	-4.61	0.12	-7.14	0.22
	300	-3.99	0.21	-0.73	0.16	-1.45	0.23	-5.81	0.24	-6.84	0.16	-4.75	0.12	-8.52	0.22
夏季	100	-4.27	-0.34 *	-2.26	-0.22	-2.53	-0.08	-5.73	-0.02	-6.13	0.09	-6.29	0.22 *	-5.03	-0.02
Summer	200	-4.68	-0.35 *	-2.14	-0.19	-2.40	-0.06	-6.00	-0.01	-6.21	0.02 *	-6.48	0.18 *	-5.65	-0.04
	300	-5.32	-0.36 *	-2.19	-0.19	-2.45	-0.04	-5.96	-0.05	-6.44	0	-6.52	0.16	-6.20	-0.05
秋季	100	-11.55	0.03	-10.47	0.01	-8.21	0.08	-9.46	0.05	-7.90	0	-7.43	0	-10.01	0
Autumn	200	-12.31	-0.01	-10.70	0	-8.83	0.14	-9.94	0.07	-8.48	-0.08	-7.51	-0.05	-11.55	-0.03
	300	-13.36	-0.05	-10.87	0	-9.26	0.14	-10.10	0.03	-8.95	-0.15	-7.56	0	-12.75	-0.06
冬季	100	-13.83	0.99	-11.69	0.21	-7.65	0.03	-10.52	0.05	-8.94	0.16	-7.36	-0.22	-11.86	0.18
Winter	200	-14.64	0.99	-12.48	0.21	-9.53	0.14	-12.09	0.08	-10.64	0.06	-7.63	-0.25	-15.13	0.19
	300	-15.93	0.98	-12.66	0.21	-10.65	0.23	-12.79	0.13	-11.64	0.01	-7.79	-0.29	-17.33	0.19

3 讨论

2001—2021 年中国东部地区地表温度总体呈上升趋势,年际变化率为 0.34 ℃/10a ($P<0.05$),其中冬季上升幅度最大,变化率为 0.45 ℃/10a ($P<0.05$);与白天相比,夜间地表温度的上升幅度更大。通过比较发现,

中国东部地区地表温度的上升幅度明显大于全球 ($0.26\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$) 和全国同时段地表温度的变化率 ($0.21\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[8-9]。中国东部地区经济发展速度快,人类活动频繁且强烈,经济发展和生产生活均会产生大量的热量,进而对地表温度变化(以温度上升为主要变化特征)产生显著影响^[27]。从地表温度的季节变化特征来看,中国东部冬季地表温度的增加幅度高于全国冬季地表温度的变化率($0.40\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[27],主要归因于冬季大气中温室气体浓度相对更高,大气吸收地面辐射增多,加剧温室效应,导致冬季地表温度上升速率加快^[28]。此外,中国北方地区冬季降雪量减少,导致地表反射率降低^[29],更多的太阳辐射被吸收,从而使中国东部北方沿岸地区冬季地表温度的增加幅度高于南方沿岸地区。夜间地表温度上升幅度可能与云量变化有关,夜间云量较大,大气逆辐射增强,云层的保温作用使得夜间地表温度的上升趋势更突出^[30]。从空间分布来看,中国东部地区地表温度多年均值总体呈南高北低的格局特征,显著上升区主要位于黄海以北和珠三角地区,下降区主要分布在北渤海和南海沿岸地区,与赵冰等^[31]的研究结果相一致。中国东部地表温度的空间分布特征主要受太阳高度角的影响,因此表现出明显的纬度地带性特征^[32]。

2001—2021 年中国东部海表温度呈显著上升趋势,年际变化率为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($P<0.05$),夏季海表温度上升幅度明显高于其他季节,变化率为 $0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ($P<0.05$);夜间海表温度表现出更为显著的上升趋势。比较以往研究结果,发现中国东部海表温度高于 1900—2019 年全球海表温度的上升速率($0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[13] 及 1980—2019 年中国沿海海表温度的增暖速率($0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)^[14]。海表温度上升除受到人类活动和由气候系统内部变率主导的自然振荡(例如,太平洋年代际涛动、厄尔尼诺和南方涛动等)等影响外,东亚季风年代际的减弱导致黑潮暖水入侵海陆架增强也是重要原因之一^[33-34];此外,受热带季风影响,暖流和暖湿气流从南海向东北方向输送热量,导致中国东部夏季海表温度的上升幅度更为突出^[35]。与夜间地表温度相同,夜间海洋上空的高云量使得云层的保温效应进一步凸显,导致夜间海表温度的增幅更大^[30]。中国东部海表温度多年均值呈从东北向西南递增,近岸海域海表温度低于远岸海域的空间特征,增温区主要位于渤海和东海以南海区,进一步证实了齐庆华等^[36]的研究结果,海表温度变化的空间分布特征可能与纬度和沿岸上升流等有关^[36]。

由于中国东部地区年际地表温度平均值一般小于海表温度平均值,因此海陆温差基本为负值。各缓冲区海陆温差总体上表现为离海岸线越近,海陆温差越小的特点。通常,海水的比热容大于陆地的,离海岸线越近,气温更易受海洋调节,温度变化幅度会越小,最终导致海陆温差相对较小。中国北部沿海地区地表温度增温快于海表温度,南部沿海地区与之相反,导致北部海区海陆温差一般呈减小趋势,南部海区的总体呈增大趋势。中国东部冬季地表温度的增温快于海表温度,夏季与之相反,因此,冬季海陆温差呈减小趋势,夏季呈增大趋势,这与 Yao 等^[7]的研究结果相一致。

结合中国东部海陆温差的季节变化特征,进一步分析了 2001—2021 年年际、夏季和冬季全天海陆温差多年均值随纬度变化的趋势特征(图 6)。结果发现,随着纬度降低,年际海陆温差表现为先减小再增大,至 26°N 再减小的趋势特征;夏季海陆温差表现为先增大再减小,至 31°N 再增大的变化趋势;冬季海陆温差在 26°N 以北和以南分别逐渐增大和减小。对比京津冀、长三角和珠三角三大城市群所在纬度带的海陆温差,发现京津冀城市群海陆温差明显突出于邻近地区,长三角和珠三角城市群海陆温差与邻近地区的差异不明显。有研究指出,城市化进程加快导致热岛效应不断增强,引起区域地表增温加剧^[37],进而影响海陆温差的变化。结合京津冀、长三角和珠三角城市群海陆温差的变化特征来看,京津冀地区城市化对该区域海陆温差的影响更为显著,详细影响机制有待进一步深入探究。

MODIS 数据具有较高的时空分辨率,但受云、雨等天气影响较大。本研究利用 ETD 方法重建了中国东部地区的地表温度数据,但仍不能完全消除不利天气的影响,尤其是在多云雨的南方沿海地区。下一步,将深入探究地表温度遥感数据的重建方法以提高其精度。再者,将结合地形、土地利用类型、人口以及大尺度大气-海洋环流因子等因素深入研究中国东部海陆温差变化的原因,并结合降水及其极值等变化探究海陆温差对区域气候变化的影响。

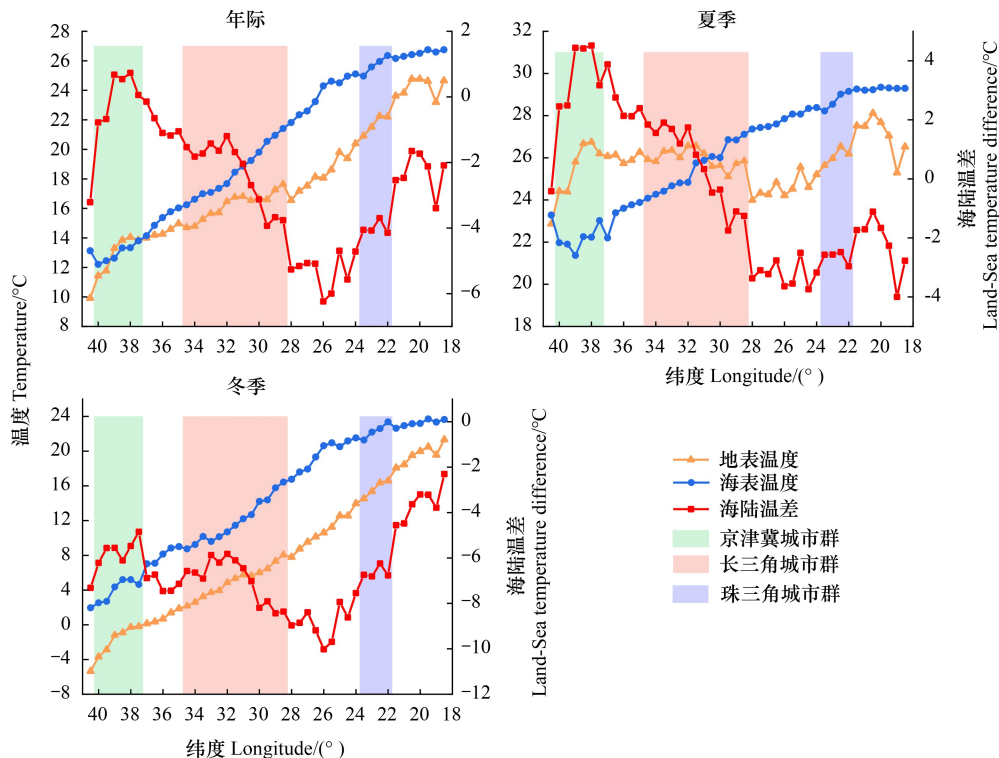


图6 中国东部地区年际全天海陆温差随纬度变化的趋势特征

Fig.6 Characteristics of annual all-day land-sea temperature difference with latitude in eastern China

4 结论

本文基于 2001—2021 年 MODIS 遥感影像探究了中国东部地区全天、白天和夜间地表温度、海表温度以及海陆温差的时空变化及其区域差异特征,主要结论如下:

(1) 中国东部地区地表温度显著上升,年际倾向率为 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,夜间地表温度的增幅更大($0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。各季节中,冬季地表温度的增幅最大($0.45\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。空间上,地表温度的变化总体呈南高北低的格局特征,黄海以北和珠江三角洲地区地表温度的增温趋势尤为明显。

(2) 中国东部海表温度以 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的速率显著上升,夜间海表温度的上升幅度更大($0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。各季节中,夏季海表温度的增幅最大($0.43\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)。空间上,海表温度表现出从东北向西南递增、近岸海域低于远岸海域的特征,显著增温区主要位于渤海和东海以南海区。

(3) 中国东部年际海陆温差通常为负,离海岸线越近的缓冲区范围内海陆温差越小。100—300 km 缓冲区范围内年际海陆温差变化率总体呈减小趋势,其中 100 km 缓冲区内海陆温差变化的降幅最大。春季和冬季海陆温差呈减小趋势,夏季和秋季的呈增大趋势。空间上,北部和南部海区的海陆温差分别呈减小和增大趋势。

致谢:感谢武汉大学遥感信息工程学院姚瑞博士对地表温度重建工作给予的帮助。

参考文献 (References):

- [1] 周天军, 陈梓明, 陈晓龙, 左萌, 江洁, 胡帅. IPCC AR6 报告解读: 未来的全球气候——基于情景的预估和近期信息. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 652-663.
- [2] Toda M, Watanabe M, Yoshimori M. An energy budget framework to understand mechanisms of land-ocean warming contrast induced by increasing

- greenhouse gases Part I: Near-equilibrium state. *Journal of Climate*, 2021; 1-63.
- [3] Guo Y, Dong B W, Zhu J S. Anthropogenic impacts on changes in summer extreme precipitation over China during 1961—2014: roles of greenhouse gases and anthropogenic aerosols. *Climate Dynamics*, 2023, 60(9): 2633-2643.
- [4] Di Capua G, Rahmstorf S. Extreme weather in a changing climate. *Environmental Research Letters*, 2023, 18(10): 102001.
- [5] 蔡榕硕, 陈际龙, 黄荣辉. 我国近海和邻近海的海洋环境对最近全球气候变化的响应. *大气科学*, 2006, 30(5): 1019-1033.
- [6] 齐庆华, 蔡榕硕, 颜秀花. 气候变化与我国海洋灾害风险治理探讨. *海洋通报*, 2019, 38(4): 361-367.
- [7] Yao Y L, Zou X Q, Zhao Y F, Wang T. Rapid changes in land-sea thermal contrast across China's coastal zone in a warming climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(4): 2049-2067.
- [8] Wang Y R, Hessen D O, Samset B H, Stordal F. Evaluating global and regional land warming trends in the past decades with both MODIS and ERA5-Land land surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 280: 113181.
- [9] 田浩, 刘琳, 张正勇, 陈泓瑾, 张雪莹, 王统霞, 康紫薇. 2001—2020 年中国地表温度时空分异及归因分析. *地理学报*, 2022, 77(7): 1713-1729.
- [10] 阮惠华, 许剑辉, 张菲菲. 2001—2020 年粤港澳大湾区植被和地表温度时空变化研究. *生态环境学报*, 2022, 31(8): 1510-1520.
- [11] 梁洪武, 阿里木江·卡斯木, 张雪玲, 赵永玉, 如克亚·热合曼. 干旱区绿洲城市群地表温度时空变化及其影响因素——以天山北坡城市群为例. *生态学报*, 2023, 43(9): 3650-3664.
- [12] 黄晶晶. 2003—2017 年江浙沪地表温度重建及其时空变化分析[D]. 金华: 浙江师范大学, 2019.
- [13] Garcia-Soto C, Cheng L J, Caesar L, Schmidt S, Jewett E B, Cheripka A, Rigor I, Caballero A, Chiba S, B  ez J C, Zielinski T, Abraham J P. An overview of ocean climate change indicators: sea surface temperature, ocean heat content, ocean pH, dissolved oxygen concentration, Arctic Sea ice extent, thickness and volume, sea level and strength of the AMOC (atlantic meridional overturning circulation). *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 642372.
- [14] 国家海洋信息中心. 中国气候变化海洋蓝皮书 2020. 北京: 科学出版社, 2021.
- [15] Sutton R T, Dong B W, Gregory J M. Land/sea warming ratio in response to climate change: IPCC AR4 model results and comparison with observations. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(2): L02701.
- [16] Day J J, Hodges K I. Growing land-sea temperature contrast and the intensification of Arctic cyclones. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(8): 3673-3681.
- [17] He Y L, Huang J P, Li D D, Xie Y K, Zhang G L, Qi Y L, Wang S S, Totz S. Comparison of the effect of land-sea thermal contrast on interdecadal variations in winter and summer blockings. *Climate Dynamics*, 2018, 51(4): 1275-1294.
- [18] 黄海东, 张济世, 王政, 卢静荣. 海陆温差与中国西南地区降水的相关性分析. *兰州交通大学学报*, 2018, 37(3): 103-109.
- [19] 王晓利, 侯西勇. 1961—2014 年中国沿海极端气温事件变化及区域差异分析. *生态学报*, 2017, 37(21): 7098-7113.
- [20] 杨明, 徐海明, 李维亮, 刘煜. 近 40 年东亚季风变化特征及其与海陆温差关系. *应用气象学报*, 2008, 19(5): 522-530.
- [21] 杨涵洧, 龚志强, 王晓娟, 封国林. 中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析. *大气科学*, 2021, 45(3): 683-696.
- [22] 王红光, 蔡榕硕, 齐庆华, 谭红建. 夏季中国东部地区海陆温差变异及其与降水的关系. *应用海洋学学报*, 2014, 33(3): 385-394.
- [23] 齐庆华. 中国东部海陆热力差异与华南冬季雾霾的气候学关联. *地理科学*, 2021, 41(9): 1667-1675.
- [24] 王晓利, 侯西勇. 中国沿海极端气候时空特征. 北京: 科学出版社, 2019.
- [25] 叶显含, 张文娟, 官云兰, 焦智婉. 基于 MODIS 产品的全球温度数据生成方法. *江西科学*, 2018, 36(2): 209-216.
- [26] Yao R, Wang L C, Huang X, Cao Q, Wei J, He P X, Wang S Q, Wang L Z. Global seamless and high-resolution temperature dataset (GSHTD), 2001-2020. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 286: 113422.
- [27] 毛克彪, 严毅博, 赵冰, 袁紫晋, 曹萌萌. 中国地表温度时空变化及驱动因素分析. *灾害学*, 2023, 38(2): 60-73.
- [28] Tian Z P, Jiang D B. Enhanced seasonality of surface air temperature over China during the mid-Holocene. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2023, 16(5): 100393.
- [29] Chen H P, Sun J Q. Future changes in daily snowfall events over China based on CMIP6 models. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2022, 15(5): 100137.
- [30] Cox D T C, MacLean I M D, Gardner A S, Gaston K J. Global variation in diurnal asymmetry in temperature, cloud cover, specific humidity and precipitation and its association with leaf area index. *Global Change Biology*, 2020, 26(12): 7099-7111.
- [31] 赵冰, 毛克彪, 蔡玉林, 孟祥金. 中国地表温度时空演变规律研究. *国土资源遥感*, 2020, 32(2): 233-240.
- [32] 齐月, 房世波, 周文佐. 近 50 年来中国地面太阳辐射变化及其空间分布. *生态学报*, 2014, 34(24): 7444-7453.
- [33] 李琰, 范文静, 骆敬新, 王爱梅, 王慧, 邓丽静, 张增健. 2017 年中国近海海温和气温气候特征分析. *海洋通报*, 2018, 37(3): 296-302.
- [34] Cai R S, Tan H J, Kontoyiannis H. Robust surface warming in offshore China Seas and its relationship to the East Asian monsoon wind field and ocean forcing on interdecadal time scales. *Journal of Climate*, 2017, 30(22): 8987-9005.
- [35] 魏凤英, 陈官军, 李茜. 中国东部夏季不同雨带类型的海洋和环流特征差异. *气象学报*, 2012, 70(5): 1004-1020.
- [36] 齐庆华, 蔡榕硕. 中国近海海表温度变化的极端特性及其气候特征研究. *海洋学报*, 2019, 41(7): 36-51.
- [37] 袁宇锋, 翟盘茂. 全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知. *大气科学学报*, 2022, 45(2): 161-166.