



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20240195

网络首发日期: 2025-10-28; 网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/12.1355.n.20251027.1626.015>

近四十年渤海及周边典型城市夏季开始时间变化机制研究

汪 尘, 袁承仪

(天津科技大学海洋与环境学院, 天津 300457)

摘 要: 基于 1982—2022 年高分辨率业务化海表面水温与海冰分析数据集 (OSTIA) 的海表面水温 (SST) 数据和欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的第五代全球再分析数据集 (ERA5), 对渤海及周边典型城市夏季开始时间的变化特征进行研究, 并通过比较不同高度云云量、云温度效应的大小关系得到影响最大的云层。结果表明: 近四十年来渤海近岸浅水区、深水区的夏季开始时间分别提早了 17 d 和 11 d, 渤海周边典型城市基于气温的夏季开始时间提早了 12 d, 基于土壤温度的夏季开始提早了 11 d。相较于同期中云、低云云量, 高云云量与夏季开始时间相关关系最为明显, 且高云云量减少幅度最大, 与同期总云云量的减少幅度最为接近, 受高云影响的云温度效应四十年间变化幅度同样最大。高云云量的减少增加了同期到达海面的太阳短波辐射量, 最终影响了海、陆夏季开始时间的长期趋势。

关键词: 夏季开始时间; 短波云辐射效应; 气候变化; 渤海; 环渤海城市

中图分类号: P467

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510 (2026) 03-0064-09

Mechanism of Variations in Summer Onset Dates over the Past Four Decades in the Bohai Sea and Surrounding Typical Cities

WANG Chen, YUAN Chenyi

(College of Marine and Environmental Sciences, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Based on the 1982–2022 high-resolution operational sea surface temperature (SST) and sea ice analysis dataset (OSTIA) and the ERA5 global reanalysis dataset released by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), this research investigates the variation characteristics of summer onset dates in the Bohai Sea and surrounding typical cities. It further explores the dominant cloud layer influencing this variation by comparing cloud cover and cloud radiative temperature effects at different altitudes. The results show that over the past four decades, summer onset dates in the nearshore shallow waters and deep-water areas of the Bohai Sea have advanced by 17 and 11 days, respectively. In the Bohai surrounding typical cities, summer onset based on air temperature has advanced by 12 days, while that based on soil temperature by 11 days. Compared with middle- and low-level clouds, high-level cloud cover exhibited the strongest correlation with summer onset dates and showed the greatest reduction, which was closest to the decrease in total cloud cover over the same period. The variation in cloud temperature effect influenced by high clouds was also the greatest over the past four decades. The reduction in high-level cloud cover has increased the concurrent surface downward shortwave radiation, ultimately influencing the long-term trend of summer onset dates over both sea and land.

Key words: summer onset date; shortwave cloud radiation effect; climate change; Bohai Sea; cities around Bohai Sea

引文格式:

汪尘, 袁承仪. 近四十年渤海及周边典型城市夏季开始时间变化机制研究[J]. 天津科技大学学报, 2026, 41 (3): 64–72.
WANG C, YUAN C Y. Mechanism of variations in summer onset dates over the past four decades in the Bohai Sea and surrounding typical cities[J]. Journal of Tianjin university of science and technology, 2026, 41 (3): 64–72.

收稿日期: 2024-09-20; 修回日期: 2025-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41606028); 天津市科技计划项目 (14JCQNJ09900, 19JCYBJC22000)

作者简介: 汪 尘 (2000—), 男, 贵州安顺人, 硕士研究生; 通信作者: 袁承仪, 副教授, cyuan@tust.edu.cn

在中纬度地区, 季节变化(即年循环)是海洋和大气系统最为显著的时间变率^[1]。四季的划分为农业生产、气象预报、气候变化、物候变化和流行病传播等众多领域提供了重要的时间标尺。较为经典的两种季节定义方式是天文四季和气象/海洋四季, 前者以春分、夏至、秋分、冬至作为四季的节点, 夏季始于夏至日, 持续到秋分之前, 后者则按月份将一年均分为几乎等长的四段。对北半球而言, 气象上的夏季为 6—8 月, 海洋中的夏季为 7—9 月^[2]。在全球变暖的大背景下, 近四十年来渤海地区热浪事件的频次和强度均有所增加。同时, 渤海周边典型城市的夏季高温初日明显提前, 高温天气的持续时间也呈现出延长的趋势^[3-4]。这样的季节温度性变化, 在海洋中会增加有害藻类水华的发生频率, 并改变其发生时间^[5]; 在陆地上, 季节的相位变化会影响动物的迁徙时间^[6], 同时影响植物的生长过程, 对农作物产量产生影响^[7], 从而影响人类的生产生活。所以, 研究季节位相变化趋势及背后的影响因素有着重要意义。然而, 传统定义下的夏季, 不能很好地涵盖上述极端气候事件的发生时间。近年来, 在探讨陆地夏季开始时间提前的研究中, 逐渐采用考虑温度局地特征的相对阈值标准判别夏季的开始时间^[8-10]。渤海的平均水深约 18 m, 最深处约 86 m, 局地水深显著影响着渤海的水温和热含量变化。借鉴上述方法, 使用具有局地特征的阈值划分渤海海域的夏季是更为合理的。

局地温度的变化主要由局地热通量以及物质流动带来的热量变化所决定。如 Gao 等^[11]通过简化能量平衡模型寻找季节相位变化的影响因素, 发现太阳短波辐射对海洋表层温度变化有显著的影响。罗娟等^[12]通过热力学诊断认为, 气温的升高主要源于非绝热加热项即局地热通量的变化, 其次才是温度的平流项带来的影响。这些研究表明, 太阳短波辐射对温度变化具有重要影响。研究^[13]表明, 进入大气层顶的太阳短波辐射几乎没有变化, 但地表接收到的太阳短波辐射却有变化, 自 20 世纪 50 年代以来, 大部分地区地表太阳辐射一直减小, 在 20 世纪 80 年代之后开始增加^[14]。也就是说, 到达地表的太阳短波辐射减少主要受到云量以及气溶胶的影响。尽管两者之间的贡献大小存在争议, 但不可否认的是, 云量对调节到达地球表面的太阳短波辐射有着重要的作用。

对气象站资料的统计结果表明, 我国北方沿海城市也存在夏季开始时间提前的长期趋势^[15-16]。因此, 本文将对渤海海区及周边典型城市的夏季相位变

化进行统一研究, 定量计算海陆夏季开始时间, 提取其近四十年的变化趋势。在此基础上, 对比海陆夏季开始时间的长期变化趋势的异同, 分析夏季开始时间对不同高度云量变化的响应情况。

1 研究区域

环渤海城市地理位置及夏季温度阈值如图 1 所示。渤海三面环陆, 属于典型的半封闭陆架浅海, 海水交换受限。北黄海海水从海峡北部进入渤海, 再从海峡南部流出至北黄海, 与外海海水交换仅限于渤海海峡处。渤海平均水深仅为 18 m, 最深处为老铁山水道处, 水深为 86 m, 整体水深较浅。渤海的热容量与热惯性均较小, 与黄海、东海相比, 更易受到大气强迫的影响。受全球变暖的影响, 1982 年到 2021 年, 渤海海表面温度呈现出显著的非线性和非稳定的升高趋势^[17]。

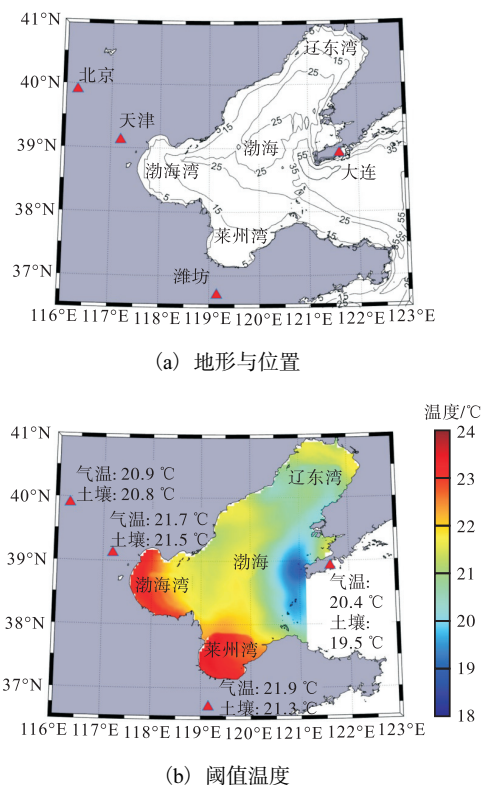


图 1 环渤海城市地理位置及夏季温度阈值

Fig. 1 Geographical location of cities around the Bohai Sea and their summer temperature thresholds

渤海周围分布着天津、北京、大连、潍坊等经济发达、人口密集的大型城市, 人类活动使渤海承受了较大的环境压力。渤海周边的大型城市在一定程度上改变了渤海的局地气候特征, 而渤海也可能通过海

陆相互作用,影响周边滨海城市的气候。

2 数据与方法

2.1 数据来源

采用 1982—2022 年的高分辨率业务化海表面水温与海冰分析数据集 (operational sea surface temperature and sea ice analysis, OSTIA) 中的海表面水温 (sea surface temperature, SST) 数据, 判别和统计渤海近四十年的夏季开始时间。该 SST 业务化数据集由英国气象局开发, 当前主要在哥白尼海洋环境监测服务网站 (CMEMS) 提供更新和技术支持等服务。该逐日数据的空间分辨率为 0.05° , 较前代数据能更好地反映边缘海近岸海洋过程对水温的影响。

研究中使用的气温、土壤温度、太阳短波净辐射、晴空条件下海表面太阳短波净辐射、总云量、高云云量、中云云量、低云云量、皮温、短波反射率、气压、相对湿度、臭氧质量混合比、水云质量混合比、冰云质量混合比等数据, 均下载自欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 维护和发布的第五代全球再分析数据集 (ERA5)。该数据集的水平空间分辨率为 0.25° , 时间分辨率为 6 h。研究中所用的太阳天顶角余弦值同样取每天 0、6、18、24 (UTC16、22、4、10) 时的值。在 ERA5 数据集中, 云量被定义为经纬度网格被云覆盖的比例, 属于无量纲量, 量值范围为 0~1。

2.2 夏季开始时间的定义

为了对渤海海区及周边典型城市的夏季开始时间变化进行归因研究, 同时与物候现象建立更加直接的关联^[18], 采用温度 (气温、海洋水温或土壤温度) 作为夏季划分的重要变量。为了与前人研究保持一致且便于计算, 本文剔除闰年中 2 月 29 日的气温数据。季节的划分采用的最小划分单元为日平均温度, 夜晚和白天海陆之间热交换差异被平均到了日平均温度中。夏季是温度季节循环中最温暖的 1/4 年, 夏季定义方法如下, 取多年逐日气候态平均气温的 75 百分位数作为判断夏季开始的阈值, 夏季开始于一年中气温首次大于该阈值的日期。由于气温与土壤温度变化幅度较大, 为了避免一年中气温越过 75 百分位数的日期超过两个, 采用三阶多项式拟合的方式对日平均气温数据进行平滑处理。已有研究^[19]表明, 不同方法平滑处理后得到的季节划分结果基本相似, 表明所应用的拟合方法合理, 并未出现过拟合的现象。

2.3 集合经验模态分解 (EEMD) 方法

集合经验模态分解 (ensemble empirical mode decomposition, EEMD) 方法, 由 Wu 等^[20]在原有经验模态分解 (empirical mode decomposition, EMD) 方法的基础上提出, 主要改进和解决 EMD 方法原有的模态混淆问题。如式 (1) 所示, EEMD 方法将非平稳或非线性的时间序列 $X(t)$ 分解为一系列的本征模态函数 $C_j(t)$ 和一个长期趋势项 $r_n(t)$, 后者在实际气候研究中常与潜在的物理机制密切相关^[21-22]。

$$X(t) = \sum_{j=1}^n C_j(t) + r_n(t) \quad (1)$$

在传统的傅里叶分析和小波分析中, 基底函数是预先设定的, 难以完全表征非平稳时间序列在整体时间域上的全部特征^[20,22]。EEMD 方法不预设固定的基底函数, 因此能以自适应的方式分段提取非平稳或非线性时间序列的变化特征。在长期趋势方面, EEMD 分析能更好保留长期趋势随时间变化的非线性特征。近四十年来, 以渤海水温以及天津、北京、大连、潍坊等代表性城市的气温、土壤温度为划分对象的夏季开始时间, 其原始时间序列呈现出跃迁或时间变化率随时间发生改变的现象 (即具有非平稳性), 因此本研究采用 EEMD 方法提取上述变量的长期趋势项并探究其时间变化特征。

2.4 ecRad 辐射传输方案

采用 ecRad 模型^[23]的 1.5.0 版本研究不同高度云对地表太阳短波辐射的影响。模型中的气体光学性质使用快速辐射传输模型一般环流模型 (rapid radiative transfer model general circulation model, RRTMG) 进行计算^[24], 气体包括臭氧、水汽等参与太阳辐射吸收和散射的成分。云求解器采用的是通过云侧的辐射传输快速算法 (speedy algorithm for radiative transfer through cloud sides, SPARTACUS)^[23]。云在短波太阳辐射波段的光学特性, 依据 Slingo^[25]给出的水云资料以及 Fu^[26]给出的冰云资料进行确定。ecRad 中将云液滴和冰晶的有效半径分别固定为 $10\mu\text{m}$ 和 $50\mu\text{m}$, Kato 等^[27]将计算得到的辐射通量与实测数据相比, 发现二者较为一致。

为探究不同高度云各自的短波云辐射效应大小及其变化趋势, 本研究将大气轮廓线和高云 ($< 450\text{ hPa}$)、中云 ($450 \sim 800\text{ hPa}$)、低云 ($> 800\text{ hPa}$) 云量分别输入 ecRad 辐射传输方案, 模拟计算得到不同高度云层的短波云辐射效应。ERA5 数据中将地表至大气顶部划分为 37 层, 固定第 1 层为大气顶层

(100 hPa), 第 37 层为地表层(1 000 hPa)。

根据前人的研究^[28], 云对太阳短波辐射的影响称为短波云辐射效应或短波云辐射强迫, 其被定义为有云条件下到达地表的太阳短波辐射与晴空条件下到达地表的太阳短波辐射之差。类似地, 云温度效应被定义为有云条件下与无云条件下的温度之差。本文参照前人的研究^[29], 将不同高度云对海洋、土壤、大气的云温度效应定义为有云条件下接收到的辐射加热温度与晴空条件下接收到的辐射加热温度之差, 如式(2)所示。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Q_{\text{cloud}}}{\rho_0 c_p h} \quad (2)$$

式中: T 为土壤或海洋的温度, Q_{cloud} 为短波云辐射量, ρ_0 为土壤或海洋的密度, c_p 为土壤或海洋的比定压热容, h 为土壤或海洋的加热深度。

Q_{cloud} 由辐射传输模型给出, 本文将海水的比定压热容设置为 $4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 将海水的密度设置为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$, 将加热深度设置为 7 m (渤海混合层深度), 即视为到达海面的辐射量加热了海洋中的混合层。类似地, 将土壤的比定压热容设置为 $2.5 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 将土壤密度设置为 $2300 \text{ kg}/\text{m}^3$, 土壤的温度参数源自其热参数典型值中的人工建筑类^[30]。随着土壤深度的变化, 土壤受到的太阳辐射的影响不断降低(图 2), 在 2.89 m 处仍然有夏季开始时间提前的信号, 所以将深度设置为 2.89 m 。云反射太阳短波辐射所导致气温的下降量, 用晴空和有云条件下大气加热率之差进行表示, 如式(3)所示。

$$R_H = -\frac{g \Delta F_n}{c_p \Delta p} \quad (3)$$

式中: R_H 为大气加热率, g 为重力加速度, c_p 为干空气的比定压热容, ΔF_n 为太阳短波辐射的净通量, Δp 为压差。

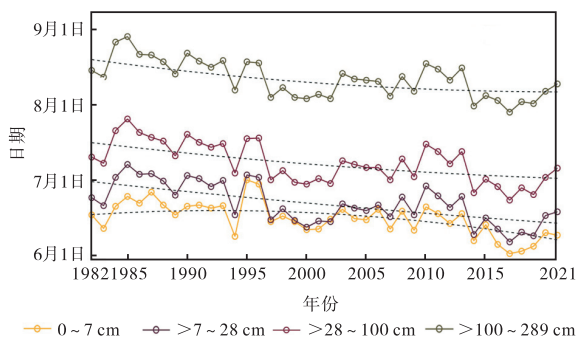


图 2 不同深度土壤夏季开始时间变化趋势

Fig. 2 Variation trends of summer onset dates at different soil depths

ecRad 短波云辐射效应与 ERA5 再分析数据比较结果如图 3 所示。两者之间的短波云辐射效应的年际变化有很好的一致性, 相关系数为 0.94 , 这表明 ecRad 辐射方案对短波云辐射效应的模拟具有一定的可靠性, 利用 ecRad 辐射传输模型模拟不同云的短波云辐射效应具有一定的合理性。

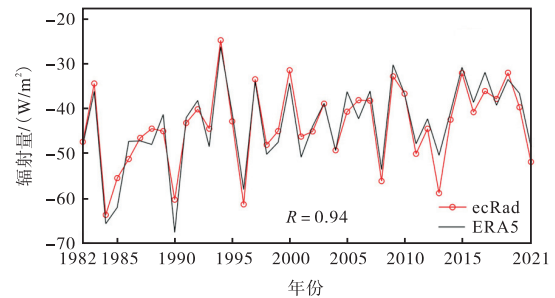


图 3 ecRad 短波云辐射效应与 ERA5 再分析数据比较结果

Fig. 3 Comparison results between ecRad shortwave cloud radiation effect and ERA5 reanalysis data

3 分析与讨论

3.1 夏季开始时间变化特征

在渤海, 用于判别夏季的阈值水温呈现了近岸浅水区高于深水区, 相同水深条件下南侧高于北侧的分布趋势。其中, 莱州湾与渤海湾湾顶的阈值水温均高于 23.0°C , 海峡北侧的阈值水温低于 19.0°C [图 1(b)]。推测其主要原因是近岸浅水区的热容量与热惯性有限, 导致其气候态夏季水温整体上高于深水区。渤海各典型城市局地温度阈值的高低与其夏季整体温度水平也是一致的, 天津、北京和潍坊的阈值明显高于大连。

夏季开始时间的空间分布以及用城市气温、渤海海表面温度、城市土壤温度划分的夏季开始时间序列及其 EEMD 趋势(虚线)如图 4 所示。由图 4 可知, 渤海周边典型城市基于气温的夏季开始时间最早, 基于土壤温度的夏季开始时间次之, 渤海的夏季开始时间最晚, 这与热惯性规律相符。具体而言, 渤海周边典型城市基于气温的夏季平均开始时间在 6 月 13 日前后, 基于土壤温度的夏季开始时间在 6 月 17 日前后, 夏季开始最早的是人为影响较重的北京, 最晚为三面环海的大连。对渤海夏季开始时间而言, 渤海湾、莱州湾和辽东湾湾顶的夏季开始时间比渤海海峡提早了半个月, 前者均早于 6 月 20 日, 后者位于 7 月 5 日前后。为探讨不同水深处夏季开始时间的变化特征, 以平均水深为参考, 将研究区域划分为近岸

浅水区(水深 $<18\text{ m}$)和深水区(水深 $\geq 18\text{ m}$),湾顶和其他的近岸浅水区的夏季开始时间早于深水区,符合浅水区热惯性较小、夏季开始早的一般规律。

在全球变暖的大背景下渤海及环渤海城市近四十年的夏季开始时间存在着显著提前的趋势。夏季开始时间的提前量为图4中1982年和2022年对应虚线数值之差(下文趋势项变化量皆为1982年和2022年数值之差)。在过去四十年中,基于气温划分的夏季开始时间提前了12 d,而基于土壤温度划分的夏季开始时间提前了11 d。在近海地区,夏季开始时间提前了17 d,而远海地区提前了11 d,显示出远海的提前幅度稍弱于近海。此外,夏季开始时间近四十年的变化趋势表现出明显的非线性特征,这进一步证明了使用EEMD方法提取变化趋势的必要性。

已有研究^[31]表明渤海夏季开始时间与晚春总云量及太阳辐射有明显的相关性,即以逐年夏季开始时间为起点,此前1个月内的平均总云量、太阳辐射量与当年夏季开始时间有明显相关性。以渤海周边典型城市气温、土壤温度为划分对象的晚春总云量、太阳短波辐射量在四十年间同样有一个下降的趋势。这表明渤海周边典型城市的夏季开始时间可能同样受到晚春总云量和太阳短波辐射影响。

以土壤温度为划分对象的夏季开始时间与晚春太阳短波辐射的相关系数为 -0.61 ,与晚春总云量的相关系数为 0.70 。以气温为划分对象的夏季开始时间与晚春太阳短波辐射的相关系数为 -0.57 ,与晚春总云量的相关系数为 0.68 。上述结果表明环渤海周边典型城市夏季开始时间与渤海夏季开始时间所受到的影响因素一致。夏季开始时间与晚春总云量存在良好的相关系数,这可能反映了同一物理过程,即晚春总云量越低,被反射的太阳短波辐射就越少,地表接收到更多有效的太阳短波辐射,渤海海区与周边的陆地城市提早升温,该年的夏季提早开始。

3.2 夏季开始时间归因分析

依据ECMWF对模型云量的分类和定义,可知高云云量、中云云量和低云云量是以模型地球的表面作为参考面,分别位于高于 $6\,300\text{ m}$ 、 $1\,800\sim 6\,300\text{ m}$ 和低于 $1\,800\text{ m}$ 高度范围内的云量。由于各层云量在垂向上存在着重叠的情况,因此总云量并非三者的简单代数和,而是应该分别统计近四十年来晚春总云量和各层云量的时间序列。不同划分标准下晚春总云量及各层云量的时间序列以及EEMD趋势如图5所示。

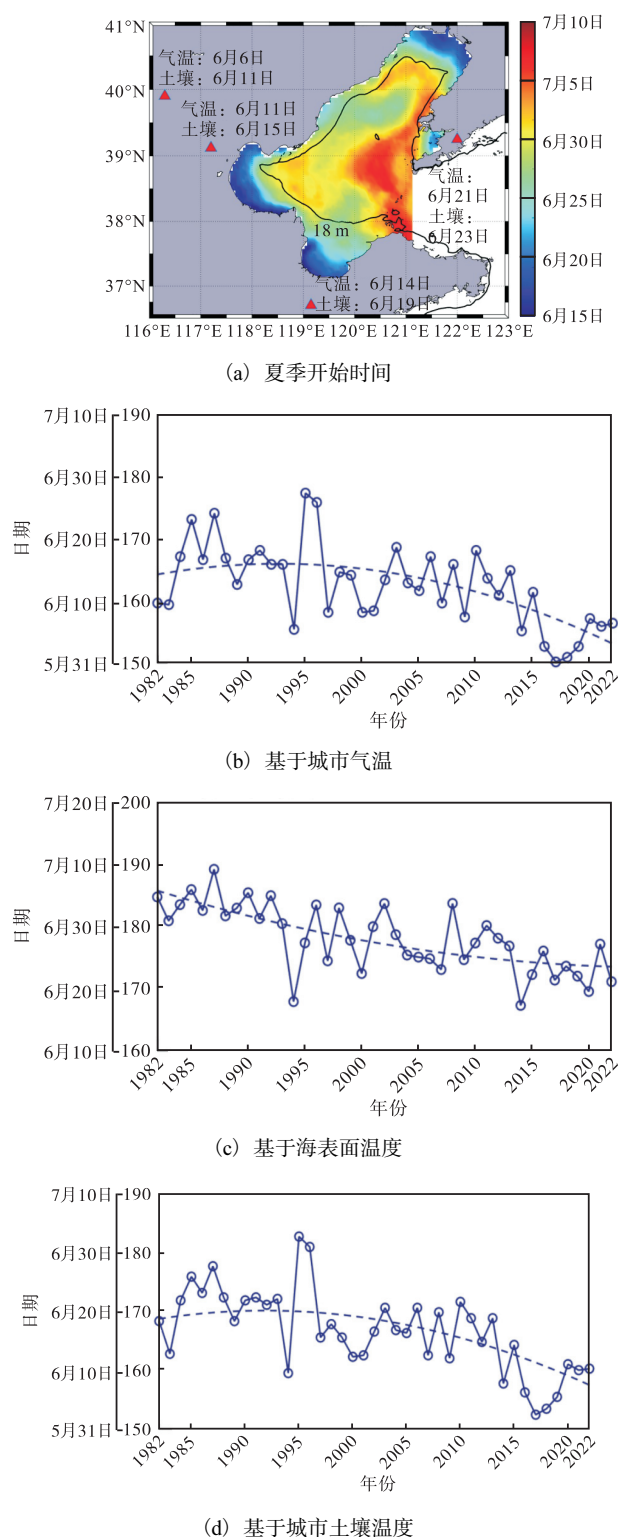


图4 夏季开始时间空间分布和基于城市气温、渤海海面温度、城市土壤温度划分的夏季开始时间序列(实线)及其EEMD趋势(虚线)

Fig. 4 Spatial distribution of summer onset dates and their time series (solid lines) segregated by urban air temperature, Bohai Sea surface temperature, and urban soil temperature with corresponding EEMD trends (dashed lines)

以海洋温度、土壤温度和气温作为划分夏季开始时间的标准时,晚春高云、中云、低云云量在四十年间的变化趋势较为一致,都存在着下降的趋势。具体而言,以土壤温度为划分夏季开始时间的标准时,晚春总云量在四十年间减少量最多,量值为 0.15;其次为以气温为划分夏季开始时间的标准时,减少量为 0.14;以海洋温度为划分夏季开始时间的标准时,减少量最小,为 0.06。不同高度云层四十年间云量下降幅度有所不同,如图 5 虚线部分变化量所示,四十年

间以海洋温度、土壤温度和气温作为划分标准下平均高云云量、中云云量、低云云量分别减少了 0.12、0.03 和 0.06,高云云量四十年间减少幅度最大。从气候态均值上来看,总云量四十年间的气候态均值为 0.53,而高云云量、中云云量、低云云量的气候态平均值分别为 0.45、0.16、0.10。不难看出,在各云层分量中仅高云云量具有与总云量类似的云量大小以及相似的减小趋势。这表明高云云量在夏季开始时间的影响因素中占据了重要地位。

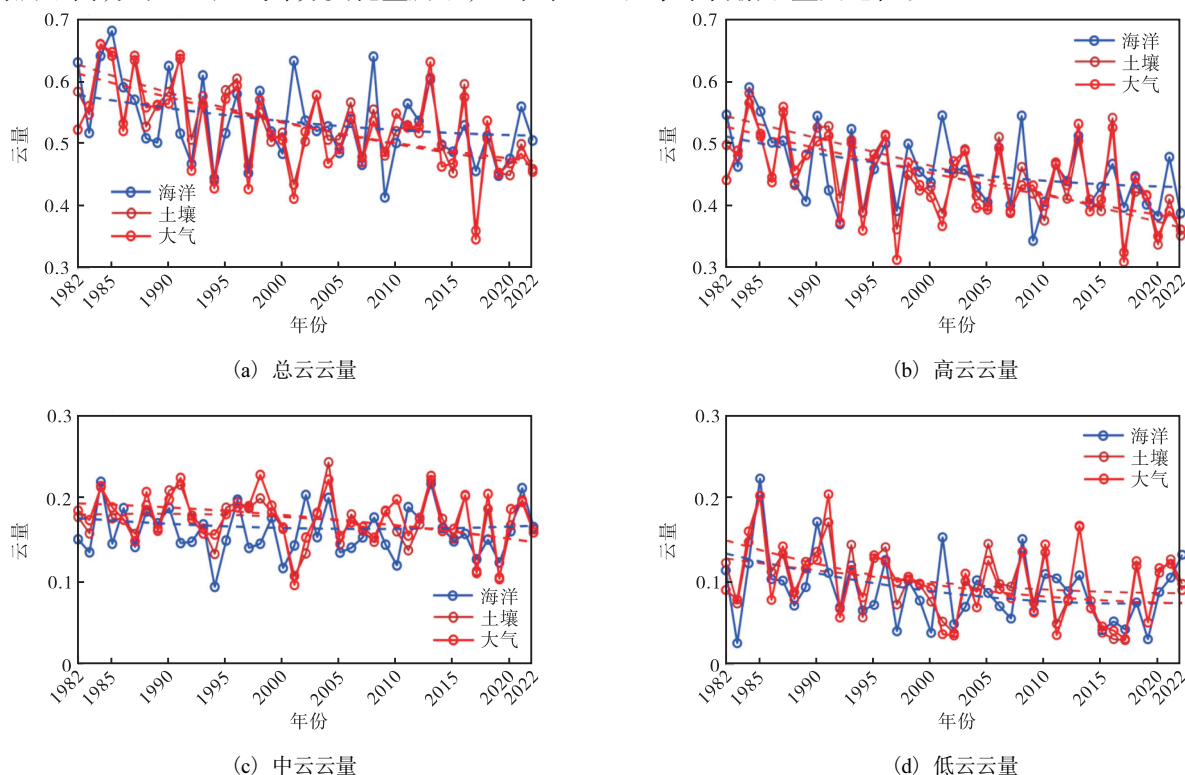


图 5 不同划分标准下晚春总云量及各层云量的时间序列(实线)以及 EEMD 趋势(虚线)

Fig. 5 Time series (solid lines) and EEMD trends (dashed lines) of total cloud cover and cloud cover at different layers in late spring under different classification criteria

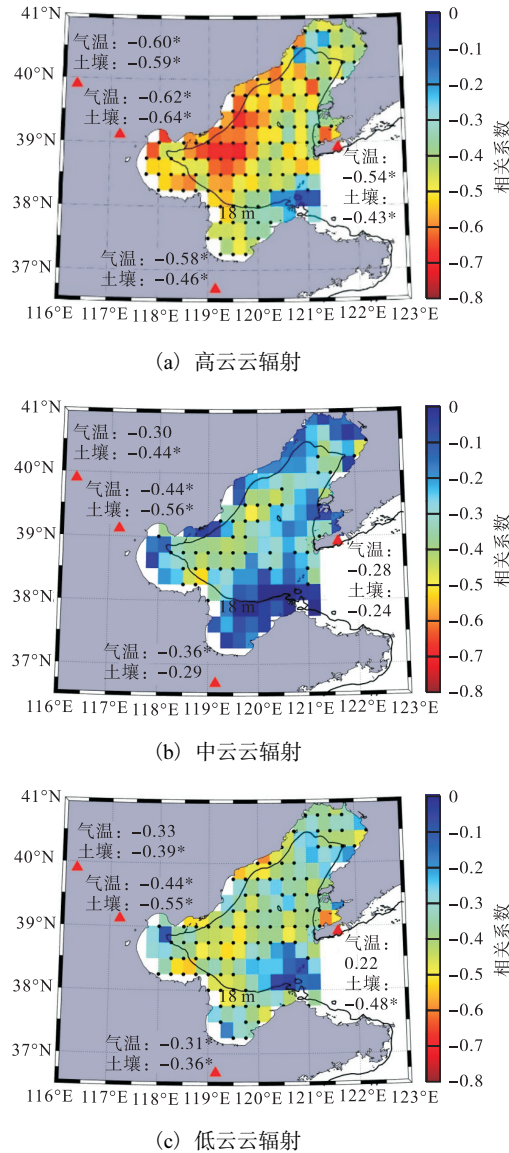
前人的研究^[29]表明:云辐射效应的变化大小不仅由云量的大小决定,还取决于云中含水量、有效粒径等因素。本研究利用了 ecRad 辐射传输模型,深入分析不同高度云层对渤海及环渤海城市夏季开始时间的影响程度。将高云云量、中云云量、低云云量及其对应大气轮廓线输入模型,模拟了不同高度云在过去四十年中的云辐射效应变化,并分析了它们对夏季开始时间的影响大小,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,高云的云辐射效应与渤海夏季开始时间存在较为显著的负相关关系。大部分海域的相关系数为 $-0.70 \sim -0.40$ 。对环渤海的代表性城市而言,晚春高云的云辐射效应与城市的夏季开始时间同样呈现明显的负相关关系,相关系数为 $-0.64 \sim -0.43$ 。

相比之下,晚春中云云辐射效应与渤海大部分海域及环渤海城市的夏季开始时间并未显示出显著的相关性。对低云而言,其云辐射效应与夏季开始时间呈现出微弱的负相关关系,相关系数为 $-0.50 \sim -0.30$ 。不难看出,晚春高云云辐射效应与夏季开始时间相关性最为显著。

为进一步分析晚春云辐射效应对夏季开始时间的影响,将有云条件下 ecRad 辐射传输模型模拟得到的四十年间地表短波辐射量与无云条件下模型模拟得到的地表短波辐射量相减,得到晚春云辐射效应,通过式(2)计算得出四十年间不同高度云层云辐射温度效应,结果如图 7 所示。从图 7 中不难看出,晚春云温度效应与晚春云量的变化趋势基本一致,四十年

间晚春云温度效应的绝对值有着明显减少的趋势。



注：黑色实点和*上标表示显著相关($P < 0.05$)。

图6 渤海及环渤海城市夏季开始时间与不同高度云云辐射效应相关系数

Fig. 6 Correlation coefficients between summer onset dates and cloud radiative effects at different cloud layers over the Bohai Sea and cities around the Bohai Sea

以土壤温度为划分标准的晚春云辐射效应四十年间绝对值变化幅度为 21.83 W/m^2 , 通过式(2)可以计算得出晚春总云云温度效应四十年间的变化量, 变化量为 3.57°C 。以环渤海城市气温为划分标准的晚春云辐射效应四十年间变化幅度为 13.37 W/m^2 , 云温度效应变化量为 1.58°C , 以海表面温度为划分标准的晚春云辐射效应四十年间变化幅度为 7.65 W/m^2 , 云温度效应的变化量为 0.67°C 。云量的减少导致了

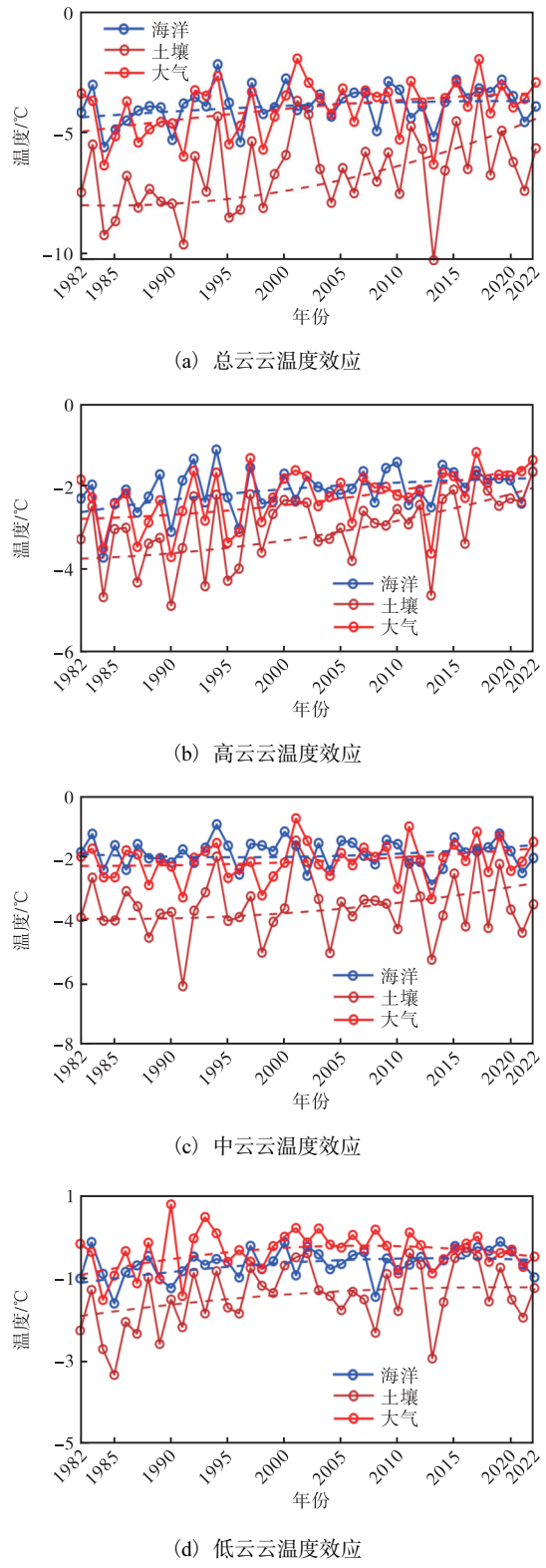


图7 不同划分标准下晚春总云温度效应及不同高度云温度效应的时间序列(实线)以及 EEMD 趋势(虚线)

Fig. 7 Time series (solid lines) and EEMD trends (dashed lines) of total cloud radiative temperature effect and cloud radiative temperature effects at different cloud layers in late spring under different classification criteria

通过大气层到达地表的短波辐射增多,进而导致了地表温度的升高。

就不同云层产生的短波云温度效应而言,四十年间晚春高云、中云、低云云辐射效应的变化量分别为 10 W/m^2 、 6 W/m^2 、 7 W/m^2 ,云温度效应的变化量分别为 1.25°C 、 0.66°C 、 0.56°C 。从数值上来看,高云所带来的云辐射温度效应在四十年间的变化幅度是最大的,且最为接近总云量带来的变化幅度,佐证了晚春高云云量在影响夏季开始时间上的重要地位。

4 总结与展望

四十年间,渤海周边典型城市基于气温的夏季开始时间与基于土壤温度的夏季开始时间分别提前了 12 d 与 11 d,渤海近岸、深水区的夏季开始时间分别提前了 17 d 和 11 d。晚春高云云辐射效应与周边典型城市夏季开始时间之间存在显著的相关关系,大部分海域的相关系数为 $-0.70 \sim -0.40$ 。高云云辐射效应与夏季开始时间相关关系最为明显。四十年间,高云云量减少了 0.12,减少量与总云量相当,晚春高云云辐射效应绝对值减少了 10 W/m^2 ,导致云温度效应绝对值减少了 1.25°C ,减少的幅度在高云、中云、低云中是最大的。高云云量的减少导致同期到达地面的太阳短波辐射量增加,最终影响了海、陆温度变化,进而影响了夏季开始时间。

对渤海和周边典型城市而言,近年来热浪事件的发生频率和强度在不断上升,温度是热浪发生的根本变量,未来应补充探讨季节相位变化与极端气候事件之间的内在联系。此外,水温是影响海洋有机物耗氧分解速率的关键变量,显著影响渤海的低氧状况,进一步明确夏季持续时间对渤海低氧问题的影响,有助于完善有关海区的生态系统管理。

参考文献:

- [1] PERRY A. Middle latitude climates[M]//OLIVER J E. Encyclopedia of World Climatology. Dordrecht: Springer, 2005: 500–502.
- [2] TRENBERTH K E. What are the seasons?[J]. Bulletin of the American meteorological society, 1983, 64(11): 1276–1282.
- [3] 王庆元,李清泉,李琰,等. 1982—2019 年渤、黄海海洋热浪时空变化特征分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(12): 38–49.
- [4] 邢佩,杨若子,杜吴鹏,等. 1961—2017 年华北地区高温日数及高温热浪时空变化特征[J]. 地理科学, 2020, 40(8): 1365–1376.
- [5] XIAO X, AGUSTÍ S, PAN Y R, et al. Warming amplifies the frequency of harmful algal blooms with eutrophication in Chinese coastal waters[J]. Environmental science & technology, 2019, 53(22): 13031–13041.
- [6] LEFFLER A J, BEARD K H, KELSEY K C, et al. Delayed herbivory by migratory geese increases summer-long CO_2 uptake in coastal western Alaska[J]. Global change biology, 2019, 25(1): 277–289.
- [7] BARTOLINI S, MASSAI R, IACONA C, et al. Forty-year investigations on apricot blooming: evidences of climate change effects[J]. Scientia horticulturae, 2019, 244: 399–405.
- [8] CHRISTIDIS N, STOTT P A, BROWN S, et al. Human contribution to the lengthening of the growing season during 1950–99[J]. Journal of climate, 2007, 20(21): 5441–5454.
- [9] WANG J M, GUAN X D, GUAN Y P, et al. Changes in lengths of the four seasons over the drylands in the northern hemisphere midlatitudes[J]. Journal of climate, 2021, 34(20): 8181–8190.
- [10] PARK B J, MIN S K, WELLER E. Lengthening of summer season over the Northern Hemisphere under 1.5°C and 2.0°C global warming[J]. Environmental research letters, 2021, 17(1): 014012.
- [11] GAO G D, MARIN M, FENG M, et al. Drivers of marine heatwaves in the East China Sea and the South Yellow Sea in three consecutive summers during 2016–2018[J]. Journal of geophysical research: oceans, 2020, 125(8): e2020JC016518.
- [12] 罗娟,邓承之,朱岩,等. 2022 年盛夏重庆不同阶段高温特征及成因对比[J]. 气象, 2023, 49(9): 1108–1118.
- [13] BEER J, MENDE W, STELLMACHER R. The role of the sun in climate forcing[J]. Quaternary science reviews, 2000, 19(1/2/3/4/5): 403–415.
- [14] WILD M. Enlightening global dimming and brightening[J]. Bulletin of the American meteorological society, 2012, 93(1): 27–37.
- [15] 贺程程,柏峰,喻雨知,等. 近 56 a 湖北荆州四季初日与季节长度变化特征[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 636–643.
- [16] 马彬,张勃. 基于格点数据的 1961—2016 年中国气候季节时空变化[J]. 地理学报, 2020, 75(3): 458–469.
- [17] 孙艺迪,王德,高志强,等. 1982—2021 年黄、渤海表层

- 温度变化的线性和非线性特征分析[J]. 海洋科学, 2023, 47(5): 41–53.
- [18] AULT T R, MACALADY A K, PEDERSON G T, et al. Northern Hemisphere modes of variability and the timing of spring in western North America[J]. Journal of climate, 2011, 24(15): 4003–4014.
- [19] PARK B J, KIM Y H, MIN S K, et al. Anthropogenic and natural contributions to the lengthening of the summer season in the Northern Hemisphere[J]. Journal of climate, 2018, 31(17): 6803–6819.
- [20] WU Z H, HUANG N E, CHEN X Y. The multi-dimensional ensemble empirical mode decomposition method[J]. Advances in adaptive data analysis, 2009, 1(3): 339–372.
- [21] WU Z H, HUANG N E, WALLACE J M, et al. On the time-varying trend in global-mean surface temperature[J]. Climate dynamics, 2011, 37: 759–773.
- [22] SONG X D, SONG Y, CHEN Y Y. Secular trend of global drought since 1950[J]. Environmental research letters, 2020, 15(9): 094073.
- [23] HOGAN R J, BOZZO A. A flexible and efficient radiation scheme for the ECMWF model[J]. Journal of advances in modeling earth systems, 2018, 10(8): 1990–2008.
- [24] MLAWER E J, TAUBMAN S J, BROWN P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave[J]. Journal of geophysical research: atmospheres, 1997, 102(D14): 16663–16682.
- [25] SLINGO A. A GCM parameterization for the shortwave radiative properties of water clouds[J]. Journal of atmospheric sciences, 1989, 46(10): 1419–1427.
- [26] FU Q. An accurate parameterization of the solar radiative properties of cirrus clouds for climate models[J]. Journal of climate, 1996, 9(9): 2058–2082.
- [27] KATO S, LOEB N G, ROSE F G, et al. Surface irradiances consistent with CERES-derived top-of-atmosphere shortwave and longwave irradiances[J]. Journal of climate, 2013, 26(9): 2719–2740.
- [28] RAMANATHAN V, CESS R D, HARRISON E F, et al. Cloud-radiative forcing and climate: results from the earth radiation budget experiment[J]. Science, 1989, 243(4887): 57–63.
- [29] 游婷, 张华, 王海波, 等. 夏季白天中国中东部不同类型云分布特征及其对近地表气温的影响[J]. 大气科学, 2020, 44(4): 835–850.
- [30] BEST M J. A model to predict surface temperatures[J]. Boundary-layer meteorology, 1998, 88(2): 279–306.
- [31] YUAN C Y, KUANG X D, XU J B, et al. Phase variations of the summer and winter seasons in the Bohai Sea during the last four decades[J]. Frontiers in marine science, 2023, 10: 1095792.

责任编辑: 周建军