

南海大气边界层高度的气候特征研究

董议文¹, 李响^{1*}, 张蕴斐¹, 王剑¹, 易侃², 姚佳伟¹

(1. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 2. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 100038)

摘 要: 利用 1979—2020 年逐时的 ERA5 再分析数据, 研究了南海区域大气边界层高度的气候特征及其影响因子。结果表明: 南海区域平均大气边界层高度为 500~800 m, 空间上呈中间高、四周低的分布特征。南海大气边界层高度具有显著的季节变化特征, 总体按照冬季、秋季、夏季、春季依次递减, 日变化较小, 大部分区域边界层高度的日变化幅度小于 300 m, 日循环比较平缓。南海大气边界层高度显著的季节变化特征主要受海气温差、海表面风、感热通量、潜热通量和稳定度的共同影响。较大的海气温差和强风速使海表热通量增加, 下垫面不稳定性增加, 海气相互作用加强, 湍流活动增强, 导致秋冬季边界层高度较高。过去 42 a 南海区域年平均大气边界层高度显著增高, 年平均增高率约为 0.8 m/a, 且边界层高度变化存在显著的季节差异。海表面温度升高、潜热通量增加以及稳定度减小有利于边界层的发展, 可能是导致南海边界层高度增加的主要原因。

关键词: 南海; 大气边界层高度; 季节变化; 日变化; 趋势

中图分类号: P421.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)01-0079-12

1 引言

大气边界层是靠近地球表面的对流层, 直接受到地表的强迫作用, 高度可达数公里, 是人类活动的主要区域^[1]。地球表面通过边界层与自由大气进行热量、动量、水汽和化学物质的交换。由于边界层内存在对流活动、湍流混合以及低层云雾形成、污染物扩散和地表能量收支等许多过程, 因此边界层与天气、气候、空气污染等许多问题密切相关^[2-4]。大气边界层高度是表征边界层结构特征的重要参数之一, 它决定了边界层内部湍流混合、对流输送和污染物扩散的垂直程度, 强烈影响着对流活动的发展和演变^[5-7]。在天气预报、气候预测和空气质量预测模式中, 大气边界层高度是最重要的参数之一。

HOLZWORTH^[8]开启了大气边界层高度研究,

他通过使用早期的无线电探空数据研究了美国的大气边界层高度特征。后来, 随着探空数据和其他来源数据的广泛应用, 学者们对典型地区大气边界层高度开展了进一步研究, 从而形成更加清晰的大气边界层高度区域图^[2,9-10]。LIU 等^[9]利用全球 14 个站点的探空数据研究了这些地区大气边界层高度的日循环气候特征。SEIDEL 等^[11]使用探空数据、再分析数据和两个模式数据分析了美国和欧洲大气边界层高度的日变化和季节变化, 得到了更多的大气边界层高度气候特征。GU 等^[12]利用全球 45 a 的探空观测数据, 描述了不同下垫面和纬度带大气边界层高度的气候特征。研究结果显示陆地与海洋大气边界层高度的日变化和季节变化差异很大, 与陆地相比, 海洋大气边界层高度表现出相对平缓的日循环特征, 季节变化不明显。

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2022-02-24。

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1408004); 国家自然科学基金青年基金(41806003); 中国长江三峡集团有限公司科研项目资助(WWKY-2020-0703)。

作者简介: 董议文(1994-), 女, 硕士, 主要从事大气边界层研究。E-mail: dongyw1225@163.com

*通信作者: 李响(1986-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事海气相互作用研究。E-mail: lixiang@nmefc.cn

国内也有很多学者通过不同的数据和方法对中国陆地和海洋大气边界层高度开展研究^[13-20]。涂静等^[18]使用FNL(Final Reanalysis Data)再分析数据研究了黄东海大气边界层高度的时空变化特征。韩美等^[19]利用CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)再分析数据对黄东海大气边界层高度的季节变化特征及其成因进行了研究,指出盛行风的平流作用与下垫面特征相结合造成的低空稳定性的变化是黄东海边界层高度时空变化的重要因素。于晓丽等^[20]使用南海的探空数据研究了季风期间南海大气边界层高度的日变化特征。GUO等^[21]通过2011—2015年的观测数据和再分析数据研究了我国大气边界层高度的气候特征。受限于海上边界层观测较为困难,很难获得长时间序列的观测数据,目前海上大气边界层高度的气候特征研究相对较少。高质量的再分析数据为研究海上大气边界层高度特征提供了一种可能。ERA5是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)最新的再分析数据,ALLABAKASH等^[22]使用ERA5数据研究了朝鲜半岛的边界层高度,其结果与从探空和GPS(Global Positioning System)无线电掩星数据中获得的边界层高度非常一致。

近年来,边界层高度的变化趋势引起了国内外学者的广泛关注^[23-25]。ZHANG等^[23]使用欧洲25个站点1973—2010年的观测数据揭示了边界层高度的增长趋势,并将其归因于近地表相对湿度的降低和温度的升高。最近的一项研究表明,中国地区边界层高度在2004年发生了显著的突变,但变化趋势随地点的不同而不同^[24]。YANG等^[26]使用地面激光雷达数据进行研究并指出,香港2004—2009年边界层高度呈下降趋势。显然,以往的研究表明,边界层高度的变化趋势可能因数据、方法或研究地点的不同而得到不同的结论,因此,非常有必要进行边界层高度长期变化趋势的研究。

南海作为中国近海中唯一的热带海区,具有较高的气温和海温,是影响我国气候的重要的动力和热力源。由于南海海气边界层观测较为困难,该地区的边界层研究大多局限于特定地点或者研究时间较短^[20,27]。本文将使用长时间、高分辨率的ERA5再分析数据来研究南海海洋大气边界层高度的气

候特征,并揭示边界层高度的长期变化趋势及原因,以增进我们对南海地区边界层特征的认识,为该区域边界层高度的研究以及数值预报模式的改进提供一定的参考。

2 数据及方法

2.1 ERA5再分析数据

ERA5再分析数据是ECMWF的第五代全球气候和天气再分析数据,也是ECMWF最新一代再分析数据。它同化了多个卫星和无线电探空数据集,还包含了世界气象组织全球电信系统(Global Telecommunications System, GTS)的各种数据集。ERA5数据覆盖全球,具有 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 的水平分辨率、37层标准气压层的垂直分辨率和逐小时的时间分辨率。本文利用ERA5的边界层高度数据研究南海地区大气边界层高度的气候特征,该边界层高度通过理查森数法计算得来。时间范围选择1979—2020年,共42 a。为了研究边界层高度的变化与影响因子的关系,还使用ERA5的海表面温度、2 m气温、10 m风速、感热通量、潜热通量等数据,以及1 000 hPa和900 hPa温度数据,用于计算低层稳定度(定义为900 hPa与1 000 hPa的位温差^[19])。

2.2 趋势分析

参照GUO等^[24]研究使用的方法,我们利用Sen斜率(Sen's slope)^[28]计算趋势,将趋势确定为所有成对值之间斜率的中值。具体计算方法如下:

$$\text{Sen's slope} = \text{Median} \{ (X_i - X_j) / (i - j) \}, i > j$$

式中: X_i 和 X_j 分别表示 X 时间序列中的第 i 和第 j 值,中位数是总数据集按顺序排列后居于中间位置的数。与线性回归相比,Sen斜率对异常值的敏感性较低。此外,使用非参数Mann-Kendall统计检验方法^[29-30]确定显著性。

3 结果

3.1 气候态

图1为ERA5再分析数据在南海区域大气边界层高度的气候态分布。南海区域的平均大气边界

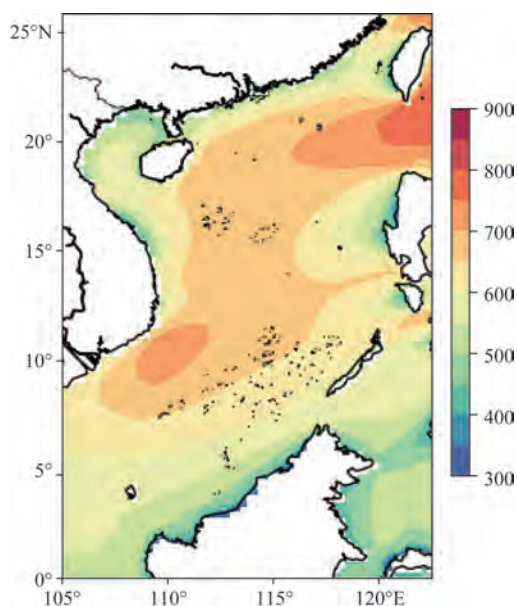


图1 南海区域大气边界层高度的气候态分布(单位:m)
Fig.1 Climatology of the atmospheric boundary layer height over the South China Sea(unit:m)

层高度在500~800 m之间。在空间分布上,南海沿岸边界区域的大气边界层高度相对较低,约为500 m,中部区域的边界层高度相对较高,超过700 m,其中台湾岛以南及南海西部海区存在大气边界层高度的大值中心,边界层高度可达800 m。总体而言,南海大气边界层高度的气候态在空间上呈现中间高、四周低的分布特征。

3.2 季节变化

图2为南海大气边界层高度在不同季节的空间分布。从图中可以看出,南海边界层高度存在显著的季节变化特征,总体按照冬季、秋季、夏季、春季依次递减,春季平均边界层高度在700 m以下,冬季则可以达到900 m以上。在空间上,不同季节南海大气边界层高度也存在显著的变化特征。秋冬季节,南海北部边界层高度高于南部,边界层最大高度出现在冬季南海北部及西部区域,达900 m以上。相比南海北部区域,南部区域边界层高度的季节变化不太明显。

为了进一步研究南海大气边界层高度的季节变化特征,我们还利用经验正交函数分析法(Empirical Orthogonal Function, EOF)计算了南海月平均大气边界层高度的时空分布模态。图3为EOF分析的第一模态、第二模态及对应的时间系数。EOF第一模态(见图3a)体现了南海大气边界层高度变化在空间上具有非常好的一致性,这种一致性占总体方差的68.7%。结合时间系数可以看出(见图3c),边界层高度存在显著的季节差异,具体表现为:4—9月,南海边界层高度降低,5月为最低;10月—次年2月,边界层高度升高,12月达到最高。这与图2中春夏季边界层高度较低、秋冬季边界层高度较高的结果一致。同时,图3a中的正值分布由北向南逐渐减小,表明这种季节差异越向南越小,这与

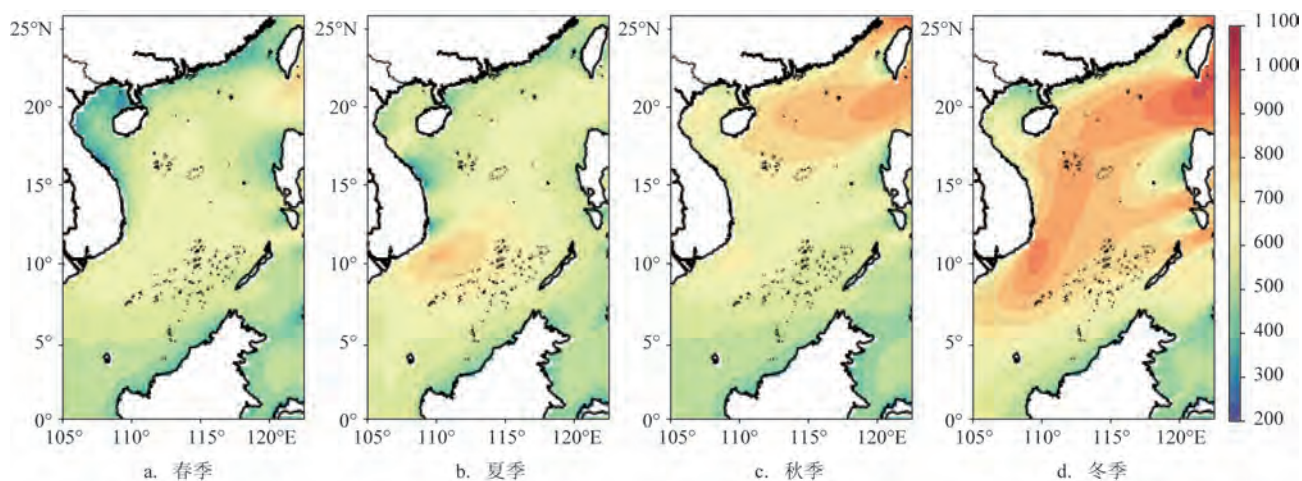


图2 南海区域不同季节大气边界层高度的空间分布(单位:m)

Fig.2 Spatial distributions of the seasonal mean atmospheric boundary layer height over the South China Sea(unit:m)

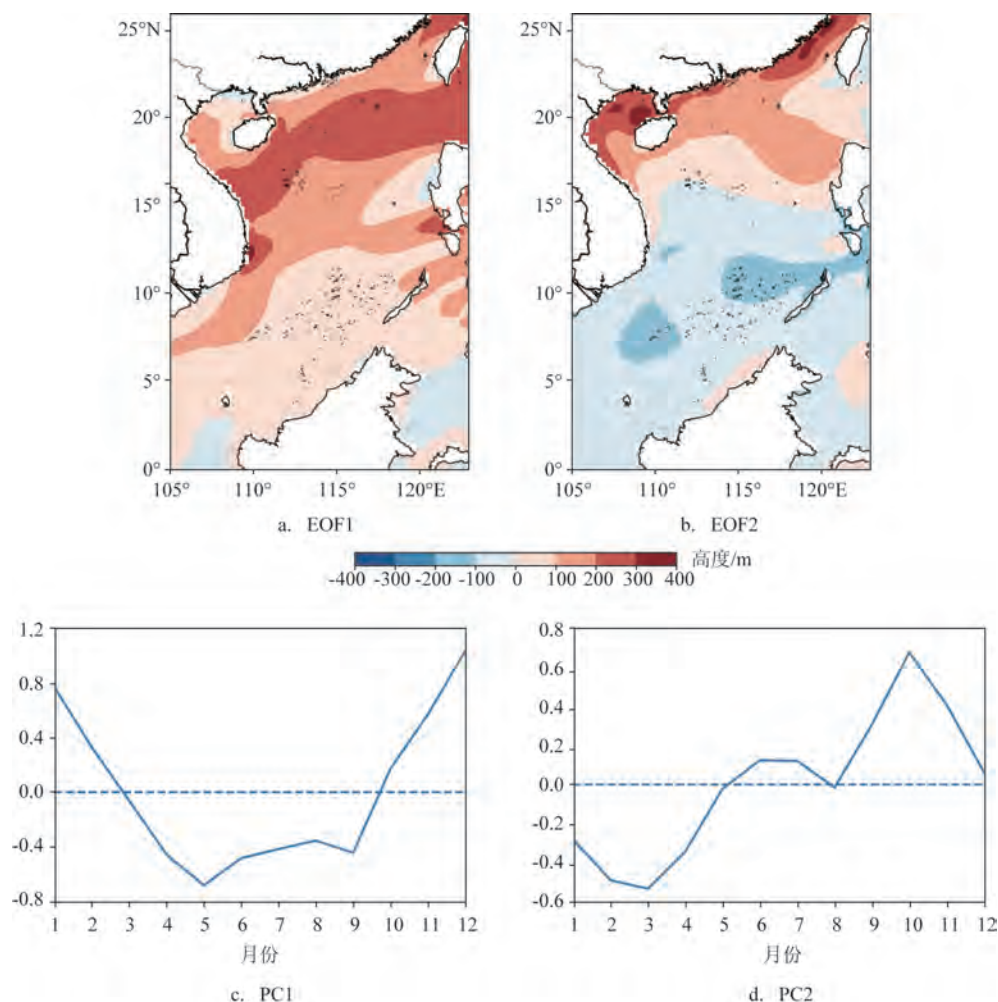


图3 南海区域月平均大气边界层高度EOF分析的前两个模态及其时间系数

Fig.3 The first two modes and their time coefficients of the EOF analysis of monthly mean atmospheric boundary layer height over the South China Sea

图2南海北部边界层高度季节变化显著而南部相对平缓的结果相一致。

3.3 日变化

图4为南海区域不同季节大气边界层高度日变化幅度的空间分布。整体而言,南海区域大气边界层高度的日变化幅度相对较小,大部分区域小于300 m,沿海区域相对较大,超过350 m。日变化幅度在大部分区域没有显著的季节变化,只在南海西部区域有较小的季节变化,春季和冬季日变化幅度相对较小,在200~250 m之间。图5为南海区域不同季节大气边界层高度的日循环。从图中可以看出,不同季节的日循环较为一致,均在13时(北京时)左右达到最高。这主要与太阳辐射的日变化直

接相关^[20]。日出时,太阳辐射增强,下垫面开始加热,热通量增加,边界层得以发展,边界层高度开始升高;中午,太阳辐射最强,边界层高度达到峰值;下午,太阳辐射减弱,边界层高度也开始降低。由于海洋这一特殊下垫面的影响,不同季节大气边界层高度的日循环变化均相对比较平缓。JOHNSON等^[31]指出海洋大气边界层高度的日变化主要由海温的日变化引起。海水比热容较大,白天海水升温较慢,夜间降温也较慢,海温日变化较小,进而导致海洋大气边界层高度的日变化也较小。

3.4 季节变化成因分析

韩美等^[19]研究指出,海洋大气边界层高度的变化受到湍流卷夹率、大尺度垂直速度以及积云质量

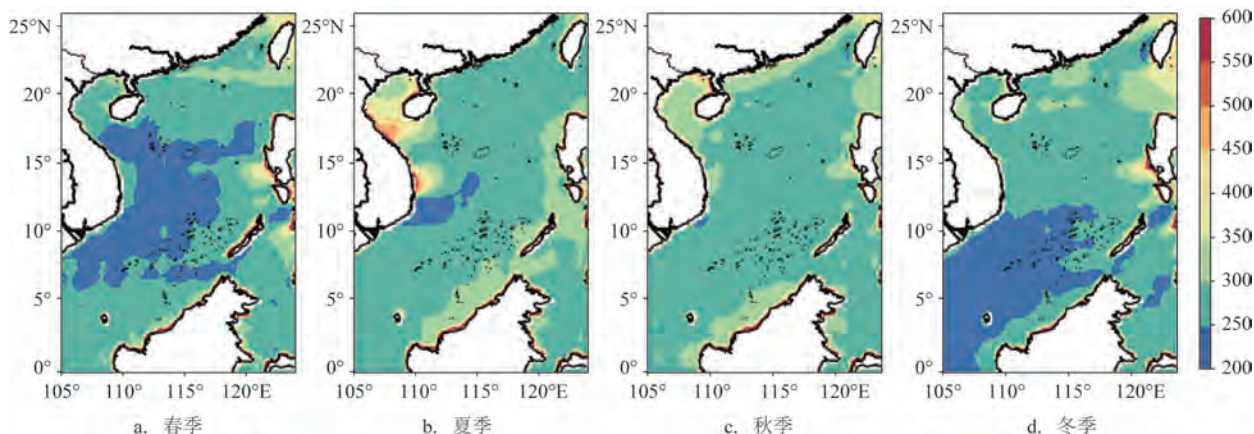


图4 南海区域不同季节边界层高度日变化幅度的空间分布(单位:m)

Fig.4 Spatial distribution of diurnal variation amplitude of boundary layer height over the South China Sea for each season(unit:m)

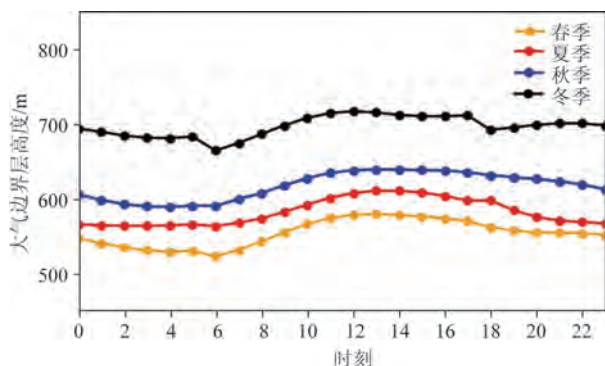


图5 南海区域不同季节大气边界层高度的日循环

Fig.5 Diurnal cycle of atmospheric boundary layer height over the South China Sea for each season

通量的影响,其中湍流卷夹率是决定大气边界高度的主要因素。湍流卷夹率与浮力通量和稳定度密切相关。浮力通量包括感热通量和潜热通量,主要受海气温差以及风速的共同影响。为了分析南海边界层高度季节变化的原因,我们探讨海气温差、海表面风(10 m风)、感热通量、潜热通量以及稳定度这几个影响因子的季节变化特征。

图6给出了各个影响因子在不同季节的空间分布。海气温差表现出复杂的时空变化特征(见图6a)。南海北部海气温差的季节变化为冬季最高,秋季次之,春夏季最低,且冬季明显高于其他季节,海气温差达到4 K左右。南海南部海气温差的季节变化表现为夏秋季最高,春季次之,冬季最低。海气温差表征了下垫面即海气界面的稳定度,海气温差越大,下垫面越不稳定,海气相互作用越强,这有利

于海气界面热通量增加,低层浮力对流活动加强,进而导致更高的边界层高度。

图6b显示了海表面风的季节变化。春季,南海以偏东风为主,北部风速略高于南部;夏季,南海盛行西南季风,季风带来大量的暖湿气流,使南海北部海气温差减小,南海区域以西南风和南风为主,风速极大值区集中在南海西部,最大风速达到8 m/s以上;秋季,东北季风开始盛行,北方的冷空气开始影响南海北部,加大了该区域的海气温差,南海北部以东北风为主,风速较大,最高达到10 m/s,风速极大值区集中在南海东北部区域,越向南风速越小;冬季,东北季风影响整个南海区域,风速较大,风速极大值区分布在南海东北部及西部区域,最高风速接近12 m/s,强劲的冷空气也加大了南海北部的海气温差。从四季来看,冬季风速最强,秋季和夏季次之,春季最弱。秋冬季节,强劲的东北风不仅带来冷空气,加大南海北部的海气温差,使得南海北部海气界面热通量增加,而且较强的风速也有利于低层湍流活动的发展,导致南海北部在秋冬季出现较高的边界层高度(见图2c—d)。我们还发现,夏季南海西部较高的边界层高度(见图2b)也有可能由较强的西南季风所导致。

图6c和6d分别显示了感热通量和潜热通量的季节变化,两者总体表现为冬季最高,秋季次之,春夏季最低,且南海北部的季节变化更为显著,冬季热通量明显高于其他季节。热通量的季节变化主要受到海气温差和风速的共同影响。秋冬季,尤其是冬季,南海北部海气温差最大,风速最强,加强了

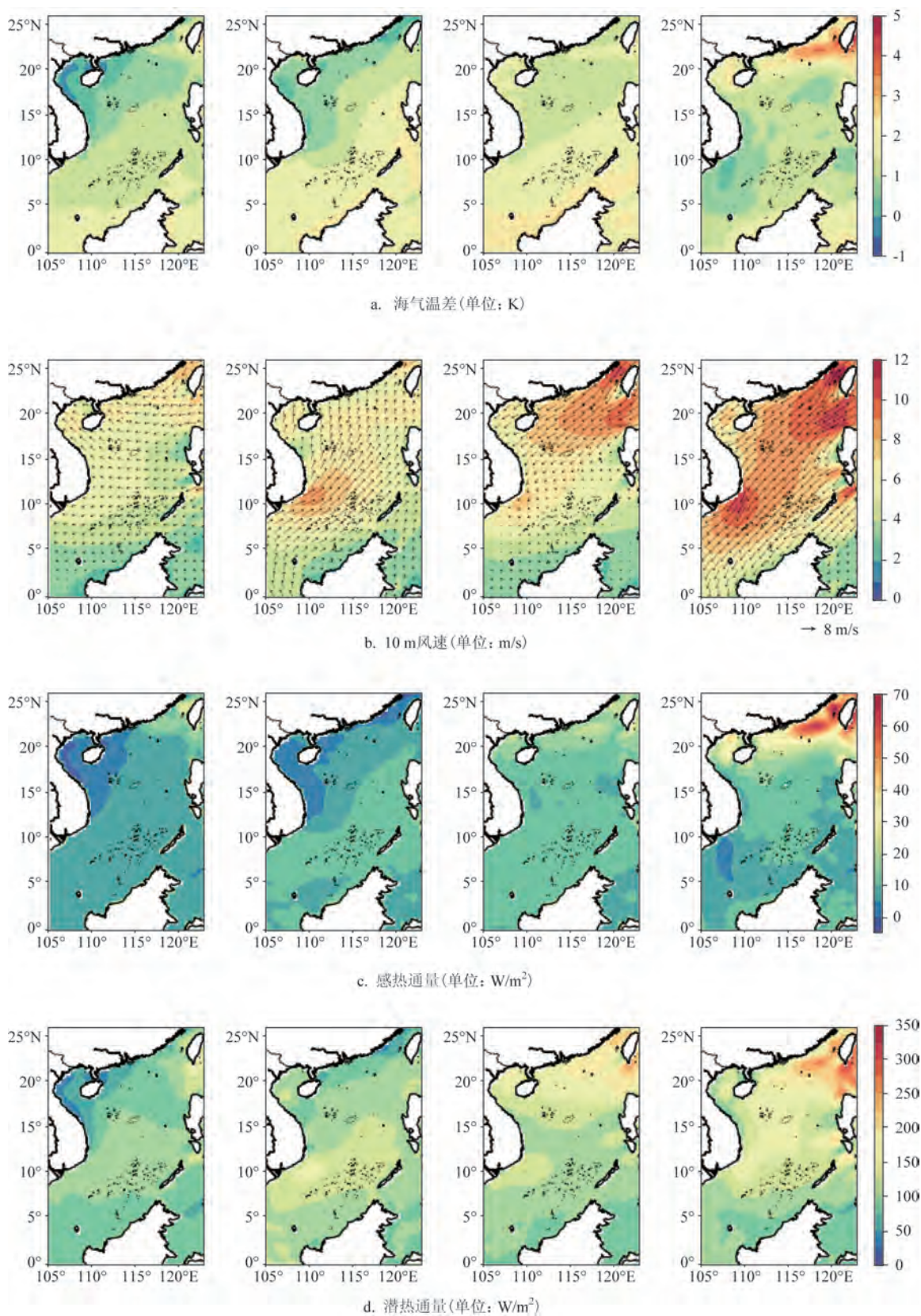
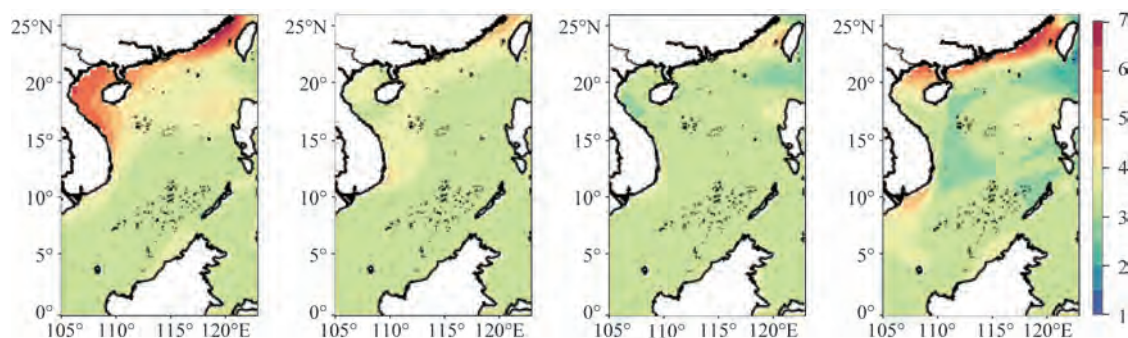


图6 南海区域不同影响因子的季节空间分布

Fig.6 Spatial distribution of impact factor in the South China Sea for each season



e. 稳定度(单位: K)

图6 (续)

Fig.6 (Continued)

海气相互作用,加快了海气界面物质和能量的交换,导致了南海北部出现较强的感热通量和潜热通量,这有利于促进南海北部边界层的发展,导致秋冬季节边界层高度增加。

图6e显示了稳定度的季节变化。稳定度为900 hPa与1 000 hPa的位温差,可以反映低层大气层结的稳定性,值越大,稳定性越高。稳定度的季节变化主要出现在南海北部,其中沿岸区域春季和冬季的稳定度高于夏季和秋季,这主要是受到陆地的影响。南海北部海区稳定度的季节变化为春季最高,夏秋季次之,冬季最低,冬季不稳定区域主要分布在台湾岛以南以及南海西部区域。稳定度越低,越有利于对流活动的发展,边界层高度越高。南海北部冬季较低的稳定度是导致该区域冬季边界层高度较高的原因之一。

综合以上分析可以发现,南海大气边界层高度的季节变化受到海气温差、海表面风、感热通量、潜热通量和稳定度的共同影响。秋冬季,尤其是冬季,南海北部大的海气温差和强风速使得南海北部的感热通量和潜热通量增加,低层不稳定性较大,有利于浮力对流活动增强,促进边界层发展,导致南海北部边界层高度较高。

3.5 长期变化趋势及原因分析

在全球气候变化的大背景下,南海大气边界层高度的长期变化趋势是需要关注的另一个科学问题。图7为1979—2020年南海区域年平均边界层高度的变化趋势。从图7a可以看出,过去42 a,该区域年平均大气边界层高度显著增加了35 m,年平均增

长率达到0.8 m/a,通过了95%显著性检验。图7b为南海区域年平均大气边界层高度的变化趋势的空间分布。结果显示,除了南海沿岸海区边界层高度增长趋势不显著外,大部分区域边界层高度显著增长,其中南海北部增高趋势约为1 m/a,南部增高趋势为1~1.5 m/a。图8为不同季节南海区域大气边界层高度的变化趋势,结果显示其空间分布有较大差异。具体表现为:春季,南海大部分区域大气边界层高度显著增加,增长率在1~1.5 m/a之间;夏季,南海北部大气边界层高度显著增加,增长率也在1~1.5 m/a之间;秋季,南海南部大气边界层高度显著增加,最快增长率达2 m/a以上;冬季,南海大部分区域大气边界层高度没有显著变化。

为了探究边界层高度增加的可能原因,我们分析了各影响因子在1979—2020年的变化趋势。除了3.4节提到的影响因子,本文还分析了海表面温度的变化趋势。结果表明,海表面温度、潜热通量和稳定度有显著的增加/降低趋势(见图9—10),其他影响因子没有明显的变化趋势(图略)。图9为年平均海表面温度、潜热通量和稳定度的时间序列。过去42 a,海表面温度明显升高(见图9a),边界层高度的年变化与海表面温度存在显著的正相关关系,相关系数 R 为0.37,通过了95%显著性检验。潜热通量也表现出了显著的增长趋势(见图9b)。尤其在20世纪90年代后期,潜热通量显著增加,年平均边界层高度与潜热通量存在显著的正相关关系, R 达到0.66,通过了95%显著性检验。稳定度在过去42 a表现出显著的下降趋势(见图9c),大气稳定度的降低有利于边界层的发展。边界层高度的年变

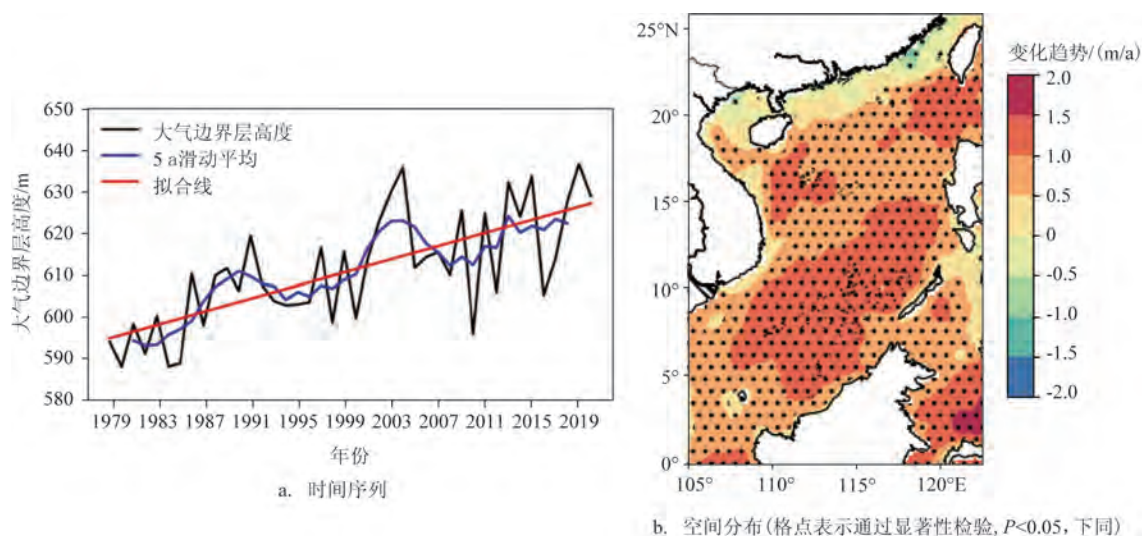


图7 1979—2020年南海年平均大气边界层高度变化时间序列和空间分布

Fig.7 Time series and spatial distribution of the annual mean atmospheric boundary layer height variation over the South China Sea from 1979 to 2020

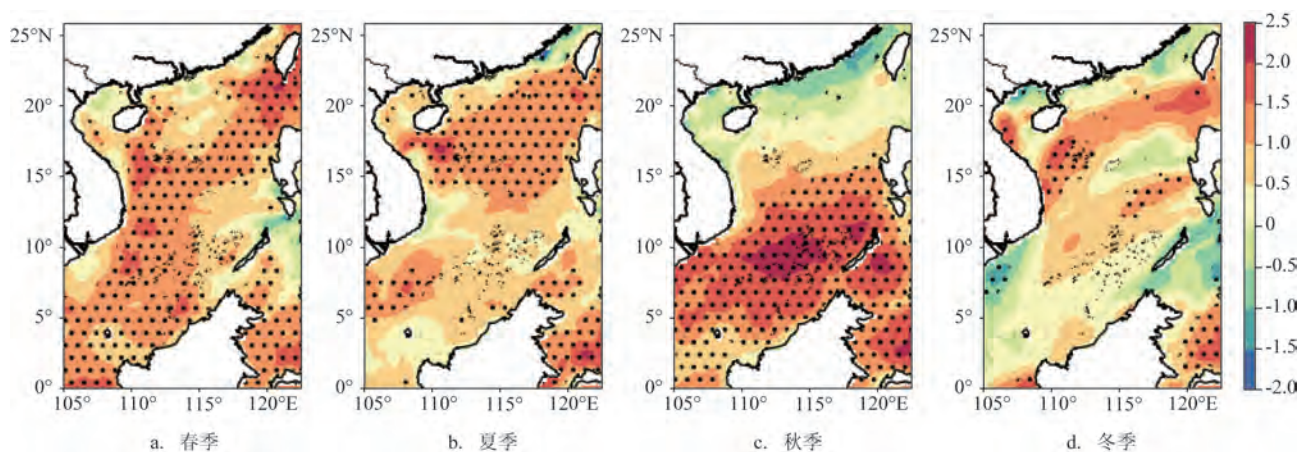


图8 1979—2020年南海区域不同季节大气边界层高度的变化趋势的空间分布(单位:m/a)

Fig.8 Spatial distribution of the trend of seasonal mean atmospheric boundary layer height over the South China Sea from 1979 to 2020 (unit:m/a)

化与稳定度存在显著的负相关关系, R 为 -0.81 , 通过了 95% 显著性检验。总体而言, 海表面温度升高、潜热通量增大以及大气稳定度减小有利于边界层的发展, 这几个因子的变化导致了边界层高度增加。

图 10 为南海区域年平均海表面温度、潜热通量和稳定度的变化趋势的空间分布。由图可见, 南海区域海表面温度显著升高(见图 10a), 南海北部升高更快, 年平均增长率达到 0.02 K/a 以上。南海大

部分区域的潜热通量也有显著的增长趋势(见图 10b), 增长最快的地方出现在南海北部, 增长率达到 $0.5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{a)}$ 左右。结合南海区域年平均边界层高度变化趋势的空间分布(见图 7b)可以发现, 南海北部海表面温度和潜热通量增长较快的区域对应着边界层高度增长较快的区域。图 10c 显示南海区域的稳定度总体呈现显著的减小趋势, 减小较快的区域与边界层高度增长较快的区域基本一致, 这一点从两者的相关性也得到证实(见图 11)。南海区

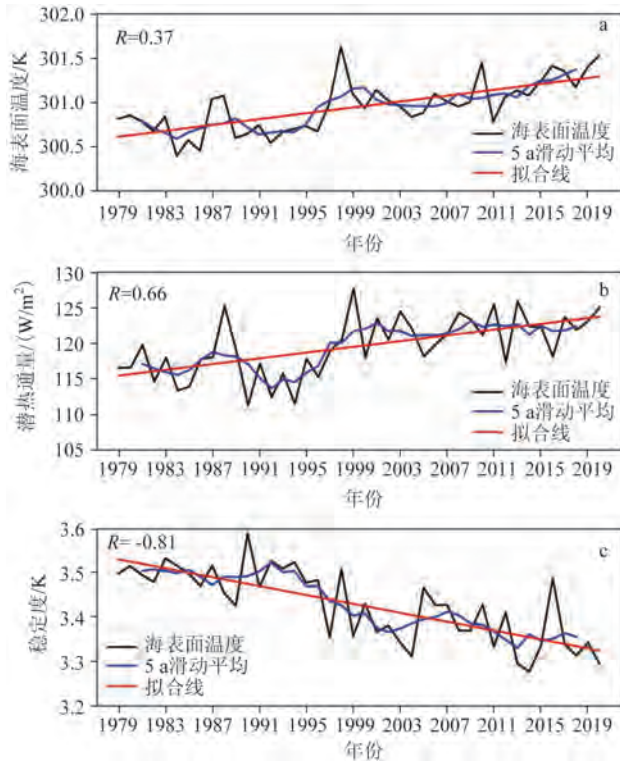


图9 1979—2020年南海年平均海表面温度(a)、潜热通量(b)和稳定度(c)时间序列

Fig.9 Time series of annual mean sea surface temperature (a), latent heat flux(b), stability(c) over the South China Sea from 1979 to 2020

域年平均边界层高度的变化与潜热通量呈显著的正相关(见图11b),与稳定度呈显著的负相关(见图11c),与海表面温度在大部分海区呈显著的正相关

(见图11a)。综上,南海大气边界层高度的增加可能是由于海表面温度升高、潜热通量增加以及稳定度减小,这与3.4节的结论一致,即更高的潜热通量和更低的稳定度有利于产生更高的边界层高度。

4 结论与讨论

本文利用1979—2020年逐时的ERA5再分析数据,研究了南海区域大气边界层高度的气候特征,分析了边界层高度季节变化的原因,并探讨了边界层高度的长期变化趋势及其原因。结论如下:

(1)南海平均大气边界层高度在500~800 m之间,空间上呈中间高、四周低的分布特征。

(2)南海大气边界层高度存在显著的季节变化特征,总体按照冬季、秋季、夏季、春季依次递减,其中南海北部的季节变化更为显著。边界层高度的季节变化受到海气温差、海表面风、感热通量、潜热通量和稳定度的共同影响。秋冬季,尤其是冬季,南海北部大的海气温差和强风速使南海北部的感热通量和潜热通量增大,热通量增加导致下垫面更不稳定,海气相互作用增强,湍流活动增强,边界层高度升高。同时,冬季南海北部低层的不稳定性也有利于边界层内对流活动的发展,使冬季边界层高度较高。

(3)南海大气边界层高度的日变化较小,大部分区域日变化幅度在300 m以下,这主要是由于海洋的特殊环境导致海温的日变化较小。不同季节

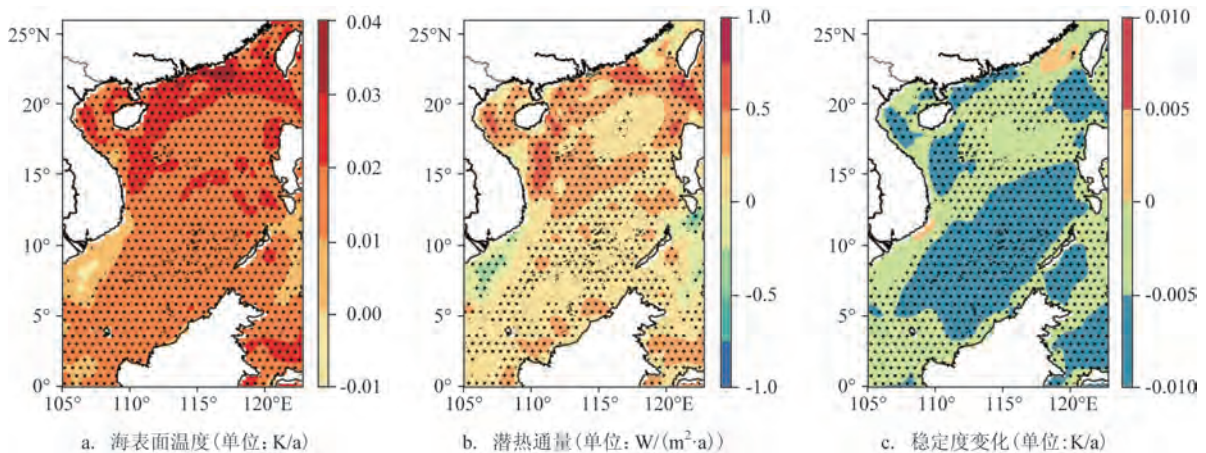


图10 1979—2020年南海区域年平均海表面温度、潜热通量和稳定度的变化趋势的空间分布

Fig.10 Spatial distribution of the trend of annual mean sea surface temperature, latent heat flux, stability over the South China Sea from 1979 to 2020

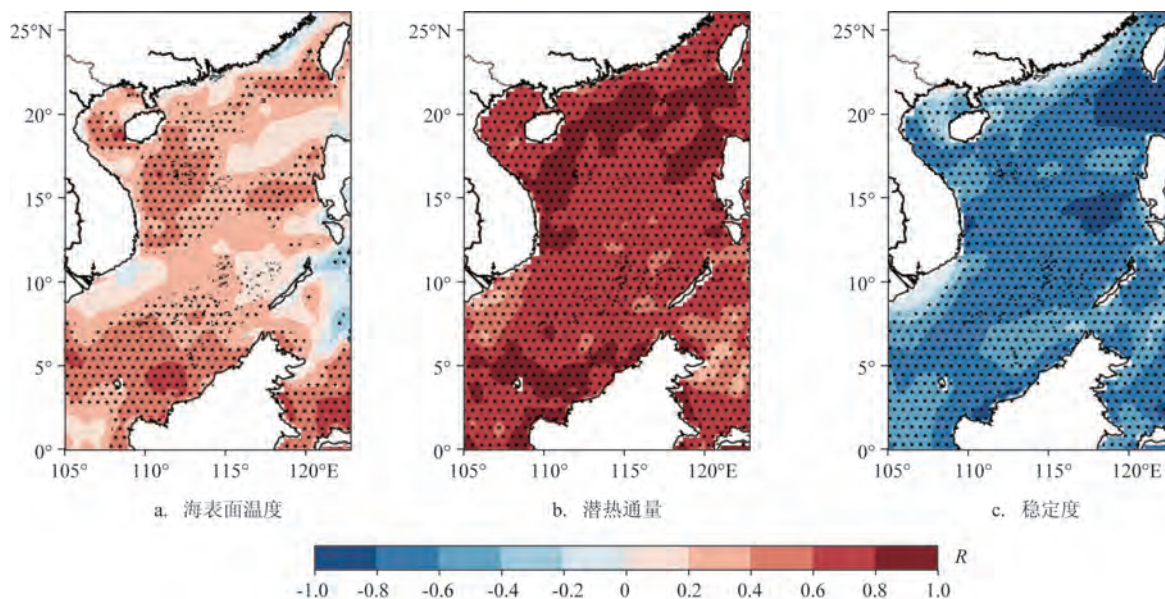


图11 1979—2020年南海区域年平均边界层高度与海表面温度、潜热通量和稳定度的相关系数的空间分布

Fig.11 Spatial distribution of correlation coefficients between annual mean atmospheric boundary layer height and sea surface temperature, latent heat flux, stability, respectively, over the South China Sea from 1979 to 2020

边界层高度具有一致的日循环特征,通常在13时达到最高,这主要归因于太阳短波辐射的变化。

(4)南海区域年平均大气边界层高度显著增高,年平均增高率约为0.8 m/a,且边界层高度的变化趋势存在显著的季节差异。海表面温度的升高、潜热通量的增加以及稳定度的减小,有利于大气边界层的发展,可能是导致南海区域大气边界层高度增加的主要原因。

参考文献:

- [1] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Dordrecht, Netherlands: Springer, 1988.
- [2] BAKAS N A, FOTIADI A, KARIOFILLIDI S. Climatology of the boundary layer height and of the wind field over greece[J]. Atmosphere, 2020, 11(9): 910.
- [3] 李响, 王辉, 吴辉碇, 等. 海上大气边界层数值预报技术发展概论[J]. 海洋预报, 2010, 27(1): 72-82.
LI X, WANG H, WU H D, et al. A review of techniques for numerical forecasting marine atmosphere boundary layer[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(1): 72-82.
- [4] 江丽芳, 尹毅, 刘春霞. 边界层参数化方案对台风“莫拉菲”热力和动力结构特征影响的对比[J]. 海洋预报, 2017, 34(4): 20-31.
JIANG L F, YIN Y, LIU C X. Comparison of the thermal and dynamic boundary layer structure with different boundary layer parameterizations during typhoon “Molave” [J]. Marine Forecasts, 2017, 34(4): 20-31.
- [5] DAVIES F, MIDDLETON D R, BOZIER K E. Urban air pollution modelling and measurements of boundary layer height[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(19): 4040-4049.
- [6] QUAN J N, GAO Y, ZHANG Q, et al. Evolution of planetary boundary layer under different weather conditions, and its impact on aerosol concentrations[J]. Particuology, 2013, 11(1): 34-40.
- [7] YANG T, WANG Z F, ZHANG W, et al. Technical note: Boundary layer height determination from lidar for improving air pollution episode modeling: Development of new algorithm and evaluation [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, 17(10): 6215-6225.
- [8] HOLZWORTH G C. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous united states[J]. Monthly Weather Review, 1964, 92(5): 235-242.
- [9] LIU S Y, LIANG X Z. Observed diurnal cycle climatology of planetary boundary layer height[J]. Journal of Climate, 2010, 23(21): 5790-5809.
- [10] VON ENGELN A, TEIXEIRA J. A planetary boundary layer height climatology derived from ECMWF reanalysis data[J]. Journal of Climate, 2013, 26(17): 6575-6590.
- [11] SEIDEL D J, ZHANG Y H, BELJAARS A, et al. Climatology of the planetary boundary layer over the continental United States and Europe[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D17): D17106.
- [12] GU J, ZHANG Y H, YANG N, et al. Diurnal variability of the planetary boundary layer height estimated from radiosonde data

- [J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, 4(5): 479-492.
- [13] 杜一博, 张强, 王凯嘉, 等. 西北干旱区夏季晴天、阴天边界层结构及其陆面过程对比分析[J]. *高原气象*, 2018, 37(1): 148-157.
DU Y B, ZHANG Q, WANG K J, et al. The northwest arid areas in summer sunny day, cloudy day boundary layer structure and land surface process comparison analysis[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(1): 148-157.
- [14] 万云霞, 张宇, 张瑾文, 等. 感热变化对东亚地区大气边界层高度的影响[J]. *高原气象*, 2017, 36(1): 173-182.
WAN Y X, ZHANG Y, ZHANG J W, et al. Influence of sensible heat on planetary boundary layer height in East Asia[J]. *Plateau Meteorology*, 2017, 36(1): 173-182.
- [15] 苏彦入, 吕世华, 范广洲. 青藏高原夏季大气边界层高度与地表能量输送变化特征分析[J]. *高原气象*, 2018, 37(6): 1470-1485.
SU Y R, LV S H, FAN G Z. The characteristics analysis on the summer atmospheric boundary layer height and surface heat fluxes over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, 37(6): 1470-1485.
- [16] ZHANG W C, GUO J P, MIAO Y C, et al. Planetary boundary layer height from CALIOP compared to radiosonde over China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(15): 9951-9963.
- [17] SI Y D, LI S S, CHEN L F, et al. Validation and spatiotemporal distribution of GEOS-5 - based planetary boundary layer height and relative humidity in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(4): 479-492.
- [18] 涂静, 张苏平, 程相坤, 等. 黄东海大气边界层高度时空变化特征[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(4): 7-18.
TU J, ZHANG S P, CHENG X K, et al. Temporal and spatial variation of Atmospheric Boundary Layer Height (ABLH) over the Yellow-East China Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(4): 7-18.
- [19] 韩美, 张苏平, 尹跃进, 等. 黄东海大气边界层高度季节变化特征及其成因[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(S1): 34-44.
HAN M, ZHANG S P, YIN Y J, et al. The seasonal variation and causation of atmospheric boundary layer height at Yellow-East Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(S1): 34-44.
- [20] 于晓丽, 谢强, 王东晓. 1998 年季风爆发期南海大气边界层的日变化[J]. *热带海洋学报*, 2009, 28(2): 31-35.
YU X L, XIE Q, WANG D X. Diurnal cycle of marine atmospheric boundary layer during the 1998 summer monsoon onset over South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2009, 28(2): 31-35.
- [21] GUO J P, MIAO Y C, ZHANG Y, et al. The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(20): 13309-13319.
- [22] ALLABAKASH S, LIM S. Climatology of planetary boundary layer height-controlling meteorological parameters over the Korean Peninsula[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(16): 2571.
- [23] ZHANG Y H, SEIDEL D J, ZHANG S D. Trends in planetary boundary layer height over Europe[J]. *Journal of Climate*, 2013, 26(24): 10071-10076.
- [24] GUO J P, LI Y, COHEN J B, et al. Shift in the temporal trend of boundary layer height in China using long - term (1979-2016) radiosonde data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(11): 6080-6089.
- [25] LI J, CHU Y Q, LI X C, et al. Long-term trends of global maximum atmospheric mixed layer heights derived from radiosonde measurements[J]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(3): 034054.
- [26] YANG D W, LI C C, LAU A K H, et al. Long-term measurement of daytime atmospheric mixing layer height over Hong Kong[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(5): 2422-2433.
- [27] 柳艳菊, 丁一汇. 南海季风爆发前后大气层结和混合层的演变特征[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(4): 459-468.
LIU Y J, DING Y H. Evolution of the atmospheric stratification and mixed layer before and after monsoon onset over the South China Sea[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(4): 459-468.
- [28] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [29] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [30] KENDALL M G. Rank correlation methods[J]. *British Journal of Psychology*, 1990, 25(1): 86-91.
- [31] JOHNSON R H, CIESIELSKI P E, COTTURONE J A. Multi-scale variability of the atmospheric mixed layer over the western pacific warm pool[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, 58(18): 2729-2750.

Climatic characteristics of atmospheric boundary layer height over the South China Sea

DONG Yiwen¹, LI Xiang^{1*}, ZHANG Yunfei¹, WANG Jian¹, YI Kan², YAO Jiawei¹

(1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 2. Institute of Science and Technology, China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Based on hourly ERA5 reanalysis data from 1979 to 2020, the climatic characteristics and influencing factors of atmospheric boundary layer height over the South China Sea are studied. The results show that the average boundary layer height over the South China Sea is within the range of 500~800 m with a spatial distribution of higher in the middle and lower in the periphery. The boundary layer height over the South China Sea is characterized by significant seasonal variation, generally decreasing in order of winter, autumn, summer and spring, with relatively small diurnal variation. The diurnal variation amplitude of the boundary layer height in most areas is less than 300 m, and the diurnal cycle is relatively gentle. The significant seasonal variation characteristics of the boundary layer height over the South China Sea are mainly affected by the air-sea temperature difference, sea surface wind, sensible heat flux, latent heat flux and stability. The large air-sea temperature difference and strong wind speed increase the sea surface heat flux, and increase the instability of the underlying surface, and strengthen the air-sea interaction and enhance turbulence activities, leading to higher boundary layer height in autumn and winter. In the past 42 years, the annual average atmospheric boundary layer height over the South China Sea has a significant increasing trend with the rate of about 0.8 m/yr, and there are significant seasonal differences in the variation of boundary layer height. The rise of sea surface temperature, the increase of latent heat flux and the decrease of stability may be the main reasons for the increase of boundary layer height over the South China Sea.

Key words: South China Sea; atmospheric boundary layer height; seasonal variation; diurnal variation; trend