

南海区域热状况的气候变化特征分析

邢彩盈^{1,2}, 朱晶晶^{1,2}, 吴胜安^{1,2}

(1. 海南省气候中心, 海南海口 570203; 2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南海口 570203)

摘要: 基于NCEP/NCAR近表层气温(SAT)、日本气象厅海表温度(SST)和OA Flux3热通量数据, 利用EEOF、趋势分析、突变检验等统计方法, 分析了南海区域热状况的气候变化特征。主要结论有: (1) 南海区域常年平均SST为26~29℃, 东南高西北低; 常年平均SAT为23~28℃, 深海区高而近陆地或海洋性大陆低; 5—9月均维持高值缓变状态, 2—5月和10—1月则分别为快速的增暖和降温过程; 二者变率均较小; (2) 南海区域各季SST和SAT呈全区一致型分布; 随时间呈明显的增暖趋势, SST较SAT显著; 各季存在明显的突变现象, 秋季相对要早, 冬、春季相对滞后; (3) 南海区域海气热通量以潜热通量为主, 常年平均潜热通量约80~140 W/m², 自南向北递增; 12—4月为快速下降过程, 9—12月为缓慢上升过程; 变率较大, 具有显著的地域性; (4) 各季潜热通量呈全区一致型分布; 随时间先平缓下降而后缓慢增长; 各季存在明显的突变现象。

关键词: 南海区域; 热状况; 气候变化特征; EEOF

中图分类号: P732.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)06-0013-11

1 引言

南海是东南亚最大的边缘海, 与太平洋和印度洋相连, 其环流结构被认为是联系热带太平洋和印度洋质量和热量的桥梁^[1]。同时, 南海也是受台风影响最显著的海区之一, 随着我国南海战略的提出和海南三沙市的设立, 南海海上航运、海洋资源开发等活动日益频繁, 了解南海地区的气候特征显得尤为重要。

海域热状况历来都是海洋家关心的重点, 其异常特征直接影响着我国大陆气候以及海洋资源的开发利用。南海地处于亚澳季风区的中部, 是东亚夏季风最先爆发的区域, 其海域热状况与南海夏季风活动的关系密切^[2-6], 其海气界面热量交换是南海夏季风爆发早晚和强弱的重要影响因子之一^[7], 进而对华南地区的旱涝分布产生重要影响。南海热状况变化对于南海土台风的生成频数、强度也具有

决定性的作用, 其海气热量交换往往导致南海台风的突变^[8]。此外, 南海热状况还可通过影响东亚环流结构而使得台风路径发生变化^[9-10], 通过局地作用增强台风登陆前的强度^[11], 这对社会经济和人身安全造成很大的影响。可见, 研究南海热状况的气候变化特征有助于加深对华南地区降水机制的认识, 为了解海气相互作用过程提供科学依据, 这对防治减灾工作有一定的指示性, 具有重要的现实意义。

关于南海区域温度方面, 蔡榕硕等^[12]研究指出南海表层水温距平场分别存在以全区同位相振荡和东南-西北反位相振荡的两个主要模态。李娟等^[13]、邱婷等^[14]分别研究了南海海表温度的时空分布特征及变化趋势, 指出南海海表温度具有明显的季节、年际和年代际变化特征。林锡贵^[15]研究冬夏季风转换期南海南部海区热状况的特征, 发现南海南部气温和海表温度最高值时段为5月下旬、阶段性变化较明显。在海气热通量方面, 戴彩悌等^[16]、陈锦年等^[17]

收稿日期: 2018-01-26; 修回日期: 2018-06-15。

基金项目: 国家自然科学基金(41765005, 41765007); 中国气象局气候变化专项(CCSF201528); 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2015M45)。

作者简介: 邢彩盈(1987-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事气候统计与预测研究。E-mail: 18876777858@163.com

通讯作者: 吴胜安(1974-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事气候诊断分析与预测研究。E-mail: wsa01@sohu.com

分别分析了南海区域海气热通量的时空变化特征。进一步地,戴彩悌等^[18]分析夏季南海潜热输送与长江流域夏季降水的关系,结果表明南海夏季潜热输送与长江流域夏季降水呈显著负相关关系。王丽娟等^[19]分析了夏季西南季风爆发早年和晚年南海潜热通量的特征,指出季风爆发早、晚年潜热通量表现出明显的差异。隋丹丹等^[20]研究表明南海潜热通量存在显著的年际和年代际变化特征。

前人关于南海热状况的研究主要针对单个方面(或海温,或热通量),缺乏对热状况较为全面的分析。同时,大部分研究成果序列时间久远,缺乏近些年的分析。而当前全球气候变暖,这一背景下南海区域热状况是如何响应?其气候变化特征如何?这些问题有待于研究。可见,有必要对南海区域热状况进行全面、细致的研究,整体上把握海域热状况的气候变化特征,以期对南海气象预报研究、南海海洋资源开发利用等提供一定的参考信息。

2 资料与方法

所用资料有:(1)1948—2014年日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)的再分析海表温度(COBE-SST2),水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$;(2)NCEP/NCAR逐月再分析气温资料,水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;(3)1958—2014年美国伍兹霍尔海洋研究所客观分析海气通量第三代数据产品(OA Flux3)^[21]的潜热、感热通量月平均资料,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。

文中主要研究南海区域($0^\circ \sim 21^\circ \text{N}$, $105^\circ \sim 121^\circ \text{E}$)热状况(包括海表温度、近表层气温和热通量)的气候变化特征,其中利用扩展经验正交函数(EEOF)方法、趋势分析、方差分析等分析热状况的空间分布和时间演变趋势,利用M-K检验、滑动T检验等分析热状况的突变特征。

扩展经验正交函数(EEOF)是一种能够分离出气候变量场空间尺度行波分布结构及相位变化的方法^[22],该方法在各个研究领域都有广泛的应用^[23-25]。它由EOF发展而来的,它不仅具有EOF的优点,还能够充分利用不同气候要素场的相关性,分析有内在相关性的要素场间相互联系的空间分布结构及

其随时间的变化^[26]。在本文中,把近表层气温场(Surface Air Temperature, SAT)和海表温度场(Sea Surface Temperature, SST)连接起来,构成如下扩展的MN维矩阵:

$$A_{M \times N} = \begin{bmatrix} A_{M_1 \times N} \\ A_{M_2 \times N} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $A_{M_1 \times N}$, $A_{M_2 \times N}$ 分别表示近表层气温场和海表温度场, $M_1 = 18 \times 23 = 414$, $M_2 = 8 \times 9 = 72$ 分别为研究区域SAT场和SST场的格点数, N 为样本数。 $A_{M \times N}$ 为扩展后的分析对象场, $M = M_1 + M_2 = 486$,为总格点数。

对矩阵 $A_{M \times N}$ 进行EOF分析,展开成只依赖于时间和只依赖于空间的函数部分如式(2),文中在EEOF分析之前已对各场进行了标准化处理。

$$A_{M \times N} = X_{M \times N} \times T_{M \times N} \quad (2)$$

式中: $X_{M \times N}$ 为EEOF分解后的特征向量, $T_{M \times N}$ 为对应的时间系数。

3 气候概况

3.1 海表温度和近表层气温的气候平均态

图1a给出了南海区域SST气候平均态(1981—2010年,下同)的空间分布情况。从图中可看出,南海区域常年年均SST为 $26 \sim 29^\circ \text{C}$,东南(靠近西太平洋暖池)高,西北(靠近大陆)低。图1b给出了常年南海区域平均SST的逐月分布,从图中可看出,1月和2月SST最低,平均不到 26.5°C ;6月SST最高,平均超过 29.5°C 。SST在2—5月和10月至次年1月的增温过程均为快速的,而6—10月则为缓慢降低的过程。

图2a给出了南海区域SAT的气候平均态的空间分布情况。从图中可看出,南海区域常年年均SAT为 $23 \sim 28^\circ \text{C}$,深海区近表层气温高,近陆地或海洋性大陆上空低。图2b给出了常年南海区域平均SAT的逐月分布,从图中可看出,1月SAT最低,平均不到 24.5°C ;6月SAT最高,平均超过 27.5°C 。与SST相似,SAT从2—5月和10—12月分别为快速的增温和降温过程,而6—9月则为缓慢的降温过程。

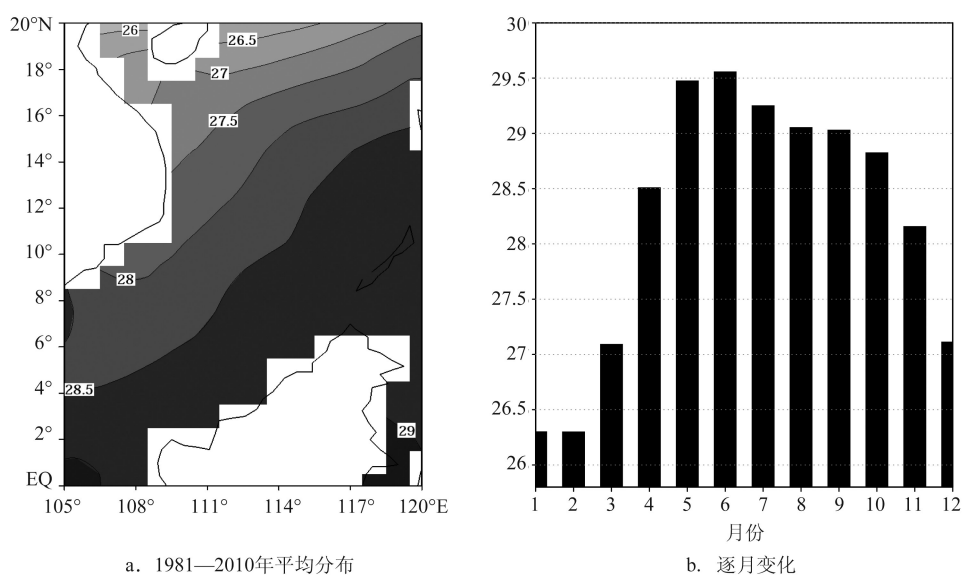


图1 南海区域SST(单位: °C)

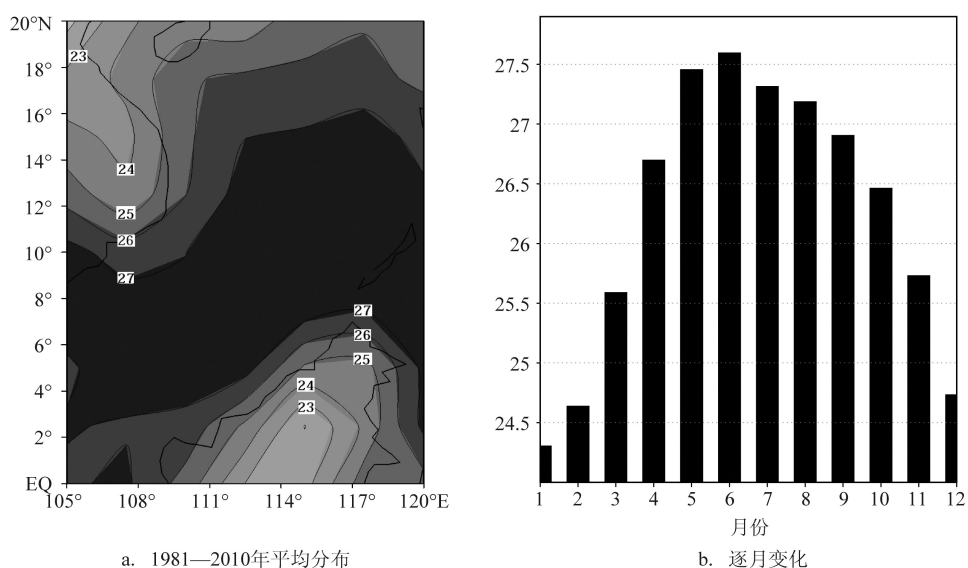


图2 南海区域SAT(单位: °C)

利用标准差来描述某一物理量在某时段内的变异幅度或变率。通过分析南海区域常年SST和SAT各月的标准差分布(图略)可发现,南海区域SST变率约为0.1~1.0 °C,海盆中心区变率较大。SAT变率总体上与SST变率相差不大,约为0.2~1.2 °C,一般纬度高的地区SAT变率大于低纬地区。从季节分布来看,夏秋季变率略小于冬春季。

为进一步分析南海区域的SAT和SST随纬度和时间的变化情况,给出了常年105°~120°E区间

平均SAT(见图3a)和SST(见图3b)的时间-纬度剖面图。如图3a所示,在南海南半部(10°N以南),SAT年内变化较平稳,近赤道区常年25 °C左右,其他地区26~29 °C;在南海北半部,随纬度升高,气温变化越大,在北端(20°N)附近,气温年内变化幅度可达9 °C:1月最低,约为19 °C;7月最高,约为28 °C。另外,从5—9月,整个南海SAT均处于缓变状态:气温高,变化小。南海区域SST年内变化便显出类似特征(见图3b),南半部年内变化幅度小

(SST为 $28\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$),北半部相对较大(SST为 $23\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$),但较气温变化幅度小;7—9月是整个南海SST的缓变期,其值维持在 $29\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。此外还发现,SST的月际分布与SAT有所差别,最低气温出现在2月,最高气温在7月和8月。5—10月整个南海SST均保持在 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,即该时期SST满足台风生成的条件,也为台风活动提供了热力保障。以上分析表明,南海SAT和SST的时空分布特征主要表现为:在南半部,SAT、SST年内变幅均较小,而北半

部相对较大;5—9月(尤其7—9月)是整个南海海区SST的高值缓变期。

3.2 热通量的气候平均态

图4给出了南海区域海气界面潜热通量气候平均态特征。由图4a可见,南海区域潜热通量均为正值,约为 $80\sim 140\text{ W/m}^2$,由南到北呈递增分布。从逐月分布情况(见图4b)来看,潜热通量具有明显的季节变化特征,其中4月最低,平均不到 75 W/m^2 ;12

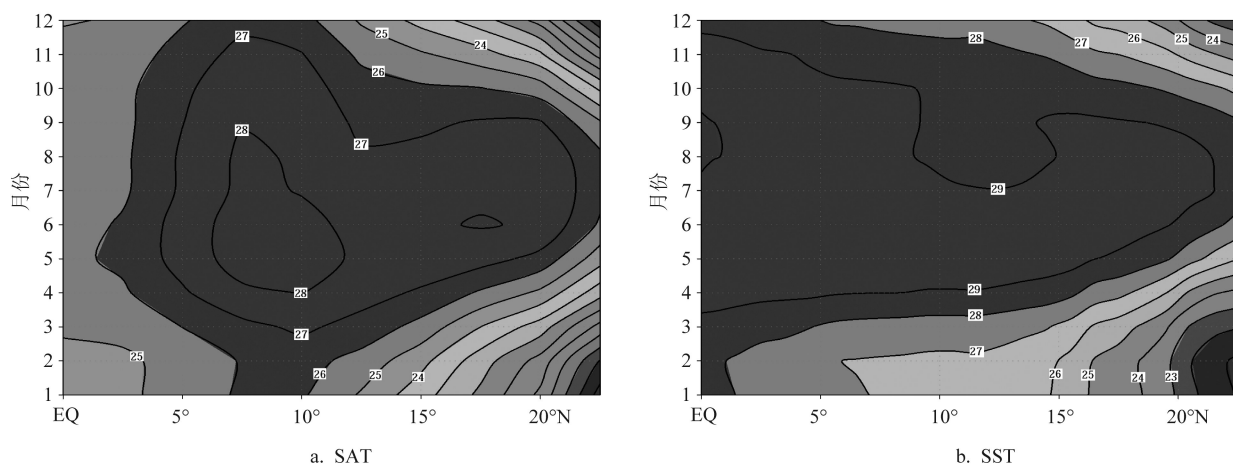


图3 105°~120°E区间平均SAT和SST的时间-纬度剖面图(单位:°C)

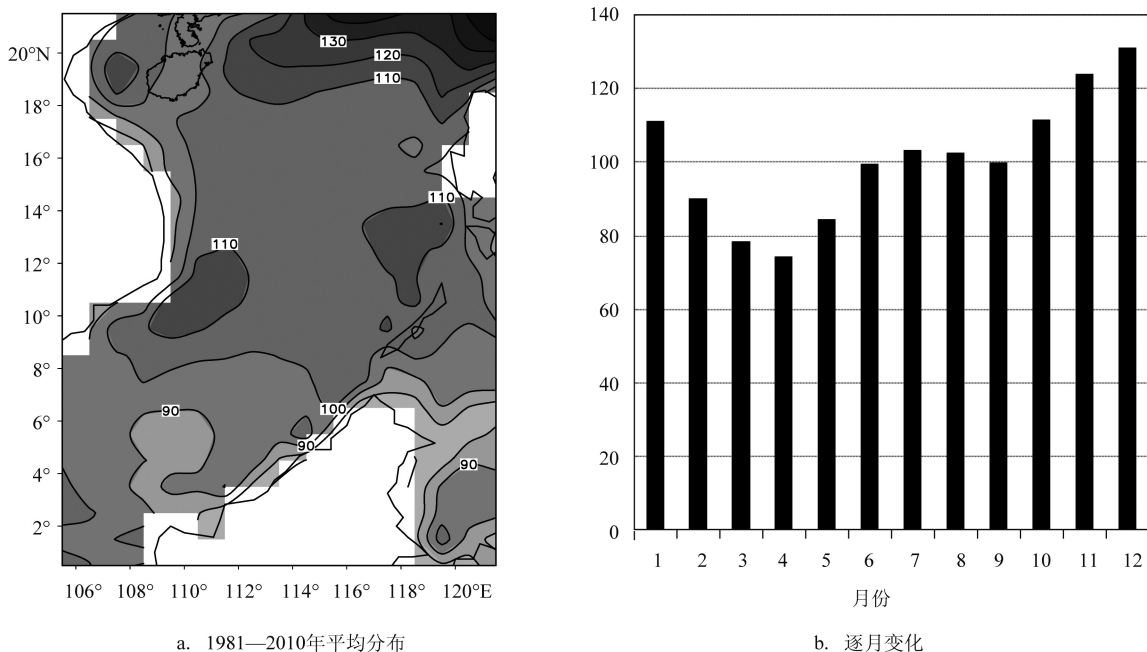


图4 南海区域潜热通量(单位: W/m^2)

月最高,平均超过 130 W/m^2 。另外,12月至次年4月为快速下降过程,9—12月为缓慢上升过程。

图5给出了南海区域的海气界面感热通量的气候平均态特征。从图5a可看出,南海区域感热通量也呈北高南低的空间分布,且均为正值,但其值很小(约 $4 \sim 16 \text{ W/m}^2$)。由此可见南海区域海气热通量以潜热通量为主,感热通量远远小于潜热通量。图5b为逐月分布情况,从图中可看出,感热通量的月际变化较大,4月最低,平均不到 2.7 W/m^2 ;12月最高,平均超过 14 W/m^2 。另外,12月至次年4月和8—12月分别为快速的下降和上升过程。

通过分析南海区域常年潜热通量和感热通量的标准差分布(图略)可知,南海区域年潜热通量变化较明显,并有显著的地域性,潜热通量变率较大,靠近陆地的海区最大达 15 W/m^2 以上。而感热通量的变率远远小于潜热通量变率,仅约为潜热通量的 $1/5$ 左右。因此,本文主要关注潜热通量的变化特征。

4 变化特征

根据 SST、SAT 及潜热通量的逐月变化特征,可分别选取1月、4月、7月和10月代表4个季节以分析南海区域热状况的气候变化特征。

4.1 海表温度和近表层气温的时空特征

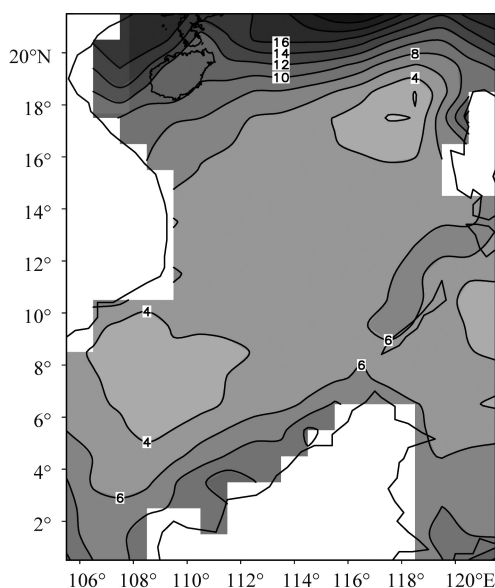
4.1.1 空间分布特征

为了分析南海区域海表温度和近表层气温的变化特征,结合其气候平均态特征,利用EEOF方法对SAT场和SST场进行扩展正交分解。表1是南海区域各季SAT和SST场前两个特征向量的方差贡献率。从表中可看出,各季EEOF前两个特征向量的累积方差贡献率均超过78%,说明前两个特征向量的变化特征可代表相应场的主要特征。同时第一特征向量的方差贡献率远大于第二特征向量,说明第一特征向量在表述该场气候变化特征方面占绝对优势。分析第一个特征向量的空间分布和时间演变特征便可揭示整个南海区域SAT和SST共同变化的主要特征。

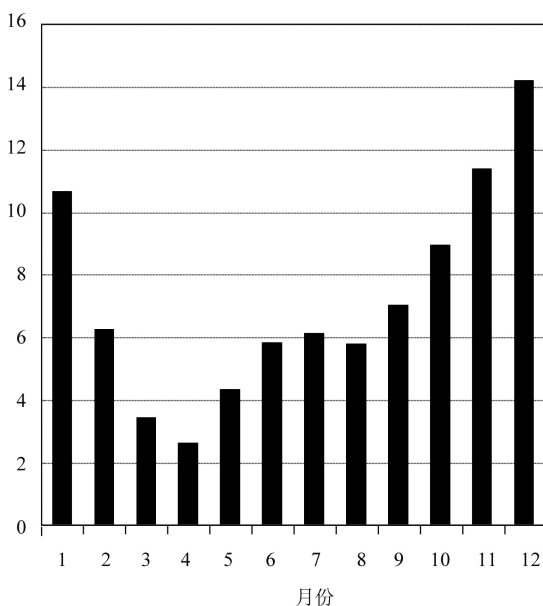
图6给出了南海区域各季SAT和SST第一特征向量的空间分布。从图中可看出,冬季SAT(见图

表1 南海区域各季SAT和SST的EEOF前两个特征向量的方差贡献率(单位:%)

	冬(1月)	春(4月)	夏(7月)	秋(10月)
EEOF1	68.8	67.8	69.0	70.1
EEOF2	11.6	11.0	9.3	8.3
EEOF1+2	80.4	78.8	78.3	78.4



a. 1981—2010年平均分布



b. 逐月变化

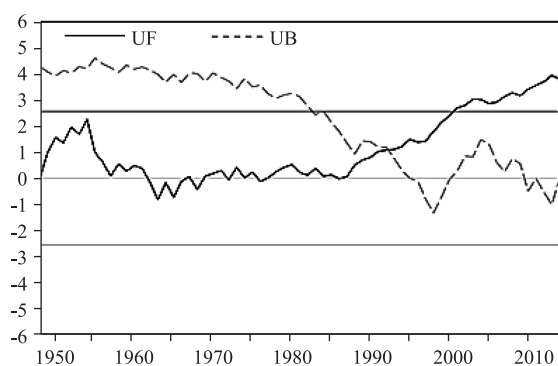
图5 南海区域感热通量(单位: W/m^2)



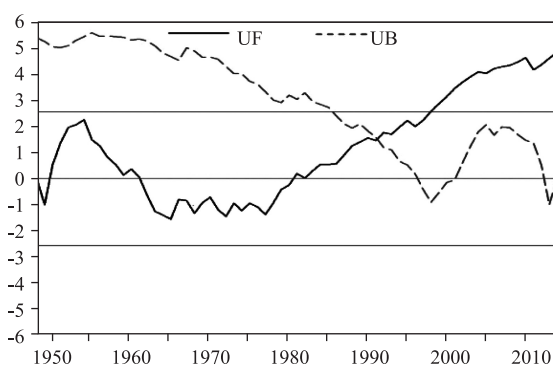
图6 南海区域各季SAT和SST的EEOF第一特征向量空间分布

6a)和SST(见图6b)第一特征向量空间分布表现为全区一致型(全区同向变化),主体(SAT场中等值线6.5围成的区域;SST场中则为等值线7.6所围成的范围)位于南海海盆中央,即该区域变率最大。冬季第一特征向量的空间分布表明,南海SAT变化与SST变化一致,当SAT偏高时,对应SST也偏高。春季SAT(见图6c)和SST(见图6d)的第一特征向量空间分布也表现为全区一致型,但相对于冬季,春季SAT空间分布的主体明显向东北收缩,而SST场的主体部分则向西南扩展,范围明显扩大。夏季SAT(见图6e)和SST(见图6f)的第一特征向量空间分布仍为全区一致型,但主体范围明显变少,SAT空间分布的主体退缩到东北角上,而SST空间分布的主体则在中部缩少为两个中心。秋季SAT(见图6g)和SST(见图6h)的第一特征向量空间分布类似,与夏季相比,秋季SAT的主体在迅速扩展到南海北半部的大部分地区,SST则在中部有明显扩张。

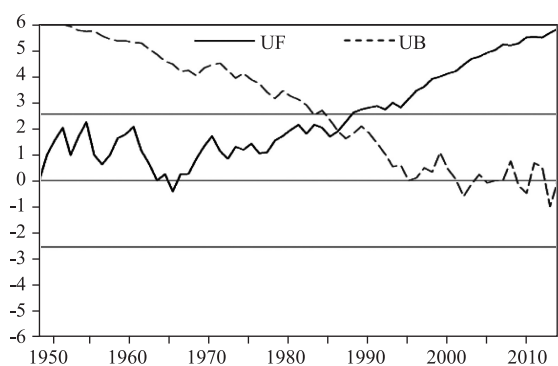
第一特征向量的高方差贡献占比率及空间分布



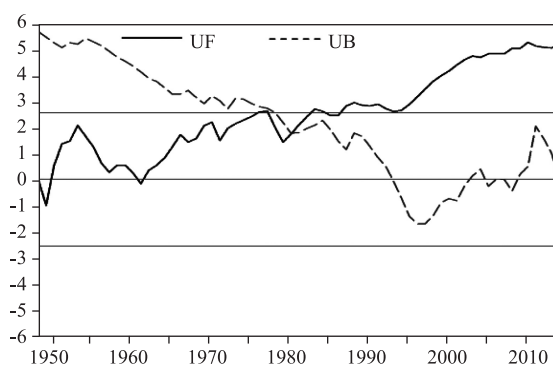
a. 冬季



b. 春季



c. 夏季



d. 秋季

图7 南海区域SAT和SST的EEOF1时间系数M-K检验

的高度一致性说明了SAT与SST具有紧密的内在联系性。为了进一步对此进行补充说明,对比了整个南海区域和冬季分布主体区($7.5^{\circ}\sim 15^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 115^{\circ}\text{E}$)冬季SAT和SST的逐年值,两者相关系数分别为0.826和0.842,均通过信度99.9%的显著性检验。

4.1.2 时间变化特征

表2给出了南海区域各季SAT和SST的EEOF第一、二特征向量对应时间序列的趋势系数和倾向率。从表中可看出,各季第一特征向量时间系数均表现明显的上升趋势,冬、春、夏、秋季的倾向率分

表2 南海区域各季SAT和SST的EEOF第一、二特征向量时间系数趋势系数和倾向率

		冬季	春季	夏季	秋季
T_{EEOF1}	趋势系数	0.492*	0.579*	0.688*	0.634*
	倾向率/(10 a)	0.031	0.037	0.044	0.040
T_{EEOF2}	趋势系数	-0.431*	0.383*	0.283	0.453*
	倾向率/(10 a)	-0.027	0.024	0.018	0.029

注:*表示可通过信度99.9%的显著性检验。

别为每 10 a 上升 0.031、0.037、0.044 和 0.040。结合其空间分布及第一特征向量的贡献率可知,南海区域四个季节 SAT 和 SST 均呈变暖趋势, SAT 主体区(空间值按 6~7 计算)约为 0.2~0.3 °C/10a,与海南岛升温率接近^[27]。由于 SST 空间值略高于 SAT,所以可知南海 SST 变暖倾向较 SAT 更明显。从 EEOF 时间序列的趋势系数来看,各季趋势系数几乎都接近或超过 0.5,线性变化趋势显著,通过信度 99.9% 的显著性检验。

图 7 给出了南海区域各季 SAT 和 SST 的 EEOF 第一特征向量的时间系数 M-K 检验曲线图。从图中可看出,各季 EEOF1 时间系数变化均出现了突变现象,冬、春季突变出现在 1992/1993 年前后,夏季出现在 1986 年前后,秋季出现在 1980 年前后。可见南海区域 SAT 和 SST 夏季的突变现象与全球性

海温模态(ENSO 状态)的转变基本吻合^[28],秋季突变相对早,冬、春季突变则相对滞后。

4.2 潜热通量的时空特征

4.2.1 空间分布特征

对南海区域各季的潜热通量进行 EOF 分解,对应前两个特征向量的方差贡献率如表 3 所示,前两个特征向量累积方差贡献率均超过 51%,第一特征

表 3 南海区域各季潜热通量的 EOF 前两个特征向量的方差贡献率(单位:%)

	冬(1月)	春(4月)	夏(7月)	秋(10月)
EOF1	43.2	46.7	34.5	37.2
EOF2	17.7	9.7	17.2	24.2
EOF1+2	60.9	56.4	51.7	61.4

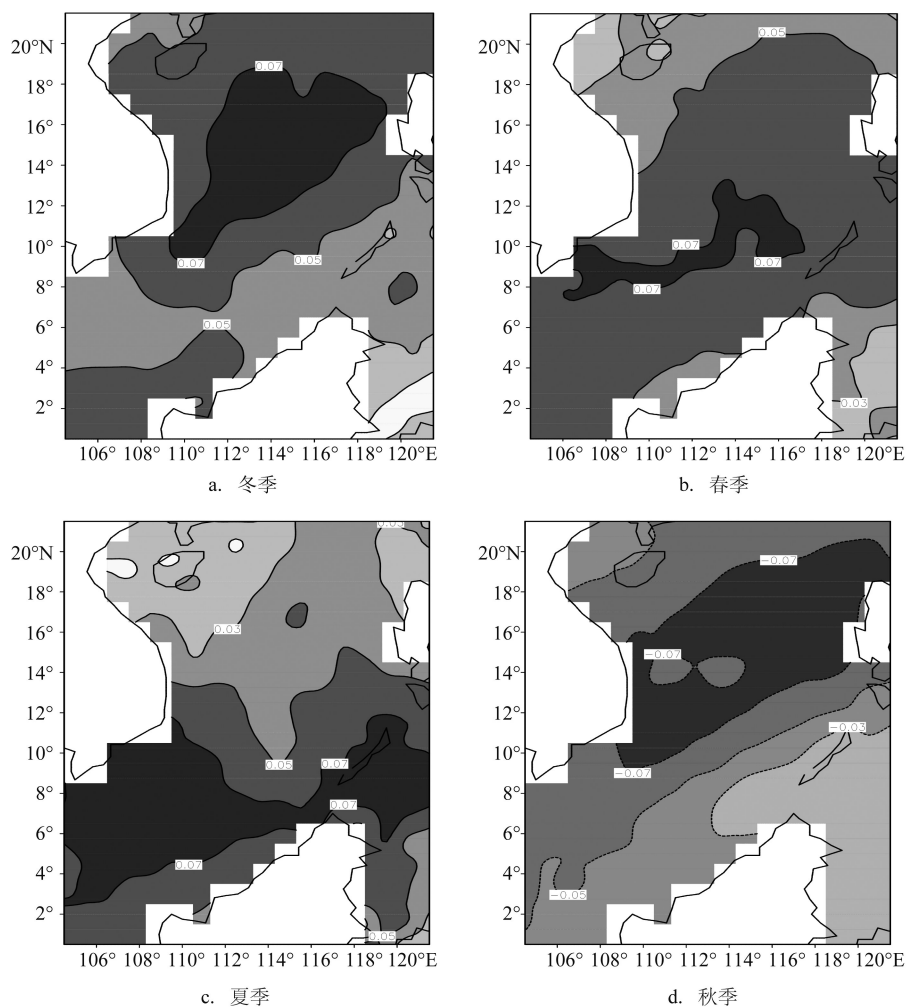


图 8 南海区域各季潜热通量 EOF 第一特征向量的空间分布

向量方差贡献率均大于34%,以下主要讨论第一特征向量的空间结构和时间变化特征。

图8给出了南海区域各季潜热通量第一特征向量的空间分布。从图中可看出,各季潜热通量的第一特征向量空间分布均表现为全区一致型。其中,冬季和秋季潜热通量的主体(等值线0.07围成的区域)主要位于南海海盆中央区,而春季和夏季则位于南海南部海区。

4.2.2 时间变化特征

从各季潜热通量的第一特征向量对应的时间系数来看(图略),各季潜热通量总体上随时间表现出先平缓下降而后缓慢增长的态势。图9给出了南海区域各季潜热通量EOF第一特征向量时间系数的M-K检验曲线。结合滑动t检验可得到,各季EOF1时间系数的演变均出现了突变现象,冬季突变最明显出现在1994年前后($t=-2.5$),春季最明显突变出现在2003年前后($t=-2.1$),夏季出现在1990年前后,秋季最明显突变出现在1985年前后($t=$

3.6)。可见,秋季突变现象要早于其他季节,春季则最晚,这与SAT和SST的突变现象相似。

5 结论与讨论

本文基于NCEP/NCAR逐月近表层气温、日本气象厅海表温度和美国OA Flux3热通量数据,利用EEOF、趋势分析、突变检验等统计方法,分析了南海区域热状况的气候变化特征,主要结论有:

(1)南海区域常年年均SST为26~29℃,东南高西北低,1月和2月最低,6月最高;常年年均SAT为23~28℃,深海区高近陆地或海洋性大陆低,1月最低,6月最高。二者在5—9月维持高值缓变状态,2—5月和10—次年1月分别为快速的增暖和降温过程;SST和SAT变率较小;

(2)南海区域各季SST和SAT呈全区一致型分布,秋、冬和春季的一致性更加明显;各季SST和SAT呈明显增暖趋势,SST较SAT更显著;各季存在

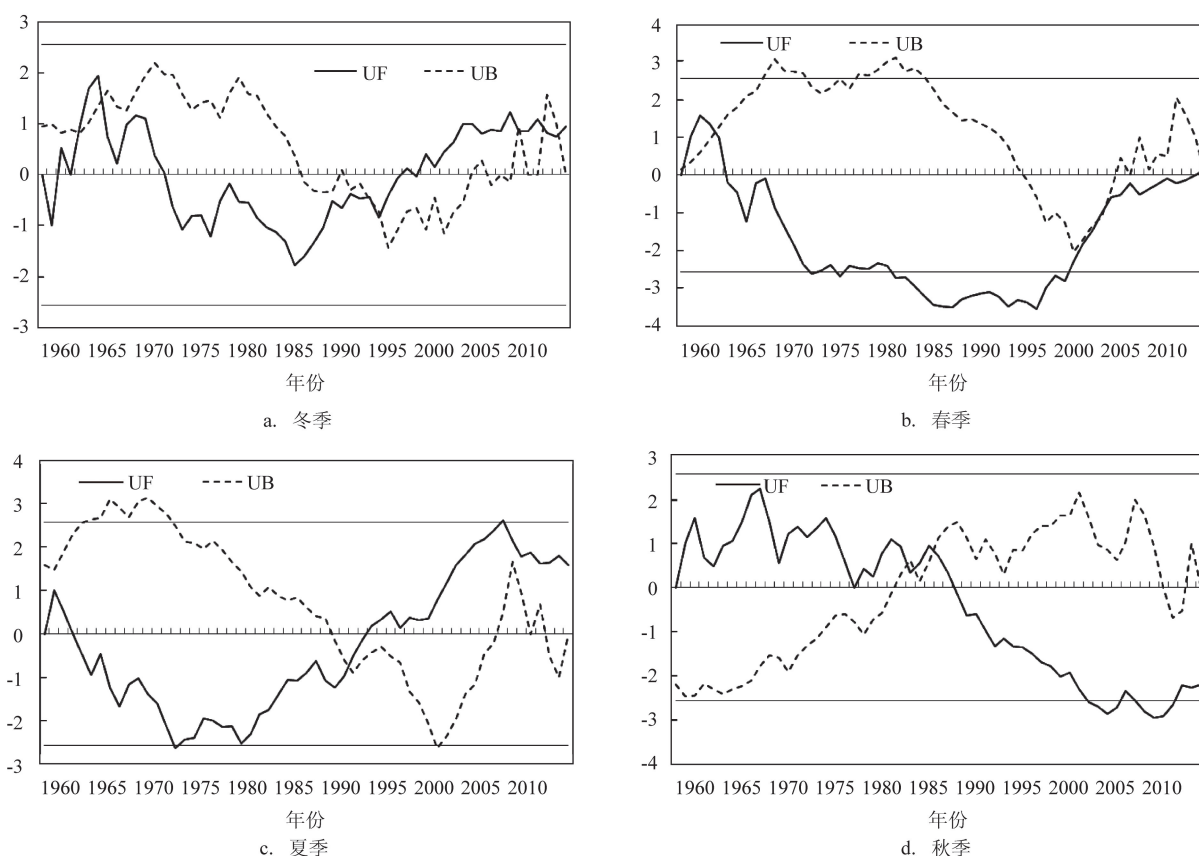


图9 南海区域潜热通量EOF1第一特征向量的时间系数M-K检验

明显的突变现象,其中秋季相对要早,冬、春季相对滞后;

(3)南海区域海气热通量以潜热通量为主,常年年均潜热通量约 $80 \sim 140 \text{ W/m}^2$,自南向北递增;具有明显的季节变化特征,4月最低,12月最高,12月至次年4月为快速下降过程,9—12月为缓慢上升过程;变率较大,具有显著的地域性;

(4)南海区域各季潜热通量呈全区一致型。其中,冬、秋季主体区位于海盆中央,春、夏季位于南部海区;各季潜热通量随时间先平缓下降而后缓慢增长;各季存在明显的突变现象,秋季突变早于其他季节,春季最晚,这与海表温度和近表面气温相似。

本文较为细致地分析了南海地区热状况的时空分布特征及长期演变趋势,但未对其年际变化、突变的原因进行研究,下一步有必要探讨其成因及影响机制,以进一步把握南海海气相互作用过程的特征、机理。

参考文献:

- [1] Qu T D, Du Y, Meyers G, et al. Connecting the tropical Pacific with Indian Ocean through South China Sea[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(24): L24609.
- [2] 谢安,毛江玉,叶谦.海温纬向梯度与南海夏季风爆发[M]//丁一汇,李崇银.南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用.北京:气象出版社,1999: 48-51.
- [3] 黄安宁,张耀存,黄丹青.南海海温异常影响南海夏季风的数值模拟研究[J]. *大气科学*, 2008, 32(3): 640-652.
- [4] 吴国雄,刘还珠.降水对热带海表温度异常的邻域响应I.数值模拟[J]. *大气科学*, 1995, 19(4): 422-434.
- [5] 谷德军,纪忠萍,王东晓,等.不同时间尺度上南海夏季风强度与海洋热力条件的关系[J]. *热带气象学报*, 2007, 23(1): 14-20.
- [6] 梁卫,温之平,李秀珍,等.南海夏季风爆发前后南海海温之演变特征[J]. *热带气象学报*, 2009, 25(S1): 85-91.
- [7] 丁一汇,李崇银.南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用[M].北京:气象出版社,1999.
- [8] 蒋迪,黄菲,郝光华,等.南海土台风生成及发展过程海气热通量交换特征[J]. *热带气象学报*, 2012, 28(6): 888-896.
- [9] 陈奇礼,李金平.热带西北太平洋热状况对热带气旋活动的影响[J]. *热带海洋*, 1992, 11(3): 89-93.
- [10] Wu L G, Wang B. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks[J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(8): 1686-1698.
- [11] 曹楚,彭加毅,余锦华.全球气候变暖背景下登陆我国台风特征的分析[J]. *南京气象学院学报*, 2006, 29(4): 455-461.
- [12] 蔡榕硕,张启龙,齐庆华.南海表层水温场的时空特征与长期变化趋势[J]. *台湾海峡*, 2009, 28(4): 559-568.
- [13] 李娟,左军成,李艳芳,等.南海海表温度的低频变化及影响因素[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(5): 575-582.
- [14] 邱婷,左军成,王鼎琦,等.南海海表温度气候变异及对局地台风的影响[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(1): 32-39.
- [15] 林锡贵.冬、夏季风转换期间南海南部海区的气象特征[J]. *广东气象*, 2003, (1): 10-12.
- [16] 戴彩悌,王学忠,李宏群.南海地区热通量的时空变化特征[J]. *气象科学*, 2007, 27(S1): 8-14.
- [17] 陈锦年,王宏娜,吕心艳.南海区域海气热通量的变化特征分析[J]. *水科学进展*, 2007, 18(1): 390-397.
- [18] 戴彩悌,张铭.南海地区潜热输送与长江流域夏季降水的关系[J]. *气象与减灾研究*, 2008, 31(2): 19-23.
- [19] 王丽娟,王辉,闫俊岳,等.南海海气界面潜热通量的分布特征及其对西南季风爆发影响的初步分析[J]. *海洋学报*, 2008, 30(1): 20-30.
- [20] 隋丹丹,谢强,王东晓.南海潜热交换年际与年代际变化的分析探讨[J]. *海洋学报*, 2012, 34(4): 27-34.
- [21] Yu L S, Jin X Z, Weller R A. Multidecade global flux datasets from the objectively analyzed air-sea fluxes (OAFlux) project: latent and sensible heat fluxes, ocean evaporation, and related surface meteorological variables[R]. Massachusetts: Woods Hole Oceanographic Institution, 2008.
- [22] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].2版.北京:气象出版社,2007: 125-142.
- [23] 杜华栋,李婧,叶志敏,等.赤道太平洋次表层海温距平的EEOF分析及与厄尔尼诺的关系[J]. *海洋预报*, 2006, 23(4): 21-27.
- [24] 李爱华,江志红.中国东部夏季雨带推进过程的年际、年代际变化[J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30(2): 186-193.
- [25] 宗海锋.两个典型ENSO季节演变模态及其与我国东部降水的联系[J]. *大气科学*, 2017, 41(6): 1264-1283.
- [26] 李志强,刘长华,杜健航,等.复经验正交函数方法对湛江南三岛海滩剖面季节变化动态特征研究[J]. *海洋工程*, 2012, 30(2): 79-86.
- [27] 张明洁,张京红,刘少军,等.海南岛1961~2011年气候变化特征分析[J]. *热带作物学报*, 2014, 35(12): 2488-2495.
- [28] 胡春迪.全球变化背景下厄尔尼诺的模式变异及其与东亚和北半球夏季气候异常的遥相关关系[D].南京:南京大学,2016.

Climatic change characteristics of thermal condition in the South China Sea

XING Cai-ying^{1,2}, ZHU Jing-jing^{1,2}, WU Sheng-an^{1,2}

(1. Hainan Climate Center, Haikou 570203 China; 2. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203 China)

Abstract: Based on NCEP/NCAR reanalysis surface air temperature(SAT) data, sea surface temperature(SST) data of Japan Meteorological Agency and heat flux data of OA Flux3, the climatic change characteristics of thermal condition in the South China Sea (SCS) are analyzed by using combined empirical orthogonal function (EEOF), trend analysis, mutation test and other statistical methods. The results are shown as follows. (1)The perennial average annual SST in the SCS is 26~29 °C, and is higher in the southeast while lower in the northwest. The perennial average annual SAT is 23~28 °C, and is higher in the abyssal region while lower near land or in the maritime continent. Both of them maintain a high value of gradual change from May to September, while there exists a rapid warming process from February to May and a rapid cooling process from October to January. Both of them have small variation rates. (2) The changes of SST and SAT in the SCS in each season show a good regional consistency. Both of them have significant warming trend in each season, and SST is warmer than SAT. There are obvious mutation characteristics in each season, autumn is relatively early, while winter and spring lag behind relatively. (3) The latent heat flux is the main heat flux in the SCS, the perennial annual latent heat flux is 80~140 W/m² increasing from south to north. There is a rapid descending process from December to April, while is a slow ascending process from September to December. The variation rate is bigger, and has significant regional feature. (4) The latent heat flux at each season in the SCS has a consistent distribution. All have shown first decreasing gently then increasing slowly, and also have obvious mutation characteristics.

Key words: the South China Sea; thermal condition; climatic change characteristics; EEOF