

中国南海低云量季节和年际变化时空特征分析

梁颖茹¹ 杨丽英² 龙景超^{3,4,5} 黎永杰⁶ 陈彩梅⁷

(1 广东省龙门县气象局, 龙门 516800; 2 广州市增城区气象局, 广州 511300;

3 广东海洋大学海洋与气象学院/南海海洋气象研究院, 湛江 524088;

4 广东省高等学校陆架及深远海气候、资源与环境重点实验室, 湛江 524088;

5 广东省近海海洋变化与灾害预警实验室, 湛江 524088; 6 东莞市应急局道滘分局, 东莞 523000;

7 台州市椒江区气象局, 台州 318000)

摘要: 利用国际卫星云气候计划 (ISCCP) 提供的D2云气候资料集、NCEP再分析资料、Nino3.4海温资料等分析探讨中国南海 (简称南海) 低云量的年平均、季节循环、年际变化的时空分布特征及可能原因。结果表明: 低云量年平均气候态呈东北—西南的带状分布, 大值区具有沿海陆交界处海岸线分布的特征; 从时间序列来看, 2001年以前的低云量指数波动幅度较大, 2001—2007年波动幅度变小; 南海低云量分布存在显著的季节差异, 这与南海夏、冬季风的爆发有关, 低云量夏季 (6—8月) 的年际变化最小, 冬季 (12月—次年2月) 的年际变化最大; 低云量季节变化存在2~5 a的振荡周期, 与ENSO循环周期相似, 二者存在一定的联系; 秋季低云量的年际变化与厄尔尼诺现象密切相关, 当厄尔尼诺发生时南海低云量增多。

关键词: 中国南海, 低云量, 标准差, 小波分析, 气候变化

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2025.01.008

Spatiotemporal Characteristics of Seasonal and Interannual Variations of Low Cloud Amount over the South China Sea

Liang Yingru¹, Yang Liying², Long Jingchao^{3,4,5}, Li Yongjie⁶, Chen Caimei⁷

(1 Longmen Meteorological Bureau of Guangdong Province, Longmen 516800;

2 Zengcheng Meteorological Bureau, Guangzhou 511300; 3 College of Ocean and Meteorology/South China Sea Institute

of Marine Meteorology (SIMM), Zhanjiang 524088; 4 Key Laboratory of Climate, Resources and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea of Department of Education of Guangdong Province, Zhanjiang 524088;

5 Laboratory for Coastal Ocean Variation and Disaster Prediction of Guangdong Province, Zhanjiang 524088; 6 Daojiao

Emergency Management Agency, Dongguan 523000; 7 Jiaojiang Meteorological Bureau, Taizhou 318000)

Abstract: By using the D2 cloud climate datasets from the International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP), NCEP reanalysis data and Nino3.4 SST data, we analyzed the spatiotemporal distribution characteristics and possible reasons of the annual average of the low cloud amount over the South China Sea (SCS), its seasonal circulation as well as its interannual variation. The results show that the annual average climatological state of low cloud amount exerts a northeast to southwest belt-like distribution. In particular, the high value area is located along the coastline of the land-sea boundary. From the perspective of time series, prior to 2001, the fluctuation range of low cloud amount index over the SCS was relatively large, while it went the opposite from 2001 to 2007. The distribution of low cloud amount over the SCS has remarkable seasonal feature, which is related to the onset of summer monsoon and winter monsoon over the SCS. The interannual variation of low cloud amount over the SCS is minimal in summer (June to August) and peaks in winter (December to February). On the interannual time scale, the oscillation

period of seasonal variation of low cloud amount over the SCS is 2 to 5 years, which coincides with the period of the ENSO cycle. This finding evidences the correlation between the two. In autumn, the interannual variation of low cloud amount over the SCS is closely related to the El Niño phenomenon. The occurrence of El Niño is accompanied with increased low cloud amount over the SCS.

Keywords: South China Sea, low cloud amount, standard deviation, wavelet analysis, climate change

收稿日期: 2023年3月2日; 修回日期: 2024年11月16日

第一作者: 梁颖茹 (1996—), Email: lyria_07@163.com

通信作者: 龙景超 (1987—), Email: longjc@gdou.edu.cn

资助信息: 国家自然科学基金项目 (41905006); 广东海洋大学大学生创新创业项目 (580520154); 广东海洋大学博士启动金 (R19018); 惠州市气象局科学技术研究项目 (2023M10); 广东省教育厅创新团队项目 (2023KCXTD015)

0 引言

中国南海(简称南海,SCS)位于23°37'N以南的低纬度地区,是一个东北—西南走向的半封闭海,东至菲律宾群岛,与西太平洋相连,西部为中南半岛及马来群岛,与东印度洋相通,南北纵跨纬度26°47',约2000 km,东西横跨约1000 km。南海海区位于热带和亚热带,云状以低云为主。冬季盛行东北季风,10月是冬季风爆发的月份,一直持续到第二年3月;夏季为西南季风期,6—8月南海北部云量线走向转为南北向,是最典型的夏季风盛行时的云量分布特征,其中6月为夏季风的爆发期。

云能够影响太阳辐射到达地球的多寡,因此,云在地球气候系统内部的能量平衡、水循环及海-气相互作用等方面发挥着至关重要的作用。研究表明全球云的变化可能控制着全球气候变化^[1]。云量作为辐射强迫和反馈因子,是全球气候研究的重要参数^[2]。因此,研究云量的时空变化等气候学特征,了解其变化的原因,对研究气候变化有重要意义。不同地区云量变化的气候学特征存在差异,不同类型的云在全球气候系统中所起的作用也不同^[3]。目前大量研究针对云量的不同高度、时间尺度变化及空间区域,探讨全球云量的分布特征。全球云量主要由海陆分布、地形和平均大气环流系统等共同决定,海陆差异显著,陆面以高云为主,洋面低云相对较多^[4]。低云通过反射短波辐射和长波辐射对地-气系统起到冷却作用,因此可作为判断区域气候变化的标示物之一^[3]。国内已有不少针对低云量(Low Cloud Amount, LCA)的研究,如西北地区、西南地区、青藏高原地区低云量的变化等^[5-12],而对海洋云量的研究较少。张亚洲^[13]发现南海地区总云量的时间及空间变化均具有显著的季节变化特征;章名立^[14]研究了西太平洋云量变化与中国东部降水的关系。然而,关于南海地区低云量的季节及年际变化时空特征的研究却相对较少。

文中利用国际卫星云气候计划(ISCCP)提供的D2云气候数据,对南海地区1984—2007年低云量的季节及年际变化的特征进行分析;此外,还利用英国哈德莱中心逐月海温资料(HadISST)及NCEP再分析资料^[15],进一步探讨Nino3.4指数、海平面气压及位势高度等与低云量变化的关系,以期为南海地区的气候研究提供参考。

1 资料与方法

本研究所使用的ISCCP月平均云气候数据集时间段为1984—2007年,分辨率为2.5°×2.5°。研究方法主要有差异分析(距平、标准差)、相关分析、小波分

析等。采用相关分析法进行Nino3.4指数、海表气压、位势高度与低云量的关系分析;利用Morlet小波分析法分析低云量指数的年际变化及不同季节的年际变化特征;显著性检验用 t 检验。

由于被动遥感仪器测量低云量时很容易被中云量及高云量混淆,因此所得的低云量数据并非十分准确,需要通过算法去除中、高云与低云重叠的影响,参考Mansbach等^[16]的研究,本研究用以下公式对低云量进行修正:

$$L' = L / (1 - M - H), \quad (1)$$

式中, L' 为修正后的低云量; L 为修正前的低云量; M 为中云量; H 为高云量。

对修正后的低云量进行距平处理,使用距平值可直观了解变量相对平均值的偏离幅度,便于进一步分析比较,本研究使用距平值减去趋势值,得出南海地区的低云量指数。

2 南海低云量时空变化特征

2.1 年平均变化

2.1.1 年平均低云量空间分布及标准差场

通过距平处理,去除低云受高云及中云的干扰,得到低云量的气候态分布(图1a)。结果显示,海洋上的低云量远大于陆地,这说明低云量与下垫面的性质密切相关。南海低云量总体上分布较均匀,呈东北—西南的带状分布。南海低云量大致在30%~55%,且海陆交界处的梯度较大,其大值区具有沿海陆交界处海岸线分布的特征,在东北部及西南部存在两个高值中心,达45%~55%,表明在巴士海峡及吕宋海峡之间常年存在黑潮路径弯曲、扩展,主体以顺时针旋转的形式西折进入南海北部^[18];南海中部区域的低云量分布较均匀,为40%左右。从标准差空间分布(图1b)来看,标准差大值区主要集中在南海中部东侧靠近菲律宾海域的上空,最大值为3.3%左右,表明南海区域低云量的年际变化主要集中在这个区域。

2.1.2 年平均低云量时间序列及其小波分析

从低云量指数时间序列(图2)来看,总体呈波动变化,其中2001年以前的波动幅度较大,2001—2007年波动幅度较小;1993年是正指数最大值,为2.4,1998年指数为-1.8,是负指数的最大值。

年平均低云量指数变化的小波分析结果(图3)反映了南海地区低云量的时频域变化特征。可见,南海年平均低云量3~4 a的周期变化是最显著的,主要体现在1992—1997年,变化周期具有较明显的局域性;而2003—2005年通过检验的部分存在2~3 a的周期。

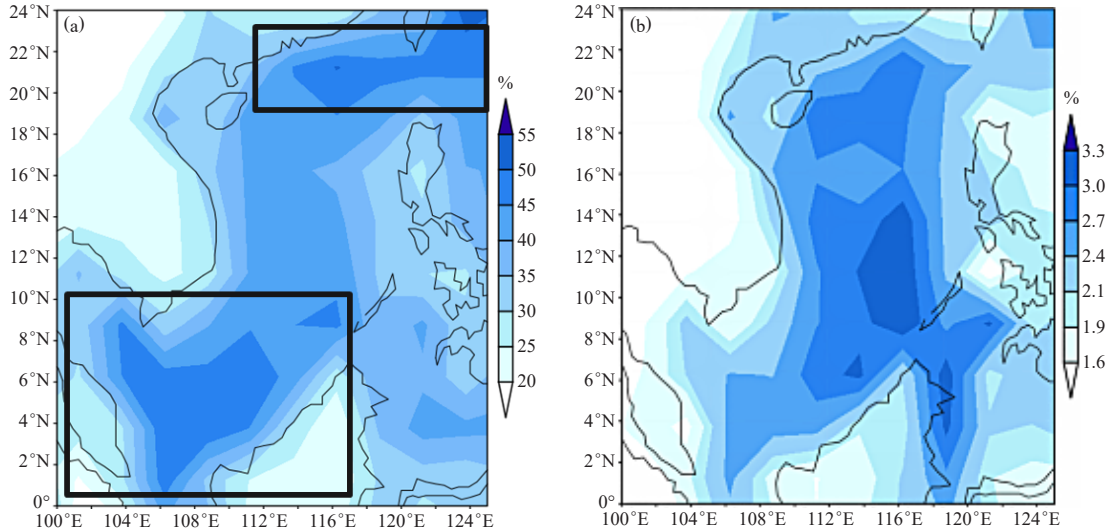


图1 1984—2007年南海平均低云量的气候态(a)和标准差(b)空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the climatological state (a) and standard deviation (b) of the average low cloud amount over the SCS from 1984 to 2007

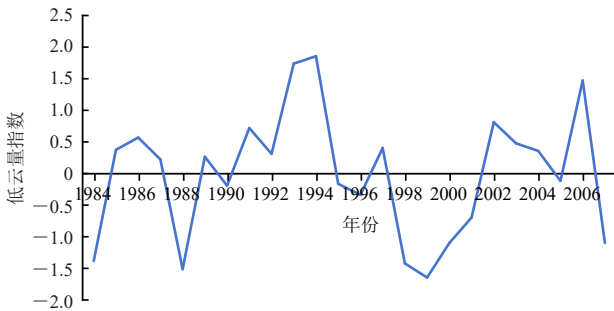


图2 1984—2007年南海年平均低云量指数变化

Fig. 2 Annual average low cloud amount index over the SCS from 1984 to 2007

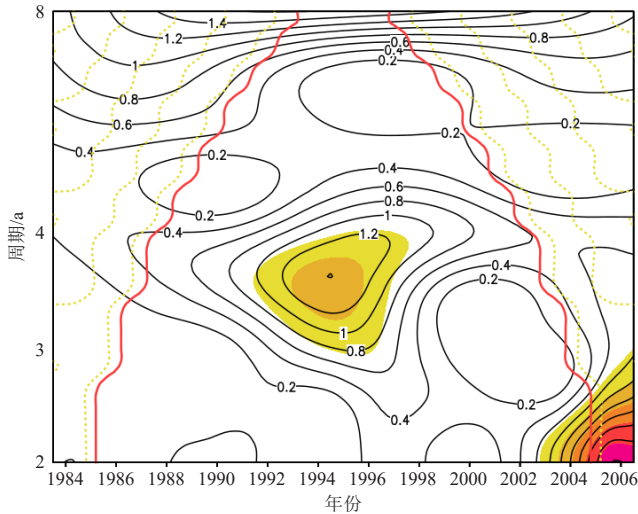


图3 1984—2007年南海年平均低云量指数时间序列的小波分析(红色线间区域通过95%置信度的红噪声检验)
Fig. 3 Wavelet analysis of the time series of annual average low cloud amount index over the SCS from 1984 to 2007 (the area within the red line: the region passing the red noise test at 95% confidence level)

2.2 季节循环特征

2.2.1 季节平均低云量空间分布

南海地区低云量水平分布和垂直结构呈现显著的季节变化和空间差异^[17]。图4显示不同季节低云量分布形态各不相同,大致呈东北—西南带状型及南北型。其中,冬季及春季为南北型,且南海北部及南部均存在一个高值中心。冬季,高值中心最大值可达55%,此时两个高值中心的位置相较于春季明显南压,对应了太阳辐射的季节变化。这两个季节南海中部靠近菲律宾吕宋岛的区域低云量均较低,只有30%左右,此时华南沿海海岸线处具有显著的云量梯度变化,表明此处低云量经向变化较大,体现了低云量在海陆交界处的空间不连续特征,这与冬季冷空气活动密切相关^[13]。夏季及秋季为东北—西南向的带状分布,大值分布在南海北部及南海中部靠近菲律宾吕宋岛的海域。南海北部的高值区可能与西南季风在夏季及秋季发展旺盛有关,而西太平洋的热带气旋往往经过吕宋岛进入南海,且吕宋岛西部的海域频生热带扰动,因此夏季这部分海域的低云量比其他季节要多。但总体上,夏季低云量分布更均匀,极大值较其他季节偏小。

刘秦玉等^[18]通过对南海北部的水文资料和海表温度资料等进行分析,指出由于吕宋海峡常年存在的黑潮流入南海北部,导致南海北部的海水温度明显升高;张亚洲^[13]指出,暖水有利于促进低云的生成。结合本研究结果进行分析,在冬季南海北部的暖海水与区域外的低温形成较强的温度梯度,促进低云的形成,因此,南海北部的低云范围扩大,云量也增多;

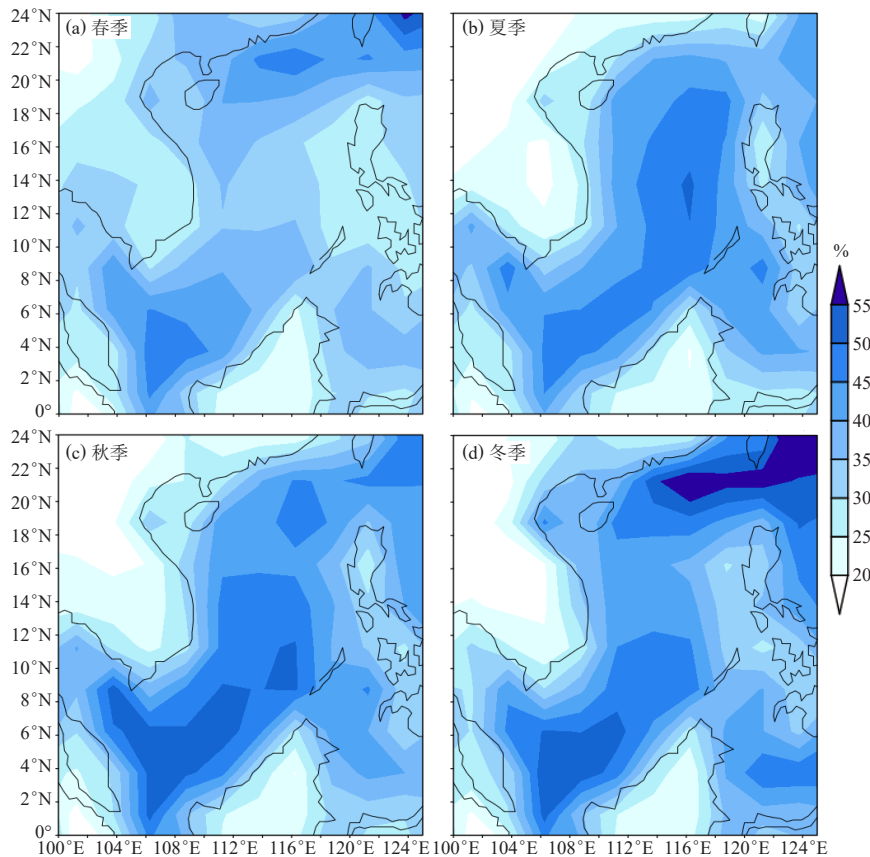


图4 1984—2007年南海低云量的季节平均空间分布场

Fig. 4 Spatial distribution of seasonal average low cloud amount over the SCS from 1984 to 2007

而在夏季，受西南暖湿季风的影响，南海地区的整体海水温度偏高，因此温度梯度变小，低云量减少，但是由于整片海域海水表面温度均升高，因此大值范围比春季要广。

2.2.2 季节平均低云量标准差场

从1984—2007年各个季节的标准差场来看(图5)，春季南海中部偏东靠近菲律宾的海域存在标准差大值区，最大值为6.0%左右，说明春季这部分海域低云量的离散程度较高，变化较大；夏季，南海低云量的标准差自北向南逐渐变小，说明夏季南海低云量的变化随纬度的降低而减小，南海低云量的变化主要集中在南海北部，中心最大值只有3.3%；秋季，标准差呈东北—西南带状分布，在菲律宾吕宋岛西北侧的海域存在一个范围较小的高值中心，大约为3.3%；冬季与秋季一样呈东北—西南带状分布，但标准差要比秋季大得多，为6.0%，尤其是在南海西南部海域存在范围较大的标准差大值区。可见，冬季南海低云量最不稳定，春季次之，秋季最稳定。

2.2.3 区域平均低云量和标准差的季节循环

为进一步研究南海地区低云量的季节循环特征，

对区域内所有格点的低云量求月平均，从而绘制出低云量指数月变化曲线(图6)。由图6可见，南海低云量指数12月最大，大约为7.2；3月及11月的指数次之，分别为6.5及6.6；6月为负指数的最大值，数值达到-8.5。12月一次年1月及3—6月低云量指数呈减小趋势，而6—12月低云量指数总体呈增大趋势。这说明南海低云量季节转换分别出现在6月和12月，而南海夏季风和冬季风的爆发分别在5月和11月^[3]，可见，南海低云量的季节转换比南海季风爆发的月份均滞后了1个月左右，因此，南海低云量的季节变化与南海夏、冬季风的爆发有关。

分析南海地区低云量指数标准差的季节循环(图7)，可见12月低云量指数的标准差最大，超过2.8；7月最低，只有1.1，而6月则为1.4。12月一次年7月低云量指数标准差呈减小趋势，7—12月呈增大趋势。对比发现，南海低云量指数及其标准差的季节转换主要发生在夏季及冬季，说明夏季(6—8月)的低云量年际变化较小，而冬季(12月一次年2月)年际变化较大。

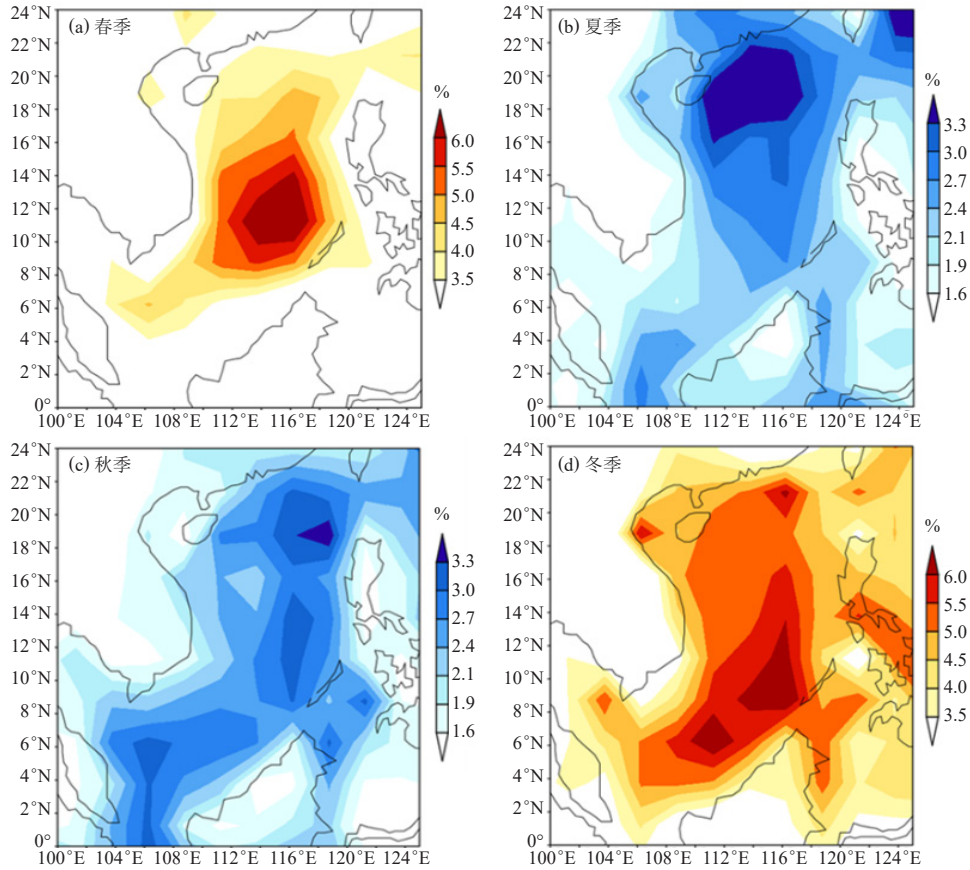


图5 1984—2007年南海低云量标准差空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of standard deviation of low cloud amount over the SCS from 1984 to 2007

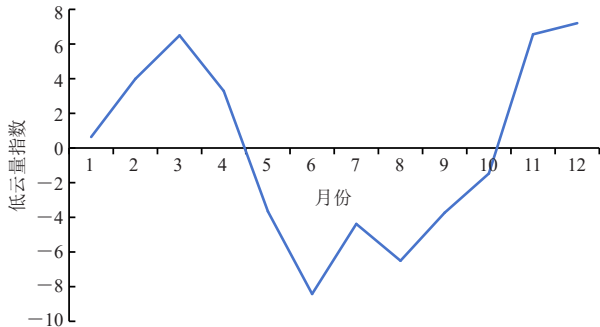


图6 1984—2007年南海区域平均低云量指数月变化
Fig. 6 Monthly variation of regional average low cloud amount index over the SCS from 1984 to 2007

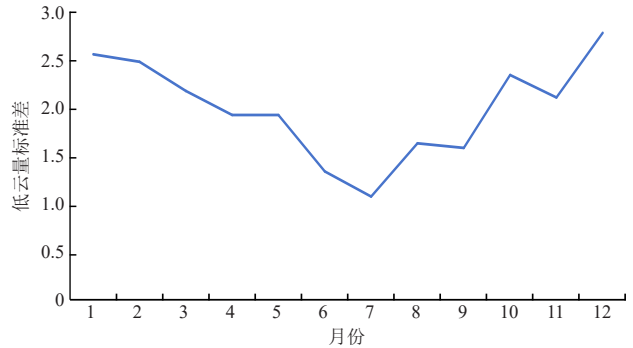


图7 1984—2007年南海区域平均低云量标准差月变化
Fig. 7 Monthly variation of standard deviation of regional average low cloud amount over the SCS from 1984 to 2007

2.3 季节平均低云量的年际变化特征

2.3.1 各季节南海低云量的年际变化特征

分析各季节南海低云量指数的年际变化(图8),结果显示,春季,1993年的低云量指数最大,为3.0,1999年最小,为-2.8;夏季,2006年最高,为1.5,负指数的最大值出现在1984年,为-2.4;秋季,1997年最大,为2.5,1988年最小,为-3.0;冬季,1993年出现正指数的极大值,为3.5,1998年出现负指数的极大值,为-3.2。整体来看,春、冬季的波动幅度大,

夏、秋季的波动幅度小。

2.3.2 低云量指数时间序列小波分析

为进一步探究各季节南海低云量的年际变化特征,对四个季节的时间序列分别进行小波分析(图9),结果表明,春季低云量指数存在2~4 a的周期变化,在1987—1994年能量最强,特征最显著;夏季通过95%置信度检验的时间周期非常少,2~3 a的周期模值相对较大,2003—2005年周期变化较显著;秋季3~4 a的周期在1988—1997年表现较为明显;冬季在

1993—2002年存在3~5 a的周期。

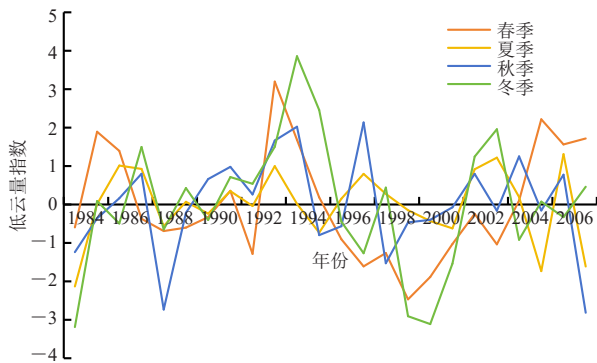


图8 1984—2007年各季南海低云量指数年际变化
Fig. 8 Interannual variation of seasonal low cloud amount index over the SCS from 1984 to 2007

已有研究表明,我国云量年际振荡的主要特征与ENSO接近^[19],与ENSO存在一定关系。从周期变化特征可见,南海低云量季节变化主要以2~5 a为振荡周期,而ENSO的循环周期一般为2~7 a^[20],二者比较接近,说明南海低云量季节变化与ENSO循环存在联系。

3 相关分析

3.1 与Nino3.4指数的相关分析

有研究指出,低云量的变化与下垫面的性质密切相关^[13],对Nino3.4指数和修正后的低云量进行相关关系分析,获得两者相关系数的空间分布(图10)。对比四个季节的相关关系发现,南海地区春季、夏季、冬季的低云量指数与Nino3.4指数的相关不明显,说明春季、夏季、冬季低云量的年际变化与厄尔尼诺不存在明显关联。而秋季的信号非常强(图10c),说明低云量指数与厄尔尼诺的相关较显著,当厄尔尼诺事件发生时,南海低云量异常增多。为进一步研究厄尔尼诺与南海低云量变化的关系,接下来主要对秋季的海平面气压、位势高度及风场与低云量指数进行相关分析。

3.2 秋季低云量与海平面气压的相关分析

根据秋季低云量与海平面气压的相关系数空间分布(图11),发现在赤道地区太平洋东部大范围区域与低云量为负相关,1000 hPa风场呈辐散状态;而在中

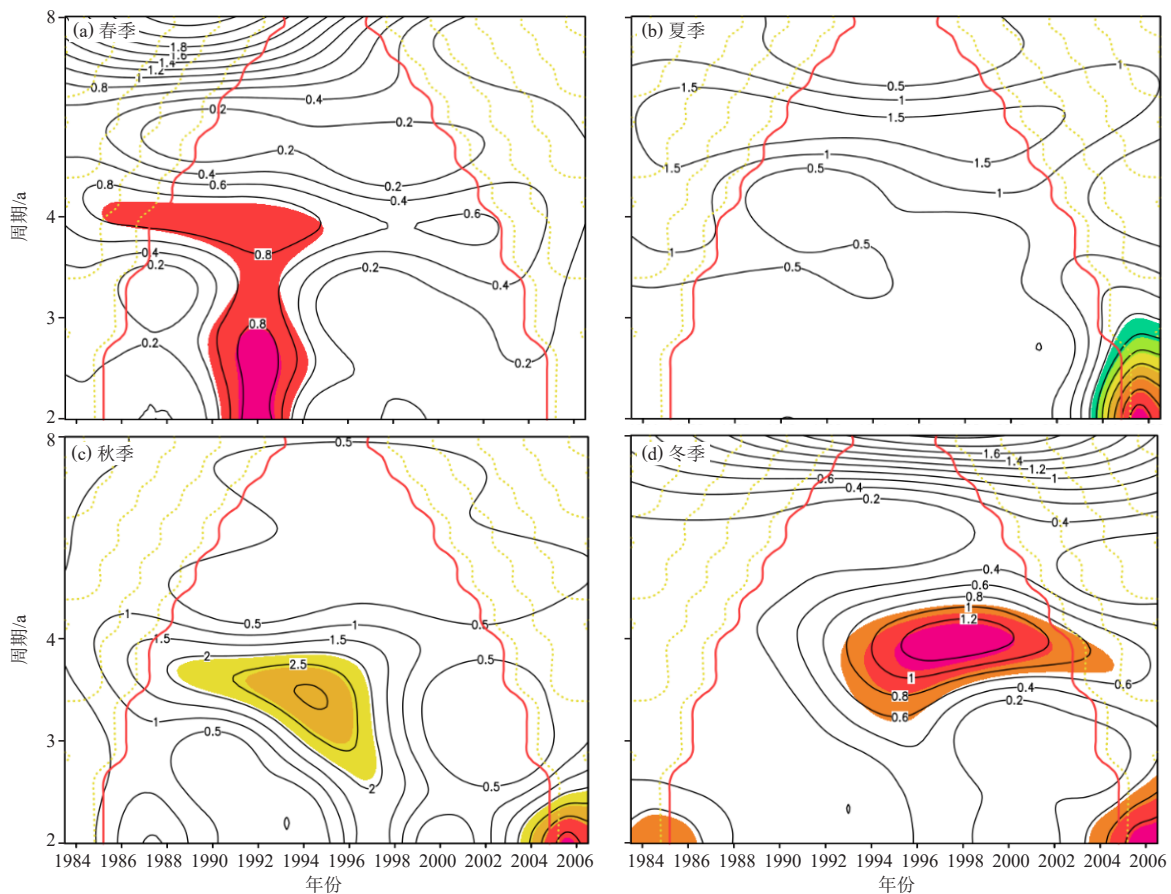


图9 1984—2007年各季南海低云量指数时间序列小波分析(红色线间区域通过95%置信度的红噪声检验)
Fig. 9 Wavelet Analysis of the time series of seasonal low cloud amount index over the SCS from 1984 to 2007 (the area within the red line: the region passing the red noise test at 95% confidence level)

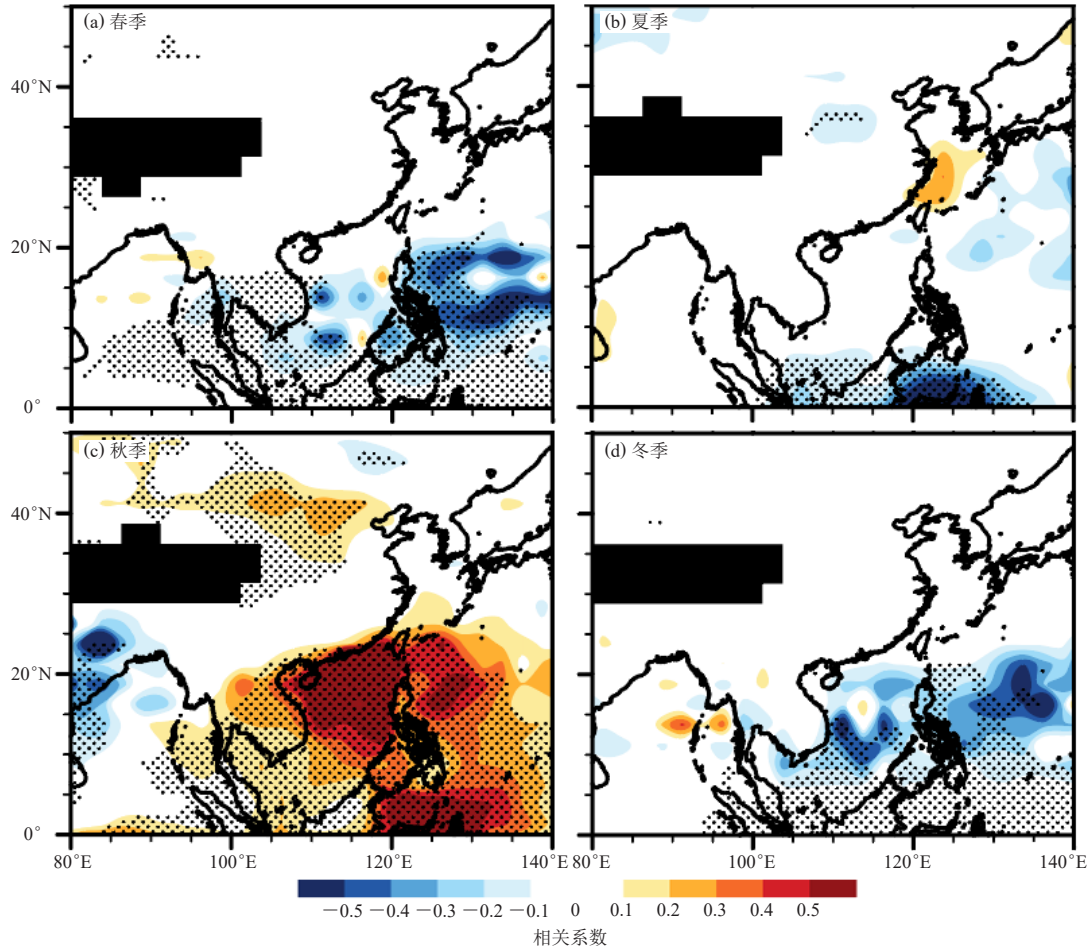


图10 1984—2007年各季南海低云量指数与Nino3.4指数的相关系数分布 (阴影区通过0.05的显著性水平检验)
Fig. 10 Correlation between seasonal low cloud amount index over the SCS and Nino3.4 index from 1984 to 2007 (the shaded area: the region passing the significance level test of 0.05)

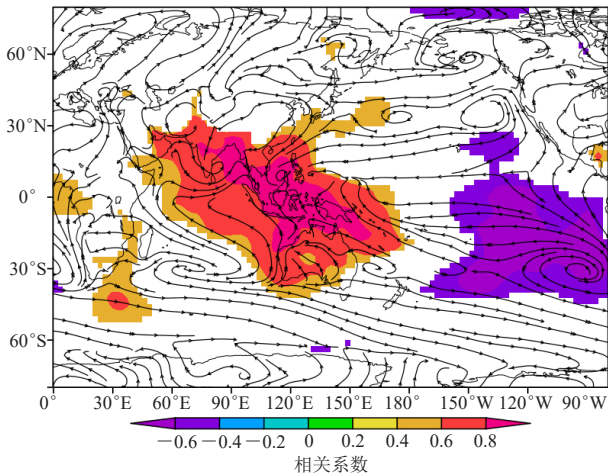


图11 1984—2007年秋季南海低云量与海表气压相关系数 (阴影区通过0.05的显著水平检验) 和1000 hPa风场 (带箭头流线)
Fig. 11 Correlation between autumn low cloud amount index over the SCS with mean sea level pressure (MSLP) (the shaded area: the region passing the significance level test of 0.05) and 1000 hPa wind field (streamlines with arrows) from 1984 to 2007

太平洋西部包括南海地区,乃至东北印度洋区域,二者则为明显的正相关,相关系数最大达到0.8,风场是辐合的。这种相态相关对应厄尔尼诺发生期间,东南太平洋气压下降,印度尼西亚和澳大利亚的气压明显升高,赤道太平洋东部与印度洋东部的海平面气压呈明显的反位相变化。可见,厄尔尼诺发生,南海低云量呈增多态势。

3.3 秋季低云量与位势高度的相关关系

图12分别是秋季低云量与700 hPa、500 hPa位势高度及风场的相关系数,其中阴影部分为与位势高度通过显著性检验的区域,流线则为风场的分布。结合发现,无论是在700 hPa或是500 hPa高度上,赤道太平洋至赤道印度洋的海域上空,低云量与位势高度均为正相关,在赤道太平洋的两侧则相反。这是因为当厄尔尼诺发生时,赤道太平洋表层暖水向东部回流,导致东太平洋海面升高,从而使南海低云增多。

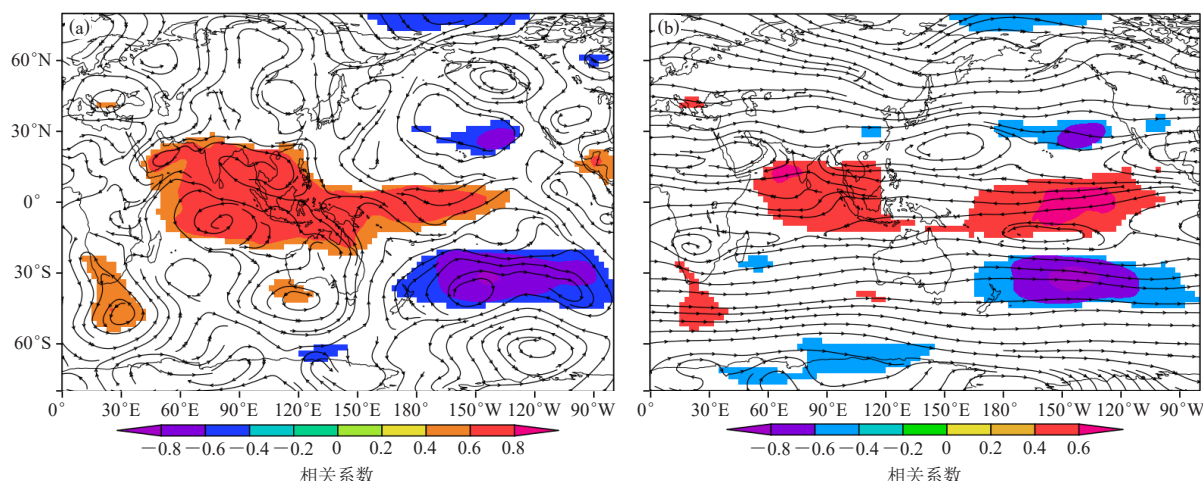


图12 1984—2007年秋季南海低云量与700 hPa (a) 和500 hPa (b) 位势高度的相关系数 (阴影区通过0.05的显著性水平检验) 及其风场 (带箭头流线)

Fig. 12 Correlation between autumn low cloud amount index over the SCS with 700 hPa (a) and 500 hPa (b) geopotential height (the shaded area: the region passing the significance level test of 0.05) and their wind field (streamlines with arrows) from 1984 to 2007

4 小结

利用国际卫星云气候计划 (ISCCP) 提供的D2气候数据, 研究中国南海地区1984—2007年低云量的季节及年际变化特征, 探讨了南海低云量变化与厄尔尼诺的关系, 主要得到如下结论: 低云量年平均气候态呈东北—西南的带状分布, 大值区具有沿海陆交界处海岸线分布的特征; 南海地区低云量分布存在显著的季节差异, 这与南海地区夏、冬季风的爆发有关, 低云量夏季 (6—8月) 的年际变化最小, 冬季 (12月—次年2月) 年际变化最大; 低云量季节变化存在2~5 a的振荡周期, 与ENSO循环周期存在一定的联系; 秋季南海低云量的年际变化与厄尔尼诺密切相关, 当厄尔尼诺发生时南海低云量增多。

云在气候变化中的作用是一个相对复杂的过程, 不仅受地形、大气环流的影响, 而且还受其他气候因子的影响, 且观测资料有限, 因此, 对其认识还不够, 今后需展开更多相关研究; 另外, 在全球持续变暖的背景下, 厄尔尼诺事件趋于增强, 其对大气、云量等的影响仍有待进一步更细致更深入的研究。

参考文献

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] 高蓉, 陈少勇, 董安祥. 青藏高原低云量的年际变化及其稳定性[J]. 干旱区研究, 2007, 24(6): 760-765.
- [3] 张亚洲, 邓文彬, 梅华, 等. 南海地区总云量的气候特征研究[J]. 气象科技, 2011, 39(5): 569-574.
- [4] 丁守国, 赵春生, 石广玉, 等. 近20年全球总云量变化趋势分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(5): 670-677.
- [5] 牛晓瑞, 王淑瑜. 华北地区低云量的变化特征及其影响因子分析[J]. 高原气象, 2012, 31(5): 1340-1347.
- [6] 刘引鸽, 王宁练, 武小波, 等. 1951—2009年中国低云量的时空特征及其影响因素[J]. 高原气象, 2013, 32(6): 1608-1616.
- [7] 王旻燕, 王伯民. ISCCP产品和我国地面观测总云量差异[J]. 应用气象学报, 2009, 20(4): 411-418.
- [8] 曾昭美, 章名立. 本世纪海洋云量变化与全球变暖问题[J]. 大气科学, 1996, 20(2): 149-158.
- [9] 徐兴奎. 中国区域总云量和低云量分布变化[J]. 气象, 2012, 38(1): 90-95.
- [10] 王亚敏, 冯起, 李宗省. 1960—2005年西北地区低云量的时空变化及成因分析[J]. 地理科学, 2014, 34(5): 635-640.
- [11] 段皎, 刘煜. 近20年中国地区云量变化趋势[J]. 气象科技, 2011, 39(3): 280-288.
- [12] 王帅辉, 韩志刚, 姚志刚. 基于CloudSat和ISCCP资料的中国及周边地区云量分布的对比分析[J]. 大气科学, 2010, 34(4): 767-779.
- [13] 张亚洲. 南海及周边地区云量分布及低云量与南海海温的关系[J]. 气象科学, 2012, 32(3): 260-268.
- [14] 章名立. 西太平洋云量变化与中国东部的降水[J]. 大气科学, 1993, 17(5): 576-583.
- [15] 刘奇, 傅云飞, 冯沙. 基于ISCCP观测的云量全球分布及其在NCEP再分析场中的指示[J]. 气象学报, 2010, 68(5): 689-704.
- [16] Mansbach D K, Norris J R. Low-level cloud variability over the equatorial cold tongue in observations and models[J]. Journal of Climate, 2007, 20(8): 1555-1570.
- [17] 龙景超, 冯梓雅, 王云. 南海低层季风环流对低云时空分布的影响[J]. 海洋湖沼通报, 2021, 43(4): 23-30.
- [18] 刘秦玉, 刘伟腾, 郑世培, 等. 黑潮在吕宋海峡的变形及动力机制[J]. 青岛海洋大学学报, 1996, 26(4): 413-420.
- [19] 曾昭美, 严中伟. 近40年中国云量变化的分析[J]. 大气科学, 1993, 17(6): 688-696.
- [20] 许武成, 马劲松, 王文. 关于ENSO事件及其对中国气候影响研究的综述[J]. 气象科学, 2005, 25(2): 212-220.

(编辑: 郑秋红)