

符传博, 丹利, 冯锦明, 等. 2019. 1960~2012 年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系 [J]. 大气科学, 43 (1): 87–98. Fu Chuanbo, Dan Li, Feng Jinming, et al. 2019. Temporal and spatial variations of total cloud amount and their possible relationships with temperature and water vapor over China during 1960 to 2012 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (1): 87–98, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17235.

1960~2012 年中国地区总云量时空变化及其与气温和水汽的关系

符传博^{1,2} 丹利¹ 冯锦明¹ 彭静¹ 营娜³

¹ 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

² 海南省气象台, 海口 570203

³ 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘 要 基于我国地区 543 个地面气象台站观测的总云量、平均气温和相对湿度日均值资料, 采用正交经验函数 (EOF)、气候倾向率和线性趋势分析等方法, 研究了 1960~2012 年总云量的时空变化特征及其与气温和水汽的关系。结果表明: (1) 我国地区总云量呈南多北少的带状分布特征, 最大值在四川盆地 (82%)。近 53 年来总云量气候倾向率为 -0.8% ($10a$)⁻¹, 趋势系数为 -0.68 , 通过了 99.9% 的信度检验。(2) 总云量季节变化特点明显, 夏季最多, 春秋季节次之, 冬季最少, 其中春季、夏季和秋季有显著的下降趋势。(3) EOF 分解的前两个模态表明总云量不仅具有一致减少的变化特征, 还具有明显的区域差异。以此同时, 平均气温和相对湿度不论在总体变化趋势、地区差异、还是时间演变上, 均与总云量保持较高的一致性, 进一步证明总云量的变化与气温和水汽有密切关系。

关键词 总云量 平均气温 相对湿度 影响因子

文章编号 1006-9895(2019)01-0087-12

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17235

Temporal and Spatial Variations of Total Cloud Amount and Their Possible Relationships with Temperature and Water Vapor over China during 1960 to 2012

FU Chuanbo^{1,2}, DAN Li², FENG Jinming¹, PENG Jing¹, and YING Na³

¹ Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203

³ State Key Laboratory of Earth Surface Process and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract This study investigates temporal and spatial variations of total cloud cover (TCC) in China during 1960 to 2012 and further analyzes their relationships with temperature and relative humidity based on the dataset of observations from 543 surface meteorological stations in China. Basic statistical methods, including the empirical orthogonal function (EOF) and climate tendency and linear trend analysis, are used here. It is found that TCC is higher in South China than in

收稿日期 2017-09-14; **网络预出版日期** 2018-01-26

作者简介 符传博, 男, 1985 年出生, 硕士, 高级工程师, 主要从事大气环境与气候模拟、环境气象等方面研究。E-mail: hnfcuanbo@163.com

通讯作者 丹利, E-mail: danli@tea.ac.cn

基金项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0602501, 国家自然科学基金项目 41630532、41575093

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0602501), National Natural Science Foundation of China (Grants 41630532, 41575093)

North China with the maximum value occurring in Sichuan Basin (82%). The climate tendency of TCC in China is $-0.8\%(10a)^{-1}$ in the recent 53 years and the trend coefficient is -0.68 . The variation of the TCC in China demonstrates remarkable seasonal change, which is the largest in the summer and smallest in the winter. It exhibits a clear declining trend in all seasons except the winter. In addition, the first two dominant EOF modes of TCC display a uniform declining variation and apparent regional differences. Meanwhile, variations of temperature and relative humidity are consistent with the variations of TCC with respect to the trend, regional differences and temporal evolution, implying a close relationship between the variations of TCC and these two variables.

Keywords Total cloud amount, Average temperature, Relative humidity, Impact factor

1 引言

云不仅是气候变化的重要因子之一,也是连接辐射平衡、水循环等方面的关键物理过程(Wild et al., 2014)。它一方面调节地气系统的辐射能量平衡,另一方面对热量交换、水汽循环起重要作用(钱永甫和黄媛媛, 1994; 牛晓瑞等, 2012)。云作为全球气候系统的主要参数之一,其变化在较大程度上能对全球气候产生影响。反之,全球气候的变化也会引起云的宏观参数和微物理特性的调整变化。因此,全面了解云的分布与变化,对评估云在气候变化中的作用就显得尤为重要。

近几十年来国内外学者主要利用地面观测云量资料和卫星遥感资料,从云量观测(Evan et al., 2007; 戴进等, 2011)、变化趋势(Maugeri et al., 2001; 彭杰等, 2013)、云光学厚度(Hong et al., 2007; 杨冰韵, 2013)、气溶胶影响(Forster et al., 2007; Li et al., 2011; 石睿等, 2015)等方面做了大量研究,不同程度上反映了气候变化特点。Sun and Groisman (2004)研究了美国地区 1949 年至 2001 年低云量的变化特征,发现其表现为先增加,后减少的变化趋势。Dai et al. (2006)发现近 30 年美国总云量呈增加的趋势。安宁和王开存(2013)利用卫星资料研究了近 10 年全球总云量的变化,发现全球总云量呈略增加的趋势,但陆地和海洋上空却有相反的变化,即陆地有所减少,海洋上空增加。刘瑞霞等(2004)分析 ISCCP 资料发现我国总云量有明显的区域差异,表现为南方多于北方,东部多于西部。徐奎奎(2012)的研究则认为近 50 年来我国地区总云量处于下降趋势。段皎(2011)对 ISCCP 资料和 MODIS 资料进行了分析,结果表明中国大部分地区云的光学厚度呈增加趋势。吴润和刘佳(2011)利用 ISCCP 资料研究了近 20 年东亚地区不同高度云量的变化,表明总云量与高、低云量呈减少趋势,而中云量则有增加的趋势。

关于我国总云量的长期变化基本上都得到一致的结果,即我国地区总云量呈现明显的下降趋势。而总云量的下降主要与气候变暖所引起的大气环流条件(包括水汽、温度、降水、风场以及层结条件)变化有关(石睿等, 2015)。此外,大气气溶胶、臭氧以及气旋活动等也会对总云量的变化造成影响(张雪芹等, 2007)。然而针对我国地区长时间序列的总云量变化的研究还较为鲜见,大部分工作主要集中在某个特定区域的时空分布特征进行分析,因此需要进一步关注我国总云量变化与全球变暖、水汽含量变化之间的关系。本文采用经验正交函数(EOF)分析、趋势系数、回归分析等方法对 1960~2012 年中国地区总云量的时空变化及其与气温、相对湿度等气象因子的关系进行诊断分析,以期更好地认识云在气候变化中的影响,了解气温和水汽对云的反馈机制。

2 资料与方法

2.1 资料

本文中所利用的资料是由国家气象信息中心整编的 756 个国家基准站日平均地面观测资料,时间年限为 1960~2012 年,要素有总云量、平均气温和相对湿度等,该套数据是我国最为完整的地面气象观测数据,同时通过了国家气象中心气象资料室的质量控制。在站点数据的挑选中,为了避免缺测资料引起的误差,本研究采用了较为严格的标准:53 年中每一年的缺测值不超过该年资料的 5%;同时兼顾到由于迁站会导致数据的非均一性问题,本文最后选取出来的站点共有 543 个,站点地理位置分布见图 1 所示。

2.2 研究方法

2.2.1 经验正交函数分解(EOF)

EOF 分解是一种将物理量场正交分解为空间场和时间系数乘积的方法,主要应用于分析矩阵数据中的结构特点,尤其是分析主要特征量的特征

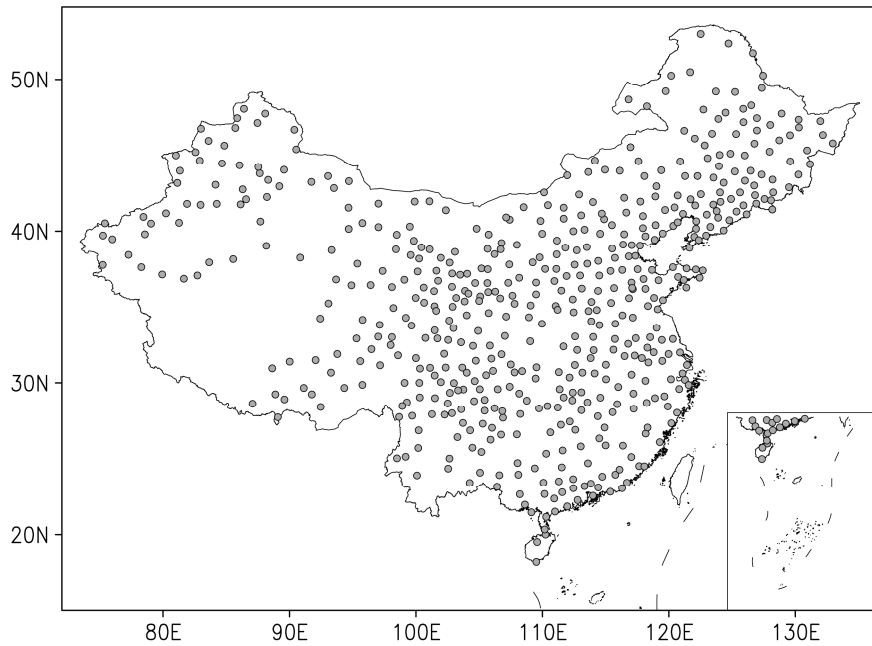


图 1 中国地区 543 个气象观测站点分布

Fig. 1 Geographic distribution of the 543 weather stations in China

(周国华等, 2012), 其公式如下:

$$S(x, y, t) = \sum V_n(x, y) T_n(t). \quad (1)$$

式中, $S(x, y, t)$ 为 $M \times N$ 的矩阵, 代表待分解的物理量场, M 为空间点的个数, N 是时间点的个数; $V_n(x, y)$ 为 $M \times N$ 阶空间函数矩阵, 描述了第 N 个模态的空间分布特征; $T_n(t)$ 为 $M \times N$ 阶时间函数矩阵, 描述了给定模态的时间变化规律, 也称为主分量。

2.2.2 气候倾向率

气候倾向率采用公式 (2) 进行计算。其中 y 表示样本数为 n 的某一物理量, x 表示 y 所对应的时间样本个数, x 与 y 之间的一元线性回归方程如公式 (2) 所示:

$$y_i = a + bx_i, (i = 1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

式中, a 为回归常数, b 为回归系数。当 $b > 0$ 时说明 y 值随时间 x 增加而增加; 反之, $b < 0$ 时说明 y 值随时间 x 增加而减小。 b 值即可表示上升或下降的倾向度 (魏凤英, 2007), 其显著性可以通过 t 检验进行判断。

2.2.3 气候趋势系数

气候倾向率带有量纲, 可直观地反映某一物理量趋势增(减)量的变化速率, 但不能反映其增(减)相对的幅度。本研究根据前人的研究方法 (施能等, 1995, 2003), 计算了气候趋势系数 r_{xt} 。该趋势系

数定义为样本数为 n 的物理量序列与自然数列 1, 2, ..., n 的相关系数, 如公式 (3) 所示:

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}}, \quad (3)$$

其中, n 为样本个数, x_i 是第 i 个样本值, $\bar{x}$ 为其样本均值, $\bar{t} = (n+1)/2$ 。从中可知, r_{xt} 值为正 (负) 时, 表示该物理量在 n 个样本内有增 (降) 的趋势。

$r_{xt} \sqrt{n-2} / \sqrt{1-r_{xt}^2}$ 符合自由度 $n-2$ 的 t 分布。

3 结果与讨论

3.1 总云量的时空分布

图 2 为近 53 年平均的我国总云量空间分布。从图中可以看出总云量呈南方多、北方少的带状分布特征, 这与我国地区的气候环境有很大的相关关系 (刘引鸽和王宁练, 2014)。北方地区气候相对于南方要干旱, 年平均雨量少, 水汽供应少, 导致云量也少; 而南方地区主要受季风气候影响, 特别是夏季, 降水量多, 水汽供应充足, 云量自然也多。在我国西南的四川、云南和贵州, 华南、江南等地是总云量的高值区, 以四川盆地为中心的年平均总云量最多高达 82%。总云量高值中心的形成主要与高原东侧的动力作用和西南季风的水汽供应充足

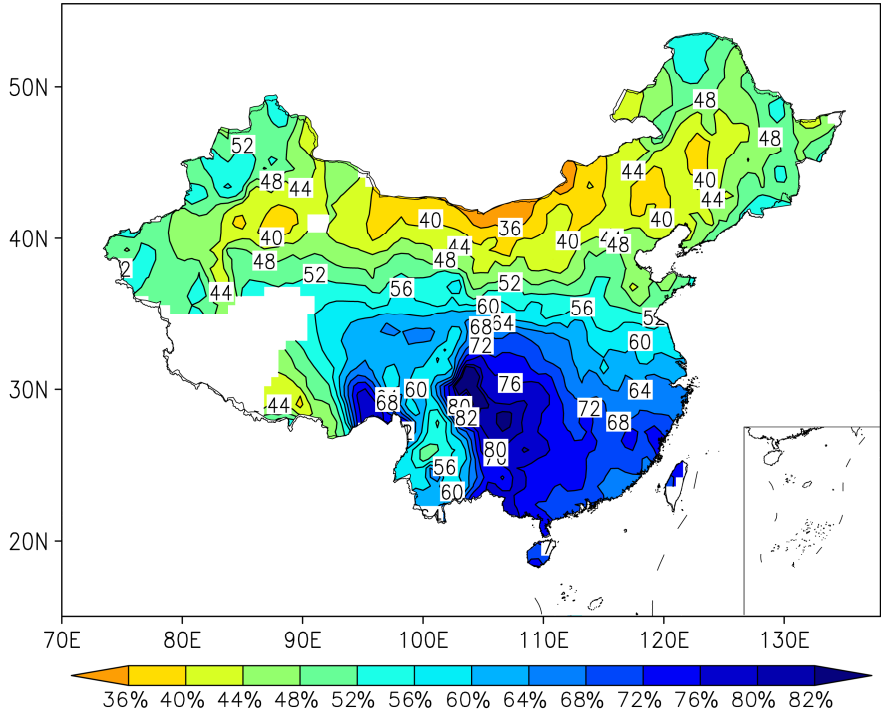


图2 1960~2012年平均的中国地区总云量空间分布
Fig. 2 Distribution of annually mean total cloud cover over China during 1960 to 2012

有关。云量最少区域位于新疆南部、内蒙古中东部等地，这些地区主要是沙漠和戈壁等较为干旱的区域，不利于云的形成。

图3分别给出了1960~2012年全国年平均总云量的气候趋势系数的变化趋势空间分布和年际变化。从图3a中可以看到，在过去53年中总云量主要表现为下降的变化趋势，特别是在东北地区南部、华北南部、华中和华东地区、四川盆地等地，其趋势系数超过了-0.6，下降十分显著。只有在华北地区、西北地区和华南局部个别站点表现为上升趋势，大部分站点都没有通过显著性检验。从全国平均的总云量年际变化(图3b)上也可以看出，总云量在近53年主要呈波动式的下降趋势，但是在不同时段变化趋势不同。20世纪60年代总云量平均为58.52%，70年代上升至58.89%，表现为略上升的趋势；而随后的三个十年均呈快速的下降趋势，其中2000~2009年平均仅为55.6%，总云量下降了3.29%。总体而言，近53年我国地区总云量下降显著(表1)，其气候倾向率为 $-0.8\% (10a)^{-1}$ ，趋势系数为-0.68，通过了99.9%的信度检验，总云量的这种变化与全球气候变化背景息息相关(徐兴奎，2012)。

表1 我国地区总云量的年平均和四季变化趋势
Table 1 Annual and seasonal variation trends of total cloud cover over China

	平均值	均方差	气候倾向率/(10a) ⁻¹	气候趋势系数	信度检验
年平均	57.29	1.82	-0.80%	-0.68	99.9%
春季	62.36	2.79	-1.21%	-0.67	99.9%
夏季	66.02	2.27	-0.76%	-0.52	99.9%
秋季	51.93	2.98	-1.07%	-0.56	99.9%
冬季	48.76	3.59	-0.21%	-0.09	不显著

3.2 总云量的四季变化趋势

图4是我国1960~2012年各个季节平均的总云量空间分布。从中可以看出，夏季是总云量最多的季节，春秋季次之，冬季最少。从空间范围上看，春夏季总云量超过50%的范围较广，而秋冬季范围相对较小。这与我国季风的气候特点存在明显的相关性。夏季是我国夏季风最强盛的时期，从热带海洋地区输送过来的暖湿空气充足，加上夏季气温较高，蒸发量大，从而形成了夏季总云量偏多时期；冬季我国主要受冬季风影响，从北方南下的干冷空气影响我国大部分地区，加上气温较低，蒸发量少，成为云量形成最少时段。因此，总体而言，夏季总云量相对较多，而冬季则偏少。春季，总云量呈明显的南多北少的分布特点，其中超过60%的地区主

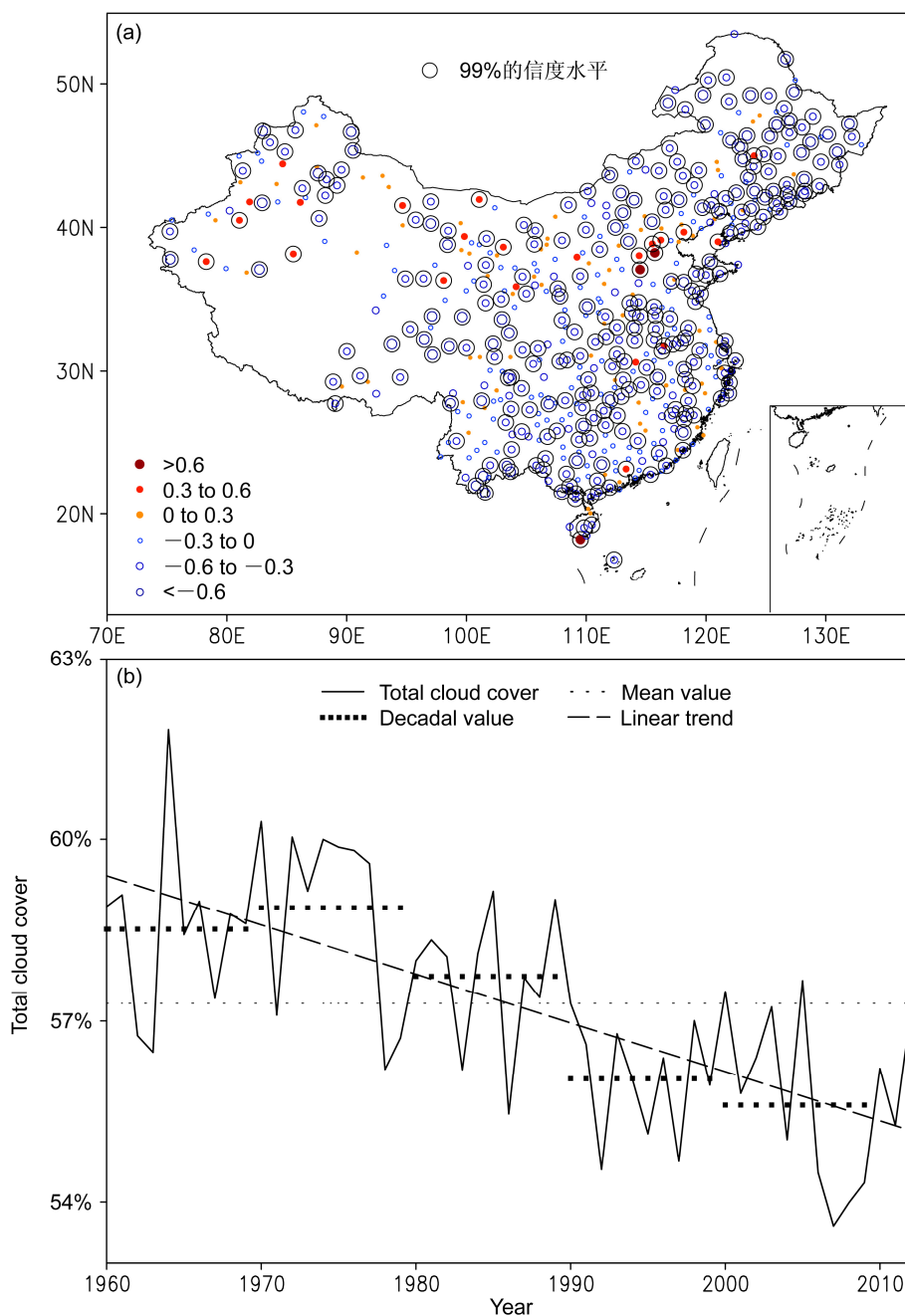


图3 1960~2012 年中国地区总云量 (a) 气候趋势系数空间分布 (圆圈表示通过 99% 信度检验) 及其 (b) 年际变化,

Fig. 3 (a) Spatial distribution of the climate trend coefficient of total cloud cover (circles indicate passed 99% confidence test) and (b) its annual variation over China during 1960 to 2012

要在 37°N 以南, 除了西藏和云南以外的大部分地区, 其中最大值出现在两广地区北部、四川盆地和青藏高原东部地区, 超过了 80%。而内蒙古东部、华北北部等地总云量最少, 在 45% 以下。夏季我国大部分地区总云量有明显的增多趋势, 其中东北地区、华北等地超过 55% 以上, 而云南、西藏东部等地总云量较春季有显著的增加, 最大值超过 85%。

秋冬季总云量空间分布较为相似, 以 35°N 为分界线, 南多北少。北方最小值出现在内蒙古中东部和青藏高原东部, 冬季在 30% 以下, 南方最大值均出现在四川盆地。秋季云南地区总云量分布还比较大, 到了冬季降至 35% 以下。

图 5 给出了 4 个季节我国地区总云量的年际变化趋势。从图中可以看出, 除了冬季以外, 其他三

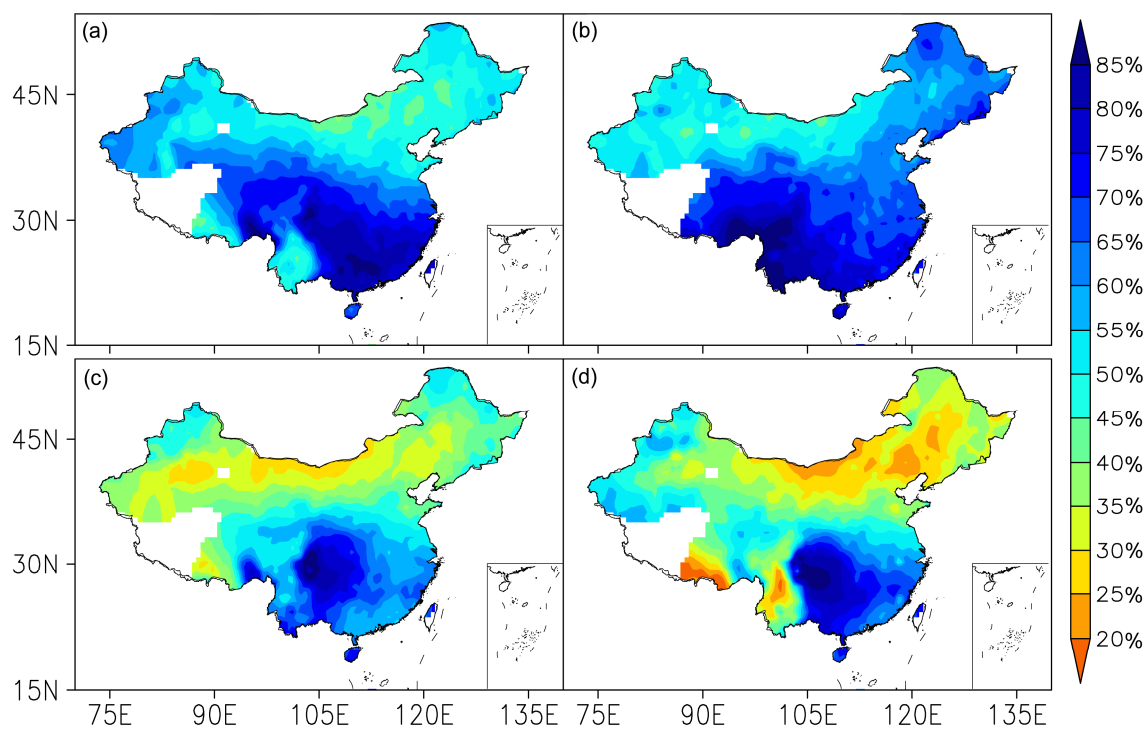


图4 1960~2012年中国地区四季总云量季节平均分布: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

Fig. 4 Seasonal distributions of total cloud cover over China in the (a) spring, (b) summer, (c) fall, and (d) winter averaged over 1960–2012

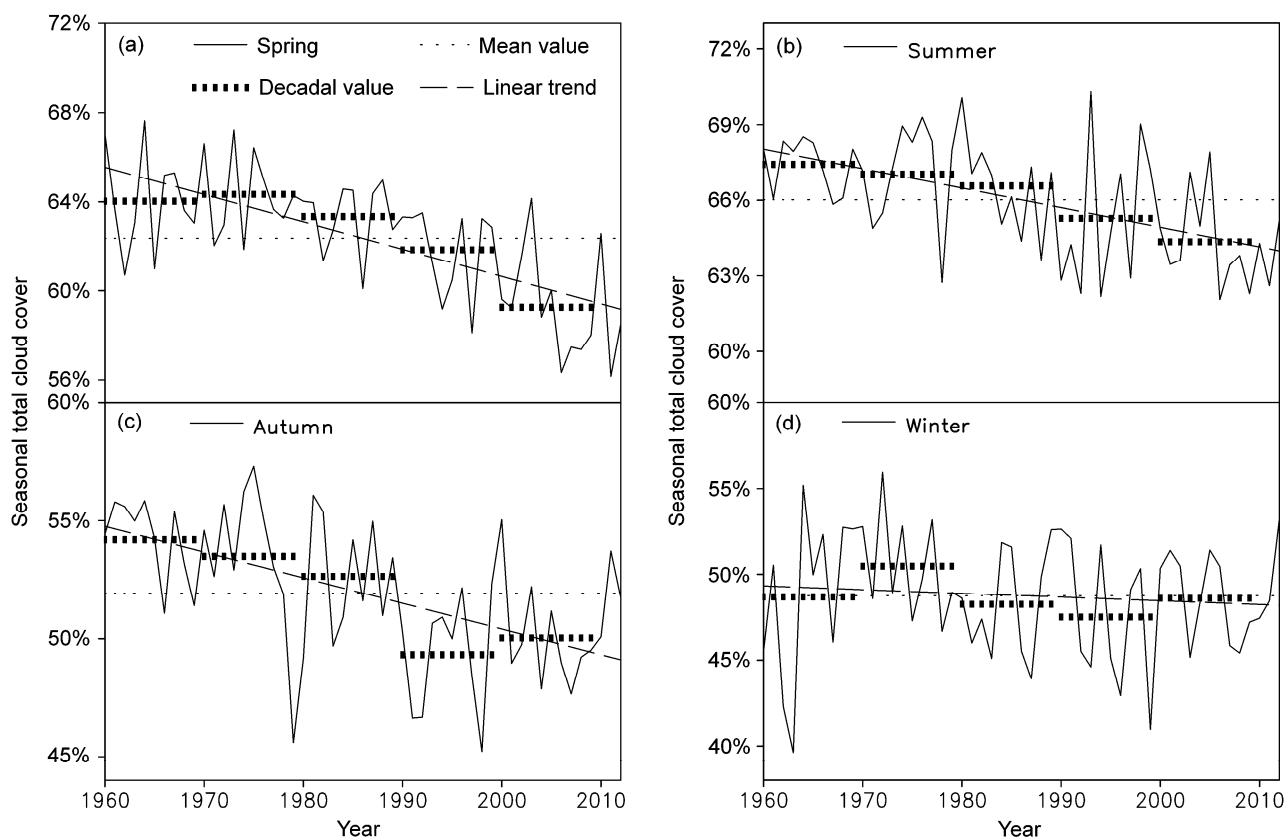


图5 1960~2012年中国地区平均四季总云量年际变化

Fig. 5 Annual variations in seasonal total cloud cover over China during 1960–2012

季近 54 年呈显著的下降趋势, 其气候倾向率分别为 $-1.21\%(10a)^{-1}$ (春季)、 $-0.76\%(10a)^{-1}$ (夏季) 和 $-1.07\%(10a)^{-1}$ (秋季), 气候趋势系数分别为 -0.67 , -0.52 和 -0.56 , 均超过了 99.9% 的信性检验。冬季总云量的气候倾向率和气候趋势系数分别为 $-0.21\%(10a)^{-1}$ 和 -0.09 , 下降趋势并不显著。

3.3 总云量距平场的 EOF 分析

对我国地区 543 个站点从 1960~2012 年总云量进行 EOF 分解, 在 EOF 分解前对数据进行了标准化处理。EOF 的前两个模态和对应的主成份 (PCs) 分别占总方差贡献的 30.265% 和 13.946% (表 2), 且均通过显著性 North's 检验 (Norrh et al., 1982)。EOF 第一模态 (EOF1) 和第二模态 (EOF2) 的空间分布以及对应的主成份 (PC1, PC2) 如图 6 所示。第一主分量体现了我国地区总云量变化的长期趋势, 并且第一模态 (EOF1) 在整个中国地区几乎均为正值, 结合第一主分量 (PC1, 图 6c) 可知, 1990 年之前, 总云量为偏多时期; 1990 年之后, 总云量开始减少, 除了和华北和西北的个别地区

外, 我国大部分地区均呈现一致的减少趋势, 这与前面的分析基本一致。第二模态 (EOF2) 以 $35^{\circ}N$ 为界, 南方为负值, 北方为正值, 结合对应的主分量 (PC2, 图 6d) 可知, 1980 年之前和 2002 年之后, 我国北方地区总云量以偏多为主, 而南方以偏少为主; 而在 1980~2002 年期间, 则刚好相反, 北方地区总云量偏少, 南方偏多。第二主分量体现了我国总云量变化的震荡性, 第二模态则表明了总云量变化的不均匀性, 具有明显的地区差异。

表 2 中国地区年平均总云量前 3 个 EOF 特征向量方差贡献
Table 2 Percentage contributions of the first three EOF eigenvectors to the variance of the total cloud cover over China

	前 3 个 EOF 特征向量方差贡献		
	1	2	3
个别方差	26.181%	14.166%	10.451%
累积方差	26.181%	40.348%	50.799%

3.4 总云量变化与气温和水汽的关系

云的形成过程主要为大气中的水汽通过凝结

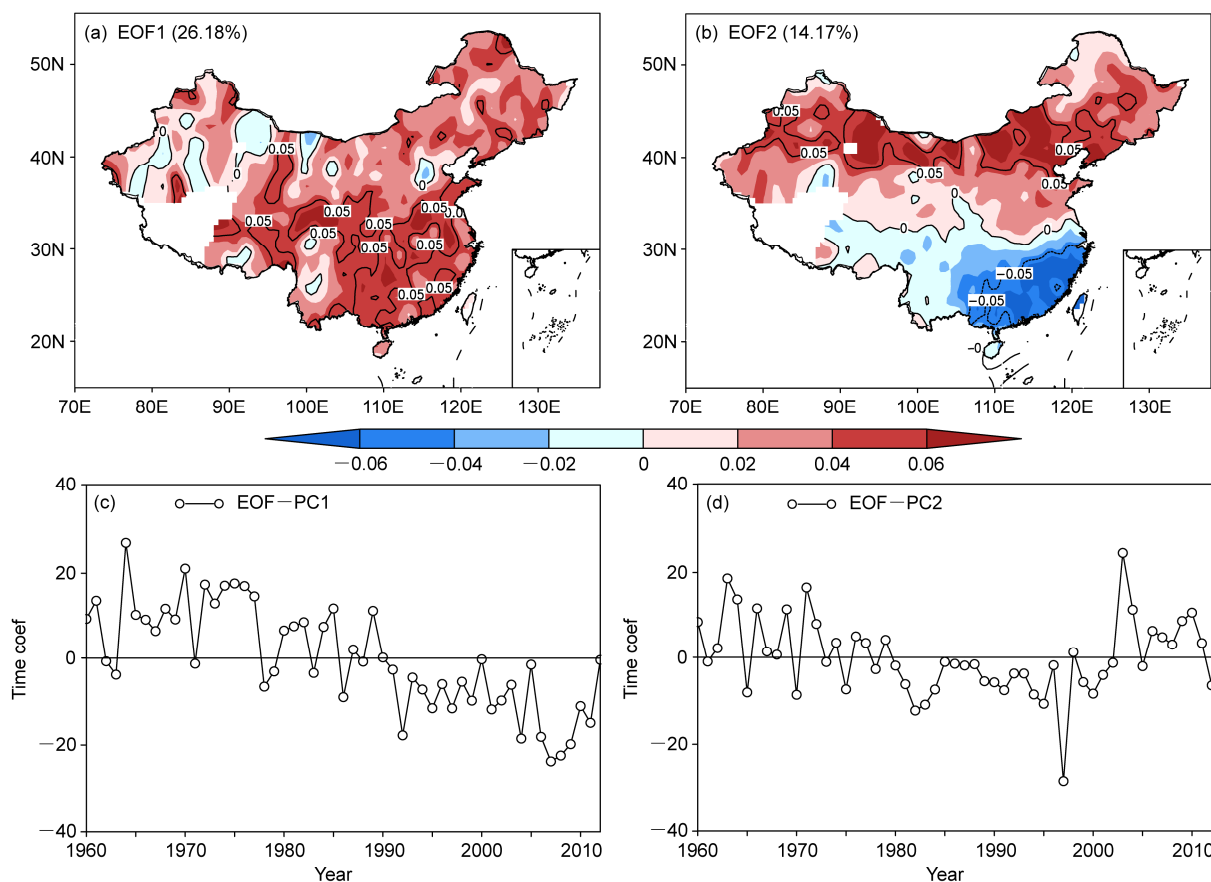


图 6 总云量 (TCC) EOF 分解的 (a) 第一、(b) 第二模态; 总云量 EOF 分解的 (c) 第一、(d) 第二主分量 (时间系数)

Fig. 6 (a, b) The first two leading EOF modes of TCC (EOF1 and EOF2); (c, d) time coefficients of PC1 and PC2 corresponding to EOF1 and EOF2, respectively

或凝华而成。根据 Clausius-Clapeyron 方程可知, 大气的饱和水汽压随着变暖增加大约 $7\% \text{ K}^{-1}$ (郭玲等, 2011) 左右, 而饱和水汽压增加则会导致低层相对湿度的显著减少, 因此可知在全球变暖的气候背景下, 我国地区总云量的变化与气温和相对湿度有着密切的联系。已有的研究对总云量减少的原因分析较少, 缺乏统一定论以及全面的解释, 本小节将就温度和相对湿度对我国地区总云量的影响机制进行探讨, 进一步验证温度和水汽对总云量变化的贡献。

3.4.1 总云量变化与气温和相对湿度的相关性

在全球气候变暖的气候背景下, 我国大部分地区气温也呈现显著的上升趋势, 同时伴随着相对湿度降低的过程。本研究进一步计算我国地区 543 个站点平均的气温气候倾向率为 $0.239 \text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{a})^{-1}$, 相对湿度气候倾向率为 $-0.409\% (10\text{a})^{-1}$, 趋势系数分别为 0.746 和 -0.528 , 均通过了 99.9% 的信度检验。

从平均气温和总云量的相关系数空间分布 (图 7a) 中可以发现, 总云量与平均气温呈现较好的负相关关系, 除了我国西部、华北的局部地区外, 大部分地区相关系数都通过了 95% 的信度检验。同时从标准化的时间序列上 (图 7b) 也可以发现总云量和平均气温有很好的负相关性, 其相关系数为 -0.671 , 通过了 99.9% 的信度检验。而从相对湿度和总云量的相关系数空间分布上看 (图 7c), 总云量与相对湿度呈现较好的正相关关系, 除了我国西部、华北的局部地区外, 大部分地区相关系数都通过了 95% 的信度检验。从相对湿度标准化的时间序列上 (图 7d) 也可以发现总云量和相对湿度有很好的正相关关系, 其相关系数为 0.648, 通过了 99.9% 的信度检验。

3.4.2 平均气温和相对湿度的 EOF 分析

对 1960~2012 年平均气温进行 EOF 分解, 对

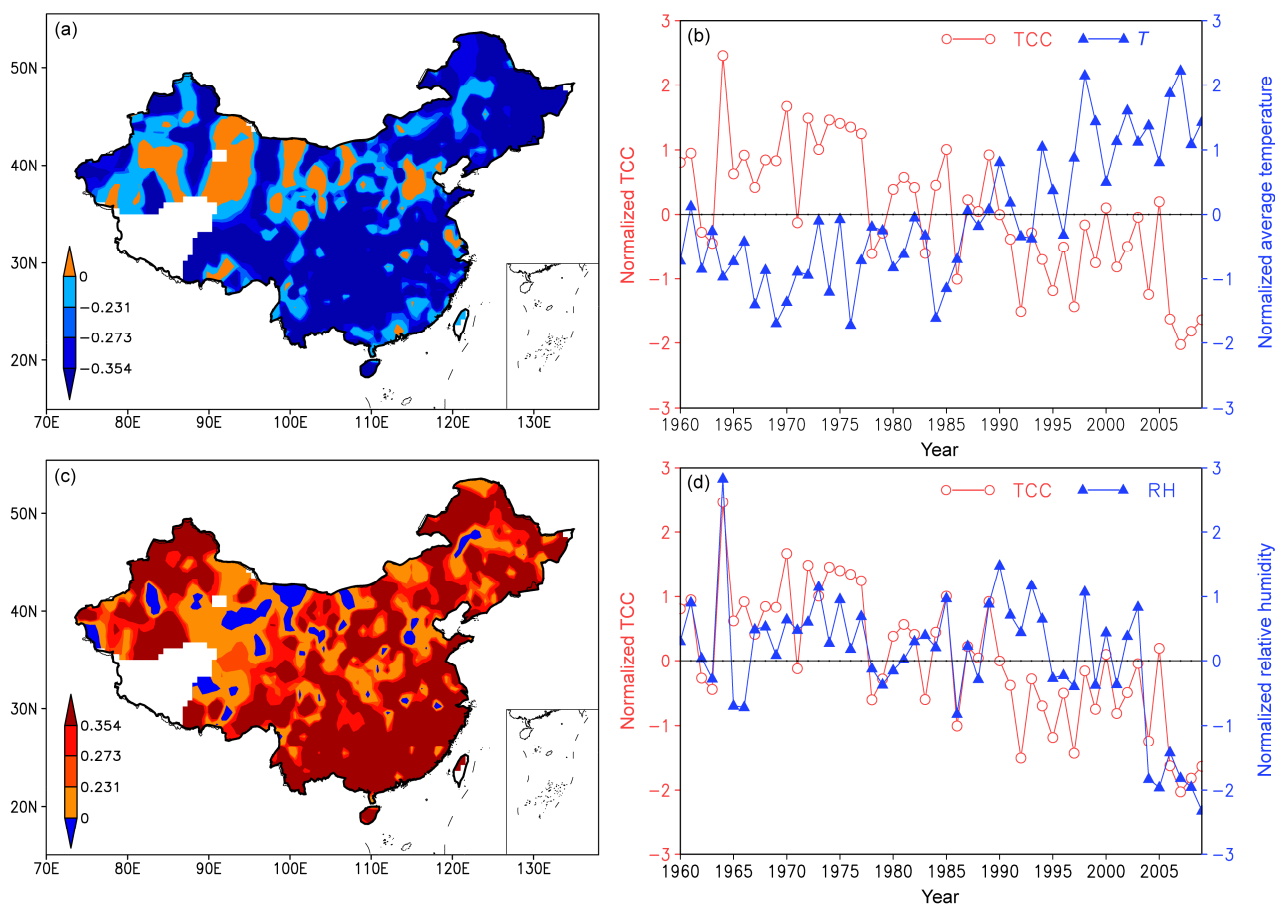


图 7 总云量与 (a) 平均气温和 (c) 相对湿度的相关系数分布 (阴影) (0.231、0.273 和 0.354 分别达到 90%、95% 和 99% 的信度水平); 总云量与 (b) 平均气温和 (d) 相对湿度标准化后的时间序列对比

Fig. 7 Correlation coefficient maps of TCC with (a) average temperature and (c) relative humidity (0.231, 0.273 and 0.354 indicate statistical significances at the 90%, 95% and 99% confidence level according to the *t*-test, respectively), and comparisons between (b) normalized average temperature and TCC and between (d) normalized relative humidity and TCC

解释方差最大的前两个模态进行分析,同时可知均通过 North's 显著性检验。如图 8 所示, EOF 分解的前两个模态与总云量 EOF 分解的前两个模态有类似的分布。平均温度第一模态 (EOF1, 图 8a) 在整个我国地区均为正值, 结合其主分量 (PC1, 图 8c) 可以得出平均温度整体呈现一致的上升趋势。以 1990 年为转折点, 1990 年之前平均气温偏低, 1990 年之后平均气温偏高, 这与总云量第一主分量一致。进一步计算平均温度和总云量第一主分量的相关系数为 -0.71 , 通过了 99.9% 的信度检验。平均气温第二模态 (EOF2, 图 8b) 在东北地区、内蒙古东部、华北、华东以及新疆北半部等地为负值, 在其他区域为正值。平均温度的第二主分量在近 53 年期间表现为先下降, 后上升的趋势, 体现了不同区域平均温度的振荡性。1980 年和 2002 年是其正负值的分界年, 这也与总云量有很好的 consistency。

进一步对 1960~2012 年相对湿度进行 EOF 分解, 同时对解释方差通过 North's 显著性检验的前

两个模态进行分析。如图 9 所示, 相对湿度第一模态 (EOF1, 图 9a) 在整个我国地区均为负值, 结合其主分量 (PC1, 图 9c) 可以得出相对湿度整体呈现一致的减少趋势。以 2000 年为转折点, 2000 年之前偏高, 2000 年之后相对湿度偏低, 这与总云量第一主分量相反。进一步计算相对湿度和总云量第一主分量的相关系数为 -0.74 , 通过了 99.9% 的信度检验。相对湿度第二模态 (EOF2, 图 9b) 在东北地区北部和我国 32°N 以南的地区为负值, 在其他区域为正值。相对湿度的第二主分量 (PC2, 图 9d) 在近 53 年期间表现为先下降后上升的趋势, 与总云量的第二主分量一致, 体现了不同区域相对湿度的振荡性。同时, 1980 年和 2002 年是其正负值的分界年, 这也与总云量有很好的 consistency。

4 结论

本文利用我国地区近 53 年 543 个站点的总云量、平均气温和相对湿度的日平均资料, 结合 EOF

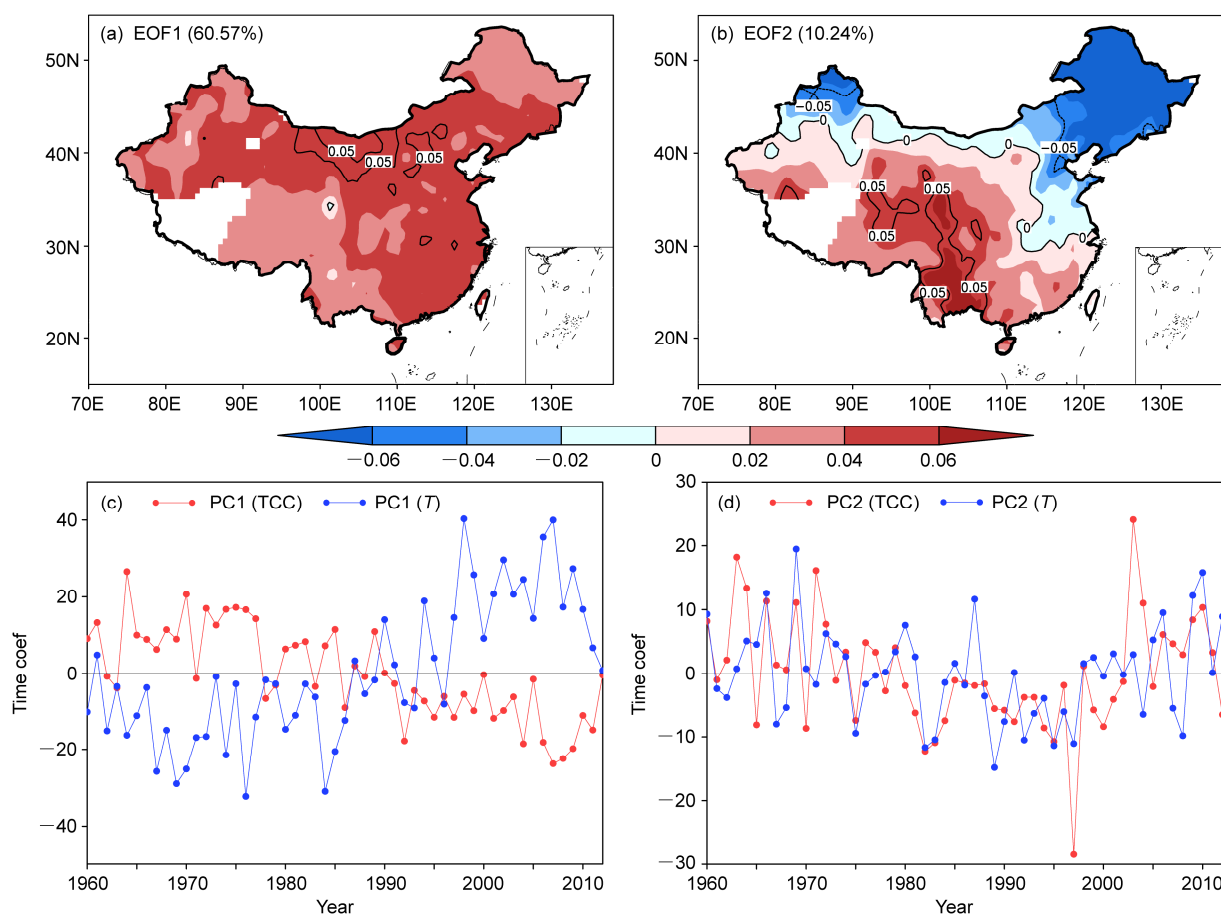


图 8 平均气温 (T) EOF 分解的 (a) 第一和 (b) 第二模态; 平均气温 (c) 第一主分量、(d) 第二主分量和总云量第一主分量、第二主分量的对比
Fig. 8 The (a) first and (b) second EOF models of average temperature, and comparisons of the (c) first and (d) second PCs of average temperature with corresponding PCs of TCC

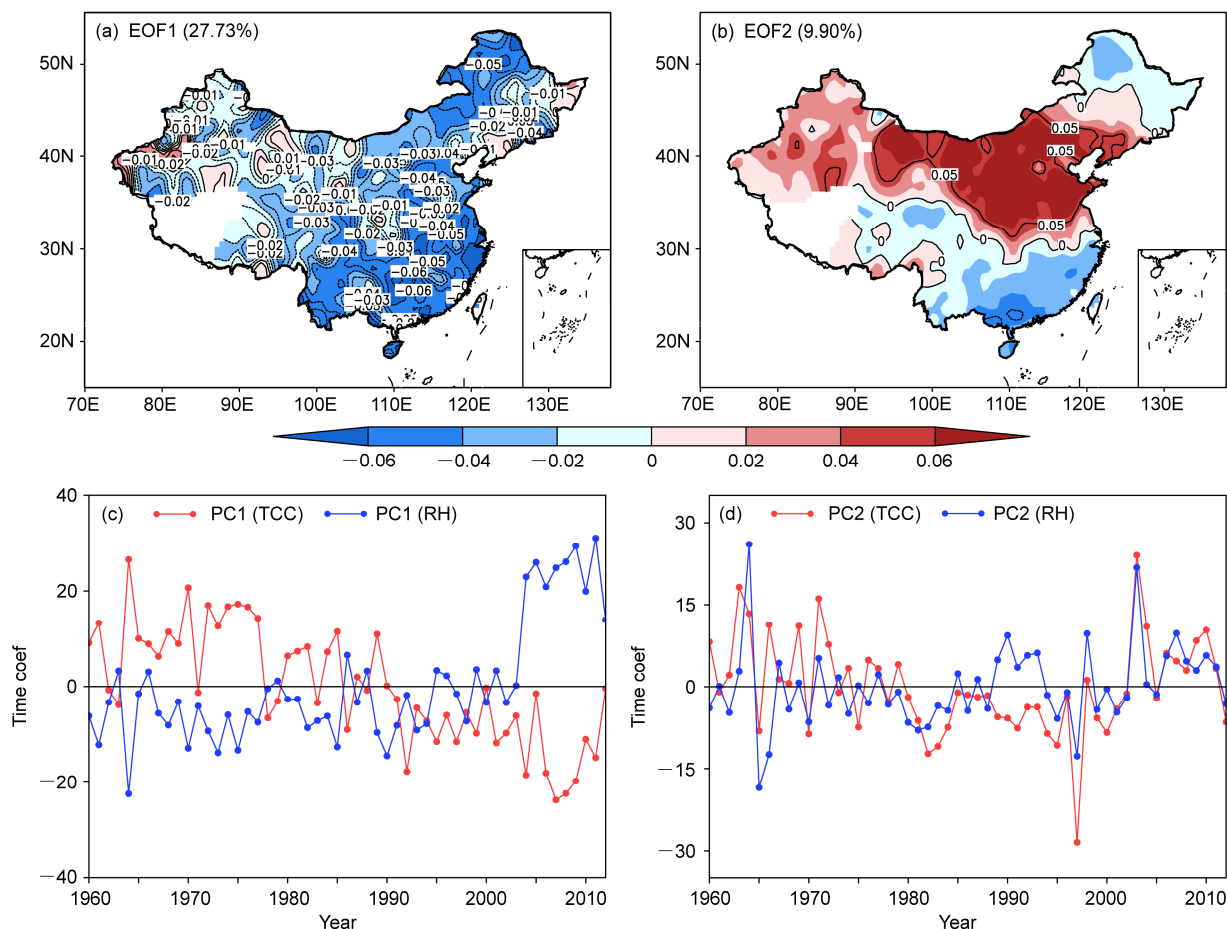


图9 相对湿度 (RH) EOF 分解的 (a) 第一和 (b) 第二模态; (c) 和 (d) 分别为相对湿度第一主分量、第二主分量和总云量第一主分量、第二主分量的对比

Fig. 9 The (a) first and (b) second EOF modes of relative humidity, and comparisons of the (c) first and (d) second PCs of relative humidity with corresponding PCs of TCC

方法讨论了我国地区总云量的主要模态的空间构造和时间演变特征, 同时进一步探讨了其与平均气温和相对湿度的可能相关关系。主要结论如下:

(1) 我国地区总云量呈南方多、北方少的带状分布特征, 大值区出现在我国的西南和华南等地, 其中最大值在四川盆地为 82%。1960~2012 年间总云量主要表现为显著的下降趋势, 其中东北地区南部、华北南部、华中和华东地区、四川盆地等趋势系数超过了 -0.6 , 下降十分显著。总云量的气候倾向率为 $-0.8\% (10a)^{-1}$, 趋势系数为 -0.68 , 通过的 99.9% 的信度检验。

(2) 季节变化特征分析表明, 我国总云量表现为夏季最多, 春秋季节次之, 冬季最少。其气候倾向率分别为 $-1.21\% (10a)^{-1}$ (春季)、 $-0.76\% (10a)^{-1}$ (夏季)、 $-1.07\% (10a)^{-1}$ (秋季) 和 $-0.21\% (10a)^{-1}$ (冬

季), 其中春季、夏季和秋季趋势系数超过了 99.9% 的信度检验, 冬季下降不明显。

(3) 对总云量的距平场进行 EOF 分析得到的前两个特征向量场的累积方差为 40.348%, 能够较好地描述总云量的主要分布特征。第一模态在空间上均为正值, 第一主分量呈下降的趋势, 体现了我国地区总云量的长期变化趋势; 第二模态在南方为负值, 北方为正值, 表明了总云量变化的不均匀性, 第二主分量则体现了我国总云量变化的震荡性。

(4) 总云量的变化与平均气温和相对湿度有很好的相关性。根据 Clausius-Clapeyron 关系, 平均气温增加使得饱和水汽压增加, 导致相对湿度减少, 云的形成减少。我国地区平均气温和相对湿度气候倾向率分别为 $0.239^{\circ}\text{C} (10a)^{-1}$ 和 $-0.409\% (10a)^{-1}$ 。总云量与平均气温呈负相关关系, 与相对湿度呈正相

关关系, 趋势系数均通过了 99.9% 的信度检验。

(5) EOF 分解结果揭示了平均气温和相对湿度具有与总云量一致或者正好相反的空间分布特征, 体现了不论在总体变化趋势, 地区差异, 还是时间演变上, 均与总云量保持较高的一致性, 这也进一步证明了总云量是由气温和水汽共同影响的。

参考文献 (References)

- 安宁, 王开存. 2013. 利用 MODIS 卫星资料研究全球近 10 年云量变化 [C]// 第 30 届中国气象学会年会论文集. 南京: 中国气象学会. An Ning, Wang Kaicun. 2013. Analyzing global trends of cloud fraction over last decade using MODIS observation [C]//Innovation-Driven Development of Meteorological Disaster Prevention Capacity-S10 Atmospheric Physics and Atmospheric Environment (in Chinese).
- Dai A G, Karl T R, Sun B M, et al. 2006. Recent trends in cloudiness over the United States: A tale of monitoring inadequacies [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 87 (5): 597–606, doi:10.1175/BAMS-87-5-597.
- 戴进, 余兴, 刘贵华, 等. 2011. 青藏高原雷暴弱降水云微物理特征的卫星反演分析 [J]. *高原气象*, 30 (2): 288–298. Dai Jin, Yu Xing, Liu Guihua, et al. 2011. Satellite retrieval analysis on microphysical property of thunderstorm with light precipitation over the Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (2): 288–298.
- 段皎, 刘煜. 2011. 近 20 年中国地区云量变化趋势 [J]. *气象科技*, 39 (3): 280–288. Duan Jiao, Liu Yu. 2011. Variation and trends of cloud amount in China over past 20 years [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 39 (3): 280–288, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2011.03.004.
- Evan A T, Heidinger A K, Vimont D J. 2007. Arguments against a physical long-term trend in global ISCCP cloud amounts [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (4): L04701, doi:10.1029/2006GL028083.
- Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. 2007. Observations: Surface and atmospheric climate change [M]// *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 275–277.
- 郭玲, 何金海, 祝从文. 2011. 中国夏季降水影响因子的研究回顾 [J]. *气象与减灾研究*, 34 (2): 1–7. Guo Ling, He Jinhai, Zhu Congwen. 2011. Review of study on the factors impacting summer rainfall in China [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research* (in Chinese), 34 (2): 1–7, doi:10.3969/j.issn.1007-9033.2011.02.001.
- Hong G, Yang P, Gao B C, et al. 2007. High cloud properties from three years of MODIS *Terra* and *Aqua* collection-4 data over the tropics [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46 (11): 1840–1856, doi:10.1175/2007JAMC1583.1.
- Li Z Q, Niu F, Fan J W, et al. 2011. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation [J]. *Nature Geoscience*, 4 (12): 888–894, doi:10.1038/ngeo1313.
- 刘瑞霞, 刘玉洁, 杜秉玉. 2004. 中国云气候特征的分析 [J]. *应用气象学报*, 15 (4): 468–476. Liu Ruixia, Liu Yujie, Du Bingyu. 2004. Cloud climatology characteristics of China from ISCCP data [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 15 (4): 468–476, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2004.04.009.
- 刘引鸽, 王宁练. 2014. 我国总云量时空特征及其影响因素分析 [J]. *宝鸡文理学院学报(自然科学版)*, 34 (1): 45–50, 58. Liu Yin'ge, Wang Ninglian. 2014. Variation and influential factors of total cloud amount all over China [J]. *Journal of Baoji University of Arts and Sciences (Natural Science Edition)* (in Chinese), 34 (1): 45–50, 58, doi:10.13467/j.cnki.jbuns.2014.01.019.
- Maugeri M, Bagnati Z, Brunetti M, et al. 2001. Trends in Italian total cloud amount, 1951–1996 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (24): 4551–4554, doi:10.1029/2001GL013754.
- 牛晓瑞, 王淑瑜, 李杉. 2012. 1961~2005 年新疆夏季低云量长期变化特征及影响因素分析 [J]. *气候与环境研究*, 17 (1): 59–67. Niu Xiaorui, Wang Shuyu, Li Shan. 2012. Analysis of long-term variation characteristics and influence factors of summer low cloud amount in Xinjiang during 1961–2005 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 17 (1): 59–67, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10047.
- Norrh G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (7): 699–706.
- 彭杰, 张华, 沈新勇. 2013. 东亚地区云垂直结构的 Cloud Sat 卫星观测研究 [J]. *大气科学*, 37 (1): 91–100. Peng Jie, Zhang Hua, Shen Xinyong. 2013. Analysis of vertical structure of clouds in East Asia with CloudSat data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (1): 91–100, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11188.
- 钱永甫, 黄媛媛. 1994. 臭氧、云和气溶胶对纬带平均气候的影响 [J]. *地理学报*, 49 (3): 266–274. Qian Yongfu, Huang Yuanyuan. 1994. The effects of ozone, clouds and aerosols on the zonally averaged climate [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 49 (3): 266–274, doi:10.11821/xb199403008.
- 施能, 陈家其, 屠其璞. 1995. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征 [J]. *气象学报*, 53 (4): 431–439. Shi Neng, Chen Jiaqi, Tu Qipu. 1995. 4-phase climate change features in the last 100 years over China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 53 (4): 431–439, doi:10.11676/qxxb1995.049.
- 施能, 黄先香, 杨扬. 2003. 1948~2000 年全球陆地年降水量场趋势变化的时、空特征 [J]. *大气科学*, 27 (6): 971–982. Shi Neng, Huang Xianxiang, Yang Yang. 2003. Spatiotemporal features of the trend variation of global land annual rainfall fields from 1948–2000 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (6): 971–982, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2003.06.02.
- 石睿, 王体健, 李树, 等. 2015. 东亚夏季气溶胶—云—降水分布特征及其相互影响的资料分析 [J]. *大气科学*, 39 (1): 12–22. Shi Rui, Wang Tijian, Li Shu, et al. 2015. The spatial and temporal characteristics of aerosol–cloud–precipitation interactions during summer in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 39 (1): 12–22, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1404.13276.
- Sun B, Groisman P Y. 2004. Variations in low cloud cover over the United States during the second half of the twentieth century [J]. *J. Climate*, 17 (9): 1883–1888, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<1883:VILCCO>2.0.CO;2.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 (第二版) [M]. 北京: 气

- 象出版社. Wei Fengying. 2007. Climate Statistical Diagnosing and Prediction (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press.
- Wild M, Folini D, Hakuba M Z, et al. 2014. The energy balance over land and oceans: An assessment based on direct observations and CMIP5 climate models [J]. *Climate Dyn.*, 44 (11–12): 3393–3429, doi:10.1007/s00382-014-2430-z.
- 吴润, 刘佳. 2011. 近二十年全球变暖背景下东亚地区云量变化特征分析 [J]. *热带气象学报*, 27 (4): 551–559. Wu Jian, Liu Jia. 2011. Trend of cloud amount in East Asia under the backdrop of global warming in the past 20 years [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27 (4): 551–559, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2011.04.012.
- 徐兴奎. 2012. 中国区域总云量和低云量分布变化 [J]. *气象*, 38 (1): 90–95. Xu Xingkui. 2012. Spatiotemporal variation of total cloud and low cloud over China [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (1): 90–95.
- 杨冰韵. 2013. 基于 CloudSat 卫星资料分析云的微物理和光学特性的分布特征 [D]. 中国气象科学研究院硕士学位论文. Yang Bingyun. 2013. Analysis on distribution characteristics of cloud microphysical and optical properties based on the CloudSat data [D]. M. S. thesis (in Chinese), China Academy of Meteorological Sciences.
- 张雪芹, 彭莉莉, 郑度, 等. 2007. 1971~2004 年青藏高原总云量时空变化及其影响因子 [J]. *地理学报*, 62 (9): 959–969. Zhang Xueqin, Peng Lili, Zheng Du, et al. 2007. Variation of total cloud amount and its possible causes over the Qinghai–Xizang Plateau during 1971–2004 [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 62 (9): 959–969, doi:10.11821/xb200709007.
- 周国华, 罗小莉, 王盘兴, 等. 2012. 中国冬季气温异常 EOF 分析的改进 [J]. *大气科学学报*, 35 (3): 295–303. Zhou Guohua, Luo Xiaoli, Wang Panxing, et al. 2012. Improvements of empirical orthogonal function analysis for winter temperature anomaly over China [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (3): 295–303, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2012.03.004.