陈凯奇, 李建平, 谢铁军, 等. 2020. 全球大气能量的时空特征及变化趋势分析 [J]. 大气科学, 44(1): 168−182. CHEN Kaiqi, LI Jianping, XIE Tiejun, et al. 2020. Analysis of the Spatiotemporal Characteristics and Trends of Global Atmospheric Energy [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(1): 168−182. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18252

全球大气能量的时空特征及变化趋势分析

陈凯奇[1] 李建平[2] 谢铁军[1] 汪秋云[1] 王兰宁[1]

1 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院，北京 100875
2 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室，山东青岛 266100

摘 要 大气能量学是大气科学重要的组成部分，了解大气能量的时空分布和变化特征，能够为大气科学研究，尤其是气候变化研究提供新的思路和手段。本文基于 1948～2016 年 NCEP 逐月再分析资料，从大气的总能量及其内能、位能、潜热和动能的分布、变化趋势和主模态变化等方面阐释了全球大气能量变化的整体特征。主要结论如下：（1）除高海拔地区外，总能量呈现从赤道向两极逐渐递减的分布，且全球大部分地区呈增加趋势，内能和位能的分布和变化与总能量较为接近；潜热能的极大值区和显著变化区均位于赤道及低纬地区；动能的极大值区分布在中纬度长波槽和西风急流出口区，其在南半球双西风急流区的变化最为显著。（2）总能量呈现出不连续的阶段性跳跃式增长特征；北半球的总能量多于南半球，而增速却慢于南半球，即两半球间的能量呈趋同趋势；海洋上空的总能量多于陆地，且海陆间差额有增大趋势；火山爆发事件可能对大气能量在年际尺度上的减少有重要作用。（3）大气各能量第一模态的空间特征与其各自变化趋势分布非常相似，并先后在 1975 年左右发生了年代际突变。就第二模态而言，大气的总能量、内能和位能从整体上反映出南北极与其它地区呈反向变化的特征；部分低纬度地区的潜热能与其它地区呈反向变化；动能主要呈现从热带太平洋向南北两极的经向波列分布；它们的时间系数均有一定的多年代际变化特征，可能与气候系统的内部变率有关。

关键词 大气能量 时空特征 变化趋势 全球 主模态
文章编号 1006-9895(2020)01-0168-15 **中图分类号** P467 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1903.18252

Analysis of the Spatiotemporal Characteristics and Trends of Global Atmospheric Energy

CHEN Kaiqi[1], LI Jianping[2], XIE Tiejun[1], WANG Qiuyun[1], and WANG Lanning[1]

1 *College of Global Change and Earth System Science*, *Beijing Normal University*, *Beijing* 100875
2 *Key Laboratory of Physical Oceangraphy/Institute for Advanced Ocean Studies*, *Ocean University of China*, *Qingdao*, *Shangdong Province* 266100

Abstract Atmospheric energetics is an important part of atmospheric science. Understanding the spatiotemporal characteristics of atmospheric energy can provide new ideas and methods for atmospheric research, especially research on climate change. This work explains the comprehensive features of global atmospheric energy changes on the basis of the distribution, trends and dominant mode changes shown by total energy, internal energy, potential energy, latent heat

收稿日期 2018-11-07；**网络预出版日期** 2019-03-12
作者简介 陈凯奇，男，1994 年出生，硕士研究生，主要从事气候变化和数值模拟方面的研究。E-mail: kyle1023@163.com
通讯作者 李建平，E-mail: ljp@ouc.edu.cn
资助项目 科技部国家重点研发计划项目 2016YFA0601801、国家自然科学重点基金项目 41530424、海洋局国际合作项目 GSAI-IPOVAI-03
Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0601801), National Natural Science Foundation of China (Grant 41530424), International Cooperation Program of State Oceanic Administration (Grant GSAI-IPOVAI-03)

energy, and kinetic energy as inferred from NCEP monthly reanalysis data for 1948 to 2016. The main conclusions are as follows: (1) The total energy decreases from the equator to the poles and from high-altitude areas, and energy in most parts of the world increases. The distribution and variation of internal energy and potential energy are closely related to the total energy. The maximum area and significant change zones of latent heat energy are located in the equator and low latitudes. The maximum area of kinetic energy is located in the long-wave trough of the middle latitudes and the outlet zone of westerly jets. In addition, kinetic energy located in double westerly jets in the southern hemisphere presents the most pronounced variations. (2) The total energy shows discontinuous periodic leap growth. The total energy of the Northern Hemisphere is more than that of the Southern Hemisphere. The speed-up of the Northern Hemisphere, however, is slower than that of the Southern Hemisphere. That is, the energy between the Northern Hemisphere and Southern Hemisphere tends to be homoplastic. The total energy above the ocean is more than that above land, and the gap between the total energy above the ocean and that above land has widened. Volcanic eruptions may have an important effect on the interannual reduction in atmospheric energy. (3) The spatial characteristics and distribution trends of the first leading mode of each component of atmospheric energy coincide, and they underwent a decadal catastrophe approximately in 1975. As a whole, the second leading modes of the total energy, internal energy, and potential energy of the atmosphere reflect that the changes in the north and south poles oppose those in other regions. The trend exhibited by the change in latent heat energy in some lower-latitude areas contradicts that exhibited by the change in the rest of the world. Kinetic energy mainly shows a meridional wave train distribution from the tropical Pacific to the north and south poles. The time series of the second leading mode possesses the characteristics of multidecadal variations that may be related to the internal variability of the climate system.

Keywords Atmospheric energy, Spatiotemporal characteristics, Trends, Global, Leading mode

1 引言

气候变化作为当今社会讨论的一个热点问题，备受人们瞩目。IPCC 第一工作组第五次评估报告指出，从 1970 年起，大气层顶净辐射为正值，1880～2012 年全球地表温度升高了 0.85℃（IPCC, 2013；秦大河等，2014），这对全球气候产生了巨大影响。而气候系统自身结构复杂且影响气候变化的因子众多，不同地区对气候变化的响应也不尽相同（董文杰等，2014）。例如，大气在垂直方向上存在明显的非均一性结构；温室气体、气溶胶等大气成分的变化会对气候系统形成额外的辐射强迫；太阳活动、地表反照率等，也都会对气候造成影响（张华和黄建平，2014）。大气能量作为天气和气候系统变化的重要体现形式（Peixóto and Oort, 1995），在研究大气行为时，考察其统计特征和能量演变也是检验天气和气候变化非常重要的手段之一（高丽和李建平，2007；董元昌和李国平，2015；Pan et al., 2017）。因此，以能量学作为切入点，对大气现象进行研究无疑具有重要意义。

目前有关大气能量学研究较多的是能量的循环和转化：Margules（1903）最早提出的风暴有效动能，开启了对大气环流中能量循环的研究；随着能量转换框图、有效位能以及扰动位能理论的提出和广泛应用，大气能量学的发展得到了极大的推动（Lorenz, 1955；罗连升和杨修群，2003；李建平和高丽，2006；汪雷等，2012；李建平等，2016）；近些年来卫星等观测手段的提高与数值模式的发展，在提升数据精度的同时，也极大地拓宽了观测数据的区域范围（卢乃锰和谷松岩, 2016），使得对全球范围的大气能量收支平衡（Kiehl and Trenberth, 1997）以及能量循环转化项的长期变化等研究也取得了较大进步（Pan et al., 2017）。但另一个方面，有关大气能量的分布和变化的研究依然较少：对于全球范围大气能量的分布及统计分析而言，由于数据的局限性和可信度等原因，在时间尺度上前人研究仍局限于数据集为 15 年的计算（Oort, 1983）。因此，有必要进一步分析全球大气总能量及各分能量的时空变化和典型模态，以便从能量学的视角，为在本质上了解长期以来全球气候变化的整体特征提供依据。

2 资料及计算方法

文中使用的资料主要有：（1）美国国家环境预测中心（National Centers for Environmental

Prediction，简称NCEP）提供的Reanalysis-II月平均再分析资料、美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration，简称NOAA）提供的NOAA-CIRES再分析资料以及欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，简称ECWMF）提供的ERA-Interim再分析资料。其中NCEP Reanalysis-II和NOAA-CIRES的资料时段为1948～2016年，ERA-Interim的资料时段为1979～2016年。NCEP Reanalysis-II和ERA-Interim的分辨率为2.5°×2.5°，NOAA-CIRES的分辨率为2°×2°。基本要素包括：风场、温度场、气压场、位势高度场和比湿等（文中若无特殊说明，则为NCEP Reanalysis-II计算结果）；（2）北半球环状模（Northern Hemisphere Annular Mode，简称NAM）指数采用Li and Wang（2003）中的定义，南半球环状模（Southern Hemisphere Annular Mode，简称SAM）指数采用Nan and Li（2003）中的定义。NAM指数取为北半球中纬度和高纬度的两个大气环状活动带的中心纬度35°N和65°N上的标准化纬向平均海平面气压差，SAM指数取为40°S与70°S的标准化纬向平均海平面气压差；（3）NOAA和国际科学协会理事会（International Council of Scientific Unions，简称ICSU）提供的北大西洋多年代际振荡（Atlantic Multidecadal Oscillation，简称AMO）指数和太平洋年代际振荡（Pacific Decadal Oscillation，简称PDO）指数。AMO指数为北大西洋20°～70°N Kaplan海表温度格点数据的面积加权平均值，PDO指数为太平洋20°N以北海表温度场异常主成分分析时第一主分量的标准化值（Mantua et al., 1997; Zhang et al., 1997）；（4）北大西洋涛动（North Atlantic Oscillation，简称NAO）指数取北大西洋地区（80°W～30°E）标准化纬向平均的35°N和65°N海平面气压场之差（Li and Wang, 2003）；（5）Niño指数采用的是NOAA气候预测中心在业务上使用的Oceanic Niño Index，它是基于Niño3.4区（5°N～5°S，120°～170°W）海温资料的三个月滑动平均值与其1971～2000年长期平均值的距平；（6）火山的数据来源为美国Smithsonian研究院的全新世强火山喷发年表（http://volcano.si.edu/search_eruption.cfm [2018-09-13]）。

本文从宏观的角度对大气中最基本的四种能量进行讨论，分别为内能I、位能P、动能K和潜热能S。研究的范围为整层大气，故需对能量进行垂直积分。

单位面积气柱的内能I_s：

$$I_{\mathrm{s}}=\int_0^{\infty}\rho I\mathrm{d}z=\int_0^{\infty}\rho C_v T\mathrm{d}z, \tag{1}$$

其中，ρ是空气密度，C_v是干空气定容比热，T是空气温度，z是高度。

在流体静力假设下：

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}z}=-\rho g, \tag{2}$$

其中，p是气压，g是重力加速度。公式（2）成立，因此式（1）也可写成：

$$I_{\mathrm{s}}=\frac{1}{g}\int_0^{p_0}C_v T\mathrm{d}p, \tag{3}$$

其中，$p_0=p(\lambda,\varphi)$是地面气压，λ和φ分别是经度和纬度。

同理，单位面积气柱的位能P_s，动能K_s，潜热能S_s分别为

$$P_{\mathrm{s}}=\int_0^{\infty}\rho P\mathrm{d}z=\int_0^{p_0}z\mathrm{d}p, \tag{4}$$

$$K_{\mathrm{s}}=\int_0^{\infty}\rho K\mathrm{d}z=\frac{1}{2g}\int_0^{p_0}(u^2+v^2)dp, \tag{5}$$

$$S_{\mathrm{s}}=\int_0^{\infty}\rho S\mathrm{d}z=\frac{1}{g}\int_0^{p_0}Lqdp, \tag{6}$$

其中，u是纬向风，v是经向风，L是潜热系数，q是比湿。由公式（3）至（6）可知单位面积气柱包含的总能量E_s为

$$E_{\mathrm{s}}=I_{\mathrm{s}}+P_{\mathrm{s}}+K_{\mathrm{s}}+S_{\mathrm{s}}=\frac{1}{g}\int_0^{p_0}C_v T\mathrm{d}p+\int_0^{p_0}z\mathrm{d}p+\frac{1}{2g}\int_0^{p_0}(u^2+v^2)\mathrm{d}p+\frac{1}{g}\int_0^{p_0}Lq\mathrm{d}p. \tag{7}$$

由火山爆发指数M_{VEI}和喷发能量E间的关系（Servando et al., 1991）可知：

$$\lg E=0.78M_{\mathrm{VEI}}+21.02. \tag{8}$$

根据前人对火山和气候影响关系的研究（洪汉净等，2003；曲维政等，2006），对选取时段内火山爆发指数$M_{\mathrm{VEI}}\geqslant 3$的火山爆发事件进行了筛选。为了充分考虑不同强度的火山对大气总能量的累积影响，定义了火山爆发能量指数VEEI（Volcanic

Explosivity Energy Index）：

$$\mathrm{VEEI} = \frac{E' - E_{\mathrm{avg}}}{E_{\mathrm{avg}}}, \tag{9}$$

$$E' = \frac{1}{\sum_{i=3}^{n} k_i} \sum_{i=3}^{n} k_i E_i, (n = 3, 4, \ldots, 7), \tag{10}$$

其中，E' 是加权的年平均火山爆发能量，i 是 VEI（Volcanic Explosivity Index）指数，k_i 是当 VEI=i 时火山爆发的次数，E_{avg} 为研究时段内火山爆发能量的年平均值。

本文采用的主要统计和分析方法有：相关分析、合成分析、Gauss 低通滤波、经验正交函数分解（EOF）、线性回归等，显著性均采用 *t*-test 方法检验。并选取 1948～2016 年的平均值作为气候平均态。

3 大气能量的全球分布特征

3.1 总能量的空间分布及趋势变化

大气能量的分布对于确定大气的热力学状态和风场结构非常重要（杨钧烽，2016）。从全球大气总能量的空间分布（图 1a）可以看出：大气总能量从低纬向两极递减；海岸线及高原山地的大气能量梯度较强，即陆地及山脉上空大气能量明显少于同纬度地区，表明海陆分布和陆表地形对大气能量分布的影响较为显著；总能量的高值区主要位于热带，最高值出现在赤道西太平洋的印太暖池地区；极低值区主要出现在南极、格陵兰岛以及高海拔地区（如青藏高原、安迪斯山脉及落基山脉等）。由于南极洲与格陵兰岛的地表反照率较高，吸收太阳辐射较少，温度较低，因此其上空大气总能量低于同纬度地区，约为赤道地区的一半；而单位面积的高原和山地上包含的大气质量较少，因此总能量较小。

图 1b 给出了在全球变暖背景下，不同地区大气总能量的变化趋势特征。由图 1b 可知：全球大多数地区为正异常，即总能量整体呈增加趋势；南半球的副热带地区与东南极洲上空呈现较强的偶极型变化，即南半球副热带大气的总能量在累积增加，而东南极洲则逐渐减少；亚欧大陆北部及东北部地区的总能量呈现负异常趋势，这可能与该地区陆表气温从 20 世纪末开始呈现出的显著变冷趋势有关（Yao et al.，2017）；赤道地区的变化趋势沿纬向呈正负异常交替出现的特征，其中印度—太平洋暖池（以下简称印太暖池）、南美洲北部和非洲中南部的大气总能量显著增加，赤道中太平洋和非洲北部则明显减少。前人利用不同的海温资料和模式结果分析表明，在热带太平洋的海温变化中存在太平洋冷舌模态（李建平等，2013），海温的降低会引发蒸发潜热的减少，这在同区域大气总能量的变化趋势中也有所体现。海冰的增减对于大气能量的影响较大，而南北两极大气能量的变化趋势相反，可能与北极海冰减少和南极海冰的增加有关（吕晓娜等，2009）。

3.2 各分能量的空间分布及趋势变化

大气在接受非绝热加热时，内能增加，由于大气具有可压缩性，故而膨胀形成上升运动，将部分内能转化为位能，因此内能和位能呈同向变化，且

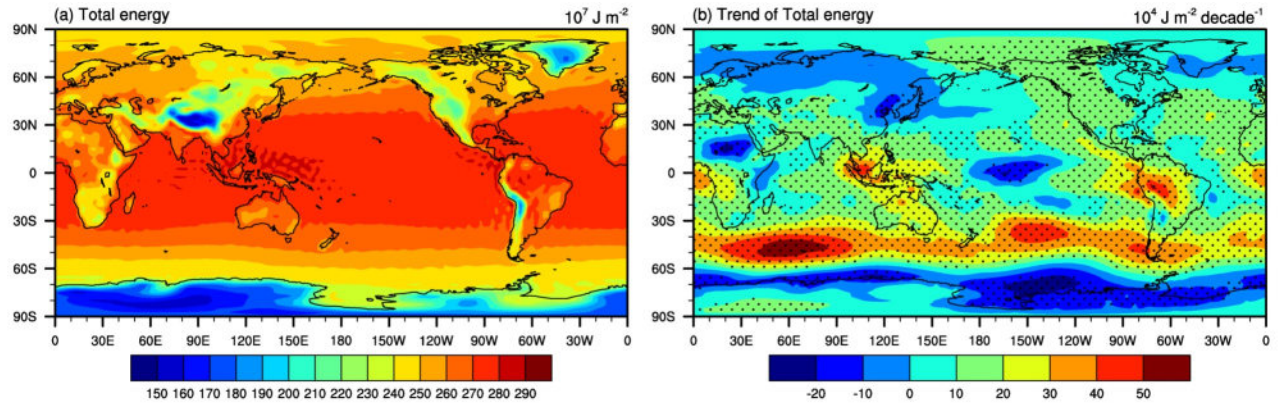

图 1 （a）1948～2016 年年平均整层大气总能量（单位：10^7 J m^{-2}）及其（b）长期趋势[单位：10^4 J m^{-2} (10 a)$^{-1}$]的全球分布。打点区域表示达到 0.05 显著性水平

Fig. 1 Global distribution of (a) the annually vertical-mean total atmospheric energy (units: 10^7 J m^2) and (b) its long-term trend [units: 10^4 J m^{-2} (10 a)$^{-1}$] for the period of 1948–2016. The stippled area indicates significance at the 0.05 level

内能占总能量比例最多（见本文4.1节），即二者的分布（图2a、b）与总能量具有极大的相似性。同时，与前人用地表气温表征内能的分布相比（Peixóto and Oort, 1974, 1995），用整层大气的内能可以更为准确地描述东非大裂谷（东非高原）等地因高海拔地形所具有的气温偏低和空气稀薄等特点，进而造成的同纬度间的能量差异。热带地区温度较高且下垫面为海洋，有利于水分蒸发，赤道地区盛行上升气流，也使得更多水汽凝结释放潜热。（图2c），因此其最大值区出现在赤道附近，反之南北极和高海拔地区潜热较少，这与前人在格陵兰岛和青藏高原等地未发现潜热极小值区的结果不同（Peixóto and Oort, 1974, 1995）。动能的极大值分布在南北半球中纬度地区（图2d），分别位于亚欧大陆东部、北美东部以及好望角南部，即北半球行星波的东亚大槽和北美大槽处，以及西风急流的出口区；南半球副热带和副极地的两支西风急流影响范围大于北半球，该结果也可以从更长的时间尺度上验证李建平和高丽（2006）提出的动能极大值在南半球呈现出的双峰分布；赤道和高纬地区的温度分布较均一，大气的斜压性低，位能及内能较难转化为动能，因而动能较小。

为进一步探究大气能量变化趋势的分布，本文对各分能量进行单独研究时，发现各组分对总能量变化趋势的贡献区域有所不同。内能和位能的变化趋势较为一致（图3a、b），呈现出南半球副热带的正异常与中高纬度的负异常共同形成的环状偶极型分布特征；南半球副热带地区的内能和位能显著增加，南极洲和亚欧大陆北部明显减少。潜热能对总能量的贡献体现在赤道地区（图3c），表现为潜热在赤道中太平洋和非洲北部减少，而印太暖池和南美洲北部增加；其中,南美北部降水的增多可能对潜热的增加有重要作用（施晓晖和徐祥德，2008）。动能的量级较小，因此更多考虑其自身变化而非对总能量的贡献；最明显的特征为南半球中高纬地区存在的两支急流（Trenberth, 1991）呈现出的反向变化趋势；即副热带急流的动能减少，西风减弱；而副极地急流的动能增加，西风增强。

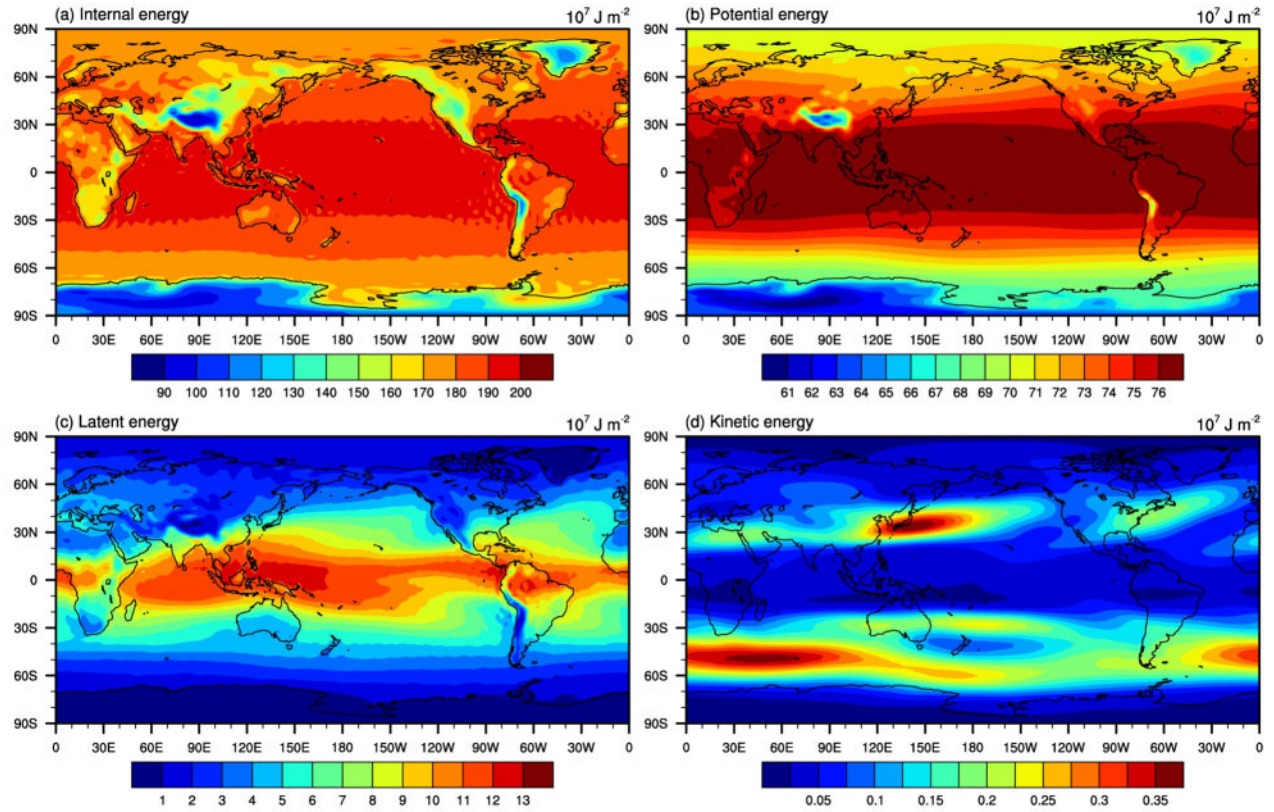

图2 1948～2016年年平均整层大气（a）内能、（b）位能、（c）潜热能和（d）动能的全球分布，单位：10^7 J m^{-2}

Fig. 2 Global distribution of each component of the annually vertical-mean atmospheric energy for the period of 1948–2016: (a) Internal energy, (b) potential energy, (c) latent heat energy, and (d) kinetic energy. Units: 10^7 J m^{-2}

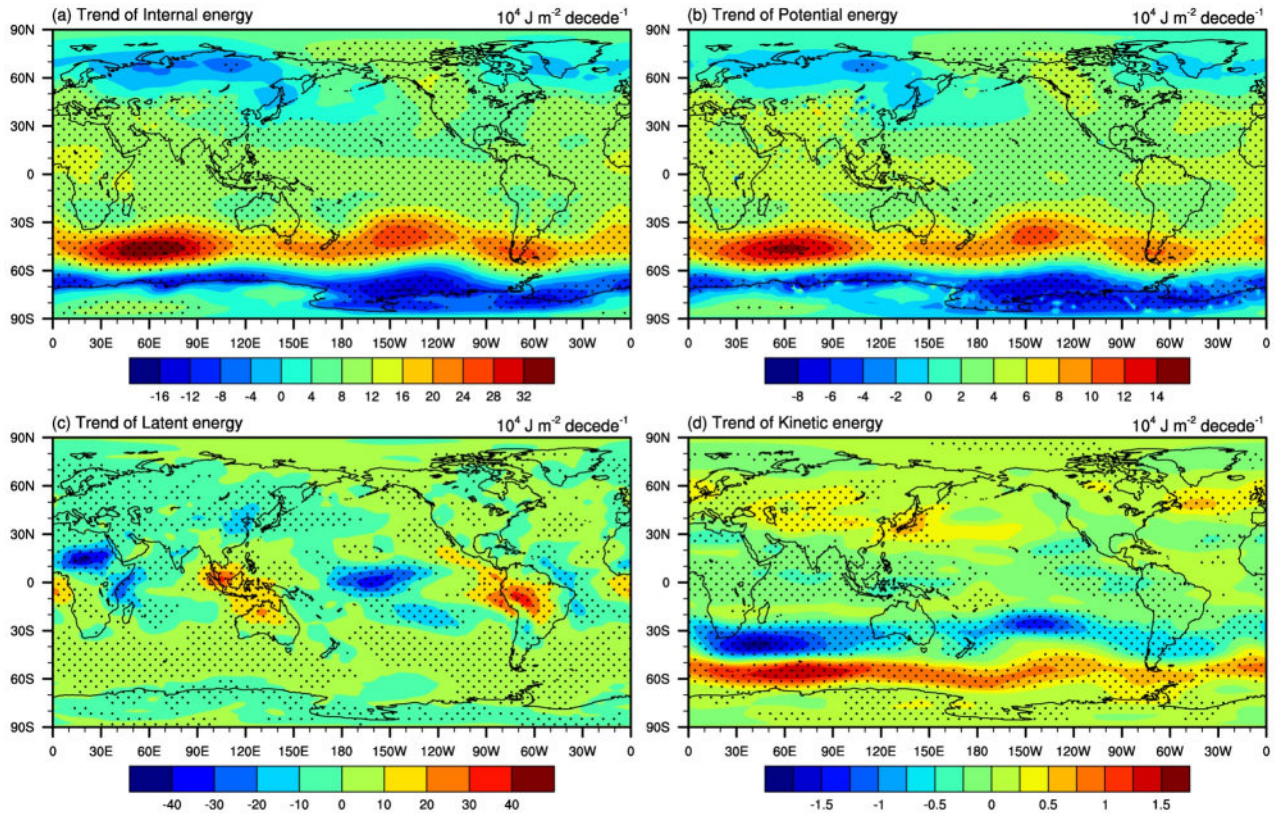

图3 1948～2016年年平均整层大气（a）内能、（b）位能、（c）潜热能和（d）动能长期趋势的全球分布[单位：10^4 J m^{-2} (10 a)$^{-1}$]。打点区域表示达到了0.05显著性水平

Fig. 3 Global distribution of each component of the long-term trend of the annually vertical-mean atmospheric energy for the period of 1948−2016: (a) Internal energy, (b) potential energy, (c) latent heat energy, and (d) kinetic energy. Units: 10^4 J m^{-2} (10 a)$^{-1}$. The stippled area indicates significance at the 0.05 level

4 能量在大气中的存储变化

4.1 大气能量的存储量

Oort（1983）曾利用1958～1973年的粗网格数据对大气能量的数值进行过计算，为了探究大气能量对于气候长期变化的响应，本文利用1948～2016年NCEP提供的Reanalysis-II再分析数据对南北半球的各类能量进行重新统计（表1）后发现：总能量与前人计算结果相差达1.64%，且各分能量在不同区域的数值也仍存在较大差异，并对海洋和陆地上的大气能量进行了补充。从整体上看，在总能量中占比最大的是内能，其次分别为位能、潜热能和动能；各分能量占总能量的比例与理论（杨大升等，1983）相近（即内能与位能近似5:2的比例）；北半球除动能外的其他能量均大于南半球；海洋上空大气的各类能量均大于陆地。

表1 大气能量的组分

Table 1 Composition of atmospheric energy

区域	大气能量/10^7 J m^{-2}				
	总能量	内能	位能	潜热	动能
北半球	258.33	179.33	73.76	5.17	0.071
南半球	245.92	169.82	71.64	4.35	0.11
海洋	263.06	183.95	73.54	5.47	0.10
陆地	229.58	155.46	70.94	3.11	0.064
全球平均	251.97	174.51	72.68	4.69	0.091

4.2 能量的年际变化

图4a给出了年平均全球整层大气总能量的时间序列。在全球变暖的大背景下，总能量呈现出显著的增长趋势，同时也存在着阶段性跳跃式的变化特征。1948～1976年大气总能量的减少趋势明显，在1976年左右出现增长型突变后的近20年内基本无明显变化趋势，2000年后随即又呈现显著上升趋势。全位能（即内能与位能之和）约占总能量的98%，潜热能和动能的占比较少，且二者的变化关键区多集中于局地。因此内能和位能的年际变化与总能量较为一致，而潜热能和动能在年际尺度上的

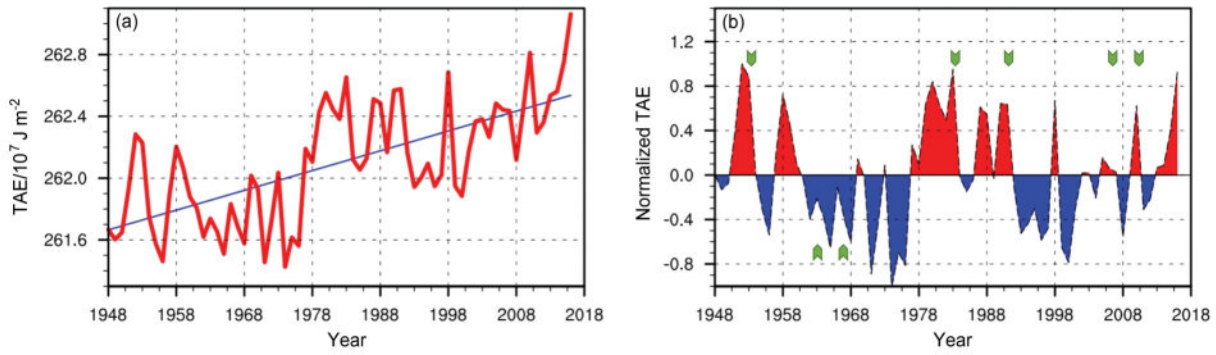

图4 1948～2016年年平均全球整层大气总能量（TAE，单位：10^7 J m^{-2}）的（a）时间序列（红色线）以及（b）去趋势的标准化序列。（a）中蓝色实线表示长期趋势，（b）中绿色箭头表示火山爆发能量指数VEEI前七的年份

Fig. 4 (a) Time series (red) and (b) detrended and normalized time series of the annually vertical-mean global average total atmospheric energy (TAE, units: 10^7 J m^{-2}) for the period of 1948–2016. The blue solid line in (a) means long-term trend, the green arrows in (b) represent the years of the seven largest VEEIs (volcanic explosivity energy indexes)

变化不明显（图略），在后续对各分能量变化原因的研究中，会把关注点更多地放在局地尺度。通过去趋势的标准化序列（图4b）发现，总能量呈现出约30年周期的多年代际变化特征。

此外，本文为了比较不同资料间的差异，结合1948～2016年的NOAA-CIRES再分析资料和1979～2016年的ERA-Interim资料对大气总能量进行了统计，并与同时段的NCEP Reanalysis-II资料分析能量的结果进行对比后发现，使用不同资料均能反映出大气总能量整体呈现出的显著增加特征（图略），且在总能量的高低值年也体现出了较好的一致性，但同时对计算结果也会产生一定影响。其差异主要体现在两个方面：一是使用不同资料算得的能量数值略有不同，利用1948～2016年的NOAA-CIRES数据计算得到的大气总能量年平均值为255.32×10^7 J m^{-2}，比同时间段NCEP Reanalysis-II资料略高；利用1979～2016年的ERA-Interim资料得到的总能量年平均值为259.70×10^7 J m^{-2}，而同时段的NCEP Reanalysis-II资料总能量的年平均值为262.35×10^7 J m^{-2}，即ERA-Interim资料得到的计算结果略低；二是总能量去趋势后的年际波动在NCEP Reanalysis-II数据中体现出了明显的周期性变化特征，但在其他数据中体现的不明显（图略）。

4.3 火山爆发对大气能量的可能影响

火山活动是影响和驱动全球气候变化最重要的因子之一（Robock, 2000）。肖栋和李建平（2011）的研究表明，火山喷发出的火山灰在平流层对氯化物的活化作用可造成平流层臭氧的年代际减少，从而可能会导致平流层臭氧吸收的热量减少，造成平流层热带地区年代际的变冷突变。因此，为探究火山爆发对大气总能量的影响，本文在考虑火山的累积效应后，重新定义了火山爆发能量指数VEEI，并筛选出最大的前七个年份，分别用绿色箭头标识在图4b中。由图可见，大气总能量在经历VEEI较大的年份后，均会产生减少的趋势；且在1991年、1955年和1963年这三个VEEI指数最大年，负异常持续时间要长于其他年份，这说明总能量减少的持续时间可能与火山的累积强度呈正相关。且不同资料的结果，均能反映出上述特征。综上所述，火山爆发事件对大气总能量的阶段性减少可能有重要作用。

4.4 能量的半球及海陆差异

北半球（Northern Hemisphere，简称NH）与南半球（Southern Hemisphere，简称SH）的大气能量除了取决于各自的辐射收支情况，也受两半球之间能量交换的影响。由南北半球总能量的年际变化（图5a）可见：两半球的能量均显著增加，且增长速率不同，其中SH的增长速率较大（约为NH的1.6倍），而单位面积上的NH大气总能量大于SH，即南北半球的总能量间存在差额在逐渐缩小（图5b）。Adam et al.（2016）和Bischoff and Schneider（2016）的研究表明：跨赤道大气能量传输与ITCZ（Intertropical Convergence Zone）的纬度位移呈负相关。这意味着南北半球能量趋同现象可能会使半球间的环流和能量交换呈减弱趋势，也可能会对ITCZ跨越赤道能量输送的敏感度产生影响。

图6a给出了陆地和海洋上空大气能量的时间

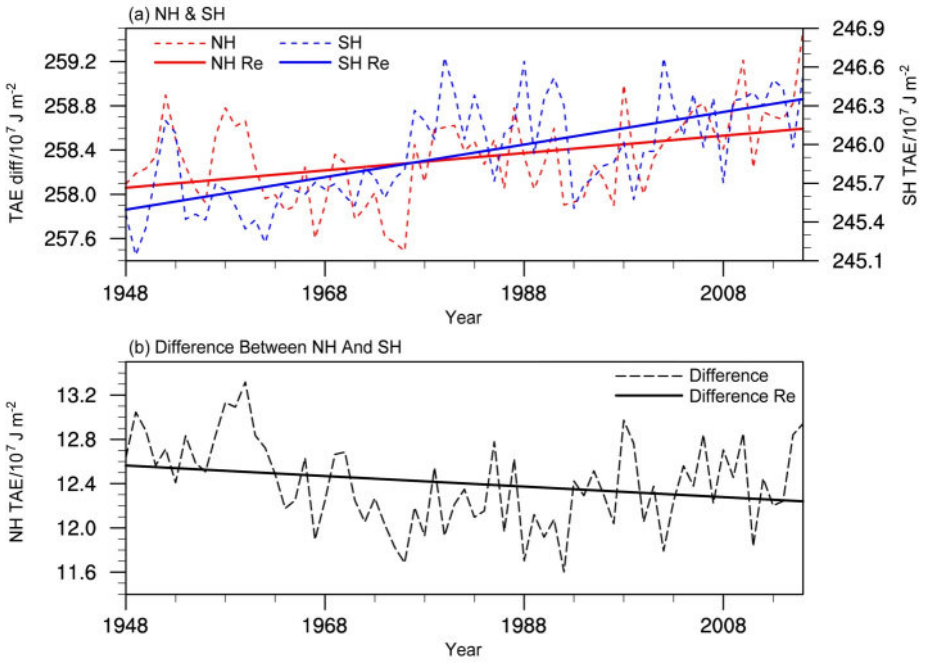

图5 1948～2016年年平均北半球（NH，红线）与南半球（SH，蓝线）整层大气总能量（TAE，单位：10^7 J m^{-2}）的（a）时间序列；（b）北半球与南半球大气总能量之差。虚线代表时间序列，实线代表长期趋势线。（a）中北半球对应左边的纵轴；南半球对应右边的纵轴

Fig. 5 (a) Time series of the annually vertical-mean average total atmospheric energy (TAE, units: 10^7 J m^{-2}) of the Northern Hemisphere (NH, red lines) and Southern Hemisphere (SH, blue lines) for the period of 1948−2016. (b) Difference between NH and SH total atmospheric energy. Dashed lines represent time series, and solid straight lines represent regression lines. The left and right vertical axes in (a) are for NH and SH, respectively

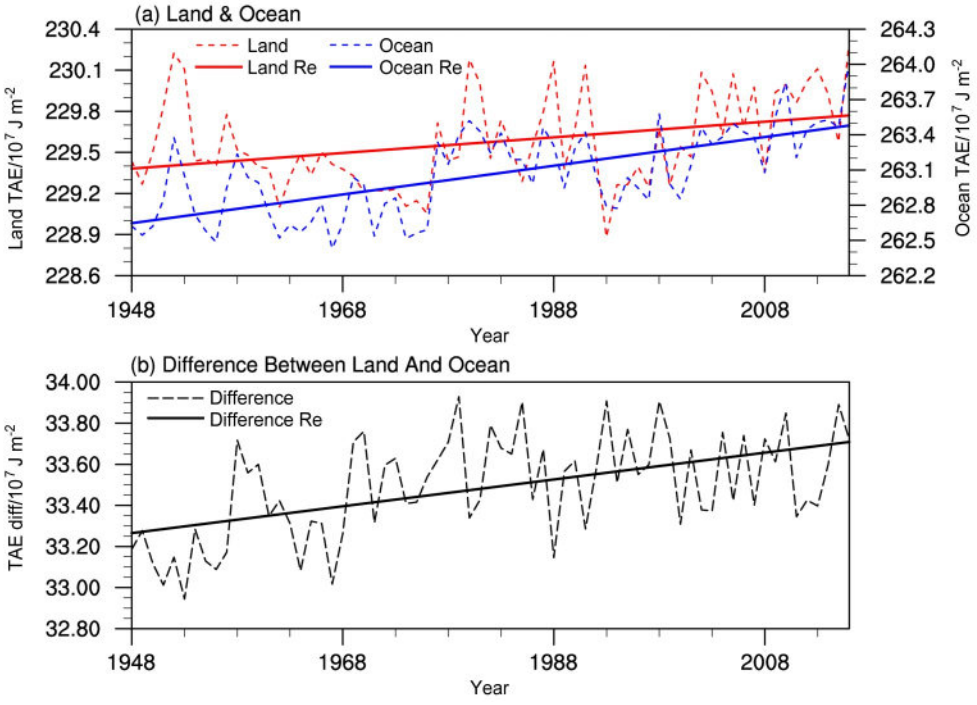

图6 （a）1948～2016年年平均陆地（红线）与海洋（蓝线）整层大气总能量（单位：10^7 J m^{-2}）的时间序列；（b）海洋与陆地大气总能量之差。虚线代表时间序列，实线代表长期趋势线。（a）中北陆地对应左边的纵轴；海洋对应右边的纵轴

Fig. 6 (a) Time series of the annually vertical-mean average total atmospheric energy (TAE, units: 10^7 J m^{-2}) of the land (red lines) and ocean (blue lines) for the period of 1948−2016. (b) Difference between ocean and land total atmospheric energy. Dashed lines represent time series, and solid straight lines represent regression lines. The left and right vertical axes in (a) are for land and ocean, respectively

序列。可知，单位面积的海洋大气积蓄了比陆地上空大气更多的能量。不仅如此，海洋上空总能量的增长速率也更快，约为陆地上的2.2倍，所以海洋上空大气总能量与陆地上空之间的差距会进一步拉大（图6b），这可能会使海洋与陆地间的能量交换得到加强。虽然整个南极地区在过去的50年中近地面气温并无明显升高，但是效存德（2008）利用模式预测21世纪末南极内陆地区将增暖3.4℃±1.0℃，海冰面积将缩小约30%。若海冰面积减小，海洋面积增加，这会使南极洲和海洋上空能量增加，进而可能会加剧南北半球间能量差距的缩小。

5 大气能量的主模态变化特征

为得到全球大气能量变化的典型模态，将其进行EOF分解后，总能量的前两个特征向量的方差贡献率分别为27.3%和15.4%，各分能量前两个模态方差和的贡献也均超过40%，因此，下面重点分析前两个模态的时空特征。

5.1 能量的第一模态分析

图7a是整层大气总能量第一模态的空间分布，它与总能量变化趋势的分布较为接近。图7b表明第一模态时间系数PC1序列整体呈现上升趋势，其中1970年代末和1990年代末分别是使其呈现跳跃式增长的两个重要时间节点。尤其在1978年前后，PC1由负转正，即总能量发生了多年代际的变化，这可能与1970年代全球大气环流、地表和海表温度的年代际突变有关（Nitta and Yamada, 1989；Trenberth and Hurrell, 1994）。即全球大部分地区的大气总能量由1978年前的偏少转为偏多，而南极、亚欧大陆北部、非洲北部和赤道中太平洋地区的总能量则由多变少。PC1与全球地面平均气温（图7b）的相关系数达到了0.85，表明地表气温的变化可能会在一定程度上解释总能量变化，也由此可将第一模态理解为全球变暖模态。

通过各分能量的第一模态空间分布（图8）和时间系数（图9）可看出：四种能量的分布型均在1970～1980年间发生了变化，其中潜热能和动能模态的突变时间较早在1974年左右（图9c、d），而内能和位能较迟在1978年左右（图9a、b）。其中内能和位能（图8a、b）对总能量第一模态的贡献主要体现在南北半球的中高纬度，其1978年前（后）的分布型与弱NAM的正（负）位相和强SAM负（正）位相类似（图9a、b）；总能量在低纬地区的空间模态与潜热能接近（图8c），1975年之前（后）印太暖池和南美洲中北部的潜热同全球其他地区相比偏多（少），其中与非洲中北部和赤道中太平洋的反向特征尤其明显（图9c）；动能最主要的空间模态特征为南半球的副热带急流和副极地急流呈相反位项（图8d），两支急流的动能在1973年前（后）的表现为北多（少）南少（多），由于动能总量较小，因此在总能量的模态中体现不明显。

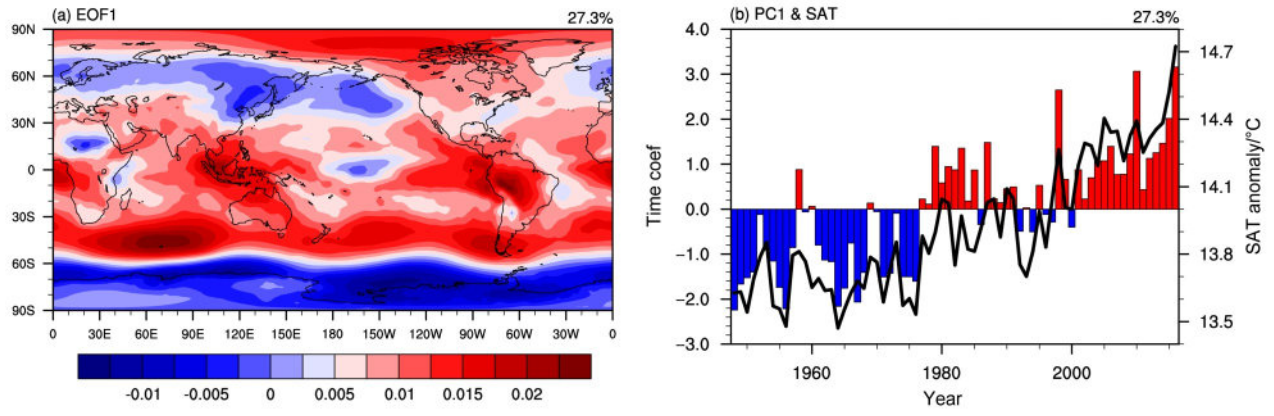

图7 1948～2016年年平均整层大气总能量EOF分解的第一模态的（a）空间分布及其（b）时间系数PC1（红蓝柱状图，左纵坐标）和全球平均地面气温（SAT；折线，右纵坐标）异常的时间序列

Fig. 7 (a) Spatial distribution of the first leading EOF mode (EOF1) of annually vertical-mean total atmospheric energy for the period of 1948–2016. (b) PC1 time series (red and blue bars, left vertical axis) corresponding to the EOF1 and time series of global mean surface air temperature (SAT) anomalies (black fold line, right vertical axis).

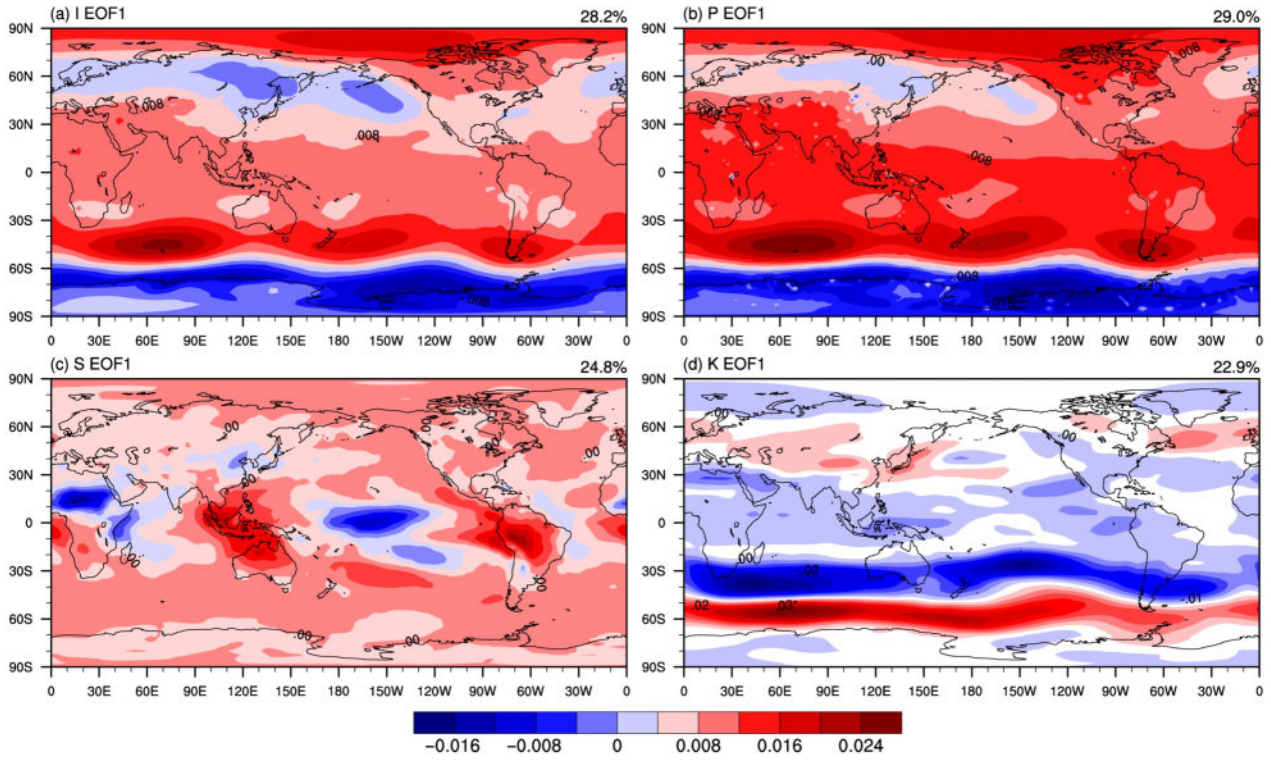

图8 1948～2016年年平均大气各分能量EOF分解的第一模态的空间分布：（a）内能；（b）位能；（c）潜热能；（d）动能

Fig. 8 Spatial distribution of the first leading EOF mode (EOF1) of annually vertical-mean total for each component of atmospheric energy for the period of 1948-2016: (a) Internal energy; (b) potential energy; (c) latent heat energy; (d) kinetic energy

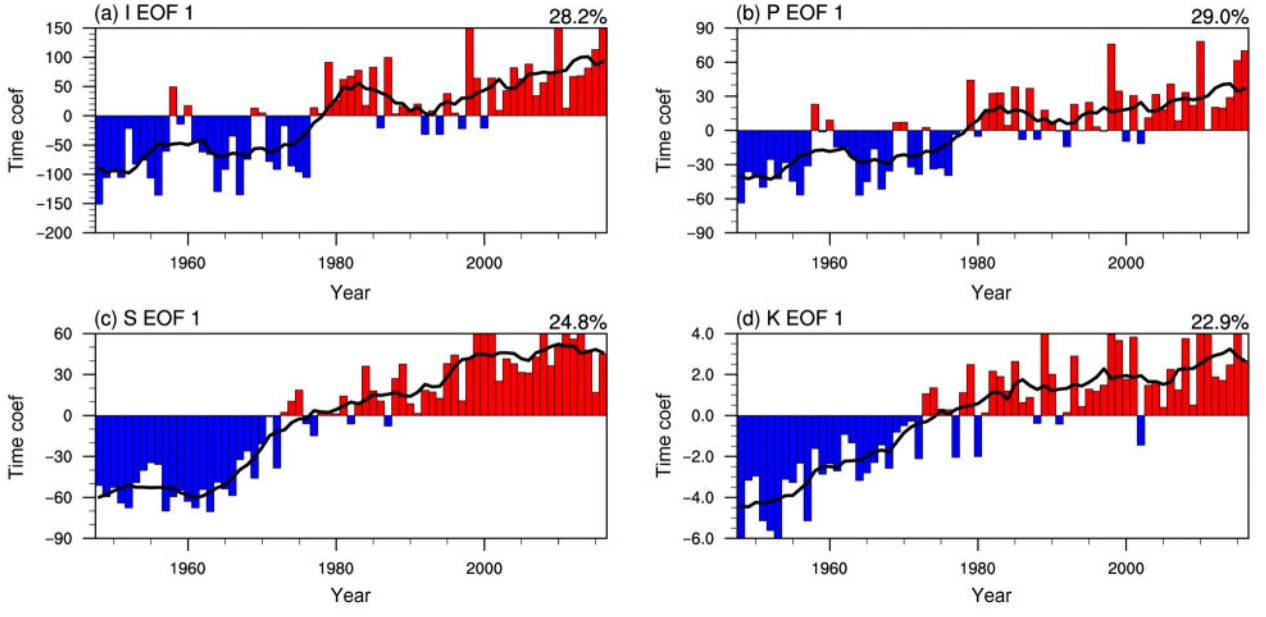

图9 1948～2016年年平均各分能量EOF分解的第一模态的时间系数PC1（红蓝柱状图）时间序列及其13年Gauss低通滤波曲线（折线）：（a）内能；（b）位能；（c）潜热能；（d）动能

Fig. 9 PC1 time series (red and blue bars) corresponding to the EOF1 of annually vertical-mean each atmospheric energy for the period of 1948−2016 and with the corresponding 13-year Gaussian lowpass time series (black fold lines). (a) Internal energy, (b) potential energy, (c) latent heat energy, and (d) kinetic energy.

5.2 能量的第二模态分析

大气总能量第二模态的空间分布（图10a）和时间系数PC2（图10b）从整体上反映了南北极与全球其余各地呈反位相变化特征，并在研究时段内出现两次转折：在1970年前后，全球大部分地区的大气总能量明显变少，而南北极和非洲中北部地区显著增加，尤其是北极地区与南半球副热带地区纬向环状的反位相分布最为明显；直至2002年左右，全球的增多和减少趋势都有所缓解。两极的趋势虽大体一致，但北极的变化强度却远大于南极。

气候的内部变率是影响气候敏感度以及其变化幅度的重要因子（周天军和陈晓龙，2015）。为探究影响总能量第二模态的因素，本文将PC2与大气系统内部主要变率进行了相关分析（表2），发现均呈现较强的相关性，其中NAM与PC2的同期相关系数为0.66。说明同期和前期的大气内部变率信号，都可能会对大气总能量的变化产生影响。

通过各分能量第二模态的空间分布（图11）和时间系数（图12）可发现：内能和位能的时间系数（图12a、b）和PC2较为相似，二者的特征向量（图11a、b）在高纬度大体一致，并与中低纬度相反，且在高纬度地区与强NAM型相似，但位能的SAM型明显强于内能。在1975年前后，内能和位能第二模态的NAM型和SAM型均由负转正，说明发生在七十年代末的这次全球大规模的模态突变时期（李春晖等，2000；刘群群等，2015），内能和位能的前两个模态在南北半球中高纬的分布型均发生了反转，其中，两个模态在北半球的NAM型位相转换相反，而SAM型的位相转换方向相同；在2002年前后，内能和位能第二模态的SAM/NAM型又存在一次由正位相向负位相转换的趋势。潜热能的特征体现为低纬度的部分地区与全球其余各地呈反向变化，具体表现在1963年左右非洲中部、印太暖池、赤道西太平洋和南美洲中部的潜热由多变少，而在21世纪初又由少增多（图11c和图12c）。动能主要呈现出从热带太平洋向南北两半球的经向波列分布，其时间系数也存在明显的多年代际变化特征（图11d和图12d）。由此可知，各能量在第一模态和第二模态的转折次数和变化趋势上均具有独立特征，后续可对其各自模态所表征的物理意义进行深入挖掘。

表2 大气总能量第二模态的时间系数PC2与主要气候内部变率的相关及最高相关出现时间

Table 2 Correlation and the highest correlation time between PC2 time series corresponding to the second leading mode (EOF2) of total atmospheric energy and the major internal variabilities of climate

内部变率	相关系数	最高相关出现时间
NAM	0.66	同期
SAM	0.39	同期
PDO	0.39	超前能量5年
El Niño	0.36	超前能量10年
NAO	0.32	超前能量3年
AMO	−0.44	同期

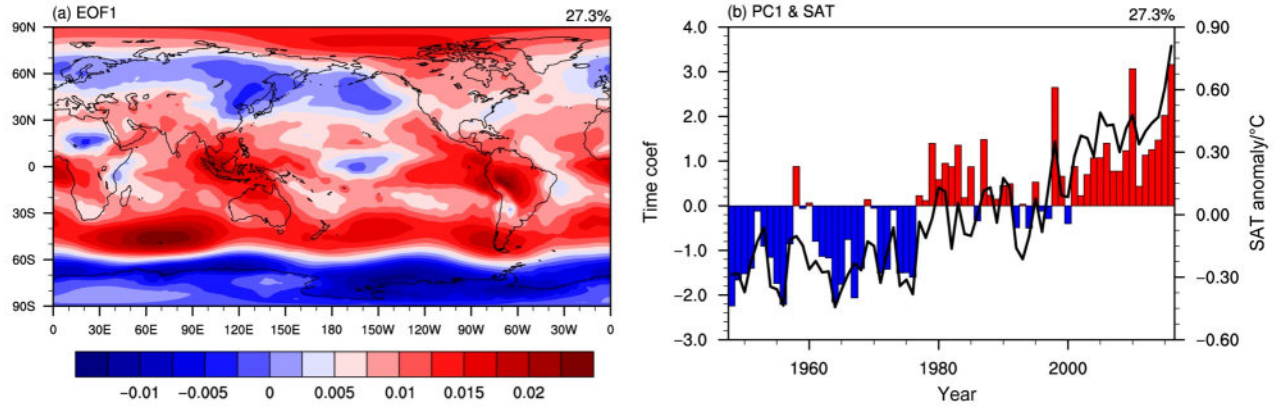

图10 同图7，但为EOF分解的第二模态。（b）中的黑色曲线为PC2的13年Gauss低通滤波

Fig. 10 Same as Fig. 7, but for the second leading mode (EOF2). The black line in (b) corresponds to the 13-year Gaussian lowpass PC2

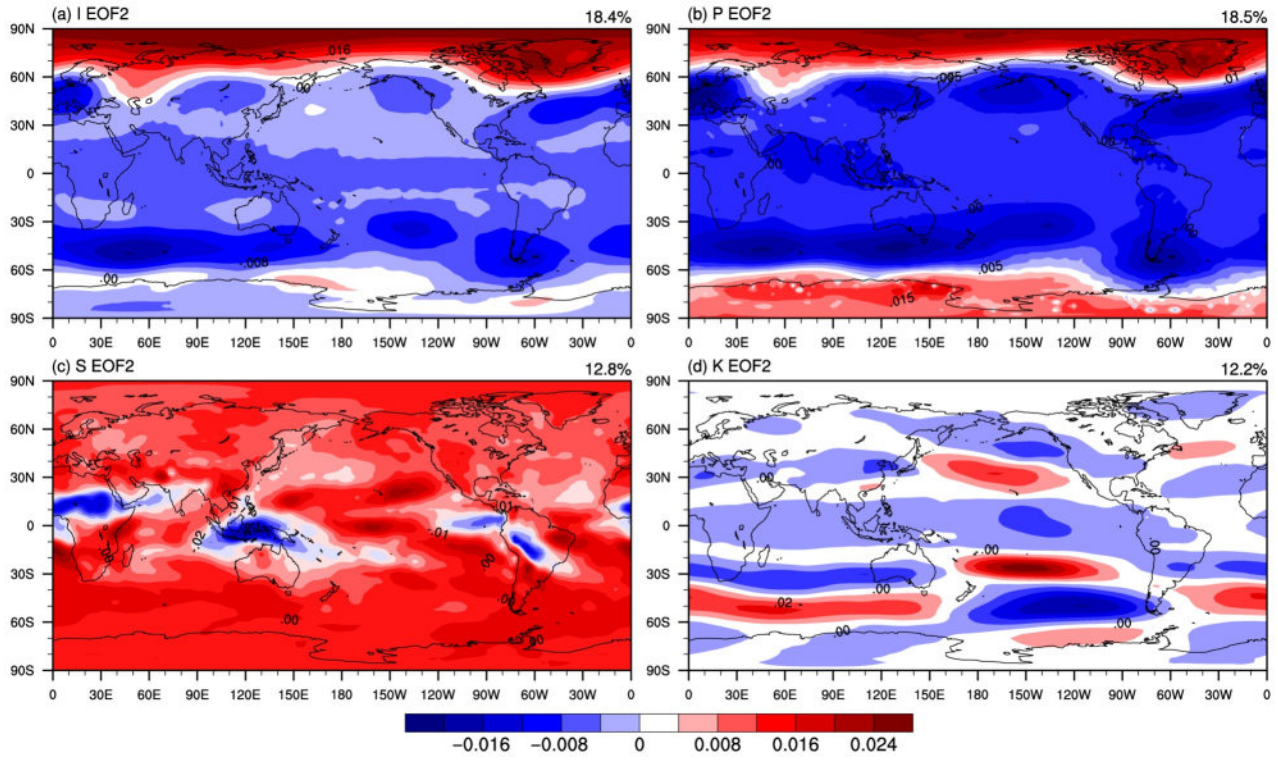

图11　同图8，但为第二模态情况

Fig. 11　Same as Fig. 8, but for the EOF2

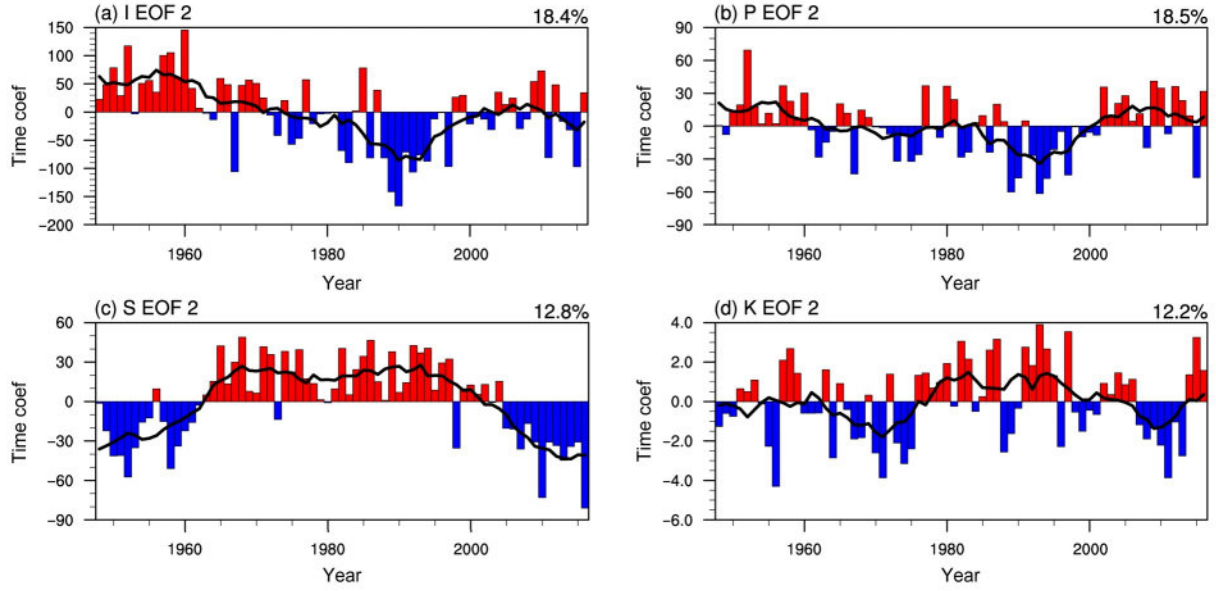

图12　同图9，但为第二模态情况

Fig. 12　Same as Fig. 9, but for the PC2

6　结论

基于1948～2016年NCEP的逐月再分析资料以及NOAA、ICSU等提供的资料，分析了全球整层大气总能量和各分能量长期变化的时空特征，在此基础上探讨了其半球和海陆差异，并考察了不同能量的主导模态，从能量整体特征的角度为气候变化的研究提供了一定的依据。主要结论如下：

（1）总能量的分布呈现从赤道到两极逐渐递减

的特征，并明显受到海陆和地形的影响；其极大值出现在热带地区，极低值区位于南极和青藏高原、格陵兰岛等高海拔地区；全球大部分地区的总能量呈长期增加趋势，而东南极洲、亚欧大陆北部、赤道中太平洋和非洲北部则减少。内能和位能的分布与总能量相似，在南北半球中高纬度地区的变化最为显著；与表层内能的分布相比，从整层的角度出发，可以更好的凸显出由于地形不同（例如青藏高原、格陵兰岛和东非大裂谷等）而造成的能量分布差异。潜热能的极大值区位于热带，其显著变化区主要位于赤道及低纬地区。动能在长波槽和西风急流出口区的分布远大于其他地区；并将前人发现动能在南半球呈现出“双峰”分布的特征，从更长的时间尺度上进行了验证；同时也发现南半球两支西风急流地区的动能呈现出反向变化特征。

（2）在提高数据的精度和时空尺度后，对整层大气各能量的数值进行了重新标定；总能量呈现出显著的阶段性跳跃式增长特征，去趋势后的波动周期为30年左右；同时，火山爆发对大气能量的阶段性减少可能有重要作用；北半球的大气总能量多于南半球，但南北半球间的能量差额呈减少趋势；海洋上空的大气总能量多于陆地，其差额呈增加趋势。

（3）大气各能量第一模态的空间分布与其各自变化趋势的分布较为相似；PC1整体呈现上升趋势，地表气温可能对大气总能量的变化有重要影响；总能量及各分能量的第一模态均在1975年前后发生了年代际突变，表明全球大气能量变化的分布型发生了改变。大气总能量、内能和位能的第二模态从整体上反映出南北极与全球其余各地反位相的变化特征，其空间型在中高纬度与NAM/SAM型较为相似；低纬部分地区的潜热能与全球其余各地呈反向变化；动能主要表现为从热带太平洋向南北两半球的经向波列分布；PC2与大气系统主要内部变率的相关度均很高，表明前期和同期的气候变率对大气能量可能有一定影响；此外，各能量的时间系数在研究时段内都出现了两次及以上的转折，说明时间系数均存在多年代际变化特征。

通过本文的研究，对全球大气能量长期变化的时空特征及其受外源强迫和内部变率的影响有了更为全面的认识。然而，影响气候变化的因子众多，大气能量受气候因子影响的机制还有待深入分析。南北半球能量趋同和海陆能量差额增大现象的验证，以及可能造成的气候影响，也值得进一步探究。此外，对主模态的本质也没有解释完全，今后会继续探究大气能量及其主模态变化与热力强迫、环流场等的联系，以求揭示能量时空特征变化的成因和物理机制。

致谢 感谢在本文的写作过程中薛佳庆、侯兆禄、梁逸爽、方振鑫、徐一丹、余苗、马璇、张亚洲、周欣、左斌、孙润楠、钟权加、李旋、谢青琰、王芬、王月红、谢巍、王晶、王雅琦、宫湛秋、王雪等给予的帮助和有益的讨论。感谢两位审稿专家对本文内容提出的建设性意见。

参考文献（References）

Adam O, Bischoff T, Schneider T. 2016. Seasonal and interannual variations of the energy flux equator and ITCZ. Part II: Zonally varying shifts of the ITCZ [J]. J. Climate, 29(20): 7281−7293. doi:10.1175/JCLI-D-15-0710.1

Bischoff T, Schneider T. 2016. The equatorial energy balance, ITCZ position, and double-ITCZ bifurcations [J]. J. Climate, 29(8): 2997−3013. doi:10.1175/JCLI-D-15-0328.1

董元昌, 李国平. 2015. 大气能量学揭示的高原低涡个例结构及降水特征 [J]. 大气科学, 39(6): 1136−1148. Dong Yuanchang, Li Guoping. 2015. The structure and precipitation characteristics of typical Tibetan Plateau vortices as revealed by energy analysis [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39(6): 1136−1148. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.14263

董文杰, 周天军, 郭彦, 等. 2014. 气候现象及其与未来区域气候变化的联系 [J]. 气候变化研究进展, 10(1): 60−64. Dong Wenjie, Zhou Tianjun, Guo Yan, et al. 2014. Climate phenomena and their relevance for future regional climate change [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 10(1): 60−64. doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.013

高丽, 李建平. 2007. 大气能量有效性的研究进展 [J]. 地球科学进展, 22(5): 486−494. Gao Li, Li Jianping. 2007. Progress in the study of atmospheric energy efficiency [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22(5): 486−494. doi: 10.11867/j. issn. 1001-8166.2007.05.0486

洪汉净, 于泳, 郑秀珍, 等. 2003. 全球火山活动分布特征 [J]. 地学前缘, 10(S1): 11−16. Hong Hanzheng, Yu Yong, Zheng Xiuzhen, et al. 2003. Global volcano distribution: Pattern and variation [J]. Earth Science Frontiers (in Chinese), 10(S1): 11−16. doi: 10.3321/j. issn: 1005-2321.2003.z1.004

IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, UK and New York , NY, USA: Cambridge University Press, 19.

Kiehl J T, Trenberth K E. 1997. Earth’s annual global mean energy budget [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78(2): 197−208. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<0197:EAGMEB>2.0.CO;2

Li Jianping, Wang J X L. 2003. A new North Atlantic Oscillation index and its variability [J]. Adv. Atmos. Sci., 20(5): 661−676. doi:10.1007/

BF02915394

李建平, 高丽. 2006. 扰动位能理论及其应用——扰动位能的概念、表达及其时空结构 [J]. 大气科学, 30(5): 834−848. Li Jianping, Gao Li. 2006. Theory on perturbation potential energy and its applications—Concept, expression and spatio−temporal structures of perturbation potential energy [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30(5): 834−848. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.05.12

李春晖, 万齐林, 林爱兰, 等. 2010. 1976年大气环流突变前后中国四季降水量异常和温度的年代际变化及其影响因子 [J]. 气象学报, 68(4): 529−538. Li Chunhui, Wan Qilin, Lin Ailan, et al. 2010. The interdecadal contrast characteristics of the rainfall and temperature in China around the atmospheric circulation carastrophe in 1976 and its affecting factors [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (4): 529−538. doi:10.11676/qxxb2010.051

李建平, 任荣彩, 齐义泉, 等. 2013. 亚洲区域海—陆—气相互作用对全球和亚洲气候变化的作用研究进展 [J]. 大气科学, 37(2): 518−538. Li Jianping, Ren Rongcai, Qi Yiquan, et al. 2013. Progress in air−land−sea interactions in Asia and their role in global and Asian climate change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37(2): 518−538. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12322

李建平, 汪秋云, 李艳杰, 等. 2016. 基于能量学的热带气旋气候学研究进展和展望 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 52(6): 705−713. Li Jianping. Wang Qiuyun, Li Yanjie, et al. 2016. Climatological research on tropical cyclones in terms of energetics: Review and perspectives [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science) (in Chinese), 52(6): 705−713. doi:10.16360/j.cnki.jbnuns.2016.06.007

刘群群, 何文平, 顾斌. 2015. 非线性动力学方法在气候突变检测中的应用 [J]. 物理学报, 64(17): 179201 Liu Qunqun, He Wenping, Gu Bin. 2015. Application of nonlinear dynamical methods in abrupt climate change detection [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 64 (17): 179201. doi:10.7498/aps.64.179201

Lorenz E N. 1955. Available potential energy and the maintenance of the general circulation [J]. Tellus, 7(2): 157−167, doi:10.1111/j.2153-3490.1955.tb01148.x.

卢乃锰, 谷松岩. 2016. 气象卫星发展回顾与展望 [J]. 遥感学报, 20 (5): 832−841. Lu Naimeng, Gu Songyan. 2016. Review and prospect on the development of meteorological satellites [J]. Journal of Remote Sensing (in Chinese), 20(5): 832−841. doi: 10.11834/jrs320166194

罗连升, 杨修群. 2003. 从有效位能变化来分析El Niño的年代际变化 [J]. 气象科学, 23(1): 1−11. Luo Liansheng, Yang Xiuqun. 2003. Interdecadal change of El Niño as seen from variations of available potential energy [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 23(1): 1−11. doi: 10.3969/j. issn. 1009-0827.2003.01.001 Niño

吕晓娜, 方之芳, 黄勇勇, 等. 2009. 全球气候变暖中南北半球海冰变化的差异 [J]. 气象, 35(1): 87−96. Lü Xiaona , Fang Zhifang, Huang Yongyong, et al. 2009. Different changes between arctic and Antarctic sea ice under global warming [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35(1): 87−96. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2009.1.011

Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78(6): 1069−1079. doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW>2.0.CO;2

Margules M. 1903. über die Energie der Stürme [M]. Vienna: Jahrb. Zentralanst. Meterol., 40, 1−26.

Nan S L, Li J P. 2003. The relationship between the summer precipitation in the Yangtze River valley and the boreal spring Southern Hemisphere annular mode [J]. Geophys. Res. Lett., 30(24): 2266. doi:10.1029/2003GL018381

Nitta T, Yamada S. 1989. Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 67(3): 375−383. doi:10.1163/9789004251243_010

Oort A H. 1983. Global atmospheric circulation statistics, 1958−1973 [R]. NOAA Professional Paper, 14: 180−226.

Pan Y F, Li L M, Jiang X, et al. 2017. Earth’s changing global atmospheric energy cycle in response to climate change [J]. Nature Communications, 8: 14367. doi:10.1038/ncomms14367

Peixóto J P, Oort A H. 1974. The annual distribution of atmospheric energy on a planetary scale [J]. J. Geophys. Res., 79(15): 2149−2159. doi:10.1029/JC079i015p02149

Peixóto J P, Oort A H. 1995. 气候物理学[M]. 吴国雄, 刘辉, 译. 北京: 气象出版社, 289−291. Peixóto J P, Oort A H. 1995. Physics of Climate (in Chinese) [M]. Wu Guoxiong, Liu Hui, trans. Beijing: Meteorological Publishing House, 289−291.

秦大河, Stocker T, 259名作者和TSU. 2014. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 10(1): 1−6. Qin Dahe, Stocker T, 259 Authors and TSU. 2014. Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 10(1): 1−6. doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.001

曲维政, 黄菲, 赵进平, 等. 2006. 火山活动对北半球平流层气候异常变化的影响 [J]. 地球物理学进展, 21(2): 650−659. Qu Weizheng, Huang Fei, Zhao Jinping, et al. 2006. The influence of volcanic activities on the abnormal changes of climate in stratosphere of the Northern Hemisphere [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 21 (2): 650−659. doi:10.3969/j.issn.1004-2903.2006.02.049

Robock A. 2000. Volcanic eruptions and climate [J]. Rev. Geophys., 38 (2): 191−219. doi:10.1029/1998RG000054

施晓晖, 徐祥德. 2008. 1951−2002年全球陆地气温和降水的年代际趋势转折特征 [J]. 自然科学进展, 18(9): 1016−1026. Shi Xiaohui, Xu Xiangde. 2008. The global land decadal trend turning characteristics of air temperature and precipitation in 1951−2002 [J]. Progress in Natural Science (in Chinese), 18(9): 1016−1026. doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2008.09.008

Trenberth K E. 1991. Storm tracks in the Southern Hemisphere [J]. J. Atmos. Sci., 48(19): 2159−2178. doi:10.1175/1520-0469(1991)048<2159:STITSH>2.0.CO;2

Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere-ocean

variations in the Pacific [J]. Climate Dyn., 9(6): 303−319. doi: 10.1007/BF00204745

汪雷, 李建平, 郭彦. 2012. 大气分层扰动位能控制方程及其应用——南海夏季风活动的能量收支 [J]. 大气科学, 36(4): 769−783. Wang Lei, Li Jianping, Guo Yan. 2012. Governing equations of atmospheric layer perturbation potential energy and its applications—Energy budget of the South China Sea summer monsoon activity [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(4): 769−783. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11187

效存德. 2008. 南极地区气候系统变化: 过去、现在和将来 [J]. 气候变化研究进展, 4(1): 1−7. Xiao Cunde. 2008. Changes in Antarctic climate system: Past, present and future [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 4(1): 1−7. doi: 10.3969/j. issn. 1673-1719.2008.01.001

肖栋, 李建平. 2011. 皮纳图博火山爆发对20世纪90年代初平流层年代际变冷突变的影响机理 [J]. 科学通报, 56(4−5): 333−341. Xiao Dong, Li Jianping. 2011. Mechanism of stratospheric decadal abrupt cooling in the early 1990s as influenced by the Pinatubo eruption [J]. Chinese Science Bulletin, 56(8): 772−780. doi:10.1007/s11434-010-4287-9

杨大升, 刘余滨, 刘式适. 1983. 动力气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 303−304. Yang Dasheng, Liu Yubin, Liu Shikuo. 1983. Dynamical Meteorology (in Chinese)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 303−304.

杨钧烽. 2016. 中纬度临近空间大气风场变化特性研究 [D]. 中国科学院国家空间科学中心博士学位论文. Yang Junfeng. 2016. Researches on the variations of atmospheric winds in near space at mid-latitude [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), National Space Science Center, the Chinese Academy of Sciences.

张华, 黄建平. 2014. 对IPCC第五次评估报告关于人为和自然辐射强迫的解读 [J]. 气候变化研究进展, 10(1): 40−44. Zhang Hua, Huang Jianping. 2014. Interpretation of the IPCC fifth assessment report on anthropogenic and natural radiative forcing [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 10(1): 40−44. doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2014.01.009

Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900−93 [J]. J. Climate, 10(5): 1004−1020. doi:10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2

周天军, 陈晓龙. 2015. 气候敏感度、气候反馈过程与2℃升温阈值的不确定性问题 [J]. 气象学报, 73(4): 624−634. Zhou Tianjun, Chen Xiaolong. 2015. The uncertainty in the 2°C warming threshold issue as related to climate sensitivity and climate feedback [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(4): 624−634. doi: 10.11676/qxxb2015.057