

# 中国东南区域闪电活动特征及其与大气环境参数的关系

王基鑫<sup>1</sup>, 祝宝友<sup>1</sup>, 马明<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 中国科学院近地空间环境重点实验室, 安徽合肥 230026;

2. 中国科学技术大学安徽蒙城地球物理国家野外科学观测研究站, 安徽合肥 230026)

**摘要:**利用近18年(1997~2013)的星载 LIS/OTD(lightning imaging sensor and optical transient detector)闪电观测资料、NCEP/NCAR(National Center for Environmental Protection/National Center for Atmospheric Research)和 ERA-Interim 再分析资料,对北纬 30°以南、东经 100°以东的中国陆地地区(17.5~30°N, 100~122.5°E)的闪电活动特征及其与大气环境因素的关系进行了分析。结果表明:中国东南闪电高发区闪电活动季节性特征明显,春夏两季为闪电高发期,厄尔尼诺事件对其闪电活动的年际变化有较强的影响,在此期间冬春季闪电活动有明显的增强,东南闪电高发区闪电活动与地面温度、700~400 hPa 平均相对湿度、850 hPa 位温等热力学参数有明显正相关,与多种稳定度参数有强相关,显示出大气层结不稳定性越大,闪电活动越强。进一步通过多元逐步线性回归方法,建立了东南闪电高发区区域平均闪电密度与地面温度、CAPE(convective available potential energy)、BR(Bowen ratio)、LI(lifted index)、SI>Showalter index)的回归方程,有助于利用多种参数开展预报区域闪电活动。

**关键词:**闪电活动特征;热力学参数;稳定度参数;回归方程

**中图分类号:**P427.3      **文献标识码:**A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2017.05.005

**引用格式:**王基鑫,祝宝友,马明. 中国东南区域闪电活动特征及其与大气环境参数的关系[J]. 中国科学技术大学学报,2017,47(5):403-412,434.

WANG Jixin, ZHU Baoyou, MA Ming. Characteristics of lightning activity and its relationship with the atmospheric environment parameters in Southeast China[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2017,47(5):403-412,434.

## Characteristics of lightning activity and its relationship with the atmospheric environment parameters in Southeast China

WANG Jixin<sup>1</sup>, ZHU Baoyou<sup>1</sup>, MA Ming<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China,

CAS Key Laboratory of Geospace Environment, Hefei 230026, China;

2. Mengcheng National Geophysical Observatory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Based on space-borne lightning observation data from Lightning Imaging Sensor (LIS) and Optical Transient Detector (OTD), and reanalysis data of National Center for Environmental Protection/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) and ERA-Interim in an 18-year period from 1997 to 2013, the lightning activity over southeastern China (17.5~30°N, 100~122.5°E) and its

**收稿日期:**2016-04-12; **修回日期:**2016-04-29

**基金项目:**公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306017),国家重点基础研究发展(973)计划(2014CB441404),中央高校基本科研业务费专项资金资助。

**作者简介:**王基鑫,男,1990年生,硕士生。研究方向:雷电气候学。E-mail:wangjix@mail.ustc.edu.cn

**通讯作者:**马明,博士/副教授。E-mail:mingma@ustc.edu.cn

associations with atmospheric environmental factors were investigated. The results indicate that the lightning activities show strong seasonal variabilities with high frequency of lightning events in the spring and summer. On the inter-annual time scale, the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) has a significant impact on lightning variability. The El Niño events can significantly intensify the lightning activity in winter and spring. The high frequency of lightning events in southeastern China is associated with the increase of thermodynamic parameters, such as surface air temperature, 700~400 hPa averaged relative humidity and 850 hPa potential temperature. The atmospheric stability parameters are also closely related to lightning activity, and a larger unstable atmospheric layer is associated with a stronger lightning activity. Furthermore, multivariate step linear regression is applied to establish the relationship between predictor variables (e.g., surface air temperature, convective available potential energy, Bowen ratio, lifted index and Showalter index) and prediction (averaged lightning activity concentration). The multiple stepwise linear regression equation is beneficial for regional lightning activity forecast.

**Key words:** characteristics of lighting activity; thermodynamic parameter; stability parameter; regression equation

## 0 引言

闪电是大气中的超长距离强烈放电过程,通常伴随着强对流天气过程而发生.随着人类社会经济的迅速发展和现代化水平的逐渐提高,尤其是电子、通讯等高新技术产业的迅猛发展,雷电灾害已经被联合国列为“最严重的十种自然灾害之一”,国际电工委员会称之为“电子化时代的一大公害”.但闪电对维持地球和电离层之间的电路平衡、NO<sub>x</sub>的生成都起着非常重要的作用<sup>[1-8]</sup>.近年来,全球和区域闪电活动的气候学特征以及雷电活动与天气、气候变化的相互关系是人们十分关注的研究课题,越来越多的人已经认识到闪电活动在天气和气候变化研究中的重要性.

在关于中国地区的闪电气候学特征的研究方面,李照荣等<sup>[9]</sup>和冯建英等<sup>[10]</sup>利用西北地区的雷暴日资料分析得到了西北地区的雷暴活动年变化都为单峰型,地理分布呈三大中心区,地形地势是影响该地区雷暴的主要因子等结论.易燕明等<sup>[11]</sup>、冯桂力等<sup>[12]</sup>、孙颀<sup>[13]</sup>、邓德文等<sup>[14]</sup>利用不同省份的雷暴日资料分析得到了不同省份的雷暴活动气候时空分布特征.郟秀书等<sup>[6,15]</sup>使用卫星资料对全球典型区域和青藏高原的闪电活动进行了分析研究.马明等<sup>[16]</sup>、袁铁等<sup>[17]</sup>通过卫星资料发现中国陆地闪电密度分布区域性差异显著,闪电密度有随海陆距离和纬度的变化趋势,有明显的季节变化和日变化.同时许多学者对闪电活动与天气、气候变化的相互关系进行了研究.Toumi 等<sup>[18]</sup>发现青藏高原春季闪电

活动受地面热力参量调制,鲍恩比和感热通量促进了对流有效位能向对流活动的有效转化.马明等<sup>[19]</sup>研究了全球闪电活动对气温变化的响应,得到了全球不同地区对于气温变化的响应特征.张义军等<sup>[20]</sup>、郟秀书等<sup>[7]</sup>、袁铁等<sup>[21]</sup>对青藏高原的闪电活动与大气层结及热通量等相关气象要素进行了研究,分析发现闪电活动与降水、对流最大不稳定能量、地表总热通量存在较好的相关性.郑栋等<sup>[22]</sup>利用北京地区的闪电定位资料和探空资料,分析发现潜在-对流稳定度参数、抬升指数、对流有效位能以及 700hPa 相当位温与闪电活动有较好的相关.

综上所述,一些学者利用不同闪电观测资料研究了我国不同区域的闪电气候学时空分布特征,另一些学者利用卫星观测资料、地基闪电观测资料研究了我国闪电活动与大气环境要素的关系.以上研究鲜有利用长时间尺度的卫星观测的闪电资料研究我国闪电频发的南方地区闪电活动的气候学分布特征及其与大气环境因素的关系.因此,本文将选取中国闪电活动频发的北纬 30°以南、东经 100°以东的陆地地区(17.5~30°N, 100~122.5°E)为研究区域,利用近 18 年卫星观测闪电资料研究该地区闪电活动与大气环境因素的关系.首先,给出本文研究区域闪电活动时空分布特征;其次,探讨研究区域闪电活动与大气环境因素的相互关系;最后,从多个大气环境表征参数中,挑选出与研究区域闪电活动相关关系较好的表征参数,利用逐步线性回归方法,得到区域平均闪电密度气候回归方程,探讨方程适用性.

## 1 资料与方法

本文所用的格点化卫星闪电数据来源于美国 Marshall 空间飞行中心的全球水文资源中心,是光学瞬态探测器(optical transient detector, OTD)观测的全球南北 75°纬度之间的闪电资料(1995 年 4 月至 2000 年 3 月)和闪电成像传感器(lightning imaging sensor, LIS)观测的全球南北 35°纬度之间的闪电资料(1997 年 12 月至 2013 年 2 月)的融合结果<sup>[23-26]</sup>.该数据经过探测器效率综合订正,数据中闪电为总闪电,其中平均闪电密度资料(LIS/OTD 0.5 degree high resolution full climatology, HRFC)的空间分辨率为 0.5°×0.5°,使用的逐月数据(LIS/OTD 2.5 degree low resolution monthly time series, LRMTS)的空间分辨率为 2.5°×2.5°.考虑到探测卫星完成一个完整的本地日循环观测大概要 50 天左右,为了保证闪电资料的代表性,本文分析中将原始逐月数据处理为季度平均值,季节范围划分如下:春季为 3 至 5 月,夏季为 6 至 8 月,秋季为 9 至 11 月,冬季为 12 月至次年 2 月.

文中计算大气环境参数所用原始气象数据来自于两部分:一部分来自美国国家环境预报中心的 NCEP/NCAR 再分析资料<sup>[27]</sup>,包括月平均地面和不同高度气温、比湿、压强和每日地面抬升指数;另外一部分来自欧洲中期天气预报中心的 ERA-

Interim 资料<sup>[28]</sup>,包括月平均大气不稳定能量、每日潜热通量和每日感热通量.利用两部分资料计算得到表征大气环境的热力学和稳定度参数:热力学参量包括地面温度、地面湿球温度、地面湿度、850 hPa 位温、850 hPa 相当位温<sup>[29]</sup>、850 hPa 假相当位温<sup>[30]</sup>、700~400 hPa 平均相对湿度和鲍恩比<sup>[31]</sup>(Bowen ratio, BR);稳定度表征参数包括对流有效势能<sup>[32]</sup>(convective available potential energy, CAPE)、K 指数<sup>[33]</sup>、KO 指数<sup>[34]</sup>、地面抬升指数<sup>[35]</sup>(lifted index, LI)、深对流指数<sup>[36]</sup>(deep convective index, DCI)、位势不稳度指数<sup>[37]</sup>(potential instability index, PII)、湿润指数<sup>[38]</sup>(humidity index, HI)和沙氏指数<sup>[39-40]</sup>(Showalter index, SI).表 1 给出了部分参数的计算方法.所选时段与前面闪电的卫星观测资料时段相同.

本文在研究闪电活动时空分布特征时采用了经验正交分解(empirical orthogonal function, EOF).EOF 可以把随时间变化的气象要素场时空分解为空间模态和时间系数,空间模态在一定程度上反映了要素空间分布特征,时间系数反映了相应空间模态的时间序列变化权重大小.该方法具有收敛速度快、无需固定函数作基函数,并且可将气象要素场信息浓缩到其中几个模态上等优点.其常用于气象要素场时空变化特征及气候变化诊断的研究<sup>[41-47]</sup>.

表 1 大气环境参数计算目录

Tab.1 The atmospheric environment parameters calculation directory

参数	等式	参考文献
假相当位温	$\theta_{SE} = \theta_d \exp(r_s L_v / (c_{pd} T))$	[30]
鲍恩比	$BR = H / LE$	[31]
CAPE	$CAPE = g \int_e^{Z_{EL}} \left( \frac{T_{vp} - T_{vc}}{T} \right) dz$	[32]
K 指数	$K = (T_{950} - T_{500}) + T_{d950} - (T - Td)_{700}$	[33]
KO 指数	$KO = 0.5(\theta_{e500} + \theta_{e700}) - 0.5(\theta_{e900} + \theta_{e1000})$	[34]
抬升指数	$LI = T_{e500} - T_{p500}$	[35]
深对流指数	$DCI = (T + T_d)_{850} - LI$	[36]
位势不稳度指数	$PII = (\theta_{e925} - \theta_{e500}) / (Z_{500} - Z_{925})$	[37]
湿润指数	$HI = (T - Td)_{950} + (T - Td)_{700} + (T - Td)_{500}$	[38]
沙氏指数	$SI = T_{500} - T'_{950 \rightarrow 500}$	[39,40]

## 2 研究区域

图 1 给出了卫星观测得到的中国陆地年平均闪

电密度分布,可见北纬 30°以南、东经 100°以东陆地地区是我国闪电频发地区,闪电密度普遍在 10 fl · km<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup> 以上,闪电密度最高值 33.67 fl · km<sup>-2</sup> · a<sup>-1</sup>

在广东省,闪电密度最低值  $1.41 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  在四川省南部,区域平均闪电密度为  $10.13 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . 本文选择北纬  $30^\circ$  以南、东经  $100^\circ$  以东图 1 白框内的我国陆地地区 ( $17.5 \sim 30^\circ \text{N}$ ,  $100 \sim 122.5^\circ \text{E}$ ) 作为本文研究区域,简称该研究区域为东南闪电高发区,探讨该地区闪电分布特征及其与大气环境因素的关系.

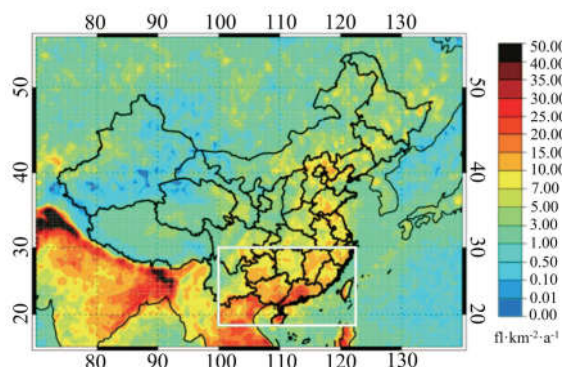


图 1 中国陆地闪电密度分布(单位:  $\text{fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

Fig.1 Distribution of lightning density in China(unit:  $\text{fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )

### 3 主要结果

#### 3.1 东南闪电高发区闪电活动时空分布特征

上文中已提到东南闪电高发区闪电活动频繁,但闪电密度分布并不均匀.进一步研究其闪电活动时空分布特征有助于更清晰地认识和了解东南闪电高发区闪电活动空间分布特征和时间变化特征.本

文对 1996 年到 2012 年逐年闪电密度距平场进行 EOF 分解:第一模态方差贡献 37.0%,第二模态方差贡献 21.2%,前两个模态累计方差贡献 58.2%,前两个模态基本可以说明东南闪电高发区闪电时空分布特征.东南闪电高发区闪电 EOF 分解的第一(图 2(a))和第二(图 2(b))空间模态的图 2 中,第一模态分布中北纬  $30^\circ$  以南的大部分陆地地区都为正值区,广西、海南、广东西部为负值,广西北部、广东中部为正负分界线,其梯度变化明显.第二模态中北纬  $30^\circ$  以南地区均为负值,负值中心在广西南部 and 广东东部.图 3(a)为第一模态时间系数,2000 年前基本为负值,2000 年后除了 2005、2006 和 2012 三年为负,其他年份时间系数均为正,时间系数为正的年份第一模态为正值区域闪电活动增加.图 3(b)为第二模态时间系数,1997,1998,2002,2004、2005,2006、2009,2012 为负值年份,第二模态空间分布为负,可见这些年份东南闪电高发区闪电活动频繁.通过对比分析各个季节的闪电密度距平 EOF 分解的模态,本文发现逐年闪电密度距平场第一模态与夏季闪电密度距平场第一模态相似,而第二模态与春季闪电密度距平场分布第一模态相似.可见,第一模态主要体现了我国夏季闪电活动变化的分布情况,第二模态更好地体现了我国春季闪电活动变化的分布情况.为此,本文分季节讨论了东南闪电高发区逐年平均闪电密度的变化(图 4).

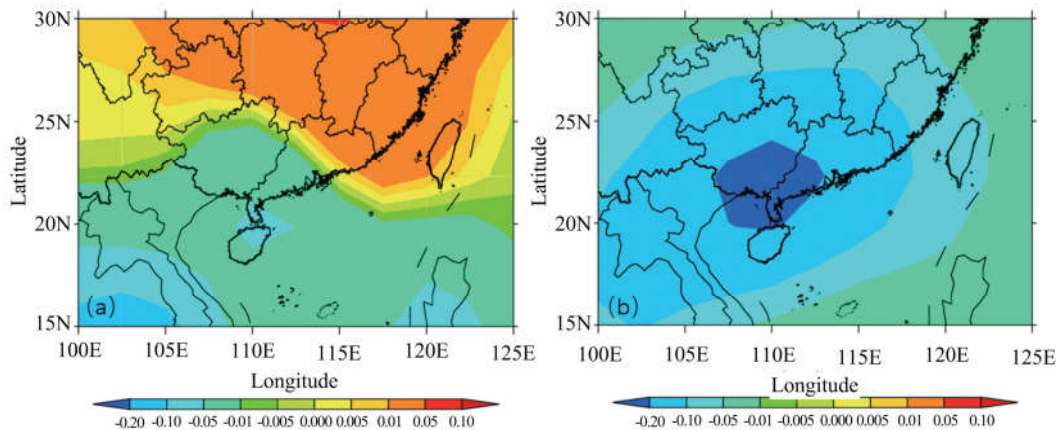


图 2 东南闪电高发区闪电 EOF 分解的第一(a)和第二(b)空间模态

Fig.2 The first(a) and second(b) modes of EOF spatial patterns of lightning activities in the Southeast China

与我国整体闪电活动多发季节为夏、秋季不同<sup>[17,48-50]</sup>,从东南闪电高发区年平均和各季节逐年闪电密度(图 4)可知:春、夏季是东南闪电高发区闪电频发季节.图 4 中平均年闪电密度为  $8.93 \text{ fl} \cdot$

$\text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ .各个季节闪电活动中夏季平均闪电密度最高,为  $16.07 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;春季次之,为  $12.43 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ;秋季平均闪电密度为  $5.55 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,次高于冬季的  $1.67 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ .值



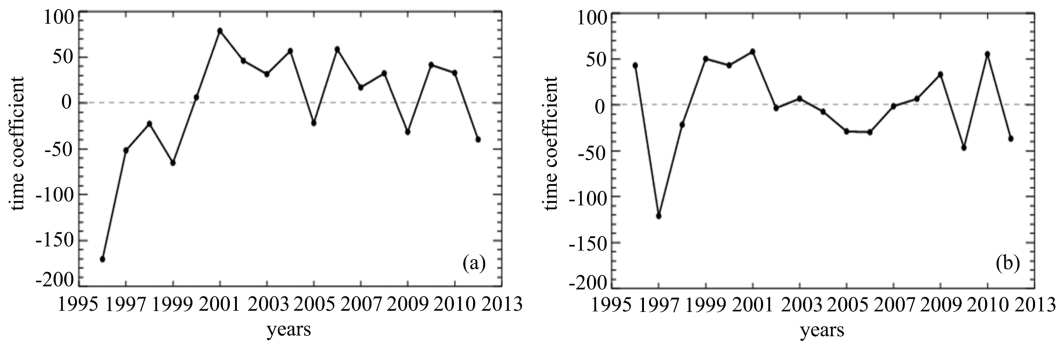


图 3 东南闪电高发区闪电第一(a)、第二(b)时间系数曲线

Fig.3 The first(a)and second(b) principal components of lighting activities in the Southeast China

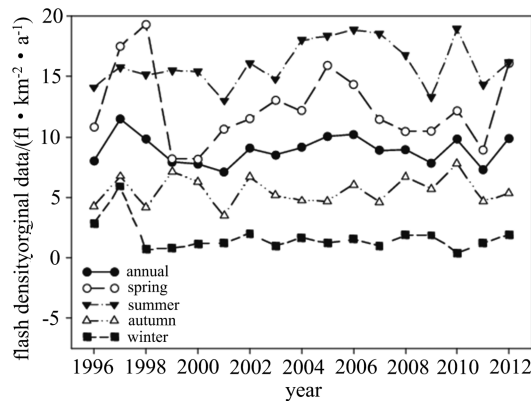


图 4 1996~2012 年东南闪电高发区每年和各季节逐年闪电密度

Fig.4 The time series of annual and seasonal lighting density during 1996~2012 in the Southeast China

得指出的是,在厄尔尼诺发生的年份(1997/1998, 2002/2003, 2004/2005, 2006/2007, 2009/2010),东南闪电高发区闪电密度普遍增加,春季闪电密度增加明显,在强厄尔尼诺年 1997/1998 年年平均闪电密度分别为  $11.49, 9.83 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 春季分别为  $17.50, 19.30 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 夏季分别为  $15.78, 15.15 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 秋季分别为  $6.76, 4.18 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 冬季分别为  $5.93, 0.70 \text{ fl} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 且春季闪电密度大于夏季闪电密度.春季和冬季闪电密度变化明显,这与马明等<sup>[41]</sup>研究得到的 1997/1998 厄尔尼诺期间中国南部闪电活动春冬两季闪电密度变化幅度较大的结论是相同的.可见,厄尔尼诺对东南闪电高发区的闪电活动有重要的影响,对春季闪电活动影响强于其他季节,而强厄尔尼诺对冬春季闪电活动影响强于对夏秋季的影响.

### 3.2 东南闪电高发区闪电活动与大气环境因素的关系

闪电作为强对流天气的伴随现象,其发生与温度、水汽及上升气流等大气的环境因素有密切的联

系.研究闪电活动与大气环境因素的相互关系对于闪电预报和预警具有重要意义.以下将探讨东南闪电高发区的闪电活动与表征大气环境因素的热力学参数和稳定度参数的关系.

图 5 给出了 1995~2012 年逐季节的东南闪电高发区闪电密度与热力学参数地面温度和 850 hPa 位温的相关系数分布.可以看到东南闪电高发区闪电密度与地面温度、850 hPa 位温均通过 99% 的显著性检验( $R$  大于 0.31),为正相关,即地面温度越高,850 hPa 位温越高,闪电密度越高,且与 850 hPa 位温相关系数比与地面温度的相关系数更大.与地面温度相关系数都在 0.70 以上,区域平均相关系数 0.80,相关系数高值中心在四川南部和赣、闽、浙三省交界处,相关系数分别为 0.91, 0.89.与 850 hPa 位温相关系数普遍在 0.75 以上,区域平均相关系数 0.84,相关系数高值中心在四川,相关达到了 0.93,另一个高值中心在江浙沪地区,相关系数是 0.86.

图 6 给出了东南闪电高发区闪电密度与稳定度参数 CAPE 和 SI 的相关系数分布.可以看到该地区

逐季节闪电密度与 CAPE 为正相关,CAPE 值越大,大气层结越不稳定,闪电密度越高,相关系数普遍在 0.85 以上;与 SI 为负相关,SI 值越小,大气层

结越不稳定,闪电密度越大,它们的相关系数都在  $-0.80$  以上.区域平均相关系数分别为 0.86,  $-0.82$ ,最大相关系数分别为 0.96,  $-0.88$ .

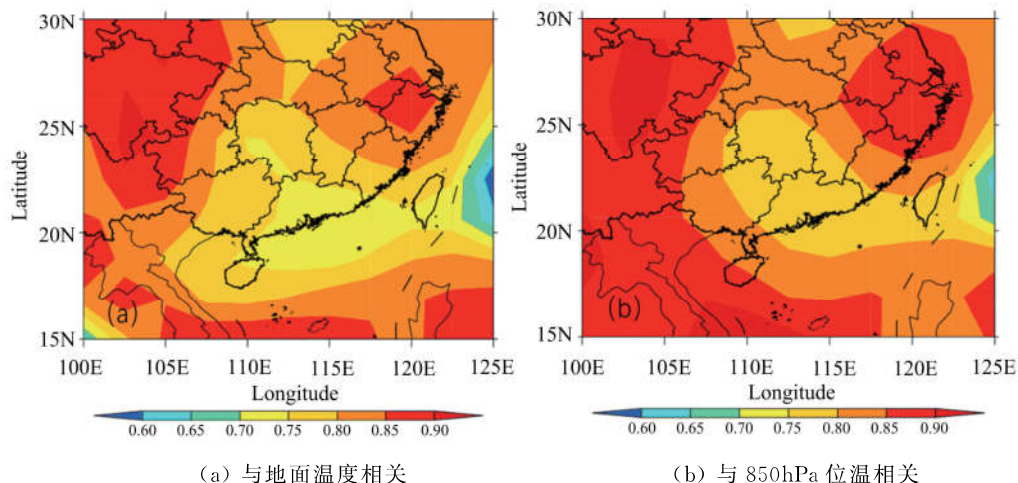


图 5 东南闪电高发区闪电密度与热力学参数相关系数分布

Fig.5 Distribution of correlation coefficient between lightning density and thermodynamic parameters in the Southeast China

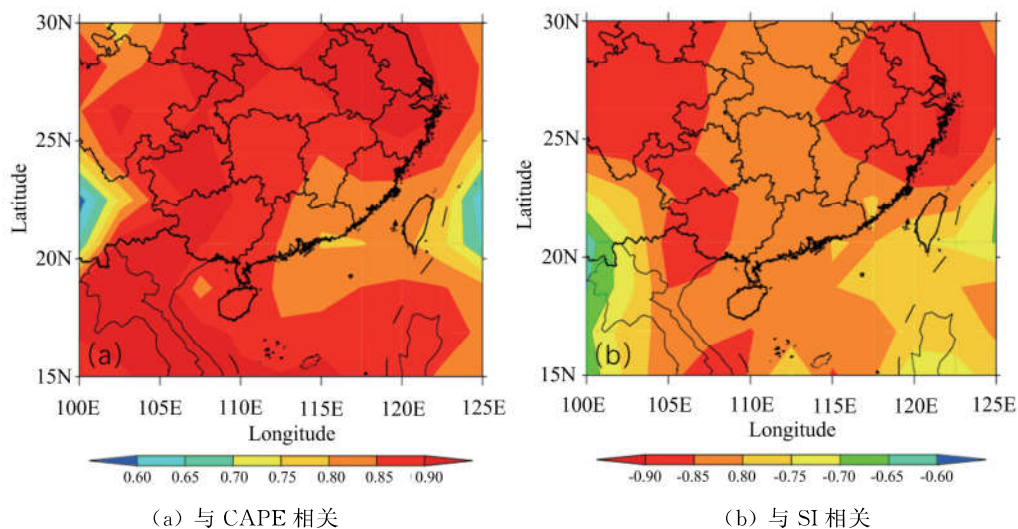


图 6 东南闪电高发区闪电密度与稳定度参数相关系数分布

Fig.6 Distribution of correlation coefficient between lightning density and stability parameters in the Southeast China

本文计算了东南闪电高发区闪电密度与各个热力学参数和稳定度参数相关系数后,取相关系数区域平均值得到了区域平均相关系数(表 2),东南闪电高发区闪电密度与所有的参数相关系数区域均值都通过了 99%置信度的显著性检验.与热力学参数中的地面温度、地面湿球温度、850 hPa 位温、850 hPa 相当位温、850 hPa 假相当位温的相关系数大于 0.75,与含有中层湿度信息参数的 700 ~ 400 hPa 平均相对湿度相关系数 0.64 要高于与地面湿度的相关系数 0.39.东南闪电高发区闪电活动与多个热力学参数都为正相关关系,地面温度越高,

700~400 hPa 中层大气相对湿度越大,850 hPa 位温越大,对应东南闪电高发区闪电密度越高,闪电活动越活跃.需指出的是对于热力学参数中的 BR,东南闪电高发区闪电密度与其成负相关关系.稳定度参数中,CAPE、DCI、K 指数、PII 4 个参数其值越大时,大气层结越不稳定,越容易发生对流,越有助于闪电形成.东南闪电高发区闪电密度与 CAPE、DCI、K 指数、PII 呈正相关,相关系数最低为 0.79,即 4 个参数其值越大时闪电密度越高.LI、KO 指数、HI 和 SI 其值越小时,大气层结越不稳定,越容易发生对流,越有助于闪电形成,所以区域平均相关

系数为负值,呈负相关关系.热力学参数中,东南闪电密度与 850 hPa 位温的区域平均相关系数 0.84

最大.稳定度参数中,东南闪电密度与 CAPE 的区域平均相关系数 0.86 最大.

表 2 东南闪电高发区闪电密度与不同大气环境参数的区域平均相关系数

Tab.2 The regional average correlation coefficient between lightning density and atmospheric environmental parameters in the Southern China

参数类型	参数	相关系数	参数类型	参数	相关系数
热力学参数	地面温度	0.82	稳定度参数	CAPE	0.86
	地面湿球温度	0.78		LI	-0.80
	地面湿度	0.39		DCI	0.81
	700~400 hPa 平均相对湿度	0.64		K 指数	0.81
	850 hPa 位温	0.84		KO 指数	-0.81
	850 hPa 相当位温	0.81		PII	0.79
	850 hPa 假相当位温	0.80		HI	-0.55
	BR	-0.54	SI	-0.82	

与此同时,本文计算东南闪电高发区季节平均的闪电密度距平百分比与各个参数季节平均的距平的线性拟合,将相关系数以及灵敏度作为闪电密度对大气环境参数变化的响应指标.其中为了消除闪电活动和各个参数的季节变化本身的影响,距平值为各个季节参量值对本季节平均值的距平,灵敏度定义为闪电密度距平百分比与参数的距平值线性拟合的拟合直线的斜率和标准误差<sup>[19]</sup>.表 3 给出了东南闪电高发区闪电活动对各参数的响应,不同参数由于其变化量级不一致使之响应灵敏度变化量级不

一.热力学参数中除了 BR 以外的其他参量,闪电密度对其变化响应都为正响应,与它们的相关关系相对应.其中 700~400 hPa 平均相对湿度相关系数未通过 95%置信区间的显著性检验.稳定度参数中 HI,KO 指数未通过 95%置信区间的显著性检验,其他参数均通过检验.同时可以看到,闪电密度对 LI,HI,SI 的响应为负响应,其他参数为正响应,正负响应与其和闪电密度相关系数均值正负关系相一致.

表 3 东南闪电高发区闪电活动对不同大气环境参数的响应

Tab.3 The lightning activity sensitivity to different parameters of the atmospheric environment in the Southern China

参数类型	参数	灵敏度	单位	相关系数
热力学参数	地面温度(T)	25.9±10.7	K	0.28*
	地面湿球温度(T <sub>g</sub> )	33.4±10.2	K	0.37*
	地面相对湿度	10.2±3.2	%	0.35*
	700~400 hPa 平均相对湿度	1.3±1.5	%	0.11
	850hPa 位温	24.8±9.7	K	0.30*
	850hPa 相当位温	10.1±3.8	K	0.31*
	850hPa 假相当位温	10.4±3.9	K	0.31*
	BR	-111.0.±42.6	—	0.30*
稳定度参数	CAPE	0.4±0.1	J	0.43*
	LI	-24.0±5.3	K	0.48*
	DCI	11.7±2.7	K	0.46*
	K 指数	14.1±3.6	K	0.42*
	KO 指数	4.5±4.5	K	0.12
	PII	1.3e5±3.1e4	K/m	0.43*
	HI	-2.2±2.2	K	0.12
	SI	-33.2±5.7	K	0.55*

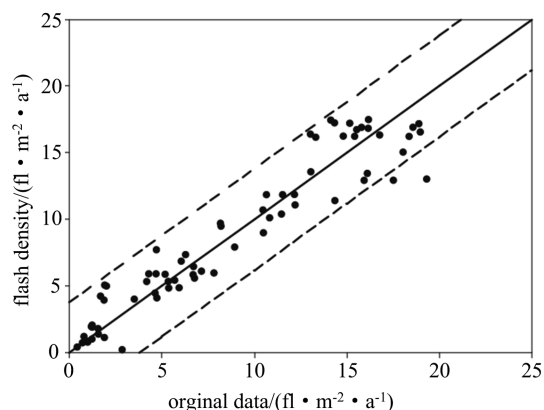
注:\* 表示通过 95%置信度检验.

通过东南闪电高发区平均闪电密度与不同热力学和稳定度表征参数的相关关系以及对各参数的响应情况的研究,本文选取了上述热力学和稳定度参数中物理学意义独立、相关性较好且通过显著性检验的参数:地面温度( $T$ )、地面湿球温度( $T_g$ )、850 hPa相当位温、BR、CAPE、LI、DCI、K 指数、PII、SI。基于多元线性逐步回归的方法,根据方程因子既显著、残差估计又最小的原则,剔除了部分参数,建立了区域平均闪电密度回归方程:

$$Y = 0.034 * T + 2.132 * LI +$$

$$0.011 * CAPE + 5.906 * BR - 3.933 * SI \quad (1)$$

该方程  $F = 414.32$  远大于分子自由度为 5、分母自由度为 65 的 F 检验临界值  $F_{\alpha=0.01} = 3.34$ , 通过了 99% 的显著性检验,且方程中各个回归系数也通过了 95% 显著性检验。方程残差平方和是 240.151, 回归平方和为 7653.795。线性拟合方程中拟合优度和复相关系数的值越接近 1, 说明回归直线对观测值的拟合程度越好, 方程(1)的拟合优度达到了 0.969, 复相关系数为 0.984, 可见回归方程拟合程度很好。图 7 为多元线性拟合得到的平均闪电密度与实际平均闪电密度散点图, 可以看到散点均匀分布在参考线  $Y = X$  两边, 且绝大多数在拟合值  $Y$  的 95% 置信区间内(虚线:  $Y \pm 3.80$ )。可见, 建立的东南闪电高发区区域平均闪电密度与大气环境参数的多元线性回归方程显著, 且能很好地达到拟合预测效果。



实线为参考线  $Y = X$ , 虚线为 95% 的置信区间

图 7 实际平均闪电密度与线性拟合平均闪电密度散点图

Fig.7 The scatter plot of fitted and original lightning density

为了较好地反映上述线性拟合方程中各个参数所占比例, 本文对上述方程中每一个参数按照 Z-Score 法进行标准归一化处理, 重新线性拟合得到修订后线性拟合方程:

$$Y^* = 0.937 * T^* + 1.229 * LI^* +$$

$$0.414 * CAPE^* + 0.425 * BR^* - 2.107 * SI^* \quad (2)$$

标准化后的线性拟合方程系数解释了  $X$  变化 1 个标准差,  $Y$  变化多少个标准差。从修订后的线性拟合方程可知, 对闪电密度变化影响较大的大气环境参数为 SI 和 LI。

闪电密度回归方程(1)给出的是东南闪电高发区区域平均的结果, 利用该方程可以计算出区域内各格点的闪电密度。于是, 我们利用逐格点季平均地面温度、抬升指数、CAPE、BR、SI 数据, 用区域平均闪电回归方程(1)计算了该区域的所有格点闪电密度, 并将之与逐季节观测的区域格点闪电密度进行线复相关计算, 得到了东南闪电高发区复相关系数分布图(图 8)。从中可以看到北纬  $27.5^\circ$  以南地区的复相关系数基本在 0.5 以上。前文提到复相关系数的值越接近 1, 说明回归直线对观测值的拟合程度越好。因此, 逐步线性回归得到的区域平均闪电密度回归方程(1)对于在我国东南地区区域闪电密度的气候预报有一定参考价值和现实意义。

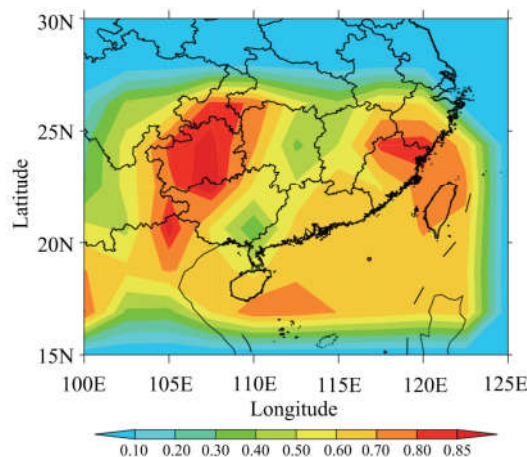


图 8 东南闪电高发区复相关系数分布

Fig.8 Distribution of the multiple correlation coefficient between original data and fitted data in Southern China

## 4 结论

本文利用星载闪电观测资料、NCEP/NCAR 再分析资料和欧洲中心再分析资料, 对北纬  $30^\circ$  以南、东经  $100^\circ$  以东的中国陆地地区 ( $17.5 \sim 30^\circ N$ ,  $100 \sim 122.5^\circ E$ ) 的闪电活动时空分布特征及其与大气环境因素的关系进行了分析, 结果表明:

(1) 东南闪电高发区闪电密度 EOF 分解第一模态呈东北—西南向偶极子分布, 第二模态呈全区一致性分布。第二模态极值中心在广西南部 and 广东东部。东南闪电高发区闪电活动季节性特征明显, 春夏



两季为闪电高发期,夏季闪电多于春季,冬季闪电密度最小.厄尔尼诺事件对东南闪电高区的闪电活动的年际变化有较强的影响,对春季闪电活动影响相对更大,强厄尔尼诺期间冬春季闪电活动的增强要大于夏季闪电活动的增强.

(II)东南闪电高发区闪电密度与大气环境表征参数中大多数参数有显著的相关性,其与热力学参数中的地面温度、地面湿球温度、地面湿度、700~400 hPa 平均相对湿度、850 hPa 位温等都有显著的正相关关系,东南闪电高发区闪电密度与稳定性参数中的 CAPE、DCI、K 指数、PII 呈现为强正相关,与 LI、KO 指数、HI 和 SI 呈负相关关系.东南闪电高发区闪电活动对不同大气环境表征参数也有不同响应,响应正负与其响应相关性有关,敏感度大小与其量级变化大小有关.

(III)通过上述东南闪电高发区闪电密度与大气环境表征参数关系的研究,本文选取热力学和稳定度参数中物理学意义独立、相关性较好且通过显著性检验的参数,基于多元线性逐步回归的方法,建立了东南闪电高发区区域平均闪电密度回归方程,拟合优度 0.97,复相关系数 0.98.通过归一化回归方程,对东南闪电高发区闪电密度变化影响较大的大气环境参数为 SI 和 LI.区域平均闪电密度回归方程对于在我国东南地区区域闪电密度的气候预报有一定参考价值 and 现实意义.

本文所得结论仅限于北纬 30°以南、东经 100°以东的我国陆地地区(17.5~30°N, 100~123°E),能否推广到我国其他地区,还待更深入的研究探讨.厄尔尼诺事件对东南闪电高区的闪电活动的年际变化有较强的影响.前人研究指出在厄尔尼诺事件成熟期,西太平洋副热带高压的位置往往偏西,中国南部地降水和闪电活动往往有异常增加趋势<sup>[51-52]</sup>.因此,闪电活动异常分布变化与全球和区域大气环流形势变化有着密切联系,其影响机制也有待进一步深入分析和探讨.上文提到东南闪电高发区平均闪电密度与鲍恩比呈负相关关系,这与 Williams 等<sup>[53]</sup>以及袁铁等<sup>[21]</sup>在研究闪电活动与鲍恩比关系时得到的结论有所差异.众所周知,不同地区的地表覆盖性质复杂,不同下垫面水热性质各异,因此,陆面和陆-气能量交换特征各异,地表能量和辐射过程的扰动也随着下垫面的不同而变化,那么不同区域的感热通量、潜热通量和鲍恩比存在差异.因此,闪电活动与鲍恩比在不同地区的相关关系,值得我们

进一步深入研究.但是,需指出的是总热通量(感热通量和潜热通量之和)在青藏高原和东南闪电高发区都呈正相关性.

**致谢** 本文所用的格点化卫星闪电数据来自美国的全球水文资源中心(GHRC)(<http://ghrc.msfc.nasa.gov>),由 NASA LIS/OTD Science Team (Marshall Space Flight Center) 提供; NCEP/NCAR 再分析资料从 <http://www.esrl.noaa.gov> 下载,由 NOAA-ESRL Physical Sciences Division 提供; ERA-Interim 再分析资料从 <http://www.ecmwf.int/> 下载,由 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 提供.作者在此一并表示感谢.

#### 参考文献(References)

- [1] MARKSON R, MUIR M. Solar wind control of the Earth's electric field[J]. *Science*, 1980, 208(4447): 979-990.
- [2] WILLIAMS E R, HECKMAN S J. The local diurnal variation of cloud electrification and the global diurnal variation of negative charge on the Earth[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1993, 98(D3): 5221-5234.
- [3] PRICE C. Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapour [J]. *Nature*, 2000, 406(6793): 290-293.
- [4] BOND D W, STEIGER S, ZHANG R, et al. The importance of NO<sub>x</sub> production by lightning in the tropics[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(9): 1509-1519.
- [5] 周筠珺, 鄒秀书. 闪电产生 NO<sub>x</sub> 机制及中国内陆闪电产生 NO<sub>x</sub> 量的估算[J]. *高原气象*, 2002, 21(5): 501-508.
- [6] 鄒秀书. 卫星观测到的全球闪电活动及其地域差异[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(6): 743-750.
- [7] 鄒秀书, TOUMI R, 周筠珺. 青藏高原中部地区闪电活动特征及其对对流最大不稳定能量的响应[J]. *科学通报*, 2003, 48(1): 87-90.
- [8] 郭凤霞, 鞠晓雨, 陈聪. 估算闪电产生氮氧化物量的研究回顾与进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(3): 305-317.
- [9] 李照荣, 康凤琴, 马胜萍. 西北地区雷暴气候特征分析[J]. *灾害学*, 2005, 20(2): 83-88.
- [10] 冯建英, 陈佩璇, 梁东升. 西北地区雷暴的气候特征及其变化规律[J]. *甘肃科学学报*, 2007, 19(3): 71-74.
- [11] 易燕明, 杨兆礼, 万齐林, 等. 近 50 年广东省雷暴、闪

- 电时空变化特征的研究[J]. 热带气象学报, 2006, 22(6): 539-546.
- [12] 冯桂力, 胡先锋, 李采莲, 等. 青岛地区闪电活动气候特征[J]. 陕西气象, 2009 (B09): 1-4.
- [13] 孙颀. 北京城区与郊区雷暴气候特征及其变化对比分析[J]. 气候与环境研究, 2011, 16(5): 649-656.
- [14] 邓德文, 周筠珺, 赵鹏国, 等. 中国典型区域雷电活动气候特征及其机制分析[J]. 气象科学, 2013 (1): 109-118.
- [15] 郗秀书. 青藏高原闪电活动的时空分布特征[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6): 997-1002.
- [16] 马明, 陶善昌, 祝宝友, 等. 卫星观测的中国及周边地区闪电密度的气候分布[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(4): 298-306.
- [17] 袁铁, 郗秀书. 卫星观测到的我国闪电活动的时空分布特征[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 488-494.
- [18] TOUMI R, QIE X. Seasonal variation of lightning on the Tibetan Plateau: A spring anomaly? [J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(4): 235-250.
- [19] 马明, 陶善昌, 祝宝友, 等. 全球闪电活动对气温变化的响应[J]. 科学通报, 2005, 50(15): 1643-1647.
- [20] 张义军, 孟青. 青藏高原东部地区的大气电特征[J]. 高原气象, 1998, 17(2): 135-141.
- [21] 袁铁, 郗秀书. 青藏高原中部闪电活动与相关气象要素季节变化的相关分析[J]. 气象学报, 2005, 63(1): 123-127.
- [22] 郑栋, 张义军, 吕伟涛, 等. 大气不稳定性参数与闪电活动的预报[J]. 高原气象, 2005, 24(2): 196-203.
- [23] CHRISTIAN H, BLAKESLEE R, GOODMAN S, et al. The lightning imaging sensor [C]//NASA Conference Publication. NASA, 1999: 746-749.
- [24] BOCCIPPIO D J, KOSHAK W J, BLAKESLEE R J. Performance assessment of the optical transient detector and lightning imaging sensor. Part I: Predicted diurnal variability [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2002, 19(9): 1318-1332.
- [25] CHRISTIAN H J, BLAKESLEE R J, BOCCIPPIO D J, et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D1): ACL 4-1-ACL 4-15.
- [26] CECIL D J, BUECHLER D E, BLAKESLEE R J. Gridded lightning climatology from TRMM-LIS and OTD: Dataset description[J]. Atmospheric Research, 2014, 135: 404-414.
- [27] KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(3): 437-471.
- [28] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(656): 553-597.
- [29] BOLTON D. The computation of equivalent potential temperature[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(7): 1046-1053.
- [30] 李任承, 顾光芹. 关于假相当位温的精确计算[J]. 气象, 1990, 16(3): 13-17.
- [31] DUGAS W A, FRITSCHEN L J, GAY L W, et al. Bowen ratio, eddy correlation, and portable chamber measurements of sensible and latent heat flux over irrigated spring wheat [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 56(1): 1-20.
- [32] WARE R, ROCKEN C, SOLHEIM F, et al. GPS sounding of the atmosphere from low Earth orbit: Preliminary results [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1996, 77(1): 19-40.
- [33] GEORGE J J. Weather forecasting for aeronautics[M]. New York: Academic Press, 2014.
- [34] ANDERSSON T, ANDERSSON M, JACOBSSON C, et al. Thermodynamic indices for forecasting thunderstorms in southern Sweden[J]. Meteorological Magazine, 1989, 118(1404): 141-146.
- [35] GOODMAN S J. Predicting thunderstorm evolution using ground-based lightning detection networks[R]. NASA, 1990: 19910006347.
- [36] BARLOW W. A new index for the prediction of deep convection [C]//17th Conference On Severe Local Storms. St. Louis, MO: American Meteorological Society, 1993: 129-132.
- [37] VAN DELDEN A. The synoptic setting of thunderstorms in western Europe [J]. Atmospheric Research, 2001, 56(1): 89-110.
- [38] STACKPOLE J D. Numerical analysis of atmospheric soundings[J]. Journal of Applied Meteorology, 1967, 6(3): 464-467.
- [39] SHOWALTER A K. A stability index for thunderstorm forecasting[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1953, 34(6): 250-252.
- [40] 吕新刚, 周志强. 沙瓦特指数的数值计算方案比较研究[J]. 气象, 2015, 41(10): 1260-1267.
- [41] 马明, 陶善昌, 祝宝友, 等. 1997/1998 El Niño 期间中国南部闪电活动的异常特征[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(9): 873-881.
- [42] 封国林, 孙树鹏, 赵俊虎, 等. 基于 2009 年初长江中下游地区持续阴雨过程的 10-30 天延伸期稳定分量的提取及配置分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(5): 836-847.