

孙君嵩,叶青,王丽,等.基于 GEI 方法对苏皖地区地电活动指数的可靠性研究[J].地震工程学报,2020,42(2):453-459.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.453
SUN Junsong, YE Qing, WANG Li, et al. Reliability of Geoelectric Activity Indexes in Jiangsu and Anhui Provinces Based on GEI Method[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(2): 453-459. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.453

基于 GEI 方法对苏皖地区地电活动指数的 可靠性研究

孙君嵩¹, 叶 青², 王 丽¹, 章 鑫³, 尹欣欣⁴

(1. 江苏省地震局, 江苏 南京 210004; 2. 中国地震台网中心, 北京 100045;
3. 广东省地震局, 广东 广州 510070; 4. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要:使用地电扰动幅度与静日变化幅值比的地电活动指数(GEI)计算方法,连续计算江苏、安徽两省6个地电场台站2018年第一季度的单台地电指数 D 、平均地电指数 D_s 。同时将地电指数 D 、 D_s 与单台地磁指数 K 、平均地磁指数 $\bar{K}$ (即 $[\bar{K}+0.5]$)对比得到:86.48%的指数 D 与指数 K 完全相同或仅相差1,89.44%的指数 D_s 与指数 $\bar{K}$ 完全相同或仅相差1。两类电、磁指数的高度吻合说明:(1)连续产出的地电指数是可靠的。(2)地电指数 D 、 D_s 可以量化界定地电场活动水平。极个别的地电指数 D 、 D_s 与地磁指数 K 、 $\bar{K}$ 仍存在一定差异,这与地电场台站观测有关,提升地电场观测资料的质量能更好地确定地电指数。(3)地电指数与地磁指数相互弥补能更准确地确定地球电磁活动水平,其在相关的地球科学技术领域有广泛的应用前景。

关键词:地电场;地电指数;地电扰动;地磁场;地磁指数;地磁扰动

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2020)02-0453-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.02.453

Reliability of Geoelectric Activity Indexes in Jiangsu and Anhui Provinces Based on GEI Method

SUN Junsong¹, YE Qing², WANG Li¹, ZHANG Xin³, YIN Xinxin⁴

(1. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210004, Jiangsu, China;

2. China Earthquake Network Center, Beijing 100045, China;

3. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, Guangdong, China;

4. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: In this study, in the first quarter of 2018, the single-station geoelectric index D and multi-station average geoelectric index D_s were determined using the geoelectric index (GEI) method based on observation data of 6 stations in Jiangsu and Anhui Provinces. Comparing the

收稿日期: 2019-06-20

基金项目:江苏省地震局青年科学基金(201910);国家自然科学基金(41374080);中国地震局专项:全国地球物理台网数据跟踪分析与产出;中国地震局监测、预报、科研三结合课题(3JH-202001027)

第一作者简介:孙君嵩,男,助理工程师,主要从事流动形变观测及地震电磁学研究。E-mail:junsong_sun@sina.com。

通信作者:叶 青,女,高级工程师,主要从事地震电磁研究和地电学科学技术管理工作。E-mail:qing_gef@126.com。

index D and D_s with single-station geomagnetic index K and average geomagnetic index $\bar{K}$ of the 6 stations, it was found that: 86.48% of D indexes are correspondingly the same with K indexes or have only a difference of 1, and 89.44% of D_s indexes are correspondingly the same with $\bar{K}$ indexes or have only a difference of 1. The high consistency between two types of indexes showed that: (1) the geoelectric index calculated by this method is reliable; (2) the electromagnetic activity level can be quantitatively identified by geoelectric indexes D and D_s . Only a few of the D and D_s indexes have a slight difference from the K and $\bar{K}$ indexes, but the problem can be well solved if the measurement accuracy of geoelectric field is improved or the measurement data from more stations are used in the calculation; (3) In the future, the mutual compensation and reference between the geoelectric and geomagnetic indexes will more accurately identify the earth's electromagnetic activity level in mainland China. This will have a wide prospect of application in the related field of earth science and technology.

Keywords: geoelectric field; geoelectric index; geoelectric disturbance; geomagnetic field; geomagnetic index; geomagnetic disturbance

0 引言

地电场是存在于大地中的天然电场。早在 1830 年, Fox 就发现了地球介质中存在的局部自然电场, 此后人们逐渐把地电场观测运用于地球物理勘探领域^[1]。1946 年法国学者在法国和马达加斯加岛进行了大地电流观测实验, 研究了大地电流的震荡现象; 1956 年匈牙利科学院和中国科学院地球物理研究所合作, 同时在北京和索坡伦观测大地电流, 观测到了可比的大空间尺度的大地电流变化^[2]。至今, 人们已经认识到大地球(流)是固体地球内部和外部的各种非人工电流系与地球介质相互作用产生的分布于地表和地下的电场, 含大地电场和自然电场。大地电场含平静日变化和扰日变化, 周期成分复杂。平静变化主要含 1 年、1 月、半月、日、半日等主要周期成分, 其中静日变化 S_q 周期为 1 天。扰日变化含地电微变化(周期 $10^{-4} \sim 1$ s)、地电脉动($0.2 \sim 1\ 000$ s)、地电湾扰(多持续 $1 \sim 3$ h)、地电暴(持续 $1 \sim 3$ d)^[3-4]。在静日、扰日等不同磁情天气的地电场变化统称为“地电日变化”, 是每日出现的周期成分, 扰日变化是叠加在静日变化上的多种周期的地电场快扰动变化。同时, 人们还注意到静日变化、扰日变化还表现出了响应地球潮汐的局部性特点^[5-7]。

地电扰日变化和地磁扰日变化起因于相同的空间场源^[8], 长期以来人们用地磁活动指数来量化评价地球地磁场的扰动程度^[9-10], 据电磁场理论应该也可以用地电活动指数来量化评价地电场扰动。地电指数与地磁活动指数相互弥补和参考能更准确地

确定地球电磁扰动程度, 将在地球电磁环境变化的监测和研究中有重要的作用; 同时, 在目前已开展的地电场观测在大地构造研究、活动构造监测、生命线工程防损、通讯通信等领域有广泛的应用和研究^[11-15]。地电扰动指数在目前开展的数据跟踪分析中同样有新的应用前景, 并分析地电场观测的影响因素。

孙君嵩等^[16]分析总结了地磁暴期间中国大陆地电场扰动变化(这里称为“地电暴”)的时、频特点, 并在 2018 年使用消除静日地电变化的幅值比方法(Geo-Electrical Index of Amplitude Ratio Removing Quiet Diurnal Variation, 缩写为“GEI”)^[17]初步计算了中国地区部分电磁台站的单台地电扰动指数 D 和各台平均指数 D_s , 两种地电指数很好地吻合各单台地磁扰动指数 K 和各台平均地磁指数 $[\bar{K} + 0.5]$ (即各台 K 指数平均值的四舍五入值, 下文简称“ $\bar{K}$ ”)。本文就是在此工作基础上进行的。

中国自 1999 年开始了固定台站的地电场观测实验, 逐步实施了世界上最大规模的高时空分辨力、固定台站、长期、连续和规范化地电场观测, 截至目前中国地电场观测网由 120 多个台站组成, 积累了丰富的观测数据。国际上关于地电场响应地震、火山等灾害性事件方面的研究较多^[18-19], 中国学者关于地电场时、频域变化特点及其在地震等灾害事件的研究方面亦取得了很有意义的进展^[20-23]。这些研究结果证明了中国地电场观测台网中的绝大多数台站的观测资料是可用的, 也为本文对苏、皖两省台站观测资料的选取方法提供了诸多有益参考。

1 台站及观测数据

1.1 地电场观测方法

固定台站的地电场观测方法引入了地球物理电法勘探中的自然电场观测方法,与物探中的观测装置统和观测物理量相同,但又不完全同于物探方法。地球物理电法勘探是移动观测装置的空间位置,测量地电场的空间分布,探测地下介质电性分布随空间的变化,而固定台站的地电场观测是在多个方位布置固定的电极,长期连续测量地电场随时间的变化,探测地下介质电性分布随时间的变化。

在江苏、安徽地区,地电场台站是在地面上沿 NS 和 EW 两个水平的正交观测方向(即:观测地电场北向分量 E_x 、东向分量 E_y)再加一个斜交观测方向,每个观测方向分别布设长、短极距两个测道,因此每个台站均布设 6 个测道;每测道、每分钟产出地电场测量数据,即 1 次/min(对于秒采样仪器,每分钟产出秒数据的平均值),每天连续观测产出 1 440 个数据;测量仪器通频带为 DC~0.005 Hz,测量分辨率为 $10\text{ }\mu\text{V}$ ^[24]。目前,中国地电场台网测量仪器与地磁场台网相对测量仪器(如 FHD 质子旋进磁力仪)的频带范围不同,地磁场观测的频段高于地电场观测^[25]。

1.2 台站观测数据

本文主要选取了江苏省的南京、高邮、新沂、海安四个地电场台站以及安徽省的蒙城、嘉山两个地电场台站(图 1)的观测数据。在上述台站分布的地区,地磁场水平分量 H 接近北分量 X 的变化幅值, X 分量变化大于 Y 分量变化幅值^[17],同时考虑电磁场偏振方向的正交关系,在计算过程中主要使用地电场东分量,即 E_y 分量的观测数据。

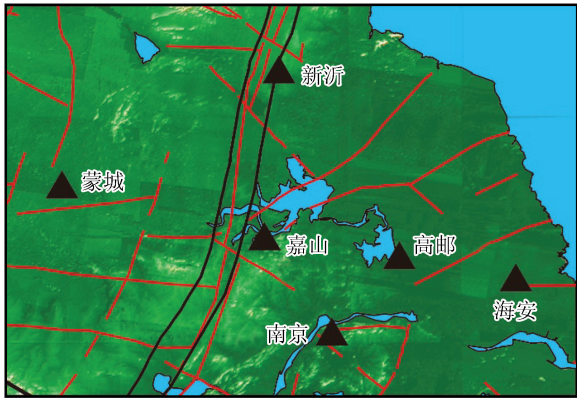


图 1 地电场台站分布图

Fig.1 Distribution of geoelectric field stations

2 地电指数计算方法

图 2 为地电指数 D 的计算流程图。其步骤为:(1)根据待计算指数日的农历日,选出磁静日下的其他年份相同或相近的农历日的地电场测量数据,用泰勒多项式方法拟合出磁静日地电场 E_y 分量的观测数据模型。(2)对拟合出的模型进行前 5 次谐波拟合,得到磁静日的日变化曲线,并设拟合曲线的“峰-谷”幅度即为磁静日 $K=0$ 时的日变化幅度,并记为 A 。(3)用待计算指数日的观测数据与拟合曲线数据对应相减,得到的差的绝对值记为 B 。(4)计算出 B/A 比值,并将一天 24 小时(UT 时间)等分为 8 个时段,即 $00^{\text{h}}:00^{\text{min}}\sim 02^{\text{h}}:59^{\text{min}}$, $03^{\text{h}}:00^{\text{min}}\sim 05^{\text{h}}:59^{\text{min}}$, $06^{\text{h}}:00^{\text{min}}\sim 08^{\text{h}}:59^{\text{min}}$, $09^{\text{h}}:00^{\text{min}}\sim 11^{\text{h}}:59^{\text{min}}$, $12^{\text{h}}:00^{\text{min}}\sim 14^{\text{h}}:59^{\text{min}}$, $15^{\text{h}}:00^{\text{min}}\sim 17^{\text{h}}:59^{\text{min}}$, $18^{\text{h}}:00^{\text{min}}\sim 20^{\text{h}}:59^{\text{min}}$, $21^{\text{h}}:00^{\text{min}}\sim 23^{\text{h}}:59^{\text{min}}$ 。分别取每个时段的最大比值 B/A 。最后将每个时段的比值按表 1 给出的关系换算出最终每个时段的地电指数。

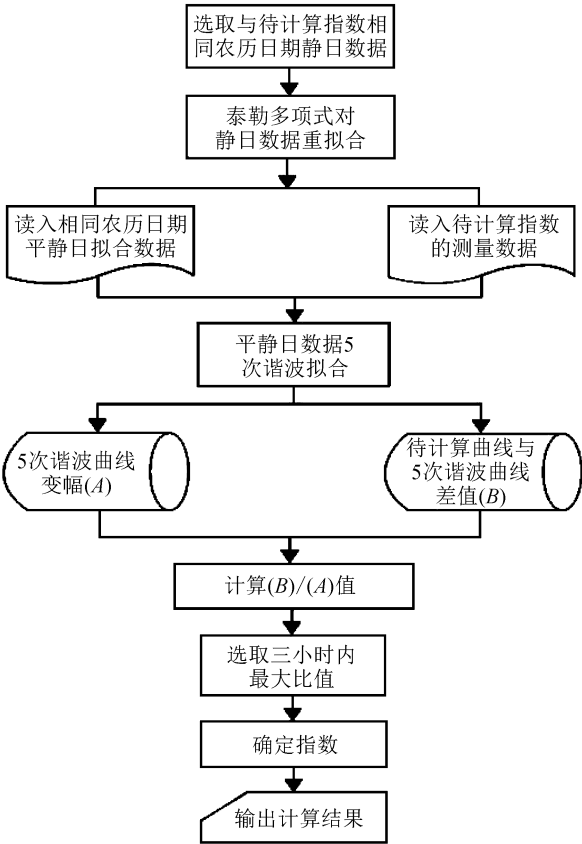


图 2 计算流程图

Fig.2 Calculation flow chart

地电指数 D 的计算原理和方法与地磁 K 指数 FMI 计算方法存在一定的差异。首先,地电观测与

地磁观测属于两种不同的物理量,并且也是不同仪器产生的观测结果。其次,在阈值确定方法上也存在差异,地磁根据 Niemeck 台站记录到的最大一次磁暴值确定最大阈值;而地电则是根据 5.5 年的资

料及对应的地磁 K 指数确定阈值。最后,考虑到地电场容易受到月相、地下电性结构影响的特殊性,地电指数 D 采用的是差值绝对值 B 与 5 次谐波曲线的变幅 A 的比值作为最终的指数判断标准。

表 1 地电指数对应的变幅范围

Table 1 The scale of D index										
地电指数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
变幅下限	0A	0.25A	0.5A	1A	2A	4A	8A	32A	128A	512A

3 计算结果

本次计算选取的时间段为 2018 年 1 月 1 日—3 月 31 日,分别计算了南京、高邮、新沂、海安、蒙城、嘉山等 6 个地电场台站的单台指数 D 共计 $(6 \times 8 \times 90)4\ 320$ 个,多台平均指数 $\bar{D}$ 。共计 $(8 \times 90)720$ 个,以及同台或临近地磁台站的地磁 K 指数,平均地磁指数 $\bar{K}$ 。

据中国气象局国家卫星气象中心 2018 年 1 月至 3 月的空间天气报告显示:1 月地磁活动水平低,发生了 1 次 3 小时的小地磁暴;2 月地磁活动水平

低,发生了 3 次 $K_p=5$ 的小地磁暴;3 月地磁活动水平较低,发生了 1 次 $K_p=6$ 的中等地磁暴。即参与计算的 3 个月的整体地磁活动水平属于偏低水平,绝大多数为地磁活动平静时段。

经过计算,86.48%的单台地电指数 D 与单台地磁指数 K 相同或者相差 1。其中,6 个地电场台站的单台指数 D 以及同台或临近地磁台站的地磁指数 K 频次分布结果如图 3 所示。不难发现在两类指数吻合度较高的情况下,各个台站的两类指数分布频次比较接近,但总体呈现一种地电指数 D 略大于地磁指数 K 的趋势,特别是在指数 2 以上较为明显。

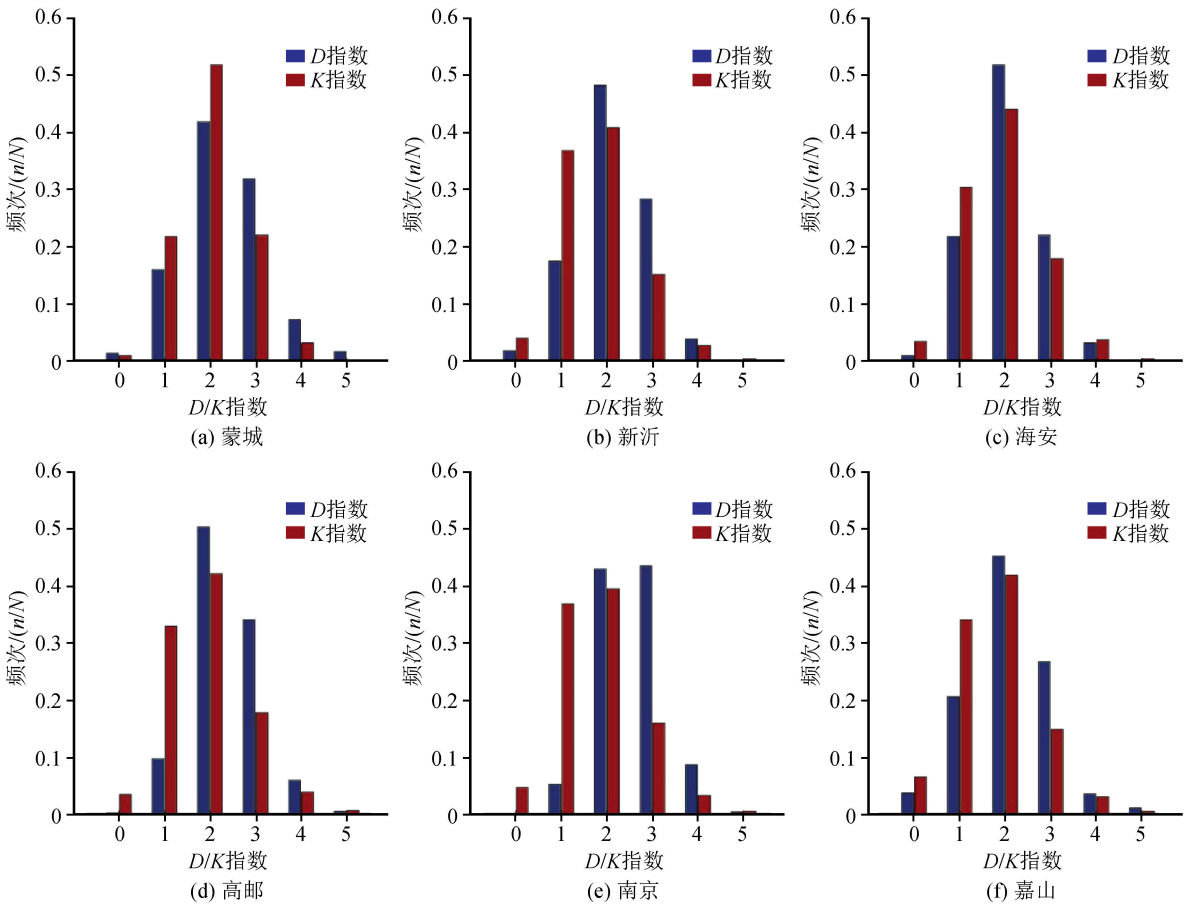


图 3 各台站 D 指数、 K 指数频次分布图

Fig.3 Frequency distribution of D index and K index of each station

为避免个别地区的局部性干扰,又分别计算了两类平均指数的差值频次、两类平均指数的频次(图 4)。计算结果显示 89.44%的指数 D_s 与指数 $\bar{K}$ 完

全相同或仅相差 1,该结果与单台计算得到的 86.48%略有提升。
由于不同测区存在不同的干扰,本研究以受地

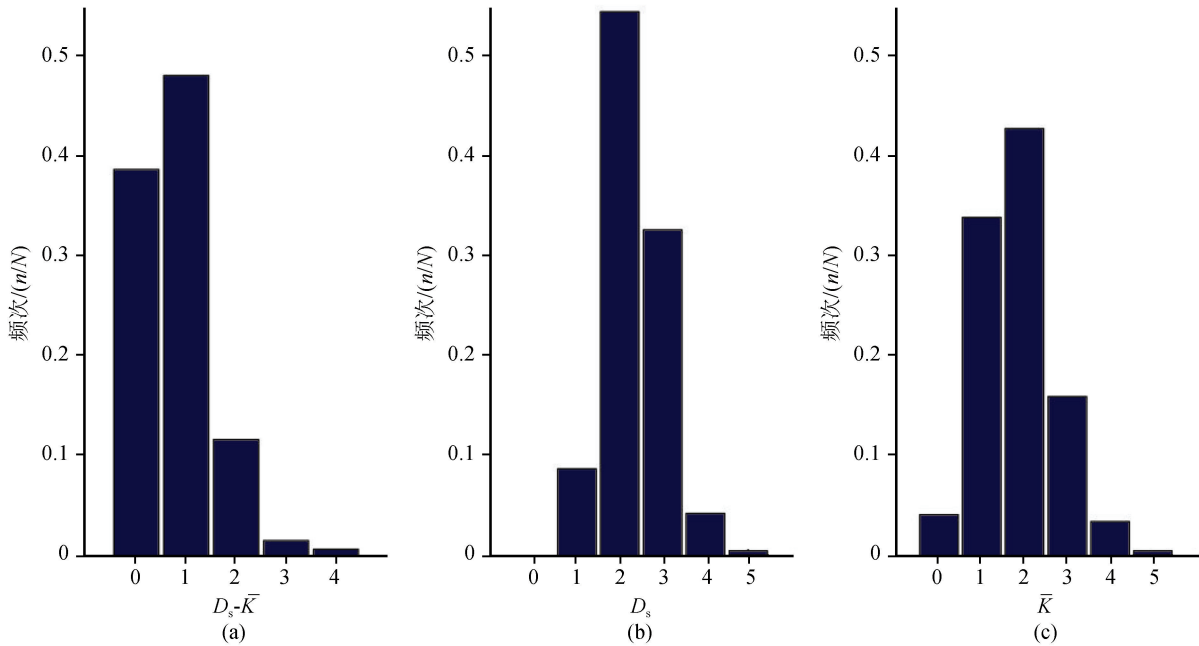


图 4 两类平均指数差值频次分布、两类平均指数频次分布图

Fig.4 Frequency distribution of difference between two kinds of average indexes and two kinds of average indexes

铁运行干扰的南京台为例,分析地铁运行干扰对单台地电指数 D 的产出影响。由于单台地电指数 D 、地磁指数 K 均为世界时(UT)时间计量系统下计算而来,而南京地铁主要运行时间为北京时间(BJT)的 05^h:00^{min}开始至次日 0^h:00^{min}结束,统一两种时间计量系统之后,南京台不受地铁运行干扰时段为 18^h:00^{min} ~ 20^h:59^{min} (UT)、02^h:00^{min} ~ 04^h:59^{min} (BJT),即指数 7 一般情况下应该属于正常水平范围。为此,统计了 2018 年第一季度南京台各个时段单台地电指数 D 与单台地磁指数 K 的差值情况,结果显示:在南京台的 720 对单台指数差值中,有 78.61%的单台地电指数 D 与单台地磁指数 K 相同或者相差 1;将余下的 21.39%部分按照指数计算时段进行统计,可以较明显看出指数 7(D7-K7)为统计时段内两类指数偏离最小时段(图 5),与地铁停止运行时段一致;同时也说明了地铁运行确实对地电单台指数的计算存在一定的干扰,单台地电指数也可以分析地电场观测的影响因素。

4 讨论与结论

4.1 地电指数的可靠性

本文使用 3 个月 6 个台站的观测数据计算了每

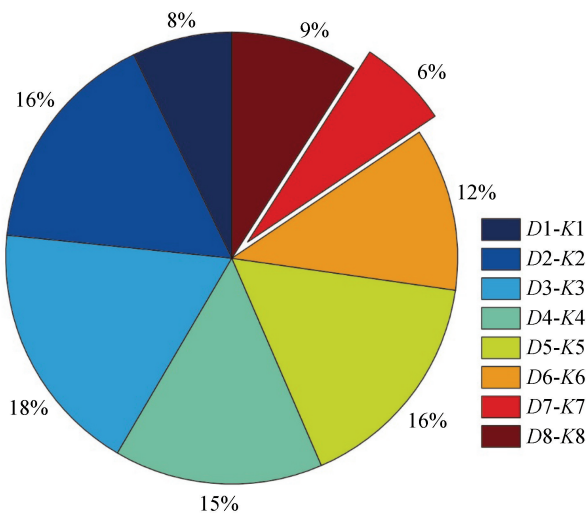


图 5 南京台两类单台指数各个时段差值频次分布数频次分布图

Fig.5 Frequency distribution of difference between two kinds of single index in different periods at Nanjing station

天的地电指数,产出了 4 320 个单台地电指数 D 和 720 个平均地电指数 D_s 。比对这些台站的地电指数与地磁指数得到,在 4 320 对单台地电指数 D 、单台地磁指数 K 中,有 86.48%的 D 指数与 K 指数完

全相同或仅相差 1; 在 720 对平均地电指数 D_s 、平均地磁指数 $\bar{K}$ 中, 89.44% 的 D_s 指数与 $\bar{K}$ 完全相同或仅差 1。此结果说明, 绝大多数的地电指数与地磁指数是高度吻合的, 尽管地电场观测影响因素多(如地电场对空间电磁响应的电脉冲丰富、观测系统待完善和易受环境干扰等因素), 但计算的地电指数是可靠的。同时也说明, 地电指数 D 和 D_s 可以量化界定地电场活动水平, 这与目前普遍使用的地磁指数 K 和 K_p 有相同的作用和意义, 地电、地磁指数相互弥补可更准确量化空间电磁扰动程度。

但苏皖地区的地电指数 D 和 D_s 的计算结果出现新的问题: 相比地磁指数 K 的计算结果来讲, 地电 D 指数整体要大于地磁 K 指数。在以往的计算中, 一般通过计算平均指数来确定大区域范围内的电磁活动水平。本次的计算结果提升并不是很明显。

上述问题的原因主要取决于地电场观测数据的质量。中国大陆的地电场台网产出 mV/km 量级的观测数据, 测量仪器的分辨力为 $10 \mu\text{V}^{[24]}$ 。对于这个量级的地电场观测其影响因素比较多, 测量仪器性能、电极稳定性、室内外线路对地绝缘程度以及台站观测环境均是影响观测数据质量的关键环节。不同的台站其观测条件不一样, 观测数据的质量是有区别的。另一方面, 在消除指数计算日的静日变化时, 文中采用了之前某年有相同农历日(为消除月相影响)、当日为磁静日的地电日变化来构建日地电日变化模型, 用以消除计算日的静日变化对地电指数的影响, 这就要求地电场观测数据长期可靠, 否则将直接影响到日变化模型的精度, 进而影响指数的真实性。其次, 文中部分台站受到城市轨道交通以及高压直流输电干扰, 也是计算结果存在偏差的原因之一。

4.2 结论

地电扰动密切联系地磁扰动。地磁学领域推出了几十种用于量化界定电磁活动水平的地磁指数, 孙君嵩等^[19]尝试用地电场观测数据界定电磁活动水平, 提出了地电指数计算方法, 本文使用该计算方法对苏皖地区的地电场台站进行计算, 得到以下结论:

(1) 该方法计算的地电指数中绝大多数指数与同一 3—1 小时时段的地磁指数在数值上完全相同或仅相差 1。在每种方法的 4 320 对单台电、磁指数,

地电指数 D 与地磁指数 K 的吻合比例在 86.48% 的范围; 在 720 对平均指数中, 地电指数 D_s 与地磁指数 $\bar{K}$ 在 89.44% 范围吻合。

(2) 在苏皖地区, 各个台站的单台地电指数 D 要略微大于地磁 K 指数, 但绝大多数是相差 1。极个别的地电指数与地磁指数(D 与 K 、 D_s 与 $\bar{K}$) 相差 2 或者 2 以上, 这与观测环境不无关系。因此, 提升地电场观测资料质量可以更好地确定地电指数, 地电场观测中不同台站的台址环境(电性条件、场地电噪声)、干扰排除方法和用两种电、磁场量分别计算指数均是影响因素。

(3) 地电场观测的影响因素多, 且快扰动变化丰富, 但合理消除影响因素后基于地电场观测可以量化界定电磁活动水平。显然, 地电扰动指数 D 和 D_s 是界定地球电磁活动水平的又一种方法, 地电指数和地磁指数是衡量其活动水平的互补。

参考文献(References)

- [1] 克拉耶夫. 地电原理-上册[M]. 张可迁, 陈培光, 张志诚, 译. 北京: 地质出版社, 1954.
A. И. Краев. Geoelectrics Principle[M]. ZHANG Keqian, CHEN Peiguang, ZHANG Zhicheng. Trans.. Beijing: Geological Publishing House, 1954.
- [2] K. 康達士, 秦馨菱. 1956 年 1 月 9 日至 14 日在中国的北京和匈牙利的索坡倫两处同时观测大地电流的结果[J]. 地球物理学报, 1956(2): 79-92.
KANTAS K. QIN Qingling. Results of the Simultaneous Measurements of Telluric Currents between Peking (China) and Sopron(hungary) executed from 9th to 14th January 1956[J]. Chinese Journal of Sinica, 1956(2): 79-92.
- [3] 傅承义, 陈运泰, 祁贵仲. 地球物理学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
FUCHengyi, CHEN Yuntai, QI Guizhong. Geophysical foundation[M]. Beijing: Science Press, 1985.
- [4] 孙正江, 王华俊. 地电概论[M]. 北京: 地震出版社, 1984.
SUN Zhengjiang, WANG Huajun. Introduction of Geoelectricity[M]. Beijing: Earthquake Press, 1990.
- [5] 谭大诚, 赵家骊, 刘小凤, 等. 自然电场的区域性变化特征[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1588-1598.
TAN Dacheng, ZHAO Jialiu, LIU Xiaofeng, et al. Features of Regional Variations of the Spontaneous Field[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(5): 1588-1598.
- [6] 崔腾发, 杜学彬, 叶青, 等. 中国大陆经纬链地电场日变化[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2358-2368.
CUI Tengfa, DU Xuebin, YE Qing, et al. The Diurnal Variation of Geo-electric Field along the Longitude and Latitude Chains

- in China Mainland[J].Chinese Journal of Geophysics,2013,56(7):2358-2368.
- [7] 王倩,韩小宾.河北昌黎台地电场数据与固体潮的初步研究[J].地震工程学报,2017,39(增刊1):117-120.
- WANG Qian, HAN Xiaobin. Preliminary Study of Geoelectric Field Data and Earth Tide at Changli Station[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(Suppl1):117-120.
- [8] FRANK-KAMENETSKY A, BURNS G, TROSHICHEV O, et al. The Geoelectric Field at Vostok, Antarctica: Its Relation to the Interplanetary Magnetic Field and the Cross Polar Cap Potential Difference[J].Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics,1999,61(18):1347-1356.
- [9] BARTELS J, HECK N H, JOHNSTON H F. The Three-hour-range Index Measuring Geomagnetic Activity[J].Journal of Geophysical Research Atmospheres,1939,44(4):411-454.
- [10] 徐文耀.地磁学[M].北京:地震出版社,2003.
- XU Wenyao. Geomagnetism[M].Beijing: Seismological Press, 2003.
- [11] ALBERTSON V, VAN BAELEN J. Electric and Magnetic Fields at the Earth's Surface Due to Auroral Currents[J].IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1970, PAS-89(4):578-584.
- [12] 章鑫,杜学彬,王丽,等.南北地震带大地电流分布与地震活动关系探讨[J].地学前缘,2017,24(2):202-211.
- ZHANG Xin, DU Xuebin, WANG Li, et al. The Spatial Distribution of Telluric Currents and Its Relationship with Earthquake Activities in North-South Seismic Belt[J].Earth Science Frontiers,2017,24(2):202-211.
- [13] 章鑫,杜学彬,刘君.华北地区地电暴时 GIC 及涡旋电流响应分析[J].地球物理学报,2017,60(5):1800-1810.
- ZHANG Xin, DU Xuebin, LIU Jun. Analysis of GIC and Vortex Current Responses in Huabei Region during Geoelectric Storms[J].Chinese Journal of Geophysics,2017,60(5):1800-1810.
- [14] ZHANG X, LIU J, DU X B. A Model of the Telluric Current Eddy: a Case from Eastern China[J].Journal of Geophysics and Engineering,2017,14(3):478-486.
- [15] 梅芹芹,邓舒,张卫强,等.基于地电场响应的地裂缝模拟试验[J].地震工程学报,2016,38(4):652-657.
- MEI Qinqin, DENG Shu, ZHANG Weiqiang, et al. Simulation Test of Ground Fissures Based on Geoelectric Field Response[J].China Earthquake Engineering Journal,2016,38(4):652-657.
- [16] 孙君嵩,杜学彬.中国大陆地电暴时频特征[J].地震学报,2017,39(4):615-632.
- SUN Junsong, DU Xuebin. The Time-frequency Characteristics of Geoelectric Storm in Chinese Mainland[J].Acta Seismologica Sinica,2017,39(4):615-632.
- [17] 孙君嵩,杜学彬,王丽,等.地电扰动指数 GEI 研究[J].地球物理学报,2018,61(11):4493-4503.
- SUN Junsong, DU Xuebin, WANG Li, et al. Study on the Geoelectric Index (GEI)[J].Chinese Journal of Geophysics,2018,61(11):4493-4503.
- [18] VAROTSOS P, ALEXOPOULOS K. Physical Properties of the Variations of the Electric Field of the Earth Preceding Earthquakes, I[J].Tectonophysics,1984,110(1-2):73-98.
- [19] JOHNSTON M. Review of Electric and Magnetic Fields Accompanying Seismic and Volcanic Activity[J].Surveys in Geophysics,1997,18(5):441-476.
- [20] 叶青,杜学彬,周克昌,等.大地电场变化的频谱特征[J].地震学报,2007,29(4):382-390.
- YE Qing, DU Xuebin, ZHOU Kechang, et al. Spectrum Characteristics of Geoelectric Field Variation[J].Acta Seismologica Sinica,2007,29(4):382-390.
- [21] 范莹莹,杜学彬, Jacques Zlotnicki, 等.汶川 $M_s 8.0$ 大震前的电磁现象[J].地球物理学报,2010,53(12):2887-2898.
- FAN Yingying, DU Xuebin, JACQUES Zlotnicki, et al. The Electromagnetic Phenomena before the $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake[J].Chinese Journal of Geophysics,2010,53(12):2887-2898.
- [22] 马钦忠,李伟,张继红,等.与大电流信号有关的华北东部地区地电场空间变化特征的研究[J].地球物理学报,2014,57(2):518-530.
- MA Qinzong, LI Wei, ZHANG Jihong, et al. Study on the Spatial Variation Characteristics of the Geoelectric Field Signals Recorded at the Stations in the East Huabei Area when a Great Current is Injected[J].Chinese Journal of Geophysics,2014,57(2):518-530.
- [23] YE Q, CHINA C E N C C E A B, FAN Y, et al. Diurnal Characteristics of Geoelectric Fields and Their Changes Associated with the Alxa Zuoqi $M_s 5.8$ Earthquake on 15 April 2015 (Inner Mongolia)[J].Earthquake Science,2018,31(1):35-43.
- [24] 杜学彬,席继楼,谭大诚,等.中华人民共和国地震行业标准地震台站建设规范 地电台站 第 2 部分:地电场台站[S].北京:中国地震局,2006.
- DU Xuebin, XI Jilou, TAN Dacheng, et al. Specification for the Construction of Seismic Station Geoelectrical Station Part 2: Geoelectrical Field Observatory[S].Beijing: China Earthquake Administration,2006.
- [25] 钱家栋,冯志生,马森林,等.中华人民共和国地震行业标准地震观测仪器组网技术要求 地磁观测仪 第 2 部分:质子矢量磁力仪[S].北京:中国地震局,2008.
- QIAN Jiadong, FENG Zhisheng, MA Senlin, et al. Technical Requirements of Instruments in Network for Earthquake Monitoring Geomagnetic Meter Part2: Proton Vector Magnetometer[S].Beijing: China Earthquake Administration,2008.