**DOI**:10.14075/j.jgg.2024.12.582

**文章编号**:1671-5942(2025)12-1310-07

# 徐州、高淳地区应变场及高淳台潮汐因子地震响应特征

郝 冉[1] 杨 驰[2] 何 斌[2] 章 东[2] 张 朋[1] 高明智[1] 张 岑[2]

1 宿迁地震监测中心站,江苏省徐州市泰山南路 72-2 号,221008

2 江苏省地震局,南京市卫岗 3 号,210014

**摘 要**:利用四分量钻孔应变仪对江苏省徐州和高淳地区 2019—2023 年地壳应变变化进行定量分析,探究区域应变场特征及其与地震活动性的关系。由应变参数结果可知,徐州和高淳地区在研究时段处于稳定状态。高淳台潮汐因子响应值在江苏盐城大丰海域 5.0 级地震前后出现先离散后稳定的异常变化。通过分析其变化特征、与断裂走向和地震震源机制解的关系推断,在孕震过程中,该区域应力应变经历了从积累到释放的过程,且潮汐因子能够在一定程度上反映该变化。

**关键词**:应力应变特征;维尼迪科夫调和分析;分量钻孔应变仪;应变场;潮汐因子

**中图分类号**:P315 **文献标识码**:A

江苏地区位于华东地块东部,地震活动性较中国西部低,但因人口密集、城市发展水平高,若发生地震将产生严重影响。华东地区内郯庐断裂活动历史悠久、影响范围广,茅山断裂活动性强、对周边地震活动及地质灾害影响深远,二者的地震活动性备受关注[1-5]。现阶段江苏地区地壳形变监测研究虽取得一定成果[6-7],但利用钻孔应变观测数据的详尽分析相对滞后。

四分量钻孔应变仪可观测地壳应变变化,监测构造运动的持续演变[8],提供应变变化主要方向和速率信息。部分学者利用该仪器进行相关研究[9-11],如提出应变参数换算方法,推导耦合系数计算公式,通过计算潮汐因子玫瑰图监测断层接触状态等,但基于其观测数据解算应变参数并结合潮汐因子玫瑰图结果的综合分析尚待开展,相关研究成果较少。

徐州台和高淳台布设有 2 套 YRY-4 型四分量钻孔应变仪,数据质量高、运行稳定,可为郯庐断裂带及溧阳震区应变场特性研究提供数据支撑。本文利用 2019—2023 年江苏地区四分量钻孔应变仪观测数据解算应变参数,分析应力状态,并结合潮汐因子玫瑰图综合分析应变场,对探究研究区地球动力学特征和反映应力状态、运动方向、运动速率与地震活动的关系具有重要参考意义。

## 1 测点概况与仪器观测原理

### 1.1 测点概况

江苏省地跨华北板块和扬子板块两大一级构造单元,区域内断裂构造较为发育,其中郯庐断裂、茅山断裂值得关注(图 1)。江苏地区 2 套分量应变仪分别布设于距郯庐断裂带及茅山断裂较近的基岩上,其中徐州台处于郯庐断裂带江苏段、无锡-宿迁断裂西侧,第 1 分量方位角为 42°,台基岩性为寒武系灰岩;高淳台处于郯庐断裂带南段

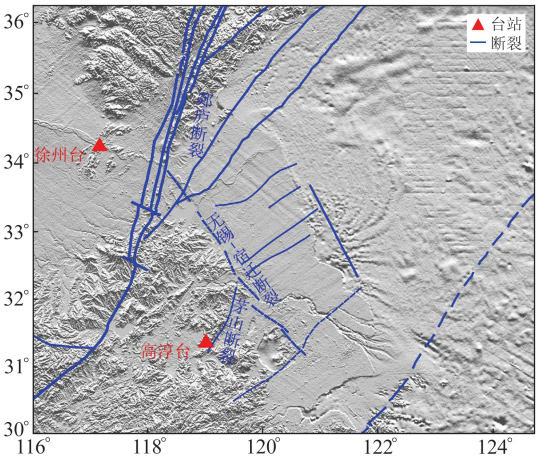



图 1 区域构造

Fig. 1 Regional structure

**收稿日期**:2024-12-26

**项目来源**:江苏省地震局科学基金(23407);中国地震局“三结合”课题(SJH-202502004)。

**第一作者简介**:郝冉,工程师,主要研究方向为地球物理学,E-mail:haoran910106@163.com。

东侧、茅山断裂带西侧,第 1 分量方位角为−33°,台基岩性为第三系长石砂页岩。

### 1.2　仪器观测原理

四分量钻孔应变观测的是地壳浅地表水平方向的应变变化(本质上观测的是该测点附加应力的连续变化),工作原理是将内部含有电容式位移传感器的探头安装在钻孔中,在钻孔与探头间填充特制水泥进行耦合,测量探头套筒内径的相对变化。在 $\theta$ 方向布设的传感器可直接测定探头套筒在该方向内径的相对位移 $S_\theta$,即元件长度变化量与元件长度之比。$S_\theta$ 与 $\varepsilon_1$、$\varepsilon_2$ 和 $\varphi$ 的关系可表示为[12]:

$$S_\theta = A(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + B(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)\cos 2(\theta - \varphi) \quad (1)$$

式中,$A$、$B$ 为耦合系数,为 2 个特定常数,其取值与测点所用套筒、水泥及岩性相关;$\varepsilon_1$ 为最大主应变;$\varepsilon_2$ 为最小主应变;$\varphi$ 为正北方向与最大主应变 $\varepsilon_1$ 之间的夹角。

## 2　四分量钻孔应变数据计算方法

### 2.1　自洽分析

自洽分析是指探头套筒在钻孔中耦合理想的情况下,4 路观测数据应满足自检方程[12],可解算平面应变参数,同时能检验观测数据的可靠程度。

### 2.2　实地相对标定

由于实际观测中探头套筒在钻孔中耦合程度无法达到理想状态,因此需要采用实地相对标定方法[13-14]对仪器进行机械标定,目的是利用元件灵敏度校正系数纠正各元件观测值对自洽方程的偏离。

### 2.3　应变数据计算方法

根据四分量钻孔应变仪观测数据具有对称性的特点,为清晰表述其物理意义,参照标准 DB/T54—2013《地震地壳形变观测方法 钻孔应变观测》,采用主应变-主方向坐标进行应变数据计算,设 $S_i(i=1,2,3,4)$ 为观测值,令:

$$\begin{cases} S_{13} = S_1 - S_3 \\ S_{24} = S_2 - S_4 \\ S_a = (S_1 + S_2 + S_3 + S_4)/2 \end{cases} \quad (2)$$

式中,$S_a$ 为替代面应变;$S_{13}$ 和 $S_{24}$ 为 2 组替代剪应变,由此可将 4 个观测值变为 3 个间接观测值。利用三角公式可得主应变($\varepsilon_1$、$\varepsilon_2$)和主方向 $\varphi$[15]:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \dfrac{1}{4A}S_a + \dfrac{1}{4B}\sqrt{S_{13}^2 + S_{24}^2} \\ \varepsilon_2 = \dfrac{1}{4A}S_a - \dfrac{1}{4B}\sqrt{S_{13}^2 + S_{24}^2} \\ \varphi = \dfrac{1}{2}\tan^{-1}\left(\dfrac{S_{24}}{S_{13}}\right) + \theta_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中,$\theta_1$ 为 1 号元件方位;$\varphi$ 为需要求解的主应变方向,即钻孔区域受应力时实际变形后最大变形椭球的长轴方位。需要说明的是,主应变方向不能代表主张应力方向或主压应力方向,应根据唐磊等[16]提出的应力应变状态判定方法进行具体分析。

### 2.4　潮汐因子玫瑰图

池顺良等[9]认为,应变观测中的断层阻断效应使台站附近固体潮应变与理论值存在较大偏差,且潮汐因子玫瑰图长轴方向与断层走向大致平行,表明台站附近断层可能是潮汐应变各向异性的原因。为显示测点潮汐应变各向异性方位的分布,需基于应变资料潮汐调和分析方法对固体潮应力数值计算结果进行分析。利用四分量钻孔应变仪 3 个分量计算不同角度水平正应力,再经弹性力学分析求解不同方向水平正应力潮汐因子响应值[17],据此绘制测点潮汐因子玫瑰图,以分析区域构造运动状态及测点附近断层大致走向[18]。

## 3　数据计算与分析

### 3.1　观测数据的可靠性分析

基于分量应变仪自检方程,对 2 个测点 2019—2023 年观测数据小时值进行自检。结果显示,高淳台自检相关系数大于 0.9,自洽性良好,数据可靠;徐州台自检相关系数为 0.857 2,面应变形态失洽,曲线变化不一致,可靠性较低。失洽的主要原因是徐州台 4 个分量对气压和水位干扰的响应不同步,元件灵敏度偏差导致仪器对干扰响应不同。据刘琦等[13]对全国各分量应变仪观测台 4 路元件观测值相对标定及对气压、水位影响的拟合反演结果,徐州台第 2 路元件气压系数较大,第 3 路元件气压、水位系数较大,其他元件受水位和气压影响波动小,这是徐州台自检相关系数较低的原因。

### 3.2　实地相对标定

由于徐州台数据在实际观测中偏离自洽方程较大,需要经过实地相对标定,使用元件灵敏度补偿系数来修正观测值之间的偏差,使其更接近自洽方程。以概率统计公式为参照,通过计算观测数据的信度 $C_{95}$ 来评估其自洽程度,利用差分信号特征优化及校正仪器所获取的原始测量数据。为更加直观地体现校准前后数据自洽程度的提升,选取 2019—2021 年观测数据校准前后的时间序列曲线(图 2,图中 ns 表示应变单位纳应变)展示实地相对标定分析成果。结果表明,校准前的面应变曲线($S_1+S_3$、$S_2+S_4$)存在一定离散,校准后的面应变曲线($R_1+R_3$、$R_2+R_4$)基本重合,校正后的信度也提高到 0.900 8。

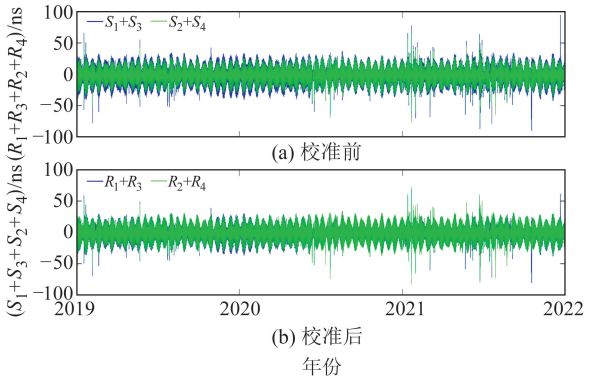



图 2 徐州台 4 元件数据校准前后对比

Fig. 2 Comparison of four component data before and after correction of Xuzhou seismic station

### 3.3 应变参数分析

基于 2 套四分量钻孔应变仪 2019—2023 年 30 d 均值实测数据，利用式(3)计算 2 个测点区域的应变参数(最大主应变 $\varepsilon_1$、最小主应变 $\varepsilon_2$、面应变 $\varepsilon_a$、剪应变 $\varepsilon_s$ 和应变变化主方向 $\varphi$)变化速率。由图 3、4(其中，$k_\varepsilon$ 表示应变数据变化速率，$d_\varepsilon$ 表示应变数据标准差)可知，2 个测点应变参数年变化趋势一致，变化速率稳定，应变主方向基本不变。邱泽华等[11]研究认为，四分量钻孔观测基值无明确意义，可对所有观测数据进行起点归零处理以清晰分辨变化趋势。为消除月变化影响，本文选取 30 d 均值数据绘制应变参数变化曲线及拟合直线(图 3、4)。可以看出，2 个测点长期变化曲线保持稳定上升或下降趋势，应变主方向变化稳定，可视为区域构造应变变化。此外，2 个测点面应变 $\varepsilon_a$ 平稳下降，表明周围区域处于稳定受压状态。综上可知，2019—2023 年 2 个测点整体构造状态稳定、活动性弱。徐州台面应变变化速率约为 $10\ 940\times10^{-9}$/a，即每年平均变化 $-10$ 个微应变左右，较高淳地区偏大，可能是因为徐州台四分量钻孔应变仪的钻孔环境及钻孔和应变传感器的耦合情况不同，导致不同台站间面应变变化速率存在差异。从全国台站应变参数计算结果来看，变化速率可差数倍至数百倍[15]。

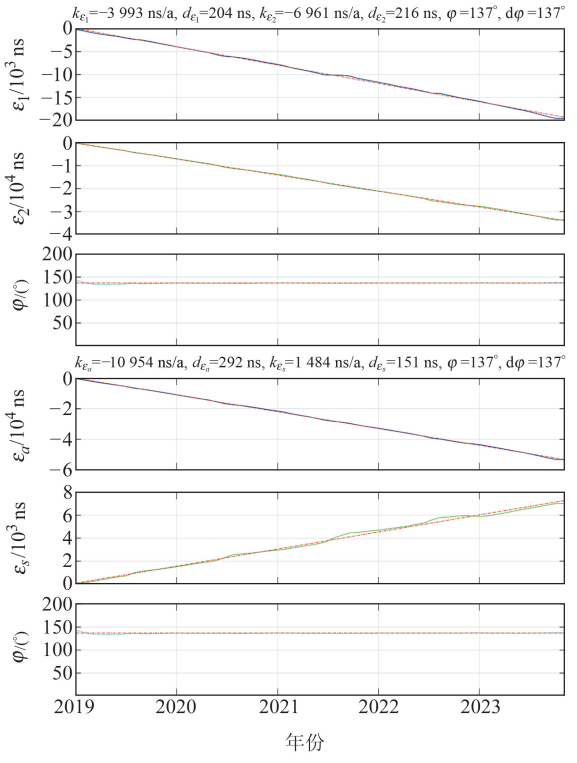



图 3 徐州台 30 d 均值应变参数变化

Fig. 3 Variation of 30-day mean strain parameters of Xuzhou seismic station

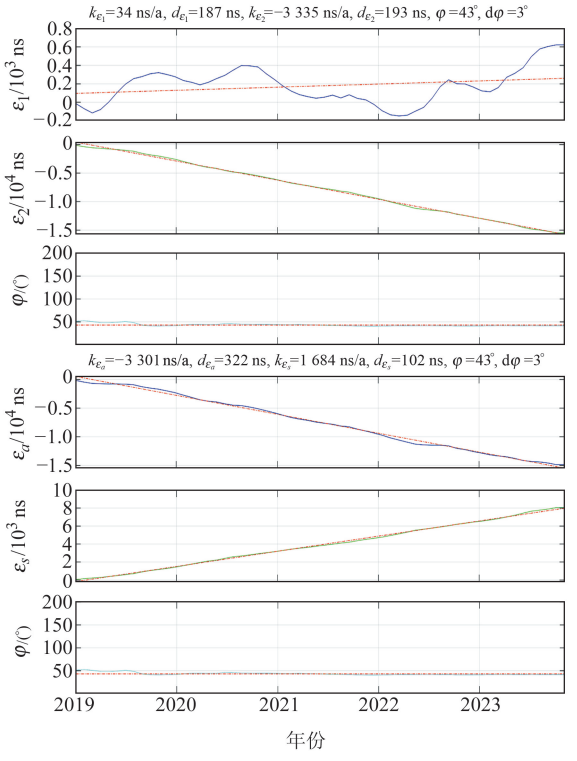



图 4 高淳台 30 d 均值应变参数变化图

Fig. 4 Variations of 30-day mean strain parameters of Gaochun seismic station

### 3.4 潮汐因子玫瑰图分析

在钻孔应变实际观测中，由于地层中发育较多断裂，在构造运动中地壳介质的紧密程度会发生改变，从而导致潮汐因子响应出现变化，因此利用潮汐因子响应玫瑰图可以研究断裂与潮汐因子响应变化的关系。

利用维尼迪科夫调和分析法计算 2019—2023 年 2 个台站的潮汐因子玫瑰图，结果如图 5～7 所示。根据断裂与潮汐因子响应变化的关系发现，徐州台存在 2 个潮汐因子响应增大的方位(图 5)，分别为 NEE-SWW 和 NWW-SEE 向，说明徐州台受周边 2 条断裂的影响；高淳台潮汐因子玫瑰图长轴方位为 NEE-SWW 向(图 6～7)，说明该测点主要受 NEE-SWW 向断裂的影响。

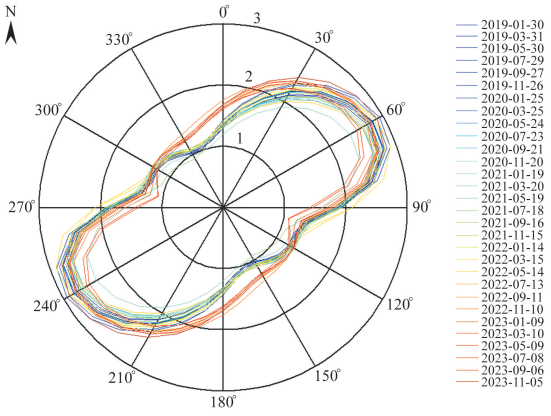



图 5　徐州台 2019-01—2023-11 潮汐因子玫瑰图

Fig. 5　Rose diagram of tidal factors of Xuzhou seismic station from January 2019 to November 2023

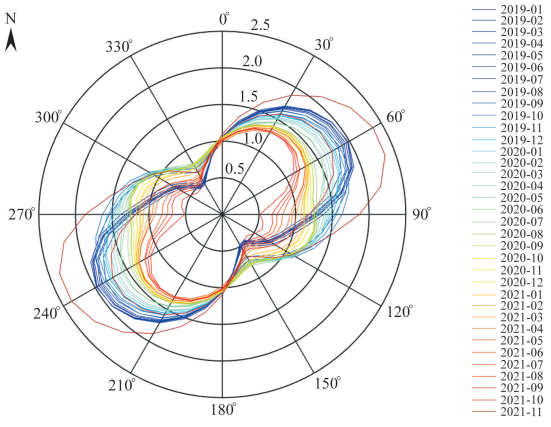



图 6　高淳台 2019-01—2021-11 潮汐因子玫瑰图

Fig. 6　Rose diagram of tidal factors of Gaochun seismic station from January 2019 to November 2021

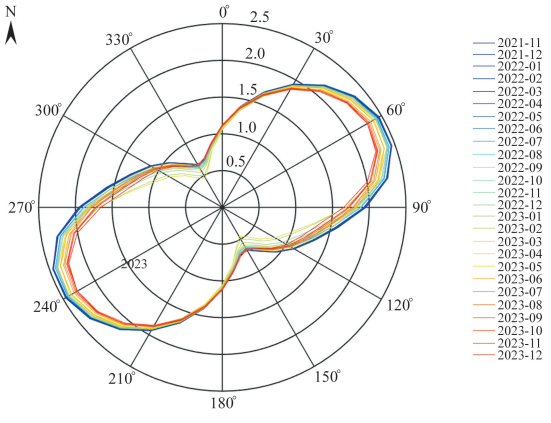
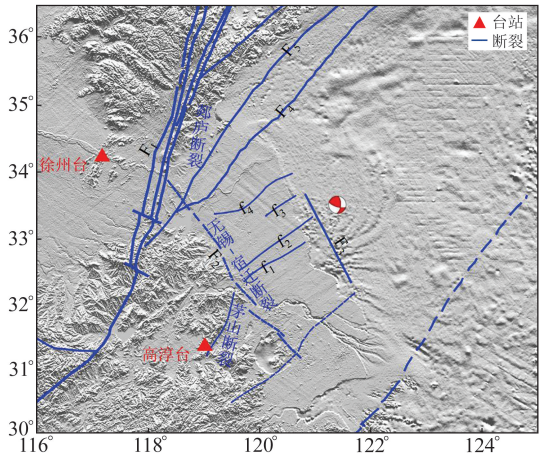



图 7　高淳台 2021-11—2023-12 潮汐因子玫瑰图

Fig. 7　Rose diagram of tidal factors of Gaochun seismic station from November 2021 to December 2023

徐州台分量应变仪的潮汐因子玫瑰图随时间序列变化稳定,集中度整体较高,可能说明徐州台周边区域整体构造状态稳定,活动性偏弱,这与李家灵等[19]认为郯庐断裂带江苏段地震活动较弱的原因是断层可能处于活动闭锁状态的观点一致。高淳台潮汐因子响应值出现先离散后稳定的现象(图 6～7),潮汐因子响应值主要变化方向为 NEE 向,变化率接近 50%,变化过程为 2019-01—2021-10 持续收缩,2021-11—2023-12 扩张至稳定状态,此次潮汐因子异常变化特征十分典型。

池顺良等[18]研究认为,玉树台潮汐因子在汶川 8.0 级地震前出现大幅扩张变化,并且指出该现象是由测点区域构造运动导致断层接触状态发生改变所造成。2021-11 江苏盐城大丰海域发生 5.0 级地震(图 8),USGS 结果显示此次地震为走滑型地震(节面Ⅰ:走向 4°、倾角 58°、滑动角 156°;节面Ⅱ:走向 107°、倾角 70°、滑动角 34°),主压应力轴 P 方位角为 233°。震后,高淳台潮汐因子结束了持续收缩的状态,随后潮汐因子玫瑰图变化持续稳定,分析认为,特定方向上的潮汐因子显著减少,可能意味着该方向上的应力积累或应力释放机制发生了变化。这种变化可能是因为原有岩石中的应变能无法通过潮汐效应来释放,导致潮汐因子响应值逐渐减小,地震发生后地壳的应力场分配重新达到比较稳定的状态,潮汐响应也随之趋于稳定,这与何奕成等[20]的分析结果一致。高淳台潮汐因子收缩变化与玉树台潮汐因子扩张变化现象类似,其与地震的相关性有待进一步研究。




黄色线条代表苏北-南黄海盆地构造边界;沙滩球代表 USGS 给出的大丰海域 5.0 级地震的震源机制解;黑色线条代表断层。$F_1$:郯庐断裂带;$F_2$:无锡-宿迁断裂;$F_3$:苏北-滨海断裂;$F_4$:嘉山-响水口断裂;$F_5$:连云港-千里岩断裂;$f_1$:泰州断裂;$f_2$:小海-陈家堡断裂;$f_3$:盐城-南洋岸断裂;$f_4$:洪泽-沟墩断裂

图 8　盐城大丰海域 5.0 级地震震源机制解

Fig. 8　Source mechanism solution of $M$5.0 earthquake in Dafeng sea area, Yancheng

## 4　区域应变场特征分析

分析 2 个测点应变参数可知,主应变和面应变变化速率稳定且为负值,徐州台和高淳台应变主方向分别为 137°和 43°。由于计算得到的应变主方向无法与区域构造的主应力方向进行直接对比,本文根据唐磊等[16]提出的应力应变状态判定方法对 2 个测点的主应力方向进行分析(图 9)。

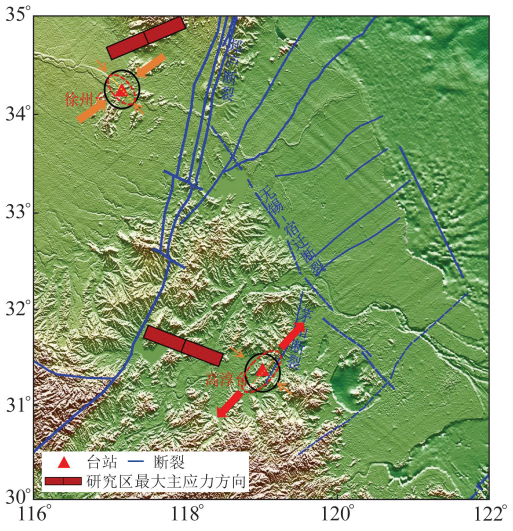



图 9 徐州台和高淳台应力应变状态分析

Fig. 9 Analysis of stress-strain states of Xuzhou and Gaochun stations

徐州台应变主方向为 137°，主应变 $\varepsilon_1<\varepsilon_2<0$，剪应变 $S_{13}<0$、$S_{24}<0$(图 10)，结合徐州台四分量钻孔应变仪器安装方位角 42°，经方位校正后其主压应力方向为 N47°E(图 9)，该结果与孙业君等[5]采用应力张量反演方法获得的郯庐断裂带鲁苏皖段压应力方位近 NEE 向的结论基本一致。高淳台应变主方向为 43°，主应变 $\varepsilon_1>0$、$\varepsilon_2<0$，剪应变 $S_{13}<0$、$S_{24}>0$(图 11)，结合高淳台四分量钻孔应变仪器安装方位角－33°，经方位校正后其主张应力方向为 N43°E(图 9)，主压应力方向为 N47°W，该结果与溧阳震区及邻区主压应力场方向为 NWW 向的观点一致[21]。由此可知，使用分量应变仪应力应变状态判定方法分析的应力方向结果是可靠的，利用其结果研究区域应力环境变化是可行的。

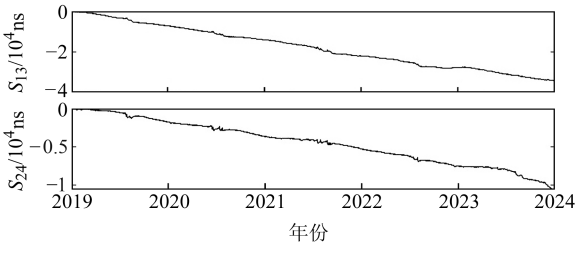



图 10 徐州台剪应变变化

Fig. 10 Shear strain variations of Xuzhou seismic station

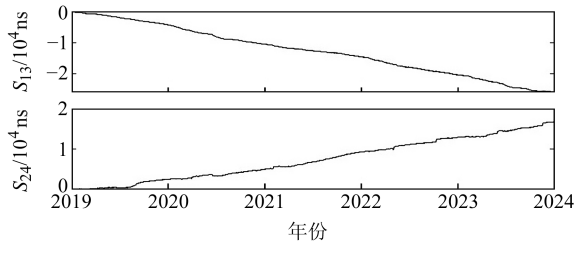



图 11 高淳台剪应变变化

Fig. 11 Shear strain variations of Gaochun seismic station

由 2 个测点潮汐因子玫瑰图可知，玫瑰图长轴方向均与测点周围断裂走向一致(图 1)。徐州台玫瑰图长轴方向与郯庐断裂及无锡-宿迁断裂走向较为一致，潮汐因子玫瑰图长轴方向整体为 NEE 向，该结果与郯庐带鲁苏皖段整体走向以 NE-SW 和 NW-SE 为主、倾角主要集中在 60°～90°的结论[5]基本一致；高淳台玫瑰图长轴方向整体为 NEE 向，与胡连英等[22]认为茅山断裂总体走向为 NNE 的观点基本一致。上述分析说明，潮汐因子玫瑰图能够大致反映周边断层走向，并且断层的阻断效应是真实存在的。

## 5 结 语

1)应变参数分析结果表明，2 个测点 2019—2023 年变化曲线均保持相对稳定的上升、下降趋势且主方向比较稳定，说明研究期间江苏区域整体构造活动平稳；同时面应变 $\varepsilon_a$ 持续平稳下降，说明江苏区域构造应变保持稳定的挤压状态，活动性较弱。

2)2 套分量钻孔应变仪整体潮汐因子玫瑰图曲线随时间序列变化平稳，集中度整体较高，表明江苏区域构造稳定，该结果与应变参数分析结果能够相互验证。2 个测点潮汐因子玫瑰图的长轴方位与区域周边断裂走向基本一致，说明断层的阻断效应真实存在。

3)高淳台潮汐因子响应值的异常变化反映了测点区域的构造运动对断层接触状态的影响，进一步验证了潮汐因子响应值的变化与孕震过程中应力应变的积累与释放之间的关系。

## 参考文献

[1] 周翠英，蒋海昆，周焕鹏，等. 华东中强震的构造分类及地震活动图像中、短期异常特征[J]. 地震，2004，24(4)：87-96(Zhou Cuiying，Jiang Haikun，Zhou Huanpeng，et al. Structure Classification of Moderately Strong Earthquakes in East China and the Characteristics of Medium-and Short-Term Anomalies of Seismicity Pattern[J]. Earthquake，2004，24(4)：87-96)

[2] 郑建常，冀东普，王鹏，等. 华东地区地震活动加速指数 AI 算法应用探讨[J]. 地震，2010，30(3)：129-139(Zheng Jianchang，Ji Dongpu，Wang Peng，et al. Discussion and Application of Seismicity Acceleration Index Algorithm in Eastern China[J]. Earthquake，2010，30(3)：129-139)

[3] 顾方琦，张春芝，张枝榴，等. 1970 年以来华东地区地震活动主体区的迁移[J]. 地震地质，2001，21(3)：475-480(Gu Fangqi，Zhang Chunzhi，Zhang Zhiliu，et al. Migration of the Main Seismic Areas in East China since 1970[J]. Seismology and Geology，2001，21(3)：475-480)

[4] 黄耘，田建明，郑江蓉. 华东地区地震活动性参数的中短

期异常动态变化特征[J]. 地震学刊, 2001, 21(3): 1-9(Huang Yun, Tian Jianming, Zheng Jiangrong. Characteristics of the Middle Short-Term Dynamic Variations in the Anomalies of Seismicity Parameters in the East China Region[J]. Journal of Seismology, 2001, 21(3): 1-9)

[5] 孙业君, 黄耘, 刘泽民, 等. 郯庐断裂带鲁苏皖段及邻区构造应力场特征及其动力学意义[J]. 地震地质, 2021, 43(5):1188-1207(Sun Yejun, Huang Yun, Liu Zemin, et al. Characteristics of Tectonic Stress Field and Dynamic Significance in the Shandong-Jiangsu-Anhui Segment of Tancheng-Lujiang Fault Zone and Its Adjacent Areas[J]. Seismology and Geology, 2021, 43(5):1188-1207)

[6] 鲍海英, 孟科, 王维. GNSS 数据在江苏地震前兆监测中的初步应用与研究[J]. 华南地震, 2014, 34(3): 91-95(Bao Haiying, Meng Ke, Wang Wei. The Preliminary Application of GNSS Data in Earthquake Precursor Monitoring of Jiangsu Province[J]. South China Journal of Seismology, 2014, 34(3): 91-95)

[7] 王维, 沈红会, 叶碧文, 等. 江苏省近期形变特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(5): 502-506(Wang Wei, Shen Honghui, Ye Biwen, et al. The Analysis of Recent Deformation Characteristics in Jiangsu[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(5):502-506)

[8] 邱泽华, 谢富仁, 苏恺之, 等. 发展钻孔应变观测的战略构想[J]. 国际地震动态, 2004, 34(1): 7-14(Qiu Zehua, Xie Furen, Su Kaizhi, et al. New Era of Borehole Strain Observation[J]. Recent Developments in World Seismology, 2004, 34(1): 7-14)

[9] 池顺良, 池毅, 邓涛, 等. 从 5.12 汶川地震前后分量应变仪观测到的应变异常看建设密集应变观测网络的必要性[J]. 国际地震动态, 2009, 39(1): 1-13(Chi Shunliang, Chi Yi, Deng Tao, et al. The Necessity of Building National Strain-Observation Network from the Strain Abnormality before Wenchuan Earthquake[J]. Recent Developments in World Seismology, 2009, 39(1): 1-13)

[10] 张凌空, 牛安福. 分量式钻孔应变观测耦合系数的计算[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3029-3037(Zhang Lingkong, Niu Anfu. Component Borehole Strain Observations Coupling Coefficients Calculation[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9): 3029-3037)

[11] 邱泽华, 唐磊, 郭燕平, 等. 用四分量钻孔应变仪观测构造应变速率[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(5): 1688-1701(Qiu Zehua, Tang Lei, Guo Yanping, et al. Observing Tectonic Strain Rates Using Four-Gauge-Borehole-Strainmeters(FGBS)[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(5): 1688-1701)

[12] Qiu Z H, Tang L, Zhang B H, et al. In Situ Calibration of and Algorithm for Strain Monitoring Using Four-Gauge Borehole Strainmeters(FGBS)[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2013, 118(4): 1609-1618

[13] 刘琦, 张晶, 池顺良. 四分量钻孔应变资料的质量评价及拟合分析[J]. 地震, 2011, 31(2): 87-96(Liu Qi, Zhang Jing, Chi Shunliang. Quality Evaluation and Fitting Analysis of 4-Component Borehole Strainmeter Data[J]. Earthquake, 2011, 31(2): 87-96)

[14] 邱泽华, 石耀霖, 欧阳祖熙. 四分量钻孔应变观测的实地相对标定[J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(1):118-122(Qiu Zehua, Shi Yaolin, Ouyang Zuxi. Relative In-Situ Calibration of 4-Component Borehole Strain Observation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(1):118-122)

[15] 邱泽华, 阚宝祥, 唐磊. 四分量钻孔应变观测资料的换算和使用[J]. 地震, 2009, 29(4):83-89(Qiu Zehua, Kan Baoxiang, Tang Lei. Conversion and Application of 4-Component Borehole Strainmeter Data[J]. Earthquake, 2009, 29(4):83-89)

[16] 唐磊, 邱泽华, 李玉江, 等. 四分量钻孔应变观测近地表应力应变状态的判定与分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2025, 50(1):63-73(Tang Lei, Qiu Zehua, Li Yujiang, et al. Determination and Analysis of Near-Surface Stress-Strain State of 4-Component Borehole Strainmeter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(1):63-73)

[17] 张斯奇, 张怀, 石耀霖. 固体潮应变各向异性研究[J]. 地震, 2013, 33(4): 190-195(Zhang Siqi, Zhang Huai, Shi Yaolin. A Study on Anisotropy of Solid-Tidal Strain[J]. Earthquake, 2013, 33(4): 190-195)

[18] 池顺良, 武红岭, 骆鸣津. 钻孔应变观测中潮汐因子离散性与各向异性原因探讨:"十五"数字地震观测网络分量钻孔应变仪首批观测资料分析解释[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(6): 1746-1753(Chi Shunliang, Wu Hongling, Luo Mingjin. Discussion on Strain Tidal Factor Separation and Anisotropy—Analysis of First Data of Borehole Component Strain-Meter of China's Digital Seismological Observational Networks[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(6): 1746-1753)

[19] 李家灵, 晁洪太, 崔昭文, 等. 郯庐活断层的分段及其大震危险性分析[J]. 地震地质, 1994, 16(2):121-126(Li Jialing, Chao Hongtai, Cui Zhaowen, et al. Segmentation of Active Fault along the Tancheng-Lujiang Fault Zone and Evaluation of Strong Earthquake Risk[J]. Seismology and Geology, 1994, 16(2):121-126)

[20] 何奕成, 缪发军, 赵启光, 等. 2021 年 11 月 17 日江苏大丰海域 $M$5.0 地震震源区三维 P 波速度结构[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(1):167-175(He Yicheng, Miao Fajun, Zhao Qiguang, et al. The Three-Dimensional P-Wave Velocity Structure across the Source Region of Dafeng Sea Area $M$5.0 Earthquake, Jiangsu, on 17 November 2021[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(1):167-175)

[21] 范玉璐, 张鹏, 高研, 等. 长三角溧阳震区地应力环境及构造稳定性分析[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(5): 1842-1852(Fan Yulu, Zhang Peng, Gao Yan, et al. Study of In-Situ Stress State and Tectonic Stability of Liyang Seismic Area in the Yangtze River Delta Region[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(5): 1842-1852)

[22] 胡连英, 徐学思, 孙寿成. 茅山东侧断裂现代运动的地貌学特征[J]. 江苏地质, 1994, 18(1):3-9(Hu Lianying, Xu Xuesi, Sun Shoucheng. Geomorphic Feature of Modern Dynamic Fault in the East Side of Maoshan Mt.[J]. Jiangsu Geology, 1994, 18(1):3-9)

# Strain Field in Xuzhou and Gaochun Areas and Seismic Response Characteristics of Tidal Factors of Gaochun Station

*HAO Ran*[1] *YANG Chi*[2] *HE Bin*[2] *ZHANG Dong*[2]
*ZHANG Peng*[1] *GAO Mingzhi*[1] *ZHANG Cen*[2]

1 Suqian Earthquake Monitoring Center Station, 72-2 South-Taishan Road, Xuzhou 221008, China
2 Jiangsu Earthquake Agency, 3 Weigang, Nanjing 210014, China

**Abstract**: We quantitatively analyzed the crustal strain changes in Xuzhou and Gaochun areas of Jiangsu province from 2019 to 2023 using four-component borehole strainmeters, and explored the characteristics of regional strain field and its relationship with seismic activity. According to the strain parameter results, both Xuzhou and Gaochun areas were in a stable state during the study period. The response values of tidal factors at Gaochun seismic station exhibited an abnormal change of first dispersion, then stabilization before and after the *M*5.0 earthquake in Dafeng sea area of Yancheng, Jiangsu province. Through the analysis of its variation characteristics, the relationship with the strike of faults and the focal mechanism solution of earthquakes, it can be inferred that in the process of earthquake preparation, the stress and strain in this area experienced a process from accumulation to release, and the tidal factors can reflect this change to a certain extent.

**Key words**: stress-strain characteristics; Venidikov harmonic analysis; component borehole strainmeter; strain field; tidal factors

**Foundation support**: Scientific Foundation of Jiangsu Earthquake Agency, No. 23407; Combination Project with Monitoring, Prediction and Scientific Research of Earthquake Technology, CEA, No. SJH-202502004.

**About the first author**: HAO Ran, engineer, majors in geophysics, E-mail: haoran910106@163.com.

(上接第 1309 页)

[13] Wahr J M. Body Tides on an Elliptical, Rotating, Elastic and Oceanless Earth[J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1981, 64(3): 677-703

[14] 徐建桥, 周江存, 陈晓东, 等. 武汉台重力潮汐长期观测结果[J]. 地球物理学报, 2014, 57(10): 3091-3102(Xu Jianqiao, Zhou Jiangcun, Chen Xiaodong, et al. Long-Term Observations of Gravity Tides from a Superconducting Gravimeter at Wuhan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(10): 3091-3102)

[15] 梁莹, 陈晓东, 孙和平, 等. 云南丽江台 OSG-066 重力潮汐观测结果及应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(7): 713-719(Liang Ying, Chen Xiaodong, Sun Heping, et al. Gravity Tide Observation with OSG-066 and Their Applications at Lijiang Station, Yunnan Province, China[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(7): 713-719)

# Influence of Time-Varying Atmospheric Admittance on Earth Tide

*GONG Lizhuo*[1,2] *YANG Weiwei*[1,2] *CUI Xiaoming*[1,2] *SUN Heping*[1,2]

1 State Key Laboratory of Precision Geodesy, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CEA, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China
2 University of Chinese Academy of Sciences, A19 Yuquan Road, Beijing 100049, China

**Abstract**: We utilize long-term observation data from five superconductor gravimeters in China and Europe within the IGETS network, and apply various atmospheric pressure correction strategies to analyze the impact of time-varying admittance on the determination of Earth tide parameters. The results show that the temporal variability of admittance significantly influences Earth tide parameters, with effects on time-varying characteristics of the Earth's free core nutation period reaching up to 10 sidereal days. Taking into account the time-varying characteristics of admittance and global atmospheric pressure effects correction, the tidal wave amplitude factor is found to be closer to theoretical values. This has important implications for the construction of regional tidal models and subtle dynamic signals analysis.

**Key words**: atmospheric admittance; superconductor gravimeter; tidal model; solid tide; free core nutation

**Foundation support**: National Natural Science Foundation of China, No. 42394114, 42174108; the Young Top-Notch Talent Cultivation Program of Hubei Province.

**About the first author**: GONG Lizhuo, PhD candidate, majors in Earth's free oscillations, E-mail: 418029833@qq.com.