

强对流天气引致的“前驱波”及其对地震前兆诊断的新启示：以青藏高原东北部为例

杨小林

井冈山大学建筑工程学院, 江西 吉安

收稿日期: 2023年12月25日; 录用日期: 2024年2月2日; 发布日期: 2024年2月26日

摘要

地震前驱波自报道以来, 国内已有不少研究相继发现了该变化, 但其中不乏一些误诊案例。鉴于当下前驱波识别中存在的一些问题, 笔者着重从观测实践的角度出发, 同时还结合天气动力学背景, 对2016年8月18日青海门源台钻孔应变记录中出现的形似远震前驱波的异常进行了综合诊断。结果表明, 该“前驱波”主要源自青藏高原东北部强对流天气过程中的气压扰动。这一工作不仅有助于拓展前驱波理性识别的视角, 同时还能青藏高原地球物理观测中短时异常的溯源研究提供参考。

关键词

强对流天气, 青藏高原, 前驱波, 地震前兆, 钻孔应变, 气压

The “Precursor Wave” Caused by Severe Convective Weather and Its New Implications for the Diagnosis of Earthquake Precursors: A Case Study of the Northeastern Tibetan Plateau

Xiaolin Yang

College of Civil Engineering and Architecture, Jinggangshan University, Ji'an Jiangxi

Received: Dec. 25th, 2023; accepted: Feb. 2nd, 2024; published: Feb. 26th, 2024

Abstract

Since the earthquake precursor wave was reported, many studies have found this change, but some of them are cases of misdiagnosis. In view of the existing problems in the identification of precursor waves, the author makes a comprehensive diagnosis of the anomalies that appear like far-earthquake precursor waves in the borehole strain records of Menyuantai, Qinghai Province on August 18, 2016 from the perspective of observation practice and combined with the background of weather dynamics. The results show that the “precursor wave” mainly originates from the barometric disturbance during the strong convective weather in the northeastern part of the Tibetan Plateau. This work not only helps to expand the perspective of rational identification of precursor waves, but also provides a reference for short-term anomaly tracing research in geophysical observation of the Tibetan Plateau.

Keywords

Severe Convective Weather, Tibetan Plateau, Precursory Wave, Earthquake Precursor, Borehole Strain, Barometric Pressure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地震前驱波自 1974 年被发现以来[1], 因其具有一定短临前兆价值, 所以受到了不少学者的关注。然而, 在前驱波的识别和研究中, 一些学者在没有充分排除仪器故障[2] [3] [4] [5]、电源问题[6] [7]、爆破[8] [9]、冲击地压[10]、盐岩等地层蠕变[11] [12]、天气[13]或水文[14]过程、洞室环境变动[15]、工程施工[16] [17]及动物干扰[18]等非构造运动噪声的前提下, 仅依据时间相关性、KdV (Korteweg-de Vries)或 sine-Gordon 方程的理论解等, 便将震前数天内地球物理时序曲线中, 所出现的间歇性脉冲及高频谐波等推定为前驱波[19] [20] [21]。显然, 这种因果推断方式尚不足以论证及诠释其源于发震断裂的动力过程[22]。因为我们深知, 时间或形态的相关(似)性并不意味着物理关联。因此, 许多“前驱波”的本源有待进一步诊断和审视。

在众多非构造运动所引致的“前驱波”中, 强对流天气无疑是一种常见且广泛存在的动力源, 该天气系统是由深厚湿对流所产生的飑线、雷暴大风、冰雹和短时强降水等各种灾害性天气, 其水平尺度一般介于几十米至几百公里, 通常具有能量强、移速快(数十公里每小时)和生命史短(数分钟至数十小时)等特点[23]。在其影响下, 局地或区域性地壳会出现瞬时的变形过程; 另外, 其扰动形态还与地震前驱波十分相似, 所以极易在地震短临前兆识别中产生误判[24]。尽管此种干扰源由来已久[25], 但在气象“前驱波”的判别和溯源研究中, 还鲜有针对性的个例分析。

青藏高原是全球海拔最高(平均在 4000 m 以上)且地形最为复杂的内陆大高原, 高原内太阳辐射强烈, 河流、冰川和湖泊等水资源丰富, 这种独特的地形、水汽、大气动力和热力等条件, 为该区强对流活动提供了十分有利的生成环境; 而随着全球变暖, 近年来, 其东北部青海高原的暖湿化现象愈加明显, 与之相应, 强对流天气也日益频发[26]。

2016年8月17~18日,在青藏高原东北部出现了一次以冰雹和雷暴大风为主的大范围强对流天气[27][28];而较为巧合的是,大西洋南乔治亚岛(South Georgia Island)东部于19日发生了M7.4地震;在这两种事件的相继作用下,青海门源台钻孔应变仪记录到了一次典型的远震“前驱波”。考虑到该变化可为非震源“前驱波”研究提供较好的范例,即例证价值颇高;因此,本文特意对其进行了较系统的诊断;相关结果,不单有助于揭示青藏高原瞬时地壳变形的驱动力,而且还能为“前驱波”的科学溯源等提供参考。

2. 钻孔应变台及仪器简介

门源台(37.23°N, 101.37°E)位于祁连山中段的门源盆地内,海拔高约2978 m,该台于2007年7月安装了YRY-4型四分量钻孔应变仪,该仪器的分辨率优于 10^{-10} (注:nstrain = 10^{-9}) [29],采样间隔为1分钟。其钻孔深度为47.4 m,探头所处围岩的岩性为砂岩;其中,1号径向位移传感器(以下简称元件)的方位角为 7° ,其余元件的方位角及孔身岩性结构如图1所示;此处需要说明的是,在后期运行中,探头内的2号和3号元件因故障而停测。至于地面气象要素观测,则主要有气压、气温和降水量。从已有的观测实践来看,该台钻孔应变仪主要受气压影响较为显著[30][31]。

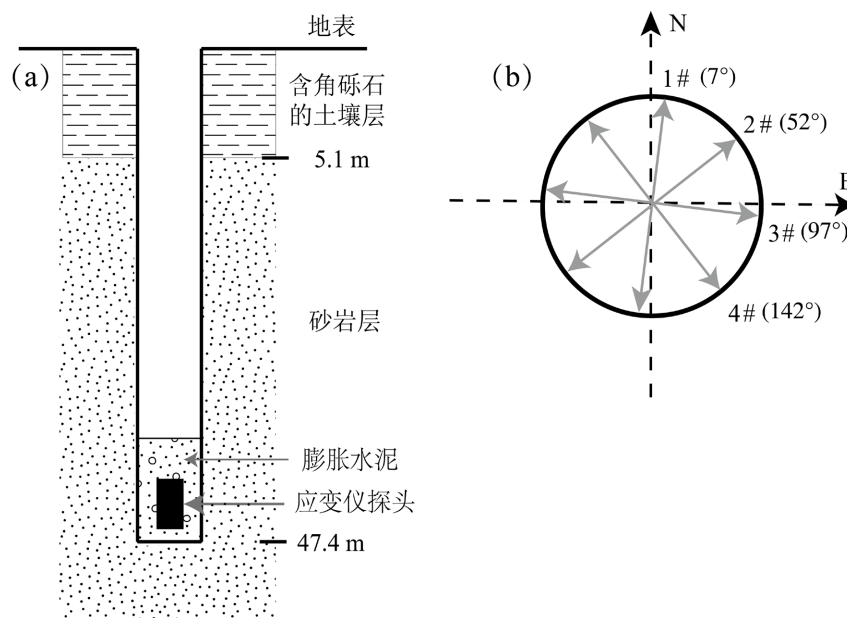


Figure 1. (a) The lithological log; (b) the four strain-gauge orientation for YRY-type bore-hole strainmeter at Menyuan station

图 1. (a) 门源台钻孔的岩性结构; (b) 探头内 4 个元件的方位角

3. 强对流天气过程和远震概况

2016年8月17日05:00时至18日12:00时(北京时,下同),西太平洋副热带高压外围的西南暖湿气流和南下东移的北方冷空气在青藏高原东北部交汇,区内自西北向东南先后出现了广泛的雷暴大风、冰雹和短时强降水等强对流天气(图2(a));其中,门源县的冰雹直径高达40 mm [27][28]。由于此次极端天气所释放的能量较大、破坏力较强,因此不仅给青海东北部地区的工农业等带来了较大的损失,同时还导致区内地壳出现了瞬时的变形过程。

以门源台为例,在雷暴大风的影响下,该台气压在18日05:00~09:00时段出现了一簇明显的脉冲(图2(b)),受其激励,钻孔应变的两个分量也同步记录到了小幅的波列变化(图2(c))。但另一个有趣的现象是,

大西洋南乔治亚岛东部地区在 19 日 15 点 32 分发生了一次逆冲型地震(M7.4)，其震中位于(55.285°S, 31.877°W)，震源深 10 km [32]，该台钻孔应变仪(震中距约为 16,000 km)对此次远震的响应也颇为显著(图 2(c))。假若在忽略天气动力学的背景下，仅以震源前驱波的视角来看，那么 18 日门源台所记录到的短时应变波(震前约 34.5 hr)，很可能在机器学习或人工辨识过程中被误判为该远震的前驱波。针对这种似是而非的问题，本文将在下一节中对该变化进行归因诊断。

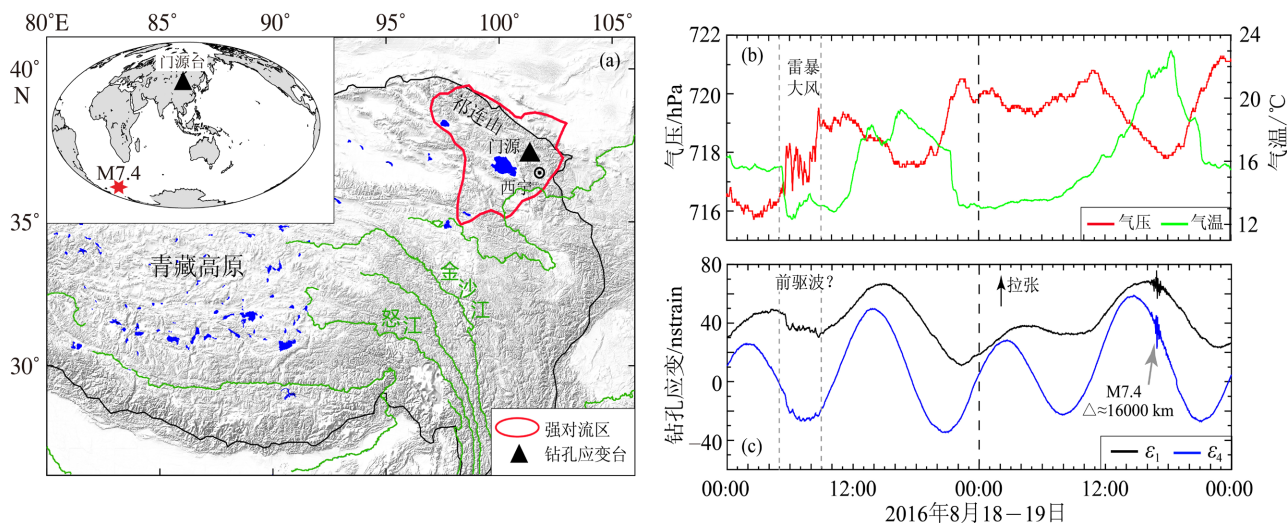


Figure 2. (a) The area (enclosed with red line) influenced by the severe convective weather, and (b) the corresponding changes of surface meteorological elements; (c) the fluctuation of crustal deformation induced by this extreme weather were also recorded at Menyuan station. The gray arrow marks the co-seismic strain responses of M7.4 earthquake east of South Georgia Island. The inset shows the epicenter location. The positive changes in strain signals mean surrounding rock extension

图 2. (a) 强对流天气活动范围; (b) 地面气象要素变化; (c) 为门源台钻孔应变仪记录到的气压波扰动和远震应变波。灰色箭头表示南乔治亚岛以东 7.4 级地震的同震应变响应。插图显示了震中的位置。应变信号的正变化意味着围岩的伸展

4. 强对流天气产生的“前驱波”

为客观揭示门源台“前驱波”的物理本源，以下将着重对短时气压扰动和瞬时应变波间的因果关联进行探究。相比于固体潮和大气潮，雷暴大风期间的气压和应变扰动周期相对较短(视周期 < 1 hr)，因此本文采用无相移的 2 阶 Butterworth 滤波器，对 18 日前 16 个小时的气压和钻孔应变分钟值进行了带通滤波，滤波频段为 6 min 至 1 hr。该步骤主要是为了更清楚地呈现扰动的细节特征，具体结果如图 3 所示。

总体来看，气压扰动历时约 4 小时，主要由 6 个脉冲波构成(图 3(a))；其中，第 2 个脉冲的幅度最大，在 15 min 内气压骤降了约 132 Pa；第 5 个脉冲的降幅最小，约为 111 Pa，其余则介于这两者之间。此处需要说明的一个问题是，由于这些气压脉冲波的波数有限，所以难以采用快速傅里叶变换来求取其准确的优势振幅[33]；至于其主频，则大致为 43 min。

在气压脉冲波的激励下，钻孔应变的两个分量均展现出了负相关的波形(图 3(b))，与气压激励的相关系数分别高达 -0.8636 、 -0.8681 ；另外，本文还借助无偏互相关函数计算了钻孔应变对气压脉冲波响应的时滞，结果表明这两个应变分量皆超前 2 min 响应气压波动。以上结果，说明气压脉冲波和钻孔应变波间具有很好的线性负相关性。究其机理，主要是由于后者能以线弹性变形的形式即时响应前者，即当气压负荷增加时，地层压力会因此增大，而钻孔面积也就随之缩小；反之，则钻孔面积会扩大[34] [35]。以第 2 个气压脉冲波为例，随着气压骤降， ϵ_1 和 ϵ_4 均出现了显著的张性应变，变幅分别为 4.3 nstrain 和 3.7 nstrain。但为何会存在小幅超前响应现象呢？这一方面可能是因气压计和钻孔应变仪存在钟差问题，另外则可能是受区域地形效应的影响。

综上所述, 不难看出门源台钻孔应变仪记录到的“前驱波”主要是由于此次强对流天气过程中的气压扰动所致。

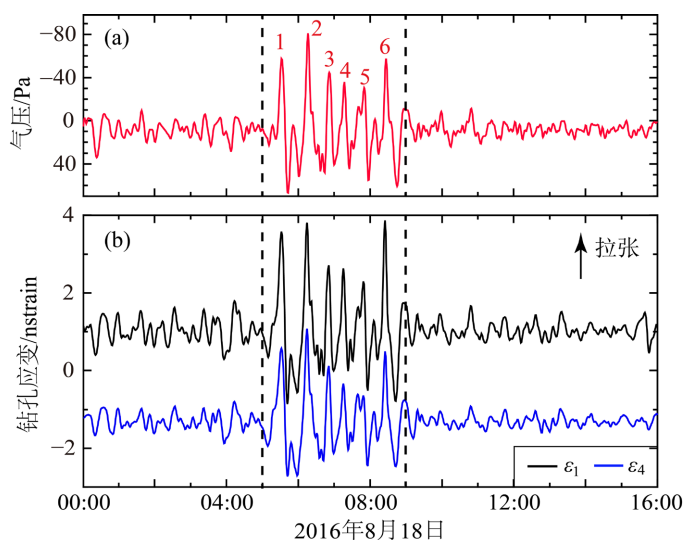


Figure 3. (a) The short-period pulse-like atmospheric wave, and (b) the pressure-induced borehole strain recorded at Menyuan station

图 3. (a) 门源站记录的短周期脉冲型大气波, (b) 大气波诱发的钻孔应变

5. 结论和讨论

为客观探究门源台钻孔应变仪记录到的形似远震前驱波的波源, 本工作在参考当地大气动力学背景的基础上, 采用数字信号处理方法, 对这种短时异常变化进行了较系统的归因诊断。结果表明, 这些“前驱波”主要是由强对流天气演变过程中的气压扰动所激发。

由于目前单点或单物理量的观测模式, 会给震前短临异常的物理属性推定带来极大的不确定性和困扰; 加之, 在分析前驱波时, 一些学者极少考虑观测数据长期的噪声特征, 而这也难免会把某些“邂逅”当成“因缘际会” [36]。对于地震前兆的科学探测和定量研究而言, 既需要理论的持续创新, 同时也依赖于观测理念和仪器制造技术的革新 [37]; 因此, 加快发展台阵和光纤等多物理量融合式的新观测网络 [38], 是实现前兆智慧探测和断裂系统灾变感知等目标的有效途径。

基金项目

国家自然科学基金(项目编号: 42104091)。

参考文献

- [1] Kanamori, H. and Cipar, J.J. (1974) Focal Process of the Great Chilean Earthquake May 22, 1960. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **9**, 128-136. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(74\)90029-6](https://doi.org/10.1016/0031-9201(74)90029-6)
- [2] 李有才. 四川姑咱水气突跳是临震异常吗? [J]. 华北地震科学, 1985, 3(3): 91-93.
- [3] Furuya, I. and Shimamura, H. (1988) Groundwater Microtemperature and Strain. *Geophysical Journal International*, **94**, 345-353. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1988.tb05905.x>
- [4] Pinettes, P., Bernard, P., Artru, J., et al. (1998) Strain Constraint on the Source of the Alleged Varotsos-Alexopoulos-Nomicos (VAN) Precursor of the 1995 Aigion Earthquake (Greece). *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **103**, 15145-15155. <https://doi.org/10.1029/98JB00959>
- [5] 张秀萍, 叶青, 张晓刚, 等. SS-Y 型伸缩仪典型故障图像特征分析及处理[J]. 地震地磁观测与研究, 2022, 43(2):

- 134-144.
- [6] 刘仕锦, 阳光, 李学川. 姑咱地震台数字化形变观测资料干扰识别[J]. 四川地震, 2007(2): 31-35.
- [7] 赵黎明, 朱冰清, 王熠熙, 等. 蓟县地震台小辛庄山洞定点形变观测干扰[J]. 地震地磁观测与研究, 2019, 40(1): 107-113.
- [8] 姜博, 胡宝慧, 常金龙, 等. 鹤岗地震台形变观测数据特征分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2017, 38(3): 113-116.
- [9] 李波, 陈阳, 白世达, 等. 个旧地震台 VP 垂直摆倾斜仪观测干扰研究[J]. 高原地震, 2021, 33(4): 49-55.
- [10] 潘一山, 李忠华, 章梦涛. 我国冲击地压分布, 类型, 机理及防治研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1844-1851.
- [11] 殷有泉, 李志明, 张广清, 等. 蠕变地层套管载荷分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2381-2384.
- [12] 李安润, 邓辉, 王小雪, 等. 饱水-失水循环条件下红层泥岩蠕变特性及本构模型研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 843-850.
- [13] 周仁达, 邓建元, 王赞. 台风对地倾斜观测的影响[J]. 地震, 1987, 7(1): 44-47, 53.
- [14] 袁曲, 王慧, 黄仲, 等. 三峡与葛洲坝水库泄洪冲沙对宜昌台形变观测的干扰[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(S): 84-89.
- [15] 高昂. 山洞环境对地震观测的影响[J]. 地震地磁观测与研究, 2013, 34(5/6): 200-203.
- [16] 足立昭. 観測坑近傍で実施されたトンネル工事の伸縮計記録への影響について[J]. 測地学会誌, 1976, 22(1): 40-48.
- [17] 龙宇云, 安一凡, 曾智辉, 等. 施工干扰对宜昌台水管仪数据影响的分析[J]. 科学技术创新, 2021, 25(19): 69-70.
- [18] 冯琼松, 杨玲英, 杨艳珠. 昆明地震台形变观测干扰分析[J]. 地震地磁观测与研究, 2015, 36(5): 64-68.
- [19] 张希, 李瑞莎, 贾鹏, 等. 汶川大震前扰动异常的震源区定位探索[J]. 武汉大学学报(信息科学版): 2012, 37(3): 310-313.
- [20] 周聪, 王庆良, 王双绪. 固体介质中孤立波的传播及演化特征[J]. 地震, 2014, 34(1): 112-117.
- [21] 路珍, 周聪, 郭泉, 等. 汶川地震前地震连续波形资料中的异常信号[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(4): 344-350.
- [22] 青木元, 古谷逸夫. 歪異常と地震の統計的考察[J]. 気象研究所研究報告, 1995, 45(3): 105-111.
- [23] 甘雨霖. 强对流天气下航路通行能力评估研究[D]: [硕士学位论文]. 广汉: 中国民用航空飞行学院, 2021.
- [24] 杨小林, 危自根, 王军. 爬线天气过程对云南洞体应变干扰的特征与机制[J]. 地球物理学进展, 2023.
- [25] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 391-418.
- [26] 苏永玲, 张雪琦, 胡垚. 青海高原强对流天气时空分布特征[J]. 青海科技, 2019, 26(3): 53-60.
- [27] 田成娟, 魏国财, 朱平, 等. 青藏高原东北部地区一次强对流天气特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2017, 32(4): 464-468.
- [28] 朱平, 俞小鼎. 青藏高原东北部一次罕见强对流天气的中小尺度系统特征分析[J]. 高原气象, 2019, 38(1): 1-13.
- [29] 赵鸿儒, 赵磊, 文小航. 基于高分辨率资料同化数据对青藏高原强对流天气的评估[J]. 自然科学, 2022, 10(6): 1176-1186. <https://doi.org/10.12677/OJNS.2022.106131>
- [30] 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.
- [31] 马震, 杜娟, 马玉虎. 青海省钻孔应变资料典型干扰特征分析[J]. 高原地震, 2011, 23(1): 53-58.
- [32] USGS (2016) M7.4—South Georgia Island Region. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us10006exl/executive>
- [33] 万永革. 数字信号处理的 MATLAB 实现[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [34] 邱泽华. 钻孔应变观测: 理论和应用[M]. 北京: 地震出版社, 2017.
- [35] 吕品姬, 李正媛, 孙伶俐, 等. 2022 年汤加火山喷发对中国大陆地应变观测的影响分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 927-933.
- [36] Wyss, M. (1997) Second Round of Evaluations of Proposed Earthquake Precursors. *Pure and Applied Geophysics*, **149**, 3-16. <https://doi.org/10.1007/BF00945158>
- [37] 刘杰, 张国民. “是否存在有助于预报的地震前兆”的讨论[J]. 科学通报, 2016, 61(18): 1988-1994.
- [38] 施斌, 朱鸿鹄, 张诚成, 等. 岩土体灾变感知与应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(10): 1-13.