



地震学报

ACTA SEISMOLOGICA SINICA



ISSN 0253-3782 CN 11-2021/P

华北地区深井水位对飊线天气过程的水力响应

杨小林 冯静 苏利娜 杨锦玲

Hydraulic responses of groundwater-level in deep wells to the passage of a squall line in North China

Yang Xiaolin, Feng Jing, Su Lina, Yang Jinling

引用本文:

杨小林, 冯静, 苏利娜, 杨锦玲. 2024. 华北地区深井水位对飊线天气过程的水力响应. *地震学报*[J], 46(4): 663–676. DOI: 10.11939/jass.20220214

Yang X L, Feng J, Su L N, Yang J L. 2024. Hydraulic responses of groundwater-level in deep wells to the passage of a squall line in North China. *Acta Seismologica Sinica*[J], 46(4): 663–676. DOI: 10.11939/jass.20220214

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11939/jass.20220214>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

深井水位对地震波、固体潮和气压的水力响应—以范县井为例

Hydraulic response of water level to seismic wave, earth tide and barometric pressure in deep well: A case study of the Fanxian well in Henan Province

地震学报. 2020, 42(6): 719–731 <https://doi.org/10.11939/jass.20200036>

华北地区重力场变化特征与孕震模型研究

Gravity field characteristics and seismogenic model in North China

地震学报. 2021, 43(4): 441–452 <https://doi.org/10.11939/jass.20200150>

基于地震活动图像的机器学习地震预测方法及其在华北地区的应用

Machine learning earthquake prediction method based on seismic activity images and its application in North China

地震学报. 2024, 46(2): 257–272 <https://doi.org/10.11939/jass.20230133>

天津王3井水位异常机理

Mechanism of abnormal water level changes in the Wang 3 well of Tianjin

地震学报. 2019, 41(6): 757–768 <https://doi.org/10.11939/jass.20190065>

基于地下水位观测的震后孔隙回弹：以2000年冰岛地震为例

Postseismic poroelastic rebound based on groundwater level observations: Taking the 2000 Iceland earthquakes as an example

地震学报. 2023, 45(6): 1055–1067 <https://doi.org/10.11939/jass.20220050>

华北地区地壳P波和S波速度结构的双差层析成像

Double-difference tomography of crustal P- and S-wave velocity structures beneath North China

地震学报. 2021, 43(1): 13–33 <https://doi.org/10.11939/jass.20200062>

杨小林, 冯静, 苏利娜, 杨锦玲. 2024. 华北地区深井水位对飊线天气过程的水力响应. 地震学报, 46(4): 663-676. doi: 10.11939/jass.20220214.

Yang X L, Feng J, Su L N, Yang J L. 2024. Hydraulic responses of groundwater-level in deep wells to the passage of a squall line in North China. *Acta Seismologica Sinica*, 46(4): 663-676. doi: 10.11939/jass.20220214.

华北地区深井水位对飊线天气 过程的水力响应*

杨小林^{1), †} 冯静²⁾ 苏利娜¹⁾ 杨锦玲³⁾

1) 中国西安 710068 陕西省地震局

2) 中国成都 610041 四川省地震局

3) 中国福州 350003 福建省地震局

摘要 为探讨华北地区飊线天气对深井水位干扰的特征和影响机制,以 2017 年 9 月 21 日发生在华北中部的一次飊线事件为例,使用时频分析和线性回归等方法系统地诊断了此次飊线对无极、辛集、永清和宁晋等四口千米级深井的水位扰动特征.结果表明:在宏观层面,飊线过境各深井时会引起气压快速涌升,在气压的激励下,深井水位出现了即时的脉冲状波动,该扰动的持续时间可长达 127 min;此次飊线过程中周期性气压波动的主频段为 15—25 cpd,在该频段内,各深井水位与气压扰动的形态高度负相关,相关系数均低于-0.95,气压系数主要集中在-4.9—-6.9 mm/hPa 之间.

关键词 华北地区 深井水位 水位波动 飊线 气压 气温

doi: 10.11939/jass.20220214 中图分类号: P315.72⁺3 文献标识码: A

Hydraulic responses of groundwater-level in deep wells to the passage of a squall line in North China

Yang Xiaolin^{1), †} Feng Jing²⁾ Su Lina¹⁾ Yang Jinling³⁾

1) Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, China

2) Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China

3) Fujian Earthquake Agency, Fuzhou 350003, China

Abstract: Since the Mesozoic, the North China has experienced intensive seismic activity. Given its special seismo-tectonic background and unusually high level of seismic potential, a network of deep wells, primarily monitoring fault and crustal deformation precursors to destructive earthquakes, has been deployed in this area since late 1960s. Although these deep well-aquifer systems can effectively capture the tectonic transients, numerous spike-like signals associated with non-tectonic sources are always recorded in the groundwater levels; however, their physical mechanism have not been confirmed on a case-by-case basis up to now.

* 基金项目 国家自然科学基金(42104091)、陕西省自然科学基金基础研究(2022JQ-225)和中国地震局 2022 年度震情跟踪任务(2022020203)共同资助。

收稿日期 2022-11-25 收到初稿, 2023-02-17 决定采用修改稿。

作者简介 杨小林, 博士, 高级工程师, 主要从事地下流体观测和解释工作, e-mail:

yang-xiaolin123@163.com



The squall line is a common type of meso-scale convective system usually defined as a group of violent thunderstorms or storm cells arranged in the form of a narrow (a few tens of kilometers) or long (several hundreds of kilometers) line in a Doppler radar. Furthermore, the typical life-span of a squall line can last several hours, and its propagation speed is approximately 60 km/h. The surface area affected by squall line is typically accompanied by abrupt changes in surface pressure and air temperature.

Squall lines occur with a high frequency in North China, but it is still unclear that how this kind of meso-scale severe weather disturbs the groundwater levels in deep wells. In view of the current situation, a target research is needed to reveal the features of hydraulic responses. On 21 September 2017, a squall line passed across the central North China, and significantly disturbed the groundwater levels in four wells deeper than 1 km, which are Wuji, Xinji, Yongqing, and Ningjin wells. Here we mainly adopt the spectrogram and linear regression methods to systematically examine the unique signals stimulated by this squall line. The results show that: ① From a macro perspective, the barometric pressures recorded at the deep wells can abruptly jump induced by the passage of squall line; instantly, the strong pulse-like disturbances were observed on groundwater level graphs associated with pressure jumps; ② The duration of disturbance could last as long as about 127 minutes for this case; ③ In the high-frequency band, the barometric waves induced by squall line have a period between 15 cpd (cycles per day) and 25 cpd. Correspondingly, the cross-correlation coefficients between barometric waves and groundwater changes can be lower than -0.95 for the four deep wells in this special frequency band. Furthermore, the barometric pressure response coefficients vary from about -4.9 mm/hPa to -6.9 mm/hPa for the four wells, determined as the linear regression coefficient between groundwater level and barometric pressure in the 15–25 cpd band-passed data. Our analysis shows that this work can extend our understating of the signatures caused by squall line in the field of groundwater research. Additionally, owing to the large amplitude of barometric waves, the squall line can help quantify the precise responses of groundwater levels in deep wells to barometric pressures in the high frequency band.

Key words: North China; groundwater level changes in deep well; groundwater level fluctuation; squall line; barometric pressure; air temperature

引言

华北地区不仅是我国的政治、经济和文化中心,也是陆内中强地震的易发区(柳畅等, 2012; 毕金孟, 蒋长胜, 2019)。近代以来,该区先后发生了1966年邢台 $M_s 7.2$ 和1976年唐山 $M_s 7.8$ 等破坏性地震,这些事件均造成了大量的人员伤亡和财产损失。因此,若要从根源上降低该地区的地震灾害风险水平,关键是提升地震短临预测预报的能力,而这在很大程度上取决于对地震前兆的识别和捕捉能力。目前,在地震地下水监测研究方面,已有不少学者采用经验、统计和数值等方法对华北地区井水位异常变化的成因进行了深入的研究,其结果显示,在中强地震前的数小时或数天,前兆场中的一些观测井水位会出现短时突跳或高频脉冲等现象(李文英等, 1994; 张国民等, 1995; 车用太等, 2006)。对于地震预测预报业务而言,此类短时波动异常具有一定的前兆指示价值。然而,需要警惕的是,一些极端天气事件,如风暴(Das *et al.*, 2021)、热带气旋(顾申宜等, 2012)、飚线或雷暴(董守玉等, 1987; 张凌空等, 2012)等亦能引起类似的异常变化。因此,如何即时地、客观地甄别不同尺度极端天气所

导致的单井或群井水位的短时突变,是当前地震地下水观测亟需解决的现实问题。

在各种极端天气中,飊线是一种常见且破坏力很强的中尺度强对流天气(丁一汇等, 1982; Meng *et al*, 2013; 俞小鼎, 郑永光, 2020),它是由许多雷暴单体排列成一条线或带状的传播性对流系统,其水平传播速度较快,通常约为数十千米每小时,典型生命史为2—12小时;在水平尺度和短轴结构上,该天气系统长约几十至上百千米,宽约数十千米(庄薇等, 2010; 沈杭锋等, 2019; 盛杰等, 2020),由飊前低压、雷暴高压和尾流低压等三大部分构成。飊线过境时,地面气象要素会发生瞬时急剧变化,如气压涌升、气温骤降等。此外,还会伴有雷暴、大风、冰雹和龙卷风等。另外,飊的定义特指2 min时段的平均风速不小于8 m/s的大风现象(俞小鼎, 郑永光, 2020)。

华北地处温带大陆性气候带和温带季风气候带,大陆性、海洋性季风气流交汇于此,故而是我国飊线的高发区(赵亚民, 魏文秀, 1984; 扈忠慈等, 1987; 李鸿洲等, 1999; 盛杰等, 2020; 陈晓欣等, 2022)。近年来,已有学者注意到华北地区短时气压骤升所引起的区域性井水位波动现象,例如:张子广等(2010)揭示出河北黄骅、深州、无极、宁晋、永年等五口深井频繁受到气压的瞬时扰动;韩文英等(2017)也发现类似的现象。但遗憾的是,他们并未认识到飊线才是其背后真正的动力源(王宏等, 2009; 盛杰等, 2020)。那么,飊线对华北地区深井水位影响的特征究竟如何?截至目前,尚缺乏富有针对性的典型个案研究。

2017年9月21日18时至23时(北京时间,下同),华北中部爆发了一次强飊线天气过程(杨晓亮, 杨敏, 2020),区内四口深井水位陆续记录到了较典型的短时扰动变化,这为揭示飊线影响的全貌提供了绝佳的实例。鉴于此,本文拟对此飊线引起的深井水位变化进行系统诊断,以加深对飊线干扰的科学认知,为井-含水层系统对高频带($f > 8$ cpd, cpd指周期数/天)气压响应的传递函数计算等提供更高信噪比的输入和输出信号(Lai *et al*, 2013; Zhang *et al*, 2016; Sun, Xiang, 2020)。

1 飊线演变和传播过程

卫星云图和多普勒天气雷达等资料(杨晓亮, 杨敏, 2020)显示,2017年9月21日18时至23时,华北中部地区出现了一次以雷暴大风为主、近北东走向(水平长轴)的飊线天气过程。在从西北向东南移动的过程中,该飊线逐渐发展壮大,并于21时前后达到鼎盛,此时一条相对完整的飊线系统趋于成熟,其水平长度近250 km,宽度达30—40 km,回波强度也超过了50 dBZ;23时之后,飊线强度逐渐减弱(图1)。图1中红色虚线为飊线逐小时的大体位置(杨晓亮, 杨敏, 2020),该飊线主体的平均传播速度约为60 km/h,并伴有八级以上瞬时地面大风(风速多为18—20 m/s),先后影响了华北中部多个地区,同时还造成了石家庄、保定、衡水等地的人员伤亡和财产受损。

总体来看,此次飊线具有能量强、移速快、影响范围广和致灾性强等特征,其生成的天气形势和动力学背景详见杨晓亮和杨敏(2020)的研究。

2 观测井及仪器概况

考虑到飊线影响的范围和深井水位记录的完整性等因素,本文最终选取出华北地区的四口深井,即无极、辛集、永清和宁晋井,作为研究对象。另外,为了表征深井所在地或周边当日降雨量的大小,本研究也通过中央气象数据网(<http://data.cma.cn>)获取了与观测井较

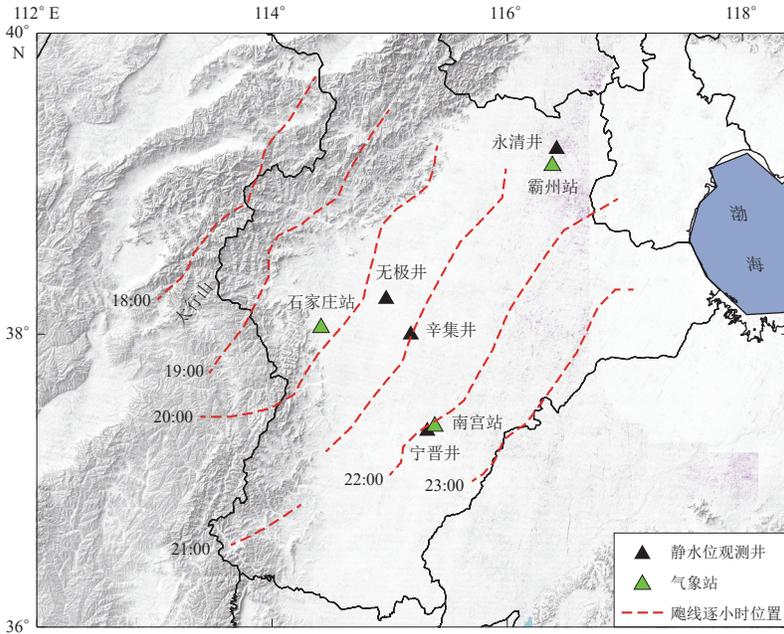


图 1 2017 年 9 月 21 日飚线主体的演变过程(杨晓亮, 杨敏, 2020)以及华北地区深井和气象站的分布

Fig. 1 The passage of the squall line on 21 September 2017 (Yang, Yang, 2020) and distribution of deep wells (black triangles) and meteorological stations (green triangles) in North China

近的三个气象站,即石家庄站、霸州站和南宫站,的降雨数据。

四口井的深度、套管直径、承压性和含水层岩性等基础信息详见表 1,从表中可见:这四口井的深度均超过了 1000 m,其中宁晋井深达 2 984.50 m;滤管理深也较深,均不浅于 1070 m,且观测含水层基本不受降雨或地表水直接入渗的影响;含水层类型主要以岩溶承压水或岩溶裂隙承压水为主,含水层岩性则以白云岩为主;整体而言,各井具有承压性好、封闭性高和深度深等特征(张子广等, 2005, 2010);各井安装的水位仪为 ZKGD-3000NL 型号,气压仪和气温仪为 RTP-II 型号,这些仪器的采样间隔均为 1 min,其分辨率依次优于 1 mm、0.1 hPa 和 0.01℃. 由于 2017 年 9 月 21 日的飚线为“干对流”型,所以各气象站记录到的降雨量均未超过 1.2 mm.

表 1 四口深井及其周围气象站概况

Table 1 General information for the four deep wells and three neighboring meteorological stations

井名	套管直径/cm	地下水类型	井深/m	井孔与含水层连通深度/m	含水层岩性	水位仪、气压仪和气温仪的型号	相邻气象站	与气象站间距/km	2017年9月21日降雨量/mm
无极	不详	岩溶裂隙承压水	2984.50	2333—2984	灰岩,白云岩	ZKGD-3000NL, RTP-II	石家庄	53	1.2
辛集	24.45	岩溶裂隙承压水	2052.37	1539—2052	白云岩		石家庄	67	1.2
永清	21.60	岩溶承压水	1274.11	1070—1274	灰岩,白云岩		霸州	12	0.0
宁晋	30.00	岩溶裂隙承压水	2003.78	1899—1919	砂质灰岩		南宫	7	0.0

3 飚线对深井水位影响的宏观特征与机制

在此次飚线演变及传播过程中,上述四口深井的静水位、户外气压和气温等测项均较好

地记录了该极端天气系统的扰动形态. 为了真实地呈现扰动的原始形貌, 本文特意选取2017年9月21—22日的分钟级测值, 各测项的变化曲线如图2所示. 从图中大致能概观出以下特征: ① 当飊线途经各深井时, 气压和气温相应出现了快速涌升和大幅陡降的鲜明变化, 毫无疑问, 这与飊线过境时地面气象要素场的典型特征十分吻合; ② 静水位与气压同步出现了脉冲状波动.

考虑到图2所绘曲线的时段较长, 而飊线的影响过程又相对较短, 所以图2还不足以充

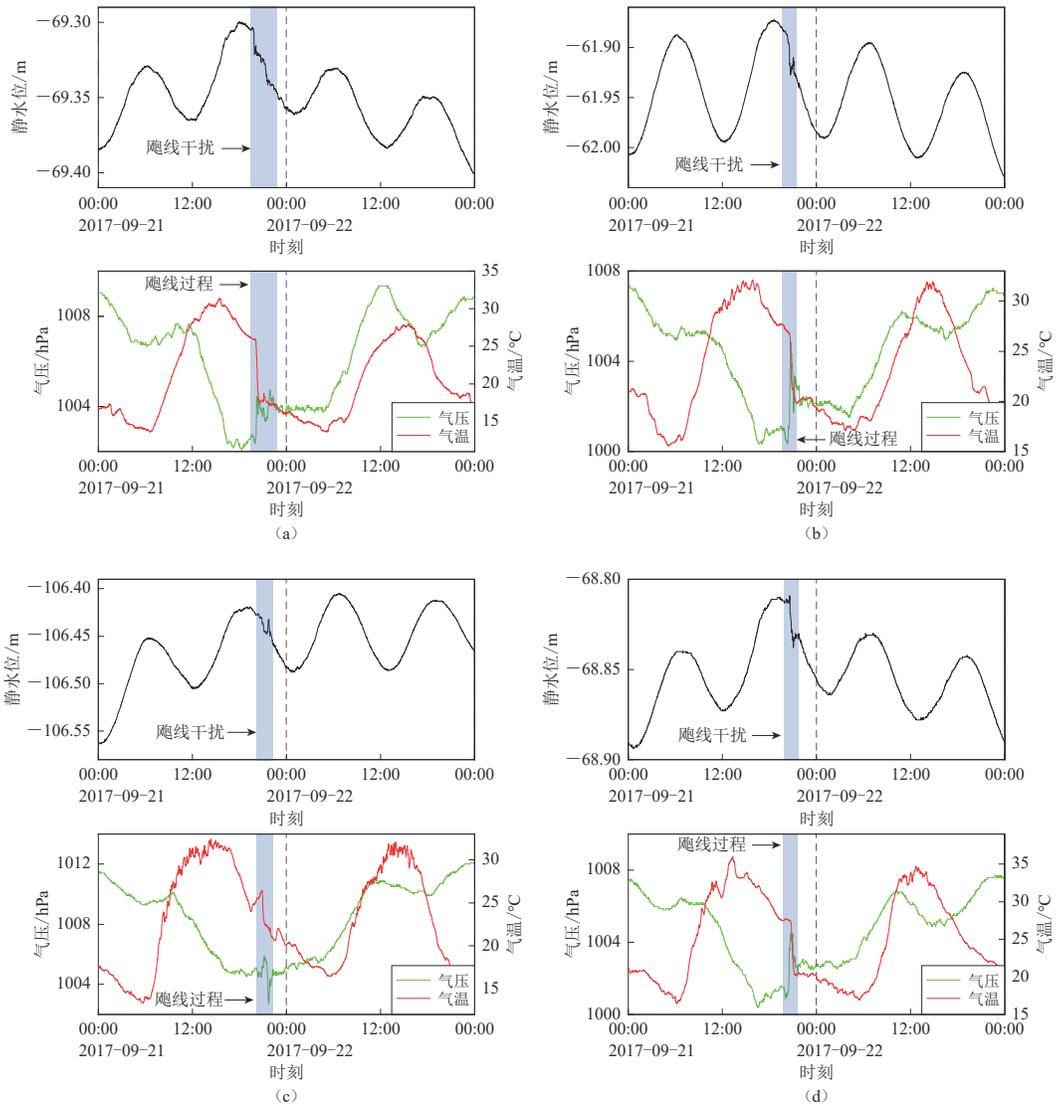


图2 飊线过境时各井记录到的静水位、气压和气温的原始变化

(a) 无极井; (b) 辛集井; (c) 永清井; (d) 宁晋井

Fig. 2 The original changes of groundwater levels (black traces), barometric pressures (green traces), and air temperatures (red traces) in response to the passage of the squall line

(denoted by blue stripe) for the four wells

(a) Wuji well; (b) Xinji well; (c) Yongqing well; (d) Ningjin well

分展示颶线扰动中的细节变化. 为此, 本研究特截取9月21日18时至24时的观测曲线; 此外, 为了更真实地展现和统计静水位和气压的瞬时变化, 采用4阶巴特沃斯(Butterworth)高通滤波器($f > 6$ cpd)对静水位和气压进行了无相移滤波, 此步骤旨在消除潮汐及大气潮效应. 需要指出的是, 在对颶线影响的起始和结束时刻进行界定时, 主要是以气压、气温和井水位三者协同响应的时刻为标度. 经上述预处理后, 即可对颶线干扰的量级和形态等进行初步诊断, 结果如图3和表2所示.

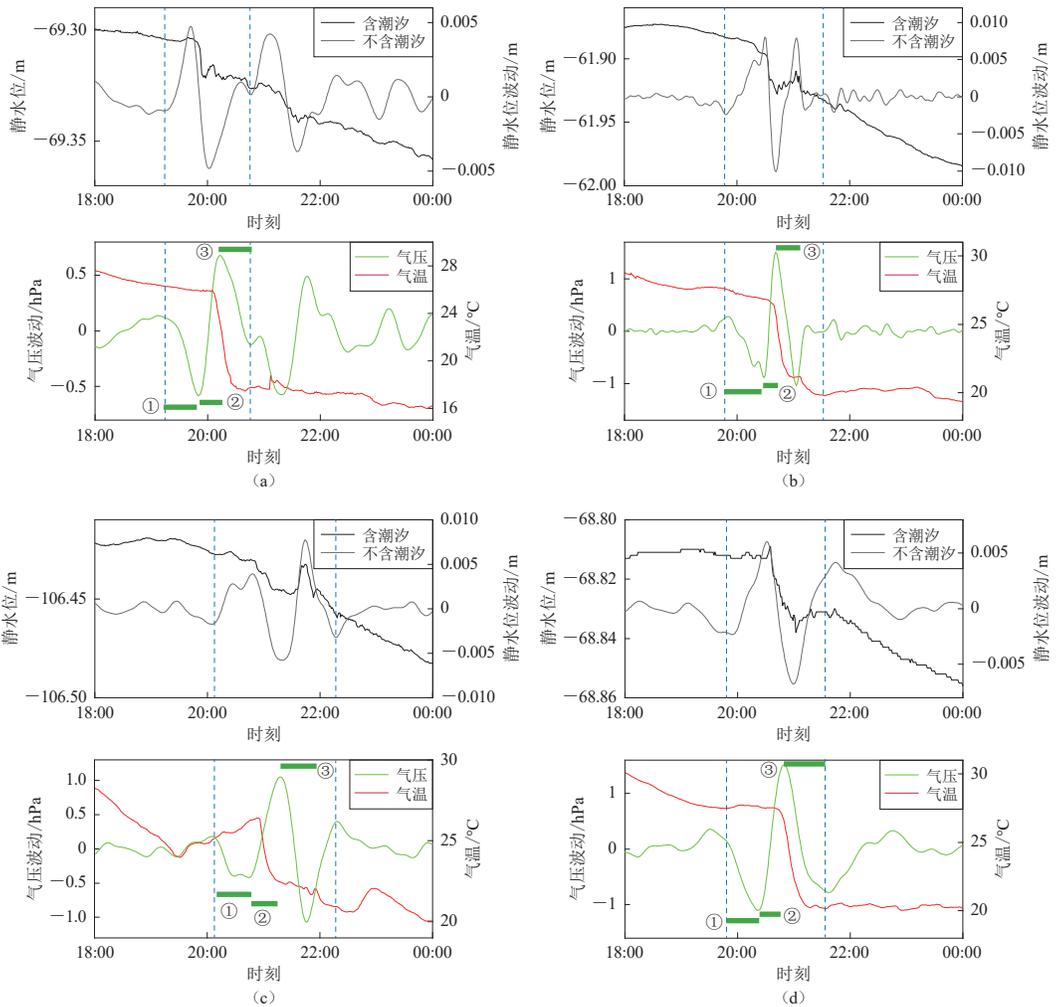


图3 2017年9月21日18—24时各测项对颶线过境时响应的细节特征

蓝色垂直虚线表示颶线影响的起始和结束时刻; ①, ②和③依次表示颶前低压、雷暴高压和尾流低压时段. (a) 无极井; (b) 辛集井; (c) 永清井; (d) 宁晋井

Fig. 3 The detailed variations of groundwater levels (black traces), barometric pressures (green traces), and air temperatures (red traces) in response to the passage of the squall line from 18:00 to 24:00 on 21 September 2017 for the four wells

The blue vertical dashed lines represent the start (left) and end (right) times of the passage of squall line, respectively.

The green short thick-lines with signs of ①, ②, and ③ indicate the pre-squall mesolow, a squall mesohigh,

and a wake low, respectively. (a) Wuji well; (b) Xinji well; (c) Yongqing well; (d) Ningjin well

表2 四口深井的水位、气压和气温对飊线过程的响应变化

Table 2 Temporal variations of groundwater levels, barometric pressures, and air temperatures in response to the passage of the squall line for the four deep wells

井名	观测物理量	飊线演变的主过程				变化形态	最大变幅
		开始时刻 h:min	峰值时刻 h:min	结束时刻 h:min	历时/min		
无极	静水位		20:00			脉冲状	10 mm
	气压	19:09	20:13	20:42	93	涌升	1.3 hPa
	气温		20:39			骤降	8.5 °C
辛集	静水位		20:40			脉冲状	18 mm
	气压	19:48	20:40	21:27	99	涌升	2.3 hPa
	气温		21:27			骤降	7.0 °C
永清	静水位		21:17			脉冲状	13 mm
	气压	20:10	21:16	22:17	127	涌升	1.5 hPa
	气温		22:17			骤降	5.4 °C
宁晋	静水位		20:59			脉冲状	12 mm
	气压	19:54	20:49	21:36	102	涌升	2.6 hPa
	气温		21:36			骤降	7.2 °C

3.1 飊线对气压、气温和深井水位影响的特征分析

从图3可以清楚地看到,四口井同一测项的扰动形态极具共性。首先以气压为例,在飊线经过时,不同深井的气压扰动主要包含了三个子过程:即降压—升压—降压(图3中①,②和③所注时段),在直观上“勾勒”出了飊线短轴水平气压场的特点;而各子过程的生成机制,则是飊前低压、雷暴高压和尾流低压等相继作用。就宏观形态来讲,气压起伏基本上是遵循了“雷暴鼻”或“高压泡”的演变历程(赵虹等,2020)。相比之下,气温变化就颇为单调,均以大幅骤降为主。再细观静水位,便能清晰地发现深井水位(图3中灰色曲线)会随气压(图3中绿色曲线)的剧烈起伏而大幅波动,二者的相位却截然相反。

在定性地刻画飊线的扰动形态后,表2又进一步给出了地面气象要素和深井水位扰动的量值。基于此,本文对其大小及差异等进行初步剖析,具体如下:

1) 气温。四个深井所在场地的气温陡降量主要集中在5.4—8.5°C,其中无极井最大,永清井最小。

2) 气压。在飊线的主体或高能阶段,即雷暴高压区(图3中的②阶段),各深井处的气压涌升速率和增幅均尤为显著,其中宁晋井在26 min内便上升了大约2.6 hPa,相比之下,无极井和永清井的增压略小,分别约为1.3 hPa和1.5 hPa。造成这两地气压涌升量偏小的原因可能如下:①在20时左右,飊线仍处于发展壮大阶段(图1),雷暴高压区的强度相应偏弱,所以在过境无极井时,尚不足以造成大幅的气压涌升;②永清井位于飊线主体结构的外围(图1),故遭受干扰的程度小一些。有趣的是,除宁晋井外,其余三井气压涌升的峰值时刻与飊线过境的时刻大致吻合(对照图1和表2),足见飊线在演变过程中会造成气压场大范围出现“迁移”性波动。再仔细观察22时飊线的位置和宁晋井气压涌升的峰值时刻(20:49)(见图1和图3d),可以看出二者相差近70 min,这其中—个重要的原因,可能是在飊线过境之前,当地已有个别雷暴单体被触发或新生。

3) 静水位。各深井水位波动的幅度(峰、谷值之差)较大,均不小于10 mm,其中辛集井高达约18 mm,其余次之。

4) 干扰持时. 通过标度地面气象要素和各深井水位响应的启动和停歇时刻, 大致能度量出虬线对单口深井干扰的持时, 从现有的统计样本来看, 这个扰动过程能持续 93—127 min (表 2). 持时的长短主要取决于虬线演进过程中的水平尺度、空间强度和移动速度等因素.

基于以上定性分析和量化统计的结果, 虬线对各地气压、气温和深井水位等干扰的特征已较为明显. 另外, 各深井响应的时间、空间和强度等特征也在一定程度上表征了此次虬线系统演变中的强度变化等. 就响应机理而言, 导致深井水位呈脉冲状波动的物理主因是什么, 这无疑是一个值得探究的问题, 本文将作进一步的解析.

3.2 虬线对深井水位影响的机制分析

如前所述, 虬线在传播和过境时, 会引起地面气压和气温的短时骤变. 从表 2 的统计结果来看, 气温的降幅固然较大, 但首先可以将该影响因素排除; 在数小时的时间尺度内, 气温波动的穿透或热传导深度十分有限(尹凤玲等, 2015), 所以无法在上千米深的含水层内产生热应力.

接下来, 再对滤波后的气压和静水位变化(图 3 中的绿色和灰色曲线)进行对比, 可以清楚地看到, 二者在时域内具有十分显著的负相关关系, 其内在的物理机制, 已有大量而深入的成因诊断(张昭栋等, 1989a; 张子广等, 2010; 顾申宜等, 2012). 这些诊断结果表明, 二者之所以能构成负相关关系(对于承压井而言), 主要是因为气压波作用于井-含水层系统时, 井孔与含水层之间产生压力差. 当气压上升时, 井孔内的水头压力随之增大, 井孔内水头压力大于含水层中的水头压力, 这使得井孔内水体向含水层的渗入量大于含水层向井孔内的渗入量, 这样井水位测值就出现下降; 同理, 当气压下降时, 井孔内的水头压力会下降, 那么由含水层向井孔内的入渗量便会增加, 井孔水头也就升高了.

综上分析可知, 虬线过程中的瞬时气压突变是导致深井水位短时波动的主因.

4 高频段深井水位的气压效应诊断

在正常天气背景下, 高频气压波的能量通常比较微弱, 相应地, 井-含水层系统的响应量也十分有限, 因此, 如何提升高频气压响应的可靠性一直都是地震地下流体研究中的一大难点.

单从图 3 所示的气压高通滤波($f > 6$ cpd)的初步结果来看, 在虬线干扰期间, 高频气压脉冲或周期波动的振幅会显著“涌升”, 该现象也意味着短周期气压激励的强度在大幅提升, 由此可见, 借助虬线来揭示深井水位的高频气压响应, 不失为一种良策. 那么, 虬线过境时的短周期气压波动, 究竟会造成无极、辛集、永清和宁晋井怎样的水力响应(气压系数和相位差)呢?

为解决该问题, 本文首先采用时频方法来提取高频气压波的主频段, 结果如图 4 所示. 可见: 在频域内, 各井的振幅谱稍显差异, 但共性特征却十分鲜明, 即优势频段主要集中在 15—25 cpd (对应周期为 57.6—96.0 min). 为考察此频段内深井水位和气压的变化特征, 进一步采用四阶巴特沃斯滤波器对二者进行无相移的带通滤波(图 5). 需要说明的是, 图 5 仅绘制了 9 月 21 日 12 时至 22 日 6 时的滤波结果, 其目的主要是为了更清楚地展示井水位和气压的波动特征. 对比各井曲线的形态和相位可以发现两者波形甚为相似, 均呈高度负相关. 为了定量地刻画其关联度, 利用互相关函数计算气压与井水位间的相关系数和滞后时间, 其中井水位滞后或超前气压的时长主要依据相关系数的最小值而定, 各井结果如图 6 和表 3 所示.

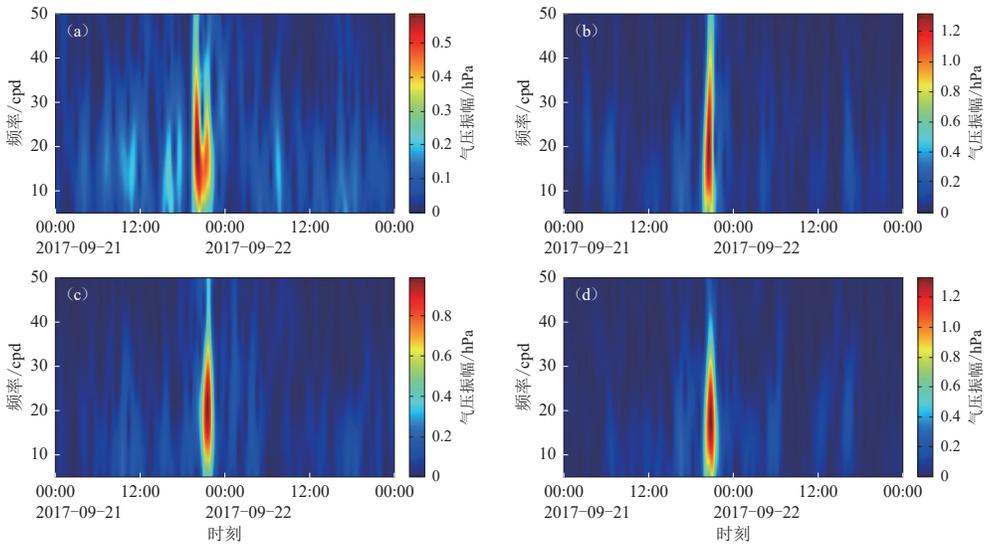


图4 飑线过境时各井气压高频振荡的时频图

(a) 无极井; (b) 辛集井; (c) 永清井; (d) 宁晋井

Fig. 4 Spectrograms of the high-frequency fluctuations of barometric pressures caused by the squall line

(a) Wuji well; (b) Xinji well; (c) Yongqing well; (d) Ningjin well

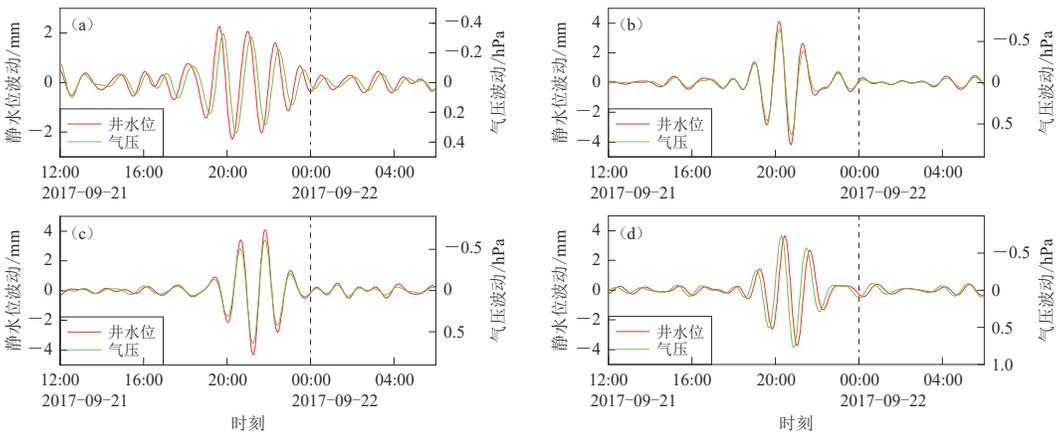


图5 在15—25 cpd频段内各深井的水位和气压波曲线对比

(a) 无极井; (b) 辛集井; (c) 永清井; (d) 宁晋井

Fig. 5 Detailed comparison of the fluctuations of groundwater levels (red lines) with barometric pressure changes (green lines) as a squall line passed the four deep wells

(a) Wuji well; (b) Xinji well; (c) Yongqing well; (d) Ningjin well

表3 各深井水位与气压在15—25 cpd频段内的相关系数及时滞

Table 3 The cross-correlation coefficients between the 15–25 cpd band-passed groundwater levels and barometric pressures for the four deep wells as well as corresponding time delays

井名	相关系数	井水位滞后气压的时间/min	井名	相关系数	井水位滞后气压的时间/min
无极	-0.956 01	-10	永清	-0.992 13	1
辛集	-0.994 12	-1	宁晋	-0.992 14	10

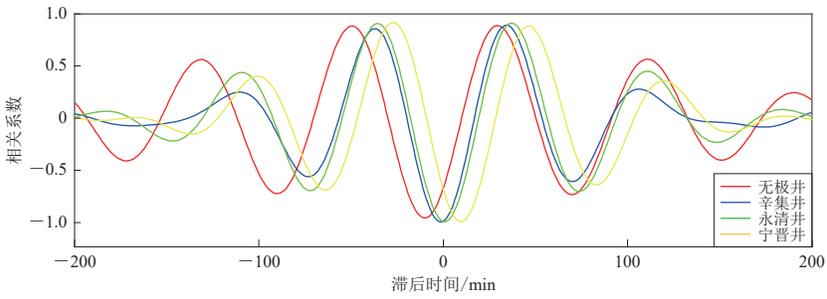


图 6 15—25 cpd 频段内各深井的水位与气压的互相关系数
 滞后时间为正, 表示水位滞后气压, 反之为超前

Fig. 6 The cross-correlation coefficients between the band-pass filtered (15–25 cpd) groundwater levels and barometric pressures for the deep wells

The negative lag time means that groundwater level advances the barometric pressure, while the positive lag time means the groundwater level lags behind the barometric pressure

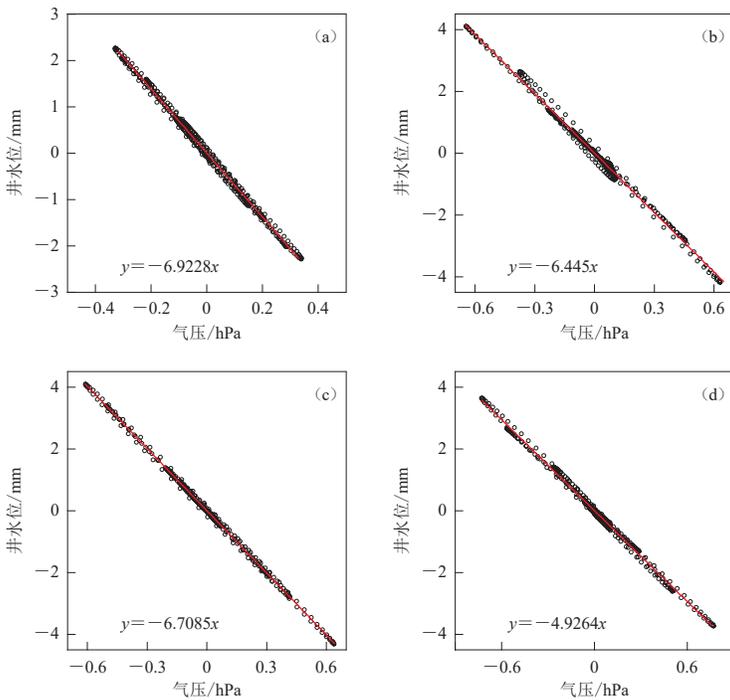


图 7 消除时滞效应后井水位与气压的一元线性回归方程(15—25 cpd 频段内)
 (a) 无极井; (b) 辛集井; (c) 永清井; (d) 宁晋井

Fig. 7 The simple linear regression relationships between groundwater levels and barometric pressures after eliminating time delays in the 15–25 cpd frequency band

(a) Wuji well; (b) Xinji well; (c) Yongqing well; (d) Ningjin well

对比相关系数的大小, 可见无极井稍低一点, 为-0.956 01, 其余三井则近乎完全负相关; 对于时滞(即井水位与气压的相位差)而言, 辛集井和永清井的很小, 几乎为即时响应, 说明这两口井含水层的导水系数可能较大(张昭栋等, 1989a), 而无极井和宁晋井则分别超

前和滞后 10 min. 一般而言, 含水层的导水系数越小, 相位滞后也就越大, 无极井为何会出现明显的相位超前现象呢? 究其原因, 可能是该井存在垂向渗流过程, 即在高频气压的负荷下, 含水层孔隙压力扩散进而导致水体向潜水层垂向流动(Roeloffs, 1996; 杨小林, 危自根, 2018).

在确定各井的水位对气压响应的时滞后, 将二者的相位进行校准, 该步骤主要是为了在之后的一元线性回归分析中消除截距的影响. 此外, 考虑到飊线干扰期间内气压、井水位的信噪比更高, 本文仅对图 5 中 21 日 18 时至 24 时的曲线进行回归拟合, 得到一元线性方程.

这四口深井的水位与气压之间的回归方程如图 7 所示, 可以看到: 无极、辛集、永清这三口井的气压系数较高, 依次为: -6.9228 mm/hPa, -6.445 mm/hPa 和 -6.7085 mm/hPa, 这可能是由其含水层以下主要特质所致: ① 导水系数较大; ② 固体骨架体积压缩系数较小; ③ 孔隙度较大; ④ 含水层厚度大(张昭栋等, 1989a, b, 1993). 相比之下, 宁晋井的气压系数偏小, 为 -4.9264 mm/hPa, 而这是否与其含水层厚度较薄有关(见表 1), 尚待更为系统的研究.

总体来讲, 在 15—25 cpd 频段内, 这几口深井普遍存在较显著的气压效应.

5 讨论与结论

以 2017 年 9 月 21 日发生在华北地区的飊线天气为实例, 系统地诊断了该中尺度极端天气对无极、辛集、永清和宁晋等四口深井水位的干扰模式, 初步揭示了各深井水位响应的共性和个性特征, 得到的主要认识如下:

1) 此次飊线在其演进过程中对华北地区大范围的气压场产生了剧烈扰动, 并由此导致了群体性的深井水位波动. 各深井水位均能即时响应气压扰动, 二者在形态、幅度和持续时间上均高度相关, 具有确定的因果关系.

2) 在宏观上, 气压和深井水位的变化特征以脉冲状为主, 两者最大的变幅分别可达 2.6 hPa 和 18 mm, 而飊线干扰的持续时间亦长达 127 min.

3) 在 15—25 cpd 频段内, 各深井水位与气压高度负相关, 相关系数均在 -0.95 以下, 前者对后者响应的滞后时间在 ± 10 min 以内. 此外, 气压系数主要集中在 -4.9 — -6.9 mm/hPa 之间.

飊线对华北地区深井水位的干扰是普遍而显著的, 但本研究仅是对个例进行了尝试性的初探, 相关认识尚浅且难以普适. 因此, 深入和系统地诊断华北乃至全国范围内飊线干扰的全貌和机理, 是本研究后续将要重点开展的工作. 就深井水位对短周期气压响应的相位滞后或超前问题, 本文也仅从经验上进行了解释; 若要揭示其内在机理, 尚需对其含水层的渗透系数、孔隙度和固体骨架体积压缩系数等展开定量研究. 此外, 还有一个不可忽视的观测系统问题, 即井水位仪与气压仪之间的钟差, 而这也是导致井水位与气压波动出现大幅相位差的一大潜在因素. 因此, 后续还需分别对无极井和宁晋井的钟差大小进行核查.

最后还需要强调的是, 由于飊线天气过程中高频气压波的能量较高, 其导致的深井水位波动也更为明显, 因此, 通过飊线这种极端天气来揭示井-含水层系统的高频气压响应模态, 无疑是极具应用前景的. 这种“自然又经济”的新手段将会为地下含水层系统的水力结构“成像”带来新视角.

三位评审专家提出了诸多建设性意见,对本文质量的提升帮助很大,作者在此谨致谢忱。

参 考 文 献

- 毕金孟,蒋长胜. 2019. 华北地区地震序列参数的分布特征[J]. *地球物理学报*, **62**(11): 4300–4312.
- Bi J M, Jiang C S. 2019. Distribution characteristics of earthquake sequence parameters in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(11): 4300–4312 (in Chinese).
- 车用太,赵文忠,鱼金子,刘成龙. 2006. 京津冀地区井水位的数字化观测及其地震前兆监测效能评估[J]. *地震*, **26**(4): 103–112.
- Che Y T, Zhao W Z, Yu J Z, Liu C L. 2006. Digitalized well-water-level observation and monitoring efficiency evaluation of earthquake precursor in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Earthquake*, **26**(4): 103–112 (in Chinese).
- 陈晓欣,俞小鼎,王秀明. 2022. 中国大范围雷暴大风事件(Derechos)研究: 时空分布、环境背景和对流系统形态特征[J]. *气象学报*, **80**(1): 67–81.
- Chen X X, Yu X D, Wang X M. 2022. Investigation of Derechos in China: Spatiotemporal distribution, environmental characteristics, and morphology of Derechos producing convective systems[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, **80**(1): 67–81 (in Chinese).
- 丁一汇,李鸿洲,章名立,李吉顺,蔡则怡. 1982. 我国飑线发生条件的研究[J]. *大气科学*, **6**(1): 18–27.
- Ding Y H, Li H Z, Chang M L, Li J S, Cai Z Y. 1982. A study on the genesis conditions of squall-line in China[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, **6**(1): 18–27 (in Chinese).
- 董守玉,贾化周,万迪盈,秦清娟. 1987. 井水位气压系数的探讨[J]. *地震研究*, **10**(1): 63–70.
- Dong S Y, Jia H Z, Wan D K, Qin Q J. 1987. Study of the atmospheric pressure coefficient of well water level[J]. *Journal of Seismological Research*, **10**(1): 63–70 (in Chinese).
- 顾申宜,张慧,解晓静,刘阳,叶向顶. 2012. 海南井水位对热带气旋响应特征分析[J]. *地震学报*, **34**(5): 716–724.
- Gu S Y, Zhang H, Xie X J, Liu Y, Ye X D. 2012. Analysis on features of well water response in Hainan Province to tropical cyclones[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **34**(5): 716–724 (in Chinese).
- 韩文英,梁丽环,尹宏伟,郭学增. 2017. 一次气压扰动引起的水位变化[J]. *防灾减灾学报*, **33**(4): 59–65.
- Han W Y, Liang L H, Yin H W, Guo X Z. 2017. A pressure disturbance caused by the water level change[J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction*, **33**(4): 59–65 (in Chinese).
- 扈忠慈,陆长荣,白乃英,孙文起. 1987. 华北平原飑线与一般对流活动发生条件的对比分析[J]. *气象*, **13**(8): 8–13.
- Hu Z C, Lu C R, Bai N Y, Sun W Q. 1987. Analysis of occurrence of squall line and commonly convective activity over North China[J]. *Meteorological Monthly*, **13**(8): 8–13 (in Chinese).
- 李鸿洲,蔡则怡,徐元泰. 1999. 华北强飑线生成环境与地形作用的数值试验研究[J]. *大气科学*, **23**(6): 713–721.
- Li H Z, Cai Z Y, Xu Y T. 1999. A numerical experiment of topographic effect on genesis of the squall line in North China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, **23**(6): 713–721 (in Chinese).
- 李文英,张清荣,平建军. 1994. 华北地区地震短临异常综合标志及预报指标的研究[J]. *地震*, **14**(1): 23–30.
- Li W Y, Zhang Q R, Ping J J. 1994. Comprehensive mark of short-term and impending anomaly in North China and study on prediction index[J]. *Earthquake*, **14**(1): 23–30 (in Chinese).
- 柳畅,石耀霖,郑亮,朱伯靖. 2012. 三维黏弹性数值模拟华北盆地地震空间分布与构造应力积累关系[J]. *地球物理学报*, **55**(12): 3942–3957.
- Liu C, Shi Y L, Zheng L, Zhu B J. 2012. Relation between earthquake spatial distribution and tectonic stress accumulation in the North China Basin based on 3D visco-elastic modelling[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **55**(12): 3942–3957 (in Chinese).
- 沈抗锋,方桃妮,蓝俊倩,翟国庆,苏涛. 2019. 一次强飑线过程极端大风的中尺度分析[J]. *气象学报*, **77**(5): 806–822.
- Shen H F, Fang T N, Lan J Q, Zhai G Q, Su T. 2019. Mesoscale analysis of the extremely damaging gale in a severe squall line[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, **77**(5): 806–822 (in Chinese).
- 盛杰,郑永光,沈新勇. 2020. 华北两类产生极端强天气的线状对流系统分布特征与环境条件[J]. *气象学报*, **78**(6): 877–898.

- Sheng J, Zheng Y G, Shen X Y. 2020. Climatology and environmental conditions of two types of quasi-linear convective systems with extremely intense weather in North China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, **78**(6): 877–898 (in Chinese).
- 王宏, 马凤莲, 王万筠. 2009. 河北承德一次飑线过程的多普勒雷达资料分析[J]. *干旱气象*, **27**(1): 29–33.
- Wang H, Ma F L, Wang W J. 2009. Doppler radar data analysis of a squall line process in Chengde of Hebei Province[J]. *Journal of Arid Meteorology*, **27**(1): 29–33 (in Chinese).
- 杨小林, 危自根. 2018. 陕西石泉井不同频带水位对气压和固体潮的响应特征[J]. *大地测量与地球动力学*, **38**(10): 1096–1100.
- Yang X L, Wei Z G. 2018. Response characteristics of water level to atmospheric loading and solid Earth tide in different frequency bands: A case study of the Shiquan well, Shaanxi[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, **38**(10): 1096–1100 (in Chinese).
- 杨晓亮, 杨敏. 2020. 2017年秋季河北一次飑线引发的雷暴大风过程分析[J]. *气象与环境学报*, **36**(6): 1–9.
- Yang X L, Yang M. 2020. Analysis of a thunderstorm gale triggered by squall line in Autumn of 2017 over central Hebei Province[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, **36**(6): 1–9 (in Chinese).
- 尹凤玲, 张怀, 石耀霖. 2015. 华北地区水位下降是否会减缓气温上升: 浅部地温影响的数值模拟分析[J]. *地球物理学报*, **58**(10): 3649–3659.
- Yin F L, Zhang H, Shi Y L. 2015. Persistent drawdown of groundwater table in North China may reduce local climate warming rate: Numerical simulation and analysis of the impacts on shallow ground temperature[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **58**(10): 3649–3659 (in Chinese).
- 俞小鼎, 郑永光. 2020. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. *气象学报*, **78**(3): 391–418.
- Yu X D, Zheng Y G. 2020. Advances in severe convective weather research and operational service in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, **78**(3): 391–418 (in Chinese).
- 张国民, 石耀霖, 张永仙. 1995. 华北北部短临前兆场特征与震源过程的数值模拟[J]. *中国地震*, **11**(4): 327–340.
- Zhang G M, Shi Y L, Zhang Y X. 1995. Characteristics of short-imminent earthquake precursory field in the northern part of North China and numerical simulation of earthquake source development[J]. *Earthquake Research in China*, **11**(4): 327–340 (in Chinese).
- 张凌空, 吴利军, 杨颖. 2012. 雷暴产生的气压突变对体应变与同井水位干扰的对比研究[J]. *中国地震*, **28**(1): 69–77.
- Zhang L K, Wu L J, Yang Y. 2012. Comparative study of the interference of mutation pressure generated by thunderstorms with volume strain and same well water-level[J]. *Earthquake Research in China*, **28**(1): 69–77 (in Chinese).
- 张昭栋, 郑金涵, 张广城, 靖继才. 1989a. 承压井水位对气压动态过程的响应[J]. *地球物理学报*, **32**(5): 539–549.
- Zhang Z D, Zheng J H, Zhang G C, Jing J C. 1989a. Response of water level of confined well to dynamic process of barometric pressure[J]. *Acta Geophysica Sinica*, **32**(5): 539–549 (in Chinese).
- 张昭栋, 郑金涵, 冯初刚. 1989b. 井水位的固体潮效应和气压效应与含水层参数间的定量关系[J]. *西北地震学报*, **11**(3): 47–52.
- Zhang Z D, Zheng J H, Feng C G. 1989b. Quantitative relationship between the Earth tide effect of well water level, the barometric pressure effect and the parameters of aquifers[J]. *Northwestern Seismological Journal*, **11**(3): 47–52 (in Chinese).
- 张昭栋, 郑金涵, 张广城. 1993. 井水位对气压响应的滞后及其机理[J]. *地壳形变与地震*, **13**(4): 51–56.
- Zhang Z D, Zheng J H, Zhang G C. 1993. Response lag of well water level to barometric pressure and its mechanism[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, **13**(4): 51–56 (in Chinese).
- 张子广, 张素欣, 张跃刚, 李薇, 尹宏伟, 韩文英. 2005. 河北省地下流体数字与模拟资料对比研究[J]. *华北地震科学*, **23**(4): 6–12.
- Zhang Z G, Zhang S X, Zhang Y G, Li W, Yin H W, Han W Y. 2005. Comparison and research on digital and analogue subsurface fluid data[J]. *North China Earthquake Sciences*, **23**(4): 6–12 (in Chinese).
- 张子广, 盛艳蕊, 张素欣, 李薇, 尹宏伟. 2010. 井水位对气压扰动的响应[J]. *地震研究*, **33**(2): 170–175.
- Zhang Z G, Sheng Y R, Zhang S X, Li W, Yin H W. 2010. Response of water level on the well to air pressure perturbation[J]. *Journal of Seismological Research*, **33**(2): 170–175 (in Chinese).
- 赵虹, 燕成玉, 刘寅, 陆一磊. 2020. 江苏一次强对流天气的中尺度诊断分析[J]. *科技通报*, **36**(3): 34–42.

- Zhao H, Yan C Y, Liu Y, Lu Y L. 2020. Mesoscale diagnostic analysis of a strong convective system in Jiangsu Province[J]. *Bulletin of Science and Technology*, **36**(3): 34–42 (in Chinese).
- 赵亚民, 魏文秀. 1984. 飏线群发展的若干特征[J]. *气象*, **10**(12): 19–20.
- Zhao Y M, Wei W X. 1984. Some characteristics of the development process for the squall line swarm[J]. *Meteorological Monthly*, **10**(12): 19–20 (in Chinese).
- 庄薇, 刘黎平, 薄兆海, 肖艳娇. 2010. 新疆一次强飏线过程双多普勒雷达观测的中尺度风场结构分析[J]. *气象学报*, **68**(2): 224–234.
- Zhuang W, Liu L P, Bo Z H, Xiao Y J. 2010. Study of the mesoscale wind field structure of a strong squall line in the Xinjiang Uygur Autonomous Region based on the dual-Doppler radar observations[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, **68**(2): 224–234 (in Chinese).
- Das K, Sarkar S, Mukherjee A, Das P, Pathak A. 2021. Observing tidal and storm generated wave height impact on ground-water levels in a tropical delta (the Sundarbans)[J]. *J Hydrol*, **603**: 126813.
- Lai G J, Ge H K, Wang W L. 2013. Transfer functions of the well-aquifer systems response to atmospheric loading and Earth tide from low to high-frequency band[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **118**(5): 1904–1924.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J. 2013. General features of squall lines in East China[J]. *Mon Wea Rev*, **141**(5): 1629–1647.
- Roeloffs E. 1996. Poroelastic techniques in the study of earthquake-related hydrologic phenomena[J]. *Adv Geophys*, **37**: 135–195.
- Sun X L, Xiang Y. 2020. Comparison of transfer function models for well-aquifer system response to atmospheric loading[J]. *J Hydrol*, **590**: 125494.
- Zhang Y, Fu L Y, Ma Y C, Hu J H. 2016. Different hydraulic responses to the 2008 Wenchuan and 2011 Tohoku earthquakes in two adjacent far-field wells: The effect of shales on aquifer lithology[J]. *Earth Planets Space*, **68**(1): 178.