马栋,马旭东,张国苓,等.唐山地区$M\geqslant4.0$地震异常总结及典型异常特征分析[J].地震工程学报,2026,48(6):1437-1446. DOI:10.20000/j.1000-0844.20241115001

Ma Dong, Ma Xudong, Zhang Guoling, et al. Summary of anomalies and analysis of typical anomaly characteristics for $M\geqslant4.0$ earthquakes in the Tangshan area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1437-1446. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20241115001

唐山地区$M\geqslant4.0$地震异常总结及典型异常特征分析

马 栋[1,2], 马旭东[1,2], 张国苓[1,2], 屈 曼[1,2], 侯晓真[1,2], 唐 杰[1,2]

(1. 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站,河北 邢台 054000;
2. 河北省地震局,河北 石家庄 050021)

摘要: 唐山地处华北历史强震活动区,近年来中等地震活动仍持续发生。为深化对该区域中等地震活动规律的认识,文章以2000年以来唐山地区地震活动及序列特征为研究基础,系统总结$M\geqslant4.0$地震的震前异常现象;详细梳理测震学与地球物理观测的异常结果,并对地球物理异常的时空演化特征开展统计分析;同时,基于映震效能,分别提炼测震学异常与地球物理观测异常的典型特征。结果表明,唐山地区$M\geqslant4.0$地震震前呈现出显著的异常成带、配套与分区分异特征;其中,地震显著平静、流体异常集中等典型异常,对该区域$M\geqslant4.0$地震的预测研判具有重要指示意义。

关键词: 唐山地区;$M4$以上地震;地震活动;异常特征

中图分类号: P315 **文献标志码**: A **文章编号**: 1000-0844(2026)06-1437-10

DOI:10.20000/j.1000-0844.20241115001

Summary of anomalies and analysis of typical anomaly characteristics for $M\geqslant4.0$ earthquakes in the Tangshan area

Ma Dong[1,2], Ma Xudong[1,2], Zhang Guoling[1,2], Qu Man[1,2], Hou Xiaozhen[1,2], Tang Jie[1,2]

(*1.Hebei Hongshan National Observatory on Thick Sediments and Seismic Hazards, Xingtai 054000, Hebei, China;*
2.Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

Abstract: The Tangshan area is a historically active region for strong earthquakes in North China, and moderate earthquakes have continued to occur in recent years. To investigate moderate seismic activity in this area in depth, this paper, based on the analysis of seismic activity and earthquake sequence characteristics in the Tangshan area since 2000, systematically summarizes the precursory anomalies of $M\geqslant4.0$ earthquakes in the region. The research results of seismological anomalies and geophysical observation anomalies are presented in detail, along with a statistical analysis of the spatio-

收稿日期:2024-11-15

基金项目:河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站科研专项(DZ2023120800016);河北省地震局创新团队项目(DZ2024052200002);河北省地震科技星火计划项目(DZ2021121400004、DZ2023120700004);中国地震局震情跟踪定向工作任务(2024010209)

第一作者简介:马 栋(1979-),男,硕士,高级工程师,主要从事地壳形变及地震预测研究。E-mail:madong0311@163.com。

temporal evolution characteristics of the geophysical anomalies. Based on earthquake reflecting efficiency, the typical anomaly characteristics of seismological anomalies and geophysical observation anomalies are analyzed. The results show that $M\geqslant4.0$ earthquakes in the Tangshan area exhibit notable features such as anomaly zoning, anomaly matching, and anomaly clustering before the events. Moreover, typical anomalous characteristics such as seismic quiescence and concentrated fluid anomalies in the Tangshan area provide good indicative significance for the assessment of $M\geqslant4.0$ earthquakes in this region.

Keywords: Tangshan area; $M\geqslant4.0$ earthquakes; seismic activity; anomaly characteristics

0 引言

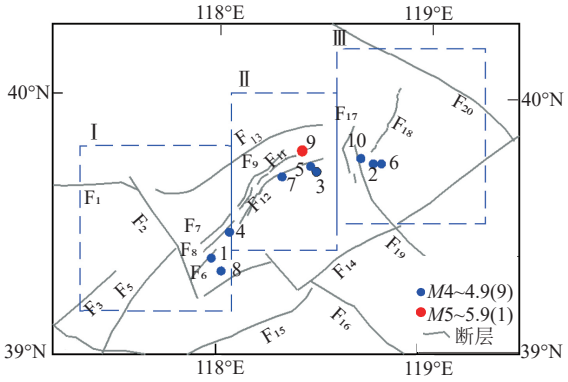
1976年唐山7.8级地震发生后，余震序列整体呈正常衰减特征，强度随时间逐步减弱，发生频度持续降低[1]。2000年至今，唐山地区地震活动仍未恢复至背景水平，期间多次发生M4.0以上地震，包含2020年古冶5.1级地震。2000—2002年河北省完成地震台站地球物理观测数字化改造[2-3]，唐山及周边地区多项观测从模拟观测升级为数字化观测，采样率与观测精度均得到显著提升，为相关研究提供了更高质量的数据基础。基于上述背景，本研究整合数字化观测与部分模拟观测资料，系统开展2000年以来唐山地区$M\geqslant4.0$地震的震前异常总结与典型特征分析。

目前针对唐山地区地震异常特征的研究已取得系列成果：一方面聚焦单次地震的震前异常识别，先后开展了2012年唐山M4.8地震、2019年唐山M4.5地震、2020年唐山M5.1地震的震前异常变化研究[4-6]；另一方面围绕特定技术方法展开探索，包括$M\geqslant4.0$地震前的b值异常特征分析[7]、中强地震对应的流动重力异常特征[8]、岩石圈磁场模值变化规律[9]、区域地震活动演化特征[10]等。现有研究多以单次地震或单一方法为切入点（虽有部分成果涉及大区域范围的地震异常综合分析，如华北地区地下流体前兆异常特征研究[11]、南北地震带形变异常特征研究[12]等），针对唐山地区地震活动与震前异常的系统性综合研究仍相对不足。

此外，当前地震异常特征与机理研究多以5级以上地震为研究对象，对4级地震的异常研究较为薄弱。鉴于此，本研究系统梳理2000年以来唐山地区4级以上地震的观测资料，统计该层级地震的活动规律，分类总结震前多学科异常特征，重点从序列演化、异常时空迁移规律、典型异常共性特征三个维度展开深入分析，明确不同测项的异常对应关系与映震效能。研究成果可为完善唐山地区4级地震预测指标体系提供支撑，其中映震效能较优的观测测项，可作为该地区日常震情跟踪的重点监测指标。

1 研究区地震活动及地震序列特征

2000年以来，唐山地区（包括唐山老震区涉及到的昌黎地区）共发生4级以上地震10次（图1）。从时间分布来看，除了2004年至2010年发震间隔时间较长外，其他时间段唐山地区4级以上地震存在2年左右的准周期（图2）。按地震序列类型划分，孤立型地震为4次（2002年丰南M4.2、2004年昌黎M4.6、2020年唐山M5.1和2021年滦州M4.3等地震），其余6次均为主余型地震，无震群型地震[13]。



分区：Ⅰ：西区；Ⅱ：中区；Ⅲ：东区

地震：1：2002年丰南M4.2；2：2004年昌黎M4.6；3：2010年滦县M4.3；4：2010年丰南M4.1；5：2012年唐山4.8M；6：2015年昌黎M4.2；7：2016年唐山M4.1；8：2019年丰南M4.5；9：2020年唐山M5.1；10：2021年滦州M4.3

断裂：F_1：宝坻断裂；F_2：蓟运河断裂；F_3：天津断裂；F_4海河断裂；F_5：沧东断裂；F_6：王兰庄南—汉沽断裂；F_7：王兰庄断裂西支；F_8：王兰庄断裂东支；F_9：陡河断裂；F_{10}：唐山—丰南断裂；F_{11}：唐山—古冶断裂；F_{12}：唐山断裂；F_{13}：榛子镇断裂；F_{14}：宁河—昌黎断裂；F_{15}：柏各庄断裂；F_{16}：西南庄断裂；F_{17}：滦县西断裂；F_{18}：卢龙—滦县断裂；F_{19}：乐亭断裂；F_{20}：建昌营断裂

图1 唐山地区$M\geqslant4$地震震中分布图

Fig. 1 Epicenter distribution of $M\geqslant4$ earthquakes in the Tangshan area

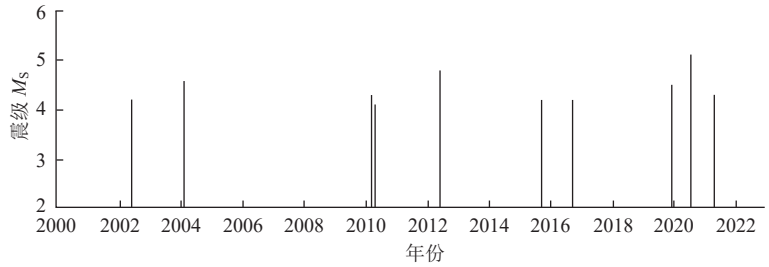


图 2　唐山地区 $M\geqslant4$ 地震 M-t 图

Fig. 2　M-t plot of $M\geqslant4$ earthquakes in the Tangshan area

余震次数较少的地震有 2002 年丰南 M4.2 地震、2010 年丰南 M4.1 地震和 2019 年丰南 M4.5 地震；$M_L\geqslant1.0$ 余震次数都在 10 次以下，且 2010 年丰南年 M4.1 和 2019 年丰南 M4.5 地震余震持续仅 2 天。2015 年昌黎 M4.2 地震余震 11 次，余震频次也较低。余震次数较多的地震有：2010 年滦县 M4.3 地震和 2016 年唐山 M4.1 地震。其中，2010 年滦县 M4.3 地震，$M_L\geqslant1.0$ 余震 130 次，余震持续 5 天才恢复到正常水平；2016 年唐山 M4.1 地震的余震 121 次，地震当天 26 次，次日 45 次，第 3～5 日，余震仍有 10 次以上，到第 6 日才降到 10 次以下。2004 年昌黎 M4.6、2012 年唐山 M4.8、2020 年唐山 M5.1 和 2021 年滦州 M4.3 等地震，$M_L\geqslant1.0$ 余震的次数在 30 次左右，衰减较快，且大部分余震都集中在主震当日，特别是 2012 年唐山 M4.8 地震主震 10 h 后余震次数较少。

根据地震序列统计分析结果，唐山地区 4 级以上地震的序列特征呈现显著的区域差异性：丰南地区曾发生 3 次 4 级以上地震，均表现为余震数量偏少、活动不活跃的特点，这一特征与发震构造密切相关。该区域的发震构造涉及王兰庄南—汉沽断裂和王兰庄断裂东支：前者北起王兰庄南部，向南延伸至汉沽以南，是沧县隆起北端宁河浅凹与黄骅凹陷北部间河凹陷的分界断裂，控制着间河凹陷渐新统沙河街组一段和东营组的沉积发育[14]；后者则是唐山断裂带、碑子院—丰南断裂与唐山断裂向南延伸的复合构造段。与之形成对比的是 2010 年滦县 M4.3 地震和 2016 年唐山 M4.1 地震，两次地震均表现出较强的余震活动。从空间分布来看，2010 年滦县 M4.3 地震的震中与 1976 年滦县 M7.1 地震震中完全重合；2016 年唐山 M4.1 地震震中距 1976 年唐山 M7.8 地震震中仅约 17 km，均位于 1976 年唐山大震区的 M7 以上地震核心区域。由于老震区震中位置的地质构造因强震作用已十分破碎，应力调整过程更易触发大量余震，因此形成了余震活动丰富的序列特征。

在发震构造分区上，结合已有研究提出的唐山地区构造划分方案[14]，可将唐山老震区进一步划分为东区、中区和西区三个次级区域（图 1）：东区共发生 3 次 4 级以上地震，其中 2004 年昌黎 M4.6、2015 年昌黎 M4.2 地震的发震构造为滦县—乐亭断裂，2021 年滦州 M4.3 地震的发震构造为卢龙断裂；中区的 4 次 4 级以上地震均沿唐山—古冶断裂分布，分别为 2010 年滦州 M4.3、2012 年唐山 M4.8、2016 年唐山 M4.1 和 2020 年唐山 M5.1 等地震；西区则有 3 次 4 级以上地震记录：2002 年丰南 M4.2 地震、2010 年丰南 M4.1 地震的发震构造为王兰庄南—汉沽断裂和王兰庄断裂东支，2019 年丰南 M4.5 地震的发震构造为宁河—昌黎断裂。

2　异常分类及对比分析

针对唐山地区 10 次 $M\geqslant4.0$ 地震，通过对震前、震后观测资料的系统分析，共识别并判定测震学异常及地球物理观测异常 136 项。这些异常可归为地震窗、地震频度、地震平静等 22 类。从各类异常的数量统计结果（图 3）来看，地震平静、地震频度、缺震、b 值、地磁及水位异常的占比相对较高，数量均在 10 次及以上；进一步对比震前提出与震后总结的异常数量发现，缺震、b 值、水准、体应变、地磁、地电阻率、水位及水温这 8 类异常中，震前识别的异常占比显著偏高。

按震例分学科统计结果显示（图 4）：测震学异常在各震例中数量最多，其中 2019 年丰南 M4.5 地震和 2020 年唐山 M5.1 地震前的测震学异常分别达 10 项和 12 项；电磁异常较为集中的震例为 2010 年滦县 M4.3 地震（5 项）、2019 年丰南 M4.5 地震（5 项）和 2020 年唐山 M5.1 地震（8 项）；流体异常在 2016

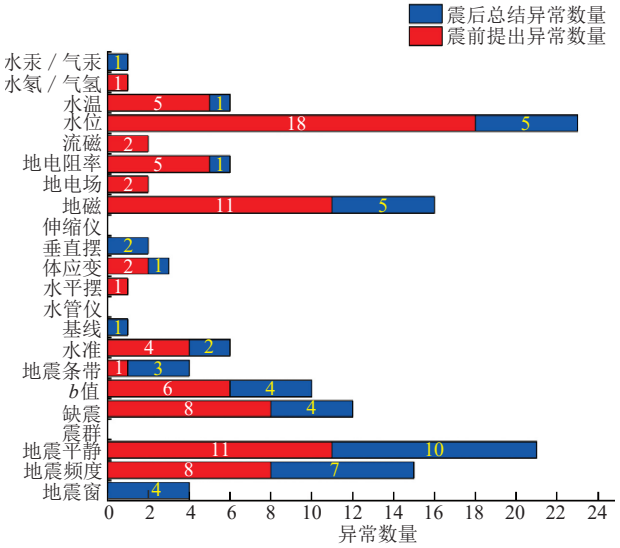


图 3 各类异常数量对比图

Fig. 3 Comparison of the number of various types of anomalies

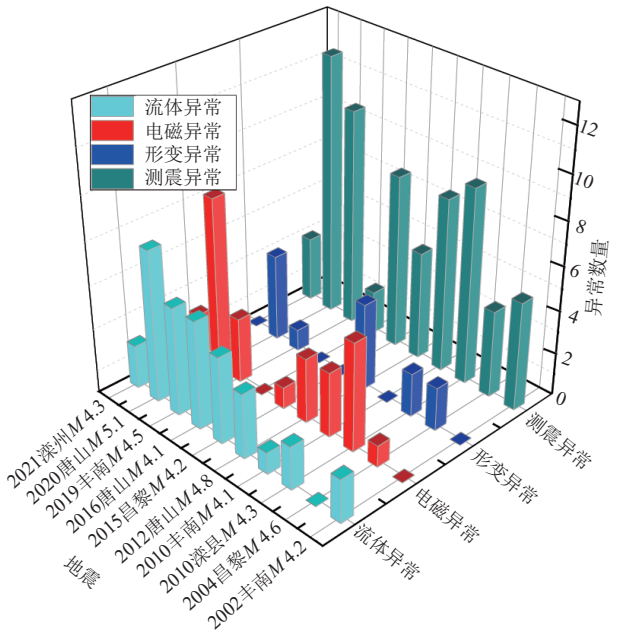


图 4 按震例分学科异常数量对比图

Fig. 4 Comparison of the number of anomalies by discipline for each earthquake case

年唐山 M4.1 地震(5 项)和 2020 年唐山 M5.1 地震(7 项)前表现较为突出;形变异常的整体数量最少,2002 年丰南 M4.2、2010 年丰南 M4.1、2015 年昌黎 M4.2、2010 年滦州 M4.3 及 2021 年滦州 M4.3 地震前均未观测到形变异常。

3 异常特征研究及异常机理讨论

基于唐山地区 $M\geqslant$4.0 地震震前 2 年的异常统计,其数量演化呈现明显的阶段性特征:震前 6 个月,地球物理观测异常数量开始显著上升(图 5);进入震前 3 个月,异常数量呈快速增长态势(图 6)。其中,2020 年唐山 M5.1 地震前的异常数量增幅最为突出,2019 年丰南 M4.5 地震、2010 年滦县 M4.3 地震次之。已有研究显示[15],强震前同样存在异常数量显著增加的现象:如 1998 年张北 M6.2 地震前,形变异常数量于震前 7 个月达到峰值;2013 年岷县—漳县 M6.6 地震前,新增异常自 2010 年起逐步累积,2011 年年中达到阶段性高点,2012 年底至 2013 年中异常测项占比再次抬升,反映短期异常集中增多的特征[16]。需指出的是,本文研究的 $M\geqslant$4.0 地震与 M6 以上强震的异常时间演化存在差异:前者异常显著增多的持续时间较短,一般仅 3~6 个月;且由于 $M\geqslant$4.0 地震的总体异常数量相对偏少,部分震例未呈现出明显的异常数量激增特征。

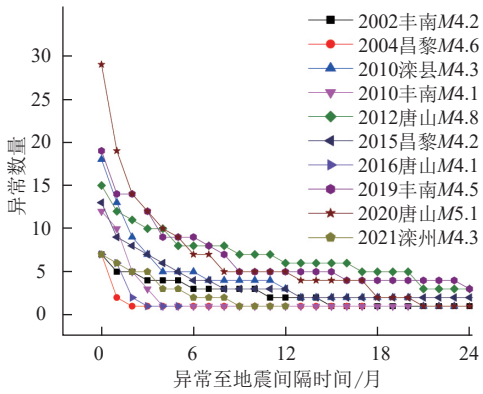


图 5 前兆异常数量时间演化特征(2 年)

Fig. 5 Temporal evolution characteristics of the number of precursory anomalies (two years)

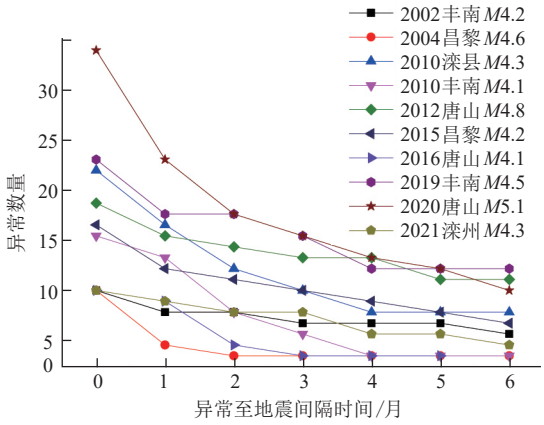


图 6 前兆异常数量时间演化特征(6 个月)

Fig. 6 Temporal evolution characteristics of the number of precursory anomalies (six months)

从异常成带、配套、分区及持续时间等维度分析并统计（表 1），唐山地区 $M\geqslant4.0$ 地震的地球物理观测异常呈现出鲜明的时空演化特征：2012 年唐山 $M4.8$ 地震前，异常成带性显著，主要沿张—渤地震带分布，且中短期异常集中在震中附近；2020 年唐山 $M5.1$ 地震前异常类型丰富，呈现清晰的配套特征，震中附近以流体异常为主，稍远区域为电磁异常，最外围则是形变异常，多学科异常在空间上形成有序配套；2019 年丰南 $M4.5$ 地震前，震中以北以中短期异常为主，震中以南异常持续时间偏长，2010 年滦县 $M4.3$ 地震的异常主要分布在外围区域、震中附近异常稀疏，2021 年滦州 $M4.3$ 地震前流体异常以 6 个月以内的短期异常为主、电磁异常持续时间偏长，展现出明显的异常分区分异特征；而 2002 年丰南 4.2 级、2004 年昌黎 $M4.6$ 地震、2010 年丰南 $M4.1$ 地震、2016 年唐山 $M4.1$ 地震的震前异常持续时间均在 6 个月以内，体现了中强地震前异常持续时间的多样性。

表 1　唐山地区 $M\geqslant4$ 地震地球物理异常时空演化特征统计

Table 1　Statistics of spatiotemporal evolution characteristics of geophysical anomalies for $M\geqslant4$ earthquakes in the Tangshan area

震例	异常成带特征	异常配套特征	异常分区特征	异常持续时间特征
2002 丰南 $M4.2$	-	仅流体异常，配套性差	-	异常都在 3 个月以内
2004 昌黎 $M4.6$	-	-	-	异常都在 3 个月以内
2010 滦县 $M4.3$	-	-	异常在震中外围分布	-
2010 丰南 $M4.1$	-	-	-	异常都在 6 个月以内
2012 唐山 $M4.8$	张—渤带	-	异常位于震中西侧	-
2015 昌黎 $M4.2$	-	-	异常位于震中西侧	-
2016 唐山 $M4.1$	平原带中段	-	-	异常都在 6 个月以内
2019 丰南 $M4.5$	-	震中距由近至远，流体、电磁、形变异常配套	北部中短期异常、南部中长期异常	-
2020 唐山 $M5.1$	-	震中距由近至远，流体、电磁、形变异常配套	异常主要位于震中西侧	-
2021 滦州 $M4.3$	-	流体、电磁配套性好，无形变异常	-	流体异常以 6 个月内为主，电磁异常持续时间偏长

唐山地区 $M\geqslant4.0$ 地震前测震学异常主要包括 b 值、地震窗、地震平静、频度及地震条带等类型（表 2）。2016 年唐山 $M4.1$ 地震与 2021 年滦州 $M4.3$ 地震前测震学异常相对偏少，仅出现 2 项异常；2010 年丰南 $M4.1$ 地震前测震学异常则较为显著，共出现 6 项异常。在映震效能方面，以异常出现震例数与总震例数的比值（a/b）评估显示，地震平静映震效能最优；地震频度、缺震及 b 值等指标亦表现较好。地震平静异常涵盖首都圈 $M_L4.4$ 地震平静、河北 $M_L3.0$ 地震平静、唐山 $M_L4.0$ 地震平静、唐山 $M_L2.0$ 地震平静及唐山 $M_L3.0$ 地震平静。其中，唐山 $M_L2.0$ 与 $M_L3.0$ 地震平静对唐山地区 $M_L4.0$ 以上地震具有较好的短期指示意义。$M_L2.0$ 地震平静以平静 30 d 后被打破为阈值，预测时效为平静打破后 3 个月内，效能评估结果为 $R(0.40)>R_0(0.28)$；$M_L3.0$ 地震平静阈值为平静持续 120 d，预测时效为超阈值后 4 个月内，评估结果为 $R(0.30)>R_0(0.29)$。2015 年昌黎 $M4.2$ 地震、2019 年丰南 $M4.5$ 地震、2020 年唐山 $M5.1$ 地震及 2021 年滦州 $M4.3$ 地震前均出现 $M_L2.0$ 或 $M_L3.0$ 地震平静异常；其中前、后三次地震还出现 $M_L2.0$ 与 M_L 3.0 平静异常配套出现的特征。因此，在唐山地区测震学异常跟踪中，应重点关注上述效能较优的平静类指标。

唐山地区 $M\geqslant4.0$ 地震前地球物理异常可分为流体、形变及电磁三类（表 2）。其中，流体异常以水位、水温为主：水位异常在 9 次地震前共出现 23 项，形态以上升/突升（12 项）和破年变（7 项）居多；其次为阶变、趋势转折与下降；映震效能较优的台项包括唐山矿井水位、马家沟矿井水位及河间井水位。水温异常在 4 次地震前出现 6 项，以畸变频次、突降及趋势转折为主要特征，其中汉 1 井水温映震效果相对突出；水氡/气氡、水汞/气汞各仅出现 1 项异常。形变异常以水准测量最为显著，在 4 次地震前出现 6 项异常，形态以破年变、趋势转折及突跳为主，房山台水准、唐山台水准映震效能较好；体应变、垂直摆分别在 2 次地震前出现 3 项和 2 项异常；

表2 唐山地区$M\geqslant4$地震异常信息统计

Table 2 Statistics of anomaly information for $M\geqslant4$ earthquakes in the Tangshan area

异常	2002丰南M4.2	2004昌黎M4.6	2010滦县M4.3	2010丰南M4.1	2012唐山M4.8	2015昌黎M4.2	2016唐山M4.1	2019丰南M4.5	2020唐山M5.1	2021滦州M4.3	映震效能
地震窗	唐山窗	唐山窗		唐山窗			唐山窗				4/10
地震频度	首都圈M_L1.8	首都圈M_L1.8、M_L3.0	首都圈M_L1.8、M_L3.0	首都圈M_L1.8	唐山M_L2.0	首都圈M_L1.8、M_L3.0		首都圈M_L1.8、M_L3.0	北京M_L1.0、首都圈M_L1.8、M_L3.0、首都圈中部M_L2.0		8/10
地震平静	首都圈M_L4.4	首都圈M_L4.4	河北M_S3、首都圈M_L4.4	河北M_S3、首都圈M_L4.4	唐山M_S4.0	唐山M_L2.0、M_L3.0、首都圈M_L4.4	唐山余震区M_L2.0	华北M_L4.0、唐山M_L4.0、M_L3.0	唐山M_L2.0、M_L3.0、华北M_L4.0、首都圈5.0	唐山M_L2.0、M_L3.0	10/10
缺震	唐山余震区M_L2.0		首都圈M_L1.8、唐山余震区M_L2.0	首都圈M_L1.8、唐山余震区M_L2.0	唐山M_L2.0	首都圈M_L1.8		华北M_L3.0、唐山M_L2.0	华北M_L3.0、首都圈M_L1.8	天津M_L1.0	8/10
b值	唐山M_L2.0		唐山M_L2、首都圈M_L1.8	首都圈M_L1.8	唐山M_L2.0	唐山M_L2、首都圈M_L1.8		唐山M_L2.0、首都圈M_L1.8	首都圈M_L1.8		7/10
地震条带			宁河至三河M_L1.0	宁河至三河M_L1.0	唐山西部M_L1.0			北京附近M_L2.0			4/10
水准/基线			房山水准↻		唐山水准↻			房山水准↻	唐山水准↯↑、唐山基线↴		4/10
地磁		加卸载响应比	加卸载响应比	加卸载响应比	低点位移	加卸载响应比		逐日比、加卸载响应比	加卸载响应比、逐日比、低点位移	逐日比	8/10
地电			昌黎地电阻率↑̄	昌黎地电阻率↑̄	马家沟地电阻率↯、宝坻地电阻率↘				通州地电阻率↘ 延庆、宝坻地电场	通州地电阻率↴↻	5/10
地倾斜		宽城垂直摆↯	怀来垂直摆↯		蓟县水平摆↻						
地应变		张家口体应变↯			昌平体应变↻、宝坻体应变↻						
流磁								唐山地区	唐山地区		2/10
水位	丰南↗、唐山矿↗		昌黎↗	河间↯	马矿↗、丰南↘、唐山矿↗	唐山矿↻、马矿↻、西集↑	昌黎↴、河间↯、西集↑	唐山矿↻、河间↗、王3↗	唐山↻、马矿↻、房山↻、王3↻、河间↗	唐山矿↗、马矿↗	9/10
水温						汉1↯	左家庄↓、汉1↯	永清↴、汉1↯	汉1↯		4/10
水氡/气氡			昌黎水氡↑								
水汞/气汞									延庆气汞↯		2/10

注：转折上升：↗；转折下降：↘；突升：↑；突降：↓；高值：↑̄；趋势转折：↴；破年变：↻；短时畸变或阶变：↯；映震效能：以比值a/b的形式表示，a指该项目出现异常的震例数量，b指震例总数

水平摆、基线各出现 1 项异常；水管仪、伸缩仪未观测到明显对应异常。总体而言，形变异常数量偏少，这与唐山地区形变台站密度较低有关，且形变测项对≤4.0级地震的映震效果总体一般。电磁异常方面，地磁加卸载响应比、地磁逐日比映震效果较好；其次为地电阻率，异常以高值异常与趋势转折为主，多表现为中长期异常，对M5.0以上地震响应较好，对M4.0地震响应偏弱；而流动地磁、地电场映震效能相对较差，分别对应2次和1次地震。

与已有研究对比可见，本文b值结果与岳晓媛等[7]对唐山老震区的研究结论基本一致，本文还补充了首都圈范围的b值异常。唐杰等[5]系统分析了唐山多次地震前地下流体典型异常，指出唐山矿井、马家沟矿井、河间井、永清井、汉 1 井、王 3 井等台项在唐山地区$M\geqslant4.0$地震前的异常特征，与本文结果相符。2000年以来，唐山地区仅发生2020年一次5.0级以上地震(M5.1)，该震前异常总数达32项，显著高于区内$M\leqslant4.0$地震的前异常数量(图 4)。

唐山地区$M\geqslant4.0$地震前，地下水位异常以上升型为主，共出现水位上升异常12项，而水位下降异常仅1项(表2)。水位上升对应的发震断层主要包括滦县—乐亭断裂、卢龙断裂、唐山—古冶断裂、王兰庄南—汉沽断裂及宁河—昌黎断裂。其中，仅唐山—古冶断裂为逆冲兼走滑性质，其余断裂均为正断层。出现水位上升异常的8次震例，其震源机制以正断型和走滑型为主：2010年滦州M4.3、2016年唐山M4.1、2019年丰南M4.5等地震为正断型；2002年丰南M4.2、2012年唐山M4.8、2015年昌黎M4.2、2020年唐山M5.1及2021年滦州M4.3等地震为走滑型。结合重力、全球定位系统(Global Positioning System，GPS)等地球物理场资料分析，唐山地区整体表现为重力正异常区，区内地震多受控于岩浆上侵与断层活动联合作用的发震模式[17]。GPS应变场解算结果显示，唐山地区为面膨胀显著的压应变梯度高值中心[18]；区域最大主张应力于2016年发生趋势转折，由持续上升转为缓慢下降，显示主张应力有所减弱[19]。地壳P波、S波速度双差层析成像结果表明，唐山震源区壳内存在低速异常体，推测与地幔热物质、深部流体及高温岩浆沿深大断裂与裂隙向上运移、侵入中—上地壳有关[20]。综合GPS揭示的面膨胀增强、张应力减小，重力反演显示的挤压环境增强，以及深部热物质上涌等特征，可较好地解释唐山地区4级以上地震前普遍出现的地下水位上升现象。

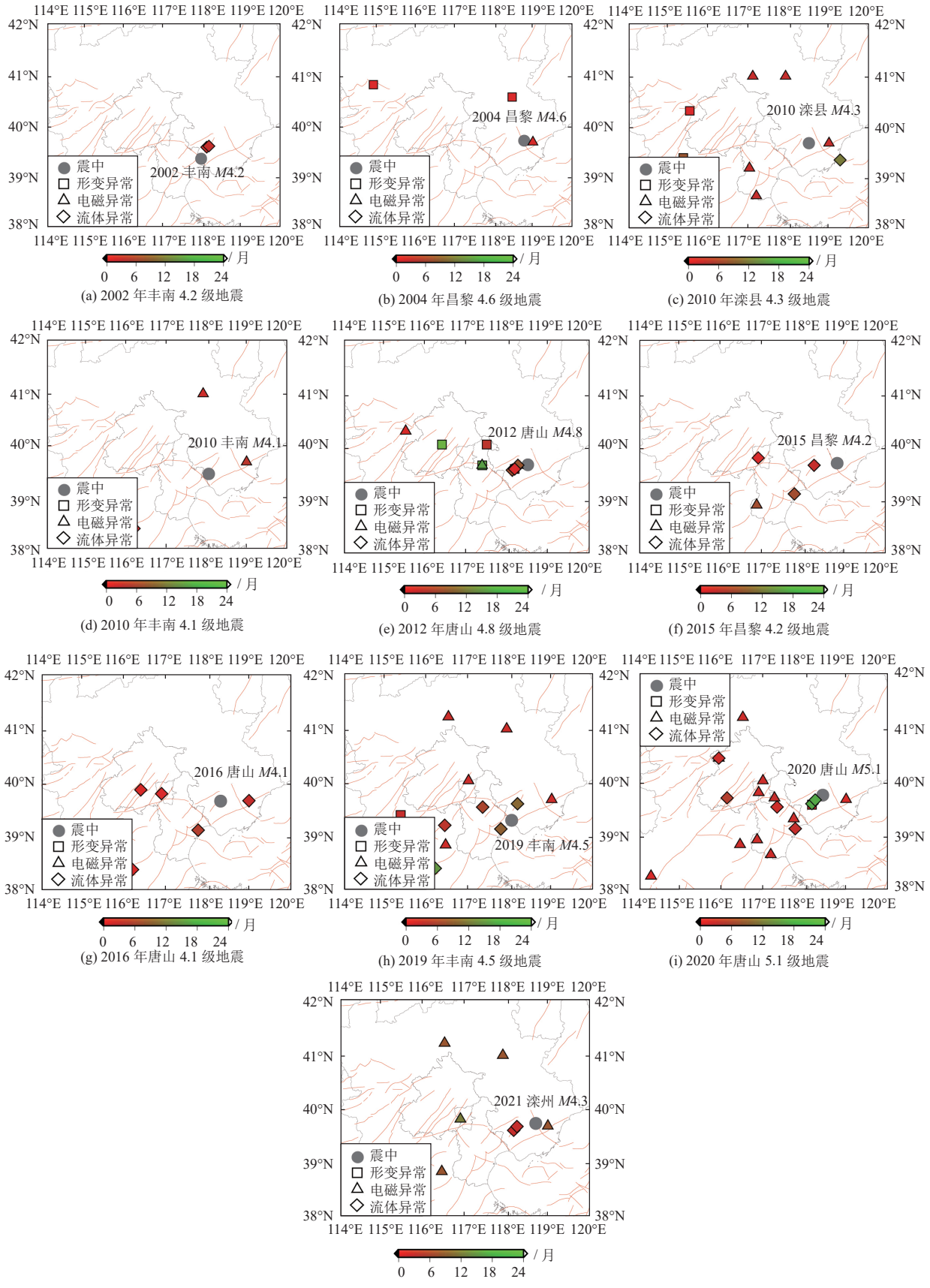
地震活动方面，本文分析的10次震例前均出现显著地震平静异常(图7)。其中，背景性平静主要包括华北M_L4.0地震、首都圈M_L4.4、河北M_S3.0及唐山M_S4.0等地震平静；短期平静异常主要表现为唐山M_L2.0地震和唐山M_L3.0地震。2015年之后的5次震例中，有3次同时出现唐山M_L2.0地震与M_L3.0地震平静异常时配套出现的特征。总体来看，唐山地区4级以上地震发生前，通常先在首都圈或华北区域出现背景性平静，在此基础上进一步出现具有短期指示意义的唐山M_L2.0、M_L3.0局部平静异常。从构造物理机制分析，地震构造区出现显著平静，可结合岩石变形声发射实验结果理解：新生断层面凹凸不平，需经历一定程度滑动才能满足整体失稳破裂条件，因此从新生断层形成至最终失稳滑动存在过渡阶段。该过程实质是通过断层蠕滑使断层面摩擦趋于均匀，即断层失稳前存在“蠕滑-匀阻化”阶段，进而导致地震活动表现为明显平静[21-22]。

4　结论与讨论

本文利用唐山及附近地区地球物理观测资料及测震学资料，通过对2000年以来唐山地区4级以上地震的异常回溯及分析，并在异常特征、异常指标等方面开展了研究，获得以下认识：

(1) 唐山地区2000年以来的4级以上地震序列类型以主余型为主(占60%)，其次是孤立型(占40%)，无震群型。各次震例余震活动数量和衰减等方面差异较大，特别是唐山地区东区4级以上地震的余震数量明显偏少，$M_L\geqslant1.0$余震次数在10次以下；2010年滦县M4.3地震和2016年唐山M4.1地震余震活动较强，$M_L\geqslant1.0$余震次数超过120次，根据发震位置判定，这两次地震分别靠近1976年滦县M7.1地震和1976年唐山M7.8地震的震中位置，其余震活动丰富是由于老震区震中位置的松散构造所致。

(2) 测震学异常以地震平静、地震频度、缺震和b值异常为主。映震效能方面，地震平静异常效能最好，其次为地震频度、缺震和b值。平静类异常的短期异常主要有唐山M_L2.0地震平静、唐山M_L3.0地震平静异常，特别是M_L2.0地震平静和M_L3.0地震平静异常配套出现对唐山地区4级以上



(a) 2002 年丰南 4.2 级地震 (b) 2004 年昌黎 4.6 级地震 (c) 2010 年滦县 4.3 级地震

(d) 2010 年丰南 4.1 级地震 (e) 2012 年唐山 4.8 级地震 (f) 2015 年昌黎 4.2 级地震

(g) 2016 年唐山 4.1 级地震 (h) 2019 年丰南 4.5 级地震 (i) 2020 年唐山 5.1 级地震

(j) 2021 年滦州 4.3 级地震

图 7 唐山地区 4 级以上地震前地球物理异常演化特征

Fig. 7 Evolution characteristics of geophysical anomalies before $M \geqslant 4$ earthquakes in the Tangshan area

地震具有较好的短期指示意义。

（3）地球物理异常以地磁和水位数量居多，且以6个月的中短期异常为主；异常空间分布特征方面，主要分为异常集中在震中附近、异常集中在外围、异常成带等类型。流体异常以水位和水温异常为主，映震效能较好的台站有唐山矿井、马家沟矿井、丰南井以及汉1井；形变异常总体偏少；电磁异常中地磁加卸载响应比和逐日比、地电阻率的映震效能较好。

结合区域构造活动、区域地壳变形特征等方面，本文相关结果可用于唐山地区以后的异常分析以及震情研判。

参考文献（References）

[1] 张素欣，王晓山，陈婷，等. 唐山老震区40年地震时空演化特征分析[J]. 华北地震科学，2017，35(1)：32-37.
Zhang Suxin，Wang Xiaoshan，Chen Ting，et al. Seismic space-time evolution characteristics in Tangshan old seismic region during the past 40 years[J]. North China Earthquake Sciences，2017，35(1)：32-37.

[2] 陈佳，陈建国，张跃刚，等. 张家口地震台地形变数字化与模拟资料对比研究[J]. 地震地磁观测与研究，2006，27(6)：49-56.
Chen Jia，Chen Jianguo，Zhang Yuegang，et al. Comparative research of the crustal strain data for the digital and analog records in Zhangjiakou seismic station[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research，2006，27(6)：49-56.

[3] 薛志芳，于春颂，郭建芳，等. 河北昌黎井数字化水温强远震异常特征浅析[J]. 山西地震，2013(4)：9-10，43.
Xue Zhifang，Yu Chunsong，Guo Jianfang，et al. Analysis of anomaly characteristic of digital water temperature observation of Changli well corresponded to far field strong earthquakes[J]. Earthquake Research in Shanxi，2013(4)：9-10，43.

[4] 王朝景，李博，苏树朋. 基于多期累积岩石圈磁场变化分析唐山M_S5.1地震震磁异常[J]. 地震研究，2024，47(4)：517-527.
Wang Chaojing，LI Bo，SU Shupeng. Analysis of the seismo-magnetic anomaly of the Tangshan M_S5.1 earthquake based on the accumulative variation of the lithospheric magnetic field[J]. Journal of Seismological Research，2024，47(4)：517-527.

[5] 唐杰，张素欣，张子广，等. 河北唐山M4.5地震前地下流体典型异常特征分析[J]. 华北地震科学，2020，38(增刊1)：80-85.
Tang Jie，Zhang Suxin，Zhang Ziguang，et al. Typical anomalies of underground fluid before the 2019 Tangshan M4.5 earthquake feature analysis[J]. North China Earthquake Sciences，2020，38(S1)：80-85.

[6] 赵慧琴，李均良，张肖，等. 唐山4.8级地震前易县地震台地应变异常特征[J]. 地震地磁观测与研究，2015，36(6)：73-79.
Zhao Huiqin，Li Junliang，Zhang Xiao，et al. The abnormal characteristics of the Earth train at Yixian Seismic Station before Tangshan M_S4.8 earthquake[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research，2015，36(6)：73-79.

[7] 岳晓媛，李艳娥，钟世军，等. 唐山老震区$M\geqslant4.0$地震前b值变化异常特征研究[J]. 地震，2024，44(1)：94-108.
Yue Xiaoyuan，Li Yane，Zhong Shijun，et al. Anormalies of b-value changes before $M\geqslant4.0$ earthquake in Tangshan old seismic region[J]. Earthquake，2024，44(1)：94-108.

[8] 张娜，龚燕民，宋志刚. 唐山老震区中强地震流动重力异常研究[J]. 地震工程学报，2016，38(增刊2)：208-211.
Zhang Na，Gong Yanmin，Song Zhigang. Strong earthouake flowing gravity anomaly research in Tangshan old seismic region[J]. China Earthquake Engineering Journal，2016，38(S2)：208-211.

[9] 赵慧琴，李博，毛丰龙. 河北及周边地区岩石圈磁场变化模值的分析[J]. 科学技术与工程，2024，24(13)：5271-5277.
Zhao Huiqin，Li Bo，Mao Fenglong. Analysis of variation modulus of seismic magnetic field in Hebei and surrounding areas[J]. Science Technology and Engineering，2024，24(13)：5271-5277.

[10] 周依，曹筠，马旭东，等. 唐山老震区现今地震活动特征[J]. 地震研究，2024，47(3)：430-440.
Zhou Yi，Cao Yun，Ma Xudong，et al. Characteristics of the recent seismicity in the Tangshan old seismic region[J]. Journal of Seismological Research，2024，47(3)：430-440.

[11] 杨振鹏，王松阳，赵倩，等. 基于中国震例统计的华北、东北地区地下流体前兆异常特征分析[J]. 防灾减灾学报，2019，35(3)：28-33.
Yang Zhenpeng，Wang Songyang，Zhao Qian，et al. Analysis of precursory anomalies of subsurface fluid in north and Northeast China based on statistics of earthquake cases in China[J]. Seismological Research of Northeast China，2019，35(3)：28-33.

[12] 王双绪，张希，张四新，等. 南北地震带区域形变异常特征与地震关系研究[J]. 地震，2006，26(1)：47-56.
Wang Shuangxu，Zhang Xi，Zhang Sixin，et al. Study on the relation of regional deformation anomaly characteristics and earthquakes along South-North seismic belt[J]. Earthquake，2006，26(1)：47-56.

[13] 马栋. 河北省震例研究：2000—2022[M]. 北京：地震出版社，2024.
Ma Dong. Reserch on earthquake cases in Hebei Province：2000—2022[M]. Beijing：Seismological Press，2024.

[14] 彭远黔，孟立朋. 河北地震构造特征[M]. 石家庄：河北人民出版社，2017：132-133.
Peng Yuanqian，Meng Lipeng. Seismic structural characteristics of Hebei Province[M]. Shijiazhuang：Hebei People's Publishing House 2017：132-133.

[15] 马栋，刘琦，闫伟，等. 张渤带形变预测指标分析[J]. 地震，2016，36(4)：101-108.
Ma Dong，Liu Qi，Yan Wei，et al. Analysis of deformation

prediction index for the Zhangjiakou—Bohai seismic belt[J]. Earthquake, 2016, 36(4): 101-108.

[16] 张小涛, 宋治平. 2013年岷县—漳县M_S6.6地震前异常的演化特点及预测意义[J]. 中国地震, 2021, 37(1): 73-83.
Zhang Xiaotao, Song Zhiping. The evolution characteristics and predictional significance of anomalies before Minxian—Zhangxian M_S6.6 earthquake in 2013[J]. Earthquake Research in China, 2021, 37(1): 73-83.

[17] 杨雄, 申重阳, 祝意青, 等. 唐山M_S7.8震区地壳三维密度结构重力反演[J]. 地球物理学报, 2023, 66(1): 183-196.
Yang Xiong, Shen Chongyang, Zhu Yiqing, et al. Study on gravity inversion of three-dimensional density structure of the crust in Tangshan M_S7.8 earthquake area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(1): 183-196.

[18] 刘同文, 王慧敏, 吴啸龙, 等. 华北平原及其临区现今地壳形变特征[J]. 测绘科学技术学报, 2021, 38(2): 117-123.
Liu Tongwen, Wang Huimin, Wu Xiaolong, et al. Current crustal deformation of the North China Plain and its adjacent regions[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2021, 38(2): 117-123.

[19] 屈曼, 侯晓真, 马栋, 等. 基于GNSS数据的河北地区形变特征[J]. 华北地震科学, 2021, 39(4): 68-74.
Qu Man, Hou Xiaozhen, Ma Dong, et al. Deformation characteristics in Hebei Region based on GNSS data[J]. North China Earthquake Sciences, 2021, 39(4): 68-74.

[20] 马梦丹, 赵爱华. 华北地区地壳P波和S波速度结构的双差层析成像[J]. 地震学报, 2021, 43(1): 13-33.
Ma Mengdan, Zhao Aihua. Double-difference tomography of crustal P and S wave velocity structures beneath North China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2021, 43(1): 13-33.

[21] 马胜利, 雷兴林, 刘力强. 标本非均匀性对岩石变形声发射时空分布的影响及其地震学意义[J]. 地球物理学报, 2004, 47(1): 127-131.
Ma Shengli, Lei Xinglin, Liu Liqiang. Effects of heterogeneity in rock samples on spatial and temporal distribution of acoustic emission and their significance in seismology[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(1): 127-131.

[22] 马胜利,蒋海昆,巴晶,等. 大震前地震活动平静现象一种可能的机制:断层的蠕滑—匀阻化[C]// 中国地震学会. 中国地震学会第十次学术大会论文摘要专集. 北京:中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室,2004.
Ma Shengli, Jiang Haikun, Ba Jing, et al. A possible mechanism of seismic quiescence before large earthquakes: creep and resistance homogenization of faults[C]//Seismological Society of China. Abstract Collection of the 10th National Academic Conference of Seismological Society of China. Beijing: State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2004.

(本文编辑:任 栋)

(上接第 1368 页)

[16] 何若全, 顾强, 孙国华. 关于钢结构抗震设计中结构影响系数的讨论[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2004, 17(4): 29-32.
He Ruoquan, Gu Qiang, Sun Guohua. On structural influencing coeffcient in aseismic design of steel structures[J]. Journal of University of Science and Technology of Suzhou (Engineering and Technology), 2004, 17(4): 29-32.

[17] 杨文侠. Y形偏心支撑钢框架的结构影响系数[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 30-71.
Yang Wenxia. Structural influence coefficient of Y-shaped eccentrically braced steel frame[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011: 30-71.

[18] 程倩倩, 苏明周, 连鸣. 带可更换剪切型耗能梁段高强钢组合框筒的结构影响系数研究[J]. 工程力学, 2020, 37(2): 145-158.
Cheng Qianqian, Su Mingzhou, Lian Ming. Response modification factor of high strength steel fabricated framed-tube with replaceable shear links[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(2): 145-158.

[19] 周玉浩, 连鸣, 韩瑞祥. 带低屈服点钢耗能梁段高强钢框筒结构的结构影响系数和位移放大系数研究[J]. 建筑钢结构进展, 2024, 26(1): 41-53.
Zhou Yuhao, Lian Ming, Han Ruixiang. A research on the structural influence coefficient and displacement amplification coefficient of high-strength steel fabricated framed-tube with low-yield-point steel shear links[J]. Progress in Steel Building Structures, 2024, 26(1): 41-53.

[20] CECS 160—2004 建筑工程抗震性态设计通则[S].
CECS 160—2004 General rule for performance-based seismic design of buildings[S].

(本文编辑:张向红)