

A Prediction of Near-field Ground Motion in Tianshui Basin Considering Cognitive Uncertainty of Asperities

Zongchao Li, Mengtan Gao, Xueliang Chen, Sen Qiao, Jian Wu

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

基于凹凸体认知不确定性因素的天水地区 近场地震动预测

李宗超, 高孟潭, 陈学良, 乔森, 吴健

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081, 中国

Abstract

Taking the core area of Tianshui earthquake as the object of study, the Green function method is used to predict the ground motion characteristics of the Ms8.0 destructive earthquake in the future. We mainly studied the cognitive uncertainty of asperity. We used logical tree method to research the cognitive uncertainty factors while used statistical method to study stochastic uncertainties. This paper establishes 4 source models with considering the cognitive uncertainty characteristics of the asperity. We predict the characteristics of the future earthquakes in the Tianshui earthquake core area by considering the number and area of the asperity. Conclusions: the prediction results of the 4 asperities source models can basically reflect the destruction intensity of the Ms8.0 earthquake. The intensity of the source model of the double asperities is basically equal to the strength of the Wenchuan earthquake while the PGA of the three asperities is higher 0.5 than the Wenchuan earthquake. This anomaly is also possible. For example, the Lushan

earthquake, the magnitude is Ms7.0 with maximum PGA is almost 1.0g. Under special site conditions, when the magnitude reaches a certain level, it is very likely that there will be a large peak acceleration and even a small magnitude acceleration.

Keyword: ground motion prediction, uncertainty, asperity, logical tree

摘要

本文以天水地区为研究对象, 用经验格林函数法对未来 Ms8.0 级破坏性地震的地震动特征进行了预测。采用逻辑树法处理地震动预测过程中凹凸体的认识不确定性因素, 用统计学方法处理地震动预测过程中的随机不确定性因素。重点对凹凸体的认知不确定性特征进行分析, 建立 4 个考虑凹凸体认知不确定性特征的震源模型, 着重考虑凹凸体的数量和面积两个不确定性参数预测天水地区未来地震的特征。结论: 4 个凹凸体震源模型的模拟结果基本都可以体现 Ms8.0 级地震的破坏强度, 双凹凸体震源模型的地震动强度与汶川地震的强度基本持平, 三凹凸体的震源模型的震源处的 PGA 高出汶川地震 0.5 个 g, 这种异常情况也是可能存在的, 以芦山地震为例, 震级为 Ms7.0, 出现了 1

个 g 的加速度。特殊场地条件下，震级到一定级别时完全有可能出现很大的峰值加速度值，甚至会出现小震级大加速度的现象。

关键词：地震预测，不确定性，凹凸体，逻辑树

1. 引言

本文对天水地区未来强地震动特征进行预测。本文着重考虑研究的是凹凸体的认知不确定性因素。凹凸体的位置位于地下以及地球的不可入性，无法直接的观测或者监测到，凹凸体具有很大的认知不确定性，处理认知不确定性因素最好的方法就是逻辑树方法。本文以天水地区为研究区域，重点运用逻辑树法分析凹凸体的认知不确定性

因素，在此基础上建立考虑凹凸体的认知不确定性的预测未来地震动的震源模型。

2. 天水地区基本参数确定

天水地区位于中国南北地震带北段，区域地质、地球物理场及地震活动是与南北地震带北段的大背景有关的^[4]。本文界定的天水地区的经纬度大体范围为（33.5°-36°N，103°-108.5°E）。参考赵云^[5](2008)的研究成果，本文将天水地区的震级设定为Ms8.0级，震源位置设定在经过天水市区的一条断层面上(105.72E,34.58N)，震源深度取为15km^[2]，研究区域如图1。

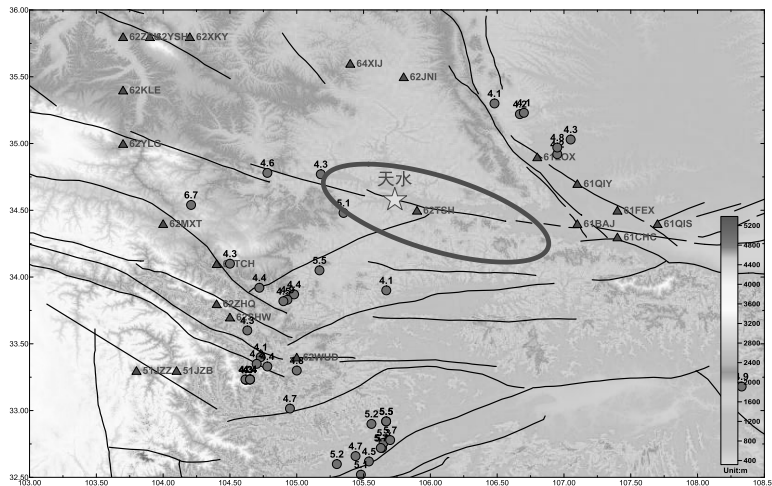


图1 天水地区. 粉色椭圆区域为天水市区. 红色三角表示强震台站位置; 粉色圆点表示该地区的余震分布情况; 黄色五角星表示天水市区位置也就是设定震源的位置。

根据李宗超(2017)博士论文中统计得到的震源参数间的经验关系，地震矩 M_0 与面波震级 M_s ，地震区面积 S 与地震矩 M_0 的经验关系：

$$\lg M_0 = 1.05706M_s + 18.78688 \quad (1)$$

$$\lg S = 0.54176\lg M_0 - 4.38789 \quad (2)$$

由上式(1)-(2)计算得到目标地震地震矩与断层破裂面积。破裂面积需要考虑到统计关系中地震破裂面积是根据余震分布情况得到的大致的结果，而实际中的地震破裂面积要小于这个面积^[1]。

天水地区周边地区临近几年发生的地震主要有08年汶川大地震Ms8.0级地震、2013年的定西地震Ms6.6级地震(岷县、漳县地震)。受强地震动数据记录的限制，本文选择格林函数时将主要参考定西地震以及汶川地震的主余震记录，本文使用的数据全部来自中国地震局工程力学研究所的强震台网中心。天水地区合适的可作为格林函数的地震记录的台站密度较低，为了增加研究区域的台站点的密度，我们在震源周围选了8个新加点，新加点的地震记录用最靠近该点的台站的记录(图2)

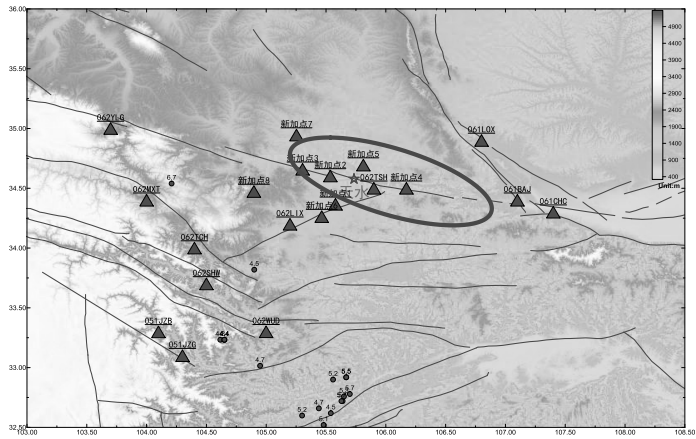


图2 台站及新加点的位置。

本文选择的格林函数震级为Ms4.5级以上的余震记录，震级如果太小，其信噪比会太小，影响模拟结果。受地震数据质量的限制，没有合适的小震被所有的台站记录到，甚至有的小震记录在有些台站数据质量欠佳，因此本文选择的小震并不固定，不同的模拟点会选择不同的小震记录。参考李宗超(2017)得到的凹凸体的震源模型，以及Somerville(1999)等人对凹凸体的研究成果，综合考虑设置天水地震的震源模型。当凹凸体的面积占破裂面积的20%-25%且凹凸体数量为2个或者3个时，震级的地震动强度及时程反应谱等比较吻合汶川地震这个震级的破坏强度的结论^[2]。Somerville(1999)的研究成果中显示凹凸体的面积占破裂面

积的22%。本文参考Somerville和李宗超的结果，依次假定凹凸体面积占整个断层破裂面积的18%和23%。凹凸体的数量选择2个或3个。凹凸体的地震矩大小参考Somerville^[1]结论，凹凸体的地震矩占整个地震的44%，所以天水地震中的凹凸体的地震为 $M_0 \times 44\% = 1.75 \times 10^{27} \times 44\% = 0.77 \times 10^{26} \text{ N} \cdot \text{M}$ 。震源的初始破裂位置选择了断层中部偏下位置，这也是参考李宗超(2017)震源参数敏感性分析的结论，当初始破裂位置在中部及偏下位置时PGA较大，破坏性较强。详细的关于凹凸体的参数计算列于表1，表2中，应力降比值C，子断层划分个数N值以及上升时间按照李宗超(2017)博士论文第五章的方式计算。

表1 两个凹凸体模型相关参数

凹凸体百分比	凹凸体占 18%	凹凸体占 23%	备注
凹凸体面积	2700km ²	3450km ²	
Max 凹凸体 面积	1800km ²	2300km ²	两个凹凸体的面积和地
Sec 凹凸体 面积	900km ²	1150km ²	震矩按照 2:1 的比例进
Max 凹凸体 上升时间	4.84s	5.47s	行分配,N 值取大于计算
sec 凹凸体 上升时间	3.42s	3.87s	N 值整数部分 1 的整数,
max L*W	60km*30km	68km*34km	当 N 小于 3 时, N 取 3.
sec L*W	42km*21km	48km*24km	

表2 三个凹凸体模型相关参数

凹凸体百分比	凹凸体占 18%	凹凸体占 23%	备注
凹凸体面积	2700km2	3450km2	三个凹凸体的面积按照 4:2:1 的比例进行分配，相应的凹凸体的地震矩也是将总的凹凸体的地震矩按照 4:2:1 的比例进行分配。N 值取大于计算 N 值整数部分 1 的整数，当 N 小于 3 时，N 取 3.
Max 凹凸体 面积	1540km2	1970km2	
Sec 凹凸体 面积	770km2	980km2	
Min 凹凸体 面积	380km2	490km2	
Max 凹凸体 上升时间	4.47s	5.06s	
sec 凹凸体 上升时间	3.16s	3.57s	
min 凹凸体 上升时间	2.22s	2.54s	
max L*W	50km*30km	62km*31km	
sec L*W	39km*19km	44km*22km	
small L*W	27km*14km	30km*16km	

参数设置好以后，用经验格林函数方法对20个点的地震动强度进行了模拟预测，受篇幅限制本文给出了四个模拟点的合成地

震动的时程图和反应谱图。两个凹凸体的震源模型时程如图3所示，反应谱如图5所示。三个凹凸体的震源模型时程如图4所示，反应谱如图6所示。

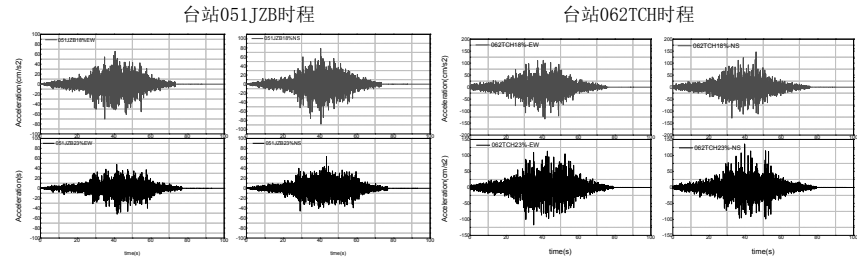


图3 两个凹凸体模型的时程。红色表示18%百分比面积的时程，黑色表示23%百分比面积的时程。每张图的左侧表示E-W分量时程，右侧表示N-S分量时程。

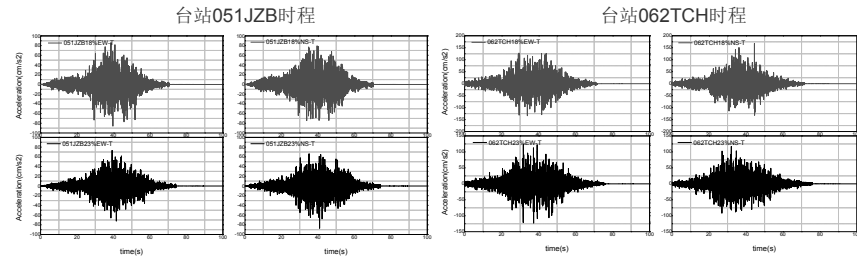


图4 三个凹凸体模型的时程。红色表示18%百分比面积的时程，黑色表示23%百分比面积的时程。每张图的左侧表示E-W分量时程，右侧表示N-S分量时程。

综合分析 20 个点的时程和反应谱，越靠近震源位置，时程幅值越大，持时也相对更久。时程的特征没有体现出凹凸体面积越大或者数量越多其幅值越大的特点，本文所选择的两个面积比例和凹凸体数量都能大致表现该震级的地震动强度，说明这几个模型都是可行的。为方便计算，所有点的时程持时最初多设

定为 150s,但事实上模拟得到的时程一般在 50~70s 的时程，持时的长度主要与震源上升时间以及地震能量等因素相关，在预测未来地震动强度时，很难把各个方面考虑的面俱到，所以持时的特征也很难与真实地震的持时特征一样。

反应谱在两个地震动方向分量上没有明

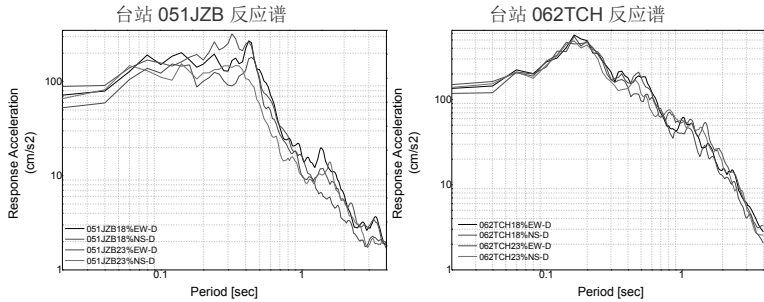


图5 两个凹凸体模型的时程。黑色线表示18%面积比例的凹凸体模型在E-W分量的反应谱；红色线表示18%面积比例的凹凸体模型在N-S分量的反应谱；蓝色表示23%面积比例的凹凸体模型在E-W分量的反应谱；粉色表示23%面积比例的凹凸体模型在N-S分量的反应谱。

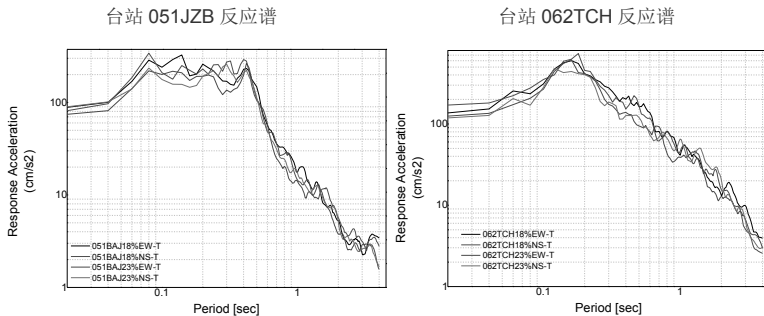


图6 三个凹凸体模型的时程。黑色线表示18%面积比例的凹凸体模型在E-W分量的反应谱；红色线表示18%面积比例的凹凸体模型在N-S分量的反应谱；蓝色表示23%面积比例的凹凸体模型在E-W分量的反应谱；粉色表示23%面积比例的凹凸体模型在N-S分量的反应谱。

显的区别，不同的凹凸体面积和凹凸体数量上也没有体现出明显的差异来，至少从这 20 个点的反应谱看不出明显的规律来。反应谱的 0 点幅值会随着震源距的增加而降低，呈现出随着距离而出现的地震动的衰减特征。

3. 地震动参数 PGA 的分布特征

根据得到的 20 个点的不同地震动分量、不同凹凸体震源模型的各模拟点的 PGA 取值，本文绘制了天水地区区域的 PGA 分布图，两个凹凸体震源模型的 PGA 分布特征如图 7 所示，三个凹凸体震源模型的 PGA 分布特征如图 8 所示。

凹凸体各个模型的 PGA 的分布大约呈南北走向的椭圆向四周扩散衰减，长轴方向为南北方向，这与假定的断层走向有很大夹角，且当凹凸体面积比例为 23% 时，在新加坡 6 的位置出现异常的峰值。这与选择模拟点的位置和地震记录匮乏有关，因为该地区缺乏合适的地震记录，所用的地震记录都是汶川地震的余震记录和定西地震的地震记录，免不了会受干扰。在站 061BAJ 和

061CHC 的区域，PGA 出现较大的衰减，衰减速度也很快，此处的地形正好是比较大的平原地带，城市有宝鸡，西安等，地震能量传到此处受地形的影响消散很快。

双凹凸体模型的各个模拟过程中出现的比较大的 PGA，超过 1 个 g。这与汶川地震中汶川县卧龙台仪器测得的 PGA 相当，汶川地震 PGA 最大数值为 950.51gal，约为一个重力加速度。当凹凸体面积比例为 18% 且凹凸体数量为两个时，模拟结果的强度达到了汶川地震的级别。证明该凹凸体模型是可行的。

三凹凸体模型的各个模拟过程中出现的比较大的 PGA，超过 1 个 g，甚至达到了 1.5 个 g。这比汶川地震中汶川县卧龙台仪器测得的 PGA 还要大很多，汶川地震 PGA 最大数值为 950.51gal，约为一个重力加速度。模拟结果在震源位置出现 PGA 最大值为 1.5 个 g 的模拟结果，虽然已经超过了汶川地震的强度，但不能排除这种可能性，例如芦山地震，震级为 Ms7.0 级，但在宝兴地办的地震台站记录到了 1024.8gal 的 PGA^[3]，达到

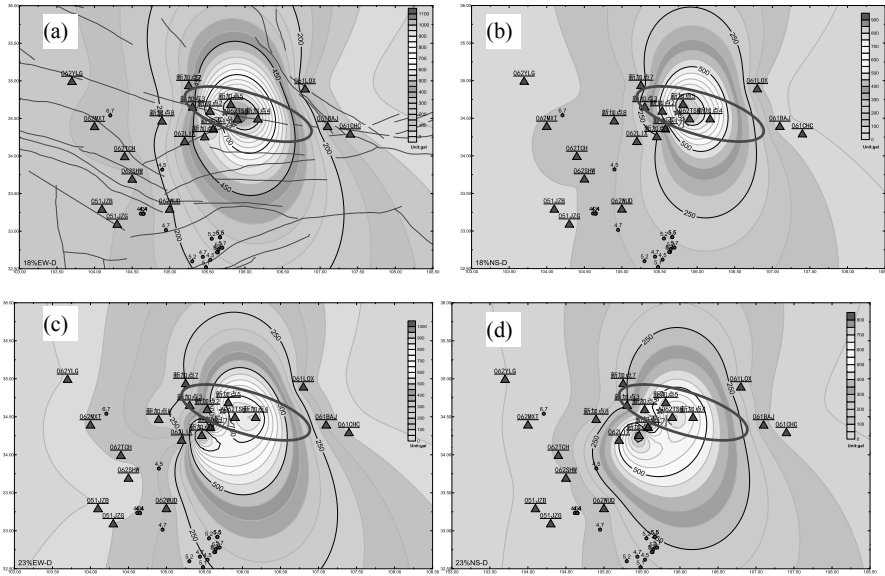


图 7 双凹凸体震源模型得到的地震动参数 PGA 分布图。(a) 面积比例为 18% 的双凹凸体震源模型得到的 E-W 方向分量 PGA 分布图; (b) 面积比例为 18% 的双凹凸体震源模型得到的 N-S 方向分量 PGA 分布图; (c) 面积比例为 23% 的双凹凸体震源模型得到的 E-W 方向分量 PGA 分布图; (d) 面积比例为 23% 的双凹凸体震源模型得到的 N-S 方向分量 PGA 分布图。

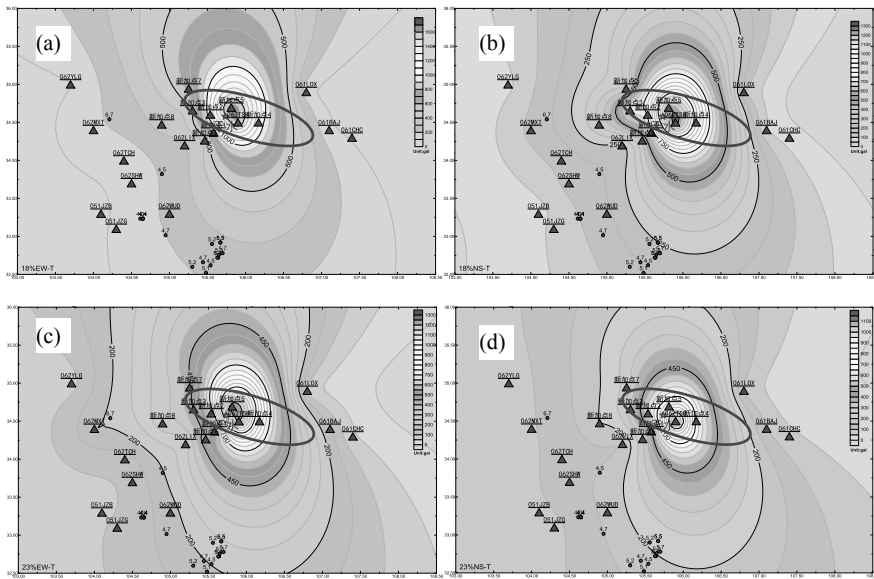


图 8 三凹凸体震源模型得到的地震动参数 PGA 分布图。(a) 面积比例为 18% 的三凹凸体震源模型得到的 E-W 方向分量 PGA 分布图; (b) 面积比例为 18% 的三凹凸体震源模型得到的 N-S 方向分量 PGA 分布图; (c) 面积比例为 23% 的三凹凸体震源模型得到的 E-W 方向分量 PGA 分布图; (d) 面积比例为 23% 的三凹凸体震源模型得到的 N-S 方向分量 PGA 分布图。

了 1 个 g ，所以 $M_s8.0$ 级出现 1.5 个 g 的峰值加速度也是有可能的。

三凹凸体震源模型的 PGA 分布特征与两个凹凸体的震源模型相似。凹凸体各个模型的 PGA 的分布大约呈南北走向的椭圆向四周扩散衰减，长轴方向为南北方向。在台站 061BAJ 和 061CHC 的区域，PGA 也出现较大的衰减，衰减速度也很快，地震能量传到此处受地形的影响消散很快。

4. 讨论与结论

4 个凹凸体震源模型的模拟结果基本都可以体现 $M_s8.0$ 级地震的强度，双凹凸体的模型的地震动强度与汶川地震的地震动特征基本持平，但三凹凸体的震源模型在震源位置的 PGA 要高出汶川地震 PGA 最大值 0.5 个 g ，对于 $M_s8.0$ 级地震的地震动强度也是存在，以芦山地震为例^[3]，震级为 $M_s7.0$ ，出现了 1 个 g 的加速度。在特殊地形，特殊场地条件，震级到了一定级别以后有可能出现很大的加速度值，甚至还会出现小震级大加速度的现象。

本文也存在几个不足的地方，最大的缺陷是地震记录的缺乏，我们在选择小震作为格林函数时，只能退而求其次选择临近区域的汶川地震余震记录和定西地震的地震记录，存在很多不确定性因素。其次，凹凸体的震源模型在初始破裂位置以及应力降参数的确定方式上仍然存在不确定性，凹凸体震源模型还存在需要细化的地方。既然选择了一种模型或者确定了一种参数也就意味着放弃了其他的可能，但是本章作为对未来破坏性大地震预测的尝试，需要从简单的模型开始，以后还需要综合考虑凹凸体震源模型的多种不确定性。

ACKNOWLEDGEMENTS

Thank the National Strong Motion Network Center for strong motion records.

This study was supported by the special fund of the Institute of Geophysics, China Earthquake Administration (Grant Number: DQJB18B20; DQJB17C08) and Earthquake Emergency Junior Key Found of CEA (CEA_EDEM-201816).

致谢

本文中所有的地震数据皆来自国家强震台网中心（由中国地震局工程力学研究所负责），在此表示感谢。本文章得到中国地震

局地球物理研究所基本科研业务费专项资助（编号：DQJB18B20; DQJB17C08）；中国地震局地震应急青年重点任务（CEA_EDEM-201816）等项目资助。

参考文献:

- [1] Somerville P, Irikura K, Graves R, et al. Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion. *Seismological Research Letters*, 1999, 70(1): 59-80.
- [2] 李宗超. 2017. 大震近场地震动数值模拟不确定性研究. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- [3] 乔森, 陈学良, 刘爱文, 等. 大陆首次超过 1g 的强地面运动记录特点及震害特征. 中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会论文集(2014 年 8 月 23-27 日, 呼和浩特), pp.14-19.
- [4] 李清河. 天水地震区区域地质、地球物理场和地震活动背景. 西北地震学报, 1991(S1): 2-6.
- [5] 赵云. 1654 年甘肃天水地震烈度和震级考析. 高原地震, 2008, 20(2): 30-33.