

大青山山前断裂乌素图 - 奎素段对呼和浩特市37个街道地震烈度评估

高 禄^{1*}, 那仁满都拉^{2#}, 王鸿鸽², 阿那尔³, 贾书承²

¹鄂尔多斯东胜区大兴中学, 内蒙古 鄂尔多斯

²内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古自治区蒙古高原地理研究重点实验室, 内蒙古 呼和浩特

³内蒙古自治区地震局, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年8月15日; 录用日期: 2025年10月17日; 发布日期: 2025年10月28日

摘 要

以大青山山前断裂乌素图 - 奎素段为例, 具体地评估了呼和浩特市37个街道的地震烈度。首先基于该断裂的空间分布特征和地震发生源的不确定性选取最远震中与最近震中假设点, 其次采用平面坐标法, 计算37个街道最远震中距与最近震中距。最后采用华北地区震级M与破裂长度L经验公式与地震烈度衰减模型, 计算该断裂未来可能发生的最大震级, 并评估37个对象点的地震烈度。研究结果表明, 大青山山前断裂乌素图 - 奎素段未来可能发生的最大地震为7.2; 最远震中时, 有86.5%的街道处于烈度VIII, 13.5%的街道处于烈度IX; 最近震中时, 有10.8%的街道处于烈度VIII, 89.2%的街道处于烈度IX。

关键词

震中距, 地震烈度, 大青山山前断裂乌素图 - 奎素段, 呼和浩特

Seismic Intensity Assessment of 37 Subdistricts in Hohhot City Affected by the Wusutu-Kuishu Section of the Daqingshan Mountain Front Fault

Lu Gao^{1*}, Narenmandula^{2#}, Hongge Wang², Anar³, Shucheng Jia²

¹Daxing Middle School of Dongsheng District, Ordos Inner Mongolia

²Key Laboratory of Geography Research of the Mongolian Plateau, School of Geographical Sciences, Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner Mongolia

³Inner Mongolia Earthquake Bureau, Hohhot Inner Mongolia

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 高禄, 那仁满都拉, 王鸿鸽, 阿那尔, 贾书承. 大青山山前断裂乌素图-奎素段对呼和浩特市37个街道地震烈度评估[J]. 地理科学研究, 2025, 14(5): 1149-1156. DOI: 10.12677/gser.2025.145109

Abstract

Taking the Wusutu-Kuishu section of the Daqingshan Mountain Front Fault as an example, this study specifically assessed the seismic intensities of 37 subdistricts in Hohhot City. Firstly, based on the spatial distribution characteristics of the fault and the uncertainty of the earthquake source, the farthest epicenter and closest epicenter hypothesis points are selected. Secondly, the plane coordinate method is used to calculate the farthest epicenter distance and closest epicenter distance of 37 streets. Finally, using the empirical formula of magnitude M and rupture length L in the North China region and the seismic intensity attenuation model, the maximum magnitude that may occur in the future of the fault is calculated, and the seismic intensity of 37 object points is evaluated. The research results indicate that the maximum earthquake that may occur in the future in the Wusutu Kuishu section of the Daqingshan piedmont fault is 7.2; At the farthest epicenter, 86.5% of the streets were at intensity VIII, and 13.5% of the streets were at intensity IX; At the recent epicenter, 10.8% of the streets were at intensity VIII and 89.2% were at intensity IX.

Keywords

Epicentral Distance, Earthquake Intensity, Wusutu-Kuishu Section of the Daqingshan Piedmont Fault, Hohhot

Copyright © 2025 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

随着现代化建设的不断推进,城市汇集了越来越多的人口,建筑数量不断增多,资源要素也高度聚集[1]。城市直下型地震,即在城市及近旁发生的地震,其震源往往就在城市区域的下部或者其附近[2],尤其是强烈的直下型地震往往对城市造成了巨大的破坏,并导致惨痛的人员伤亡与经济损失。例如1960年发生于美国旧金山8.3级的地震,其震后的火灾烧毁近3万栋楼房,造成25万人受伤[3];1976年发生于我国唐山7.8级地震,造成97%的地面建筑被毁,24.2万人罹难,直接经济损失达100亿[2];1995年发生于日本关西兵库县南部的淡路岛的神户大地震,造成6434人遇难,经济损失1015亿美元[2]。我国作为世界上地震活动最强烈的国家之一,有近41%的国土、超过一半的城市位于地震烈度7度及以上的地区,并且大部分城市都存在着发生破坏性地震的潜在危险,所以地震烈度评估,对于维护城市稳定发展,保障居民生命与财产安全具有重要的意义。

现阶段,学者多基于历史地震烈度资料进行地震烈度评估[4][5],地震烈度即地震对特定建筑物的破坏程度以及人的影响[6],该方法基于特定的地质特征、场地地震效应等,不需要过多假设。例如孙丽娜利用历史地震烈度资料对晋冀蒙交界区的地震活动性进行分析与地震烈度评估[7];刘静伟利用京津唐地区500年的地震烈度资料,对其进行地震灾害与危险性分析[6]。本研究以大青山山前断裂乌素图-奎素段为例,通过 $M-L$ (地震震级-地表破裂长度)经验公式分析未来最有可能发生的震级,再根据华北地区地震烈度衰减函数[8],评估未来直下型地震对呼和浩特市(以下简称为呼市)37个街道的地震烈度,为该城市防震减灾规划及可持续发展提供科学的决策依据。

2. 大青山山前断裂与研究区概况

2.1. 大青山山前断裂

大青山山前断裂，西南从昭君坟南始，呈北东走向经过黄河经麻池、苗家营子，而后折转近东西走向跨包头市东河区，向东沿大青山南麓延伸至呼和浩特市东以的奎素一带，总体走向为北东向，全长约200 km，是呼包断陷的北边界断，亦是其主要控制断裂[9]。该断裂在晚更新世以来处于较活跃的状态，由一系列正断层组成，具有左旋走滑分量，断面南倾，地表倾角较陡，约50°~70°，到深部变缓为45°~65°之间，总体呈铲状。大青山山前断裂晚更新世以来的活动在空间分布上具有显著的不均匀性，大致可分为5段(图1)，从西至东为：包头段从黄河南岸到雪海沟段全长37 km；土右旗西段从雪海沟到土右旗全长35 km；土左旗西段从土右旗到土左旗全长56 km；毕克齐段从土左旗到乌素图段全长49 km；呼和浩特段从乌素图到奎素全长46 km [10]。

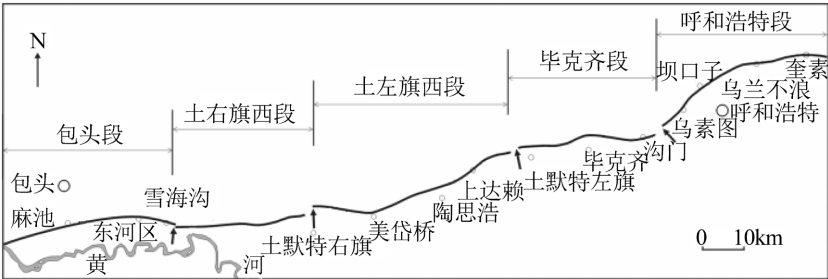


Figure 1. Schematic diagram of the planar distribution and segmentation of the Daqingshan mountain front fault (Li Bin, 2017)
图 1. 大青山山前断裂平面分布及分段示意图(李彬，2017)

2.2. 研究区概况

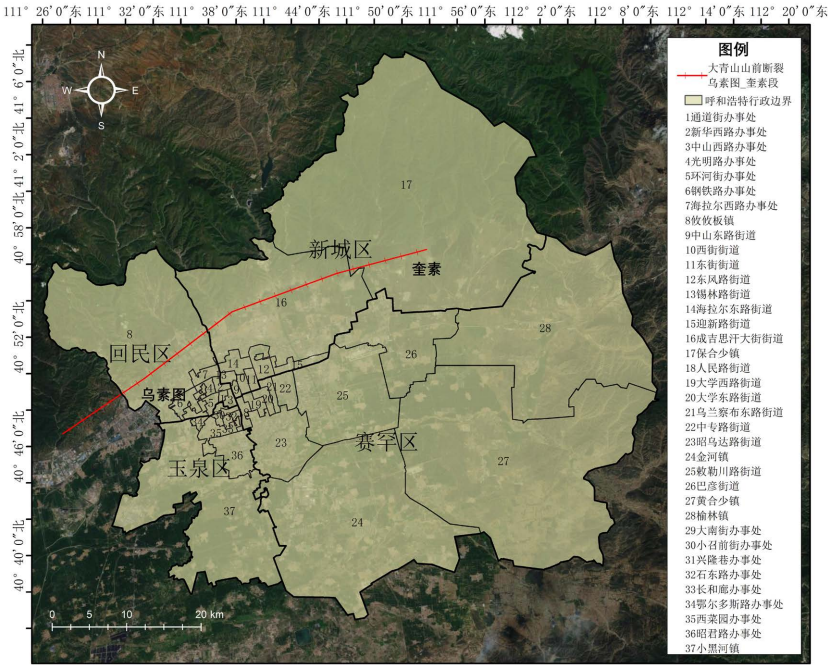


Figure 2. Street locations in Hohhot City and the Wusutu-Kuishu Section of the Daqingshan mountain front fault
图 2. 呼和浩特市街道位置与大青山山前断裂乌素图 - 奎素段

呼市位于华北北部，是内蒙古自治区的首府，也是政治、金融、技术、教育、交通中心。绝对位置为 $40^{\circ}51'\sim 41^{\circ}8'N$ ， $110^{\circ}46'\sim 112^{\circ}10'E$ ，相对位置为大青山脚下，土默特平原上。由于其位于断裂坳陷平原以及周边地区第四纪活动断层分布广、新构造运动强、地震活动频繁的特殊地震地质背景，呼市需要进行地震烈度评估。本文以呼市城区为研究范围涉及到四个城区 37 个街道(图 2)。

3. 研究对象和研究方法

3.1. 研究对象

本研究以乌素图 - 奎素段为研究对象，该断裂带在距今 1.9 万年来发生了 7 次古地震，距今约为 1.875 ± 0.075 、 1.697 ± 0.096 、 1.465 ± 0.067 、 1.182 ± 0.069 、 0.945 ± 0.026 、 0.741 ± 0.0315 和 0.450 ± 0.023 万年，平均重复间隔是 2375 ± 432 年[11]，现已超过其地震平均复发间隔周期(2800 年前)，未来百年内发生大地震的可能性较大。该断裂的长度约 46Km，表倾角 $50^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 、深部 $45^{\circ}\sim 65^{\circ}$ [12]。由于内蒙古地区极大多数的地震深度为 15~25 Km [13]，为评估其可能的最大影响，故假设该断裂未来震源深度为 15 km，根据该断裂和受灾体的空间分布特征，从城市中心最近点与最远点，选取假设发生地震的最远震中与最近震中，表 1 和图 3 显示为选取倾角 60° 计算后，假设震中的位置信息和各街道形心点位置。

Table 1. Longitudes and latitudes of hypothetical nearest and farthest epicenters
表 1. 假设最近震中和最远震中的经纬度

假设震中	东经(°)	北纬(°)
最近震中	111.678	40.797
最远震中	111.926	40.863

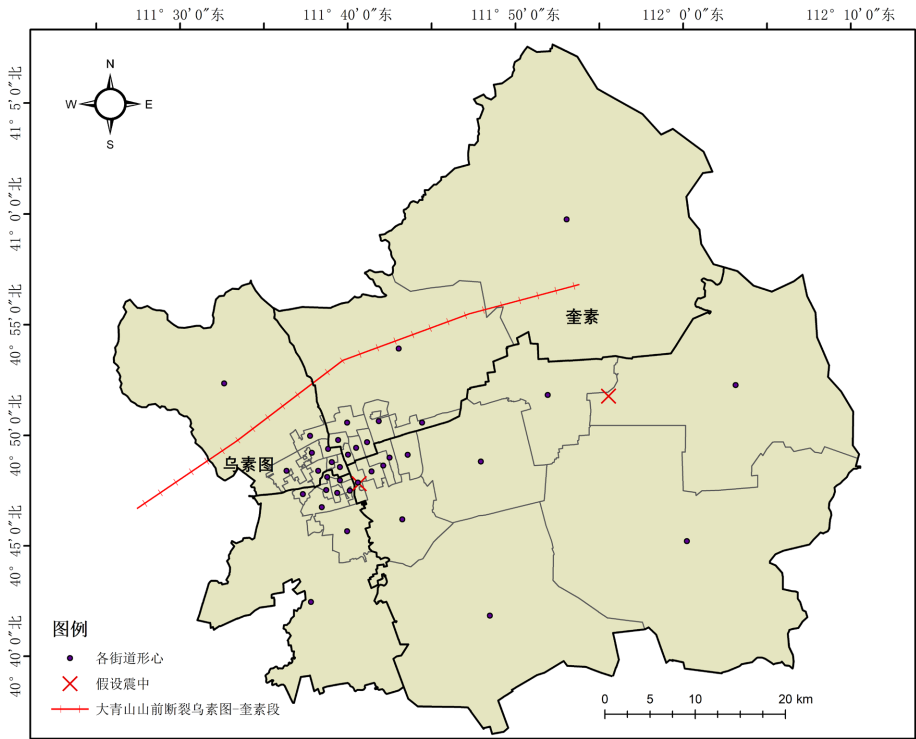


Figure 3. Positions of street centroids and hypothetical epicenter points
图 3. 各街道形心与假设震中点位置

3.2. 研究方法

3.2.1. 震中距计算方法

震中距是地面上任意一点到震中的直线距离, 由于地震震源多为地下且受到地球曲面的影响, 本研究采用平面坐标法进行计算[14], 该方法对于震中距 ≤ 1000 km 的计算精度较高。假设震中点坐标为 (λ_0, φ_0) , 对象点坐标为 (λ, φ) , 具体计算公式如下[11]:

$$\begin{cases} x = R_n (\lambda - \lambda_0) \cos \varphi_0 \\ y = R_m (\varphi - \varphi_0) + \frac{x^2 \operatorname{tg} \varphi_0}{2R_n} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{式中 } R_n = \frac{A}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_0)^{1/2}} \quad R_m = \frac{A(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_0)^{3/2}}$$

$e^2 = 0.0066936176$ (地球的偏心率) $A = 6378.13649$ 公里(地球长半径)。

3.2.2. 地震震级的计算方法

地震震级可以衡量某一次地震震源产生的地震波强度如何, 是后续进行地震能量、地震烈度分布、地震烈度评估以及防震减灾规划中的重要一环[15]。传统震级标度多基于地震波振幅与扩散过程中的衰减规律设定, 并依据历史地震数据计算震级 M 与破裂长度 L 之间的相关系数。本研究采用了华北地区活断层的震级-破裂长度的经验公式[16], 计算公式如下:

$$M_s = 1.860Lg(L) + 3.821 \quad (\pm 0.32) \quad (2)$$

式中: M_s 为面波震级, L 为破裂长度

由式 2 计算可得 $M_s = 6.91$, 即未来乌素图 - 奎素段发生的潜在地震震级可能为 6.59~7.23, 在地震烈度评估中, 为了最大程度确保居民的生命和财产安全, 一般采用最大预测值进行后续的计算与评估, 故本研究采用该断裂未来可能发生的最大地震 7.2 级进行后续的计算, 与其他学者得出的结论一致[4][10]。

3.2.3. 地震烈度的计算方法

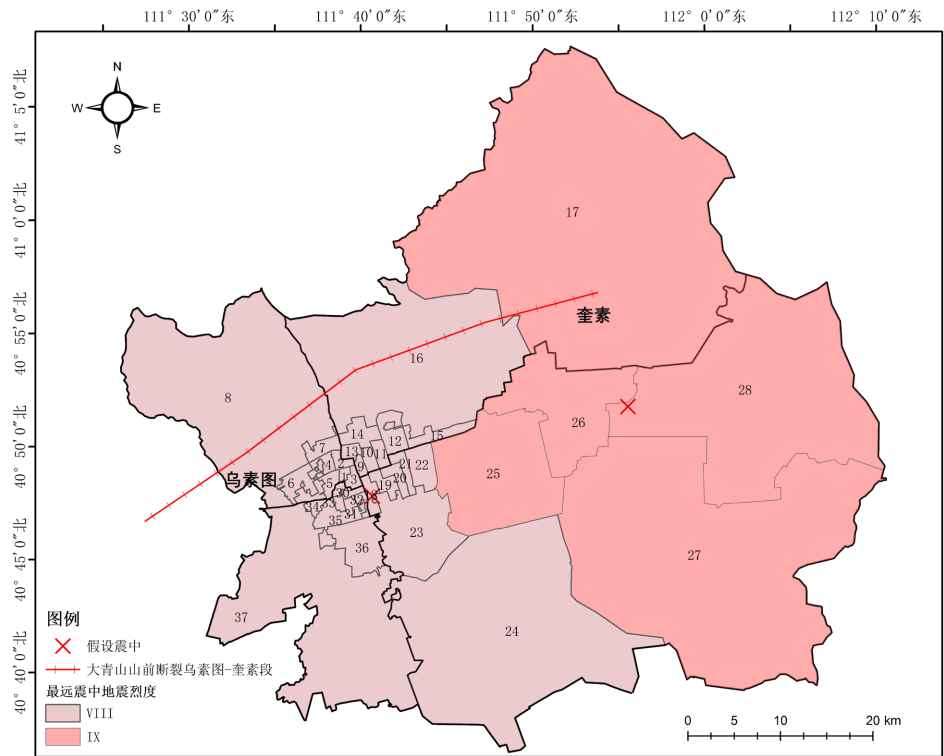
地震烈度即地震引起的地面震动的强烈程度, 可扩展为某一地区人的感觉、器物的反应、生命线工程的损坏以及引起的其他自然灾害等宏观程度。近年来随着呼市城市现代化的不断推进, 城市建设用地不断扩大, 抗震需求也不断增加, 如何准确评估该城市潜在地震烈度, 对后续房屋建设的定量指标制定有着重要的意义。现阶段多用地震烈度衰减关系等经验型函数方法进行地震烈度评估。本研究借鉴华北地区地震烈度衰减公式[8], 计算公式如下:

$$I = 1.7865 + 1.4523M - 1.1155 \ln(R + 13) \quad (3)$$

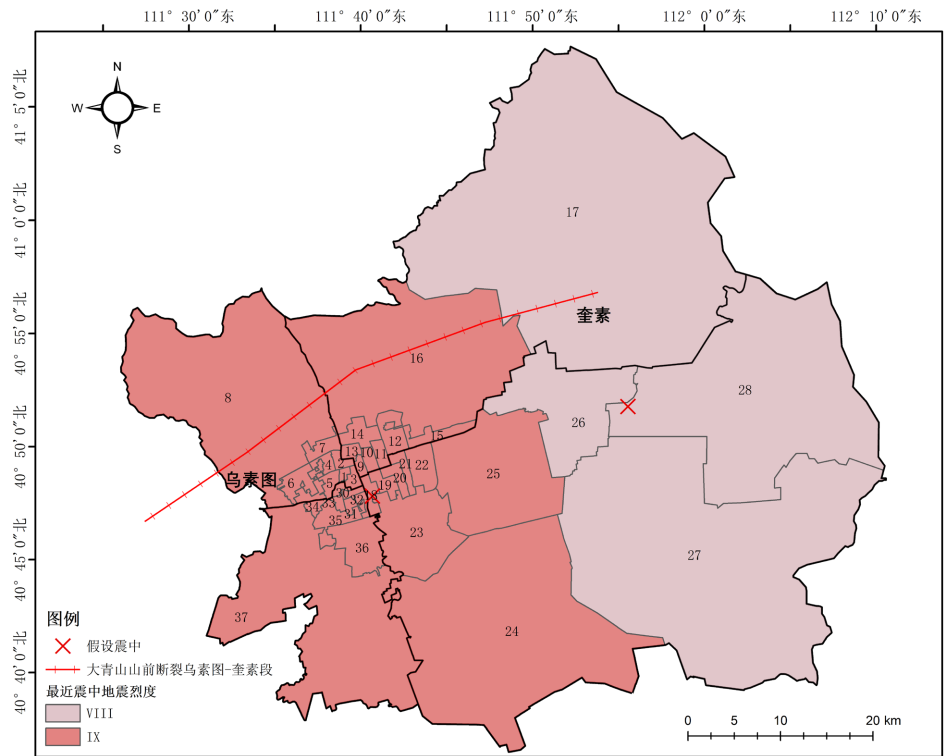
式中 I 为烈度; M_s 为面波震级; R 为震中距。

4. 乌素图 - 奎素断裂引起地震对呼市 37 个街道的影响烈度

该断裂对呼市 37 个街道的烈度影响如表 2 和图 4 所示, 其中依据式 1 可得出 37 个对象点与最远、最近震源的震中距, 由式 2 可得该断裂未来可能发生的地震规模, 由式 3 可得假设最远、最近震中时, 37 个对象点所经受的地震烈度, 并参考中国地震烈度表[17]宏观调查评定指标, 对其进行宏观烈度预测。当最远震中震级为 7.2 时, 计算烈度集中于 8~9, 有 86.5% 的街道处于烈度 VIII, 13.5% 的街道处于烈度 IX; 当最近震中震级为 7.2 时, 计算烈度集中于 8~9.4, 仅有 10.8% 的街道处于烈度 VIII, 有 89.2% 的街道处于烈度 IX。



(a) 最远震中地震烈度等级分布



(b) 最近震中地震烈度等级分布

Figure 4. Distribution of Seismic intensity grades at farthest and nearest epicenters
图 4. 最远震中与最近震中地震烈度等级分布

Table 2. Distances to nearest and farthest epicenters and estimated seismic intensities for 37 subdistricts
表 2. 37 个街道的最近与最远震中距离和估算地震烈度

对象点	震级 Ms	最远			最近		
		震中距(km)	计算烈度(I)	宏观烈度(I)	震中距(km)	计算烈度(I)	宏观烈度(I)
通道街办事处	7.2	23.85	8.2	VIII	2.92	9.2	IX
新华西路办事处		23.92	8.2	VIII	3.89	9.1	IX
中山西路办事处		23.29	8.2	VIII	2.12	9.2	IX
光明路办事处		25.32	8.2	VIII	4.72	9.0	IX
环河街办事处		25.12	8.2	VIII	3.60	9.1	IX
钢铁路办事处		27.70	8.1	VIII	6.19	8.9	IX
海拉尔西路办事处		25.24	8.2	VIII	5.73	9.0	IX
攸攸板镇		32.24	8.0	VIII	14.07	8.6	IX
中山东路街道		22.38	8.3	VIII	2.58	9.2	IX
西街街道		21.59	8.3	VIII	2.99	9.2	IX
东街街道		20.61	8.3	VIII	3.52	9.1	IX
东风路街道		19.38	8.4	VIII	5.45	9.0	IX
锡林路街道		22.97	8.2	VIII	4.04	9.1	IX
海拉尔东路街道		22.03	8.3	VIII	5.18	9.0	IX
迎新路街道		15.79	8.5	VIII	7.33	8.9	IX
成吉思汗大街街道		18.05	8.4	VIII	11.72	8.7	IX
保合少镇		15.11	8.5	IX	28.06	8.1	VIII
人民路街道		22.21	8.3	VIII	0.13	9.4	IX
大学西路街道		20.84	8.3	VIII	1.44	9.3	IX
大学东路街道		19.76	8.4	VIII	2.51	9.2	IX
乌兰察布东路街道		19.06	8.4	VIII	3.34	9.1	IX
中专路街道		17.54	8.4	VIII	4.72	9.0	IX
昭乌达路街道		20.12	8.3	VIII	4.68	9.0	IX
金河镇		20.84	8.3	VIII	15.54	8.5	IX
敕勒川路街道		12.02	8.7	IX	10.37	8.7	IX
巴彦街道		5.11	9.0	IX	17.46	8.4	VIII
黄合少镇		13.77	8.6	IX	27.90	8.1	VIII
榆林镇		10.68	8.7	IX	32.65	8.0	VIII
大南街办事处		24.52	8.2	VIII	2.74	9.2	IX
小召前街办事处		23.59	8.2	VIII	1.64	9.2	IX
兴隆巷办事处		24.13	8.2	VIII	2.01	9.2	IX
石东路办事处		23.07	8.2	VIII	0.98	9.3	IX
长和廊办事处		24.92	8.2	VIII	2.81	9.2	IX
鄂尔多斯路办事处		26.89	8.1	VIII	4.81	9.0	IX
西菜园办事处		25.76	8.2	VIII	3.71	9.1	IX
昭君路办事处		24.64	8.2	VIII	4.11	9.1	IX
小黑河镇		30.27	8.0	VIII	10.68	8.7	IX

5. 结论

该研究以大青山山前断裂乌素图 - 奎素段为例，更为具体地评估了呼市 37 个街道的地震烈度。首先

采用平面坐标法精确测算了 37 个街道到假设震中的距离,并结合华北地区震级 M 与破裂长度 L 经验公式与地震烈度衰减模型,科学预测了该断裂带未来可能发生的最大地震震级为 7.2 级。评估结果显示,在最远震中情景下,86.5% 的街道将处于 VIII 度烈度区,13.5% 的街道可能达到 IX 度烈度区;而在最近震中情景下,90% 左右的街道将面临 IX 度烈度的强烈震动,为研究区街道、为单位震害预测与减灾防灾工作起到实际参考价值。

根据国家《地震动参数区划图》(GB 18306-2015),呼市大部分区域设防烈度为 VIII 度,该研究结果显示,在最不利情况下(最近震中),近九成的街道可能达到或超过设防烈度,这对现有建筑和基础设施的抗震能力提出了严峻挑战。特别是处于烈度 IX 区的街道,其地面震动强度将显著高于设防标准,可能导致更严重的破坏,如通道街办事处、新华西路办事处、中山西路办事处等,在最远震中情况下即处于烈度 VIII 区,而在最近震中情况下则跃升至烈度 IX 区。这些街道由于地理位置接近断层,面临首当其冲的地震风险。未来防震减灾规划中,应优先考虑这些高风险区域的建筑加固、紧急疏散通道建设及防灾减灾教育普及。

基金项目

国家自然科学基金项目(41967056);中央引导地方科技发展资金项目(2024ZY0112);内蒙古自治区自然科学基金项目(2024LHMS04023)。

参考文献

- [1] 张媛,吴建春,赖俊彦.关于加强超大城市地震灾害应对能力建设的分析与思考[J].中国应急救援,2022(6):10-15.
- [2] 姚兰,张芝霞.城市直下型地震灾害与减灾策略[J].城市与减灾,2021(6):32-35.
- [3] 世界历史上大地震[J].中国金融家,2008(6):222.
- [4] 刘静伟.基于历史地震烈度资料的地震危险性评估方法研究[J].国际地震动态,2012(7):37-38.
- [5] 文雯,隋明坤,庄儒新,等.基于历史地震烈度资料的云南地区地震危险性评估[J].地震研究,2023,46(3):422-429.
- [6] 刘静伟,王振明,谢富仁.京津唐地区地震灾害和危险性评估[J].地球物理学报,2010,53(2):318-325.
- [7] 孙丽娜,杨锐,王晓山,等.晋冀蒙交界地区地震危险性评估及地震活动性分析[J].震灾防御技术,2020,15(1):143-155.
- [8] 崔鑫,苗庆杰,王金萍.华北地区地震烈度衰减模型的建立[J].华北地震学科,2010,28(2):18-21.
- [9] 张润,杨劲松,赵华,等.全新世以来大青山山前冲洪积扇的期次划分及其影响因素[J].干旱区资源与环境,2020,34(9):95-101.
- [10] 李彬.呼和浩特市主要活动断裂未来危险性评价——以大青山山前断裂为例[J].华北地震科学,2017,35(2):76-81.
- [11] 冉勇康,张培震,胡博,等.大青山山前断裂呼和浩特段晚第四纪古地震活动历史[J].中国地震,2002(1):15-27.
- [12] 阿那尔,那仁满都拉,乌兰图雅,等.大青山山前断裂乌素图-奎素段对呼和浩特市区的地震危害性评估[J].内蒙古科技与经济,2013(8):54-55+61.
- [13] 曹刚.内蒙古地震研究[M].北京:地震出版社,2000:24.
- [14] 胡克坚.震中距计算方法是用范围的讨论[J].地震学刊,1987(1):33-38.
- [15] 刘同辉,王墩.传统与现代震级标度[J].地震工程学报,2023,45(4):901-909.
- [16] 冉勇康,张培震,陈立春.河套断陷带大青山山前断裂晚第四纪古地震完整性研究[J].地学前缘,2003(S1):207-216.
- [17] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.中国地震烈度表 GB/T 17742-2020 [S].北京:中国标准出版社,2020.