

王晓山, 付长华, 赵志远, 等. 延庆—怀来盆地地震动盆地效应研究[J]. 灾害学, 2023, 38(2): 53–59. [WANG Xiaoshan, FU Changhua, ZHAO Zhiyuan, et al. Research on Basin Effect of Ground Motion in Yanqing – Huailai Basin[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(2): 53–59. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.02.009.]

延庆—怀来盆地地震动盆地效应研究*

王晓山¹, 付长华², 赵志远¹, 冯向东¹

(1. 河北省地震局, 河北 石家庄 050021; 2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要:综合分析延庆—怀来盆地地震危险性, 确定潜在发震断裂为延矾盆地北缘断裂的屈家窑—方家冲段, 震级为7.0级。基于延庆—怀来盆地地表厚沉积层的三维结构模型, 设置两种破裂模式进行设定地震的地震动模拟研究盆地结构对地震动的放大效应, 发现盆地浅层的沉积结构对较短周期段的地震动影响更为显著, 较大的放大系数通常对应着较大的第四系厚度, 最大放大系数位于延庆盆地。

关键词: 延庆—怀来盆地; 地震危险性; 地震动模拟; 盆地效应

中图分类号: TU4; P315; X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2023)02–0053–07

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.02.009

延庆—怀来盆地(以下简称“延怀盆地”)地处京西北约60~120 km, 是山西隆起构造带于晚新生代产生的地壳深部右旋剪切作用在浅部引起伸展正断的一个构造组成部分^[1]。历史上曾发生多次6级以上地震, 是首都圈重要的地震活动区之一, 严重威胁着首都圈西侧人民生命和财产安全, 一直划为首都圈地震重点监视防御区范围。刘昌铨等^[2]对延怀盆地的大震危险性进行了分析, 认为延怀盆地及其周边地区具有发生中强地震的深部构造背景, 不排除有发生7级地震的可能性。陈运泰等^[3]利用怀来数字地震台网的观测资料, 分析了延怀盆地潜在的地震危险性, 但指出盆地内近期的微震活动并没有显示出不久将发生大的地震破裂的征兆。

鉴于延怀盆地较高的地震风险, 白石羽^[4]使用混合法进行延怀盆地的地面运动的理论模拟, 表明有比较明显的盆地效应, 第四纪沉积层的分布有效放大了地震波信号, 延长了波列的持续时间。WANG等^[5]基于随机有限层模型进行了延怀地区的1720年沙城地震强震动的三维有限差分模拟, 结果表明首都圈地震灾害与延怀盆地有极强的关联。文彦君等^[6]对延矾盆地北缘断裂设定地震的地震动进行了三维有限差分模拟, 但仅对官厅水库大坝所受影响进行了分析。强震动数值模拟结果可以在一定程度上对编制区域灾害风险图^[7]、防灾减灾综合规划^[8]、地震灾害风险管理^[9–10]等方面起到积极的指导作用。本文将对延矾盆地北缘断裂的设定地震的地震动盆地效应进行定量详细分析, 以此补充延怀盆地地震动盆地效应的资料, 为首都圈地震灾害管理和风险评估提供基础数据。

1 地质构造背景

延怀盆地位于山西裂谷系北部晋冀蒙盆岭构造区最东端与NW向张家口—渤海断裂带交会地段, 区内堆积了大量上新世—第四纪地层, 盆地西宽东窄, 进一步划分成延庆—矾山(延矾)和怀来—涿鹿(怀涿)两个彼此间相互连通的次级盆地(图1)^[1]。延矾次级盆地长度约100 km, 宽度约10~16 km, 呈不规则的长条形, 新生界厚度约2 300 m, 其中上新统厚达1 500 m, 第四系厚达800 m, 沉积中心位于延庆东北部单家营至西南部的太平庄一带; 怀涿次级盆地新生界厚度约2 300 m, 其中上新统厚达1 000~1 500 m, 第四系沉积厚度超过500 m, 沉积中心位于涿鹿及其南缘地带(图1)。

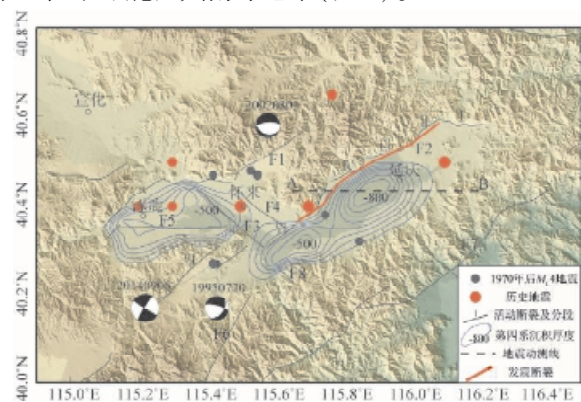


图1 延怀盆地地震构造简图(改自徐锡伟等^[1])

* 收稿日期: 2022–11–02 修回日期: 2023–02–06

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH20006Y); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(DQJB22Z01–11); 河北省科技计划(19975412D)

第一作者简介: 王晓山(1980–), 男, 汉族, 河北唐山人, 高级工程师, 主要从事地震活动性和地震危险性研究。

E-mail: wangxsh2022@163.com

通信作者: 付长华(1978–)男, 汉族, 湖南邵阳人, 副研究员, 主要从事强地面运动与地震动数值模拟方面的研究。

E-mail: fuchanghua2004@163.com

始于上新世发育的延怀盆地，其盆地边缘主要受 NNE—NE、NNW—NW 以及近 EW 向断裂控制，发育了一系列以 NE 向为主的正倾滑活动断裂，其中规模较大的、持续活动至晚第四纪的有 NE 向的延怀盆地北缘断裂和怀涿盆地北缘断裂等。本文重点研究的延怀盆地北缘断裂大致可分为辛庄堡、屈家窑—古城、古城—营门矿、方家冲—营门矿、狼山—方家冲、狼山—矾山、燕王沟—水沟等 7 个基本破裂分段(见图 1)^[1]，晚更新世—全新世的活动集中在中部，向东西两端有规律地减弱。

2 方法和模型参数

本文使用曲线网格有限差分方法^[11-12]进行延怀盆地北缘断裂上设定地震的强地面运动数值模拟，该方法通过联合求解一阶应力—速度方程组(1)和本构关系方程组(2)可得到任意地点的地震动速度时程。

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial t} = b \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} = b \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} = b \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right). \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial V_x}{\partial x} + \lambda \left(\frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial V_y}{\partial y} + \lambda \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right); \\ \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial V_z}{\partial z} + \lambda \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} \right); \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial x} \right); \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial V_x}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial x} \right); \\ \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial V_y}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \right). \end{cases} \quad (2)$$

上述方程中， (V_x, V_y, V_z) 是三方向上的速度分量； $(\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz})$ 是应力分量； b 是介质密度的倒数； (λ, μ) 是拉梅常数。在求解过程中，通常以交错网格布局方式将各节点上的物理量进行定义，以空间四阶精度和时间二阶精度的差分格式对波动方程进行离散，通过应用水平地表应力镜像方案实现含起伏地形的地震波模拟，引入地球介质品质因子(Q 值)描述地震波在介质中传播时的黏弹性衰减，采用 E 指数或完全匹配层(PML)吸收边界处理方法解决地震波到达计算边界处的反射和透射问题，并将震源地震矩转化成初始应力分量耦合到对应的网格点上。

有限差分方法模拟长周期地震动需要建立研究区地下介质三维速度结构模型，主要包括地下介质分层结构以及各个介质层的横波速度(V_s)、纵波速度(V_p)、密度和品质因子(Q_0)等参数。为此我们收集了延怀盆地 40 km 深度范围内的地下介质分层结构资料^[13]，从地表(Topo)往下包含了第四系底界面(S4)、上地壳上部的一个转换界面(G界面)、上地壳的底界面(C2界面)、中地壳的底界面(C3界面)和壳幔分界面(Moho面)共 5 个分界面(表 1)。

3 发震断裂和震源模型参数设定

本文以延怀盆地北缘断裂作为潜在发震断裂进行设定地震研究，徐锡伟等^[1]利用该断裂的定量数据确定了未来发生地表型破裂地震的地点和震级上限，对发震的危险程度作出客观的评价(表 2)，其中屈家窑—古城(Ⅱ)、狼山—方家冲(V)和燕王沟—水沟(Ⅶ)三段近期地震危险程度比较高。考虑了延怀盆地北缘断裂各段的活动性和延续性，选定屈家窑—方家冲段作为发震断裂(图 1 中红线)，长度约 50 km，按照龙锋等^[14]给出的关系式确定震级为 7.0 级，这与刘昌铨等^[2]给出的震级和延怀盆地历史地震的最大震级基本一致。

表 1 延怀盆地三维介质层结构模型

介质层	Topo ~ S4	S4 ~ G	G ~ C2	C2 ~ C3	C3 ~ Moho	Moho 面以下
密度/(g/cm ³)	2.00	2.70	2.80	2.88	2.96	3.00
V_p /(km/s)	1.80	6.00	6.30	6.53	6.65	7.00
V_s /(km/s)	1.00	3.40	3.50	3.70	3.80	4.00
Q_0	100	340	350	370	380	400

表 2 延怀盆地北缘断裂晚更新世以来活动断裂定量参数与危险性评估表

断裂名称	段落分段	段落长度/km	滑动速率/(mm/a)	震级上限 M_{max}	近期危险程度
延怀盆地北缘断裂	I 辛庄堡	10.0	0.36~0.55	6.3~6.4	C
	Ⅱ 屈家窑—古城	11.5	0.36	6.4	A
	Ⅲ 古城—营门矿	12.0	0.58	6.4	C
	Ⅳ 方家冲—营门矿	11.0	0.24	6.4~6.5	B—A
	V 狼山—方家冲	13.5	0.32	6.5	A
	Ⅵ 狼山—矾山	22.0	0.38	6.7~6.8	C
	Ⅶ 燕王沟—水沟	17.5	0.20	6.7	A

注：A 代表有近期发震危险的地震危险段(消逝率 ≥ 1)；B 代表存在中长期危险的地震基本段(0.5~1.0 之间)，带有问号的代表缺乏定量参数，但晚更新世晚期有过活动的段落；C 代表仅作为有长期危险背景的段落(消逝率小于 0.5)。

设定地震的震源模型参数如下: ①断层面长 50 km, 宽 15 km, 走向为 NE $36^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 倾角为 65° , 滑动角为 270° , 断层上端埋深为 1 km; ②设定矩震级为 $M_w 7.0$, 释放的地震矩为 $3.548 1 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$; ③断层面上分布有两个凹凸体, 最大滑动量为 2.5 m, 主要凹凸体位于断裂西南端(狼山—一方家冲段), 次级凹凸体位于断裂北东端(屈家窑—古城段); ④初始破裂点位于发震断裂的西南侧(图 2); ⑤以初始破裂点为中心, 破裂以大约 2.9 km/s 的速度向四周扩展, 直达断层面边界处停止。将断裂各分段活动性强弱作为地震能量分配的参考依据, 即活动性强对应释放地震能量大, 活动性弱则释放能量小, 可以得到断层面上的滑动量分布, 采用规则 Yoffe 函数^[15]描述断层滑动速率的变化过程。

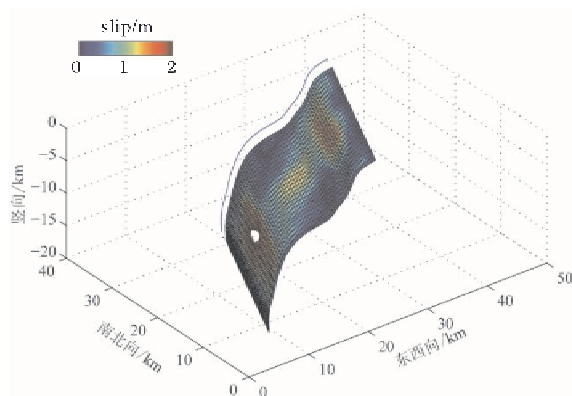


图2 延矾盆地北缘断裂发震段几何结构及滑动量空间分布 (西南端初始破裂)

4 地震动模拟结果

为了更清楚地显示盆地内外地震波的差异, 我们以位于延庆附近的一条地震波测线 AB (见图 1) 为例。该测线穿过第四系沉积厚度最大的盆地和基岩区, 测线上地表各点的速度波形 (2.5 Hz 低通滤波后) 如图 3 所示。

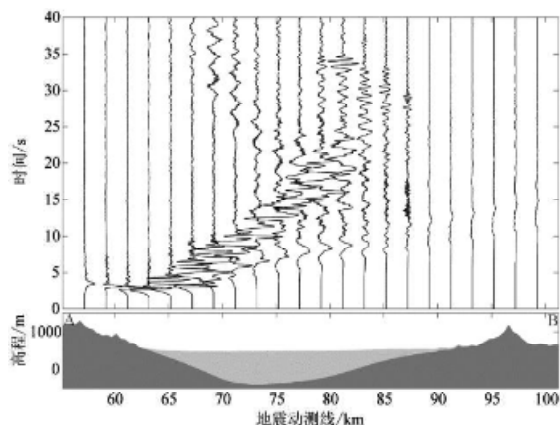


图3 地震动测线 AB 上地表各点速度时程 (西南端初始破裂)
(注: 上半幅为 2.5 Hz 低通滤波后的速度时程; 下半幅为浅地表速度结构剖面, 浅色区域代表第四系盆地, 深色区域代表基岩区)

据图 3 可以得知: 地震波从 A 端盆地边缘处

开始进入盆地, 逐步向盆地中央和 B 端盆地边缘传播, 遇到盆地与基岩分界面时发生反射和波形转换; 盆地内外的地震动差异显著, 地震波被围陷在盆地内来回反射叠加, 增强了盆地内的地震动强度和持时; 此外, A 端盆地边缘处的直达波和反射波间隔时间较长, 而 B 端盆地边缘处则相互叠加在一起, 这可能也是导致 B 端盆地边缘处地震动强度较大的原因之一。

1 ~ 10 s 周期范围内的东西向地震动加速度反应谱分布结果如图 4 所示。从图 4 中可以看出地震动盆地效应是非常明显的, 但不同周期时的反应谱分布特征又有所不同。其中, 1 ~ 2 s 较短周期段的反应谱分布特征更为复杂一些, 既体现了盆地中心的地震动聚焦效应, 也反映了复杂的盆地边缘效应; 3 ~ 10 s 较长周期段的反应谱分布特征没有反映出盆地边缘效应, 仅表现出了地震动强度与盆地第四系厚度之间的显著正相关性, 即地震动强度随着第四系厚度的增大而增大。此外不难发现, 随着周期的增大, 地震动强度逐渐减小, 周期为 1 s 时的最大加速度反应谱值大约为 1.6 g, 周期为 10 s 时的最大反应谱值已减小到 0.02 g 左右。

5 盆地效应

为了定量分析盆地对地震动的放大效应, 我们建立了区别于真实盆地结构模型的基岩参考模型。基岩参考模型只将上述盆地结构模型中的第四系替换成下伏的基岩介质, 其他参数均保持不变。以盆地结构模型的计算结果相比于基岩参考模型的计算结果, 得到了 3 ~ 10 s 周期范围内的加速度反应谱放大系数分布 (图 5)。该图表明: ①在 3 ~ 10 s 的长周期段, 盆地放大系数主要受第四系厚度的影响, 表现出随第四系厚度增大而增大的特性, 延庆—康庄、狼山—桑园和怀来—涿鹿三个沉积中心对应着较高的放大系数。其中, 狼山—桑园之间的放大系数尤其显著, 可能是盆地结构聚焦效应、破裂方向性效应和地形放大效应共同作用的结果。②盆地放大系数随周期增大而变小, 盆地结构对周期为 3 s 的地震动成分的放大作用更为明显。

为了对比破裂方向对地震动模拟结果和盆地放大效应的影响, 我们在发震断裂 NE 端设置初始破裂点, 对 NE 端初始破裂的震源模型按照 SW 端的流程计算出盆地放大系数, 对两个震源破裂模型下的盆地放大系数取平均, 得到了 3 ~ 10 s 周期范围内的平均盆地放大系数分布 (图 6)。从平均盆地放大系数与第四系厚度之间相关性来看, 较大的放大系数通常对应着较大的第四系厚度, 第四系沉积中心拥有最大的盆地放大系数。从周期上看, 平均盆地放大系数随着周期的增大而变小, 3 s 周期时的最大放大系数大约为 15, 4 s 周期时的最大放大系数大约为 8, 5 s 周期时的最大放大系数大约为 5, 此后周期继续变大时, 放大系数只略有减小, 说明在 3 ~ 10 s 周期范围内, 盆地结构对较短周期段的地震动影响更为显著。

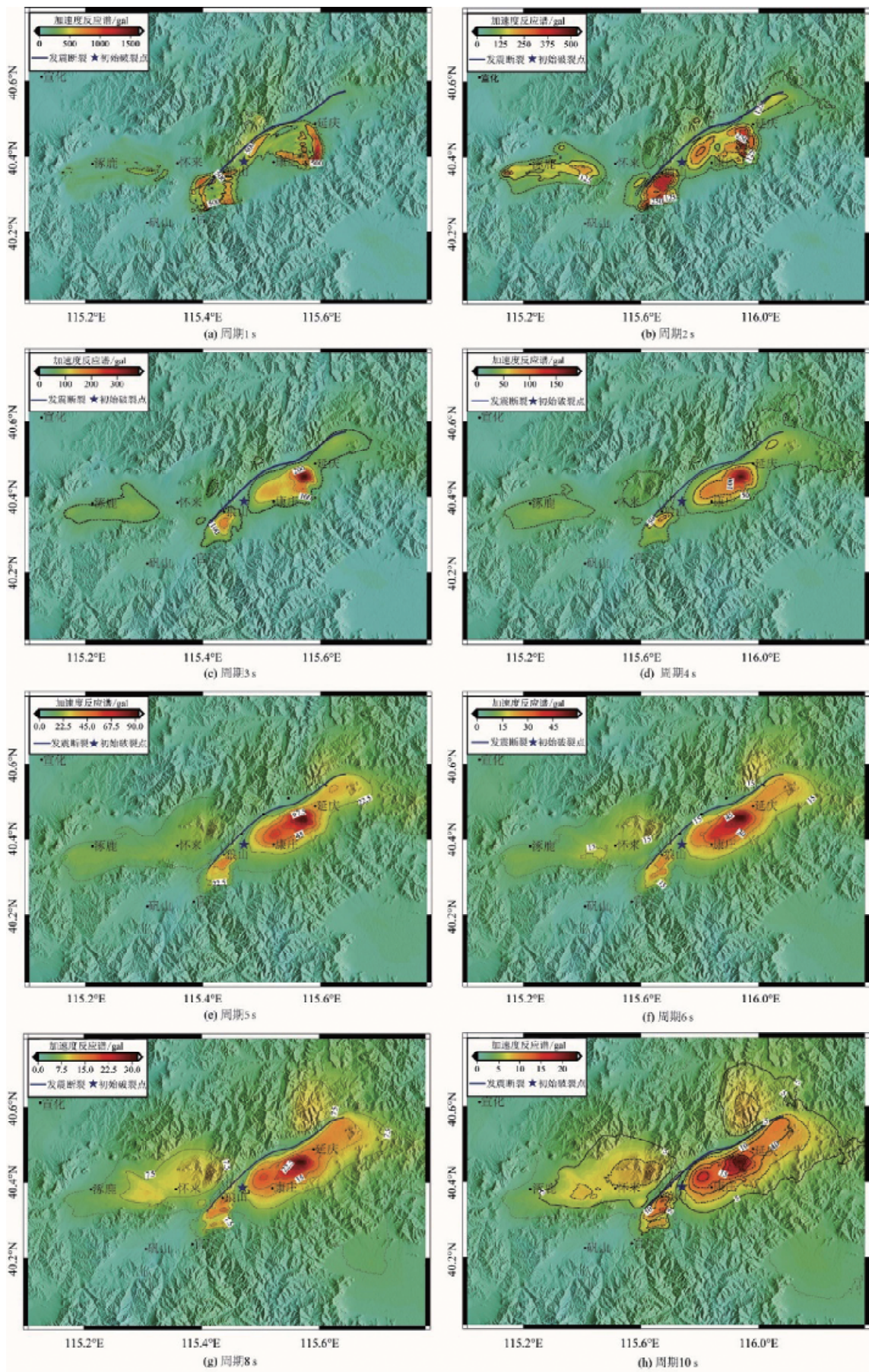


图4 不同周期时加速度反应谱分布(SW 开始破裂)

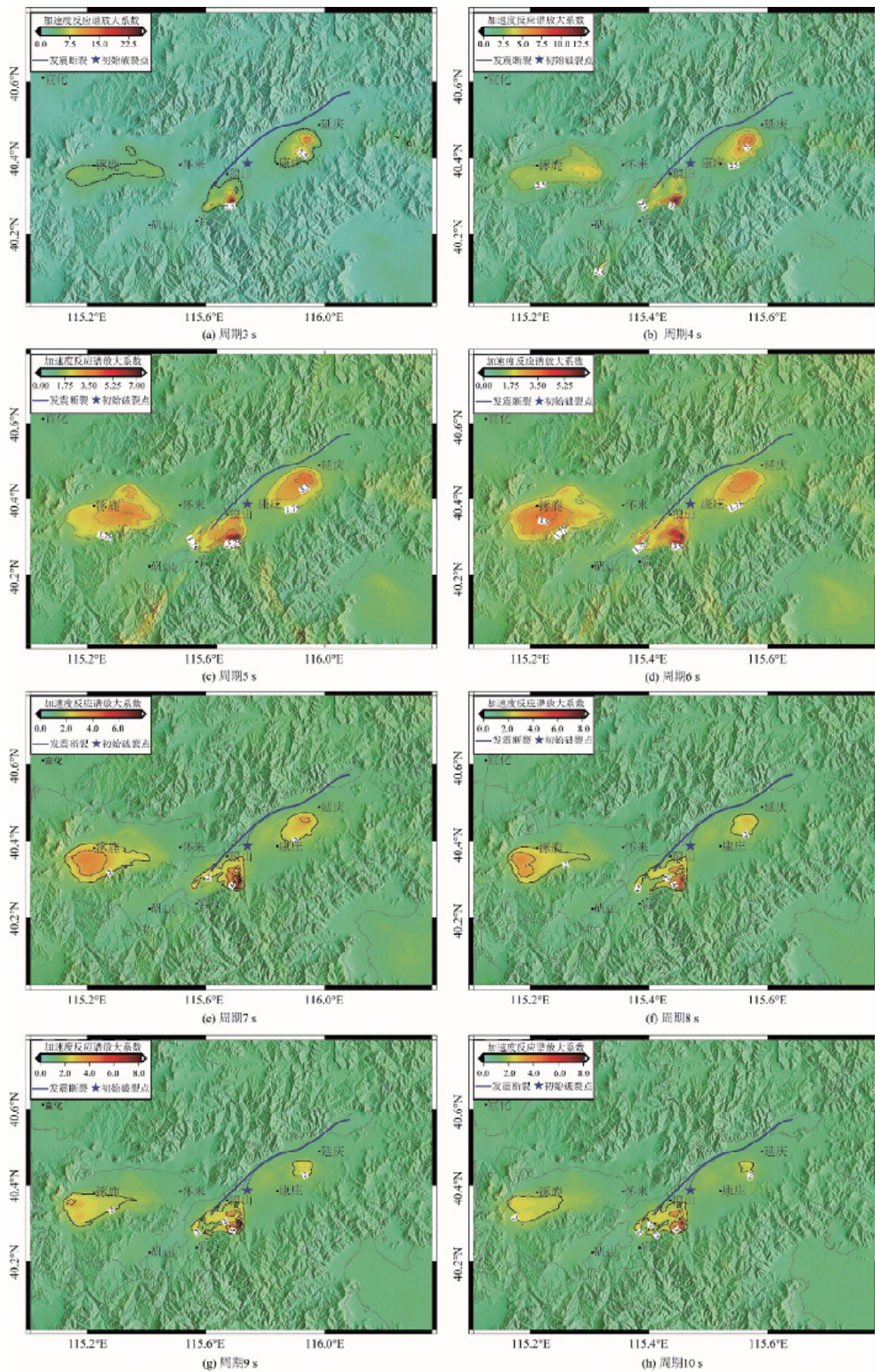


图5 不同周期时加速度反应谱放大系数分布(SW 开始破裂)

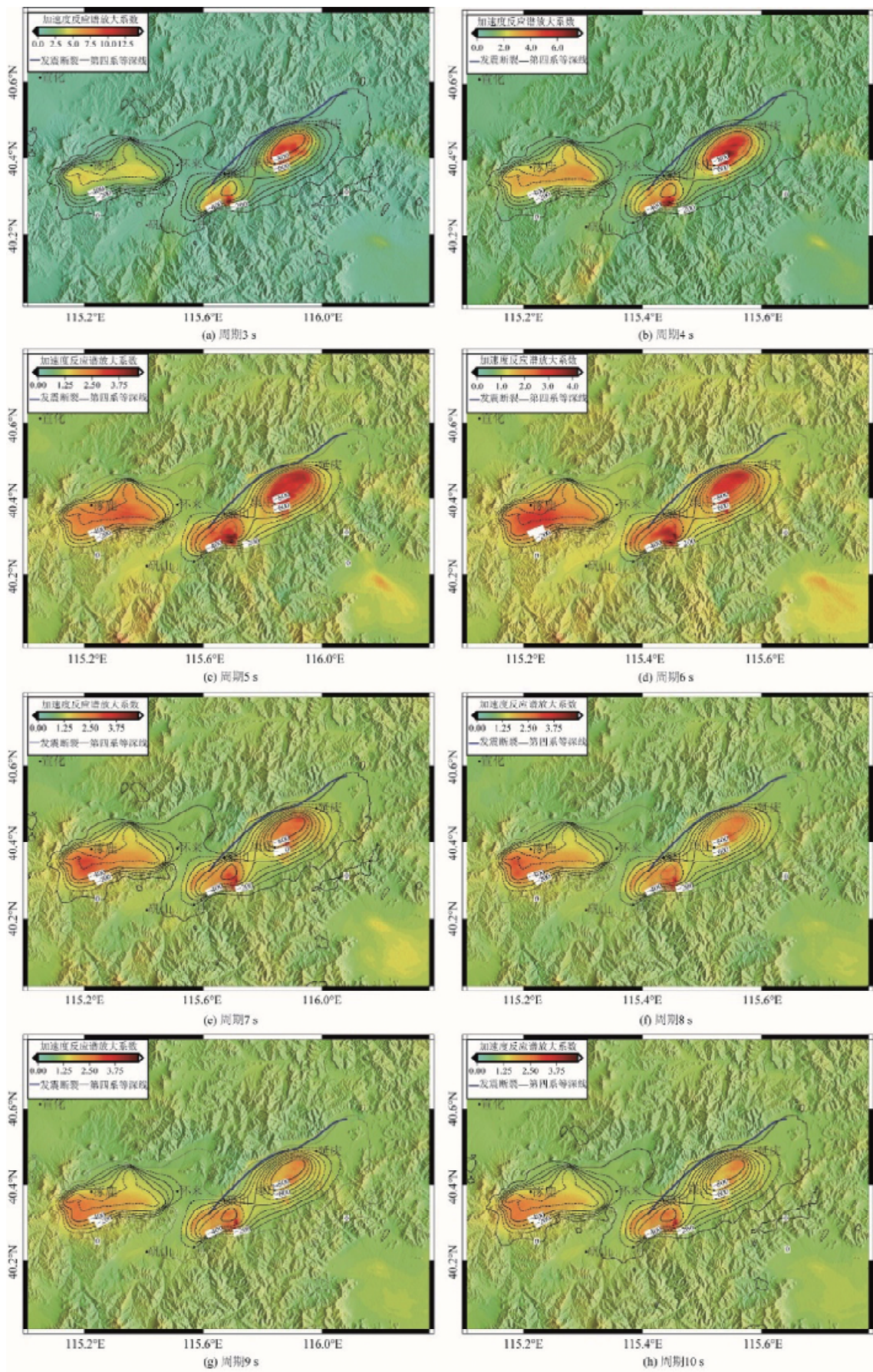


图6 不同周期时加速度反应谱平均放大系数分布

6 结论与讨论

本文按照地震危险程度确定延矾盆地北缘断裂的屈家窑—方家冲段作为发震断裂, 震级为 7.0 级。基于延怀盆地三维地壳介质模型, 开展设定地震的地震动模拟研究, 定量分析了盆地结构对地震动的放大效应, 给出了 3~10 s 周期范围内平均盆地放大系数与第四系厚度之间的对应关系, 表现为地震动强度与盆地第四系厚度之间的显著正相关性, 即地震动强度随着第四系厚度的增大而增大, 盆地浅层的沉积结构对较短周期段的地震动影响更为显著。该结果可以为延怀盆地的地震风险评估和综合防灾减灾规划提供科学参考依据。

官厅水库大坝位于盆地边缘, 第四纪沉积厚度较薄, 地震动强度、高频地震动是影响其结构破坏的主要因素, 从大坝的高度来看长周期地震动对其影响较小, 但蓄水高度变化会影响大坝的自振频率, 所以地震时水库的蓄水高度是需要考虑的因素。盆地内的高层建筑一般最高 30 层, 自振周期介于 2.6~3.6 s 的范围, 3 s 周期时的最大放大系数大约为 15, 4 s 周期时的最大放大系数大约为 8。而我们关注的高层建筑大多分布在盆地的边缘, 离第四系沉积中心稍远, 如康庄处最大放大系数约为 2.5。高层建筑除做地震安全性评价外, 考虑到盆地对地震动的放大效应, 给予抗震性能的特殊考虑是必要的。

参考文献:

- [1] 徐锡伟, 吴卫民, 张先康, 等. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

- [2] 刘昌铨, 嘉世旭, 刘明军, 等. 延庆—怀来盆地地震危险性分析研究[J]. 地震学报, 1997, 19(5): 517-523.
- [3] 陈运泰, 许向彤, 于湘伟, 等. 北京西北延庆—怀来盆地的地震观测及减轻地震灾害研究[J]. 华南地震, 1998, 18(1): 2-8.
- [4] 白石羽. 延庆—怀来盆地地面运动的理论模拟与研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2003.
- [5] WANG G Q, ZHOU X Y. 3D finite - difference simulations of strong ground motions in the Yanhuai area, Beijing, China during the 1720 Shacheng earthquake (M_s 7.0) using a stochastic finite - fault model [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2006, 26: 960-982.
- [6] 文彦君, 郑文涛. 延怀盆地现代构造应力场模拟与官厅水库大坝地震安全性初探[J]. 地震地质, 2004, 26(1): 141-152.
- [7] 郭红梅, 赵真, 张莹, 等. 一种适用于山地地区的地震灾害风险评估方法—以四川宝兴县为例[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 147-152.
- [8] 葛懿夫, 翟国方, 何仲禹, 等. 韧性视角下的综合防灾减灾规划研究[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 229-234.
- [9] 李金奎, 汪洋, 杨承源, 等. 基于土体等效线性黏弹性模型的地下综合管廊地震响应[J]. 灾害学, 2022, 36(3): 64-70.
- [10] 魏强, 肖东升. 基于弹塑性时程分析的结构地震倒塌时间研究[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 7-13, 26.
- [11] ZHANG W, CHEN X. Traction image method for irregular free surface boundaries in finite difference seismic wave simulation[J]. Geophysical Journal International, 2006, 167(1): 337-353.
- [12] ZHANG W, ZHANG Z, CHEN X. Three - dimensional Elastic Wave Numerical Modeling in the Presence of Surface Topography by a Collocated - Grid Finite - Difference Method on Curvilinear Grids [J]. Geophysical Journal International, 2012, 190: 358-378.
- [13] 高文学, 马瑾. 首都圈地震地质环境与地震灾害[M]. 北京: 地震出版社, 1993.
- [14] 龙锋, 闻学泽, 徐锡伟. 华北地区地震活断层的震级—破裂长度、破裂面积的经验关系[J]. 地震地质, 2006, 28(4): 511-535.
- [15] SAVRAN W, OLSEN K B. Kinematic Rupture Generator Based on 3 - D Spontaneous Rupture Simulations Along Geometrically Rough Faults[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(10): 1-22.

Research on Basin Effect of Ground Motion in Yanqing - Huailai Basin

WANG Xiaoshan¹, FU Changhua², ZHAO Zhiyuan¹, FENG Xiangdong¹

(1. Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, China; 2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on comprehensively analyse on the seismic risk of Yanqing - Huailai basin, the potential seismogenic fault is Qujiayao - Fangjiachong segment of the northern margin fault of Yanqing - Fanshan basin is determined, with a probable magnitude of 7.0. Based on the 3D structural model of Yanqing - Huailai basin with thick surface sediments, two rupture modes are set to simulate the ground motion of the scenario earthquake for studying the amplification effect of the basin structure. It is found that the shallow sedimentary structure of the basin has a more significant impact on the ground motion in the shorter period. The larger amplification factor usually corresponds to the larger quaternary thickness, and the maximum amplification factor is located in Yanqing Basin.

Keywords: Yanqing - huailai basin; seismic risk analysis; ground motion simulation; basin effect