

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.202005018

考虑场地效应的概率地震危险性分析—— 以玉溪为例*

梅伟¹, 顾世祥¹, 童保林¹, 谢波¹, 杜文琪²

(1. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南昆明 650021; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 工程风险与防灾研究所, 湖北武汉 430072)

摘要: 为了定量表征场地效应对概率地震危险性分析(PSHA)结果的影响, 采用OpenQuake软件计算方法, 针对玉溪地区, 开展了考虑场地效应的PSHA分析, 生成了基于基岩场地和实际场地的玉溪市50年超越概率10%的地震动峰值加速度(PGA)和0.5秒反应谱加速度(Sa(0.5s))危险分布图。结果表明: 考虑场地效应(实际场地)的PGA和Sa(0.5s)危险值分别分布在0.12g~0.45g和0.15g~0.55g区间; 场地效应显著增大了玉溪市东部地区的地震危险性, 原因是该区域地势平坦且上覆软土层; 考虑场地效应的PSHA结果可用于生成针对某一特定场地的一致危险性反应谱。因此, 应重点关注软弱土层场地放大效应对PSHA结果的影响, 从而更为合理、科学地表征地震危险性。

关键词: 场地效应; 概率地震危险性分析; 空间光滑地震活动性; 一致反应谱

中图分类号: P315.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)03-0516-07

Probabilistic Seismic Hazard Analysis Considering Site Effect: A Case Study of Yuxi City

MEI Wei¹, GU Shixiang¹, TONG Baolin¹, XIE Bo¹, DU Wenqi²

(1. Yunnan Institute of Water & Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Institute of Engineering Risk and Disaster Prevention, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The site effect plays a great role in the probabilistic seismic hazard analysis (PSHA). In this study, the PSHA considering realistic site conditions for Yuxi City, Yunnan Province, China has been conducted by using the computing method of the OpenQuake engine. Considering the bedrock and realistic site conditions respectively, the seismic hazard maps of Yuxi city in terms of peak ground acceleration (PGA) and 0.5-second spectral acceleration (Sa(0.5s)) for 10% exceedance probability in 50 years are generated. The results show that: (1) the PGA and Sa(0.5s) hazard values at realistic sites of Yuxi City are distributed in the range of 0.12g-0.45g and 0.15g-0.55g, respectively; (2) Since the east of Yuxi City is mainly covered by soft sediments, the site effect significantly increases the seismic hazard level; (3) for a specific site, the PSHA results considering the site effect could generate a

* 收稿日期: 2020-05-18; 修回日期: 2020-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51909193, 41861144022)资助

作者简介: 梅伟(1970—), 男, 正高级工程师。主要从事水利水电工程建筑安全方向研究。E-mail: okmeiwei@vip.sina.com

通讯作者: 杜文琪(1985—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事抗震评估与防灾减灾研究。E-mail: wqdu309@whu.edu.cn

uniform hazard spectrum. Therefore, more attention should be paid to the influence of the site amplification effect of soft sediments on the results of PSHA, so as to yield a more accurate seismic hazard assessment.

Keywords: site effect; probabilistic seismic hazard analysis; spatially smoothed seismology; uniform hazard spectrum

引言

我国地处环太平洋地震带和欧亚地震带之间,是世界上地震最多、地震灾害最为严重的国家之一。进入21世纪以来,先后发生6.0级以上地震近800次。作为地震灾害防御的一个关键环节,合理、准确评估我国高地震烈度地区的场地地震危险性对我国工程结构的抗震设计以及地震灾害的预防意义重大^[1]。地震危险性评价包括确定性方法和概率性方法。20世纪60年代,C.A.Cornell^[2]提出了基于已有数据来构造模型并评估场地地震危险性的概率方法(PSHA),为地震危险性评价提供了重要的分析方法。与确定性的地震危险性分析方法相比,C.A.Cornell提出的方法更为完整、科学^[3],可以更好地表征地震动分布的不确定性。自PSHA方法提出以来,该方法被广泛应用于工程中的各个领域,包括区域性地震区划图与建筑设计规范编制、工程地震研究领域、地震风险评估、地震保险和工程场地地震危险性评价等^[4]。我国于20世纪70年代末才引入PSHA方法,较早时候主要应用于大型水电站、海洋钻井平台等工程场地的地震安全性评估以及大城市的地震小区划。后来,在第三代《中国地震烈度区划图(1990)》也采用或改进了PSHA方法的思路,并沿用至今^[5]。

大量强震历史资料表明,地震动强度及频谱特性会受到场地条件的影响,即:地震波在不同介质成分的土层中传播的速度和强度不同。通常来说,较软土质会对地震波的强度起到放大作用,这也就是研究人员熟知的场地效应^[6]。因此,在地震危险性分析中通常需要考虑场地效应的影响。然而,由于缺乏足够的不同场地条件实测地震动记录,PSHA通常只用于估计地震动在基岩场地条件下的强度分布^[5]。为了在危险性分析中进一步考虑场地效应,则需要对传统(基于基岩)的概率地震危险性分析结果进行进一步修正,即:利用场地指标参数通过开展场地效应分析来得到实际场地的地震动

强度及反应谱加速度分布^[7]。然而,该方法所需地震反应计算量较大,无法得到区域尺度的场地地震危险性分布。目前,结合地震动衰减关系和场地放大效应概率模型的改进PSHA方法,为生成实际场地的地震危险性分布图提供了一条有效途径。

本文采用考虑场地放大效应的改进PSHA方法,选取位于我国大陆地区浅源地震最活跃的地震带-南北地震带(中枢地震带)南段的云南省玉溪市为例,开展考虑场地效应的概率地震危险性分析研究,结果以475年重现期的地震动危险性分布图和一致危险性反应谱表示。

1 考虑场地放大效应的PSHA方法

1.1 传统PSHA方法

传统PSHA方法主要由确定潜在震源、确定震源的地震活动性、地震影响的估计以及场地点危险性确定4个步骤组成^[3]:

(1)确定潜在震源:目前标准的PSHA方法仍然是以潜在震源区为核心,将活动断层划入到潜在震源区内,并假定区域内给定震级的地震在空间内均匀发生、震级满足古登堡-里克特(G-R)关系^[8]、时间服从泊松分布。

(2)确定震源的地震活动性:震源的地震活动性主要确定震源的复发关系,与确定性分析方法只选一个控制地震不同,PSHA需要考虑场地内所有潜源的地震活动性和与场点的距离。

(3)地震影响的估计:地震影响估计主要通过建立地震动衰减关系来实现,衰减关系一般通过强震记录拟合形成,表达式中应包含考虑震源效应、路径效应和场地效应的三部分参数。

(4)场地点危险性确定:场地点危险性确定即计算场点的超越概率,一个区域的危险性通常是以一定时间周期内给定值的地面运动被超越的概率表示^[3]。

1.2 改进 PSHA 方法在本次分析中的应用

本次地震概率危险性分析以概率密度函数表征地震的时空分布,估算特定时间段内某一水平地震动的超越概率。为了建立震级-频度的关系,采用 G-R 关系式来获得地震参数 a 和 b, G-R 关系式如下:

$$\log_{10}(N) = a - b \cdot M \quad (1)$$

式中, N 表示每年发生震级等于或大于 M 的地震累计次数; a 和 b 分别表示地震发生率和地震大小比例关系常数。由(1)式可知,地震目录可以用 3 个参数表示: G-R 关系式中的 a 和 b , 以及假定的最大震级 M_{\max} 。

考虑场地效应的 PSHA 根据给定地震动特性参数 IM (例如地震动峰值加速度 PGA) 计算地震动危险性,考虑研究区域所有潜在震源,计算某一场地地震参数 IM 超过给定值 z 的概率:

$$P_{IM}(z) = \sum_{i=1}^k \lambda_0^i \cdot \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \int_r P[IM > z | m, r, S] f_i(m) f_i(r) dr dm \quad (2)$$

式中, $P_{IM}(z)$ 表示 IM 超过给定值 z 的年平均概率; k 为所有潜在震源的数量; λ_0^i 表示第 i 个潜在震源发生震级位于 $[M_{\min}, M_{\max}]$ 区间的地震年平均发生率; M_{\min} 和 M_{\max} 分别代表起算震级和震级上限; $f_i(m)$ 和 $f_i(r)$ 分别表示与震级和震中距相关的概率密度函数; S 表示场地条件。 $P[IM > z | m, r, S]$ 为给定 m, r 和 S 情景下 IM 超过 z 的条件概率,在假设 IM 服从对数正态分布的情况下:

$$P[IM > z | m, r, S] = 1 - \Phi\left(\frac{\ln z - \mu_{\ln IM}}{\sigma_{\ln IM}}\right) \quad (3)$$

式中, Φ 表示标准正态累积分布函数; $\mu_{\ln IM}$ 和 $\sigma_{\ln IM}$ 分别表示地震动参数 $\ln IM$ 的预测均值和方差,可由地震动衰减公式和场地放大效应模型确定。针对某一特定场地 $\mu_{\ln IM}$ 存在以下关系:

$$\mu_{\ln IM} = \left(\mu_{\ln IM}\right)_{\text{bedrock}} + A_F(S, m, r) \quad (4)$$

式中, $A_F(S, m, r)$ 表征场地放大效应模型,通常由场地分类指标或地表以下 30 m 的平均剪切波速 (V_{s30}) 来确定。

选取合适的场地放大效应概率模型对开展考虑场地效应的 PSHA 分析具有重要意义。现有研究中针对我国场地放大效应开展概率模型的研究较为匮乏。因此,本文选用了由 D.M.Boore 等^[9]开

发的场地效应概率模型,该模型包括线性和非线性放大部分,通过场地反应和数据统计分析建立了针对不同场地条件的放大系数概率模型,合理考虑了场地效应的不确定性,从而可以得到实际场地的地震动参数概率分布。

按照国际上地震危险性分析的惯例,PSHA 方法需要考虑与输入参数相关的随机不确定性和认知不确定性,随机不确定性主要指地震震源参数和衰减关系的不确定性,而认知不确定性与模型本身相关,通常采用逻辑树方法来处理。本文中的概率地震危险性分析步骤如图 1 所示。

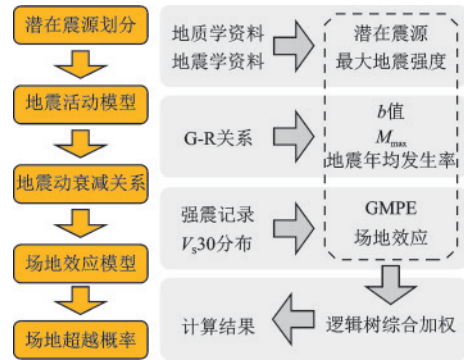


图 1 地震概率危险性分析方法流程

Fig. 1 Flowchart of probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) method

2 玉溪地区地质条件

2.1 地形特征

玉溪市位于云南省中部,川滇菱形块体东南,区域内以红河为界,以西为滇西横断山区,山体走向呈 NW 向。玉溪以东为云贵高原,多为低~中山湖盆,市内地势以山地为主,占 90% 左右。玉溪西部的哀牢山呈 NW-SE 走向的巨大屏障。玉溪北部和东部都有一些较大的断陷盆地,南部和西部多为向南突出的弧形小山丘^[10],总体来说,玉溪市内地势西北高、东南低,地形复杂,这样的地形特点使得玉溪地层发育齐全,地质构造复杂。

2.2 地貌特征

玉溪地区位于云贵高原西缘,地貌受深大断裂控制很明显。其中,红塔区、江川县、澄江县、通海县为坝区,华宁、易门为半山区,峨山、元江为山区^[11]。玉溪、峨山一线以东为滇东台褶带,主要分布震旦系

砂页岩、碳酸盐岩等,厚度达到800~2 600 m;峨山一线以西为川滇台背斜,主要出露昆阳群中部砂岩、板岩以及碳酸盐岩等,厚度近万米。此外,新平、元江两县境内的哀牢山区域主要由混合岩、片麻岩以及少数大理岩组成,总厚度大约为9 200 m。

2.3 断裂带分布及场地条件

图2给出了玉溪市主要活动断裂带分布情况。由图2所示,玉溪及其周边地区断裂带较多,主要有SN走向的易门断裂(F1)、普渡河断裂(F2)和小江断裂(F3),以及NW走向的曲江断裂(F4)、楚雄—建水断裂(F5)和红河断裂(F6)。据历史记载,玉溪地区发生最大地震为1970年1月5日发生于玉溪通海的 M_s 7.7地震,曲江断裂的强烈活动性为此次地震震提供了物理构造基础^[11]。

在美国国家地震减灾计划(NEHRP)规范^[12]当中,采用 V_s30 指标作为场地类别划分标准。美国联邦地质调查局USGS基于全球地形坡度,提供了30弧秒网格分辨率的全球 V_s30 分布图。通过在USGS网站^[13]下载,玉溪市的 V_s30 分布情况如图3所示。可以看到,玉溪市西部地区平均剪切波速较大,而中部和东部大部分区域剪切波速小于300 m/s,这部分区域地势相对平坦,若强震发生可能会导致显著的场地放大效应。

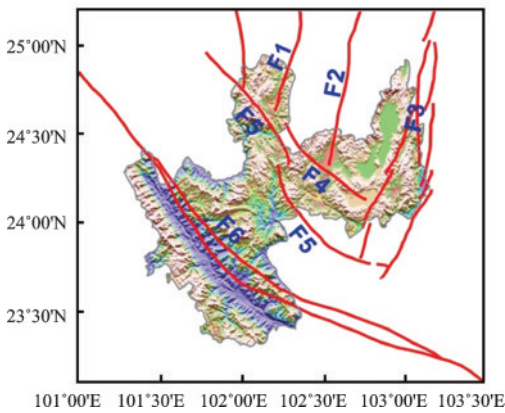


图2 玉溪市主要活动断裂带分布示意

Fig. 2 Distribution of major active fault zones in Yuxi City

3 玉溪地区的PSHA分析流程

3.1 历史数据的搜集和整理

针对玉溪市,历史地震事件的搜索集中在 $21^{\circ}\text{N}\sim 29^{\circ}\text{N}$ 和 $97^{\circ}\text{E}\sim 107^{\circ}\text{E}$ 的坐标范围内。历史强震资料包括《中国历史强震目录(公元前23世纪~公元

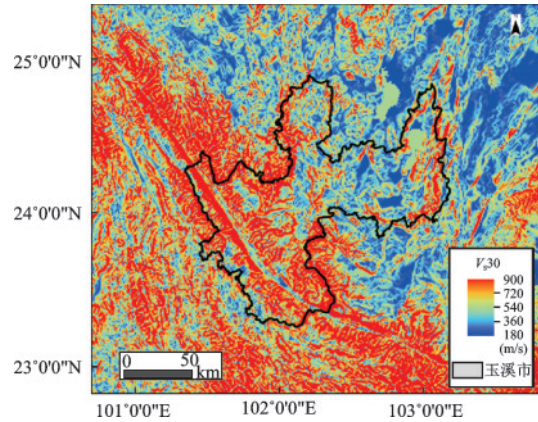


图3 玉溪市 V_s30 分布

Fig. 3 The V_s30 distribution map of Yuxi City

1911年)》、中国地震台网统一地震目录、云南省地震局编撰的云南地震目录等。综合地震搜索目录涵盖了公元1600年~2005年的时间。每一个标准目录中的信息包括地震发生的日期、时间、震中坐标、震源深度和震级。挑选的地震目录共包括研究区域内75 527个记录地震事件,其中震级大于等于4的地震事件共2 185个。

开展地震危险性分析之前需要对地震数据进行处理,删除目录中的前震和余震,只保留独立地震事件。参阅文献[14],本研究采用J.K.Gardner和L.Knopoff^[15]提出的余震删除方法。该方法通过提出针对不同震级地震的余震空间窗口和时间窗口,将满足空间和时间窗口条件的地震事件当作余震删除,最终获得地震目录包括研究区域内震级大于等于4的独立地震事件共750个。

3.2 区域地震活动性分析

由于收集到的地震目录数量相对有限,以及对断层构造认识的局限性,针对研究区域的每一条断裂带开展地震活动性分析并非易事。目前,国内外普遍采用A.Frankel^[16]提出的空间光滑地震活动性方法,即不根据地震构造来划分潜在震源区,而是直接利用研究区域内的地震目录数据计算地震活动性参数,再把地震事件分配到均匀分布的空间格点内,将每个格点当作空间光滑后的点震源来开展地震危险性分析。

本文采取上述空间光滑地震活动性方法计算地震活动率。首先,采用G-R关系拟合法获得研究区域不同地震震级的年超越概率分布,利用式(1)拟合地震活动性参数a和b。如图4所示,采用的G-R关系较好地拟合了统计地震数据,相应计算得

到的 a 和 b 值分别为 3.63 和 0.72。此外,可以发现研究区域最大历史地震震级为 8.0,因此本研究设定的 $M_{\max}=8$ 。

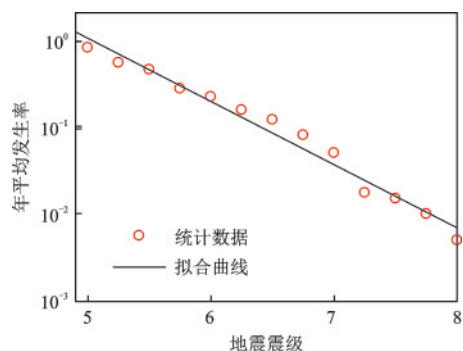


图 4 研究区域 G-R 关系曲线

Fig. 4 Magnitude-cumulative number relationship plot for the study area

然后,将研究区域划分为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的网格,统计每个网格中大于等于 4 级的地震事件频度,再使用空间光滑函数将地震频度分配到其他临近网格中。采用经典的高斯光滑函数如下:

$$\bar{n}_i = \frac{\sum_j n_j e^{-\Delta_{ij}^2/c^2}}{\sum_j e^{-\Delta_{ij}^2/c^2}} \quad (5)$$

式中, \bar{n}_i 表示空间光滑后第 i 个网格的地震事件数目; Δ_{ij} 表示第 i 个网格与第 j 个网格之间的距离; c 表示相关距离。参阅现有研究成果^[17],同时考虑到研究区域背景地震活动性较高的情况,本文将相关距离设定为 60 km。

最后,基于上文得到的地震活动性参数获得研究区域不同震级地震的年发生率,再利用空间光滑函数把地震活动性模型分配给空间格点,之后,将每一网格假定为点震源用于地震危险性计算。

3.3 基于基岩场地的概率地震危险性分析

概率地震危险性计算过程在 OpenQuake 软件^[18]中实现。该软件是由全球地震模型(GEM)研究所开发,具有开源和可访问的特点,已经成为地震灾害危险建模的一种较为常用的软件。OpenQuake 通过构建基于 Python 的计算工具箱来实现 PSHA 分析功能,其计算性能和准确度得到了国际研究学者的广泛肯定。鉴于玉溪市属于地壳浅层稳定区域,本文中使用的地震动衰减关系为 S.Pezeshk 等人开发的适用于美国中、东部地区(同属于地壳浅层稳定区)的地震动衰减模型^[19]。同

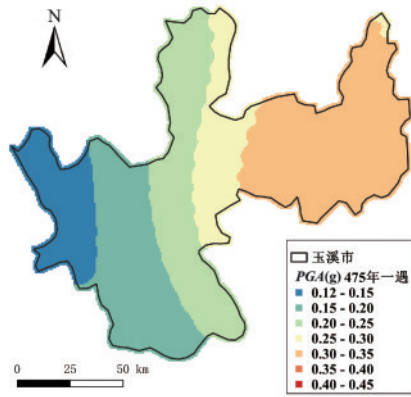
时,考虑地震震源深度的认知不确定性,建立包含三个震源深度(5, 10 km 和 20 km,代表性权重分别为 0.2, 0.7 和 0.1)的逻辑树模型。

在 OpenQuake 软件中,将整个玉溪市划分为 $800 \text{ m} \times 800 \text{ m}$ 的网格,所有网格设定为基岩场地 ($V_{s30}=760 \text{ m/s}$)。在 PSHA 中,考虑 5 个地震动强度参数,包括:峰值加速度(PGA)以及自振周期为 0.3、0.5、1 s 和 2 s 的谱加速度值。利用上节描述的地震点源开展概率地震危险性计算,得到了 50 年内超越概率 10% (即 475 年一遇)的地震动参数强度值分布。图 5 展示了玉溪地区 50 年内超越概率 10% 的基岩地震动参数(PGA 和 0.5 秒谱加速度值 $S_a(0.5 \text{ s})$)危险性分布图。如图 5(a)所示,本文所计算的 PGA 危险值分布在 $0.12g \sim 0.35g$ 区间范围内,且东部地区的地震危险性较大,与我国最新地震动参数区划图中 I_1 类场地的 PGA 区划图^[20]大体一致,一定程度上验证了本文结果的准确性和合理性。此外,由图 5(b)可以看出, $S_a(0.5 \text{ s})$ 危险值分布在 $0.15g \sim 0.25g$ 区间范围内,显著小于相应的 PGA 分布范围。究其原因是由于地震活动性分析中的点震源设定,使得地震危险性由包含较多高频地震波成分的近场地震动所主导。

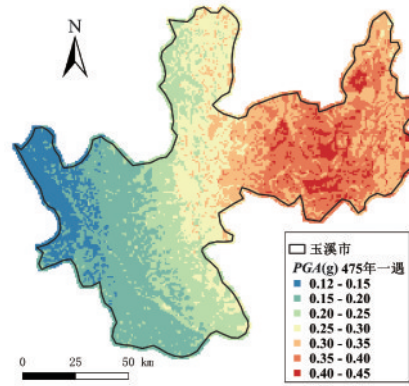
3.4 考虑实际场地效应的概率地震危险性分析

采用本文采用的考虑场地效应的概率地震危险性分析方法,计算得到玉溪地区 50 年内超越概率 10% 的实际场地地震动参数(PGA 和 $S_a(0.5 \text{ s})$)危险性分布图,如图 6 所示。由图可见,基于实际场地计算的 PGA 和 $S_a(0.5 \text{ s})$ 危险值分别分布在 $0.12g \sim 0.45g$ 和 $0.15g \sim 0.55g$ 区间内,并且玉溪市东部地区地震危险性显著大于西部地区。

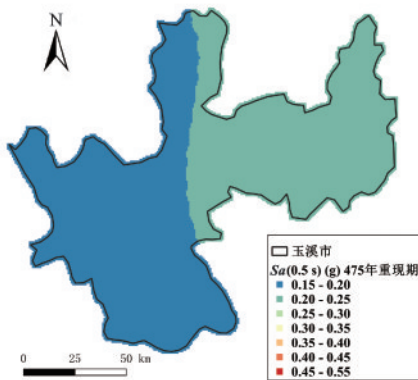
对比图 6 与图 5 可以发现:(1)由于场地效应的影响,覆盖软土层的玉溪东部地区地震动强度被显著放大,从而增大了该区域的地震危险性;(2)由于小尺度场地条件参数(V_{s30})的变异性,图 6 展示的危险性分布图未呈现如图 5 所示的危险性均匀变化趋势;(3)对玉溪东部地区而言,场地效应对地震动参数 $S_a(0.5 \text{ s})$ 的放大效应比之 PGA 更为显著,其主要原因是由于共振效应,中、低频成分的地震波更易在软土地地上得到放大。由此可见,玉溪东部地区的中、长周期反应谱加速度的危险性较高,地震有可能对该地区的中、长周期结构带来更强的动力反应和更大的破坏后果。



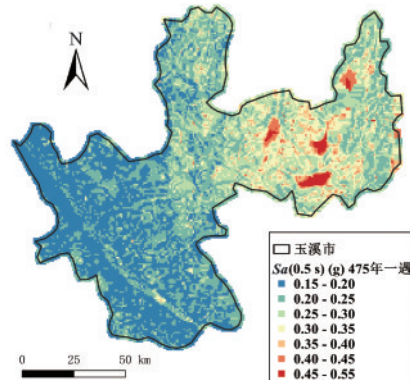
(a) 峰值加速度PGA



(a) 峰值加速度PGA



(b) 0.5秒反应谱加速度Sa(0.5 s)



(b) 0.5秒反应谱加速度Sa(0.5 s)

图5 基于475年重现期的基岩地震危险性分布

Fig. 5 PSHA hazard maps (rock site condition with $V_{s30}=760$ m/s) for the return period of 475 years for (a) PGA, and (b) Sa (0.5s), respectively

图6 基于475年重现期的实际场地地震危险性分布

Fig. 6 PSHA hazard maps (realistic site condition) for the return period of 475 years for (a) PGA, and (b) Sa (0.5s), respectively

3.5 考虑场地效应的一致危险性反应谱

基于3.4节中考虑场地效应的PSHA结果,进一步得到研究区域某一特定场地的一致危险性反应谱。以玉溪市火车站(玉溪南站)为例,由图3可知该站点 V_{s30} 约为280 m/s,图7展示了基于475年重现期的一致危险性反应谱。由图7可见,考虑基岩场地条件的PGA危险值为0.32g,略大于我国地震动参数区划图^[20]提供的相应城镇(即云南省玉溪市红塔区研河街道)II类场地基本地震动峰值加速度值0.30g。除此之外,可以发现场地效应整体上放大了加速度反应谱。考虑实际场地条件的PGA危险值超过了0.4g,且在0.3 s周期附近的反应谱峰值加速度为0.55g。与设计反应谱相比,一致危险性反应谱较好地反映了某一特定场地的地震危险性,因而可以用于选取地震波以开展地震动力分析。

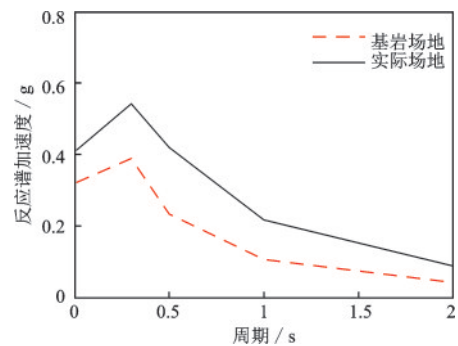


图7 基于基岩场地和实际场地的玉溪火车站一致危险反应谱(475年重现期)

Fig. 7 Uniform hazard spectrum of the Yuxi Station site for the return period of 475 years considering bedrock and realistic site conditions, respectively

4 结论

根据我国西南地区公元1600年~2005年的地

震目录数据,以及收集到的玉溪地区 V_s30 数据,利用 OpenQuake 软件,开展了考虑场地效应的玉溪地区场地的概率地震危险性分析,分别计算了玉溪市 50 年内超越概率 10% 的地震动峰值加速度 (PGA) 和 0.5 秒反应谱加速度 ($S_a(0.5\text{ s})$) 的危险分布图,所得结论如下:

(1) 不考虑场地效应的基岩场地 PSHA 分析结果表明:玉溪地区 PGA 危险值分布在 $0.12g\sim 0.35g$ 区间,且高地震危险性 ($PGA > 0.3g$) 主要发生在玉溪市东部地区,与我国最新地震动参数区划图中的 PGA 区划图基本一致。

(2) 考虑场地效应的 PSHA 分析结果表明:玉溪地区 PGA 和 $S_a(0.5\text{ s})$ 危险值分别分布在 $0.12g\sim 0.45g$ 和 $0.15g\sim 0.55g$ 区间中,且玉溪市东部地区地震危险性显著大于西部地区。

(3) 对比基岩场地和实际场地的玉溪地区 PSHA 分析结果可以发现:玉溪地区场地放大效应主要集中在东部地区,因其地势相对平坦且上覆较厚软质土层。

(4) 通过开展考虑场地效应的 PSHA 分析可以用于生成针对某一特定场地的一致危险性反应谱。一致危险反应谱较为科学、合理地表征了考虑场地效应的地震动危险性,因而可以被当作目标谱应用于选取地震波组中。

参考文献:

- [1] 司明婧,常素萍,陈国兴.唐山大地震中京津唐地区水利工程的震害现象与特征[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(6): 839-847.
Si M J, Chang S P, Chen G X. Seismic damage phenomena and characteristics of hydraulic engineering in Beijing-Tianjin-Tangshan region during Tangshan earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(6): 839-847. (in Chinese)
- [2] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.
- [3] 陈颢,刘杰,陈棋福,等.地震危险性分析和震害预测[M].北京:地震出版社,1999.
Chen Y, Liu J, Chen Q F, et al. Earthquake risk analysis and earthquake damage prediction [M]. Beijing: Seismological Press, 1999. (in Chinese)
- [4] 李小军.工程场地地震安全性评价工作及相关技术问题[J]. 震灾防御技术, 2006, 1(1): 15-24.

- Li X J. Evaluation of seismic safety for engineering sites and relevant technical problems [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2006, 1(1): 15-24. (in Chinese)
- [5] 国家地震局.中国地震烈度区划图(1990)概论[M].北京:地震出版社,1996.
China Earthquake Administration. An introduction to the seismic intensity map of China (1990) [M]. Beijing: Seismological Press, 1996. (in Chinese)
- [6] 胡聿贤.地震工程学(第二版)[M].北京:地震出版社, 2006.
Hu Y X. Earthquake engineering (second edition) [M]. Beijing: Seismological Press, 2006. (in Chinese)
- [7] Papaspiliou M, Kontoe S. Sensitivity of site response analysis on the number of ground motion records and implications for PSHA [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2013, 11(5): 1287-1304.
- [8] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1944, 34(4): 185-188.
- [9] Boore D M, Atkinson G M. Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA , PGV , and 5%-Damped PSA at spectral periods between 0.01 and 10.0 s [J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 99-138.
- [10] 胡剑功.玉溪市山洪地质灾害特征及形成条件分析[D].昆明:昆明理工大学,2005.
Hu J G. Characteristic and formation condition analysis of mountain torrents geological hazard of Yuxi, Yunnan Province [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)
- [11] 张四昌,刘百箴.1970年通海地震的地震地质特征[J].地质科学,1978(4):323-335.
Zhang S C, Liu B C. Seismic geological characteristics of Tonghai earthquake in 1970 [J]. Scientia Geologica Sinica, 1978(4): 323-335. (in Chinese)
- [12] NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures [S]. Washington D.C.: Building Seismic Safety Council of the National Institute of Building Sciences, 2015.
- [13] USGS. V_s30 Models and Data [EB/OL]. (2016-09-07) [2020-04-26]. <https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/>.

(本文责编:赵霞)

(下转第 541 页)