

“一带一路”地区地震区划和防震减灾对策研究

李昌珑, 蒋长胜*

中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

摘要 “一带一路”地区面积辽阔, 活动构造分布广泛, 大地震频繁发生。介绍了“一带一路”地区的潜在震源区划分模型、地震活动性模型、地震动衰减关系模型和场地调整方法, 在“一带一路”地区开展了概率地震危险性计算, 给出了全区 50 年超越概率 10% 的峰值加速度 (PGA) 分布的地震区划图, 并提出不同地震危险性地区防震减灾对策建议。研究表明, 东亚和东南亚西部、太平洋西岸、中亚南部、西亚东部、欧洲南部和非洲东部是“一带一路”地区地震危险性较高的地区, 在 50 年超越概率 10% 的 $PGA > 0.4$ 的地区, 一般民用建筑应采取地震烈度九度设防。

关键词 一带一路; 地震危险性; 地震区划; 抗震设防

“一带一路”的概念于 2013 年首次提出, 是“丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”的简称。至今已有 130 多个国家加入了“一带一路”倡议, 包含亚、欧、非、大洋等大洲的很多地区。本文以“一带一路”沿线地区为基础开展地震区划, 包含上述 4 大洲的主要地区。“一带一路”地区面积辽阔, 活动构造分布广泛, 大地震频繁发生 (图 1)。在该地区开展地震危险性分析工作对该地区的建筑抗震设防、工程设施的减灾设计具有重要意义。

当前世界各国的地震危险性分析主要采用概率地震危险性分析 (probabilistic seismic hazard assessment, PSHA) 方法^[1]。该方法计算场点周边所有可能对场点的地震危险性有贡献的震源及其地震发生率, 结合地震动衰减规律和场地参数调整, 得到场点地震危险性的全概率结果。将地震危险性结果用分区的地震区划图表示出来, 可以作为抗震设防和减灾设计的依据。

在“一带一路”地区, 地震危险性和地震区划研

收稿日期: 2019-12-13; 修回日期: 2020-05-26

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作重点项目 (131551KYSB20160002); 中国地震局地球物理研究所基本科研业务费专项 (DQJB17T04)

作者简介: 李昌珑, 副研究员, 研究方向为地震危险性和地震风险, 电子信箱: changlongli@163.com; 蒋长胜 (通信作者), 研究员, 研究方向为地震学、地球物理学, 电子信箱: jiangcs@cea-igp.ac.cn

引用格式: 李昌珑, 蒋长胜. “一带一路”地区地震区划和防震减灾对策研究[J]. 科技导报, 2020, 38(16): 58-67; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.16.007

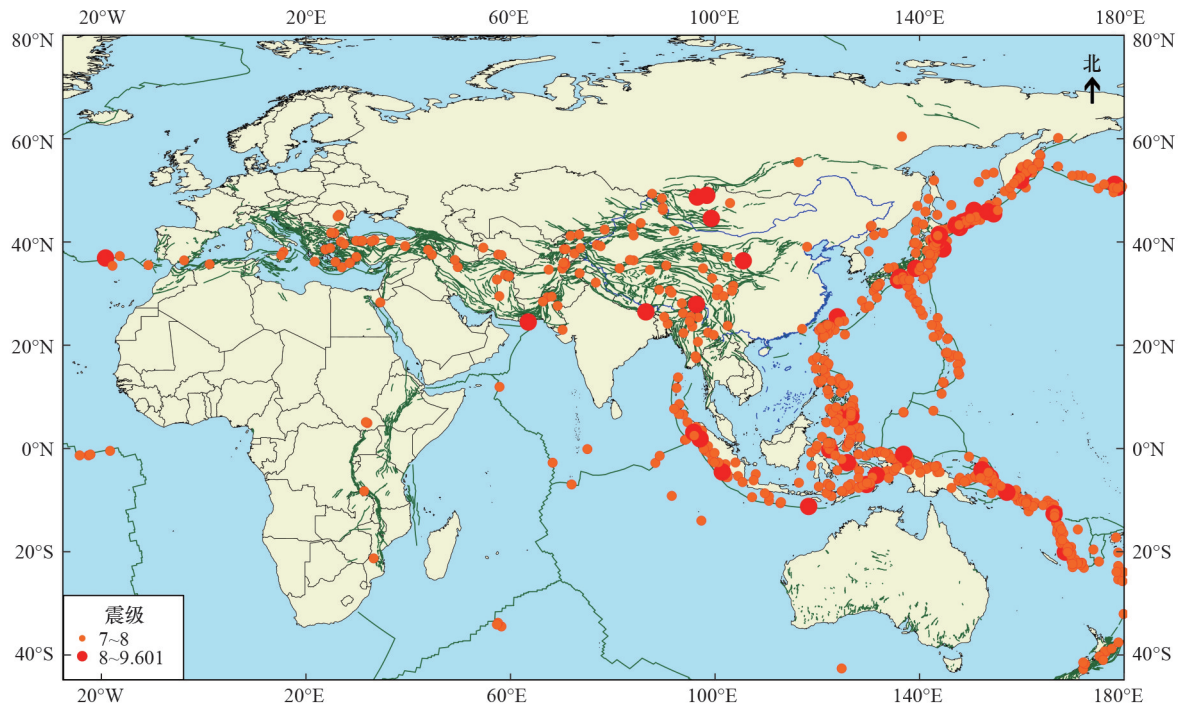


图1 “一带一路”地区活动构造和1900—2017年M7级以上地震分布

究已经有了一定的研究基础。1999年, Giardini等^[2]开展了全球范围的地震区划研究, 绘制了全球50年超越概率10%的峰值加速度(PGA)的地震区划图。近20年来, 在“一带一路”的部分国家和地区, 地震基础研究获得了较多新的资料、数据和成果, 促进了地震危险性和地震区划模型的改进。但目前地区间的研究水平差异仍然较大。欧洲、中国、日本的地震危险性研究水平较高, 非洲、东南亚地区水平较低。

2009—2013年, 欧洲开展了“欧洲地震危险性合作”(seismic hazard harmonization in Europe, SHARE)项目, 建立了“2013欧洲地震危险性模型”^[3-4]。该模型跨越国界, 将欧洲各国, 例如瑞士^[5]、葡萄牙^[6]、比利时^[7]和土耳其的地震危险性数据统一起来。与之前欧洲的PSHA工作相比, SHARE有6点改进^[8]: (1) 编制并更新了统一的PSHA数据库; (2) 多方合作, 采用了数百名欧洲专家的成果; (3) 地震工程学界多学科的投入; (4) 研究成果直接被欧洲相关建筑设计规范采用; (5) 考虑了模型参数和危险性结果的不确定性; (6) 所有数据、结

果和方法完全公开。

从1958年第1代《中国地震烈度区域划分图》^[9]开始, 中国的地震区划研究已经积累了长期的研究经验和丰富的研究成果。2007年, 中国地震局开始主持编撰全新的第5代《中国地震动参数区划图》, 2011年完成主要工作, 并于2015年形成了新的强制性国家标准《中国地震动参数区划图》(GB18306—2015)^[10]。GB18306—2015编制过程中, 根据对中国及邻近地区最新的地震活动性、板块内部块体运动等资料, 形成了全新的地震活动模型。该图在2016年正式公开发布。

日本十分重视地震危险性与地震区划研究, 每2年定期发布新的全国地震区划图(地震动预测地图)。2018年6月, 日本出版了最新的《全国地震动预测地图2018年版》^[11]。该地图在2016年版地图的基础上加入了近2年对于活断层的最新研究成果, 对低频度的大地震采取了新的考虑方法, 绘出了全日本未来30年地震动分别超越5度弱、5度强、6度弱、6度强的概率分布图。

在中亚、中东等发展中国家和地区, 由发达国

家主持牵头的地震危险性研究项目也取得了一定成果^[12-13]。本文在这些研究成果的基础上,介绍“一带一路”地区的潜在震源区划分、地震活动性参数的确定、地震动衰减关系模型和场地参数调整方法,绘制“一带一路”地区的地震区划图,并提出了抗震设防与减灾的对策建议。

1 “一带一路”地区地震区划研究

1.1 潜在震源区划分

潜在震源区划分主要依据对地质构造、断层分布和活动情况的认识。目前,“一带一路”地区开展了潜在震源区划分的地区包括欧洲、中亚、中东和中国。

欧洲的潜在震源区划分如图 2^[13]所示。SHARE 项目将欧洲的潜源分为活跃浅层潜源、稳定浅层潜源、俯冲带、洋中脊等几大类^[13],收集了资料的断层总长度超过 6.4 万 km。

中国的潜在震源区划分如图 3^[14]所示。周本刚等^[14]通过对中国及邻区地震活动特征的深入分析,提出了潜在震源区三级划分的方案:首先划分出作为地震活动性参数统计单元的地震带,在此统计单

元内地震震级频度关系符合 G-R 关系^[15];其次在地震区带内划分出不同背景地震活动特征的地震构造区(背景性地震活动潜在震源区,SBG);最后在地震构造区内围绕地震活动构造划分潜在震源区(构造性地震活动潜在震源区,SST)。潜在震源区三级划分方法是本研究潜在震源区划分中最为突出的特色,在全国划分出 29 个地震带,77 个地震构造区和 1199 个潜在震源区(图 3)。考虑到东西部地区构造活动环境的差异,对西部强震区及东部中强地震区在地震构造划分、潜在震源区划分方法与依据的侧重点有所差异。在西部地区重视不同级别活动块体边界对大地震活动的控制作用^[16],建立了不同类型发震构造模型,并在发震构造模型框架下充分运用构造类比原则,力求划分出潜在的新区和不低估高震级潜在震源区的发震能力;在东部地区加强中强地震构造带的判识,充实中强地震潜在震源区划分的依据。需要注意的是,在这套潜在震源区划分方案中,潜在震源区是潜在地震宏观震中(macro-epicenter)在地表的水平投影区域。

Ullah 等^[12]研究了中亚地区的地震危险性,使用平面震源模型,将所有潜在震源深度都考虑为 ≤ 50 km。中亚的潜在震源区划分如图 4^[12]所示。

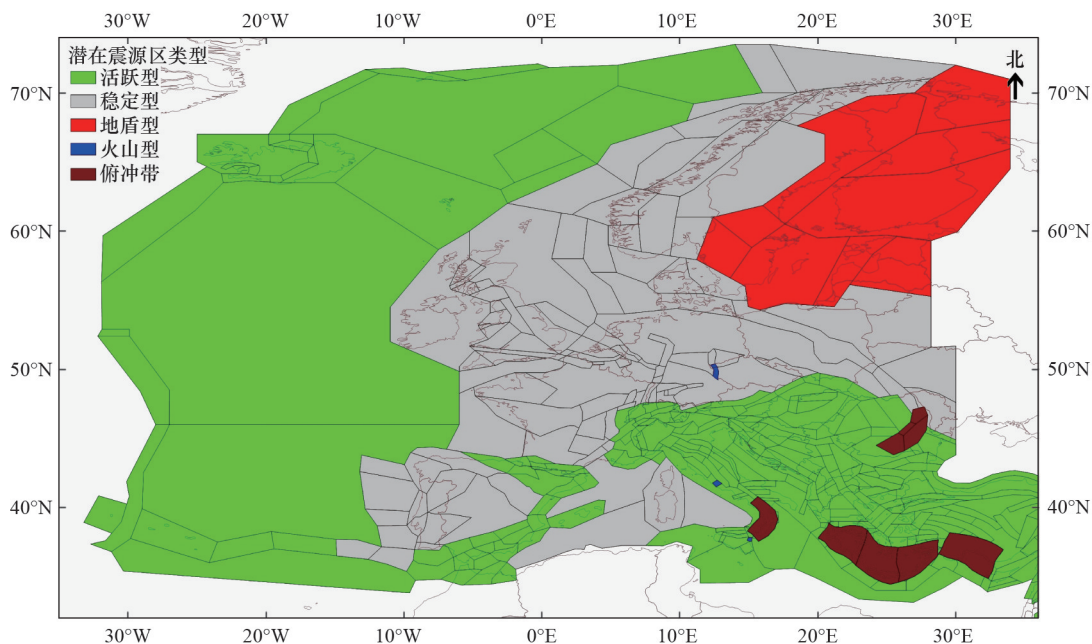


图2 欧洲潜在震源区划分

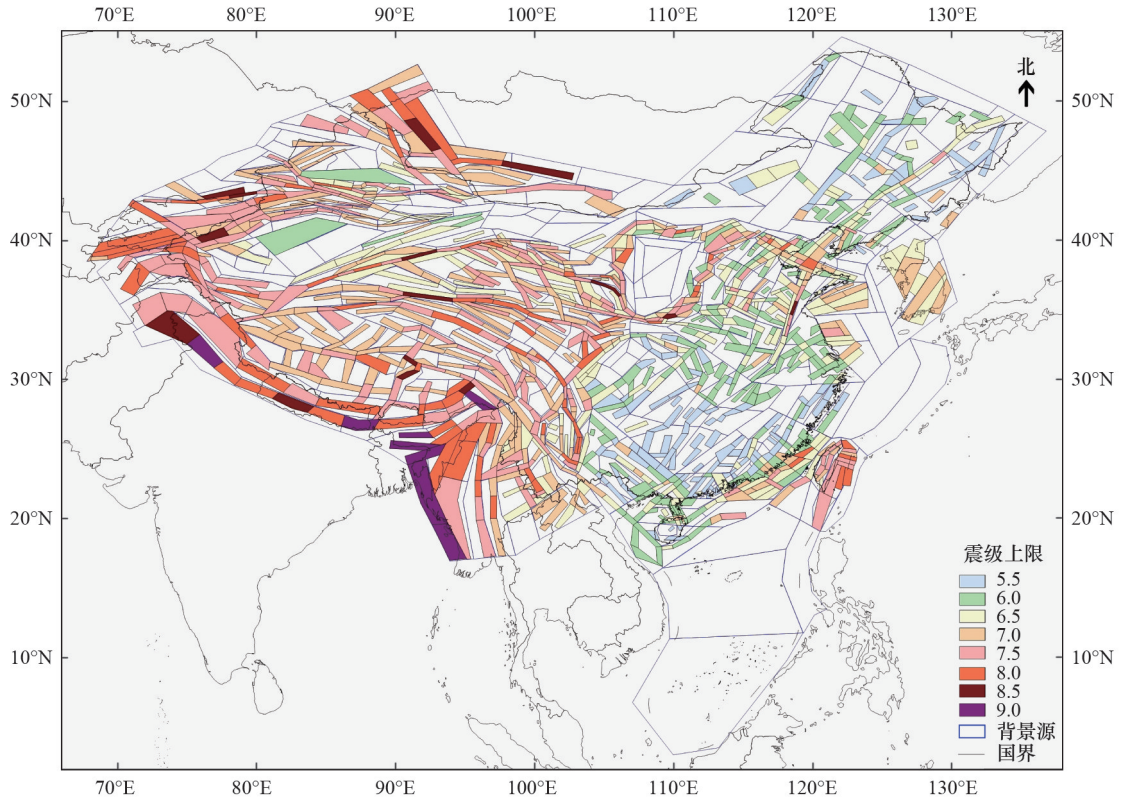


图3 中国潜在震源区分

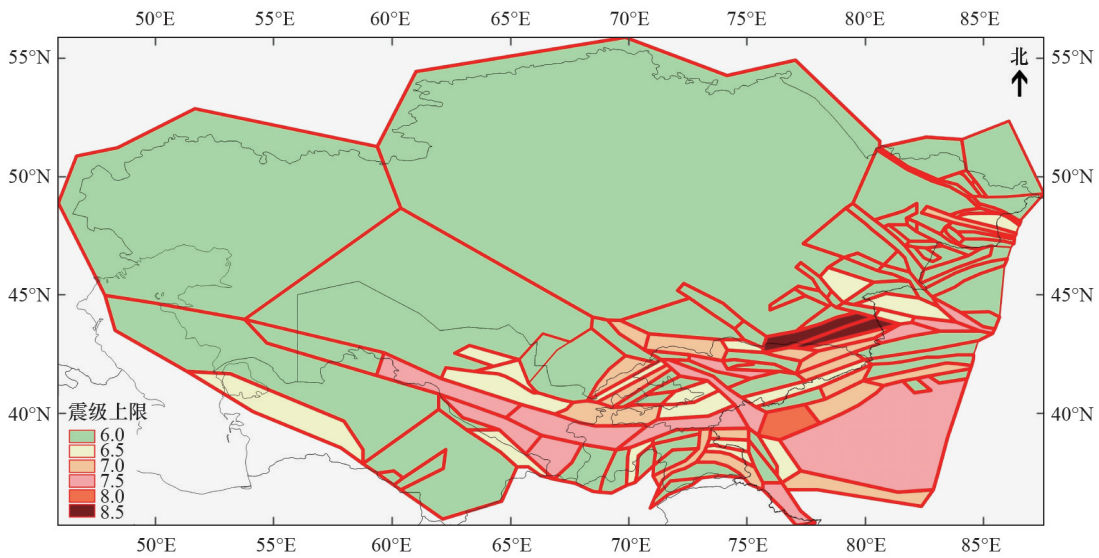
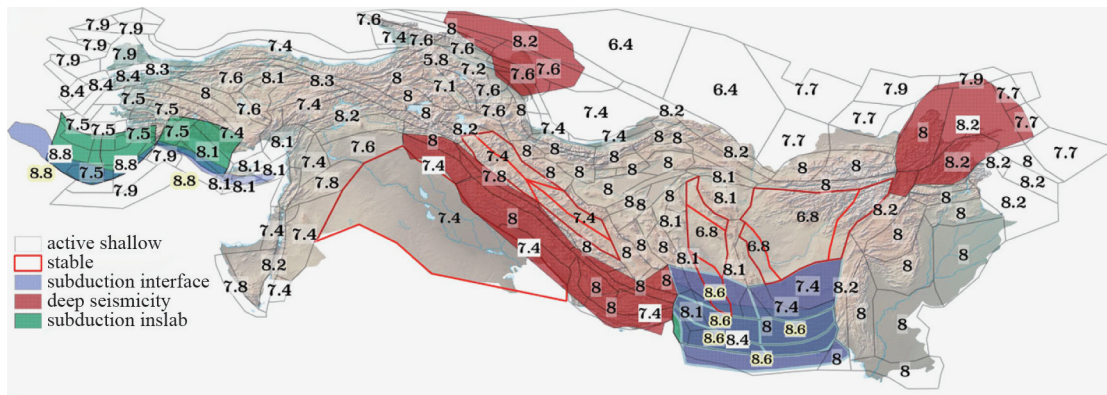


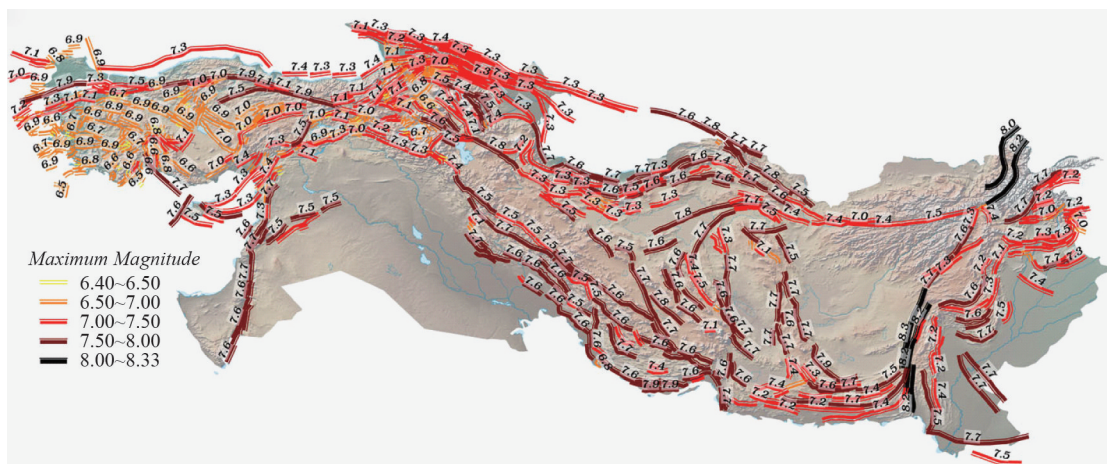
图4 中亚潜在震源区分

Danciu 等^[13]对中东地区开展的地震区划研究中,采用了面源与断层源相结合的潜在震源区分方案(图 5^[13])。其中,面源分为 224 个浅层潜源、6

个俯冲带潜源和 10 个碰撞带深源。对断层源建立三维断层源模型,共考察了超过 3000 个断层段落,总长度超过 9 万 km。



(a) 面源模型



(b) 断层源模型

图5 中东潜在震源区分

在“一带一路”地震区划研究较薄弱地区(例如非洲和东南亚),未形成完备的潜在震源区分方案和模型。这些地区可直接使用地震目录计算地震危险性,例如Petersen等^[17]在东南亚开展的地震危险性研究。

1.2 地震活动性参数确定

地震活动性参数根据地震目录确定。2013年,全球地震模型(global earthquake model, GEM)基金会和国际地震中心(International Seismological Centre, ISC)联合编制了全球地震目录。目录收录了全球有记载以来的历史地震和1900年以来的4.7级以上仪器地震^[18]。Michael^[19]对该地震目录进行了完整性分析,指出最近30年以来全球的5级以上地震记录基本完整,之前的时期在地震监测能力

较弱地区会出现遗漏。

根据地震目录统计的地震发生情况,将地震活动性参数赋予各潜在震源区。中国潜在震源区分模型的地震活动性参数采用划分震级档的方式,在震级4.0~9.0之间每0.5级划分一个震级档,再确定每个震级档的地震发生率。世界其他地区多采用震级的概率密度函数由G-R关系^[15]得到。当前的震级分布 $f_m(m)$ 采用的是Cornell和Vanmarcke^[20]提出的截断的指数分布,表达式为

$$f_m(m) = \frac{\beta \exp[-\beta(m - m_0)]}{1 - \exp[-\beta(m_{uz} - m_0)]} \quad (1)$$

式中, $\beta = b \ln 10$, b 为地震统计区的 b 值, m_0 为震级下限; m_{uz} 为地震统计区震级上限。

1.3 地震动衰减关系模型

地震动衰减关系又称为地震动预测方程 (ground motion prediction equation, GMPE), 描述地震动大小与震级和距离的关系。中国使用的地震动衰减关系为俞言祥等^[21]建立的方程:

$$\lg Y = A + BM + C \lg(R + De^{EM}) \quad (2)$$

式中, Y 为地震动参数, M 为震级, R 为震中距, A 、 B 、 C 、 D 、 E 为已知系数。其中地震动参数包括峰值

PGA 和峰值速度(PGV)。

“一带一路”的其他地区使用的地震动衰减关系也有相似的形式, 但距离参数各有不同, 可为震中距、断层投影距 R_{jb} 或断层破裂面距 R_{mp} 。当一种衰减关系无法表现地震动的复杂性和不确定性时, 常使用逻辑树方法取多个衰减关系的加权和。“一带一路”地区几项区域地震危险性研究使用的地震动衰减关系如表 1 所示。

表 1 “一带一路”地区几项区域地震危险性研究使用的地震动衰减关系

编号	区域	衰减关系(逻辑树)
1	中国	俞言祥等(2013) ^[21]
2	欧洲	Akkar and Bommer (2010) ^[22] × 0.35 + Cauzzi and Faccioli (2008) ^[23] × 0.35 + Zhao et al. (2006) ^[24] × 0.1 + Chiou and Youngs (2008) ^[25] × 0.2
3	中亚	Bindi et al. (2011) ^[26]
4	中东浅层潜源	Akkar et al. (2014) ^[27] × 0.25 + Akkar and Cagnan (2010) ^[28] × 0.25 + Chiou and Youngs (2008) ^[25] × 0.25 + Zhao et al. (2006) ^[24] × 0.25
5	中东俯冲带	Zhao et al. (2006) ^[24] × 0.25 + Youngs et al. (1997) ^[29] × 0.25 + Atkinson and Boore (2003) ^[30] × 0.25 + Lin and Lee (2008) ^[31] × 0.25

1.4 地震危险性算法

地震危险性计算式是 Cornell^[1]、Esteva^[32]和 McGuire^[33]发展的:

$$p(a > A) = \sum_i v_i \int_m \int_r \int_\sigma P(a > A | m, r, \sigma) f_m(m) f_r(r) f_\sigma(\sigma) dm dr d\sigma \quad (3)$$

式中, $p(a > A)$ 是地震动超过 A 的概率, v_i 是第 i 个震源的一个震级档的地震年发生率, 函数 P 是给定震级 m 和震中距 r 的地震使地震动 a 超过 A 的概率。地震动衰减关系的标准差(服从对数正态分布)用 σ 表示。震级、距离和标准差的概率密度函数分别表示为 $f_m(m)$ 、 $f_r(r)$ 和 $f_\sigma(\sigma)$ 。

将多次计算的地震动值及其超越概率整合起来, 可绘出场点的地震危险性曲线。在地震危险性曲线上读出给定超越概率的地震动值, 作为场点的地震危险性结果。

1.5 地震动场地参数调整

由于建立地震动衰减关系使用的强震数据为

基岩场地记录, 由上述方法计算得到的地震危险性表现的也是基岩场地(I类场地)的地震动参数。在实际地震区划图应用中, 工程建筑设施多建设于 II 类场地, 故需对计算得到的地震危险性结果进行场地参数调整。调整的方法参照中国地震动参数区划图使用的方法^[10], 对不同取值范围的 PGA 乘以场地调整系数, 如表 2 所示。

表 2 地震动峰值加速度 II 类场地调整系数

基岩场地 PGA 值/g	调整系数
$PGA \leq 0.05$	1.25
$0.05 < PGA \leq 0.1$	1.22
$0.1 < PGA \leq 0.19$	1.20
$0.19 < PGA \leq 0.28$	1.18
$0.28 < PGA \leq 0.38$	1.05
$PGA > 0.38$	1.00

1.6 “一带一路”地区地震区划

“一带一路”地区的地震区划如图 6 所示。绘图参数为 II 类场地上 50 年超越概率 10% 的 PGA。

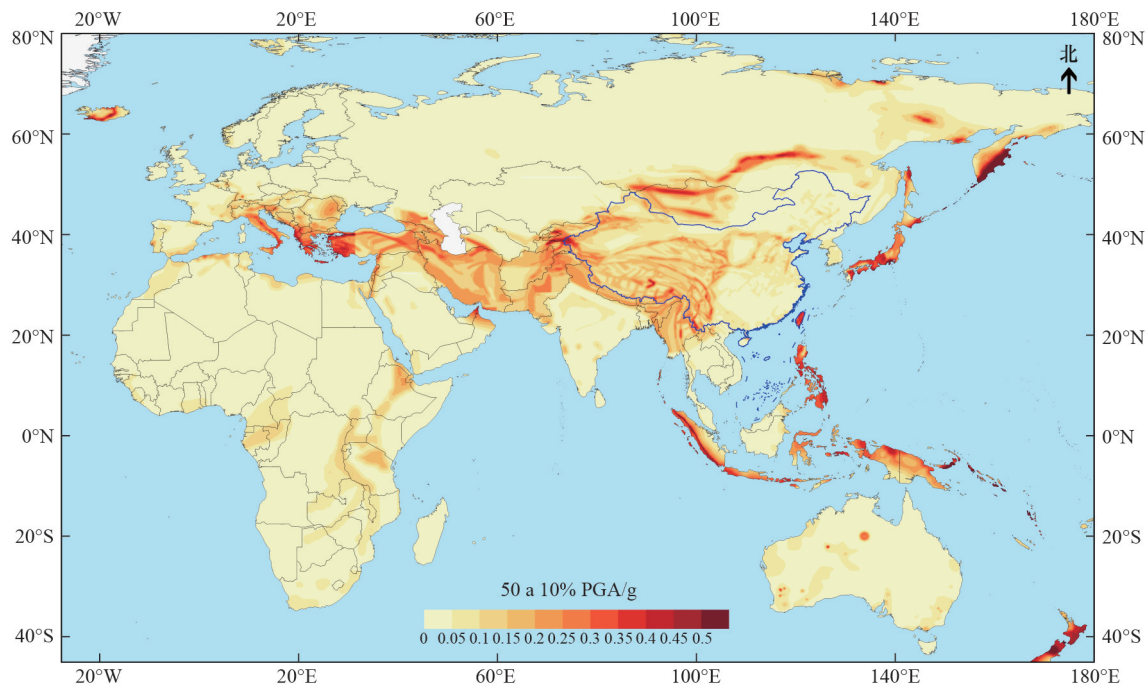


图6 “一带一路”地区地震区划

2 “一带一路”地区减灾建议

2.1 “一带一路”地区地震危险性分布

东亚的地震危险性总体上西部高于东部(图6)。蒙古西部、中国西部和华北处在欧亚地震带上,地震危险性较高。中国台湾处在环太平洋地震带上,地震危险性也较高。蒙古东部、中国东北和华南、朝鲜半岛的地震危险性较低。中亚的地震危险性总体上南部高于北部。南部处在欧亚地震带上,地震危险性较高。哈萨克斯坦北部处在欧亚板块内部,地震危险性较低。东南亚的地震危险性总体上西部高于东部,南部高于北部。缅甸、泰国南部、马来半岛、印度尼西亚处在欧亚地震带和环太平洋地震带的结合部,地震危险性较高。菲律宾处在环太平洋地震带,地震危险性也较高。中南半岛东部的地震危险性较低。南亚的地震危险性总体上北部高于南部。北部处在欧亚地震带,是印度板块和欧亚板块的碰撞带,地震危险性较高,南部处在印度板块内部,地震危险性较低。西亚的地震危险性总体上北部高于南部。北部处在欧亚地震带,

地震带危险性较高。南部处在阿拉伯板块内部,地震危险性较低。

欧洲的地震危险性总体上南部高于北部。南部处在欧亚地震带,地震危险性较高。北部处在欧亚板块内部,地震危险性较低。俄罗斯的地震危险性总体上东部高于西部。高加索地区处在欧亚地震带,地震危险性较高。西伯利亚南部受印度板块碰撞作用影响,地震危险性较高。远东地区处在环太平洋地震带,地震危险性也较高。其他地区位于欧亚板块内部,地震危险性较低。

非洲的地震危险性总体东部高于中西部。东部东非裂谷区地震危险性较高,其他地区多为板内地区,地震危险性较低。澳大利亚大部为稳定的大陆板块,地震危险性总体较低,但零星分布有板内地震活跃地区,地震危险性较高。

这里还须指出,“一带一路”地区地震危险性研究水平在地区间差异较大,本文对于尚未开展潜在震源区划分的国家和地区,沿用了1999年“全球地震危险性分析”项目(Global Seismic Hazard Assessment Program, GSHAP)研究的地震危险性结果。

本文的地震区划图仅计算了地震动参数为50年超越概率10%PGA的地震危险性,而地震动常具有更复杂的特征,尤其地震动反应谱对于不同高度和结构类型的建筑的抗震设防具有重要意义,而这方面的研究也受到地区间发展水平差异的限制。今后应增加这方面的研究。

2.2 防震减灾建议

“一带一路”地区存在面积很广的高地震危险性地区,多数国家面临严峻复杂的地震灾害风险。“一带一路”各国发展水平极不均衡,不发达地区的防震减灾工作亟待提高。因此,参考中国的防震减灾工作经验,结合各国自身实际情况,对中国在“一带一路”沿线国家开展工作提出如下防震减灾对策建议。

1) 中国在“一带一路”地区开展工作,应有地震监测预警工作作为配套保障。在“一带一路”的地震多发区,地震预警能够在地震发生后短时间内发出预警信息,使人员作出快速反应,减少伤亡和损失。因此,应根据地震区划的结果,在高地震危险性地区重点开展地震监测预警系统的建立,为“一带一路”建设提供服务。

2) 中国在“一带一路”地区的工程建设应做好抗震设防和风险防范。根据中国《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》^[34],建筑物需要根据地震危险性及相应的设防等级进行设防加固。对“一带一路”地区,结合抗震规范要求,建议在地震危险性(50年超越概率10%的PGA) $<0.1\text{ g}$ 的地区,一般民用建筑应采用六度设防;在 $0.1\text{ g}\leq$ 地震危险性 $<0.2\text{ g}$ 的地区,一般民用建筑应采用七度设防;在 $0.2\text{ g}\leq$ 地震危险性 $<0.4\text{ g}$ 的地区,一般民用建筑应采用八度设防;在地震危险性 $\geq 0.4\text{ g}$ 的地区,一般民用建筑应采用九度设防。对于重大工程,应采用更严格的设防标准,必要时单独开展地震安全性评价工作。

3) 开展国际合作,在“一带一路”地区建立地震应急救援体系。在地震区划图的高地震危险性地区,需要特别做好应急备灾工作。工程建设部门应与当地政府部门和国内相关机构密切合作,了解当地法律法规和社会制度,建立大震应急救援体

系,在地震灾害发生后,有效开展自救互救,减轻伤亡和损失。

3 结论

介绍了“一带一路”地区开展概率地震危险性分析和地震区划的资料、模型和方法,绘制了该区50年超越概率10%PGA的地震区划图并给出了防震减灾对策建议。主要结论如下。

1) “一带一路”地区主要国家和地区的地震危险性和地震区划研究方法类似,使用的模型形式也基本相同,但地区间研究水平差异较大。

2) 东亚和东南亚西部、太平洋西岸、中亚南部、西亚东部、欧洲南部和非洲东部是“一带一路”地区地震危险性较高的地区。

3) 中国在“一带一路”沿线国家开展工作,应通过相应措施做好地震监测预警、工程抗震设防和风险防范、建立地震应急救援体系,保障“一带一路”各项工作的顺利开展。

中国当前已经进入了第6代全国地震区划图的编制周期,新一代区划图预计将在模型、算法以及产品的多样性等方面继续有所创新。国际上也有一些组织正在开展跨国、跨大洲范围的地震区划合作研究(如GEM基金会),并且已经获得了多个国家的配合和帮助。中国未来也需要更多的科技输出,保障“一带一路”的地震安全,同时开展更多的国际合作,与各国一起做好“一带一路”地震区划和防震减灾工作。

致谢 地震危险性计算使用GEM开发的Open-Quake软件^[35]。

参考文献(References)

- [1] Cornell C A. Engineering seismic risk analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1968, 58(5): 1583-1606.
- [2] Giardini D, Gruenthal G, Shedlock K M, et al. The GS-HAP global seismic hazard map[J]. Annals of Geophysics, 1999, 42(6): 1225-1230.

- [3] Giardini D, Woessner J, Danciu L, et al. Mapping Europe's seismic hazard[J]. EOS, Transactions, American Geophysical Union, 2014, 95(29): 261-268.
- [4] Woessner J, Laurentiu D, Giardini D, et al. The 2013 European seismic hazard model: Key components and results [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2015, 13(12): 3553-3596.
- [5] Schwarz C. Towards a Swiss national earthquake risk model: Sensitivity and gap analysis[R]. Delft: University of Technology, 2015.
- [6] Silva V, Crowley H, Varum H, et al. Seismic hazard and risk assessment of Portugal[C]//Second European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul, Aug 25-29, 2014.
- [7] Vanneste K, Vlemminckx B, Verbeeck K, et al. Development of seismic hazard maps for Belgium[C]//Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE): DGEB-Workshop, 2014.
- [8] 李昌珑, 吴健, 徐伟进, 等. 全球地震模型(GEM)研究进展综述及应用前景展望[J]. 震灾防御技术, 2016, 11(3): 582-591.
- [9] 李善邦. 中国地震烈度区域划分图说明[J]. 地球物理学报, 1957, 6(2): 127-158.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中国地震动参数区划图[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2015.
- [11] 地震调查研究推进本部, 地震调查委员会. 全国地震动预测地图2018年版[R]. 东京: 地震调查研究推进本部事务局, 2018.
- [12] Ullah S, Bindi D, Pilz M, et al. Probabilistic seismic hazard assessment for Central Asia[J]. Annal Geophys, 2015, 58(1): 0103S.
- [13] Danciu L, Şeşetyan K, Demircioglu M, et al. The 2014 earthquake model of the middle east: Seismogenic sources[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018(16): 3465-3496.
- [14] 周本刚, 陈国星, 高战武, 等. 新地震区划图潜在震源区划分的主要技术特色[J]. 震灾防御技术, 2013, 8(2): 113-124.
- [15] Gutenberg B, Richter C F. Frequency of earthquakes in California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1944, 34(4): 185-188.
- [16] Zhang P Z, Deng Q D, Zhang G M, et al. Active tectonic blocks and strong earthquakes in continental China[J]. Science in China (Series D), 2003(46): 13-24.
- [17] Petersen M, Harmsen S, Mueller C, et al. Documentation for the Southeast Asia seismic hazard maps[R]. Reston: Geological Survey, 2007.
- [18] Storchak D A, Di Giacomo D, Bondár I, et al. Public release of the ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue (1900-2009)[J]. Seismological Research Letters, 2013, 84(5): 810-815.
- [19] Michael A J. How complete is the ISC-GEM global earthquake catalog[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2014, 104(4): 1829-1837.
- [20] Cornell C A, Vanmarcke E H. The major influence on seismic risk[C]. Santiago: The Fourth World Conference on Earthquake Engineering, 1969.
- [21] 俞言祥, 李山有, 肖亮. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. 震灾防御技术, 2013, 8(1): 24-33.
- [22] Akkar S, Bommer J J. Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East[J]. Seismological Research Letters, 2010, 81(2): 195-206.
- [23] Cauzzi C, Faccioli E. Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records[J]. Journal of Seismology, 2008, 12(4): 453.
- [24] Zhao J X, Zhang J, Asano A, et al. Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2006, 96(3): 898-913.
- [25] Chiou B S J, Youngs R R. An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 173-215.
- [26] Bindi D, Pacor F, Luzi L, et al. Paolucci and published as "Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion data"[J]. Bulletin Earthquake Engineering, 2011, doi: 10.1007/s10518-011-9313-z.
- [27] Akkar S, Sandikkaya M A, Bommer J J. Empirical ground-motion models for point-and extended-source crustal earthquake scenarios in Europe and the Middle East[J]. Bulletin of earthquake engineering, 2014, 12(1): 359-387.
- [28] Akkar S, Cagnan Z. A local ground-motion predictive model for Turkey, and its comparison with other regional and global ground-motion models[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(6): 2978-2995.
- [29] Youngs R R, Chiou S J, Silva W J, et al. Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes[J]. Seismological Research Letters, 1997, 68

- (1): 58–73.
- [30] Atkinson G M, Boore D M. Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(4): 1703–1729.
- [31] Lin P S, Lee C T. Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in northeastern Taiwan[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(1): 220–240.
- [32] Esteva L. Seismic risk and seismic design decisions[M]// *Seismic Design for Nuclear Power Plants*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 1970: 142–182.
- [33] McGuire R K. Fortran computer program for seismic risk analysis[R]. Reston: Geological Survey, 1976: 67–76.
- [34] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010.
- [35] Pagani M, Monelli D, Weatherill G, et al. Openquake engine: An open hazard (and risk) software for the global earthquake model[J]. *Seismological Research Letters*, 2014, 85(3): 692–702.

Seismic hazard mapping and earthquake disaster mitigation measures in the Belt and Road areas

LI Changlong, JIANG Changsheng*

Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081

Abstract The Belt and Road area is vast, with a wide distribution of active seismogenic structures and frequent earthquakes. The seismic hazard assessment and the seismic hazard mapping in this area are of great significance in the earthquake prevention of buildings and the disaster mitigation design of engineering facilities. This paper analyzes the seismogenic source area division model, the seismicity model, the ground motion attenuation relationship model and the site adjustment method in the Belt and Road area. The probabilistic seismic hazard calculation is carried out in the area, and the seismic hazard map of the peak ground acceleration (PGA) distribution with 10% probability of exceedance in 50 years is obtained, and the countermeasures for the earthquake prevention and the disaster mitigation in different seismic hazard areas are proposed. It is shown that the East and Southeast Asia, the western Pacific Ocean, the southern Central Asia, the eastern West Asia, the southern Europe and the eastern Africa are areas with a high seismic hazard in the Belt and Road regions. In the area with the PGA larger than 0.4 with 10% probability of exceedance in 50 years, the general civil buildings should be equipped with the capacity to resist a seismic intensity of 9 degrees.

Keywords the Belt and Road; seismic hazard; seismic hazard mapping; earthquake prevention ●



(责任编辑 徐丽娇)