

文章编号: 1006-6616 (2017) 01-0115-10

基于 Newmark 模型的尼泊尔 M_s 8.1 级地震滑坡危险性快速评估

杨志华^{1,2}, 张永双^{1,2}, 郭长宝^{1,2}, 杜国梁^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京 100081)

摘要: 在研究分析地震灾区地形地貌、地层岩性、地质构造、气象水文和典型地区滑坡的基础上, 采用 Newmark 斜坡累积位移模型对 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 M_s 8.1 级地震诱发的滑坡危险性的空间分布状况进行了快速评估, 通过典型地区的滑坡遥感解译结果验证表明评估结果具有较好的可信度, 初步反映了尼泊尔地震诱发滑坡危险性分布的基本特征。然后考虑降雨作用对震后滑坡危险性的影响, 对地震叠加降雨诱发滑坡危险性分布进行了快速预测。研究结果对地震应急救援中的地质灾害防灾减灾具有重要的参考意义。

关键词: M_s 8.1 级尼泊尔地震; Newmark 模型; 滑坡危险性; 快速评估; 西藏

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

0 引言

2015 年 4 月 25 日 14 时 11 分, 在尼泊尔博克拉以东 ($N28.2^\circ$, $E84.7^\circ$) 发生 M_s 8.1 级地震, 震源深度 20 km, 震中峰值加速度 $1.02 g$, 震中距离我国西藏日喀则市约 425 km。重烈度区从震中向东延伸, 等震线长轴总体呈北西西走向, 最大地震烈度大于 IX 度, 烈度 VI 度及以上区域面积约 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$, 地震造成尼泊尔、中国、印度和孟加拉国等国受灾。当日 14 时 45 分, 在尼泊尔 ($N28.3^\circ$, $E84.8^\circ$) 发生 M_s 7.0 级地震, 震源深度 30 km; 17 时 17 分, 在我国西藏日喀则地区的定日县 ($N28.4^\circ$, $E87.3^\circ$) 发生 M_s 5.9 级地震, 震源深度 20 km。

截至 2015 年 5 月 13 日, 地震至少造成 8219 人死亡, 17866 人受伤, 中国西藏南部、印度、孟加拉国、不丹等地均出现人员伤亡。由地震引起的崩塌、滑坡等地质灾害造成公路中断、房屋倒塌, 部分滑坡堵塞河流形成堰塞湖, 给抗震救灾

造成巨大影响。震区历年降雨量较大, 且局地短时强降雨量较大, 随着震区渐入雨季, 在极端强降雨作用下, 震区发生滑坡、泥石流灾害风险加剧。

尼泊尔地震发生在印度板块与欧亚板块碰撞带的喜马拉雅主断裂带上, 属于罕见的破裂面接近水平 (倾角约 11°) 的逆冲型特大地震, 震中烈度相对偏低, 余震区面积大, 地震引起的应力调整对邻区和周边活动断裂可能产生重要影响^[1]。尼泊尔地震标志着喜马拉雅构造带自 1950 年以来半个世纪的平静期已经结束, 进入新活动期, 预计将持续十到几十年^[2]。地震发生后, 我国政府启动应急预案, 派遣专家赴尼泊尔地震灾区和西藏地区开展抗震救灾活动, 急需地震诱发滑坡危险性分布状况。在研究分析地震灾区地形地貌、地层岩性、地质构造、气象水文和典型地区滑坡的基础上, 采用 Newmark 斜坡累积位移模型^[3-5]对尼泊尔地震滑坡危险性空间分布状况进行了快速评估, 通过部分地区的滑坡遥感解译结果验证表明评估结果具有较好的可信度, 初步反映了尼

收稿日期: 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41502313); 国家科技基础性工作专项 (2011FY110100-2)

作者简介: 杨志华 (1982-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事工程地质与地质灾害防治等研究工作。E-mail: yangzh99@163.com

通讯作者: 张永双 (1968-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事工程地质与地质灾害防治等研究工作。E-mail: zhys100@sohu.com

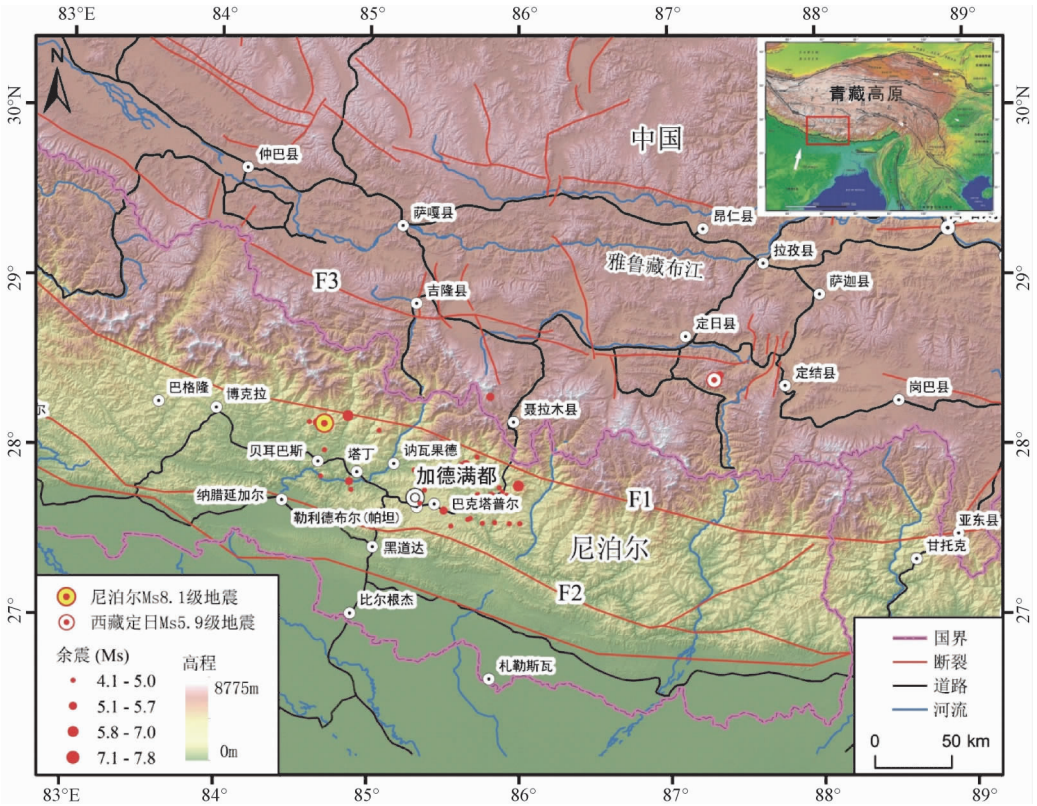
泊尔地震诱发滑坡危险性具有沿断裂带分布、与地震烈度关系密切、受地形影响显著等与地震滑坡既有认识一致的基本特征^[6-8]。然后考虑降雨作用对震后滑坡危险性的影响,对地震叠加降雨诱发滑坡危险性分布状况进行了快速预测。研究结果对地震应急救援中的地质灾害防灾减灾具有重要的参考意义。

1 研究区概况

尼泊尔地势北高南低(见图1),境内大部分

属丘陵地带,东、西、北三面多高山,中部河谷区,多小山,南部是冲积平原,分布着森林和草原。尼泊尔北部喜马拉雅地区,海拔高度在4877~8844 m之间,中部山区占尼泊尔国土面积的68%。尼泊尔地区气候差异明显,主要可以分为北部高山、中部温带和南部亚热带三个气候区。

尼泊尔和我国藏南比邻区域降雨主要受印度西南季风和青藏高原地形阻挡共同影响,其中80%的年降雨量发生在夏季风活跃期(6—9月)。尼泊尔雨季(6—9月)降雨空间分布非常不均匀,首都加德满都的降雨量为1100 mm,加德满都东侧



F1—喜马拉雅中央主断裂; F2—喜马拉雅边界主断裂; F3—藏南滑脱分离系断裂

图1 尼泊尔及中国藏南地区地理地貌图

Fig. 1 Geographical landform in Nepal and southwest Tibet of China

的奥卡尔东加站点的降雨非常丰沛,达到1400 mm,加德满都西侧的久姆拉站点的降雨量减少到520 mm。雨季(6—9月)加德满都平均气温为24℃,最高和最低气温分别为28.5℃和19.5℃。尼泊尔全国台站最高气温主要出现在6月,雨季平均气温在16℃左右,年际变化在14~18℃范围。

尼泊尔和喜马拉雅地区可分为5个构造带:印度特莱构造带、中喜马拉雅构造带、低喜马拉雅构造带、高喜马拉雅构造带、西藏特提斯喜马拉雅造山带。在喜马拉雅地区,有两条横贯全境的

大断裂,即中央主断裂和边界主断裂,正好把三个喜马拉雅地带分开。中央断裂层是把喜马拉雅山推到8000 m高度的一条断裂带,断层附近是片麻岩或花岗岩。研究区内自元古界到第四系地层均有出露(见图2),尼泊尔境内以元古界、前寒武系地层为主,北部喜马拉雅地区以古生界和侏罗系地层为主。尼泊尔境内分布大量古生界变质岩,但是此次尼泊尔地震的震中位于花岗岩地层中。南部分布新近系、第四系沉积地层。

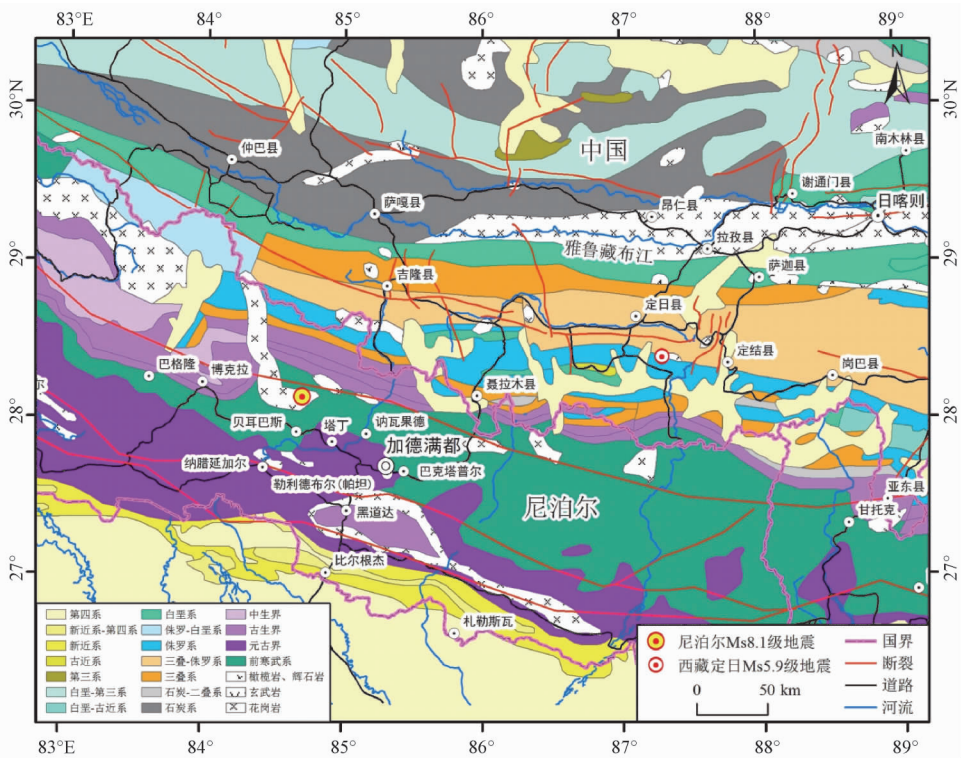


图2 尼泊尔及中国藏南区域地质图

Fig. 2 Geological map of Nepal and southwest Tibet of China

2 尼泊尔地震地质灾害基本特征

尼泊尔地震灾区主要位于喜马拉雅山南麓, 地形地貌复杂, 北部为著名的喜马拉雅山脉, 中南部为河谷区和冲积平原, 地形起伏度大。复杂的地形地貌和地质条件导致地震过程中地面震动反应强烈, 造成大面积岩体破碎, 斜坡破坏严重。地质灾害赋存的地质环境条件发生变化, 增加了地质灾害易发性和危险性。

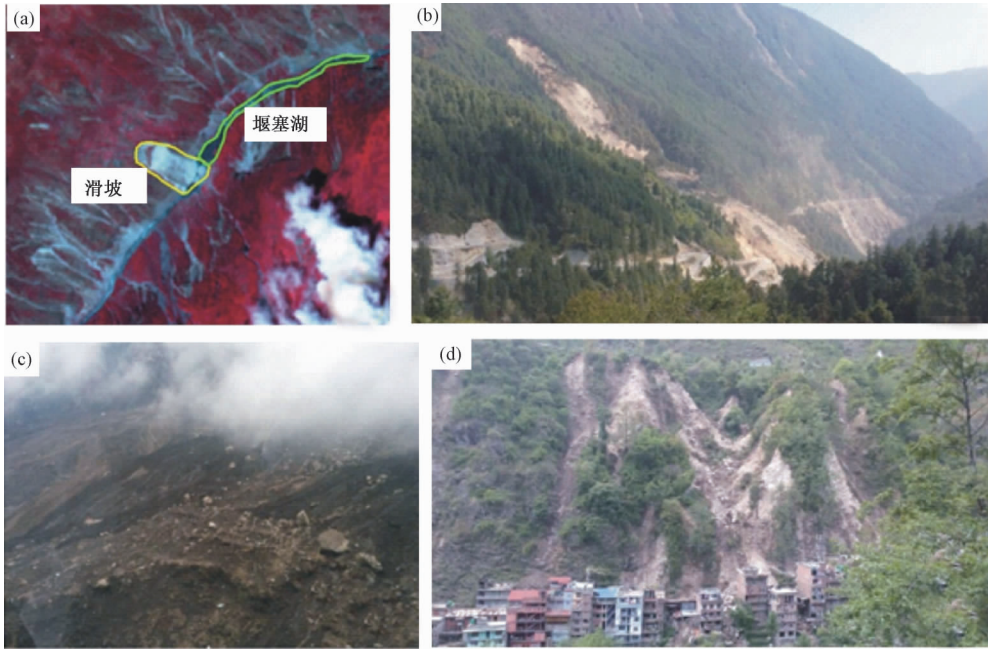
地震诱发了大量崩塌、滑坡等地质灾害。中国科学院成都山地灾害与环境研究所在中国资源卫星应用中心的数据支持下, 通过遥感影像处理和地震前后影像对比, 解译出尼泊尔境内和我国藏南地区发生崩塌、滑坡等地质灾害 375 处。其中, 尼泊尔 Betrawati 至我国吉隆热索口岸公路沿线有崩塌、滑坡 113 处、堰塞湖 4 个; 尼泊尔 Pangretar 至我国聂拉木樟木口岸公路沿线崩塌、滑坡 36 处。

地震发生后, 珠穆朗玛峰北坡海拔约 7000 m 处发生雪崩, 南坡的雪崩致使两个登山者营地被雪覆盖, 多名登山者伤亡。地震造成我国西藏聂拉木县崩塌滑坡 5 处、吉隆县崩塌滑坡 15 处, 造

成樟木口岸边坡发生滚石 (见图 3c) 以及古滑坡后缘局部发生拉裂 (见图 3d)。根据国土资源部尼泊尔地震应急专家组、遥感影像分析、现场调查, 国道 318 线聂拉木至日喀则段有长约 40 km 的局部路段发生落石和塌方, 道路双向中断, 其中 G318 吉隆镇口岸处发生大型滑坡 (见图 3b), 为地震诱发老滑坡复活, 滑坡体积约 $270 \times 10^4 \text{ m}^3$, 造成国道中断, 并形成堰塞湖 (见图 3a)。

3 尼泊尔地震滑坡危险性快速评估

尼泊尔地震发生后, 地震灾区发生了多起地质灾害事件, 并造成人员伤亡和财产损失, 迫切需要对地震滑坡危险性的空间分布做出快速评估, 为抗震救灾、灾民安置和灾后重建提供参考。由于缺乏地震地质灾害和历史地质灾害详细目录, 传统的层次分析法^[9]、信息量模型^[10]、加权线性叠加^[11]、证据权模型^[12]、支持向量机^[13]、贝叶斯网络^[14]和逻辑回归^[15]等统计分析方法^[16-19]不适应本次研究。因此, 本文选用 Newmark 斜坡累积位移模型来快速评估尼泊尔地震滑坡危险性。



a—吉隆滑坡形成堰塞湖；b—吉隆滑坡；c—地震引起樟木口岸边坡发生滚石；d—地震引起樟木滑坡发生局部变形

图3 尼泊尔地震诱发典型崩塌、滑坡和堰塞湖实例 (据尼泊尔地震应急专家组)

Fig. 3 Typical cases of Nepal earthquake-induced geo-hazards

3.1 Newmark 模型基本原理

Newmark 模型的理论基础是无限斜坡的极限平衡理论，滑块的永久位移是在地震荷载作用下，滑动块体沿着最危险滑动面发生瞬时失稳后位移不断累积所致^[20]。当施加于最危险滑动面处的加速度超过临界加速度时，块体即沿破坏面发生滑动；将外荷载加速度与临界加速度的差值部分对时间进行二次积分即可得到永久位移（见图4）^[4]。

经典的 Newmark 累积位移计算需要完整的地震动加速度记录，在缺乏地震动加速度记录的情况下，可以采用基于统计分析的简化 Newmark 位移模型^[4, 21, 5]，计算过程包含4个主要步骤：（1）采用岩土体强度和斜坡形态参数，计算区域斜坡静态安全系数 F_s ；（2）利用 F_s 和坡度，计算坡体临界加速度 a_c ；（3）利用 a_c 和峰值地面加速度（PGA），计算地震诱发斜坡体发生的永久滑动位移量（ D_n ）；（4）统计分析斜坡位移量与滑坡发生之间的相关关系，并进行地震滑坡发生概率计算和危险性评价。

3.2 地震滑坡危险性快速评估

3.2.1 斜坡体静态安全系数

根据研究区地质构造（见图1）和地层岩性（见图2），划分工程地质岩组（见图5a），包含5个类别：松散岩组、软弱岩组、较坚硬岩组、坚硬岩组和冰川水体。根据工程地质手册^[22]赋予岩

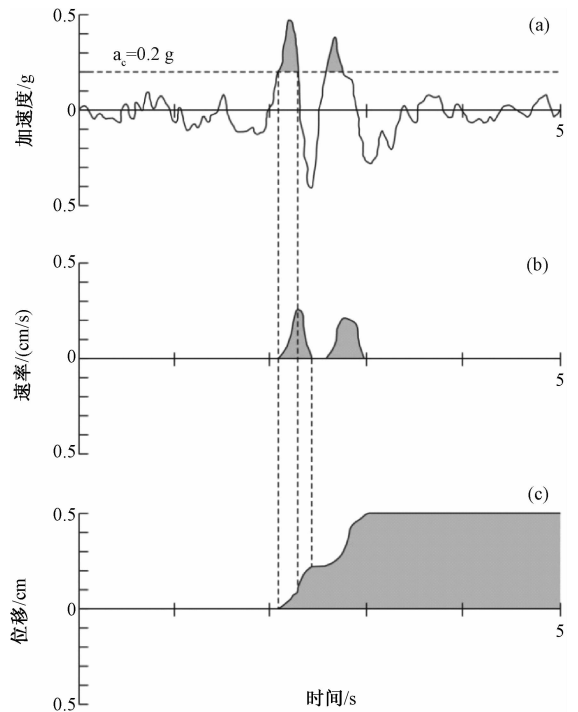
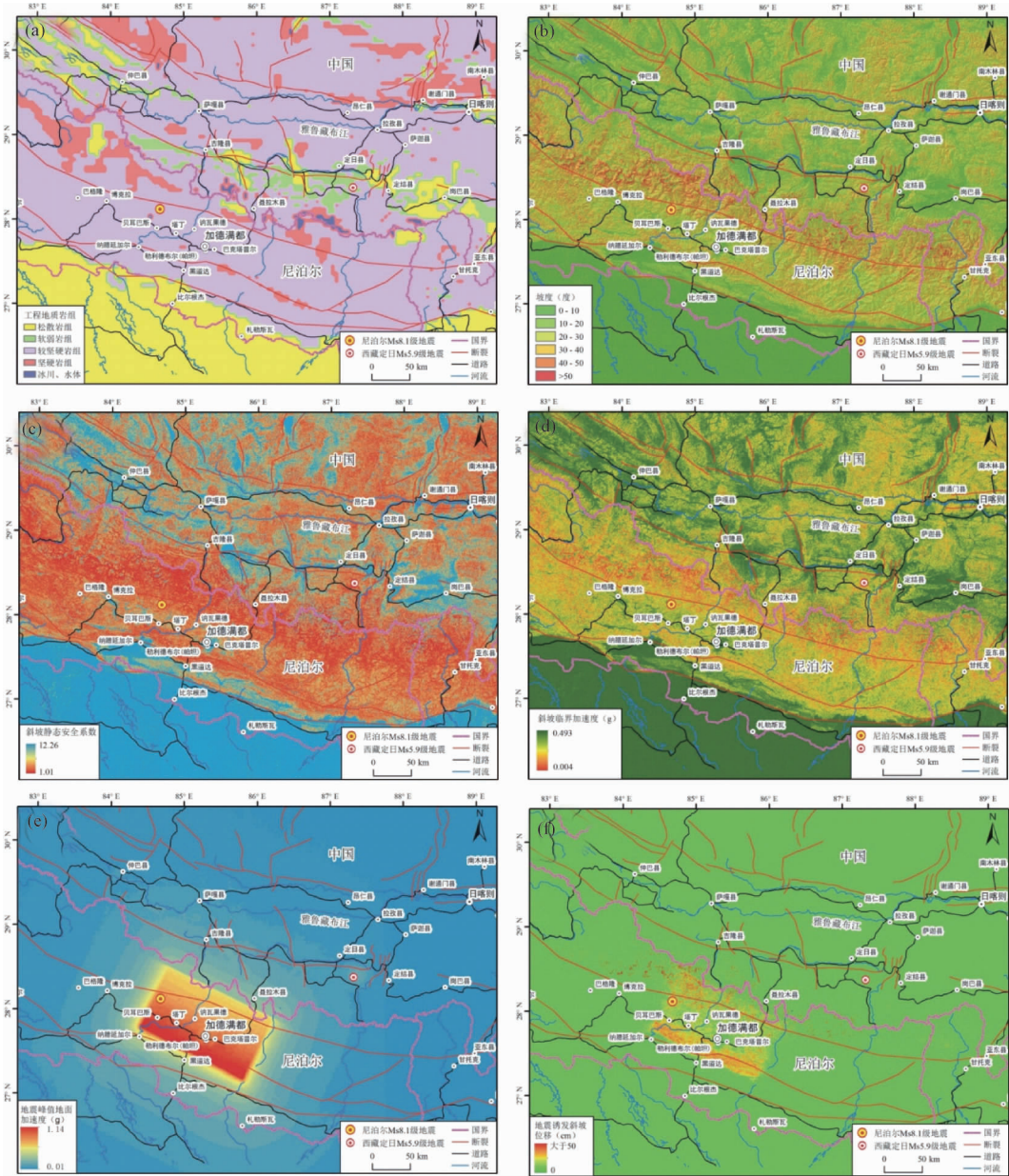


图4 Newmark 模型的累积位移计算过程示意图^[4]

Fig. 4 Schematic diagram of calculation process of cumulative displacement of Newmark model

土体初始强度参数，结合斜坡形态参数（见图5b），按照公式1^[4]计算区域斜坡静态安全系数 F_s ，根据 F_s 的计算结果，调整岩土体强度参数，并进



(a) 工程地质岩组, (b) 斜坡坡度, (c) 静态安全系数, (d) 临界加速度, (e) 地震峰值地面加速度, (f) 地震诱发斜坡位移。

图 5 尼泊尔地震滑坡危险性快速评估过程。

Fig. 5 Rapid assessment procedure of Nepal earthquake-induced landslide hazard

行迭代计算, 保证 F_s 的最小值大于 1。

$$F_s = \frac{c'}{\gamma t \sin \alpha} + \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} - \frac{m \gamma_w \tan \varphi'}{\gamma \tan \alpha} = \frac{c'}{\gamma t \sin \alpha} + (1 - \frac{m \gamma_w}{\gamma}) \times \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} \quad (1)$$

式中, c' 是有效内聚力, kPa; φ' 是有效内摩擦角, ($^\circ$); γ 是岩土体重度, kN/m^3 ; γ_w 是地下水重度, kN/m^3 ; t 是潜在滑体厚度, m; α 是潜在滑面倾角, ($^\circ$), m 是潜在滑体中饱和部分占总滑体厚度的比例。

图 5c 是最终获得的斜坡静态安全系数 F_s 分布图, 可以表征在没有地震和降雨等外在触发条件下的滑坡易发程度。斜坡静态安全性受地形影响显著, 与斜坡坡度具有较大相关性, 具有较低静态安全性的斜坡主要分布在喜马拉雅南麓, 总体上呈 NWW-SEE 分布, 大量的不稳定斜坡位于高山峡谷区以及河流、道路沿线。

3.2.2 斜坡体临界加速度

评价地震斜坡位移, 需要计算斜坡的临界加速度, 它是触发斜坡发生位移变形的最小外荷载

加速度，在同等外荷载加速度情景下，临界加速度越小，斜坡发生的位移变形越大。采用斜坡静态安全系数 F_s 和地形坡度，按照公式 2^[20] 计算坡体临界加速度 a_c 。公式 2 中， g 为重力加速度 (m/s^2)， α 为潜在滑面倾角。斜坡临界加速度 a_c 计算结果见图 5d，其空间分布特征与斜坡静态安全系数 F_s 具有较大相似性，较小临界加速度 a_c 主要位于地形复杂的喜马拉雅地区，呈现 NWW-SEE 分布，受地形坡度影响较大。

$$a_c = (F_s - 1)g\sin\alpha \quad (2)$$

3.2.3 地震诱发斜坡位移

采用斜坡临界加速度 a_c 和尼泊尔地震、西藏定日地震峰值地面加速度 (a_{max}) (USGS) (见图 5e)，按照公式 3^[21] 计算地震诱发斜坡位移量 (D_N)，其中，较大斜坡位移主要分布在较小临界加速度和较大峰值地面加速度区域 (见图 5f)。

$$\log D_N = 0.215 + \log \left[\left(1 - \frac{a_c}{a_{max}} \right)^{2.341} \left(\frac{a_c}{a_{max}} \right)^{-1.438} \right] \quad (3)$$

3.2.4 地震诱发滑坡危险性

地震诱发斜坡位移并不表征一定会发生滑坡灾害，只有斜坡位移累积到一定程度，斜坡才会

失稳并沿滑动面滑坡而发生滑坡灾害。因此，采用斜坡位移和滑坡发生之间的统计关系 (公式 4^[4]) 来计算尼泊尔地震滑坡发生的概率，并进行危险性分区。公式 4^[4] 中， $P(f)$ 是地震滑坡发生概率， D_n 是斜坡位移， m ， a 和 b 是常量参数。

$$P(f) = m[1 - \exp(-aD_n^b)] = 0.335[1 - \exp(-0.048D_n^{1.565})] \quad (4)$$

评价结果 (见图 6) 表明：地震诱发滑坡极高和高危险区面积达 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，主要位于烈度 VIII 度以上区域，受断裂构造控制作用明显，自震中向东南延伸，呈 NWW 展布，加德满都南北两侧的两条大型断裂带 (喜马拉雅中央主断裂和喜马拉雅边界主断裂) 对地震滑坡分布具有重大影响。对比分析地震滑坡危险性分布与震后遥感解译地质灾害数据库的相关性 (见图 7)：81% 的地震地质灾害位于极高和高危险区，17% 位于中危险区。尼泊尔首都加德满都位于烈度 VIII-IX 度区域，虽然地震造成了大量房屋倒塌，但是此处地势平坦，地震滑坡危险性较低。尼泊尔地震对我国的影响区域主要分布在西藏与尼泊尔的交界部位，包括吉隆县、聂拉木县和定日县等。西藏定日地震诱发滑坡危险性较小，仅在震中周围有少量的中等滑坡危险性区域。

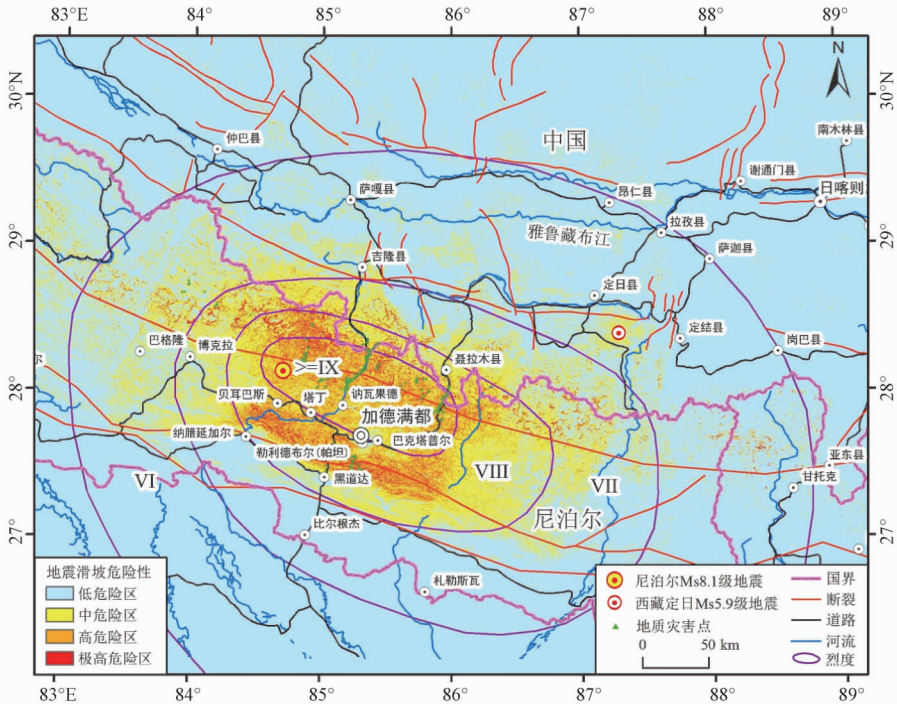


图 6 尼泊尔地震诱发滑坡危险性分布图

Fig. 6 Distribution map of Nepal earthquake-induced landslide hazard

3.3 震后降雨诱发滑坡危险性快速预测

尼泊尔大部位于亚热带地区，受南亚热带季

风影响大，受北部喜马拉雅山脉的阻挡作用，降雨量丰富。震区降雨分布严重不均，最大年降雨量

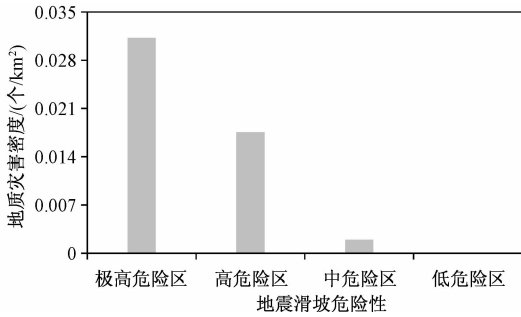


图 7 尼泊尔地震诱发滑坡危险性快速评价结果与地质灾害分布统计关系图

Fig. 7 Statistical relationship between earthquake-induced landslide hazard distribution and field landslide case distribution resulted from post-earthquake rapid remote sensing interpretation

520 ~ 1400 mm, 80% 的年降雨量发生在 6—9 月,

其中 7—8 月是极端降雨频发期, 最大日极端降雨量达 405 mm, 降雨作用曾导致尼泊尔地区大型滑坡、泥石流事件频繁发生, 并导致严重人员伤亡和财产损失^[23]。

地震改变了震区崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害赋存的地质环境条件, 叠加极端降雨作用, 地质灾害风险加剧。根据中国国家气象局的尼泊尔震区 6—9 月 (1981—2007 年) 气候平均降雨空间分布数据 (见图 8), 在地震诱发滑坡危险性快速评价的基础上, 叠加降雨作用获得震后降雨滑坡危险性分布 (见图 9)。尼泊尔加德满都北西和南东两侧的强降雨分布区使得震后降雨滑坡危险性显著增加, 随着震区雨季的来临和降雨强度的增加, 震区在地震叠加极端降雨作用下滑坡和泥石流灾害强度将显著增加, 需要重点防范。

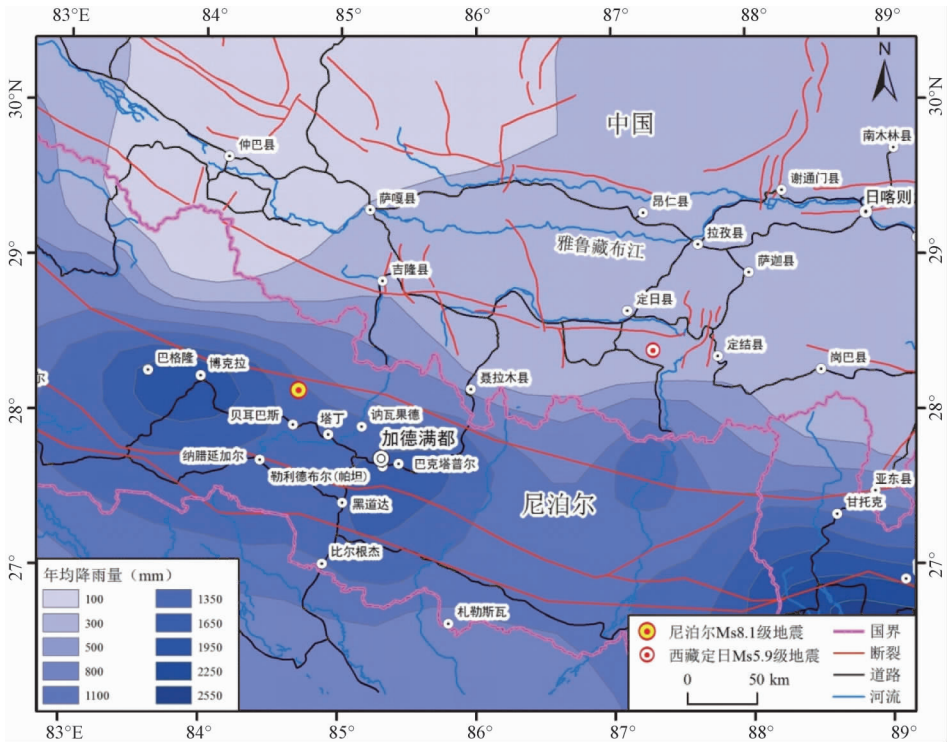


图 8 尼泊尔及中国藏南地区 6—9 月平均降雨空间分布图 (1981—2007 年) (据中国国家气象局)

Fig. 8 Average rainfall distribution from June to September (1981—2007) in Nepal and southwest Tibet of China

3.4 气温升高对冰湖溃决灾害的风险分析

喜马拉雅山中段是世界上山地冰川最为发育的地区之一, 而且受冰湖溃决洪水或泥石流灾害影响极为严重。据统计, 尼泊尔境内冰湖共 2145 个, 面积约 74.14 km², 20 世纪以来喜马拉雅山中段地区至少已有 23 次较大的冰湖溃决灾害事件发生, 其中 15 次发生在我国西藏境内。与暴雨或融雪洪水不同, 冰湖溃决洪水具有突发性强、频率

低、洪峰高、破坏力强、灾害波及范围广等特点, 往往对下游地区的人们生命财产和基础设施带来极大破坏。

喜马拉雅山中段历史冰湖溃决表明, 5—9 月份是冰湖溃决的主要发生时段, 受此次地震影响和雨季 (6—9 月) 来临, 冰湖溃决风险增大。预测的尼泊尔大部分区域雨季气温正常略偏高, 其北部地区以及我国藏南比邻区域偏高更明显 (部

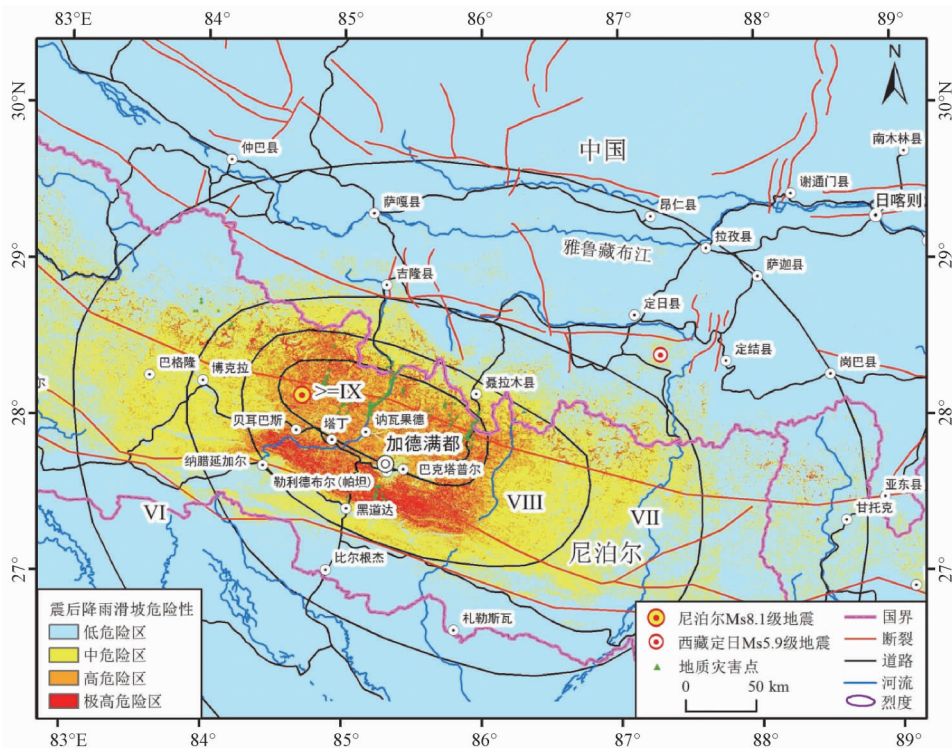


图9 尼泊尔震区震后降雨诱发滑坡危险性分布图

Fig.9 Hazard distribution map of post-earthquake rainfall-induced landslide in Nepal seismic area

分区域偏高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$), 有利于积雪和冰川的融化, 从而增加了冰湖溃决的风险。

4 结论及建议

尼泊尔地震救援行动急需地震诱发滑坡危险性分布状况, 采用 Newmark 动力模型、斜坡极限平衡模型和地理信息系统平台, 对尼泊尔地震动力作用下的斜坡位移进行了定量计算, 并考虑降雨作用对震后滑坡危险性的影响, 对地震叠加降雨诱发滑坡危险性分布进行了快速预测。

地震灾区局部降雨增多, 气温升高, 加快积雪和冰川消融, 导致入湖水量急剧增加, 加大冰湖溃决风险。建议做好地震灾区的气象监测和预报工作, 特别是关注尼泊尔北部和我国藏南地区极端高温事件和持续性强降雨的发生。

在我国藏南地区增设自动气象站和人工观测站, 增加气象观测数据积累, 为预测和研究该区域天气气候提供基础数据支持。同时, 要加强该区域天气气候变化特征和规律的研究。

致谢 感谢中国地震局地球物理研究所, 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 国土资源

部航空物探遥感中心, 国家气象局, 以及抗震救灾应急专家组提供的宝贵资料, 感谢王珂和刘筱怡在数据处理过程中的帮助。

参 考 文 献

- [1] 熊维, 谭凯, 刘刚, 等. 2015年尼泊尔 Mw7.9 地震对青藏高原活动断裂同震、震后应力影响 [J]. 地球物理学报, 2015, 58 (11): 4305 ~ 4316.
XIONG Wei, TAN Kai, LIU Gang, et al. Coseismic and postseismic Coulomb stress changes on surrounding major faults caused by the 2015 Nepal Mw7.9 earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58 (11): 4305 ~ 4316.
- [2] 赵根模, 刘杰, 吴中海. 尼泊尔大地震及喜马拉雅造山带未来地震趋势 [J]. 地质力学学报, 2005, 21 (3): 351 ~ 358.
ZHAO Gen-mo, LIU Jie, WU Zhong-hai. 2015 Nepal earthquake and the future seismic trend of Himalaya orogenic belt [J]. Journal of geomechanics, 2005, 21 (3): 351 ~ 358.
- [3] Newmark NM. Effects of earthquakes on daM_s and embankments [J]. Geotechnique, 1965, 15 (2): 139 ~ 160.
- [4] Jibson RW, Harp EL, Michael JA. A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps [J]. Engineering Geology, 2000, 58 (3/4): 271 ~ 289.
- [5] 王涛, 吴树仁, 石菊松, 等. 基于简化 Newmark 位移模型的区域地震滑坡危险性快速评估—以汶川 $M_s 8.0$ 级地震为例 [J]. 工程地质学报, 2013, 21 (1): 16 ~ 24.

- WANG Tao, WU Shu-ren, SHI Ju-song, et al. Case study on rapid assessment of regional seismic landslide hazard based on simplified Newmark displacement model: Wenchuan M_s 8.0 earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21 (1): 16 ~ 24.
- [6] CHEN Jianping, LI Jianfeng, QIN Xuwen, et al. RS and GIS-based statistical analysis of secondary geological disasters after the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *ActaGeologicaSinica (English Edition)*, 2009, 83 (4): 776 ~ 785.
- [7] ZHANG Yongshuang, DONG Shuwen, HOU Chuntang, et al. Geohazards induced by the Lushan M_s 7.0 earthquake in Sichuan Province, Southwest China: typical examples, types and distributional characteristics [J]. *ActaGeologicaSinica (English Edition)*, 2013, 87 (3): 646 ~ 657.
- [8] 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等. 四川 5.12 地震次生地质灾害的基本特征初析 [J]. *地质力学学报*, 2008, 14 (2): 109 ~ 116.
- ZHANG Yong-shuang, LEI Wei-zhi, SHI Ju-song, et al. General characteristics of 5.12 earthquake-induced geohazards in Sichuan [J]. *Journal of Geomechanics*, 2008, 14 (2): 109 ~ 116.
- [9] YANG Zhihua, LAN Hengxing, GAO Xing, et al. Urgent Landslide Susceptibility Assessment in the 2013 Lushan Earthquake-impacted Area, Sichuan Province, China [J]. *Natural Hazards*, 2015, 75 (3): 2467 ~ 2487.
- [10] GUO Changbao, Montgomery DR, ZHANG Yongshuang, et al. Quantitative assessment of landslide susceptibility along the Xianshuihe fault zone, Tibetan Plateau, China [J]. *Geomorphology*, 2015, 248: 93 ~ 110.
- [11] Ayalew L, Yamagishi H, Ugawa N. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan [J]. *Landslides*, 2004, 1: 73 ~ 81.
- [12] Ozdemir A, Altural T. A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 64: 180 ~ 197.
- [13] YAO Xin, Tham LG, DAI Fuchu. Landslide susceptibility mapping based on Support Vector Machine: A case study on natural slopes of Hong Kong, China [J]. *Geomorphology*, 2008, 101: 572 ~ 582.
- [14] SONG Yiquan, GONG Jianhua, GAO Sheng, et al. Susceptibility assessment of earthquake-induced landslides using Bayesian network: A case study in Beichuan, China [J]. *Computers and Geosciences*, 2012, 42: 189 ~ 199.
- [15] XU Chong, XU Xiwei, DAI Fuchu, et al. Application of an incomplete landslide inventory, logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping related to the May 12, 2008 Wenchuan earthquake of China [J]. *Natural Hazards*, 2013, 68 (2): 883 ~ 900.
- [16] Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, et al. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy [J]. *Geomorphology*, 1999, 31: 181 ~ 216.
- [17] 兰恒星, 伍法权, 周成虎, 等. GIS 支持下的降雨型滑坡危险性空间分析预测 [J]. *科学通报*, 2003, 48 (5): 507 ~ 512.
- LAN Hen-xing, WU Fa-quan, ZHOU Cheng-hu, et al. Spatial hazard analysis and prediction on rainfall-induced landslide using GIS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48 (5): 507 ~ 512.
- [18] 刘凤民, 张立海, 刘海青, 等. 中国地震次生地质灾害危险性评价 [J]. *地质力学学报*, 2006, 12 (2): 127 ~ 131.
- LIU Feng-min, ZHANG Li-hai, LIU Hai-qing, et al. Danger assessment of earthquake-induced geological disasters in China [J]. *Journal of Geomechanics*, 2006, 12 (2): 127 ~ 131.
- [19] 张铎, 吴中海, 李家存, 等. 国内外地震滑坡研究综述 [J]. *地质力学学报*, 2013, 19 (3): 225 ~ 241.
- ZHANG Duo, WU Zhong-hai, LI Jia-cun, et al. An overview on earthquake-induced landslide research [J]. *Journal of Geomechanics*, 2013, 19 (3): 225 ~ 241.
- [20] Wilson RC, Keefer DK. Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyote lake, California, earthquake [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1983, 73 (3): 863 ~ 877.
- [21] Jibson RW. Regression models for estimating coseismic landslide displacement [J]. *Engineering Geology*, 2007, 91 (2 ~ 3), 209 ~ 218.
- [22] 常士骠, 张苏民, 项勃, 等. 工程地质手册 (第四版) [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- CHANG Shi-biao, ZHANG Su-min, XIANG Bo, et al. *Engineering geology manual of China (fourth edition)* [M]. Beijing: China architecture and Building Press, 2007.
- [23] Gallo F, Lave J. Evolution of a large landslide in the High Himalaya of central Nepal during the last half-century [J]. *Geomorphology*, 2014, 223: 20 ~ 32.

LANDSLIDE HAZARD RAPID ASSESSMENT IN THE M_s 8.1 NEPAL EARTHQUAKE-IMPACTED AREA, BASED ON NEWMARK MODEL

YANG Zhi-hua^{1,2}, ZHANG Yong-shuang^{1,2}, GUO Chang-bao^{1,2}, DU Guo-liang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: April 25, 2015, an M_s 8.1 earthquake occurred in Nepal with epicenter of 28.2°N, 84.7° E and focal depth of 20 km. The earthquake and induced landslides caused serious casualties and economic losses in Nepal and southwest Tibet of China. After the earthquake, the earthquake-induced landslide hazard distribution offered information to timely relief activities. Based on the detailed analysis of geomorphology, lithology, tectonics, hydrology and typical landslides, the sophisticated Newmark model and Geographic Information System were adopted to complete the rapid assessment of landslide hazard distribution in the Nepal earthquake-impacted area. The assessment results had good confidence by the verification in terms of landslide cases coming from remote sensing interpretation in partial regions and initially reflected the basic characteristics of Nepal earthquake-induced landslide hazard distribution. Then, considering the post-earthquake rainfall effect that can significantly initiate landslides, the landslide hazard rapid assessment under the combined effect of seismic motion and heavy rainfall was completed. The landslide hazard rapid assessment results can provide important references to geo-hazard prevention and mitigation during post-earthquake emergent relief activities.

Key words: M_s 8.1 Nepal earthquake; Newmark model; landslide hazard; rapid assessment; Tibet