

云南红河县城区房屋地震灾害三维仿真模拟方法^{*}

杜浩国¹, 陈亮², 林旭川³, 卢永坤¹, 张方浩¹, 杨琪¹,
邓树荣¹, 和仕芳¹, 曹彦波¹, 余庆坤¹

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 建水县地震局, 云南 红河 654300;
3. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 对云南省红河县城区房屋建造年代、结构类型、设防等级、楼层、层高、面积、外观形状及所处地形等进行调查, 并采用无人机航拍遥感技术、地理空间信息技术和三维仿真建模技术, 对红河县城区进行地震灾害三维仿真模拟评估, 得出不同烈度下城区房屋的破坏程度及分布情况。最后将评估结果与滇南地区历史地震造成的房屋破坏情况进行对比。结果表明: 红河县城区三维仿真与滇南地区历史地震房屋面积破坏比相近, 地震灾害三维仿真系统在房屋破坏动态可视化方面优势明显, 因此使用该方法模拟评估地震灾害对房屋造成的影响是可行的。

关键词: 地震灾害; 三维仿真建模; 地理空间信息技术; 高原山地; 无人机航拍

中图分类号: P315.945

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2019)02-0218-12

0 引言

房屋是城市各项活动的主要载体, 其抗震性能与城市的抗震能力密切相关, 历史地震的震害经验表明, 房屋倒塌往往是造成人员伤亡与财产损失的重要原因(李永强等, 2010)。有效加强城市地震灾害预防, 提升城市抗震设防能力是建筑和地震领域面临的重要问题, 采用三维仿真建模技术进行地震灾害模拟评估是当前地震灾害模拟的重要手段之一。近年来无人机航拍遥感技术和地理空间信息技术发展迅速, 已经被成熟应用于地震数据库建设、地震灾害损失评估、灾害预测和地震烈度图划分等方面(陈晋等, 2018; 邓树荣等, 2018; 于江等, 2018)。仿真模拟将无人机高分辨率的航拍图作为建模数据基础, 与地理信息空间技术相融合, 并根据建筑物的建造年代、用途、设防等级、房屋结构、楼层、层高、面积、外观形状等信息(明小娜等, 2018), 可综合模拟出在不同地震烈度下房屋破损的三维动态可视化信息。

国际上已经有许多国家进行了地震灾害三维

仿真模拟评估方面的研究, 如1964年新泄大地震后, 日本开始对地震灾害预测进行研究; 2002年日本开展“大城市大地震减灾特别研究项目”, 其中的“反映大城市特征的地震灾害高端模拟技术的开发”是基于地理信息空间技术建立房屋模型, 通过超级计算机构建了整个东京市的建筑物三维可视化模型。在国内, 李建成等(2009)提出在构建三维地理信息空间技术应用的基础上融合二维ArcGIS的功能, 通过二维ArcGIS和三维ArcGIS交替完成工作, 实现了具有三维地形和地物的显示以及鹰眼功能; 杨泽(2006)利用3DS MAX制作出平房建筑物在不同等级下的震害模型, 进一步利用ArcGIS开发完成了其三维显示; 胡长理(2009)通过模拟多层砌体结构的震害情况, 根据使用功能的不同, 利用3DS MAX建立了多个砌体结构模型, 模拟砌体结构及城市级建筑群震害, 并采用不同颜色区分破坏情况; 赵鹏(2010)采用3DS MAX对信息比较完整的框架结构房屋进行了单体模拟; 林旭川和叶列平(2012)通过引入基于结构广义刚度的构建重要性指标, 提出了考虑构建重要程度差异的RC框架结构抗震优化设计方法; 林旭川(2017)构建了城市建筑群地震灾

^{*} 收稿日期: 2019-01-28.

基金项目: 云南省地震局青年基金项目(2017ZL08)资助.

害数值仿真系统，并对我国东部某大型城区的 70 多万建筑物进行震害分析，模拟出不同损伤程度面积、非结构构件的损伤程度、建筑地震灾害风险评估指标、城市可恢复性指标等。

综上所述，地震灾害三维仿真模拟技术已趋于成熟，对三维模拟数据的精确度也有了更高的要求。以往研究主要集中于单栋建筑或以传统卫星遥感影像为基础的建筑群，采用卫星遥感影像获取地形地貌及房屋楼面面积时，存在影像分辨率低、时效性差的问题，更重要的是房屋形状和面积的勾画精度难以保证。随着无人机技术的不断发展，影像实时性、高分辨率的特点开始发挥优势，使得利用无人机获取高精度的房屋形状和面积成为可能（段福洲，赵文吉，2010；付箫等，2018；王之等，2018）。

云南省是全国地震灾害频发的省份之一，地震活动具有频度高、强度大、分布范围广等特点，许多县城建立于高原山地上，房屋结构类型复杂，地震灾害风险高（周光全等，2009；卢永坤等，2006），对云南典型的山地县城进行地震灾害三维仿真模拟有利于提升其地震灾害预防和抗震设防能力。本文以云南省红河县城区为研究对象，开展高原山地县城地震灾害三维仿真模拟评估，利用无人机对红河县城区进行全方位航拍提取遥感信息，采用地理信息空间技术把实地调查的房屋数据与无人机航拍遥感信息相融合，再通过城市建筑群地震灾害数值仿真系统（林旭川等，2009）进行地震灾害三维仿真，并与滇南地区历史地震造成的房屋破坏情况（周光全，2011）进行对比分析。

1 研究区概况

红河县位于云南省南部，隶属红河哈尼族彝族自治州，地处红河流域与勐龙河流域之间的迤萨梁子顶端，是云南省典型的高原山地县城之一（张建国等，2008），也是云南省地质灾害高易发区。境内河谷狭窄，地势特点大致为中部高，南北低，山地面积大。县城城区地质构造复杂，地处横断山脉纵谷区的南缘和哀牢山余脉地区，新构造运动强烈，峰峦起伏，沟壑纵横，冲沟发育，岸坡陡峻，软弱岩体发育（李西等，2016），人类活动过程强烈，地质灾害不断孕育。该县人口密度高，房屋建筑结构类型较多，抗震性能有待加

强。为打破“城市发展”与“地质灾害”僵持的局面，红河县开展了一系列地震灾害综合防治，效果显著。但地震具有突发性，地震灾害的预防和房屋抗震性能的提升问题依旧严峻，对红河县城区进行地震灾害三维仿真模拟评估，可为该县的规划及防灾减灾工作提供科学依据。

2 研究方法

2.1 技术路线

采用无人机航拍遥感技术、三维仿真模拟技术、地理信息空间技术三者相结合的方法对云南红河县城区房屋地震灾害进行三维（动态）可视化研究。由图 1 可见，数据收集是基础，主要对红河县城区房屋结构、层数等信息进行实地调查收集，并采用无人机航拍遥感技术，得到红河县城区高清航拍影像图和高精度地形高程图。数据处理主要是采用地理信息空间技术对无人机高清航拍影像图中的建筑物框架进行勾选，并与红河县城区实地调查的房屋数据相融合。地理信息空间基础建模是把房屋结构、楼层、所处地形等主要信息汇集于红河县城区地理信息空间基础模型中，得出基于地理信息空间的红河县城区房屋 + 地形的三维模型。地震灾害三维仿真模拟系统主要是把房屋建造年代、结构类型、层高、楼层、面积、所处地形等采用一定的算法和公式建立相关性，构建出红河县城区地震灾害三维仿真（动态）模拟系统，输入不同的地震烈度参数，可模拟出红河城区房屋三维破坏（动态）可视化信息。对比分析主要是将红河县城区房屋仿真模拟结果与所属滇南地区历史地震造成的房屋破坏情况进行对比分析，验证模拟评估的准确性和可靠性。

2.2 无人机航拍方法

地震灾害三维仿真模拟评估中基础数据的真实性和精确性尤为重要。由于红河县城区地势起伏较大，因此将固定翼无人机航拍飞行高度统一保持在 340 ~ 350 m，高度误差范围不超过 10 m，最后进行航拍图的拼接和航拍数据的导出。这样既保证数据的真实性，又能得到精准的高程图，优化了建筑物框架勾画（卢永坤等，2011）和 GPS 校准过程，可提供真实、精确的数据基础。图 2 为红河县城区无人机航拍线路规划图。

2.4 城市仿真系统模型构建方法

采用城市建筑群地震灾害数值仿真系统（林旭川，2017）进行三维仿真，如图3所示把五层高的楼房模拟为多剪力弹簧模型。城市建筑群地震灾害数值仿真系统分为3个部分，分别是建模模块、计算模块、分析模块。其中建模模块包含三维模型的自动建模，自动建模主要是将地理空间信息中勾选的建筑物框架与建筑物的建造年代、用途、设防等级、房屋结构、楼层、层高、面积、框架信息转化为建筑破坏方式和破坏程度，结合震害防御的经验和抗震设防的要求给出建筑结构物理参数，并建立建筑结构物理参数与非线性计算模型参数的相关性，最终确定计算模型的所有参数。计算模块主要是计算结构模型在给定地震动输入下的时程响应结果，不同位置输入不同的地震动时会对建筑物造成不同的破坏，从而起到预评估的作用。分析模块是对建筑物的地理信息数据与计算结果进行分析，给出整个城市建筑地震响应统计结果，对该区域地震后的破坏和损失进行分析，最后给出整个城市的地震灾害数值仿真。

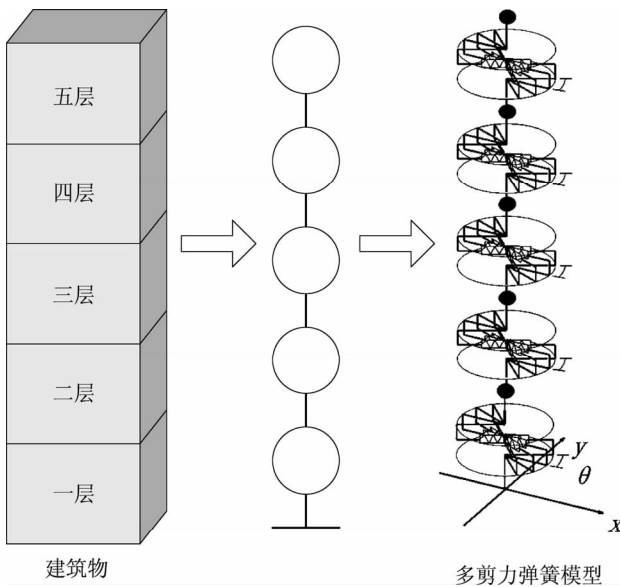


图3 建筑物数值仿真模型

Fig.3 Numerical simulation model of building

2.5 仿真影响因子分析

2.5.1 水平地震作用

仿真系统中，输入不同地震动参数产生的水平地震作用力为：

$$F_{Ek} = \alpha_1 G_{eq} \quad (2)$$

$$F_i = \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} F_{Ek} (1 - \delta_n) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

$$\Delta F_n = \delta_n F_{Ek} \quad (4)$$

式中： F_{Ek} 为结构总水平地震作用标准值； α_1 为相应于结构基本自振周期的水平地震影响系数值； G_{eq} 为结构等效重力载荷； F_i 为质点 i 的水平地震作用标准值； G_i 、 G_j 分别为集中于质点 i 、 j 的重力荷载代表值； H_i 、 H_j 分别为质点 i 、 j 的计算高度； δ_n 为顶部附加地震作用系数； ΔF_n 为顶部附加水平作用力。

2.5.2 竖向地震作用

楼层的竖向地震作用效应可按各构件承受的重力荷载代表值的比例分配，并乘以增大系数1.5：

$$F_{Evk} = \alpha_{vmax} G_{eq} \quad (5)$$

$$F_{vi} = \frac{G_i H_i}{\sum_{j=1}^n G_j H_j} F_{Evk} \quad (6)$$

式中： F_{Evk} 为结构总竖向地震作用标准值； F_{vi} 为质点 i 的竖向地震作用标准值； α_{vmax} 为竖向地震影响系数的最大值； G_{eq} 为结构等效总重力荷载。

2.5.3 房屋建造年限

相同结构类型的房屋建造年限越长，房屋的抗震性能越差。用 η 来表示三维仿真模拟中房屋年限抗震性能指标：

$$\eta = \frac{10}{Y_{max} - Y_{min}} (Y - Y_{min}) \quad (7)$$

式中： Y 为房屋建造时间； Y_{max} 与 Y_{min} 分别为所统计房屋中，建造时间最长和最短的房屋， η 越大房屋的抗震性能越好，反之抗震性能越差。

2.5.4 房屋楼层与层高

房屋楼层 N 和层高 L 也是影响房屋破坏的重要因素，与所选房屋发生位移时的垂直高度 H 的关系为：

$$H = \sum_{i=1}^N L_i \cos \theta_i \quad (8)$$

式中: L_i 为第 i 层楼房屋高; θ_i 为第 i 层楼受到地震影响时垂直偏移角度。

2.5.5 房屋结构破坏指标

图 4 给出了结构系统中构件屈服力与剩余刚度关系。除钢结构房屋外, 框架结构、木结构、砖石和石混结构在屈服力不断增大后, 都会产生断裂点即房屋破损或倒塌。

如果房屋有 n 个构件屈服, 则其剩余刚度 $K_{\text{stru},0}$ 为:

$$K_{\text{stru},0} = K_{\text{stru},0} \prod_{i=1}^n (1 - I_{si}) \quad (9)$$

式中: I_{si} 为构件断裂点的指标。

结构断裂点可用切线刚度判断:

$$K_{\text{stru},n} \leq \beta K_{\text{stru},0} \quad (10)$$

式中: $\beta K_{\text{stru},n}$ 为 n 个构件屈服后的切线刚度; β 为屈服后结构刚度与完好结构刚度的比值。若满足式 (10), 则房屋破损或毁坏。

把 (9) 式带入 (10) 式中, 可得出房屋破坏或毁坏判断表达式为:

$$\prod_{i=1}^n (1 - I_{si}) \leq \beta \quad (11)$$

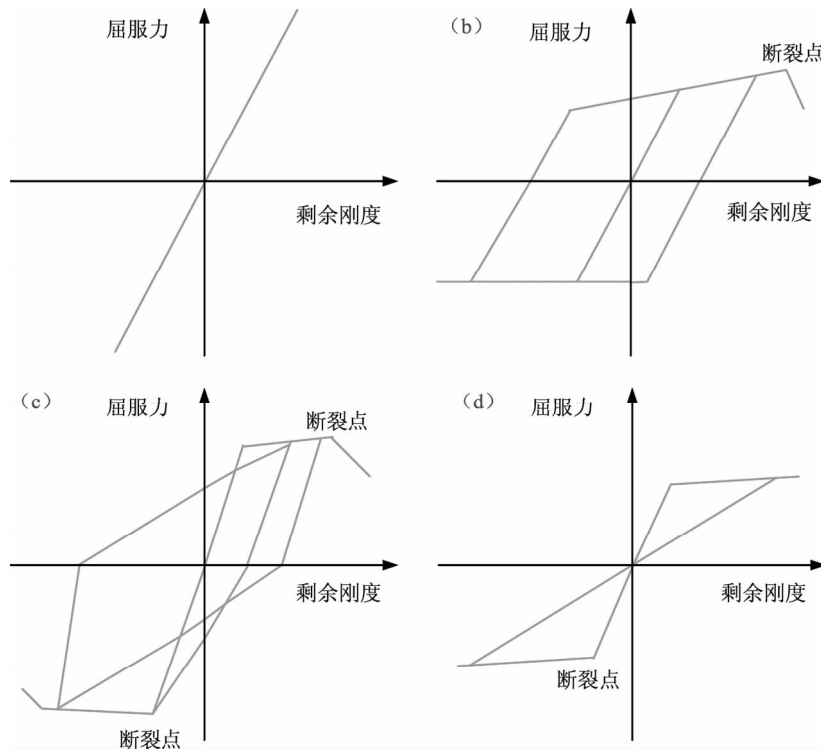


图 4 钢结构 (a)、框架结构 (b)、木结构 (c) 以及砖石和石混结构 (d) 房屋的屈服力与剩余刚度关系

Fig. 4 Relationship between yield force and residual stiffness of steel (a), frame (b), wood (c) and masonry (d) structure buildings

3 数据处理

3.1 基础数据获取与处理

无人机飞行采用航线自主规划飞行 (杜浩国等, 2018), 确保航拍全程飞行高度保持一致, 误差高度不超过 10 m, 以提高后期航拍图片拼接处理的吻合度和房屋三维模型框架勾画的精确度。表 1 为航拍的数据信息。

表 1 航拍数据信息

Tab. 1 The information of UAV data

指标	参数	指标	参数
无人机型号	飞马 F100	照片数量	874 张
航拍时间	45 min	照片大小	5 ~ 7 M/张
航拍高度	340 ~ 350 m	拼接航拍图时间	2 d
航拍总里程	10.198 km	总航拍图大小	2.5 G
航拍面积	6.5 km ²	总航拍图附带信息	地理坐标地形高程图

表 3 红河县城区各类型结构房屋数量和面积占比
Tab. 3 The quantity and area ratio of different structure houses in Honghe County

结构类型	房屋结构图片	各结构房屋分布情况	栋数	数量占比 (%)	面积/m ²	面积占比 (%)
钢结构			65	0.868	64 371.706	2.9
框架结构			410	5.563	407 317.519	18.35
设防砖混			2 572	34.89	930 282.137 4	41.91
未设防砖混			2852	38.69	653 483.801 6	29.44
砖木结构			441	5.983	68 367.191 2	3.08
土木结构			311	4.219	37 735.138	1.7
石混等其它结构			720	9.769	57 934.535 4	2.61

层高、面积、形状、所处地形等输入系统中归纳整合，得到图 7。图 7 不仅给人直观的三维视觉感，而且附带有每一栋建筑物（共 7 370 栋）的精确房屋和地形信息。

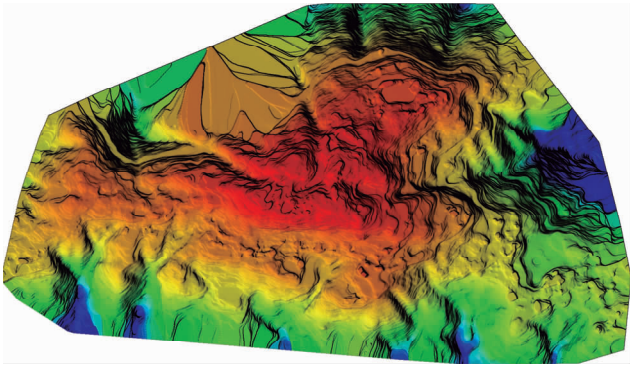


图 6 无人机航拍红河县城区高程图
Fig. 6 The elevation map of Honghe County of UAV photography

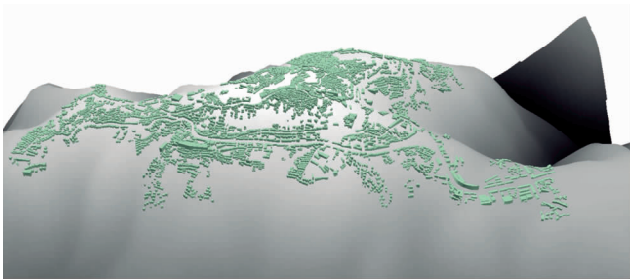


图 7 基于地理信息空间技术的红河县城区房屋 + 地形三维模型
Fig. 7 The 3D map model of house and terrain of Honghe County based on geospatial technology

4 地震灾害三维仿真模拟系统构建

将所有收集到的房屋和地形信息进行地震灾害三维仿真模拟，再将不同的房屋结构对应不同的弹簧剪切力模型，地震灾害三维仿真模拟系统对输入的数据进行自动修正、快速建模和地震响应计算，最后给出红河县城区地震灾害三维仿真模拟动态结果。由于选取的红河县城区范围小，房屋总数只有 7 370 栋，采用一般的移动工作站就能快速计算出结果。图 8 为红河县房屋城区在烈度为Ⅵ度、Ⅶ度、Ⅷ度、Ⅸ度破坏情况下的三维仿真（动态可视化）结果。模型的可视化信息包括

不同视角的红河县城区房屋变形和位移过程，系统可实现红河县城区每栋建筑、不同时间、不同烈度下的地震响应。表 4 为抗震设防烈度与设计基本地震加速度值的对应关系。将房屋破坏分为 5 个等级，用不同的颜色表示，如表 5 所示。从图 8a 可看出，烈度为Ⅵ度时整个城区房屋基本受影响，其中房屋中度（绿色）破坏的居多，主要是新建居民房屋，分布在城区周边斜坡上；严重破坏的主要是老旧居民楼和厂房，分布于红河县城区中。随着输入的地震加速度不断增大，烈度不断升高，房屋严重（土黄色）和毁坏（红色）数量不断增加，破坏面积不断扩大。当烈度到达Ⅸ度时（图 8d），有一半以上房屋毁坏（红色），其余的房屋基本都是严重（土黄色）破坏和中度（绿色）破坏，没有无损伤的房屋。

对红河县城区在设定地震基本加速度值为 50，100，150，200，300，400 及 600 gal 时造成的房屋破坏仿真结果分别进行数据提取分析，结果如表 6 所示。从表中可看出，当加速度值为 50 gal 时，房屋主要为轻微和中度破坏，无损伤房屋面积很少，房屋大多是钢结构和框架结构，主要是新建行政楼，这是由于红河县城区约有一半房屋未达到抗

表 4 抗震设防烈度和设计基本地震加速度值的对应关系
Tab. 4 Correspondence between the intensity of seismic fortification and the acceleration of design basic seismic

抗震设防烈度	设计基本地震加速度值/gal
Ⅵ度	50
Ⅶ度	100 ~ 150
Ⅷ度	200 ~ 300
Ⅸ度	400

表 5 地震灾害三维仿真模拟评估房屋破坏等级定义
Tab. 5 The house damage level definition of 3D simulation and evaluation of earthquake disaster

破坏等级	地震加速度/(cm · s ⁻²)	破坏程度	表示颜色
0 ~ 1	0 ~ 50	无损伤	蓝
1 ~ 2	50 ~ 150	轻微	天蓝
2 ~ 3	150 ~ 250	中度	绿
3 ~ 4	250 ~ 350	严重	土黄
4 ~ 5	350 ~ 450	毁坏	红

震设防标准；当加速度值为 100 gal 时，整个城区房屋都有不同程度的受损；当加速度值达到 200 gal 时，房屋最低破坏等级已达中度及以上；当加

速度值达到 400 gal 时，有房屋出现严重破坏和倒塌，并随着地震基本加速度值的不断增加，房屋严重破坏和倒塌数量不断增加。

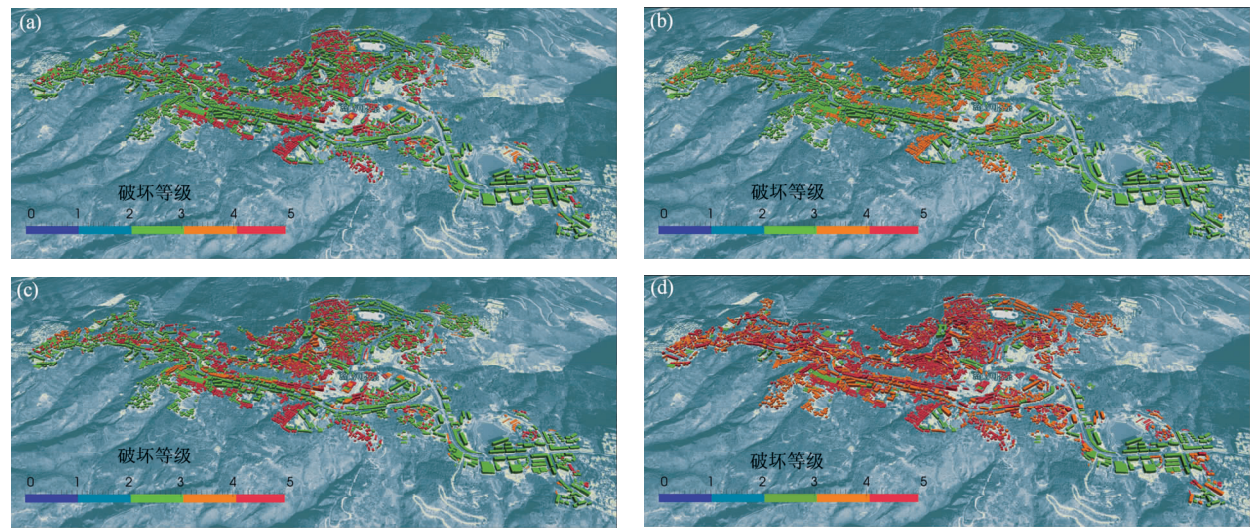


图 8 烈度为Ⅵ度 (a)、Ⅶ度 (b)、Ⅷ度 (c)、Ⅸ度 (d) 时造成的红河县房屋破坏仿真结果

Fig. 8 Simulation results of house damage in Honghe County caused by intensity of Ⅵ (a), Ⅶ (b), Ⅷ (c), and Ⅸ (d) in Honghe County

表 6 红河县房屋面积破坏仿真结果

Tab. 6 The simulation results of destruction of housing area in Honghe County

设定地震基 本加速度值/ gal	破坏等级									
	无损伤		轻微破坏		中度破坏		严重破坏		倒塌	
	面积/m ²	占比 (%)	面积/m ²	占比 (%)	面积/m ²	占比 (%)	面积/m ²	占比 (%)	面积/m ²	占比 (%)
50	306 810.5	13.82	1 117 879	50.36	795 024.5	35.82	0	0	0	0
100	0	0	306 811	13.82	191 2903	86.18	0	0	0	0
150	0	0	210 918.1	9.50	200 8796	90.50	0	0	0	0
200	0	0	0	0	175 5508	79.09	464 206.2	20.91	0	0
300	0	0	0	0	163 1525	73.50	39 511.53	1.78	548 677.6	24.72
400	0	0	0	0	146 2382	65.88	208 651.1	9.40	548 680.6	24.72
600	0	0	0	0	335 840.3	15.13	894 233	40.29	989 640.7	44.58

5 对比分析

由于红河县区域内无历史地震，因此，笔者利用数理统计法对 2000—2018 年红河县所属滇南地区的历史地震进行统计分析（表 7），得到滇南地区历史地震在烈度为Ⅵ度、Ⅶ度、Ⅷ度下

房屋破坏比。

由式（1）得到滇南地区历史地震房屋面积破坏比平均值，并与红河县城区地震灾害三维仿真系统中房屋面积破坏比进行比较（表 8）。其中，红河县城区房屋面积破坏比为红河县城区在不同的烈度下（Ⅵ度、Ⅶ度、Ⅷ度）汇总了所有房屋的破坏情况。

表 7 2000—2017 年云南滇南境内历史地震

Tab. 7 The historical earthquakes in south Yunnan from 2000 to 2017

序号	发震日期	$\varphi_N/$ ($^{\circ}$)	$\lambda_E/$ ($^{\circ}$)	最高烈度	地震
1	2000-01-27	24.20	103.60	VII	丘北—弥勒 5.5 级
2	2001-07-15	24.30	102.60	VI	江川 5.1 级
3	2001-09-04	23.40	100.30	VI	景谷 5.0 级
4	2003-07-21	25.90	101.20	VIII	大姚 6.2 级
5	2003-10-16	25.90	101.30	VIII	大姚 6.1 级
6	2004-12-26	24.70	99.50	VI	双柏 5.0 级
7	2005-01-26	23.60	101.70	VI	思茅 5.0 级
8	2005-08-13	23.60	104.10	VI	文山 5.3 级
9	2006-01-12	23.30	101.60	VI	墨江 5.0 级
10	2007-06-03	23.00	101.10	VIII	宁洱 6.4 级
11	2009-07-09	25.60	101.10	VIII	姚安 6.0 级
12	2010-02-25	25.40	101.90	VI	禄丰—元谋 5.1 级
13	2014-10-07	23.40	100.50	VIII	景谷 6.6 级
14	2014-12-06	23.30	100.50	VIII	景谷 5.9 级
15	2015-03-01	23.50	98.90	VII	沧源 5.5 级
16	2018-08-13	24.19	102.71	VI	通海 5.0 级
17	2018-09-08	23.28	101.53	VIII	墨江 5.9 级

表 8 红河县与滇南地区历史地震房屋面积破坏比对比 (%)

Tab. 8 The comparison of housing area damage ratio between Honghe County and historical earthquakes in south Yunnan (%)

区域名称	轻微	中等	严重	毁坏
红河县城区三维仿真房屋	15.50	68.80	2.89	12.80
滇南地区历史地震房屋	35.72	52.50	2.74	9.04

由表 8 可知，红河县城区三维仿真房屋面积破坏比与滇南地区历史地震房屋面积破坏比相近，尤其是在中等和严重等级。而对于房屋面积轻微破坏比，红河县城区三维仿真结果中只占 15.5%，其原因一方面是由于红河县城区位于斜坡上（图 9），房屋位置斜坡坡度已超过 60°，即使是震级小的地震也有可能就会导致大面积的滑坡；另一方面是由于模拟震中位置为城中心，对城中心房屋密

集区域破坏更严重。因此，相同震级的地震，对红河县城区房屋的破坏更为严重，即 60% 以上的房屋面积为中等破坏。



图 9 红河县城区周围房屋破坏照片
Fig. 9 The photos of houses damage around Honghe County

6 结论和讨论

本文采用无人机对云南红河县城区进行航拍、实地收集房屋数据并提取地形高程图，证明了地震灾害三维仿真模拟系统中数据的准确性；并根据房屋建造年代、用途、设防等级、房屋结构、层数、层高、面积、外观形状等综合因素进行研究，采用一定的算法融合于三维仿真技术中；将模拟结果与滇南历史地震房屋面积破坏比进行对比分析，证明了地震灾害三维仿真模拟系统仿真结果的可靠性。与传统的震害预测相比，地震灾害三维仿真系统在房屋破坏动态可视化方面优势明显。但本文的仿真模拟系统主要以房屋破坏为主要方向，如果后期能把整个城市的道路、桥梁、通信、电力以某一种算法或公式加入地震灾害三维仿真模拟系统中，使用优化后的系统再对整个

城市进行全面评估,这样不仅对整个城市地震灾害预防和抗震设防能力提升起重要作用,而且对整个城市的规划和发展也有很大的帮助。

参考文献:

- 陈晋,习聪望,陈文凯,等. 2018. 基于无人机、高分卫星遥感影像的甘肃省陇南市建筑物空间化研究[J]. 地震研究, 41(2): 192-200.
- 邓树荣,陈维,张方浩,等. 2018. 高原山地环境下无人机通视图航线规划方法研究——以香格里拉—奔子栏航线为例[J]. 地震研究, 41(2): 201-208.
- 杜浩国,张方浩,邓树荣,等. 2018. 震后极灾区无人机最优航拍区域选择[J]. 地震研究, 41(2): 209-215.
- 段福洲,赵文吉. 2010. 基于图像匹配的机载遥感影像质量自动检查方法研究[J]. 测绘科学, 35(6): 57-58, 102.
- 付萧,郭加伟,刘秀菊,等. 2018. 无人机高分辨率遥感影像地震滑坡信息提取方法[J]. 地震研究, 41(2): 186-191.
- 胡长理. 2009. 砌体结构三维模型及三维灾害场景实现技术的初步研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 李建成,郭建文,盖迎春,等. 2009. 基于 ArcEngine 的三维 GIS 的设计与实现[J]. 遥感技术与应用, 24(3): 395-398.
- 李西,冉勇康,陈立春,等. 2016. 红河断裂带南段全新世地震活动证据[J]. 地震地质, 38(3): 596-604.
- 李永强,聂高众,杨杰英. 2010. 20 世纪云南省人员震亡基本特征分析[J]. 自然灾害学报, 19(5): 20-28.
- 林旭川,潘鹏,叶列平,等. 2009. 汶川地震中典型 RC 框架结构的震害仿真与分析[J]. 土木工程学报, 42(5): 13-20.
- 林旭川,叶列平. 2012. 基于构件重要性指标的 RC 框架结构抗震优化设计研究[J]. 建筑结构学报, 33(6): 16-21.
- 林旭川. 2017. 城市建筑群地震灾害数值仿真与风险控制[J]. 城市与减灾, (3): 18-22.
- 卢永坤,代博洋,庞卫东,等. 2011. 云南地区房屋建筑面积的统计和调查结果[J]. 地震研究, 34(4): 533-537.
- 卢永坤,施伟华,非明伦,等. 2006. 会泽 5.3 级地震建(构)筑物震害分析[J]. 地震研究, 29(1): 92-96, 110.
- 明小娜,王晓青,周洋,等. 2018. 基于高分卫星遥感影像的昭通城区建筑物结构类型解译标志构建[J]. 测绘与空间地理信息, 41(9): 139-142.
- 王之,刘超,刘秀菊,等. 2018. 基于 SEaTH 算法的芦山地震无人机低空遥感影像信息对象级分类[J]. 地震研究, 41(2): 173-179.
- 杨泽. 2006. 基于 ArcGIS 和 3DS Max 的房屋震害三维可视化方法研究[D]. 北京:中国地震局地质研究所.
- 于江,张彦琪,李西,等. 2018. 无人机航测技术在 2014 年鲁甸 $M_s6.5$ 地震震区活动构造调查中的应用[J]. 地震研究, 41(2): 166-172.
- 张建国,皇甫岗,谢英情,等. 2008. 中越红河断裂带考察与研究(一)[J]. 地震研究, 31(4): 362-368.
- 赵鹏. 2010. 框架结构震害特征简析及三维灾害场景实现初步[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 周光全,王慧彦,李西. 2009. 2008 年云南地震灾害概况[J]. 地震研究, 32(3): 312-315.
- 周光全. 2011. 云南地区简易房屋的震害指数研究[J]. 地震研究, 34(1): 88-95.

3D Simulation Method of Housing Earthquake Disaster in Honghe Country, Yunnan

DU Haoguo¹, CHEN Liang², LIN Xuchuan³, LU Yongkun¹, ZHANG Fanghao¹, YANG Qi¹,
DENG Shurong¹, HE Shifang¹, CAO Yanbo¹, YU Qingkun¹

(1. Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

(2. Jianshui County Earthquake Agency, Honghe 654300, Yunnan, China)

(3. Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract

Through detailed investigation to the topography, the housing construction age, the use, the defense level, the structure, the number of floors, the floor height, the area and the appearance shape in Honghe County, Yunnan, we carried out the 3D simulation evaluation of earthquake disaster of Honghe County by using the remote sensing of UAV, geospatial information and 3D simulation modeling technologies, and obtained the degree and distribution of houses damage under different seismic intensity. Finally, the evaluation results are compared with the damage of buildings caused by historical earthquakes in southern Yunnan. The results show that the damage ratio of the 3D simulation of Honghe County is similar to that of historical earthquake buildings in southern Yunnan. The 3D simulation system of earthquake disasters has obvious advantages in visualizing the dynamic damage of buildings. Therefore, this method is feasible to simulate and evaluate the impact of earthquake disasters on houses.

Keywords: earthquake disaster; 3D simulation modeling; the technology of geospatial information; mountainous areas on the plateau; UAV aerial photography