

Study on the Distribution of Earthquake Emergency Shelter in Mountain Tourist City Based on GIS

—A Case Study of Dujiangyan, Sichuan Province

Yuzao Yuan ¹, Hailing Li ^{1†}, Huai Zhang ²

1. School of Architecture and Civil Engineering of Xihua University, Chengdu, Sichuan, 610065, China

2. Key Laboratory of Computational Geodynamics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

†Email: lhl@mail.xhu.edu.cn

Abstract

This paper takes Dujiangyan as the research object due to its characteristics as a mountain tourism city different from other plain cities, and introduces the influence of tourism and mountain attributes on the walking evacuation speed, in order to improve the traditional service radius of emergency shelter. In view of the coexistence of plain and mountain terrain in Dujiangyan Irrigation Project, based on the buffer zone analysis method, the spatial accessibility of refuge places was quantitatively analyzed, and combined with the superposition analysis, the rationality of the spatial layout of refuge places in Dujiangyan Irrigation Project was verified. The results show that there are some unreasonable places in Dujiangyan, such as overlapping shelters, uneven distribution, and exposure of scenic spots outside the accessible range, which need to be further improved.

Keywords: Buffer Analysis; Superposition Analysis; Emergency Shelter; Mountain Tourism City

基于 GIS 的山地旅游城市地震应急避难场所布局 研究*

——以四川都江堰为例

袁钰早 ¹, 李海凌 ^{1†}, 张怀 ²

1. 西华大学, 建筑与土木工程学院, 四川成都 610039

2. 中国科学院大学, 北京燕山地球关键带国家野外科学观测研究站, 北京 101408

摘要: 本文以都江堰为研究对象, 考虑其作为山地旅游城市不同于其他平原城市的特点, 引入旅游和山地两种属性对步行疏散速度的影响, 改进避难场所传统服务半径。针对都江堰平原、山地两种地形并存的特性, 基于缓冲区分析法对避难场所空间可达性定量分析, 并结合叠加分析验证都江堰避难场所空间布局的合理性。结果表明, 都江堰存在避难场所范围重叠、分布不均、景区暴露在可达范围之外等不合理之处, 需要进一步完善。

关键词: 缓冲区分析; 叠加分析; 避难场所; 山地旅游城市

引言

*基金资助: 受教育部“春晖计划”合作科研项目(HZKY20220579); 四川省哲学社会科学重点研究基地彝族文化研究中心资助项目(YZWH2308); 成都信息工程大学四川省教育厅人文社科重点研究基地——气象灾害预测预警与应急管理研究中心2023年一般项目“传统村落风景区气候承载力及灾害适应性研究”(ZHYJ23-YB05); 四川省哲学社会科学重点研究基地——四川革命老区发展研究中心2023年度项目“基于特征认知与价值评价的川陕革命老区传统村落活化路径研究”(SLQ2023SB-23)资助。

我国属于多山地国家，地质构造复杂，有自然灾害频发的特点^[1]，同时地处世界两大地震带——环太平洋地震带与欧亚地震带的交织部位，受太平洋板块、印度板块和菲律宾海板块的相互作用挤压，地震活动十分频繁^[2]，两者交织下山地地区地震活跃。此外我国很多旅游城市隶属山地地貌，典型代表有四川、云南、贵州，在以他们为代表的省市中，旅游业是当地经济发展的支柱产业。基于以上背景，国家对山地旅游城市防灾体系的研究越来越重视，地震应急避难场所（下文简称避难场所）作为其中的重要环节，它的出现为防灾体系的完善提供了保障^[3]。目前我国避难场所大多选择学校、绿地等开敞空间作为场地^[4]，对以上场地进行空间可达性分析，即通过直观反映人们利用避难场所的机会大小及其空间分布^[5]的均衡性，可验证空间布局的合理性。

目前对避难场所的空间可达性研究主要以平原城市为载体，主要包含以下范围：（1）城市，如周钰科等^[6]基于 Voronoi 图法划分避难场所服务区并根据可达性等原则，构建避难场所适宜性评价指标体系，对福州市避难场所的空间分布的均衡性进行分析。（2）城市的某个区、片区或人流量大的区域，如陈晨等^[7]基于现场走访与问卷调查，对西安市 4 个适于紧急避难的小微开敞空间进行 GIS 技术识别，通过可达性对避难场所空间布局进行分析，并为城市小微开敞空间应急救灾能力评价提供依据。（3）城市绿地、公园、医院、消防站等特定场所，如李文等^[8]基于 GIS 从可达性等角度对哈尔滨公园绿地的防灾能力进行评价，得出避难场所空间不均匀的结论。

目前，避难场所的相关研究未细分城市的地形地貌，对山地城市的针对性布局研究很少。本文基于 GIS 的空间分析功能和实际调查数据，区分平原和山地两种地形，考虑都江堰域内旅游和山地两种属性对避难速度的影响，改进避难场所实际服务半径，运用缓冲区分析法对避难场所空间可达性进行论证，并结合叠加分析研究其空间布局的合理性，基于研究结果给出都江堰避难场所规划建设的优化建议。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

都江堰隶属于四川省成都市，位于成都西北边缘，是成都平原向川西高原的过渡地带。该市横跨四川西部龙门山地带和成都平原岷江冲积扇顶部，属于中国大地貌三个阶梯中第一梯队的东边，即第一阶梯向第二阶梯过渡的典型山地平原交相呼应的地区。市域内东西向高程跨度剧烈，地势为西北高，东南低，高中低山脉、丘陵和平原呈现阶梯状分布态势，海拔 540-4678m，最大相对高差多达 4138m，平原地区占比约 34%，丘陵地区占比约 66%。

都江堰地处地震活动剧烈的南北地震带中部位置，新构造运动强烈，地震活动较为活跃。同时又属于亚热带湿润气候，雨量充沛，存在局部暴雨。在各种影响下导致区域内崩塌、滑坡、泥石流等灾害频繁发生，是地质灾害的集中暴发区。

根据《都江堰市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》获悉，都江堰在城市发展中的远景目标之一是成为全国旅游强市的典范，全域旅游服务产业是研究区的支柱产业之一。随着后疫情时代的到来，都江堰的旅游产业也将逐渐回暖，日均接待游客量逐渐回升，并有望达到新高。

总体来说，都江堰具有地质灾害频发和山地文旅小城的典型特征。

1.2 数据资料

本文主要涉及的数据有：都江堰避难场所目录、行政区划数据、道路数据、数字高程模型（Digital Elevation Model, DEM)数据，数据来源见表 1 所示。

表 1 数据来源说明

数据名称	数据精度	数据来源
现有避难场所目录	处	都江堰市人民政府网（ http://www.djy.gov.cn/ ）

行政区划数据	区县级	四川省人民政府关于同意成都市调整龙泉驿区等 15 个县（市、区）部分乡镇区划的批复(http://mzt.sc.gov.cn/)
各级道路数据	村级	OpenStreetMap 数据库 (https://planet.openstreetmap.org/)
DEM 数据	30M	地理空间数据云服务平台(http://www.gscloud.cn/)

1.3 成都市避难场所空间布局要求

根据《成都市中心城应急避难场所布局规划（2008—2020）》，将避难场所分为三个等级（如表 2 所示）。其中，I 级避难场所指长期避难场所，其避难时间超过 30 天，避难生活设施齐全，能够满足人们长期避难的需求。II 级避难场所指中短期避难场所，避难时间 15~30 天（含 30 天），具备避灾所需设施。III 类避难场所指应急疏散居民的应急场所，通常避难时间 2-14 天，具备最为基本生活需求。

表 2 避难场所分类控制要求表

类别项目	二者满足其一即可		避难时长 (天)	人均有效避难 面积 (hm ²)	服务半径 (m)
	用地面积 (hm ²)	有效避难面积 (hm ²)			
I类避难场所	≥20	≥5	>30	≥3.0	5000
II类避难场所	≥2	≥1.0	15-30	≥2.0	2000
III类避难场所	≥0.2	≥0.2	2-14	≥1.0	500

都江堰虽地处成都平原西北侧，但不同于成都市区广袤平原，都江堰境内平原山地呈东北-西南向分布，因此，不能直接按照表 2 的分类控制要求进行避难场所的规划布局。在考虑旅游属性和山地属性的影响下，区分都江堰具有的平原和山地两种地形，基于表 2 对都江堰避难场所的空间布局进行针对性分析。

1.4 都江堰避难空间面积及类型划分

都江堰政府网站公布的现有避难场所中，I类避难场所 3 处，II类避难场所 8 处，III类避难场所 14 处，共计 25 处避难场所，如表 3 所示。

表 3 都江堰现有避难场所面积类型统计表

序号	避难场所名称	面积 (m ²)	类型
1	体育中心-都江堰中学应急避难场所	67000	I
2	四川农业大学都江堰分校应急避难场所	67000	I
3	北街小学--北区中学应急避难场所	22995	I
4	青城山高级中学应急避难场所	18000	II
5	树德中学都江堰外国语实验学校应急避难场所	19000	II
6	塔子坝中学应急避难场所	2700	II
7	蒲阳中学	3300	II
8	大观中学应急避难场所	3000	II
9	天马中学应急避难场所	4200	II
10	友爱小学应急避难场所	10000	II
11	八一高级中学应急避难场所	77400	II
12	聚源职业高中应急避难场所	4500	III
13	崇义中学应急避难场所	15300	III
14	青城山镇七一中学应急避难场所	3750	III
15	翠月湖九年制义务学校应急避难场所	3000	III
16	安龙中学应急避难场所	3000	III
17	向峨乡学应急避难场所	3750	III
18	玉堂小学应急避难场所	4800	III
19	柳街小学应急避难场所	2000	III
20	石羊中学应急避难场所	3000	III

21	胥家九年制义务学校应急避难场所	4000	III
22	李冰中学应急避难场所	4650	III
23	龙池小学应急避难场所	8670	III
24	虹口小学应急避难场所	10005	III
25	紫坪学校应急避难场所	25000	III

2 研究方法

基于疏散速度 V 和表 4 各类避难场所服务半径 R 确定避难时长 T 。考虑都江堰旅游城市特点，引入旅游属性和山地属性对都江堰 V 值的影响，在区分平原和山地两种地形的基础上确定山地旅游城市的疏散速度。根据 T 值和两种地形的 V 值得出实际服务半径 $R_{平}$ 和 $R_{山}$ 。运用 GIS 中的缓冲区分析功能，建立避难场所的空间可达范围并进行分析。基于空间可达范围使用叠加分析中的相交功能绘制可达范围重叠区域，分析避难场所的重叠情况。研究步骤如图 1 所示。

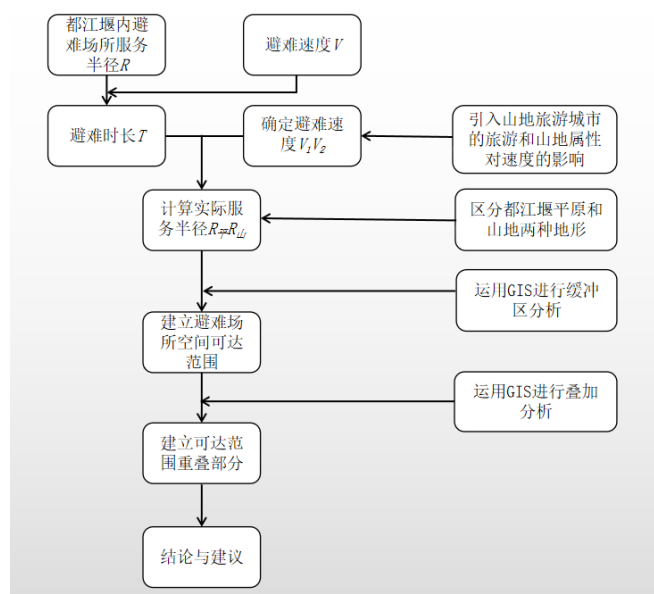


图 1 研究步骤

2.1 缓冲区分析

缓冲区分析在对时效性要求较高的紧急服务设施，如避难场所的评价中应用比较广泛^[9]。它是以点、线、面三类为基础，基于他们建立不同半径长度的圆形区域，分析该对象在空间上对周遭事物的影响的一种方法^[10]。其核心就是通过空间内一个物体，确定他们的邻域^[11]，邻域大小则是由物体半径决定。在本次研究中服务半径 R 代表物体半径，它的计算公式如下：

$$R = V \times T \quad (1)$$

式中： V 为疏散速度^[12]， T 为避难时间。

(1) 旅游属性对 V 值的影响

都江堰作为旅游城市，域内游客众多，游客在陌生环境中遭遇地震时可能会出现恐慌心理^[13]，进而减缓游客疏散速度。综合考虑游客旅游属性影响，对 V 值进行修正：

$$V_1 = V \times \alpha \quad (2)$$

式中： V_1 是旅游属性影响下的疏散速度， α 是旅游属性影响系数。

(2) 山地属性对 V 值的影响

作为山地旅游城市，都江堰不仅游客众多，山地也是其主要特征，山地不同道路的坡度起伏会影响居民和游客疏散速度，故在 V_1 基础上对山地疏散速度进行折减：

$$V_2 = V_1 \times \beta \quad (3)$$

式中： V_2 是山地属性影响下的疏散速度， β 是山地属性影响系数。

2.2 叠加分析

GIS 中的叠加分析是一项非常重要的空间分析功能，它是指在同一空间参考系统下，将两组及以上的数据进行集合运算，产生新的空间关系^[14]，并从中发现数据间的相互差异、联系和变化等特征，公式如下：

$$M = \begin{cases} \text{相交 } A \cap A_{II} \cap A_{III} \cap B_{III} \\ \text{合并 } A \cup A_{II} \cup A_{III} \cup B_{III} \\ \dots \end{cases} \quad (4)$$

式中： M 是叠加部分合集， A 是都江堰平原内避难场所， B 是都江堰山地内避难场所

3 都江堰避难场所空间布局合理性验证

3.1 都江堰山地、平原区域划分及避难场所的分布

虽地处成都平原，都江堰却同时具有平原和山地两种地形。基于都江堰域内 DEM 数据，可将都江堰地形由东北-西南向进行平原、山地两种地形的划分。避难场所共计 25 个，其中平原各类避难场所 22 个（I类避难场所 3 个，II类避难场所 8 个，III类避难场所 11 个），山地各类避难场所 3 个（III类避难场所 3 个）。

3.2 都江堰避难场所实际服务半径的计算

山地旅游城市的避难中，步行是受灾群众到达应急避难场所最直接和最简单的出行方式，对此式（1）中 V 定义为步行疏散速度。一般来说人的步行速度为 $4-6\text{km/h}$ ，本次研究选取 $V=5\text{km/h}$ ^[15]。

(1) 都江堰平原地区避难场所实际服务半径 $R_{\text{平}}$

都江堰平原地区的 V 值影响系数 $\alpha=0.95$ ，带入式（3）得出 $V_1=4.75\text{km/h}$ 。

以平原I类避难场所为例进行计算，已知 $V=5\text{km/h}$ ，由表 3 可知 $R=5000\text{m}$ ，由式（1）计算出 $T=1\text{h}$ 。由式（1）同理得出 $R_{\text{平}}=4750\text{m}$ 。以此类推，可计算出旅游属性影响下平原地区各类避难场所的 $R_{\text{平}}$ ，如表 4 所示。

表 4 都江堰平原地区各类避难场所实际服务半径 $R_{\text{平}}$

名称	I类避难场所	II类避难场所	III类避难场所
实际服务半径（m）	4750	1900	475

(2) 都江堰山地地区避难场所实际服务半径 $R_{\text{山}}$

研究区内山地地形主要以台地和丘陵居多^[16]，坡度大多介于 $25^\circ-35^\circ$ 之间^[17]，故选取 $\beta=0.96$ ^[18]作为 V_1 的影响系数，带入式（4）得出 $V_2=4.56\text{km/h}$ 。

以山地III类避难场所为例进行计算，已知 $V=5\text{km/h}$ ，由表 3 可知 $R=500\text{m}$ ，由式（1）可计算出常规避难时间 $T=10\text{min}$ 。由式（1）同理得出 $R_{\text{山}}=456$ ，如表 5 所示。

表 5 都江堰山地地区各类避难场所实际服务半径 $R_{\text{山}}$

名称	I类避难场所	II类避难场所	III类避难场所
实际服务半径（m）	/	/	456

3.3 都江堰避难场所缓冲区分析

本次研究改进传统缓冲区分析中没有考虑服务半径 R 取值会受到外界^[19]，比如山地或旅游因素影响的薄弱环节，引入山地旅游城市特有的旅游和山地属性对 V 的影响，区分平原和山地两种地形，修正得到实际服

务半径 $R_{平}$ 和 $R_{山}$ ，基于此计算避难场所空间可达范围。

利用 ArcGIS10.8 分析工具中的缓冲区功能，依据表 4 和表 5 中的 $R_{平}$ 和 $R_{山}$ 作为边界条件，进行都江堰全域内避难场所缓冲区分析，得到都江堰避难场所的空间可达范围，如图 2 所示。

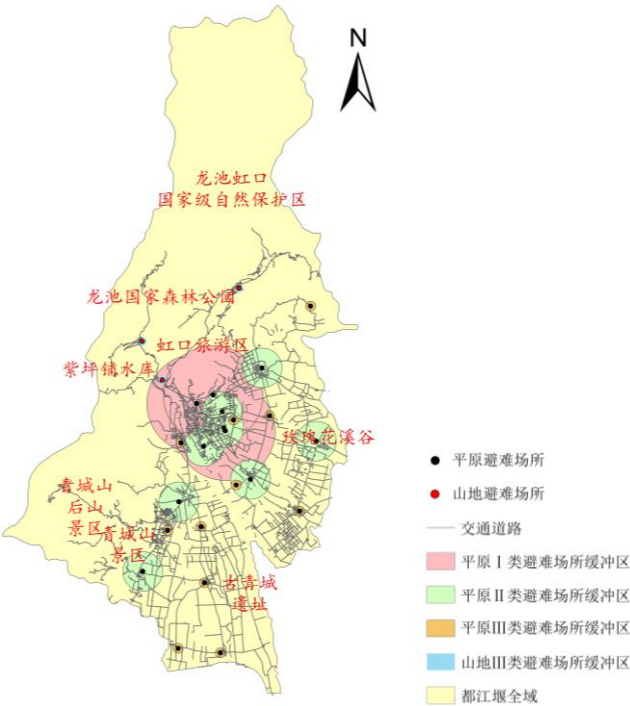


图 2 避难场所缓冲区

通过图 2 可知目前避难场所存在以下问题：（1）总体差异很大。避难场所是由中心向两端扩散的，中心城区的数量相对较多。中心城区以外的地区由于避难场所较少。有大量区域尤其是都江堰东南部与成都其他县市接壤的平原区域暴露在避难场所覆盖面积以外，导致该片区的居民很难便捷到达就近避难场所。（2）作为山地旅游城市有知名部分景区，比如青城山后山景区、玫瑰花溪谷和虹口景区等暴露在避难场所可达范围以外，不利于本地居民和外来游客及时避难，尤其是对当地不熟悉的游客造成二次伤害，影响当地旅游行业发展。

3.4 都江堰避难场所的叠加分析

基于 GIS 区分平原和山地地形，根据实际服务半径 $R_{平}$ 和 $R_{山}$ 分别建立的各类避难场所缓冲区得到的数据进行叠加分析，本次研究使用叠加分析中的相交工具，即对式（5）选择使用交集运算，生成新的避难场所重叠部分 M 并对其中数据进行统计，如图 3 和表 6 所示。它能真实反应都江堰避难场所的服务效率^[20]，用于分析都江堰避难场所的空间布局。

表 6 实际服务半径下各类避难场所覆盖面积指标

名称	面积（m ² ）	研究区内面积比（%）	重叠率（%）
研究区	1208	/	/
I 类避难场所	212.65	17.6	/
II 类避难场所	90.73	7.5	/
III 类避难场所	9.76	0.81	/
避难场所重叠面积	97.64	/	31.2
避难场所实际面积	215.5	17.84	/

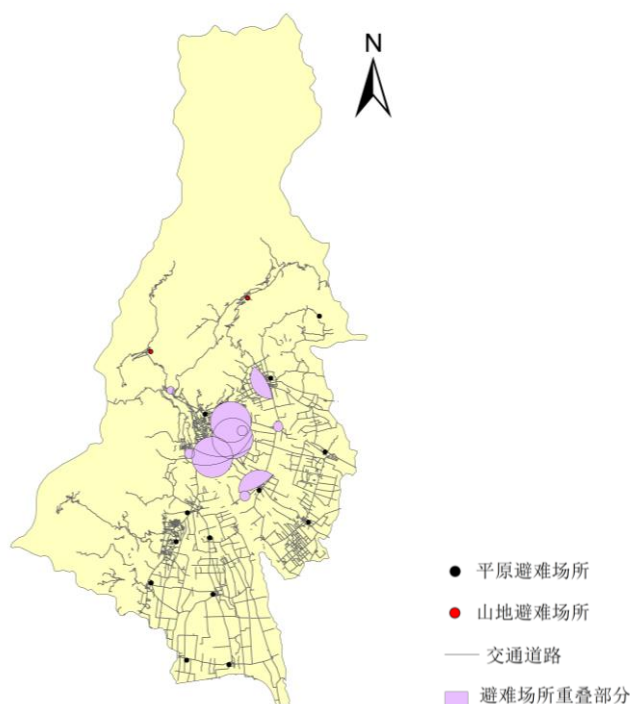


图 3 避难场所覆盖范围重叠区域

都江堰避难场所可达范围存在部分重叠的情况，重叠率为 31.2%，即：出现服务功能冗余的问题。重叠部分主要集中在中心城区，导致中心城区避难场所服务功能过剩，而四周片区避难场所不足的情况。

3.5 优化建议

（1）注重都江堰与成都其他县市之间的连接地段，加强边缘区域的规划，利用其广大的空旷地带和耕地面积，增加临时避难场所，在灾时、灾后可以暂时充当避难场所。

（2）在避难场所的规划或调整中，应基于对现有避难场所分布的评价基础上，对避难场所进行新增或调整，在考虑引入旅游和山地因素的基础上对避难场所进行新建或优化，避免出现功能重叠、覆盖不足、资源浪费的情况。

（3）作为旅游城市，应基于历史数据和科学技术等方法归纳总结游客旅游活动范围等数据，在游客集中的区域适当增加避难场所等防灾设施，并做好引导标记，以确保游客安全。

4 结束语

依托 GIS 空间分析功能和实际数据，考虑都江堰作为山地旅游城市不同于平原城市的特性，引入旅游和山地属性对避难速度的影响，改进了避难场所服务半径。针对平原和山地并存的情况，运用缓冲区分析法从空间可达性角度对都江堰避难场所进行论证，并结合叠加分析探讨其空间布局合理性。得出都江堰现有避难场所存在总体规划差异较大、功能重叠、覆盖不足、游客安全考虑不足等问题，需要在现有避难场所基础上进行优化布局，确保当地居民和游客处于安全范围内。同时本文的研究可为都江堰同类型的山地旅游城市开展类似研究提供思路和参考。

参考文献

- [1] 施益军,王培茗,刀认.山地小城市应急避难场所布局优化研究——以云南剑川为例[J]. 现代城市研究,2016(05):92-99.
- [2] 冷艳萍, 基于 GIS 的建筑物防震管理系统建设. 电脑知识与技术, 2010. 6(36): 第 10408-10409,10415 页.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 防灾避难场所 设计规范 GB51143-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [4] 苏建锋,张庆斌.城市地震应急避难场所适宜性评价——以天津市中心城区为例[J].震灾防御技术,2021,16(02):414-420.

- [5] 樊亚明,田丽莹,陈昭宇.城市生态游憩空间可达性评价及规划响应——以桂林市为例[J].规划师,2023,39(02):125-132.
- [6] 周玉科,刘建文,梁娟珠.基于改进灰色关联的福州市避难所适宜性综合评价[J].地理与地理信息科学,2018,34(06):63-70+1.
- [7] 陈晨,程林,窦睿音.基于微观个体避难行为的城市小微开敞空间应急救灾效能评价——以西安市为例[J].地理与地理信息科学,2021,37(06):71-77.
- [8] 李文,张林.哈尔滨公园绿地防灾避险功能布局研究[J].北方园艺,2010(12):115-118.
- [9] 宋正娜,陈雯,张桂香,张蕾.公共服务设施空间可达性及其度量方法[J].地理科学进展,2010,29(10):1217-1224.
- [10] 王海,李瑞敏.缓冲区分析方法在事故多发点鉴别的应用研究[J].公路工程,2016,41(01):103-107.
- [11] 王何晨阳,赵恒,高仲亮,魏建珩.基于缓冲区分析的云南省文山州森林火灾分布研究[J].消防科学与技术,2022,41(11):1556-1562.
- [12] 徐嵩,曾坚,任兰红.基于可达性分析的山地村镇防灾避难场所研究——以阜平县不老树村为例[J].建筑学报,2016(S2):22-25.
- [13] 谢启苗,王焘,王维莉.考虑恐慌心理的人员疏散模型[J].中国安全科学学报,2022,32(7):180-187.
- [14] 周爱华,张景秋,付晓.北京城区长期避难场所空间布局研究[J].安全与环境学报,2014,14(03):151-156.
- [15] 庄霆坚,邓捷铭,林紫珊,张倩,洪婷婷.福州市鼓楼区公园应急避难可达性评价[J].中国城市林业,2017,15(05):21-25.
- [16] 王会豪,任平,张智波.基于地形起伏度的耕地与聚落耦合关系演变研究——以都江堰市为例[J].四川师范大学学报(自然科学版),2017,40(04):536-543.
- [17] 黎秋杉,卡比力江·吾买尔,小出治.基于水基底识别的水生态安全格局研究——以都江堰市为例[J].地理信息世界,2019,26(06):14-20.
- [18] 赵万民,游大卫.防震视角下的山地城市防灾开敞空间优化策略探析[J].西部人居环境学刊,2015,30(01):73-80.
- [19] 杨文奇,徐颖彤,徐雅,张华兵.城市公园绿地空间可达性研究[J].林业资源管理,2019(04):143-150.
- [20] 易铮,冯沥娇,董芊里,张浪,张青萍.基于可达性分析的公园绿地布局优化——以许昌市建成区为例[J].现代城市研究,2020(11):53-60.

【作者简介】

¹ 袁钰早（1996-），女，四川成都人，西华大学建筑与土木工程学院，硕士研究生在读，主要研究方向：工程管理。Email: 605925514@qq.com;

² 李海凌（1976-），女，博士，西华大学建筑与土木工程学院（610039），副院长，教授，硕导。Email: lhl@mail.xhu.edu.cn。

³ 张怀（1973-），男，博士，中国科学院大学地球与行星科学学院计算地球动力学重点实验室（100049），南方海洋科学与工程广东省实验室（珠海）（519080），中国科学院大学北京燕山地球关键带国家野外科学观测研究站（101408），教授，博导，中国科学院大学地球与行星科学学院。Email: hzhang@ucas.ac.cn。