

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.04.012

多元型复合灾害系统适应性评估

黄莉¹, 张祎喆², 万旭哲², 王伟², 宋月²

(1. 河海大学公共管理学院; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院)

摘要: 考虑灾害损失的叠加(折减)效应, 推导了多元型复合灾害系统的适应性指数公式, 从防灾能力、应灾能力两大维度构建了多元型复合灾害系统适应性评估指标体系, 并使用熵权-TOPSIS 方法评估了各区域的适应性, 利用 ArcGIS 软件绘制了适应性区划图。粤港澳大湾区的实例应用结果表明: 粤港澳大湾区“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统适应性高的区域主要集中在南部地区, 较高适应性区域主要为中部少数地区, 中、较低适应性区主要分布在中部大部分地区、西南部和东部地区, 低适应性区域主要分布在西北部和东北部; 在面对多元型复合灾害系统时, 区域的适应性指数显著低于其面对单一灾害的适应性指数。

关键词: 多元型复合灾害; 适应性评估; 风险传递模型; 熵权法; TOPSIS 方法; 粤港澳大湾区

Adaptive evaluation of multivariate compound disaster systems

Huang Li¹, Zhang Yizhe², Wan Xuzhe², Wang Wei², Song Yue²

(1. College of Public Administration, Hohai University; 2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University)

Abstract: By considering the superposition (reduction) effect of disaster losses, an adaptive index formula for multivariate compound disaster systems was derived, and an adaptive evaluation index system for multivariate compound disaster systems was constructed from the two major dimensions of disaster prevention capacity and disaster response capacity. The entropy weight-TOPSIS method is used to evaluate adaptability of each region, and ArcGIS software is utilized to map the adaptability zoning. The application results of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area case show that for the “rainstorm-landslide” and “rainstorm-collapse” multivariate compound disaster systems in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, the regions with high adaptability are mainly concentrated in the southern area; the regions with relatively high adaptability are mainly a few areas in the central part; the regions with medium and relatively low adaptability are mainly distributed in most areas of the central part and the southwestern and eastern areas; the regions with low adaptability are mainly located in the northwestern and northeastern areas, respectively. When facing multivariate compound disaster systems, the regional adaptive index is significantly lower than that for single disasters.

Key words: multivariate compound disaster; adaptive evaluation; risk propagation model; entropy weight method; TOPSIS method; the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

近年来,随着全球气候变化,产生极端天气的频率和强度显著增加。我国多地频繁遭受暴雨、台风、崩塌等自然灾害的侵袭^[1-2]。这些灾害不仅给当地居民的生命财产安全构成了严重威胁,也给区域经济的可持续发展带来了巨大挑战^[3-4]。多元型复合灾害同时具备串发型和并发型灾害特质^[5],既有线性因果关系,又有并行发生的特征,往往会造成更为严重的损失。通过评估多元型复合灾害系统适应性,有针对性地提出增强区域韧性和减少灾害损失的措施,是维护区域安全和保障经济社会健康发展的有效手段之一^[6]。

现有国内外相关研究多围绕单一灾害开展适应性与应急能力评估^[7-11],针对灾害链的量化评估研究仍显不足。为数不多的灾害链评估主要分为两类:①基于灾前准备、预警响应、灾害暴露等要素搭建指标体系实施评估;②通过累加各单灾种风险值,得到灾害链综合风险结果^[12]。例如:王婷等^[13]从防灾能力、抗灾能力和救灾能力三方面构建评估指标体系,应用多级模糊综合评估模型定量评估台风-洪涝-地质灾害链减灾能力;张柯炜等^[14]梳理了我国华东滨海乡村地区的主要灾害链,从设施应急需求度和功能重要性两个维度评估乡村应急全过程中综合应急设施配置优先度。目前,研究的切入点往往是对复合灾害应急能力评估指

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3001002);国家自然科学基金项目(71974052)

作者简介: 黄莉(1982—),女,副教授,博士,主要从事水灾害应急管理研究。E-mail:lily8214@126.com

通信作者: 王伟(1979—),男,教授,博士,主要从事水灾害应急物流研究。E-mail:13813826667@163.com

标体系进行构建和完善,且缺乏系统性和全面性。尽管王伟等^[15]从灾害链角度提出了以灾害链转移机理为基础的串发型灾害链应急能力评估方法,但针对同时具备串发型和并发型灾害特质的多元型复合灾害的应急能力评估研究仍然缺失,且没有考虑多元型复合灾害的叠加(折减)、传递效应^[16-17],提出的应对策略和措施缺乏针对性。因此,本文以更为复杂的多元型复合灾害为研究对象,考虑灾害损失的叠加(折减)效应构建风险传递模型,推导适应性指数公式,并以粤港澳大湾区“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统为例,计算了不同区域的多元型复合灾害适应性,以期防灾减灾工作提供参考。

1 理论推导

复合灾害是致灾因子通过相互作用,形成比单一灾害更复杂、更严重的灾害情境^[18]。通常分为串发型灾害和并发型灾害。串发型灾害指的是一种灾害触发另一种灾害的线性序列反应,形成一个因果链条,特点是前一个灾害事件会直接成为下一个灾害发生的导火索。并发型灾害则描述了多个灾害源独立发生,但几乎同时作用在同一地区或系统上,相互之间可能没有直接的因果关系,但彼此间存在间接影响。多元型复合灾害是指同时具备串发型和并发型灾害特质的灾害,表现为多个灾害之间既有线性的因果关系,又有并列的同时区关系。

适应性是指在灾难发生前后,地区对灾害事件的应对能力,以及从灾害损失中恢复的能力。灾害适应性评估与量化分析,是衡量城市自然灾害应对能力的核心手段,也是制定防灾减灾方案、提升城市韧性的重要依据。适应性评估结果不仅可以反映当前防灾机制的有效性,还能为未来的防灾规划提供数据支持^[19-20]。Clark 等^[21]将灾害适应性定义为应对和恢复能力的综合,指在灾害发生时区域或个体能够吸收冲击并继续正常运作的能力,以及在灾害发生后区域或个体能够从损失中恢复并重建的能力。本文从防灾能力和应灾能力两维度着手,分别选取最能反映防灾能力的指标(居民人均可支配收入、地质灾害隐患点消除能力、地质灾害监测预警能力等),以及反映应灾能力的指标(每万人拥有医疗机构床位数、每万人拥有避灾点数量、排水管网密度等)构建适应性评估指标体系,对“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统适应性进行评估。

多元型复合灾害适应性评估是一个复杂且多维度的过程,它不仅建立在对单灾种的适应性评估基础之上,还应综合考虑多种灾害之间的相互作用、连锁反应等。假定灾害 C 为既有并发型灾害又有串发型灾害的多元型复合灾害,包含了 n 个不同的单灾种 $\{d_i | i=1, 2, \dots, n\}$, 构建有向图 $C=(D, H)$, 有向图中的 n 个顶点分别代表 n 个单灾种, D 代表所有灾种节点组成的集合, H 代表灾害的边(每条边都有方向,代表灾害之间的传递转换关系)。

设多元型复合灾害 C 中的灾害损失叠加(折减)效应系数为 g_c :

$$g_c = L_n / \sum_{i=1}^n L_i \tag{1}$$

式中: L_n 为多元型复合灾害 C 的灾害损失; L_i 为单灾种 d_i 的灾害损失。

区域面对多元型复合灾害 C 的适应性指数 F_c (应对能力和恢复能力) 为区域应对多元型复合灾害的能力 P_c 与区域的应急需求 R_c 之间的比值:

$$F_c = P_c / R_c \tag{2}$$

假设区域应对各灾种的能力是一致、通用的,即 $P_c = P_i = P$, 区域的应急需求 R_c 的叠加(折减)效应系数与应急损失的叠加(折减)效应系数一致,则由区域面对多元型复合灾害 C 中各灾种 d_i 的适应性 F_i 推导得到:

$$F_c = \frac{P_c}{R_c} = \frac{1}{g_c} \sum_{i=1}^n \frac{1}{F_i} \tag{3}$$

2 实例应用

2.1 研究区概况

粤港澳大湾区是中国经济发展的重要引擎之一^[22], 涵盖广东省的广州、深圳、珠海、佛山、惠州、东莞、中山、江门、肇庆 9 个市以及香港和澳门两个特别行政区, 其不仅在经济上具有重要地位, 还因其特殊的地理位

置和气候条件,成为多元型复合灾害系统研究的理想对象。粤港澳大湾区位于中国东南沿海中纬度环球灾害带与环太平洋灾害带的交汇处,地形复杂,三面环山,一面临海,形成了“三江汇流、八口出海”的独特地貌。粤港澳大湾区属南亚热带湿润季风气候,夏季台风、暴雨、洪涝、滑坡等灾害多发^[23],受全球气候变化影响,极端天气事件的发生频次与强度持续上升,灾害风险随之显著加剧^[24]。同时,区域城市化快速推进,地表不透水面积不断扩张,给排水系统带来巨大负荷,强降雨天气下极易诱发城市内涝^[25-26]。此外,山区和丘陵地带的土壤结构较为松散,在强降雨条件下容易发生滑坡和崩塌,增加了灾害的复杂性和危害性^[27]。例如,2023年9月7日傍晚至8日上午,深圳罗湖区局部累计降水量达到469.0 mm,香港24 h降水量超过647 mm。深圳和香港多个地区出现严重内涝,交通中断,部分地区积水深度超过1 m,强降水引发了多起滑坡和泥石流,造成房屋损毁和人员伤亡。

选择粤港澳大湾区作为多元型复合灾害系统适应性研究的原因:①粤港澳大湾区自然灾害种类繁多且频繁发生,为研究提供了丰富的数据和案例;②该地区“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”灾害链频发,具有很强的代表性;③快速的城市化进程和独特的地理环境使其灾害风险具有典型性和代表性;④粤港澳大湾区高度发达的经济水平和先进的科学技术实力为应对各类灾害挑战以及实施有效的适应性策略提供了坚实的基础。

2.2 指标选取

评估指标的选取应基于科学依据确保数据的可靠性和准确性,同时需全面涵盖灾害风险的各个方面并与灾害风险有明显的相关性,能够有效反映区域的灾害适应能力^[28]。本文在指标遴选过程中充分考量数据获取条件,尽可能选用一手基础数据,以此保障指标体系的客观性与真实性。对于虽作用于多元型复合灾害,但数据获取困难,或是与灾害适应性关联度较低的指标,均予以剔除。构建的多元型复合灾害系统适应性评估指标体系见图1。居民人均可支配收入、堤防规模、每万人拥有医疗机构床位数、每万人拥有避灾点数量等指标数据来源于《广东统计年鉴2021》(<http://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/index.html>),每10万常住人口中大学程度人口数、15岁以下及65岁以上人口比例、女性比例等指标数据来源于《2020年第七次全国人口普查主要数据》(<https://www.stats.gov.cn/sj/pcsj/rkpc/d7c/>)。

目标层	准则层	指标层	表征
多元型复合灾害系统适应性评估指标体系	防灾能力	居民人均可支配收入 Q_1	正向指标,表征区域经济基础及防灾投入保障能力
		每10万常住人口中大学程度人口数 Q_2	正向指标,表征居民受教育水平与防灾减灾认知能力
		堤防规模 Q_3	正向指标,表征区域防洪与工程防护能力
		地质灾害隐患点消除能力 Q_4	正向指标,表征地质灾害隐患排查与治理能力
		地质灾害防治资金投入 Q_5	正向指标,表征地质灾害防治的资金保障水平
		地质灾害监测预警能力 Q_6	正向指标,表征地质灾害识别、监测与预警水平
	应灾能力	15岁以下及65岁以上人口比例 Q_7	负向指标,表征需重点照顾的脆弱人口负担
		女性比例 Q_8	负向指标,表征灾害情景下脆弱人口的相对规模
		每万人拥有医疗机构床位数 Q_9	正向指标,表征灾后医疗救治与恢复保障能力
		每万人拥有避灾点数量 Q_{10}	正向指标,表征紧急避险与人员安置保障能力
		排水管网密度 Q_{11}	正向指标,表征城市排水与暴雨内涝防御能力
		水库库容比 Q_{12}	正向指标,表征区域蓄洪、调洪与水资源调控能力
		政府应急救援队伍 Q_{13}	正向指标,表征应急救援组织、动员与处置能力
		应急物资储备能力 Q_{14}	正向指标,表征灾害应急物资供应与持续保障能力

图1 多元型复合灾害系统适应性评估指标体系

Fig.1 Adaptive evaluation index system for multivariate compound disaster system

2.3 权重和指标数值计算

熵权法计算的权重能够准确反映各指标在综合评价中的重要性。该方法基于数据本身确定权重,确保了权重分配的客观性和合理性,避免了人为主观因素的干扰,从而使得评价结果更加可靠和科学^[29]。TOPSIS方法能够综合考虑多个评价指标的影响,适用于多准则决策,且对数据分布及样本量没有严格限制,可以适用于本文的小样本资料。通过计算各方案与理想解和负理想解的距离,提供直观的决策结果。不需要目标函数,不用通过检验,能够很好地刻画多个影响指标的综合影响力度^[30]。鉴于此,本文采用熵权法确定各指标的权重(表1),并利用TOPSIS方法评估各区域的适应性。

2.4 “暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统适应性评估

根据暴雨、滑坡、崩塌灾害之间的相互影响和叠加效应,结合参考文献[15],确定“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统叠加(折减)效应系数 $g_1 = 1.5$,得到粤港澳大湾区“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害系统适应性指数范围为 $0.009 \sim 0.040$,然后与 ArcGIS 连接并关联创建矢量图。通过内嵌的自然断点法将适应性指数分为 5 个等级:低适应性 $0.009 \sim <0.012$ 、较低适应性 $0.012 \sim <0.016$ 、中适应性 $0.016 \sim <0.018$ 、较高适应性 $0.018 \sim <0.026$ 、高适应性 $0.026 \sim 0.040$,得到的粤港澳大湾区多元型复合灾害系统适应性区划图,如图 2 所示。

由图 2 可知:适应性高的区域主要是南部地区,较高的是中部少部分地区,而中部大部分区域,以及西南部和东部地区多为中、较低适应性区,西北部和东北部则多为低适应性区。

表 1 各指标权重

Table 1 Weights of indicators

指标	权重		
	暴雨	滑坡	崩塌
Q_1	0.144 1	0.114 5	0.096 0
Q_2	0.090 9	0.072 3	0.060 6
Q_3	0.242 9		0.161 8
Q_4		0.161 8	0.161 8
Q_5		0.130 8	0.130 8
Q_6		0.153 3	0.153 3
Q_7	0.038 9	0.030 9	0.025 9
Q_8	0.028 8	0.022 9	0.019 2
Q_9	0.107 8	0.085 7	0.071 8
Q_{10}	0.063 2	0.050 2	0.042 1
Q_{11}	0.025 1		
Q_{12}	0.034 9		
Q_{13}	0.146 6	0.116 5	0.097 6
Q_{14}	0.076 9	0.061 1	0.051 2

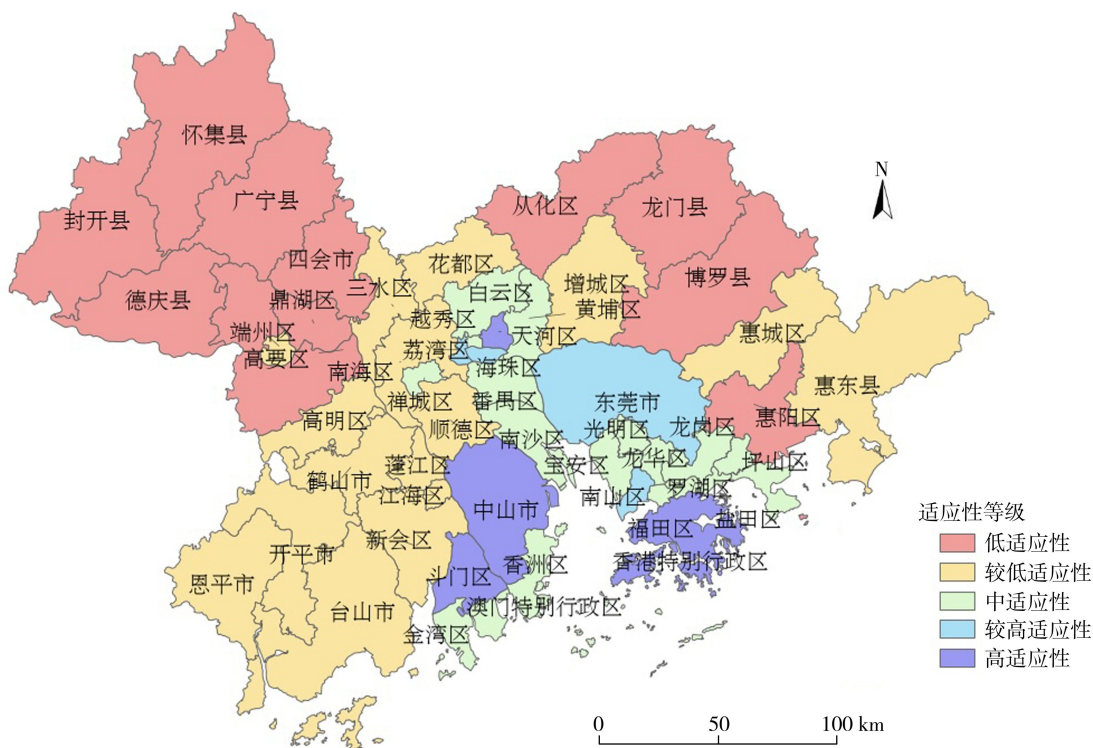


图2 粤港澳大湾区多元型复合灾害系统适应性区划图

Fig. 2 Adaptive zoning map of multivariate compound disasters system in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

a. 高适应性区域具体分布在越秀区、福田区、斗门区、香港特别行政区、中山市等南部和少部分中部地区。这些地区经济基础雄厚,居民人均可支配收入高达 114 401 元,约为粤港澳大湾区平均水平 57 757 元的两倍,政府提供了充足的资源用于建设坚固的基础设施、避灾点,拥有高效的灾害监测预警系统和完善的医疗机构,平均每万人拥有医疗机构床位数 120 个。此外,这些地区的政府管理水平较高,能够制定和实施有效的城市规划和应急管理措施并且有大量应急物资储备,平均物资储备 84 万件。同时,这些地区的居民参与程度高,公众防灾教育和灾害防范准备意识较强,非劳动力人口占比低。因此,整体上对灾害的应对能力强。

b. 较高适应性区域具体分布在海珠区、天河区、南山区、罗湖区、东莞市、澳门特别行政区等少部分中南部地区。这些地区经济繁荣,居民人均可支配收入为 94 482 元,远高于粤港澳大湾区的平均水平,能够支持

高标准的基础设施建设和维护。拥有完善的医疗体系和应急救援条件,政府部门拥有更多的资源和专业知识来制定与执行有效的灾害风险管理策略。此外,这些地区的居民普遍对灾害风险有较高的认识,并积极参与防灾减灾活动,平均每10万常住人口中有27735名大学生,非劳动人口占比22%,确保在灾害发生时能够迅速采取行动,减少损失。因此,区域整体的应对能力也较强。

c. 中适应性区域具体分布在白云区、黄埔区、番禺区、禅城区、宝安区、光明区等部分中部地区。这些地区虽然在经济上有一定的发展,居民人均可支配收入为59852元,略高于粤港澳大湾区的平均水平,但相较于核心城市区域还存在一定的差距,导致可用于提升防灾能力的资源相对有限,应急物资储备59万件,约为高适应性区域的3/4。同时,这些地区每万人平均拥有医疗机构床位数为32个,低于大湾区平均每万人平均拥有的医疗机构床位数(44个),其基础设施建设和更新未能完全跟上快速推进的城市化进程,从而影响了灾害响应和恢复的效率。此外,这些中部地区在应急管理和公众防灾教育方面还有进一步提升的空间。在应急物资储备和应急救援队伍等几项指标与适应性高和较高的地区相比,均存在一定差距,这也是制约其灾害适应性的重要因素。

d. 较低适应性区域具体分布在惠东县、惠城区、增城区、花都区、三水区、南海区、台山市、恩平市等西南部、东部和一部分中部地区。这些地区由于经济欠发达,居民人均可支配收入为42808元,低于粤港澳大湾区的平均水平,缺乏足够的资金和技术用于建设完备的防灾基础设施。此外,这些地区的政府和社区在灾害预防、响应和恢复方面的准备不足,导致整体应对灾害的能力有限。居民受到的公共教育有限,平均每10万常住人口中有14460名大学生,低于大湾区平均水平,对灾害风险认识不足,进一步削弱了区域整体的抗灾能力。

e. 低适应性区域具体分布在封开县、怀集县、德庆县、龙门县、博罗县、惠阳区等西北部 and 东北部地区。这些地区位置较为偏远,远离大湾区的经济中心,导致经济发展水平相对较低,居民人均可支配收入仅为29148元,远低于粤港澳大湾区的平均水平,从而限制了可用于投资基础设施和灾害预防措施的资金,导致应急物资储备仅为23万件,相当于高适应性区域的30%。此外,这些地区的经济和人口密度明显低于大湾区平均水平,非劳动人口占比高达32%。因此,地方政府在应对自然灾害方面缺乏足够的经验和资源,包括灾害预警系统、应急物资储备、应急救援队伍的建设以及居民防灾教育和准备活动等方面均显不足。这使得在面对自然灾害时,这些地区的应对和恢复能力较弱。

2.5 单一灾害与多元型复合灾害评估结果对比

通过分别对比暴雨、滑坡、崩塌单一灾害的适应性评估结果(图3)发现:大湾区面对灾害的适应性最小的是崩塌灾害,其次是滑坡,再次是暴雨灾害。这一现象的主要原因:暴雨灾害在大湾区较为频发,且影响范围广泛,因此当地在应对暴雨灾害方面积累了丰富的经验和资源;相比之下,滑坡和崩塌灾害的发生频率较低,影响范围有限,导致应对这些灾害的经验和资源储备相对欠缺。针对暴雨灾害,大湾区已构建了较为完备的监测预警系统和综合防控工程体系,涵盖城市排水管网、防洪堤坝、调蓄水库等多重防汛基础设施。然而对于滑坡和崩塌灾害,尤其是在地质条件复杂的区域,监测与预防措施仍显不足。大湾区的经济发展水平

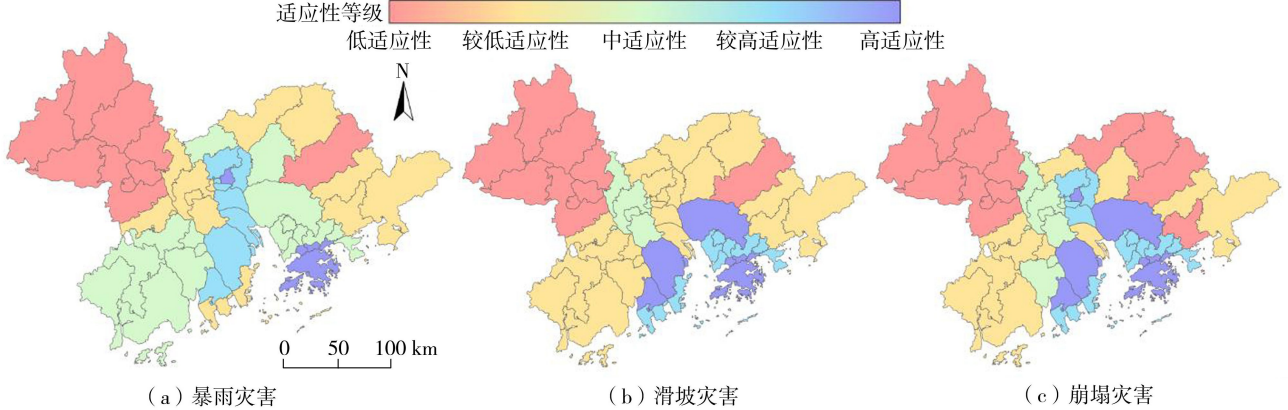


图3 粤港澳大湾区单一灾害适应性区划图

Fig. 3 Adaptive zoning map of single disasters in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

和人口密度较高的地区通常在暴雨灾害的防范和应对上投入更多资源;相反,在滑坡和崩塌灾害多发的山区和边缘地区,由于经济发展相对滞后,防灾减灾的投入也相对较少。

对比图 2 和图 3 可知:区域面对“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害的适应性远低于单一灾害的适应性指数。复合灾害涉及多个灾害的相互作用和叠加效应,各灾害相互挤占、损坏应急资源,增加了灾害的复杂性,使得施加应对措施更加困难,导致应对效率低下、灾害损失增加。此外,现有的预警系统通常针对单一灾害设计,对复合灾害的预警和响应能力不足。复合灾害的发生常常超出预警系统的预测范围,导致应急响应滞后。因此,应对复合灾害还需要多部门、多层次的协调、资源优化配置与集成调度。在南部地区,不仅多元型复合灾害的适应性高或较高,暴雨、滑坡、崩塌等单一灾害的适应性也表现为高或较高。在中南部少数地区,多元型复合灾害适应性较高。在这些地区,暴雨灾害通常表现为较高或中等适应性,滑坡灾害则多为高适应性,崩塌灾害大多为高或较高适应性。在中部部分地区,多元型复合灾害的适应性为中等。暴雨灾害多表现为较高或中等适应性,滑坡灾害多为较高适应性,少部分地区为较低适应性,崩塌灾害则多为较高适应性。在西南部、东部和部分中部地区,多元型复合灾害的适应性较低。暴雨和崩塌灾害大多表现为较低或中等适应性,滑坡灾害多为较低适应性。在西北部和东北部地区,多元型复合灾害的适应性低。暴雨和滑坡灾害大多表现为较低或低适应性,崩塌灾害多为低适应性。

大部分地区单一灾害与多元型复合灾害的适应性区划等级较为一致,即在单一灾害呈现高适应性、中适应性、低适应性的地区,多元型复合灾害也对应呈现出相同的适应性特征,在面对单一灾害时具备较高应对能力的区域,相对拥有较强的应急管理和防灾应灾能力,这些区域在面对多元型复合灾害时,也同样表现出较高的适应性。但也有部分地区存在差异,如少部分中部地区虽然在滑坡灾害中呈现较低适应性,但在多元型复合灾害下则表现为较高适应性。这些地区虽然在单一灾害应对上存在不足,但在多元型复合灾害发生时,通过综合应急措施和资源整合,反而能够较好地应对多重灾害叠加的影响。

3 结 语

本文从防灾能力、应灾能力两大维度,构建多元型复合灾害系统适应性评估指标体系,并推导出对应的适应性指数公式。结合熵权法与 TOPSIS 方法,分别测算暴雨、滑坡、崩塌 3 类单一灾害,以及“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”多元型复合灾害的适应性指数;借助 ArcGIS 完成空间可视化并绘制适应性等级区划图,以此分析区域灾害适应性的空间分异特征。

实例应用结果显示,粤港澳大湾区应对“暴雨-滑坡、暴雨-崩塌”等复合灾害的适应性,显著低于单一灾害。究其原因,复合灾害存在灾害耦合与风险叠加效应,各类灾害相互挤占、损毁应急资源,大幅提升防灾减灾工作难度,最终造成应急处置效率下降、灾害损失加剧。空间格局方面,多数区域在单一灾害与多元型复合灾害场景下的适应性等级基本一致:单一灾害适应性较高的区域,面对多元型复合灾害时同样表现良好,反映出这类区域具备扎实的防灾与应急管理水平。另有部分区域单灾适应能力偏弱,但可通过统筹应急举措、整合各类资源,在多元型复合灾害情景下实现较高的适应水平。

后续研究,可进一步探索灾害适应性评估的跨区域协同管理机制,搭建区域信息共享与联动处置体系,全面提升区域综合防灾能力,保障经济社会可持续发展。

参考文献:

[1] 霍祎黎,宋玉祥. 粤港澳大湾区经济协调发展水平测度与影响因素分析[J]. 经济纵横,2023(2):102-110. (Huo Yili,Song Yuxiang. Measurement of the level of coordinated development and analysis of its influencing factors in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Economic Review,2023(2):102-110. (in Chinese))

[2] Ripple W J,Wolf C,Gregg J W,et al. The 2024 state of the climate report:perilous times on planet Earth[J]. BioScience,2024, 74(12):812-824.

[3] 吴勇军,薛禹胜,谢云云,等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化,2016,40(2):20-29. (Wu Yongjun,Xue Yusheng,Xie Yunyun,et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(2):20-29. (in Chinese))

[4] 刘丁蓉,杨凯,孙仕. 珠三角城市群内涝灾害韧性综合评估及障碍因子识别[J]. 水利经济,2024,42(4):23-29. (Liu Dingrong, Yang Kai, Sun Shi. Comprehensive assessment and obstacle factor recognition of waterlogging disaster resilience in

Pearl River Delta urban agglomeration[J]. Journal of Economics of Water Resources,2024,42(4):23-29. (in Chinese))

[5] Lee R,White C J,Adnan M S G,et al. Reclassifying historical disasters:from single to multi-hazards[J]. Science of the Total Environment,2024,912:169120.

[6] 张海波. 新时代国家应急管理体制机制的创新发展[J]. 人民论坛·学术前沿,2019(5):6-15. (Zhang Haibo. Innovation and development of national emergency management institution and mechanism in the new era[J]. Frontiers,2019(5):6-15. (in Chinese))

[7] 吴新燕,顾建华. 国内外城市灾害应急能力评价的研究进展[J]. 自然灾害学报,2007,16(6):109-114. (Wu Xinyan,Gu Jianhua. Advance in research on urban emergency management capability assessment at home and abroad[J]. Journal of Natural Disasters,2007,16(6):109-114. (in Chinese))

[8] 铁永波,唐川. 城镇地质灾害应急响应能力评价[J]. 自然灾害学报,2009,18(2):139-145. (Tie Yongbo,Tang Chuan. Assessment of cities' and towns' ability in emergency response to geological disasters[J]. Journal of Natural Disasters,2009,18(2):139-145. (in Chinese))

[9] 方佳毅,史培军. 全球气候变化背景下海岸洪水灾害风险评估研究进展与展望[J]. 地理科学进展,2019,38(5):625-636. (Fang Jiayi,Shi Peijun. A review of coastal flood risk research under global climate change[J]. Progress in Geography,2019,38(5):625-636. (in Chinese))

[10] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护,2024,40(4):36-47. (Lu Xingchao,Xu Zongxue,Li Yongkun,et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models[J]. Water Resources Protection,2024,40(4):36-47. (in Chinese))

[11] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2025,45(1):1-9. (in Chinese))

[12] 郑德凤,高敏,李钰,等. 基于GIS的大连市暴雨洪涝灾害综合风险评估[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(3):1-8. (Zheng Defeng,Gao Min,Li Yu,et al. Comprehensive risk assessment of rainstorm-flood disaster in Dalian City based on GIS[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(3):1-8. (in Chinese))

[13] 王婷,吴绍洪,高江波,等. 区域台风-洪涝-地质灾害链减灾能力评估[J]. 灾害学,2022,37(4):193-200. (Wang Ting,Wu Shaohong,Gao Jiangbo,et al. Coping capacity assessment of regional typhoon-flood-geological disaster chain[J]. Journal of Catastrophology,2022,37(4):193-200. (in Chinese))

[14] 张柯炜,陈秋晓,章明宇. 灾害链视角下的华东滨海乡村应急设施配置优先级评价研究[J]. 自然灾害学报,2022,31(6):56-66. (Zhang Kewei,Chen Qiuxiao,Zhang Mingyu. Priority evaluation of emergency facilities configuration in coastal rural area of East China from the perspective of disaster chain[J]. Journal of Natural Disasters,2022,31(6):56-66. (in Chinese))

[15] 王伟,石雨欣,宋月,等. 暴雨-滑坡灾害链应急能力评估:以粤港澳大湾区为例[J]. 自然灾害学报,2024,33(4):95-105. (Wang Wei,Shi Yuxin,Song Yue,et al. Emergency capability assessment of the rainstorm-landslide disaster chain:Taking the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as an example[J]. Journal of Natural Disasters,2024,33(4):95-105. (in Chinese))

[16] 郭雪松,赵宇,王子爻. “情景触发-任务驱动-组织重构”:耦合视角下复合型灾害适应性治理的生成逻辑与实现路径[J]. 中国行政管理,2023,39(12):141-149. (Guo Xuesong,Zhao Yu,Wang Ziyao. “Situation triggered-task driven-organization reconstructed” the generation logic and construction path of adaptive governance mechanism for compound disasters from the perspective of coupling[J]. Chinese Public Administration,2023,39(12):141-149. (in Chinese))

[17] 张金良,罗秋实,王冰洁,等. 城市极端暴雨洪涝灾害成因及对策研究进展[J]. 水资源保护,2024,40(1):6-15. (Zhang Jinliang,Luo Qiushi,Wang Bingjie,et al. Research progress on causes and countermeasures for extreme rainstorm-induced urban flood disasters[J]. Water Resources Protection,2024,40(1):6-15. (in Chinese))

[18] Zheng Hao,Deng Zhifei,Guo Lanlan,et al. Assessment of building physical vulnerability in earthquake-debris flow disaster chain[J]. International Journal of Disaster Risk Science,2023,14(4):666-679.

[19] 李正兆,傅大放,王君娴,等. 应对内涝灾害的城市韧性评估模型及应用[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(2):266-276. (Li Zhengzhao,Fu Dafang,Wang Junxian,et al. Urban resilience assessment model for waterlogging disasters and its application[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),2022,62(2):266-276. (in Chinese))

[20] 高玉琴,汪键,高见,等. 基于组合赋权-云模型的城市洪涝灾害韧性评价方法[J]. 水利水电科技进展,2024,44(2):22-29. (Gao Yuqin, Wang Jian, Gao Jian, et al. Evaluation method of urban flood disaster resilience based on combined weighting-cloud model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2024,44(2):22-29. (in Chinese))

[21] Clark G E,Moser S C,Ratick S J,et al. Assessing the vulnerability of coastal communities to extreme storms;the case of revere, MA. ,USA[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,1998,3(1):59-82.

[22] 赵晓斌,强卫,黄伟豪,等. 粤港澳大湾区发展的理论框架与发展战略探究[J]. 地理科学进展,2018,37(12):1597-1608. (Zhao Xiaobin,Qiang Wei,Huang Weihao,et al. Theoretical framework and development strategy of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Progress in Geography,2018,37(12):1597-1608. (in Chinese))

[23] 王钧,宫清华,宇岩,等. 粤港澳大湾区城市群自然灾害综合承灾能力评价[J]. 地理研究,2020,39(9):2189-2199. (Wang Jun,Gong Qinghua,Yu Yan,et al. Evaluation of comprehensive disaster-bearing capacity of urban natural disasters in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Geographical Research,2020,39(9):2189-2199. (in Chinese))

[24] Wang Yujie,Gao Ge,Zhai Jianqing,et al. Evolution characteristics of the rainstorm disaster chains in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area,China[J]. Natural Hazards,2023,119(3):2011-2032.

[25] 陈明发,刘帆,赵耀龙,等. 1987—2017 年粤港澳大湾区城市群的不透水地表扩张与梯度演化[J]. 地球信息科学学报,2021,23(3):443-455. (Chen Mingfa,Liu Fan,Zhao Yaolong,et al. The expansion and gradient evolution of impervious surface within the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area from 1987 to 2017[J]. Journal of Geo-information Science,2021,23(3):443-455. (in Chinese))

[26] 刘志雨,刘玉环,孔祥意. 中小河流洪水预报预警问题与对策及关键技术应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):1-6. (Liu Zhiyu,Liu Yuhuan,Kong Xiangyi. Problems,strategies and key technology research of flood forecasting and early warning for small and medium-sized rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):1-6. (in Chinese))

[27] 石佳佳,李伟峰,刘亚丽,等. 粤港澳大湾区城镇化对海岸线与海岸带的影响[J]. 生态学报,2022,42(1):67-75. (Shi Jiajia,Li Weifeng,Liu Yali,et al. Impacts of urbanization on coastline and coastal zone in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Acta Ecologica Sinica,2022,42(1):67-75. (in Chinese))

[28] 王国萍,闵庆文,丁陆彬,等. 基于 PSR 模型的国家公园综合灾害风险评估指标体系构建[J]. 生态学报,2019,39(22):8232-8244. (Wang Guoping,Min Qingwen,Ding Lubin,et al. Comprehensive disaster risk assessment index system for national parks based on the PSR model[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(22):8232-8244. (in Chinese))

[29] Qian Bao,Zhu Yuxin,Wang Yuxiao,et al. Can entropy weight method correctly reflect the distinction of water quality indices? [J]. Water Resources Management,2020,34(11):3667-3674.

[30] Jin Chenxia,Mi Jusheng,Li Fachao,et al. An improved TOPSIS method for multi-criteria decision making based on hesitant fuzzy β neighborhood[J]. Artificial Intelligence Review,2023,56(1):793-831.

(收稿日期:2024-10-27 编辑:刘晓艳)

(上接第 35 页)

[10] 赵刚,刘建峰,胡双,等. 在役海底管道后挖沟分析方法和校核标准[J]. 中国海洋平台,2025,40(3):101-108. (Zhao Gang,Liu Jianfeng,Hu Shuang,et al. Analysis methods and verification standards on post-trenching for subsea pipeline in service [J]. China Offshore Platform,2025,40(3):101-108. (in Chinese))

[11] 刘冠良,刘建峰,赵刚,等. 平坦海床海底管道后挖沟安全性计算[J]. 石油和化工设备,2024,27(3):127-132. (Liu Guanliang,Liu Jianfeng,Zhao Gang,et al. Safety calculation of submarine pipeline post-trenching on flat seabed[J]. Petro & Chemical Equipment,2024,27(3):127-132. (in Chinese))

[12] Phillips R,Nobahar A,Zhou J. Trench effects on pipe-soil interaction [C]//2004 International Pipeline Conference. Calgary: IPC,2004:321-327.

[13] Kianian M,Shiri H. Experimental study of trench effect on lateral failure mechanisms around the pipeline buried in clay[J]. Journal of Pipeline Science and Engineering,2021,1(2):198-211.

[14] Yang Ming,Wang Dongyuan,Jia Haidong,et al. Research on the interaction between trench material and pipeline under fault displacement[J]. Scientific Reports,2024,14(1):12439.

[15] 陈景皓,段梦兰,徐崇巍,等. 深水海底管道 J 形铺设参数[J]. 油气储运,2013,32(6):654-658. (Chen Jinghao,Duan Menglan,Xu Chongwei,et al. Parameters of J-lay method for deepwater submarine pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2013,32(6):654-658. (in Chinese))

[16] 刘秉德. 海底悬空管道二次挖沟治理研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2015.

(收稿日期:2025-07-01 编辑:熊水斌)