

澳門風暴潮災害風險評估

鄭慧敏 施華斌 陸萬海

[摘要] 由於全球變暖導致海平面上升，沿海城市面臨的風暴潮災害風險越來越高。澳門是一個小型、高度城市化、人口密集的沿海城市，特別容易受到颱風和風暴潮的影響。2017年颱風“天鴿”在澳門附近的珠海登陸，造成澳門10人死亡，200多人受傷和15億美元的災難性損失；2018年颱風“山竹”也對澳門造成了嚴重的破壞。因此，評估風暴潮災害風險對澳門未來的防災減災至關重要。然而，尚未有對像澳門這樣的小型、高度城市化和人口密集的歷史城市面臨的風暴潮災害進行風險評估的報告。本文建立了澳門風暴潮災害風險評估指標體系，包括風暴潮危險性指標、社會脆弱性指標和承災能力指標，並確定了各指標的主觀、客觀和綜合權重。以颱風“天鴿”和“海高斯”分別作為極端強颱風與典型颱風的樣本進行風險評估，分別分析了兩場颱風導致的風暴潮對澳門23個統計區的風暴潮災害的危險等級、脆弱等級和綜合風險等級，以幫助提高澳門海洋防災減災和應急管理水平，進一步完善城市規劃。

[關鍵詞] 澳門 風暴潮 災害風險評估

一、引言

隨着全球氣候變暖及海平面上升，未來颱風、暴雨、風暴潮等自然災害不斷增加。2011—2020年全球地表溫度比1850—1900年高 1.09°C 。^①由於沿海城市的重要性，有關沿海城市風暴潮災害風險的研究引起人們的廣泛關注。近年來，UNHABITAT、NOAA和歐盟啟動了沿海城市風暴潮災害風險評價和管理研究，建立了沿海城市動態風險評估模型，並強調了評估風暴潮災害對沿海城市安全的影響。

澳門特別行政區位於中國東南沿海，珠江口的西岸，經濟發達，人口眾多，是易受風暴潮影響的地區之一。據2011—2020年統計，平均每年影響澳門的風暴潮約有2.1次。在2017年8月，颱風“天鴿”從珠海登陸，由“天鴿”引發的風暴潮，對澳門造成最大水浸深度2.38米，直接經濟損失90.45億澳門元。2018年9月，超級颱風“山竹”在澳門大面積地造成了嚴重的洪災，內港災情最為嚴重，最大水浸深度達到2.01米，直

作者簡介：鄭慧敏，澳門大學科技學院碩士生；施華斌，澳門大學智慧城市物聯網國家重點實驗室、科技學院助理教授；陸萬海（通訊作者），澳門大學科技學院副教授。

^① Intergovernmental Panel on Climate Change. *AR6 Climate change 2021: The Physical Science Basis*. IPCC, 2021.

接經濟損失 6.91 億澳門元。2019 年，澳門特區政府公佈了《澳門特別行政區防災減災十年規劃（2019－2028 年）》，^① 旨在建設一個國際先進的宜居、宜業、宜行、宜遊、宜樂城市，有序推進防災減災九個重點領域工作，包括應急管理體系、風險管理與監測預警、應急隊伍救援和裝備。本文建立了澳門風暴潮災害風險評估指標體系，有助於提高對澳門洪澇災害風險的認識，優化城市規劃和應急管理，減少災害損失。

二、風暴潮災害

（一）風暴潮

風暴潮通常是指由風或大氣壓強引起的海平面異常上升或下降。當風將大量水團推向或遠離海岸時，將產生顯著的湧浪高度。這種影響不應與波長較短、空間和時間尺度較小的波浪引起的海面高度變化相混淆。^② 風暴潮分為熱帶風暴潮和溫帶風暴潮。熱帶風暴潮通常也稱為颱風風暴潮，這是一種由熱帶氣旋引起的風暴潮，常發生在夏季和秋季。溫帶風暴潮是由冷暖空氣相交匯引起的風暴潮，常發生在春季和秋季。

（二）風暴潮災害

沿海城市容易受到由風暴潮影響所引起的水浸侵害，造成人員的傷亡和公共設施的損壞。這一災害的嚴重程度除了與風暴潮自身強度有關，還取決於是否與天文大潮疊加、受災城市的地理位置、海岸線情況、社會文化和經濟現狀等。

（三）風暴潮災害風險

風險這一詞彙已被廣泛研究，但直至現在都還沒有一個公認的風險定義。在專著《風險》一書中，風險是指不利影響程度和災害發生可能性的綜合影響。^③ 聯合國人道主義事務部（United Nations Department of Humanitarian Affairs, UNDHA）提出風險主要是指在一定的時間和地理區域內，由致災因子造成的死亡、傷害和經濟損失。^④ 風險是指致災因子發生概率與災害損失的乘積，^⑤ 是由致災因子、災害環境和承災體這三個因素共同影響的結果，^⑥ 是對危險性、暴露性和脆弱性的綜合評價。^⑦ 聯合國開發計劃署（United Nations Development Programme）提出，風險是致災因子和人類脆弱性相結合

^① 澳門特別行政區政府：《澳門特別行政區防災減災十年規劃（2019－2028 年）》，2019 年 10 月。

^② Weisse, Ralf, and Hans von Storch. *Marine Climate and Climate Change Storms*. Spring, 2010.

^③ Adams, John. *Risk*. Taylor & Francis Group, 1995.

^④ United Nations Department of Humanitarian Affairs. *Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management*. UNDHA, 1992.

^⑤ Smith, Keith. *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*. Routledge, 1996.

^⑥ 史培軍：〈三論災害研究的理論與實踐〉，《自然災害學報》（哈爾濱），第 3 期（2002），頁 1－9。

^⑦ Okada, Norio, et al. *Integrated Research on Methodological Development of Urban Diagnosis for Disaster Risk and its Applications*. Disaster Prevention Research Institute at Kyoto University, 2004.

的結果。^①

基於前人的研究成果，本文認為致災因子和承災體相互作用構成了風暴潮災害風險機制，這導致了通常所說的風暴潮災害。在一個處於風暴潮區域內的城市，如果人類社會系統容易受到一定強度的風暴潮影響，且缺乏足夠的響應能力時，風暴潮災害風險就會存在。災害風險評估是研究風暴潮的一個非常重要的部分，主要通過分析和評估風暴潮的危險性和承災體的脆弱性來實現。

（四）風暴潮災害風險評估

災害風險評估是制定全面減災和應急管理政策的基礎。它能有效地將災害風險納入可持續發展的政策和方案中。災害風險評估還可以指導發展投資，這能夠廣泛地提高受影響社區的承災能力。^② 國際減災戰略（ISDR）將危險性、脆弱性和災害風險評估確定為優先事項之一。^③ 由於風暴潮災害在沿海城市發生頻率高，特別是由颱風風暴潮導致的災害。因此風暴潮災害風險評估是一個普遍關注的問題，這是一個涉及自然災害和社會屬性的多學科評估過程。當風暴潮的強度超過受影響城市的人類社會系統的脆弱性等級和應急能力時，災害就會發生。^④ 風暴潮災害風險評估可以定義為對沿海城市的生物系統、生態環境系統和社會經濟系統（統稱為承災體）在風暴潮災害中遭受破壞或損失的可能性的定量描述，從而得出受影響城市的風暴潮災害風險等級。在本文中，風暴潮災害風險評估主要分為危險性分析和脆弱性分析。

（1）危險性分析

風暴潮實時預測主要內容是對即將出現的風暴潮進行預測。風暴潮數值模擬可以預測每次即將到來的風暴潮的最大風暴潮和風速，從而實現風暴潮危險性的實時預報和預警，但同時它也受預測模型的準確性和精確度的限制。它只能預測特定的風暴潮情況，並不能對風暴潮進行長期趨勢的預測。^⑤ 近年來主要研發的非結構網格數值模型，如 FVCOM、ADCIRC 和 SELFE，其優點是能夠根據實際地形特徵設置網格。不僅可以在近岸設置精細網格以適應複雜的海岸線，也可以在近岸適當地降低網格分辨率以保證模擬精度並提高計算效率。^⑥

風暴潮災害長期分析主要關注的是風暴潮的重現期。風暴潮的重現期是分析風暴潮

^① International Strategy for Disaster Reduction. *Living with Risk: a Global Review of Disaster Reduction Initiative*. United Nations, 2004.

^② Asian Development Bank Institute. *Disaster Risk Assessment for Project Preparation*. ADB, 2017.

^③ 史培軍：〈再論災害研究的理論與實踐〉，《自然災害學報》（哈爾濱），第4期（1996），頁6—17。

^④ 史培軍：〈四論災害研究系統的理論與實踐〉，《自然災害學報》（哈爾濱），第6期（2005），頁1—7。

^⑤ 李擴、李國勝：〈風暴潮風險研究進展〉，《自然災害學報》（哈爾濱），第6期（2011），頁104—111。

^⑥ 侯一筠等：〈我國海洋動力災害研究進展與展望〉，《海洋與湖沼》（青島），第4期（2020），頁759—767。

危險性的一個重要的因素，它可以對風暴潮的長期危險性趨勢進行預測分析。^①這有助於沿海城市的防災減災規劃，但它並不能分析具體的風暴潮過程，因此它不能用來預測單個風暴潮案例的危險性。

(2) 脆弱性分析

風暴潮災害風險不僅與風暴潮的強度和頻率有關，還與風暴潮災害承災體的脆弱性密切相關。根據 IPCC 第五次工作報告，脆弱性是指自然和社會系統容易受到不利影響的趨勢，以及它們對環境的敏感性、響應力和適應性。^②簡單來說，風暴潮災害的脆弱性客觀地反映了沿海城市對風暴潮的抵抗力。風暴潮災害脆弱性分析可以普遍分為兩類：一是基於指標體系，二是基於脆弱性曲線。

指標體系法是一種半定量的計算方法，以某一研究領域為基礎，研究不同領域在當前社會的經濟、人文、地理、政策、法規等條件下對風暴潮災害的脆弱性。它是脆弱性分析中使用最為廣泛的方法。Gornitz 在未來海平面上升對全球海岸災害影響研究中提出了海岸脆弱性指數和風險等級的概念。^③Klein 等人圍繞沿海城市脆弱性分析的概念提出一個有關敏感性、自然因素和社會經濟這三方面的脆弱性分析框架。^④

構建脆弱性曲線是國外廣泛採用的一種研究脆弱性的定量方法。然而在國內目前還沒有一個標準的災害評估系統，這是因為災害數據的共享不足和數據信息的獲取困難，因此很難構建一個成熟且實用的脆弱性曲線。^⑤此外，該方法不涉及沿海城市的社會、經濟和環境的脆弱性程度的分析，以及對災害的應急反應能力分析。

三、澳門風暴潮災害風險評估

(一) 澳門風暴潮災害風險指標體系

(1) 澳門風暴潮災害風險指標選取

風暴潮災害風險評估指標體系的建立應遵循科學性、全面性、可操作性、因地制宜和靈敏性五項原則。

1) 科學性：指標體系應符合風暴潮災害的發生機制，以風暴潮災害形成的內因和外因為基礎。

^① 傅賜福等：〈濱海新區溫帶風暴潮災害風險評估研究〉，《海洋學報》（北京），第 1 期（2013），頁 55—62。

^② Intergovernmental Panel on Climate Change. *AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014*. IPCC, 2014.

^③ Gornitz, Vivien. "Global Coastal Hazards from Future Sea Level Rise." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 89, no. 4, 1991, pp. 379-398.

^④ Klein, Richard J. T., and Robert J. Nicholls. "Assessment of Coastal Vulnerability to Climate Change." *Ambio*, vol. 28, no. 2, 1999, pp. 182-187.

^⑤ Zhang, Yuexia, et al. "Discussion on Evaluating the Vulnerability of Storm Surge Hazard Bearing Bodies in the Coastal Areas of Wenzhou." *Frontiers of Earth Science*, vol. 9, no. 2, 2015, pp. 300-307.

2) 全面性：風暴潮災害風險受多重因素影響。因此在選擇的過程中應同時考慮自然因素和社會因素，以充分反映研究地區的風暴潮災害風險。

3) 可操作性：不僅要充分考慮指標的全面性，而且需要考慮所選指標在實際情況中的可用性和可操作性。

4) 因地制宜：不同地區在環境、社會、人文、經濟等方面存在差異，應根據所研究地區的具體條件選擇合適的指標。

5) 靈敏性：由於太多的指標會降低相對權重，不利於風暴潮災害風險評估。因此所選指標的數量不宜過多。在研究地區中，選擇的指標應對風暴潮災害的風險有較大的影響，並對所研究地區的風暴潮災害風險更為敏感。

澳門是一個小型的沿海城市，根據 2022 年的資料，土地總面積約為 33 km²。由於其面積較小，難以對 23 個統計區進行相關經濟數據的統計。因此在本研究中，風暴潮災害風險評估中的指標體系主要側重於水浸情況、社會因素和承災能力上。在構建澳門風暴潮災害風險評估指標體系時，考慮以下幾個方面：風暴潮災害的特徵現象、澳門海岸的特點以及所選指標基本上能夠反映風暴潮對澳門社會發展的影響。最後本文選取 4 個指標（5 個元素）構成危險性分析指標體系，選取 6 個指標（13 個元素）構成脆弱性分析指標體系（表 1、2）。

表 1 風暴潮災害危險性指標

指標類別	指標	元素	描述	數據來源
風暴潮	流速	最大流速	評估地區的最大流速	FVCOM (Li et al., 2021)
	水浸深度	最大水浸深度	評估地區的最大水浸深度(不含前 5 % 的最大值)	
		平均水浸深度	評估地區的平均水浸深度	
	水浸面積	水浸面積比	評估地區的水浸面積與評估單位總面積比	
	水浸時長	總水浸時長	評估地區的總水浸時長	

表 2 風暴潮災害脆弱性指標

指標類別	指標	元素	描述	數據來源	
社會脆弱性	人口	人口密度	評估地區的人口密度	2016 人口中期普查詳細結果報告	
		整體依賴指數	評估地區中的兒童人口(14 歲及以下) 和老年人口(65 歲及以上) 佔成年人口(15 – 64 歲) 的百分比		
		教育程度	評估地區的高中及以上學歷的人口比例		
	住宅用地	30 年或以上的住宅單位	評估地區的 30 年及以上的住宅單位數	統計地理資訊系統 (https://www.dsec.gov.mo/gis/unidade/?lang=mo)	
	重要承災體	供水設施	供水設施	評估地區的原水泵站、水處理廠、淨化水泵站和水庫的數量	澳門自來水股份有限公司 (https://www.macaowater.com/about-macao-water/water-supply-facilities)
			供電設施	評估地區的變電站(主變電站和客戶高壓開關站) 和發電站的數量	澳門電力股份有限公司 (https://www.cem-macau.com/zh/about-cem/company-profile/operation/)
		街市	街市	評估地區的街市數量	澳門網上地圖 (https://webmap.gis.gov.mo/InetGIS/eng/index.html)
		歷史建築	歷史建築	評估地區的歷史建築數量	
		公共停車場	公共停車場	評估地區的公共停車位數量	
		承災能力	救援能力	消防單位	評估地區的消防單位數量
治安單位	評估地區的治安單位數量				
避災能力	避災中心		評估地區的避險中心數量		
醫療能力	醫療機構		評估地區的醫療機構數量		

澳門風暴潮災害風險評估中的數據由 23 個統計區的數據組成。數據來源包括風暴潮數值模擬模型 FVCOM、^①2016 年人口中期普查詳細結果報告、^② 統計地理資訊系

^① 李珂珂等：〈澳門新城區填海工程對沿海風暴潮特性的影響〉。第二十屆中國海洋(岸)工程學術討論會論文，廣東湛江，2022 年 12 月，頁 641 – 647。

^② 澳門特別行政區政府統計暨普查局：《2016 中期人口統計詳細結果》，2017 年 5 月。

統、^① 澳門自來水股份有限公司、^② 澳門電力股份有限公司^③ 和澳門線上地圖。^④

(2) 指標權重的確定

確定指標權重的方法有很多，一般來說主觀賦權法在根據指標本身的含義確定權重方面具有優勢，但客觀性較差。而客觀賦權法在確定權重時只考慮數據之間關係，具有很強的數學理論基礎，但不能反映決策者對不同指標的重視程度，有時確定的權重可能與指標的實際重要性相反。因此結合主觀和客觀賦權法的組合賦權法似乎更好。本文採用層次分析法（AHP）來計算主觀權重（SW），熵權法計算客觀權重（OW），並用博弈論來計算綜合權重（CW）。

層次分析法（AHP）是一種廣泛應用於主觀權重計算的方法，簡單有效，可用於計算複雜系統中的指標權重。該方法是 20 世紀 70 年代提出的一種層次化的權重決策分析方法，將決策分析中的風險因素分解為目標層、準則層和指標層，進行定性和定量相結合的系統分析。為了更好的確定主觀權重，本文除了邀請 11 位相關權威專家進行指標重要性評分外，還對澳門受災群眾進行了問卷調查。本次澳門群眾問卷調查收集到 125 份有效紙製問卷、87 份有效網上問卷。

在本文風暴潮危險性指標的主觀權重計算中（表 3），澳門群眾對指標的主觀權重從大到小排序依次是最大水浸深度（0.313）、最大流速（0.280）、平均水浸深度（0.156）、水浸面積比（0.136）、總水浸時長（0.115），專家對指標的主觀權重從大到小排序依次是最大流速（0.243）、水浸面積比（0.243）、總水浸時長（0.172）、最大水浸深度（0.171）、平均水浸深度（0.171）。結果表明，澳門群眾和專家對風暴潮危險性指標的權重不同，這是因為澳門群眾對風暴潮危險性的認知是基於各人的經驗和直覺，而專家則是根據他們的專業知識和澳門實際情況對其重要性評分。通過博弈論結合澳門群眾和專家的結果，澳門風暴潮危險性指標的主觀權重從大到小依次是最大水浸深度（0.288）、最大流速（0.269）、水浸面積比（0.168）、平均水浸深度（0.143）、總水浸時長（0.132）。

^① 澳門特別行政區政府統計暨普查局：〈住宅樓宇統計資料、人口普查資料〉，統計地理資訊系統，2022 年，www.dsec.gov.mo/gis/unidade/index.html?lang=mo，2022 年 12 月讀取。

^② 澳門自來水股份有限公司：〈供水設施〉，澳門自來水股份有限公司網站，2022 年，www.macaowater.com/about-macao-water/water-supply-facilities，2022 年 12 月讀取。

^③ 澳門電力股份有限公司：〈澳門變電站與供電設施數目分佈〉，澳門電力股份有限公司網站，2022 年，www.cem-macau.com，2022 年 12 月讀取。

^④ 澳門特別行政區政府地圖繪製暨地籍局：〈地理位置 / 堂區分佈〉，澳門網上地圖，2021 年 8 月，webmap.gis.gov.mo/InetGIS/eng/index.html，2022 年 12 月讀取。

表 3 危險性指標的主觀權重

指標類別	指標	主觀權重 SW			元素	主觀權重 SW		
		澳門群眾	專家	綜合值		澳門群眾	專家	綜合值
風暴潮	流速	0.28	0.243	0.269	最大流速	0.280	0.243	0.269
	水浸深度	0.469	0.342	0.431	最大水浸深度	0.313	0.171	0.288
					平均水浸深度	0.156	0.171	0.143
	水浸面積	0.136	0.243	0.168	水浸面積比	0.136	0.243	0.168
水浸時長	0.115	0.172	0.132	總水浸時長	0.115	0.172	0.132	

針對風暴潮災害社會脆弱性指標的主觀權重（表 4），澳門群眾調查結果中指標按主觀權重從大到小排序依次是供電設施（0.225）、30 年或以上的住宅單位（0.164）、人口密度（0.160）、供水設施（0.142）、整體依賴指數（0.088）、街市（0.087）、公共停車場（0.053）、教育程度（0.049）、歷史建築（0.033）。專家對指標的主觀權重從大到小排序依次是 30 年或以上的住宅單位（0.250）、人口密度（0.246）、整體依賴指數（0.156）、教育程度（0.098）、供電設施（0.076）、供水設施（0.070）、歷史建築（0.041）、街市（0.032）、公共停車場（0.031）。通過博弈論結合澳門群眾和專家的結果，澳門社會脆弱性指標的主觀權重從大到小依次是 30 年或以上的住宅單位（0.199）、人口密度（0.196）、供電設施（0.161）、整體依賴指數（0.115）、供水設施（0.113）、教育程度（0.068）、街市（0.064）、公共停車場（0.045）、歷史建築（0.039）。

表 4 社會脆弱性指標的主觀權重

指標類別	指標	主觀權重 SW			元素	主觀權重 SW		
		澳門群眾	專家	綜合值		澳門群眾	專家	綜合值
社會脆弱性	人口	0.297	0.50	0.379	人口密度	0.160	0.246	0.196
					整體依賴指數	0.088	0.156	0.115
					教育程度	0.049	0.098	0.068
	住宅用地	0.164	0.250	0.199	30 年或以上的住宅單位	0.164	0.250	0.199
	重要承災體	0.539	0.250	0.422	供水設施	0.142	0.070	0.113
					供電設施	0.225	0.076	0.161
					街市	0.087	0.032	0.064
					歷史建築	0.033	0.041	0.039
				公共停車場	0.053	0.031	0.045	

針對澳門風暴潮災害承災能力指標的主觀權重，澳門群眾和專家均認為避災中心最為重要，其次是消防單位、醫療機構和治安單位，但給出的權重值並不相同（表 5）。

表5 承災能力指標的主觀權重

指標類別	指標	主觀權重 SW			元素	主觀權重 SW		
		澳門群眾	專家	綜合值		澳門群眾	專家	綜合值
承災能力	救援能力	0.297	0.400	0.315	消防單位	0.198	0.267	0.210
					治安單位	0.099	0.133	0.105
	避災能力	0.539	0.400	0.515	避災中心	0.539	0.400	0.515
	醫療能力	0.164	0.200	0.170	醫療機構	0.164	0.200	0.170

熵權法（EWM）是一種客觀賦權的方法，根據各指標的數據分散程度，利用信息熵計算出各指標的熵權，從而得到指標的客觀權重。當數據分散程度越大時，熵值越小，該指標的數據包含的信息越多，所以權重越大，則與上述情況相反。博弈論（GT）的基本思想是找到由不同方法確定的基本權重的最佳組合，這個可以通過主觀權重和客觀權重的離差最小化來實現。^① 指標的客觀權重在不同具體情況下是不同的，因此本文以颱風“天鴿”和“海高斯”為例，前者作為極端強颱風的特例、後者作為典型颱風的樣本進行具體風險分析。利用 FVCOM 模型模擬這兩場颱風期間的風暴潮，從而計算風暴潮危險性指標的客觀權重。最後通過博弈論將主觀和客觀權重相結合，得出風暴潮危險性指標的綜合權重。

結果顯示（表 6、7），颱風“天鴿”所引起的風暴潮的危險性指標的綜合權重從大到小依次是最大水浸深度（0.243）、平均水浸深度（0.236）、水浸面積比（0.22）、最大流速（0.176）、總水浸時長（0.125）。颱風“海高斯”所引起的風暴潮情形下，危險性指標的綜合權重從大到小依次是水浸面積比（0.239）、最大水浸深度（0.231）、平均水浸深度（0.203）、最大流速（0.196）、總水浸時長（0.131）。

表6 颱風“天鴿”下的災害危險性指標權重

指標類別	指標	元素	SW	OW	CW
風暴潮	流速	最大流速	0.269	0.103	0.176
	水浸深度	最大水浸深度	0.288	0.208	0.243
		平均水浸深度	0.143	0.308	0.236
	水浸面積	水浸面積比	0.168	0.261	0.220
	水浸時長	總水浸時長	0.132	0.120	0.125

^① 路遙等：〈基於博弈論組合賦權的泥石流危險度評價〉，《災害學》（西安），第1期（2014），頁194—200；Zou, Qiang, et al. “Fast Comprehensive Flood Risk Assessment Based on Game Theory and Cloud Model under Parallel Computation (P-GT-CM).” *Water Resources Management*, vol. 34, 2020, pp. 1625-1648；張明霞等：〈基於博弈論——TOPSIS 法的船型綜合評價方法〉，《應用科學》（哈爾濱），第5期（2020），頁13—19。

表 7 颱風“海高斯”下的災害危險性指標權重

指標類別	指標	元素	SW	OW	CW
風暴潮	流速	最大流速	0.269	0.128	0.196
	水浸深度	最大水浸深度	0.288	0.178	0.231
		平均水浸深度	0.143	0.259	0.203
	水浸面積	水浸面積比	0.168	0.304	0.239
	水浸時長	總水浸時長	0.132	0.131	0.131

根據 2021 年的相關數據，確定澳門脆弱性指標的客觀權重和綜合權重，結果顯示（表 8、9），社會脆弱性指標的綜合權重從大到小依次是供水設施（0.197）、供電設施（0.196）、街市（0.131）、人口密度（0.117）、30 年或以上的住宅單位（0.115）、歷史建築（0.099）、公共停車場（0.067）、整體依賴指數（0.048）、教育程度（0.03）。承災能力指標的綜合權重從大到小依次是避險中心（0.442）、消防單位（0.257）、醫療機構（0.157）、治安單位（0.144）。

表 8 2021 年澳門社會脆弱性指標權重

指標類別	指標	元素	SW	OW	CW
社會脆弱性	人口	人口密度	0.196	0.065	0.117
		整體依賴指數	0.115	0.006	0.048
		教育程度	0.068	0.006	0.03
	住宅用地	30 年或以上的住宅單位	0.199	0.097	0.115
	重要承災體	供水設施	0.113	0.24	0.197
		供電設施	0.161	0.209	0.196
		街市	0.064	0.167	0.131
		歷史建築	0.039	0.132	0.099
公共停車場		0.045	0.078	0.067	

表 9 2021 年澳門承災能力指標權重

指標類別	指標	元素	SW	OW	CW
承災能力	救援能力	消防單位	0.210	0.382	0.257
		治安單位	0.105	0.247	0.144
	避災能力	避災中心	0.515	0.249	0.442
	醫療能力	醫療機構	0.170	0.122	0.157

（二）風暴潮危險性分析：以颱風“天鴿”和“海高斯”為例

風暴潮危險性分析可以分為風暴潮實時預測和風暴潮災害長期分析這兩類。為了對澳門在特定颱風事件期間的風暴潮進行災害風險評估，本文採用風暴潮實時預測討論單

場颱風中澳門城市風暴潮危險性分佈特點。基於澳門風暴潮災害風險指標體系，對“天鴿”和“海高斯”颱風作用下澳門 23 個統計區的風暴潮危險性進行分析。

研究區域的風暴潮災害危險等級根據五個具體的危險性指標元素（即最大流速、最大水浸深度、平均水浸深度、水浸面積比和總水浸時長）確定，其計算方法為：

$$H_i = \sum_{j=1}^5 D_{ij} \times W_j \quad (1)$$

其中， i 為研究區域的編號，本文研究澳門 23 個統計區的風暴潮災害危險性，故而 $i=1,2,\dots,23$ ； j 代表危險性指標元素； H_i 為風暴潮事件中第 i 個統計區的綜合危險等級； D_{ij} 為第 i 個統計區由具體的危險性元素 j 誘發的危險等級； W_j 為危險性元素 j 的權重。

風暴潮危險性一共分為 5 個等級，即安全、低危險性、中等危險性、高危險性和極高危險性（表 10、11）。風暴潮所造成的水浸現象也屬於洪水的一種，因此本文參考了澳洲以洪水深度與流速的組合曲線對洪水危險性進行的規範劃分、^① 菲律賓納加市二維水動力模型的洪水災害圖、^② 《中華人民共和國水利行業標準：洪水風險圖編制導則》，等有關洪水危險等級的確定的文獻，^③ 並結合風暴潮對澳門影響的特徵，得出澳門風暴潮危險性指標在各危險等級的閾值（表 12）。

表 10 風暴潮災害危險等級

危險等級	0	I	II	III	IV
危險值	0	$0 < H \leq 1$	$1 < H \leq 2$	$2 < H \leq 3$	$3 < H \leq 4$

表 11 風暴潮災害危險等級詳細描述

危險等級	危險程度	特徵
0	安全	沒有危險，該區域在風暴潮期間不會水浸
I	低	危險性低，該區域在風暴潮期間可能會有小範圍水浸，不會造成洪水
II	中	危險性中等，該區域在風暴潮期間可能會有水浸，並可能造成洪水
III	高	危險性高，該區域在風暴潮期間容易會有水浸，並容易造成洪水
IV	極高	危險性極高，該區域在風暴潮期間極易會有水浸，並極易造成洪水

^① Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand. *Floodplain Management in Australia: Best Practice Principles and Guidelines*. CSIRO Publishing, 2000.

^② Tennakoon, K. *Parameterization of 2D Hydrodynamic Models and Flood Hazard Mapping for Naga City, Philippines*. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), 2004.

^③ 中華人民共和國水利部：《中華人民共和國水利行業標準：洪水風險圖編制導則 SL483-2017》，2017 年 2 月。

表 12 風暴潮災害各危險性指標元素的危險等級閾值

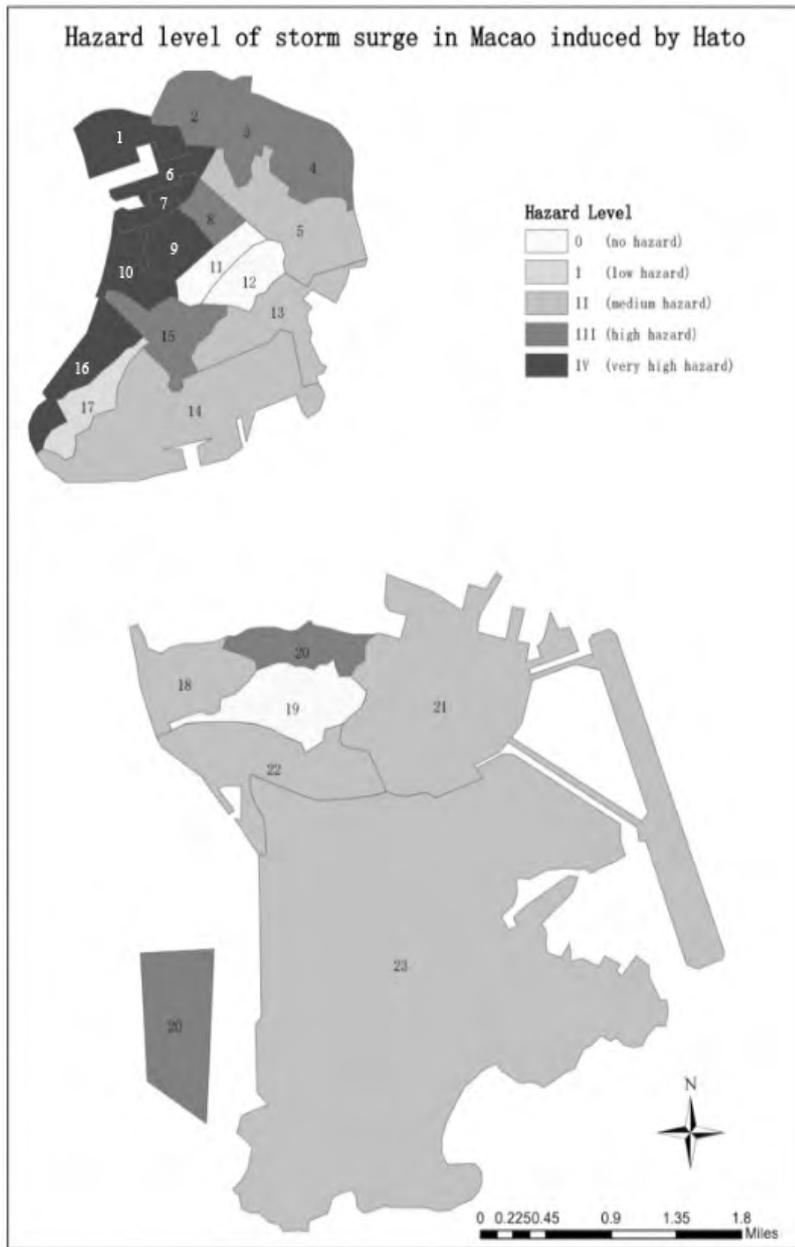
指標元素	危險等級				
	0 (安全)	I (低)	II (中)	III (高)	IV (極高)
最大流速 (m/s)	0	0 ~ 0.4	0.4 ~ 0.8	0.8 ~ 1.5	> 1.5
最大水浸深度 (m)	0	0 ~ 0.3	0.3 ~ 0.6	0.6 ~ 1.2	> 1.2
平均水浸深度 (m)	0	0 ~ 0.3	0.3 ~ 0.5	0.5 ~ 0.8	> 0.8
水浸面積比 (%)	0	0 ~ 25	25 ~ 50	50 ~ 75	> 75
總水浸時長 (h)	0	0 ~ T/4	T/4 ~ T/2	T/2 ~ 3T/4	> 3T/4
T = 風暴潮事件的總持續時間					

(1) 澳門在颱風“天鴿”下的風暴潮災害危險等級

採用經過嚴密驗證的 FVCOM 風暴潮模型對颱風“天鴿”在澳門引起的風暴潮進行了數值模擬，獲得了風暴潮在澳門 23 個統計區造成的水浸分佈情況。^① 基於表 6、12 和公式 1 計算得到各統計區的風暴潮災害危險等級圖（圖 1），其中，第 11、12 和第 19 區安全；第 17 區處在低危險；第 5、13、14、18、21、22 和第 23 區為中危險；第 2、3、4、8、15 和第 20 區為高危險；第 1、6、7、9、10 和第 16 區處於極高危險。可以看出澳門半島由於高程較低，受風暴潮的影響比路氹地區更嚴重。其中內港地區的水浸情況最為嚴重，整體處於 IV 級。

^① 李珂珂等：〈澳門新城區填海工程對沿海風暴潮特性的影響〉，第二十屆中國海洋（岸）工程學術討論會論文，廣東湛江，2022 年 12 月，頁 641 - 647。

圖 1 颱風“天鴿”作用下澳門各統計區的風暴潮災害危險等級

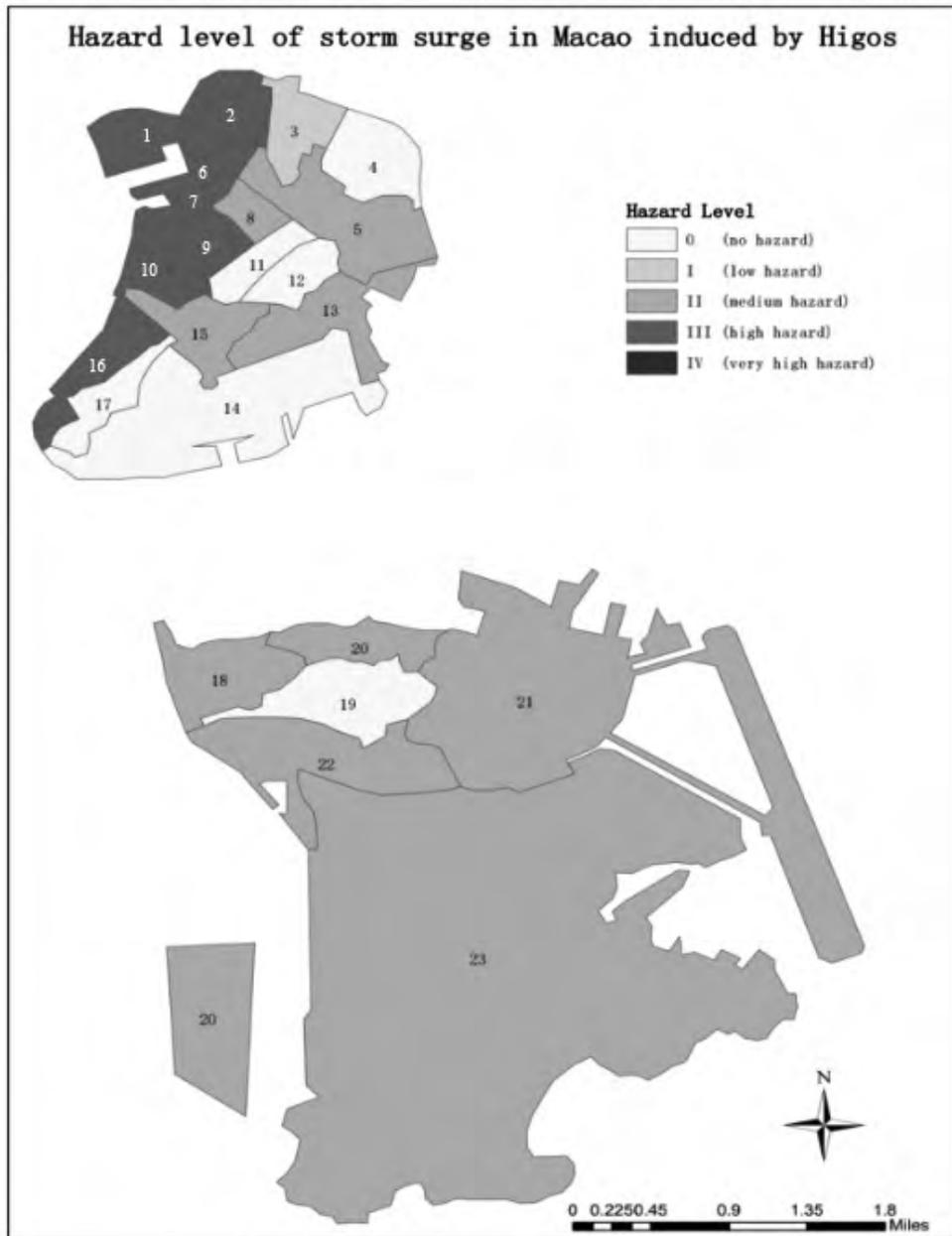


地圖來源：根據澳門特別行政區政府地圖繪製暨地籍局和統計暨普查局、並採用 ArcGIS 軟件製作。

(2) 澳門在颱風“海高斯”下的風暴潮災害危險等級

同樣，應用 FVCOM 風暴潮模型計算颱風“海高斯”作用下澳門 23 個統計區內風暴潮造成的水浸分佈情況，得到各個風暴潮災害危險等級分佈圖（圖 2），其中，第 4、11、12、14、17 和第 19 區安全；第 3 區處在低危險；第 5、8、13、15、18、20、21、22 和第 23 區為中危險；第 1、2、6、7、9、10 和第 16 區為高危險；沒有統計區處於極高危險。內港地區的水浸情況最為嚴重，整體處於 III 級。

圖 2 颱風“海高斯”作用下澳門各統計區的風暴潮災害危險等級



地圖來源：根據澳門特別行政區政府地圖繪製暨地籍局和統計暨普查局、並採用 ArcGIS 軟件製作。

(三) 風暴潮脆弱性分析

脆弱性分析能客觀地反映海濱城市對風暴潮的抵抗力。本文以建立的風暴潮災害風險指標體系為基礎，採用模糊綜合評價法對澳門 23 個統計區的脆弱性等級進行分析。脆弱性分析主要通過對各區的社會脆弱性和承災能力這兩方面進行脆弱等級劃分。社會脆弱性分析考慮人口、住宅用地和重要承災體這三類指標，一共九個指標元素（人口密

度、整體依賴指數、教育程度、30年或以上住宅單位、供水設施、供電設施、街市、歷史建築和公共停車場)。承災能力分析則考慮救援能力、避災能力和醫療能力這三類指標，一共四個指標元素(消防單位、治安單位、避險中心和醫療機構)。研究區域的脆弱性分為四個等級，即低脆弱性、中脆弱性、高脆弱性和極高脆弱性(表13)。參考Gornitz的海岸脆弱性分析模型，^①澳門的風暴潮災害脆弱性分析可採用以下公式計算：

$$V = \frac{S}{K} \tag{2}$$

其中，V為研究區域的災害脆弱性；S為社會脆弱性；K為承災能力。根據社會脆弱性和承災能力的模糊綜合評價，S和K也分為四個等級，下表為研究區域的綜合脆弱性等級與社會脆弱性和承災能力的關係(表14)。

表 13 脆弱性等級的詳細描述

脆弱等級	脆弱程度	特徵
I	低	該區為低脆弱性，通常不會在風暴潮中受損
II	中	該區為中脆弱性，在風暴潮期間可能會受損，且受損程度小
III	高	該區為高脆弱性，在風暴潮期間容易受損，且受損程度中等
IV	極高	該區為極高脆弱性，在風暴潮期間極易受損，且受損程度高

表 14 脆弱性等級的確定

		社會脆弱性			
		I (低)	II (中)	III (高)	IV (極高)
承災能力	I (低)	III (高)	IV (極高)	IV (極高)	IV (極高)
	II (中)	II (中)	III (高)	III (高)	IV (極高)
	III (高)	I (低)	II (中)	III (高)	III (高)
	IV (極高)	I (低)	II (中)	II (中)	III (高)

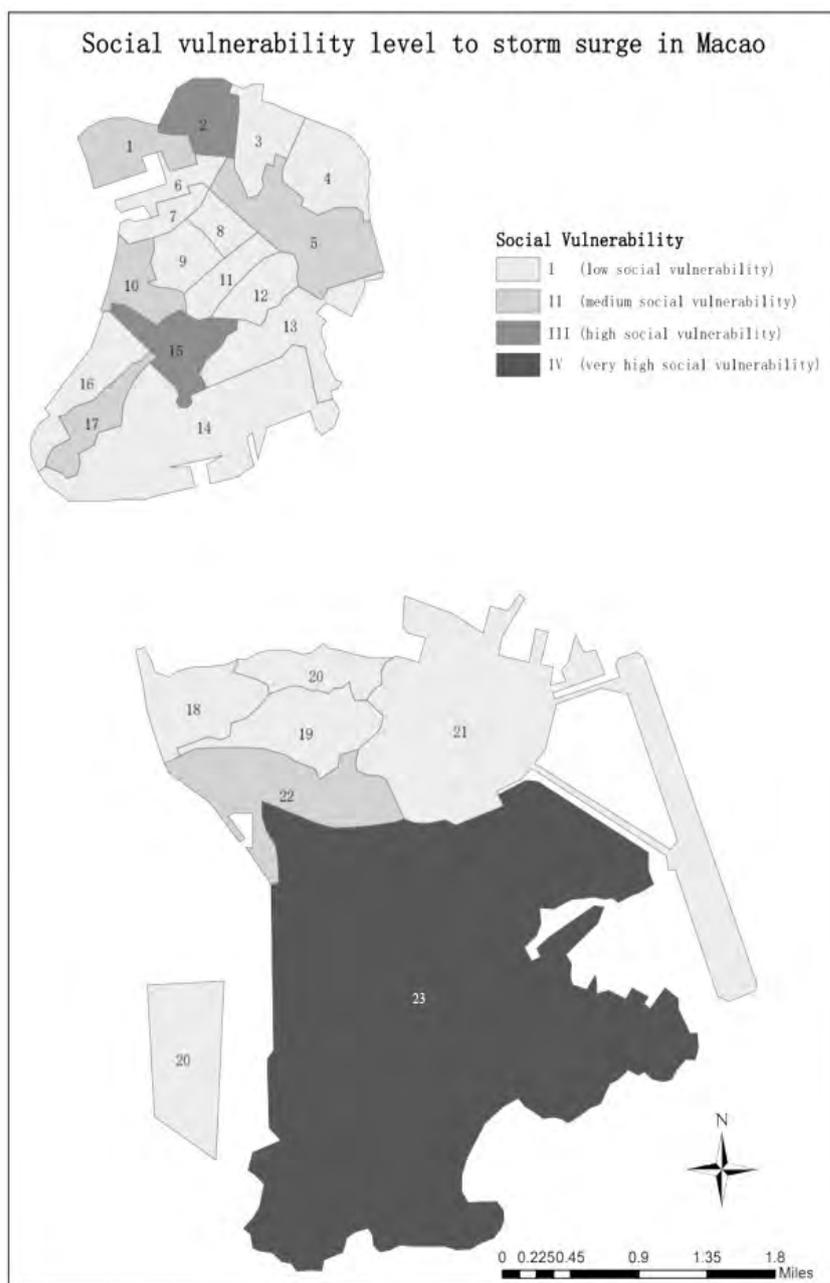
應用模糊綜合評價法確定澳門各統計區社會脆弱性和承災能力的等級。模糊綜合評價法在1965年被提出的，用來表達事物的不確定性，已被廣泛應用於災害等級的劃分。^②本文首先根據最大隸屬度原則，基於2021年澳門的相關統計數據，計算社會脆弱性和承災能力各指標元素的模糊度，以確定各統計區社會脆弱性和承災能力的等級。

^① Gornitz, Vivien. "Global Coastal Hazards from Future Sea Level Rise." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 89, no. 4, 1991, pp. 379-398.

^② 余蜀豫等：〈基於模糊數學的重慶地區雷電災害風險評估方法研究〉，《災害學》(西安)，第2期(2015)，頁75-78。

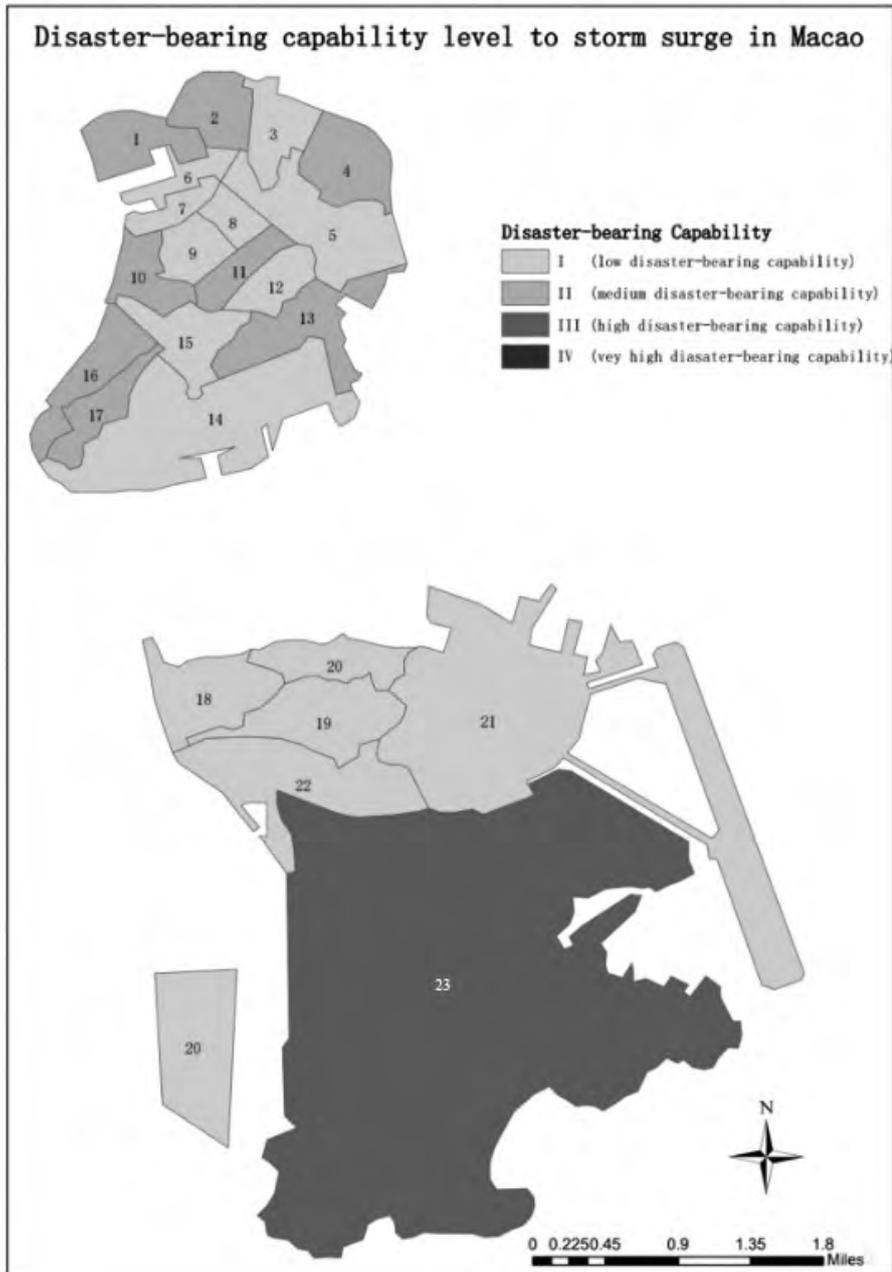
結果顯示（圖 3、4），第 23 區的社會脆弱性極高；第 2 和第 15 區處於高社會脆弱性；第 1、5、10、17 和第 22 區處於中等社會脆弱性；其餘統計區處於低社會脆弱性。而第 23 區是高承災能力區；第 1、2、4、10、11、13、16 和第 17 區屬於中等承災能力區；其餘統計區屬於低承災能力區。

圖 3 2021 年澳門各區的風暴潮災害社會脆弱性等級



地圖來源：據澳門特別行政區政府地圖繪製暨地籍局和統計暨普查局、並採用 ArcGIS 軟件製作。

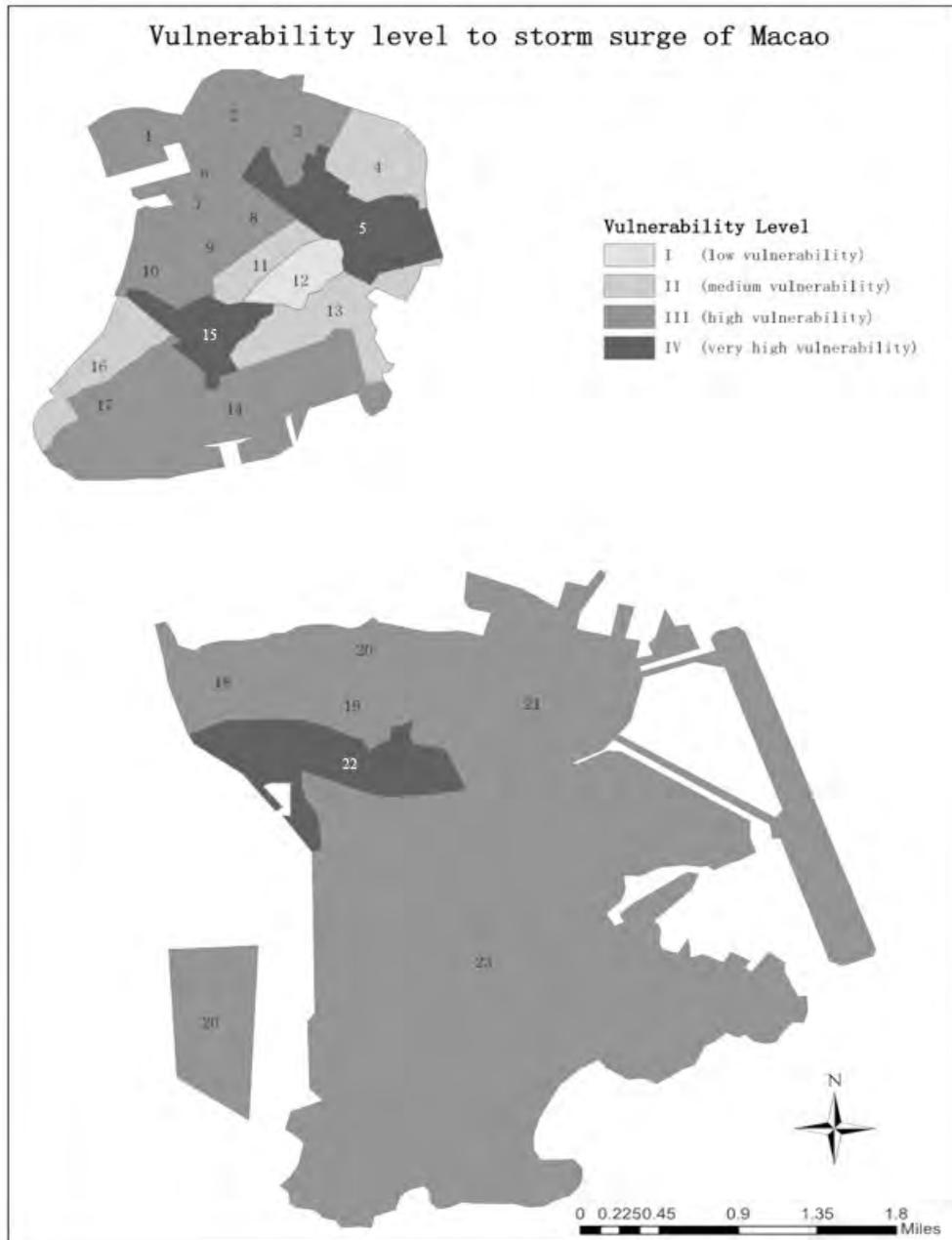
圖 4 2021 年澳門各區的風暴潮災害承災能力等級



地圖來源：根據澳門特別行政區政府地圖繪製暨地籍局和統計暨普查局、並採用 ArcGIS 軟件製作。

根據公式 2 和表 14，基於 2021 年的相關統計數據，可以得到澳門 23 個統計區的綜合脆弱性等級（圖 5）。一般而言，社會脆弱性越大則綜合脆弱性越大、承災能力越高則綜合脆弱性越小。第 5、15 和第 22 區屬於極高脆弱性區，這三個區的社會脆弱性處於中高水平，而承災能力處於中低水平。第 4、11、13 和第 16 區屬於中等脆弱性區，這四個區社會脆弱性低而承災能力中等水平。其餘統計區屬於高脆弱性區，這是因為這些區的社會脆弱性水平高於或等於承災能力水平。

圖 5 2021 年澳門各區的風暴潮災害脆弱性等級



地圖來源：根據澳門特別行政區政府地圖繪製暨地籍局和統計暨普查局、並採用 ArcGIS 軟件製作。

(四) 澳門風暴潮災害風險等級

風險等級是對致災環境的演變、致災因素的危險性和承災體的脆弱性的綜合反映。根據國際減災戰略 (ISDR) 所提出的災害風險評估模型，澳門風暴潮災害風險等級可由下式確定：

$$R = H \times V \quad (3)$$

其中， R 為風險等級； H 為危險性等級； V 為脆弱性等級。 H 根據風暴潮的數值模擬結果（水浸情況）劃分為五個等級， V 共劃分為四個等級，而風暴潮災害的風險水平 R 也被劃分為五個等級，其與 H 和 V 的關係見下表（表 15）。

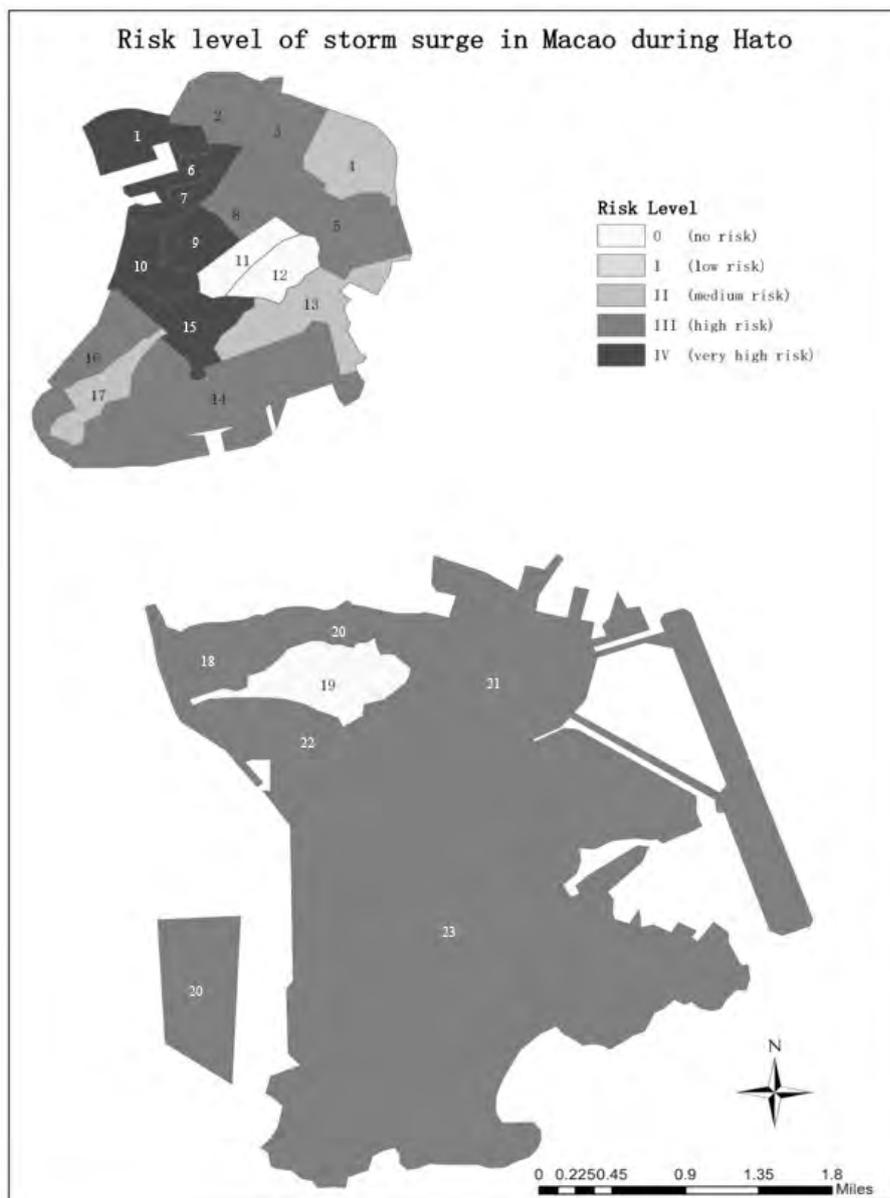
表 15 風暴潮災害風險等級

		危險性				
		0 (安全)	I (低)	II (中)	III (高)	IV (極高)
脆弱性	I (低)	0 (安全)	I (低)	I (低)	II (中)	II (中)
	II (中)	0 (安全)	I (低)	II (中)	III (高)	III (高)
	III (高)	0 (安全)	II (中)	III (高)	III (高)	IV (極高)
	IV (極高)	0 (安全)	II (中)	III (高)	IV (極高)	IV (極高)

(1) 颱風“天鴿”作用下澳門的風暴潮災害風險等級

基於圖 1 和 5 的結果，根據公式 (3) 得到在颱風“天鴿”影響下澳門 23 個統計區的風暴潮災害風險等級，結果顯示（圖 6），其中，第 1、6、7、9、10 和第 15 區屬於極高風暴潮災害風險區，這是因為這些統計區風暴潮脆弱性高、且在颱風“天鴿”風暴潮期間處於極高危險性。第 2、3、4、5、8、14、16、18、20、21、22 和第 23 區屬於高風暴潮災害風險區，這些統計區在颱風“天鴿”風暴潮期間處於中高危險性和中高脆弱性。第 13 和第 17 區屬於中等風暴潮災害風險區，這兩個區在颱風“天鴿”風暴潮期間的危險性和脆弱性都處於中低水平。第 11、12、和第 19 區屬於無風暴潮災害風險區，這三個區不會受颱風“天鴿”風暴潮的影響。

圖 6 颱風“天鴿”影響下澳門各區的風暴潮災害風險等級

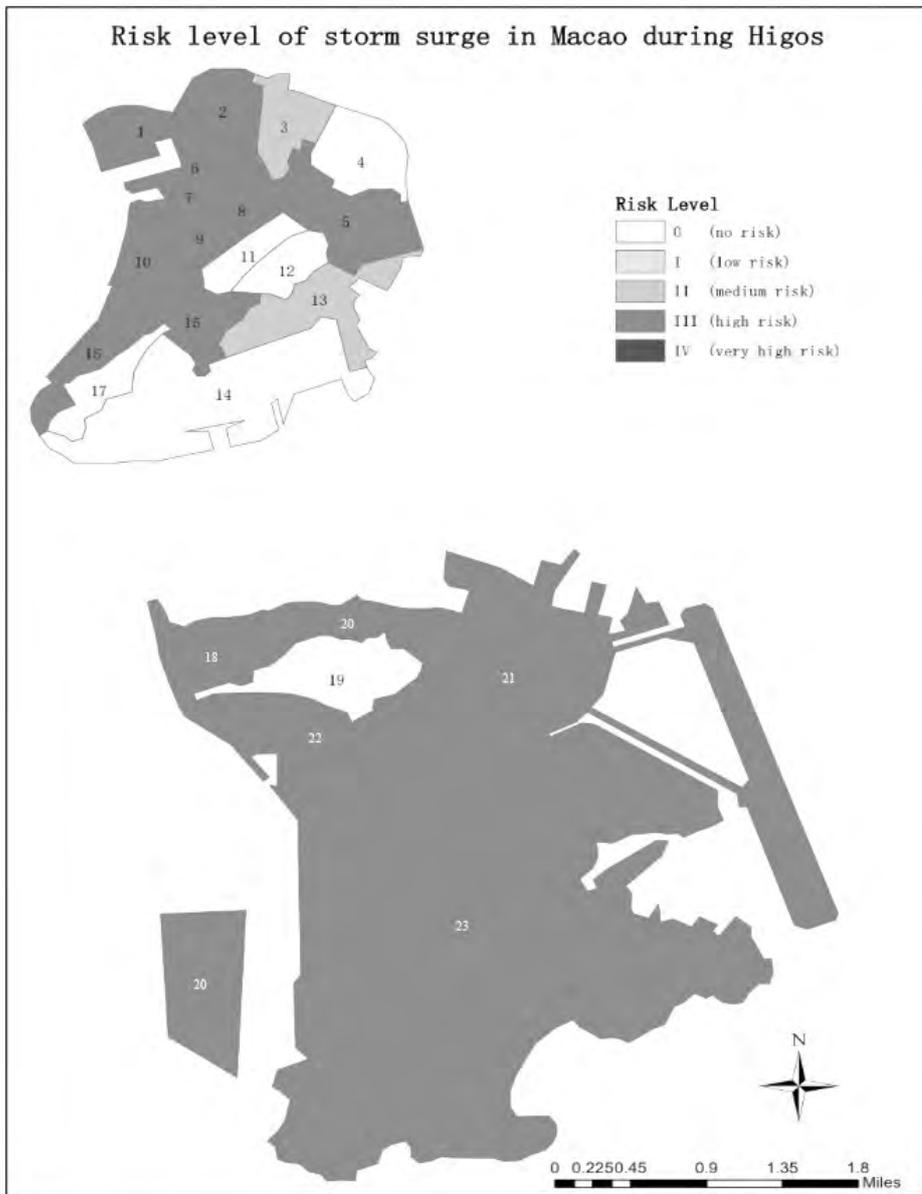


地圖來源：根據澳門特別行政區政府地圖繪製暨地籍局和統計暨普查局、並採用 ArcGIS 軟件製作。

(2) 颱風“海高斯”作用下澳門的風暴潮災害風險等級

同樣，基於圖 2 和 5 的結果，根據公式 (3) 得到在颱風“海高斯”影響下澳門 23 個統計區的風暴潮災害風險等級，結果顯示 (圖 7)，在“海高斯”作用下，第 1、2、5、6、7、9、10、15、16、18、20、21、22 和第 23 區屬於高風暴潮災害風險區，在颱風“海高斯”風暴潮影響期間的危險性和脆弱性都處於中高水平。第 3 和第 13 區屬於中等風暴潮災害風險區，“海高斯”作用期間第 3 區處於低危險性和高脆弱性，而第 13 區屬於中危險性和中脆弱性。其餘統計區在颱風“海高斯”風暴潮期間不受影響。

圖 7 颱風“海高斯”影響下澳門各區的風暴潮災害風險等級



地圖來源：根據澳門特別行政區政府地圖繪製暨地籍局和統計暨普查局、並採用 ArcGIS 軟件製作。

四、結論

在全球變暖和快速城市化的背景下，沿海地區風暴潮災害風險不斷升高、損失不斷增加，可持續發展面臨嚴峻威脅。本文以澳門為研究對象，針對海濱小型、高度城市化、人口密集的沿海城市，建立了風暴潮災害風險指標體系，並以颱風“天鴿”和“海高斯”為例對澳門風暴潮災害風險進行了評估。總的來說，風暴潮災害風險隨着颱風等級的增加和水浸的增加而增加。澳門沿海地區的風暴潮災害風險高於內陸地區，澳門半島的風

暴潮災害風險高於路氹地區，且內港的風暴潮災害風險最高。澳門半島的高程較低、城區年代悠久、人口密度大，有許多老居民區和歷史建築，承災能力弱，而其中內港地區是最容易受到風暴潮的影響。建立風暴潮災害應急預案、強化風暴潮緊急避災演練、重視風暴潮防災知識宣傳，這些均有助於提升澳門海洋防災減災能力。

[責任編輯 陳超敏]

[校對 何仲佳]