

以澳門歷史城區為核心的防災減災規劃與管理研究

周龍 *

摘 要 在全球氣候變化的背景下，自然災害的發生頻率和造成的危害均在增加。因人口密度大、空間肌理複雜、老舊建築連綿以及市政設施薄弱等因素，導致澳門歷史城區及周圍區域致災風險高，防災減災工作難度大。澳門歷史城區是世界的珍貴遺產，也是宜居城市生活空間的一部分，因此制定針對澳門歷史城區及周圍區域的專項規劃設計與管理策略具有重要的意義。本文通過對城市形態與空間肌理進行定量分析，識別澳門歷史城區及周圍區域的防災減災重點及脆弱區域；藉助氣象監測數據與物理模型模擬，分析颱風引起的海水倒灌、降雨與風災影響歷史城區及周圍區域的致災機制與範圍；藉助GIS網絡分析，探究災害影響歷史城區及周圍區域的公共交通與疏散的具體過程。依此，本文進一步提出針對澳門歷史城區及周圍區域的專項規劃設計與管理策略，並建議構建一套防災減災應急體系指導資訊系統，以期為未來的防災減災工作提供借鑑與參考。

關鍵詞 澳門；防災減災；歷史城區；空間韌性；規劃設計

引言和背景

已被列入《世界文化遺產名錄》的澳門歷史城區體現了澳門四百多年東西文化交融的歷史精髓，是澳門城市的重要組成部分和世界人類的珍貴遺產。¹ 歷史城區的保護與管理是促進澳門社會健康可持續發展和建設世界旅遊休閒中心的重要基石。² 根據聯合國《保護世界文化和自然遺產公約》，世界遺產正受到自然災害和人為破壞兩類災害的威脅。³ 如今澳門已在保護歷史城區、應對城市建設壓力威脅方面開展相應研究，並制定相關管理策略。1953年，澳門政府確定了當時已有的單體建築文物，逐漸開始關注城市的保護工作。1976年，澳門政府頒佈了數條法令，同時建立委員會負責文物保護工作。澳門特別行政區政府成立後，更把文化遺產的保護與再利用作為施政重點。2005年，澳門歷史城區正式被聯合國教科文組織列入《世

界文化遺產名錄》後，文化遺產保護工作進入了一個全新的階段，《澳門歷史城區保護及管理計劃》明確了對景觀視覺廊道和城市街道風貌的管理和監督，提出了對建築樣式、體量和高度的限制條件，並設定了歷史城區空間形態肌理的維護措施和改造限制，以及制定了建築文物的修復準則。⁴

由於陸地和海洋氣候的雙重作用，澳門經常受到風暴潮災害影響。⁵ 僅在1955至1984年這30年期間，澳門遭受熱帶風暴和颱風侵襲共63次（以中心距離澳門100海里為準），平均每年2.1次；颱風發生最多的年份在1980年，次數高達8次；1964年次之，次數高達5次。2017年颱風“天鴿”過境澳門時，近三分之一的陸地面積受到水浸影響，當時城市最高水浸高度達到2米以上，造成10人死亡，244人受傷，財產損失高達125億澳門元。⁶ 2018年，澳門全年共受到了7個熱帶氣旋影響，其中強颱風“山竹”的影響最為嚴重。颱風期間的海水倒灌、強降雨及大風災害，導致城市部分區域出現內澇、人員傷亡、城市基礎設施中斷、交通

* 周龍，澳門城市大學創新設計學院城市規劃與設計課程副教授、美國俄克拉荷馬大學規劃、設計與構造博士，主要研究領域為生態城市規劃設計與績效評價。

癱瘓，暴露出澳門防災減災專項規劃缺失，政府災害應急回應工作缺乏系統性問題。

增強文化遺產的防災韌性體系亦是國際前沿的熱點問題，普遍缺少協同歷史風貌保護和防治災害改造的完整模式、技術方法和標準體系。澳門歷史城區同時也是重要的居住生活空間，由於老舊建築連綿、城市肌理複雜、市政設施薄弱、交通疏散緩慢等特點，災害防禦體系脆弱，易受風暴潮災害的影響。然而，目前對澳門歷史城區保護的研究主要集中在城市肌理的保護、⁷ 遺產建築保護、⁸ 視線風貌保護和緩衝區範圍的劃定等方面，⁹ 缺少從自然災害防禦角度，針對澳門歷史城區保護方法與技術的指導。2019年10月，澳門特別行政區政府發佈《澳門特別行政區防災減災十年規劃（2019—2028年）》¹⁰，在政策上指出要優化防災減災應急管理體系，提升澳門應對各類突發事件的能力和水平。文件提出了“共建安全韌性城市，同享幸福美好生活”的願景，旨在建設國際先進的宜居、宜業、宜行、宜遊、宜樂城市，然而卻未在技術和方法層面上提出城市空間，尤其是歷史城區的防災減災系統理論、技術與方案。近來，各類城市空間精細定量分析方法、防災動態模型模擬技術、大數據獲取與分析工具，以及高等優化算法的迅速發展，為歷史街區複雜空間肌理的剖析與歸納、風暴潮災害影響範圍預測、災時智慧臨時交通組織、救災服務設施佈局和災後合理有序恢復等方面提供新的方法，進而為傳統的防災理論與實踐的提升創造了新的機會和可行性。

城市防災韌性（City Disaster Resilience）作為一種災前防禦、災時反應和災後管理的理論被廣泛實踐，即通過規劃設計與管理使城市系統在受到自然災害威脅時，具備災害抵抗力、快速恢復力、彈性適應力和可持續發展力，使城市系統受災害的影響降至最低，並保護其基本結構和功能。¹¹ 同時在災害發生時，防災韌性體系的構建需同時考慮到核心區域與周邊關聯區域，彼此沒有邊界限制，避免“頭痛醫頭，腳痛醫腳”的片面低效模式。¹² 因此，歷史城區的

防災保護是城市整體防災體系中的一部分，本研究以澳門歷史城區及周邊關聯範圍為主要研究對象，目標將城市—社會防災韌性體系構建融合進以澳門歷史城區為核心的城市空間，藉助空間統計與定量歸類、災害環境模型與模擬、情景假設與數據分析等技術方法，從空間結構佈局、空間形態設計、交通疏散組織和功能優化等方面進行探索，提出針對澳門歷史城區及周圍區域的專項規劃設計與管理策略，並建議構建一套防災減災應急體系系統，以期為未來的防災減災工作提供借鑑與參考。

一、空間環境肌理定量研究與防災減災難點分析

城市普遍是在街道、建築物、構築物、公共空間、綠化公園和地形地貌等共同作用下，在平面上組成幾何形態，並由這些幾何形態及不同的建設材質、佈局形態、建築密度、街巷脈絡等共同形成城市空間特徵，即城市肌理。城市肌理的演變主要受到來自時間、經濟與社會的綜合影響，反映出區域範圍內的社會生活模式、社區關係、風俗與儀式等人文活動，體現了城市的發展特徵。城市肌理在物質環境上的具體表現，包括用地佈局、建築類型、建築規模及交通結構等。¹³ 城市空間形態和肌理特徵與防災韌性有着密不可分的聯繫，歷史的悠久造就了澳門歷史街區空間結構和肌理的複雜性，而空間結構和肌理的複雜性給城市合理高效的防災減災造成困難和挑戰，例如災害發生場所的隨機性、人口佈局的離散性和應急疏散的誤導性。本研究首先藉助 GIS 和 Depthmap 工具，通過空間句法（Space Syntax）對歷史城區進行空間定量研究，準確掌握其複雜肌理空間結構，為防災保護與管理奠定基礎。

空間句法以拓撲關係為基礎，定量描述空間形態、空間特徵以及空間之間的關聯性與通達性。¹⁴ 本研究採取空間句法軸線法，通過連接值（Connectivity）、控制值（Control Value）、深度值（Depth Value）、集成度（Integration Value）和穿行度（Choice）

澳門研究

五個指標，對歷史城區空間網絡進行分割計算，並分析關聯與通達程度。

（一）連接值

連接值 C_i 表示系統中與第 i 個單元空間相交的其他單元空間的數目。對應軸線圖，連接值則表示與指定街道 i 相交的其他街道的總數。其運算式為：

$$C_i = K$$

連接值表示系統中與某個街區空間相交的其他單元數目，或部分空間直接相連的空間數。某個街區空間的連接值越高則表示其空間滲透性越好，與其他空間的聯繫就越密切，也代表了該路段容易集中大量的交通流量，災害發生時形成交通擁堵的概率提高。

（二）控制值

$$Ctrl_i = \sum_{j=1}^k \frac{1}{C_j}$$

上式中， k 是與第 i 個節點相交的節點數， j ($j=1,2,\dots,k$) 是與節點 i 直接相連接的節點， C_j 是第 j 個節點的連接值。控制值表示一個空間對與之相交空間的影響程度，對該空間的選擇則是由與該空間相鄰的空間數目所決定的，數目越多，意味着該空間的被選擇概率越小，災害發生時導向性越差。

（三）深度值

假設 d_{ij} 是連接圖中任意兩點 i 與 j 之間的最短距離，其總深度值為：

$$\sum_{j=1}^n d_{ij}$$

其平均深度值的公式如下所示，式中的 n 是連接結點數，深度值反映了空間中一個節點

距其他所有節點的最短距離：

$$MD_i = \frac{\sum_{j=1}^n d_{ij}}{n-1}$$

（四）集成度

集成度由相對不對稱值 RA_i (Relative Asymmetry) 和實際相對不對稱值 RRA_i (Real Relative Asymmetry) 來表示。它反映了某一空間與系統中其他空間的聚集或者分散程度，亦可以表示某一空間與局部空間或整體空間之間的聯繫。

$$I_i = RA_i = \frac{2(MD_i - 1)}{n-2}$$

$$I_i = RRA_i = \frac{RA_i}{D_m} = \frac{\frac{2(m[\log_2((\frac{m+2}{3}) - \eta) + 1])}{(m-1)(m-2)}}{\frac{2(MD_i - 1)}{(m-2)}} = \frac{m[\log_2((\frac{m+2}{3}) - \eta) + 1]}{(m-1)|MD_i - 1|}$$

當一個空間的集成度越大，表示該空間在整個空間系統中接近交匯位置；反之，該空間處於遠離交匯位置。

（五）穿行度

穿行度表示系統中某一空間被其他最短路徑穿行的可能性。

$$R^2 = \frac{[\sum (C_i - \bar{C}) (I_i - \bar{I})]^2}{\sum (C_i - \bar{C})^2 \sum (I_i - \bar{I})^2}$$

穿行度意味着從局部感受整體，穿行度越高的城市系統，通過任意一個局部空間獲得整個系統的信息越多，反之則越少。

精確定量計算澳門歷史城區空間節點的連接值、控制值、深度值、集成度和穿行度五個指標，可為韌性空間識別和緊急疏散路線設計提供科學依據。本研究選取澳門歷史城區及周圍關聯區域中的 37 個主要城市空間，從北到南依次是：白鴿巢前地、花王堂前地、花王堂街、

大三巴街、戀愛巷、聖方濟各斜巷、大三巴右街、大三巴斜巷、大三巴巷、關前後街、關前正街、賣草地街、板樟堂街、板樟堂前地、米糙巷、營地大街、議事亭前地、主教巷、大堂巷、板樟堂巷、大廟腳巷、大堂街、仁慈堂右巷、龍嵩正街、崗頂前地、官印局街、風順堂街、高樓街、亞婆井街、西望洋斜巷、西望洋巷、鮑公馬路、龍頭里、媽閣街、媽閣斜巷、媽閣上街、東望洋斜巷。本研究通過空間句法中的軸線分析法進行定量計算，並將連接值、控制值、深度值、集成度和穿行度量化數值匯整製成圖 1。

從定量結果可以看出，連接值與控制值的峰谷基本能夠一一相對，大堂街的控制值最高，其次是花王堂街、議事亭前地與賣草地街，說明這些街區與其他街道連接緊密，災害發生時容易集中大量的人群流量，易形成擁堵，應急疏散效率較低，建議應增強災時應急疏散指揮協助和導向視覺標識。控制值低的街道，例如仁慈堂右巷與其他道路的聯繫不緊密，行人的通行量也相應減少，人口聚集密度較低，災時疏散壓力相對較小。大堂街依舊是歷史街區中集成度最高的區域，並依次向四周遞減。大堂街連接了多條幹道，其中包括亞美打利庇盧大馬路（新馬路）、大堂前地、板樟堂前地等，由於這些道路數量較多，空間可達性較高；其次議事亭前地也是集成度較高的區域，從大三巴斜巷至崗頂前地區域的集成度都高於澳門半島集成度的平均值，體現這個區域的中心優勢，往往會有大量人流停留聚集，可考慮在此區域設立災害避難場所，方便突發災害的就近撤離。連接值、控制值、集成度顯示線性值從北到南依次減弱，說明歷史城區道路的可達性從北到南依次降低，其交通效率等也逐步降低，深度值與穿行度由北到南依次增加，南邊媽閣廟區域在歷史街區中可達性低。整體來看澳門歷史城區及周圍關聯區域空間的連接度不高，分流的能力較弱，如遇大量人流應急疏散，不利於發揮疏散功能最大化；區域內的大部分道路為小巷與里、圍，斷頭路較多，道路通達性不明顯，給防災減災疏散造成壓力。

二、颱風衍生災害影響澳門歷史城區及周圍關聯區域過程和脆弱區識別

在以上初步分析歷史城區及周圍關聯區域空間肌理及防災減災難點分析的基礎上，本研究將對颱風“天鴿”過境澳門的過程（2017 年 8 月 23 日上午 10 時 50 分至 12 時 20 分）進行風暴潮實景還原，並通過數據分析與模型模擬，分別識別受颱風天氣影響而引起海水倒灌、強降雨及風災影響的脆弱區域。

過往資料表明，當城市內澇水深超過 30 厘米時，機動車輛行駛困難，行人行走極度困難；當城市內澇水深超過 60 厘米時，水深超過機動車進氣口，機動車輛無法行駛，行人無法行走。¹⁵ 藉助地球物理暨氣象局 17 個水位監測點的實時數據，並且額外選取 23 個制高點作為模擬點，研究引入反距離加權內插分析（Inverse Distance Weighted）和相等間隔重分類（Equal Interval）的方法，在 GIS 中模擬還原歷史城區及周圍區域受城市內澇水浸深度與影響範圍。模擬算法如下所示：

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

其中 $Z(s_0)$ 為 s_0 處的預測值； N 為預測計算過程中周圍樣點數量； λ_i 為預測計算過程中使用的各樣點的權重，該數值會隨着樣點與預測點之間的距離的增加而減少； $Z(s_i)$ 是在 s_i 處獲得的測量值；確定權重的計算公式為：

$$\lambda_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p} \quad \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$$

其中， p 為指數值； d_{i0} 是預測點 s_0 與各預測點的 s_i 之間的距離。採樣點在預測點值的計算過程中所佔權重大小受參數 p 的影響，隨着採樣點與預測點值作用的權重大小是成比例的，這些權重值的總和為 1。根據時間的演變，計算出歷史城區範圍內風暴潮情況的空間分佈，再根據資料所示的風險等級評價範圍，採

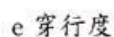
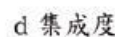
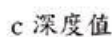
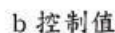


圖 1. 澳門歷史城區及周圍關聯區域空間環境肌理定量 (圖片來源: 筆者自製)

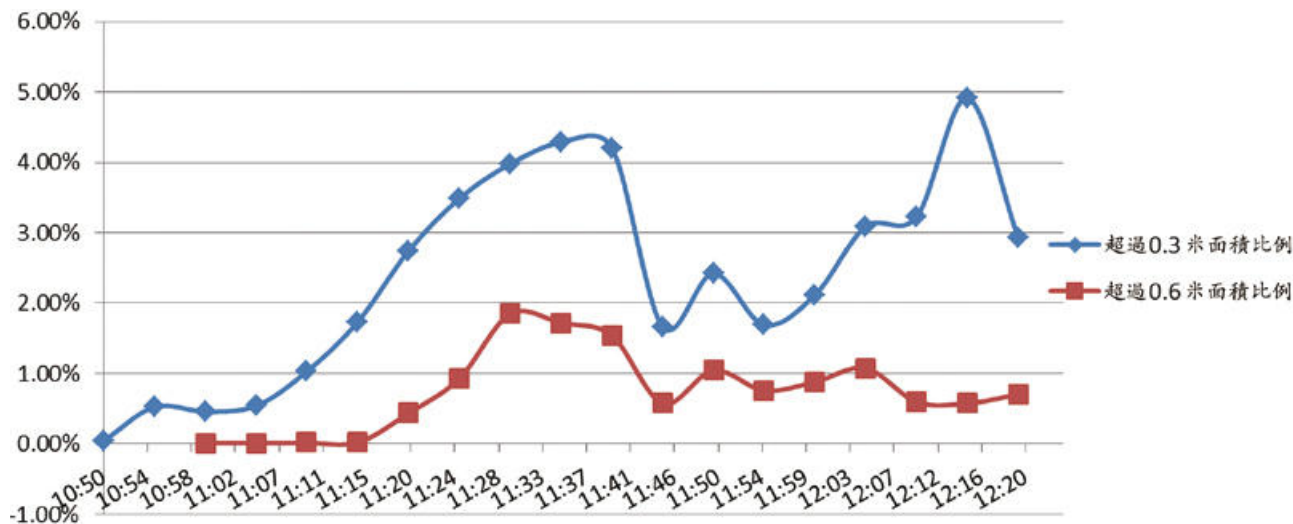


圖 2. 0.3 米深與 0.6 米深內湧範圍面積與比例變化（圖片來源：筆者自製）

用空間分析的方式（Spatial Analysis）劃分出澳門歷史城區內安全脆弱區範圍。

每間隔 5 分鐘的監測數據提取與模擬分析結果顯示，2017 年 8 月 23 日上午 10 時 50 分前後，海水倒灌從內港開始逐漸引起城市內湧，並向歷史城區及周邊區域蔓延，持續到 12 時 20 分前後，內湧積水從筷子基與關閘之間逐漸退去，0.3 米深與 0.6 米深內湧範圍面積與比例變化如圖 2 所示。在研究時間段中的總體趨勢均呈現先快速增加，達到峰值後減小，最後波動消退的趨勢。由於歷史原因，這些區域的防洪防湧設施建設還不夠完善，部分地區的排水設施存在年久失修以及管網堵塞等問題，導致很多地區排湧設施的設計和建造滯後。

如圖 3-a 所示，當日上午 11 時 30 分至 40 分，水浸面積達到峰值，城市整體水浸範圍延伸至媽閣廟一帶地區，中部延伸至南灣湖以南一帶，水浸高度超過 0.3 米的區域範圍面積超過 120 萬平方米，佔澳門總面積的 4%；水浸高度超過 0.6 米的區域接近 60 萬平方米，佔澳門區域總面積的 2%。同一時間，歷史城區內水浸高度超過 0.3 米的區域範圍面積超過 16 萬平方米，佔歷史城區面積的 13%，受影

響範圍主要分佈在大三巴及康公廟附近一帶的歷史街區；歷史城區中水浸高度超過 0.6 米的區域範圍面積約為 11 萬平方米，佔歷史城區面積的 9%，受影響範圍主要分佈在大三巴以西部分街區。

城市公共交通是澳門最主要的交通方式。巴士運行安全性比普通車輛高，造成交通壓力小，且不存在停車車庫被水浸的風險，但因懸掛八號或以上熱帶氣旋警告信號前，巴士系統過早停運，為颱風抵近前疏散群眾或前往防災救災緊急避難點均帶來不便。《澳門特別行政區城市總體規劃（2020—2040 年）》草案諮詢文本中，關於“都市防災”第 22 條亦有提及避險路線規劃內容，《澳門特別行政區防災減災十年規劃（2019—2028 年）》中也有減少交通基礎設施因災害損毀中斷服務時間的行動目標，故本研究初步探討通過調整臨時路線方法，適當延長巴士運營時間，根據水浸範圍和深度，精準確定停運時間，逐條分線停運，盡最大可能起到有效疏散作用。本研究對經過澳門歷史城區的公共交通線路數目進行了匯總，其中包括了整段線路全部在澳門半島內的 26 條線路，以及 11 條行駛在澳門半島和離島之間的公共交通線路。在颱風引起的城市水浸深度

澳門研究

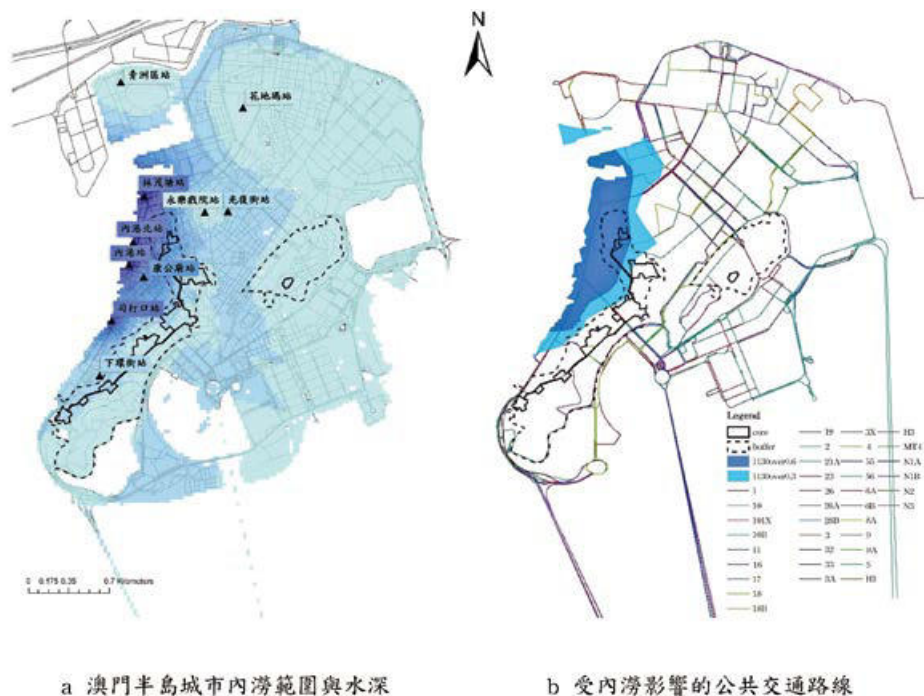


圖 3. 2017 年 8 月 23 日上午 11 時 30 分，澳門半島城市內湧情況與受影響的公交線路（圖片來源：筆者自製）

超過 0.6 米的條件下，共有 28 條經過歷史城區或附近的公交線路路面通行條件受到影響（如圖 3-b 所示），其中影響較為嚴重的路線包括 1 號和 26A 號兩條公共交通線路。本研究通過 GIS 網絡分析（Network Analysis），建議對受到影響的公交路線進行災時臨時路線調整，以確保有效疏散歷史城區遊客及居民，避免路線受阻造成交通擁堵。

如圖 4-a 所示，1 號公共交通線路呈南北走向，北至關閘總站，南達媽閣總站，總共停靠 16 個站點，當中有 7 個公共交通站點受到內湧深度超過 0.6 米的安全脆弱區的阻礙。在水浸初期，只有火船頭街的小部分路段受到了內湧的阻礙。隨着時間推移，內湧區域範圍不斷向東向北擴大，對巴素打爾古街的部分區域和沙梨頭海邊街均造成了不小的影響，阻斷了交通正常運行，建議調整至先向東進入亞美打利庇盧大馬路，再向北行駛，避開內湧區域，後與原線路匯合；中期，內湧阻礙區域分為內港一帶和沙梨頭海邊街兩塊，此時對 1 號線路

的調整也變為分南北兩個部分來進行；後期，內湧情況又有所改變，雖然線路中還是有兩塊區域受到了內湧阻礙，但區域位置和面積有所變化，位於南部河邊新街的一塊內湧區域面積有所擴大，而位於北部的一塊內湧區域範圍北移，對沙梨頭海邊街一帶造成影響，因而線路需要再一次進行調整。

如圖 4-b 所示，26A 號公共交通線路是一條連接澳門半島與離島的重要公共交通線路，且它在澳門半島的區域範圍內有 11 個站點，受到內湧阻礙嚴重的站點主要分佈在沙梨頭及大三巴區和下環區。這塊區域不僅是人口密集的交通樞紐地帶，同時更是極易受到風暴潮災害影響的脆弱區。災害初期，0.6 米水深阻礙範圍逐漸從內港火船頭街的小部分區域，擴大到北至沙梨頭海邊街，南至巴素打爾古街一帶，建議路線調整為由殷皇子大馬路向東北方行駛，進入南灣大馬路，避開內湧阻礙；中期，內湧深度超過 0.6 米的區域範圍只在沙梨頭海邊街一帶，對原有的 26A 號公共交通線路造成

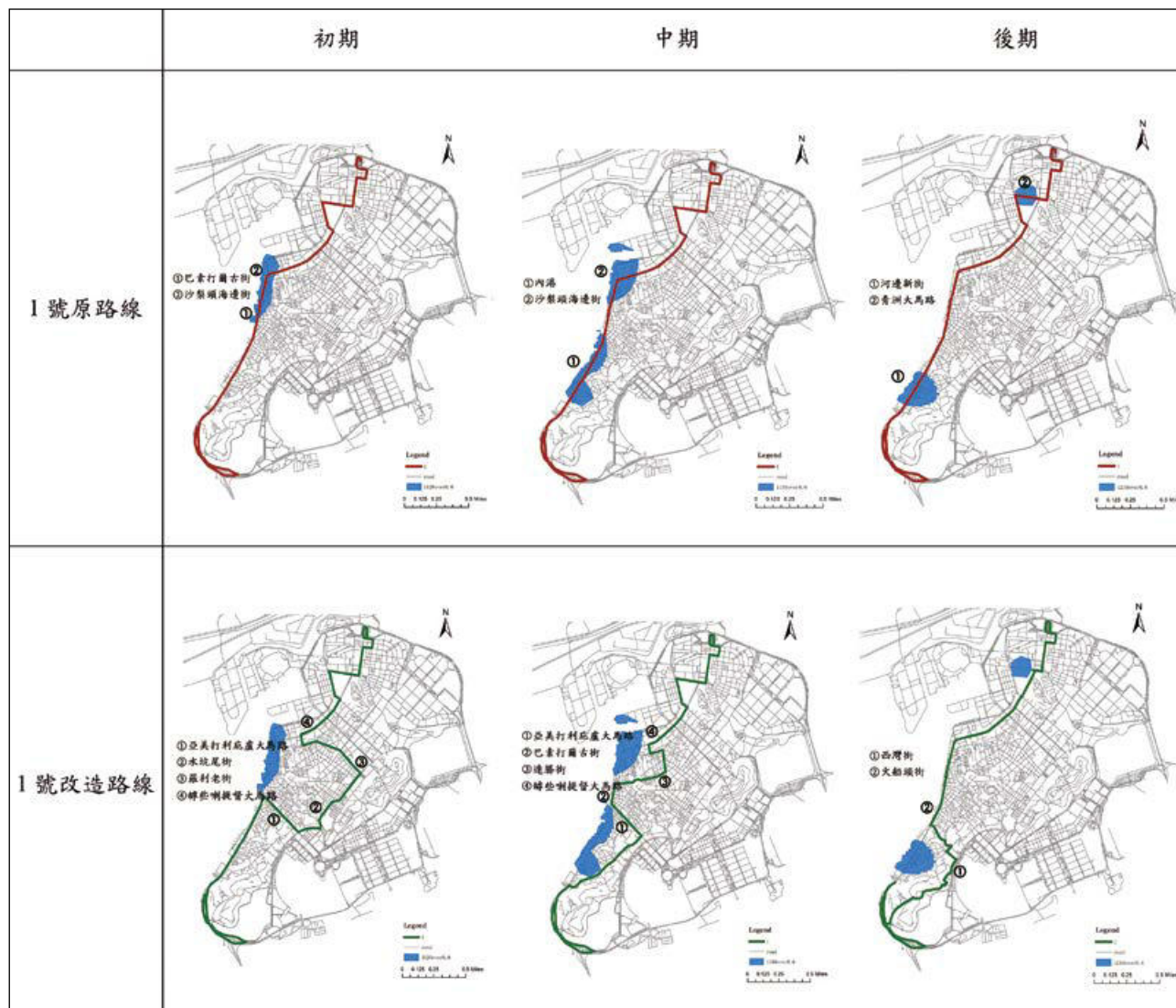


圖 4-a. 1 號路線受內湧積水影響情況與臨時路線建議（圖片來源：筆者自製）

了影響，建議臨時路線調整為沿巴素打爾古街行駛，之後向東進入連勝街，行駛一段距離後，向北行駛進入鏡湖馬路，之後抵達罈些喇提督大馬路，與原線路相匯合；後期，阻礙區逐漸北移至青洲大馬路一帶，研究提出臨時路線調整，改向西北方向行駛，經過白朗古將軍大馬路，繞開內湧影響的區域以及人口密集區，避免給城市交通造成過大影響。

澳門的水浸災害不僅是由海水倒灌引起

的，暴雨或是持續性強降雨也會導致澳門老城區受到水浸的影響。因此，本研究額外藉助 WV3 和資源三號衛星高精度遙感影像識別下墊面功能與覆蓋（LULC），結合土地工務局排水管網佈局，¹⁶ 並實地測量確定管線深度及流向，使用暴雨強度計算和雨水流量計算（合理化公式），通過 SWMM 模擬黃色暴雨警告、紅色暴雨警告、黑色暴雨警告情景下地面積水與地表匯流情況，再通過 GIS 進行可視化分析得到不同暴雨時期對歷史城區水浸的影響。

澳門研究

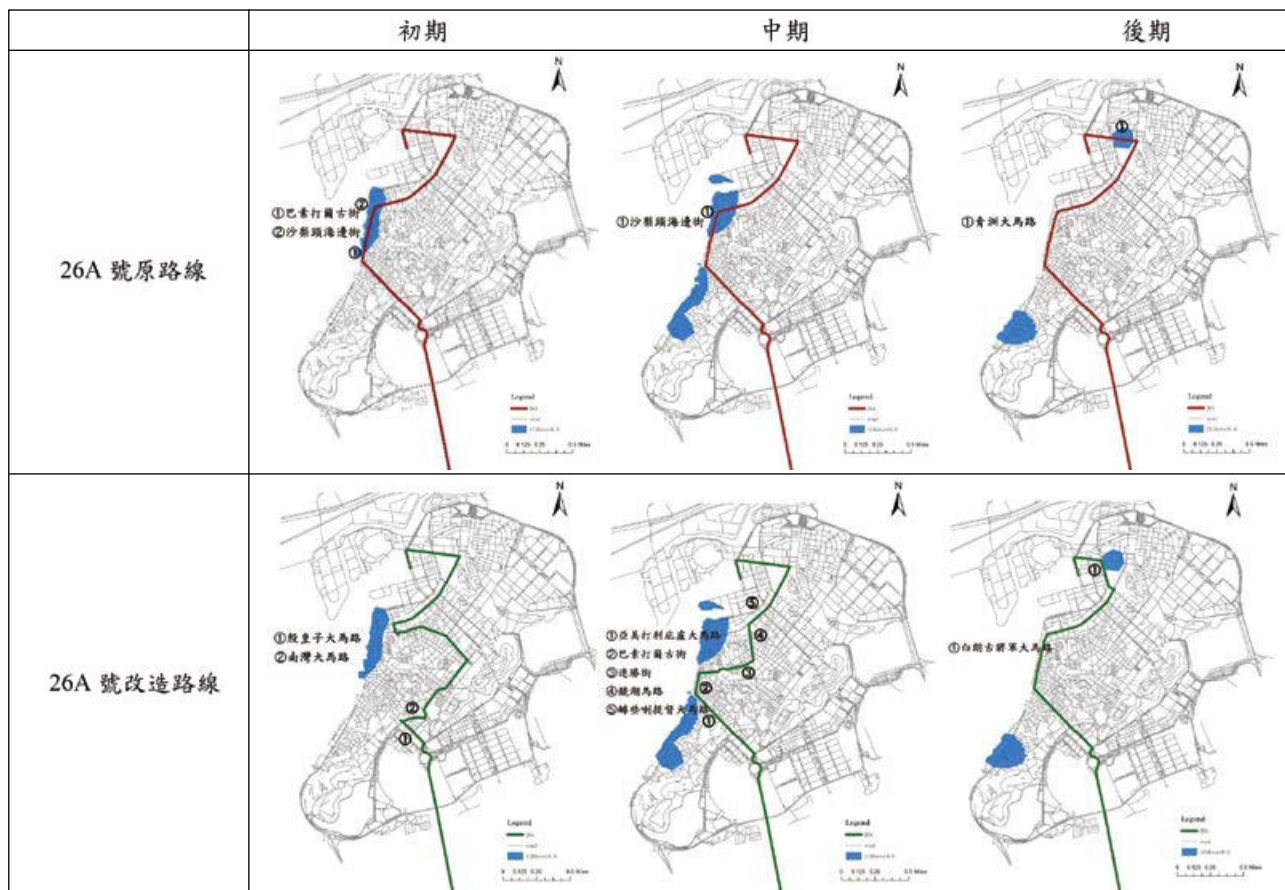


圖 4-b. 26A 號路線受內湧積水影響情況與臨時路線建議（圖片來源：筆者自製）



圖 5. 澳門半島及歷史城區排水管網（圖片來源：筆者根據土地工務局資料繪製）

$$q = 167A/(t+b)^n$$

$$Q = qF\psi T$$

q 為公頃暴雨強度 (L/S)； t 為降雨時間； A 為雨力； b 、 n 為地方常數（參照全國城市暴雨公式等值線圖）； Q 為初期雨水排放量； F 為公頃匯水面積； ψ 為徑流係數； T 為收水時間。

圖 5 顯示，澳門歷史城區為老城區，雨水與污水河流管線較多，此類管線形式不僅在暴雨時排水能力不足，而且容易造成水體污染。SWMM 劃分得到 4,197 個子匯水區，其中最大面積為 7,048 平方米，最小面積為 42 平方米，概化為 4,128 個節點，103 個排水口和 4,606 根管道。降雨量模擬結果如圖 6 所示。

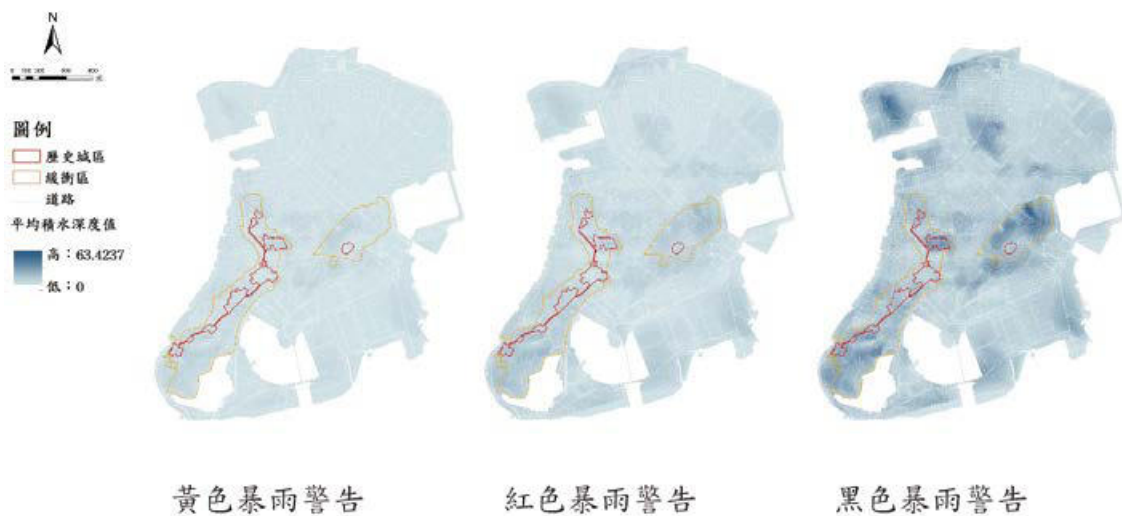


圖 6. 模擬降雨對歷史城區及周圍區域水浸影響 (圖片來源：筆者自製)

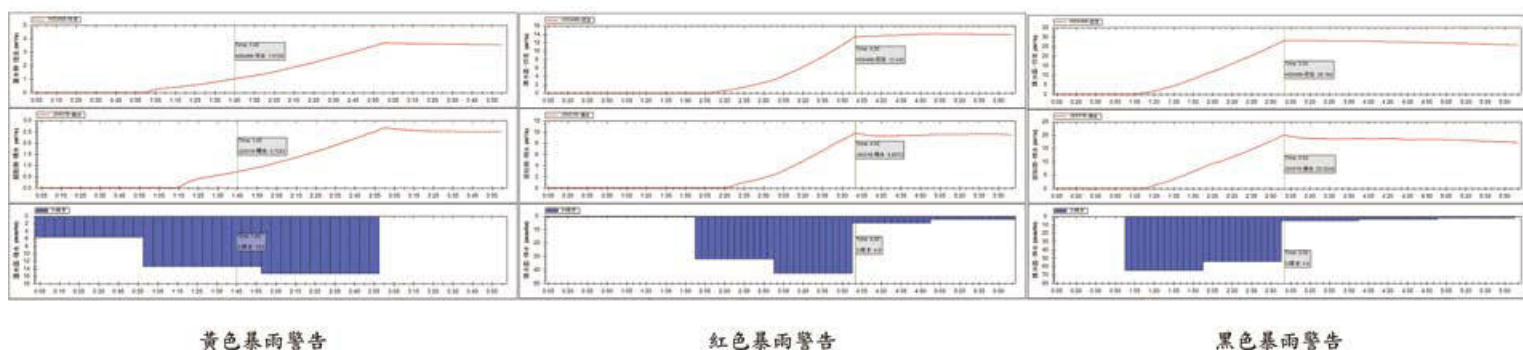


圖 7. 媽閣廟前地附近降雨與地表徑流 (圖片來源：筆者自製)

黃色暴雨警告生效時，澳門半島中區的地表積水情況較明顯，主要集中於媽閣附近以及荷蘭園區地勢較低窪處。紅色暴雨警告生效時，北區與東區開始積水，其中黑沙環與水塘馬路一帶的積水明顯。黑色暴雨警告生效時，澳門積水深度最深的地點主要集中在公園、山體、裸地以及大面積硬質鋪地上，這些區域主要由於匯流面積大，集水效益大於排水效益，從而無法快速排水。其他積水點主要分佈在新橋區、高士德區、內港區、水塘馬路、黑沙環區、台山區以及下環區。在歷史城區中，媽閣廟、海事及水務局大樓、大炮台以及緩衝區中的二龍喉公園及附近地段受降雨積水影響較為嚴重，

其中媽閣廟與海事及水務局大樓主要由於地處低窪，排水管道設計管徑偏小而造成積水的情況。大炮台地勢較高，且匯水面積與地表徑流係數較大，下游排水管道整體管徑較小，導致節點處持續溢流。二龍喉公園位於松山山腳，公園內地勢變化較大，在降雨時地表徑流流量與速度都較大，導致節點無法快速收集大量雨水，且設計管徑偏小，雨水排出速率也較慢。本研究將媽閣廟與海事及水務局大樓位置點，在黃色、紅色和黑色暴雨警告生效期間的地表徑流變化在模型中單獨計算提取後，得到如圖 7 所示的結果。黃色暴雨警告生效時，節點的溢流時間即達到兩小時以上，此處地處低窪且

澳門研究

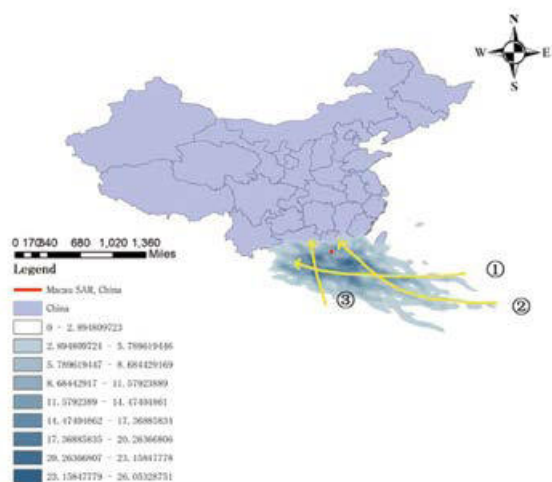


圖 8-a. 颱風路徑 (圖片來源：筆者自製)

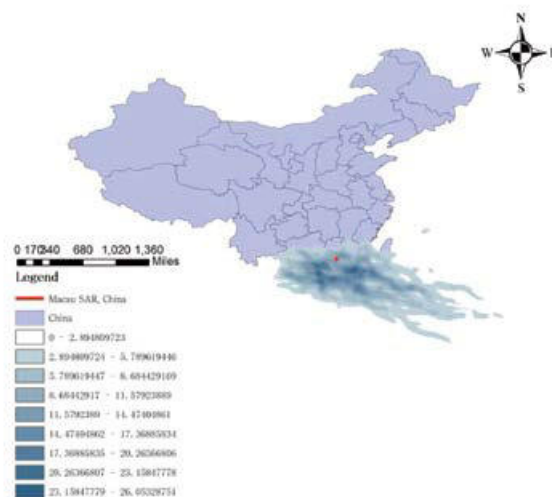


圖 8-b. 空間密度圖 (圖片來源：筆者自製)

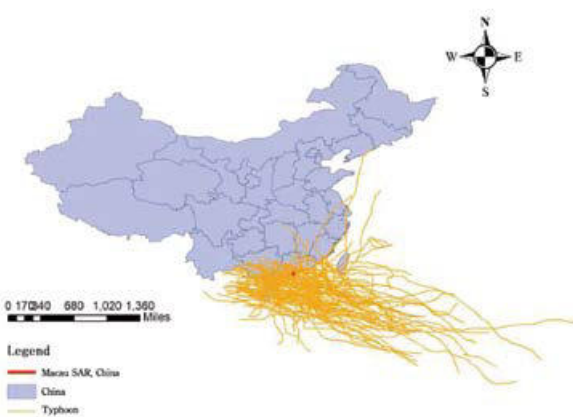


圖 8-c. 軌跡規律 (圖片來源：筆者自製)

雨水匯流面積較大，管線的管徑偏小且下游整體排水不暢導致節點持續溢流，而在黑色暴雨警告生效的情況下，匯水區徑流峰值可最高達到每秒 20 立方米以上。

颱風影響澳門時，其所引起的強風氣流也對城市及歷史城區帶來威脅與影響。本研究基於澳門 2000 年至 2020 年的 100 場颱風災害的記錄，得出澳門地區颱風災害的總體特性及產生規律，並以此為基礎在 FLUENT 平台上

進行了澳門歷史城區及周邊區域的颱風模擬，在 GIS 中識別強風災害脆弱區。

根據地球物理暨氣象局調查資料顯示，最近 20 年對澳門造成影響的熱帶氣旋累計多達 100 個。本研究對每間隔 6 小時颱風中心的經緯度坐標進行截取，獲得近 20 年颱風侵襲澳門時的分佈形態。統計發現，這些影響澳門的熱帶氣旋大致可以歸納出三類不同的移動過境路徑，如圖 8-a 所示。路徑①的軌跡由東向西移動，從澳門東部沿海地區登陸後向西側前進。路徑②是影響本澳的颱風路徑中發生頻次最高的，由澳門東南沿岸登陸並向西北方向移動。路徑③是沿澳門南部向北部移動，並影響到廣東其他地區。國家海洋環境預報中心指出，當風速達到每秒 10.8 至 17.1 米時，風速級別達到 6 至 7 級，此時樹木開始搖晃；當風速達到每秒 17.2 至 24.4 米時，風速級別達到 8 至 9 級，此時開始樹葉飛天；當風速達到每秒 24.5 至 32.6 米時，風速級別達到 10 至 11 級，此時樹木被風吹斷；當風速達到每秒 32.7 至 41.4 米時，風速級別達到 12 至 13 級，此時屋頂掉磚、電桿倒地；當風速達到每秒 41.5 至 50.9 米，風速級別達到 14 至 15 級，此時達到災難性級別；當風速大於或等於每秒 51 米，風速級別達

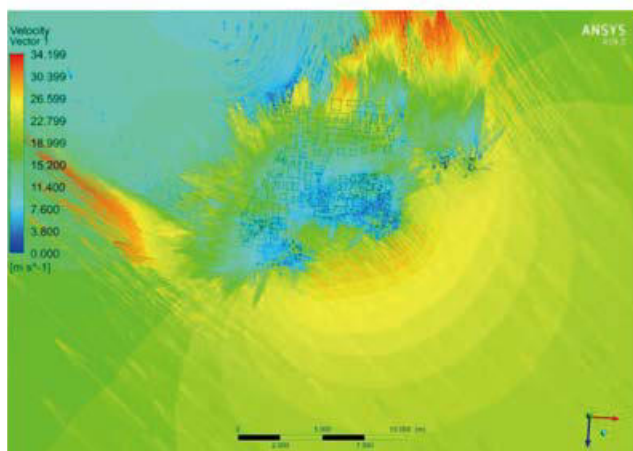
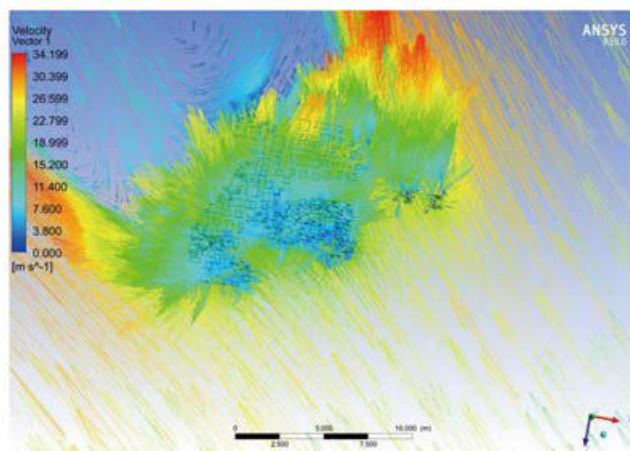


圖 9. 澳門颱風模擬風壓風速細節圖（圖片來源：筆者自製）



到 16 級，此時達到嚴重災難性級別。根據模擬結果顯示，澳門常規颱風風速區間為約為每秒 34.2 米以下。本研究將颱風風速依次按每秒 10.8 至 17.1 米、17.2 至 24.4 米、24.5 至 32.6 米、32.7 至 41.4 米劃分為四種不同等級，分別對應 6 至 7 級、8 至 9 級、10 至 11 級和 12 至 13 級進行脆弱區識別。

本研究依據規律特性、平均風向和風速，通過 FLUENT 模擬，對澳門歷史城區及其緩衝區範圍內易受颱風嚴重影響的區域進行範圍劃定，為有效實現防災減災措施奠定基礎，結果如圖 9 所示。澳門颱風的平均風速為每秒 28.13 米，已達到強熱帶風暴，為 10 至 11 級風。達到 6 至 7 級的地區為聖若瑟修院大樓及教堂和東望洋燈塔附近，可將其劃分為低係數安全脆弱區。聖若瑟修院大樓及教堂附近地處下環，總人口高達 42,650 人，為歷史城區內人口最多的地區，建議成立歷史城區防災救援小組，保障戶外市民安全。達到 8 至 9 級的為媽閣廟、大三巴及其周邊緩衝地帶，可將其定義為中係數安全脆弱區，其中的媽閣廟及其附近處於南西灣及主教山區的總人口為 11,581 人，沙梨頭及大三巴區人口也高達 30,817 人。西灣湖附近的災害情況最為嚴重，達到 10 至 11 級風力，可定義為高係數安全脆弱區，其地處外港及西灣湖新填海區，區內總人口達到

11,708 人。

歷史城區南部的媽閣廟、鄭家大屋、海事及水務局大樓、亞婆井前地等附近風速較高，已達到每秒 19 米，風速級別達到 8 至 9 級，預料此時開始樹葉飛天，且人逆風前進困難，行人不宜在室外長時間逗留，建議針對澳門風災期間行人活動範圍及時間進行限制及封控。南灣大馬路、亞婆井街、福隆新街的街道建築使用年期較高，絕大部分均在 30 年以上，建議推進該地區住宅單元外立面與門窗改造，並針對 25 年以上的建築進行加固和維修處理。西灣湖沿岸一帶風速更是接近每秒 27 米，西灣湖內猛浪驚濤，海面漸呈洶湧，建築玻璃開始破損。西灣湖附近屬高係數安全脆弱區，且該區人口過萬，災害的特徵明顯，應加強西灣湖廣場、孫逸仙大馬路及觀光塔街的沿海工程性防災措施，確保靠近海岸線或湖邊的區域安全。聖若瑟修院大樓及教堂、崗頂前地、崗頂劇院、何東圖書館大樓及聖奧斯定堂周圍緩衝區的颱風受災情況相對較輕，風速為每秒 11 米，級別為 6 至 7 級，此時樹木開始搖搖晃晃，室外能感受到明顯風感，建議應對崗頂前地、東方斜巷、天通街等主幹道沿路樹木進行加強固定。市政署大樓、議事亭前地、三街會館、仁慈堂大樓、大堂、玫瑰聖母堂及大三巴附近的歷史城區景點的風速接近每秒 20 米，其周邊緩衝區則為每

澳門研究

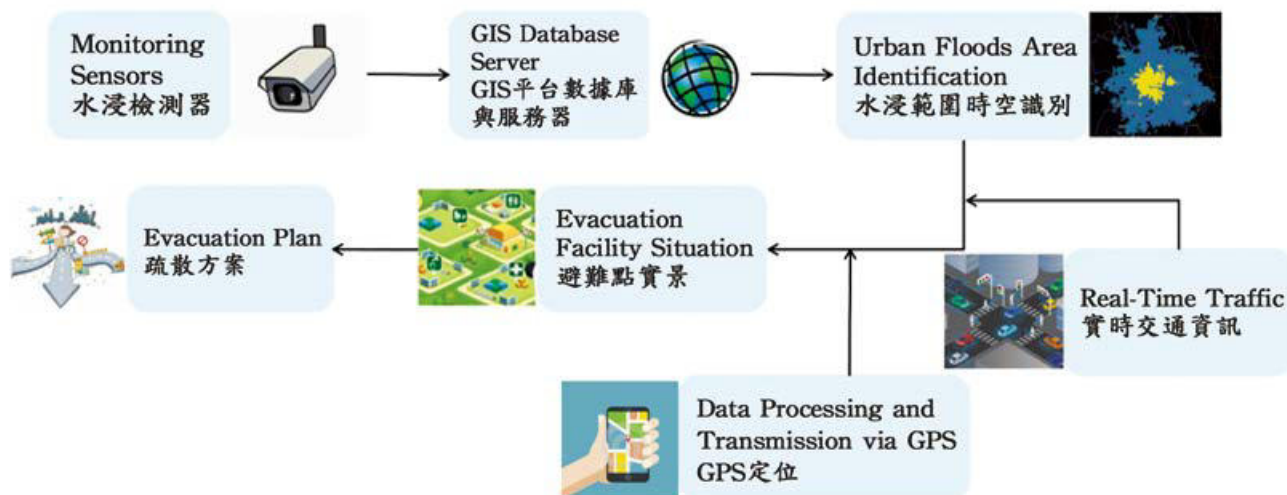


圖 10. 防災體系信息系統示意 (圖片來源：筆者自製)

秒 23 米，此時附近室外人群行走感到困難，窗戶承壓嚴重。目前澳門有關樓宇高度及地段可建造性之規範要求，窗外懸掛物和陽台突出不可超過 75 厘米，針對在歷史城區範圍內的建築應進一步限定此指標要求，以確保沒有外掛物在災害期間墜落造成危險。

總結與建議

澳門歷史城區人口密度高，道路肌理複雜，交通疏散緩慢，常遭受自然災害的影響，研究制定合理高效的防災計劃與相關技術，建立並實踐防災體系，對於減少災害損失具有重要的實際意義。防災脆弱區識別、防災救災疏散、救災設施規劃和災後恢復是防災體系的四個主體部分。國內外學者已開展相關研究並提出一系列基於網絡理論的防災路徑規劃設計模型與技術，然而這些研究大多假設疏散網絡起點、弧段和目標點的密度、速度和承載力恒定條件下進行的，缺少對災害即時狀況的觀測與分析，不能反映災害發生對防災過程的即時影響。本研究提議，通過借鑑國外案例，結合現代擁有的高新技術，構建防災體系信息系統，並研發相關移動應用程式。該系統由水浸檢測器、GIS 平台數據庫與服務器、水浸範圍時空識別、實時交通資訊、GPS 定位、避難點實景以及疏

散方案七個部分組成 (圖 10)，具體內容包括：

(1) 根據人口統計與即時分佈 (LBS) 建構典型場所人群時空分佈模型，解析避險行為與空間佈局的耦合關係，研究避難場所的合理區位和安全容量等規劃指標；(2) 基於空間句法和模擬等數位技術，研究高密度歷史城區不同道路空間整合度、連通性以及路網密度與安全疏散效率的關係，結合交通即時影像流量計算和避難場所即時擁擠程度，研究災時公共交通協助人口疏散組織方案；(3) 整合即時監控數據和網絡分析，利用網絡路徑求解，研究協調個體目標疏散路線方案技術與有效信息傳達。

澳門歷史城區及周邊關聯區域防災工作要實現韌性城市的防災規劃，需要轉變傳統防災規劃模式；提升對災害的風險識別、預警和評估能力，根據地區的地理位置、發展特點等，準確識別城市面臨的主要風險及影響機制；提升居民的防災意識，使居民意識到災害可能會帶來的各種危害，包括對自身、家庭和社會帶來的影響和破壞程度，引起大眾對災害的重視，並建立以社區為單位的安全小組，讓鄰里之間互相提醒、互幫互助；在災害發生後，一個城市的應急管理能力對城市起着非常關鍵的作用，城市的應急能力強，可以用更少的時間使城市恢復到正常狀態，減少災害對城市的破壞。

在災害面前，政府與居民應共同面對和齊心協力保護歷史城區。

附：本文為澳門特別行政區政府 2018 年學術研究獎學金項目“澳門歷史文化街區防災保護與管理研究”階段性成果。

註釋：

1. 澳門特別行政區政府文化局：《〈澳門歷史城區保護及管理計劃〉框架公開諮詢十月十日啟動》，2015 年 6 月 17 日，詳見 <https://www.culturalheritage.mo/cn/detail/mainNewsID11881>。
2. 澳門發展策略研究中心：《澳門打造“世界旅遊休閒中心”的內涵與策略》，2011 年 5 月 23 日，詳見 <http://www.cpedm.org.mo/wp-content/uploads/2013/06/q7.pdf>。
3. 聯合國教科文組織：《保護世界文化和自然遺產公約》，1972 年 11 月 23 日，詳見 <https://whc.unesco.org/archive/convention-ch.pdf>。
4. 澳門特別行政區政府文化局：《澳門歷史城區保護及管理計劃》，2018 年，詳見 <http://edocs.icm.gov.mo/Survey/sgchm2017/sgchmcn.pdf>。
5. 中華人民共和國國家海洋局：《2016 年中國海洋災害公報》，2017 年 3 月 31 日發佈，詳見 <http://www.nmdis.org.cn/c/2017-03-31/56766.shtml>。
6. 澳門特別行政區政府：《國家減災委協助澳門“天鴿”颱風災害評估專家組的工作報告》，2017 年，第 3–21 頁。
7. 王維仁、張鵬橋編：《圍的再生——澳門歷史街區城市肌理研究》，澳門：文化局，2008 年。
8. 朱蓉：《澳門世界文化遺產保護管理研究》，北京：社會科學文獻出版社，2015 年，第 121–126 頁。
9. 聯合國教科文組織亞太地區世界遺產培訓與研究中心：《澳門歷史性城市景觀保護研究》，2013 年 2 月 26 日，詳見 <http://www.whitr-ap.org/index.php?classid=1535&newsid=2301&t=show>。
10. 澳門特別行政區政府政策研究和區域發展局：《澳門特別行政區防災減災十年規劃（2019–2028 年）》，2019 年 10 月，詳見 <https://www.dsepd.gov.mo/zh-hant/event/decade/disaster-prevent2019-2028>。
11. Thi Tong, Rajib Shaw and Yukiko Takeuchi, "Climate Disaster Resilience of the Education Sector in Thua Thien Hue Province, Central Vietnam", *Natural Hazards*, vol. 63, no. 2(2012), pp. 685–709.
12. 李雲燕：《西南山地城市空間適災理論與方法研究》，《西部人居環境學刊》2014 年第 6 期，第 120–121 頁。
13. 溫宗勇、張翼然、陶迎春、左效剛、邢曉娟：《北京核心區城市肌理與空間形態研究》，《北京規劃建設》2019 年第 4 期，第 150–156 頁。
14. 魯海軍、劉學軍、程建權、杜寧睿：《基於空間句法的城市道路網可達性分析》，《中國水運》2007 年第 7 期，第 133–135 頁；吳成鵬：《基於空間句法的城市空間形態定量分析》，《山西建築》2010 年第 25 期，第 48–49 頁；鄭伯紅、張寶錚：《基於空間句法分析的歷史文化風貌區研究——以長沙小西門歷史文化風貌區為例》，《長沙鐵道學院學報（社會科學版）》2010 年第 2 期，第 3 頁。
15. 《雨天行車 記牢細節保安全》，《廈門日報》2021 年 8 月 3 日，B06 版。
16. 澳門特別行政區政府土地工務局：《改善澳門半島排水系統的研究》，2018 年 8 月，詳見 https://www.dsscu.gov.mo/uploads/media/estudo/melhoramento_das_redes_de_drenagem_da_peninsula-macau.pdf。

