

琴澳生態安全格局的構建及協同優化研究*

朱慧雨 周龍

[摘要]《橫琴粵澳深度合作區建設總體方案》提出 2024 年將初步建立琴澳一體化發展格局，顯現促進澳門經濟適度多元發展的支撐作用。本研究借助生態學和城市規劃學科方法，採用 2020 年至 2024 年的數據，探究琴澳一體化發展過程中的生態安全要素識別及格局構建。研究表明，澳門生態斑塊總面積較橫琴少 65.28km²，生態斑塊在空間分布中不存在不均衡；生態廊道數量與總長度均呈下降趨勢，下降比分別約為 5.26% 和 12.52%，空間分布存在不均勻；生態夾點數量顯著增加，從 5 個增至 22 個，路氹—橫琴交界區及橫琴內部集聚效應增強，但澳門半島與橫琴間的生態交互作用仍顯不足；生態障礙點數量則由 15 個增至 18 個，新增障礙點主要分布於澳門路氹及橫琴部分區域，反映出城市擴張對生態連通性的負面影響。基於此，研究提出三點協同優化建議：增強生態斑塊均衡性、提高生態廊道連通性、提升生態節點韌性。

[關鍵詞] 生態安全格局 生態系統服務 協同優化 城市生態空間 琴澳一體化

一、背景及研究意義

在全球氣候變化與城市化的背景下，區域生態安全的調控與保障已成為一項刻不容緩的議題。生態安全格局（ecological security pattern）構建旨在識別和保護生態功能關鍵區域，並科學管理區域內的生態安全狀況。^①它能夠有效銜接區域景觀格局與生態系統服務（ecosystem services，即人類從自然生態系統中直接或間接獲得的利益，例如資源供給、環境調節、景觀美學和旅遊等）^②，是平衡城市建設與環境保護可持續發展路徑、實現區域科學規劃與管理的重要途徑。^③生態安全格局主要由生態斑塊（ecological patch）、生態

* 本研究是澳門科學技術發展基金科研資助項目“基於城市科學系統理論的琴澳空間格局與生態服務價值協同優化研究”（項目批准號：0067/2022/A）的研究成果。

作者簡介：朱慧雨，澳門城市大學城市與可持續發展研究院城市規劃與設計專業博士研究生；周龍（通訊作者），澳門城市大學城市與可持續發展研究院副教授。

^① Peng, Jian, et al. “Linking Ecosystem Services and Circuit Theory to Identify Ecological Security Patterns.” *Science of the Total Environment*, vol. 644, 2018, pp. 781–90.

^② Costanza, Robert, et al. “The Value of the World’s Ecosystem Services and Natural Capital.” *Nature*, vol. 387, 1997, pp. 253–60.

^③ Wu, Shiyu, et al. “Spatial and Temporal Evolution Analysis of Ecological Security Pattern in Hubei Province Based on Ecosystem Service Supply and Demand Analysis.” *Ecological Indicators*, vol. 162, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.11205>.

廊道 (ecological corridor) 及生態節點 (ecological node) 所構成。^①生態斑塊是維持生態安全的景觀斑塊，也是維繫生態網絡結構、提供優質生態功能的重要區域，^②主要通過量化評估生態系統服務價值進行識別，將達到特定規模的生態價值區域劃定為生態斑塊。^③生態廊道承擔着物質交換、能量流動、生物多樣性保護等多種生態功能，^④主要通過構建生態阻力面進行識別，^⑤反映景觀異質性對生態過程和要素流動的影響。生態節點包括夾點以及障礙點，生態夾點在生態安全格局的連通性中發揮着重要作用，是生態要素流動的重要節點。而生態障礙點則是生態要素流動受到阻礙的區域，對區域生態斑塊的連通性影響較大。^⑥

目前，生態安全格局的相關研究成果及應用為土地和生態管理提供了決策支援，對區域及城市空間管控、識別和保護具有重要意義，為城市生態空間規劃提供了實踐指導。^⑦已有多項研究深入揭示了粵港澳大灣區（下稱“大灣區”）城市中的關鍵生態要素及其空間聯繫。吳健生等以深圳為研究對象，提出了基於“功能節點—關鍵廊道”的城市生態安全格局構建理念，為城市尺度的生態規劃奠定了理論基礎。^⑧韋家怡等評估了大灣區的生態安全格局及重要生態廊道，強調核心生態斑塊和關鍵連接廊道在維護區域生態系統健康中的核心作用，為大灣區增強宏觀生態連通性提供了重要依據。^⑨王秀明等在此基礎上，依託生態安全格局，進一步精準界定出大灣區陸域空間的生態保護修復重點區域，為區域生態治理與國土空間規劃提供了明確的方向性指引。^⑩Meng Yang 等以大灣區為研究區域，將政策量化分析與自然、社會和生態安全格局建設相結合，基於多尺度分析，針對大灣區內的城市提出個性化的生態管理政策建議，研究結果為日益嚴峻的生態挑戰提供了可行的解決方案。^⑪

^① Yu, Kongjian. "Security Patterns and Surface Model in Landscape Ecological Planning." *Landscape and Urban Planning*, vol. 36, no. 1, 1996, pp. 1–17.

^② Perkl, Ryan M. "Geodesigning Landscape Linkages: Coupling GIS with Wildlife Corridor Design in Conservation Planning." *Landscape and Urban Planning*, vol. 156, 2016, pp. 44–58.

^③ Chen, Jiao, et al. "Construction of An Ecological Security Pattern Based on Ecosystem Sensitivity and the Importance of Ecological Services: A Case Study of the Guanzhong Plain Urban Agglomeration, China." *Ecological Indicators*, vol. 136, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108688>.

^④ Kang, Jieming, et al. "Ecological Security Pattern: A New Idea for Balancing Regional Development and Ecological Protection. A Case Study of the Jiaodong Peninsula, China." *Global Ecology and Conservation*, vol. 26, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01472>.

^⑤ McRae, Brad H., and Paul Beier. "Circuit Theory Predicts Gene Flow in Plant and Animal Populations." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, no. 50, 2007, pp. 19885–90.

^⑥ Li, Zhao-Tian, et al. "Spatio-temporal Dynamics of Ecological Security Pattern of the Pearl River Delta Urban Agglomeration Based on LUCC Simulation." *Ecological Indicators*, vol. 114, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106319>.

^⑦ Nie, Wenbin, et al. "Constructing and Optimizing Ecological Network at County and Town Scale: The Case of Anji County, China." *Ecological Indicators*, vol. 132, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108294>.

^⑧ 吳健生等：〈基於“功能節點—關鍵廊道”的城市生態安全格局構建——以深圳市為例〉，《地理科學進展》（北京），第37卷，第12期，2018年，頁1663–71。

^⑨ 韋家怡等：〈粵港澳大灣區生態安全格局及重要生態廊道識別〉，《生態環境學報》（廣州），2022年，第31卷，第4期，頁652–62。

^⑩ 王秀明等：〈基於生態安全格局的粵港澳地區陸域空間生態保護修復重點區域識別〉，《生態學報》（北京），第42卷，第4期，2022年，頁450–61。

^⑪ Yang, Meng, et al. "Integrating Policy Quantification Analysis into Ecological Security Pattern Construction: A Case Study of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area." *Ecological Indicators*, vol. 162, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112049>.

2021年，《橫琴粵澳深度合作區建設總體方案》提出建設橫琴粵澳深度合作區，為澳門長遠發展注入重要動力，塑造琴澳一體化總體發展新格局。按照合作區發展目標，2024年是初步建立琴澳一體化發展格局之年，將逐步顯現促進澳門經濟適度多元發展的支撐作用。^①澳門作為中國典型的高密度填海城市，面臨着嚴峻的人地矛盾、資源短缺、生態環境破壞等問題，制約了城市的健康有序發展。^②琴澳一體化的提出為澳門和橫琴兩地的城市建設發展帶來了重大機遇，提供了可持續及具有韌性的空間支撐。^③在此背景下，本研究以澳門和橫琴為研究對象，在大灣區生態結構中，精細分析城市發展對生態安全格局的影響，並提出琴澳生態安全格局的規劃建議。

二、研究區域、數據來源及研究方法

（一）研究區域

澳門特別行政區位於中國大陸東南部沿海，珠江入海口，北鄰珠海，東鄰香港，包括澳門半島、氹仔島和路環島。為了適應社會的快速發展，澳門通過填海造地和城市化建設的手段，不斷擴大土地面積，從1912年的11.6平方公里擴大到2024年底的33.3平方公里。截止2024年底，澳門有約68萬人口，是全球人口最稠密的地區之一。^④

橫琴島，地處廣東省南部，珠江口西側，其地理位置優越，東毗澳門，北接珠海保稅區，西側與磨刀門水道貫通，南瀕中國南海，與澳門及珠海陸域均有大橋相連。陸域面積達106平方公里，約為澳門陸地面積的三倍（圖1）。^⑤2009年，國務院批准實施《橫琴總體發展規劃》，^⑥利用橫琴與澳門一水一橋之隔的優勢，把橫琴打造為促進澳門經濟適度多元發展的重要平台。2021年9月5日，中共中央、國務院正式公布《橫琴粵澳深度合作區建設總體方案》，^⑦明確了橫琴粵澳深度合作區的四大戰略定位：促進澳門經濟適度多元發展的新平台、便利澳門居民生活就業的新空間、豐富“一國兩制”實踐的新示範、推動粵港澳大灣區建設的新高地。《澳門特別行政區城市總體規劃（2020–2040）》提出實踐“一河兩岸”概念，^⑧打造具備便利交通、景觀特色及經濟集聚的灣區；打造“一河兩岸合作軸帶”，沿十字門兩岸的土地規劃互相配合，促進兩地合作帶來的效益，實現互利共贏的協同發展新局面。《橫琴粵澳深度合作區國土空間總體規劃（2021–2035年）（草案）》提

^①〈中共中央 國務院印發《橫琴粵澳深度合作區建設總體方案》〉，中國政府網，2021年9月5日，www.gov.cn/zhengce/2021-09/05/content_5635547.htm，2024年8月22日讀取。

^②Zhou, Long, et al. “Urban Ecosystem Services, Ecological Security Patterns and Ecological Resilience in Coastal Cities: The Impact of Land Reclamation in Macao SAR.” *Journal of Environmental Management*, vol. 373, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123750>.

^③陳僑予：〈從競合博弈到功能性合作——澳門與橫琴區域一體化整合的歷史脈絡與理論邏輯〉，《澳門研究》（澳門），第4期，2023年，頁127–38。

^④澳門統計暨普查局：《統計年鑑2024》，2025年7月，頁34–53。

^⑤中共中央、國務院：《橫琴粵澳深度合作區建設總體方案》，2021年9月，頁3。

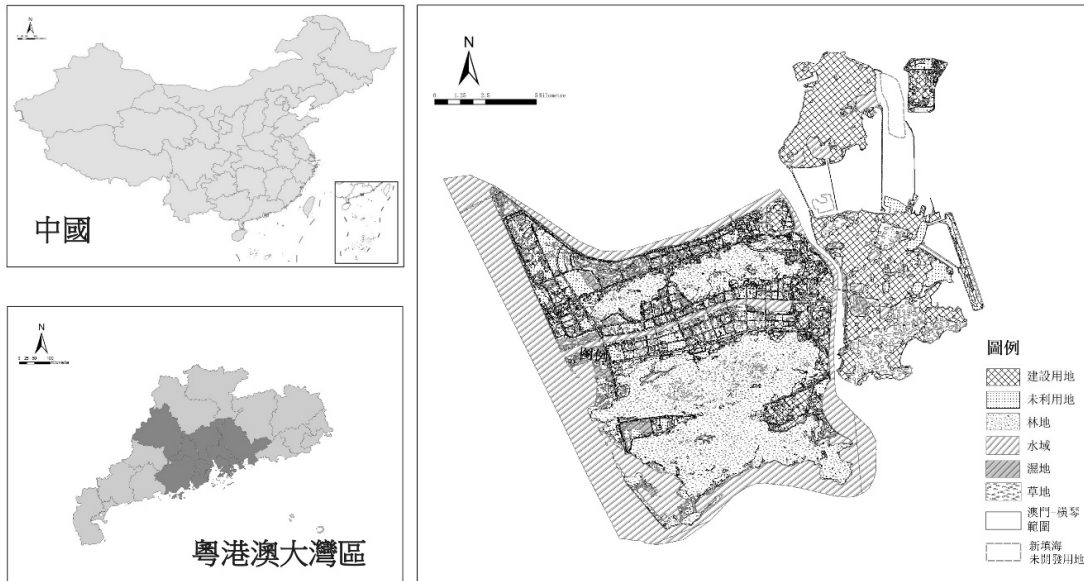
^⑥國家發展與改革委員會：《橫琴粵澳深度合作區總體發展規劃》，2023年12月，頁4–5。

^⑦中共中央、國務院：《橫琴粵澳深度合作區建設總體方案》，2021年9月，頁3–4。

^⑧澳門土地工務運輸局：《澳門特別行政區城市總體規劃（2020–2040）》，2022年2月，頁5。

出構建“一環、雙核、多廊”的生態安全格局，協同澳門打造生態保護屏障，建設大小橫琴山環山綠道、登山雲道，沿天沐河、十字門水道等建設碧道，串聯森林公園、濕地公園、水岸公園等藍綠空間，銜接澳門綠色韌性軸帶，塑造連續便捷、舒適可達的休閒遊憩網絡，為區域可持續發展奠定堅實基礎。^①

圖1 澳門和橫琴區位示意及2024年土地利用分類



圖片來源：作者自製。

資料來源：Sentinel-2, Copernicus Data Space Ecosystem, dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-data/sentinel-2. Accessed 12 April 2024.

澳門作為世界上人口密度最高的地區之一，土地建設強度大、建築密度高。澳門回歸後，旅遊和博彩業帶動了城市經濟發展與快速城市化，隨之也導致澳門城市生態環境逐步弱化、城市綠色空間比例縮減、^②城市景觀破碎度增加、生物多樣性降低、城市生境質量面臨下降風險、天然濕地等原有生態資源減少，^③以及生態空間受到侵佔等問題。^④橫琴生態系統豐富，包括海洋、濕地和森林三大主要類型，具有極高的生態價值和豐富的生物多樣性。在《橫琴粵澳深度合作區總體發展規劃》中明確提出橫琴要建設成資源節約、環境友好的“生態島”。^⑤橫琴在開發建設中劃定了禁建區、限建區、適建區，及已建區四大空

^①橫琴粵澳深度合作區管理委員會：《橫琴粵澳深度合作區國土空間總體規劃（2021–2035年）（草案）》，2024年6月，頁9–10。

^②耿宏兵、袁壯兵：〈澳門：資源稀缺條件下的綠色生態環境改善策略研究〉，2011年中國城市規劃年會論文，中國城市規劃學會中國城市科學研究會，2011年9月，頁3722–33。

^③孟楠等：〈澳門城市生態系統格局變化研究〉，《生態學報》（北京），第38卷，第18期，2018年，頁6442–51。

^④楊駿等：〈填海造地對澳門旅遊環境的影響評價：基於HRP分析法〉，《湖州師範學院學報》（湖州），第6期，2013年，頁75–81、89。

^⑤國家發展與改革委員會：《橫琴粵澳深度合作區總體發展規劃》，中華人民共和國國家發展和改革委員會網站，2023年12月，www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202312/P020231221647624666171.pdf，2024年4月12日讀取。

間管制區，其中禁建區面積佔橫琴總面積的 50% 以上，嚴格保護了橫琴的原始生態。琴澳一體化發展不僅對區域協同發展具有重要意義，也是實現其戰略目標的重要保障和支撐。澳門與橫琴地理位置毗鄰，兩地生態環境緊密相連，構建琴澳生態安全格局有助於推動澳門和橫琴的區域一體化進程，實現生態環境的協調發展。

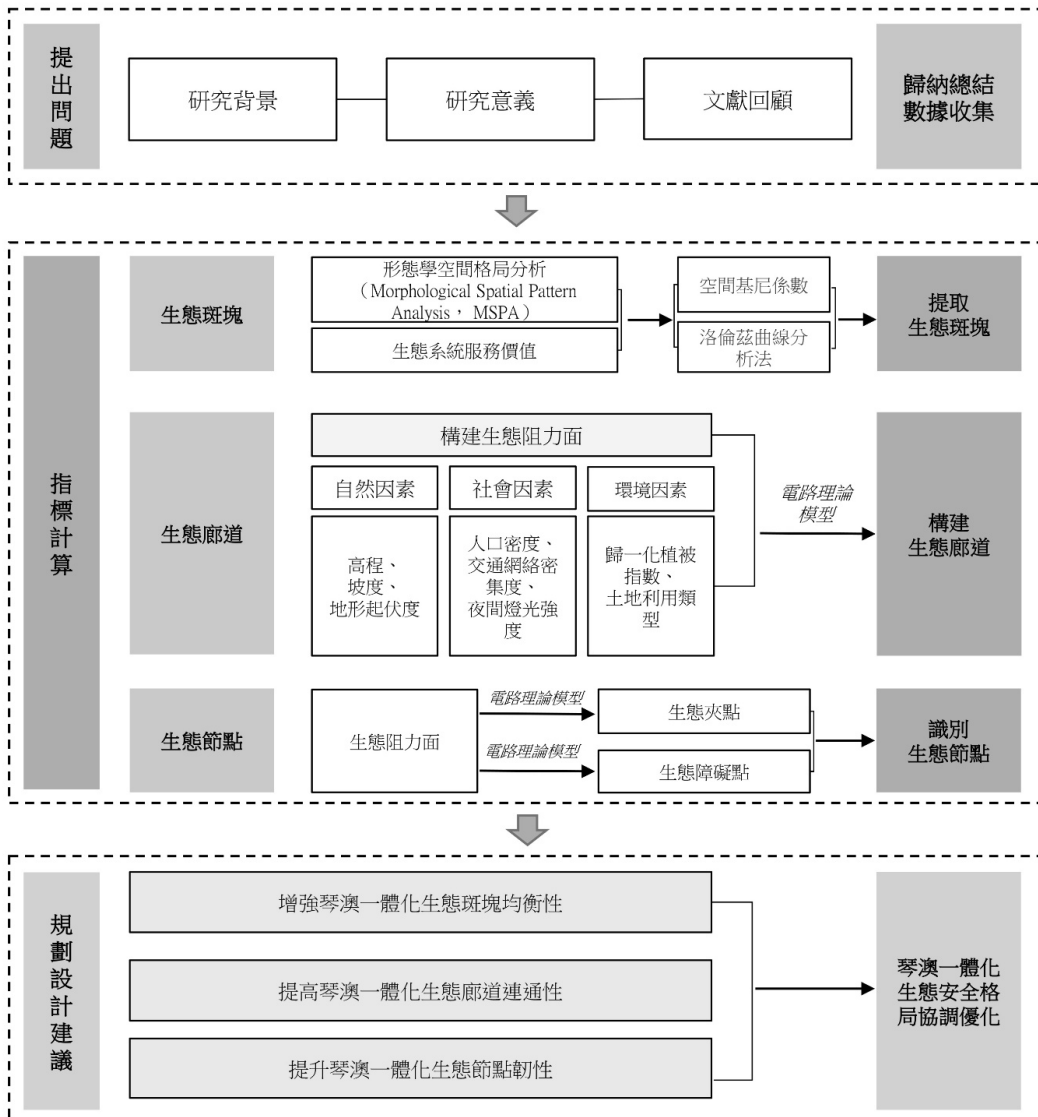
(二) 數據來源

本研究融合多源數據，土地利用數據用於計算生態系統服務價值，高程、坡度、交通路網、夜間燈光強度、歸一化植被指數用於構建生態阻力面，人口統計數據用於計算基尼係數（Gini coefficient）和洛倫茲曲線（Lorenz curve）。詳細研究指標選取和數據來源描述如表 1 所示，本研究的技術路線圖如圖 2 所示。

表 1 指標選取及數據來源

指標選取	數據名稱	數據來源	用途
土地利用類型	歐空局 Sentinel-2 號衛星數據	Sentinel-2 號衛星 dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-data/sentinel-2	計算生態系統服務價值
高程	高程模型 DEM	澳門特別行政區地圖繪製暨地籍局	構建阻力面
坡度	高程模型 DEM	澳門特別行政區地圖繪製暨地籍局	構建阻力面
交通網絡密度	城市交通路網	澳門特別行政區地圖繪製暨地籍局	構建阻力面
夜間燈光強度	NPP-VIIRS 夜間燈光數據	NPP-VIIRS 衛星夜光遙感影像 ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS/	構建阻力面
歸一化植被指數	多光譜遙感影像數據	美國陸地衛星 LANDSAT 8 www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8	構建阻力面
人口統計數據	/	澳門特別行政區 2021 人口普查詳細結果 橫琴粵澳深度合作區第七次全國人口普查數據	計算基尼係數和洛倫茲曲線

圖 2 技術路線圖



圖片來源：作者自製。

(三) 研究方法

(1) 提取生態斑塊

形態學空間格局分析 (Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA) 是對整體城市空間形態格局進行識別和分類，從而有效地確定景觀類型及結構，獲得研究範圍內不同類型的生態斑塊。^①本研究選擇林地、草地、濕地作為建模前景，建設用地、未利用地等作為建模背景。將數據重新分類後，在 Guidos Toolbox 軟件中進行形態學空間格局模型分析，依據研究區範圍提取核心區中面積大於 3,000 平方米的區域作為生態斑塊。

^① Wickham, James D, et al. "A National Assessment of Green Infrastructure and Change for the Conterminous United States Using Morphological Image Processing." *Landscape and Urban Planning*, vol. 94, no. 3-4, 2010, pp. 186-95.

本研究同時參照聯合國千年生態系統評估（Millennium Ecosystem Assessment, MA）的生態系統服務價值評估分類，^①識別具有高生態系統服務價值的區域作為生態斑塊，並採用價值當量法總結出各類型土地的生態系統服務價值量參數，依據參數結果計算出研究區各類型用地的生態系統服務價值。^②該方法在區域生態系統服務價值評估中得到了廣泛的應用。本研究基於中國陸地生態系統單位面積價值等效生態服務尺度，^③結合周永傑等對大灣區生態系統單位面積的生態服務價值的研究結果，^④針對澳門和橫琴的土地利用進行陸地生態系統服務價值計算，其計算公式如下：

$$ESV_t = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{ij} \times VC_{ij} \quad (1)$$

公式 1 中， ESV_t 是土地總體 t （萬元）中的生態服務價值； A_{ij} 是單位土地面積 t （公頃）； VC_{ij} 是生態服務類型 i 在土地利用類型 j （萬元／公頃）下的係數； m 和 n 分別是生態服務類型和土地利用類型的數量。

空間基尼係數和洛倫茲曲線分析法常作為公平性績效評價的定量指標，目前在社會—環境公平領域被廣泛運用。^⑤本研究通過基尼係數和洛倫茲曲線衡量澳門和橫琴生態斑塊分布的空間格局公平性，其計算公式如下：

$$GE_u = 1 - \sum_{k=1}^n (P_k - P_{k-1})(C_k + C_{k+1}) \quad (2)$$

$$C_k = \frac{\sum_{i=1}^k A_i R_i}{\sum_{i=1}^n A_i R_i} \quad (3)$$

公式 2、3 中， GE_u 為城市地理單元 u 的生態斑塊公平性指數， n 為城市地理單元總數； k 為研究區的生態斑塊可達性，按照升序排序後的第 k 個區， $k = 1, 2, \dots, n$ ； A_j 為研究區的生態斑塊可達性值； R_i 為研究區 i 的人口； C_k 是從研究區 1 到研究區 k 的生態斑塊可達性與研究區人口乘積的累積比， $P_0 = 0$ ， $P_n = 1$ 。根據基尼係數的數學含義，當 $GE \leq 0.2$ ，表明生態斑塊空間分配是高度平均；當 $0.2 < GE \leq 0.3$ 表明生態斑塊空間分配較為合理；當 $0.4 < GE \leq 0.5$ 意味着生態斑塊的空間分配差距較大；若 $GE > 0.5$ 表明生態斑塊的空間分配差距懸殊，存在嚴重的不公平現象。^⑥

^① Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. 2nd ed., Island Press, 2005.

^② Chuai, Xiaowei, et al. "Land Use and Ecosystems Services Value Changes and Ecological Land Management in Coastal Jiangsu, China." *Habitat International*, vol. 57, no. 3–4, 2016, pp. 164–74.

^③ 謝高地等：〈基於單位面積價值當量因子的生態系統服務價值化方法改進〉，《自然資源學報》（北京），第 8 卷，第 30 期，2015 年，頁 1243–54。

^④ 周永傑等：〈粵港澳大灣區生態系統演變及其服務價值研究〉，《環境保護》（北京），第 47 卷，第 23 期，2019 年，頁 56–60。

^⑤ Liang, Huilin, et al. "Using An Improved 3SFCA Method to Assess Inequities Associated with Multimodal Accessibility to Green Spaces Based on Mismatches between Supply and Demand in the Metropolitan of Shanghai, China." *Sustainable Cities and Society*, vol. 91, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104456>; Lu, Yutian, et al. "Inclusive Green Environment for All? An Investigation of Spatial Access Equity of Urban Green Space and Associated Socioeconomic Drivers in China." *Landscape and Urban Planning*, vol. 241, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104926>; Ke, Xinli, et al. "Contribution of Non-Park Green Space to the Equity of Urban Green Space Accessibility." *Ecological Indicators*, vol. 146, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109855>.

^⑥ 楊文越等：〈基於多出行模式兩步移動搜索法的廣州多尺度綠地可達性與公平性研究〉，《生態學報》（北京），第 41 卷，第 15 期，2021 年，頁 6064–74。

(2) 生態安全廊道識別

生態阻力面反映了生態過程的阻力和生態功能轉化的難易程度，^①不僅包括自然生態系統的內部干擾，還包括社會系統的外部干擾。^②由於人類活動因素和城市環境因素對生態系統結構和功能有顯著影響，本研究選取高程、坡度、交通網絡密度、夜間燈光強度、歸一化植被指數、土地利用類型等六個因子作為阻力面，將每個評價指標分為五級，分別賦值為 1、2、3、4、5。^③生態阻力面的評價指標體系如表 2 所示。阻力值的劃分基於澳門與橫琴現狀以及參考相關研究。^④

表 2 生態阻力評價體系及賦值

阻力因數	1	2	3	4	5	權重
高程	> 0	0–100	100–250	250–400	> 400	0.08
坡度	< 5°	5°–10°	10°–25°	25°–50°	> 50°	0.06
交通網絡密度	50m	100m	500m	1,000m	1,500m	0.07
夜間燈光強度	300	500	700	900	> 1,100	0.12
歸一化植被指數	0.8–1.0	0.6–0.8	0.4–0.6	0.4–0.2	0.2–0	0.25
土地利用類型	林地	草地	水域及濕地	未利用地	建設用地	0.42

資料來源：澳門特別行政區地圖繪製暨地籍局，www.dscg.gov.mo/zh-hant/home.html，2024年4月12日讀取；Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS), ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS/. Accessed 12 April 2024; Sentinel-2, Copernicus Data Space Ecosystem, dataspace.copernicus.eu/data-collections/copernicus-sentinel-data/sentinel-2. Accessed 12 April 2024; Landsat 8, U.S. Geological Survey, www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8. Accessed 12 April 2024.

生態廊道是維繫生態斑塊之間交流的關鍵紐帶，對提高生態連通性，保障和維護區域的生態功能具有重要作用。^⑤本研究基於上述綜合阻力面，結合電路理論模型中的 Linkage Mapper 工具，^⑥計算最小成本距離路徑（least-cost paths, LCP），其計算公式如下：

$$NLCC_{AB} = CWD_A + CWD_B - LCD_{AB} \quad (4)$$

公式 4 中， $NLCC_{AB}$ 為核心區 A 與核心區 B 歸一化最小成本廊道長度； CWD_A 為核心區 A 的成本加權距離； CWD_B 為核心區 B 的成本加權距離； LCD_{AB} 為沿着最低成本距離路徑移動的成本加權距離。

^① Huang, Lei, et al. “Ecological Security Assessment and Ecological Pattern Optimization for Lhasa City (Tibet) Based on the Minimum Cumulative Resistance Model.” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, no. 55, 2022, pp. 83437–51.

^② Li, Qing, et al. “An Integrated Approach to Constructing Ecological Security Patterns and Identifying Ecological Restoration and Protection Areas: A Case Study of Jingmen, China.” *Ecological Indicators*, vol. 137, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108723>.

^③ 張學淵等：〈西北乾旱區生態承载力監測及安全格局構建〉，《自然資源學報》（北京），第 34 卷，第 11 期，2019 年，頁 2389–402。

^④ Shen, Zhou, et al. “A Static and Dynamic Coupling Approach for Maintaining Ecological Networks Connectivity in Rapid Urbanization Contexts.” *Journal of Cleaner Production*, vol. 369, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133375>.

^⑤ 付鳳傑等：〈基於生態安全格局的國土空間生態修復關鍵區域識別——以賀州市為例〉，《生態學報》（北京），第 41 卷，第 9 期，2021 年，頁 3406–14。

^⑥ McRae, Brad, Viral B. Shah. *Circuitscape User Guide*. University of California, Santa Barbara, 2011.

（3）生態節點識別

生態節點是生態過程中流動性高的關鍵區域，其退化或喪失可能破壞生態斑塊之間的連通性，因此需要在生態保護中優先關注。本研究運用 Linkage Mapper 工具箱中的 Pinch Point Mapper 模塊，對生態夾點位置進行定位模型計算，夾點的核心位置和連通性不會受到廊道寬度變化的影響，採用自然斷點法選取高等級結果為生態夾點。生態障礙點是指生態斑塊之間物質流動阻礙較大的區域，修復這些屏障可以顯著增強景觀連通性。^①本研究同時利用另一模塊 Barrier Mapper，對生態屏障位置進行定位模型計算，採用改善得分相對於最小成本路徑百分比的方法進行障礙區的識別。

三、生態安全格局結果與分析

（一）生態斑塊提取結果

根據澳門和橫琴 2020 年和 2024 年的土地利用類型數據，採用生態系統服務價值當量法，計算出澳門和橫琴的生態系統服務價值量，^②結果如圖 3 所示。為更好地可視化澳門和橫琴的生態系統服務價值，採用自然斷點法將生態系統服務價值從高到低分為五個等級，並賦予不同的顏色深淺：顏色越深的區域表示生態系統服務價值越高，反之則越低。

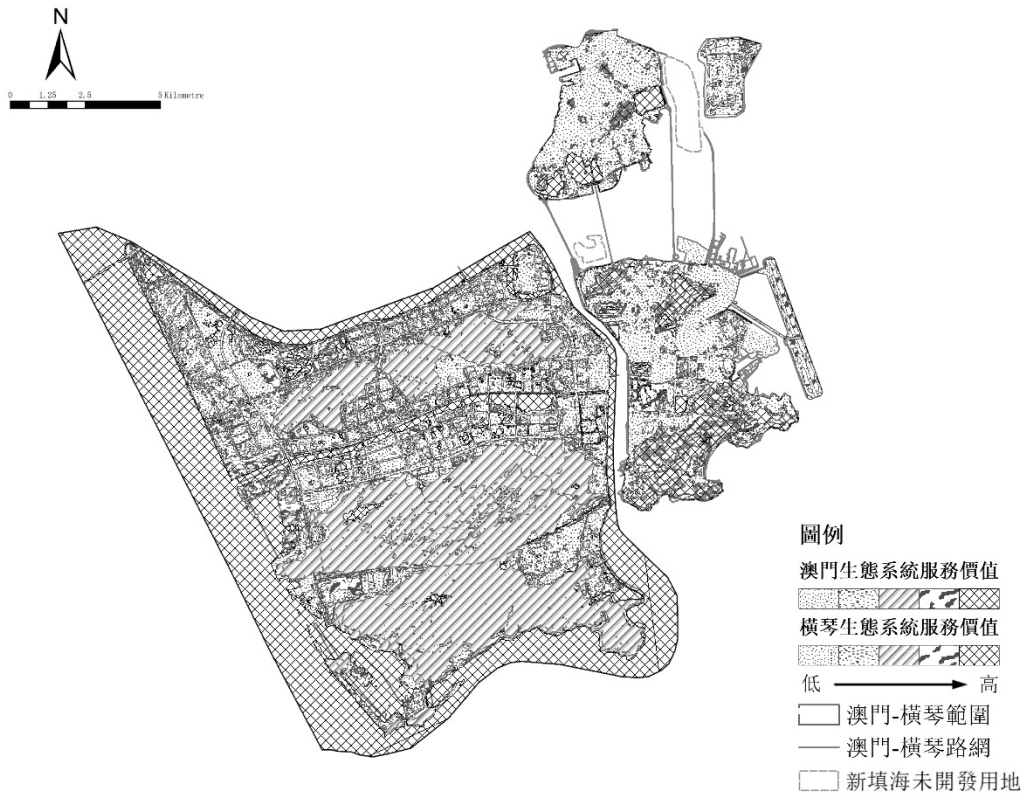
澳門生態系統服務價值的高值區以自然山體、公園綠地、生態濕地為主，由北向南依次分布於：孫中山紀念公園、青洲山、望廈山、螺絲山公園、白鴿巢公園、水塘、二龍喉公園、南灣湖、媽閣山、小潭山郊野公園、大潭山郊野公園、龍環葡韻濕地生態區、路氹城生態保護區、路環島南側的疊石塘山，以及九澳山，而高密度住宅區及休閒娛樂區的生態系統服務價值較低；橫琴的生態系統服務價值高值區由北向南主要位於：芒洲濕地公園、珠海東方高爾夫球會、小橫琴山、二井灣濕地公園及大橫琴山等區域，這些地區擁有豐富的自然資源和生物多樣性，為橫琴提供了重要的生態服務。

本研究將核心區面積大於 3,000 平方米的區域識別為生態斑塊，結果如下圖所示（圖 4）。澳門的生態斑塊總面積約為 10.93 平方公里，由北向南主要位於青洲山、望廈山、東望洋山、媽閣山、小潭山郊野公園、大潭山郊野公園、龍環葡韻濕地、巴黎人花園、路氹城生態保護區、九澳水庫淡水濕地、疊石塘山等地。橫琴的生態斑塊總面積約為 38.89 平方公里，由北向南主要分布於芒洲濕地公園、珠海東方高爾夫球會、小橫琴山、二井灣濕地公園及大橫琴山周邊山體。

^① Gou, Mengmeng, et al. "Integrating Ecosystem Service Trade-Offs and Rocky Desertification into Ecological Security Pattern Construction in the Daning River Basin of Southwest China." *Ecological Indicators*, vol. 138, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108845>.

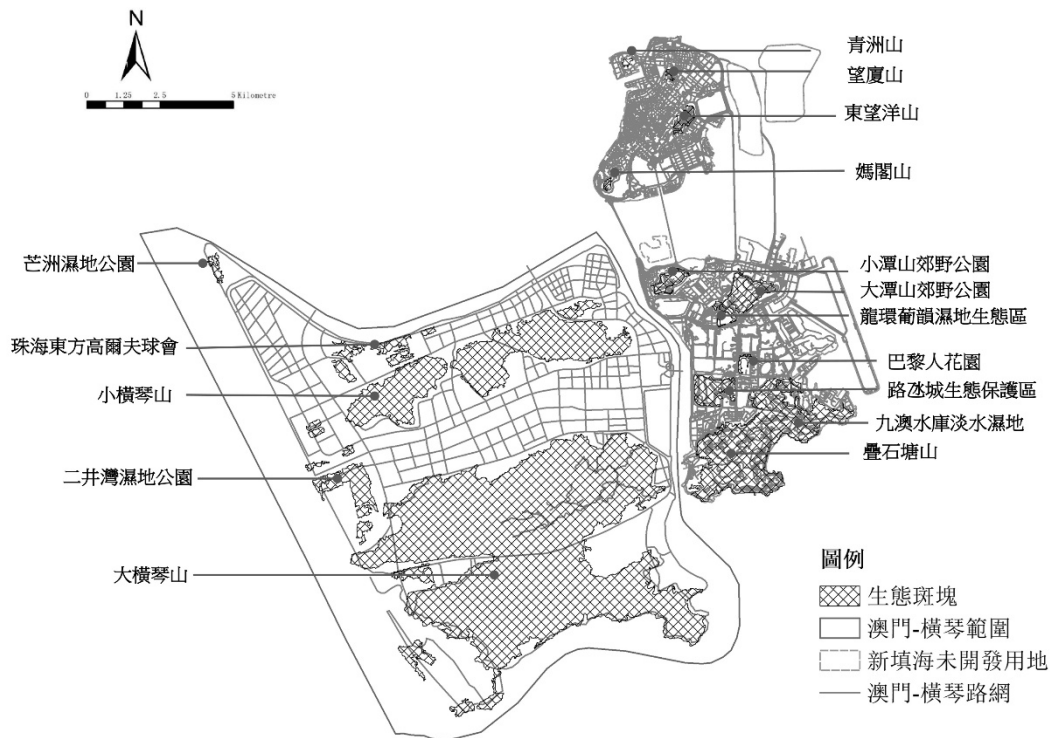
^② 謝高地等：〈基於單位面積價值當量因子的生態系統服務價值化方法改進〉，《自然資源學報》（北京），第 30 卷，第 8 期，2015 年，頁 1243-54。

圖3 澳門和橫琴生態系統服務價值結果



圖片來源：作者自製。

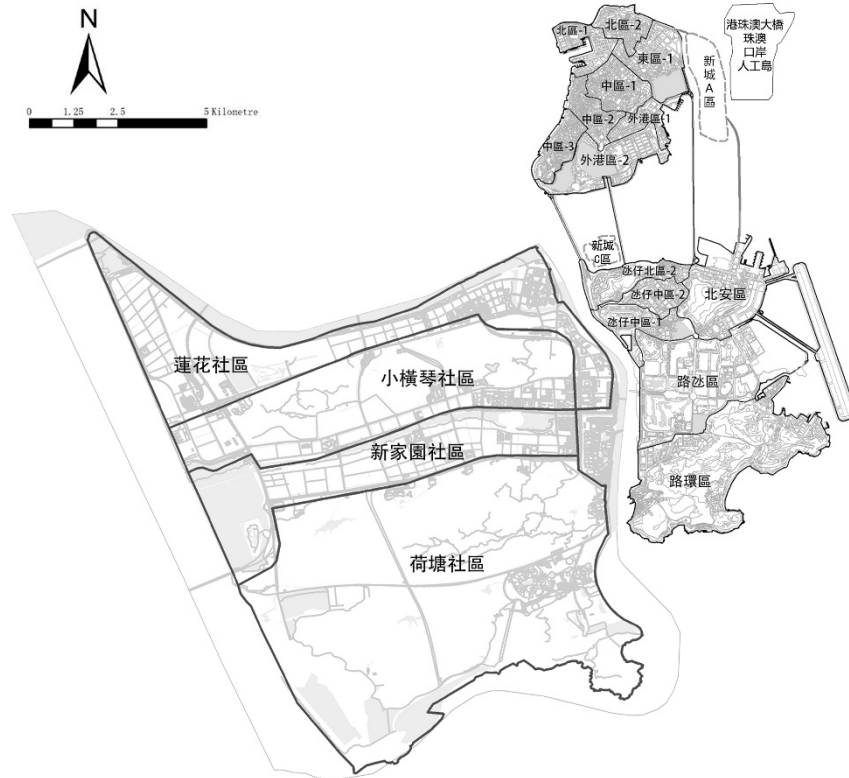
圖4 澳門和橫琴生態斑塊提取結果



圖片來源：作者自製。

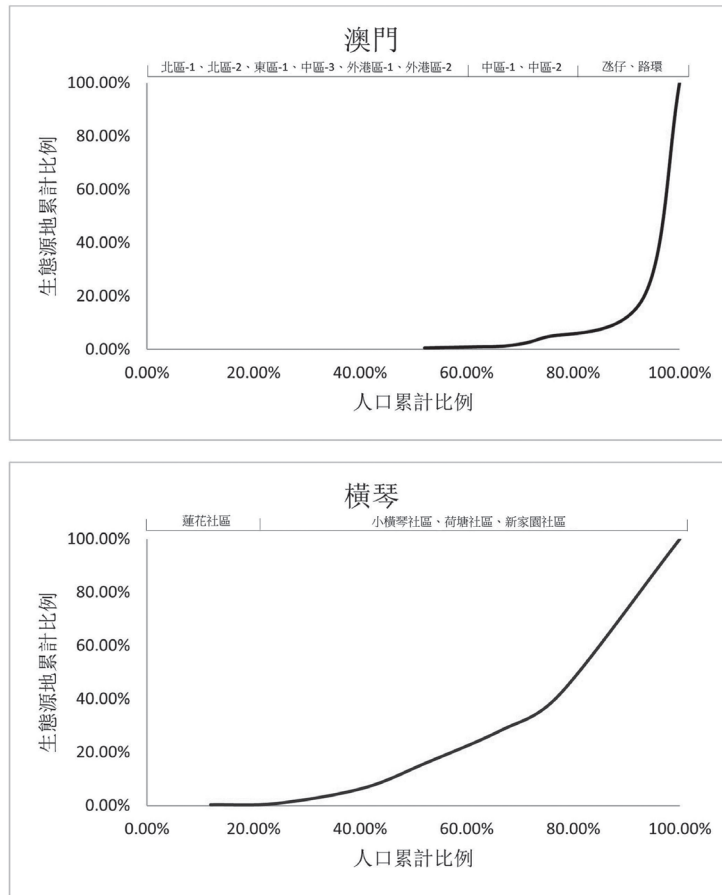
根據洛倫茲曲線和基尼係數，評估澳門與橫琴生態斑塊分配的不平等程度。洛倫茲曲線的彎曲程度是衡量生態斑塊分配公平性的直觀指標，曲線越彎曲，表明分配越不公平（圖 5、6）。澳門生態斑塊基尼係數高達 0.86，橫琴則為 0.30。澳門社區居民獲得的生態斑塊較為匱乏，50% 的人口僅能分配到 0.46% 的生態斑塊，這些人口主要分布於北區 -1、北區 -2、東區 -1、中區 -3、外港區 -1、外港區 -2，80% 的人口所享有的生態斑塊比例也僅為 7.6%，主要集中在中區 -1、中區 -2、氹仔和路環（由於在本研究期間，新城 A 區與 C 區為新填海未開發用地，暫無人口數據，故未納入計算）。相較之下，橫琴的生態斑塊分配情況較為均衡，其 50% 的人口能夠分配到 16.11% 的生態斑塊資源，主要集中在蓮花社區、80% 的人口則可分配到 41.58% 的生態斑塊資源，主要集中在小橫琴社區、荷塘社區和新家園社區。

圖 5 澳門和橫琴人口統計分區



圖片來源：作者自製。

圖 6 澳門和橫琴生態斑塊分配洛倫茲曲線



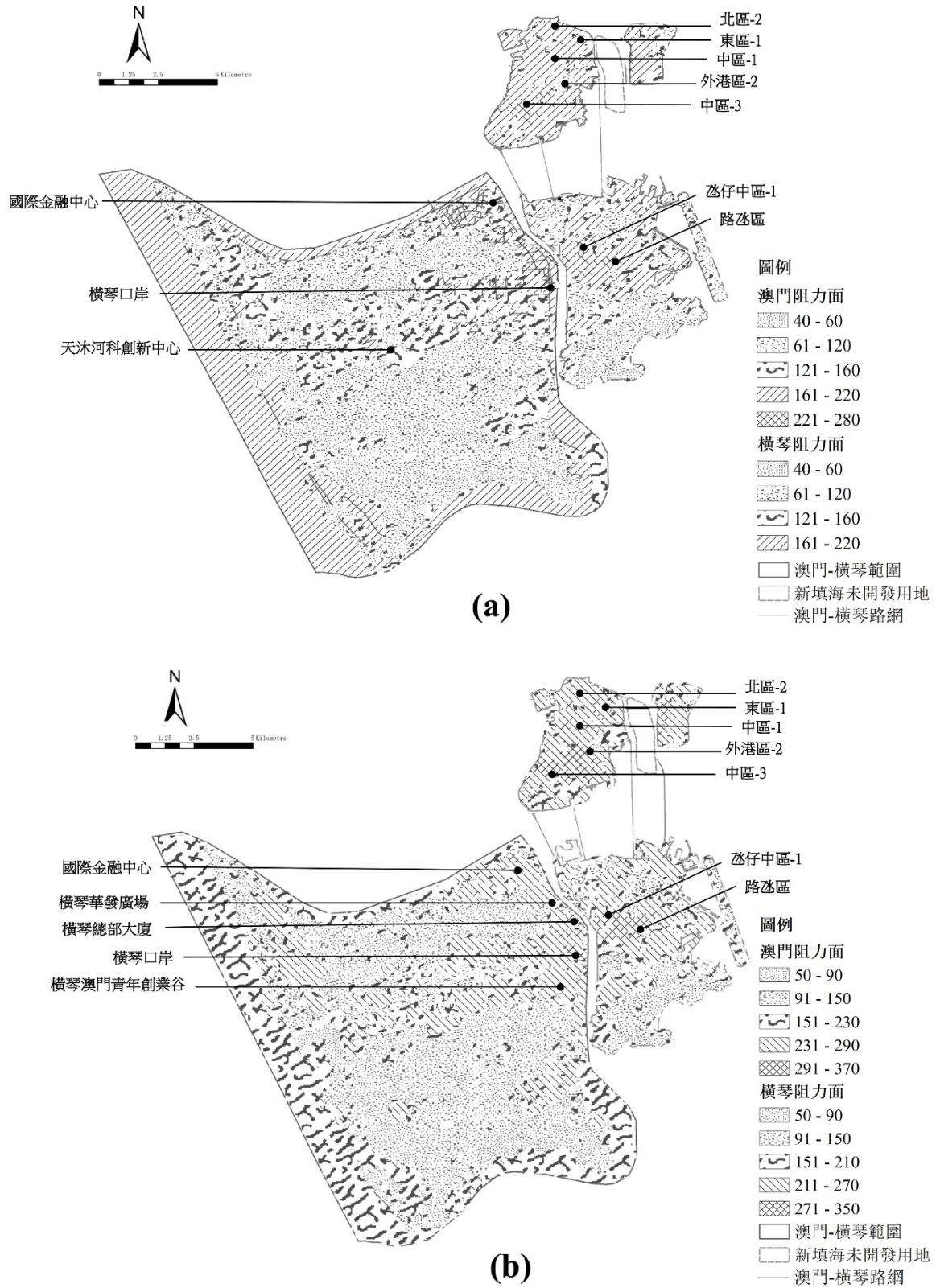
圖片來源：作者自製。

資料來源：澳門統計暨普查局：《2021 人口普查 詳細結果（更新版）》，2022 年，頁 117–20；〈人口社會統計專題快報〉，橫琴粵澳深度合作區統計局，www.hengqin.gov.cn/stats/tjzt/rktjzt/content/post_3815693.html，2024 年 6 月 15 日讀取。

（二）生態廊道識別結果

本研究採用加權疊加分析方法，將各阻力因子按其權重進行空間疊加，計算出澳門和橫琴綜合阻力面（圖 7）。2020 年澳門高阻力值區域主要分布在北區 -2、東區 -1、中區 -1、外港區 -2、中區 -3、氹仔中區 -1 和路氹區等，以密度較高的住宅區及休閒娛樂區為主，橫琴高阻力值區域主要分布在橫琴口岸、國際金融中心和天沐河科創新中心等。兩地高阻力值區域主要分布在住宅區以及主要交通路網上，該區域人流活動較為集中，對生態斑塊之間的能量流動有較大的阻礙（圖 7a）。2024 年澳門和橫琴的生態阻力格局發生了進一步演變（圖 7b）。澳門的生態阻力面在總體上保持與 2020 年相似的高阻力特徵，高密度建成區的阻力值仍維持在較高水平。2024 年橫琴的高阻力值區域明顯擴大，除了原有的橫琴口岸、國際金融中心等高阻力區域外，新增了如橫琴華發廣場、橫琴總部大廈、橫琴澳門青年創業谷等地的高阻力集中區。不透水地表面積增加，自然植被覆蓋減少，路網密度進一步提升，這反映出在橫琴粵澳深度合作區背景下，橫琴的基礎設施建設和城市功能區開發在過去四年中取得了顯著進展。這種快速的城市化和經濟發展以犧牲部分生態空間為代價，導致“高阻力斑塊”的數量和面積均有所增加。

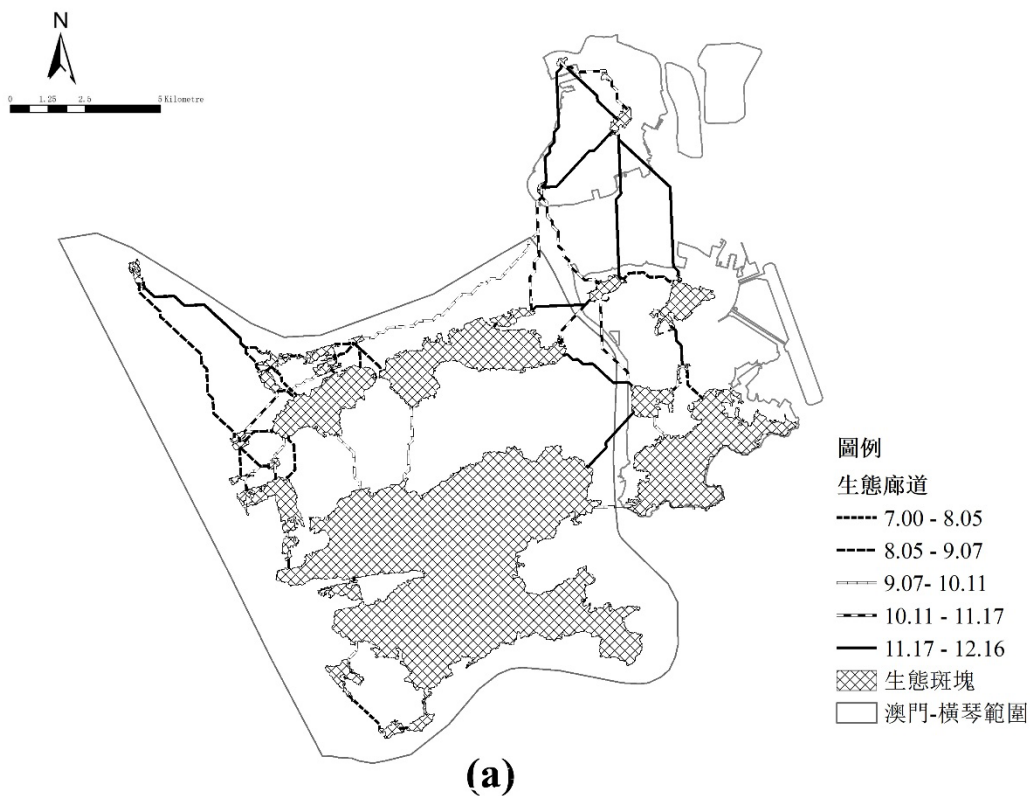
圖 7 2020 年和 2024 年琴澳一體化生態阻力面

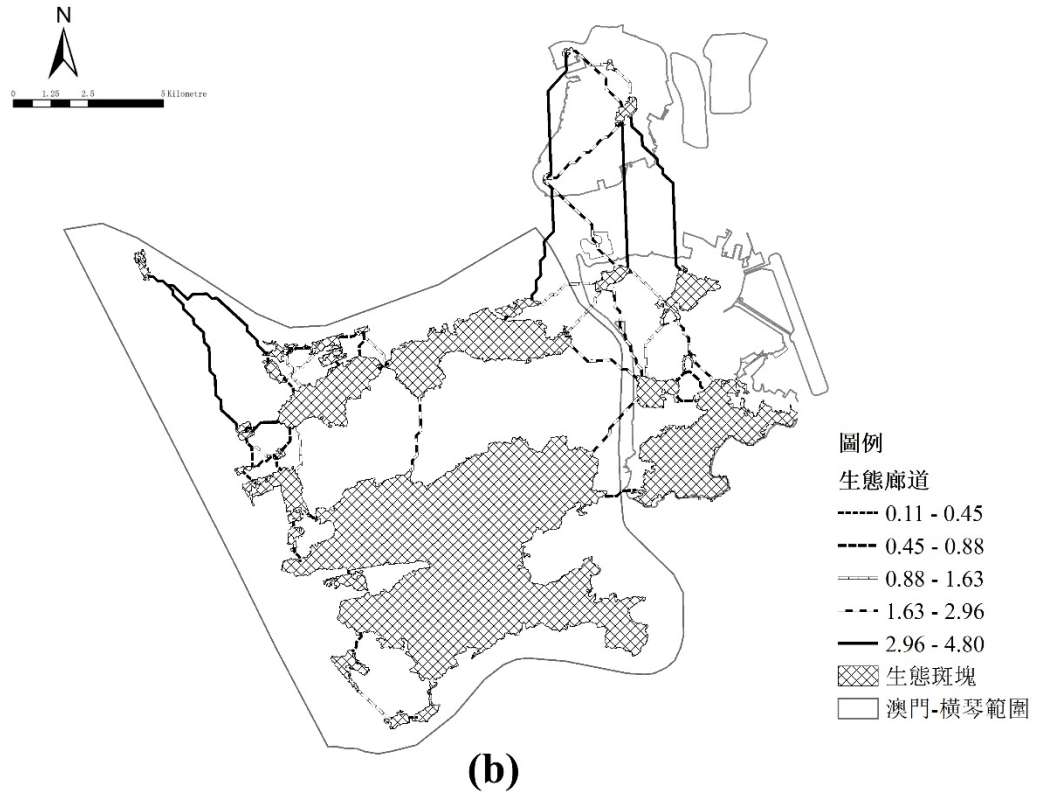


註：(a) 表示 2020 年琴澳一體化生態阻力面，(b) 表示 2024 年琴澳一體化生態阻力面；在本研究中，生態阻力面是通過對環境因素進行加權計算得出的，主要是相對阻力值，而非具體的物理單位。
 圖片來源：作者自製。

根據生態斑塊範圍和阻力面來計算生態斑塊與斑塊間的生態廊道，結果如下圖所示（圖 8）。據統計，2020 年琴澳一體化空間作用下的生態廊道共 57 條，總長度約為 79.05 千米，最長的生態廊道為 6.74 千米，最短為 0.12 千米（圖 8a）。2024 年琴澳一體化空間作用下的生態廊道共 54 條，總長度約為 69.15 千米，最長的生態廊道為 4.80 千米，最短為 0.12 千米（圖 8b）。不同類型的生態廊道具有不同的彈性水平，通過成本距離與實際距離的比例得出廊道的質量，從而得出廊道等級：阻力值越高，其質量越低，反之則越高。通過自然斷點法將廊道質量分為五級，生態廊道阻力值較低、質量較高的廊道連接橫琴西部的芒洲濕地公園和北部東方高爾夫珠海球場的綠廊。生態廊道阻力值較高、質量較低的廊道連接澳門半島二龍喉公園、東望洋山和媽閣山的綠廊，以及連接路氹大潭山郊野公園、路氹城生態保護區和龍環葡韻濕地公園的綠廊。

圖 8 2020 年和 2024 年琴澳一體化生態廊道分析圖



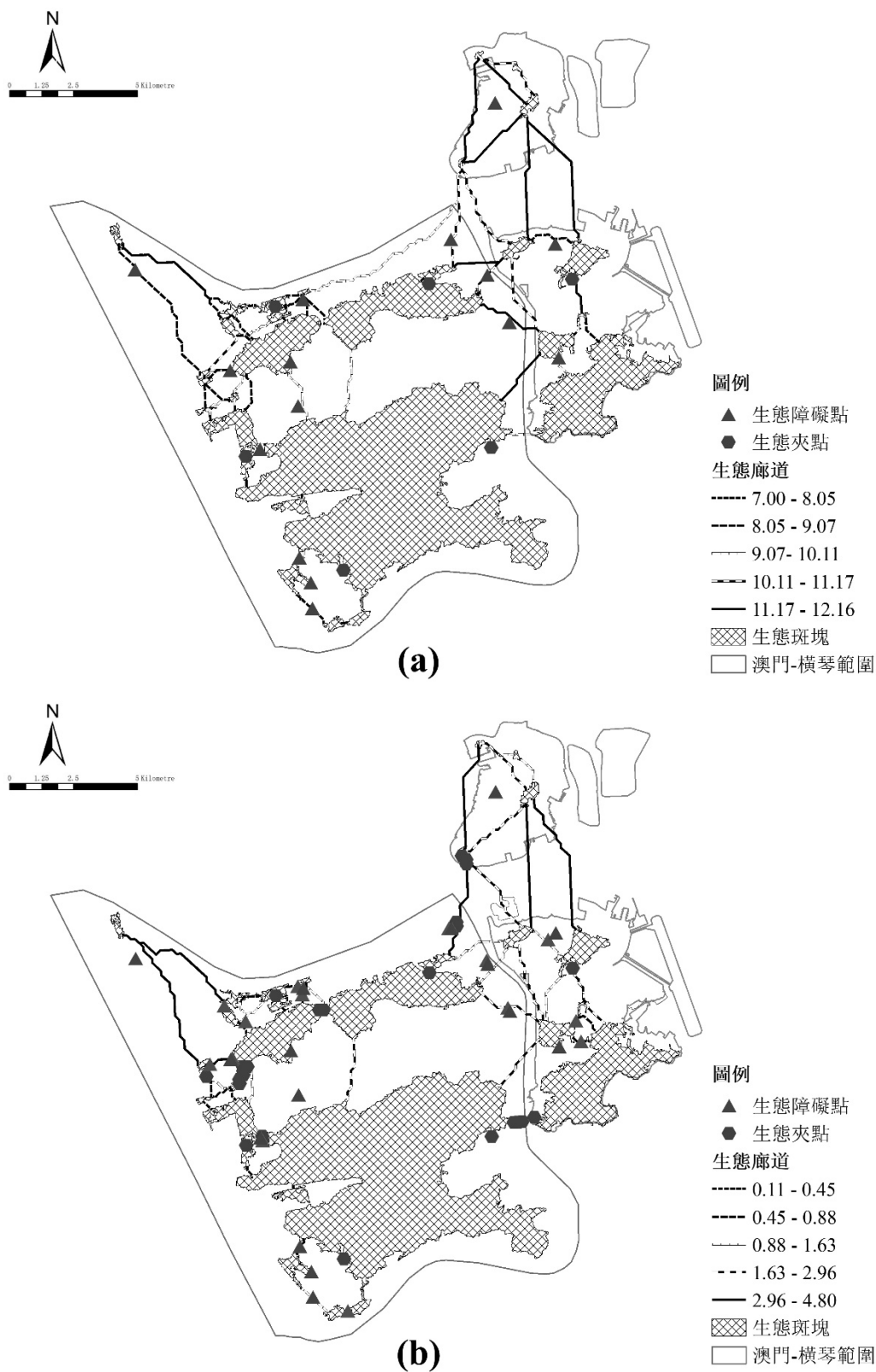


註：(a) 2020 年琴澳一體化生態廊道，(b) 2024 年琴澳一體化生態廊道；本研究中，生態廊道的測量並沒有固定的單位，而是根據其連通性來衡量，反映的是廊道在生態系統中作為通道的功能。圖片來源：作者自製。

(三) 生態節點識別結果

在已有生態斑塊、生態廊道的基礎上識別出澳門和橫琴的重要生態夾點和障礙點。2020 年共有 5 個生態夾點，結果如下圖所示（圖 9a）。澳門半島內未存在生態夾點，生態夾點主要分布在橫琴北部、西部以及路氹大潭山。2024 年共有 22 個生態夾點，與 2020 年相比，新增夾點分布於澳門媽閣山與橫琴北山交匯處、小橫琴山與橫琴國家濕地公園交匯處（圖 9b）。生態障礙點是阻礙生態斑塊之間連通性的關鍵區域。將得分高值區面積較大和較為集中的區域視為琴澳一體化的主要生態障礙點，2020 年共有 15 個主要生態障礙點，其總面積為 26.76 平方公里，主要分布於澳門半島內部高密度住宅區、媽閣山與小橫琴山、大潭山郊野公園與小潭山郊野公園交匯處、小潭山郊野公園與小橫琴山交匯處、路氹城生態保護區與小橫琴山交匯處，以及路氹城生態保護區與小橫琴山交匯處（圖 9a）。2024 年共有 18 個主要生態障礙點，其總面積為 26.85 平方公里，與 2020 年相比增加了 3 個生態障礙點，它們位於澳門路氹巴黎人花園與凱撒高爾夫球場交匯處、二井灣濕地公園與小橫琴山交匯處，以及橫琴珠海東方高爾夫球會與小橫琴山交匯處（圖 9b）。本研究將生態斑塊、生態廊道、生態夾點和障礙點整體疊加後，構建出 2020 年（圖 10a）及 2024 年（圖 10b）琴澳一體化的生態安全格局。

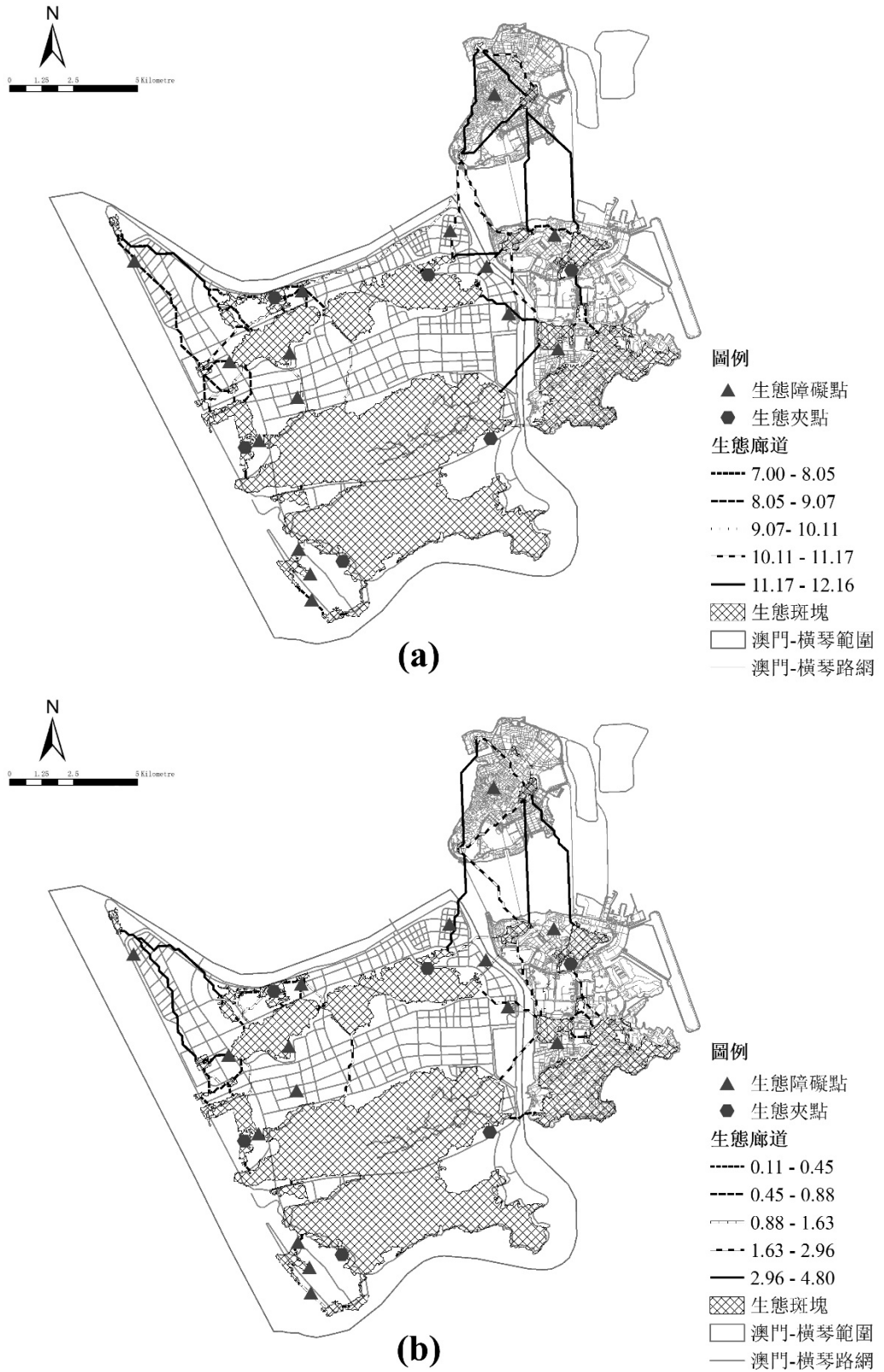
圖 9 2020 年和 2024 年琴澳一體化生態節點分析圖



註：(a) 2020 年琴澳一體化生態夾點和生態障礙點，(b) 2024 年琴澳一體化生態夾點和生態障礙點；研究中，生態廊道的測量並沒有固定的單位，而是根據其連通性來衡量，反映的是廊道在生態系統中作為通道的功能。

圖片來源：作者自製。

圖 10 2020 年和 2024 年琴澳一體化生態安全格局



註：(a) 2020 年琴澳一體化生態安全格局；(b) 2024 年琴澳一體化生態安全格局研究中，生態廊道的測量並沒有固定的單位，而是根據其連通性來衡量，反映的是廊道在生態系統中作為通道的功能。圖片來源：作者自製。

四、琴澳一體化對生態安全格局影響的分析及規劃設計建議

基於生態廊道、生態夾點以及生態障礙點的空間分析結果，本研究提出規劃設計與建議，旨在琴澳一體化背景下，提高整體生態系統服務價值、保護生態環境、推進城市生態安全格局韌性進而有效支撐琴澳一體化的高質量發展。

（一）增強琴澳一體化的生態斑塊均衡性

澳門的生態斑塊由北向南主要分布於青洲山、望廈山、東望洋山、媽閣山、小潭山郊野公園、大潭山郊野公園、龍環葡韻濕地、巴黎人花園、路氹城生態保護區、九澳水庫淡水濕地、疊石塘山等地。橫琴的生態斑塊由北向南主要分布於芒洲濕地公園、珠海東方高爾夫球會、小橫琴山、二井灣濕地公園及大橫琴山周邊山體。在《澳門特別行政區城市總體規劃（2020–2040）》中，^①針對澳門現有生態價值的自然資源山體（路環山體、大潭山、小潭山、媽閣山、西望洋山、青洲山、東望洋山及望廈山）、水體（澳門水塘、石排灣水塘、九澳水庫、黑沙水庫、西灣湖及南灣湖）和濕地（疊石谷濕地、九澳水庫淡水濕地、龍環葡韻濕地、路氹城生態保護區一區及二區）提出了生態保護區內不允許劃設居住、商業、工業及旅遊娛樂用地的限制，以確保自然資源得到保護及減少不同的活動對環境帶來的影響。

生態斑塊是城市內部分布的綠色空間，在提升城市景觀多樣性方面扮演着重要的角色。增加大型的生態斑塊有利於維持生態品質、保護物種多樣性，並促進生態系統中的能量流動，而小型的生態斑塊具有佔地小、分布廣的特點，能夠提高景觀豐富度與多樣性，對大型的生態斑塊起到補充作用。^②據此，規劃者應增加生態斑塊和綠色基礎設施，與現有的生態斑塊相結合並加以擴展，以構建連續的綠地，確保生態網絡內的物質交換和能量流動。本研究建議，在澳門未來的詳細規劃中，應針對北區-1、北區-2、東區-1、中區-3、外港區-1、外港區-2等人口密集區，適當增添小型生態斑塊，提升澳門城市空間範圍內部的植被覆蓋度，從而增強琴澳一體化生態斑塊的均衡性與穩定性。

（二）提高琴澳一體化生態廊道連通性

在2020年至2024年間，琴澳一體化生態廊道的數量與總長度均呈現下降趨勢。具體而言，2020年共識別出57條生態廊道，總長度為79.05千米；然而，至2024年，廊道數量減少至54條，總長度降至69.15千米。此趨勢反映出城市發展過程中，區域生態連通性面臨潛在侵蝕危機。此外，生態廊道的質量亦因生態阻力值的增加而呈現異質性。高阻力區域，諸如高密度住宅區及休閒娛樂區和主要交通幹道，對生態流動造成顯著阻礙，進一

^①澳門土地工務運輸局：《澳門特別行政區城市總體規劃（2020–2040）》，2022年2月，頁12。

^②王軍等：〈景觀生態規劃的原理和方法〉，《資源科學》（北京），第21卷，第2期，1999年，頁71–76。

步削弱了廊道的生態服務功能。現有生態廊道阻力值較低，質量較高的廊道連接橫琴西部的濱海濕地公園和北部東方高爾夫珠海球場的綠廊，生態廊道阻力值較高，品質較低的廊道連接澳門半島二龍喉公園、東望洋山和媽閣山的綠廊，以及路氹大潭山郊野公園、路氹城生態保護區和龍環葡韻濕地公園的綠廊。在琴澳一體化生態廊道構成後，路環疊石塘山和九澳山在內的山體和大橫琴島的山體相連接後阻力值降低，減輕了路氹中部生態廊道阻力較高的問題。研究結果與《澳門特別行政區城市總體規劃（2020–2040）》中的“一河兩岸合作軸帶”區域契合，^①該區域作為藍綠網絡規劃中的關鍵節點，是未來降低修復區內的生態阻力、增加生態廊道連續性的核心位置。

生態廊道加速生態過程與要素流動，對於生物多樣性的保護有積極的影響。無論是城市規劃理論下綠地系統的“點—線—面”形態，還是景觀生態學理論下的“斑—廊—基”結構，生態修復的重點都在於重塑生態物質信息的流動，以實現生物多樣性保護與休閒遊憩等生態系統服務。^②對此，需規劃能夠適應城市發展變化的連續生態網絡，確保廊道在空間變化的情況下仍能保持功能。通過整合緩衝區和適應性管理策略，保護生態廊道免受城市化的不利影響，從而提高連通性並增強整體復原性。橫琴與路氹在水路和陸路之間都存在交匯地帶，應在水體、道路兩側預留出一定的生物通道，便於生態過程與要素流動，適當拓寬廊道的寬度，盡可能以自然生態系統邊界為廊道的邊界，減少外界對生態廊道的干擾。在阻力較大的廊道附近，建議適當增加點狀生態斑塊，加強生態廊道之間的連通能力，保證各景觀之間物質流動的交互作用，提高琴澳一體化生態廊道的連通性。

（三）提升琴澳一體化生態節點韌性

在 2020 年至 2024 年間，琴澳的生態夾點數量呈現顯著增幅，由 2020 年的 5 個增加至 2024 年的 22 個。此增長趨勢預示着兩地間生態連通潛力的提升，有助於生態過程及生態要素流通。新增夾點的空間分布及其在實際生態功能中的有效性有待進行深入評估。現有生態夾點位於橫琴芒洲—二井灣—深井灣，對於維護整個區域的生態平衡與可持續發展具有重要的作用。研究結果與《橫琴粵澳深度合作區國土空間總體規劃（2021–2035 年）（草案）》內生態安全格局中的“一環”對應，^③規劃草案強調了加強芒洲—二井灣—深井灣沿線地區及其南部沙灘的生態保護。與此同時，生態障礙點的數量亦有所增長，從 2020 年的 15 個增加至 2024 年的 18 個。這些新增障礙點主要集中於澳門路氹及橫琴部分區域，其空間分布隨城市發展而呈現動態位移。現有生態障礙點主要集中在橫琴十字門沿岸，與草案提出的“琴澳一河兩岸合作軸帶”的區域一致，該區域不僅是未來琴澳一體化發展的關鍵合作軸帶，也是構建生態安全格局、實現生態保護與修復雙重目標的核心區域。

^①澳門土地工務運輸局：《澳門特別行政區城市總體規劃（2020–2040）》，2022 年 2 月，頁 9。

^②王佳煜、陳天：〈沿海高密度城市國土空間生態修復關鍵區域識別方法——以澳門特別行政區為例〉，《風景園林》（北京），第 28 卷，第 12 期，2021 年，頁 16–22。

^③《橫琴粵澳深度合作區國土空間總體規劃（2021–2035 年）（草案）》，2024 年 6 月，頁 9。

生態節點是生態廊道中的關鍵區域，對於連接斑塊間的生態過程發揮着至關重要的作用。規劃者應加強生態節點上的各種綠地，包括公園、自然休憩區等，確保它們形成一個更具韌性和相互關聯性的城市生態網絡，從而增強生態系統整體結構和功能的完整性。在澳門半島高密度建成區之間建議增加小型帶狀生態斑塊，使用垂直綠化或者屋頂綠化的方式，增加城市空間範圍內部的植被覆蓋度，降低修復區內的生態阻力，保持其生態廊道的連續性和生態斑塊間的穩定性，改善澳門半島生態連通性較差的狀況，並使增加的小型生態斑塊融入現有生態體系，形成有機生態網絡。通過實施更加嚴格的生態管理策略，保護區域內的自然生態系統和生物多樣性，促進生態要素的流動，提升琴澳一體化的生態節點韌性與可持續發展能力。

五、研究結論

琴澳一體化格局的形成為澳門和橫琴的建設發展帶來了重大機遇，城市空間的協同發展與生態安全格局的優化提升是兩地城市空間規劃中的重要主題，能為琴澳一體化發展提供可持續及具有韌性的空間支撐。本研究以澳門和橫琴作為研究對象，依據生態系統服務價值和形態學空間格局分析模型對生態斑塊進行提取；基於研究區的生態屬性選取高程、坡度、交通網絡密度、夜間燈光強度、歸一化植被指數，以及土地利用類型等六個因子作為阻力值，構建生態阻力面；利用電路理論對生態廊道、生態夾點、生態障礙點進行空間識別，構成琴澳一體化的生態安全格局。

本研究針對琴澳一體化提出增強生態斑塊均衡性、提高生態廊道連通性、提升生態節點韌性的規劃建議。未來琴澳兩地需更加明確規劃制度的協同合作機制，實施協同優化政策，促進琴澳一體化生態安全格局的協同優化發展，建立澳門和橫琴兩地城市空間健全且有效的布局與協同規劃研究。

然而，本研究仍存在一定的局限性，在未來的研究中可進一步深化。首先，在時間維度上，本研究僅關注了2020年和2024年澳門和橫琴的生態狀況，缺少對歷史演變趨勢和未來情景的預測分析，難以全面揭示生態安全格局動態演化規律。其次，在方法論層面，生態系統服務功能的選擇和評估方法有待進一步完善，本研究使用當量價值法和形態學空間格局分析來確定生態斑塊，未來建議將生態系統服務的供給與需求評價納入評估體系，更科學地進行城市生態服務價值評估及空間分析。最後，本研究以澳門與橫琴作為核心研究區域，未能充分考慮珠海市全域自然生態格局對區域生態連通性的影響。作為大灣區重要的生態城市，珠海擁有豐富的山林、濕地和海岸帶資源，在維持區域生物多樣性、保障生態系統服務功能，以及維繫大灣區生態網絡的整體連續性上，具有不可替代的作用。未來研究應着重分析珠海在大灣區生態安全格局構建中的作用機制，以更全面地評估區域生態網絡的穩定性和恢復力。因此，建議後續研究將珠海納入分析範疇，構建更具整體性與

系統性的區域生態網絡，從而深化對區域生態系統複雜性的認知，提出更符合實際生態治理系統性需求、更具實踐性與協同效應的優化建議。