

DOI: 10.5846/stxb202105071200

许超, 孟楠, 张岩, 谢世林, 韩宝龙, 苏芝敏, 林真光, 逯非, 欧阳志云. 城市生态保护红线划定与管理——以澳门特别行政区为例. 生态学报, 2021, 41(22): 9103-9117.

Xu C, Meng N, Zhang Y, Xie S L, Han B L, Su Z M, Lin Z G, Lu F, Ouyang Z Y. Urban ecological conservation redlines delineation and management: A case study of Macao Special Administrative Region. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 9103-9117.

## 城市生态保护红线划定与管理 ——以澳门特别行政区为例

许 超<sup>1,2,3</sup>, 孟 楠<sup>2</sup>, 张 岩<sup>2</sup>, 谢世林<sup>2</sup>, 韩宝龙<sup>2</sup>, 苏芝敏<sup>2,4</sup>, 林真光<sup>5</sup>, 逯 非<sup>2,4,\*</sup>,  
欧阳志云<sup>2</sup>

1 北京建筑大学, 未来城市设计高精尖创新中心, 建筑与城市规划学院, 北京 100044

2 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

3 北京林业大学园林学院, 北京 100083

4 京津冀区域生态环境变化与综合治理国家野外科学观测研究站, 北京 100085

5 广州草木蕃环境科技有限公司, 广州 510630

**摘要:**我国澳门特别行政区是世界上人口密度最高的地区之一, 人地关系紧张。随着城市和经济的发展, 人类空间与生态空间失调, 城市生态和人居环境问题不断加剧。在建设美丽湾区、美丽澳门和人们对美好人居环境需求的背景下, 通过划定城市生态保护红线以控制和维持现有重要功能生态空间, 保护和改善高敏感生态空间, 维护区域生态安全显得尤为重要。基于对澳门陆域生态系统调查, 结合城市和自然资源特征, 从生态系统服务功能、生态系统敏感性、生物多样性分布以及现有生态保护区四个方面构建了城市生态保护红线划定方法框架, 选取并评估水源涵养、雨洪调节、热岛调节、土壤保持、海岸带防护五类调节服务和生态系统服务中的休闲游憩的空间格局, 水土流失敏感性和海岸带风暴潮敏感性两种生态敏感性的分布, 并综合澳门具有保育价值生物的栖息地分布和现有保护区范围进行了城市生态保护红线的划定。研究结果显示, 澳门城市生态保护红线区域总面积 6.71 km<sup>2</sup>, 占研究区面积的 19.79%, 覆盖了 44% 的生态空间、12.4% 的海岸线、所有的重要物种栖息地及三分之一的古树名木。依照此生态保护红线研究进一步提出针对各类红线地块的保护和管理措施。研究提出的城市生态保护红线划定思路, 可以为其他城市的重要生态空间保护、修复与管理提供参考。

**关键词:**生态空间; 生态保护红线; 生态系统服务; 空间管理; 澳门

## Urban ecological conservation redlines delineation and management: A case study of Macao Special Administrative Region

XU Chao<sup>1,2,3</sup>, MENG Nan<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>2</sup>, XIE Shilin<sup>2</sup>, HAN Baolong<sup>2</sup>, SU Zhimin<sup>2,4</sup>, LIN Zhenguang<sup>5</sup>,  
LU Fei<sup>2,4,\*</sup>, OUYANG Zhiyun<sup>2</sup>

1 Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, School of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China

2 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 Beijing-Tianjin-Hebei Urban Megaregion National Observation and Research Station for Eco-Environmental Change, Beijing 100085, China

**基金项目:**国家自然科学基金委员会重点项目(71533005); 澳门特别行政区政府环境保护局项目(2066/090/DPA/DPAA/2017); 中国科学院青年创新促进会项目

收稿日期: 2021-05-07; 接收日期: 2021-10-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: feilu@rcees.ac.cn

5 Guangzhou CAOMUFAN Ecological Research Co., Ltd., Guangzhou 510630, China

**Abstract:** Macao Special Administrative Region is one of the most densely populated regions in the world, and the human-land relationship is tense. The fast development of the city and economy resulted in the imbalanced pattern of human space and ecological space, and serious problems of urban ecology and human settlement environment. In the context of building a beautiful Bay Area and a beautiful Macao, and people's demand for a better living environment, it is particularly important to control and maintain the existing vitally functional ecological space, and to protect and improve the highly sensitive ecological space by delimiting the urban ecological conservation redlines, so as to maintain regional ecological security. Based on the survey of the terrestrial ecosystem in Macao and by combining the characteristics of the city and natural resources, this paper constructed a framework for the delineation of urban ecological conservation redlines from four aspects, i.e., ecosystem service functions, ecosystem sensitivity, biodiversity distribution and existing ecological protection zones. We selected and evaluated five types of regulation services (including water conservation, rain and flood regulation, heat island regulation, soil conservation, and coastal protection) and leisure and recreation in ecosystem services, and analyzed distribution of the sensitivity of water and soil erosion and the coastal storm surge. The results were further combined with the distribution of habitats of the species with high conservation value in Macao and the scope of the existing protected areas, and the urban ecological conservation redlines were finally delineated. The total area within the delineated Macao's urban ecological conservation redlines was 6.71 km<sup>2</sup>, accounting for 19.79% of the study area, which covered 44% of the ecological space, 12.4% of the coastline, all the important species habitats and one third of the ancient famous trees. Corresponding protection and management measures were also provided according to different kinds of land parcels in this ecological conservation redlines. The proposed frame and method of urban ecological redlines delineation could also provide reference for conservation, restoration and management of important urban ecological spaces in other cities.

**Key Words:** ecological space; ecological conservation redline; ecosystem service; space management; Macao

城市是一个复合生态系统,社会、经济、自然三个子系统互相影响和制约<sup>[1]</sup>,既依赖于城市范围以外的生态系统,同时也受益于城市内部的生态系统<sup>[2]</sup>。生态空间是具备生态功能,能够提供生态产品和生态系统服务的区域,通过保护和管理可使其持续提供生态系统服务,保障城市与区域生态安全<sup>[3]</sup>。城市中的生态空间为城市提供生态系统服务,是保障城市生态安全、提升居民生活质量不可或缺的城市空间<sup>[4]</sup>。它包括自然生态空间和人类生态空间,人类生态空间与退化的自然生态空间耦合关系的失调导致了诸多的城市生态环境问题,统筹管理好两类空间至关重要<sup>[5]</sup>。通过生态系统服务功能和生态敏感性评估,控制和维持现有重要功能生态空间,保护和改善高敏感生态空间,对城市生态系统管理意义重大。近些年已有较多研究关注于如何利用生态系统服务功能和生态敏感性评估引导生态空间保护和管控的内容,大多集中在生态保护红线划定<sup>[6-7]</sup>、生态空间划定管制<sup>[8-9]</sup>、土地利用管理<sup>[10]</sup>、生态安全格局构建<sup>[11]</sup>等方面,这些评估应用为生态空间保护管理提供了新思路,也有效推动了不同生态空间针对性保护管理决策工作的进行<sup>[12]</sup>。

在生态保护红线划定方面,《生态保护红线划定指南》<sup>[13]</sup>的出台为其提供了划定方法和技术路线参考,在区域尺度也已有较多研究开展<sup>[14-17]</sup>。与区域不同,城市范围内的生态保护红线划定和管理在多方面需要特殊考虑。在研究对象上,区域尺度红线的划定研究多聚焦于城乡范围的生态空间,而城市内的生态空间更加多元和复杂,它们直接关系到社会体制、经济发展状况以及人类赖以生存的自然环境<sup>[18]</sup>。在评估内容上,区域尺度红线划定较多关注支持服务、供给服务和调节服务3个方面,基本不涉及文化服务,而在城市内则无法忽视它的重要性。在研究方法上,就城市而言,既要加强划定的科学性,研究城市生态系统本身的功能结构特征,最大化保护生态资源;又要注重准确性,充分考虑涉及的已建设空间状况,在较精确的地块尺度上,准确地划定生态控制边界<sup>[19]</sup>。在研究意义上,通过城市生态保护红线的划定可以引导城市内部生态保护与空间开发的合理分配,实现生态保护与城市发展的双赢<sup>[20]</sup>,为城市重要生态空间保护管理方案和措施的制定提供

理论依据和技术支持。

随着澳门数年持续的填海造地,建设用地不断扩张<sup>[21]</sup>,但人口密度仍然是全世界最高的区域之一,据统计澳门居民已经超过 65 万人,2017 年有超过 3200 万游客入境<sup>[22]</sup>。社会和经济的发展却导致生态空间受到侵占和压缩,植被资源被破坏,湿地、自然岸线减少<sup>[23-24]</sup>,生态环境受到威胁并出现了诸多问题<sup>[25-27]</sup>,严重制约城市的可持续发展。澳门没有农田、农业人口、农业产值,其城市化率已经达到了 100%<sup>[28]</sup>,每一寸土地都面对着巨大的开发建设压力,这与已有的生态保护红线划定研究的背景并不相同。以往的城市生态保护红线划定都聚焦在非建设用地<sup>[29-30]</sup>,多用来保护重要的自然生态空间,与各方利益相关较少,容易实现空间的划定和管理;而在澳门,很多生态空间与城市居民生活和工商业生产功能单元相互交错,红线划定涉及的问题与城市人居环境密切相关,划定的过程需要多方面权衡和调整,红线的管理需要注重实施性和针对性。

2019 年 2 月 18 日,中共中央、国务院印发《粤港澳大湾区发展规划纲要》,明确要“划定并严守生态保护红线”,对澳门特别行政区的生态系统管理提出了新要求。同时,大量本地居民和游客对澳门人居环境改善和生态保护的需求也在日益增长,建设生态安全、环境优美的美丽澳门就显得更为迫切。在此背景下,保护城市生态系统重要功能区和高敏感区,明确这些区域的空间分布,针对不同的空间提出相应的管理策略是实现该目标的有效途径。

本文遵循科学性、整体性、协调性、应保尽保的原则,结合城市生态系统服务功能和敏感性的特征以及澳门自身的特点,基于生态系统服务功能、敏感性评估和生物多样性调查,综合多因素分析,建立城市生态保护红线划定方法,并在澳门陆域划定城市生态保护红线,为澳门的生态系统保护管理和城市可持续发展提供参考和依据。

## 1 研究区概况

澳门特别行政区(113°31′33″—113°35′43″E, 22°06′39″—22°13′06″N)位于我国珠三角地区,毗邻广东省珠海市,是粤港澳大湾区的重要节点。气候为热带海洋性季风气候,年平均气温为 22.4℃。年平均降雨量为 1974.5mm,降雨受季节波动影响,4—9 月为雨季,10—次年 3 月为旱季<sup>[31]</sup>。澳门是土地资源极为稀缺的滨海城市,为了满足城市和经济的发展,一直在进行填海造地,其陆域逐渐由原来的半岛、氹仔和路环三岛变成现在的半岛和离岛双岛格局。

研究区域包含半岛、离岛、澳门大学横琴校区(经全国人大表决授权澳门特别行政区对其实施管辖并实行隔离式管理)和新城 A 区(新填海区),总面积为 33.90km<sup>2</sup>(图 1)。

## 2 研究方法

### 2.1 城市生态保护红线划定思路与框架

研究在参考《生态保护红线划定指南》<sup>[13]</sup>的基础上,提出城市生态保护红线的划定技术路线和框架(图 2)。首先,结合研究区的城市自然条件(资源及灾害等)、城市生态环境特征、城市发展状况(人口、产业等)的分析和实地调查,确定需要评估分析的关键生态系统

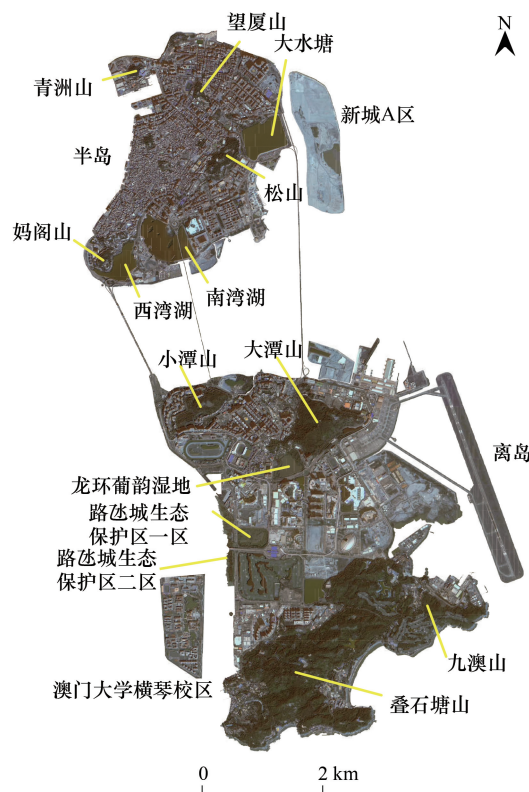


图 1 研究区域  
Fig.1 Study area

服务功能类型和关键敏感性类型,构建评估指标体系;评估分析后,基于结果划分重要生态系统服务功能区和敏感区;再结合当地关于生态保护区等既有控制政策和规定,划定城市生态保护红线评价识别区;最后,结合土地属性校核、实地调查情况(地面获取而非遥感判读的生态系统类型、土地利用状况和权属等)进行核对、调整和补充,形成最终的划定方案。

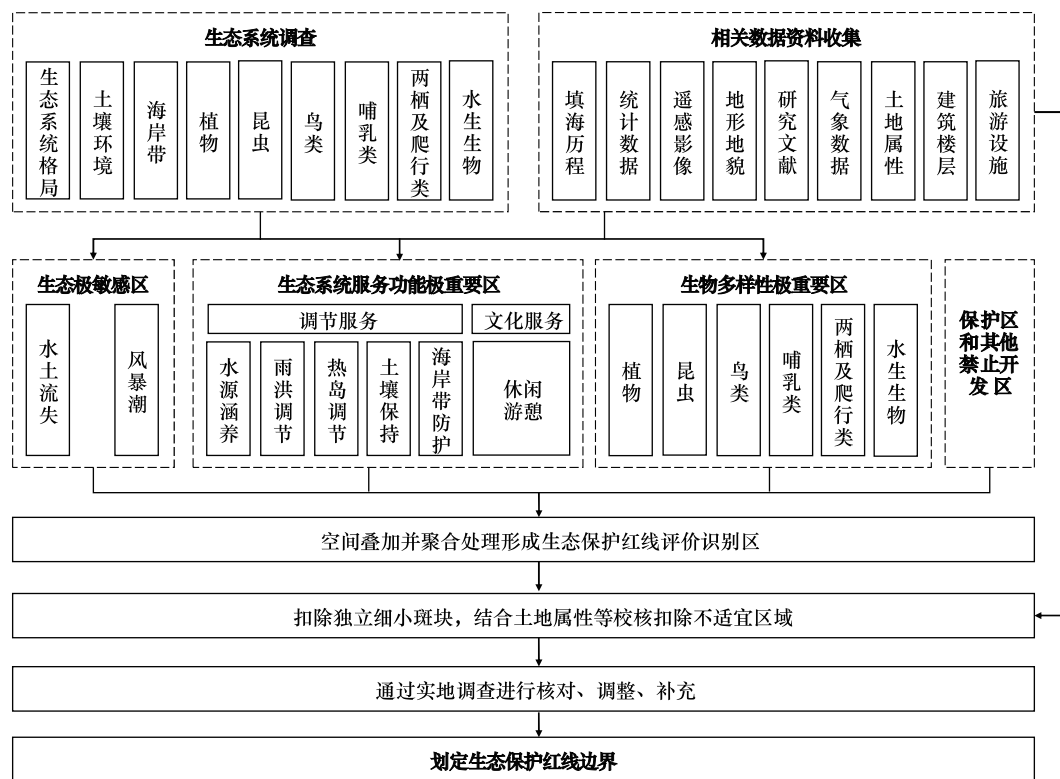


图2 技术路线图

Fig.2 Technical roadmap

研究基于澳门实地生态调查并结合城市自然条件、生态环境特征和发展情况,选取了水源涵养、雨洪调节、热岛调节、土壤保持、海岸带防护和休闲游憩六项关键生态系统服务功能,水土流失敏感性和海岸带风暴潮敏感性两项生态系统敏感性指标,结合生物多样性调查和现有保护区,划定生态保护红线评价识别区,然后结合土地属性数据和实地调查进行校核和调整,最终形成澳门陆域生态保护红线划定方案。

## 2.2 研究数据及来源

研究使用多源数据(表1)开展生态系统服务功能和敏感性评估、土地属性校核等工作,其中土地覆盖分类数据根据遥感解译结合实地调查验证后得到,分为建筑、道路、广场、人工林、自然林、人工灌丛、自然灌丛、草地、裸地、湖/塘/库、湿地和人工水面12种类型<sup>[21]</sup>。

## 2.3 生态系统服务功能评估

### 2.3.1 水源涵养

澳门淡水资源匮乏,淡水供给基本依赖内地,2017年96.5%的淡水水源来自珠海磨刀门,但这并不是长久之计<sup>[32]</sup>。澳门属亚热带地区,降雨量丰沛,2015、2016、2017年3年平均降雨量达1820mm<sup>[22]</sup>,是华南沿海地区降雨量较多的地区之一。如果按照研究区面积33.90km<sup>2</sup>核算,理论上澳门每年能够利用的雨水资源为6170万m<sup>3</sup>。2017年澳门的总用水量为8843万m<sup>3</sup><sup>[33]</sup>,若能充分利用雨水作为淡水资源补充,就能够在很大程度上缓解澳门的用水压力。生态空间的水源涵养功能可以有效收集雨水资源,补充地下水源,对于淡水资源匮乏的澳门来说无疑是重要的服务功能。研究使用水量平衡方程<sup>[13]</sup>来评估水源涵养功能量,详见下式(1):



表 1 主要研究数据及来源  
Table 1 Main research data and sources

评估数据 Evaluation data	主要用途 Main uses	类型 Types	来源 Sources
2017 年遥感影像 Remote sensing image for 2017	土地覆盖类型分类	栅格图像 (1m)	GF2
数字高程模型 DEM Digital elevation model	热岛调节服务、土壤保持服务、 水土流失敏感性评估	栅格图像(30m)	地理空间数据云 <a href="http://www.gscloud.cn/">http://www.gscloud.cn/</a>
土壤属性 Soil property	土壤保持服务和水土流失敏感性 评估	采样统计数据	土壤调查采样
海岸带岸线类型 Coastline type	海岸带防护服务和海岸带风暴 潮敏感性评估	调查统计数据	海岸带地貌特征调查
地形与水深数据 Relief and bathymetry	海岸带防护服务和海岸带风暴 潮敏感性评估	栅格图像 (2km)	美国国家海洋和大气管理局官网 <a href="https://www.ngdc.noaa.gov/">https://www.ngdc.noaa.gov/</a>
气象站(8 个)逐日降雨量统计 Daily rainfall statistics of meteorological stations	水源涵养服务、雨洪调节服务、 土壤保持服务和水土流失敏感 性评估	统计数据	澳门气象局
2017 年地表温度反演 Surface temperature inversion data for 2017	热岛调节服务评估	栅格图像 (30m)	根据 Landsat 影像处理
归一化植被指数 NDVI Normalized differential vegetation index	热岛调节服务评估	栅格图像 (30m)	根据 Landsat 影像处理
植被覆盖度 Vegetation coverage	土壤保持服务和水土流失敏感 性评估	栅格图像 (30m)	根据 Landsat 影像处理
2017 年统计年鉴 Statistical yearbook for 2017	分区边界	地图	澳门统计暨普查局
2016 年中期人口统计 2016 Population by-census detailed results	休闲游憩服务评估	统计数据	澳门统计暨普查局
休闲游憩绿地分布 Leisure and recreation green space distribution	休闲游憩服务评估	名录、地图和矢量图像	澳门自然网 <a href="https://nature.iam.gov.mo/c/park/list">https://nature.iam.gov.mo/c/park/list</a> 、《澳门特别行政区绿化区》地图和澳门地图绘制暨地籍局数字化地图 <a href="https://eservice.dscc.gov.mo/epay/chs/Transaction/productSelection.jsp">https://eservice.dscc.gov.mo/epay/chs/Transaction/productSelection.jsp</a>
澳门建筑轮廓及层数 Macau building outline and the number of floors	休闲游憩服务评估	矢量图像	高德地图
兴趣点 POI Points of interest	休闲游憩服务评估	矢量图像	高德地图
土地属性 Land property	土地属性校核	矢量图像	澳门土地工务运输局

$$S_{WP} = \sum_{i=1}^n A_i \times (P - R_i - ET) \times 10^{-3}$$

(1)

式中,  $S_{WP}$  为水源涵养量( $t/m^2$ );  $P$  为年均降雨量( $mm$ ), 基于气象站平均降雨量进行克里金插值计算得到;  $R_i$  为地表径流量( $mm$ ), 由降雨量乘以径流系数得出, 根据澳门城市植被特征<sup>[34-35]</sup>、实地调查情况和《生态保护红线划定指南》<sup>[13]</sup>, 自然林和自然灌丛的径流系数参考常绿阔叶林 2.67%和常绿阔叶灌丛 4.26%取值, 通过 NDVI 加权后人工林和人工灌丛分别取 4.49%和 7.88%, 草地参考草丛取值, 湿地参考湿地取值;  $ET$  为蒸散发量( $mm$ ), 基于年降雨量等数据计算<sup>[36]</sup>得出;  $A_i$  为  $i$  类植被覆盖类型的面积( $m^2$ );  $i$  为研究区第  $i$  类植被覆盖类型;  $n$  为研究区植被覆盖类型总数。

2.3.2 雨洪调节

澳门所处的珠江河口经常受到暴雨和风暴潮影响, 城市极易发生洪涝灾害<sup>[37]</sup>, 在近年的台风“天鸽”、“山竹”期间更是发生了严重的内涝。雨洪调节功能是指生态空间所特有的生态结构能够吸纳大量的降水和

过境水,蓄积雨洪洪峰水量,削减并滞后雨洪洪峰,以缓解汛期洪峰造成的威胁和损失的功能。研究使用暴雨降水量、地表径流量和生态系统类型<sup>[15]</sup>来评估雨洪调节的功能量( $\text{t}/\text{m}^2$ )。

### 2.3.3 热岛调节

《粤港澳大湾区气象发展规划(2020—2035年)》指出,区域台风、暴雨、雷电、大风、高温等灾害性天气多发,城市内的高温天气往往受热岛效应的影响而加重,城市生态空间则具有调节城市热岛的作用,其降温效益与所处地理环境条件、土地覆盖类型的面积、形状及配置方式等直接相关。基于现有研究数据,选取土地覆盖类型(林地、水体、草地)、DEM 和 NDVI 作为影响地表温度(LST)的关键因子,构建地表温度和相关影响因素关系模型,分别计算无生态空间和有生态空间的降温量,以二者的差值表征热岛调节的功能量( $^{\circ}\text{C}$ )。

### 2.3.4 土壤保持

土壤保持是生态空间通过其结构与过程减少降水所致的土壤侵蚀的作用,山体是澳门主要的生态空间类型之一,其植被对土壤保持发挥着重要的作用。土壤保持功能主要与气候、土壤、地形和植被有关,研究采用修正通用水土流失方程(RUSLE)<sup>[38]</sup>对土壤保持服务开展评估,土壤保持功能量( $\text{t hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ )为潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差。

### 2.3.5 海岸带防护

海岸带防护作为沿海城市一种重要的生态系统服务类型,起着防护城市海岸带和抵御风暴潮的重要作用,是沿海城市保持韧性和弹性的重要保障。研究以澳门海岸带为对象,基于 InVEST 的海岸带脆弱性模型评估得出海岸带脆弱性指数  $EI$ <sup>[39]</sup>,预设自然植被完全消失的情景变化,并赋予每段岸线最高风险等级值,采用下式(2)计算自然植被的重要性指数,以此表征海岸带防护功能的重要程度:

$$HI_k = EI_{k\max} - EI_k \quad (2)$$

式中,  $HI_k$  为岸线  $k$  的植被重要性指数,无量纲;  $EI_{k\max}$  为最高风险等级下岸线  $k$  的脆弱性指数,无量纲;  $EI_k$  为常规风险等级下岸线  $k$  的脆弱性指数,无量纲。

### 2.3.6 休闲游憩

城市中生态空间的休闲游憩服务功能至关重要<sup>[3,40]</sup>,可以结合城市特征考虑作为城市红线划定的重要因素之一。研究对现有主要休闲游憩绿地的服务压力进行评估,并以此作为是否需要划入红线范围的依据。鉴于澳门是世界知名的旅游城市,常年有大量游客入境,因此评估要考虑常住人口和游客两个方面产生的服务压力。

常住人口方面,居住建筑物尺度的常住人口空间分布模拟对服务需求量化和空间化具有重要意义<sup>[41]</sup>,由居住建筑物层数和面积共同表征的建筑物体积是模拟这个空间尺度上人口分布的重要因素<sup>[42]</sup>。通过爬取高德地图的澳门建筑物楼层矢量数据,在 ArcGIS 10.2 里使用澳门土地属性数据中的住宅用地边界裁取得到澳门住宅楼层数据,并进行栅格化处理,得到 1 米分辨率的建筑楼层数据。将楼层栅格数据以统计分区<sup>[22]</sup>为单元统计分区总数值,并与统计分区人口<sup>[43]</sup>(其中澳门大学横琴校区按 5000 人分配<sup>[44]</sup>) 在 R 语言统计分析软件中进行回归分析( $R^2=0.78, P<0.001$ ),可知分区人口分布与建筑层数分布相关性较强,可以以此为权重进行人口分配。

研究以每个分区为单元,以楼层数占比作为人口权重系数(无量纲),将每个分区的人口按照层数差异分配到住宅建筑尺度空间上。详见下式(3):

$$\text{POP}_j^i = \text{POP}_j \times \frac{W_j^i}{\sum_{i=1}^n W_j^i} \quad (3)$$

式中,  $\text{POP}_j^i$  为第  $j$  个分区的第  $i$  个栅格的人口数;  $\text{POP}_j$  为第  $j$  个分区的总人口数;  $W_j^i$  为第  $j$  个分区的第  $i$  个栅格的楼层数;  $\sum_{i=1}^n W_j^i$  为第  $j$  个分区的栅格楼层总数。

游客方面,由于 POI 数据有助于明确城市空间的社会属性<sup>[45]</sup>,研究基于爬取的澳门 POI 数据筛选出餐

饮、购物、科教文化、住宿、娱乐服务等类型数据以反映这些与游客密切相关设施的空间分布,进而在一定程度上反映研究区内游客分布的冷热差异。将数据导入 ArcGIS 10.2 进行处理并对矢量点数据进行核密度分析,再将分析后的值进行归一化处理。

研究根据实地调查情况,参考澳门自然网<sup>[46]</sup>在录的公园绿地、《澳门特别行政区绿化区》地图的公园区域及澳门地图绘制暨地图局公开的绿地矢量数据整合为休闲游憩绿地评估数据,包含了研究区内主要的公园(花园)。

然后,结合人口分布模拟和 POI 核密度分析两方面来评估研究区内公园绿地的服务压力。为了使两方面数据能够结合进行评估,将人口分布数据也进行归一化处理,在 ArcGIS 10.2 中以每块绿地边界做缓冲区统计区内人口、POI 的归一化值之和,其中缓冲区根据绿地面积大小(结合澳门实际情况设定为  $>50000\text{m}^2$ 、 $10000\text{—}50000\text{m}^2$ 、 $<10000\text{m}^2$  3 个级别)分为 1000m、500m 和 200m 3 个层次,用统计后二者之和除以绿地面积,比值越大则压力越大,详见下式(4):

$$D_{\text{LR}} = (\text{POP}_{\text{buffer}} + \text{POI}_{\text{buffer}}) \times A^{-1} \quad (4)$$

式中,  $D_{\text{LR}}$  为休闲游憩服务压力指数(无量纲);  $\text{POP}_{\text{buffer}}$  为缓冲区内人口的归一化值;  $\text{POI}_{\text{buffer}}$  为缓冲区内 POI 的归一化值;  $A$  为绿地面积( $\text{m}^2$ )。

### 2.3.7 生态系统服务功能重要性分级

将水源涵养、雨洪调节、热岛调节和土壤保持服务功能值按从高到低的顺序排列,计算累加值。以累加值占功能量总值比例的前 30%、70% 为依据,将生态系统服务功能重要性分为三级,即极重要、重要和一般重要。

海岸带防护重要性方面,使用下式将 HI 指数范围等间距划分为四等份,指数大于第三分割点值的海岸线为极重要海岸线,指数小于第一分割点值的海岸线为一般重要海岸线,中间部分为重要海岸线。

$$HI_k = V_{\min} + k \times (V_{\max} - V_{\min}) / 4 \quad (5)$$

式中,  $HI_k$  为分割点  $k$  ( $1 \leq k \leq 3$ ) 处的指数;  $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$  分别为最小和最大指数,无量纲。为减少极端值对等级划分的影响,  $V_{\min}$ 、 $V_{\max}$  分别取最小 10% 的平均值和最大 10% 的平均值。在划分矢量岸线后,做 100 m 缓冲区对三级海岸带进行空间划定。

休闲游憩服务从两个方面进行重要性判定,首先基于研究区内综合平均压力值进行重要性分级,取压力值小于平均压力值的区域为一般重要,大于平均压力值小于 5 倍平均压力值的区域为重要,大于 5 倍平均压力值的区域为极重要。然后通过统计极重要区域各休闲游憩绿地内不透水地表比例进行再筛选,将大于 50% 的降为重要。

## 2.4 生态敏感性评估

### 2.4.1 水土流失敏感性

水土流失敏感性以前文评估的实际土壤侵蚀量( $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )表征,值越大敏感性越高。

### 2.4.2 海岸带风暴潮敏感性

海岸带风暴潮敏感性以前文评估的海岸带脆弱性指数 EI 值(无量纲)表征,值越大敏感性越高。

### 2.4.3 生态敏感性分级

水土流失敏感性方面,根据土壤侵蚀量大小,结合水利部发布的《土壤侵蚀分类分级标准 SL190—2007》中的南方红壤丘陵区评价标准进行敏感性分级,依次划分为极敏感(极强烈和剧烈  $>80 \text{ t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )、敏感(中度和强烈  $25\text{—}80 \text{ t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )和一般敏感(微度和轻度  $<25 \text{ t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ )三个等级。

海岸带风暴潮敏感性方面,使用下式将 EI 指数范围等间距划分为四等份<sup>[47]</sup>,指数大于第三分割点值的海岸线为极敏感,指数小于第一分割点值的海岸线为一般敏感,中间部分为敏感。

$$EI_k = EI_{\min} + k \times (EI_{\max} - EI_{\min}) / 4 \quad (6)$$

式中,  $EI_k$  为分割点  $k$  ( $1 \leq k \leq 3$ ) 处的指数;  $EI_{\min}$ 、 $EI_{\max}$  分别为最小和最大指数,无量纲。为减少极端值对等级划分的影响,  $EI_{\min}$ 、 $EI_{\max}$  分别取最小 10% 的平均值和最大 10% 的平均值。在划分矢量岸线后,做 100 米缓

缓冲区对三级海岸带进行空间划定。

## 2.5 生态系统调查及生物多样性极重要区

针对澳门的生态环境保育,《澳门环境保护规划 2010—2020》提出了加强动植物保护,维护动物栖息、觅食、繁殖等场所,维持与增加植物多样性,在城市规划和建设中根据各类群组成特点保留或开阔走廊通道的要求。保护生物多样性,开展澳门区域及邻近地区珍稀动植物资源整理及调查工作也被列入《规划》的重点行动计划之一。由于研究区面积较小,具备开展细致深入的生态调查的条件,因此可以更加准确的以保护动植物为主的空间范围确定生物多样性重要区域。基于研究过程中进行的数次详尽全面的生态调查,明确了包括鸟类、哺乳类、两栖类、爬行类、植物、水生生物、昆虫、本地动植物多种生物类别的重要物种栖息地,作为生物多样性极重要区纳入生态保护红线范围。

## 2.6 生态保护区

澳门现有的生态保护区都在离岛,包括路氹城生态保护区一区和二区。一区是位于离岛西部的封闭式管理湿地,二区是位于一区西侧的滨海湿地。对现有生态保护区必须严格进行保护和建设控制,尽量避免所有与生态环境保护和生态建设无关的开发活动,通过直接划入生态保护红线以保护珍贵的自然资源。

## 2.7 城市生态保护红线划定

### 2.7.1 相关因素叠加整合及评价识别区划定

在 ArcGIS 10.2 里将生态系统服务功能极重要区和生态极敏感区评估数据转换为 Shape 格式,与生物多样性极重要区和现有保护区进行空间叠加合并,使用聚合工具将相对聚集或邻近的图斑聚合为相对完整连片图斑<sup>[13]</sup>,形成生态保护红线评价识别区。为避免海岸带防护极重要和风暴潮极敏感岸线缓冲区对其他叠加区的影响,在将二者结合土地属性等因素扣除不适宜区域后再并入评价识别区。

### 2.7.2 其他因素的扣除和增补

在各项评估整合得到的生态保护红线评价识别区基础上,根据城市生态系统的特点,还有一些生态系统调查和评估之外的因素需要纳入考虑,以形成具有可行性和实用性的城市生态保护红线划定结果。考虑到生态保护红线空间的生态完整性和连续性,结合澳门地区实际情况,扣除 1hm<sup>2</sup>以下独立细小斑块(若细小斑块为重要物种栖息地或其他重要生态保护地须予以保留)和受建设开发影响破碎化的绿地。然后通过土地属性核对扣除范围内的私有属性土地,同时根据整体性原则对于范围所包围的小面积(面积小于 2500m<sup>2</sup>)非私有土地上的建筑物予以保留,以避免未来开发改建可能对周边红线区域生态系统造成的不可预估的影响。最后充分结合实地调查情况,按照保护需要和开发利用现状对生态保护红线边界进行调整、补充勾绘。

## 3 结果

### 3.1 重要性和敏感性分级

结果表明(表 2),水源涵养、雨洪调节和热岛调节功能为研究区较为主要的服务功能类型,土壤保持、休闲游憩功能的极重要区和重要区占比都较小,生物多样性极重要区面积最大,海岸带防护功能极重要岸线占 24%,风暴潮极敏感岸线占 20%,水土流失敏感性类型以一般敏感为主。

水源涵养和雨洪调节功能的极重要区都主要分布于半岛的青洲山、松山和妈阁山及离岛的大潭山、小潭山、龙环葡韵湿地、叠石塘山、九澳山等;土壤保持功能的极重要区主要分布于半岛的松山及离岛的大潭山、小潭山、叠石塘山、九澳山等;热岛调节功能的极重要区主要分布于半岛的南湾湖、西湾湖、大水塘及离岛的大潭山、小潭山、叠石塘山等;海岸带防护功能的极重要区主要分布于半岛的南侧岸线及离岛的西侧、北侧和东侧岸线等(图 3)。

休闲游憩功能方面,选取望厦山市政公园、松山市政公园及二龙喉公园、螺丝山公园、大炮台公园、白鸽巢公园、纪念孙中山市政公园、卢廉若公园、加思栏花园(表 3)8 处极重要休闲游憩绿地(图 3)并入红线评价识别区。



表 2 重要性和敏感性评估结果及构成

Table 2 Importance and sensibility assessment results and composition

名称 Names	极重要 Vital / 极敏感 Very sensitive		重要 Important / 敏感 Sensitive	
	面积 Area/km <sup>2</sup>	占本项比 Proportion of this item/%	面积 Area/km <sup>2</sup>	占本项比 Proportion of this item/%
水源涵养 Water conservation	4.11	31.14	3.81	28.86
雨洪调节 Rain and flood regulation	4.51	31.36	2.23	15.51
土壤保持 Soil conservation	1.21	6.19	2.74	14.02
热岛调节 Heat island regulation	3.92	12.62	6.12	19.71
海岸带防护 Coastal protection	1.68	24.00	1.12	16.00
休闲游憩 Leisure and recreation	0.44	7.37	0.10	1.68
生物多样性 Biodiversity	5.99	38.65	—	—
水土流失敏感性 Water and soil erosion sensitivity	0.54	1.99	1.55	5.70
海岸带风暴潮敏感性 Coastal storm surge sensitivity	1.40	20.00	1.75	25.00

表 3 休闲游憩服务功能评估及重要性判定

Table 3 Leisure and recreation service function assessment and importance determination

名称 Names	压力指数 Pressure index	不透水地表比例/% Proportion of impervious surface	重要性 Importance
黑沙环三角公园	18.77	75	重要
卢廉若公园	12.23	44	极重要
大炮台公园	10.68	26	极重要
螺丝山公园	6.22	32	极重要
白鸽巢公园	5.88	28	极重要
望厦山市政公园	4.91	30	极重要
华士古达嘉马花园	4.39	67	重要
祐汉街市公园	3.45	81	重要
黑沙环公园	3.24	52	重要
得胜花园	3.22	51	重要
花城公园	2.88	63	重要
艺园	2.46	55	重要
松山市政公园及二龙喉公园	2.15	29	极重要
纪念孙中山市政公园	1.70	37	极重要
氹仔中央公园	1.65	57	重要
加思栏花园	1.52	48	极重要
何贤公园及宋玉生公园	1.43	—	重要
烧灰炉公园	1.19	—	重要
大水塘滨湖带(水塘公园)	0.75	—	重要
码头花园及纪念碑花园	0.71	—	重要
十字花园	0.52	—	重要
马交石炮台公园	0.51	—	重要
氹仔市政花园	0.39	—	一般重要
小潭山郊野公园	0.18	—	一般重要
大潭山郊野公园	0.04	—	一般重要
石排湾郊野公园	0.04	—	一般重要
黑沙水库郊野公园及周边绿地	<0.01	—	一般重要
路环山顶公园及周边绿地	<0.01	—	一般重要
黑沙海滩公园及黑沙公园	<0.01	—	一般重要
九澳水库郊野公园及周边绿地	<0.01	—	一般重要

不透水地表比例根据澳门地图绘制暨地籍局数码化地图 CDROM\_A 资料统计计算

水土流失极敏感区主要分布于半岛的松山、妈阁山及离岛的大潭山、小潭山、叠石塘山、九澳山等。海岸带风暴潮极敏感区主要分布于半岛的南侧岸线及离岛的北侧岸线等(图 3)。

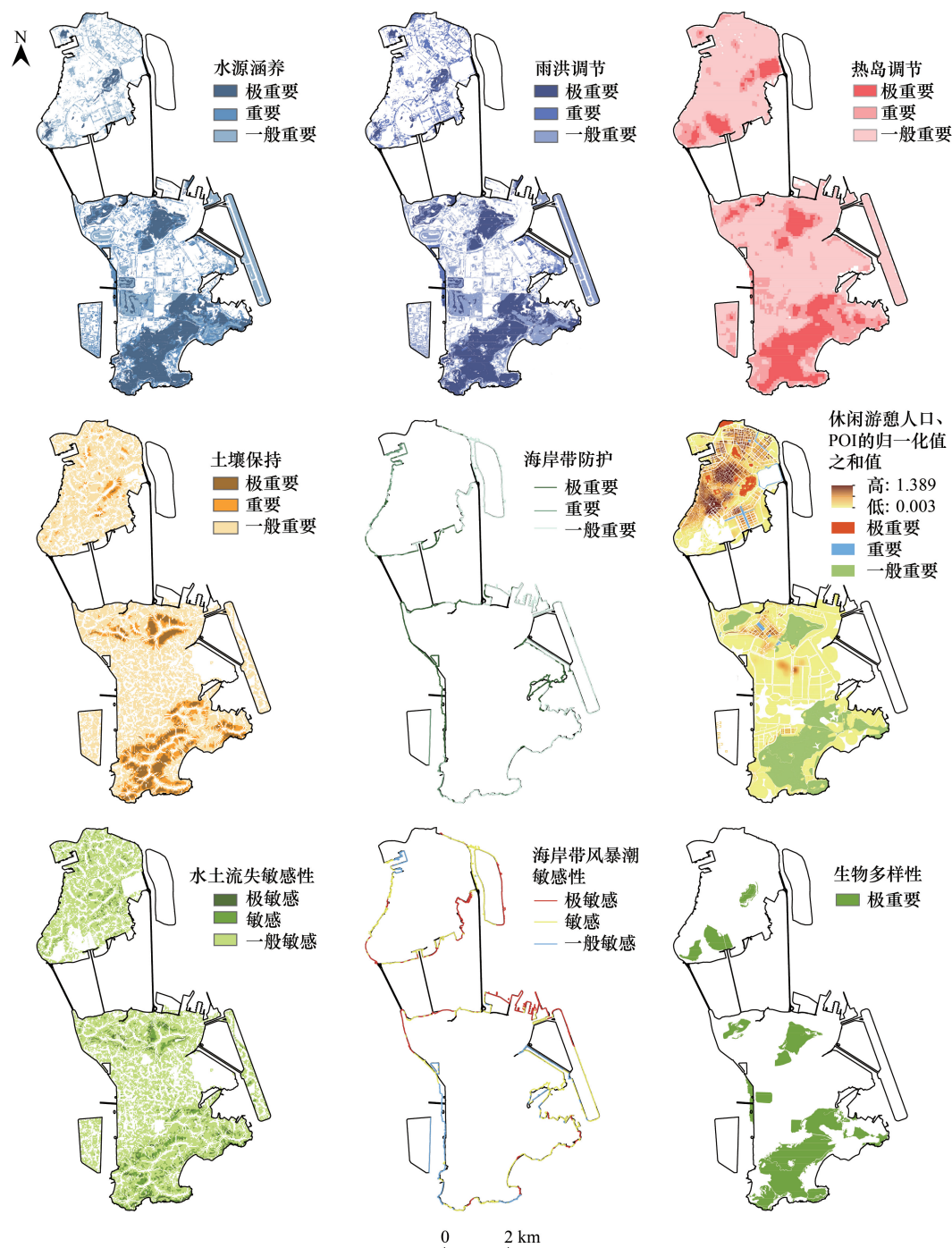


图3 生态系统服务功能、生态敏感性及生物多样性分级结果

Fig.3 Graded results of ecosystem services, ecological sensitivity and biodiversity

生物多样性方面,基于调查和调查结果汇总得到了澳门有特殊保育价值的物种及分布(表4),并由澳门特别行政区政府环境保护局发布<sup>[48]</sup>,将上述物种分布区域划定为极重要区(图3)。

### 3.2 城市生态保护红线划定结果

经叠加合并聚合形成的生态保护红线评价识别区总面积为 8.83km<sup>2</sup>(图4),扣除独立细小斑块和受建设开发影响破碎化的绿地 50.39hm<sup>2</sup>;通过土地属性核对扣除范围内除绿地、公共设施、水塘水库及政府使用属

性外的土地 167.61hm<sup>2</sup>;对于范围内所包含的面积小于 2500m<sup>2</sup>的非私有土地上的建筑物予以保留,对大水塘(L10)和澳门大学横琴校区水体(L25)进行补充,补充被扣除的马场北大马路北侧地块(L3)、螺丝山公园(L5)和加思栏花园(L15),最终确定了澳门城市生态保护红线划定范围。

表 4 生物多样性极重要区及物种类型  
Table 4 Vital areas and species types of biodiversity

名称 Names	物种类型 Types of species
松山	重要植物、鸟类、昆虫、哺乳类(含蝙蝠等)
南湾湖	水生生物(鱼类、浮游动物、浮游植物、底栖动物)
西湾湖	水生生物(鱼类、浮游动物、浮游植物、底栖动物)
小潭山	重要植物、哺乳类(含蝙蝠等)
大潭山	重要植物、鸟类、哺乳类(含蝙蝠等)、两栖及爬行类、昆虫、水生生物
龙环葡韵湿地	昆虫、两栖及爬行类、水生生物(鱼类、浮游动物、浮游植物、底栖动物)
路氹城生态保护区一区	鸟类、两栖及爬行类、昆虫、水生生物(鱼类、浮游动物、浮游植物、底栖动物)
路氹城生态保护区二区	鸟类
石排湾	水生生物(鱼类、浮游动物、浮游植物、底栖动物)
路环山	重要植物、鸟类、两栖及爬行类、哺乳类(含蝙蝠等)、昆虫、水生生物(鱼类、浮游动物、浮游植物、底栖动物)

澳门城市生态保护红线最终划定面积 6.71km<sup>2</sup>(路氹城生态保护区二区不列入计算),占研究区面积的 19.79%,共计 25 个地块(L1—L25)和 7 条海岸带(S1—S7)。集中分布在半岛的松山、妈阁山、青洲山、望厦山、南湾湖、西湾湖、大水塘等,离岛的大潭山、小潭山、龙环葡韵湿地、路氹城生态保护区、叠石塘山、九澳山等(图 4)。

通过生态保护红线的划定,覆盖了研究区 44%的生态空间以及 12.4%的海岸线,涵盖了研究区所有的重要物种栖息地及三分之一(240 棵)的古树名木,依照此红线实施相应的保护措施,将对澳门的生态系统保护起到明显的积极作用,为建设“天更蓝、山更绿、水更清、环境更优美”的澳门提供有效保障和实施路径。生态保护红线一经划定要严格进行保护,防止城市发展带来的侵占和影响。基于澳门的实际情况,生态保护红线内包含了一些已建设内容,因此在红线管理上要体现差异化(表 5),力求实现城市建设与生态保护协同推进。

表 5 生态保护红线管理策略  
Table 5 Ecological conservation redline management strategies

地块编号 Plot number	土地属性 Land property	主导因素 Leading factors	管理策略 Management strategies
L1、L3、L8、L16、L19、L20、L21、L23	绿地	水源涵养、雨洪调节、生物多样性、土壤保持、水土流失敏感性	严格控制和保护区域内的生态空间,禁止开发和占用,对已有建设和规划建设内容进行再评估
L2、L5、L6、L7、L15、L17	公共设施	休闲游憩、热岛调节	主要为市政公园或社区公园,允许包含少量配套建筑、道路等,地块内绿地率需达到 65%—75% <sup>[49]</sup>
L10、L11、L12、L22	水塘与水库	热岛调节、生物多样性	维护现有水体规模和质量,严格控制水体周边的开发建设,同时控制滨水绿道的不透水地表占比
L4、L9、L13、L14、L18、L24、L25	含机关和教育用地	水源涵养、雨洪调节、生物多样性、土壤保持、水土流失敏感性	在控制生态空间规模不减少的基础上,合理协调相关公共职能地块的使用规模,纳入近远期使用规划
S1—S7	海岸带	海岸带防护、海岸带风暴潮敏感性	保护现有自然岸线,增加植被占比,修复脆弱岸线,提升海岸带韧性和弹性

S: 海岸 Seacoast; L: 陆地 Land

4 讨论

4.1 城市生态保护红线划定方法及其与区域生态保护红线划定的差异

研究关注于全部城市化地区的城市生态保护红线划定和管理,与常规的区域尺度生态保护红线划定体系

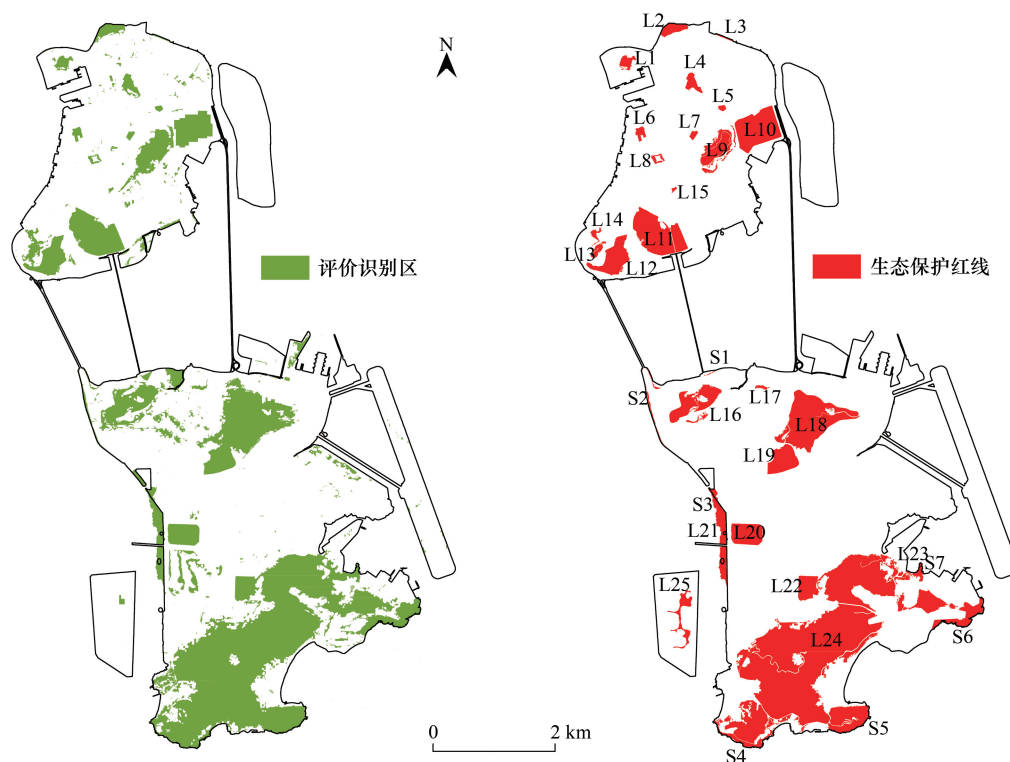


图4 生态保护红线评价识别区及红线划定结果

Fig.4 Results of ecological conservation redline evaluation and identification area, ecological conservation redline

S: 海岸 Seacoast; L: 陆地 Land

有着一定的差异,是针对特定背景和特征城市地区生态保护红线划定的一种探索和尝试。和区域生态保护红线划定相比,本方法基于城市生态系统的特点,在评估对象(生态系统服务种类)、数据精度、评估和划定方法上都进行了调整优化。首先,由城市生态环境特征、自然资源、发展情况等城市基本情况出发,选择具有针对性的评估指标,增加了文化服务(休闲游憩)和调节服务(热岛调节)方面的考量,并将它们作为形成评价识别区的叠加因素,对红线划定具有决定性作用。其次,评估方法的选择和使用在现有相关红线划定体系基础上,结合城市特征和评估尺度进行了适宜性的调整,包括使用评估数据的类型和精度、参数的确定及特定评估方法的构建等。鉴于城市内部土地的复杂性和多元化,有必要通过对不同分级划定比例的比较分析,选择较合适的比例以提升划定范围的合理性和可行性。在本研究中,由于海岸带(狭窄)、生物多样性(与几项生态系统服务功能高度重叠,并部分处于政府部门管理的现有保护区内)和休闲游憩(主要由人口分布和城市自身特征决定)的改变对本研究划定的红线格局影响不大,故选取水源涵养、雨洪调节、土壤保持和热岛调节四项影响较大的服务功能,比较了3种累加功能值占比(20%、30%和50%)划分极重要区的不同模式(表6)。

研究可见,20%比例的划定情景在重要生态空间上缺失较多,识别区仅占研究区的10.41%;30%比例情景则包含了大部分的重要生态空间,且空间整体性较强,识别区占研究区的20.60%;50%比例情景包含了更多的生态空间,识别区占研究区的37.76%,但很多不成规模的斑块也被划入,如行道树、广场绿植等。非绿地属性土地占比方面,20%和30%比例情景相差不大,而50%比例情景则明显纳入了过多的其他属性土地,不利于保护和管理的实施。综上可见,选择30%的比例进行红线划定,可以对城市的保护和发展起到较好的均衡作用。

在对评价识别区进行校核和调整的过程中,结合了土地属性、权属进行增减,为其他相似土地体制城市的规划和管理,以及生态系统保护和修复也提供了重要借鉴。在划定结果上,与已有高度城市化地区(北京<sup>[29]</sup>、



上海<sup>[30]</sup>)相比,澳门的城市生态保护红线更多的融入了城市内部生态空间,受到社会、经济因素更显著的影响,通过明确现有需要保护的空间范围,可以为城市的发展和建设提供更细致的决策依据。由于红线划定的过程涉及到多方因素和利益,在最后结合实地调查调整、补充时需要进行统筹和权衡,在划定过程和结果体现上可能存在一定的主观性。

表 6 不同划定比例情景之间的比较

Table 6 Comparison among different scaled scenarios

名称 Names	20%	30%	50%
水源涵养 Water conservation/km <sup>2</sup>	2.69	4.11	7.21
雨洪调节 Rain and flood regulation /km <sup>2</sup>	2.91	4.51	7.99
土壤保持 Soil conservation/km <sup>2</sup>	0.68	1.21	2.49
热岛调节 Heat island regulation /km <sup>2</sup>	2.57	3.92	6.98
四种服务叠加后识别区面积 Area of identification area after the four services are superimposed/km <sup>2</sup>	3.53	6.80	12.80
识别区占研究区比例 Proportion of identification area to study area/%	10.41	20.60	37.76
识别区非绿地属性土地面积 Area of non-green land in the identification area/km <sup>2</sup>	0.87	1.71	5.43
非绿地属性土地占识别区比例 Proportion of non-green land to identification area/%	24.65	25.15	42.42

## 4.2 基于生态保护红线的澳门城市生态系统管理建议

### (1) 统筹管理城市生态系统

城市生态系统是更大尺度区域生态系统的一部分,具有开放性。作为城市生态空间管理的一部分,在城市生态保护红线的划定工作中,还应当考虑城市生态空间与城市所在区域生态系统之间的耦合关系<sup>[5]</sup>。本研究以澳门陆域生态系统为研究对象,澳门与珠海在陆地上于关闸(珠海拱北口岸)附近和澳门大学横琴校区接壤,其生态系统与周边区域存在关联并互相影响。但同时由于出入境管控,在澳门北部关闸东至鸭涌河段的接壤区域及澳门大学横琴校区外围都设置有长段围栏和口岸通道相关建筑物、构筑物的物理隔离,在地表对研究区边界内外生态系统的物质、能量和信息流会起到较强的阻隔作用。半岛内港段及路氹航道段则会面临同样海岸带风险,也应考虑同步预防。

### (2) 城市土地使用管理

由于是在城市内部划定生态保护红线,红线范围内涉及了多种土地属性,其中包含 77.13%的绿地、17.04%的水塘与水库、4.66%的公共设施用地、1.01%的机关用地和 0.16%的教育用地。在划定的过程中既要考虑现有土地建设情况和属性,在后续差异化管理基础上也要考虑红线内各土地属性的变更或规模增减。

参考我国生态红线、湿地红线等相关管理办法<sup>[50]</sup>,按照“面积不缩小、性质不改变、功能不退化,服务不减少”的原则,严格遵循占补生态系统的替代性与同质性,落实占补机制,开发建设占用占补平衡条件限制建设区的,建设机构和个人必须履行补充生态保护红线内生态系统义务,特别是涉及少量机关用地、教育用地的区域。在确保生态保护红线占补平衡的基础上,进行差别化保护与管理,开展土地赎买置换以及建立政策与法律保障体系。

### (3) 纳入城市和景观规划

城市生态保护红线的划定对城市和景观规划设计也有着重要的参考和指导意义。澳门城市发展对生态空间的压迫和侵占一直存在,如受人为干扰较多的松山、望厦山、大潭山和小潭山以及受干扰相对较少的青洲山、叠石塘山和九澳山等原有自然资源,几十年间都有了不同程度的缩减。通过生态保护红线的划定,可以严格控制城市规划的底线,确保整体生态空间比例不降低。在存量更新背景下,还需要尽可能的将未划入生态保护红线的剩余空间<sup>[51]</sup>转换为多种形式的“微绿地”,构建微绿体系,实现生态效益最大化<sup>[28]</sup>;见缝插针式的

渐进生态修复,优化更新城市绿色基础设施<sup>[52]</sup>,恢复历史生态资源与格局,提升打造微生态功能区;在保持现有生态空间的基础上,扩展、延伸与连通绿色网络;也可以将低效的工业用地转化为绿地或水系生态空间,最大限度的扩大生态空间占比。在填海造地土地开发利用时,要控制新增土地的不透水地表比例,可以参考现有填海区的景观格局指数进行土地利用空间布局和各类型比例控制,确保新填海区域的生态空间占比和景观连通性都不低于澳门现有指标;还要合理利用岸线资源,提倡以功能湿地模式连接和修复生态岸线<sup>[27]</sup>,提升植被占比以增加海岸带的弹性和韧性,构建和优化滨海生态屏障。

#### 参考文献 (References):

- [1] 马世骏,王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. 生态学报, 1984, 4(1): 1-9.
- [2] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 1999, 29(2): 293-301.
- [3] 欧阳志云, 李小马, 徐卫华, 李煜珊, 郑华, 王效科. 北京市生态用地规划与管理对策. 生态学报, 2015, 35(11): 3778-3787.
- [4] 王甫园, 王开泳, 陈田, 李萍. 城市生态空间研究进展与展望. 地理科学进展, 2017, 36(2): 207-218.
- [5] 王如松, 李锋, 韩宝龙, 黄和平, 尹科. 城市复合生态及生态空间管理. 生态学报, 2014, 34(1): 1-11.
- [6] 徐卫华, 孔令桥, 欧阳志云, 詹勇华. 生态保护红线划定流程——以浙江省开化县为例. 环境保护, 2017, 45(23): 47-49.
- [7] 郑华, 欧阳志云. 生态红线的实践与思考. 中国科学院院刊, 2014, 29(4): 457-461, 448-448.
- [8] 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 江叶枫, 赖夏华. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的自然生态空间管制分区研究. 生态学报, 2020, 40(3): 1065-1076.
- [9] 熊善高, 秦昌波, 于雷, 路路, 关杨, 万军, 李新. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的生态空间划定研究——以南宁市为例. 生态学报, 2018, 38(22): 7899-7911.
- [10] Bryan B A, Ye Y Q, Zhang J E, Connor J D. Land-use change impacts on ecosystem services value: incorporating the scarcity effects of supply and demand dynamics. *Ecosystem Services*, 2018, 32: 144-157.
- [11] 彭建, 李慧蕾, 刘焱序, 胡熠娜, 杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710.
- [12] 毛齐正, 黄甘霖, 邬建国. 城市生态系统服务研究综述. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1023-1033.
- [13] 环境保护部, 国家发展和改革委员会. 生态保护红线划定指南. 北京: 环境保护部, 国家发展和改革委员会, 2017.
- [14] 张雪飞, 王传胜, 李萌. 国土空间规划中生态空间和生态保护红线的划定. 地理研究, 2019, 38(10): 2430-2446.
- [15] 孔令桥, 王雅晴, 郑华, 肖焱, 徐卫华, 张路, 肖洋, 欧阳志云. 流域生态空间与生态保护红线规划方法——以长江流域为例. 生态学报, 2019, 39(3): 835-843.
- [16] 李永格, 李宗省, 冯起, 卫伟, 杨静, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟. 基于生态红线划定的祁连山生态保护性开发研究. 生态学报, 2019, 39(7): 2343-2352.
- [17] 梁鑫源, 金晓斌, 朱凤武, 何杰, 张晓琳, 张孟真, 樊应凭, 胡静, 周寅康. 长江中下游平原区生态保护红线的划定——以江苏省为例. 生态学报, 2020, 40(17): 5968-5979.
- [18] 王如松, 欧阳志云. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 337-345.
- [19] 罗巧灵, 张明, 詹庆明. 城市基本生态控制区的内涵、研究进展及展望. 中国园林, 2016, (11): 76-81.
- [20] De Groot R S, Alkemade R, Braat L, Hein L, Willemen L. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 260-272.
- [21] 孟楠, 韩宝龙, 王海洋, 逯非, 许超, 欧阳志云. 澳门城市生态系统格局变化研究. 生态学报, 2018, 38(18): 6442-6451.
- [22] 澳门特别行政区政府. 统计年鉴-2017. 澳门: 统计暨普查局, 2018.
- [23] 李昕儒. 基于新加坡城市规划理念的澳门未来发展策略研究. 中外建筑, 2019, (6): 72-74.
- [24] 洪鸿加. 澳门特别行政区生态环境敏感性分析研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2011.
- [25] 米金套. 澳门城市景观格局变化与热岛效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [26] 杨骏, 陈志刚, 查方勇. 填海造地对澳门旅游环境的影响评价——基于 HRP 分析法. 湖州师范学院学报, 2013, 35(6): 75-81, 89-89.
- [27] 张金铺. 功能湿地理论在澳门居住区可持续发展研究中的运用. 中外建筑, 2019, (1): 39-42.
- [28] 肖希, 李敏. 绿斑密度: 高密度城市绿地规划布局适用指标研究——以澳门半岛为例. 中国园林, 2017, 33(7): 97-102.
- [29] 崔亚君, 杨伯钢, 陈品祥, 刘博文, 王森, 张译, 谢燕峰. 国土空间规划视角的北京市生态保护红线建设. 测绘科学, 2021, 46(1): 184-188, 202-202.
- [30] 金岚. 生态空间分类管控视角下上海市生态保护红线划定方法研究. 上海国土资源, 2020, 41(2): 7-12.
- [31] Xie S L, Ouyang Z Y, Gong C, Meng N, Lu F. Seasonal fluctuations of urban birds and their responses to immigration: an example from Macau,

- China. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 59: 126936.
- [32] 于洋, 卢然超, 李迎霞. 澳门水资源现状与展望. 给水排水, 2014, 40(2): 30-33.
- [33] 澳门统计暨普查局. 2017 年澳门环境统计. [2021-04-08]. [https://www.dsec.gov.mo/getAttachment/982f10a0-7ead-454d-a04d-ce3019a62267/C\\_AMB\\_PUB\\_2017\\_Y.aspx](https://www.dsec.gov.mo/getAttachment/982f10a0-7ead-454d-a04d-ce3019a62267/C_AMB_PUB_2017_Y.aspx)
- [34] 彭少麟, 陆宏芳, 梁冠峰. 澳门离岛植被生态恢复与重建及其效益. 生态环境, 2004, 13(3): 301-305.
- [35] 梁敏如. 澳门城市绿地与园林植物研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [36] 赵阳, 余新晓, 郑江坤, 武巧英. 气候和土地利用变化对潮白河流域径流变化的定量影响. 农业工程学报, 2012, 28(22): 252-260.
- [37] 刘阳, 费迎庆. 滨水城市内涝对策研究——以澳门内港为例. 福建建筑, 2016, (5): 106-110.
- [38] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, McCool D K, Yoder D C. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington: US Government Printing Office, 1997: 703-703.
- [39] Natural Capital Project. InVEST documentation. [2021-04-08]. [https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/coastal\\_vulnerability.html](https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/coastal_vulnerability.html).
- [40] 陶芹, 陶宇, 欧维新. 长三角地区休闲游憩服务供需关系研究. 生态学报, 2021, 41(5): 1777-1785.
- [41] Yao Y, Liu X P, Li X, Zhang J B, Liang Z T, Mai K, Zhang Y T. Mapping fine-scale population distributions at the building level by integrating multisource geospatial big data. International Journal of Geographical Information Science, 2017, 31(6): 1220-1244.
- [42] 董南, 杨小唤, 蔡红艳. 基于居住空间属性的人口数据空间化方法研究. 地理科学进展, 2016, 35(11): 1317-1328.
- [43] 澳门统计暨普查局. 2016 中期人口统计详细结果. [2021-04-08]. [https://www.dsec.gov.mo/getAttachment/b9eb6f4f-f164-4ff5-b55e-c0e4fbda9511/C\\_ICEN\\_PUB\\_2016\\_Y.aspx](https://www.dsec.gov.mo/getAttachment/b9eb6f4f-f164-4ff5-b55e-c0e4fbda9511/C_ICEN_PUB_2016_Y.aspx).
- [44] 路姜男, 唐金楠. 类型化视角下对学生事务发展的思考——澳门大学住宿书院模式的启示. 北京教育: 高教版, 2016, (4): 77-80.
- [45] Song J C, Lin T, Li X H, Prishchepov A V. Mapping urban functional zones by integrating very high spatial resolution remote sensing imagery and points of interest; a case study of Xiamen, China. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1737.
- [46] 澳门市政署. 澳门自然网休闲设施列表. [2021-04-08]. <https://nature.iam.gov.mo/c/park/list>.
- [47] Arkema K K, Guannel G, Verutes G, Wood S A, Guerry A, Ruckelshaus M, Kareiva P, Lacayo M, Silver J M. Coastal habitats shield people and property from sea-level rise and storms. Nature Climate Change, 2013, 3(10): 913-918.
- [48] 澳门环境保护局. 澳门生态环境调查. [2021-04-08]. [https://www.dspa.gov.mo/PDF/20200601\\_DPAA\\_PAEM\\_tc.pdf](https://www.dspa.gov.mo/PDF/20200601_DPAA_PAEM_tc.pdf).
- [49] 李敏, 童匀曦, 李济泰. 国标编制相关的城市公园绿地主要规划指标研究. 中国园林, 2020, 36(2): 6-10.
- [50] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委等 9 部委印发《关于加强资源环境生态红线管控的指导意见》的通知. [2021-04-08]. [http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/02/content\\_5079112.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2016-06/02/content_5079112.htm).
- [51] 余美萱, 叶昌东, 李敏. 澳门城市“剩余空间”开发利用途径. 山西建筑, 2015, 41(20): 197-199.
- [52] 许超, 孟楠, 逯非, 刘晓明, 欧阳志云. 生态系统服务需求视角下的澳门城市绿色基础设施管理研究. 中国园林, 2020, 36(9): 104-109.