

DOI: 10.5846/stxb202012283297

梁晨, 曾坚, 沈中健, 王倩雯. 快速城市化生态系统服务格局分析与空间管控——以厦门市为例. 生态学报, 2021, 41(11): 4379-4392.

Liang C, Zeng J, Shen Z J, Wang Q W. Spatial pattern analysis and management of urban ecosystem services under rapid urbanization: A case study of Xiamen. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4379-4392.

快速城市化生态系统服务格局分析与空间管控 ——以厦门市为例

梁 晨¹, 曾 坚^{1,2,*}, 沈中健¹, 王倩雯¹

¹ 天津大学建筑学院, 天津 300072

² 中国城市科学学会韧性城市专业委员会, 北京 100835

摘要:快速城市化对生态系统服务产生消极影响, 科学识别二者的空间规律并进行管控对国土空间资源可持续开发意义重大。基于土地利用、遥感影像、POI 等多源数据, 借助 ArcGIS、InVEST 平台分析厦门市六类生态系统服务的空间分布及权衡协同格局, 并引入人工神经网络算法与土地利用程度指数模型定量识别城市化空间格局, 通过决策矩阵提出空间管控策略。结果表明: ①厦门生态系统服务分布在“陆-海”方向上分异显著, 岛外地区综合生态系统服务指数总量占全域的 91.78%, 其中同安区的总量和均值都处于首位; ②生态系统服务之间以协同作用为主, 在全局关系中生境质量与雨涝调蓄以及与温度调节的协同水平最高, 在局部空间关系中水源涵养与雨涝调蓄的协同水平最高, 休闲游憩服务与其他服务的权衡效应最强; ③翔安区开发潜力最大, 同安区过度城市化问题突出, 市域未开发单元中生境质量、水源涵养和雨涝调蓄服务较强, 建成单元仅在休闲游憩服务具有优势; ④叠加空间细分单元的城市化与生态系统服务特征, 得到厦门市生态管控分区和决策矩阵, 提出四类单元八种情景的具体管控策略。

关键词:快速城市化; 生态系统服务; 权衡协同; 空间管控; 厦门

Spatial pattern analysis and management of urban ecosystem services under rapid urbanization: A case study of Xiamen

LIANG Chen¹, ZENG Jian^{1,2,*}, SHEN Zhongjian¹, WANG Qianwen¹

¹ Architecture School, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² Resilient City Council, Chinese Society for Urban Studies, Beijing 100835, China

Abstract: Rapid urbanization induces negative impact on ecosystem services (ESs). Scientific identification of the spatial distribution and management of ESs is of great significance to sustainable development of land and resource. Currently, the lack of research on meso and micro scale limits further cognition of ESs. Additionally, homogeneous urbanization was generally taken as the premise to analyze the evolution characteristics of ESs by former research, which cannot meet the needs of fine land management. Based on land use, remote sensing, point of interest and other data, this paper analyzed the spatial distribution and trade-off/synergy relationship of six ESs in Xiamen, using ArcGIS and InVEST platform. Moreover, artificial neural network algorithm and land development assessing model were introduced to quantitatively identify the spatial pattern of urbanization. Finally, spatial management strategies were proposed through decision matrix. The results showed that (1) the distribution of ESs in Xiamen was significantly different on the land-sea direction. The four off-island districts of Xiamen contributed to 91.78% of the comprehensive ecosystem service (CES) in the study region. The total

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划(2016YFC0502903); 国家自然科学基金项目(52078330)

收稿日期: 2020-12-28; 修订日期: 2021-05-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 13602058416@vip.163.com

amount and average level of CES in Tong'an District were both the highest. (2) There were mainly synergistic effects between the ESs in Xiamen. From the perspective of overall relationship, habitat quality and runoff mitigation, habitat quality and temperature mitigation both showed high synergy. From the perspective of local spatial relationship, the synergy level of water conservation and flood regulation was the highest, while the trade-off effects between recreation service and other ESs were very significant. (3) Through identification of urbanization characteristics, Xiang'an District showed highest developing potential, and Tong'an District showed high level of over-urbanization. After spatial subdivision and classification, it was found that the service levels of habitat quality, water conservation and runoff mitigation were higher in the non-development units, and the built-up units only got an advantage on recreation service level. (4) Integrating spatial characteristics of urbanization and ESs distribution, the ecological control zoning map of Xiamen was put forward, based on the spatial subdivision units. Furthermore, the specific management strategies of four types of units in eight scenarios were proposed through the decision matrix. Sustainable development is to find a balance between ecological protection and economic development, so as to maximize the comprehensive benefits. Through the identification of the complex spatial relationship between ESs and the interaction between CES and urbanization process, this paper provides quantitative decision support for the fine management and control of urban ecological space.

Key Words: rapid urbanization; ecosystem service; trade-offs and synergies; spatial management; Xiamen

生态系统服务形成并维持人类赖以生存的环境条件与效用,是连接自然生态系统和人类社会经济系统的纽带^[1]。由于城市化在多尺度驱动环境变化,改变地表景观结构、生态过程以及生态功能^[2],导致区域生态系统服务受到重要影响^[3],其衰退与变异现象引起广泛关注。不同生态系统服务在动态演变中具有相互干预机制^[4-5],呈现了差异化的空间分布与权衡协同关系,进而形成复杂的格局并直接影响人居环境质量。生态系统服务级联效应(Ecosystem services cascade, ESC)强调了从景观结构过程到人类惠益的多尺度链式结构^[6]。然而,当前大量研究从国家、省域、流域等宏观尺度探讨了生态系统服务的空间分异和权衡协同关系^[7-9],中微观尺度研究的匮乏限制了对生态系统服务进一步认知。此外,已有研究指出,城镇化过程的人工干预并不是生态系统服务退化的必要条件^[10],因此需要进一步剖析二者关联并探究引导管控方法。然而,城市化与生态环境之间呈现复杂的非线性交互关系,同时具有显著的阶段性和空间差异性^[11],现有研究多以均质城市化为假设前提分析生态系统服务的演变规律,该范式一定程度上促进了生态规划实践中广泛运用的宏观分区管控思路的形成^[12-13]。需要指出在目前国土空间规划精细化管理的语境下,现有技术成果表现出空间细分度不够、决策缺乏依据两点不足,造成生态系统服务研究的应用程度不高。因此,引入城市化空间的细分识别可以为深度揭示二者的交互作用规律和科学管控提供支撑。

综上所述,本文聚焦于中微观尺度上典型的快速城市化地区,以厦门市为研究对象,基于有关模型计算生态环境质量、土壤保持、水源涵养、温度调节、雨涝调蓄和游憩休闲六类生态系统服务,旨在探究各类生态系统服务的空间分布与权衡协同特征,并进一步揭示异质性城市化格局中生态系统服务构成规律,基于空间细分的方法提出市域生态分区管控方案与决策模式。研究结果对我国新时期国土生态空间的精细化管理有指导作用。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

厦门市位于福建省东南部,是闽三角地区中心城市,地处 117°53'—118°26' E, 24°23'—24°54' N 之间,属于亚热带海洋性季风气候。全市由厦门岛等岛屿与陆域两部分组成,包括 6 个行政辖区,陆地面积 1699.39 km²,海域面积约 390 km²(图 1)。由于区位优势突出,厦门成为区域重要经济与交通枢纽,自改革开放以来经历了快速城市化过程,从岛内东南一隅逐步扩展到陆域,其建设用地在 1980—2018 年从 142.84 km²增加到 477.85 km²。城市化在促进厦门人口集聚与经济效益的同时侵占大量生态资源,导致生态系统服务的快速衰

退^[14],人地系统矛盾突出,具有研究的代表性。

1.2 数据来源

研究采用的数据包括土地利用、DEM、遥感影像、夜间灯光、净初级生产力、气象、人口空间分布、地理要素和兴趣点(POI)数据,具体情况见下表(表1)。

2 研究方法

本文的研究框架包括三个层次(图2):在生态系统服务选择和计算的基础上;分别从空间分布特征、权衡协同格局两方面分析生态系统服务的格局特征,进而通过城市化过程的空间细分识别探究生态系统服务的空间构成规律;最终在细分单元水平上综合生态系统服务水平 and 城市化阶段提出生态空间管控策略。

2.1 空间细分网格尺度选择

空间异质性是生态系统的普遍特征^[15],为了在生态系统服务与城市化过程耦合分析中实现精准匹配,引入空间网格作为辅助。网格分析在生态学、地理学等领域应用广泛,通过设定适宜的网格尺寸可以实现精细化的空间特征分析,并为管控提供明确指向。网格尺度的选择决定对下垫面信息的提取程度,因此香农多样性指数(SHDI)可以作为信息采样的衡量指标。为了避免依赖经验判断导致的网格尺度选择误差,本文基于500—1500 m的范围以100 m为步长,通过Fragstats 4.2.1分别计算厦门土地利用的SHDI。通过对计算结果比较,选择采样SHDI平均值显著提高(信息提取充分)以及网格尺寸最小(提高分析精度)的1000 m作为网格分析尺度,借助ArcGIS 10.2生成采样网格,并通过其分区均值统计工具批量化提取栅格信息。

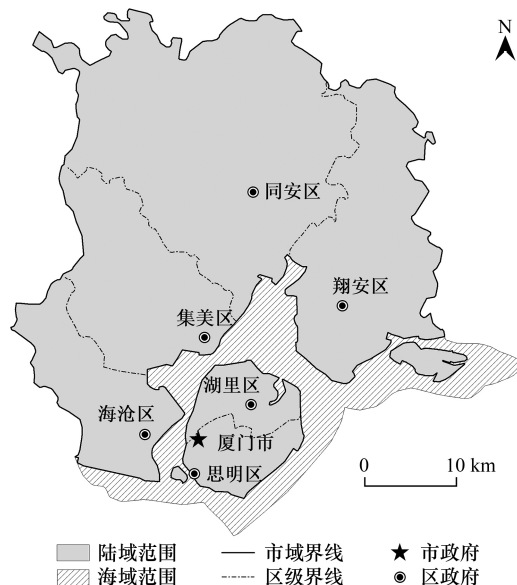


图1 研究区域
Fig.1 Study area

表1 研究数据来源

Table 1 Data source of this research

序号 Code	名称 Name	精度 Resolution	来源 Source
1	土地利用数据(2018)	30 m	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
2	DEM 数据	30 m	地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn)
3	Landsat 8 OLI/TIRS (2017-8-15)	30 m	
4	NPP-VIIRS DNB (2018)	约 500 m	美国国家海洋和大气管理局 (https://www.ngdc.noaa.gov)
5	NPP 初级净生产力数据	1000 m	全球变化科学研究数据出版系统 (http://www.geodoi.ac.cn)
6	土壤质地数据	1:100 万	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
7	地理矢量要素数据	—	国家基础地理信息中心 (http://www.ngcc.cn)
8	兴趣点(POI)数据	—	高德开放平台 (https://lbs.amap.com)

2.2 生态系统服务评估与分析方法

2.2.1 单一生态系统服务评估

参考前人研究^[14,16-17]并结合厦门市域实际情况,从6个方面展开生态系统服务评估,其中考虑了日益突出的极端气候影响^[18-19],通过温度调节与雨涝调蓄测度其气候调节水平。

(1) 生境质量

InVEST 模型中的生境质量模块通过自然栖息地受到的人工干扰程度计算生境质量水平,基于 InVEST 3.8.6 平台,将林地、草地、水域、湿地定义为生境^[20],其他用地定义为非生境,同时将城镇建设用地、农

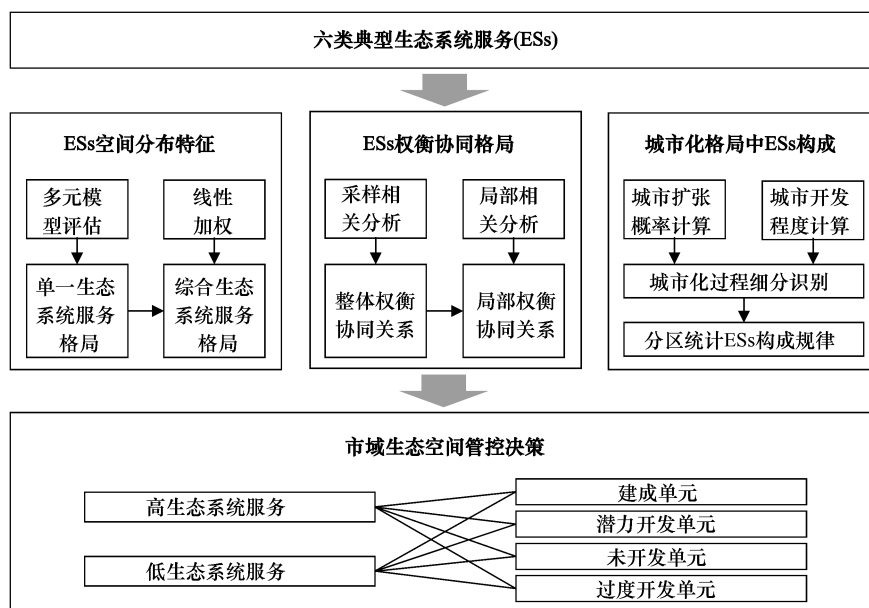


图2 研究技术框架

Fig.2 The framework of this study

ESs: 生态系统服务 Ecosystem services

村居民点、公路和铁路定义为生境胁迫要素,生态保护区以厦门现行总体规划为准,根据模型手册确定模型的各项参数。计算公式如下

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (1)$$

式中, Q_{xj} 为地类 j 中栅格 x 的生境质量指数; H_j 为地类 j 的生境适宜度; D_{xj} 为地类 j 中栅格 x 的生境退化度; k 为半饱和常数,即退化度最大值的一半; z 为模型默认参数。

(2) 土壤保持

通过土壤侵蚀模型衡量土壤保持服务的水平,为了克服 USLE 模型在地形方面的局限^[21],引入修正的通用土壤流失方程 RUSLE 模型。计算公式如下:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (2)$$

式中, A 为土壤侵蚀指数 ($\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$); R 为降雨侵蚀力因子 ($\text{MJ mm hm}^{-2} \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子 ($\text{t h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$); L 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖和管理因子; P 为水土保持措施因子。上述各个指标计算参考了前人有关方法^[21-23]。

(3) 水源涵养

水源涵养服务表现为植被截留降水、增强土壤下渗、抑制蒸发、缓和地表径流和增加降水等功能。本文以生态系统水源涵养服务能力指数^[24]作为水源涵养功能评价指标,计算公式如下:

$$WR = NPP_{\text{mean}} \cdot F_{\text{sic}} \cdot F_{\text{pre}} \cdot (1 - F_{\text{sio}}) \quad (3)$$

式中, WR 为生态系统水源涵养服务能力指数; NPP_{mean} 为年均生态系统净初级生产力; F_{sic} 为土壤渗流能力因子,根据砂土、壤土、黏土渗流能力的强弱分别赋值 1、0.67、0.33; F_{pre} 为多年平均降水量, F_{sio} 为坡度值,两者均做离差标准化处理。

(4) 温度调节

城市热环境的升温和热岛现象加剧,很大程度上是由于地表覆被的改变,有研究表明自然生态系统通过植被水体可显著调节温度^[18]。通过反演地表温度 (Land surface temperature, LST) 衡量生态系统的温度调节

效能。基于遥感数据的劈窗算法、单窗算法和 IB 算法成为目前被广泛应用,其中单窗算法具有模型简易、计算效率高、所需参数较少的优点。LST 反演计算借鉴了 Estoque 等^[25]的方法,基于 8 月份少云的 Landsat 8 OLI/TIRS 影像进行辐射亮温计算,其中地表比辐射率的计算参照了高静等^[26]的计算过程。

(5) 雨涝调蓄

快速城市化伴随的土地利用变化改变了自然景观结构和水文过程,导致城市暴雨内涝问题日趋严重。通过对暴雨情景下的地表径流进行计算模拟,评估现状生态系统对雨水径流的消纳调蓄功能。主要使用 SCS-CN(Soil Conservation Service-Curve Number)模型实现,该模型是美国农业部水土保持局于 1954 年基于 150 多个小流域实测数据统计开发得出的,能够有效揭示不同土地利用类型对径流的影响^[19]。根据厦门市海绵城市专项规划,选取 50 a 一遇暴雨情景进行分析,设计降雨量 222.91 mm,具体计算过程参照 Walega 等^[27]的方法。其中,CN 值是一个无量纲参数,是综合反应土壤类型、土地利用现状、土壤前期湿度的指标,考虑厦门地形的影响,通过坡度因子对其进行修正^[28]以提高计算精度。

(6) 休闲游憩

生态空间的覆盖度决定了其可达性水平,是评价其提供休闲游憩绩效的重要指标^[29],以高德开放平台地图分类编码中类的风景名胜与公园广场筛选 POI 数据。通过 ArcGIS 10.2 的 Kernel density 工具针对厦门市公园绿地的 POI 数据进行密度计算。

2.2.2 综合生态系统服务评估

目前在综合指标聚合中性线性加权法的应用最广泛,由该方法计算生态系统服务的综合水平,通过 Delphi 法确定 6 类生态系统服务的权重(表 2)。

表 2 厦门市 6 类生态系统服务权重与指标性质

Table 2 Weights and attributes of six ESs of Xiamen

指标名称 Indicator name	生境质量 Habitat quality	土壤保持 Soil conservation	水源涵养 Water conservation	温度调节 Temperature mitigation	雨涝调蓄 Runoff mitigation	休闲游憩 Recreation
指标权重 Indicator weight	0.18	0.14	0.15	0.16	0.20	0.17
指标性质 Indicator attribute	正向	负向	正向	负向	负向	正向

为消除量纲影响,对各项指标采用以下公式进行标准化^[30]:

$$\begin{aligned} \text{正向指标: } S_i &= (X_i - \min X_i) / (\max X_i - \min X_i) \\ \text{负向指标: } S_i &= (\max X_i - X_i) / (\max X_i - \min X_i) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, S_i 表示原始数据 X_i 的标准化值, $\min X_i$ 表示第 i 项指标的最小值, $\max X_i$ 表示第 i 项指标的最大值。

2.2.3 生态系统服务的权衡协同分析

目前,学界普遍将生态系统之间的关系概括为竞争消长的权衡、相互增益的协同和无关三类^[31]。本文在宏观与局部两个尺度上开展分析:在宏观上,通过分析网格几何质心生成矢量点 1580 个,对单一生态系统服务栅格数据分别采样后,借助 SPSS 22 平台进行相关性分析,当结果呈现负相关表示权衡关系,反之为协同关系,双侧置信度满足 0.01 则为强权衡/协同,满足 0.05 为弱权衡/协同,不显著则表示无关^[8]。在局部上通过分析网格提取单一生态系统服务均值后,借助 GeoDa 1.14 平台中的双变量空间自相关分析模块,可以进一步揭示权衡协同的空间格局,具体计算方法见文献^[17]。根据局部空间关联性指标(Local indicators of spatial association, LISA),同质的“高一高”集聚及“低—低”集聚特征均表示协同关系,异质的集聚则表示权衡关系,其他为不相关。

2.3 城市化过程的识别方法

城市化过程可以从时空两个维度进行识别,即未来扩张的可能性(适宜性)和现状空间的开发程度^[11],通过二者的叠加判定目标单元的城市化阶段和趋势。

2.3.1 城市扩张概率计算

由于城市化过程的高度动态性、综合性与复杂性,有典型的灰箱特征,借助非线性方法在扩张动态的模拟和识别中可取得较好效果^[32]。人工神经网络(Artificial neural networks, ANNs)是一种模仿生物神经网络(如人脑)行为特征进行分布式并行信息处理的算法^[33],该模型能够通过多次学习记忆迭代,学习和拟合输入数据与训练目标之间的复杂关系,在非线性地理问题模拟预测中取得了较好效果^[34]。在 ANNs 模型中包括输入层、隐藏层和输出层上的多个神经元构成,通过每个栅格单元中输入空间要素信息以及输出的土地利用类型,采用 Sigmoid 函数约束模型的输出,具体计算公式如下^[35]:

$$S = \sum w \cdot V \quad (5)$$

$$\text{Sigmoid}(S) = \frac{1}{1 + e^{-S}} \quad (6)$$

式中: S 表示隐藏层中神经元获取的信号, w 表示输入层与隐藏层的适应性权重,而 V 表示与输入层神经元相关联的变量。

每个输出层的神经元都对应一种土地利用类型,通过输出层的神经元可获得某一土地利用类型出现的概率。通过 ANNs 的大量样本训练,适应性权重得到校准并可用于预测。在输入层的城市建设驱动因子方面,刘晓阳等^[36]通过随机森林算法遴选了闽三角地区的建设用地扩张驱动因素,参考其成果并结合厦门实际情况,选取了自然、社会、区位和交通 4 类 18 项驱动因素(表 3),通过归一化处理得到 30 m 分辨率栅格文件。在输入层方面,将土地利用类型重分类为建设用地与非建设用地两类。

表 3 城市扩张概率模拟输入驱动因素

Table 3 Input driving factors in urban sprawl simulation

类型 Category	驱动因素 Driving factors	计算方法 Calculation method	类型 Category	驱动因素 Driving factors	计算方法 Calculation method
自然因素 Natural factors	高程	DEM 数据导入	社会因素 Social factors	经济活动密度	夜间灯光数据导入
	坡度	ArcGIS 表面分析		公园绿地密度	基于 POI 数据进行
	到水系距离	ArcGIS 欧氏距离		中小学密度	ArcGIS 核密度分析
区位因素 Locational factors	到海岸距离		交通因素 Traffic factors	医疗设施密度	
	到市级中心距离	ArcGIS 欧氏距离		到铁路距离	ArcGIS 欧氏距离
	到乡镇中心距离			到高速公路距离	
	到城镇建成区距离			到高速公路出入口距离	
	到农村居民点距离			到主干路距离	
	到工矿用地距离			到交通枢纽距离	

2.3.2 城市开发程度计算

城市化的本质是资源要素集聚的过程,其空间表现为土地利用类型与格局演变,由自然状态逐渐转变为人工状态。刘纪远^[37]基于人类对土地资源开发的上下限提出了一种通过不连续函数量化土地利用程度的思路。因此,引入该土地利用程度指数模型计算所有采样网格内的城市开发程度(表 4),计算公式如下:

$$LCI_m = \sum_i^n A_{mi} \cdot C_i \quad (7)$$

式中, LCI_m 为第 m 个网格的土地利用程度指数; A_{mi} 为第 m 个网格中土地利用类型 i 的面积比重; C_i 为土地利用类型 i 的开发程度分值;共 n 种土地利用类型。

2.3.3 城市化过程判别坐标系

基于分析网格采样得到的扩张概率与开发程度样本,以两个指标的均值为原点构建二维四象限坐标系,以横轴表示开发程度,纵轴表示扩张概率,象限 I、II、III、IV 依次代表建成单元、潜力开发单元、未开发单元、过度开发单元,以此为依据细分市域城市化过程的空间异质特征。

表 4 土地利用程度分级赋分表^[37]

Table 4 Scores of land development degree classification

土地利用分类 Land development category	土地利用类型 Land use type	土地利用程度赋分 Land development value
城镇用地 Urban land	城镇、居民点、工矿用地、交通用地	4
农村用地 Rural land	耕地、园地、人工草地	3
自然用地 Natural land	林地、草地、水地	2
未开发地 Undeveloped land	未利用地或难利用地	1

3 结果与分析

3.1 生态系统服务的空间分布特征

3.1.1 单一生态系统服务格局

厦门市各类生态系统服务的空间分布具有显著差异(图 3)。在生境质量方面,高质量区域集中于内陆山区及河湖水系周边,滨海地区的高度人工化导致生境质量衰退,而海湾地区生境质量明显高于周边。在土壤保持方面,大部分地域属于服务高值区,图中显示土壤侵蚀模数在内陆山地的局部地区显著提高;在水源涵养方面,北部林区的服务水平整体较高,而石兜水库、汀溪水库等水源地的服务能力最突出。在温度调节方面,建成区服务能力不足,厦门高温区呈枝状向郊区蔓延,岛外城区组团和填海造陆地区形成明显“热核”。在雨涝调蓄方面,由于地表覆被差异,内陆未开发地区明显优于建成区,值得注意的是厦门滨海高强度建设(特别是临港建设)严重削弱了生态调蓄能力,从图中可见服务低值区密集分布在海岸线。在休闲游憩方面,厦门岛及海沧、集美、同安等地区处于服务高值区,但是服务覆盖的均匀性较差。总的来看,生境质量、水源涵养、温度调节和雨涝调蓄服务均在“陆—海”方向上表现出衰退趋势,游憩休闲服务则表现为增强趋势,土壤保持

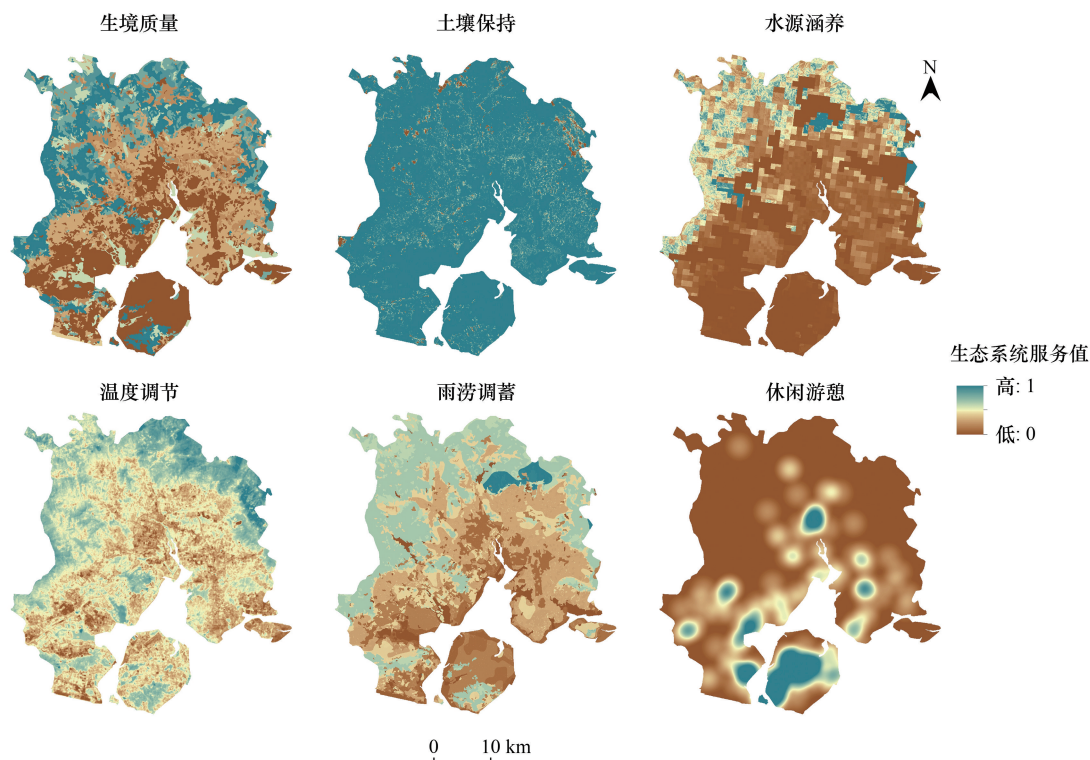


图 3 厦门市六类生态系统服务空间格局

Fig.3 Spatial patterns of six ESs of Xiamen

服务变化不显著。

3.1.2 综合生态系统服务格局

聚合单一生态系统服务得到综合生态系统服务格局(图4)。在空间分布上,低值区(占比23.47%)与建成区范围基本重叠并且集中在海岸带,而高值与中高值区(占比28.97%)集中于内陆山区,为市域生态系统运转提供关键支撑,中值区与中低值区(占比47.56%)属于生态系统中的“灰色空间”,在城市化过程中极易被侵蚀后丧失服务能力。从全市各区情况来看(表5),翔安区和海沧区的均值同为最低值0.37,厦门制造业集中在该区域布局,对生态系统服务产生消极影响。生态系统服务均值最高的是区划面积最大的同安区(0.43),凭借广阔的生态腹地具备较高服务水平。湖里区生态系统服务水平最低(0.31),由于思明区园林绿化资源多于湖里区,所以生态系统服务较高(0.41),然而从生态系统服务的分布特征来看,湖里区标准差最低,服务均匀性最强,而海沧区生态系统服务的空间异质性最高。从生态系统服务的总量来看,基本与面积呈正相关,岛外四区的综合生态系统服务供给占比达到全域的91.78%,其中同安区占比44.55%,具有绝对优势。

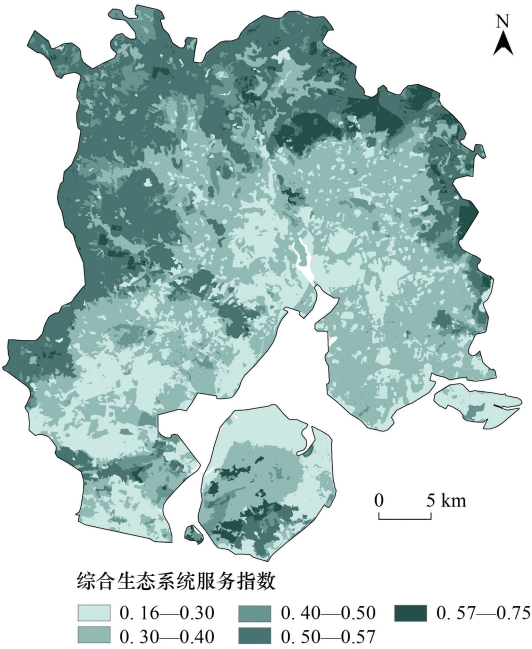


图4 厦门市综合生态系统服务指数空间格局
Fig.4 Spatial pattern of CES of Xiamen

表5 厦门市综合生态系统服务指数分区统计
Table 5 Zonal statistics of CES index of Xiamen

区域名称 District name	面积 Area/km ²	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 Std	总和 Sum
思明区	74.98	0.22	0.68	0.41	0.11	34002.66
湖里区	66.37	0.20	0.67	0.31	0.07	22853.59
翔安区	357.35	0.16	0.71	0.37	0.10	145981.91
海沧区	173.28	0.17	0.68	0.37	0.14	71552.28
集美区	253.19	0.20	0.67	0.39	0.11	109308.17
同安区	646.19	0.20	0.75	0.43	0.12	308252.43

3.2 生态系统服务的权衡协同格局

3.2.1 整体权衡协同关系

通过大量采样并进行统计学分析进一步探究各类生态系统服务的权衡协同关系。Pearson 相关分析结果表明(表6),六类生态系统服务之间以协同关系为主,存在少量权衡与不相关现象。在协同关系方面,生境质量—水源涵养、生境质量—温度调节、生境质量—雨涝调蓄、土壤保持—温度调节、水源涵养—温度调节、水源涵养—雨涝调蓄、温度调节—雨涝调蓄七对服务表现出强协同,其中生境质量与雨涝调蓄(0.785**)以及与温度调节(0.616**)具有最高的协同水平,表明气候调节类生态系统服务和物种生存环境的密切联系。此外,土壤保持与生境质量(0.064*)以及与雨洪调蓄(0.089*)两对服务表现出弱协同,未来随着城市扩张和生态退化有演变为权衡关系的可能。此外,结果还发现游憩休闲与其他生态系统服务都表现出较强的权衡关系,其中与生境质量(-0.370**)以及与雨涝调蓄(-0.368**)权衡效应最突出,与土壤保持服务不相关。结合图3可知,休闲游憩服务集中于城区内部与近郊的公园绿地,内陆腹地生态空间目前提供的休闲服务有限,因此休闲游憩活动与生态资源的分布呈现倒挂现象。

表 6 厦门市六类生态系统服务的相关性分析结果
Table 6 Correlation analysis results of six ESs of Xiamen

生态系统服务 Ecosystem services	生境质量 Habitat quality	土壤保持 Soil conservation	水源涵养 Water conservation	温度调节 Temperature mitigation	雨涝调蓄 Runoff mitigation	休闲游憩 Recreation
生境质量 Habitat quality	1	0.064 *	0.450 **	0.616 **	0.785 **	-0.370 **
土壤保持 Soil conservation	弱协同	1	0.032	0.316 **	0.089 *	0.046
水源涵养 Water conservation	强协同	不相关	1	0.367 **	0.507 **	-0.293 **
温度调节 Temperature mitigation	强协同	强协同	强协同	1	0.575 **	-0.212 **
雨涝调蓄 Runoff mitigation	强协同	弱协同	强协同	强协同	1	-0.368 **
休闲游憩 Recreation	强权衡	不相关	强权衡	强权衡	强权衡	1

* * 表示在置信度(双测)为 0.01 时,相关性显著; * 表示在置信度(双测)为 0.05 时,相关性显著

3.2.2 局部权衡协同关系

通过双变量空间自相关分析获得 15 组计算结果(图 5),总的来说水源涵养与雨涝调蓄具有最高的协同性,协同单元达到 1050 个,雨涝调蓄与休闲游憩具有最高的权衡性,权衡单元达到 811 个。厦门市生态系统服务权衡协同的空间格局包括三种类型:第一类,协同主导,包括 HQ-WC、HQ-TM、HQ-RM、WC-TM、WC-RM、TM-RM 六组,其共性特征是空间自相关格局分明,协同单元占比在 41.18%—61.85%之间,“高一高”集聚分布于内陆山区,“低—低”集聚分布于海岸及岛内建成区,较为清晰的体现了生境质量、水源涵养、温度调节和雨涝调蓄服务的“陆—海”格局差异,权衡现象只在局部零星出现。第二类,权衡主导,包括 HQ-RS、SC-RS、WC-RS、TM-RS、RM-RS 五组,特征为在内陆山区和厦门岛内的“高一低”与“低—高”集聚,权衡单元占比达到 38.10%—45.43%,休闲游憩服务与其他五类服务的空间权衡是主要原因。第三类,混合分布,包括 HQ-SC、SC-WC、SC-TM、SC-RM 三组,特征为在内陆山区表现协同关系,而海岸及岛内表现权衡关系,其中生境质量与土壤保持的空间相关性较弱,不显著单元占比达到 71.82%。

3.3 生态系统服务在城市化格局中的构成

3.3.1 城市化过程的空间格局识别

通过计算扩张概率和开发程度实现城市化过程空间识别。选取开发程度和扩张概率的均值(2.92,0.39)为原点绘制二维四象限坐标系对厦门全域空间单元进行分类(图 6),散点图中形成“高概率—高开发”和“低概率—低开发”两个簇群,对建成区和非开发区有较好的分离度,分类结果包括建成单元 602 个、潜力开发单元 231 个、过度开发单元 177 个,未开发单元 775 个。其中,建成单元主要是城市化完成的地域,与城区范围基本吻合,呈现组团状分布,集中于滨海和岛内区域;未开发单元属于未发生规模城市化的乡村地域,集中连片分布于内陆腹地包含大量自然要素;潜力开发单元扩张概率高但是开发程度低,是近期城市化热点区,零散分布于市郊,其中翔安区包含 95 个潜力开发单元,为市域最高,此外潜力开发单元多数与郊区乡镇中心或工矿区临近;过度开发单元指在城市发展现状条件下扩张概率低但是开发程度高,即土地开发超前于城市扩张的客观需求,是一种局部过度城市化的现象,同安区包含 68 个过度开发单元,为全市最高,在空间分布上该类单元集中于生态敏感的湾区及浅山区。

3.3.2 城市化格局中生态系统服务构成

为进一步明确四类城市化空间单元对生态系统服务的贡献比重,通过均值统计得到结果(图 7)。从综合生态系统服务指数来看,未开发单元占比最高(31.38%),其次分别是过度开发单元、潜力开发单元与建成单元。在生境质量、水源涵养和雨涝调蓄服务方面,未开发单元都具有明显优势,分别占 45.31%、58.20%和 39.65%,而建成单元的服务水平较低,分别占 8.34%、7.25%和 14.10%。土壤保持与温度调节在四类空间的服务水平相对均衡。在休闲游憩方面,建成单元服务水平最高(48.26%),未开发单元仅贡献 5.58%。总的来看,厦门市域未开发单元的生态系统服务平均水平最高,在多项服务中发挥关键作用,而潜力开发单元与过度开发单元的服务水平相近,建成单元仅在土壤保持、雨涝调蓄和休闲游憩表现出一定服务能力,其他方面基本

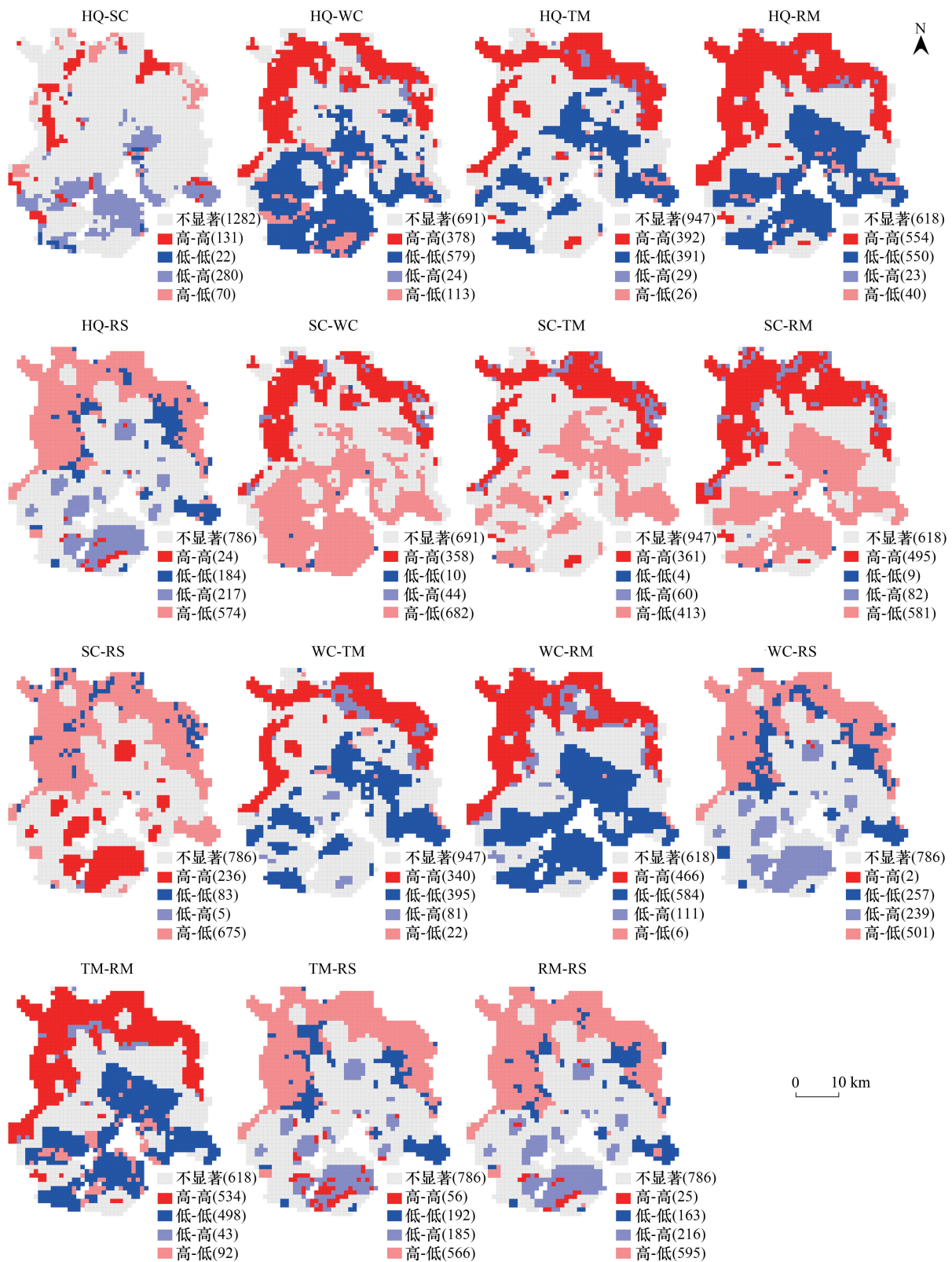


图5 厦门市六类生态系统服务的双变量 LISA 图

Fig.5 Bivariate LISA diagram of six ESs of Xiamen

HQ: 生境质量服务 Habitat quality; SC: 土壤保持服务 Soil conservation; WC: 水源涵养服务 Water conservation; TM: 温度调节服务 Temperature mitigation; RM: 雨涝调蓄服务 Runoff mitigation; RS: 休闲游憩服务 Recreation service

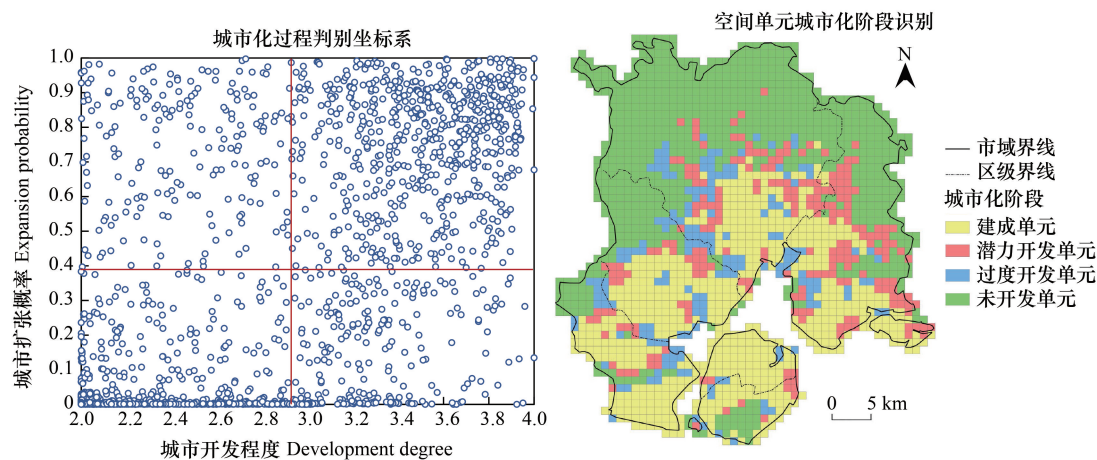


图6 厦门市城市化过程的空间格局识别结果

Fig.6 Spatial identification of urbanization process in Xiamen

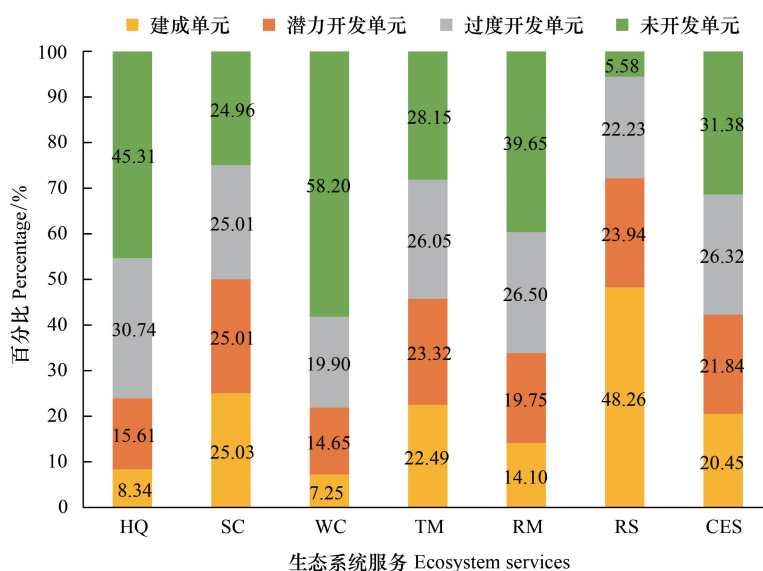


图7 厦门市四类城市化单元对生态系统服务的贡献

Fig.7 Contribution of four kinds of urbanization units to ESs in Xiamen

依赖外部生态系统服务补充,可见高度人工化的空间系统具有明显生态系统服务短板。

3.4 耦合城市化与生态系统服务的分区分管策略

3.4.1 生态分区分管格局

基于城市化异质性的空间细分结果以及每个采样单元内综合生态系统服务水平的高低(与平均值对比),进一步细化生态管控单元分区。由图8可见,非开发区的低服务单元主要位于城镇近郊区,并且已经向山区渗透,是生态保护需重点关注的问题。潜力开发与过度开发单元中具备高服务水平的空间主要分布于城乡交错带,经济区位上具有较高价值,同时又极其脆弱敏感,这类空间的有效规划控制对厦门市域生态安全格局起到关键作用。建成单元中的高服务区主要得益于厦门城区公园绿地的建设,然而其中仍有大部分属于低服务单元,所以城市建成区生态环境仍需优化提升。

3.4.2 生态分区分管决策

统筹考虑空间单元的城市化与生态系统服务特征,通过交叉分析获得厦门市生态分区分管决策矩阵

(表 7),共包括四类单元八种情景的管控策略:(1)建成单元,特征是空间基本饱和且可调整范围较小,在生态系统服务高值区主要维持现状生态空间继续发挥相应功能,对生态系统服务低值区采用存量修复的策略,例如增加立体绿化,海绵城市改造等措施可以在有限空间内提供可观的生态系统服务;(2)潜力开发单元,特征是建设适宜性高且远期建设调整的可能性较大,其内部的生态系统服务高值区往往在城乡生态网络中具有重要作用,应降低开发强度对关键生态空间进行保留,而在生态系统服务低值区可适当平衡高值区的建设容量,局部提高开发强度;(3)过度开发单元,特征是土地覆被动态性强且现状建设超前于实际需求,也具备较大调整空间,在高生态系统服务区域严格限制进一步开发,保存关键生态空间,在低生态系统服务区域着重开展受损空间生态修复,此时各类生态系统服务的权衡协同关系可提供参照,从而精准弥补生态短板;(4)未开发单元,特征是以自然生态属性为主并在区域发挥重要的服务功能,在生态系统服务高值区应继续生态保育,涵养自然资源并严格禁止开发建设,同时对于生态系统服务低值区,需要采取辅助生态干预的手段,优化各类生态要素的关系,逐步提升其服务能力。

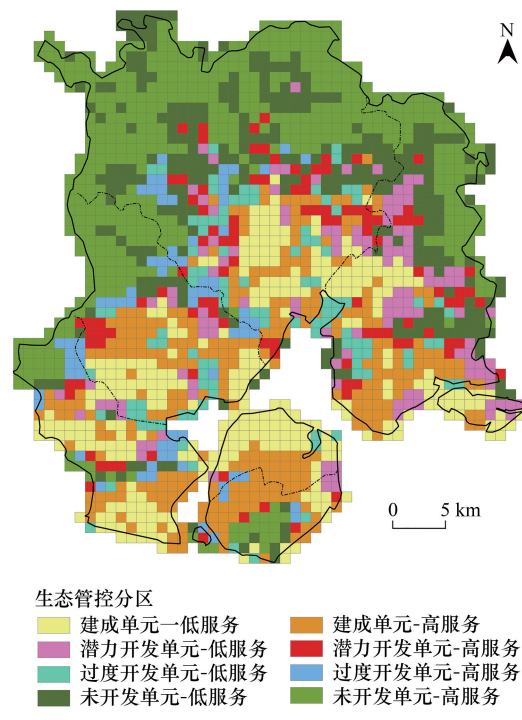


图 8 厦门市域生态分区管控图
Fig.8 Regional ecological zoning management map of Xiamen

表 7 厦门市生态分区分管决策矩阵

Table 7 Ecological zoning management decision matrix of Xiamen				
单元分类 Unit types	建成单元 Built-up units	潜力开发单元 Developing units	过度开发单元 Over-developed units	未开发单元 Non-developed units
生态系统服务高于均值 CES above average	维持现状	低强度开发	开发限制	生态保育
生态系统服务低于均值 CES below average	存量修复	高强度开发	生态修复	生态干预

4 讨论与结论

4.1 讨论

研究发现生态系统服务退化最严重的区域主要分布于厦门滨海集中建设区,并且此处空间权衡效应最显著。从空间经济学的角度来看,滨海地区的优势经济区位吸引更多的人工开发活动,进而加剧了对自然环境中多层次生态系统服务的扰动。城镇扩张本质是经济效益对生态效益的空间置换,在不能有效识别生态系统服务水平阈值^[1]的条件下,由经济增长驱动的城市化过程具有很强路径依赖性,极易对原始生态系统带来不可逆转的破坏。比较典型的是,在厦门城乡交错地区的潜力开发单元与过度开发单元中,生态系统服务与城市化的矛盾最为突出,与既有研究相符^[14]。一方面该地区属于典型的生态交错带(Ecotone),边缘效应突出,在厦门各类生态系统服务中的贡献占比较高且较为稳定,具备较高生态价值;另一方面,该区域也是城市化中的热点区,极易受到外部胁迫而丧失原有生态服务能力^[38]。因此,在市域生态规划中需要着重加强对城乡交错带的关注。

生态系统服务的格局识别旨在通过认识和掌握生态系统服务之间的复杂空间关系与城市化过程的交互

影响规律,探寻生态底线保护与社会经济发展的平衡点,从而实现综合效益最大化。区别于现行生态保护规划中宏观分区的技术范式,本文尝试在细分空间单元中探究规律与管控路径。由于尺度细分放大了空间异质性影响,研究结果呈现一定程度的碎片化现象,但同时也有有效识别了传统广域分区中易被忽略的关键生态管控节点。在国土空间规划“五级三类”的体系中,本文提出的方法可以为市县级规划提供技术支撑,特别是在详细规划中,空间细分可以为城市及乡村地区提供更为细致的参照。考虑尺度效应影响,采用的 1000 m 采样与管理网格可以满足厦门大部分区域的识别和分析,但是在不同研究区域或不同研究目标下仍需进一步搜寻最优分析尺度。此外,由于城市化过程的动态性与非线性,在时间截面上的空间识别结果不具备外推条件,因此未来需在时序研究上继续深入。

4.2 结论

本文以厦门市为研究对象,在探究生态系统服务的空间分异特征和权衡协同关系的基础上,揭示了异质性城市化格局中生态系统服务构成规律,并基于空间细分的方法提出市域生态空间管控方案。主要得出以下结论:(1)厦门市生态系统服务在“陆-海”方向上空间分异显著,岛外四区的综合生态系统服务指数总量占全域的 91.78%,在平均服务水平上翔安区和海沧区最低,同安区在总量和均值上均处于首位;(2)六类生态系统服务之间以协同作用为主,在全局关系中生境质量与雨涝调蓄以及与温度调节的协同水平最高,在局部空间关系中水源涵养与雨涝调蓄的协同水平最高且高值区集中于内陆山区,休闲游憩服务与其他服务的权衡效应最强;(3)厦门市未开发单元的生态系统服务平均水平最高,其生境质量、水源涵养和雨涝调蓄服务较强,建成单元服务能力最弱,仅在休闲游憩服务表现出优势,在市域尺度翔安区开发潜力最大,同安区过度城市化问题突出;(4)基于空间细分单元叠加城市化与生态系统服务特征,得到厦门市生态管控分区图以及管控决策矩阵,提出了四类单元八种情景的具体管控策略。

参考文献(References):

- [1] Daily G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems. Washington DC: Island Press, 1997.
- [2] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, Redman C L, Wu J, Bai X, Briggs J M. Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, 2008, 319 (5864): 756-760.
- [3] Delgado L E, Marin V H. Ecosystem services and ecosystem degradation: Environmentalist's expectation? *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101177.
- [4] Chen W, Zhao H, Li J, Zhu L, Wang Z, Zeng J. Land use transitions and the associated impacts on ecosystem services in the Middle Reaches of the Yangtze River Economic Belt in China based on the geo-informatic Tupu method. *Science of The Total Environment*, 2020, 701: 134690.
- [5] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [6] Turner K G, Odgaard M V, Bocher P K, Dalgaard T, Svenning J. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 89-104.
- [7] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 徐彩仙, 李焱. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系——以甘肃白龙江流域为例. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1278-1288.
- [8] 杜勇, 税伟, 孙晓瑞, 杨海峰, 郑佳瑜. 海湾型城市生态系统服务权衡的情景模拟——以福建省泉州市为例. *应用生态学报*, 2019, 30 (12): 4293-4302.
- [9] 张城, 李晶, 周自翔, 刘宪锋. 生态系统服务级联效应研究进展. *应用生态学报*. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202105.029>
- [10] 王丽群, 张志强, 李格, 马丰伟, 陈立欣. 北京边缘地区景观格局变化及对生态系统服务的影响评价——以牛栏山-马坡镇为例. *生态学报*, 2018, 38(3): 750-759.
- [11] Liang C, Zhang R, Zeng J, Shen Z. A land-use decision approach integrating thermal regulation, stormwater management, and economic benefits based on urbanization stage identification. *Science of The Total Environment*, 2021, 779: 146415.
- [12] 王宏亮, 高艺宁, 王振宇, 沙威, 吴健生. 基于生态系统服务的城市生态管理分区——以深圳市为例. *生态学报*, 2020, 40(23): 8504-8515.
- [13] 唐明珠, 梁晨, 曾坚, 耿煜周. 生态约束下的闽三角城市群城镇发展特征与转型路径研究. *生态学报*, 2021, 41(15). <https://doi.org/10.5846/stxb202002190294>
- [14] 张天海, 田野, 徐舒, 唐立娜, 郭蔚. 滨海城市土地利用格局演变及对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2018, 38(21): 7572-7581.

- [15] 陈玉福, 董鸣. 生态学系统的空间异质性. 生态学报, 2003, 23(2): 346-352.
- [16] 税伟, 杜勇, 王亚楠, 杨海峰, 付银, 范冰冰, 黄梦圆. 闽三角城市群生态系统服务权衡的时空动态与情景模拟. 生态学报, 2019, 39(14): 5188-5197.
- [17] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 徐文瑾, 王燕燕, 王辉. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系. 地理研究, 2020, 39(1): 64-78.
- [18] 沈中健, 曾坚. 厦门市热岛强度与相关地表因素的空间关系研究. 地理科学, 2020, 40(5): 842-852.
- [19] 朱文彬, 孙倩莹, 李付杰, 高艳妮, 张林波. 厦门市城市绿地雨洪减排效应评价. 环境科学研究, 2019, 32(1): 74-84.
- [20] 方莹, 王静, 黄隆杨, 翟天林. 基于生态安全格局的国土空间生态保护修复关键区域诊断与识别——以烟台市为例. 自然资源学报, 2020, 35(1): 190-203.
- [21] 张恩伟, 彭双云, 冯华梅. 基于 GIS 和 RUSLE 的滇池流域土壤侵蚀敏感性评价及其空间格局演变. 水土保持学报, 2020, 34(2): 115-122.
- [22] 李天宏, 郑丽娜. 基于 RUSLE 模型的延河流域 2001—2010 年土壤侵蚀动态变化. 自然资源学报, 2012, 27(7): 1164-1175.
- [23] 胡先培, 曾成, 钱庆欢, 王权, 李阳兵. 基于 RUSLE 模型的铜仁地区 1987—2015 年土壤侵蚀时空特征. 生态与农村环境学报, 2019, 35(2): 158-166.
- [24] 韩青, 孙中原, 孙成苗, 李丹, 刘一萍. 基于自然资源本底的国土空间规划现状一张图构建及应用——以青岛市为例. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2150-2162.
- [25] Estoque R C, Murayama Y, Myint S W. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of The Total Environment*, 2017, 577: 349-359.
- [26] 高静, 龚健, 李靖业. “源-汇”景观格局的热岛效应研究——以武汉市为例. 地理科学进展, 2019, 38(11): 1770-1782.
- [27] Walega A, Amatya D M, Caldwell P, Marion D, Panda S. Assessment of storm direct runoff and peak flow rates using improved SCS-CN models for selected forested watersheds in the Southeastern United States. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2020, 27: 100645.
- [28] 彭建, 魏海, 武文欢, 刘焱序, 王仰麟. 基于土地利用变化情景的城市暴雨洪涝灾害风险评估——以深圳市茅洲河流域为例. 生态学报, 2018, 38(11): 3741-3755.
- [29] 屠星月, 黄甘霖, 邹建国. 城市绿地可达性和居民福祉关系研究综述. 生态学报, 2019, 39(2): 421-431.
- [30] 张学渊, 魏伟, 颀斌斌, 郭泽呈, 周俊菊. 西北干旱区生态承载力监测及安全格局构建. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2389-2402.
- [31] 戴路炜, 唐海萍, 张钦, 崔凤琪. 北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究. 生态学报, 2020, 40(9): 2863-2876.
- [32] Tayyebi A, Pijanowski B C. Modeling multiple land use changes using ANN, CART and MARS: Comparing tradeoffs in goodness of fit and explanatory power of data mining tools. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 28: 102-116.
- [33] Almeida C M, Gleriani J M, Castejon E F, Soares-Filho B S. Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics. *International Journal of Geographical Information Science*, 2008, 22(9): 943-963.
- [34] Openshaw S. Neural Network, Genetic, and Fuzzy Logic Models of Spatial Interaction. *Environment and Planning A*, 1998, 30(10): 1857-1872.
- [35] Liu X, Liang X, Li X, Xu X, Ou J, Chen Y, Li S, Wang S, Pei F. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [36] 刘晓阳, 曾坚, 贾梦圆, 张森. 闽三角城市群生态安全格局构建及城镇扩展模拟. 生态学报, 2020, 40(21): 7873-7885.
- [37] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996.
- [38] 梁晨, 曾坚. 城乡交错带的三维动态识别及空间演变机制——以厦门市为例. 地理研究, 2021, 40(5): 1404-1420.