

基于生态系统服务簇分析的福州都市圈生态保护空缺识别研究

Identification of Ecological Protection Gaps in Fuzhou Metropolitan Area Based on Ecosystem Service Bundles Analysis

李秋蓉¹ 廖凌云^{1,2*}
LI Qiurong¹ LIAO Lingyun^{1,2*}

(1.福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002; 2.武夷山国家公园研究院, 福州 350002)
(1. College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian, China, 350002; 2. Wuyishan National Park Research Institute, Fuzhou, Fujian, China, 350002)

文章编号: 1000-0283(2025)01-0014-09
DOI: 10.12193/j.laing.2025.01.0014.002
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2024-05-20
修回日期: 2024-07-09

摘要

在快速城市化背景下, 都市圈面临经济发展和生态保护之间不协调的问题。以福州都市圈为例, 运用InVEST模型评估2020年生境质量、碳固存、土壤保持、水源涵养4项关键生态系统服务, 分析其空间分布特征, 基于此利用SOM聚类分析福州都市圈的生态系统服务簇, 识别空间特征和主导生态系统服务簇, 进而识别福州都市圈生态保护空缺。结果表明: (1) 2020年福州都市圈生态系统服务呈现“西北高, 东南低”的空间格局, 中部生态系统服务价值低; (2) 福州都市圈6类生态系统服务簇空间分布具有异质性; (3) 福州都市圈核心生态系统服务簇为B5簇, 主要用地类型为林地和草地, 碳固存、生境质量和土壤保持服务高, 水源涵养服务较低, 综合生态价值高, 其次为B4和B6簇, B2簇生态系统服务较低; (4) 福州都市圈保护空缺区域主要分布于鹭峰山脉和戴云山脉, 整体保护空缺率为1.85%。研究结果可为福州都市圈区域生态保护与格局优化提供思路。

关键词

生态系统服务簇; 自然保护区; 都市圈; SOM聚类分析; InVEST模型

Abstract

Against the backdrop of rapid urbanization, the metropolitan area faces the issue of discordance between economic development and ecological preservation. Using the InVEST model, this study evaluates the habitat quality, carbon sequestration, soil retention, and water yield, four key ecosystem services in the Fuzhou metropolitan area in 2020. It analyzes their spatial distribution characteristics and utilizes SOM bundling analysis to identify the ecosystem service bundles in the Fuzhou metropolitan area, recognizing spatial characteristics and dominant service bundles and consequently identifying ecological protection gaps. The results indicate: (1) In 2020, the ecosystem services in the Fuzhou metropolitan area exhibited a spatial pattern of “high in the northwest and low in the southeast,” with low ecological system service value in the central region. (2) The spatial distribution of the six types of ecosystem service bundles in the Fuzhou metropolitan area is heterogeneous. (3) The dominant ecosystem service bundles in the Fuzhou metropolitan area is bundle B5, mainly comprised of forest and grassland, with high carbon sequestration, habitat quality, and soil retention services, but relatively low water yield services, exhibiting high comprehensive ecological value. This is followed by bundle B4 and bundle B6, while the ecosystem services of bundle B2 are nearly exhausted. (4) The protection gaps in the Fuzhou metropolitan area are mainly distributed in the Jiufeng and Daiyun mountain ranges, with an overall protection gap rate of 1.85%. The research results can provide ecological protection and spatial optimization ideas in the Fuzhou metropolitan area.

Keywords

ecosystem service bundles; protected areas; metropolitan areas; SOM cluster analysis; InVEST model

李秋蓉

1999年生/女/广西桂林人/在读硕士研究生/研究方向为国家公园与自然保护地规划

廖凌云

1990年生/女/福建邵武人/副教授/研究方向为国家公园与自然保护地规划、生态系统服务评估、社区规划

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: liaolingyun@fafu.edu.cn

基金项目:

国家自然科学基金项目“自然保护区生态保护成效时空分异格局及驱动机制探究: 以福建省为例”(编号: 32401461); 福建省自然科学基金项目“面向多目标权衡的国家公园周边城乡居民点空间布局智能优化研究”(编号: 2022J01613); 福建省中青年教育科研项目“山地小流域水导向关键景观体系的识别、控制与耦合优化”(编号: JAT220058); 2022年度福建农林大学科技创新专项基金项目(社科类)“多源数据支持下武夷山国家公园徒步线路时空动态分析及步道规划优化研究”(编号: KCX22F60A)

都市圈是城镇化进程中城市发展的高级别城市空间形态^[1],是指以一个或多个中心城市为核心,以发达的交通连接为支撑,与周边社会经济区域紧密相连的功能性城市区域^[2]。生态系统服务是人类从生态系统直接或间接获取各种效益的统称^[3],对人类生存和福祉具有重要意义,同时也反映了自然生态系统与人类社会的相互作用^[4]。作为人类社会与自然生态系统之间的桥梁,生态系统服务日益受到重视^[5]。在城市发展过程中,土地利用结构的改变会导致生态系统结构和功能发生改变,从而影响到生态系统的服务功能,并且导致生态系统服务水平下降和生态退化等问题,严重威胁到区域生态系统的健康和健康^[6-7]。都市圈面临着经济发展与生态保护之间不平衡的矛盾,对都市圈生态系统服务进行生态系统服务评估与生态保护空缺识别具有重要意义。

城市生态保护空缺分析研究侧重于以生态系统服务作为重要指标识别保护空缺。例如采用自然断点法划分北京市密云区生态系统服务,选取最高级别作为优先保护区,对比现有保护范围识别保护空缺^[8];利用热点分析识别江西赣州市生态系统服务热点区域与保护区进行叠加得到保护空缺^[9];基于价值聚类分析进行福州市生态系统服务的高低聚类分析与自然保护地矢量数据叠加分析保护空缺^[10]。现行空缺分析方法通常基于最大值法或等权叠加法、冷热点聚类分析得到不同图层的保护优先区域进行叠加,进而识别保护空缺,存在一定主观性。这往往忽略多个单一生态系统服务图层叠加时各生态系统服务之间的交互作用,无法考虑到同一空间生态系统服务之间的权衡和协同。

相关研究表明生态系统服务之间并非

独立存在,同一区域范围内不同生态系统服务间存在同增共减的协同和此消彼长的权衡关系,并产生交互影响^[11-12]。生态系统服务簇(Ecosystem Service Bundles, ESB)是指跨空间和时间重复出现的不同类型生态系统服务组合,这组服务间往往存在协同或权衡效应^[13-15]。生态系统服务簇可以在时空上一致地表达多重生态系统服务^[16],划定具有相似生态系统服务量级和组合的区域^[17],可以反映生态系统服务中的主导功能^[18]。近年来,学者们对生态系统服务簇的研究逐步深入,或基于生态系统服务簇进行生态功能区划^[4,17,19],或基于生态系统服务簇识别保护优先区进行生态修复^[20-21]。将生态系统服务簇识别纳入城市生态保护空缺,识别生态系统服务簇,有助于弥补仅考虑单一生态系统服务识别保护空缺的不足。本研究基于生态系统服务簇角度研究城市生态保护空缺,有助于从生态系统服务价值整体保护的角度提出城市生态保护规划优化措施。

福州都市圈发展规划于2020年开始编制,2021年正式获批。福州都市圈在高质量发展、建设国际化大都市的同时,面临着保护生态和绿色发展的挑战,开展生态系统服务评估与空缺分析对于平衡区域经济发展和保护生态具有重要意义。本研究以福州都市圈为例,运用InVEST模型评估2020年福州都市圈4项关键生态系统服务(水源涵养、土壤保持、生境质量和碳固存),并利用自组织映射网络(Self-organizing Feature Mapping, SOM)对生态系统服务进行聚类分析,以揭示其空间特征和主导生态系统服务簇。最后,通过与现有自然保护地叠加识别生态保护空缺,以期对都市圈的生态保护和自然保护地格局优化提供技术支持。

1 研究区概况

福州都市圈(25° 01'—27° 38' N, 117° 50'—120° 15' E)位于福建省东北部,属于亚热带季风气候,气候温暖湿润,四季常青,阳光充足,雨量充沛。研究区以福建省福州市为中心,主要包括福州市和莆田市,宁德市的蕉城区、福安市、霞浦县和古田县,南平市的延平区、建阳区和建瓯市部分地区,及平潭综合试验区,陆域面积26 000 km²^[22]。地形以山地、丘陵为主,沿海多为低丘陵、堆积平原,地势中间高四周低,主要用地类型为林地和草地。

福州都市圈内共有76处自然保护地(图1),其中自然保护区6个,森林公园等各类自然公园70个,总面积约1 933 km²(包含交叉重叠面积)。自然保护地主要分布在西北、西部山地丘陵地区,中部、北部低丘陵地区,沿海一带平原地区。

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

研究所使用的基础数据及来源详见表1。由于各数据源在分辨率、坐标投影等方面存在差异性,研究使用ArcGIS 10.8对数据进行预处理,定义统一坐标系统为WGS-1984_UTM_Zone_50N,重采样至1 km分辨率。按照中科院“LUCC遥感监测数据分类体系”将福州都市圈2020年土地利用数据分为6类(耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地)^[23],作为InVEST模型评估生态系统服务的基础数据;其中水系是基于DEM进行填洼、提取河流和流向等操作提取,用于水源涵养功能量的计算。

2.2 生态系统服务评估

目前常用于评估生态系统服务功能和价

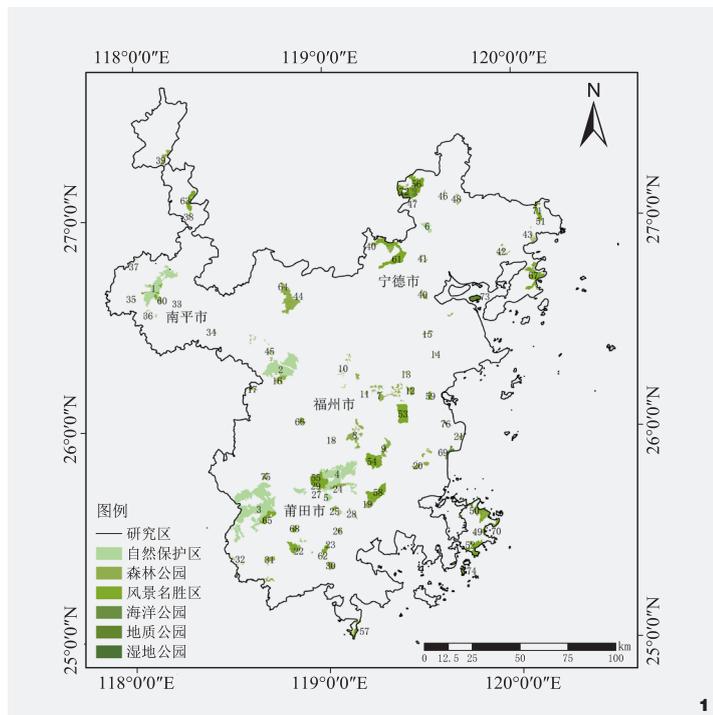


图1 福州都市圈自然保护地现状分布图
Fig. 1 Distribution map of protected areas in Fuzhou metropolitan area

值的方法大致分为物质质量评估法、能值分析及模型评估法三种^[24]。前两种方法计算过程较为繁杂, 数据难获取, 存在主观和不确定性, 单纯的数学理论计算会忽略生态系统服务的空间异质性^[25]。模型评估法根据生态系统评估模型进行测算, 同时可以反映生态系统服务的空间异质性并将结果可视化。本研究选择InVEST模型量化和评估生态

系统服务, 结合传统定量评估和空间表达进行。

基于福州都市圈森林覆盖率高、地形起伏大的生态特征, 本研究从支持服务、供给服务、调节服务中选取4项代表福州都市圈生态状况的关键生态系统服务(生境质量、碳固存、土壤保持和水源涵养)进行定量评估^[26-27]。

2.2.1 生境质量

运用InVEST模型中的“Habitat Quality”模块评估, 该模块通过分析各种威胁因子的综合影响, 结合土地利用类型进行计算^[28], 见公式(1)。

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2 + K^2} \right) \quad (1)$$

式中, Q_{xj} 为每个栅格的生境质量, 值范围为[0, 1], H_j 为生境适宜性, D_{xj} 为生境退化程度, K 为比例因子(半饱和参数)。

2.2.2 碳固存

运用InVEST模型中的“Carbon”模块计算碳固存量, 该模块计算地上生物量、地下生物量、土壤有机物和死亡有机质碳储量4个碳库的平均密度, 并将其与对应的土地利用类型的面积相乘来计算碳固存量^[29], 见公式(2)。

$$C = C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil} \quad (2)$$

式中, C 为每个栅格的碳储量总量(t), C_{above} 和 C_{below} 分别对应地上生物量碳(t)、地下生物量碳(t), C_{dead} 为死亡有机碳(t), C_{soil} 为土壤有机碳(t)。

表1 数据类型及来源
Tab. 1 Data types and sources

数据类型 Data type	数据名称 Data name	分辨率 Resolution ratio	数据来源 Data source
气象数据	年均降水量	1 km	资源环境科学数据注册与出版系统 (http://www.resdc.cn/DOI)
	月均气温	1 km	国家青藏高原科学数据中心 (http://data.tpcd.ac.cn/zh-hans/)
	潜在蒸散量	1 km	
基础数据	土地利用	30 m	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)
	土壤数据	1 km	世界土壤数据库 (https://www.rserforum.com/)
	DEM	30 m	NASA 地球科学数据网站 (https://nasadaacs.eos.nasa.gov/)
	路网	—	open street map (https://www.openstreetmap.org/)
	自然保护地	—	2019年福建省林业局提供
	行政边界数据	—	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn/)

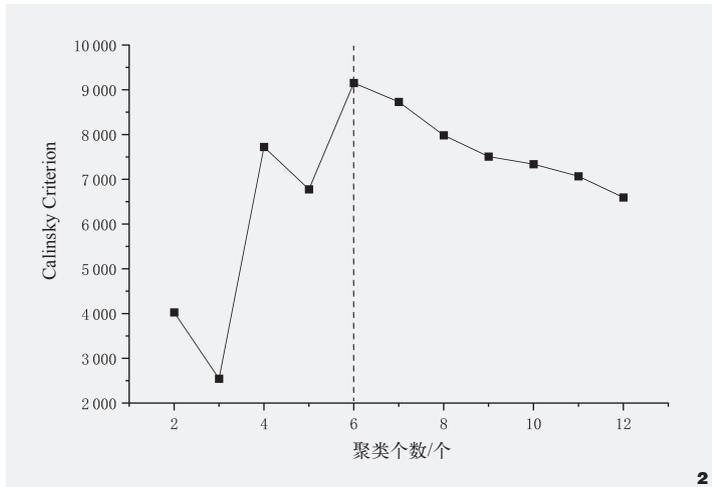


图2 不同聚类数量的Calinsky Criterion值
Fig. 2 Calinsky criterion values for different bundling numbers

2.2.3 土壤保持

运用InVEST模型中的“Sediment Delivery Ratio”模块进行评估,该模块分别计算实际土壤流失和潜在土壤流失量,并计算二者之间的差值得到土壤保持量^[30-31],见公式(3)-(5)。

$$SC_x = RKLS_x - USLE_x \quad (3)$$

$$RKLS_x = R_x \times K_x \times LS_x \quad (4)$$

$$USLE_x = R_x \times K_x \times LS_x \times C_x \times P_x \quad (5)$$

式中, SC_x 为每个栅格的土壤保持量(t), R_x 为降水侵蚀性因子, K_x 为土壤可蚀性因子, LS_x 为坡长坡度因子, C_x 为植被覆盖和作物管理因子, P_x 为水土保持措施因子, $RKLS_x$ 为潜在土壤侵蚀量(t), $USLE_x$ 为实际土壤侵蚀量(t)。

2.2.4 水源涵养

运用InVEST模型的“Annual Water Yield”模块进行评估,该模块以年均降水量、年均参考作物蒸散量、土壤的最大根系埋藏深度、植物可利用含水量和土地利用等数据为基础,计算每个栅格的产水量^[29,32],见公式(6)。

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (6)$$

式中, Y_x 为每个栅格的年产水量(m^3), AET_x 和 P_x 分别为栅格单元的年实际蒸散量(mm)和年平均降水量(mm)。

2.3 生态系统服务簇识别及保护空缺分析

SOM聚类分析法是一种可用于聚类分析的无监督的人工神经网络,能根据不同生态系统服务在空间上的共现相似性,将每个研究单元或次级流域分配到生态系统服务簇中^[20]。该模型反映了数据之间的本质联系,有效减少了主观性因素的干扰^[33]。本研究以1 km网格作为研究单元,提取福州都市圈2020年各项生态系统服务价值,并采用SOM聚类分析法识别福州都市圈1 km网格尺度上的生态系统服务簇。在进行SOM聚类分析之前,对生态系统服务进行标准化,使用R4.3软件中的“kohonen”包执行聚类分析。聚类分析完成后,在ArcGIS 10.8中进行空间制图,可视化福州都市圈生态系统服务簇的空间特征。

不同的簇数会形成不同质量的聚类,生态系统服务的最佳聚类数量通过Calinski-Harabasz指数确定^[16],见公式(7)。

$$CH = \frac{SS_B}{SS_w} \times \frac{(N - K)}{(K - 1)} \quad (7)$$

式中, CH 即Calinski-Harabasz值, SS_w 为组内平方和误差, SS_B 为组间平方和误差, K 为聚类数目, N 为样本数量。当组内平方和误差较小、组间平方和误差较大时,该指数越大,表明组内相似度高,组间差距较大,聚类效果较好。通过对2~12个聚类进行计算,确定最佳聚类个数为6(图2)。

根据SOM聚类结果得到生态系统服务簇的空间分布格局,选取生态系统服务综合功能良好的核心生态系统服务簇,将面积小于 $20 km^2$ 的斑块剔除,对比现有自然保护地边界范围,识别具有高生态系统服务价值且连续成片的自然保护地外区域作为保护空缺。

3 结果分析

3.1 福州都市圈生态系统服务空间分布特征

福州都市圈生态系统服务整体呈现“西北高,东南低”的分布格局,由西北向东南逐渐递减(图3)。由于城市建设集中在福州市和莆田市,该区域的生态系统服务相对较低^[34]。

生境质量和碳固存呈现相似的空间分布格局,生态系统服务高值区主要位于西南部和北部森林覆盖率高的山地丘陵地区,低值区分布在东南沿海一带的城镇地区。土壤保持服务高值区主要集中在西南和东北地势较为平缓的低丘陵地区,植被覆盖高有效缓解土壤流失,低值区分布在近河流、沿海地区,由于陡坡山区降雨冲刷、河流侵蚀导致土壤流失严重。水源涵养的高值区主要集中在东北部平原区、西北部和各处水库、河流,低值区分布于耕地和林地。

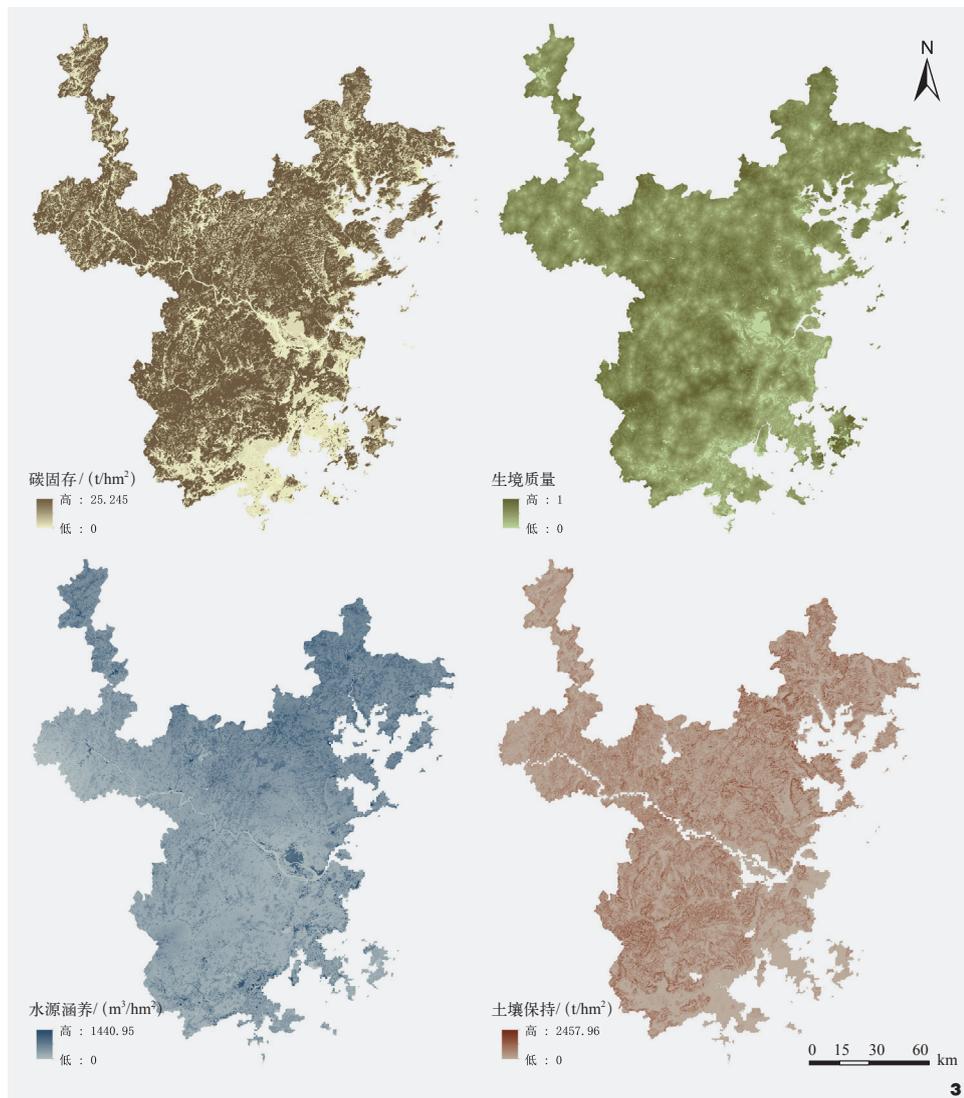


图3 生态系统服务空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution map of ecosystem services

与以往研究结果一致^[12,34], 由于宁德市和南平市持续提供生态补偿, 相较于其他地区生态系统服务价值高。福州市森林覆盖率高, 生境质量和碳固存服务总体较高。由于河流冲刷和侵蚀作用, 福州市和莆田市沿海地区的土壤保持能力较弱。水源涵养的格局分布与降水格局一致, 山地丘陵地区迎风坡水源涵养能力较强。

3.2 福州都市圈生态系统服务簇空间分布特征

通过SOM聚类分析, 将福州都市圈划分为6类生态系统服务簇。由图4及表2可知, B1簇主要分布于宁德市和南平市建阳区, 零散分布在福州市和莆田市, 面积占比6.72%, 用地类型多为建设用地和耕地。B2簇主要分布于福州市和莆田市, 零散分布于南平市延平区, 面积占比10.95%, 土地利用类型以耕地为主, 少量建设用地。B3簇集中分布在南平市延平区和碎片化分布在福州市和莆田市低丘陵地区, 面积占比21.20%, 用地类型以林地和草地为主, 地势平坦。B4簇集中分布于宁德市山地丘陵地区, 南平市建阳区、建瓯市低丘陵地区, 面积占比22.54%, 主要用地类型为草地和耕地。B5簇主要分布于莆田市和宁德市的高海拔山地丘陵地区, 零散分布于福州市, 面积占比11.94%, 用地类型以林地为主, 森林覆盖率高。B6簇主要分布于

表2 生态系统服务簇统计表
Tab. 2 Statistics table of ecosystem service bundles

分类 Classification	面积占比 / % Proportion of area	主要用地类型 Primary land use types	主要分布市县 Main distribution cities and counties	优势服务 Dominant services
B1	6.72	建设用地、耕地	宁德市、南平市建阳区	水源涵养
B2	10.95	耕地	福州市、莆田市	碳固存
B3	21.20	林地、草地	南平市延平区	生境质量、碳固存
B4	22.54	草地、耕地	宁德市、南平市	生境质量、碳固存、水源涵养
B5	11.94	林地、草地	莆田市、宁德市	生境质量、碳固存、土壤保持
B6	26.65	林地、草地	福州市、莆田市、南平市延平区	生境质量、碳固存

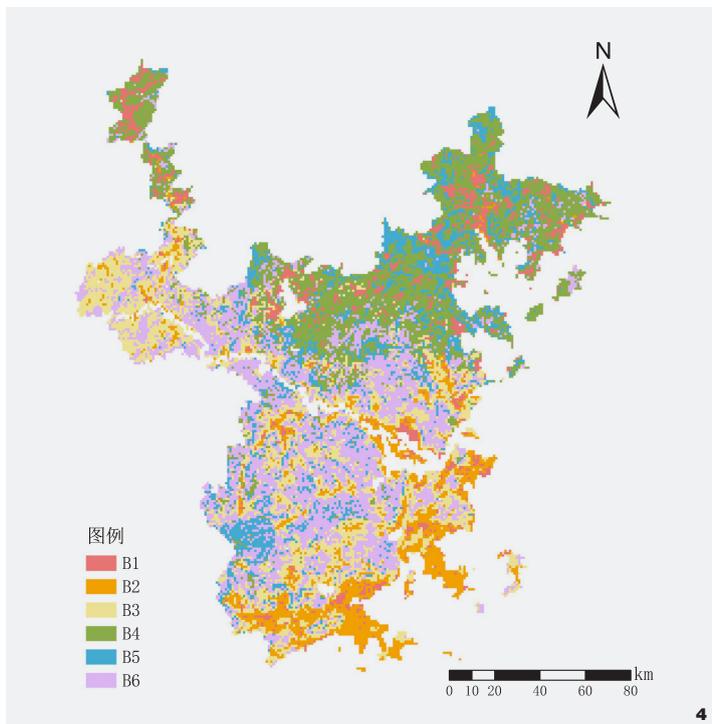


图4 生态系统服务簇空间分布图
Fig. 4 Spatial distribution map of ecosystem services bundles

福州市、莆田市和南平市延平区的低丘陵地区，面积占比26.65%，主要用地类型为林地和草地。

由聚类结果可以看出(图5)，B1簇以水源涵养服务为主，由于建设用地导致下垫面产生径流，所以此类区域水源涵养能力较高，其他生态系统服务低。B2簇以耕地和建设用地为主，整体生态系统服务低。B3簇以碳固存为主，生境质量较低，大面积的草地和林地能够提高区域内的固碳能力和生境质量，土壤保持服务弱。B4簇内4项生态

系统服务均有发展，以碳固存、生境质量和水源涵养为主，处于均值水平，由于低丘陵地区容易导致水土流失，土壤保持能力相对较低。B5簇兼具多项生态功能，碳固存、生境质量和土壤保持处于较高水平，水源涵养量处于较低水平，因林地和山地的综合作用，所以此类区域的生态系统价值高，而林地蒸散能力强导致水源涵养能力弱。B6簇区域内的林地和草地提供了较高的碳储量和生境质量，草地的土壤保持能力较低，林地和草地耗水量大，所以该区域内提供的水源涵养服务低。

福州市服务簇以B2、B3和B6簇为主，簇内碳固存服务较高，土壤保持服务相对较低，位于沿海地区的B2簇内水源涵养高于其他两类服务簇，土壤保持服务较高的B6簇主要位于福州市西北部，与以往研究一致^[12]。不同点在于以往研究中服务簇内的生境质量均较低，原因可能是生境质量相对于其他类型的生态系统服务来说不占优势。由于生态系统服务的权衡与协同作用，在同一空间中表现出异质性，B1、B2和B6簇没有同时体现4类生态系统服务，与以往研究一致^[17,33,35]。

3.3 福州都市圈生态保护空缺分析

由结果可知，B5簇为福州都市圈核心生态系统服务簇，同时综合了4类生态系统服务且生态价值较高。因此，将B5簇作为需要重点保护的区域，剔除20 km²以下的碎片斑块，得到B5簇面积为1 229 km²，叠加对比现有自然保护地情况分析福州都市圈的生态保护空缺，与现有自然保护地重叠面积749 km²，保护空缺面积480 km²，保护空缺率为1.85%。由表3可知，保护空缺区域主要位于海拔500 m以上的高山林地，保护空缺区域海拔200 ~ 500 m，占比31.51%，海拔500 m以上，占比62.98%。其中主要土地利用类型林地占比85.83%，草地占比10.60%。

从整体格局来看(图6)，根据保护空缺位置将福州都市圈保护

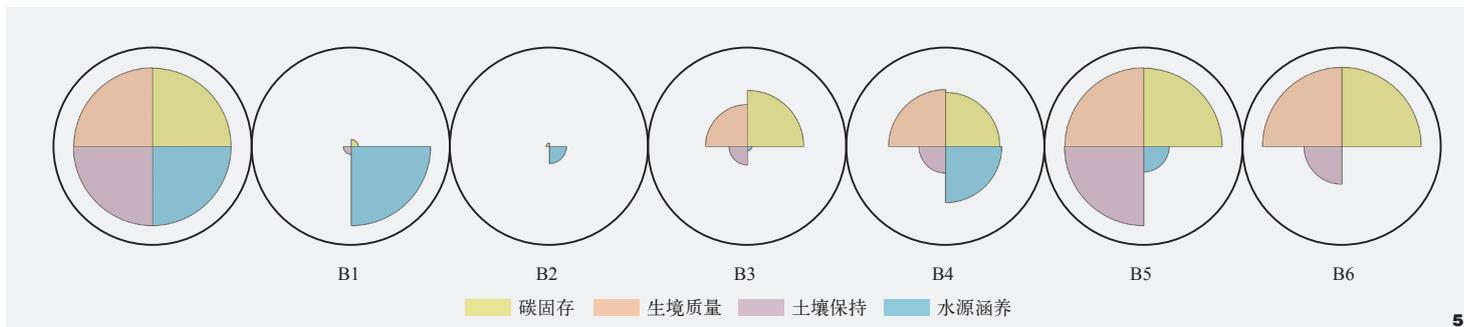


图5 生态系统服务簇结构
Fig. 5 Structure of ecosystem service bundles

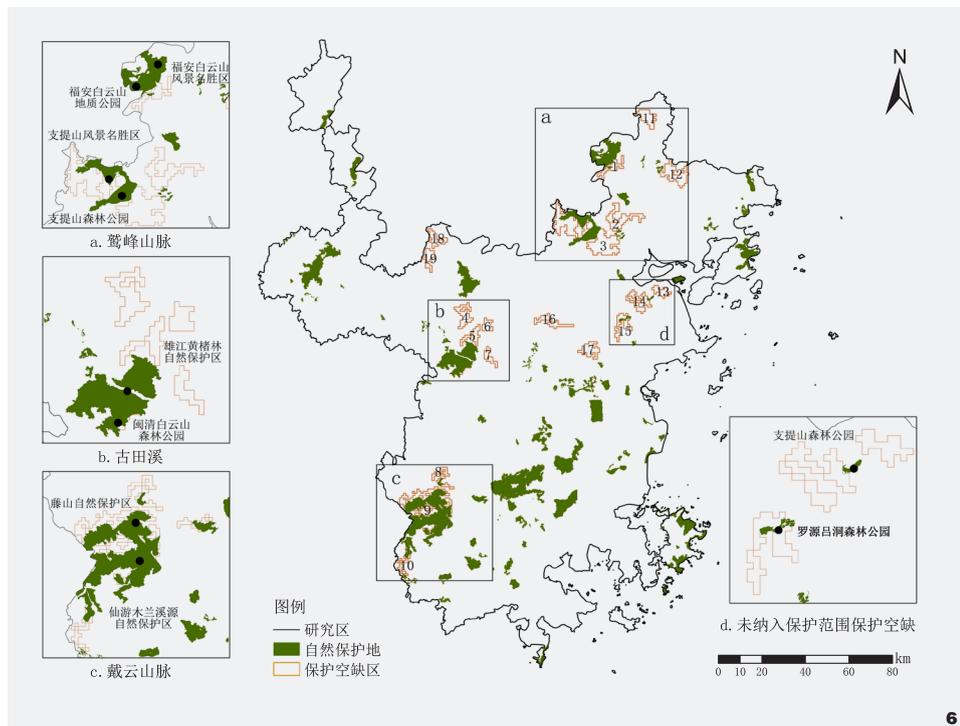


图6 福州都市圈生态保护空缺分布图
Fig. 6 Distribution map of ecological conservation gaps in Fuzhou metropolitan area

空缺区域分为保护地周边空缺和单独保护空缺两类(表3)。保护地周边空缺分布于鹭峰山脉(a区)的支提山国家森林公园、支提山省级风景名胜、福安白云山地质公园和福安白云山风景名胜区, 古田流域(b区)的

闽清白云山省级森林公园和雄江黄楮林国家级自然保护区, 戴云山脉中段(c区)的仙游木兰溪源省级自然保护区、藤山省级自然保护区。单独保护空缺沿线分布在岱江和交溪流域具体海拔及土地利用类型见表4。

表3 生态保护空缺统计表
Tab. 3 Statistical table of ecological conservation gaps

类型 Type	序号 Number	面积/km ² Area	市县 Cities and counties	类型 Type	序号 Number	面积/km ² Area	市县 Cities and counties
保护地周 边空缺	1	31.51	福安市	单独保护 空缺	11	40.00	福安市
	2	67.00	蕉城区		12	68.44	福安市
	3	199.36	蕉城区		13	23.00	蕉城区、罗源县
	4	43.00	古田县、闽清县		14	44.97	蕉城区、罗源县
	5	29.00	闽清县		15	38.31	罗源县、连江县
	6	22.00	闽清县		16	35.00	罗源县、闽侯县
	7	22.00	闽侯县		17	42.00	连江县
	8	30.64	永泰县		18	31.00	古田县
	9	92.88	永泰县、仙游县		19	28.00	古田县
	10	20.43	仙游县				

4 结论与讨论

4.1 结论

本研究以福州都市圈为例, 运用InVEST模型评估2020年生境质量、碳固存、土壤保持、水源涵养4项生态系统服务, SOM聚类识别6类生态系统服务簇, 分析其空间分布特征和不同生态系统服务簇的结构特征, 并基于此与现有自然保护地对比分析保护空缺。结果表明:

(1) 2020年福州都市圈生态系统服务呈现“西北高, 东南低”的空间格局, 由西北向东南逐渐递减, 中部生态系统服务价值低。生境质量和碳固存呈现相似的空间分布格局, 高值区主要位于莆田市和宁德市; 土壤保持服务高值区主要集中在莆田市和宁德市; 水源涵养的高值区主要集中在宁德市、南平市和各处水库、河流。

(2) 根据聚类结果将福州都市圈划分为6类生态系统服务簇: B1簇分布于宁德市、南平市建阳区, B2簇分布于福州沿海、莆田市和南平市延平区, B3簇分布于福州市和莆田市, B4簇分布于宁德市, B5簇分布于莆田市和宁德市, B6簇分布于莆田市和福州市。

(3) 福州都市圈核心生态系统服务簇为B5簇, 以生境质量、碳固存和土壤保持服务为主, 水源涵养服务较低, 综合生态价值高, 与生态系统服务高值分布区具有一致性, B4和B6簇生态系统服务价值相对较低, B1簇生态系统服务单一, B2簇生态系统服务低, 生态系统服务簇综合生态价值高的区域主要用地类型为林地和草地。

(4) 福州都市圈保护空缺区域主要分布于鹭峰山脉和戴云山脉的高海拔山地林地, 整体保护空缺面积为480 km², 保护空缺率为1.85%。

表4 生态保护空缺的分布海拔及土地利用类型统计表
Tab. 4 Statistical table of elevation and land use type of ecological conservation gap

海拔高度 /m Altitude	面积占比 /% Area proportion	土地利用类型 Land use type	面积占比 /% Area proportion
< 200	5.51	耕地	2.96
200 ~ 500	31.51	林地	85.83
500 ~ 1 000	49.07	草地	10.60
1 000 ~ 1 500	13.57	水域	0.32
> 1 500	0.34	建设用地	10.29

4.2 讨论

4.2.1 福州都市圈生态系统服务簇的空间异质性分析

福州都市圈生态系统服务簇的空间异质性在一定程度上取决于土地利用类型和地理条件。B3、B4、B5和B6簇的空间分布与林地、草地的空间分布一致，B1簇与B2簇与建设用地分布一致。不同土地利用类型的主导生态系统服务不同，从而影响生态系统服务簇的空间格局^[36-37]。福州都市圈的土地覆盖多以林地和草地为主，在水源涵养、固碳释氧方面能够提供更高的生态系统服务。此外，福州都市圈地处中国东南沿海地区，气候温暖湿润，雨量充足，为植被生长提供了充足条件，也为生境质量和碳储量服务提供良好的生态基础^[38]。福州都市圈综合生态价值良好的B3、B4、B5和B6簇往往分布在平均海拔200 m以上，B1和B2簇位于海拔200 m以下的冲积平原地区^[12]。生态系统服务簇在不同海拔梯度上的空间分布聚集特征也说明地形是影响空间异质性的主要因素之一。有研究表明地形往往是影响植被生长和分布的重要因子，进而影响生态系统服务空间分布^[39]。

4.2.2 福州都市圈生态保护空缺优化建议

福州都市圈作为培育型都市圈，其鹭峰山脉—戴云山脉和近岸海域形成了天然的

生态安全屏障。《福州都市圈发展规划》明确设立茫荡山—闽江中游综合保育区、莆—仙—永—德综合保育区、山仔水库重要饮用水源保护区、闽东诸河中游峡谷土壤保持区、闽江口—三都澳生物多样性保护区、环兴化湾—江阴湾土壤保持与风沙控制区等6片重要生态功能区。基于上文分析，福州都市圈a区保护空缺同时位于闽东诸河中游峡谷土壤保持区和山仔水库重要饮用水源保护区，这些保护空缺的各项生态系统服务均较高。都市圈发展规划仅是建议建立单一生态保护功能区，尚未提出针对性的复合保育措施。建议增设生态系统服务综合保育区，对a区进一步提出生态保护与恢复措施。此外，d区保护空缺未纳入保护范围，建议应调整距离最近的宁德—罗源综合保育区边界，将d区纳入保护。

5 结语

本研究基于福州都市圈生态系统服务分析福州都市圈的生态系统服务簇，以核心生态服务簇作为重点保护区域与现有自然保护地对比分析保护空缺，为福州都市圈区域生态保护和自然保护地格局优化提供思路。本次研究从生态系统服务簇的角度分析生态保护空缺，相较于叠加单一生态系统服务高值得到的重点保护区域，该方法考虑到了生态

系统服务之间在空间上的相互作用关系及同一空间内多种生态系统服务的综合功能。但是本研究只选取生态系统服务簇作为福州市都市圈保护空缺分析的指标，且受限于数据获取，未分析生态红线的空间叠加情况，保护空缺分析存在一定的局限性。后续研究应进一步结合都市圈的生态保护目标，确定生态保护的综合指标，并对生态保护格局优化提出更准确的建议。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 汪光焘, 李芬, 刘翔, 等. 新发展阶段的城镇化新格局研究——现代化都市圈概念与识别界定标准[J]. 城市规划学刊, 2021(2): 15-24.
- [2] SCOTT A J. Globalization and the Rise of City-regions[J]. European Planning Studies, 2001, 9(7): 813-826.
- [3] ROBERT C, RALPH D, RUDOLF D G, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J]. Nature, 1997, 387(6630): 253-260.
- [4] 郝梦妍. 基于服务簇的郑州市都市圈核心区生态功能区划及总体空间结构优化研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2024.
- [5] 王悦露, 董威, 张云龙, 等. 基于生态系统服务的生态安全研究进展[J]. 生态学报, 2023, 43(19): 7821-7829.
- [6] XIAO R, LIN M, FEI X, et al. Exploring the Interactive Coercing Relationship Between Urbanization and Ecosystem Service Value in the Shanghai-Hangzhou Bay Metropolitan Region[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 119803.
- [7] XING L, XUE M, HU M. Dynamic Simulation and Assessment of the Coupling Coordination Degree of the Economy-Resource-Environment System: Case of Wuhan City in China[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 230: 474-487.
- [8] 刘阳, 梁淑榆, 邹天娇, 等. 基于生态系统服务功能的自然保护区优先保护与保护空缺分析——以北京市密云区为例[J]. 生态城市与绿色建筑, 2018(4): 68-71.
- [9] 周俊鑫, 蔡梅芳, 郭福生, 等. 江西省赣州市土壤保持和水源涵养时空特征及保护空缺[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 413-420.
- [10] 廖凌云, 傅田琪, 吴涌平, 等. 基于生态系统服务评估

- 的市域自然保护地体系优化: 以福州市为例[J]. 风景园林, 2022, 29(07): 80-85.
- [11] 刘颂, 谌诺君, 董宇翔. 基于生态系统服务簇的生态功能区划及管控策略研究——以嘉兴市为例[J]. 园林, 2022, 39(3): 21-29.
- [12] 宋家鹏, 陈松林. 基于生态系统服务簇的福州市生态系统服务格局[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 1045-1053.
- [13] RAUDSEPP-HEARNE C, PETERSON G D, BENNETT E M. Ecosystem Service Bundles for Analyzing Tradeoffs in Diverse Landscapes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [14] SAIDI N, SPRAY C. Ecosystem Services Bundles: Challenges and Opportunities for Implementation and Further Research[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(11): 113001.
- [15] BENNETT E M, PETERSON G D, GORDON L J. Understanding Relationships Among Multiple Ecosystem Services[J]. Ecology Letters, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [16] 张天翼, 潘洪义, 姚材仪, 等. 基于服务簇的沱江流域生态系统服务权/协同关系演变[J]. 生态与环境学报, 2024, 40(10): 1287-1300.
- [17] LIU Z, HUANG Q, ZHOU Y, et al. Spatial Identification of Restored Priority Areas Based on Ecosystem Service Bundles and Urbanization Effects in a Megalopolis Area[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 308: 114627.
- [18] 祁宁, 赵君, 杨延征, 等. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权/协同[J]. 生态学报, 2020, 40(9): 2827-2837.
- [19] 张鑫, 张丹, 张广森, 等. 关中平原城市群生态系统服务时空特征及生态功能区划分[J]. 干旱区地理, 2024, 47(09): 1587-1595.
- [20] 徐彩瑶, 崔铭焜, 王宁, 等. 浙江省生态保护修复优先区识别[J]. 生态学报, 2024(8): 1-18.
- [21] 蒋红波, 覃盟琳, 王政强, 等. 基于生态系统服务簇评价的长沙市生态修复优先区识别[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(4): 1325-1333.
- [22] 福建省人民政府.《福州都市圈发展规划》印发[EB/OL]. (2021-06-27)[2024-05-11]. https://www.fujian.gov.cn/zwgk/zxwj/szfwj/202107/t20210709_5644123.htm
- [23] 马舒意, 黄小兰, 黄晶. 环鄱阳湖城市群生态系统服务价值时空变化及权/协同关系[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 391-400.
- [24] 刘昊翔, 曹雪莹, 张晨晨. 生态系统服务价值评估的研究进展[J]. 绿色科技, 2024, 26(3): 273-280.
- [25] 李丽, 王心源, 骆磊, 等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1233-1245.
- [26] 宋家鹏. 土地利用转型背景下的生态系统服务格局与过程研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2022.
- [27] WU L, SUN C, FAN F. Multi-criteria Framework for Identifying the Trade-offs and Synergies Relationship of Ecosystem Services Based on Ecosystem Services Bundles[J]. Ecological Indicators, 2022, 144: 109453.
- [28] 黄宇斌. 基于生境质量评估的厦门市绿色空间格局优化研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022.
- [29] 肖微. 基于InVEST模型的闽东南地区生态系统服务功能评估[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- [30] 周文佐, 刘高焕, 潘剑君. 中国土壤有效含水量分布(英文)[J]. Journal of Geographical Sciences, 2005(1): 5-14.
- [31] 潘美慧, 伍永秋, 任斐鹏, 等. 基于USLE的东江流域土壤侵蚀量估算[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2154-2164.
- [32] 贾芳芳. 基于InVEST模型的赣江流域生态系统服务功能评估[D]. 北京: 中国地质大学, 2014.
- [33] 戴菲, 江佩宜, 文晨. 基于生态系统服务簇分析的城市生态空间碳汇能力综合提升[J]. 风景园林, 2023, 30(11): 96-104.
- [34] 王瑞祥, 叶青, 郭晓佳. 福州都市圈生态系统服务价值时空演变及生态—经济协调发展[J]. 地球科学与环境学报, 2024, 46(2): 211-228.
- [35] 林静, 江洪, 岳辉, 等. 长汀县生态系统服务权/协同关系[J]. 海南大学学报(自然科学版), 2024, 42(03): 301-311.
- [36] 常耀文, 吴迪, 李欢, 等. 基于自组织映射神经网络的淮河流域生态系统服务簇时空变化特征[J]. 生态学报, 2024, 44(11): 4544-4557.
- [37] 王世豪, 黄麟, 徐新良, 等. 粤港澳大湾区生态系统服务时空演化及其权/协同特征[J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8403-8416.
- [38] 董丽, 邢小艺. 气候变化对城市植被的影响研究综述[J]. 风景园林, 2021, 28(11): 61-67.
- [39] 高丽萍. 基于土地利用变化的滇中城市群生态系统健康演化特征及影响因素研究[D]. 昆明: 云南财经大学, 2024.