

DOI: 10.20103/j.stxb.202308141755

毛倩鸿, 田雅丝. 权衡协同视角下城市边缘区生态系统服务优化研究——以苏州市为例. 生态学报, 2024, 44(15): 6567-6583.

Mao Q H, Tian Y S. Optimization of ecosystem services in urban fringe from the perspective of trade-offs and synergy: A case study of Suzhou City. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6567-6583.

# 权衡协同视角下城市边缘区生态系统服务优化研究 ——以苏州市为例

毛倩鸿, 田雅丝\*

苏州大学建筑学院城乡规划系, 苏州 215123

**摘要:** 城市边缘区是城乡之间的过渡区域, 具有人地关系复杂、城乡冲突尖锐的特征, 其生态系统服务 (Ecosystem Services, ESs) 功能呈现权衡或协同的复杂相互作用。研究城市边缘区 ESs 的相互关系、基于功能协调目的对其进行优化, 对于缓解人地关系矛盾、实现乡村振兴和促进区域可持续发展具有重要意义。以苏州市为例, 在识别城市边缘区基础上, 选取粮食供给、产水量、碳储存、土壤保持、生境质量、水质净化、文化服务 7 种关键 ESs 进行评估, 结合 Spearman 相关性分析和自组织网络方法探究 ESs 权衡协同关系及其时空演变特征, 最后对城市边缘区进行分类及提出优化策略。结果表明: 1) 苏州市 918 个村庄被识别为城市边缘区; 2) 生境质量与粮食供给存在极显著的权衡关系 ( $R_{(xy)} = -0.77$ ), 生境质量与文化服务存在极显著的协同关系 ( $R_{(xy)} = 0.95$ ), 2010—2022 年间 ESs 间的关系以权衡效应为主, 协同效应较少, 整体权衡关系呈减弱趋势; 3) 根据聚类分析结果, 可将研究区分为 5 类生态系统服务簇, 分别为生态服务协调簇、生态服务失调簇、生态保育簇、生态游憩休闲簇以及生态风险加剧簇; 4) 提出了促进城市边缘区 ESs 协调, 有助于自然-经济-社会复合生态系统可持续发展的优化策略。

**关键词:** 城市边缘区; 生态系统服务; 权衡协同关系; 时空演变; 优化研究

## Optimization of ecosystem services in urban fringe from the perspective of trade-offs and synergy: a case study of Suzhou City

MAO Qianhong, TIAN Yasi\*

Department of Urban and Rural Planning, School of Architecture, Soochow University, Suzhou 215123, China

**Abstract:** Urban fringe is a transitional area between urban and rural areas, which has the characteristics of complex relationship between man and land and sharp conflict between urban and rural areas, and its ecosystem services (ESs) function presents complex interaction of trade-offs or synergies. It is of great significance to study the interrelationship between ESs in urban fringe areas and optimize them for the purpose of functional coordination, which will alleviate the human-land contradiction, realize rural revitalization and promote regional sustainable development. Taking Suzhou as an example, on the basis of identifying the urban fringe areas, this study selected seven key ESs, including food production, water yield, carbon storage, soil conservation, habitat quality, water purification, and cultural service. Combining Spearman correlation analysis and self-organized network method, we explored the trade-off-synergy relationship of ESs and its spatial-temporal evolution characteristics, and classified and proposed optimization strategies for urban fringe areas. The results are as follows: 1) 918 villages in Suzhou are identified as urban fringe areas; 2) There is a significant trade-offs relationship between habitat quality and food production ( $R_{(xy)} = -0.77$ ), and there is a significant synergistic relationship

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目 (42371200); 国家自然科学基金青年基金 (41901203); 江苏省高等学校基础科学 (自然科学) 研究面上项目 (23KJB170023)

**收稿日期:** 2023-08-14; **网络出版日期:** 2024-05-24

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ystian@suda.edu.cn

between habitat quality and cultural service ( $R_{(xy)} = 0.95$ ). The relationship between ecosystem services is dominated by trade-offs effect, with less synergistic effects, and the overall trade-offs relationship shows a weakening trend from 2010 to 2022; 3) According to the results of cluster analysis, the study area can be divided into five types of ecosystem service bundles, ecosystem service coordination bundle, ecosystem service incoordination bundle, ecosystem conservation bundle, ecosystem recreation bundle, and ecosystem risk aggravation bundle. From 2010 to 2022, the spatial pattern of ecosystem conservation bundle and ecosystem recreation bundle in the urban fringe area of Suzhou is relatively stable, and the evolution trajectory mainly occurs between ecosystem service coordination bundle, ecosystem service incoordination bundle and ecosystem risk aggravation bundle. The ecosystem risk aggravation bundle have the greatest changes from 2010 to 2022, which are closely related to the development rate of urbanization; 4) The optimization strategy is put forward to promote the coordination of ESs in urban fringe areas that contribute to the sustainable development of complex socio-economic-natural ecosystems. For ecosystem service coordination bundle, dynamically monitor ecological spatial changes to maintain the synergistic development of ESs. For ecosystem service incoordination bundle and ecosystem risk aggravation bundle, the main focus is on the management of short boards of ESs, and the ability of ecosystems to self-regulate and balance is enhanced through ecological remediation and restoration. For ecosystem conservation bundle, conservation should be strengthened, and development should be strictly controlled and restricted. For ecosystem recreation bundle, it is necessary to improve the blue-green infrastructure network, so as to realize the win-win situation between ecological protection and economic development.

**Key Words:** urban fringe; ecosystem services; trade-offs-synergy relationship; temporal and spatial evolution; optimization research

城市边缘区是城乡之间的过渡区域,作为距城市最近的生态腹地,拥有较丰富的土地资源和生态环境基础,在提供生态系统服务(Ecosystem Services, ESs)和优化城镇格局方面扮演重要角色<sup>[1]</sup>。受中心城市对外扩张以及乡村城镇化的双重作用,城市边缘区生态资源被侵占,人口、产业集聚等社会经济活动产生大量污染等负外部影响,生态环境问题突出,具有人地关系复杂、空间冲突尖锐的特征。有关城市边缘区生态方面的研究日臻丰富,如景观格局分析<sup>[2]</sup>、生态脆弱性<sup>[3]</sup>、生境服务评估<sup>[4]</sup>等,为本文研究奠定认知基础,但仍存在以下不足:①以往研究在空间范围划定上,往往依照相关上位规划的行政边界和道路为标准,将其作为城市中心的附属区域,未对城市边缘区进行单独的评价和识别,这种偏定性的方法具有较大主观性,较难与城市边缘区动态发展的速度同步,容易忽略潜在的生态环境挑战。②研究内容上缺乏对城市边缘区 ESs 复杂交互作用的分析。人们对土地利用干扰方式的多样性及生态系统本身的高度动态复杂性叠加,使得特定生态系统中的不同 ESs 呈现活跃的演变态势以及复杂的相互作用关系,常表现为此消彼长的权衡关系和相互增益的协同关系<sup>[5-6]</sup>。在人地冲突的背景下,城市边缘区的 ESs 在博弈过程中往往呈现出多样化、复杂化、耦合性的权衡失调特征,难以达到最优平衡,不利于自然—经济—社会系统的可持续发展。因此,有必要把城市边缘区作为独立地理单元进行识别,研究 ESs 的复杂相互作用、基于功能协调目的协同优化城市边缘区 ESs,对于缓解人地关系矛盾和促进区域可持续发展具有重要意义。

近年来,国内外学者对 ESs 权衡协同关系进行了广泛研究,研究对象多聚焦于国家、生态功能区、流域或子流域、城市群或省市等中宏观尺度<sup>[7-12]</sup>,研究方法上运用相关性分析、主成分分析、均方根差、贝叶斯网络等多种方法<sup>[13-14]</sup>分析 ESs 权衡协同关系的变化特征及影响机制,研究应用上使用 FLUS<sup>[15]</sup>、PLUES<sup>[16]</sup>等模型模拟预测未来不同情景下的 ESs 相互作用关系演变并进行优化。但现有研究大多关注某一单一类型优化或两两 ESs 之间的权衡,对多个 ESs 间的相互依赖性关注较少。生态系统服务簇(Ecosystem Service Bundles, ESB)指共现于某一时空尺度上重复出现的多种类型的生态系统服务组合<sup>[17]</sup>,为表征多种 ESs 复杂交互作用提供科学视角<sup>[18]</sup>。目前,已有学者基于 ESB 探讨 ESs 相互作用关系,研究方法上大多采用 K-means 聚类分

析<sup>[19]</sup>、自组织网络分析<sup>[20]</sup>, 研究尺度上集中于城市<sup>[18]</sup>、省域<sup>[19]</sup>、流域<sup>[21]</sup>、城市群<sup>[22]</sup>等大中尺度, 对城市边缘区的ESB分布格局及动态演变关注较少。村域是国土空间生态管控的最小单元, 城市边缘区的村庄在城市化进程中往往面临不同阶段的复杂人地矛盾, 其生态困境呈现时空差异性。因此, 识别村域尺度ESB的时空格局, 辨析不同村庄主导ES及其权衡特征的演变规律, 有助于为城市边缘区ESs协同优化提供差异化和精细化的分析依据和决策支持, 促进乡村振兴和城乡可持续发展。

在长三角城市群区域一体化的发展背景下, 苏州市作为高速发展的前沿城市, 建设用地扩张, 城市边缘区大面积生态用地被挤占, 具体表现在交通基础设施的快速建设切断了生态廊道的物质流、能量流和信息流, 斑块趋于破碎化, 耕地流失, 工业污染的潜在风险加剧, 生物多样性减少、ESs退化等生态问题极具代表性。结合相关学者研究<sup>[23-24]</sup>和苏州市城市边缘区主要生态问题, 本研究定量测度2010和2022年苏州市城市边缘区粮食供给、土壤保持、碳储存、产水量、生境质量、水质净化与文化服务7种关键服务的时空变化特征; 运用Spearman相关性分析方法定性判别各服务之间权衡协同关系; 以村级尺度为评价单元, 基于自组织网络方法识别ESB, 分析城市边缘区主导ESs及协调特征的时空演变规律并提出优化策略。图1为本研究的研究框架图。

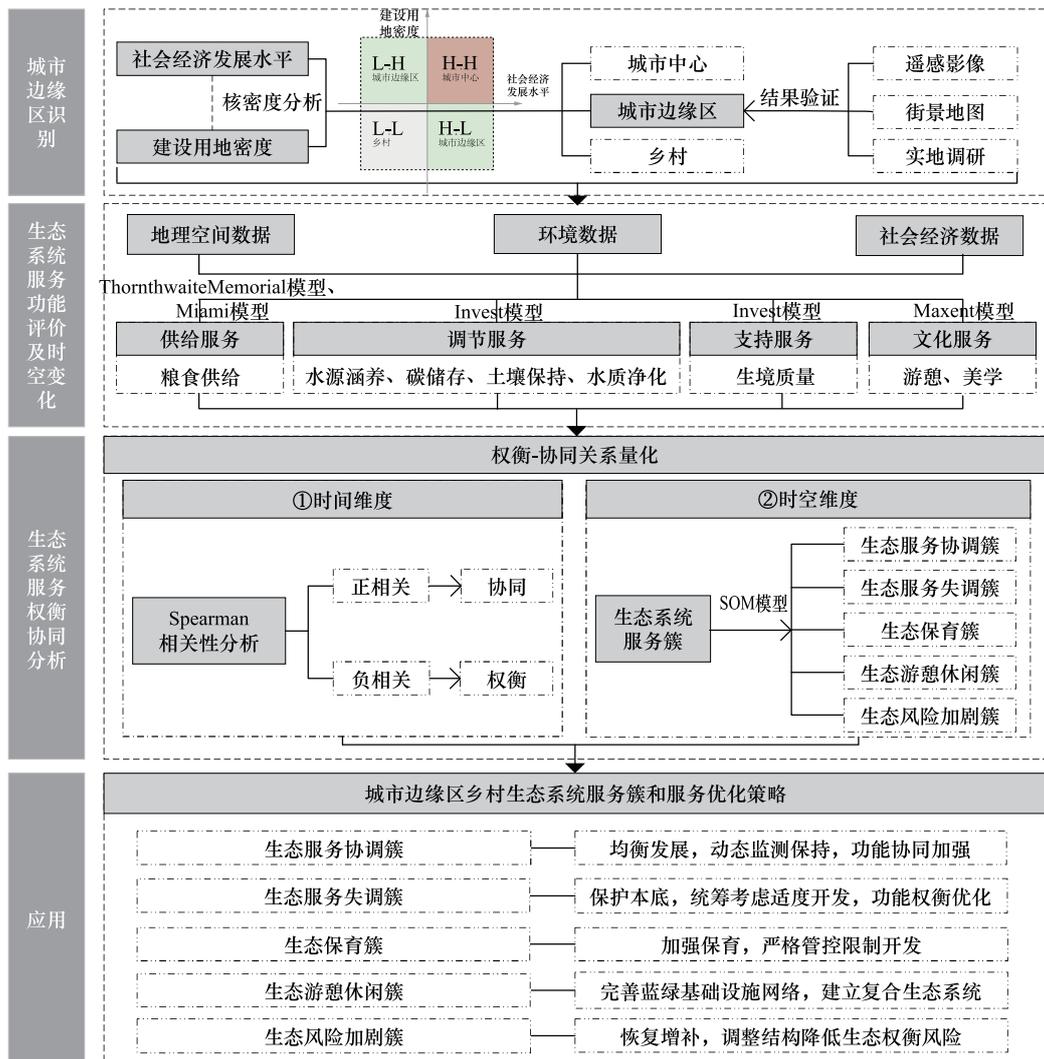


图 1 研究框架图

Fig.1 The technical flow chart

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

苏州市是江苏省的地级市,下辖 6 个区和 4 个县级市,截至 2022 年末,地区生产总值达到 23958.3 亿元,经济发展水平进入全国 GDP20 强。苏州市常住人口为 1291.1 万,城镇化率达 74.42%,是典型的特大城市之一。受上海等周边城市辐射带动的外溢效应驱动,其社会经济发展亟需大量建设用地。在城市中心土地资源较为饱和及市场化的驱动下,人口、产业等要素不断转移至城市边缘区,城市边缘区聚集形成大量高新技术、商贸金融及工业等产业园区,在城市的经济社会发展中占据着愈发重要的地位。与此同时,城市化的快速推进也导致了景观的破碎化<sup>[25]</sup>,工业用地的大面积开发蚕食着大量生态用地,在加剧碳排放的同时造成生境质量退化、土壤质量恶化、水质污染等问题,对苏州市 ESs 的权衡及退化产生一定影响。人地矛盾不断激化,已经成为制约城市可持续发展的瓶颈之一,因此本研究选择苏州市作为案例研究区具有典型性、代表性、必要性。

### 1.2 数据来源与处理

本研究使用的数据包括:

地理空间数据:2010 年和 2022 年土地利用数据集分别来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/>) 和 Esri Sentinel-2 Land Cover Explorer (<https://livingatlas.arcgis.com/>),采用一级分类结果,包括耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,空间分辨率 30m;数字高程模型(DEM)数据空间分辨率 30m,来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn/>);土壤属性数据来源于世界土壤数据库(HWSD),土壤分类系统为 FAO-90;道路交通、水系、行政区划等数据来源于 Open street map (<http://www.openstreetmap.org/>);

②气象数据:2010 年和 2022 年的气象数据集,包括海拔、气温、降雨量、日照时数等来自于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>),利用 Kriging 插值法获取栅格图层;

③社会经济数据:来源于苏州市统计年鉴等。其中电子地图兴趣点 POI (Point of Interest) 数据通过 Python 3.11 从百度开放平台服务 (<http://lbsyun.baidu.com/>) 中收集。

以上所有数据重采样输出栅格分辨率为 30m×30m。在获得栅格尺度测算结果的基础上,本研究以行政村为基础分析单元,采用 ArcGIS 10.2 分区统计工具分别计算各行政村边界范围内 ESs 平均值,以此表征该村 ESs 供给能力。

### 1.3 研究区土地利用分析

苏州市市域总面积 8657.32km<sup>2</sup>,平原、水域、丘陵分别占 55%,42%,3%。如图 2 所示,2010 年土地利用类型以水域和耕地面积为主,占比为 37.1%、34.6%,林地较少,主要分布在西南部的东山、西山和西北部的虞山。建设用地不断从城市中心扩张,蔓延至城市边缘区,呈现大分散小集中结构,其显著变化主要发生在苏州市北部和南部,到 2022 年建设用地约占 40.4%,增幅为 56.2%。此外,耕地占比下降了 16%,成片式分散分布在城市外围地区,水域呈现大分散大组团、条带式多样化分布,与其他用地类型之间的嵌入耦合关系较为密切。

2010—2022 年苏州市土地利用变化矩阵如表 1 所示。2010—2022 年苏州市各类土地利用类型中,相互转化主要发生在耕地、水域和建设用地之间,耕地面积呈现出最大化的下降趋势,其中耕地转向水域的面积为 313km<sup>2</sup>,转向林地和草地的面积相似,为 50km<sup>2</sup>左右。建设用地大幅度增加,其中生态用地(耕地、林地、草地和水域)转为建设用地的面积达到 1542.8km<sup>2</sup>,占 2022 年总建设用地的 44.2%,成为其主要来源。林地、草地和未利用地的面积有所增加,但增长幅度远小于建设用地。基于苏州市土地利用转移分析,近年来苏州市呈现建设用地快速扩张趋势,且显著以牺牲生态用地为代价。这种土地利用转变对区域 ESs 产生较大负面效应,尤其建设用地扩张往往发生在城市边缘区,这将对边缘区村庄的可持续发展产生重要影响。因此,亟需进

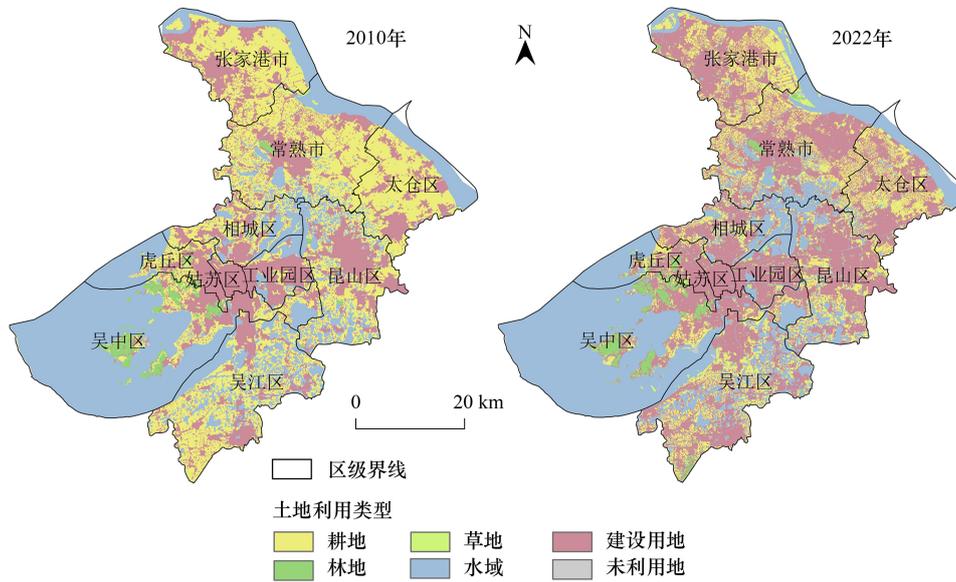


图2 研究区位置及其 2010 年和 2022 年土地利用/覆被特征

Fig.2 Location of the study area and its land use/cover characteristics in 2010 and 2022

一步聚焦城市边缘区,分析其在城市化进程中 ESs 权衡协同关系的时空演变,明晰其潜在的生态权衡风险挑战,有利于为生态管控策略提供决策依据。

表 1 2010—2022 年苏州市土地利用变化矩阵

Table 1 2010—2022 land use change matrix for Suzhou

| 土地利用类型<br>Land use type | 2022 年                   |              |                 |                  |                              |                            | 总计<br>Total |
|-------------------------|--------------------------|--------------|-----------------|------------------|------------------------------|----------------------------|-------------|
|                         | 耕地<br>Cultivated<br>land | 林地<br>Forest | 草地<br>Grassland | 水域<br>Water area | 建设用地<br>Construction<br>land | 未利用地<br>Unutilized<br>land |             |
| 2010 年 耕地               | 1247.58                  | 55.8(3.20)   | 50.17(2.87)     | 313(17.93)       | 1324.01(75.85)               | 2.58(0.15)                 | 2993.14     |
| 林地                      | 8(12.98)                 | 123.97       | 6.98(11.32)     | 12.36(20.05)     | 34.22(55.52)                 | 0.08(0.13)                 | 185.61      |
| 草地                      | 5.68(30.29)              | 3.32(17.71)  | 1.52            | 4.34(23.15)      | 5.38(28.69)                  | 0.03(0.16)                 | 20.27       |
| 水域                      | 198.32(45.37)            | 12.51(2.86)  | 36.52(8.35)     | 2775.8           | 179.19(40.99)                | 10.58(2.42)                | 3212.92     |
| 建设用地                    | 140.02(48.07)            | 17.44(5.99)  | 39.79(13.66)    | 92.5(31.76)      | 1945.94                      | 1.52(0.52)                 | 2237.21     |
| 未利用地                    | 0.6(7.40)                | 0.68(8.38)   | 0.6(7.40)       | 1.29(15.91)      | 4.94(60.91)                  | 0.06                       | 8.17        |
| 总计                      | 1600.2                   | 213.72       | 135.58          | 3199.29          | 3493.68                      | 14.85                      | 8657.32     |

表中( )外数据表示土地利用/覆被类型转换面积, km<sup>2</sup>; ( )内数据表示转出面积占总转出面积的比例, %

## 2 研究方法

### 2.1 城市边缘区识别

借鉴已有研究<sup>[26—27]</sup>,使用社会经济发展水平和建设用地密度对城市边缘区进行识别。用国内生产总值(Gross Domestic Product, GDP)和人口密度两个指标表征社会经济发展水平,将社会经济发展水平、建设用地密度进行核密度分析并叠加,通过高低值生成四象限图,其中第二象限 L-H 和第四象限 H-L 为城市边缘区(图 3)。在此基础之上,利用 ArcGIS 随机取点工具,以随机点坐标代入实景地图,结合遥感影像及实地调研确认是否与识别预期结果相符,使用总体精度和 Kappa 系数检验识别结果,由此验证识别方法合理性及结果准确性。

伴随城市扩张过程,城乡空间结构始终处于较为活跃的演变态势,使得城市边缘区的空间范围也随区域

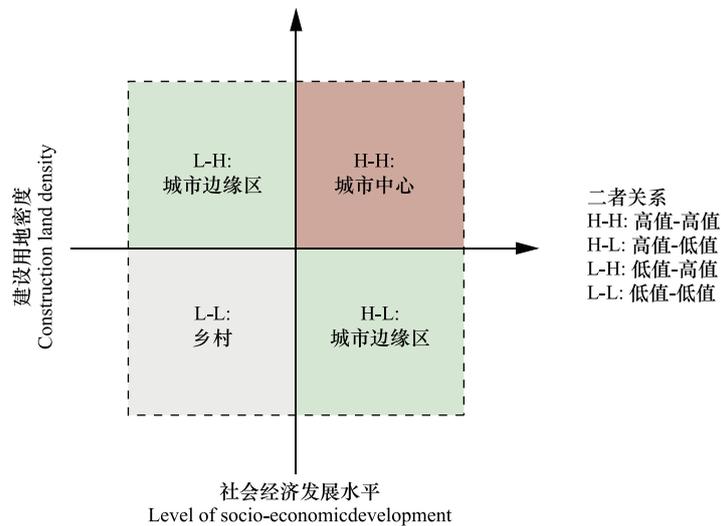


图 3 基于四象限图的城市边缘区识别

Fig.3 Identification of urban fringe based on four-quadrant graph

社会经济的不断发展而变化。鉴于本研究重点关注城市边缘区内 ESs 权衡协同关系的演变,而非城乡空间结构变化对 ESs 相互关系的影响,因此将研究区域进行如下限定:本研究以现状行政区划界线为准,不考虑行政区划边界变更的影响,并以研究终止年识别的城市边缘区空间范围为最大研究边界,将研究区域定义为研究时段内持续为城市边缘区的地区以及从乡村演变为城市边缘区的地区(图 4)。

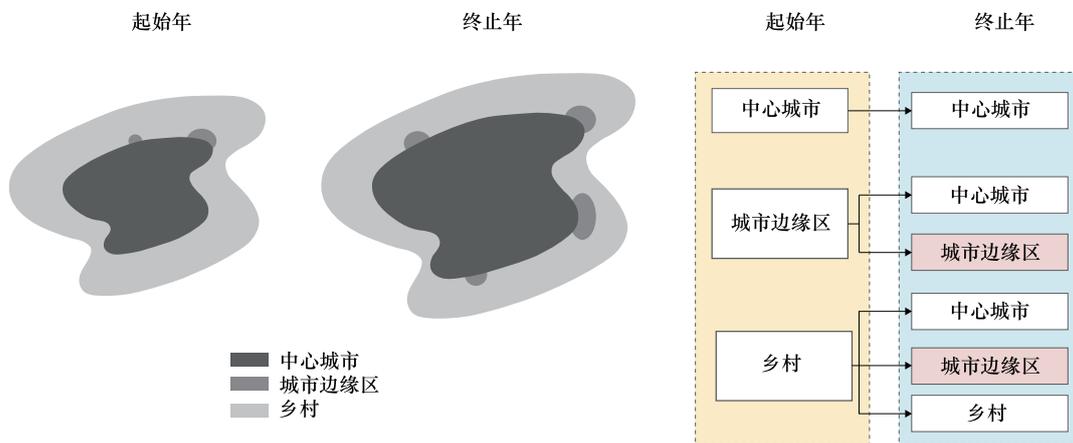


图 4 城乡空间结构发展示意图

Fig.4 Schematic diagram of urban-rural spatial structure development

## 2.2 生态系统服务估算

考虑城市边缘区人地关系特征,本研究选择粮食供给、产水量、碳储存、土壤保持、生境质量、水质净化、文化服务 7 种关键 ESs,以此探究城市边缘区 ESs 的相互作用关系。

### (1) 粮食供给

利用 Thornthwaite Memorial 模型和 Miami 模型相结合计算标准气候生产潜力<sup>[28]</sup>,综合土地自然质量、基础设施、限制条件等因素量化修正标准气候生产潜力,得到综合生产潜力以表征粮食供给服务值<sup>[29]</sup>。

Miami 模型公式为:

$$W_T = 30000 / (1 + e^{1.315 - 0.119T}) \tag{1}$$

$$W_R = 30000 / (1 - e^{-0.000664R}) \quad (2)$$

Thornthwaite Memorial 模型公式为:

$$W_v = 30000 / (1 - e^{-0.0009695(v-20)}) \quad (3)$$

$$V = 1.05R / [1 + (1.05R/L)^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$L = 300 + 25T + 0.05 T^3 \quad (5)$$

$$W = \min(W_T, W_R, W_V) \quad (6)$$

$$Y_i = W_i \times K_i \quad (7)$$

式中,  $T$  为年平均气温 ( $^{\circ}\text{C}$ );  $R$  为年降水量 (mm);  $L$  为年平均最大蒸散量 (mm);  $V$  为年平均实际蒸散量 (mm);  $W_T$ 、 $W_R$ 、 $W_V$  分别为年平均气温、年降水量和蒸散量决定的植被生产潜力 ( $\text{kg hm}^{-2} \text{a}^{-1}$ );  $W$  为研究区域的标准气候生产潜力。 $Y_i$  为地块  $i$  的综合生产潜力;  $W_i$  为研究区域的标准气候生产潜力;  $K_i$  为地块  $i$  的生产潜力综合修订系数。

## (2) 土壤保持

本文采用修正通用土壤流失方程 (RUSLE) 来估算土壤保持量<sup>[30]</sup>, 计算公式如下:

$$SC = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (8)$$

式中,  $SC$  为土壤保持量 ( $\text{t/km}^2$ );  $R$  为降雨侵蚀力因子 ( $\text{MJ mmhm}^{-2}\text{h}^{-1}\text{a}^{-1}$ );  $K$  为土壤可蚀性因子 ( $\text{t hMJ}^{-1}\text{mm}^{-1}$ );  $C$  为植被覆盖因子, 无量纲;  $P$  为水土保持因子, 无量纲;  $LS$  为坡长坡度因子, 无量纲, 以上因子详细计算公式参考文献<sup>[31]</sup>。由 InVEST 模型自动计算。

## (3) 产水量

采用 InVEST 模型产水模块评估产水量, 基于水平衡原理, 将产水量定义为降水量减去蒸散量。计算公式如下:

$$Y_{(xj)} = \left(1 - \frac{\text{AET}_{(xj)}}{P_{(x)}}\right) \times P_{(x)} \quad (9)$$

式中,  $Y_{(xj)}$  为  $j$  类土地利用类型  $x$  栅格上的年产水量 (mm);  $\text{AET}_{(xj)}$  为  $j$  类土地利用类型  $x$  栅格上的年实际蒸散量 (mm);  $P_{(x)}$  是  $x$  栅格上的年降雨量 (mm); 利用栅格面积和  $Y_{(xj)}$  的乘积再换算得到栅格上最终产水量 ( $\text{m}^3$ )。

## (4) 碳储存

利用 InVEST 模型的碳储量模块对碳储存服务总量进行计算, 公式如下:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} \times C_{\text{below}} \times C_{\text{soil}} \times C_{\text{dead}} \quad (10)$$

式中,  $C_{\text{tot}}$  为总碳储量 ( $\text{t/km}^2$ );  $C_{\text{above}}$ 、 $C_{\text{below}}$  分别为地上、地下生物量中的碳储量;  $C_{\text{soil}}$  为土壤碳储量;  $C_{\text{dead}}$  为死亡有机物中的碳储量; 各部分碳储量参数根据文献资料获得<sup>[32]</sup>。

## (5) 水质净化

基于 InVEST 模型的 NDR 模块, 根据相关研究的污染物拦截系数与过滤量及相关参数<sup>[33]</sup>, 评估植被和土壤对氮磷的残留效应。该模块通过输出氮和磷来反映水的净化程度。公式如下:

$$\text{ALV}_{(x)} = \text{HSS}_{(x)} \times \text{pol}_{(x)} \quad (11)$$

式中,  $\text{ALV}_{(x)}$  是栅格  $x$  的调整负荷数,  $\text{HSS}_{(x)}$  是栅格  $x$  的水文敏感性评分,  $\text{pol}_{(x)}$  是栅格  $x$  的输出系数。

## (6) 生境质量

采用 InVEST 模型中生境质量模块, 作为表示生物多样性的指标<sup>[34]</sup>。根据生境类型敏感性和外界因素威胁计算生境质量指数, 并根据生境质量指数评估生境质量。计算公式如下:

$$Q_{(xj)} = H_j \times \left(1 - \frac{D_{(xj)}^2}{D_{(xj)}^2 + k^2}\right) \quad (12)$$

式中,  $Q_{(xj)}$  为土地利用类型  $j$  中栅格  $x$  的生境质量;  $H_j$  为土地利用类型  $j$  中栅格  $x$  的生境适应性;  $D_{(xj)}$  为土地

利用类型  $j$  中栅格  $x$  的生境退化度;  $k$  为半饱和常数。生境质量值在 0—1 之间, 值越高, 生境质量就越高, 退化程度越低, 反之亦然。各部分参数根据文献资料获得<sup>[35]</sup>。

### (7) 文化服务

参考苏州市具体情况以及前人研究<sup>[36–37]</sup>, 利用最大熵模型 Maxent 3.4.4 平台, 结合获取的“风景名胜” POI 数据作为样本点数据, 选取指标作为环境变量数据, 包括自然和人为条件指标: 坡度、距水体距离、高程、土地利用/覆被以及距道路距离, 将样本点数据与环境变量数据输入 Maxent 模型测算得到评价结果<sup>[29]</sup>。

## 2.3 生态系统服务权衡/协同关系的量化

### 2.3.1 生态系统服务间的相关性分析

为消除多种类型 ESs 不同量纲的影响, 本研究采用 Min–Max 标准化法对 ESs 进行归一化处理, 具体公式如下:

$$ES_{\text{std}} = \frac{ES_{\text{obs}} - ES_{\text{min}}}{ES_{\text{max}} - ES_{\text{min}}} \quad (13)$$

式中,  $ES_{\text{std}}$  是某种 ESs 的标准化值;  $ES_{\text{obs}}$  是 ESs 观测值;  $ES_{\text{min}}$  和  $ES_{\text{max}}$  分别是 ESs 观测值的最小值和最大值。在数据标准化基础上, 本研究使用 Spearman 的非参数相关性分析来确定 ESs 之间的权衡/协同关系, 以确定这些交互关系的方向和强度<sup>[38–39]</sup>。ESs 之间的正相关表示协同作用, 负相关表示权衡。用 R4.3.1 软件中的“corrplot”软件包在 2010 年和 2022 年进行 Spearman 相关分析判别 7 种 ESs 之间的相关关系并实现可视化。

$$R_{(xy)} = \frac{\sum_{n=1}^n (X_{ij} - \bar{X})(Y_{ij} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^n (X_{ij} - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{n=1}^n (Y_{ij} - \bar{Y})^2}} \quad (14)$$

式中,  $R_{(xy)}$  为相关系数, 值域  $[-1, 1]$ , 若  $R_{(xy)} > 0$ , 表示两个服务之间存在协同关系;  $R_{(xy)} < 0$ , 意味着两个服务之间存在权衡关系。  $X_{ij}$  和  $Y_{ij}$  表示不同类型 ESs 数据值。

### 2.3.2 生态系统服务簇

基于 ESs 评估结果, 利用自组织特征映射网络 (SOM) 识别生态系统服务簇<sup>[14,20]</sup>。SOM 方法结合了主成分分析和 K-means 聚类分析方法, 通过近邻关系函数保留输入空间的拓扑结构并在分析中添加空间信息, 运用竞争学习策略, 依靠神经元之间互相竞争, 逐步优化网络, 实现分类处理<sup>[18]</sup>。本研究将苏州市城市边缘区作为样本输入, 利用 R4.3.1 中的“kohonen”软件包识别生态系统服务簇。最佳分组数通过计算 2—15 类时的 Davies–Bouldin 指数来确定, 该指数越小, 表明服务簇之间的差异越大, 簇内差异越小<sup>[14]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 城市边缘区识别结果及生态系统服务时空变化

#### (1) 城市边缘区识别结果及土地利用时空演变

本研究识别 2022 年苏州城市边缘区共 3838.8 km<sup>2</sup>, 占全市面积 44.56%, 大部分以各区中心为核心, 呈环状集聚分布在各区中心附近 (图 5)。根据苏州市最新行政区划, 城市边缘区范围内包括村庄 918 个。选取 10% 的样本进行验证分析, 总体精度和 Kappa 系数分别为 88.88% 和 0.85, 证明识别方法精度较高。2010—2022 年随着城镇化和社会经济发展水平不断上升, 在人流、物流、信息流等城乡要素加快渗透融合的驱动下, 土地作为空间利用表征的载体, 在城市边缘区显现出大幅变化, 至 2022 年以建设用地为主, 占比为 51.64%。相比于 2010 年增加了 926 km<sup>2</sup>, 耕地减少了 1009.5 km<sup>2</sup>, 减幅为 26.29%。除耕地外, 林地、草地和水域分别增加了 0.43、1.54 和 0.13 个百分点。

#### (2) 生态系统服务时空动态分析

评估苏州市城市边缘区 2010 和 2022 年主要的 7 类 ESs, 各取平均值 (表 2), 研究结果总体呈现出波动性

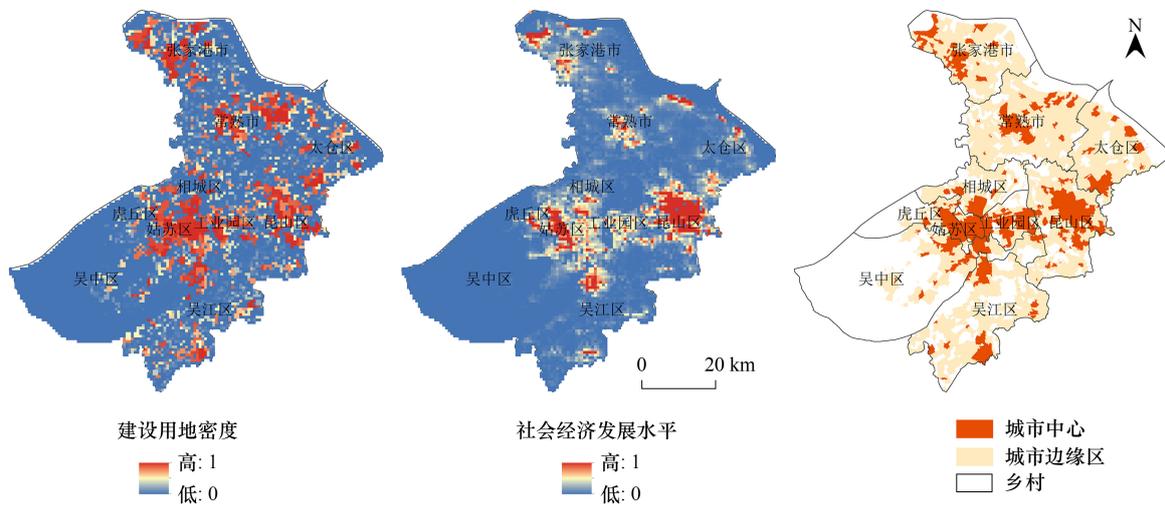


图 5 苏州市城市边缘区识别结果

Fig.5 Identification results of urban fringe in Suzhou City

变化特征。除文化服务呈增长趋势外,其余 ESs 呈下降趋势。其中研究区碳储存的年供给量从 2010 年的  $5.03 \times 10^6 \text{ t}$  下降到 2022 年的  $3.88 \times 10^6 \text{ t}$ ,降幅较大,为 22.9%,主要由于建设用地扩张导致固碳能力较高的土地利用类型面积减少;单位面积产水量从  $3.26 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$  降至  $2.19 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ,年产量在 2010 年为  $1.25 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,2022 年为  $8.42 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,这与该区域的降雨量和蒸散量密切相关;进行归一化处理后的研究区生产综合潜力指数均值在 2010 年和 2022 年分别为 0.42、0.33,粮食供给能力下降了 21.43%;该区域受人类活动影响较大,快速城镇化导致生境斑块破碎化加剧,生境质量平均分由 0.12 下降到 0.11,整体下降了 8.33%。土壤保持和氮磷输出量总体虽有波动但变化幅度较小。进行归一化处理后的文化服务供应能力均值分别为 0.13 和 0.17,呈增长趋势,增幅为 30.77%。

表 2 2010—2022 年苏州市城市边缘区生态系统服务变化

Table 2 Changes of Ecosystem Services in Suzhou Urban Fringe from 2010 to 2022

| 年份<br>Year | 粮食供给<br>Food providing | 碳储存<br>Carbon storage/<br>( $10^3 \text{ t}/\text{km}^2$ ) | 产水量<br>Water yield/<br>( $10^5 \text{ m}^3/\text{km}^2$ ) | 土壤保持<br>Soil conservation/<br>( $10^3 \text{ t}/\text{km}^2$ ) | 生境质量<br>Habitat quality | 氮输出量<br>Nitrogen output/<br>( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) | 磷输出量<br>Phosphorus output/<br>( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ) | 文化服务<br>Landscape aesthetics |
|------------|------------------------|--|---|--|-------------------------|---|---|------------------------------|
| 2010       | 0.42                   | 1.31   | 3.26  | 2.20   | 0.12                    | 1.46  | 0.169   | 0.13                         |
| 2022       | 0.33                   | 1.01   | 2.19  | 2.17   | 0.11                    | 1.25  | 0.147   | 0.17                         |

结合 2010 年和 2022 年 ESs 得到变化情况的空间分布(图 6)。受气温与降水等自然因素变化和人类活动干扰影响,2010—2022 年城市边缘区的粮食供给、碳储存、土壤保持和产水量大部分区域为减少,减少区域的面积分别占该区域的 85.29%、88.45%、87.69%和 73.53%,其分布格局具有一定相似性,主要位于建设用地快速扩张区,如常熟市、吴江区等。粮食供给和碳储存增加区域分布相对分散。受近些年风景名胜景点及设施逐步发展和完善的影响下,文化服务的增加区域占比达 64.16%,其减少区域主要集中在张家港市、常熟市和太仓区。氮输出量和磷输出量空间分布格局具有一定相似性,减少区域占比高,分别占该区域的 85.08%和 74.29%。生境质量增减区域占比相似,分别为 47.06%和 52.94%,整体呈“生境质量增减区域全区交互分布、局部集中”的空间分布格局。

### 3.2 生态系统服务相互作用及动态演变分析

#### 3.2.1 生态系统服务相关性分析

根据图 7 所示,蓝色系表示正相关,红色系表示负相关,圆形越大则绝对值越大,表明权衡或协同程度更

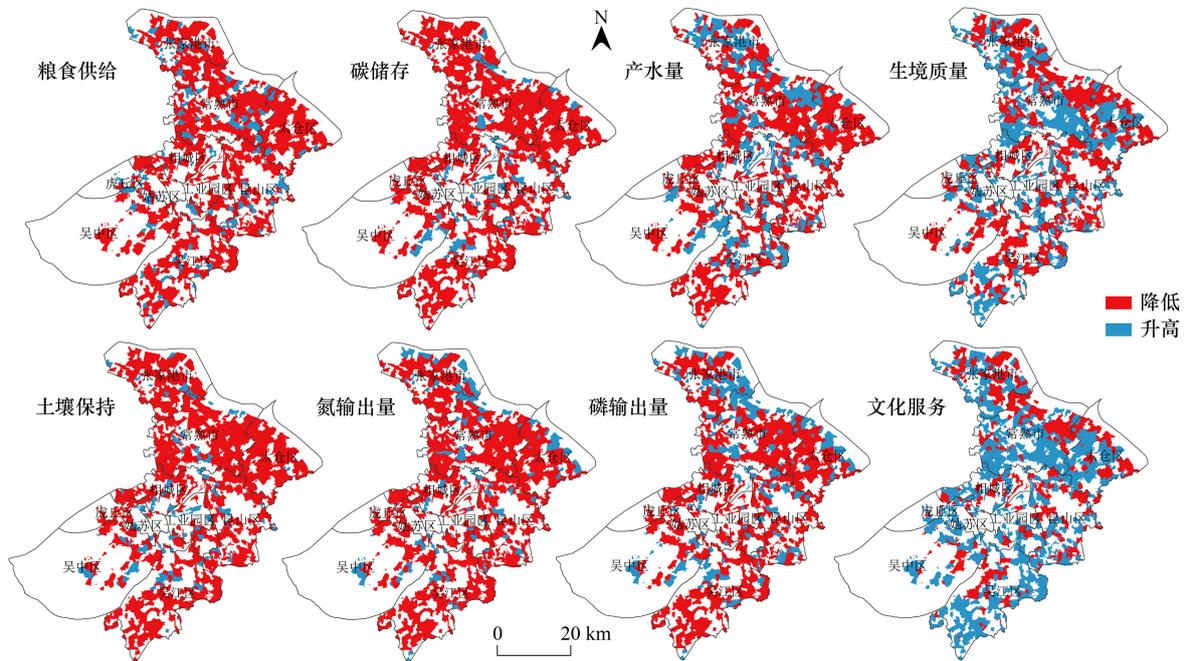


图 6 2010—2022 年苏州市城市边缘区生态系统服务变化情况及空间分布

Fig.6 Changes and spatial distribution of ecosystem services in Suzhou urban fringe from 2010 to 2022

高。2010—2022 年,苏州市城市边缘区 7 种 ESs 之间的相关性分析结果均通过 0.05 水平的显著性检验,相关系数绝大多数小于 0,以权衡效应为主,协同效应较少,整体权衡关系呈减弱趋势。

2010—2022 年粮食供给与土壤保持、产水量、生境质量、文化服务之间的相关系数均显著为负,呈不同程度的权衡关系,和生境质量的权衡效应最强,分别为 $-0.54$ 和 $-0.77$ 。此外,建设用地增加使得地表密实化,粮食供给-产水量之间权衡效应波动性减弱,从 $-0.65$ 上升至 $-0.47$ 。调节服务如土壤保持和水质净化、碳储存之间的相关系数显著为正,说明这两对 ESs 之间存在显著的协同效应,且协同效应均明显增强,但总体上土壤保持-水质净化之间的协同效应较高于土壤保持-碳储存的协同效应。支持服务(生境质量)和调节服务(土壤保持、水质净化)、文化服务主要表现为正相关性,2022 年和文化服务正相关性最高,为 $0.96$ 。产水量-碳储存之间为协同效应,说明耕地转换为固碳能力较弱的建设用地,固碳能力减弱使得碳储存服务下降,在降雨量减少的情况下出现了产水量-碳储存协同效应,协同效应波动性减弱。生境质量与碳储存、产水量存在显著的权衡效应,生境质量-产水量之间权衡效应不断增强,生境质量-碳储存之间权衡效应波动性减弱,说明水域面积增加,促成了生境质量上升而碳储存下降的权衡效应,且在降雨量减少的情况下出现了产水量和生境质量权衡效应。文化服务与产水量、粮食供给、碳储存之间的相关系数均显著为负,表明三对 ESs 间存在权衡效应,其中文化服务-粮食供给、文化服务-产水量之间权衡效应不断增强,文化服务-碳贮存之间权衡效应波动性减弱,总体上文化服务与产水量的权衡效应最强,增幅为 $15\%$ 。

### 3.2.2 生态系统服务簇动态演变和优化策略

运用自组织映射网络方法识别出苏州市边缘区最优生态系统服务簇数为 5 类,根据服务簇内占主导地位的 ES 和 ESs 相互作用关系进行命名,苏州市边缘区村域尺度形成生态服务协调簇、生态服务失调簇、生态保育簇、生态游憩休闲簇以及生态风险加剧簇,各类服务簇的时空分布以及转移情况示于图 8。其数量变化和空间演化呈现如下特征:

#### (1) 数量关系上:

①生态服务失调簇与生态风险加剧簇是苏州市城市边缘区主导的生态系统服务簇,研究期间分别呈明显下降或上升,减幅及增幅分别为 $17.18\%$ 和 $54.51\%$ 。而生态服务协调簇与生态游憩休闲簇的村庄数量有所下

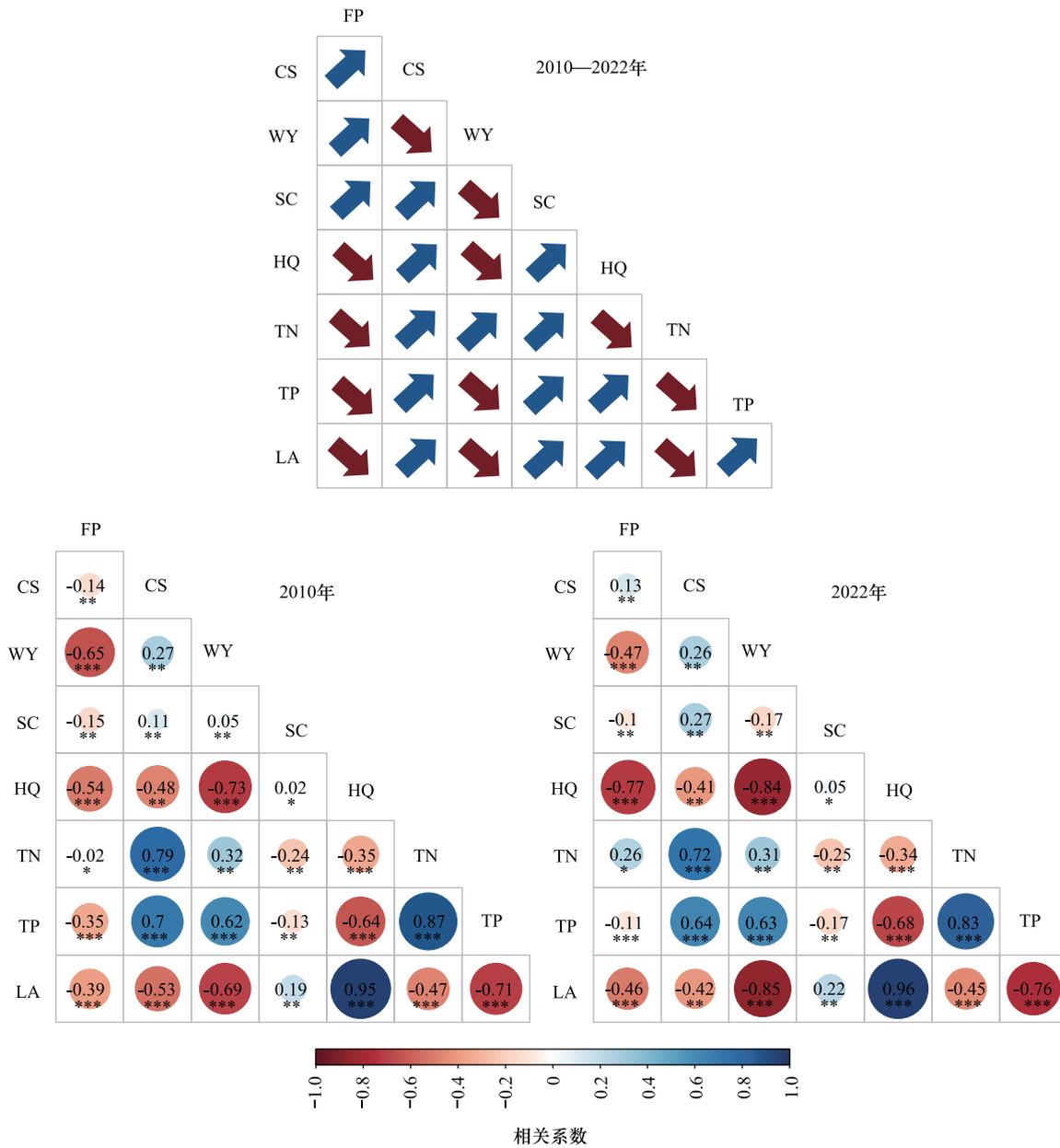


图 7 2010—2022 年生态系统服务 Spearman 相关系数及其变化趋势

Fig.7 Spearman correlation coefficient of ecosystem services from 2010 to 2022 and its changing trend

FP: 粮食供给 Food providing; CS: 碳储存 Carbon storage; WY: 产水量 Water yield; HQ: 生境质量 Habitat quality; SC: 土壤保持 Soil conservation; TN: 氮输出量 Nitrogen output; TP: 磷输出量 Phosphorus output; LA: 文化服务 Landscape aesthetics; \*\*\* 表示在 0.001 水平上显著相关、\*\* 表示在 0.01 水平上显著相关、\* 表示在 0.05 水平上显著相关

降,生态保育簇基本保持不变。②在 2010—2022 年间,在城市建设用地迅速扩张,人为活动对城市边缘区生态系统严重干扰的情况下,许多村庄的 ESs 权衡程度强化,主要表现为生态服务协调簇向生态服务失调簇、生态风险加剧簇转变,转变类型分别占 24.6%、25.1%。112 个村庄由生态服务失调簇转变为生态风险加剧簇,转变率为 26.7%。另外,分别有 31 和 15 个村庄发生了反向转化,由生态服务失调簇和生态游憩休闲簇转变为生态服务协调簇。

(2) 空间演化上:

①生态服务协调簇各种生态服务供给能力均较高,组成结构均衡,呈现高值协同关系。2010 年占比

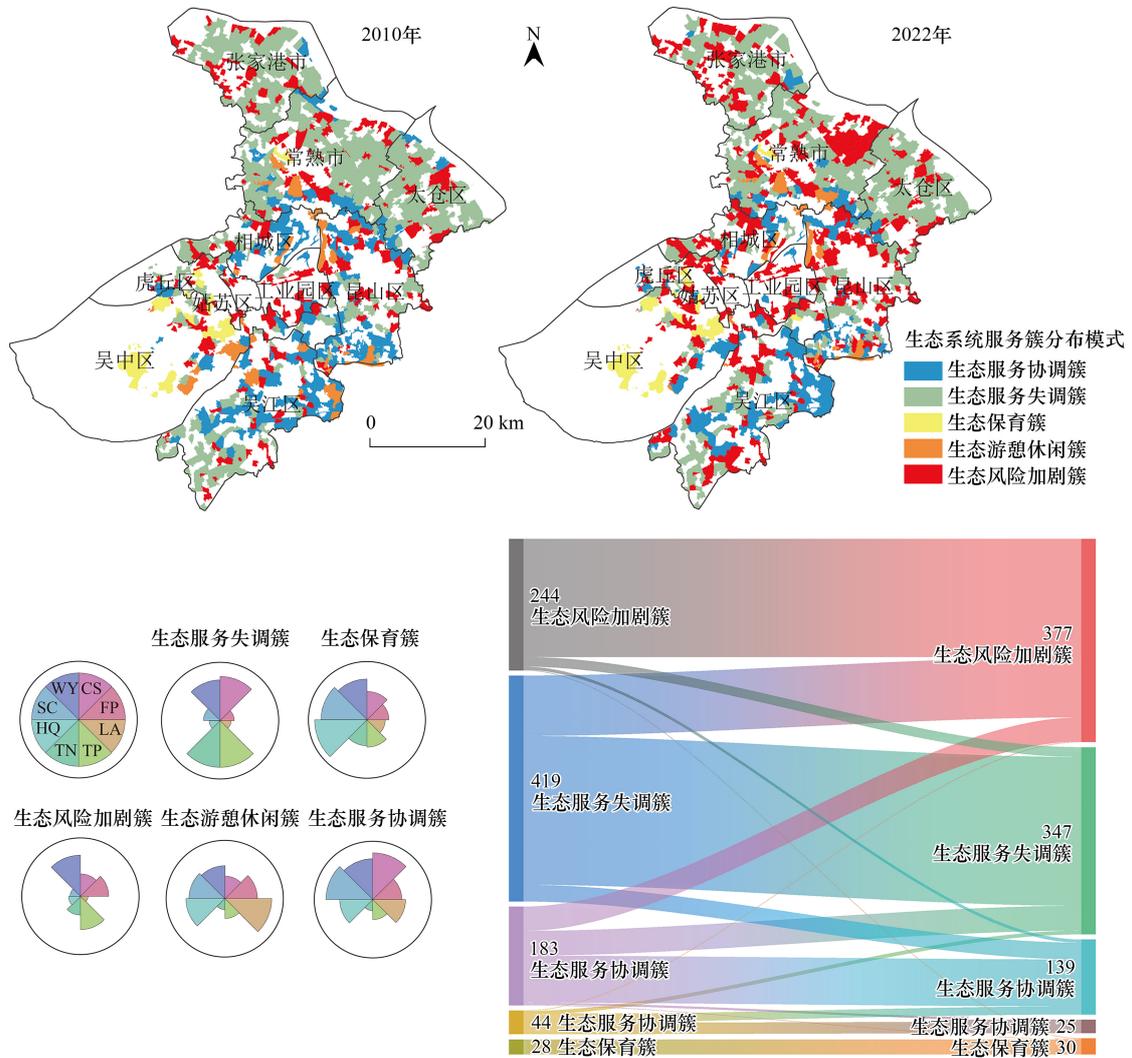


图 8 2010—2022 年苏州市城市边缘区生态系统服务簇模式、空间分布及演变轨迹

Fig.8 Mode, spatial distribution and evolution track of ecosystem service bundles in Suzhou urban fringe from 2010 to 2022

19.93%,至 2022 年总体减少 44 个,降幅为 24.04%,主要位于吴江区、相城区和昆山区,空间分布较为分散。对于现有的生态服务协调簇,其中有较大部分从生态系统服务失调簇转变而来,这类村庄多集中分布在水域面积较大的地方。结合土地利用变化情况来看,耕地、草地等转为水域,受湿地保护修复措施以及退渔还湖等政策多措并举的影响,生态环境得到了极大改善,生物多样性不断提高,形成了多种 ESs 协调的特征。未来要对生态空间的质量与空间结构继续进行动态监测,保持 ESs 的协同发展,进一步优化现有生态框架,妥善安排长期建设于生态框架内。在加快城镇化建设的同时维系城市边缘区湿地空间的生态安全,充分发挥湿地生态的溢出效应,提升其景观功能多样性,促进多重 ESs 供给能力。

②生态服务失调簇除产水量和碳储存服务较高外,其他服务供给能力均较低,处于权衡状态的 ESs 占比最高。2010 年在服务簇中占比最大,为 45.64%,2022 年下降至 37.80%,集中分布在张家港市、常熟市和太仓区一带以及吴江区南部村庄。该区域由于建设用地增加更快,林地、草地覆盖率较低,碳储量呈下降趋势,受降雨量减少的更大影响使得产水量也趋于下降,产水量-碳储存呈协同效应,但与其它调节、供给和文化服务表现出权衡关系。未来应严格控制该类村庄的新增建设用地规模,以 ESs 短板治理为主,比如为改善耕地减少带来的粮食供给与其它服务的权衡关系,需在适宜农业生产的地区,在不破坏生态系统稳定性的前提下,提

高农林业生产空间的强度和利用效率,采取措施加强农林业的立体优化配置,探索多种农林业生产模式,实现各 ESs 的协同,提高生态空间的综合效益。

③生态保育簇表现出较高的生态效益,其特点是以调节服务(土壤保持、生境质量、水质净化)为主导,但粮食供给能力较低,可能与海拔较高、人为干扰较少、森林覆盖率较高有关,生境质量服务能力在所有服务簇中最高。其主要集中分布在吴中区、虎丘区林地和丘陵地带,在复杂的城市生态系统中发挥着提供多样 ESs 的重要作用,在 2010—2022 年间占比皆最小,分别为 3.05% 和 3.27%,整体保持相对平稳状态。对于该类型的村庄,必须严格限制非生态用途的生态空间占用,减少对自然植被的破坏,保持其完整的生态结构、完备的生态功能和空间,提高维护生态安全的能力。同时应进行适当的生态补偿,以弥补村庄对于整体生态系统发挥综合效益所作的贡献;在区域可持续发展过程中,对于一些可适当进行开发的村庄,如金庭镇、光福镇等一些自然风景区,在维护原有林地、水域良好的同时,合理低干预地进行生态旅游开发,开发力度需控制在生态适应性演变的架构之中。

④生态游憩休闲簇以文化服务为主导,文化服务能力在所有服务簇中最高,其它服务均较好。2010 年占比为 4.79%,2022 年下降至 2.72%,总体减少 19 个,且 2022 年在服务簇中占比最小。分散分布在太仓区西部、吴江区东部以及常熟区南部村庄,自然条件优越,建立了多个森林公园和水乡古镇等旅游景点,提供一定的景观美学和生境质量服务。经济活动和开发建设使得土地趋于破碎化,导致该类村庄的文化服务和其它 ESs 之间产生权衡效应,有 7 个转变为生态服务失调簇。为了寻求居民福祉和生态保护之间的平衡,该类村庄在完善基础设施建设,促进交通便利,加上政策支持为提高游憩休闲服务能力的同时,要加强污染防治,注意修复生态环境,通过灰绿基础设施配合减缓现存问题,确保开发建设活动在当地的生态承载力范围内。另外,注重绿道网布局与地方文化、特色资源相结合,通过功能安排、游憩活动组织等方式形成各具特色的绿道游览路线,实现经济社会发展与生态保护之间的平衡和双赢。

⑤生态风险加剧簇。相较于其它簇,离城市中心更近受城市建设用地扩张影响较大,生态系统趋于风险加剧,除产水服务较高外,其余 ESs 供给能力均较弱,且该部分产水量服务并不能被直接利用。在 2010 年和 2022 年分别占 26.58% 和 41.07%,总体数量增加 133 个,是变化最大的生态系统服务簇,2022 年在所有服务簇中占比最大。空间变化比较分散,分散分布在苏州市边缘区城市建设用地占比更大且扩张更快的密集地区。大面积的耕地、水域和林地转变为建设用地,生态用地被挤占,导致了水质净化、土壤保持和碳储存服务呈减损状态,容易加剧村庄各类 ESs 的权衡效应,生态环境压力相对较大,易对生态系统造成更大的风险。未来有必要严格控制新增开发区位,加强生态管控,从源头上扭转生态空间进一步退化和景观格局破碎化的趋势。优化生态空间的中微观格局,在考察土地利用和开发影响的基础上进行生态环境整治和恢复,针对拥有重要水域和湿地的村庄,结合水生态修复工程和湿地保育工程,提升生态系统自我调节平衡能力,防止不可逆破坏。

## 4 讨论

### (1) 城市边缘区的 ESs 权衡协同关系

当城市中心的土地资源与价值开发趋于过饱和,在社会经济快速发展及人们逐利的驱动下,更靠近城市中心的城市边缘区由于其土地资源相对丰富、土地价格低廉、地理位置便利等条件往往成为城市空间拓展的重点区域。这种为获取更多资本增值的经济理性逻辑表面上推动了城市建设,但是由于缺乏生态理性,其指导下的粗放化规划容易导致土地资源浪费、侵占生态空间,使得生态结构被破坏及生态系统的完整性受到干扰,为未来的可持续发展问题埋下了隐患。当城市边缘区作为城市的一部分进行研究时,其 ESs 权衡协同关系分析结果与将其作为独立地理单元分析的结果有所不同。本研究表明在研究区 28 对 ESs 关系中,11 对关系呈强权衡关系,5 对关系呈强协同关系,其他 7 对关系为弱协同关系。以苏州市整体区域土壤保持-产水量、粮食供给-生境质量为例进行回归分析,结果均通过 99% 的置信度检验( $P < 0.01$ ),土壤保持-产水量回归系数

2010年和2022年分别为0.10和0.08,呈现弱协同关系,而对苏州市城市边缘区进行单独分析时,土壤保持-产水量在2022年为弱权衡关系。另一方面,2010和2022年粮食供给-生境质量相关系数在苏州市整体区域层面分别为-0.36和-0.31,较城市边缘区权衡程度均有所下降。总体来说,相关变化成因可表明区别于整体区域的研究,对城市边缘区进行更高精度的分析,在一定程度上可放大ESs间复杂相互作用关系的局部空间差异。城市边缘区受到城乡双向交互影响,其内部ESs矛盾高于整体区域。区别于相关生态研究<sup>[2-4]</sup>多从城市规划政策下人为划定的静止区域中直接划分出城市边缘区,结合指标进行精准识别作为划分依据,有利于动态化和精细化管理城市边缘区发展过程中的ESs协同。此外,除在市级空间对城市边缘区进行单独划分的研究,未来可结合ESs尺度效应上升到省级、城市群等较大尺度的城市边缘区作更多讨论,其对于区域一体化背景下的跨尺度生态空间面临的风险可提供指导意义。

### (2) 村级尺度的动态演变视角下城市边缘区ESs优化

ESs权衡协同作用的时空共现性与ESs的时空共现性相同,将多种ESs的权衡协同作用缩减为ESB的形式,基于村级尺度可以更有效地识别不同村庄的主导ESs及权衡关系特征。在城镇化发展进程的不同阶段下,土地利用强度的变化对主导ESs及权衡关系特征的演变产生着至关重要的影响,特别是对于位于过渡性地带动态变化显著的城市边缘区,结合2010—2022年苏州市城市边缘区土地利用转换轨迹(图9)有助于追溯村庄ESs权衡演变成因,可为制定并实施差异性优化策略和管理提供有效方法。城市边缘区的土地利用相互转化主要发生在耕地、水域和建设用地之间,以耕地的面积减少最多,其中有191.9km<sup>2</sup>的耕地向水域转移,建设用地面积增长最多,总共增加926km<sup>2</sup>。结合土地利用空间分布,建设用地的扩张呈现以各区城市中心往外辐射的环型空间拓展结构特征。和各分区相比,张家港、常熟市的集中式蔓延和吴江区南部的分散分布式增加尤为明显,建设用地增幅最大,经过数十年的建设和发展,市政基础设施和商业服务业更新迭代速度加快,其生态空间格局遭到破坏的程度更甚<sup>[40-41]</sup>。结合空间转移轨迹,该区域的村庄主要为生态服务协调簇转向生态风险加剧簇,且生态风险加剧簇与生态服务失调簇有连接成片趋势,一定程度上可表明生态风险加剧簇的演变与建设用地的快速扩张具有一致性,这与冯兆等人<sup>[42]</sup>对城市区域服务枯竭簇的研究结果具有相似性。为促进ESs协同,该类村庄亟需进行生态重塑,以用地布局结构问题治理为主,优化生态空间的中微观格局,降低生态权衡风险,逐渐恢复生态与人居环境的相互渗透与融合。此外,城市边缘区作为受城市化和乡村城镇化双向作用力的复杂过渡性地带,各个村庄自身的自然地理环境及区位优势的不同,除土地利用变化外,未来可从内在、外生驱动力多角度进行影响机制分析,通过认识ESs权衡协同作用驱动机制的空间异质性识别村庄生态系统服务簇演变的关键因素及影响因子的交互性,提出更加多元化和切实可行的优化建议。

### (3) 研究不足与展望

本文在城市边缘区ESs功能评价、权衡协同关系、村庄ESB类型分化等方面作出一定探索,但仍存在以下一些问题:①研究方法上,文化服务主要选取风景名胜POI进行分析,以游憩休闲为主,未来可丰富文化服务评估的维度进行更全面分析,例如结合问卷调查等从居民角度量化文化服务。研究仅分析了ESs权衡协同关系在全局空间上的变化,未对空间上局部的ESs权衡协同关系变化进行研究,未来可结合空间自相关性可进一步探讨不同高低值区域以便对不同乡村进行更具针对性的分析并提供决策依据。②研究应用上,后续研究可进一步结合元胞自动机、遗传算法、粒子群算法等模型或算法模拟土地利用演变趋势进而揭示ESs及相互关系变化规律,合理预测生态系统服务簇未来的格局,提出更加合理的生态系统风险管理策略。③研究内容上,本文仅讨论ESs相互作用关系,未来可结合生态学的尺度效应,如微观尺度的要素或宏观尺度的生态安全格局,探究各个环节之间的耦合差异性关系,为缓解城市边缘区人地关系矛盾提供多元化的生态指导。其次,该研究仅分析了边缘区ESs功能的演变特征,未来可结合影响因素和时序数据对内在机理和驱动机制的空间异质性进行进一步探究,提出更加科学有效的优化建议。最后,农民、城市居民、政府、开发商和其他团体都是城市边缘区开发和利用过程中的重要参与者,可结合利益相关者对结果进行讨论,通过分析他们对ESs权衡决策的态度,制定满足当地居民对生态系统日益增长的需求的相关决策。

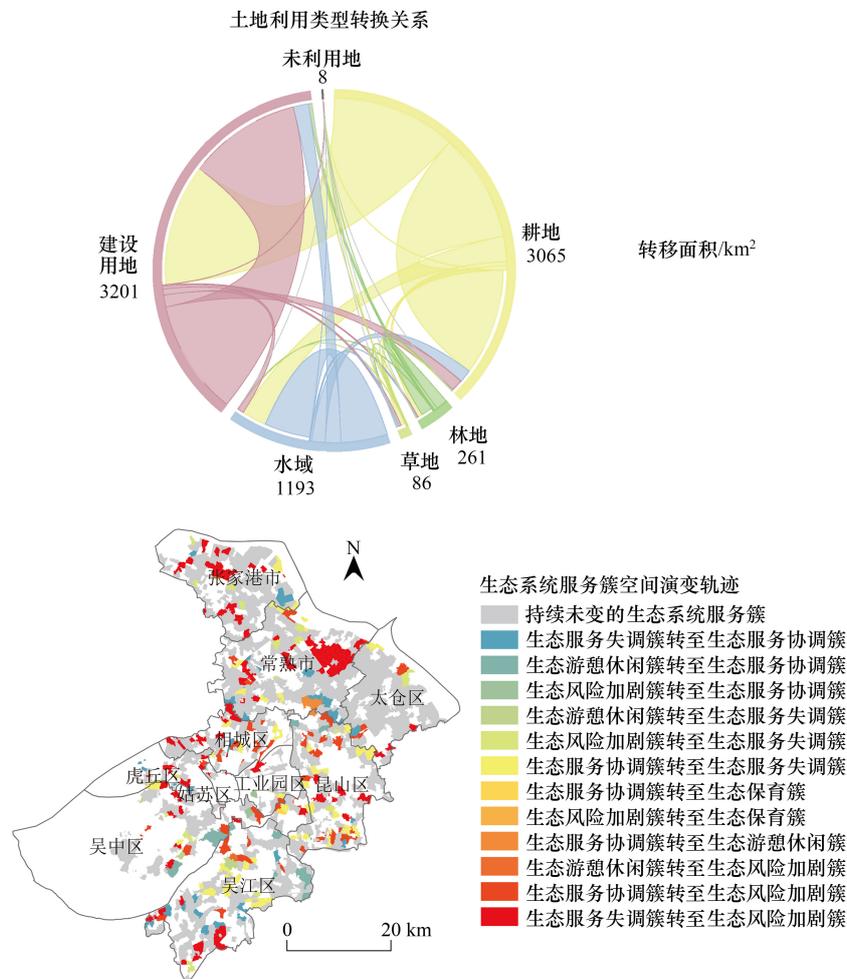


图9 2010—2022年苏州市城市边缘区土地利用类型转换关系及生态系统服务簇空间演变轨迹

Fig.9 Land use type conversion relationships and spatial evolution trajectories of ecosystem service bundles in urban fringe of Suzhou City, 2010—2022

## 5 结论

本文首先对苏州市城市边缘区进行识别,在此基础上对其2010年和2022年7种ESs进行量化,利用相关性分析探究多种ESs间的交互关系,使用自组织映射方法判断各个村庄主导ESs类型和协调特征的时空分异特征及演变规律,主要结论如下:

(1) 基于村级尺度识别得到苏州市城市边缘区918个村庄,分布具有明显的空间分异规律,大部分以各区中心为核心,呈环状集聚分布在各区中心附近。

(2) 从ESs量化及时空演变分布特征来看,2010—2022年间粮食供给、碳储存、产水量、生境质量、土壤保持、氮磷输出量呈下降趋势,文化服务整体上升,碳储存降幅最明显。相互作用关系以权衡效应为主,协同效应较少,且整体权衡关系呈减弱趋势。除生境质量、文化服务总体呈现增减区域交互分布外,其它ESs分布较为相似,主要呈现减少区域大面积集中,增加区域分散式分布的特征,退化显著。

(3) 苏州市城市边缘区7种ESs在空间上共现形成5种服务簇,分别为生态服务协调簇、生态服务失调簇、生态保育簇、生态游憩休闲簇以及生态风险加剧簇。生态保育簇主要分布在以林地为主的西南部,生态服务协调簇主要分布在以水域和农田为主的东南部,生态风险失调簇和生态风险加剧簇主要分布在东北部。2010—2022年苏州市城市边缘区生态保育簇、生态游憩休闲簇空间格局较稳定,演变轨迹主要发生在生态服

务协调簇、生态服务失调簇与生态风险加剧簇之间,生态风险加剧簇变化最大,与城镇化发展速度密切相关。

(4)分析城市边缘区村级尺度不同阶段的ESB演变轨迹,对各个村庄不同程度的生态权衡问题提出优化策略,指导城乡可持续发展。对于生态服务协调簇,动态监测其生态空间变化,保持ESs的协同发展。对于生态服务失调簇和生态风险加剧簇,以ESs短板治理为主,进行生态环境整治和恢复,提升生态系统自我调节平衡能力。对于生态保育簇,加强保育,严格管控并限制开发。对于生态游憩休闲簇,需完善蓝绿基础设施网络,从而实现生态保护与经济互惠共赢。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 梁晨,曾坚,辛儒鸿. 城市边缘区的生态适应性演进:困境反思与范式转型. 城市问题, 2023, (7): 13-20.
- [ 2 ] 李婷,王思元. 基于原型思维的城市边缘区景观格局演变研究——以北京市大兴区为例. 生态学报, 2022, 42(3): 1153-1164.
- [ 3 ] 杨俊,关莹莹,李雪铭,席建超. 城市边缘区生态脆弱性时空演变——以大连市甘井子区为例. 生态学报, 2018, 38(3): 778-787.
- [ 4 ] 夏哲一,刘黎明,袁承程,魏雪,黄家嗣,王怡. 基于社会-生态耦合视角的城市边缘区生境服务评估与分区. 生态学报, 2024, 44(4): 1501-1513.
- [ 5 ] Costanza R, Liu S. Ecosystem services and environmental governance: comparing China and the U.S. *Asia & the Pacific Policy Studies*, 2014, 1(1): 160-170.
- [ 6 ] Yin D Y, Yu H C, Shi Y Y, Zhao M Y, Zhang J, Li X S. Matching supply and demand for ecosystem services in the Yellow River Basin, China: a perspective of the water-energy-food nexus. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 384: 135469.
- [ 7 ] 牛忠恩,何洪林,任小丽,张黎,秦克玉,赵旦,吕妍. 基于过程模型的2000—2018年中国陆地生态系统服务时空动态及其权衡与协同分析. 生态学报, 2023, 43(2): 496-509.
- [ 8 ] 荔童,梁小英,张杰,耿雨,耿甜伟,石金鑫. 基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系及其驱动因子分析——以陕北黄土高原为例. 生态学报, 2023, 43(16): 6758-6771.
- [ 9 ] 杨阳,窦艳星,王云强,安韶山. 黄土丘陵沟壑区典型小流域生态系统服务权衡与协同关系研究. 生态学报, 2022, 42(20): 8152-8168.
- [ 10 ] 乔旭宁,杨祯,杨永菊. 1995—2020年淮河流域生态系统服务权衡协同关系的尺度效应. 地域研究与开发, 2023, 42(2): 150-154, 166.
- [ 11 ] Huang Y T, Wu J Y. Spatial and temporal driving mechanisms of ecosystem service trade-off/synergy in national key urban agglomerations: a case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration in China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110800.
- [ 12 ] 陈俊辰,贺淑钰,薛晶,张环宇,李兆华,王玲,李昆. 多尺度生态系统服务的权衡关系及其对景观配置响应——以湖北省为例. 生态学报, 2023, 43(12): 4835-4846.
- [ 13 ] Xue C L, Chen X H, Xue L R, Zhang H Q, Chen J P, Li D D. Modeling the spatially heterogeneous relationships between tradeoffs and synergies among ecosystem services and potential drivers considering geographic scale in Bairin Left Banner, China. *The Science of the Total Environment*, 2023, 855: 158834.
- [ 14 ] Lin H W, Yun H. Spatiotemporal dynamics of ecosystem services driven by human modification over the past seven decades: a case study of Sihou agricultural watershed, China. *Land*, 2023, 12(3): 577.
- [ 15 ] 张自正,梁思源,熊玉晴. 多情景土地利用变化下武汉城市圈生态系统服务权衡协同研究. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 345-357.
- [ 16 ] 杨强强,章翮,邱小琮,赵增锋,赵睿智,周瑞娟. 宁夏回族自治区生态系统服务时空变化及其权衡研究. 中国环境科学, 2023, 43(10): 5453-5465.
- [ 17 ] Renard D, Rhemtull J M, Bennett E M. Historical dynamics in ecosystem service bundles. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(43): 13411-13416.
- [ 18 ] 闫晓露,李欣媛,刘澄浩,李佳伟,钟敬秋. 生态系统服务簇空间演变轨迹及其社会-生态驱动的地理探测——以大连市为例. 生态学报, 2022, 42(14): 5734-5747.
- [ 19 ] 袁海威,龚建周,陈雅婷,陈康林,吴卓,邱霓. 基于地域区划的广东省陆域生态系统服务簇与模式识别. 生态学报, 2023, 43(22): 9384-9401.
- [ 20 ] Xia H, Yuan S F, Prishchepov A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: implications for spatial planning and management. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189: 106767.
- [ 21 ] 张锦琳,游巍斌,蔡新瑜,何东进. 武夷山小流域生态系统服务(簇)权衡/协同及对地形起伏度的响应. 生态学报, 2023, 43(12): 4892-4903.
- [ 22 ] Wu L L, Sun C G, Fan F L. Multi-criteria framework for identifying the trade-offs and synergies relationship of ecosystem services based on

- ecosystem services bundles. *Ecological Indicators*, 2022, 144: 109453.
- [23] 邵大伟, 吴殿鸣. 景观破碎化对生态系统服务价值的影响作用分析——以苏州为例. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(11): 2436-2449.
- [24] 孙枫, 章锦河, 王培家, 魏国恩, 储光, 曹禹. 城市生态安全格局构建与评价研究: 以苏州市区为例. *地理研究*, 2021, 40(9): 2476-2493.
- [25] 谢宇轩, 梁鑫源. 苏州市水田破碎化时空演变研究. *地域研究与开发*, 2023, 42(5): 127-133.
- [26] 曹辉, 蒋伟萱, 陈江龙, 陈诚, 何江, 刘春卉. 南京市城乡交错带多维识别与特征分析. *自然资源学报*, 2023, 38(3): 795-807.
- [27] Tian Y S, Chen J Y. Suburban sprawl measurement and landscape analysis of cropland and ecological land: a case study of Jiangsu Province, China. *Growth and Change*, 2022, 53(3): 1282-1305.
- [28] 赵慧颖, 田宝星, 宫丽娟, 曲辉辉, 季生太, 李秀芬, 张兴林. 近 308 年来大兴安岭北部森林植被气候生产潜力及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2017, 37(6): 1900-1911.
- [29] 范逸凡, 王珂, 黄璐. 乡村地区生态系统服务权衡与协同关系——以湖州市为例. *生态学报*, 2022, 42(17): 6875-6887.
- [30] Zhang L W, Fu B J, Lü Y H, Zeng Y. Balancing multiple ecosystem services in conservation priority setting. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 535-546.
- [31] Wang C D, Li W Q, Sun M X, Wang Y T, Wang S B. Exploring the formulation of ecological management policies by quantifying interregional primary ecosystem service flows in Yangtze River Delta region, China. *Journal of Environmental Management*, 2021, 284: 112042.
- [32] 邹文涛, 何友均, 叶兵, 赵晓迪, 许单云, 肖仁乾, 段艺璇. 基于 InVEST 模型的钱江源国家公园生态系统碳储量研究. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(3): 120-128.
- [33] 艾军勇. 生态系统服务与城市化关系研究——以江苏省为例[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [34] Zhu W Q, Pan Y Z, He H, Yu D Y, Hu H B. Simulation of maximum light use efficiency for some typical vegetation types in China. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(4): 457-463.
- [35] 陈实, 金云翔, 黄银兰. 长三角中心区生境质量时空变化及其影响机制. *生态学杂志*, 2023, 42(5): 1175-1185.
- [36] Zhang K L, Tang X H, Zhao Y T, Huang B W, Huang L J, Liu M Y, Luo E D, Li Y X, Jiang T, Zhang L Q, Wang Y H, Wan J J. Differing perceptions of the youth and the elderly regarding cultural ecosystem services in urban parks: an exploration of the tour experience. *The Science of the Total Environment*, 2022, 821: 153388.
- [37] Zhang J X, He C Y, Huang Q X, Li J, Qi T. Evaluating the supply and demand of cultural ecosystem services in the Tibetan Plateau of China. *Landscape Ecology*, 2022, 37: 2131-2148.
- [38] Lyu R F, Clarke K C, Zhang J M, Feng J L, Jia X H, Li J J. Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving factors: a case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China. *Applied Geography*, 2019, 108: 64-73.
- [39] Dou H S, Li X B, Li S K, Dang D L, Li X, Lyu X, Li M Y, Liu S Y. Mapping ecosystem services bundles for analyzing spatial trade-offs in Inner Mongolia, China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120444.
- [40] 彭曼, 邵一平, 裴蓓, 杨梦杰, 李根, 文婉若, 杨凯. 长三角一体化示范区生态系统服务供需格局演变及区域调控探讨. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2023(6): 145-157.
- [41] 田雅丝, 毛倩鸿, 李纯, 钱晶. 区域一体化视角下长三角地区生态用地时空演变影响因素. *生态学报*, 2023, 43(13): 5406-5416.
- [42] 冯兆, 彭建, 吴健生. 基于生态系统服务簇的深圳市生态系统服务时空演变轨迹研究. *生态学报*, 2020, 40(8): 2545-2554.