专题：城市绿地生物多样性与生态系统服务

# 生态管控区城市扩张形态对生态系统服务价值的影响*

马淇蔚

浙江农林大学风景园林与建筑学院 杭州 311300

**摘要**：生态管控区作为城市发展的安全线，旨在维护重要生态功能、增强生态支撑能力。以杭州生态带为例，基于多源数据，采用价值当量法测算生态带生态系统服务价值（ESV）及其变化；利用最大斑块指数（LPI）、聚合指数（COHESION）、周长面积比（PAR）、分裂指数（SPLIT），定量刻画城市扩张形态时空特征；通过相关性分析及逐步回归模型，解析不同扩张形态对 ESV 损益影响。结果表明：1）生态带总 ESV 连年低幅下降，各级、各类 ESV 均遭受不同程度损耗。2）LPI 描述的外围圈层式和 COHESION 表征的内城填充式是生态带城市扩张的主要形态，生态带管控促使城市空间紧凑性上升伴随破碎度下降，中心城市主导地位进一步增强。3）全局视角下，外围圈层式和内城填充式正向推动生态带 ESV 损失，而 PAR 代表的近郊点轴式和 SPLIT 反映的远郊散点式对此具有负向遏制作用；局部视角下，同一扩张形态在面对不同类型生态带时存在影响差异，且扩张形态间根据影响的正负效应形成正负相消的权衡或同正共负的协同两种关系。综上可知，生态管控区 ESV 对城市扩张形态有积极和消极两种反应，反应强度因生态系统服务类型而异。

**关键词**：生态系统服务价值；城市扩张；生态管控；城市形态；生态带

DOI：10.12169/zgcsly.2024.03.19.0001

## Impacts of Urban Expansion Forms on Ecosystem Service Value in Ecological Control Area

Ma Qiwei

(College of Landscape Architecture, Zhejiang Agriculture & Forestry University, Hangzhou 311300, China)

**Abstract**: Ecological control area, as the safety line of urban development, aims to maintain important ecological functions and enhance the ecological support capacity. Six ecological belts in Hangzhou are selected to measure the ecosystem service value (ESV) and its change using multi-source data and equivalent value assessment. Then, largest patch index (LPI), cohesion index (COHESION), perimeter-area ratio (PAR) and splitting index (SPLIT) are used to quantitatively describe the spatiotemporal characteristics of urban expansion forms, and then Pearson correlation analysis and stepwise regression model are adopted to explain the effects of various expansion forms on the ESV change. The results indicate: 1) The total ESV of Hangzhou Ecological Belt have been decreasing, and ESVs of all levels and kinds have suffered losses at varying degrees; 2) Outer circular expansion represented by LPI and filling expansion in inner-city represented by COHESION are the two main expansion forms of Hangzhou Ecological Belt. The management and control of the Ecological Belt makes the compactness of the built area increased and the fragmentation degree decreased, and thus enhances the dominant role of the central

收稿日期：2024-03-19

* 基金项目：浙江省自然科学基金探索项目（LQ22E080007）；国家自然科学基金青年科学基金项目（52308083）

作者简介：马淇蔚（1992- ），男，博士，副教授，研究方向为城乡生态规划。E-mail：maqiwei@zafu.edu.cn

cities and towns; and 3) From the belt perspective, the outer circular expansion and the filling expansion in inner-city positively increase the ESV loss, while irregular sprawl in suburb area presented by PAR and scattered development in outer suburb presented by SPLIT have a negative influence on the ESV loss. From the perspective of specific ecological belt, the same urban expansion forms have different impacts on different types of ecological belts, and they have two relations, i. e., trade-offs and coordination relations, according to their positive and negative effects on ESV changes. To sum up, the ESV of ecological control zones has two kinds of responses to urban expansion, i. e., positive and negative responses, and the intensity of the responses varies depending on the type of ecosystem services.

**Keywords**: ecosystem service value; urban expansion; ecological control; urban form; ecological belt

生态系统服务（Ecosystem service，ES）是生态系统形成并维持人类赖以生存的环境条件与效用，为生态系统向经济社会系统提供的各种惠益[1]。快速城市化助推城市规模不断增长，但土地利用方式的合理性缺失，无序、低效的城市扩张引发 ES 价值（Ecosystem service value，ESV）受损，加剧地区生态风险，给绿色、高效、安全的城乡人居环境构建带来严峻挑战[2]。故探讨城市扩张对 ESV 损益影响具有重要意义。

既往研究先是从定量角度探求城市扩张的规模与强度和 ESV 的关系[3-4]，后引入空间视角实现定量结果的可视化[5]，识别扩张强度高与 ESV 损耗程度高的“双高”区域，并针对性提出管控策略[6]。城市扩张的识别大多采用遥感影像解译，也有基于夜间灯光数据[7]、不透水面数据[8]；ESV 评估多使用价值当量法[3-6]，其次为生态过程模型[9]；研究区主要为大、特大城市[8-9]或城市群[7]。在此基础上，学者进一步从城市扩张的具体维度和 ES 特定类型两大方面展开深化。针对前者，有从城市用地的转入与转出方面作出阐释[10]，也有从城市等级结构、城乡关联度切入[11-12]，还有关注城市发展目标的多情景对 ES 的保护绩效[13]；针对后者，有探究特定 ES 对城市扩张的响应[14]，另有将具有权衡关系的 ES 放在一起解析[15]。总的来说，现有研究从多个方面，基于多源数据，采用多种手段，就城市扩张对 ESV 损益的影响展开了大量探索。然而，同样的扩张规模与强度如果以不同的形态进行扩张，所产生的生态效应是否一致？如果不一致，不同的扩张形态对生态价值的影响又是怎样？针对这一问题，目前从形态角度出发，基于城市扩张形态的 ESV 损益解析研究并不多见。此外，从研究对象来看，生态管控区作为 ES 的高质量集聚区，近年来被不断蚕食，但当前较少以快速城市化背景下生态保护与城市开发存在紧张对立的生态管控区为分析对象。

综上，选取我国典型的兼有生态脆弱性和经济发达双重属性且是国内较早开展生态管控的杭州，以其 2007 年设立的 6 条生态带为例，使用价值当量评估法和景观格局指数，考察 2005—2020 年生态带 ESV 及其变化和城市扩张形态时空特征，再根据皮尔逊相关系数，明确各 ESV 变化对扩张形态的响应程度，最后通过逐步回归明晰扩张形态对不同生态带 ESV 变化的影响差异，以期为优化国土空间开发保护格局、实现绿色高质量发展提供决策支持。

## 1 研究区概况

杭州是我国典型的自然资源赋能型城市。一方面，它生态环境优越，山水要素充沛，人文底蕴深厚，是生态文明与美丽中国建设的样板城市；另一方面，它产业基础坚实，城镇化水平成熟，创新氛围浓厚，是长三角第二大中心城市和全国数字经济第一城。面对生态刚性保护与经济快速发展的尖锐矛盾，杭州在全国范围内较早启动了生态管控政策制定工作，编制了《杭州市生态带概念规划（2007—2020 年）》，设定由东部生态带、东南部生态带、南部生态带、西南部生态带、西北部生态带、北部生态带 6 条生态带组成的生态管控区。6 条生态带形状不一，内部生态要素各异，保护的主导生态功能不尽相同，有机构成“山水城林田”生态安全格局。然而，自生态带设立以来，生态保护让位于城市开发的现象屡见不鲜，生态带不断遭受侵蚀，其完整性和系统性被破坏。因此，以 6 条生

态带为研究范围，总面积 2 145.84 km$^2$，并根据生态带 2007—2020 年的规划年限，取整以 2005—2020 年为研究时限（图 1）。

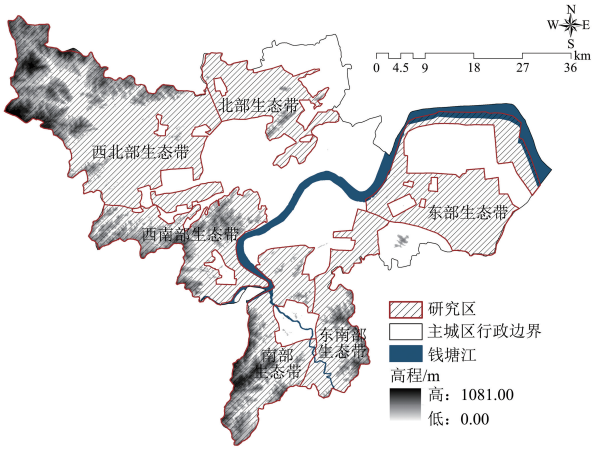



图 1　研究区概况

## 2　研究方法

### 2.1　数据来源及预处理

遥感影像数据：从美国地质调查局（usgs.gov）下载获得杭州 2005、2020 年 30 m 分辨率的 Landsat-7 TM/ETM+影像，用于识别土地利用类型。行政界限与空间规划数据：杭州市政府编制的《杭州市生态带概念规划（2007—2020 年）》和《杭州市城市总体规划（2006—2020 年）》，6 条生态带边界作为研究区，总体规划界定的“一主三副六组团”城市空间结构为探讨生态带保护空间与城市开发空间的相互关系提供基础；根据最新出版地图，确定主城区行政边界。经济统计数据：2005—2020 年杭州市统计年鉴农业篇的粮食产量和种植面积指标，以测算耕地的食物供给服务作为价值当量评估的基准系数。

对遥感影像进行预处理：按照研究区进行边界裁切并投影，通过几何校正、大气校正提高辨识精度。根据研究区生态空间类型，并与谢高地等[16]提出的 ESV 当量系数表的用地类型保持一致，采用“建设用地、林地、水域、耕地、湿地、草地”的分类标准。利用 ENVI 的 SVM 模块对 2005、2020 年 2 期影像展开监督分类，通过精度分析得到 Kappa 系数为 95.74%（2005 年）和 96.96%（2020 年）。

### 2.2　ESV 及其变化强度测算

价值当量评估法具有操作简便、快速获取 ESV 的技术优势，且基于土地利用类型的测算结果便于可视化[17]，故用其获取 ESV 及其空间分布。根据杭州 2005—2020 年各年份粮食产量和种植面积获得粮食单位面积产量并计算年平均值为 12 493.15 元/hm$^2$。按照单位农田提供的粮食生产价值是无人力投入的自然生态系统的 7 倍[16]来获取耕地食物供给服务的 ESV 系数为 1 784.74 元/hm$^2$，将其乘以“中国陆地单位面积 ESV 价值当量表”[16]，得到研究区单位面积 ESV 当量系数（表 1）；根据既有研究[18]，将建设用地的 ESV 当量系数设为 0，不纳入计算。利用表 1，基于土地利用类型面积得到一级、二级 ESV，将研究区划分为 500 m 精度格网，赋值获得 ESV 空间分布并计算变化强度。

表 1　研究区单位面积 ESV 当量系数　　元/hm$^2$

| ES | | 土地利用类型 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 一级 ES | 二级 ES | 建设用地 | 林地 | 水域 | 耕地 | 湿地 | 草地 |
| 调节服务 | 气体调节 | 0.00 | 4 556.33 | 1 616.76 | 1 406.79 | 3 989.41 | 4 136.40 |
| | 气候调节 | 0.00 | 13 647.98 | 4 808.29 | 755.89 | 7 558.88 | 10 939.41 |
| | 水文调节 | 0.00 | 9 952.53 | 215 302.15 | 566.92 | 50 875.47 | 8 020.83 |
| | 废物调节 | 0.00 | 4 052.40 | 11 653.28 | 209.97 | 7 558.88 | 3 611.47 |
| 支持服务 | 土壤支持 | 0.00 | 5 564.18 | 1 952.71 | 2 162.68 | 4 850.28 | 5 039.27 |
| | 养分循环支持 | 0.00 | 419.94 | 146.98 | 251.96 | 377.94 | 377.94 |
| | 生物多样性支持 | 0.00 | 5 060.25 | 5 354.21 | 272.96 | 16 524.56 | 4 577.33 |
| 供给服务 | 食物供给 | 0.00 | 608.91 | 1 679.75 | 1 784.74 | 1 070.84 | 797.88 |
| | 原材料供给 | 0.00 | 1 385.79 | 482.93 | 839.88 | 1 049.84 | 1 175.83 |
| | 水资源供给 | 0.00 | 713.89 | 17 406.42 | 41.99 | 5 438.20 | 650.91 |
| 文化服务 | 娱乐文化 | 0.00 | 2 225.67 | 3 968.41 | 125.98 | 9 931.53 | 2 015.71 |

### 2.3　城市扩张形态辨识

景观格局指数是生态斑块形状、大小、数量及其组合的量化结果[19]。将建设用地看作特定斑块，其亦能反映城市形态特征[20]。城市扩张方式主要有外围圈层式（建成区边缘以圈层拓展的用地开发）、内城填充式（建成区内部或相互之间

非建成区的用地开发）、近郊点轴式（建成区近郊依托线性交通或受地形限制的不规则触角状的用地开发）、远郊散点式（远离或不依附于建成区的分散小规模的用地开发）[21-22]。根据《FRAGSTATS 4.2 HELP》，在参考相关研究基础上[23]，按照相对独立、较少冗余原则，选定最大斑块指数（Largest patch index，LPI）、聚合指数（Cohesion index，COHESION）、周长面积比（Perimeter-area ratio，PAR）、分裂指数（Splitting index，SPLIT）4 种指数，对应表征外围圈层式、内城填充式、近郊点轴式、远郊散点式 4 种扩张模式。

### 2.4 相关性分析和回归分析

采用皮尔逊相关系数获取扩张形态与生态带 ESV 变化的关系；将相关系数绝对值为 0~0.3 定义为低度相关，0.3~0.6 为中度相关，0.6~1 为高度相关。对不同生态带 ESV 变化以城市扩张形态为影响因素进行逐步回归，解析各类扩张形态的作用差异。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态带 ESV 时空特征

研究区 2005、2020 年一级和二级 ESV 如图 2 所示：2005—2020 年生态带总 ESV 从 87.79 亿元下降至 75.79 亿元，年均损失 0.75 亿元，年均耗损强度为 0.85%，属低度耗损。各级、各类 ESV 均遭受不同程度损耗。从耗损规模来看，调节服务最大（7.74 亿元），支持服务次之（2.32 亿元），供给服务和文化服务最小（分别为 1.34 亿元和 0.60 亿元）。从耗损程度来看，支持服务、供给服务、文化服务最为剧烈，耗损程度在 15%以上，调节服务由于基数大，耗损程度相对较小（12.52%）；就二级服务而言，食物供给是唯一损耗程度在 25%以上的服务，土壤支持、养分循环支持、生物多样性支持、原材料供给、娱乐文化的损耗程度在 15%~20%，气体调节、气候调节、水文调节、废物调节、水资源供给的损耗程度在 15%以下。

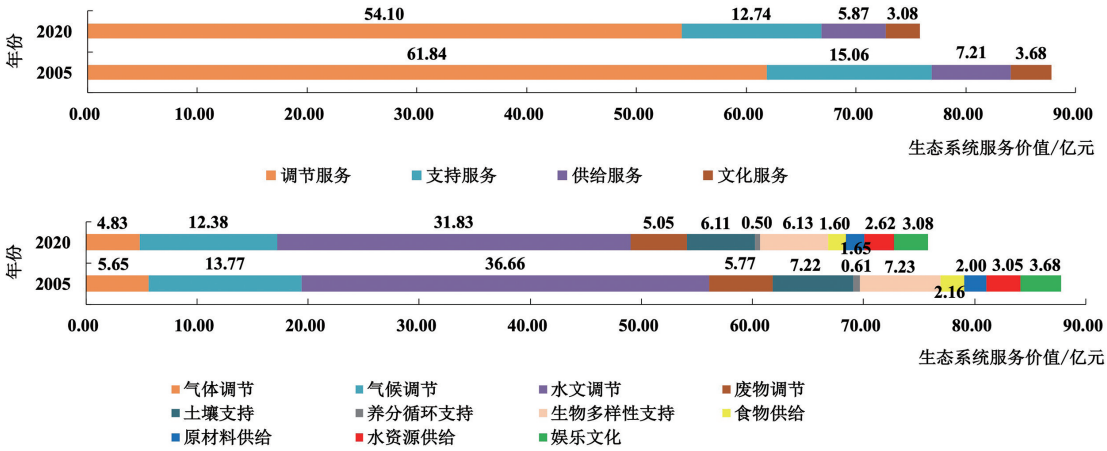



图 2 研究区 2005、2020 年一级和二级 ESV

各生态带 2005、2020 年一级 ESV 及 2005—2020 年变化方位分布如图 3 所示：ESV 在方位上具有凹状、指状两种格局。调节服务、供给服务在方位上呈现以东部、西北部为翼的凹状格局，支持服务、文化服务在方位上表现为以西北部为极的指状格局。由此可见，东部生态带、西北部生态带是各类 ESV 高值分布的主要区域，在生态带保护系统中占据重要地位。ESV 变化规模在前两位的也是东部生态带和西北部生态带。支持服务在西北部生态带的变化规模最为显著，主要发生在仓前平原、鸬鸟低山丘陵一带以及西溪湿地及周边区域，除此以外的 ESV 大规模耗损都出现在东部生态带，这与近 15 年杭州主导的“东扩西进”空间发展战略密切相关，绝大多数用地增量开发都落在这两大生态带，东部、西北部平原水网与滨海湿地的脆弱生态空间被快速低成本地转化为城市硬质景观。ESV 变化强度在北部生态带最为强烈，在方位上呈现以北部为极的柱锥结构，这是北部生态带 ESV 基数小，紧邻主城区、临平副城区，建设用地大量蚕食高 ESV 的森林斑块、湿地斑块的结果。

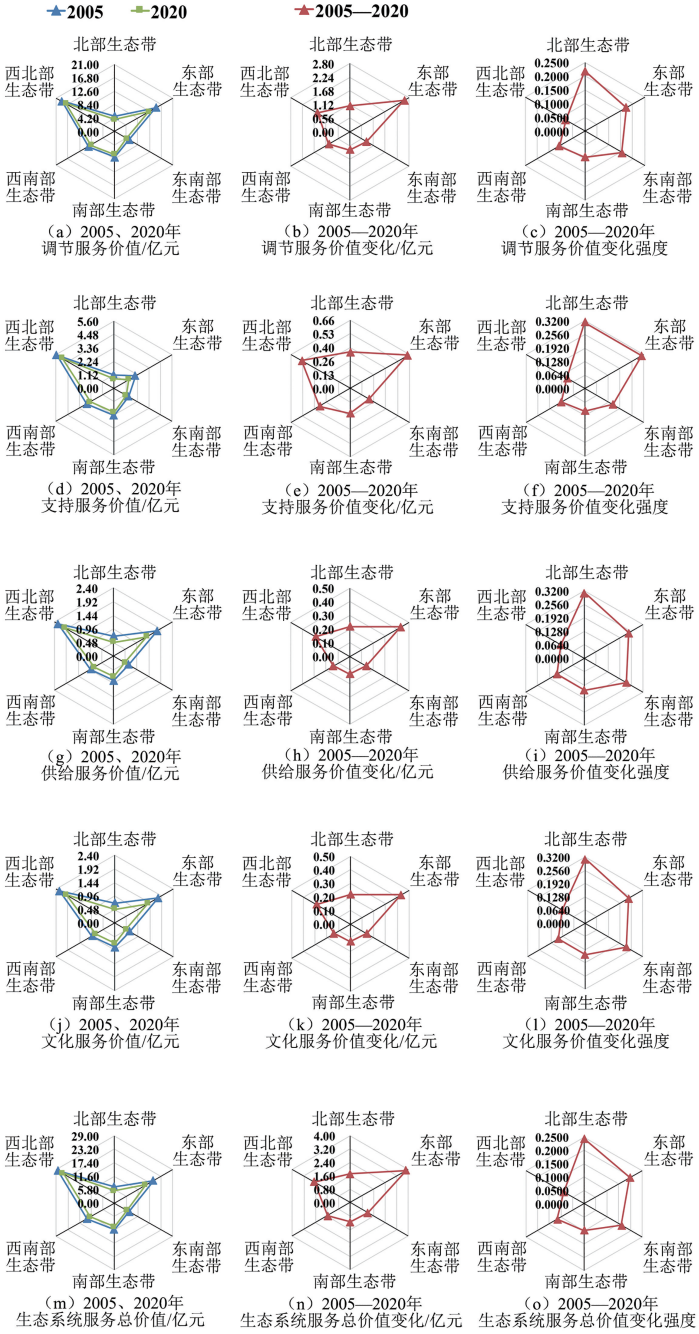



**图 3　各生态带 2005、2020 年一级 ESV 及其 2005—2020 年变化规模与强度**

### 3.2　城市扩张形态时空特征

研究区各生态带 2005—2020 年景观格局指数变化如图 4 所示：2005—2020 年研究区 LPI 大幅上升，COHESION 小幅增加，伴随 PAR、SPLIT 显著下降。由此可见，外围圈层式是研究区城市扩张的主要方式，城市形态渐趋紧凑，碎化度降低，生态带管控产生既定效果。从不同景观格局指数在各生态带的变化情况来看，LPI、PAR 在东部生态带的变化最为剧烈，表明外围圈层式是东部生态带的主导扩张方式，扩张过程伴随城市形态由点轴不规则状转为近圆规则状；COHESION、SPLIT 在西北部生态带的变化最为明显，说明内城填充式是西北部生态带主要扩张方式，城市内部或相互之间非建成区的用地开发，促使原有远离或不依附于建成区的分散小规模的用地斑块大大减少；除东部生态带和西北部生态带外，其余生态带不存在主导的扩张形态。

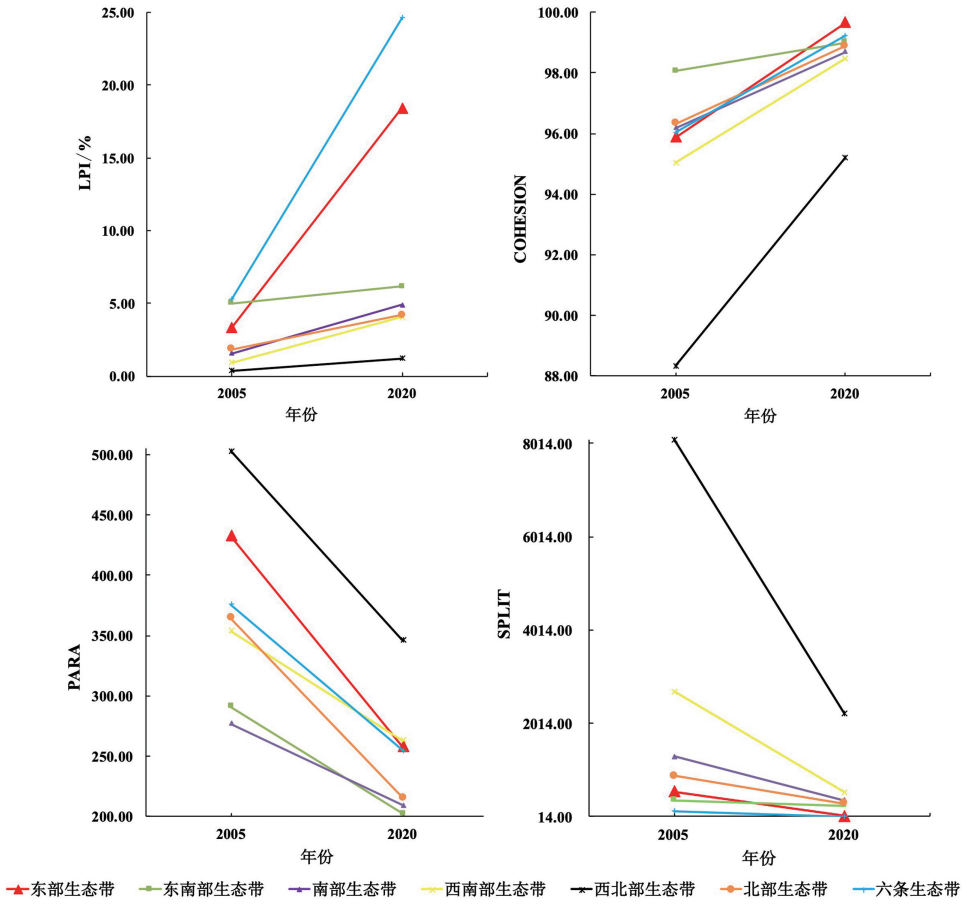



图 4 研究区各生态带 2005—2020 年景观格局指数变化

研究区 2005、2020 年景观格局指数及 2005—2020 年变化的空间分布如图 5 所示：外围圈层式即 LPI 增值热点呈核状，主要分布在生态带穿孔的副城、组团或重大基础设施周边（如东部生态带与萧山空港的邻接地区），以及生态带核心城镇外围（如西南部生态带的蒋村街道边缘）。内城填充式即 COHESION 增值热点主要发生在生态带城镇内部或相互之间，如西北部生态带的城西科创大走廊。近郊点轴式即 PARA 增值热点主要出现在农田水系纵横交错带（如东部生态带的大面积平原水网地区），还有低丘缓坡指状区域（如南部生态带的青化山和石牛山周边），以及交通干道沿线（如西北部生态带的杭长线）。远郊散点式即 SPLIT 增值热点主要在林地（如西北部生态带的鸬鸟山）、湿地（如北部生态带的东塘—丁山湖湿地）、自然保护地（如西南部生态带的灵山—龙坞风景区）等大型生态斑块内可见。

### 3.3 ESV 变化对城市扩张形态的响应

研究区一级、二级 ESV 变化同景观格局指数变化的相关系数如图 6 所示：ESV 变化与景观格局指数变化的相互作用有两种情形，即 ESV 耗损与 PARA、SPLIT 减值呈正相关，与 LPI、COHESION 增值呈负相关。LPI、COHESION 增值所表征的外围圈层式和内城填充式以 ESV 高损耗量为代价，而 PARA、SPLIT 增值所表征的近郊点轴式和远郊散点式对 ESV 的损耗起到缓解作用，一定程度实现 ESV 保值增值。从各类扩张形态对 ESV 耗损的贡献度来看，外围圈层式比内城填充式对所有一级 ESV 耗损的推动作用更为明显，而近郊点轴式和远郊散点式除了对调节服务耗损的遏制效果近似外，前者对支持服务、供给服务、文化服务耗损的抑制作用比后者更加有效；就二级服务而言，4 种扩张形态对食物供给、原材料供给、养分循环支持、土壤支持、气体调节损益的正负影响最为强烈，而对水文调节、水资源供给损益的加速或缓解作用不明显。

各生态带 ESV 变化与景观格局指数变化的逐步回归系数如表 2 所示：外围圈层式对 6 条生态

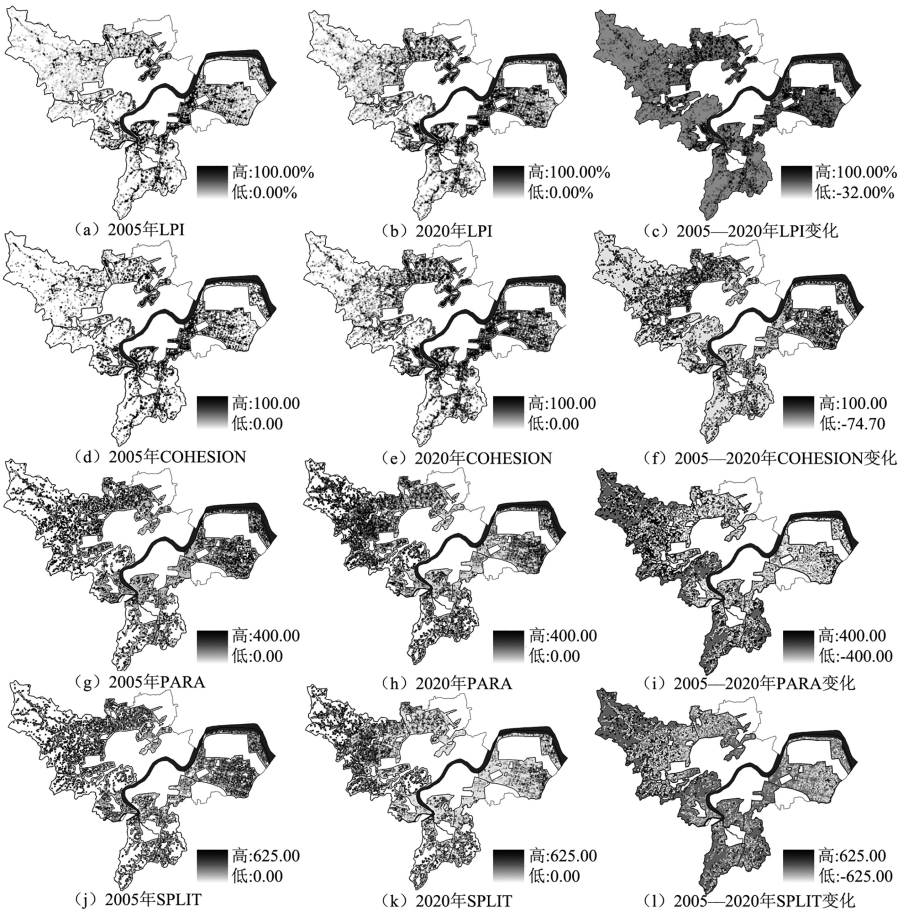



图 5　研究区 2005、2020 年景观格局指数及其 2005—2020 年变化的空间分布

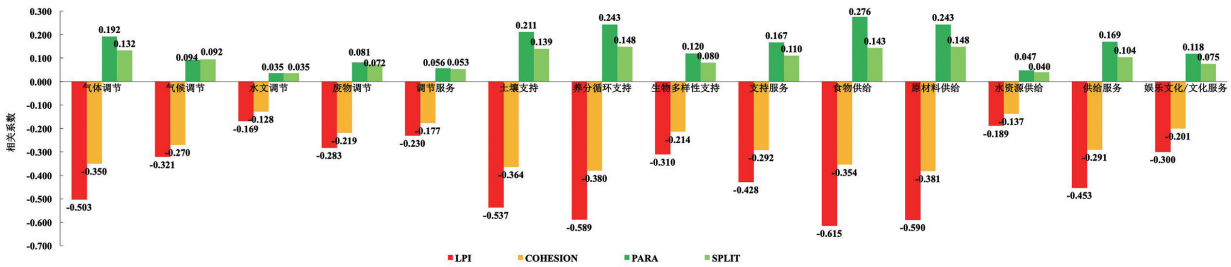



图 6　研究区一级、二级 ESV 变化同景观格局指数变化的相关系数

带 ESV 增益产生极为明显的消极影响，由内向外的圈层扩张致使建成区周边本就脆弱敏感的生态基质发生剧烈变动。内城填充式除在西北部生态带作用不明外，对其余 5 条生态带 ESV 增益具有明显负向效应。就西北部生态带而言，内城填充式一方面加速调节服务、供给服务耗损；另一方面与支持服务、文化服务增益呈正相关。正负相消，归因于西北部生态带管控面积最大且内部生态系统类型复杂，多维 ES 间存在此消彼长的权衡关系。近郊点轴式对东南部生态带、南部生态带、北部生态带 ESV 耗损产生抑制作用，但对东部生态带、西北部生态带 ESV 增益具有负向效应。针对近郊点轴式对东南部生态带、南部生态带、北部生态带 ESV 耗损的抑制现象前者，根据景观生态学原理，斑块形状越不规则，斑块生态系统状况越好。近郊点轴式削弱了建设用地边缘的人工几何特征，使用地形态整体趋于有机，与东南部生态带、南部生态带、北部生态带的低山丘陵斑块相咬合。针对近郊点轴式对东部生态带、西北部生态带 ESV 增益的负向作用后者，东部生态带、西北部生态带的建成区依附于平原水网基质，不规则触角状的用地延伸对农田斑块的侵蚀

作用和对水网廊道的切割作用被放大。远郊散点式对东部生态带、西北部生态带、西南部生态带 ESV 增益具有促进作用，而与南部生态带 ESV 耗损呈正相关，这是因为东部生态带、西北部生态带以大面积、均质化的平原水网为主，小规模分散式的用地开发割裂生态廊道的风险小，能够保证大型生态斑块的系统性；西南部生态带拥有西湖风景名胜区、西溪国家湿地公园等人文斑块，是文化服务的重要载体，小规模分散式的点状用地多为增添必要的文化服务设施，增强了文化服务；南部生态带以石牛山、青化山两大森林斑块为主，散点式用地开发侵入森林斑块的现象使完整的林地斑块发生穿孔，损害了森林生态系统提供的调节服务、支持服务和供给服务。

**表 2 各生态带 ESV 变化与景观格局指数变化的逐步回归系数**

| 项目 | | 各生态带 ESV 变化 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 东部生态带 | 东南部生态带 | 南部生态带 | 西南部生态带 | 西北部生态带 | 北部生态带 |
| 常量 | | 817.095 | −825.385 | 1 474.730 | 1 059.804 | 3 692.184 | −1 064.807 |
| LPI 变化 | | −275.582 | −149.921 | −223.902 | −294.967 | −380.151 | −158.553 |
| COHESION 变化 | | −18.470 | −32.810 | −31.239 | −31.014 | / | −28.152 |
| PAR 变化 | | −10.329 | 1.186 | 2.722 | / | −11.516 | 2.846 |
| SPLIT 变化 | | 6.291 | / | −3.741 | 1.067 | 5.183 | / |
| 扩张形态 | 外围圈层式 | − | − | − | − | − | − |
| | 内城填充式 | − | − | − | − | — | − |
| | 近郊点轴式 | − | + | + | — | − | + |
| | 远郊散点式 | + | — | − | + | + | — |
| 作用机制 | | (−,−,−,+) | (−,−,+,—) | (−,−,+,−) | (−,−,—,+) | (−,—,−,+) | (−,−,+,—) |

注：“/”代表无值；“+”代表正向效应；“−”代表负向效应；“—”代表既没有正向效应也没有负向效应。

## 4 讨论

景观格局指数的类型庞杂，指数间冗余度高，在选用时需充分考虑指数的关联性，确保指数间相对独立[24]。为验证扩张形态间是否有自关联现象，对 4 类景观格局指数变化进一步作相关性分析。通过相关性分析得到，LPI 与 COHESION 的相关系数为 0.610，两者呈高度正相关，而 LPI 与 PAR、SPLIT 的相关系数分别为−0.193、−0.200，为低度负相关；COHESION 与 PAR 的相关系数为−0.131，两者呈低度负相关，但与 SPLIT 的相关系数为−0.490，两者为中度负相关；PAR 与 SPLIT 的相关系数为 0.204，两者是低度正相关。这与车通等[25]的分析结果一致。由此可见，圈层扩张与填充扩张联系紧密，两种扩张形态具有显著的协同关系，这是由于在圈层扩张的过程中，主城斑块与其周边斑块的距离会越来越近，使得副城、组团与主城之间的空隙越容易被填充，从而形成连片的城市空间。填充扩张与蔓延扩张具有较明显的权衡关系，这是因为填充扩张促使城市形态越加紧凑，边缘的规则几何特征更为突出，抑制了蔓延扩张所带来的不规则城市边界，同样，蔓延扩张越显著，城市结构越分散，城市形态的紧凑性和规则几何特征就越不明显。就扩张形态的生态效应来看，圈层扩张、填充扩张对于 ESV 损益的影响具有较高的一致性，在实际的城市增长过程中，这两者扩张形态往往也会同步产生、同时作用[26]；填充扩张与蔓延扩张对于 ESV 损益的作用相反，两者在现实的城市增长中也是相互抑制、此消彼长[26]；圈层扩张同点轴扩张、蔓延扩张，填充扩张同点轴扩张，点轴扩张同蔓延扩张，上述三组扩张形态没有突出的权衡或协同关系，对 ESV 损益影响不存在连带效应。本文发现的圈层扩张、填充扩张的集聚性以及蔓延扩张的分散性，和车通等[25]提出的城市扩张过程中建设用地景观存在“集聚—扩散—集聚”现象这一观点相似，但本文还揭示了圈层扩张和填充扩张的协同性，以及圈层扩张同点轴扩张、蔓延扩张，填充扩张同点轴扩张，点轴扩张同蔓延扩张，三组扩张形态的无关联性。

## 5 结论

1）快速城镇化阶段，生态带保护政策对 ESV 耗损速度具有缓解作用，但仍难以扭转 ESV 连年

下降态势，难以实现 ESV 保值增值，耗损规模及强度跟城市空间发展战略、总体规划界定的城市空间结构等因素密切相关。

2）生态带设立前后，外围圈层式和内城填充式成为城市扩张的主导形态，土地开发向优势城镇集中，重要城镇控制作用进一步增强，生态带管控对城市扩张的空间紧凑性引导产生既定效果。

3）生态带全局视角下，LPI 增值所表征的外围圈层式和 COHESION 增值所代表的内城填充式对 ESV 损耗具有推动作用，PARA 增值所反映的近郊点轴式和 SPLT 增值所描述的远郊散点式对 ESV 耗损发挥遏制力；生态带局部视角下，4 类扩张形态对不同生态带 ESV 变化的正负影响具有多种组合形式，这是由各生态带的要素构成及主导生态系统类型、空间穿孔状况、服务间权衡与协同效应、生态网络连续性等原因所致。

**参考文献**


[1]COSTANZA R,D'ARGE R,DE GROOT R,et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Nature,1997,387:253-260.

[2]TIAN S Q,WU W,SHEN Z,et al.A cross-scale study on the relationship between urban expansion and ecosystem services in China[J].Journal of Environmental Management,2022,319:115774.

[3]黄云凤,崔胜辉,石龙宇.半城市化地区生态系统服务对土地利用/覆被变化的响应:以厦门市集美区为例[J].地理科学进展,2012,31(5):551-560.

[4]王杉,吕寅超,林静雅,等.苏州游湖地区土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].中国城市林业,2022,20(2):125-130.

[5]韩增林,孟琦琦,闫晓露,等.近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系[J].生态学报,2020,40(8):2555-2566.

[6]刘永婷,杨钊,徐光来,等.基于四象限模型的生态系统服务与人类活动强度关联性分析:以皖南国际旅游文化示范区为例[J].生态学报,2022,42(13):5200-5210.

[7]江原,郝媛媛,黄祎宸.基于夜间灯光数据的甘青宁城市扩展及其建成区植被变化特征[J].生态学报,2022,42(10):3974-3988.

[8]李发志,朱高立,姬超,等.基于不透水表面指数的城市扩张趋势及驱动机制分析:以南京市为例[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):575-590.

[9]李嘉译,匡鸿海,王佩佩.重庆市主城区城市扩张对生态系统服务影响的时空评估[J].长江流域资源与环境,2020,29(4):859-868.

[10]王颖慧,丁建丽,李晓航,等.伊犁河流域土地利用/覆被变化对生态系统服务价值的影响:基于强度分析模型[J].生态学报,2022,42(8):3106-3118.

[11]乔旭宁,石漪澜,郭静,等.郑州都市圈不同等级城镇扩张对生态系统服务的影响研究[J].地理研究,2022,41(7):1913-1931.

[12]欧阳晓,王坤,魏晓.城乡建设用地关联对生态系统服务的影响:以洞庭湖地区为例[J].生态学报,2022,42(21):8713-8722.

[13]谭德明,丁仕宇,韩宝龙,等.不同发展模式对城市生态系统调节服务价值的影响[J].生态学报,2022,42(16):6554-6564.

[14]聂宇,杨彦敏,王一航,等.拉萨市城关区近 50 年城市扩展过程对自然生境质量的综合影响[J].生态学报,2022,42(6):2202-2220.

[15]王猛,提杨,王家栋,等.不同土地利用情景下天津市生态系统服务及权衡与协同分析[J].北京林业大学学报,2022,44(5):77-85.

[16]谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.

[17]石薇,程开明,汪劲松.基于核算目的的生态系统服务估价方法研究进展[J].应用生态学报,2021,32(4):1518-1530.

[18]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衡协同关系[J].水土保持研究,2024,31(3):391-400.

[19]陈文波,肖笃宁,李秀珍.景观指数分类、应用及构建研究[J].应用生态学报,2002,13(1):121-125.

[20]阳文锐.北京城市景观格局时空变化及驱动力[J].生态学报,2015,35(13):4357-4366.

[21]王新生,刘纪远,庄大方,等.中国特大城市空间形态变化的时空特征[J].地理学报,2005,60(3):392-400.

[22]周春山,叶昌东.中国城市空间结构研究评述[J].地理科学进展,2013,32(7):1030-1038.

[23]杨婉清,杨鹏,孙晓,等.北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响[J].生态学报,2022,42(16):6487-6498.

[24]李佳滢,杨冬冬,杨菲,等.城市化背景下景观格局对天津市生态系统服务供需匹配的影响[J].生态学报,2024,44(12):4987-5002.

[25]车通,李成,罗云建.城市扩张过程中建设用地景观格局演变特征及其驱动力[J].生态学报,2020,40(10):3283-3294.

[26]冀青青,乔伟峰,卢诚,等.1980 年以来南京市建设用地扩张阶段性特征[J].长江流域资源与环境,2018,27(09):1928-1936.