

任其然,安睿,陆砚池,等.山东省生态系统服务簇的时空演变及其非线性协同关系研究[J].中国环境科学,2026,46(5):2946-2960.

Ren Q R, An R, Lu Y C, et al. Study on the spatiotemporal evolution and nonlinear synergistic relationships of ecosystem service bundles in Shandong Province [J]. China Environment Science, 2026,46(5):2946-2960.

山东省生态系统服务簇的时空演变及其非线性协同关系研究

任其然¹,安睿²,陆砚池³,刘耀林^{3*} (1.贵州大学旅游与文化产业学院,贵州 贵阳 550025; 2.陕西师范大学地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119; 3.武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 基于山东省 2000、2005、2010、2015 和 2020 年五期多源空间数据,构建生境质量、水源涵养、土壤保持、固碳、粮食供给和娱乐休憩 6 类生态系统服务指标,采用自组织映射(SOM)识别生态系统服务簇(ESB),并结合因子分析和广义加性模型(GAM),分析各簇内部生态系统服务的协同—权衡关系及其情境依赖性.结果表明:(1)2000~2020 年山东省生态系统服务总体变化显著,空间上表现为“鲁中南山地—胶东丘陵的调节类服务高值区相对稳定,省会及沿海城市圈周边的生境质量与固碳服务下降”.(2)全省共识别出 8 类生态系统服务簇,其中综合调节簇和多功能供给簇面积最大且稳定性较高,以城市生活簇和发展潜力簇为代表的人类活动增强区呈现持续吸纳周边单元的演化方向.(3)簇内服务关系兼具共性与差异:土壤保持与水源涵养在多数簇中保持协同,是山东省 ESB 的共性特征;供给服务与调节/文化服务之间的权衡现象普遍存在;粮食供给与娱乐休憩在综合调节簇、多功能供给簇中表现为协同,在城市生活簇中则转为权衡,表明其强度具有显著的地理依赖性.(4)上述关系反转主要受“自然基底—人类扰动”双重作用调节:生态用地占比高、地形起伏和水热条件较好的鲁中南及胶东丘陵能够维持调节类服务簇的稳定,而建设用地集聚、夜间灯光增强的城市生活簇更易诱发服务间的资源竞争.研究表明,从生态系统服务簇的视角开展分情境管理,可为山东省差异化生态补偿和国土空间精细化管控提供针对性依据.

关键词: 生态系统服务簇; 权衡与协同; 非线性响应; 山东省

中图分类号: X171.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2026)05-2946-15

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20251128.002

Study on the spatiotemporal evolution and nonlinear synergistic relationships of ecosystem service bundles in Shandong Province. REN Qi-ran¹, AN Rui², LU Yan-chi³, LIU Yao-lin^{3*} (1.College of Tourism and Cultural Industry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 3.School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430072, China). *China Environment Science*, 2026,46(5): 2946~2960

Abstract: Based on five periods of multi-source spatial data for 2000, 2005, 2010, 2015, and 2020, this study constructed six ES indicators—habitat quality, water conservation, soil retention, carbon storage, food provision, and recreation—and employed a self-organizing map (SOM) to identify ecosystem service bundles (ESBs). Combined with factor analysis and a generalized additive model (GAM), we examined the synergy-trade-off relationships within each bundle and their context dependence. The results show that: (1) ESs in Shandong Province changed markedly from 2000 to 2020, with a spatial pattern characterized by relatively stable high values of regulating services in the central-southern mountainous area and the Jiaodong hilly area, and declines in habitat quality and carbon storage around the provincial capital and coastal urban agglomerations. (2) Eight types of ESBs were identified across the province. Among them, the comprehensive regulating bundle and the multifunctional supply bundle had the largest areas and the highest stability, while human-activity-enhanced bundles such as the urban-living bundle and the development-potential bundle showed a persistent tendency to absorb surrounding units. (3) Service relationships within bundles exhibited both commonality and differentiation: the soil retention-water conservation pair remained synergistic in most bundles, representing a common feature of ESBs in Shandong; trade-offs between provisioning and regulating/cultural services were widespread; however, the “food provision-recreation” pair was synergistic in the comprehensive regulating and multifunctional supply bundles but turned into a trade-off in the urban-living bundle, indicating a pronounced geographical dependence of its interaction strength. (4) Such relationship reversals were mainly regulated by the dual effects of “natural baseline—human disturbance”: areas with high shares of ecological land, greater topographic relief, and favorable hydrothermal conditions (e.g., the construction land and intensified central-southern mountains and Jiaodong hills) tended to maintain stable regulating-service bundles, whereas areas with concentrated

收稿日期: 2025-09-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42230107);国家自然科学基金青年项目(42401323);贵州省科技厅基础研究计划青年引导项目(黔科合基础 QN(2025) 040)

* 责任作者, 教授, yaolin610@yeah.net

nighttime lights (urban-living bundles) were more prone to triggering resource competition among services. These findings suggest that context-specific management from the perspective of ESBs can provide more targeted support for differentiated ecological compensation and refined territorial spatial planning in Shandong Province.

Key words: ecosystem service bundles; trade-offs and synergies; nonlinear response; Shandong Province

可持续发展是国家战略规划的核心。党的十八大以来,以习近平同志为核心的党中央将生态文明建设纳入“五位一体”总体布局,推动生态治理体系现代化^[1]。在城镇化冲击导致生态系统显著退化的背景下,生态系统服务(Ecosystem Services, Ess)的科学管理已成为治理现代化的重点议题。二十届三中全会将“健全生态环境治理体系”列为改革重点,2025 年政府工作报告进一步强调统筹山水林田湖草沙系统治理与生态产品价值实现^[2]。作为生态治理的核心对象与支撑,ESs 既是人类福祉的自然资本^[3-4],也是连接自然与社会系统的关键纽带^[5]。不同的生态系统服务通过要素互动维持系统平衡^[6];同时,人类行为亦深刻重构其运行状态^[7]。综上,ESs 的形成与变化并非单向过程,而是“自然供给—人类反馈”的双向耦合结果,这要求对不同服务关系开展有针对性的主动调控。

当前生态治理实践面临的核心挑战在于如何聚焦不同的区域与生态系统服务组合厘清生态系统服务的动态复杂关系。尽管学界已认识到不同区域生态功能在能量流动、物质循环过程中普遍存在此消彼长的权衡(Trade-offs)与互利共生的协同(Synergies)关系^[8-10],但对于这种关系在不同空间情境/簇类中的非线性演化与阈值特征,认识仍显不足,管理上因此容易在定向提升某一服务时引发关联服务的非预期衰减^[11]。为此,生态系统服务簇(Ecosystem Service Bundles, ESB)作为表征 ESs 空间共现与功能耦合的新范式,被用于在保持系统复杂性的同时将治理单元情境化^[12-14]:它既能揭示主导服务组合及其演化路径^[15-16],也能为分区管理提供直观载体^[17-18]。方法上,ESB 识别主要采用 k 均值^[19]、高斯混合^[20]、主成分—聚类联合^[18]与自组织映射(SOM)等方法^[21],其中 SOM 凭借非线性降维与对空间梯度的敏感性,在捕捉簇间跃迁规律方面更具优势。然而,既有研究多止于对服务簇的识别与空间分布描绘,对于同一服务组合在不同社会—生态情境下由协同转为权衡(或由权衡转为协同)的关系反转机制,及其地理依赖性与阈值区间缺乏系统阐释。基

于此,本文以 1km 栅格为基础空间单元,利用多种生态系统服务指标的空间共现特征,采用自组织映射方法识别生态系统服务簇,并以服务簇作为情境化分析单元。在此基础上,结合因子分析与广义加性模型,刻画簇内生态系统服务协同—权衡关系的非线性特征及其可能的关系反转区间,重点揭示不同社会—生态情境下服务关系差异的形成机制。

山东省处于农业高投入区、沿海城镇密集区与中南部山地生态屏障交织的典型人地系统中,人类活动梯度显著、生态系统类型多样,是开展生态系统服务簇识别及其时空分异研究的理想区域。在该省域尺度上,从生态系统服务簇视角解析多种服务的组合特征及其内部协同—权衡关系,有助于为国土空间规划和黄河流域生态保护与高质量发展提供更具情境针对性的生态治理依据。基于上述背景,本文以山东省为研究区,重点回答以下三个相互关联的科学问题:(1)在省域尺度上,如何基于生态系统服务的空间共现特征识别具有情境一致性的生态系统服务簇,并揭示其 2000~2020 年的时空演变格局;(2)在不同服务簇内部,主要生态系统服务之间的协同与权衡关系呈现出何种空间差异,哪些服务组合表现出典型的共性协同或关系反转特征;(3)簇内服务关系的差异能否在“自然基底—人类扰动”的社会—生态框架下得到解释,从而为差异化生态补偿与国土空间精细化管控提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

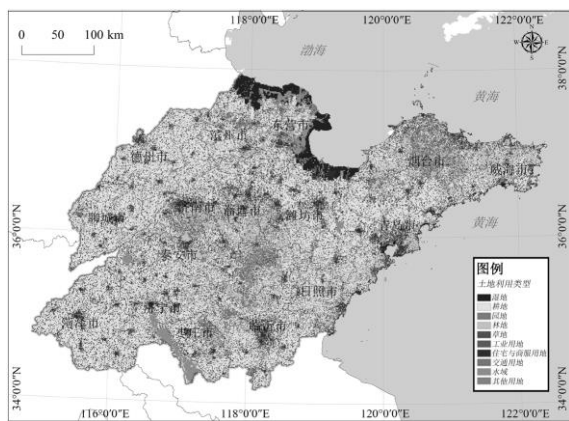
1.1 研究区概况与数据来源

1.1.1 研究区概况 山东省位于中国东部沿海(34°22'~38°24'N,114°47'~122°42'E),陆域面积约 157,966km²;下辖 16 个设区市(图 1)。省域地貌以“中高四低、山海并存”为特征:中部和南部为泰沂山系及其延伸的低山丘陵,西部为华北平原,东部滨海一带多为低山、丘陵与台地,相对高差塑造了明显的水土保持与水源涵养潜力梯度。区域属暖温带半湿润季风气候,年平均气温约 11~14℃,多年平均降水量约 680mm,整体呈由东南向西北递减的空间格局。土地

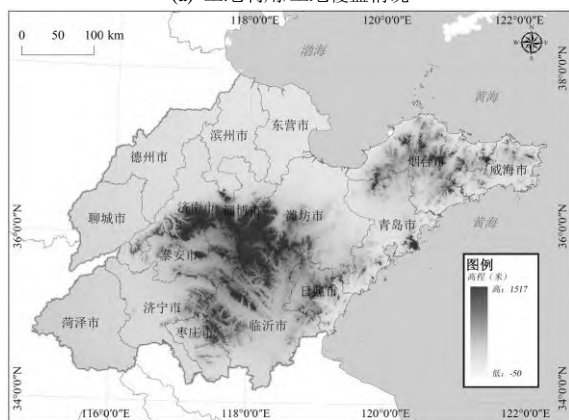
利用类型以耕地为主(约 44%),其后为林地、草地和湿地等多种生态用地,构成了粮食生产、生态保育和滨海利用并存的多功能生态系统基础.经济社会方面,山东省处于京津冀与长三角两大城市群之间的通道位置,东临渤海和黄海,海岸线长、城镇分布带状,形成了由沿海—平原—丘陵—山地逐级递减的人类活动梯度.改革开放以来省域经济持续快速增长,城镇化率已超过 60%,建设用地在沿海城市圈、省会经济圈及主要交通廊道集聚扩张.快速城市化在推动土地利用格局重组的同时,也增加了对水资源、生境质量和固碳等生态系统服务的压力,为分析不同社会—生态情境下生态系统服务簇的形成与演变提供了典型场景.

已被转化为空间数据,并采用 Krasovsky_1940_Albers 坐标系统进行统一标准化.为了一致性,具有不同分辨率的栅格数据均被重新采样为 1km².此外,使用 ArcGIS10.7 对数据进行预处理.本文所涉及数据信息如下:

(1)土地利用/覆盖数据:2000~2020 年土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心,分辨率为 1km,用于构建生态系统服务评估的土地利用基础;(2)气象数据:2000~2020 年气象数据来自中国气象数据共享网,具体包括年平均气温、年降水量、相对湿度、风速和日照时数.站点数据采用反距离权重(IDW)方法插值到 1km 空间分辨率,并采用留一法计算 MAE、RMSE 以检验插值精度,插值结果满足后续空间分析的需求;(3)土壤数据:土壤数据来自联合国粮农组织提供的世界土壤数据库(HWSD)中国土壤数据集,该数据集来自中国科学院南京土壤研究所提供的 1:100 万中国土壤地图,空间分辨率为 1km;(4)DEM 数据来自 CIAT-CSI SRTM.空间分辨率为 90m;(5)社会经济数据:县(市、区)尺度的 GDP、人口、粮食产量等数据来源于《山东省统计年鉴(2000~2020)》及各地市统计年鉴.为与 1km 栅格保持一致,首先按行政区划进行面域赋值,再结合土地利用类型采用加权分配法生成栅格数据,最终形成与生态系统服务评估分辨率一致的社会经济栅格;(6)夜间光照数据:夜间光照数据来源于现有文献中 2000~2020 年夜间光照数据的扩展时间序列^[22].考虑到山东省部分大中城市存在灯光饱和与背景噪声,本研究参照文献方法并结合研究区特征进行了区域校正:设定最低亮度阈值以剔除非建成区噪声,对济南、青岛、潍坊等饱和区进行线性拉伸重标定,并将校正后的夜间灯光强度与同期建成区面积进行相关性检验,以确认其能够有效表征城市化/人类活动强度;(7)蒸散量数据(ET0):ET0 数据来自 NASA Earth Science Data.



(a) 土地利用/土地覆盖情况



(b) 高程分布情况

图 1 山东省概况

Fig.1 Overview of Shandong province

该图基于山东省自然资源厅标准地图(审图号为鲁 SG (2020) 019 号) 绘制,底图无修改.下同

1.1.2 数据来源与预处理 本研究使用了包括栅格数据、卫星遥感数据、矢量数据、监测站数据以及统计数据等多种数据类型,且所有非空间数据均

1.2 研究方法

本研究的分析流程分为 3 个层次:首先,利用自组织映射(SOM)对多种生态系统服务进行聚类,识别具有空间共现特征的生态系统服务簇(ESB),以获得生态情境相对一致的分析单元;其次,在簇类尺度上引入自然地理与人类活动等社会—生态驱动因子,通过相关性检验与因子筛选构建服务关系的影

响因素体系;最后,采用广义可加模型(GAM)刻画“簇内生态系统服务关系”对主要驱动因子的非线性响应及其阈值特征,从而解释同一服务组合在不

同簇中出现协同—权衡关系反转的机理.上述步骤共同构成了“服务簇识别—驱动因子提取—非线性机制解析”的系统分析框架(图 2).

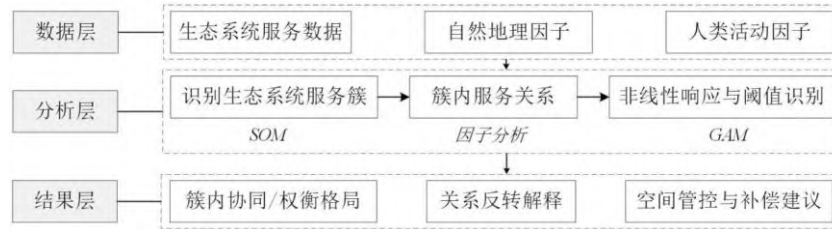


图 2 生态系统服务簇识别与机制分析框架

Fig.2 Framework for ESB identification and mechanism analysis

1.2.1 生态系统服务量化 本文依据以下几项标准,挑选了 6 种生态系统服务:(1)在指标选取上应与 2005 年的 MEA 生态系统服务分类原则相符合^[23];(2)这些服务在研究区的自然环境和社会经济条件下具有代

表性;(3)评估这些服务的模型适用性强,且相关的量化数据和图表资料易于获取.本研究严格基于以上标准,共选定了 6 种生态系统服务,涵盖了 4 种不同类型的生态系统服务.具体的组成和说明请参见表 1.

表 1 生态系统服务的类型及评估方法

Table 1 Categories of ecosystem services and their evaluation methods

ES 类别	ES 功能	简称	方法	单位
支持服务	生境质量	HQ	生态系统服务综合评估与权衡模型	无量纲
供给服务	粮食供应	GP	能量供应方程	10 ¹² J/km ²
	土壤保持	SC	修订后的通用土壤流失方程	t/hm ²
调节服务	固碳服务	CS	生态系统服务综合评估与权衡模型	10 ⁴ t/km ²
	水源涵养	WC	生态系统服务综合评估与权衡模型	mm
文化服务	娱乐休憩	RS	娱乐机会频谱模型	无量纲

1.2.2 生态系统服务簇量化 (1)自组织映射(SOM):研究采用 SOM 对生态系统服务簇进行量化.SOM 是一种无监督的神经网络聚类方法,能够根据多维特征的相似性将样本自动映射到低维拓扑结构上,适用于识别生态系统服务在空间上的共现模式^[8].本文以研究期内同一空间尺度上的标准化生态系统服务值作为输入特征,将每个 1km 网格划分到相应的生态系统服务簇中,以确保不同时期、不同区域的 ES 值具有可比性.SOM 分析在 R 软件(4.0 版)的“kohonen”包中完成^[24],输出的簇类结果将作为后续簇内服务关系分析与驱动机制识别的空间分组基础.

因子的可解释性确定^[26].以保证提取的因子既能反映主要的服务组合特征,又不会造成过度分解.随后,将各簇的因子得分进行空间化表达,用以刻画不同生态系统服务簇内部权衡/协同关系的空间异质性.

(2)因子分析:为了识别各生态系统服务簇内部不同服务之间的权衡与协同作用,本文在簇内尺度上采用带最大方差旋转的因子分析(SPSS v26)来提取主成分^[25].因子数量依据碎石检验及派生

(3)广义加性模型:为了进一步揭示“簇内生态系统服务关系”受社会—生态驱动因子影响的非线性特征,本文采用广义加性模型(GAM)进行拟合^[27].本研究主要利用 GAM 来识别簇内生态系统服务关系是否存在非线性趋势以及可能的响应区间,用于解释同一服务组合在不同簇中出现协同—权衡关系反转的现象.模型的一般形式为:

$$g(E(Y|X))=\beta_0+f_1(X_1)+f_2(X_2)+\dots+f_p(X_p) \quad (1)$$

式中:Y 是响应变量,X₁,X₂,...,X_p 是解释变量,g(·)是链接函数,它可以根据响应变量的分布进行选择(例如,对于二项分布的响应变量,通常选择 logit 链接函

数) f_1, f_2, \dots, f_p 是平滑函数,用于捕捉解释变量与响应变量之间的非线性关系^[28-29].考虑到生态系统服务对驱动因子的响应往往存在阈值区间,为避免过拟合,本研究将平滑函数的基维度初始设定为 5,并根据拟合效果在不超过 6 的范围内进行调整^[30-33].通过比较各平滑函数的变化趋势,可识别出不同驱动因子对应的非线性响应及可能的阈值点,为解释同一服务组合在不同簇中出现协同—权衡关系反转提供量化依据.

(4)生态系统服务簇的最优数目确定:为保证 SOM 聚类结果具有较好的簇内一致性和簇间差异性,本研究以 Davies-Bouldin 指数作为主要判别依据^[8],同时参考了其他聚类有效性指标的变化趋势.Davies-Bouldin 指数越小,表明簇内的一致性越高,簇间的异质性越大,因此簇的划分越合理.在栅格尺度下,当生态系统服务的簇的数目为 8 时,Davies-Bouldin 指数最小,

因此将 6 种生态系统服务划分为 8 类(图 3).

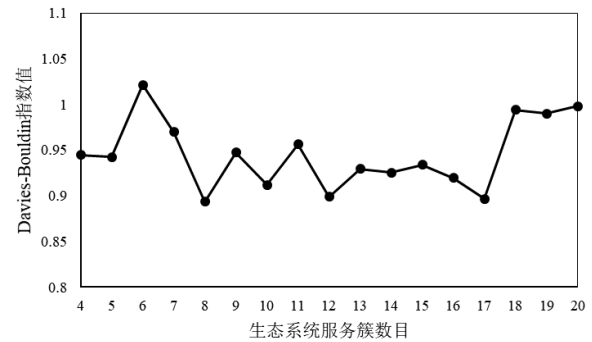


图 3 栅格尺度下生态系统服务簇个数对应的 Davies-Bouldin 指数

Fig.3 Davies-Bouldin Index corresponding to the number of ecosystem service clusters at the grid scale

2 结果分析

2.1 生态系统服务的时空演变特征

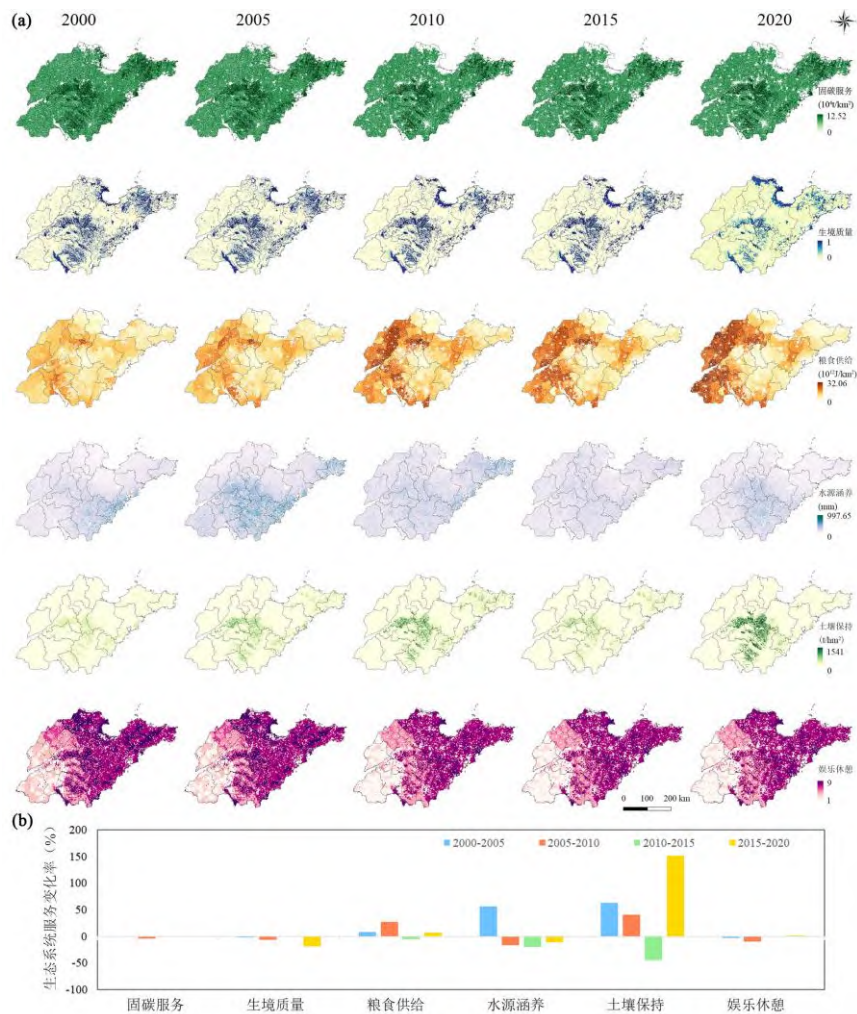


图 4 山东省生态系统服务的空间格局与变化

Fig.4 Spatial patterns and changes of ecosystem services in Shandong province

2000~2020年间,山东省生态系统服务呈现显著时空分异特征(图4)。固碳服务(CS)整体呈下降趋势,但泰安、济南、临沂及枣庄等鲁中西部地区因森林和山地资源丰富,固碳服务有所增加,且呈现集聚特征。然而,快速的城市化进程导致部分高值区域的固碳服务有所下降,尤其是在青岛和潍坊等城市周边地区。生境质量(HQ)服务在过去20年间总体保持稳定,较高值区域集中在人类活动较少的山地和森林区域。相较之下,城市中心区域因经济的快速发展,生境质量有所下降,尤其是在2005~2010年和2015~2020年期间,生境质量的下降较为显著。粮食生产(GP)服务在2000~2010年间显著增长,其中2005~2010年间增速达27.46%,如图4(b)所示。中西部黄河流域依托肥沃土壤与灌溉优势,虽受城市用地侵占影响,仍维持山东省粮食产能的核心地位。水源涵养(WC)和土壤保持(SC)的高值集中于山区和丘陵地带,丰富的自然植被促进了雨水的积聚和渗透,有助于土壤保持和防止水土流失。相反,城市化导致东部平原和沿海经济发达城市的土地利用转变为建设用地(不透水面),使其土壤保持功能受到限制。娱乐休憩(RS)服务在黄河三角洲、胶东半岛和西北山区等地区较高,这些地区因山地、丘陵、湿地和海滨等自然景观的存在,为人们提供了丰富的休闲资源。相反,内陆平原地区由于农业用地较多,娱乐休憩服务相对较低。

2.2 生态系统服务簇的识别及时空演变特征

本部分进一步分析山东省生态系统服务簇的组成及其在时间和空间上的分布特性(图5)。通过定量评估各生态系统服务(ES)的供应量,将服务簇划分为8个主要类别,每个类别反映了不同生态服务的组合和供应强度。具体根据其维持生态平衡、促进可持续发展、保护生物多样性、满足城市居民的生活质量以及提供娱乐休憩等方面的主导服务功能和潜在价值方面的表现命名服务簇类别。最终划分类别分别为:综合调节簇(B1)、生态保育簇(B2)、发展潜力簇(B3)、城市生活簇(B4)、多功能供给簇(B5)、娱乐休憩簇(B6)、食物供给簇(B7)以及水源涵养簇(B8)。具体来看,栅格尺度八个服务簇的时空分布特征如下:

综合调节簇(B1)除粮食供给外,其余生态系统服务供给较为均衡,主要分布于胶东半岛及中西部

山地丘陵区,2000~2020年间面积由17124km²减少至9910km²,整体变化幅度较小,表现出较强稳定性,可能与人类活动增强、土地利用变化及生态保护政策调整有关;生态保育簇(B2)以固碳、娱乐休憩、生境质量、水源涵养和土壤保持服务为主,集中于山东中西部地区,其面积由2000年的5418km²缩减至2020年的4200km²,反映生态保育空间在城市扩张和农业开发压力下有所收缩;发展潜力簇(B3)以娱乐休憩服务供给突出、其他服务较弱为特征,面积由23271km²减少至11314km²,可能表明区域功能由单一休憩向多元服务转变;城市生活簇(B4)整体生态系统服务供给水平较低,主要承担城市居住与商业功能,其面积在2000~2020年间呈现波动变化,反映城市化进程中空间结构调整及生态绿地配置的阶段性特征;多功能供给簇(B5)服务结构与B1相似但整体供给水平较低,面积由38074km²增至50761km²,显示研究期内多功能供给区域持续扩展,可能与生态修复和可持续土地利用措施实施有关;娱乐休憩簇(B6)在生境质量和娱乐休憩服务供给方面显著突出,主要分布于自然景观条件较优区域,其面积由6572km²增至9307km²,反映居民对高品质生态环境和休闲空间需求的增强;食物供给簇(B7)以粮食供给服务为主,体现明显农业生产功能,其面积在研究期内总体呈波动增长态势,显示粮食生产空间在阶段性调整后再次扩张;水源涵养簇(B8)以水源涵养服务最为突出,主要分布于沿海及高山、湿地区域,面积由8912km²增至10690km²,变化反映了不同时期水源保护区划定与管理调整的影响。

图5(c)显示,2000~2020年间山东省生态系统服务簇整体上以自保持为主,其中B5和B7两类簇在各时期均保持了最大的自循环规模,是全期最为稳定的簇;这说明以综合调节或多功能供给为特征的服务组合在社会—生态条件变化下具有较强的结构稳健性。同时,图中仍可识别出若干具有代表性的跨簇转换路径:其一,2000~2005年阶段,部分B3簇单元向B5和B7转入,表明处于中等服务水平的簇更易被综合性或多功能性簇所吸收;其二,2005~2010年阶段,B3对B5的转入关系持续存在,反映了部分区域对供给—调节协同能力的进一步强化;其三,2010~2015年阶段,B3向B4的流动更加明显,说明在人类活动强度上升的带状地区,发展潜力类簇

倾向于向城市生活功能更突出的簇演化.总体而言, 这些转换路径与图 5 中流线粗细的时序分布相吻合,

表明簇间演变具有相对明确的主导方向,而非单纯的面积增减.

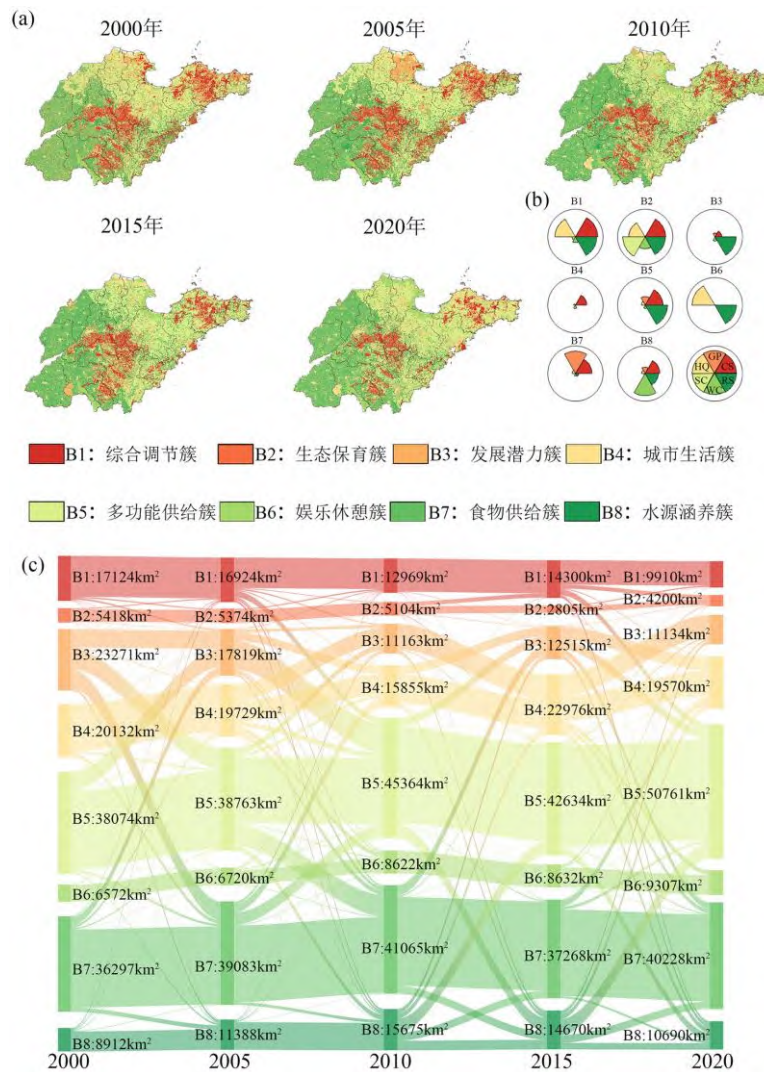


图 5 山东省生态系统服务簇 2000~2020 年时空特征及簇内供给分布

Fig.5 Spatial-temporal characteristics and intra-bundle supply distribution of ecosystem services bundles in Shandong Province from 2000~2020

(a) 山东省 2000~2020 年栅格尺度上生态系统服务簇的时空格局演变;(b) 2020 年山东省栅格尺度上生态系统服务簇中生态系统服务组成和相对大小. 较长的区段代表较高的 ES 供应量;(c) 2000~2020 年栅格尺度上不同生态系统服务簇之间的相互转换面积

2.3 生态系统服务簇内部变化

表 2 为栅格尺度八大生态系统服务簇内不同生态系统服务(CS/HQ/GP/WC/SC/RS)关系的因子分析结果.表格中,因子载荷值(*Factor Loading Value, FLV*)揭示不同 ESs 之间的权衡与协同关系,为识别生态系统服务之间的相互依赖和影响提供了直观的量化指标.因子载荷值 ≥ 0.35 强调特定生态系统服务的显著性.解释方差(*Explained Variance, EV*)代表单个因子能够解释的生态系统服务变异性的比例;

累积方差(*Cumulative Explained Variance, CEV*)则是多个因子共同解释的总变异性比例,累积方差越高意味着选取的因子在描述生态系统服务簇内部关系的解释力越强.

基于表 2 的因子载荷与解释方差分析,本研究解析不同生态系统服务簇(ESB)中服务间的作用关系,揭示出以下三方面规律性特征:第一,供给服务与调节服务普遍存在空间竞争,但特定簇类呈现协同转化.比如,粮食生产(GP)在 B1 簇与

固碳服务(CS)、B7 簇与水源涵养(WC)呈显著权衡,而在 B4 簇中 GP-CS 却转为协同,表明农业生产模式差异可逆转传统对立关系.第二,文化服务(RS)在多数簇类与其他服务共生,但在 B4 和 B6 簇中与 GP 呈现此消彼长,显示出娱乐休憩功能

具有可调节性.第三,调节服务间以协同主导但存在局部解耦(如 B2 簇中的 CS-SC).上述异质性特征表明,生态系统服务关系具有显著的情境依赖性,其作用方向可能受自然基底条件与人类干预强度多条件调控.

表 2 B1~B8 簇内的生态系统服务因子负荷值与解释方差

Table 2 Factor loadings of ecosystem services and explained variance within bundles B1~B8

簇	簇内 ESs 协同与权衡关系	因子负荷值(Factor Loadings Value,FLV)						旋转载荷平方和	
		CS	GP	HQ	SC	WC	RS	解释方差 EV (%)	累计方差 CEV (%)
B1	SC 和 WC 之间的协同作用	0.17	0.04	0.00	0.84	0.79	-0.26	23.57	23.57
	CS 和 HQ 之间的协同作用	0.71	-0.03	0.80	-0.03	0.06	0.46	22.73	46.30
	GP 和 RS 之间的协同作用	0.00	0.98	-0.15	-0.01	0.05	0.37	16.81	63.11
B2	CS、HQ 和 GP 之间的权衡作用	0.84	-0.56	0.87	0.06	-0.08	0.24	30.71	30.71
	WC 和 RS 之间的协同作用	-0.06	-0.16	0.14	-0.01	0.88	0.51	17.93	48.64
	CS 和 SC 之间的权衡作用	-0.35	-0.15	0.07	0.90	-0.03	0.03	16.82	65.46
B3	CS 和 HQ 之间的权衡作用	0.99	-0.17	-0.99	0.01	0.06	0.11	33.34	33.34
	SC 和 WC 之间的协同作用	0.05	0.18	-0.03	0.73	0.72	-0.33	20.05	53.38
	GP 和 RS 之间的协同作用	-0.04	0.79	0.04	0.04	-0.10	0.64	17.51	70.90
B4	CS、GP 和 HQ 之间的协同作用	0.89	0.40	0.89	0.15	-0.12	0.25	30.72	30.72
	SC 和 WC 之间的协同作用	0.04	0.11	-0.02	0.73	0.77	0.06	19.02	49.74
	GP 和 RS 之间的权衡作用	0.01	-0.60	0.03	0.12	-0.14	0.79	16.93	66.68
B5	CS 和 HQ 之间的协同作用	0.90	-0.24	0.92	0.11	-0.06	0.15	29.07	29.07
	SC 和 WC 之间的协同作用	0.07	0.01	-0.01	0.75	0.82	-0.24	21.41	50.48
	GP 和 RS 之间的协同作用	-0.08	0.78	0.00	-0.13	-0.06	0.73	19.51	69.99
B6	HQ、RS 和 GP 之间的权衡作用	0.14	-0.63	0.77	0.03	-0.31	0.69	26.58	26.58
	SC 和 WC 之间的协同作用	-0.08	0.03	-0.22	0.92	0.53	0.09	19.96	46.54
	CS 和 WC 之间的协同作用	0.90	0.13	0.20	-0.06	0.57	0.04	19.83	66.37
B7	CS 和 HQ 之间的协同作用	0.90	-0.16	0.90	0.09	-0.15	0.08	27.88	27.88
	SC、WC 和 GP 之间的权衡作用	0.03	-0.59	-0.03	0.70	0.65	0.10	21.08	48.96
	GP 和 RS 之间的协同作用	0.01	0.47	0.04	0.07	0.06	0.92	17.85	66.81
B8	CS、HQ、SC 和 WC 之间的权衡作用	0.85	0.28	0.70	0.36	-0.65	0.12	31.01	31.01
	GP 和 SC 之间的权衡作用	0.01	-0.78	0.26	0.70	0.20	0.00	20.12	51.13
	HQ 和 RS 之间的协同作用	0.27	-0.07	0.36	-0.04	0.28	0.90	17.97	69.10

本研究将因子分析结果可视化,来进一步分析山东省生态系统服务簇内部生态系统服务(CS/HQ/GP/WC/SC/RS)主要权衡与协同关系的空间分布特征(图 6).具体来说,因子分析识别为协同作用的 ES 组合,图中绿色区域表示这些服务均处于高供给状态,而红色区域则指示所有相关服务供给水平低.此外,本研究还采用广义可加模型(GAM)来模拟和分析不同生态系统服务沿其因子得分的响应曲线(图6).

整体来看,不同 ESB 中各生态系统服务之间的权衡与协同在空间格局和响应形态上都表现出明显的异质性,并呈现出一定的非线性特征.在每一类 ESB 内部,服务的联合供给会随着协同/权衡强度的变化而出现空间上的起伏;沿主要因子得分的梯度,

部分服务组合呈现出非线性响应,但总体波动幅度相对有限.鉴于本文的重点在于比较不同生态系统服务簇的情境差异,这里仅呈现非线性关系的主要形态而不逐项展开参数输出.为进一步揭示八类生态系统服务簇内部复杂的权衡与协同机制,下面对各簇的内部关系进行具体分析:综合调节簇(B1)中存在三对显著的生态系统服务协同关系,即土壤保持(SC)-水源涵养(WC)、固碳服务(CS)-生境质量(HQ)以及粮食供给(GP)-娱乐休憩服务(RS)(图 6、图 7),表明该簇内多种 ES 组合具有相互促进特征,其空间分布主要集中于山东中西部山区和胶东半岛,其中鲁中南地区以 SC-WC 高值协同为主,胶东半岛以低值协同为主,CS-HQ 呈现高低值交错分布,而 GP-RS 在两区均表现为高值协同;生态保育簇

(B2)同时表现出协同与权衡关系,空间上集中于鲁中南山地地区(图 6),WC-RS 呈协同关系,而 CS、HQ 与 GP 之间以及 CS 与 SC 之间存在显著权衡,表现为 CS 和 HQ 高值区对应 GP 供给降低;发展潜力簇

(B3)中以 CS-HQ 为主导权衡关系,SC-WC 和 GP-RS 为主要协同关系,这些关系广泛分布于除山东省西南角外的区域(图 6、图 7),其中 CS 增强伴随 HQ 降低,而 GP 与 RS 呈现正向共增;

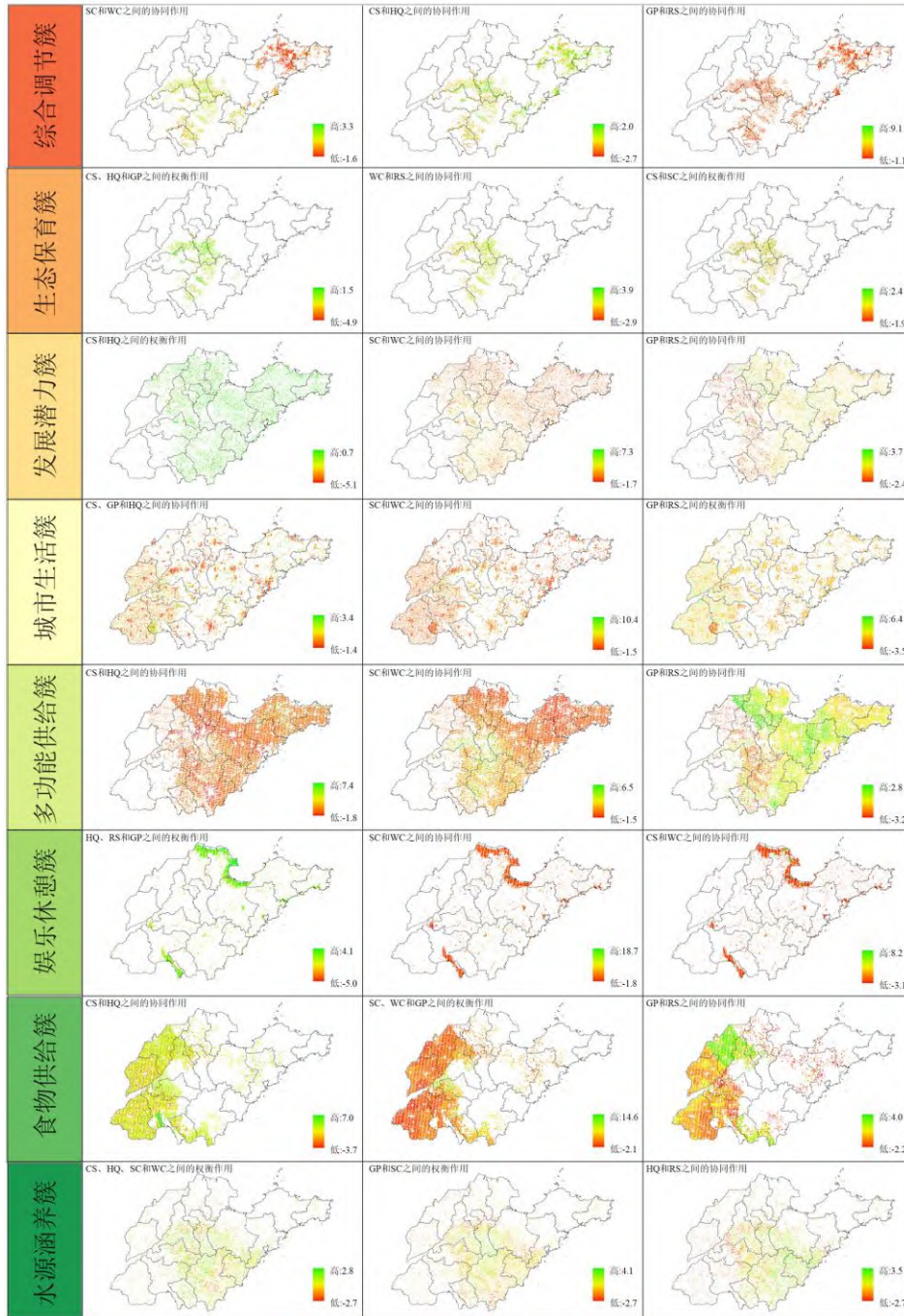


图 6 2020 年不同生态系统服务簇内部协同和权衡作用的因子得分空间分布

Fig.6 Spatial distribution of factor scores for synergies and trade-offs within different ecosystem services bundles in 2020

关于生态系统服务簇内部的协同作用,绿色代表具有正因子载荷的生态系统服务均处于较高水平的区域,而红色代表这些生态系统服务均处于较低水平的区域;关于生态系统服务簇内部的权衡作用,绿色代表具有正因子载荷的生态系统服务均处于较高水平且具有负因子载荷的生态系统服务均处于较低水平的区域,而红色代表具有负因子载荷的生态系统服务均处于较高水平且具有正因子载荷的生态系统服务均处于较低水平的区域

城市生活簇(B4)包含多组“权衡—协同”关系, 广泛分布于全省并在菏泽、聊城、泰安和济宁等地

较为集中(图 6、图 7),其中 CS、GP 与 HQ 的协同作用最为显著,而 GP-RS 的权衡关系反映了城市空间中粮食生产与休闲功能之间的竞争;多功能供给簇(B5)以协同关系占主导,主要包括 CS-HQ、SC-WC 和 GP-RS,但 CS-HQ 与 SC-WC 以低值协同为主,而 GP-RS 以高值协同为主(图 6、图 7);娱乐休憩簇(B6)中生境质量、娱乐休憩与粮食供给之间以权衡关系为主,SC-WC 和 CS-WC 表现为协同关系,但空间分布范围有限,主要集中于山东北部滨海湿地区,

且以低值协同为主(图 6、图 7);食物供给簇(B7)中 CS-HQ 与 GP-RS 均呈协同关系,其中 CS-HQ 在山东西部平原地区以高值协同为主,而 GP-RS 以低值协同区占优势(图 6、图 7);水源涵养簇(B8)中存在两对权衡关系和一对协同关系,主要分布于中西部高海拔地区(图 6、图 7),CS、HQ、SC 与 WC 之间表现为权衡,GP-SC 的权衡反映土壤保持增强可能抑制粮食生产,而 HQ-RS 的协同关系表明提升生境质量有助于增强休闲娱乐服务供给。

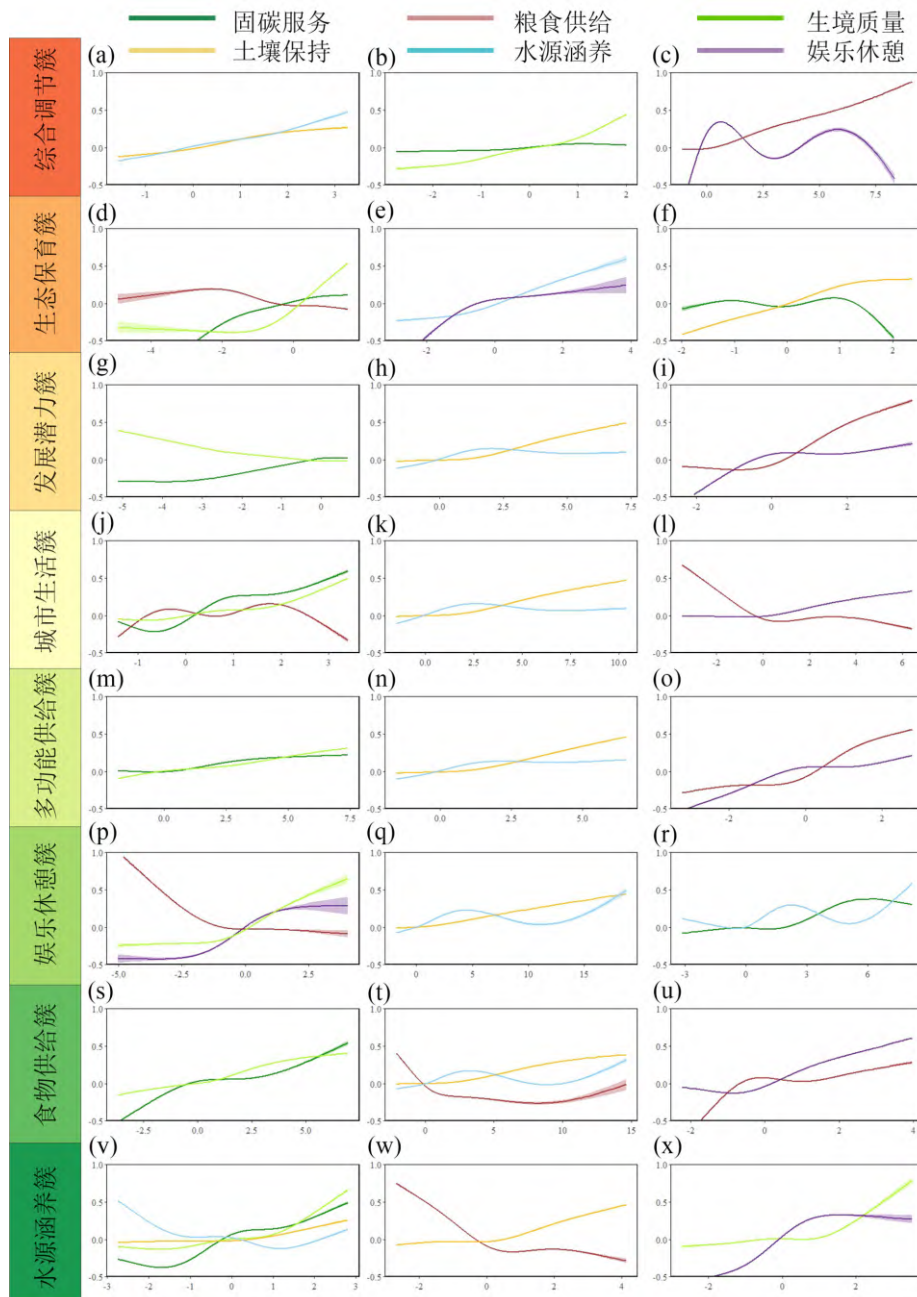


图 7 2020 年不同生态系统服务簇(ESBs)中,生态系统服务对因子得分的响应曲线

Fig.7 Response curves of ecosystem services to factor scores within different ecosystem services bundles in 2020

横坐标为因子分析提取的因子得分,纵坐标为各生态系统服务经标准化处理后的 GAM 平滑拟合响应值

3 讨论

3.1 生态系统服务簇的时空特征及其管理策略

山东省生态系统服务时空分异特征呈现显著空间异质性(图4)。空间格局分析表明,生态系统服务高值区集中分布于鲁中南山区与胶东半岛丘陵地带,该区域固碳、生境质量、水源涵养及土壤保持服务呈现显著空间集聚特征。特别值得注意的是,黄河三角洲湿地生态系统通过其独特的生态功能,支撑了该区域生境质量与娱乐休憩服务的高值表现。与之形成鲜明对比的是鲁西北平原区,受大规模耕地扩张影响,该区域呈现单一化的粮食供给服务主导格局,其他生态系统服务(尤其是生境质量与娱乐休憩服务)受到显著抑制。不同ESs的空间分异特征与生态系统服务簇(ESB)的形成机制高度耦合,印证了生态系统服务空间协同关系管理在生态系统管理的关键作用^[34]。

基于土地利用格局与社会生态要素的交互作用,山东省可解释为八类特征鲜明的生态系统服务簇(图5)。其中,粮食供给簇主要分布于鲁中-鲁西黄泛平原区,该区域平坦地形与深厚耕作层为农业集约化提供了自然基础;生态保育簇、水源涵养簇与娱乐供给簇则集中分布于鲁中南中高海拔山区,其复杂地形与较高植被覆盖度为多样化服务供给创造了有利条件;胶东半岛及东部滨海区域受海陆交互作用影响,形成以水源涵养簇、娱乐休憩簇为主的空间格局,其独特的地理区位与水文特征赋予该区域显著的水源涵养优势和发展潜力。

生态系统服务簇揭示了区域性管理的重要性,这种管理不仅须考虑自然地理因素的影响,还需针对不同地区制定具体的政策建议。(1)黄河流域粮食供给簇需构建“耕地质量提升-生态影响控制”双轨机制,通过节水灌溉技术推广、土壤有机质提升工程降低农业生产对周边生态系统的负外部性;(2)鲁中南生态保育簇亟需强化生态安全屏障功能,建议通过自然保护区网络优化、退化林分修复工程提升生物多样性维持能力;(3)东部沿海服务簇可实施“生态产业化”发展路径,在严格管控海岸带开发强度的前提下,探索湿地公园、生态旅游等绿色经济模式。总之,山东省的生态系统服务簇与地形地貌之间的密切关系要求政策制定者采取基于地形特征的

区域性管理措施。通过综合管理,可以实现生态与经济的和谐发展,为山东省乃至更广泛地区的可持续发展奠定坚实基础。

3.2 生态系统服务簇内部关系的规律总结

本研究通过融合空间分析与非线性模型,揭示了生态系统服务簇(ESB)内部协同/权衡关系的空间异质性与情境依赖性。不同社会—生态驱动因素导致各ESB内部协同/权衡关系在类型与强度上呈现差异性,其中供给服务与其他服务间的权衡现象尤为普遍(图6、图7)^[35-36]。典型案例如:在生态保育簇内,固碳服务、生境质量与粮食供给之间的权衡尤为显著;在水源涵养簇中,强调粮食生产可能导致土壤保持功能的减弱,而过度的土壤保持措施又可能限制农业用地的可用性。需要指出的是,粮食生产功能与其他生态系统服务并非天然对立,其相互作用的性质取决于具体的环境—管理情境。既有研究表明,合理的农田管理制度和政策推广能够在提高粮食产量的同时增加土壤有机碳含量^[37-38]。本研究进一步表明,尽管粮食生产与其他生态系统服务之间经常存在竞争,但在特定生态系统服务簇内仍有可能实现共同增益。比如,在综合调节簇、发展潜力簇、多功能供给簇和食物供给簇中,粮食供给与文化服务之间呈现出较为明显的协同作用(表2、图6、图7),而在城市生活簇内,固碳服务、粮食供给与生境质量之间的协同则是该簇的显著特征。

为解释上述不同生态系统服务簇内部呈现出的协同—权衡差异,有必要回到“自然基底—人类活动”这一双重作用的分析框架。鲁中南山地、胶东丘陵等以生态用地为主的区域,固碳、水源涵养、土壤保持等调节类服务的供给基线较高,对土地利用扰动的敏感性较低,即便在总体呈下降的背景下仍能保持相对稳定甚至局部提升;与此相对,城市生活簇及其周边地区建设用地持续集聚、夜间灯光显著增强,指示了较高的人类干扰水平,并与城市中心区生境质量下降的空间格局相吻合,说明人类活动是该类服务衰减的主要驱动因素。也就是说,生态系统服务的时空演变并非随机波动,而是沿着“自然约束—人类扰动”的社会—生态梯度有序展开:自然基底较强的簇更容易维持协同与稳定,人类活动增强的簇则更容易发生向城市生活情境的转入。在此基础上,可将簇内服务关系的表现概括为两个

方面进行讨论。

第一,关系反转的情形。生态系统服务簇的空间异质性与非线性特征表明,一方面,某些服务组合在特定簇内会形成较强的协同,但同时会对其他服务产生挤压;另一方面,同一服务组合在不同簇之间可能出现由协同转为权衡或由权衡转为协同的“关系反转”,且这种反转的强度具有明确的地理依赖性(图 6)。其机理在于,自然基底条件和人类活动强度共同决定了服务的供给基线与空间连通性:在气候水热条件较好、地形起伏较大且生态用地占比高的山地丘陵区,水源涵养、土壤保持、固碳等调节服务本身处于高位,新增的粮食生产往往以占用生态用地为代价,更容易表现为权衡;而在平原区或多功能供给簇中,生态服务水平处于中等,通过精细化农田管理即可同时提升粮食产量与土壤保持/碳汇水平,服务关系则可转向协同。同时,人类扰动梯度(如夜间灯光、建设用地比重、人口密度)会改变生态系统服务的空间连通性,高强度建设活动压缩了休憩与生境维持的空间,使原本在综合调节簇中能够协同提升的“粮食供给—娱乐休憩”组合在城市生活簇中转而表现为显著的资源竞争。GAM 的响应结果也显示,各驱动因子往往存在阈值区间,当社会—生态因子超过该阈值后,服务间的边际响应会发生方向性改变,从而在空间上呈现出非线性的关系反转。

第二,典型互动模式的归纳。在上述机制之上,簇内服务组合的互动可以进一步归纳为三类具有代表性的模式:一是跨簇协同的稳定性,如“土壤保持—水源涵养”在综合调节簇、发展潜力簇等多类簇群中均表现为协同,但其空间表达强度存在明显梯度——鲁中南高海拔区为高值协同(双高供给),胶东半岛为低值协同(双低供给),反映了地貌单元对服务供给基线的控制;二是簇内关系的可逆性,“粮食供给—娱乐服务”在综合调节簇等四类簇群中呈协同增益,却在城市生活簇内转为显著权衡,说明城镇化进程可能改变服务之间的基本关联(表 2、图 6);三是空间表达的异质性,“固碳—水源涵养”组合虽整体协同,但其空间集聚位置会随簇类迁移而发生显著变化:在综合调节簇中主要集中于生态屏障区,在发展潜力簇中则向农田—城镇过渡带扩散,提示人类活动梯度对服务耦合关系具有重塑效应。

3.3 生态系统服务簇的情境化政策启示与区域比较

前文的分析表明,生态系统服务簇内部的协同—权衡关系具有明确的地理依赖性和情境性,因此后续的国土空间治理不能仅依据行政边界或单一服务高低进行划分,而需要在不同簇类所处的社会—生态背景下制定差异化策略。结合本研究的结果,可从以下三个方面加以把握。

第一,空间管理的指向。在识别到关系反转及其地理依赖性的前提下,精细化国土空间管控和差异化生态补偿应将这一特征视为前置条件:在高海拔、低干扰且以生态用地为主的区域,应侧重维护水源涵养、土壤保持、固碳等调节服务之间的协同,防止因开发行为打破原有高基线;在城镇化快速推进的区域,通过绿地织补、生态农牧复合、都市农业嵌入等方式缓解粮食供给与文化/生境服务之间的空间挤压;在粮食主产区则需同步设定生态影响控制阈值,避免单一供给目标对生境质量和固碳服务造成结构性削弱。上述做法实质上是把“同一服务组合在不同地域单元中应当呈现的合理关系”落到空间上,与前文的簇划分结果形成呼应。

第二,区域情境下的对比分析。从已有区域尺度的生态系统服务簇研究来看,不同社会—生态背景下的簇类数量与主导因子存在明显差异,这为理解山东省 8 类 ESB 的形成提供了参照。以成都平原城市群为例,在快速城镇化驱动下,研究多将服务簇归纳为城市生活/建设簇、农田供给簇和生态保育簇等数量相对较少的类型,簇的空间格局主要受核心城市组团控制,高强度建设区内的文化和调节服务普遍受到挤压,这与本文在城市生活簇中识别到的“粮食供给—娱乐休憩”由协同转为权衡的现象具有一致性^[39]。长三角地区的研究则通常在 6 类左右的服务簇框架内展开,更强调对高城镇化带生态风险与服务失衡的精细化调控,簇的空间范围多受沿江及沿沪宁发展轴的约束^[40]。京津冀等北方城市群的相关工作亦表明,人类活动增强区的供给/建设性服务会对文化与调节服务形成明显的空间挤压,但多数研究并未在具体服务簇内部识别这种挤压的情境差异^[41]。与上述区域相比,本研究在山东省识别出 8 类生态系统服务簇,主要源于省域内部同时存在山地—平原—滨海的多地貌梯度以及较高的耕地占比,使得调节类高值簇、粮食供给主导簇与城市生活簇能够在同一尺度上并行出现,服务组合的

情境差异因而被更充分地保留下来.本文进一步将文献中普遍观察到的“城镇化挤压文化/调节服务”现象限定在特定ES簇内,并指出其对建设强度存在阈值依赖性,从而为解释不同社会—生态情境下服务关系表现不一致的现象提供了更具分辨力的证据.

第三,情境化管理机制的构建.上述发现说明,生态系统服务之间并不存在一成不变的组合关系,而是会随着所处的服务簇、干扰强度和地貌单元而发生可预期的调整,因此有必要构建面向不同情境的空间响应机制:(1)增益机制:在协同潜力较高的簇中,通过生态农业推广、梯田固土—林草涵养等措施激活服务间的正向反馈;(2)反转机制:建立服务关系动态监测与阈值识别体系,当建设用地占比、夜间灯光等指标超过一定水平时(如典型城市生活簇),及时启动粮食—娱乐服务权衡的预警,通过都市农业、廊道绿化等方式进行空间置换,避免生态系统服务出现断崖式下降;(3)适配机制:依据同一生态系统服务组合在不同簇中的地理表达模式实施分区调控,如在综合调节簇的生态屏障区实行封育保护,在发展潜力簇的农田—城镇过渡带推行“碳汇林网+海绵农田”等复合措施,使服务协同模式与地域功能定位实现精准匹配.

在把握上述情境化政策启示的同时,我们也需界定研究边界与后续方向:其一,时间断面仅五期(2000~2020),难以开展逐像元的年序列显著性检验;其二,本文聚焦ESB情境下的关系表征,未对城市化率、土地转移等驱动变量进行因果识别,后续可在ESB单元引入年序列与准因果方法(如面板DID/合成控制/断点)并系统报告GAM的关键统计量与阈值区间;其三,山东兼具山地—平原—滨海的复合地貌,使结论具有情境针对性,跨区外推需经多尺度验证与迁移学习评估.

4 结论

4.1 2000~2020年间,山东省各类生态系统服务的时序演化存在显著差异.粮食供给(GP)和土壤保持(SC)整体呈波动上升趋势;水源涵养(WC)在2000~2005年阶段出现明显提升,随后逐步回落;固碳(CS)与生境质量(HQ)随城镇化推进整体下降;娱乐休憩(RS)在2000~2015年间下降,2020年出现小

幅恢复.上述结果表明,不同类型生态系统服务对社会—生态扰动的敏感性存在差别,为后续从服务簇视角分析其情境性变化提供了基础.

4.2 基于多种生态系统服务的空间共现特征,研究区被划分为8类生态系统服务簇.综合调节簇与多功能供给簇具有较大的空间规模和较高的跨期保持性,在2000~2020年间保持了相对稳定的服务结构;发展潜力簇与城市生活簇在不同时段表现出对周边单元的吸纳,反映出生态系统服务簇在省域尺度上存在由中等服务水平向人类活动较强情境演化的主要路径.桑基图的时序流向进一步证实了生态系统服务簇的演变具有方向性而非简单的面积增减.

4.3 生态系统服务簇内部的协同与权衡关系呈现出可辨识的空间—情境差异.土壤保持—水源涵养等调节类服务组合在多数簇内保持协同,构成了山东省生态系统服务簇的共性特征;“粮食供给—娱乐休憩”等组合在综合调节簇、多功能供给簇中表现为协同,但在城市生活簇中受高强度建设活动挤压而转为权衡,表明同一服务组合在不同簇中存在关系反转;固碳—水源涵养等组合虽以协同为主,但其空间集聚位置会随簇类变化而发生迁移,说明簇内服务关系受具体社会—生态情境制约.

4.4 上述空间异质性和关系反转主要受“自然基底—人类扰动”双重因素调节:生态用地占比高、地形起伏度较大且水热条件相对有保障的鲁中南山地、胶东丘陵能够长期维持调节类服务的高水平协同;建设用地集聚、夜间灯光持续增强的城市生活簇更易触发供给服务与文化/调节服务之间的竞争.因而,在省域生态空间管控和差异化生态补偿设计中,应将不同地貌单元与不同城镇化梯度的生态系统服务簇作为独立管理对象,在高基线区域侧重维护调节服务协同,在高干扰区域通过绿地织补、农林复合等措施缓解服务间权衡.

参考文献:

- [1] 郇庆治.论习近平生态文明思想的制度维度[J].行政论坛,2023,30(1):5-14.
Huan Q Z. Institutional dimension of Xi Jinping Thought on Ecological Civilization [J]. Administrative Forum, 2023,30(1):5-14.
- [2] 中共中央.关于进一步全面深化改革推进中国式现代化的决定[N].人民日报,2024-07-22.

- Central Committee of the Communist Party of China. Decision on further comprehensively deepening reform to advance Chinese modernization [N]. People's Daily, 2024-07-22.
- [3] Daily G C, Söderqvist T, Aniyar S, et al. The value of nature and the nature of value [J]. *Science*, 2000,289(5478):395-396.
- [4] Costanza R, Darge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997,387(6630):253-260.
- [5] Ouyang Z, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital [J]. *Science*, 2016,352(6292):1455-1459.
- [6] 牛丽楠,邵全琴,陈美祺,等.2000~2020 年长江流域生态系统服务变化及其权衡协同关系 [J]. *资源科学*, 2024,46(4):853-866.
- Niu L N, Shao Q Q, Chen M Q, et al. Changes in ecosystem services and their trade-offs and synergies in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020 [J]. *Resources Science*, 2024,46(4):853-866.
- [7] 郑德凤,王燕燕,曹永强,等.基于生态系统服务的生态福祉分类与时空格局——以中国地级及以上城市为例 [J]. *资源科学*, 2020,42(6):1110-1122.
- Zheng D F, Wang Y Y, Cao Y Q, et al. Classification and spatiotemporal patterns of ecosystem well-being based on ecosystem services: A case study of prefecture-level and above cities in China [J]. *Resources Science*, 2020,42(6):1110-1122.
- [8] Shen J S, Li S C, Liang Z, et al. Exploring the heterogeneity and nonlinearity of trade-offs and synergies among ecosystem services bundles in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. *Ecosystem Services*, 2020,43:101103.
- [9] 张碧天,闵庆文,焦雯璐,等.生态系统服务权衡研究进展 [J]. *生态学报*, 2021,41(14):5517-5532.
- Zhang B T, Min Q W, Jiao W J, et al. Progress in research on ecosystem service trade-offs [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(14):5517-5532.
- [10] 苏伯儒,刘某承.基于生态系统服务权衡的生态系统管理策略研究进展 [J]. *自然资源学报*, 2023,38(7):1848-1862.
- Su B R, Liu M C. Research progress on ecosystem management strategies based on ecosystem service trade-offs [J]. *Journal of Natural Resources*, 2023,38(7):1848-1862.
- [11] 段如梦,李晓宇,张清.吉林西部生态系统服务功能权衡/协同关系及生态服务簇时空演变 [J]. *环境科学*, 2025,46(1):1-20.
- Duan R M, Li X Y, Zhang Q. Trade-offs and synergies among ecosystem services and spatiotemporal evolution of ecosystem service bundles in western Jilin Province [J]. *Environmental Science*, 2025,46(1):1-20.
- [12] Reader M O, Eppinga M B, De Boer H J, et al. Consistent ecosystem service bundles emerge across global mountain, island and delta systems [J]. *Ecosystem Services*, 2024,66:101593.
- [13] Raudsepp-Hearne C, Peterson G D, Bennett E M. Ecosystem service bundles for analyzing trade-offs in diverse landscapes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010,107(11):5242-5247.
- [14] 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 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023,189:106767.
- [15] Chang B L, Chen B M, Chen W, et al. Analysis of trade-offs and synergies of ecosystem services and driving forces in urban agglomerations in Northern China [J]. *Ecological Indicators*, 2024,165:112210.
- [16] Cord A F, Bartkowski B, Beckmann M, et al. Towards systematic analyses of ecosystem service trade-offs and synergies: Main concepts, methods and the road ahead [J]. *Ecosystem Services*, 2017,28:264-272.
- [17] Meacham M, Norström A V, Peterson G D, et al. Advancing research on ecosystem service bundles for comparative assessments and synthesis [J]. *Ecosystems and People*, 2022,18(1):99-111.
- [18] Baró F, Gómez-Baggethun E, Haase D. Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: Insights for landscape planning and management [J]. *Ecosystem Services*, 2017,24:147-159.
- [19] Liu Z H, Huang Q D, 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.
- [20] 刘迪,陈海,荔童,等.黄土丘陵沟壑区村域生态系统服务簇的时空分异及其地形梯度分析 [J]. *地理科学进展*, 2022,41(4):670-681.
- Liu D, Chen H, Li T, et al. Spatiotemporal differentiation of ecosystem service bundles and their topographic gradient effects at the village scale in the Loess Hilly and Gully Region [J]. *Progress in Geography*, 2022,41(4):670-681.
- [21] Shen J S, Li S C, Liu L B, et al. Uncovering the relationships between ecosystem services and social-ecological drivers at different spatial scales in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,290:125193.
- [22] Chen Z, Yu B, Yang C, et al. An extended time series (2000~2018) of global NPP-VIIRS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. *Earth System Science Data*, 2021,13(3):889-906.
- [23] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis* [M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [24] Wehrens R, Kruisselbrink J. Flexible self-organizing maps in kohonen 3.0 [J]. *Journal of Statistical Software*, 2018,87(7):1-18.
- [25] Ament J M, Moore C A, Herbst M, et al. Cultural ecosystem services in protected areas: Understanding bundles, trade-offs, and synergies [J]. *Conservation Letters*, 2017,10(4):440-450.
- [26] Qiu J, Turner M G. Spatial interactions among ecosystem services in an urbanizing agricultural watershed [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013,110(29):12149-12154.
- [27] Wood S N. *Generalized additive models: An introduction with R* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [28] Frei B, Renard D, Mitchell M G E, et al. Bright spots in agricultural landscapes: Identifying areas exceeding expectations for multifunctionality and biodiversity [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2018,55(6):2731-2743.
- [29] Cortinovis C, Geneletti D, Hedlund K. Synthesizing multiple ecosystem service assessments for urban planning: A review of approaches and recommendations [J]. *Landscape and Urban Planning*,

- 2021,213:104129.
- [30] Shen J S, Li S C, Wang H, et al. Understanding the spatial relationships and drivers of ecosystem service supply-demand mismatches towards spatially targeted management of social-ecological systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023,406: 136882.
- [31] Laiolo P, Pato J, Obeso J R. Ecological and evolutionary drivers of the elevational gradient of diversity [J]. *Ecology Letters*, 2018,21(7): 1022-1032.
- [32] Peters M K, Hemp A, Appelhans T, et al. Climate-land-use interactions shape tropical mountain biodiversity and ecosystem functions [J]. *Nature*, 2019,568(7750):88-92.
- [33] Maskell L C, Crowe A, Dunbar M J, et al. Exploring the ecological constraints to multiple ecosystem service delivery and biodiversity [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2013,50(3):561-571.
- [34] 张春悦,白永平,杨雪荻,等.多情景模拟下宁夏平原生态系统服务簇识别研究 [J]. *地理研究*, 2022,41(12):3364-3382.
- Zhang C Y, Bai Y P, Yang X D, et al. Identification of ecosystem service bundles in the Ningxia Plain under multiple scenario simulations [J]. *Geographical Research*, 2022,41(12):3364-3382.
- [35] 张 弛,李枝坚,曾 辉.基于小波变换的生态系统服务权衡尺度效应与影响因素研究——以珠江三角洲为例 [J]. *地理研究*, 2022,41(5):1279-1297.
- Zhang C, Li Z J, Zeng H. Scale effects and influencing factors of ecosystem service trade-offs based on wavelet transform: A case study of the Pearl River Delta [J]. *Geographical Research*, 2022,41(5):1279-1297.
- [36] 戚 琦,王 玲,陈俊辰,等.武汉市城市快速扩张与生态系统服务价值权衡/协同的交互作用 [J]. *地理科学*, 2024,44(6):953-963.
- Qi Q, Wang L, Chen J C, et al. Interactive effects of rapid urban expansion and ecosystem service value trade-offs and synergies in Wuhan City [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2024,44(6):953-963.
- [37] Dade M C, Mitchell M G E, McAlpine C A, et al. Assessing ecosystem service trade-offs and synergies: The need for a more mechanistic approach [J]. *Ambio*, 2019,48(10):1116-1128.
- [38] Li B J, Chen D X, Wu S H, et al. Spatio-temporal assessment of urbanization impacts on ecosystem services: A case study of Nanjing City, China [J]. *Ecological Indicators*, 2016,71:416-427.
- [39] Li P, Li T. Spatiotemporal analysis of ecosystem services and the impact of new-type urbanization: A case study of Chengdu, China [J]. *Ecological Indicators*, 2025,171:113191.
- [40] Huang Y, Cao Y, Wu J. Evaluating the spatiotemporal dynamics of ecosystem service supply-demand risk from the perspective of service flow to support regional ecosystem management: A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024,460:142598.
- [41] Li Q, Li D, Wang J, et al. Spatial heterogeneity of ecosystem service bundles and driving factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024,479:144006.

作者简介: 任其然(1993-),男,贵州贵阳人,讲师,博士,研究方向为生态系统服务评估与管理、景观生态过程与模拟.发表论文 10 余篇. qren@gzu.edu.cn.