苏南水网地区生态系统服务权衡协同与分区调控

——以苏州吴江区为例

周凌赟 丁金华 杨 阳

苏州科技大学建筑与城市规划学院 江苏苏州 215001

摘要：【目的】明晰生态系统服务（ESs）关系并进行生态功能分区调控，为生态系统服务功能协同优化、促进区域可持续发展提供科学依据。【方法】以苏州市吴江区为例，定量评估水源涵养、粮食供给、生境质量、碳储存、景观文化 5 种典型 ESs，利用 Spearman 相关性分析、空间自相关等工具揭示 ESs 间权衡协同关系及空间分异特征，通过 K-means 聚类分析识别生态系统服务簇并提出分区调控策略。【结果】1）吴江区 ESs 综合水平呈“东西高-南北低”的空间分异格局，在太湖、元荡等水网密集区形成 ESs 高值中心，低值区集中于吴江经济开发区等城镇化快速扩张区域。2）吴江区关键 ESs 整体呈“强协同-弱权衡”关系，其中水源涵养-生境质量、粮食供给-碳储存呈显著协同效应；碳储存-水源涵养、粮食供给-景观文化呈权衡关系。3）识别出 5 类生态系统服务簇，分别为生态均衡簇、水源游憩簇、粮食供给簇、固碳释氧簇和生态脆弱簇，不同服务簇组成结构和空间分布特征存在显著差异。4）根据服务簇特征划分多种生态功能分区并提出精准调控策略。【结论】吴江区 ESs 权衡协同关系呈现复杂性与规律性的特征，需因地制宜实施生态功能分区调控，凸显主导优势功能，在特定情境下优化权衡与协同关系，以实现区域生态系统功能的整体提升。

关键词：生态系统服务；权衡与协同；生态系统服务簇；分区调控

DOI：10.12169/zgcsly.2024.09.10.0001

Trade-offs, Synergies and Zonal Regulation of Ecosystem Services in Water Network Region of Southern Jiangsu: A Case Study of Wujiang District in Suzhou

Zhou Lingyun Ding Jinhua Yang Yang

(School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215001, Jiangsu, China)

Abstract:【Objective】 Clarifying the relationships among ecosystem services (ESs) and regulating ecological function zones provide a scientific foundation for coordinating and optimizing ES functions and promoting regional sustainable development.【Method】 Taking Wujiang District in Suzhou City as a case study, this research quantitatively assesses five typical ESs: water conservation, food supply, habitat quality, carbon storage, and landscape culture. Spearman correlation analysis, spatial autocorrelation, and other tools are used to reveal the trade-offs, synergies, and spatial differentiation among ESs. K-means clustering analysis is employed to identify ES bundles, and propose zonal regulation strategies.【Result】

收稿日期：2024-09-10

* 基金项目：国家自然科学基金（41301191）；江苏省建设系统科技项目（2018ZD243）；“十四五”江苏省重点学科（风景园林学）；苏州科技大学研究生优质资源建设项目（23SZKC-01）

第一作者：周凌赟（1999- ），女，硕士生，研究方向为地域生态环境与景观规划。E-mail：2211013009@post.usts.edu.cn

通信作者：丁金华（1973- ），女，教授，硕士生导师，研究方向为地域生态环境与景观规划。E-mail：yzdingjh@163.com

1) The ESs integration level in Wujiang District exhibits a spatial differentiation pattern of "high in the east/the west and low in the north/the south", with high ES centers in dense water network areas like Taihu Lake and Yuandang, and low centers in rapidly urbanized areas such as the Wujiang Economic Development Zone; 2) Key ESs in Wujiang District present the pattern of "strong synergy and weak trade-off", with significant synergistic effects between water conservation-habitat quality and food supply-carbon storage, and trade-offs between carbon storage-water conservation and food supply-landscape culture; 3) Five ES bundles are identified, including ecological balance, water recreation, food supply, carbon sequestration and oxygen release, and ecological vulnerability, each with distinct structural and spatial distribution characteristics; and 4) Based on the service bundle characteristics, various ecological function zones are classified, and precise control strategies tailored to different service bundles are proposed. 【Conclusion】 Trade-offs and synergies of ESs in Wujiang District are complex and regular, and it is therefore necessary to implement zonal regulation of ecological functions according to local conditions, highlight dominant functions, optimize trade-offs and synergies in specific scenarios to enhance all regional ecosystem functions.

Keywords: ecosystem service; trade-off and synergy; ecosystem service bundle; zonal regulation

生态系统服务（Ecosystem Services，ESs）是人类直接或间接从生态系统中所获得的惠益，构成人类社会和自然环境相互依存的重要纽带[1]。不同 ESs 间相互影响，呈此消彼长的权衡关系或相互促进的协同关系[2]。有效评估和管理 Ess，明晰 ESs 间权衡与协同关系，对强化生态系统服务间协同增效，促进社会发展与生态保护良性互动具有重要意义[3]。

近年来，ESs 权衡协同关系的研究日益深入，为生态系统的可持续发展提供重要支撑。国内外学者运用 InVEST 模型、SolVES 模、权衡协同度模型、相关性统计分析等方法[4-9]，在 ESs 权衡协同关系的时空特征、尺度效应、驱动因素等方面取得了一定的研究成果[10-12]。现有研究主要以数理统计模型定量描述权衡协同关系[13-14]，对权衡协同关系的空间异质性分析较有限。生态系统服务簇（Ecosystem Service Bundle，ESB）是多种 ESs 在特定空间上形成的不同组合[15]，可揭示 ESs 权衡协同在空间上的潜在关联模式[16]，为指导生态功能空间分区提供科学依据。现有研究主要聚焦于省域、城市集群等[17-19]，对于水网地区等具有独特地域特征区域的研究相对不足。苏南水网地区 ESs 间权衡与协同关系具有一定复杂性，较难达到功能协调平衡。基于 ESs 权衡与协同关系分析视角对其展开研究，有利于明确 ESs 间的复杂作用机制，促进水网地区 ESs 功能协同优化。

苏州吴江区是长三角一体化发展战略的示范区，具备独特的水乡肌理，是苏南水网典型区域。随着城镇化快速发展，吴江区人地关系冲突频繁[20]、生态空间遭受侵占，ESs 的权衡和退化等生态问题具有一定典型性。量化评估吴江区 5 种关键性 ESs，基于相关性分析和空间自相关方法厘清 ESs 间权衡协同关系及空间分布特征，识别多种生态系统服务簇并提出吴江区生态功能分区和调控策略，旨在深入挖掘吴江区生态系统服务的内在规律，为水网地区 ESs 长效协同发展提供实证案例和参考借鉴。

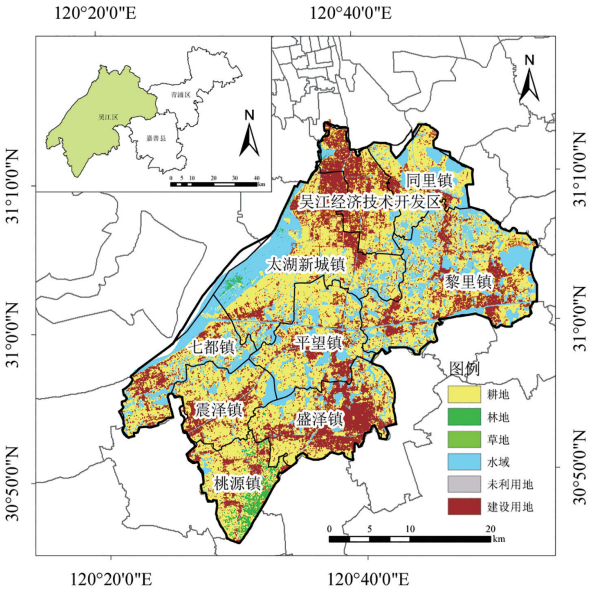
1 研究区概况

吴江区（120°21′—120°53′E，30°45′—31°13′N）位于江苏省苏州市东南部，地势较为平坦，为太湖水网平原的一部分。全区总面积 1237.44 km^2，水域面积占全区总面积的 25.99%，具有"千年百湖之城"的生态优势，河网密布、林田水交织的江南水网格局，可提供供给、调节、支持、文化等多元生态系统服务（图 1）。

2 研究方法

2.1 数据来源及预处理

本研究以多源数据为基础，包括土地利用数据、归一化植被指数、气象数据及社会经济数据等（表 1）。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS（2019）3333 的标准地图制作，底图无修改。

图 1　研究区区位及土地利用类型

表 1　数据来源与说明

数据名称	数据类型	年份	精度/m	数据来源
土地利用数据	栅格数据	2022	30	CLCD 数据集(https://zenodo.org)
NDVI 数据	栅格数据	2022	30	GEE 遥感云计算平台(https://earthengine.google.com/)
气象数据	站点数据	2022	1 000	国家气象科学数据中心(https://data.cma.cn/)
社会经济数据	统计数据	2022	30	《全国农产品成本收益资料汇编 2022》《吴江统计年鉴 2022》

2.2　生态系统服务评估

综合考虑苏南水网地方性特征，选取水源涵养、生境质量、粮食供给、碳储存、景观文化 5 项关键 ESs 表征吴江区 ESs 现状[20-23]。研究利用水量平衡法评估水源涵养，NDVI 指数分配法[21]评估粮食供给，运用 InVEST 模型评估碳储存、生境质量，基于价值系数法[22]对景观文化进行定量化评估。

为便于后续分析，各项生态系统服务需消除量纲影响，采用以下公式进行数据标准化：

$$S_i = \frac{(X_i - \min X_i)}{(\max X_i - \min X_i)} \quad (1)$$

式（1）中：S_i表示原始数据X_i的标准化值；$\min X_i$表示第 i 项指标的最小值；$\max X_i$表示第 i 项指标的最大值。

2.3　生态系统服务权衡与协同关系分析

1）生态系统服务间的相关性分析。Spearman 相关系数可判定研究区 ESs 权衡与协同强度关系。若相关性系数为正，表示 ESs 间为协同关系，反之为权衡关系，若相关系数为 0，则代表独立关系，相关系数绝对值大小反映权衡或协同关系的强弱程度[7]。

2）生态系统服务间的空间自相关分析。运用双变量局部自相关刻画吴江区权衡协同关系的空间异质性[6]。

3）生态系统服务簇识别。运用 R 中的 cluster crit 计算 Davies-Bouldin 指数（DB 值）确定最佳聚类数目 K，进行 K-means 聚类分析[24-25]。

3　结果与分析

3.1　吴江区生态系统服务评估

由图 2 可知：水源涵养服务高值区以斑块状形式散布于东太湖、元荡和北麻漾等水网密集的地带，低值区较多分布于北部吴江经济开发区与南部盛泽镇；粮食供给服务高值区集中分布于南部盛泽镇，同时在城镇化边缘的郊区亦呈较高水平，这与片区内土地资源合理利用、农业结构适时调整的作用有关；生境质量高值区分布较广，集中于西部东太湖、东北部澄湖等区域，是各类

动植物优质的生存环境和繁殖场所；碳储存服务高值区广泛分布于中部及南部高植被覆盖度区域，低值区集中分布于北部建设用地密集区；景观文化服务以湖荡为高值区逐步向四周递减，依托丰厚的水资源形成了水乡古镇等游憩景点，提供了较高的文化价值。

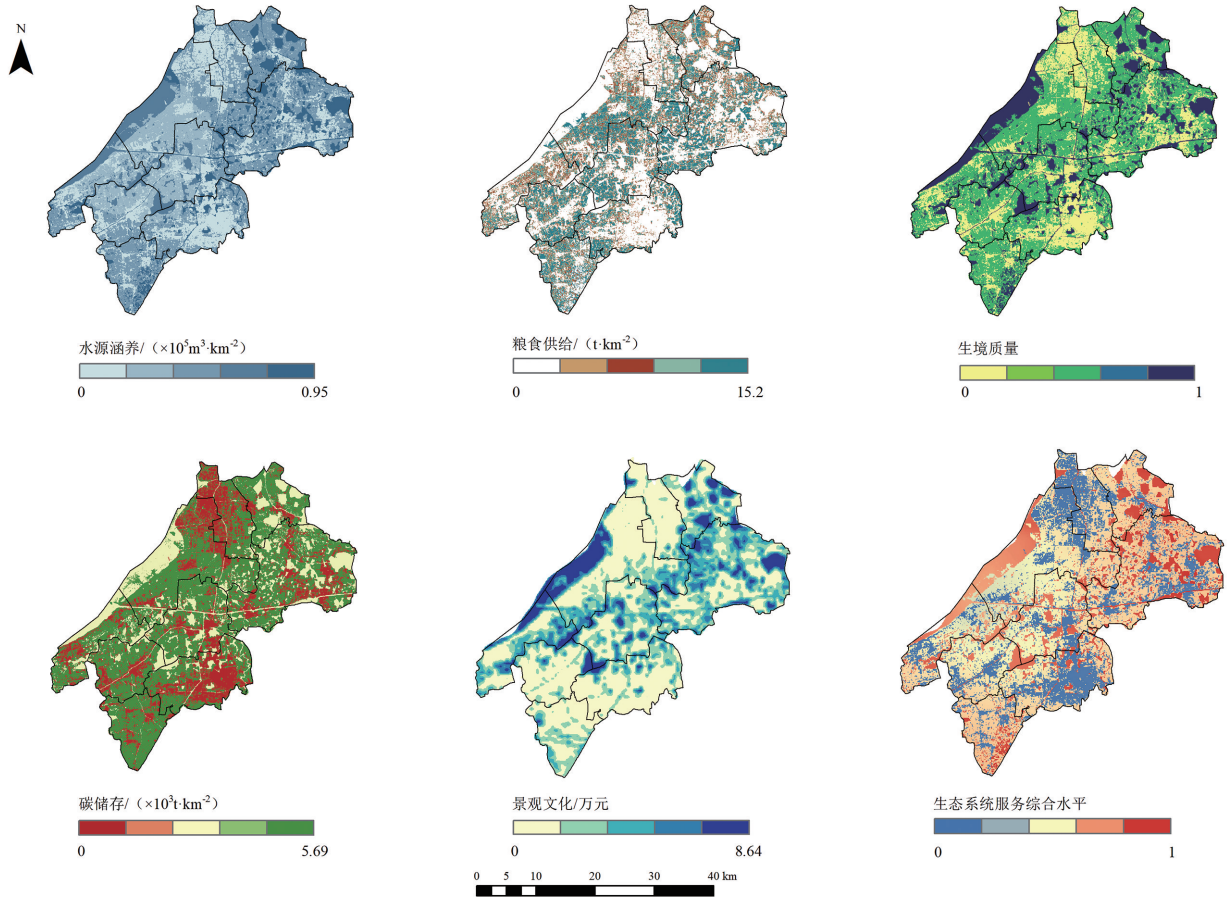


图 2 吴江区生态系统服务空间分布

综合而言，吴江区 ESs 水平在空间呈现“东西高-南北低”的梯度分异特征，在东西部水网湖荡区形成 ESs 高值中心，向中部生态用地梯度递减，南北部吴江经济开发区为 ESs 低值区，生态功能受干扰明显，整体生态系统服务水平较弱。

3.2 吴江区生态系统服务权衡协同关系

3.2.1 吴江区生态系统服务间的相关性

对 5 种 ESs 成对进行 Spearman 相关性分析（表 2）可知，所有相关系数均通过了 0.05 水平上的显著性检验。吴江区 ESs 间以协同效应为主，呈“强协同-弱权衡”的特征。水源涵养-生境质量、水源涵养-景观文化、生境质量-碳储存的 ESs 相关系数为正，呈不同强度的协同关系。其中，水源涵养-景观文化的协同关系最强，协同度高达 0.93。水源涵养-粮食供给、生境质量-粮食供给、粮食供给-景观文化等 ESs 间相关系数为负，呈一定程度的权衡关系，其中水源涵养-碳储存间的权衡度为-0.59，在权衡关系中最显著。

表 2 吴江区生态系统服务 Spearman 相关性分析

项目	水源涵养	生境质量	粮食供给	碳储存	景观文化
水源涵养	1	(+)	(—)	(—)	(+)
生境质量	0.85**	1	(—)	(+)	(+)
粮食供给	-0.37**	-0.13**	1	(+)	(—)
碳储存	-0.59**	0.11**	0.65**	1	(—)
景观文化	0.93**	0.74**	-0.34**	-0.07**	1

注：** 表示在 0.01 级别（双尾）相关性显著，* 表示在 0.05 级别（双尾）相关性显著；(+) 代表协同，(—) 代表权衡。

3.2.2　吴江区生态系统服务间的空间自相关

吴江区 ESs 权衡协同关系存在显著的空间分异特征，成对 ESs 间均存在局部权衡或协同的空间单元（图 3）。吴江区各 ESs 间以协同空间为主，占比为 26.79%。水源涵养–生境质量、水源涵养–景观文化主要呈现高–高协同，集中于东太湖、元荡等湖荡区域，三者相互带动，形成正向协同效益。生境质量–碳储存、水源涵养–景观文化等低–低协同空间占比较高，分布于吴江区南北部城镇化建设集中区域，表现为一种生态系统服务衰退联动另一种服务下降的负向协同效应。吴江区存在局部 ESs 权衡空间，占比约为 17.20%。粮食供给–景观文化在吴江区中部以高–低权衡为主，集中于吴江区粮食生产高供给地带，该区域一定程度上弱化了农业生产用地作为自然与文化景观的双重属性，呈粮食供给高而景观文化服务低的权衡效应。

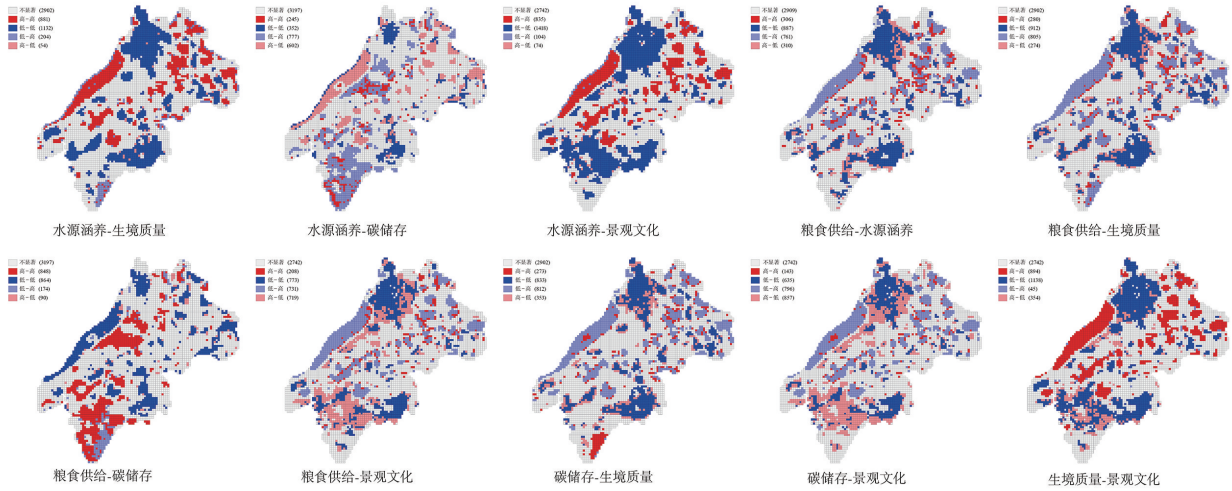


图 3　吴江区生态系统服务间的空间自相关分析

3.2.3　吴江区生态系统服务簇识别

K-means 聚类分析表明，吴江区生态系统服务簇最佳聚类数为 5 类。根据服务簇主导性服务和 ESs 权衡协同关系，将其命名为生态均衡簇、水源游憩簇、粮食供给簇、固碳释氧簇以及生态脆弱簇（图 4、表 3）。

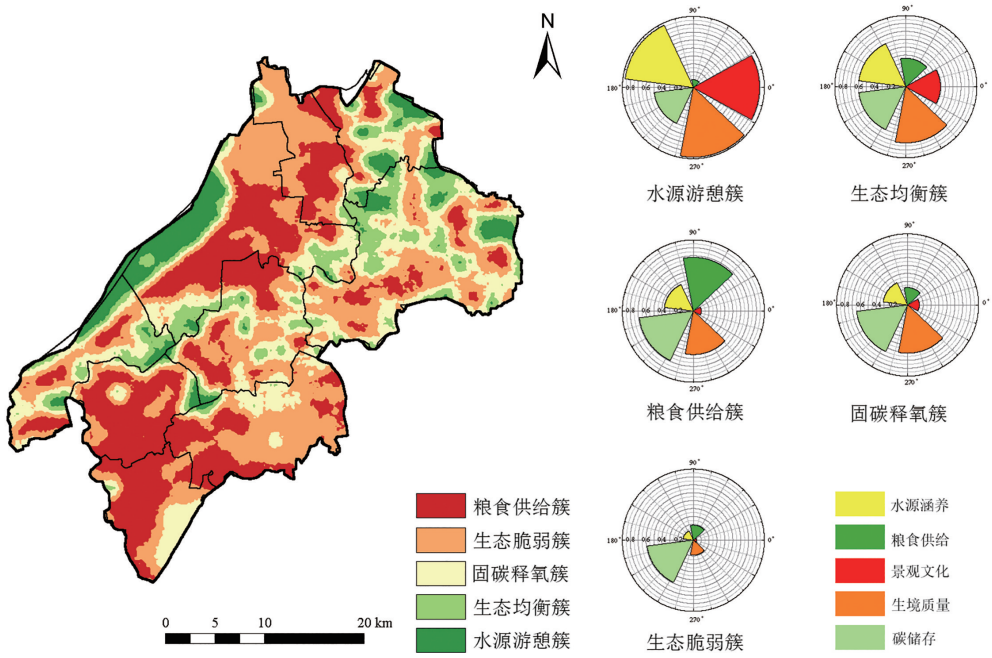


图 4　吴江区生态系统服务簇空间分布与聚类

表 3 吴江区生态系统服务簇 ESs 指数

项目	水源涵养	生境质量	粮食供给	碳储存	景观文化
生态均衡簇	0.60	0.71	0.36	0.61	0.44
水源游憩簇	0.87	0.85	0.12	0.52	0.84
粮食供给簇	0.37	0.55	0.68	0.65	0.10
固碳释氧簇	0.31	0.61	0.22	0.65	0.15
生态脆弱簇	0.13	0.19	0.19	0.59	0.04

1）生态均衡簇。ESs 指数均较高，组成结构均衡呈强协同效应。其中生境质量指数最高，为主导性服务。空间分布于东太湖、北麻漾等重要湖荡区域周边，与 ESs 间高值协同区分布一致，用地类型较丰富，生境本底条件较好，共同促成均衡状态的形成。

2）水源游憩簇。水源涵养、生境质量、景观文化指数水平较高，为主导性服务。其空间分布呈斑块状，与水网格局相似。水源涵养-生境质量、水源涵养-景观文化呈高值协同。粮食供给-水源涵养服务间存在局部的低-高权衡效应，局部服务功能间权衡关系不仅反映了生态系统内部功能的差异化配置，也是生态系统自我维持与平衡机制的直观体现。

3）粮食供给簇。以粮食供给服务为主导，空间连片分布于中部平望镇等农业生产空间。该簇大部分位于粮食供给-碳储存高值协同区与粮食供给-景观文化的低-高权衡区，表明该簇粮食供给与碳储存服务间协同效益较好，景观文化服务仍具备提升空间。

4）固碳释氧簇。以碳储存和生境质量为主导性服务，空间带状分布于南部桃源镇等林地密集区域，为碳储存-生境质量的高值协同区。该簇类空间区域植被覆盖度较高，碳汇释氧功能有助于维护生物多样性的丰富，其余 ESs 间相关性不显著。

5）生态脆弱簇。仅碳储存服务指数较高，其余 ESs 指数均较低。空间处于南部盛泽镇等集中建设区，ESs 呈明显退化趋势，不同生态系统服务之间呈负向的协同效应。

3.3 吴江区生态功能分区调控策略

结合《长三角生态绿色一体化发展示范区国土空间总体规划（2021—2035 年）》《苏州市吴江区国土空间总体规划（2021—2035 年）》与各服务簇 ESs 权衡协同关系特征将吴江区相应划分为生态保育区、水源维育区、农业储备区、碳汇潜力区和生态修复区（表 4），针对性地提出差异化调控策略。

表 4 吴江区生态功能分区

生态功能分区	主要用地类型	面积/km^2	分布区域
生态保育区	水域、耕地、林地	106.25	元荡、北麻漾等水体边缘地带
水源维育区	水域	144.04	东太湖、长漾等中大型重要湖荡
农业储备区	耕地	379.02	平望镇、震泽镇等耕地集中连片区域
碳汇潜力区	林地、草地	191.86	桃源镇省级森林公园等林地集中区、呈带状分布
生态修复区	建设用地	416.26	北部、南部城镇集中区

3.3.1 生态保育区：保育优质本底，限制开发保持生态稳定

生态保育区以生态均衡簇为主，面积占比为 8.59%。该区以均衡多样的高 ESs 特性，多项 ESs 正向协同发展形成优质生态本底。依据《苏州市吴江区“十四五”生态环境保护规划》，对该区域严格实施底线管控，限制雪落漾、桃花漾等重点湖荡的建设强度，维育同里国家湿地公园等复合多元的生态栖息地，以保障各项生态系统服务长效协同发展。

3.3.2 水源维育区：维育重点水源，适度开发与保护并重

水源维育区以水源游憩簇为主，占比 11.64%，是水资源保护与文化游憩的重点区域。该区域密布吴江区大小湖荡，以保护生态本底资源为明确发展方向，重点发挥区域水源涵养功能[16]，协同促进生境质量持续提升。根据《苏州市吴江区重点流域水生态环境保护“十四五”规

划》，严格控制核心水环境质量，以保障水资源的完整性，持续发挥关键功能；合理规划游憩活动区域，实施适度开发与保护并重策略。

3.3.3　农业储备区：保障粮食安全，统筹提升生态与文化综合效益

农业储备区以粮食供给簇为主，面积占比为30.63%。该区域粮食供给与碳储存服务协同显著，形成绿色农业发展的良好态势，但其景观文化服务相对较弱，农业、生态与文化发展间呈复杂关系。应加强对农业生产空间的分级调控，一方面，积极推广吴江区东联村等农业示范园的绿色发展模式，保障粮食供给与减源增汇协同推进；另一方面，探索农旅文融合路径，结合吴江区基塘、桑蚕等农业文化遗产，适度发展观光农业，促进农业生产与景观文化融合。

3.3.4　碳汇潜力区：激活多元协同，加强复合林网建设提质增汇

碳汇潜力区以固碳释氧簇为主，占比为15.50%，为区域碳汇提供重要支撑。该区域碳储存-粮食供给呈一定权衡关系，该区主要以林地为土地利用类型，承担原材料供应等特定生态系统服务功能。应持续推进桃源镇森林旅游度假区等地的复合林网建设，固碳增汇的同时促进水源涵养、景观文化等多元 ESs 共同提升，激活各 ESs 间的协同效应。

3.3.5　生态修复区：修复受损生态系统，增补生态空间促进正向协同

生态修复区以生态脆弱簇为主，占比为33.64%，各项 ESs 能力偏低。作为城镇建设用地密集区域，该区显著的负协同效应和生态脆弱性凸显了生态修复的必要性和紧迫性。应明确城镇开发边界与强度，从根本上减缓无序扩张对生态环境的负面冲击。实施精准的生态修复，促进区域内吴江公园、芦荡湖湿地公园等绿地资源协同增效，增补绿色基础设施，强化用地的生态连通性提升 ESs 整体水平，促进 ESs 间的正向协同。

4　讨论

本研究深入探讨典型水网地区吴江区 ESs 间的复杂权衡与协同关系，旨在为吴江区生态系统的有效管理提供一定的决策依据。吴江区粮食供给-碳储存服务呈协同关系，与聂名萱等[24]对苏锡常快速城镇化地区的研究取得了较为一致的结果。水源涵养-景观文化之间呈强协同关系，这与范逸凡等[25]的研究结果存在差异，其原因可能是地方性特征所致。地域特征是地方人工环境与自然环境在漫长相互作用中耦合适应的结果[26]，在特定生态服务目标导向下，生态系统内部服务间的权衡是其在维持整体稳定过程中对资源的合理配置与优化利用。吴江区水系发达，湖泊密布，独特的水文条件为水源涵养提供了良好的基础，同时也成为了游憩活动的重要载体，有效促进了水源涵养与景观文化服务之间的正向协同。

研究仍存在一定的局限性：1）对吴江区 ESs 权衡与协同关系的成因研究较有限。ESs 权衡协同关系不仅是生态系统内部 ESs 间相互作用的结果，同时受生态、社会与经济等多重驱动因素的影响[25]，未来在不同驱动力对生态系统服务权衡与协同关系的影响机制等方面有待进一步研究。2）权衡与协同关系的尺度依赖性还需进一步探究[27]。研究主要聚焦于吴江区这一特定尺度分析，未来可着眼于 ESs 权衡与协同关系的多尺度测度，更为全面和深入地揭示多种 ESs 之间的复杂相互关系。3）在 ESs 权衡与协同关系的时空动态性方面考虑不足。本研究以静态为主，未考虑生态系统服务变化的滞后性，未来可深入探索 ESs 间权衡与协同的动态演变机制。

5　结论

吴江区 ESs 综合水平呈现显著的空间非均质性，整体表现为“东西高、南北低”的分布特征。吴江区 ESs 间的相互作用关系复杂，以“强协同、弱权衡”为主要特征，且这种协同与权衡关系存在明显的空间异质性：协同空间以聚集分布为主，权衡空间则呈分散式交织布局。各类生态系统服务簇的 ESs 组成结构及主导生态功能与当地土地利用类型、城镇化建设强度等因素存在一定关联，体现了人类活动与自然生态系统互相影响下，水网地区 ESs 呈现多样性、复杂性的协同权衡特征。需因地制宜地优化各生态功能分区权衡与协同效应，以实现吴江区 ESs 间的综合提升。

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]. Ecological Economics,1998,25(1):3-15.

[2]李双成,张才玉,刘金龙,等.生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J].地理研究,2013,32(8):1379-1390.

[3]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 of the United States of America,2010,107(11):5242-5247.

[4]任胤铭,刘小平,许晓聪,等.基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响[J].生态学报,2023,43(11):4473-4487.

[5]李子,张艳芳.基于 InVEST 模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析[J].水土保持学报,2021,35(4):178-185.

[6]赵宏宇,李雁冰,车越.基于 SolVES 的传统村落生态系统服务社会价值评估:以锦江木屋村为例[J].中国园林,2022,38(12):76-81.

[7]刘小波,王玉宽,刘勤,等.基于城市化梯度的中国西南地区生态系统服务权衡与协同[J].生态学报,2023,43(22):9416-9429.

[8]任国平,刘黎明,李洪庆,等.乡村景观多功能权衡-协同关系时空格局研究:以上海市青浦区为例[J].资源与生态学报(英文版),2021,12(2):225-240.

[9]范耘恺,马书明.多情景模拟土地利用变化下的生态系统服务评估及其权衡/协同研究:以辽宁省沈抚地区为例[J].环境科学学报,2023,43(10):419-434.

[10]朱俊俊,高周冰,王君橹,等.南京都市圈生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J].水土保持研究,2023,30(3):383-394.

[11]王鹏涛,张立伟,李英杰,等.汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J].地理学报,2017,72(11):2064-2078.

[12]陈登帅,李晶,杨晓楠,等.渭河流域生态系统服务权衡优化研究[J].生态学报,2018,38(9):3260-3271.

[13]李益敏,李驭豪,赵筱青,等.云南省文山市生态系统服务的权衡/协同关系[J].长江流域资源与环境,2022,31(11):2545-2555.

[14]冯琳,雷国平.东北地区生态系统服务及权衡/协同关系时空演变特征与功能分区研究[J].中国土地科学,2023,37(7):100-113.

[15]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.

[16]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.

[17]陈俊辰,贺淑钰,薛晶,等.多尺度生态系统服务的权衡关系及其对景观配置的响应:以湖北省为例[J].生态学报,2023,43(12):4835-4846.

[18]张紫怡,刘艳芳,张扬,等.生态系统服务协同权衡对影响因子的空间响应:以福建省生态功能区为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(1):111-125.

[19]梁玉琦,危小建,江平,等.基于力学平衡模型的生态系统服务协同与权衡关系研究:以长江中游城市群为例[J].中国环境科学,2023,43(11):5974-5986.

[20]丁金华,纪然.水生态系统服务供需视角下的水网乡村适应性规划策略:以吴江张鸭荡片区为例[J].中国园林,2020,36(11):45-50.

[21]赵文亮,贺振,贺俊平,等.基于 MODIS-NDVI 的河南省冬小麦产量遥感估测[J].地理研究,2012,31(12):2310-2320.

[22]丁金华,沈佳辉.基于共生理论的苏南旅游型乡村更新规划[J].中国城市林业,2021,19(4):72-77.

[23]谢高地,鲁春霞,成升魁.全球生态系统服务价值评估研究进展[J].资源科学,2001,23(6):5-9.

[24]聂名萱,黄思华,濮励杰,等.快速城镇化地区生态系统服务的时空动态及权衡与协同分析:以苏锡常地区为例[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1088-1099.

[25]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[J].生态学报,2022,42(17):6875-6887.

[26]刘滨谊,左佑,张琳.江南水网乡村地方性景观生态系统自然-文化服务耦合协调研究:以长三角生态绿色一体化发展示范区为例[J].中国城市林业,2023,21(5):9-18.

[27]赵婷,潘竟虎.讨赖河流域生态系统服务权衡与协同的多尺度测度[J].生态与农村环境学报,2022,38(7):839-850.