基于 MCCA 模型的苏州市生态系统服务权衡协同时空特征与多情景模拟*

冯怡然 吴殿鸣

苏州科技大学建筑与城市规划学院 江苏苏州 215011

摘要：【目的】探究市域空间生态系统服务权衡协同关系的时空特征，有效提升生态系统服务效益。【方法】利用 Landsat TM/ETM、DTM 和 POP 等多源数据，采用权衡协同度模型（ESTD）探究 1995—2020 年生态系统服务权衡协同关系时空特征，借助 MCCA 模型进行多情景模拟。【结果】1）ESV 总量呈“W”型趋势，仅调节服务价值持续增长，空间呈“四周高、中间低”格局；2）各服务类型间以协同关系为主，但强度逐渐减弱；空间聚集特征显著，强权衡协同关系集中于苏州东南部和阳澄湖周边，弱权衡协同关系集中于城市中心建成区和水域地区；3）2035 年生态发展情景下 ESV 增量、协同关系数量最多，ESTD 极值最高，为苏州市最佳发展情景。【结论】市域空间需限制用地扩张、合理划定城市开发边界、严守耕地底线并强化生态修复，最大程度促进生态、经济和农业协同发展。

关键词：生态系统服务价值；权衡协同；多情景模拟；MCCA 模型；苏州市

DOI：10.12169/zgcsly.2024.09.26.0001

Spatiotemporal Characteristics and Multi-Scenario Simulation of Trade-off and Synergies Between Ecosystem Services in Suzhou Based on MCCA Model

Feng Yiran Wu Dianming

(School of Architecture and Urban Planning, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

Abstract：【Objective】The study is to understand the spatiotemporal characteristics of ecosystem service trade-offs and synergies at urban spaces in order to significantly enhance ecosystem service benefits. 【Method】 Using multi-source data including Landsat TM/ETM, DTM, and POP, and applying the Ecosystem Service Trade-off and Synergy Degree (ESTD) model, this study explores the spatiotemporal dynamics of ecosystem service trade-offs and synergies in 1995-2020, and conducts multi-scenario simulations using the MCCA model. 【Result】 1) The total ecosystem service value (ESV) shows a “W” shaped trend. Only the regulating services have a continuously increasing value, and a spatial pattern of “high at the edges while low in the center” has shaped; 2) Synergies dominate among service types, though their intensity gradually weakens. Spatially clustering characteristics distinctly presents. Strong relationship between trade-off and synergy is concentrated in the southeastern part of Suzhou and around Yangcheng Lake, while weak relationship between trade-off and synergy are concentrated in the urban center and water areas; and 3) Under the ecological development scenario in 2035, there are the highest increment of ESV and the largest number of synergistic relationships, while ESTD reaches its maximum

收稿日期：2024-09-26

* 基金项目：国家自然科学基金项目（51908392）

第一作者：冯怡然（2000- ），女，硕士生，研究方向为园林与景观设计。E-mail：fengyiran0428@163.com

通信作者：吴殿鸣（1984- ），女，博士，副教授，研究方向为景观与规划设计。E-mail：wudmsz@163.com

value. Therefore, this scenario is the optimal development scenario of Suzhou. 【Conclusion】 In urban spaces, there is a need to restrain land use expansion, rationally delineate the boundary of urban development, strictly enforce farmland protection, and enhance ecological restoration so as to maximize the synergistic ecological, economic and agricultural development.

Keywords: ecosystem service value; trade-off and synergy; multi-scenario simulation; MCCA model; Suzhou City

生态系统服务（Ecosystem Services）是生态系统所形成及维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用[1]，其价值（Ecosystem Service Value，ESV）是人类从生态系统中得到的所有收益[2]。生态系统服务的非独立性特征，导致服务间存在着此消彼长的权衡关系，或是同时增减的协同关系[3]。自 Costanza 等[2]确立生态系统服务分类以来，权衡协同关系即成为研究热点，并多集中于关系识别、演变规律、驱动因素和模拟预测等方面[4]。其中国外学者更关注其变化对社会、生态效益的影响[5]，国内学者则侧重于揭示其演变规律的地区差异[6]。在关系识别方面，相关学者主要运用相关性分析研判服务类型间的作用关系方向和强弱，近年来权衡协同度（ESTD）、均方根偏差（RMSD）等方法出现，强调了变化速率并表达其不均衡度[7]；在演变规律方面，多关注省域、县域等行政空间和流域等地域空间[8-10]，揭示了草地、森林等生境类型的变化规律[11-12]；驱动因素包括自然因素和社会因素，其中土地利用变化为最显著、最关键、最直接的驱动因素[13]，通过调整土地利用增强生态系统服务功能，可以改变生态系统服务间的权衡协同效应[14]；情景分析法可通过设置自然和人文条件模拟权衡/协同改变[15]，并通过 CA、FLUS 等土地利用模拟模型有效提升 ESV 和权衡协同关系的模拟精度。

然而，上述模型仅将单元识别为单一土地类型，忽视了土地利用混合特征[16]。混合元胞自动机（mixed-cell cellular automata，MCCA）模型通过轮盘赌的方式确定土地覆盖率比例变化，实现土地利用模拟在亚元胞尺度上定性到定量的转变[17]，支撑对权衡协同关系的预测。同时，现有模拟预测的研究多聚焦于省域、县域，较少关注市域，市域国土空间规划处于“五级三类”中承上启下的关键层级[18]，其权衡协同关系研究有利于生态系统服务导向下国土空间规划的传导推进。因此，本研究聚焦市域空间，深入探究权衡协同关系时空变化规律，引入 MCCA 模型进行多情景模拟，为生态系统服务优化增效、生态系统科学管理提供理论支撑。

1 研究区概况

苏州市地处江苏省东南部，东傍上海，南接浙江，西抱太湖，北依长江。市域内河流、湖泊众多，全年平均气温 18.1 ℃，降水量 1 406.8 mm。苏州市辖姑苏区、虎丘区、吴中区、相城区、吴江区及苏州工业园区，代管常熟、张家港、昆山、太仓 4 个县级市。截至 2020 年总面积约 8 540 km^2，城镇化率高达 81.72%，人口总数 1 274.83 万，同年 GDP 达 2.02 万亿元，较 1995 年增长 1.93 万亿元，经济发展势头强劲，但也面临生态系统服务退化等问题。

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

2.1.1 土地利用数据

结合苏州各发展阶段特征，利用中国科学院资源环境科学数据中心发布的中国多时期土地利用遥感数据集（CNLUCC），获取苏州地区 1995—2020 年 Landsat TM/ETM 遥感影像数据。参考《土地利用现状分类》（GB/T21010-2021）划为建设用地、耕地、林地、草地、水域、未利用地和湿地。

采用 1 km×1 km 网格尺度进行后续分析，苏州是城市化快速推进的地区，小尺度划分更能够捕捉其生态系统服务的细微变化；同时，该尺度是当前我国生态管理最小单元尺度[19]，因而研究结果有利于土地利用政策相结合，对城市管理和生态保护有指导意义。

2.1.2 土地利用变化驱动因子

考虑研究区情况和数据可量化性，选取自然（高程、坡度、坡向、NDVI）、社会经济（人口密

度、GDP）和交通区位（到公路距离、到铁路距离、到居民点距离、到水域距离）10 个驱动因子[20]，数据来源如下：1）高程 DEM 数据来源于地理空间数据云（http://www.gscloud.cn）；2）NDVI 数据来源于资源环境数据云平台（http://www.resdc.cn/DOI）；3）人口密度和 GDP 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）；4）公路、铁路、居民点和水域分布矢量数据来源于全国地理资源目录服务系统（https://www.webmap.cn）。

2.2　生态系统服务价值估算

查阅苏州统计年鉴，2020 年苏州地区主要粮食作物晚籼稻平均粮食单产水平为 8 986 kg·hm^{-2}，得出一个生态系统服务价值当量因子经济价值量为 5 673.50 元/（hm^2·a）。根据中国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量表，修正苏州市单位面积 ESV 当量（表 1），计算各土地利用类型 ESV，公式如下：

$$ESV = \sum (A_k \times VC_k) \quad (1)$$

$$ESV_f = \sum (A_k \times VC_{fk}) \quad (2)$$

式（1）~（2）中：ESV 为研究区生态系统服务价值总量；A_k 是第 k 种土地利用类型面积；VC_k 是第 k 种土地利用类型的生态系统服务价值系数；ESV_f 是土地生态系统第 f 项服务价值；VC_{fk} 是第 k 种土地利用类型的第 f 项服务价值系数。

表 1　苏州市各类土地生态系统服务价值系数　元/（hm^2·a）

生态系统服务功能		耕地	林地	草地	水域	未利用地	湿地
调节服务	气体交换	0.283 7	1.985 7	0.453 9	0.000 0	0.000 0	1.021 2
	气候调节	0.504 9	1.531 8	0.510 6	0.261 0	0.000 0	9.701 7
	水源涵养	0.303 4	1.815 5	0.453 9	11.562 6	0.017 0	8.793 9
	废物处理	0.930 5	0.743 2	0.743 2	10.314 4	0.005 7	10.314 4
支持服务	土壤形成与保护	0.828 3	2.212 7	1.106 3	0.005 7	0.011 3	0.970 2
	生物多样性保护	0.402 8	1.849 6	0.618 4	1.412 7	0.192 9	1.418 4
供给服务	食物生产	0.567 4	0.056 7	0.170 2	0.056 7	0.005 7	0.170 2
	原材料	0.056 7	1.475 1	0.028 4	0.005 7	0.000 0	0.039 7
文化服务	娱乐休闲	0.005 7	0.726 2	0.022 7	2.462 3	0.005 7	3.148 8

2.3　生态系统服务权衡协同度

权衡协同度（ESTD）绝对值的大小反映了权衡/协同水平，ESTD 为负值表示第 i 与 j 种生态系统服务为权衡关系，反之为协同关系，计算公式如下：

$$ESCI_i = (ES_{ia} - ES_{ib}) / ES_{ib} \quad (3)$$

$$ESTD_{ij} = (ESCI_i/ESCI_j + ESCI_j/ESCI_i)/2 \quad (4)$$

式（3）~（4）中：ES_{ia}、ES_{ib} 分别为 a、b 时刻第 i 种生态系统服务值；$ESCI_i$ 是第 i 种生态系统服务的变化指数；$ESCI_j$ 为第 j 种生态系统服务的变化指数；$ESTD_{ij}$ 表示第 i、j 种生态系统服务之间的权衡协同度。

2.4　土地利用多情景模拟

2.4.1　MCCA 模型

MCCA 模型主要分为 3 个步骤：采用随机森林回归模型挖掘各土地利用类型变化与驱动因子间的影响机制，获取各土地利用类型间的转换规则；马尔可夫模型预测未来的土地利用需求；基于轮盘赌法则模拟混合元胞内各类土地覆盖率变化情况。

2.4.2　精度验证

2015—2020 年最能反映未来土地利用变化的发展趋势，因此以 2015、2020 年两期土地利用数据模拟 2035 年情况，模拟结果 kappa 系数为 0.91，总体精度（OA）为 0.93，模拟精度达到较高水平。

2.4.3　土地利用模拟情景

《苏州市国土空间总体规划（2021—2035 年）》将 2035 年作为实现目标的关键年份，因此本研究以 2035 年作为预测目标，并分别设置自然发展情景、耕地保护情景、生态发展情景进行模拟预测（表 2）。

表 2　苏州市土地利用发展情景模式及原则

发展情景模式	原则及限制因素
自然发展情景	无任何规划政策限制
耕地保护情景	加入永久农田保护范围，禁止耕地转出
生态发展情景	耕地、草地、林地向建设用地转化概率下降 50%，水域、湿地禁止向建设用地和耕地转化；生态保护红线范围作为限制转化区域

2.4.4 转换成本矩阵

转换成本矩阵表示各用地类型之间是否可以相互转化，值为 1 时地类允许转换为其他地类；值为 0 时则相反（表 3）。

表 3 土地利用转换成本矩阵

	自然发展情景							耕地保护情景							生态发展情景						
	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	e	f	g	a	b	c	d	e	f	g
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1
b	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
c	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1
d	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1
e	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
g	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1

注：a 建设用地；b 草地；c 耕地；d 林地；e 水域；f 未利用地；g 湿地。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值时空变化

3.1.1 土地利用变化特征

1995—2020 年土地利用转移矩阵（表 4）表明，受城市快速扩张影响，苏州市大量耕地转为建设用地（面积增加 1 489.65 km^2），苏州中心城区、昆山经济开发区等地尤为明显（图 1），2010 年后城镇化放缓和对耕地保护有效遏制了这种趋势。研究周期内耕地缩减 38.29%，主要转为建设用地和水域，水域增加 8.89%，其他用地类型变化相对较小。

表 4 1995—2020 年苏州市土地利用转移矩阵 km^2

1995 年	2020 年							
	草地	建设用地	耕地	林地	水域	未利用地	湿地	总计
草地	17.15	2.84	0.82	0.05	0.64	0.58	0.08	22.16
建设用地	0.02	776.87	39.05	1.79	10.81	0.03	1.10	829.66
耕地	0.52	1 437.27	2 715.31	8.16	361.96	1.28	1.68	4 526.18
林地	0.29	14.92	4.85	170.31	3.11	0.03	0.01	193.51
水域	3.76	86.10	31.19	0.93	2 765.91	0.06	17.59	2 905.54
未利用地	0.00	0.88	0.01	0.33	0.33	3.19	0.00	4.74
湿地	0.09	2.43	1.92	0.00	22.37	0.00	32.17	58.98
总计	21.82	2 319.31	2 793.15	181.57	3 164.13	5.16	52.62	8 540.77

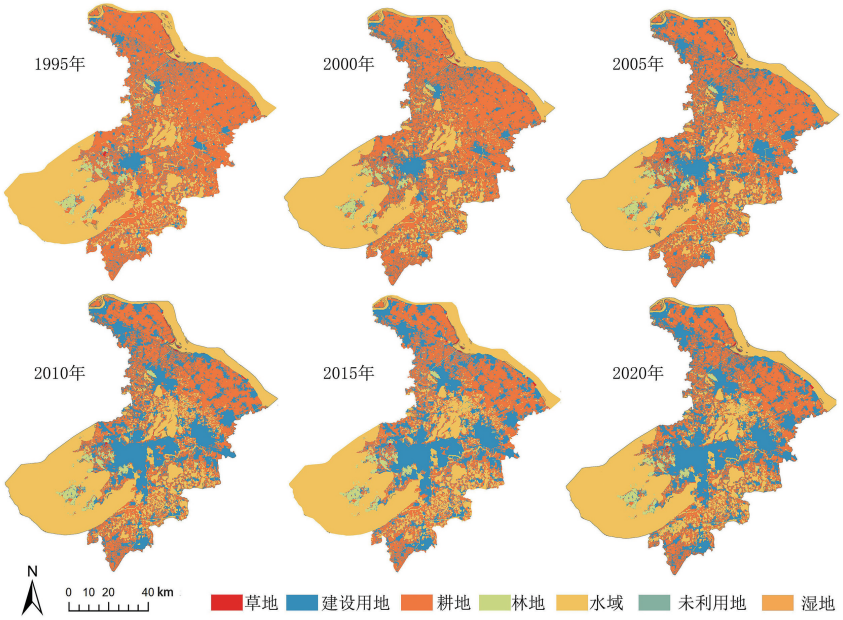


图 1 苏州市土地利用类型分布

3.1.2　生态系统服务价值时序特征

根据时序特征分析结果（表 5），ESV 总量呈“W”型小幅下降。因耕地减少 ESV 整体呈下降趋势，但 2005—2010 年由于水域面积增长，2015—2020 年永久基本农田保护红线和生态保护红线的落实，耕地降幅减缓、生态用地增加，ESV 总量均呈上升趋势。

一级生态系统服务价值呈“调节服务>支持服务>文化服务>供给服务”的规律。调节服务占比最高，除 2010—2015 年外，持续增长。支持服务次之，但耕地缩减使土壤形成与保护价值降低，支持服务总量下降 18.28 亿元。供给服务价值最低且降幅高达 32.69%，同样因耕地减少导致食物生产价值大幅下降。

表 5　1995—2020 年苏州市单项生态系统服务价值变化　亿元

一级服务功能	二级服务功能	ESV					
		1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
调节服务	气体交换	17.38	16.62	15.53	12.55	12.33	12.17
	气候调节	39.23	37.83	35.92	30.34	30.56	30.36
	水源涵养	360.05	362.37	365.03	380.53	379.56	383.39
	废物处理	349.38	350.20	350.03	357.58	356.25	359.29
支持服务	土壤形成与保护	42.75	40.90	37.64	29.38	28.58	28.09
	生物多样性保护	63.82	63.25	62.17	60.43	59.95	60.20
供给服务	食物生产	27.57	26.46	24.20	18.79	18.20	17.87
	原材料	5.62	5.38	5.20	4.56	4.50	4.47
文化服务	娱乐休闲	75.04	75.59	76.44	80.23	80.19	81.05
总计		980.84	978.60	972.15	974.39	970.13	976.88

3.1.3　生态系统服务价值空间特征

根据自然断点法将苏州市 ESV 从高到低划分为高值区、较高值区、中值区、较低值区、低值区，得到 1995—2020 年 ESV 空间分布格局（图 2）。ESV 与土地利用类型密切相关且呈“四周高、中间低”的格局。高值区集中于长江、太湖地区，以水域和湿地为主，同时阳澄湖及苏州东南部等地区因“退耕还湖”等政策，高值区明显扩展；较高值区、中值区零星分布于苏州中部和东南部，多为水域、林地和耕地；较低值区与耕地布局相近，广泛分布于苏州东北部。苏州中心城区等建设用地外围由于耕地转为建设用地，低值区大范围扩张，最终形成“四周高、中间低”的 ESV 分布格局。

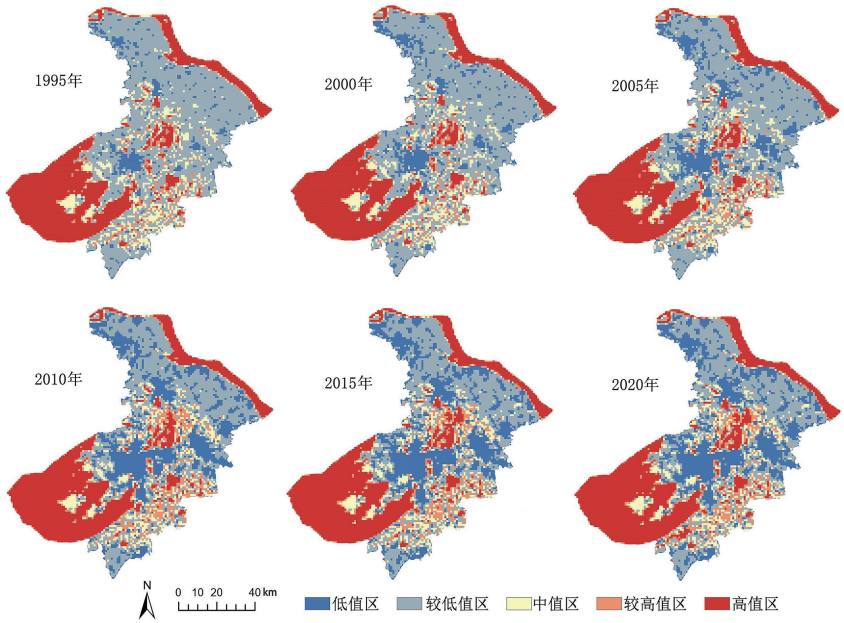


图 2　苏州市 1995—2020 年 ESV 空间分布

3.2 生态系统服务权衡协同关系

3.2.1 权衡协同度时序特征

图 3 显示了各时段生态系统服务权衡协同度（ESTD）极值的波动变化。2000 年后协同关系占主导，耕地缩减同时水域增加，废物处理价值降幅小于土壤形成与保护，二者呈强协同。2005—2010 年废物处理价值显著提升，与略有下降的土壤形成与保护、食物生产转为权衡关系。此后 5 年因耕地缩减呈现 ESV 共减趋势下的协同。2015 年后权衡关系为主导，但程度较弱。

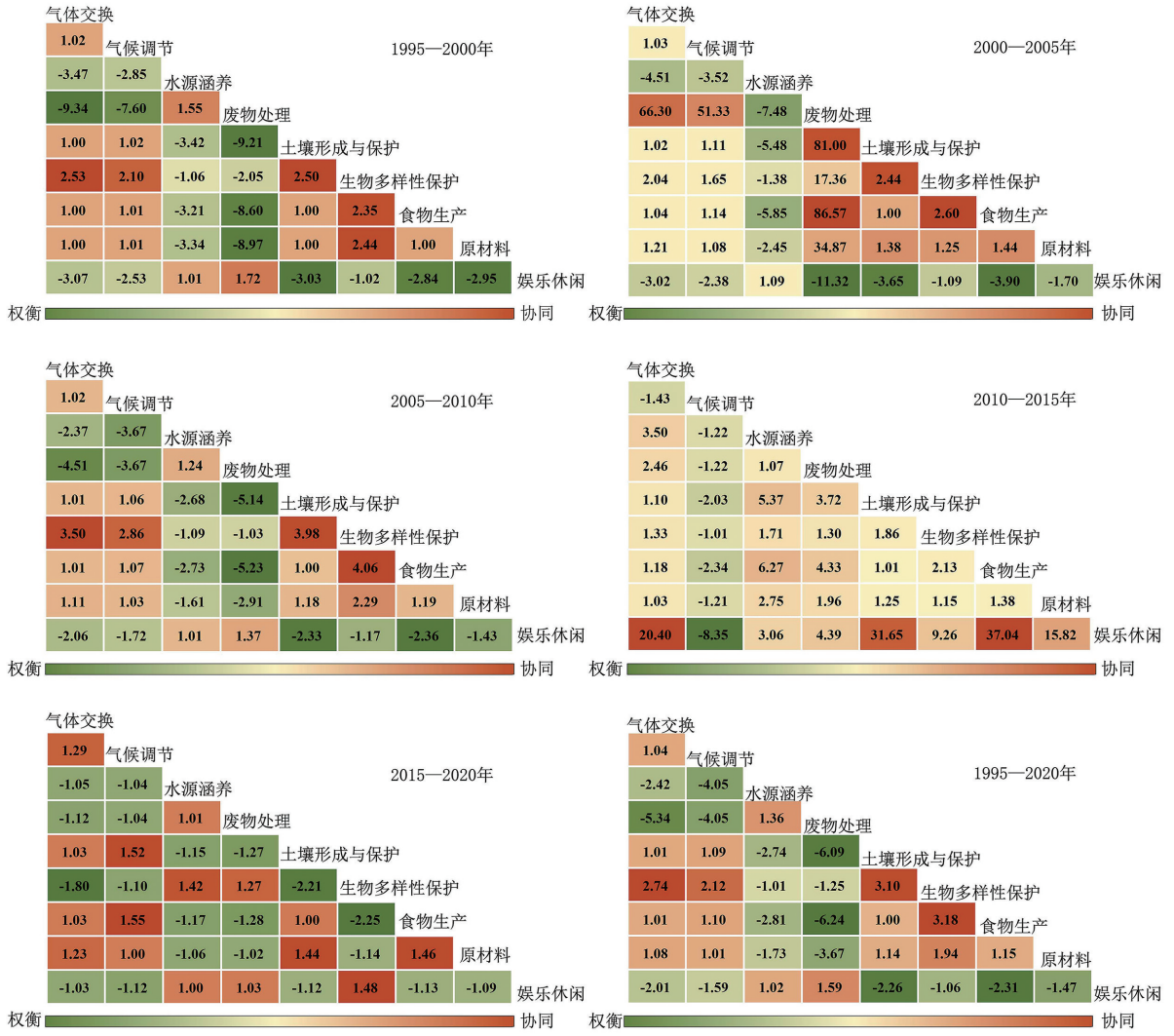


图 3 苏州市各时段生态系统服务权衡协同度

3.2.2 权衡协同度空间特征

将 ESTD 值从高到低划分为高值区、较高值区、较低值区、低值区，并将 ESTD = 0 的情况划分为较低值区，得到年 ESTD 空间分布格局（图 4）。

调节—支持服务和支持—文化服务强协同区域围绕苏州中心城区分布。因“退圩/田还湖”政策及建设用地扩张，苏州东南、阳澄湖东北部等地区水域增加，中心城区外围耕地减少，且水域、耕地变化对调节、文化服务影响更强，使二者 ESV 增速远高于支持服务，因此形成围绕中心城区形成广泛的强协同关系格局。

调节—文化服务强协同区域呈“先扩后缩”趋势。1995—2000 年“水环境综合治理工程”等行动使阳澄湖、苏州东南部等地水域面积增加，调节服务增速最快并与文化服务呈强协同关系且不断扩张。2005 年后建成区周围大量耕地转为建设用地，调节服务价值增速放缓至与文化服务价值趋同，二者转为弱协同关系，ESTD 高值区缩减为围绕水域周边地区零星分布。

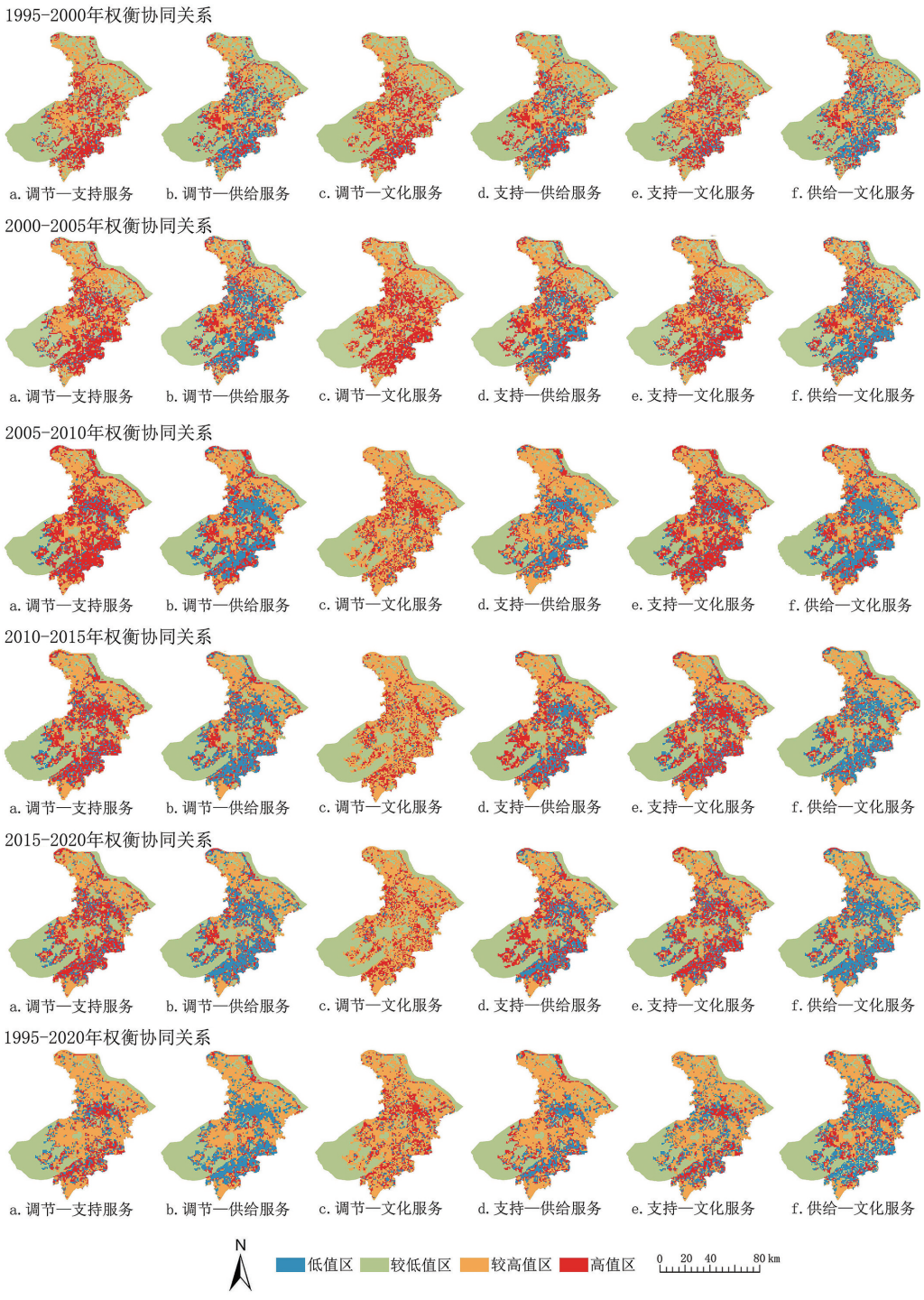


图 4　苏州市 ESTD 空间分布

调节—供给服务和供给—文化服务强权衡区域集中于苏州东南部和阳澄湖地区。受“退耕还湖”等政策影响，此区域水域面积不断扩张，调节、文化服务价值提升；同时耕地面积缩减导致供给服务价值持续下降，造成供给服务同调节、文化服务间的强权衡关系范围逐年扩大。

支持—供给服务强权衡区域以苏州东南部、阳澄湖为中心扩张。部分耕地转为水域导致供给服务价值下降、支持服务价值上升，但支持服务价值所受影响相对较小，强权衡范围仅局部扩张，水域周边区域多维持高协同。此外，太湖、长江地区由于水域土地利用类型变化较小，苏州中心城区等地区以建设用地为主，不具有 ESV，因此各服务间均以弱权衡关系为主。

3.3 多情景模拟

3.3.1 生态系统服务价值多情景模拟

多情景模拟结果显示，生态发展情景下 ESV 增量最大，表明生态用地的保护和恢复效果显著，生态环境效益提升明显。自然发展情景 ESV 总量略有提升，说明目前政策对生态环境具有一定促进作用。而耕地保护情景 ESV 总量略有下降，表明单一耕地保护不利于生态效益持续发展。

图 5 显示，自然发展情景和生态发展情景空间分布基本一致。不同的是，生态发展情景下高值区、较高值区扩张和低值区缩减更显著，表明此情景有效抑制生态系统服务退化，促进 ESV 增加。

耕地保护情景下高值区和较高值区有所缩减。此情景下为保障粮食生产耕地扩张，高值区和低值区较其他两种情景范围更小，中值区和较低值区在苏州东北部及高值区周围略有扩张。

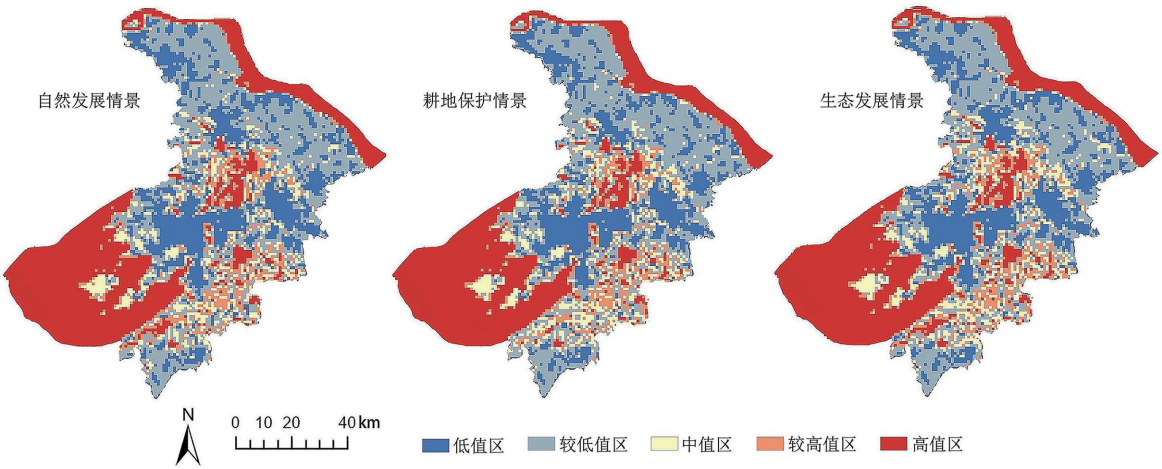


图 5 2035 年苏州市 ESV 空间分布

3.3.2 权衡协同关系多情景模拟

由图 6 可知，自然发展情景下权衡关系最突出。其中，权衡关系数量最高，但由于各项 ESV 变化较小，ESTD 值均小于 2，权衡协同程度较弱。

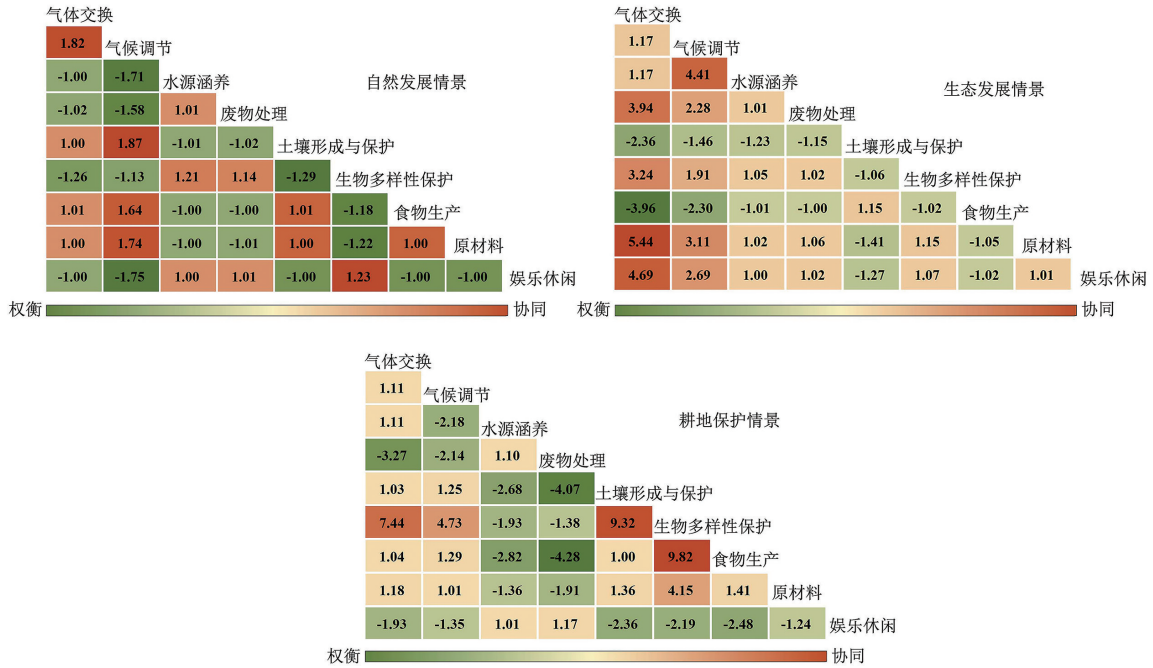


图 6 2035 年生态系统服务权衡协同度

耕地保护情景下协同关系略高于权衡关系。永久基本农田保护和耕地占补平衡政策使耕地面积回升，食物生产价值增幅显著，与 ESV 增幅较小的生物多样性保护呈强协同；同时废物处理价值小幅下降，与食物生产间呈明显权衡关系。

生态发展情景下协同关系为主导。林地、水域扩张和耕地面积缩减促使原材料价值增幅最大，与增幅最小的气体交换呈强协同关系。此情景下协同关系数量和作用强度远高于权衡关系，最有利于生态系统服务提升。

4　讨论

优化生态系统服务权衡协同关系对最大化人类福祉具有重要作用。本研究发现，苏州市生态系统服务主要表现为调节与支持服务间的协同关系，以及二者与供给服务间的权衡关系，这与韩晓佳[21]等研究结论相似，但造成二者 ESV 和权衡协同关系变化的主要因素存在较大差异，如安塞区位于黄土高原，受人类活动干扰较小，自然因素是 ESV 和权衡协同关系变化的主因；而苏州作为典型的高度城镇化地区城市，政策等社会因素影响下的土地利用变化对生态系统服务的影响更显著。同时，权衡协同关系可反映不同地区发展的主要矛盾，例如苏州市 2000—2005 年及博斯腾湖流域 1995—2005 年均以 ESV 下降趋势下的协同关系为主，但苏州市由于建设用地大幅增加，城镇建设同生态、农业之间的冲突加剧；而博斯腾湖流域则因开发耕地破坏原有植被、草场，造成生态和农业间的矛盾更为突出[22]。此外，对城市化快速发展的地区而言，城镇扩张导致建设用地对生态用地的侵占是其权衡关系加剧的主要原因，例如苏州市中心城区和厦门市滨海集中建设区均表现为 ESV 退化和权衡关系增强[23]，表明城市经济效益的提升多以生态效益的损失为代价，并使权衡关系程度增加。

与其他模型相比，MCCA 模型精度更高，可支撑 ESV 和权衡协同关系的精准预测。生态发展情景是提升 ESV、缓解权衡关系的最优模式，说明生态用地的保护与合理规划可有效降低权衡关系程度，这与林媚珍等[24]结论相近。但本研究通过模拟预测发现，单一的发展模式难以最大程度实现生态保护、经济发展和粮食生产等多目标协同，不利于整合地区资源实现高质量发展，因此需要综合制定政策推动协同关系的整体提升：一是合理划定城市开发边界，改善城镇空间内部生态。优化城镇空间布局，苏州中心城区等建设用地严格限制扩张，减少对生态用地侵占；增加绿地面积和闲置地块覆绿，提高绿化覆盖率，改善城市内部生态环境。二是严守耕地红线，推动“两区—三片”农业生产格局。划分“粮食生产功能区和重要农产品生产保护区”，确保粮食安全以促进食物生产 ESV 增长；建设“沿长江生态、环太湖现代和水乡特色”农业片区，推动绿色农业等新模式，增强农业生产和生态保护协同。三是强化生态红线保护，以太湖、阳澄湖、长江为核心优化生态空间。禁止自然保护地开发性建设，提升生态系统服务功能稳定性；太湖、阳澄湖及长江地区修复岸线，持续增强调节、支持和文化服务间协同关系。

本研究从 1 km×1 km 网格下探究苏州市生态系统服务权衡协同关系变化，但其具有明显的尺度效应和空间差异，未来需深入研究不同尺度下权衡协同关系驱动因素及作用机制，并在模拟过程中根据城市特征优化驱动因子选取，以提升权衡协同关系模拟精度。

5　结论

1）ESV 呈“W”型波动变化趋势。ESV 整体略有下降，除调节服务 ESV 上升，其余均下降。市域东南部和阳澄湖等水域周边地区 ESV 明显增加，建设用地扩张区 ESV 减少最显著。

2）生态系统服务之间以协同关系为主，呈明显的空间聚集特征。强权衡协同关系区域主要以东南部和阳澄湖地区为中心扩张；弱权衡协同关系主要围绕建设用地密集区向外扩张。

3）生态发展情景 ESV 最高、协同关系最显著，为最佳发展情景。生态红线的划定使生态效益得到更好发展，生态保护效果最好。MCCA 模型以其高精准度的结果，为未来相关决策的制定提供有效参考。

参考文献

[1]申嘉澍,李双成,梁泽,等.生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望[J].自然资源学报,2021,36(8):1909-1922.

[2]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.

[3]戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡:方法、模型与研究框架[J].地理研究,2016,35(6):1005-1016.

[4]景永才,陈利顶,孙然好.基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架[J].生态学报,2018,38(12):4121-4131.

[5]HOWE C,SUICH H,VIRA B,et al.Creating win-wins from trade-offs? Ecosystem services for human well-being:a meta-analysis of ecosystem service trade-offs and synergies in the real world[J].Global Environmental Change,2014,28:263-275.

[6]杨强强,徐光来,李爱娟,等.青弋江流域生态系统服务评估与权衡研究[J].生态学报,2021,41(23):9315-9327.

[7]巩杰,柳冬青,高秉丽,等.西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系:以甘肃白龙江流域为例[J].应用生态学报,2020,31(4):1278-1288.

[8]王晓萌,潘佩佩,王晓旭,等.基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(1):80-88.

[9]苗培培,赵筱青,普军伟,等.喀斯特山区生态系统服务权衡/协同时空分异研究:以云南广南县为例[J].山地学报,2023,41(1):103-114.

[10]刘玥含,金爱博,王向荣.昆明市生态系统服务多情景模拟评估:基于 GMOP-PLUS 模型分析[J].中国城市林业,2025,23(1):143-152.

[11]BENGTSSON J,BULLOCK J M,EGOH B,et al.Grasslands:more important for ecosystem services than you might think[J].Ecosphere,2019,10(2):e02582.

[12]仲启铖,张桂莲,崔心红.崇明三岛森林生态系统服务价值动态评估[J].中国城市林业,2018,16(4):22-27.

[13]何刘洁,郑博福,万炜,等.长江经济带生态系统服务权衡与协同及其驱动因素[J].环境科学,2024,45(6):3318-3328.

[14]王耕,冯妍.辽宁太子河流域生态系统服务权衡/协同关系时空变化与情景预测[J].生态学报,2024,44(1):96-106.

[15]黄木易,汤玉茹,郭芹,等.基于权衡协同效应的安徽省生态功能区识别及情景模拟[J].中国环境科学,2025,45(1):450-464.

[16]ZHANG D,HUANG Q X,HE C Y,et al.Impacts of urban expansion on ecosystem services in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration,China:a scenario analysis based on the shared socioeconomic pathways[J].Resources,Conservation and Recycling,2017,125:115-130.

[17]LIANG X,GUAN Q F,CLARKE K C,et al.Mixed-cell cellular automata:a new approach for simulating the spatio-temporal dynamics of mixed land use structures[J].Landscape and Urban Planning,2021,205:103960.

[18]白娟,黄凯,路遥.国土空间规划体系核心价值认知及落定策略[J].规划师,2021,37(10):12-19.

[19]黄钰婷,曹雅蓉,吴隽宇,等.交互效应与关键阈值:长三角生态系统服务的驱动因素解析[J].生态学报,2024,(21):1-18.

[20]陈理庭,蔡海生,张婷,等.基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J].生态学报,2022,42(10):3947-3958.

[21]韩晓佳,王继军,温昕.退耕区域生态系统服务作用关系尺度效应及分异机制:以安塞区为例[J].生态学报,2024,44(5):1791-1807.

[22]张敏,迪丽努尔·阿吉.博斯腾湖流域生态系统服务价值时空演变及权衡协同关系[J].水生态学杂志,2022,43(2):29-36.

[23]梁晨,曾坚,沈中健,等.快速城市化生态系统服务格局分析与空间管控:以厦门市为例[J].生态学报,2021,41(11):4379-4392.

[24]林媚珍,刘汉仪,周汝波,等.多情景模拟下粤港澳大湾区生态系统服务评估与权衡研究[J].地理研究,2021,40(9):2657-2669.