



城市生态系统多元协同理论与评估机制：以降碳减污扩绿增长协同度为例

吴铭婉¹, 刘耕源^{1,✉}, 徐多¹, 杨青²

1. 北京师范大学环境学院, 区域环境安全全国重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学环境与生态前沿交叉研究院, 珠海 519087

摘要 城市未来的发展需要重点关注城市系统多要素的相互作用及响应变化, 其中, 协同效应作为城市代谢良性循环的关键点, 保障了城市系统的稳定性和抗风险能力。本研究旨在以协同理论视角出发, 构建城市多元协同分析框架, 探究中国城市在自然环境—经济社会两大系统中, 降碳、减污、扩绿、增长之间的协同关系和内在规律, 从总量和效率分别建立协同模型进行评估。2000—2020 年间中国城市的扩绿—减污总量协同持续上升, 降碳—减污、降碳—增长总量协同保持稳定。中国城市在效率协同上表现复杂, 其中, 部分城市的降碳—增长效率协同效应在 2016 年开始向弱协同水平发展。到时间序列末期, 中国 18.95% 的城市达到多要素总量强协同, 26.42% 的城市形成多要素效率协同。城市生态元与多要素综合协同度之间存在非线性关系, 并且随着城市化率提升, 综合协同度阈值也在提高。中国城市近 20 年的多要素综合协同水平在总量上由弱到强, 在效率上由不协同走向协同, 但是大部分城市的多要素综合协同水平仍有待提升。最后, 本研究提出了城市多元协同发展路径, 为城市协同治理提供理论参考。

关键词 协同发展; 耦合协调; 城市化; 生态系统服务

城市作为国家和地区经济社会发展的重要单元, 承载着当下和未来的经济发展和人类社会进步。然而, 由于城市化过程中的人口、GDP、土地、生态等要素缺乏良性互动, 加剧生态环境恶化, 出现资源供需不匹配、人与自然不协调等问题^[1]。一方面, 城市化进程加速了自然向半自然或人工生态系统的转变, 影响生态系统的结构和功能^[2]。另一方面, 城市化造成资源能源等需求激增^[3], 对全球碳排放也产生深远影响^[4], 并进一步影响人群健康^[5]。IPCC 最新的第 6 次评估报告第二工作组报告《气候变化 2022: 影响、适应和脆弱性》全面揭示了碳与社会、生态系统以及生物多样性的相互依存关系, 并指出城市既是生态环境风险的热点区域, 也是协同解决的关键抓手^[6]。2022 年 10 月, 党的二十大报告明确提出“统筹产业结构调整、污染治理、生态保护、应对气候变化, 协同推进降碳、减污、扩绿、增长, 推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展”, 为更好统筹生态文明建设和经济社会发展指明了方向。

城市协同理论致力于研究城市内部多维度、多层次、多组织之间的各部分的相互作用关系。在有关协同理论的研究中, CORNING 和 SZATHMARY^[7]的协同作用假说解释了协同是系统自组织行为的一种表现。正协同强调在合作过程中产生“共赢”的效益, 可以是自然形成的城市系统各部分相互作用规律, 或者在人为干预——协同控制或协同治理——下逐渐形成自发的正反馈和收益。而负协同作用, 又称“协同蔓延”, 强调多重社会现象重叠产生螺旋式的负外部效应, 使社会发展陷入恶性循环。在应对灾害风险防范的评估中, “地理协同论”提出社会—生态系统综合协同运作, 各部门达成共同抵御风险的共识^[8-9]。

在城市可持续发展管理决策过程中, 应充分考虑城市代谢的过程性与多要素之间综合的协同效应。从现有研究来看, 城市的协同研究从双要素协同正在走向多要素综合协同。例如, 污染物与碳排放协同 PM_{2.5}-

收稿日期: 2024-06-30 录用日期: 2024-09-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (52430003); 中国工程院战略研究与咨询重点项目 (2024-XZ-47); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 吴铭婉 (1998—), 女, 博士研究生, 研究方向为城市与区域生态模拟与管理, 202431180023@mail.bnu.edu.cn

✉通信作者: 刘耕源 (1983—), 男, 博士, 教授, 研究方向为城市生态规划与管理, liugengyuan@bnu.edu.cn

CO₂-O₃^[10]、SO₂-CO₂-PM_{2.5} 的协同效应^[11]；水-能源-碳的关联关系^[12]；社会-经济-自然协同：氮的生产-消费-排放过程的耦合^[13]；城市土地-碳排放-气候变化的时空耦合^[14-15]等。这些多层次、多组分、高密度、高流量、高互动性的关联性特征在城市代谢过程中普遍存在，从而使得城市代谢系统中原本已非常显著的复杂性在多层式互动结构中被极度放大。传统的解决环境污染、温室气体减排等问题的单一维度的分析方法，已无法反映高度复杂的城市代谢和相互作用的内在联系，单一要素分析将严重影响城市代谢过程分析的有效性及可靠性，易造成相关决策失误和重大损失。

在城市系统整体的协同程度评价模型上，非线性演化方程^[16]、耦合协调度模型^[10,17-19]、EKC 曲线^[20-22]、投入产出模型^[23]、脱钩理论指数模型^[24]、双指数模型^[25-26]等，都被用于模拟城市不同要素协同的静态截面和动态变化。此外，在协同评价上，FAN 等^[23]采用多维向量角思想，根据能源消费类型及含碳量比例，构建了能源结构脱碳指数，对能源结构脱碳变化进行测度。在考虑相关性的协同上，GUAN 等^[10]利用相关系数变化量构建二维和三维综合协同指数，模拟 PM_{2.5}-O₃-CO₂ 的协同作用变化。GAO 等^[11]构建了交叉弹性指数，利用差分法模型模拟大气污染物减排对碳排放的协同效应。这些模型多采用计量方法和数学模型对协同进行定义、解构和趋势拟合，但大部分研究忽略了城市化造成的生态与其他要素的规律发现和验证，导致城市协同研究缺乏先验知识和理论基础。

城市绿地生态系统提供了栖息地环境质量、生物多样性和生态系统服务等多种支持，绿色空间为城市提供了低温度和低污染的生态环境^[27]。绿地生态系统内部存在多服务之间的权衡和协同关系，这种内部协同效应在城市化的影响下会有所增强或弱化^[28-29]。生态系统多样性与碳循环有正相关关系，如增加树木多样性同时可以提供更多碳固存效益^[27]。然而，城市用地的过度开发会占用生态用地，造成生态环境破坏，导致生态系统服务下降^[30-31]。城市化与绿地生态系统之间的协同存在阈值界限，当城市公共服务因过度集中，开发强度过高而超出阈值，生态用地因土地竞争而流失，生态系统服务迅速下降^[27]。此外，城市公共服务与生态系统服务的正向协同形成取决于当地适宜的生态条件^[32]。

本研究通过建立城市多元协同分析框架，对中国城市的降碳、减污、扩绿、增长 4 个维度的协同度进行研究，尝试寻找多要素协同效应规律，并提出城市经济社会转型的生态协同发展路径，为制定城市多元协同发展战略提供支撑。

1 研究框架与方法

1.1 城市“降碳减污扩绿增长”多元协同分析框架

复杂系统的基本结构是多层次的，具有无法用低层次现象充分描述、预测或解释宏观层面的整体特征。此外，不同层次的组织通过“相互约束的接口”向上或向下形成层级间的相互联系^[33]。同样，在系统的协同研究分析中，不同层次的组织也以多种方式“相互作用”，形成许多复杂的反馈链路^[7]。本研究从总量型协同和效率型协同 2 个视角出发，对城市尺度生态资本、碳排放、环境质量、经济社会增长等城市要素提出城市多元关系网络和协同分析框架，探讨城市多要素两两协同、多维度综合协同的特征，并总结提出城市的协同发展方向和未来的协同政策指引。

城市多要素之间存在复杂的关系网络。本研究以城市碳循环、环境质量、生态资本和经济社会发展为例，构建了城市多元关系网络（图 1）。其中，城市碳循环包括碳源和碳汇，碳源主要是由于化石燃料燃烧等能源消耗产生的碳排放，在社会生产活动中以碳强度衡量单位经济产值下的碳排放输出。环境质量关注污染物的排放和净化，污染物包括气体污染物、可溶性污染物和固体废弃物的点源或非点源排放，碳排放和空气污染物排放具有同源性。环境质量由大气环境、水环境和土壤环境共同构成，污染净化和控制一部分依靠生态系统调节服务的净化环境功能，另一部分由经济社会基础设施（如污水处理厂、垃圾处理设施、大气污染治理设备等）进行处理。在生态资本方面，生态用地包括森林、草原和湿地生态系统，扩大植被覆盖面积、维护当地生态系统物种多样性稳定，有助于提升生态系统服务的生物固碳、滞纳污染物、净化水资源等调节服务，提高粮食、木材等供给服务效益和娱乐、休闲、康养等文化服务效益。经济社会系统包括经济增长和社会发展 2 部分，经济增长主要是 GDP 和能源、粮食等消费的增长，社会发展体现在建成区的扩张、人类健康和幸福感、资源分配公平性等方面。城市建成区用地扩张初期会侵占生态用地，但在政策管理下对生态用地进行保护，构建人工生态系统进行生态修复等。环境质量与人类健康相关，城市通过投资进行污染治理。

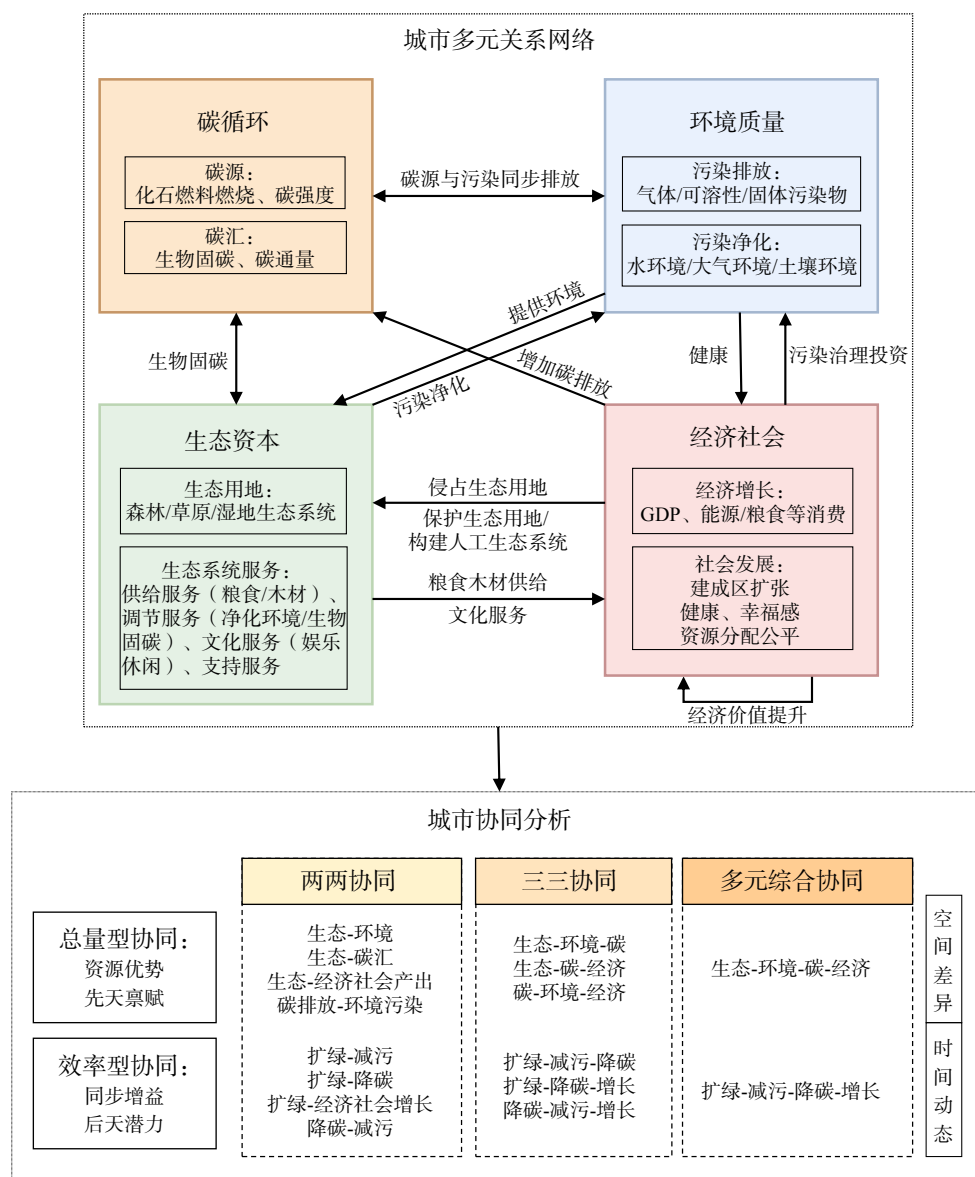


图 1 城市多元协同分析框架

Fig. 1 Analysis framework of urban multi-element synergy

总量型协同，强调要素与要素之间在数量关系上的相关性。总量型协同更多展现的是当地的社会经济条件、环境状况和生态禀赋等资本的存量，是区域的资源优势。如大兴安岭地区是天然的高生态禀赋区域，长三角、珠三角城市群是经济社会相对发达的区域，又如山东省各城市处于黄河下游，是污染物的汇集区，城市如果出现高污染现象，可能不是山东省本身由于生产活动造成的，而是上游城市污染排放的汇集。

效率型协同，强调发展变化过程中波动变化方向的一致性。效率型协同更多关注增长率的同步性，代表增益的后天潜力。在时间维度上，指标的同步/异步波动程度可以反映要素之间的协同关系。如果两个维度的基准年的变化率均为正向增长，则体现为效率型协同。

1.2 城市多元协同评估指标及方法

1) 指标体系及数据来源。在减污方面，采用空气质量指数和水环境指数进行归一化加权求和，生成环境质量指数（表 1）。在空气质量指数和水环境指数方面，各城市的核算方法一致，环境质量指数对当地的自然环境质量表征具有代表性。空气质量指数来自于生态环境部（<https://www.mee.gov.cn>），数据的起止年份为 2000—2020 年。水环境指数来源于公众环境研究中心（<https://www.ipe.org.cn/index.aspx>），起止年份为 2010—2020 年。

表 1 城市多要素指标体系
Table 1 Urban multi-element index system

要素	指标	变量	标准化
生态资本	单位面积生态元/(10^{10} sej·m ⁻²)	ESV _i	$Ec_i = \frac{ESV_i - ESV_{\min}}{ESV_{\max} - ESV_{\min}}$
环境质量	空气质量指数	AQI _i	$AQI'_i = \frac{AQI_{\max} - AQI_i}{AQI_{\max} - AQI_{\min}}$
	水环境指数	WQI _i	$WQI'_i = \frac{WQI_{\max} - WQI_i}{WQI_{\max} - WQI_{\min}}$
	环境综合质量指数	En _i	$En_i = \alpha AQI'_i + \beta WQI'_i$
碳循环	二氧化碳排放量/10 ⁴ t	CO _{2i}	$Ca_i = \frac{\text{Log}(\text{CO}_{2\max}) - \text{Log}(\text{CO}_{2i})}{\text{Log}(\text{CO}_{2\max}) - \text{Log}(\text{CO}_{2\min})}$
经济社会发展	人均GDP/元	GDP _i	$So_i = \frac{\text{Log}(\text{GDP}_i) - \text{Log}(\text{GDP}_{\min})}{\text{Log}(\text{GDP}_{\max}) - \text{Log}(\text{GDP}_{\min})}$

注：由于碳和经济社会要素符合规模理论效应，因此在标准化时采用取对数的处理方法。单位面积生态元、人均GDP均为正向指标，空气质量指数、水环境指数和二氧化碳排放量指标均为逆向指标，在标准化处理过程中，针对正向/逆向指标采用了不同的处理方法。

在降碳方面，选取二氧化碳排放总量。碳排放核算采用化石燃料消费的碳排放系数进行换算，针对2000—2019年的每年各类能源消费总量进行核算。碳排放数据来源于中国 CEADS 数据库（<https://www.ceads.net.cn>）。

在生态要素上，选取自建的单位面积生态元作为扩绿的指标。生态元法聚焦于调节服务类生态产品的价值核算，该方法以太阳能值作为核算的统一量纲，打通了不同生态服务功能之间不可加和的传统障碍，也避免了直接量化为货币价值后难以进一步向市场价值和交易价值转化的困境^[34]。生态元法的单位为表征能量的“生态元”，1生态元等价于 10^{10} 太阳能焦耳。将生态元作为生态产品的基本统计单位，有利于在同一地区不同生态系统服务之间，以及不同地区同一生态系统服务之间作对比分析。数据的起止年份为2000—2020年，每5年1期^[35]。

在经济增长方面，选取人均GDP作为衡量城市经济发达程度的指标。数据来源于《中国城市统计年鉴》和各省的统计年鉴，起止年份为2000—2020年。

2) 总量型协同指数。以生态资本和环境质量的两两协同为例，城市的“生态—环境”总量协同表现为，城市同时提供高生态系统服务价值与高环境质量。因此，总量协同指数由“生态—环境”标准化指数的几何平均值得出，具体计算如式(1)~(3)所示。

$$QS_{Ec-En} = \sqrt{Ec_i \cdot En_i} \quad (1)$$

$$QS_{Ca-En} = \sqrt{Ca_i \cdot En_i} \quad (2)$$

$$QS_{Ca-So} = \sqrt{Ca_i \cdot So_i} \quad (3)$$

式中： QS_{Ec-En} 为“生态—环境”总量协同指数； QS_{Ca-En} 为“碳—环境”总量协同指数； QS_{Ca-So} 为“碳—社会经济”总量协同指数。总量协同指数的评价等级见表2。 $Ec_{\text{mathit{it}}}$ 、 En_i 、 Ca_i 分别为城市*i*归一化的单位面积生态元、环境综合质量指数和CO₂排放总量。

3) 效率型协同指数。城市的“生态—环境”效率型协同表现为，在同一时段内，城市生态系统服务价值与环境质量同步正向提升的相似趋势。因此，在时间断面“高生态资本—高环境质量”的基础上，增加了时间序列相关性的检验。效率型协同指数由时间序列下的“生态—环境”双变量相关性及相关变化率得出，具体计算如式(4)~式(6)所示。

$$ES_{Ec-En} = r_{Ec-En} \cdot \sqrt{|\Delta Ec_i \cdot \Delta En_i|} \quad (4)$$

$$ES_{Ca-En} = r_{Ca-En} \cdot \sqrt{|\Delta Ca_i \cdot \Delta En_i|} \quad (5)$$

$$ES_{Ca-So} = r_{Ca-So} \cdot \sqrt{|\Delta Ca_i \cdot \Delta So_i|} \quad (6)$$

式中： ES_{Ec-En} 为“扩绿—减污”效率协同指数； ES_{Ca-En} 为“降碳—减污”效率协同指数； ES_{Ca-So} 为“降碳—增长”效率协同指数。效率协同指数的评价等级见表 2。 r_{Ec-En} 为时间序列下单位面积生态元和环境综合质量指数的皮尔逊相关系数，当 $r_{Ec-En} \geq 0.5$ 时，城市表现为“扩绿—减污”的效率协同。当

$|r_{Ec-En}| < 0.5$ 时，认为城市的“扩绿—减污”之间没有效率协同关系。当 $r_{Ec-En} \leq -0.5$ 时，城市表现为“扩绿—减污”效率协同的相反趋势。 ΔEc_i 、 ΔEn_i 、 ΔCa_i 分别为城市 i 归一化的单位面积生态元、环境综合质量指数和 CO_2 排放总量的在一段时间区间下的相对变化率。

4) 回归分析。本研究采用非线性模型对城市生态元与“降碳—减污—扩绿—增长”综合协同度进行回归分析。非线性回归方程选取指数型回归函数，如式 (7) 所示。

$$y = Ae^{-\frac{x}{t}} + y_0 \quad (7)$$

式中： A 、 t 、 y_0 均为拟合参数， $y=y_0$ 为回归方程的渐近线，表现的是指标 y 的上限水平。自变量 x 选取单位面积生态元，因变量 y 为综合协同度。回归分析过程中采用皮尔逊矩相关系数 (Pearson's r) 和 R^2 分别对指标间的相关性和回归结果拟合优度进行评价。

5) 综合协同度模型。与耦合协调度相似，综合协同度反映城市中多个要素的协同水平，强调各要素在资源和质量的匹配性和差异程度。本研究借鉴耦合协调度的计算方法，构建了“降碳—减污—扩绿—增长”的综合协同度模型。综合协同度越高，反映城市多要素的协同程度越高。具体计算如式 (8) 所示。

$$C_i = (Ca_i \cdot En_i \cdot Ec_i \cdot So_i)^{1/4} \quad (8)$$

式中： C_i 为无量纲的综合协同度，取值范围为 (0,1]； Ca_i 、 En_i 、 Ec_i 、 So_i 分别为城市 i 的碳排放总量、环境综合质量、单位面积生态元和人均 GDP 的标准化值。为进一步对协同关系进行表征，对协同程度的计算结果进行了标准化处理。

2 结果与讨论

2.1 城市扩绿—减污协同效应分析

中国各城市的生态元与大气环境质量之间的总量协同关系从 2000—2020 年逐渐上升，而生态元与水环境质量之间的总量协同关系在 2010—2020 年间呈现稳定趋势 (图 2)。城市生态元与大气环境的总量协同指数平均值从 2000 年的 0.41 上涨到 2020 年的 0.50，期间 2014 年存在波动的谷值 (0.40)。这表明生态质量和大气环境质量的协同关系是从中等协同逐步发展为强协同，但是，突发的空气污染事件会严重降低生态质量和大气环境质量的协同程度。在 2010—2020 年间，城市生态元与水环境的总量协同指数平均值在 0.45~0.47 范围内波动。

在效率协同关系中，城市扩绿—减污之间的变化趋势更为复杂。2001 年，在 46 个城市有效数据中，只有 12 个城市达到扩绿—大气减污效率协同，到 2020 年 69.00% 的城市达到了扩绿—大气减污效率协同 (300 个城市有效数据中，有 207 个城市的扩绿—大气减污效率协同指数大于 0)。在扩绿—水环境减污效率协同方面，2011 年有 20.34% 的城市达到扩绿—水环境减污效率协同 (236 个城市有效数据中，有 48 个城市的扩绿—水环境减污效率协同指数大于 0)；到 2020 年，城市符合扩绿—水环境减污效率协同发展的城市为 43.92% (296 个城市有效数据中，有 130 个城市的扩绿—水环境减污效率协同指数大于 0)。

城市生态—环境的总量协同和效率协同评估结果如图 3 所示。从 2020 年总量协同分布情况来看，城市生态元与大气环境、水环境质量的协同水平整体表现相似。华南地区和部分东北城市的“生态—环境”禀赋高，生态系统提供了较高生态元和良好的环境质量。而华北平原及部分西北地区城市的生态系统调节服务价值匮乏，环境质量相对较差。在效率协同中，大部分城市“扩绿—大气减污”协同水平表现为弱协同，少量城市“扩绿—水体减污”呈现弱协同，即在近五年内持续同步提高生态元和提升环境质量，尤其是空气质量。在

表 2 总量协同评价等级

Table 2 Evaluation level of synergistic index

协同等级	总量协同指数	效率协同指数
不协同	$QS \leq 0$	$ES \leq 0$
弱协同	$0 < QS \leq 0.3$	$0 < ES \leq 0.3$
中等协同	$0.3 < QS \leq 0.6$	$0.3 < ES \leq 0.6$
强协同	$QS > 0.6$	$ES > 0.6$

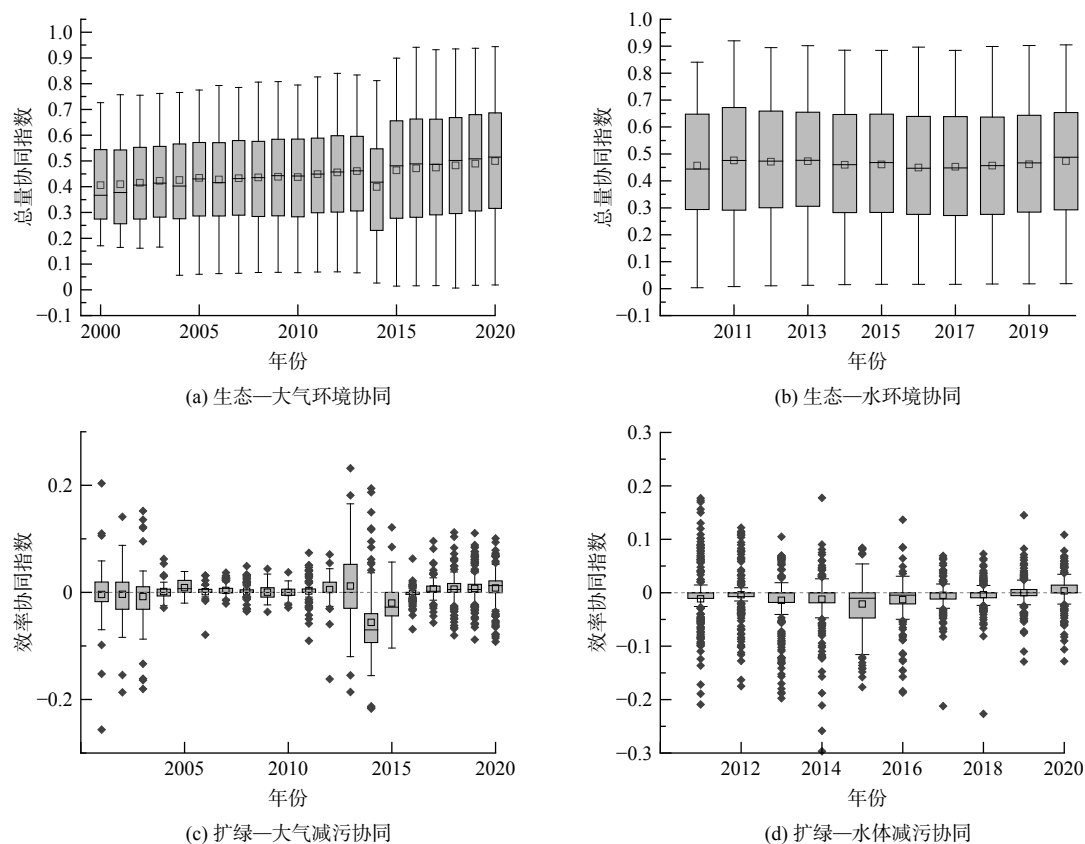
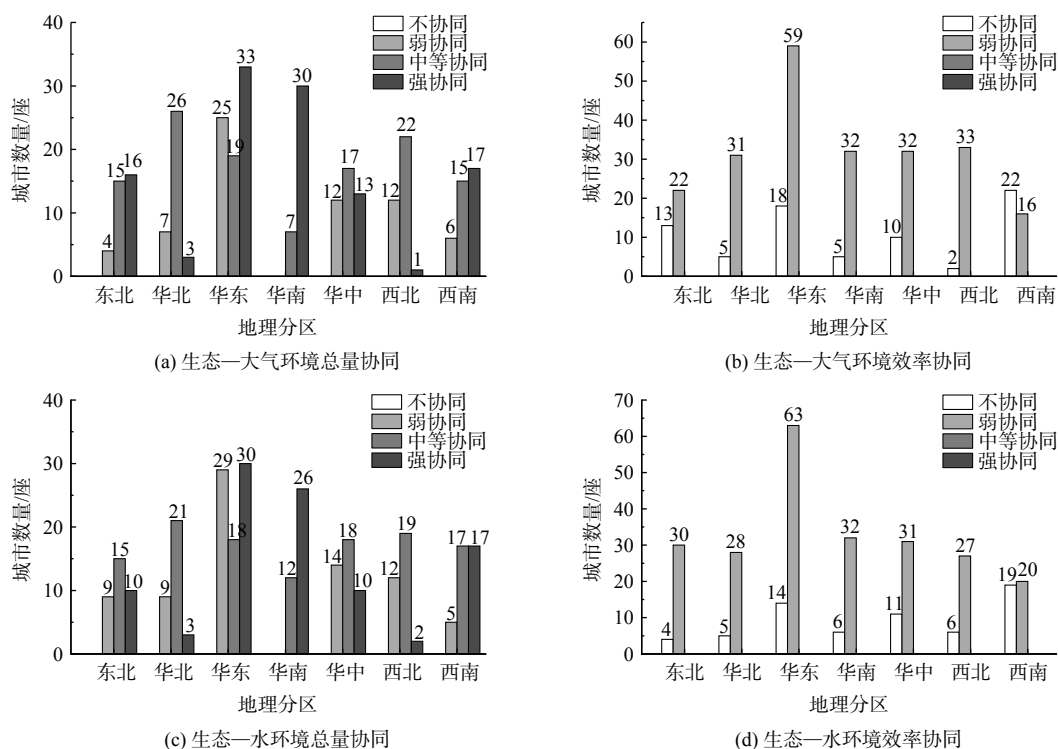


图2 生态元与环境质量的协同效应

Fig. 2 The synergistic effect of pollution reduction and ecosystem services



注：数据为2020年。

图3 生态元与环境质量的总量型协同和效率型协同空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of quantity and efficiency synergy between ecosystem services and environmental quality

水环境质量方面，“生态—水环境”总量强协同的城市，出现了效率不协同甚至变成负相关关系，因此，在城市发展过程中，“扩绿—水体减污”的效率协同值得重点关注，在提高生态质量的同时，应注意水环境质量的变化。

2.2 城市降碳与减污、增长的协同效应分析

中国城市碳排放与大气环境之间的总量协同在时间序列下在一定范围内波动变化（图4）。在效率协同方面，2000—2013年间大部分城市无法形成降碳与减污效率协同，但从2014年起，城市降碳—减污效率协同指数平均值开始超过0，随后在2018年回弹，表现出降碳与减污效率又回到不协同状态。

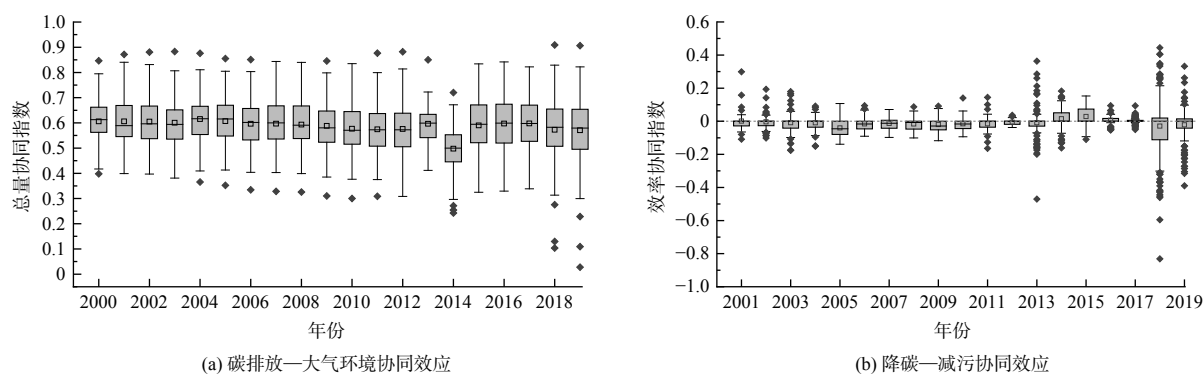


图4 碳减排与环境质量的协同效应

Fig. 4 The synergistic effect of carbon reduction and environmental quality

中国城市碳排放与经济水平之间的总量协同在时间序列下保持稳定（图5）。在效率协同方面，2015年以前大部分城市无法形成降碳—经济增长的效率协同，即大部分城市的经济增长依赖高碳排产业。从2016年起，城市降碳—经济增长效率协同指数差异变大，形成降碳与经济增长效率协同的城市明显增多，在2018年的281个城市有效数据中，72个城市形成降碳与经济增长的效率协同。但部分城市的降碳—经济增长效率协同容易出现反弹，丧失降碳与经济增长的效率协同效应。

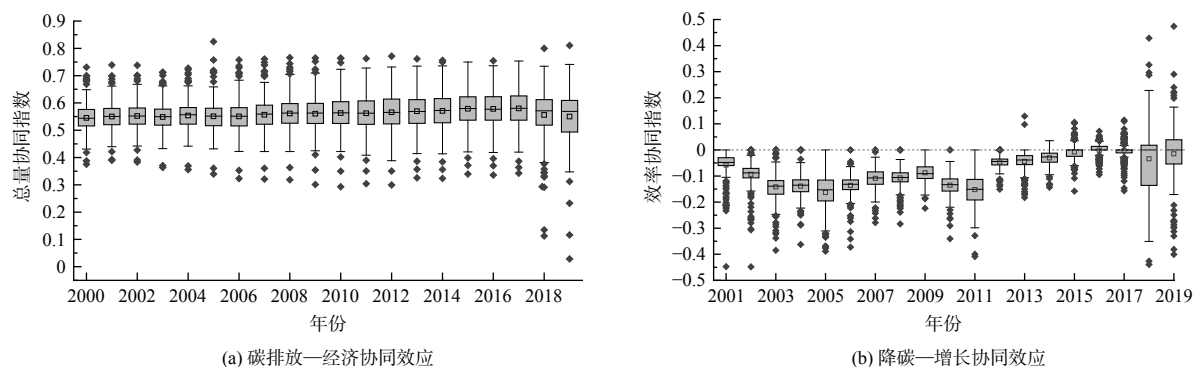


图5 碳减排与经济增长的协同效应

Fig. 5 The synergistic effect of carbon reduction and economic growth

华南、东北和西南地区城市的碳排放—大气环境总量协同程度较高，表明这部分区域的城市碳排放较低，空气质量较好；在效率型协同方面，各地区只有较少的城市在时间序列上形成降碳和减污的同步变化（图6）。在区域碳排放—经济总量协同中，华南和西南地区的总量协同程度较高，这部分区域的城市的经济增长开始脱离碳排放依赖，但从效率上看，各地区的城市尚未形成经济增长和降碳的同步效应（图7）。

2.3 城市多元协同发展路径分析

根据国际货币基金组织（IMF）公布的数据，2021年发达国家人均GDP达到了52 070美元（折合人民币约 36.6×10^4 元），发展中国家人均GDP为6 080美元（折合人民币约 4.3×10^4 元），第一象限的纵向划分线（即人均GDP的均值与一倍标准差之和）约为 8.0×10^4 元（图7），处于发展中国家与发达国家人均GDP差距的1/4处。

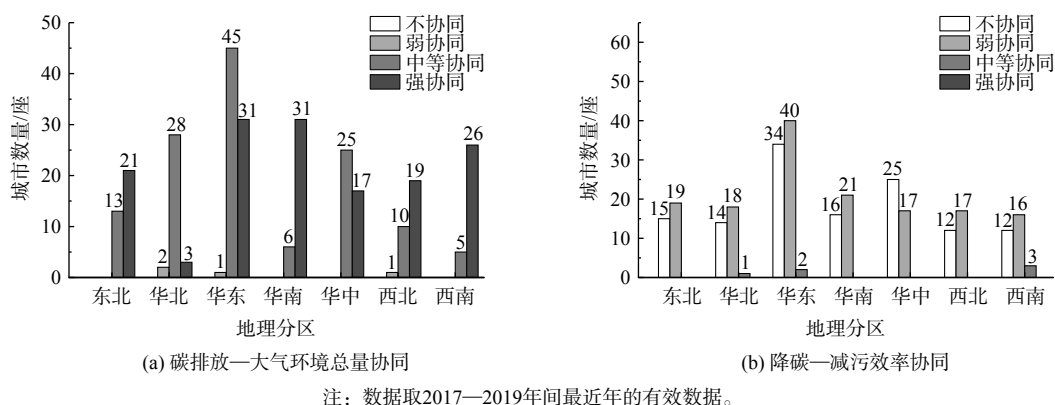


图 6 碳排放与空气质量的总量型协同和效率型协同的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of quantity and efficiency synergy effect between carbon emissions and air quality

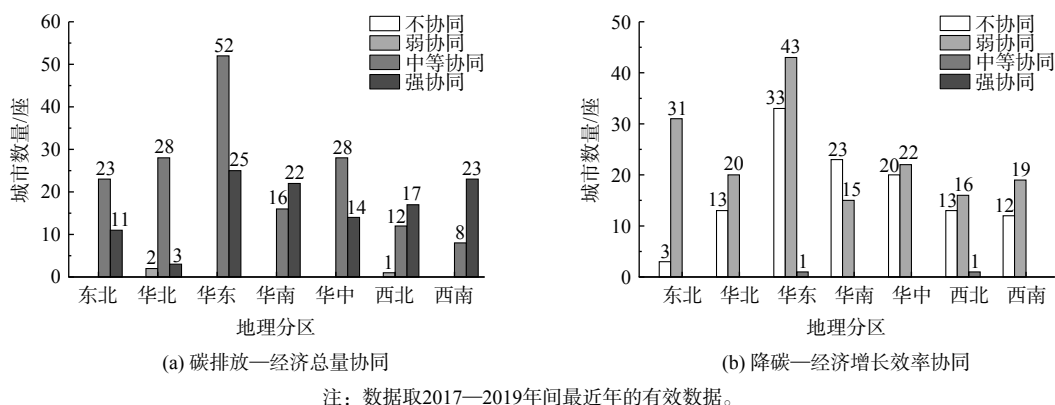


图 7 碳排放与经济增长的总量型协同和效率型协同的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of quantity and efficiency synergy effect between carbon emissions and economic growth

对于人均 GDP 和单位面积生态元的变化关系，城市可以分为生态与经济双赢型协同（图 8 第一象限）、经济衰退型（区域②）、生态衰退型（区域④）、生态与经济双衰退型协同（区域③）。

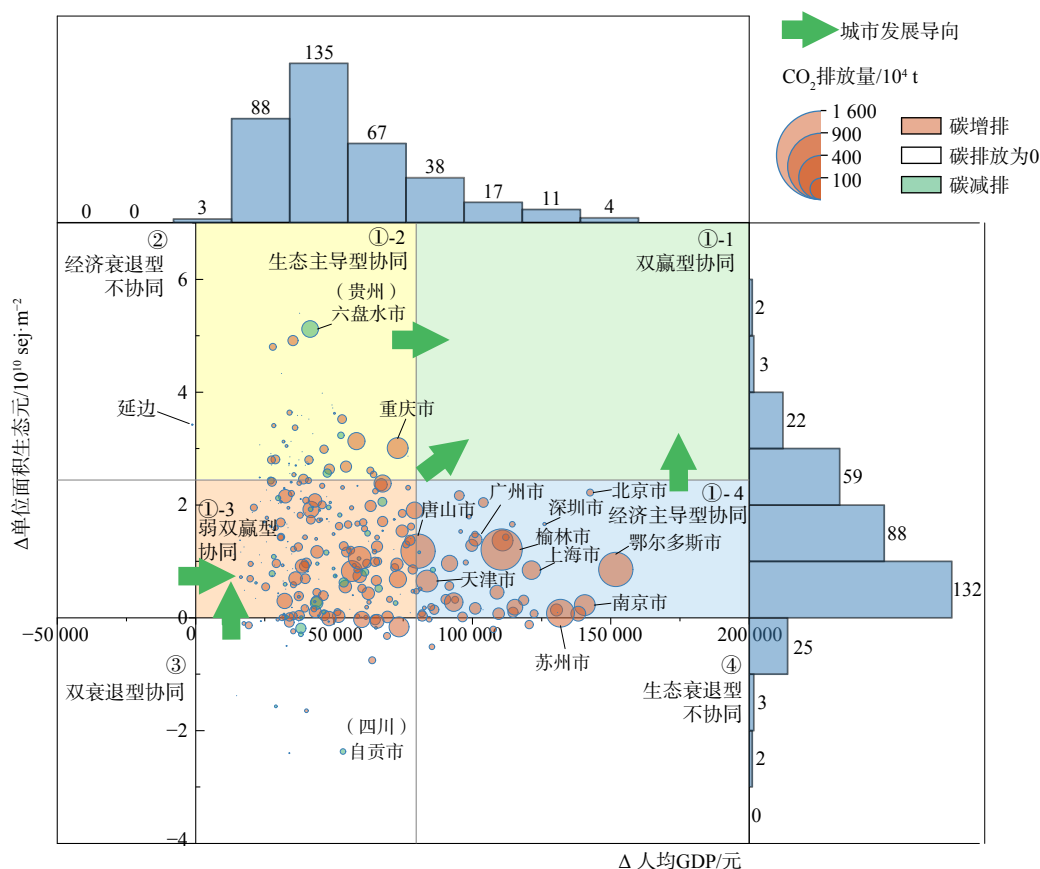
经济衰退型（区域②）体现在城市人均 GDP 在近 20 年减少的同时，单位面积生态元是呈现增加的趋势，代表城市为延边朝鲜族自治州，其碳减排能力较弱。

生态衰退型（区域④）表现为城市人均 GDP 增加的同时，单位面积生态元减少加剧。代表城市为广西百色市、海南海口市、四川自贡市、大兴安岭地区，这些城市的碳减排能力相对较弱。

生态与经济双衰退型协同（区域③）表现为城市的人均 GDP 和单位面积生态元同样减少的现象，目前近 20 年前后的总体变化中尚未发现存在这类城市。

在生态与经济双赢型协同的城市中，又划分为 4 个子区域，即强双赢型协同（区域①-1）、生态主导型协同（区域①-2）、经济主导型协同（区域①-4）、弱双赢型协同（区域①-3）。中国大部分城市多集中于人均 GDP 与单位面积生态元的增长程度较为微弱，处于弱双赢协同区域（区域①-3）。生态主导型协同（区域①-2）代表城市有吉林白山市、辽宁鞍山市、贵州六盘水市、重庆市等；经济主导型协同（区域①-4）代表城市为北京、天津、上海、广州、深圳、内蒙古鄂尔多斯等，这类城市的碳排放都呈现增加趋势。所有城市的发展导向为强双赢型协同模式（①-1），城市表现为经济上人均 GDP 和生态上单位面积生态元的大幅度增长。

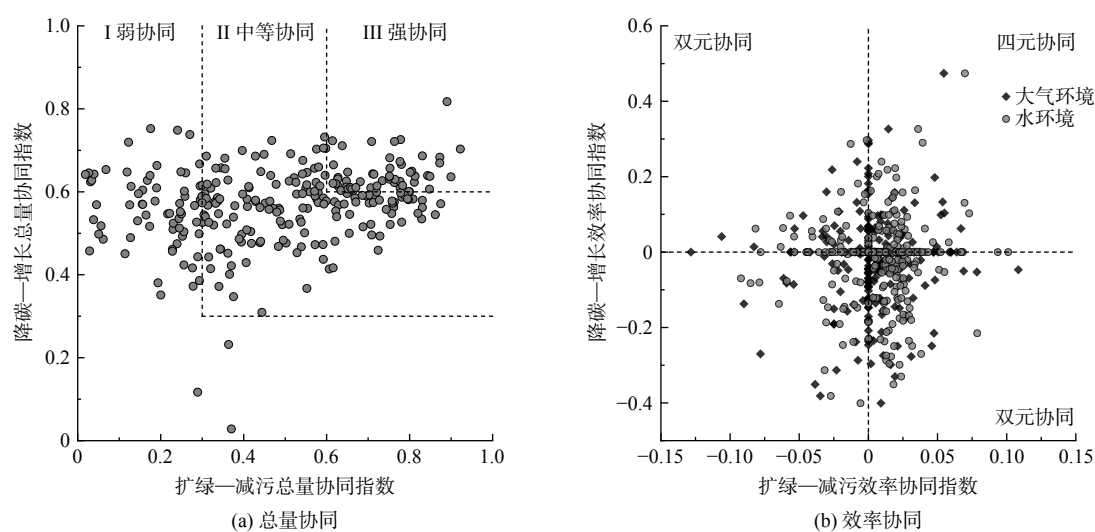
在城市降碳—减污—扩绿—增长多元综合协同结果中，284 个城市中 18.95% 的城市达到多元总量强协同（图 9(a) 区域Ⅲ），57.04% 的城市处于多元总量中等协同水平（图 9(a) 区域Ⅱ），仍有 23.94% 的城市处于多元总量弱协同水平（图 9(a) 区域Ⅰ）。中国城市的多元效率协同结果中（图 9(b)），193 个城市中有 26.42% 的城市处于降碳—减污—扩绿—增长的四元协同变化趋势，60.62% 的城市属于二元效率协同变化，



注：CO₂ 排放量是根据现有数据的从 2000 年到最近年的数据进行计算的。CO₂ 排放量中圆圈为绿色代表 CO₂ 排放减少，橙色代表 CO₂ 排放增加，圆圈大小代表 CO₂ 减排量的绝对值大小。在直角坐标系的基础上初步划分四个象限区域（①~④），其中，第一象限（区域①）通过人均 GDP 变化量和单位面积生态元数据的均值加一倍标准差获得 4 个子分区，分别为①-1，①-2，①-3，①-4。

图 8 2000—2020 年人均 GDP、单位面积生态元与碳排放变化量关系图

Fig. 8 Relationship between per capita GDP, ecosystem services per unit area and carbon emission from 2000 to 2020



注：图9(a)的扩绿—减污总量协同指数取扩绿—大气减污和扩绿—水体减污总量协同指数的平均值，所有数据均采用最近年有效数据。

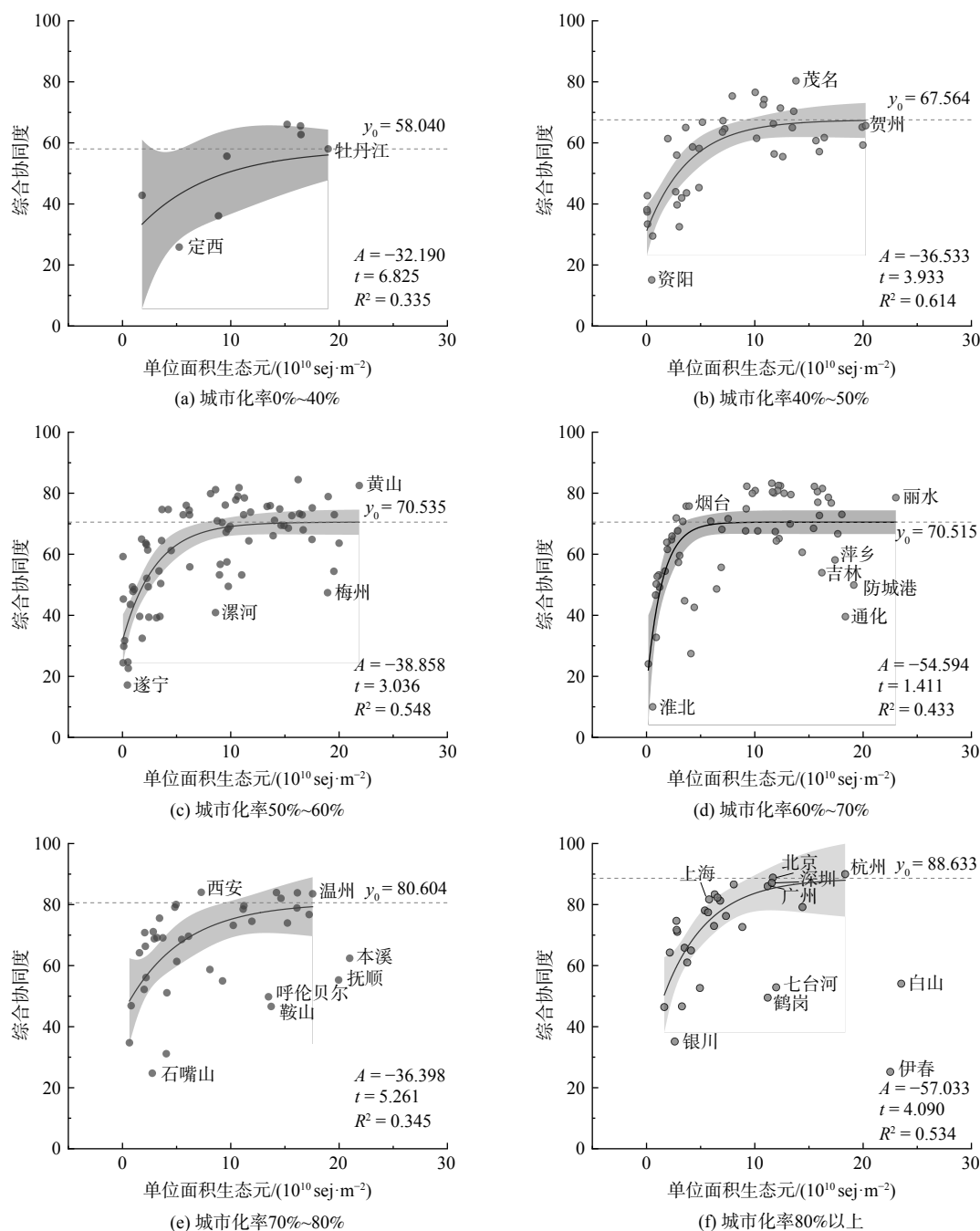
图 9 城市降碳—减污—扩绿—增长总量协同和效率协同象限图

Fig. 9 Quantity and efficiency synergy diagram of urban carbon reduction, pollution reduction, ecosystem services improvement, and economic growth

以及 12.95% 的城市出现多个要素间的负相关, 如扩绿—减污、降碳—增长之间完全相反的变化趋势。

2.4 讨论

研究发现, 城市单位面积生态元与综合协同度的关系基本符合非线性关系 $y = Ae^{-\frac{x}{t}} + y_0$ ($A = -38.904$, $t = 2.577$, $y_0 = 69.004$, $R^2 = 0.408$) (图 10)。在单位面积生态元 0~5 ($10^{10} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2}$) 的分布范围中, 城市与城市之间的协同度差异明显, 而单位面积生态元超过 5~10 ($10^{10} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-2}$) 的城市, 综合协同度的差异相对减小。



注: 图中显示了拟合曲线及其95%置信区间。图10(e)的非线性拟合输入数据剔除了本溪、抚顺、呼伦贝尔和鞍山, 图10(f)的非线性拟合输入数据剔除了白山、伊春、七台河和鹤岗。拟合优度 R^2 在0.3到0.7之间。

图 10 不同城市化率区间单位面积生态元与综合协同指数的非线性回归拟合

Fig. 10 Non-linear regression fitting between ecosystem services unit area and comprehensive synergy index in different urbanization rate intervals

同一城市化率区间内，单位面积生态元与综合协同度的非线性关系更为显著。在不同城市化率的梯度区间内，协同指数的上限水平也随城市化率提高，城市化率 0%~40.00% 的估计综合协同度预计上限为 58.04，当城市化率达到 80.00% 以上，综合协同度的预计上限达到 88.63。

但城市化率达到 50.00% 开始，部分城市即使单位面积生态元较高，综合协同度的表现并不理想。例如梅州（城市化率 50.00%~60.00%）、通化和防城港（城市化率 60.00%~70.00%）、本溪、抚顺、呼伦贝尔和鞍山（城市化率 70.00%~80.00%），白山、伊春、七台河和鹤岗（城市化率 80.00% 以上）。

针对降碳—减污—扩绿—增长综合协同目标，本研究提出对应的协同路径及政策建议。城市经济社会发展和碳减排的协同路径，即在碳达峰碳中和的限制条件下，实现从传统粗放型产业向绿色、高效、低碳、循环发展经济体系的路径转变^[36]。作为城市系统运作的不同角色，市场、社会、政府在碳排放权交易体系中相互协调，例如，政府可以整合社会资源，市场机制有利于提高资源利用效率和企业碳排放约束，社会可以提倡更节能、可持续的生活方式，使城市系统整体达成低碳、降碳中实现经济增长和社会发展的目标。

城市的生态扩绿—环境减污协同路径，应考虑在城市用地扩张过程中，保护原生生态系统，增加人工湿地，构建海绵城市，提高调蓄水源和净化水质的能力；同时，考虑植被对空气污染物的滞纳作用，通过城市绿色空间对植被数量和多样性的合理布局，最大限度发挥生态系统的净化大气功能。在社会基础设施处理污染物方面，促进城市雨污分流管道系统的建立与维护，提升污染物处理净化技术等。

3 结论与展望

1) 在双要素协同效应中，中国城市的扩绿—减污总量协同持续上升，降碳—减污、降碳—增长总量协同在一定范围内波动变化；城市在效率协同上表现复杂，降碳—增长效率协同效应在 2016 年开始向弱协同水平发展。

2) 在多要素协同效应中，中国城市 2000—2020 年的多要素综合协同水平在总量禀赋上由弱到强，在效率上由不协同走向协同；到研究末期，中国 18.95% 的城市达到多要素总量强协同，26.42% 的城市形成多要素效率协同。

3) 城市化率影响生态元与综合协同度拟合的上限水平。在城市化过程中，提升生态元有助于提高城市整体的协同发展水平。

参考文献

- [1] GENCER E, FOLORUNSHO R, LINKIN M, et al. Climate Change and Cities (ARC 3-2). Second Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network[M]. New York: Cambridge University Press, 2018.
- [2] SONG W, DENG X Z. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 576: 705-719.
- [3] WU H T, HAO Y, WENG J H. How does energy consumption affect China's urbanization? New evidence from dynamic threshold panel models[J]. *Energy Policy*, 2019, 127: 24-38.
- [4] LIN C, QI J C, LIANG S, et al. Saving less in China facilitates global CO₂ mitigation[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1358.
- [5] RAMASWAMI A, TONG K K, FANG A, et al. Urban cross-sector actions for carbon mitigation with local health co-benefits in China[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7(10): 736-742.
- [6] IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2022.
- [7] CORNING P A, SZATHMÁRY E. "Synergistic selection": A Darwinian frame for the evolution of complexity[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2015, 371: 45-58.
- [8] 史培军, 汪明, 胡小兵, 等. 社会——生态系统综合风险防范的凝聚力模式[J]. *地理学报*, 2014, 69(6): 863-876.
- [9] 史培军, 宋长青, 程昌秀. 地理协同论——从理解“人—地关系”到设计“人—地协同”[J]. *地理学报*, 2019, 74(1): 3-15.
- [10] GUAN Y, XIAO Y, RONG B, et al. Heterogeneity and typology of the city-level synergy between CO₂ emission, PM_{2.5}, and ozone pollution in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 405: 136871.
- [11] GAO X W, LIU N, HUA Y J. Environmental protection tax law on the synergy of pollution reduction and carbon reduction in China: Evidence from a panel data of 107 cities[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 33: 425-437.
- [12] WANG X, KLEMEŠ J J, WANG Y, et al. Water-energy-carbon emissions nexus analysis of China: An environmental input-output model-based approach[J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114431.
- [13] PAN J J, DING N, YANG J X. Changes of urban nitrogen metabolism in the Beijing megacity of China, 2000–2016[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 666: 1048-1057.

- [14] 李建豹, 黄贤金, 孙树臣, 等. 长三角地区城市土地与能源消费 CO₂ 排放的时空耦合分析[J]. *地理研究*, 2019, 38(9): 2188-2201.
- [15] AN M, XIE P, HE W J, et al. Local and tele-coupling development between carbon emission and ecologic environment quality[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 394: 136409.
- [16] 乔标, 方创琳. 城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用[J]. *生态学报*, 2005(11): 211-217.
- [17] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析[J]. *自然资源学报*, 2005(1): 105-112.
- [18] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度[J]. *生态学报*, 2015, 35(7): 2244-2254.
- [19] 赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 159-171.
- [20] CAVIGLIA-HARRIS J L, CHAMBERS D, KAHN J R. Taking the “U” out of Kuznets: A comprehensive analysis of the EKC and environmental degradation[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(4): 1149-1159.
- [21] KIJIMA M, NISHIDE K, OHYAMA A. Economic models for the environmental Kuznets curve: A survey[J]. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 2010, 34(7): 1187-1201.
- [22] FAN J J, WANG J L, QIU J X, et al. Stage effects of energy consumption and carbon emissions in the process of urbanization: Evidence from 30 provinces in China[J]. *Energy*, 2023, 276: 127655.
- [23] 彭焜, 朱鹤, 王赛鸽, 等. 基于系统投入产出和生态网络分析的能源-水耦合关系与协同管理研究——以湖北省为例[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1514-1528.
- [24] GUPTA S. Decoupling: A step toward sustainable development with reference to OECD countries[J]. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2015, 22(6): 510-519.
- [25] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. *地理研究*, 2003(2): 211-220.
- [26] 高乐华, 高强. 海洋生态经济系统交互胁迫关系验证及其协调度测算[J]. *资源科学*, 2012, 34(1): 173-184.
- [27] BELAIRE J A, HIGGINS C, ZOLL D, et al. Fine-scale monitoring and mapping of biodiversity and ecosystem services reveals multiple synergies and few tradeoffs in urban green space management[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 849: 157801.
- [28] SYLLA M, HAGEMANN N, SZEWRANSKI S. Mapping trade-offs and synergies among peri-urban ecosystem services to address spatial policy[J]. *Environmental Science & Policy*, 2020, 112: 79-90.
- [29] TIAN P, LIU Y C, LI J L, et al. Spatiotemporal patterns of urban expansion and trade-offs and synergies among ecosystem services in urban agglomerations of China[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110057.
- [30] MASCARENHAS A, HAASE D, RAMOS T B, et al. Pathways of demographic and urban development and their effects on land take and ecosystem services: The case of Lisbon Metropolitan Area, Portugal[J]. *Land Use Policy*, 2019, 82: 181-194.
- [31] YIN C Y, SHAO C F, DONG C J, et al. Happiness in urbanizing China: The role of commuting and multi-scale built environment across urban regions[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2019, 74: 306-317.
- [32] HOU X R, WU S H, CHEN D X, et al. Can urban public services and ecosystem services achieve positive synergies?[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 124: 107433.
- [33] KLINE S J. *Conceptual Foundations for Multidisciplinary Thinking*[M]. Stanford, CA: Stanford University Press, 1995.
- [34] 刘耕源, 杨青, 黄潇霄, 等. 2000—2020 年中国“两山”价值测算与动态分析[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 58(2): 241-252.
- [35] 刘世锦, 刘耕源. 基于“生态元”的全国省市生态资本服务价值核算排序评估报告[R]. 深圳腾讯大数据应用科技研究院, 2019.
- [36] YANG Z W, LIU J L, XING Q F. Evaluation of synergy between low-carbon development and socio-economic development based on a composite system: a case study of Anhui Province (China)[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 20294.

(责任编辑: 陶雪)

Multi-dimension synergistic theory and assessment of urban ecological system: Case of synergy among carbon reduction, pollution reduction, greening and economic growth

WU Mingwan¹, LIU Gengyuan^{1,*}, XU Duo¹, YANG Qing²

1. State Key Laboratory of Regional Environment and Sustainability, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Advanced Interdisciplinary Institute of Environment and Ecology, Beijing Normal University, Zhuhai 519087, China

*Corresponding author, E-mail: liugengyuan@bnu.edu.cn

Abstract The future development of cities needed to focus on the interactions and response changes of multiple elements of the urban system, among which, synergistic effect, as a key point of the virtuous cycle of urban metabolism, guarantees the stability and risk-resistance of the urban system. This study aimed to construct a multi-element synergy analysis framework for cities from the perspective of synergy theory, exploring the synergistic relationship and internal law between carbon reduction, pollution reduction, ecological greening and economic growth of Chinese cities in the two major systems of natural environment and economic and social systems. This study established synergy models to evaluate the synergistic relationship in terms of quantity and efficiency. From 2000 to 2020, the quantity synergy between ecological greening and pollution reduction in Chinese cities continued to rise, and the quantity synergy between carbon reduction and pollution reduction, and between carbon reduction and economic growth remained stable. Chinese cities showed complex performance in efficiency synergy, among them, efficiency synergy between carbon reduction and economic growth in some cities have moved toward a weak synergy level since 2016. By the end of the time series, 18.95% of China's cities reached strong level of multi-element quantity synergy, and 26.42% change into multi-element efficiency synergy. There was a non-linear relationship between urban ecological elements and multi-element comprehensive synergy, and the comprehensive synergy threshold increased with the urbanization rate. The level of multi-element synergy in Chinese cities was from weak to strong level in quantity, and from non-synergy to synergy in efficiency in the past 20 years. But most cities still needed to improve the level of multi-element synergy. Finally, this study put forward the development path of urban multi-element synergy to provide theoretical reference for urban synergistic governance.

Keywords synergistic development; coupling coordination; urbanization; ecosystem services