

DOI: 10.20103/j.stxb.202412103041

徐茜, 卢芷欣, 许莹杰, 林子晴, 杨忍. 基于供需关系的广东省生态系统服务空间流动研究. 生态学报, 2025, 45(12): 5753-5768.

Xu Q, Lu Z X, Xu Y J, Lin Z Q, Yang R. Study on spatial flow of ecosystem services in Guangdong Province based on supply-demand relationship. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 5753-5768.

基于供需关系的广东省生态系统服务空间流动研究

徐 茜¹, 卢芷欣¹, 许莹杰¹, 林子晴¹, 杨 忍^{2,*}

¹ 广东财经大学公共管理学院, 广州 510320

² 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275

摘要: 生态系统服务供需在空间上存在不平衡关系, 促成生态系统服务流动过程, 对区域生态安全与社会经济的可持续发展具有重要影响, 厘清其空间流动过程与强度等至关重要。以经济高速发展与生态环境保护权衡博弈突出的广东省为典型案例区, 基于 InVEST、RUSLE、CASA 等模型综合测评生态系统服务供需能力及其空间匹配特征, 进而通过构建断裂点模型和场强模型揭示其生态系统服务的流动过程、范围和流动强度。结果表明: (1) 2000—2020 年, 广东省整体生态系统服务供给和需求能力区域差异特征显著, 同“一核一区一带”的空间发展定位相一致, 北部生态屏障区的生态系统服务供给能力明显较强, 珠三角地区随着经济持续发展和居民消费水平的提升, 形成生态系统服务需求核心高值区域, 并呈现出放射状向外围地区递减的格局特征。 (2) 广东省生态系统服务整体大致处于一个供略大于求的稳定状态, 珠三角地区为明显的强需求区, 尤其人口稠密、经济发达、产业集聚的广州-佛山城市带和深圳-东莞城市带更为突出, 粮食生产及产水服务的主要供给区为粤西、粤北地区, 固碳服务也主要来源于粤北地区, 土壤保持服务为粤东和粤北地区的主要供给。 (3) 全省生态系统服务流在空间上形成了以一个以珠江三角洲入海口两侧的城市群为主要强需求区, 生态系统服务流入为主, 粤东西北地区疏散供给流出为主的空间流动格局。珠三角地区能够被大部分供给区的最大流动范围所覆盖, 其生态系统服务流动密集, 平均流动强度高, 存在明显的虹吸效应; 粤西及粤东城市的中心城区也有流入, 但流动强度和密度明显低于珠三角地区。生态系统服务的空间差异性产生了供需关系的空间联系, 生态系统服务流动的空间差异受到自然、社会经济、土地利用、利益相关者及多因素的远程耦合影响。

关键词: 生态系统服务; 生态系统服务流; 供需关系; 广东省

Study on spatial flow of ecosystem services in Guangdong Province based on supply-demand relationship

XU Qian¹, LU Zhixin¹, XU Yingjie¹, LIN Ziqing¹, YANG Ren^{2,*}

¹ School of Public Administration, Guangdong University of Finance & Economics, Guangzhou 510320, China

² School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: The spatial dynamics of ecosystem services are characterized by an imbalance between supply and demand, which drives the flow of these services and significantly affects regional ecological security and the sustainable development of the social economy. It is critical to clarify the process and intensity of spatial flow. Taking Guangdong Province as a typical case area, where the trade-off game between rapid economic development and ecological environment protection is prominent. This study comprehensively evaluates its main ecosystem service types and supply capacity based on InVEST, RUSLE, CASA and other models. The study evaluates its demand capacity from the dimensions of land use, population and economic development, and analyzes the spatial matching characteristics of its ecosystem services supply and demand. The breaking point model and field strength model are constructed to reveal the flow process, scope and flow intensity of

基金项目: 广东省自然科学基金(2023A1515012373); 广东省哲学社会科学规划项目(GD24CGL28)

收稿日期: 2024-12-10; **网络出版日期:** 2025-04-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangren0514@163.com

ecosystem services. The results showed: (1) From 2000 to 2020, the regional differences in the overall ecosystem services supply and demand capacity of Guangdong Province were significant, which were consistent with the spatial development orientation of 'one core, one area and one belt'. The ecosystem services supply capacity of the northern ecological barrier zone was significantly stronger. With the continuous economic development and the improvement of residents' consumption level, the Pearl River Delta region has formed a core high-value area of ecosystem services demand, and has shown a pattern of decreasing radially to the periphery. (2) The ecosystem services in Guangdong Province are generally in a stable state of slightly oversupply. The Guangzhou-Foshan urban belt and the Shenzhen-Dongguan urban belt are obviously low-value areas of supply and demand ratios. The western and northern Guangdong regions are the main supply areas of grain production services and water yield services, the northern Guangdong region is the main supply area of carbon sequestration services, and the soil conservation services are the main supply in eastern and northern Guangdong. (3) The flow of ecosystem services in the province has formed a demand area dominated by urban agglomerations on both sides of the Pearl River Delta estuary, and the inflow of ecosystem services is the mainstay. The eastern and western Guangdong are mainly evacuated and supplied outflow. The Pearl River Delta region can be covered by the maximum flow range of most supply areas, and its ecosystem services flow intensively, with high average flow intensity and obvious siphon effects; There are also inflows in the central urban areas of western and eastern Guangdong, but the flow intensity and density are lower than those in the Pearl River Delta region. The spatial difference of ecosystem services produces the spatial relationship between supply and demand. The spatial difference of ecosystem services flow is affected by the remote coupling of nature, social economy, land use, stakeholders and multiple factors.

Key Words: ecosystem services; ecosystem services flow; supply-demand relationship; Guangdong Province

健康良性的生态系统是社会经济可持续发展的前提和基础^[1],生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统中获得的各种产品和惠益的总和^[2]。伴随快速城市化和工业化的发展,经济发展的代价是对生态环境的破坏,生态系统服务及其结构受到强烈扰动,生态系统服务供需失衡及其空间不匹配性等问题凸显^[3-4]。在经济高质量发展的关键转型期,经济发达人口密集的大城市常是生态系统服务的高需求区,解析时间和空间上的生态系统服务流动特征,对于如何实现社会经济与生态环境的和谐发展显得至关重要。因而,突破生态系统服务供需关系的静态空间分布特征,识别其空间流动的动态特征,并明晰其影响机制,这对于社会生态系统的可持续发展、生态文明建设及国土空间规划等工作具有重要的现实意义。

自 2001 年的千年生态系统评估项目(MEA)以来,生态系统服务研究就引起了全球学者关注的热点^[5],随着生态系统服务研究的逐渐深入,认为供给和需求是生态系统服务研究的一项重要内容,而供需不平衡的问题又是向我们提出新的挑战^[6]。国内外学者对生态系统服务供给和需求已有丰富的研究成果^[7],由于自然本底与社会经济条件的差异,不同区域的生态系统服务供给和需求的数量具有显著差异^[8-9]。生态系统服务供给是特定地区提供生态系统产品和服务的能力^[10-11],生态系统服务需求是指人类社会消耗或期望获得的生态系统服务数量,供需能力受到自然本底、人口密度、经济水平、教育文化、政策法规、民俗习惯及社会经济的保障体系等的影响^[12-13]。当生态系统服务供需产生空间上的不平衡时就发生了服务的流动,生态系统服务流反映了供给区与需求区之间的时空联系,也是人类向自然界获取各类服务的重要桥梁^[14]。目前生态系统服务流的研究仍处于起步阶段^[14-15],主要研究各类生态系统服务从供给区向需求区流动的时空全过程,在这个过程中可能会遇到流动的阻碍,甚至无法到达特定的需求区^[16]。关于生态系统服务流的类型,一般认为分为 3 类,供给区与需求区基本重叠的称之为原位服务流,例如土壤碳固定、土壤保持服务^[11];供给区向全方位传输到各个需求区的为全向服务流,例如空气质量调节服务^[14];供给区向特定区域传输的为定向服务流,例如水源供给服务^[17]。目前,研究基于生态系统服务供给和需求的数量及供需平衡关系以期反映生态系统服务流的特征,进而对区域生态管控进行具体分区^[18],也可识别生态风险和可持续发展风险^[19]。研究认

为生态系统服务流表现出多样化的特征,这是由于自然、经济、人口、政策等众多因素的影响^[20-22];在绘制生态系统服务流时,需要考虑关键生态系统变量的非线性效应^[23];使用“供给-流量-需求”的生态系统服务流框架可以更准确地识别传统方法无法识别的生态来源^[24]。也有学者将生态系统服务流重新分类,引入熵理论,对生态系统服务流进行了定量评价,揭示生态系统服务流方向及其健康程度等^[25];利用空间分布式模型来模拟生态系统服务流动的空间过程,例如利用水文模型、生态系统服务人工智能模型构建服务路径属性网络、混合单粒子拉格朗日积分轨迹模型等方法来模拟生态系统服务的空间流动路径^[26-28],但由于模型模拟需要大量参数,其精确性难以保证。

广东省作为全国经济的桥头堡,社会经济的高速发展以及人口的聚集,使其社会经济与生态环境之间的矛盾突出,而珠三角地区和粤东西北地区的经济与自然资源条件等均在较大差异,加剧了全省供需的差异性,根据供需错配的范围和程度识别赤字区域,可以探索更合理的生态补偿标准^[29-30];也有学者基于珠三角地区生态系统服务流的空间格局和驱动因素,进而选择最优状态因子配置来优化其空间格局^[31]。关于生态系统服务供需及其流动的研究内容日益丰富,为解决社会经济和生态环境矛盾等问题提供了全新的视角,但仍存在不足:一是对生态系统服务的产生、流动到使用的全过程分析框架仍需进一步完善;二是较少从生态系统服务供需空间匹配的角度出发,进而揭示服务流动的空间特征;三是生态系统服务流的流动特性决定了其复杂性,很难准确定量评估,研究中多选用区域某一种或几种服务分别判定其空间流动特征,而较少将区域生态系统的不同服务作为一个整体进行供需关系的空间流动方向、范围及程度的分析。因而,研究以经济发达、人地关系矛盾突出的广东省为研究区,厘清 2000—2020 年广东省生态系统服务供给和需求的时空演化特征,将不同供给和需求类型统一为一个整体,揭示生态系统服务供需的空间错配问题,解析生态系统服务供给区和需求区间的流动过程、流动范围及流动强度,进而探索生态系统服务流的影响机制,这对于实现经济发达地区经济与生态的和谐共生与可持续发展、提升人类福祉等具有重要意义。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

广东省位于中国南部,陆地范围为北纬 20°09′—25°31′,东经 109°45′—117°20′之间,占地面积约 179725km²,全省可划分为粤东、粤西、粤北以及珠三角四个片区,辖有广州、深圳等 21 个地级市(图 1)。广东省地处热带与亚热带地区,北回归线横穿中部,热量丰富,雨热同期,全省平均日照时数为 1745.8h,年平均气温 22.3℃,降水充沛,年平均降水量在 1300—2500mm 之间,全省平均为 1777mm。由于良好的水热条件和南岭的生态屏障作用,形成了广东省多样的植被类型,其中广泛分布的植被类型以常绿阔叶林为主。广东省地貌类型复杂多样,境内山川纵横交错,山地之间丘陵、台地和盆地发育,总体上地势北高南低,从粤北山地向南部沿海逐级递降,形成北部中山山地、中部低山丘陵、南部平原台地为主的地貌格局,山地、丘陵、台地与平原面积分别占全省土地总面积的 33.7%、24.9%、14.2%和 21.7%。作为改革开放的前沿,广东凭借着庞大的外来人口优势和改革开放前沿的政策优势迅速发展,城镇化水平、社会经济、教育文化和科技水平等均领跑全国大部分省市,根据广东省 2020 年的统计数据,全省地区生产总值为 11.076 万亿元,其中第二产业和第三产业分别占地区生产总值的 39.2%和 56.50%。广东省凭借全国 1.87%的陆地面积带来 10.93%的 GDP,经济实力相当雄厚。但各区域经济与城镇化发展不平衡问题愈发凸显,2020 年珠三角地区的地区生产总值占广东省地区生产总值高达 80.83%,粤东西北的地区生产总值仅占不到 20%,区域差异明显,这也是广东省急需破解的难题。

1.2 研究方法

1.2.1 生态系统服务供需

研究综合考虑广东省自然本底特征、土地利用程度等因素,选取粮食生产、产水服务、固碳服务、土壤保持这四种主要生态系统服务类型来表征其供给能力。其中,①根据已有研究,NDVI 与粮食产量之间存在显著

表 1 生态系统服务需求指标测评

Table 1 Assessment of ecosystem service demand indicators

需求类型 Requirement type	公式 Formula	说明 Explain
粮食需求 Grain demand	$GS = Dc \times Pc + Dr \times Pr$	GS 为粮食消费量, Dc 为城镇居民人均粮食消费量, Pc 为城市人口数量, Dr 为农村居民人均粮食消费量, Pr 为农村人口数量
用水需求 Water demand	$W = A \times Agr + G \times Ind + P \times Dom$	W 为用水需求, A 为耕地面积, Agr 为单位耕地灌溉用水量, G 为工业生产总 值, Ind 万元工业增加值用水量(含火电), P 为总人口数, Dom 人均生活用 水量
土壤侵蚀 Soil erosion	$Ar = R \times K \times LS \times C \times P$	Ar 为实际土壤侵蚀量, R 为降雨侵蚀因子, K 为土壤侵蚀因子, LS 为地形因 子, C 为植被因子, P 为土壤保持措施因子

$$CESDR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ESDR_i$$

式中, S 、 D 分别为研究区各县区单项生态系统服务供给值和需求值, $S_{\max}$ 、 $D_{\max}$ 分别是供给量和需求量的最大值。CESDR 是区县的综合生态系统服务供需比, n 为所选取的生态系统服务项数, $n=4$ 。

1.2.3 生态系统服务供需空间匹配

研究以区县为单元进行生态系统服务供需匹配关系的分析,对生态系统服务供给量和需求量分别进行 z -score 标准化处理,以标准化后的供给量为 x 轴,需求量为 y 轴构建二维坐标系,各县区单元的标准化需求、供给值构成 (x, y) 坐标点,得到 4 类供需匹配类型:高供给-高需求、高供给-低需求、低供给-低需求以及低供给-高需求依次对应第一至第四象限^[39]。

$$x = (x_i - \bar{x}) / s$$

式中, x 为 z -score 标准化后的供给量或需求量, x_i 为区县单元的综合供给量或需求量, $\bar{x}$ 为研究区平均值, s 为研究区标准差。

1.2.4 生态系统服务流

生态系统服务在供给区和需求区之间的流动基本遵循距离衰减规律^[21],因此研究中引入断裂点模型和场强模型模拟生态系统服务流动的辐射范围以及流动强度^[38,40]。

$$D_p = D_{dp} / \left[1 + \sqrt{\left(\frac{N_d}{N_p} \right)} \right] \quad I_{dp} = N_p / D_{dp}^2$$

式中, D_p 为生态系统服务流动范围半径, I_{dp} 为生态系统服务的流动强度, D_{dp} 为生态系统服务供给区到需求区的最短距离, N_d 和 N_p 分别为需求区和供给区的综合生态系统服务供给值。

1.3 数据来源

研究中使用的土地利用数据和归一化植被指数来源于中国科学院资源与环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), DEM 数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>), 土壤含水量数据来源于国际土壤参考信息中心 (<https://www.isric.org/>), 土壤深度数据来源于中国基岩深度数据中心 (<http://globalchange.bnu.edu.cn/research/>), 降水量及潜在蒸散量等数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>), 碳排放数据来源于清华大学多尺度排放清单模型 (<http://meicmodel.org.cn>), 社会经济数据主要来源于广东省和各地市的统计年鉴、各地市国民经济和社会发展统计公报, 单位耕地灌溉用水量、万元工业增加值用水量(含火电)、人均生活用水量来源于《广东省水资源公报》。需要说明的是,由于数据获取的局限,研究中不涉及汕头市的南澳县和深圳市的光明区、龙华区、坪山区以及大鹏新区。

2 生态系统服务供需及其空间流动的演化特征

2.1 生态系统服务供给的时空演化特征

2000—2020 年,广东省粮食生产能力整体呈下降趋势,粮食总产量由 1822.33 万 t 下降到 1267.56 万 t,单

位面积的粮食生产能力由 $3.80\text{t}/\text{hm}^2$ 下降至 $3.39\text{t}/\text{hm}^2$ (图 2), 其中 2010 年为最低 ($2.7\text{t}/\text{hm}^2$), 这是由于该年份 5 月北江流域、韩江流域、东江流域、珠三角地区普降暴雨到大暴雨, 局部特大暴雨, 造成了 $58.02\text{千}\text{hm}^2$ 农作物受灾, 6 月又遇超百年一遇的暴雨, 由于自然灾害的频发使全省粮食生产能力整体受到极大影响。从空间分布上来看, 全省粮食生产能力整体呈现出北高南低的格局, 粤北地区最高, 而珠三角地区最低, 2020 年的粮食生产量分别为 $4.11\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $2.75\text{t}/\text{hm}^2$, 这和区位优势定位相关, 粤北地区主要农作物种植面积约为全省 $1/3$, 且其生态环境优良, 粮食单产较高, 韶关市、清远市和云浮市的单位面积粮食生产能力为全省最高; 而珠三角地区以经济发展为主, 城市密集, 尤其珠江口两岸为粮食生产明显的低值区。城市主城区为二三产业发展, 没有粮食生产功能, 例如广州的越秀区、荔湾区、深圳福田区、罗湖区等, 深圳和广州粮食生产能力为全省最低, 2020 年其值仅为 $1.05\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $2.06\text{t}/\text{hm}^2$, 明显低于全省平均水平。

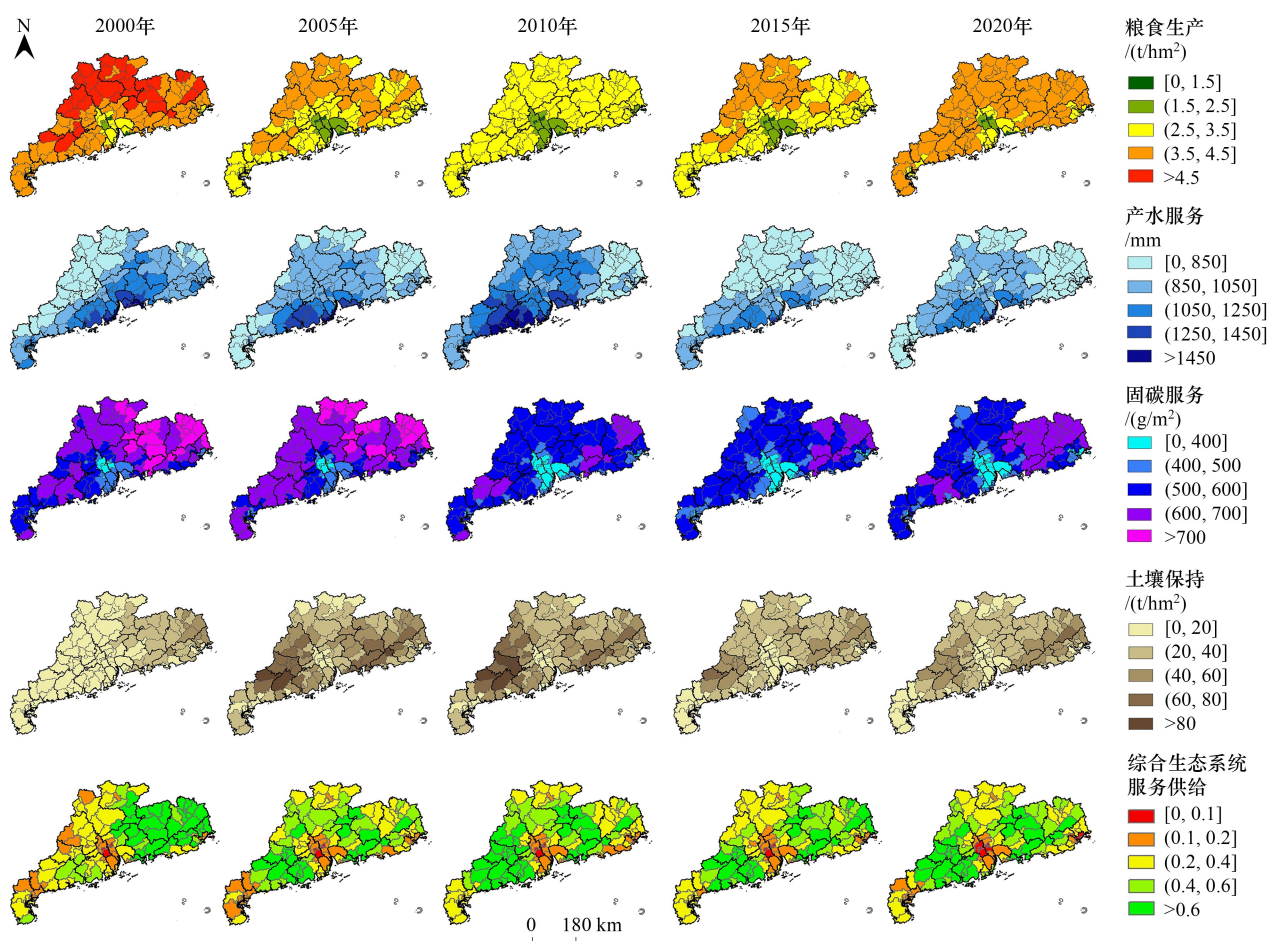


图 2 广东省生态系统服务供给空间格局

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem services supply in Guangdong Province

2000—2020 年, 广东省产水服务波动变化, 2010 年为产水量最高值 (1081.74mm), 其原因是极端暴雨天气频繁, 遭受多个热带气旋登陆的严重影响, 降水强度高且频率也高, 而 2015 年产水量较低, 全省平均值为 879.04mm 。在空间分布上, 产水能力高值区主要集中在珠江入海口两岸以及粤西的沿海地区, 如珠海、深圳、阳江和江门等地, 整体呈现从西南向东北逐级递减的格局。全省固碳量呈波动下降的趋势, 从 2000 年的 $579.94\text{g}/\text{m}^2$ 增加至 2005 年的 $590.42\text{g}/\text{m}^2$, 又下降到 2015 年的 $481.63\text{g}/\text{m}^2$, 2020 年又回升至 $503.66\text{g}/\text{m}^2$ 。2005—2015 年为快速城市化时期, 建设用地快速扩张带来的是对各类生态用地的挤压, 因而造成固碳能力的下降; 党的十八大以来, 广东将生态文明建设融入全省改革发展全过程各领域, 深入推进生态保护和修复及绿美广东的生态建设, 对重要生态区域的低效林进行林分优化和林相改善, 因地制宜调整优化树种、林种结构

等,有效提升了全省植被的固碳能力,因而 2020 年的固碳量回升至与 2010 年的水平相当。从空间分布特征来看,全省固碳能力呈中心低、四周高的格局,南岭为国家级自然保护区,是广东省重要的生态屏障,故粤北呈明显的固碳高值区,而经济发达的珠三角地区城镇密集,为固碳能力的低值区。从土壤保持服务来看,2000—2020 年呈先增加再减少趋势,整体由 $15.24\text{t}/\text{hm}^2$ 增长到 $27.53\text{t}/\text{hm}^2$,2005 年和 2010 年的土壤保持量较高,分别为 $38.46\text{t}/\text{hm}^2$ 和 $37.78\text{t}/\text{hm}^2$ 。全省土壤保持量的空间分布格局差异性较小,高值区主要分布在粤东、粤北一带,生态用地面积较大,非沿海区域普遍受降水等影响较小;而其低值区集中在粤西的雷州半岛、珠三角以及粤西的潮汕平原地区,这些区域地形平缓,且受人类活动干扰程度高,截留土壤的条件相对较差。对广东省产粮能力、年产水量、固碳量及土壤供给量进行归一化处理后再等权叠加,得到广东省生态系统服务综合供给量。整体来看,2000—2020 年全省生态系统服务供给能力变化不大,由 0.519 略降低至 0.509;从四大区来看,粤北地区为主要的生态系统服务供给区,但这二十年间供给能力有所下降,由 0.605 下降至 0.558;珠三角地区经济发达、人口密集,但供给能力为最低。

2.2 生态系统服务需求的时空演化特征

2000—2020 年,广东省生态系统服务需求表现出明显的时空分异性特征,粮食需求、用水需求、碳排放和土壤侵蚀的高值区主要集中在珠三角地区以及粤东、粤西的核心城市群中心,形成以珠三角地区为高值中心,以及粤东、粤西地区的高值次中心,呈放射状向外层地区递减过渡的格局特征(图 3)。具体来看:广东省粮食

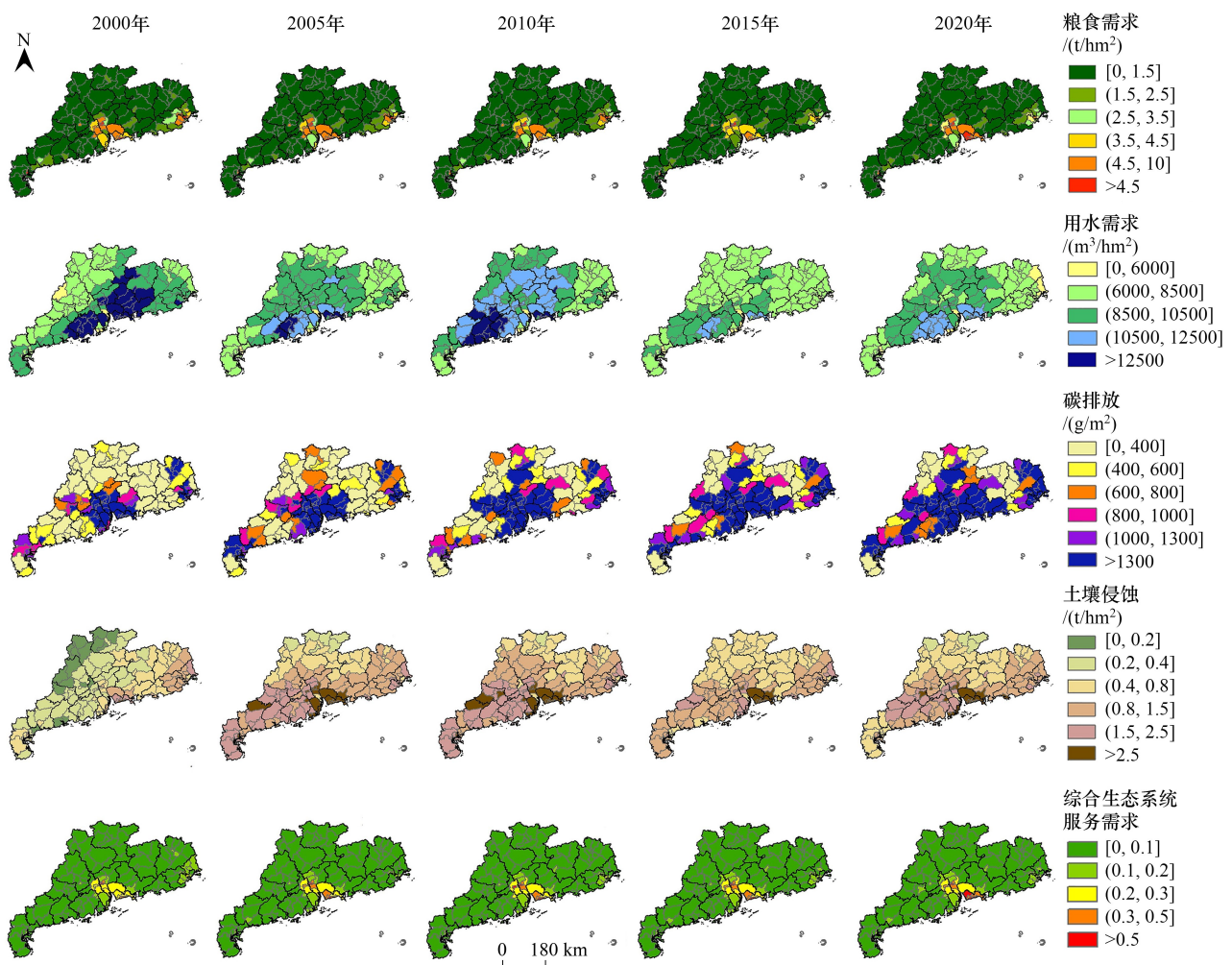


图 3 广东省生态系统服务需求空间格局

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem services demand in Guangdong Province

需求量有所下降,由 $3.08\text{t}/\text{hm}^2$ 下降至 $3.02\text{t}/\text{hm}^2$,但珠三角地区粮食需求量有所增加,由 $5.36\text{t}/\text{hm}^2$ 增加至 $5.76\text{t}/\text{hm}^2$,且显著高于其他地区,粤北地区仅为 $0.44\text{t}/\text{hm}^2$ (2020 年)。粮食需求水平主要由人均粮食消费量和人口数量所决定,广东省人口数量呈上升趋势,但人均粮食消费量明显下降,尤其农村居民粮食消费量下降更明显。随着人民生活水平的提高,肉、蛋、奶等蛋白质摄入量明显提高,故谷类、薯类和豆类等粮食作物的消费量随即大幅减少,而珠三角地区由于人口数量增加较多,故粮食需求量有所增加,粮食需求量超过 $10\text{t}/\text{hm}^2$ 的区县全部集中于广州和深圳市,也是因为两个一线城市的人口密度大。从用水需求来看,全省单位面积用水量没有显著差异,珠三角地区略高,为 $9551.85\text{m}^3/\text{hm}^2$ (2020 年),粤东相对较少,2020 年为 $6370.06\text{m}^3/\text{hm}^2$ 。2000—2010 年,全省用水量呈缓慢上升趋势,由 $9304.78\text{m}^3/\text{hm}^2$ 增加至 $9978.69\text{m}^3/\text{hm}^2$;2010—2020 年,用水量稳中有降,减少至 $8456.13\text{m}^3/\text{hm}^2$,这十年间全省用水结构有明显调整,随人民生活水平的提高,生活用水量有明显增长,而农业用水和工业用水量均呈减少态势。全省碳排放呈显著增加趋势,由 $1520.37\text{g}/\text{m}^2$ 增加至 $3341.58\text{g}/\text{m}^2$,珠三角地区经济活动集中,也是碳排放的绝对高值区,2020 年单位面积碳排放均值 ($6110.64\text{g}/\text{m}^2$) 是粤北地区 ($912.92\text{g}/\text{m}^2$) 的六倍之多,但 2010 年—2020 年珠三角地区单位碳排放已出现逐渐下降的趋势,由 $6369.55\text{g}/\text{m}^2$ 下降至 $6110.64\text{g}/\text{m}^2$,其中广州市的南沙区、海珠区、番禺区、荔湾区及越秀区单位碳排放量均下降了 $2000\text{g}/\text{m}^2$ 以上。广州在经济社会高质量发展趋势下,积极推进数字化、绿色化及国际化转型,调整产业类型、重塑产业结构,在践行低碳、高效及可持续发展的经济发展方式中,作出了省会城市的表率作用;但同时,珠三角地区的第二产业外迁使粤东西北地区仍在持续增加,尤其粤西地区年均单位碳排放量增加了 $53.24\text{g}/\text{m}^2$,粤东和粤北地区分别增加了 $21.39\text{g}/\text{m}^2$ 、 $4.85\text{g}/\text{m}^2$ 。全省实际土壤侵蚀呈明显增加趋势,由 $0.62\text{t}/\text{hm}^2$ 增加至 $1.70\text{t}/\text{hm}^2$,其中珠三角地区侵蚀相对明显,增加了 2.67 倍;其次为粤西地区,实际土壤侵蚀量由 $0.39\text{t}/\text{hm}^2$ 增加至 $1.37\text{t}/\text{hm}^2$,增加了 2.53 倍;粤北地区土壤侵蚀水平最低,但也从 $0.30\text{t}/\text{hm}^2$ 增加至 $0.66\text{t}/\text{hm}^2$ 。土壤侵蚀受到地形地貌、植被覆盖和降水的共同影响,呈现出明显空间差异性,但受到降水量的影响,2010—2015 年各地区的土壤侵蚀量均有所下降。

将粮食需求、用水需求、碳排放和土壤侵蚀四种需求进行归一化处理后再等权叠加,得到综合生态系统服务需求。2000—2020 年,全省综合生态系统服务需求呈增加趋势,需求值大于 0.5 的区县全部集中于广州和深圳市的中心城区,需求值大于 0.2 的区县全部集中于珠三角地区各市。珠三角地区是全省人口、经济及贸易活动集聚区,各类需求值也相应较高;而粤东西北地区虽近年受到珠三角地区的经济辐射带动作用,但受到空间距离的限制,这些地区的经济发展和人口聚集程度仍与珠三角地区存在一定的差距,故生态系统服务需求相对较低。

2.3 生态系统服务供需的空间匹配特征

2000—2020 年,全省粮食生产服务供需比均值呈先下降再波动上升趋势,其中 2005 年和 2010 年为供不应求,其他年份均可自给自足 (图 4)。空间分布上,珠三角地区始终保持明显的粮食生产供不应求状态,ESDR 为 -0.09 — -0.13 ;其次为粤东地区,2005 年、2010 年 ESDR 均为负值;粤西及粤北地区为粮食供大于求,尤其粤北地区 ESDR 始终大于 0.12,其原因一是人口密度低,另外例如梅州市也是主要产量区。全省产水服务供需状况良好,一直保持供大于求的状态,ESDR 为 0.08 — 0.31 ;粤北和粤西地区 ESDR 值较高,珠三角地区仍为相对低值区。固碳服务的供不应求情况比较严重,2000—2020 年全省始终保持为供不应求,且这种趋势仍在加剧,ESDR 值由 -0.16 下降至 -0.31 ,珠三角地区严重供不应求,2015 年之后 ESDR 均值低于 0.62,ESDR 均值低于 -1 的区县全部集中于广州、深圳、佛山、东莞市的中心城区,空间集聚性明显。

土壤保持服务供需状态优良,全省 ESDR 均值始终保持在 0.40 以上,供大于求,粤东地区和粤北地区较高,2020 年 ESDR 均值分别为 0.45 和 0.41;2000 年珠三角地区土壤保持 ESDR 均值高于粤西,但粤西有明显增加,2020 年二者水平相当。从综合生态系统服务供需比来看,2000—2020 年广东省整体的生态系统服务供需比略有波动,整体上 ESDR 的均值基本维持在 0.07 — 0.12 ,处于一个供略大于求的基本稳定状态。广东省处于华南地区,热量充足、降水充沛、土壤较肥沃,自然本底条件较为优越,故生态系统服务供给能力相对较

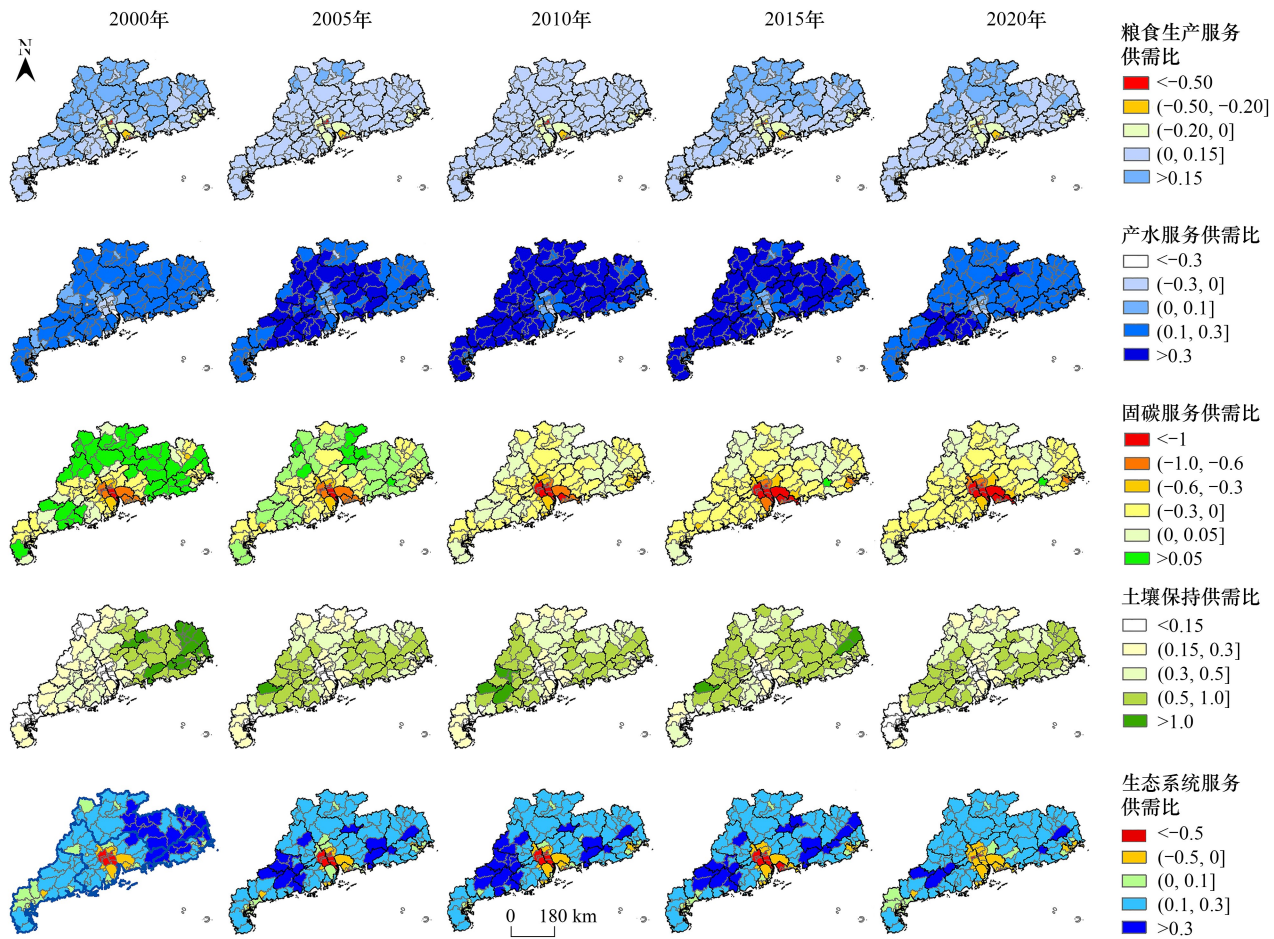


图4 广东省生态系统服务供需比特征

Fig.4 Characteristics of supply and demand ratio of ecosystem services in Guangdong Province

高,整体来看本省能够满足本区域人民生活的需求,但广东省内部四大区的自然、经济及人口特征差异较大,珠三角地区承担着全省的经济主导,土地资源开发程度高,城市化水平高,人口集聚度高;而粤北山区为生态屏障区,导致全省生态系统服务供需比具有明显的空间差异性。珠三角地区为四大区中ESDR唯一出现负值的区域,2000年、2005年、2020年ESDR分别为-0.04、-0.04和-0.06,且空间上广州-佛山城市带和深圳-东莞城市带为明显的ESDR低值区,尤其广州、深圳、佛山的中心城区表现出严重供不应求;粤西及粤东地区的城市中心城区为ESDR低值次中心,例如湛江市的霞山和赤坎区、揭阳市的榕城区、汕头市的龙湖区、金平区、潮阳区等。可以看出,综合生态系统服务供需比主要由人口密度和经济水平所决定。

从生态系统服务的匹配类型来看,高供给-低需求、低供给-低需求和高供给-高需求都认为是本区域可以满足自身的需求,全省大部分区县可以实现自给自足的状态(图5);而低供给高需求区县主要分布在珠江口左岸的广州、佛山、中山、珠海的主要城区以及珠江口右岸的深圳及东莞市,粤西地区茂名和湛江、粤东地区潮州和揭阳的部分中心城区也表现为低供给高需求区。2000—2020年,高供给-低需求类型是广东省主要的生态系统服务匹配类型,主要分布在粤北和粤东地区的大部分区县,且区县数量由47个增加至65个;而随着社会经济的发展和居民生活水平的提高,全省低供给-高需求的区县也略有增加,由26个增加至30个,占比约为1/4,空间分布上主要集中在珠三角地区。虽然低供给-高需求的区县在数量上以及空间分布格局的变化不大,但需求水平上升迅速,其增加率远远大于供给水平的变化速率,相应导致了匹配为高需求区域的数量上升,扩大了广东省整体的供给水平与需求水平的差距,加剧了由于全省经济发展不平衡所导致的生态系统服

务供需不匹配的情况。低供给-低需求和高供给-高需求被认为是供需平衡的匹配类型,其中低供给-低需求在这 20 年间大量减少,由 37 个区县减少为 20 个区县,减少的 17 个区县中有 14 个转为了高供给-低需求类型,主要分布在粤北地区和珠三角外围地区的肇庆和江门市,根据图 2 可以看出这些区县的生态系统服务供给能力有所提升。高供给-高需求类型的区县数量为最少,且呈现继续减少的趋势。

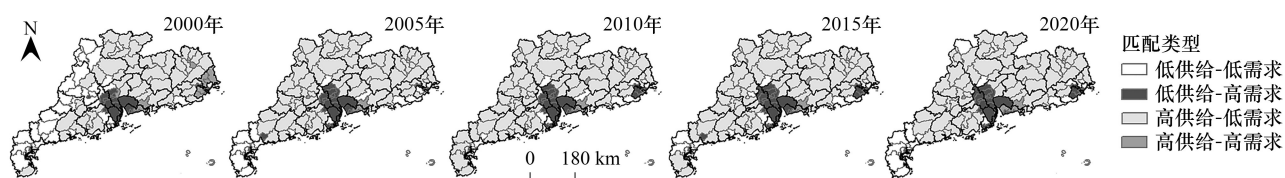


图 5 广东省生态系统服务供需匹配类型

Fig.5 The matching types of ecosystem services supply and demand in Guangdong Province

2.4 生态系统服务流的空间流动

对于经济发达、人口密集的城市群,生态系统服务的供给能力弱,但需求水平较高,呈供不应求的状态,需要其它生态系统服务高值区为其提供服务,即产生了空间上的生态系统服务流动。研究中认为生态系统服务供需匹配类型中的高供给-高需求和低供给-低需求类型属于供需平衡状态,暂且认为不参与生态系统服务流动过程。以综合生态系统服务供需比为正值,且匹配类型为高供给-低需求的区域视为生态系统服务流动中的供给区;以生态系统服务供需比为负值,且匹配类型为低供给-高需求的区域视为需求区,进行研究区生态系统服务流动的分析。

由于生态系统服务供给区和需求区之间的距离差异以及供给区自身供给潜力等因素的影响,存在供给区与相应需求区的流动半径无法完整覆盖该需求区的情况,故需要根据供给区所能辐射到的最大面积,综合分析生态系统服务流动的空间特征。从整体上看,广东省生态系统服务流形成了以一个中心需求集中供给流入为主、两翼需求疏散供给流出为主的流动格局(图 6)。2000—2020 年,全省生态系统服务需求区明显集中于珠江三角洲入海口两侧的城市,且需求区的数量有所增加,由 22 个区县增加至 28 个;生态系统服务供给区主要分布在两翼区域,包裹着珠三角强需求区,且供给区的数量明显增加,由 47 个区县增加至 65 个。从各供给区最大流动范围来看,总的流动辐射圈覆盖了广东省全域,即所有需求区都能够得到有效的生态系统服务供给,空间上呈现出多中心辐射的形态,粤西、粤北以及粤东为中心的辐射圈在珠三角地区交汇,使得珠三角地区的需求区在依赖内部供给流动以外,还能够获得其他供给区的有效补给,以广州越秀区、天河区为例,在获得广州市增城区、从化区等区域内部供给区的供给以外,也处于新丰县、阳春市以及普宁市等粤北、粤西、粤东供给区可辐射到的最大供给流动半径内。

随着经济的发展和人民生活水平的提高,珠三角地区的生态需求愈加强烈,粤东西北地区向珠三角地区的生态系统服务流动特征也愈加明显,供给区和需求区之间的生态系统服务的流动关系数量明显增加,由 1034 个增加至 1820 个,即广东省各区县之间的供需流动更加活跃。这是由于区域生产结构的调整和优化,生态资源丰富的地区发展重心将偏向于农业生产、资源型旅游业等,最大化利用自身的优势获取更多的经济提升空间,因此这些地区具备较优的生态系统服务供给能力,产生较高水平的生态系统服务盈余,以粤北地区的供给区为例,整体的供给辐射范围最大,基本覆盖全省,其 2020 年的供给辐射总面积相较于 2000 年,增长了 7.39%;发展重心偏向于工业发展、新兴科技产业等的地区,自身的生态本底较薄弱,高速的社会经济发展需要消耗大量资源,对于生态系统服务供不应求,需要更多的供给。广州、深圳两个一线城市经济双引擎也带来自身生态系统服务供给显著不足的忧患,需长期依赖于周围区域的生态补给,珠三角经济发达区域的生态系统服务“虹吸作用”导致对粤东西北地区生态资源的挤压和占用,导致区域间的生态及经济利益的失衡,故广东省也积极通过生态补偿等政策进行调控,依据珠三角地区所占用其他区域生态资源的数量来进行经济补偿。

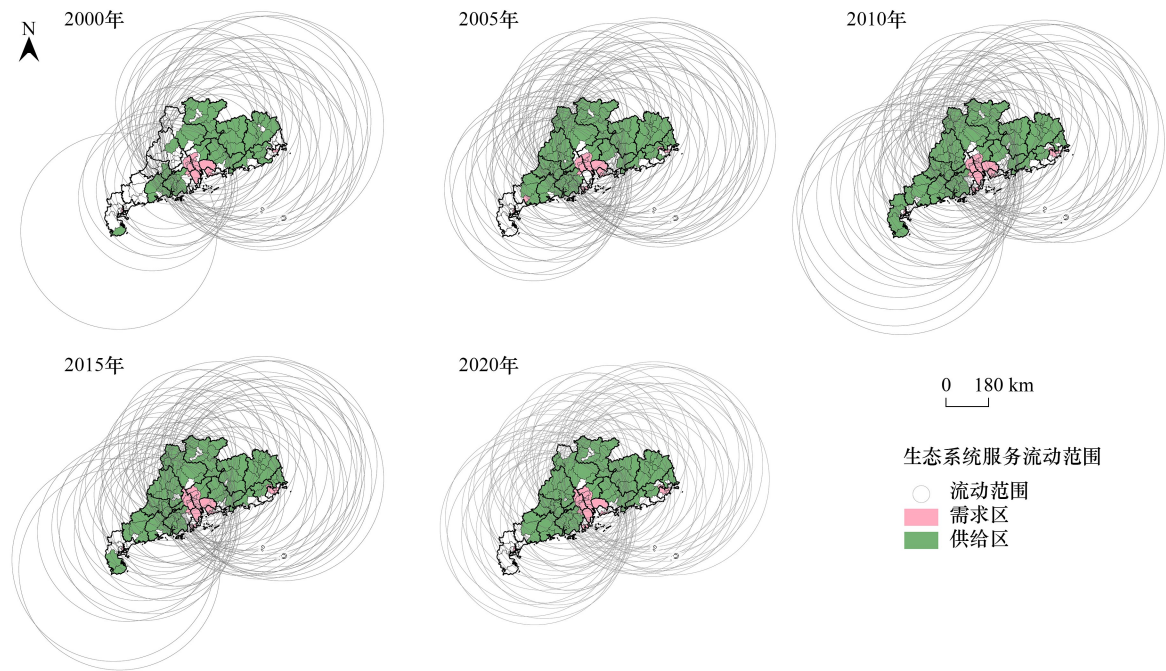


图6 广东省生态系统服务流动范围

Fig.6 The range of ecosystem services flow in Guangdong Province

从生态系统服务流动的强度上看,珠三角地区的流动密集,生态系统服务流入强度为最高,研究区域的流动强度整体遵循随距离增加流动削弱的空间梯度递减规律(图7)。中等到高强度的流动主要出现在珠三角地区以及粤东、粤西的城市群中心。珠三角地区内部的供需流动由于受到距离衰减的影响较小,能够保持较高水平的强度;其他区域(如韶关市新丰县和清远市佛冈县等)能够向珠三角地区输入相对较高强度的生态系统服务供给,主要得益于供给区自身的生态本底优越,生态系统服务盈余较高;同时这些供给区围绕在珠三

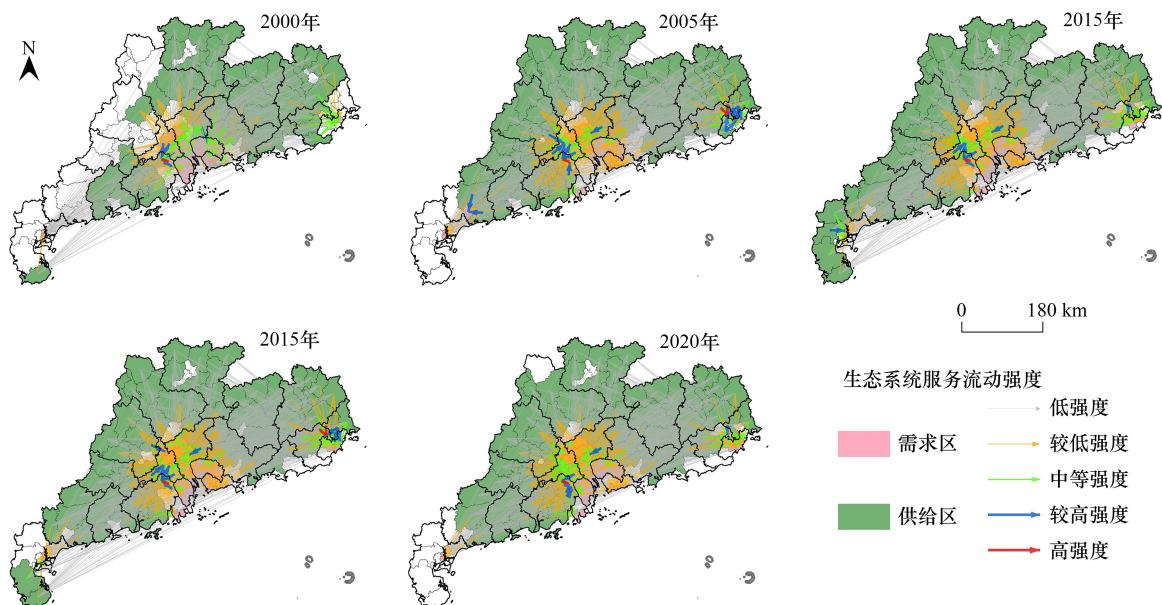


图7 广东省生态系统服务流动强度

Fig.7 The intensity of ecosystem services flow in Guangdong Province

角地区外围,与珠三角城市群的联系也比较密切,因此能够与珠三角内部需求区提供中高强度的服务供给。从年累积流动强度来看,各区域生态系统服务流动强度最高的供给区分别为江门的鹤山市(珠三角)、汕尾市陆河县(粤东)、茂名市电白区(粤西)以及梅州市丰顺县(粤北)。值得注意的是,生态系统服务流出的年累积强度最高的区县并非生态系统服务盈余显著的区县,其较大程度取决于该供给区的质心位置与所模拟的流动辐射圈交汇中心的距离,需求区同理。对于需求区而言,接受生态系统服务的累积流动强度较高的区县主要位于珠三角地区,因此,以广州越秀区、天河区等为代表的生态系统服务亏损较显著的需求区在流动过程中累积的强度为中下水平,但珠三角地区整体生态系统服务流入的年累积流动强度呈现略有波动的上升趋势。

综合来看,集中了大量需求的珠三角地区能够被大部分供给区的最大流动范围所覆盖,可以认为该区域生态系统服务流动密集,平均流动强度高,存在明显的虹吸效应;其他区域虽有需求区零星分布,例如粤东地区的汕头市龙湖区和澄海区,其供给流动范围可到达该区域的供给区数量较少,流动较不活跃,区域的平均流动强度也低于珠三角地区,生态系统服务流动较为稀疏。

3 讨论

3.1 生态系统服务供需关系的影响因素分析

生态系统服务的空间差异性造成了供给和需求的不匹配性,由此产生了供给区和需求区的空间联系。广东省的主要产粮区包括湛江市、茂名市、惠州市、梅州市、肇庆市等地,主要需求区集中于各个地市尤其大城市人口稠密的中心城区,粮食供应充足的粤西、粤北地区多余的粮食流向广州、深圳等粮食严重短缺的城市。Liu 等人也有相同的研究结果,通过对珠三角地区粮食供需的研究,发现粮食生产服务主要在供应能力较强的珠三角城市群周边的低山丘陵地区,肇庆、惠州、江门等地通过土地质量改良和农业基础服务设施的改善,粮食供应能力有所提升,粮食流向人口密集的广州、深圳、东莞等城市的中心城区^[35]。广东省整体水资源相对充沛,依据《广东省水资源公报》,2020 年全省水资源总量为 1626.0 亿 m^3 。粤东沿海莲花山脉以南迎风坡,粤西沿海云雾山脉东南迎风坡,北江流域阳山、连山、连州一带均为产水服务供给区,社会经济水平发达的珠三角地区为需求区,2020 年 9 市的用水总量为 213.7 亿 m^3 ,占全省用水总量的一半以上。2000—2020 年全省用水效率显著提高,万元 GDP 用水量及万元工业增加值用水量显著下降,耕地实际灌溉亩均用水量也有所下降。按 2000 年可比价计算,万元 GDP 用水量由 555 m^3 下降到 56 m^3 ,下降了 90.0%;万元工业增加值用水量由 391 m^3 下降到 23 m^3 ,下降了 94.2%。全省水资源供给相对充足,且随着产业结构的调整和技术水平的提升,用水效率明显提升,全省的产水服务可以实现供需平衡状态,但区域内部由粤东、粤西沿海区、北江流域流向需求强盛的珠三角经济发达区。固碳服务中,森林覆盖率高的粤北自然保护区为主要供给区。这和 Wu 等人的研究结果相一致,研究发现生态系统服务需求区集中于珠三角核心区,人口密集、产业发达、自然资源需求高、碳排放水平也高,但生态用地面积有限,生态系统服务严重赤字,固碳服务需要粤北四市以及肇庆、云浮等地区的供给补充,产水服务是由江门、阳江等沿海地区供给^[30]。

3.2 生态系统服务流的影响机制分析

生态系统服务具有明显的尺度效应,例如粤北林区的森林固碳服务虽产生于粤北地区,但其效益却扩展到珠三角及粤东、粤西地区,起到整个华南地区生态屏障的重要作用;但在城市区域,随着城市化的发展,硬化地表几乎不具有生态系统服务能力,但人口密集区对生态系统服务的需求很高,随着经济的发展这种需求会愈加强烈,而生态系统服务的空间差异性和不匹配性也更加严重。那么,为了满足远距离的生态系统服务需求,就需要空间上的转移过程。理想状态下生态系统服务供给区将不同服务类型传递至需求区,这是一个流畅的线性传递过程(图 8);但现实具有一定的复杂性,生态系统服务的流动受到流动载体的驱动影响,这种影响既可能是对流动过程的促进作用,也可能是不同程度的抑制影响;既可能是单因素的影响,也可能是多种因素的叠加影响,还有可能是周围区域影响因素的空间溢出效应等;相同的影响因素在不同时间及空间尺度下的影响程度也会具有差异,最终不同类型的流动载体在复杂影响因素的作用下对生态系统服务流动过程产生复合作用。

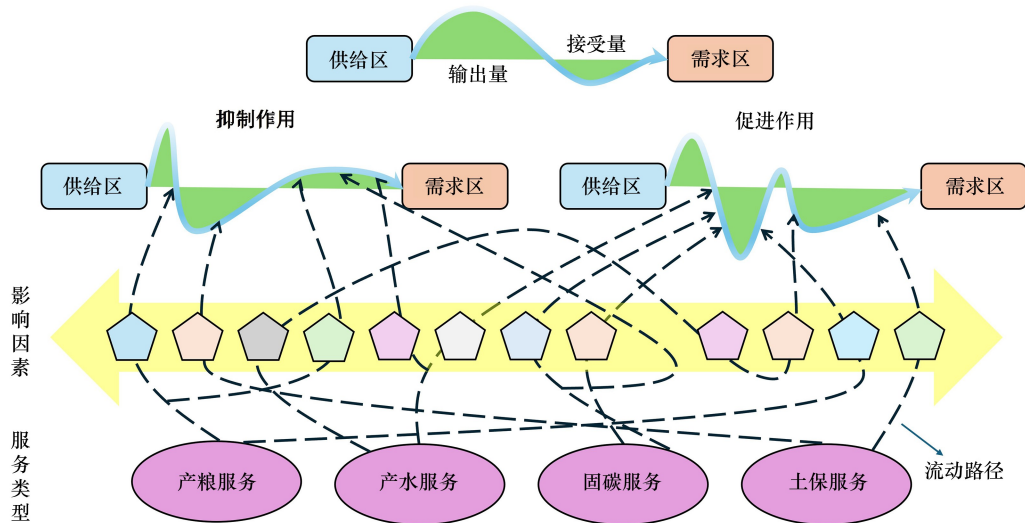


图8 生态系统服务流动的影响机制逻辑图

Fig.8 Logical diagram of the influence mechanism of ecosystem services flow

自然因素的影响。研究发现,粤北地区为主要的生态系统服务供给区,作为国家级自然保护区,林地覆盖率高,而天然林的碳汇能力明显高于人工林及其他土地利用类型的碳汇能力,故粤北生态林区对保障珠三角城市群的生态安全作用也极为重要。粤北地区定位为重要的生态屏障保护区是由其自然本底条件所决定的,粤北是广东省地势最高的区域,地貌以中山、低山、丘陵为主,山地面积最大,气候属亚热带季风气候,热量和水资源都很丰富,适合发展林业资源,故成为全省生态系统服务流的主要起源地,流向不同方向的需求区,尤其是珠三角地区。

社会经济因素的影响。生态系统服务流将大自然的供给和人类的需求联系在一起,反映了自然-社会-经济复合系统的特征,供给和需求都会受到社会经济因素的影响,例如社会经济因素中的城镇化水平、人口数量、人口集聚程度、居民消费水平、基础设施建设水平、政策制度以及城镇发展规划定位的影响等。有研究发现,植被固碳能力与人类活动密切相关,珠三角地区土地利用变化过程中耕地转移为建设用地的碳汇损失总量为最大,林地转移为建设用地次之^[41],说明珠三角地区建设用地扩张过程中耕地转移为建设用地是地类转移的最大碳汇损失源,城市化水平较高、经济发展水平较强的珠三角地区在社会经济稳步发展的同时,生态系统服务需求愈加强烈,供需不平衡愈加突出,其资源环境问题应引起政府的足够重视。此外,土地非农化致使耕地资源的数量和质量都会受到影响,粮食安全保障度也会降低。

社会经济和自然环境相互作用及远程耦合的影响。远程耦合是指发生在多个独立地点之间的社会经济和自然环境相互作用,不同独立地点形成不同的几个独立系统,这些系统之间产生远程耦合的驱动因素,对本区域、其他区域或更大尺度的区域产生生态系统服务供需的影响^[42]。例如珠三角地区发达的经济吸引着粤东西北地区的人们源源不断的涌入,一方面人口密度的增加和消费水平的提升使得珠三角地区的生态系统服务需求不断攀升,在频繁剧烈的人类活动影响下其服务供给能力却在下降;而另一方面,粤东西北地区随着人口的减少,其需求水平下降,可能会有更多的供给区为珠三角地区服务,但区域间极大的经济差异会激励农民进城打工,但部分农民进城打工享受城市红利的同时又影响到供给区生态系统服务能力的下降,供需矛盾进一步加剧。为解决经济与生态的空间错配问题,广东省实行激励型财政机制,出台《广东省生态保护补偿办法》,充分考虑重点生态功能区对全省经济社会可持续发展的奉献,依据“谁保护,谁得益”的原则,通过转移支付进行适当补偿,有效调动了保护环境的积极性,以促进生态保护区的经济社会全面协调发展。

土地利用的影响。城市化的一个显著特征就是土地非农化,自然地表被硬化地表所取代。不同土地利用

类型是人类提供不同的生态系统服务,例如林地的固碳能力最强、地表草地的覆盖使土壤的保水能力提升、保障耕地资源才能保障粮食生产服务及基本民生问题,而土地利用类型、数量及结构的变化导致生态系统服务类型及强度相应改变,例如在生态系统服务流中, CO_2 排放后作为碳源进入大气,随着大气环流运动,假设系统中生态用地数量充足,通过植被固定和土壤储存可以实现碳平衡,但剧烈的人类活动破坏了这些生态用地,林地资源大量减少,释放出的 CO_2 无法被全部吸收,未被固定的碳即随大气运动的方向而被传输到其他地区,生态系统服务流的空间特征被改变^[43—44]。

利益相关者的影响。大自然无偿的为人类提供各类生态系统服务,但并非每个人都可以平等的从这些供给中获益,例如一条河流提供了清洁的水资源,上游的人首先获取后再排污至河水中,污水流至下游,下游的人不仅无法继续获取洁净的水资源,甚至对下游的林地、草地、土壤、居民健康等都产生恶劣甚至不可逆转的影响。生态系统服务流的时空特征,受到不同类型生态系统服务类型间相互作用关系的影响,例如权衡、协同作用等,同时利益相关者之间的作用关系,包括一些权力关系的影响,也决定着生态系统服务的获取和管理^[45—46]。利益相关者之间的权力不对称意味着一些利益相关者可能使用特定的生态系统服务或一组生态系统服务,而其他利益相关者可能被排除在外,由此改变了生态系统服务流的正常流动。在快速城市化发展时期,常以牺牲生态环境为代价,社会经济的发展和生态环境保护的矛盾也体现了利益相关者之间的博弈关系。

3.3 研究不足与展望

生态系统服务流研究将大自然的供给和人类的需求耦合连接起来,自然生态系统服务包括供给服务、调节服务、支持服务、文化服务等数量众多的具体服务类型^[47—49],人类对自然获取的需求类型也是种类繁多,在具体研究中我们很难充分考虑到所有类型,只能通过主要类型来表征其供给和需求能力。研究中由于社会经济数据获取的局限,研究尺度以区县为单元,构建了理想状态下的生态系统服务需求区与供给区的流动网络格局,但生态系统服务流动具有空间上的尺度效应,且其流动并不会受到行政区界线的影响,在不同空间尺度下的不同生态系统服务类型流动过程具有差异,而社会经济的发展又会对供需关系产生影响,进而传递至流动过程的变化,使其影响机制的定量研究更加复杂。

断裂点模型和场强模型在生态系统服务流研究中被广泛应用,生态系统服务随着距离的增加而逐渐下降,距离衰减原理是牛顿万有引力在地理实体之间相互作用的表现,但该模型的假设条件过于理想,未考虑实际中不同的生态系统服务类型在气温、降水、风向、地形、人口数量及强烈人类干扰下带来的不同程度的变化,其计算时所需的经验因子也难以确定^[50—51]。虽然生态系统服务流动的定量评价方法还不成熟,其空间转移规律及影响机制也尚不明确,但进行深入的研究能够明晰自然生态系统所提供的服务供给和人类社会经济系统的需求之间传递的空间路径,识别达到生态系统服务供需平衡的关键节点,以更合理的制定生态管控政策以实现真正意义上人与自然的和谐共生^[14,52],故生态系统服务流动是未来生态系统服务研究的一个重要方向,对实现区域的可持续发展具有重要意义。随着“3S”和模型技术的发展,开发配适度更高的生态系统服务流模型,精确识别生态系统服务流的流向、范围和程度等,定量化和空间可视化水平的提高才能有效揭示生态系统服务复杂动态流动的影响机制和不同尺度间生态系统服务流的相互作用机制。未来也有必要将生态系统服务流动的相关研究具体应用于生态保护、生态恢复、生态补偿及国土空间规划中,真正意义上实现科学研究的落地化。

4 结论

(1) 全省生态系统服务供给能力变化不大,略有减少,粤北地区为主要的生态系统服务供给区,但其供给能力有所下降,珠三角地区经济发达、人口密集,但供给能力为最低。生态系统的需求水平与供给相反,形成以珠三角地区为高值中心,粤西及粤东城市中心区的次高值中心,呈放射状向外圈层地区递减过渡的格局特征。

(2) 广东省整体的综合生态系统服务供需比均值维持在 0.07—0.12,因其热量充足、降水丰富、土壤较肥

沃,自然本底条件较为优越,故整体来看尚能够满足本区域人民生活的需求,高供给-低需求类型主要分布在粤北和粤西地区,低供给-高需求的区县略有增加,主要集中分布在珠三角地区,供需不匹配性有所增加。

(3)广东省生态系统服务流在空间上形成了以一个中心需求集中供给流入为主、两翼需求疏散供给流出为主的流动格局特征,粤东西北地区为流出区,珠三角地区为主要流入区,且流向该区域的平均服务流动强度较高,不同类型的流动载体在自然、社会经济、社会经济和自然环境相互作用的远程耦合影响、土地利用及利益相关者等复杂影响因素的作用下对生态系统服务流动过程产生复合影响。

参考文献(References):

- [1] 于贵瑞,郝天象,杨萌. 中国区域生态恢复和环境治理的生态系统原理及若干学术问题. 应用生态学报, 2023, 34(2): 289-304.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [3] Rasul G. Twin challenges of COVID-19 pandemic and climate change for agriculture and food security in South Asia. *Environmental Challenges*, 2021, 2: 100027.
- [4] Li T N, Li D Z, Liu Y B, Wei G E, Liu C H, Wang J H. The spatiotemporal effects on ecosystem services supply-demand from industrial transformation and upgrading: Promotion or inhibition? *Ecological Indicators*, 2024, 161: 111990.
- [5] 赵士洞,赖鹏飞,商界环保协会(香港)译. 千年生态系统评估报告集-二. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- [6] 张欣蓉,王晓峰,程昌武,刘世荣,周潮伟. 基于供需关系的西南喀斯特区生态系统服务空间流动研究. 生态学报, 2021, 41(9): 3368-3380.
- [7] 易丹,肖善才,韩逸,欧名豪. 生态系统服务供给和需求研究评述及框架体系构建. 应用生态学报, 2021, 32(11): 3942-3952.
- [8] Schröter M, Koellner T, Alkemade R, Arnhold S, Bagstad K J, Erb K H, Frank K, Kastner T, Kissinger M, Liu J G, López-Hoffman L, Maes J, Marques A, Martín-López B, Meyer C, Schulp C J E, Thober J, Wolff S, Bonn A. Interregional flows of ecosystem services: concepts, typology and four cases. *Ecosystem Services*, 2018, 31: 231-241.
- [9] 李征远,李胜鹏,曹银贵,王舒菲,刘施含,张振佳. 生态系统服务供给与需求: 基础内涵与实践应用. 农业资源与环境学报, 2022, 39(3): 456-466.
- [10] Jones L, Norton L, Austin Z, Browne A L, Donovan D, Emmett B A, Grabowski Z J, Howard D C, Jones J P G, Kenter J O, Manley W, Morris C, Robinson D A, Short C, Siriwardena G M, Stevens C J, Storkey J, Waters R D, Willis G F. Stocks and flows of natural and human-derived capital in ecosystem services. *Land Use Policy*, 2016, 52: 151-162.
- [11] 王晓峰,尧文洁,冯晓明,贾子续,张欣蓉,马嘉豪,周继涛,涂义,孙泽冲. 青藏高原生态系统服务供需变化及其驱动因素. 生态学报, 2023, 43(17): 6968-6982.
- [12] Liang J, Pan J H. Identifying carbon sequestration's priority supply areas from the standpoint of ecosystem service flow: a case study for Northwestern China's Shiyang River Basin. *Science of the Total Environment*, 2024, 927: 172283.
- [13] 赵文武,刘月,冯强,王亚萍,杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139-151.
- [14] 王嘉丽,周伟奇. 生态系统服务流研究进展. 生态学报, 2019, 39(12): 4213-4222.
- [15] 张潇,路青. 城市尺度下生态系统服务流研究综述. 环境保护科学, 2020, 46(6): 55-63.
- [16] Bagstad K J, Villa F, Batker D, Harrison-Cox J, Voigt B, Johnson G W. From theoretical to actual ecosystem services: mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. *Ecology and Society*, 2014, 19(2): art64.
- [17] 官冬杰,张喻翔,陈明珠,朱康文,周李磊,张艳军. 水源供给服务供需流空间不匹配特征识别及优化. 生态学报, 2024, 44(12): 5070-5082.
- [18] 熊昕莹,孟梅. 基于生态系统服务供需关系及空间流动的新疆生态管理分区与优化策略. 应用生态学报, 2023, 34(8): 2237-2248.
- [19] Huang Y T, Cao Y R, Wu J Y. 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 Yangtze River Delta urban agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 460: 142598.
- [20] Su D, Yu C, Dong X Y, Wu Q, Fang X Q, Cao Y. Evaluation of ecosystem services budget based on ecosystem services flow: a case study of Hangzhou Bay area. *Applied Geography*, 2024, 162: 103150.
- [21] 刘慧敏,刘绿怡,任嘉衍,卞子元,丁圣彦. 生态系统服务流定量化研究进展. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2723-2730.
- [22] 孙才志,安志英. 基于生态系统服务流的东北地区水安全格局. 水资源保护, 2024, 40(3): 11-19, 27.
- [23] Molla Sitotaw T, Willemsen L, Tsegaye Meshesha D, Nelson A. Empirical assessments of small-scale ecosystem service flows in rural mosaic landscapes in the Ethiopian Highlands. *Ecosystem Services*, 2024, 67: 101622.
- [24] Tian H Z, Wang H, Lyu X, Li X B, Yang Y L, Zhang Y, Liu J H, Lu Y T, Zhao X L, Qu T F, Su J R, Luo D S. Construction and optimization of ecological security patterns in Dryland watersheds considering ecosystem services flows. *Ecological Indicators*, 2024, 159: 111664.

- [25] 李婧昕, 杨立, 杨蕾, 张超, 霍兆敏, 陈敏豪, 栾晓峰. 基于熵理论的城市生态系统服务流定量评估——以北京市为例. 应用生态学报, 2018, 29(3): 987-996.
- [26] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永, 扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. 科学通报, 2006, 51(6): 700-706.
- [27] 阳小琼, 朱文泉, 潘耀忠, 宋国宝. 基于修正的亚像元模型的植被覆盖度估算. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1860-1864.
- [28] 王艳艳, 杨明川, 潘耀忠, 朱文泉, 龙中华, 刘旭拢, 顾晓鹤. 中国陆地植被生态系统生产有机物质价值遥感估算. 生态环境, 2005, 14(4): 455-459.
- [29] Wang X M, Liu P, Wei C T, Xu N Z, Zhao P, Wen D. Research on ecological compensation based on ecosystem service flow: a case study in Guangdong province, China. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 480: 144090.
- [30] Wu J Y, Huang Y T, Jiang W K. Spatial matching and value transfer assessment of ecosystem services supply and demand in urban agglomerations: a case study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area in China. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 375: 134081.
- [31] Wu J S, Fan X N, Li K Y, Wu Y W. Assessment of ecosystem service flow and optimization of spatial pattern of supply and demand matching in Pearl River Delta, China. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110452.
- [32] Zhang Z M, Peng J, Xu Z H, Wang X Y, Meersmans J. Ecosystem services supply and demand response to urbanization: a case study of the Pearl River Delta, China. *Ecosystem Services*, 2021, 49: 101274.
- [33] 朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 李京. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300.
- [34] 韩增林, 刘澄浩, 闫晓露, 李欣媛, 王学哲. 基于生态系统服务供需匹配与耦合协调的生态管理分区——以大连市为例. 生态学报, 2021, 41(22): 9064-9075.
- [35] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, Zhang F, Teng Y M, Wang C, Chu X, Kumi M A. The tradeoffs between food supply and demand from the perspective of ecosystem service flows: a case study in the Pearl River Delta, China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 301: 113814.
- [36] Li M, Liu H, Geng G N, Hong C P, Liu F, Song Y, Tong D, Zheng B, Cui H Y, Man H Y, Zhang Q, He K B. Anthropogenic emission inventories in China: a review. *National Science Review*, 2017, 4(6): 834-866.
- [37] 何国钰, 张蕾, 雷锡琼, 孙远洋, 万玉雯, 熊海玲. 基于生态系统服务供需簇的武汉都市圈生态风险评估及影响因素. 应用生态学报, 2024, 35(5): 1347-1358.
- [38] 孙贤斌, 孙良萍, 王升堂, 李光耀, 张欣. 基于 GIS 的跨流域生态补偿模型构建及应用——以安徽省大别山区为例. 中国生态农业学报: 中英文, 2020, 28(3): 458-466.
- [39] 彭建, 杨旸, 谢盼, 刘焱序. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. 生态学报, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [40] 陈江龙, 徐梦月, 苏曦, 高金龙. 南京市生态系统服务的空间流转. 生态学报, 2014, 34(17): 5087-5095.
- [41] Xu Q, Dong Y X, Yang R. Influence of the geographic proximity of city features on the spatial variation of urban carbon sinks: a case study on the Pearl River Delta. *Environmental Pollution*, 2018, 243: 354-363.
- [42] Liu J G, Yang W, Li S X. Framing ecosystem services in the telecoupled anthropocene. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2016, 14(1): 27-36.
- [43] 杨丽雯, 董丽青, 张立伟, 何秉宇, 张永清. 固碳服务供需平衡和服务流量化评估——以引黄入晋南干线为例. 资源科学, 2019, 41(3): 557-571.
- [44] Zank B, Bagstad K J, Voigt B, Villa F. Modeling the effects of urban expansion on natural capital stocks and ecosystem service flows: a case study in the Puget Sound, Washington, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 149: 31-42.
- [45] Felipe-Lucia M R, Martín-López B, Lavorel S, Berraquero-Díaz L, Escalera-Reyes J, Comín F A. Ecosystem services flows: why stakeholders' power relationships matter. *PLoS One*, 2015, 10(7): e0132232.
- [46] Villa F, Voigt B, Erickson J D. New perspectives in ecosystem services science as instruments to understand environmental securities. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences*, 2014, 369(1639): 20120286.
- [47] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being*. Washington, D.C.: Island Press, 2005
- [48] Motesharrei S, Rivas J, Kalnay E, Asrar G R, Busalacchi A J, Cahalan R F, Cane M A, Colwell R R, Feng K S, Franklin R S, Hubacek K, Miralles-Wilhelm F, Miyoshi T, Ruth M, Sagdeev R, Shirmohammadi A, Shukla J, Srebric J, Yakovenko V M, Zeng N. Modeling sustainability: population, inequality, consumption, and bidirectional coupling of the Earth and human systems. *National Science Review*, 2016, 3(4): 470-494.
- [49] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [50] 陈龙, 徐丽, 于名召, 贺桂珍. 水生态系统服务流研究进展. 生态学报, 2025, 45(2): 1000-1012.
- [51] Wang C D, Li W Q, Sun M X, Wang Y T, Wang S B. Exploring the formulation of ecological management policies by quantifying interregional primary ecosystem service flows in Yangtze River Delta region, China. *Journal of Environmental Management*, 2021, 284: 112042.
- [52] 姚婧, 何兴元, 陈玮. 生态系统服务流研究方法最新进展. 应用生态学报, 2018, 29(1): 335-342.