

DOI: 10.5846/stxb202112203611

刘伟, 张帆, 魏云浩, 赵芬. 珠三角城市群区域生态系统服务供需均衡关系. 生态学报, 2023, 43(11): 4461-4472.

Liu W, Zhang F, Wei Y H, Zhao F. The balance between ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta Urban Agglomerations area. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4461-4472.

珠三角城市群区域生态系统服务供需均衡关系

刘 伟¹, 张 帆^{2,*}, 魏云浩¹, 赵 芬³

1 山东师范大学地理与环境学院, 济南 250358

2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

3 鲁东大学资源与环境工程学院, 烟台 264025

摘要: 生态系统服务供需均衡关系分析为生态系统管理提供了详实的科学基础信息。基于土地利用、气象和社会经济等多源数据, 采用遥感反演、水量平衡方程、修正的通用土壤流失方程和植被净生产力模型(CASA)等方法, 分别评估了 1990—2015 年珠三角城市群粮食供给、产水服务、固碳释氧和土壤保持服务; 采用相关社会经济指标核算了生态系统服务的需求量; 进而揭示了栅格、县域和市域多尺度的生态系统服务供需均衡关系及其时空演变特征。研究发现: (1) 除粮食供给外, 产水服务、固碳释氧和土壤保持服务呈波动性增加的趋势, 增幅分别为 52.2%、21.8% 和 73.4%; 在空间上表现为中部平原地区服务水平低, 低山丘陵地带高的分布特征。(2) 除土壤保持服务外, 粮食供给、产水服务和固碳释氧服务需求量不断增加, 增幅分别为 10.1%、17.5% 和 769.4%; 中部平原地区生态系统服务需求量大, 低山丘陵地带小。(3) 除土壤保持和产水服务外, 粮食供给、固碳释氧及综合服务供需指数不断下降, 其中, 2015 年粮食供给和固碳释氧供需指数分别为 -0.47 和 -0.71。研究结果可为决策者了解区域的生态系统服务供需均衡匹配状况提供科学基础信息, 直接服务并指导区域生态系统管理和规划, 促进区域生态-社会-经济复合系统的可持续发展。

关键词: 生态系统服务; 供需均衡关系; 时空格局演变; 珠三角城市群

The balance between ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta Urban Agglomerations area

LIU Wei¹, ZHANG Fan^{2,*}, WEI Yunhao¹, ZHAO Fen³

1 College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

3 School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: The examination of the supply and demand for ecosystem services provides precise and fundamental scientific data for ecosystem management. Based on land use, remote sensing, meteorological and socio-economic data, we used the ecological process methods and models such as remote sensing retrieval, water balance equation, revised universal soil loss equation (RUSLE) and CASA to evaluate the grain supply (GS), water yield (WY), carbon sequestration and oxygen release (CS) and soil conservation (SC), and used the relevant socio-economic indicators to calculate the amount of key ecosystem services demand in the Pearl River Delta urban agglomerations from 1990 to 2015. We analyzed the balance between ecosystem services supply and demand at the grid, county and city levels. The results showed that: (1) Except for GS, the WY, CS and SC showed an increasing trend with fluctuation, increased about 52.2%, 21.8% and 73.4%, respectively. Ecosystem service supply was characterized by low levels in the central plain and high levels in the low

基金项目: 国家自然科学基金项目(72104130, 72033005)

收稿日期: 2021-12-20; **网络出版日期:** 2023-02-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangf.ccap@igsnrr.ac.cn

mountain and hilly areas. (2) In addition to SC, the demand for GS, WY and CS had a trend of continuous increase, increased about 10.1%, 17.5% and 769.4%, respectively. The demand is high in the central plain areas and low in the low mountains and hills. (3) Except for SC and WY, the supply-demand index of the GS, CS and the integrated services declined at different level. In 2015, the supply-demand indices of GS and CS were -0.47 and -0.71, respectively. The study's findings would provide basic scientific information for decision-makers to grasp the balance and matching conditions between ecosystem service supply and demand, which could directly serve and guide regional ecosystem management and planning, as well as promote the sustainable development of eco-socio-economic system.

Key Words: ecosystem service; balance between supply and demand; spatio-temporal pattern evolution; Pearl River Delta urban agglomeration

生态系统服务是指人类直接或间接地从生态系统中获取的惠益^[1],为生态系统和社会经济系统的联系搭建了桥梁。在全球气候变化和城镇化生态转型背景下,自然生态系统呈现面积萎缩和破碎化的趋势发展,影响着生态系统服务供给水平;同时,社会经济系统不断发展,居民对生态系统服务需求量持续增加,进而导致了区域生态系统服务供需失衡和生态环境恶化等问题,直接或间接地制约着区域可持续发展^[2]。开展生态系统服务供给、需求及其供需均衡关系研究对于了解区域生态系统与社会经济系统之间的互动关系,识别区域生态环境问题,促进区域生态系统可持续发展具有切实意义。

生态系统服务需求及供需均衡关系相关研究成果相比于生态系统服务供给评估仍然较少,还处于不断深化与完善阶段^[3]。目前,生态系统服务供给研究相对成熟,评估方法主要包括基于生态系统服务功能价值估算的经济学方法和基于生态系统服务机制构建的生态系统服务功能模拟模型,评估尺度多聚焦于全球、国家及区域。在生态系统服务需求方面,学者主要基于相关指数(例如,土地开发指数^[4]、基尼系数^[5]等)、专家经验法和生态足迹法^[6]进行核算,其难点在于对生态系统服务需求的时空异质性刻画^[7]。生态系统服务供需均衡关系研究仍停留在理论探索阶段,相关的研究案例大都基于生态系统服务供需矩阵^[8]评估区域、省域等大尺度单元的单一生态系统服务的供需关系^[9]。综合来看,现有成果对于进一步深化生态系统服务供需均衡关系研究意义重大,但在互动机制和区域间联系揭示方面仍显不足^[10],具体表现在三个方面:一是仅有少量的研究采用生态系统服务供给和需求的物质量进行分析^[11,12],大多数研究对社会经济系统的服务需求量的时空异质性特征考虑不足,研究结果只展示生态系统系统服务供需相对状况;二是大多数研究仅对单一尺度的生态系统服务供需均衡关系进行分析,对多尺度的生态系统服务供需关系分析鲜有涉及^[13];三是现有研究对京津冀和长三角城市群的生态系统服务供需分析较多,鲜有对珠三角城市群的相关报道。基于此,开展基于物质量的珠三角城市群不同尺度的生态系统服务供需均衡分析就显得尤为必要。

珠三角城市群作为我国城镇化水平最高、开发建设强度最大的城镇密集地区之一,不仅要争取建成为世界级城市群,更要成为高质量发展的典范。目前珠三角地区的城镇化发展速度迅猛,在城市扩张和发展过程中消耗了大量的资源,侵占了部分生态用地,造成了自然生态系统破碎化和质量退化,面临着资源能源约束趋紧、生态环境压力日益增大等问题。本文基于土地利用和社会经济等多源数据,采用物质量评估方法,核算了珠三角城市群生态系统服务供给量和需求量,从供需指数视角分析了生态系统服务在栅格、县域和市域尺度的供需均衡关系,研究成果可为珠三角城市群生态系统管理、供需格局优化及土地利用规划等提供科学支撑,对于推动城市群生态-社会-经济系统可持续发展具有重要意义。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

根据国务院批准设立的珠三角经济区,珠三角城市群包括广州、深圳、珠海、东莞、中山、佛山、惠州、江门、肇庆九个地级市,位于广东省中南部、珠江入海口处(图1),占地面积 54754 km²。其东、北、西三面丘陵台地

环抱,中部平原广阔、地势低平。属亚热带湿润季风气候,具有终年高温,光照充足,夏季长、霜期短,降水丰沛,水热季节配合好等气候特征。珠三角常住人口由 1990 年 2369.93 万人增加到 2015 年 5874.27 万人;国内生产总值(GDP)由 1990 年 997.43 亿元增长到 2015 年 42470.58 亿元(1990 年 GDP 可比价)。研究期间,耕地减少了 3355.7 km²,林地和草地减少了 1196.4 km²;相反,建设用地面积增长了 4574.3 km²(图 1)。

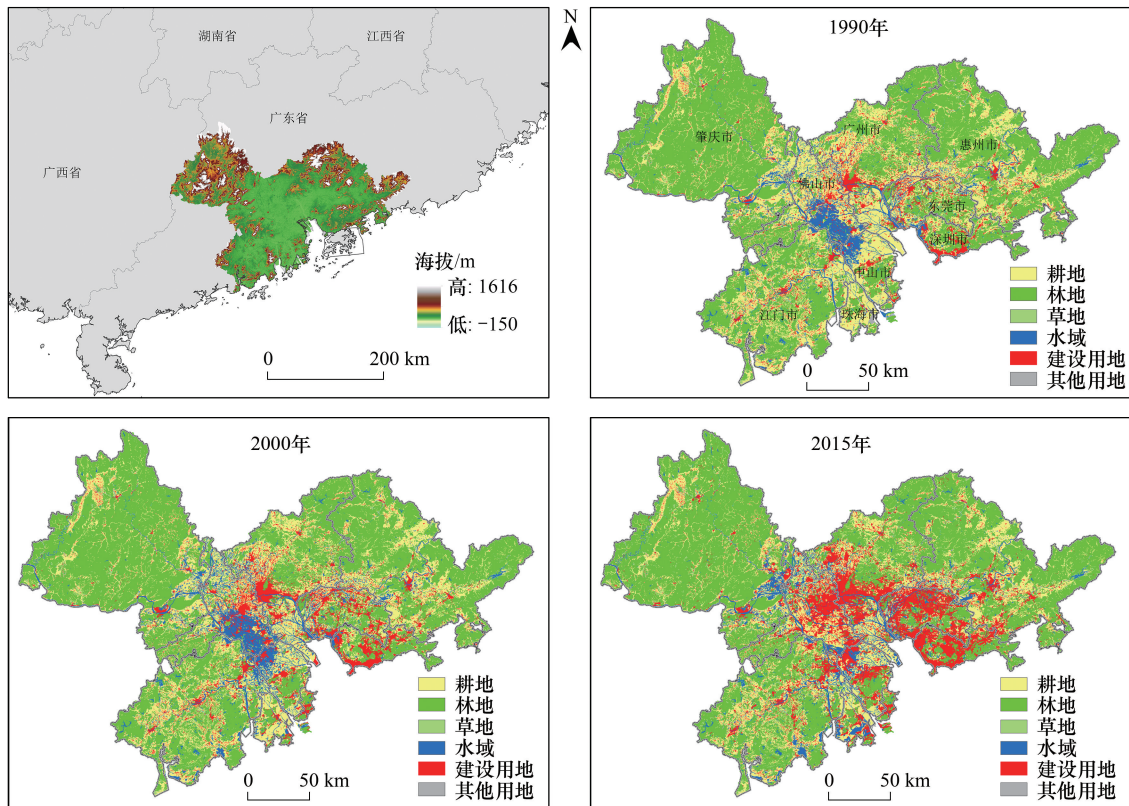


图 1 珠三角城市群数字高程(DEM)及土地利用空间分布

Fig.1 The spatial distribution of DEM and land use in 1990, 2010 and 2015 in the PRD urban agglomeration

1.2 数据来源

本研究使用的数据包括土地利用、归一化植被指数(NDVI)、夜间灯光、气象、土壤、数字高程(DEM)和社会经济等数据。其中,1990、2000 和 2015 年的土地利用数据来源于中国科学院资源环境数据中心,空间分辨率为 1 km×1 km;NDVI 数据来源于美国国家航空航天局(NASA) MODIS/TERRA 植被指数 16 天合成产品数据集,采用最大值合成法生成月及年尺度 NDVI 数据,空间分辨率为 250 m×250 m;夜间灯光数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的美国国家气象卫星(DMSP)的 OLI 传感器和索米国家极地轨道伙伴卫星(NPP)的 VIIRS 传感器获取的年度夜间灯光数据集,空间分辨率为 0.00417°×0.00417°。土壤数据来源于国家青藏高原科学数据中心,空间分辨率为 1 km×1 km。各地市的年用水量来源于水资源统计公报。DEM 数据来源于地理空间数据云 ASTER GDEM 数据集,空间分辨率为 30 m×30 m。1990—2015 年广东省气象站点的日平均降雨量、太阳辐射等气象数据来自国家气象科学数据中心。由于不同数据空间分辨率不同,本研究采用双线性内插法将其统一为 1 km×1 km。

2 研究方法

2.1 生态系统服务供给评估方法

基于珠三角城市群特殊功能、生态系统类型及地域特征,本研究选取了粮食供给、土壤保持、固碳释氧及

产水服务作为典型生态系统服务,分别采用遥感反演方法(植被状态指数)、修正的通用土壤流失方程(RUSLE)模型、植被净生产力模型(CASA)模型、水量平衡模型(WBM)和生态系统服务和权衡的综合评估模型(InVEST)模型进行评估。生态系统服务评估方法详见表1。

表1 生态系统服务评估方法及参考文献

Table 1 Methods and main references for evaluating ecosystem service

类型 Types	方法 Methods	公式 Equations	指标含义 Index
粮食供给 Grain production	采用收获率方法;水稻赋予水田;大豆等经济作物赋予旱地,根据不同地类的植被状态指数(VCI) ^[14] 指数将粮食分配到相应栅格	$GP_i = GP_t \times \frac{VCI_i}{\sum_{i=1}^n VCI_i}$	GP_i 为 i 栅格粮食产量(t);VCI 为植被状态指数; GP_t 为 t 类型粮食总产量(t);
土壤保持 Soil conservation	基于修正的通用土壤流失方程(RUSLE) ^[15] 模型计算土壤保持量	$A_c = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$	A_c 为土壤保持量(t/hm^2); R 为降雨侵蚀性因子; K 为土壤可侵蚀因子; LS 为坡长坡度因子; C 为植被覆盖和作物管理因子; P 为水土保持措施因子
固碳释氧 Carbon fixation and oxygen release	基于植被净生产力模型(CASA) ^[16] 模型估算固碳量	$W_{CO_2} = NPP_i \times 2.2 \times 1.63$	W_{CO_2} 为固碳量(gCO_2/m^2); NPP_i 为 i 栅格的 NPP 值(gC/m^2)
产水服务 Water yield	基于水量平衡方程(WBM) ^[17] 计算产水量	$WY = PPT - ET$	WY 为产水量(mm); PPT 为降水量(mm); ET 为实际蒸散发(mm)

2.2 生态系统服务需求评估方法

2.2.1 粮食需求

本研究基于高分辨率遥感影像和夜间灯光数据提取的珠三角城市于农村的分界线将两者分配到空间上。基于高分辨率遥感影像和夜间灯光数据提取了珠三角城市与农村的分界线,并根据历年《广东省统计年鉴》中城市与农村居民的人均粮食消费量和人口数量计算了珠三角城市群的粮食需求量。

$$D_{grain} = Dpg_i \times \rho_i$$

式中, D_{grain} 为粮食需求量(kg); Dpg_i 为农村($i=1$)或者城市居民($i=2$)的人均粮食消费量(kg/人); ρ_i 为城市或者农村人口数量(人)。

2.2.2 水资源需求

社会经济系统的用水类型主要包括农业需水、工业需水、生活需水和生态环境需水等。水资源需求量计算公式如下:

$$D_{water} = D_{agr} + D_{ind} + D_{pub} + D_{res} + D_{eco}$$

式中, D_{water} 为需水总量(m^3); D_{agr} 为农业需水(m^3); D_{ind} 为工业需水(m^3); D_{pub} 为城镇公共用水(m^3); D_{res} 为居民生活用水(m^3); D_{eco} 为生态环境用水(m^3)。

2.2.3 固碳释氧服务需求

本研究基于碳排放系数法(方法和不同能源的 CO_2 排放系数见 Zhan 等^[18])核算了各个地市的由于化石能源燃烧引起的 CO_2 排放量;并基于 DMSP/OLS 和 NPP/VHRS 灯光遥感产品数据和 $1\ km \times 1\ km$ 栅格人口分布数据,采用 Ghosh 等提出的 CO_2 空间配置模型将其进行空间模拟^[19]。

2.2.4 土壤保持服务需求

人类期望获得生态系统服务数量即为生态服务需求量^[20],实际的土壤侵蚀量是人类期望能够被治理的,因此,本研究以实际的土壤侵蚀量作为土壤保持服务的需求量。

$$A_r = R \times K \times LS \times C \times P$$

式中, A_r 为土壤侵蚀量(t/hm^2); R 为降雨侵蚀力因子($MJ\ mm\ hm^{-2}\ h^{-1}$); K 为土壤可侵蚀因子($t\ hm^2\ h\ MJ^{-1}\ mm^{-1}\ hm^{-2}$); LS 为坡长坡度因子(无量纲); C 为植被覆盖和作物管理因子(无量纲); P 为水土保持措施因子

(无量纲)。各土地利用类型的 C 、 P 值来源于珠三角的相关研究^[21]。

2.3 生态系统服务供需均衡关系分析

本研究采用生态系统服务供需比^[22]描述珠三角城市群不同生态系统服务以及综合的供需状态。计算公式为:

$$\text{ESDR}_i = \frac{S_i - D_i}{S_i + D_i}$$

$$\text{CESD}_i = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \text{ESDR}_n$$

式中, ESDR_i 为某一空间尺度(栅格、县域、市域)上的生态系统服务供需比,值域范围为 $(-1, 1)$, $\text{ESDR}_i < 0$ 表示供给小于需求, $\text{ESDR}_i > 0$ 表示供给大于需求; S_i 和 D_i 为某一空间尺度上的生态系统服务供给量和需求量; CESD_i 为生态系统服务综合供需比; m 为生态系统服务类数,在本研究中 $m = 4$ 。

3 结果分析

3.1 生态系统服务供给变化趋势

3.1.1 粮食供给

随着经济的不断发展,珠三角城市群人口不断集聚、城市用地不断扩张,导致耕地面积不断减少,直接造成的结果是粮食供给能力不断下降。1990—2015 年,珠三角城市群水田面积由 11180.71 km² 减少到 8868 km²,旱地由 4597.64 km² 减少到 3554.11 km²;粮食供给量由 698.54 万 t 下降到 347 万 t。珠三角城市群粮食供给量具有明显的空间异质性,整体上呈中、东部地区低,西、南部低山丘陵地带高的特点(图 2)。粮食生产力较高的区域主要分布在广州的东北部、肇庆及江门的大部分、佛山的西南部等区域;惠州、广州、佛山、东莞等地市接壤地带粮食生产力普遍偏低。

3.1.2 产水服务

珠三角城市群产水服务能力呈现增强趋势,由 1990 年的 4.18×10^{10} m³ 增长到 2015 年的 6.36×10^{10} m³。不同空间分布特征下的降水和蒸散发强度组合,使得产水服务能力尚未表现出规律的空间分布特征(图 2)。1990 年,珠三角城市群产水服务能力呈现出以肇庆-佛山-中山为中轴线向两侧逐渐增强的空间分布特征;2000 年,呈现出由西往东逐渐变强的空间分布特征;2015 年,除肇庆-广州-惠州的北部部分地区产水服务能力较高之外,其他地区的产水服务能力差异不大。

3.1.3 固碳释氧

1990—2015 年,珠三角城市群固碳量(CO₂固定量)呈波动性上升的趋势,由 9145 万 t 上升到 11142.8 万 t,又下降到 10158.6 万 t(图 2)。固碳量的变化除受到林地和草地面积的影响之外,主要受气候因素的影响,如 2000 年固碳量的上升源于当年的日照辐射量较大和月平均气温较高,植被的光合作用较强。固碳能力较高的区域主要分布在低山丘陵地带,这些地区的生态系统受到的人类干扰活动的影响较小,植被生长较好;地势低平的中部平原地区经济发达,建设用地、耕地等对生态用地的占用比较严重,并且水系比较密集,形成了固碳量的一个低谷。

3.1.4 土壤保持

1990—2015 年,珠三角城市群土壤保持量不断增加,由 243.03 亿 t 增加到了 421.31 亿 t。土壤保持量的变化主要受到降雨侵蚀力的影响,除此之外,与植被覆盖、管理因子、水土保持因子也有较大的关系。从土壤保持服务的空间分布来看,东、西、北三面的低山丘陵地带土壤保持力较高,中部平原地区的土壤保持力相对较小,这主要与人类的活动方式有关,低山丘陵地区的坡度坡长因子较大,建设用地分布较少,土地利用方式以耕地、林地和草地为主,植被覆盖度较好,该区域的土壤保持服务水平较高;在平原地区,地形平缓,并且土地利用类型以建设用地为主,该区域潜在土壤流失量较小,其土壤保持服务能力也就较低。

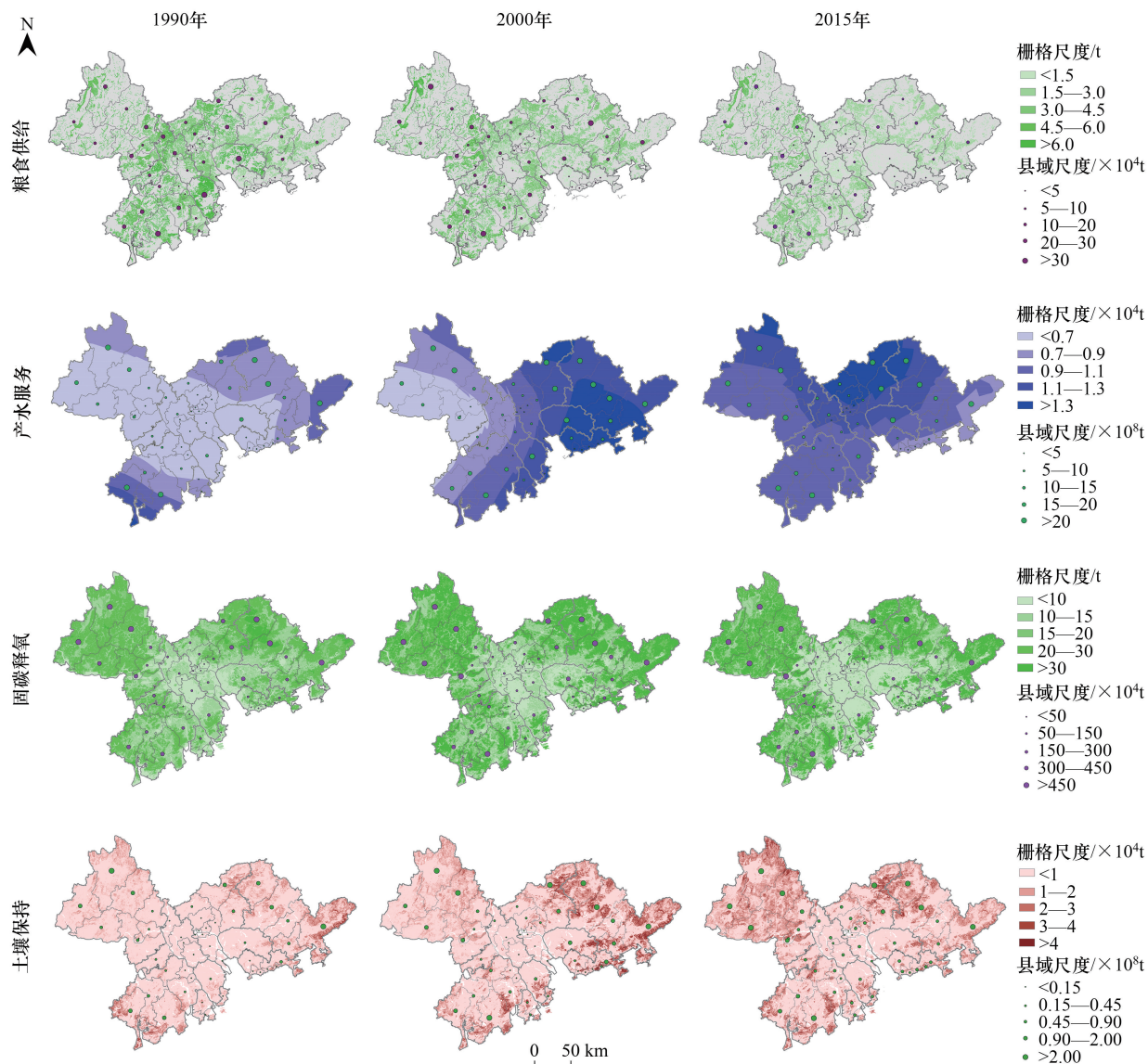


图2 1990—2015年珠三角城市群粮食供给、产水服务、固碳释氧和土壤保持服务时空分布

Fig.2 The spatial distribution of grain production, water yield, carbon sequestration and soil conservation supply at grid and county level during 1990 and 2015 in the PRD urban agglomeration

3.2 生态系统服务需求

3.2.1 粮食供给

1990—2015年,珠三角城市群粮食需求量呈先增加后减少的趋势,由1990年的574.55万t增加到2000年的787.54万t,之后下降到2015年的632.70万t。在空间分布上,中部平原地区的粮食需求量较大且相对集中,尤其是广州和深圳市的市中心区域,其他区域的粮食需求量较低且分散(图3)。

3.2.2 产水服务

1990—2015年,珠三角城市群需水量呈先增加后减少的趋势,由1990年的194.22亿t增长到2000年的268.69亿t,之后又减少到2015年的228.21亿t。研究期间,栅格尺度上耗水强度差距逐渐变大;1990年,广州、佛山和珠海部分区域的栅格用水量较大,达到了150万t以上,其余地区的大部分栅格用水量相差不大;2000年,用水量大于150万t的栅格在广州、佛山和中山部分区域出现明显扩张,并且用水强度也进一步增加,东莞和深圳等区域栅格尺度用水量也出现了明显的增长;2015年,大部分区域栅格尺度用水量呈不同程

度减少,但是,局部地区的栅格尺度用水量显著增加,例如,广州市城区与深圳市的南部临海区域,部分栅格的用水量达到了 600 万 t 以上(图 3)。

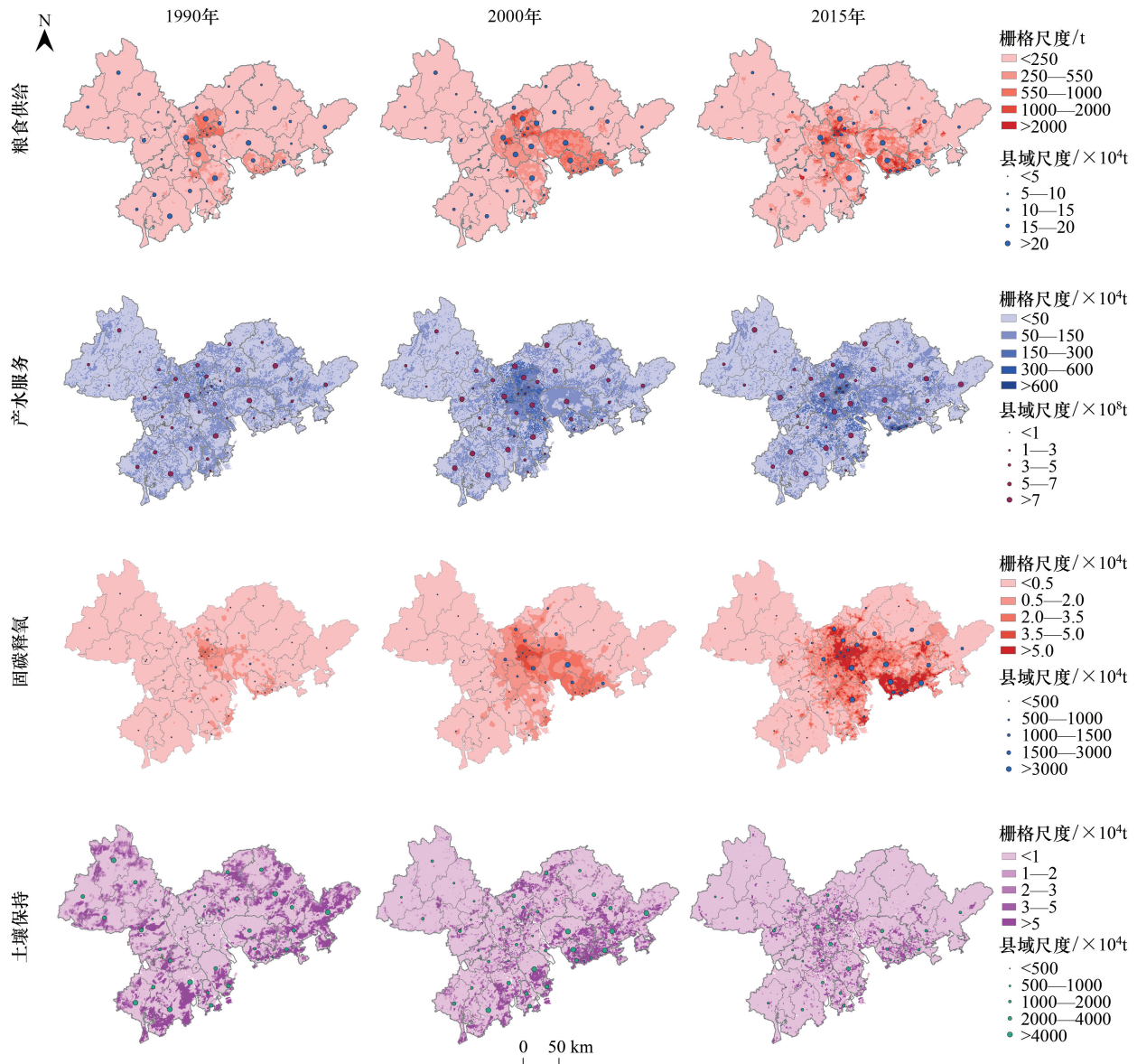


图3 1990—2015年珠三角城市群栅格及县域尺度粮食生产、产水服务、固碳释氧和土壤保持服务需求量空间分布

Fig.3 The spatial distribution of grain production, water yield, carbon sequestration and soil conservation demand at grid and county level during 1990 and 2015 in the PRD urban agglomeration

3.2.3 固碳释氧

珠三角城市群 CO_2 排放量呈快速增加的趋势,由 1990 年的 6990 万 t 增长到了 2015 年的 60772.39 万 t,年均增长 2151.3 万 t。1990 年, CO_2 排放量较大的区域主要集中在广州城区,东莞和深圳市部分栅格的 CO_2 排放量也比较大,达到了 0.5 万 t 以上;其余地区栅格的 CO_2 排放量差异不大。2000 年,广州、东莞和深圳中心城区栅格的排放量显著增加;2015 年, CO_2 排放量大于 5 万 t 的栅格数量出现了明显的增长,主要分布在广州和深圳;惠州、中山和肇庆中心区域栅格也出现了明显的增长(图 3)。

3.2.4 土壤保持

1990—2015 年,珠三角城市群土壤保持服务需求量由 11.35 亿 t 下降到 4.44 亿 t,主要由降水强度和植被

生长情况的变化引起的。低山丘陵地带土壤保持服务需求量较高,中部平原地区较低(图 3)。

3.3 生态系统服务供需均衡关系分析

3.3.1 粮食供给

珠三角城市群粮食供需均衡关系具有明显的时空异质性。粮食供需指数在中部平原地区较小,三面低山丘陵地区较大。1990—2015 年,耕地面积的不断减少导致粮食供给能力下降,人口数量的不断增长使得需求量持续增加,从而导致了当地粮食缺口越来越大,其供需指数由 0.12 下降到-0.47。粮食供给量小于需求量的栅格占比由 1990 年的 54.47%增长到了 2015 年的 69%;供需指数大于零的县域个数由 27 个减少到 11 个。粮食供需指数下降比较明显的地市主要发生在经济和人口比较密集的区域,例如广州、佛山、珠海、东莞和深圳等;低山丘陵地带(例如,肇庆和江门)的土地利用及人口数量变化不明显,其粮食供需指数基本保持稳定。综上所述,在栅格、县域和市域尺度上,粮食供需指数整体上呈下降的趋势,表明珠三角城市群粮食供给和需求的匹配关系越来越差。

3.3.2 产水服务

珠三角城市群的水资源比较丰富,其供给量能满足需求量。产水服务供需指数呈波动性增加趋势,由 1990 年的 0.38 增长到了 2015 年的 0.41。研究期间,水资源供大于需的栅格数量不断增加,由 1990 年的 73% 增长到了 2015 年的 83%。供小于需的栅格主要分布在经济比较发达、人口比较密集的城市或者县城的中心,尤其是广州和佛山市的中心区域。1990—2015 年,供需指数小于零的县域个数分别为 11、10 和 11,主要分布在广州、佛山、深圳和江门等市。从地市水平上看,只有 2015 年的深圳没有满足其水资源需求,供需指数为 -0.26;其余地市的水资源供给量远远大于需求量。综上所述,除了在经济比较发达和人口比较密集的栅格、县域等局部地区,珠三角城市群的产水服务能够满足当地需求。

3.3.3 固碳释氧

固碳释氧服务供需指数呈波动性下降趋势,表明供需关系呈恶化趋势。1990 年,珠三角城市群生态系统的固碳量大于 CO_2 排放量,供需指数为 0.14;随着能源消耗量不断增加,供需指数在 2000 年和 2015 年分别下降到-0.37 和 -0.71,说明了目前 CO_2 的排放量远远大于固碳量。在栅格尺度上,供需指数小于零的栅格数量占比由 1990 年的 25%增加到了 2015 年的 52%,主要分布在广州、深圳、佛山和东莞;固碳量大于排放量的栅格主要分布在肇庆的东南部和江门的西南部。从县域尺度上看,固碳量小于排放量的县域个数由 1990 年的 26 个增加到 2015 年的 40 个。在市域尺度上,固碳量大于其排放量地市的个数由 1990 年的三个减少到 2015 年的一个,肇庆市是唯一一个碳排放量小于其固碳量的地市。综上所述,随着经济的发展,不管在栅格、县域还是市域尺度上,珠三角城市群的固碳释氧服务供需均衡关系日益变差。

3.3.4 土壤保持

珠三角土壤保持力较好。1990—2015 年,整个区域的土壤保持服务供需指数不断增加,由 0.91 增长到了 0.98。只有极少数的栅格土壤保持量不能满足其需求。所有的县市和地市的土壤保持量远远大于其需求量。随着时间的推移,供需指数呈下降趋势的县域和市域的个数分别有 10 个(主要分布在广州、佛山和江门)和 1 个(佛山)。

3.3.5 综合生态系统服务

生态系统服务综合供需指数与单一生态系统服务供需指数在空间分布上呈大体相似的特征:中部平原地区低,低山丘陵地带高,且空间差异较大。1990—2015 年,从变化方向上看,大约有 88.4% 栅格的供需指数呈现不同程度下降,其中供需指数小于零的栅格在佛山、珠海、东莞和深圳等市不断扩张且集聚发展,其数量占比由 4.7%增长到了 22.9%;所有县域的综合供需指数呈不同程度下降,其中,供需指数小于零的县域个数由研究初期的 11 个增长到了 28 个,主要分布在广州、深圳和佛山市;各地市综合供需指数呈不同程度的下降,其中只有肇庆、惠州和江门市的综合供需指数在研究时段内为正值;深圳的综合供需指数最低(2015 年为 -0.26);其次是东莞(2015 年为 -0.19)和佛山(2015 年为 -0.16)。珠三角城市群的综合供需指数虽然大于 0,

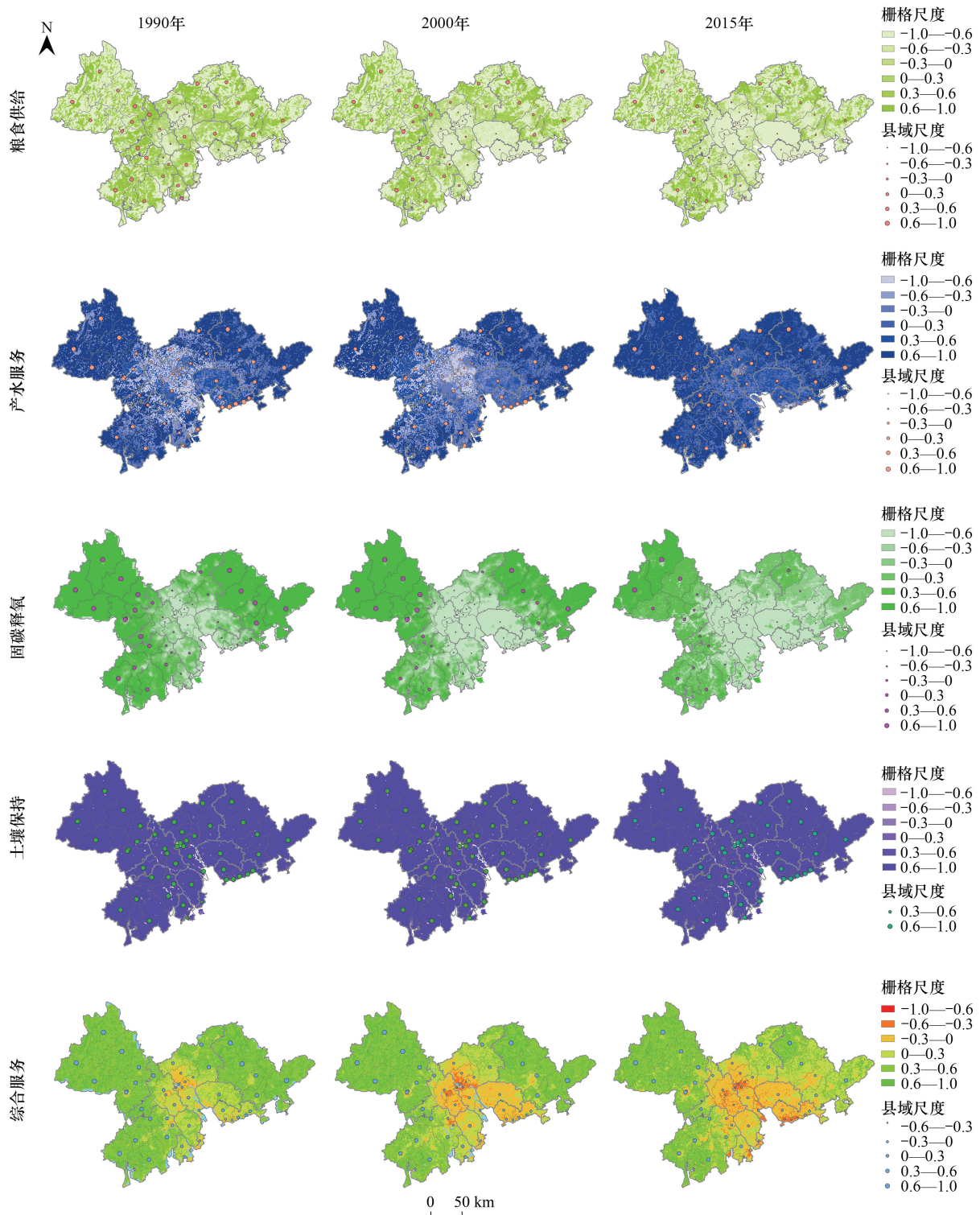


图4 1990—2015年珠三角城市群粮食供给、产水服务、固碳释氧、土壤保持和综合服务供需指数空间分布

Fig.4 The spatial distribution of the supply-demand index of grain production, water yield, carbon sequestration, soil conservation and integrated ecosystem services at grid and county level during 1990 and 2015 in the PRD

但在不断下降,由1990年的0.39下降到2000年的0.18,又下降到2015年的0.05,这主要是由固碳释氧和粮食供给服务的供需指数下降引起的。因此,珠三角城市群要重点关注粮食供给和固碳释氧服务,改善两者的

供需匹配关系。

4 讨论

4.1 珠三角城市群生态系统服务供需特征

厘清生态系统服务供需关系及空间特征,阐释区域生态系统服务供需的形成机制、生态演替过程及表现形式,可直接指导区域生态系统管理。目前,生态系统服务供需均衡关系大都采用生态系统服务供需矩阵的方法进行研究,还有一部分研究通过设计不同的指标分别核算生态系统服务供给和需求进行均衡分析,这些研究只能表达一个区域的供给和需求的相对关系,存在着对供需空间异质性刻画不足的问题。因此,从物质质量角度进行生态系统服务供需均衡关系分析的研究亟待开展^[23]。本研究采用遥感反演、水量平衡方程、RUSLE 和 CASA 等生态过程模型,分析了珠三角城市群粮食供给、产水服务、固碳释氧和土壤保持服务的时空演变特征;采用相关社会经济指标(以人定需、以能定需)量化不同生态系统服务需求,进而分析其供需均衡关系。

生态系统服务主要受气候变化和土地利用变化的影响^[24]。虽然气候要素的偶然性波动影响着生态系统服务的供给水平,但基于历年数据评估某些时间节点的生态系统服务也能较好的刻画其演变趋势。研究发现,生态系统服务供给方面,珠三角城市群粮食供给和固碳释氧相较于产水服务和土壤保持下降明显。从需求方面看,除土壤保持服务下降之外,其余三种生态系统服务的需求量呈明显增加的趋势,这与 Zhang 等^[25]的研究结果一致。由于供给和需求变化趋势相反,造成了近年来珠三角城市群的粮食供给、固碳释氧服务的供需均衡关系逐年恶化,一方面是由于城市化发展占用了部分耕地和生态用地,另一方面是由于人口增加和社会经济的发展对生态系统服务需求不断增加。这种日趋紧张的供需均衡关系在珠三角中部平原地区尤为突出,即广州、佛山、东莞、中山和深圳;在江门、肇庆、珠海和惠州等低山丘陵地带,生态系统服务供需均衡关系较为缓和,这些发现与 Xu 等^[26]的研究结论相近。

4.2 珠三角城市群多尺度下生态系统服务供需均衡关系

生态系统服务供需均衡关系是区域生态系统管理的基础,也是区域生态可持续性的重要保障。目前,相关研究侧重于栅格^[27]、县域^[28]、流域^[29]或省域^[11]等单一尺度,然而生态系统服务供给和需求具有时空异质性和空间尺度效应特征^[30],因此,不同尺度的生态系统服务供需均衡关系并非独立存在,而是相互联系和相互影响;此外,其提供的生态管理或土地利用管理基础信息相互补充。栅格尺度的生态系统服务供需均衡关系详细刻画了区域微观尺度的生态状况;县域尺度均衡关系能把握市域内的不同生态系统服务主要供给区和需求区;市域尺度均衡关系有助于了解本地生态系统服务水平,明确生态系统服务对本地需求的供给状况。研究发现,随着研究尺度的变大,珠三角城市群部分区域的生态系统服务供需均衡关系得到了缓解,但在中部平原地区不同尺度下的供需均衡关系仍较为紧张。例如,肇庆市部分栅格尺度的固碳释氧服务不能满足其需求,但由于生态系统服务的空间流动性,其市域尺度的固碳释氧服务的供给大于其需求量。

4.3 珠三角城市群生态系统管理对策及建议

珠三角城市群实施的一系列生态工程(例如,森林碳汇工程和矿山生态修复工程)对于改善生态环境和提升生态系统服务水平具有重要意义,但由于社会经济系统对生态系统服务需求较大,对于缓解生态系统服务供需矛盾作用有限,供需状况仍在逐渐恶化。从粮食供给和固碳释氧服务看,珠三角城市群生态系统服务供给远小于生态系统服务需求,尤其是在中部平原地区;就产水服务看,也存在着 11 个县市不能满足其当地水资源需求的现象。栅格、县域和市域三个尺度的粮食供给服务和固碳释氧服务的供需指数相对于另外两种服务较低,因此,肇庆、江门、惠州和广州东北部等低山丘陵地带应实施封山育林、退耕还林政策,优化耕地空间布局,提升土地资源利用率,严禁占用优质耕地;修复粮食产量和固碳释氧服务较高区域的受损关键单元(例如,肇庆和江门的耕地破碎化明显),形成集中连片的粮食高产区和固碳释氧高值区;广州、佛山、东莞、深圳、中山和珠海等生态系统服务需求高值区应适当通过建立城市副中心的方式适当降低人口密度,修

建与供给区相联系的生态廊道,优化生态空间格局;建立需求区向供给区的生态补偿机制,提升人民福祉水平。此外,对于粮食供给来说,珠三角城市群还需要与国内外粮食主产区之间建立完善的粮食物流基础设施,同时提升粮食的储备能力。

5 结论

本研究采用物质质量评估方法核算了珠三角城市群四项生态系统服务供给量及需求量;分析了栅格、县域和市域尺度生态系统服务供需均衡关系,探究了其时空演变特征,得到以下结论:

(1) 1990—2015 年,除粮食供给服务外,产水服务、固碳释氧和土壤保持服务均呈现出不同程度的增加趋势;除产水服务服务,另外三种生态系统服务在空间上表现出中部平原地区生态系统服务水平低,低山丘陵地带服务水平高的空间分布特征。

(2) 珠三角城市群生态系统服务的需求量波动性增加,并且各种生态系统服务需求在空间分布上比较一致:中部平原地带需求量较高,三面低山丘陵地带需求量较低。

(3) 珠三角城市群土壤保持和产水服务供需数量匹配较好,整体上供给量大于需求量;粮食供给和固碳释氧服务的供需指数不断降低,供需关系日益恶化,2015 年分别下降到-0.47 和-0.71。虽然综合生态系统服务供给大于需求,但是供需指数不断降低。生态系统服务供需空间差异性明显,中部平原地区的供需指数相对较低。

(4) 政府需要在低山丘陵地带实施封山育林、退耕还林政策,优化耕地布局,修复粮食生产和固碳释氧服务较高区域的受损关键单元;中部平原地区应适当降低人口密度,修建与供给区相连通的生态廊道,提升人民福祉水平,从而促进珠三角城市群生态与社会经济可持续发展。

参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰,张立伟. 土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展.地理科学进展,2014,33(04):441-446.
- [2] 欧维新,王宏宁,陶宇. 基于土地利用与土地覆被的长三角生态系统服务供需空间格局及热点区变化.生态学报,2018,38(17):6337—6347.
- [3] 傅伯杰,于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法.资源科学,2016,38(01):1-9.
- [4] 吴健生,门·新纳,梁景天,赵宇豪. 基于基尼系数的生态系统服务供需均衡研究——以广东省为例.生态学报,2020,40(19):6812—6820.
- [5] 张豆,渠丽萍,张桀漓. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化——以长三角地区为例.生态学报,2019,39(20):7525—7537.
- [6] 谢高地,曹淑艳,鲁春霞,肖玉,章予舒. 中国的生态服务消费与生态债务研究.自然资源学报,2010,25(1):43—51.
- [7] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, Haines-Young R, Montes C. National Parks, buffer zones and surrounding lands: Mapping ecosystem service flows. ECOSYST SERV, 2013, 4: 104—116.
- [8] Burkhard B, Kroll F, Müller F, Windhorst W. Landscapes' capacities to provide ecosystem services-A concept for land-cover based assessments. Landscape Online, 2009, 15: 1—22.
- [9] 董潇楠,谢苗苗,张覃雅,王萌辉,郭雪莹. 承灾脆弱性视角下的生态系统服务需求评估及供需空间匹配.生态学报,2018,38(18):6422—6431.
- [10] 胡其玉,陈松林. 基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化.自然资源学报,2021,36(02):342—355.
- [11] 杨冕,张艺千,王春晓. 湖北省关键生态系统服务供需状况的时空变化研究.长江流域资源与环境,2019,28(9):2080—2091.
- [12] 陈骏宇,王慧敏,刘钢,白杨. “水-能-粮”视角下杭嘉湖区域生态系统服务供需测度及政策研究.长江流域资源与环境,2019,28(03):542—553.
- [13] 王壮壮,张立伟,李旭谱,李英杰,王鹏涛,延军平. 区域生态系统服务供需风险时空演变特征——以陕西省产水服务为例.生态学报,2020,40(06):1887—1900.
- [14] Kuri F, Murwira A, Murwira K S, Masocha M. Predicting maize yield in Zimbabwe using dry dekads derived from remotely sensed Vegetation Condition Index. INT J APPL EARTH OBS, 2014, 33: 39—46.
- [15] Kinnell P I A. Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. J HYDROL, 2010, 385(1-4):384—397.
- [16] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: A process model

- based on global satellite and surface data. *GLOBAL BIOGEOCHEM CY*, 1993, 7(4): 811—841.
- [17] Zhao M, Peng J, Liu Y, Li T, Wang Y. Mapping Watershed-Level Ecosystem Service Bundles in the Pearl River Delta, China. *ECOL ECON*, 2018, 152: 106—117.
- [18] Zhan J, Liu W, Wu F, Li Z., Wang C. Life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions of urban residential buildings in Guangzhou city. *J CLEAN PROD*, 2018;S0959652618314616.
- [19] Ghosh T, Elvidge C D, Sutton P C, Baugh K E, Ziskin D, Tuttle B T. Creating a Global Grid of Distributed Fossil Fuel CO₂ Emissions from Nighttime Satellite Imagery. *ENERGIES*, 2010, 3(12): 1895—1913.
- [20] 刘立程, 刘春芳, 王川, 李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. *地理学报*, 2019, 74(09): 1921—1937.
- [21] Hu T, Wu J, Li W. Assessing relationships of ecosystem services on multi-scale: A case study of soil erosion control and water yield in the Pearl River Delta. *ECOL INDIC*, 2019, 99:193-202.
- [22] 张蓬涛, 刘双嘉, 周智, 刘春敬, 徐磊, 高星. 京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变. *生态学报*, 2021, 41(9): 3354—3367.
- [23] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 杜昱璇. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780—2796.
- [24] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. *生态学报*, 2013, 33(03): 726-736.
- [25] Zhang Z, Peng J, Xu Z, Wang X, Meersmans J. Ecosystem services supply and demand response to urbanization: A case study of the Pearl River Delta, China. *ECOSYST SERV*, 2021, 49: 101274.
- [26] Xu Q, Yang R, Zhuang D, Lu Z. Spatial gradient differences of ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta region. *J CLEAN PROD*, 2021, 279: 123849.
- [27] 王盈丽, 徐新良, 庄大春, 董贤斌, 杨雪青, 邹好阳, 樊简, 刘雅菲. 湖南省生态系统服务供需格局演变. *生态学杂志*, 2021, 40(10): 3268-3277.
- [28] 彭建, 杨旻, 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.
- [29] Chen D, Li J, Yang X, Zhou Z, Pan Y, Li M. Quantifying water provision service supply, demand and spatial flow for land use optimization: A case study in the YanHe watershed. *ECOSYST SERV*, 2020, 43: 101117.
- [30] 申嘉澍, 李双成, 梁泽, 王玥瑶, 孙福月. 生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望. *自然资源学报*, 2021, 36(8): 1909-1922.