

长三角城市群生态系统服务供需格局与影响因素研究

李成¹ 赵洁^{2,31}

(1. 中国矿业大学 建筑与设计学院, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏师范大学 “一带一路” 研究院, 江苏 徐州 221009;

3. 江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 江苏 徐州 221116)

【摘要】: 揭示生态系统服务供需关系时空演变特征与关键驱动过程, 对生态空间的科学管理和资源的高效配置具有重要意义。以长三角城市群为研究区, 通过供需矩阵法测度 2000 年和 2015 年生态系统服务供给和需求, 利用供需匹配度指数分析供需关系时空演变特征, 运用地理加权回归模型量化影响因子的作用强度, 揭示各因素对生态系统服务供需影响的空间分异特征。结果表明: 长三角城市群整体上供需处于盈余状态, 但供需关系趋于紧张; 供需匹配度呈现北低南高的分布格局, 供需赤字区域主要集中在上海、苏南、杭州湾, 供需盈余地区主要集中在皖南、浙西和浙南; 年平均气温、年降雨量、建设用地比例、耕地比例、GDP 和人口密度等因子对供需关系具有显著影响, 其作用关系和强度具有空间异质性。

【关键词】: 生态系统服务 供需匹配 驱动因素 地理加权回归 长三角城市群

【中图分类号】: X196; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2022)09-160-10

区域社会经济的快速发展导致生态系统结构不断发生重构, 进而对生态系统服务功能的影响日益加剧^[1,2,3]。2019 年, 《全球生物多样性和生态系统服务评估报告》指出, 迄今为止全球 75% 的陆地环境受人类活动影响而发生严重改变, 绝大多数生态系统服务功能迅速下降^[4]。生态系统服务的供给与需求共同构成生态系统服务从自然生态系统流向人类社会系统的动态过程^[5]。生态系统服务供需关系是有效反映区域社会经济结构与自然生态本底是否能够协调发展的重要表征^[6]。随着区域社会经济的快速发展和国土空间的高强度开发, 生态本底不断遭到破坏, 生态系统服务供给大幅缩减, 而人们对于良好人居环境的需求与日俱增, 从而导致供需关系愈发紧张, 严重影响区域的可持续发展与人类福祉^[7]。如果仅从生态系统服务供给的角度进行管理和优化, 而忽视社会经济发展对生态系统服务的需求, 将难以实现区域生态系统的科学管理和可持续发展^[8]。对城市群生态系统服务供需关系以及影响因素进行研究, 有助于明晰城市群内部各区域之间自然生态本底与人居环境需求之间的关联, 可为城市群制定生态系

作者简介: 李成, 博士, 副教授, 研究方向为区域景观过程、城镇化与生态环境效应。赵洁, 博士, 讲师, 研究方向为国土空间开发与保护。E-mail: jiezhao@jsnu.edu.cn;

基金项目: 国家自然科学基金项目“煤炭资源型城市生态系统服务供需匹配与居民福祉耦合机理及调控研究”(42001241); 国家自然科学基金项目“长三角城市群三生空间演化机理与优化调控研究”(41801197); 江苏省社会科学基金项目“基于生态系统服务供需匹配的居民福祉提升路径研究”(20SHD010)

cn), 空间分辨率为 30m。②地形数据, 采用数字高程模型 (DEM), 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>), 空间分辨率为 30m。③气象数据, 来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 所提供的逐年年平均气温、年降水量空间插值数据集, 空间分辨率为 1km。④长三角城市群社会经济数据, 来源于 2001 年和 2016 年的《中国城市统计年鉴》《中国县域统计年鉴》以及长三角城市群 26 市的统计年鉴。

2 研究方法

2.1 生态系统服务供给和需求测算

针对长三角城市群的自然生态本底与社会发展对生态系统服务需求特点, 结合数据的可获取性, 采用 Burkhard 等^[11]提出的生态系统服务供需评价矩阵法, 从供给服务、调节服务和文化服务三个方面对长三角城市群生态系统服务供给量和需求量进行测算。

在原始供需测算矩阵的基础上, 本研究邀请了对研究区的自然及社会环境非常了解, 并且具有景观生态学和地理学学科背景的 6 位专家, 针对 6 类用地的生态系统服务的供需水平进行评分, 对原始供需矩阵进行调整。供需水平分值在 0~5 之间, 0 分表示无供给或无需求, 5 分表示最大供给量或最大需求量, 分值越大, 供给能力/需求水平越高。在此基础上形成针对研究区的生态系统服务供给矩阵和需求矩阵。生态系统服务供给矩阵确定了不同土地利用类型所提供的特定服务的能力, 而需求矩阵反映了特定土地利用类型对生态系统服务的需求。依据供给和需求矩阵对长三角城市群生态系统服务的供给和需求进行测度。

2.2 生态系统服务供需关系分析

本文通过构建供需匹配度 (SDI) 刻画生态系统服务的供需匹配状况, 具体计算公式如下:

$$SDI = \frac{ES_s - ES_D}{ES_D} \quad (1)$$

式中: SDI 为生态系统服务供需匹配度; ES_s 为生态系统服务供给量; ES_D 为生态系统服务需求量。SDI>0 表示供给大于需求, 即盈余状态; SDI=0 表示供给等于需求, 即供需平衡状态; SDI<0 表示供给小于需求, 即赤字状态。

在供需匹配度测算的基础上, 本文利用 Moran' sI 指数分析供需匹配度全局自相关性, 从而从全局层面衡量空间关联性和变异性。Moran' sI 指数的取值范围为[-1, 1], Moran' sI>0 表示空间正相关性, 其值越大, 空间相关性越显著; Moran' sI<0 表示空间负相关性, 其值越小, 空间差异越大; Moran' sI=0, 表明空间呈随机性分布。

局部空间自相关分析可反映空间上某一研究单元的属性值同其邻接单元上同一属性值的相关和空间聚集程度^[25]。本文借助局部自相关指数 (LISA) 识别具有统计显著性的高—高聚集区、低—低聚集区、高—低聚集区、低—高聚集区的空间聚类模式, 揭示生态系统服务供需匹配度的空间集聚分布格局演化趋势。

2.3 生态系统服务供需关系影响因素分析

综合考虑长三角城市群的自然现状、发展特点以及数据的可获取性, 结合自然和人类活动影响, 在县域尺度上, 选取 8 个潜在影响因素, 分别为坡度、年降雨量、年均气温、林地比例、耕地比例、建设用地比例、单位面积 GDP、人口密度。为避免影响因子的多重共线性和冗余问题, 本研究采用普通最小二乘法 (OLS) 回归模型, 通过选取方差膨胀因子 (VIF) 和显著性 P 值来筛选关键影响因素。

在关键影响因素筛选的基础上, 本文利用地理加权回归 (GWR) 模型分析不同因素对生态系统服务供需匹配度作用关系的空间分布情况。不同于传统的回归模型, GWR 模型将空间位置融入模型中, 考虑了不同空间位置指标对回归结果的影响, 能够充分展现自变量与因变量之间的作用关系在不同空间地理位置的分布特征, 从而有效解决了传统回归模型无法揭示回归系数空间异质性的问题^[26], 公式为:

$$y_i = \beta_0(\mu_i, \nu_i) + \sum_{k=1}^i \beta_k(\mu_i, \nu_i)x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中: y_i 是空间位置 i 上的因变量 (生态系统服务供需匹配度); (μ_i, ν_i) 是空间位置 i 的坐标; x_{ik} 是第 k 个解释变量在空间位置 i 上的值; $\beta_0(\mu_i, \nu_i)$ 为空间位置 i 处的空间截距; $\beta_k(\mu_i, \nu_i)$ 是第 k 个解释变量在空间位置 i 上的回归系数, 采用加权最小二乘法进行局部估算; ε_i 是残差。应用 GWR 模型首先要确定空间权重矩阵和带宽, 在本研究中空间权重矩阵通过高斯函数确定, 而最优带宽则依据赤池信息准则 (AIC) 法获得, 当 AIC 值最小时带宽最优。本文利用 ArcGIS10.5 空间统计工具中的 GWR 模块进行计算。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务供给和需求特征

利用生态系统服务价值专家评估矩阵法对长三角城市群供给服务、调节服务、文化服务的供给和需求进行估算。2000 年和 2015 年, 长三角城市群供给、调节和文化服务的总供给均大于总需求。基于 ArcGIS 空间分析模块, 以县域为基本空间, 对估算结果单元进行输出, 得到长三角城市群供给和需求的时空分布格局。

3.1.1 生态系统服务供给

总体来看, 长三角城市群供给服务的总供给量呈现持续减少趋势, 由 2000 年的 1.067×10^8 减少到 2015 年的 0.995×10^8 。研究区中的最大平均供给量位于苏州市的吴中区, 供给量由 2000 年的 8.204 减少到 2015 年的 7.687。而研究单元中的最小平均供给量位于上海市区, 其供给量由 2000 年的 0.588 减少到 2015 年的 0.584。长三角城市群供给服务供给量的空间格局具有较明显的区域分异性, 总体上呈现南低北高的趋势。其中, 供给高值区主要分布于农田较为集中的长三角城市群北部地区, 而低值区主要分布在长三角城市群南部地区。2000—2015 年, 供给服务供给量增加的区域主要集中在大丰市、东台市、射阳县和岱山县, 其中, 大丰市所增加的平均供给量最大, 为 0.118。大部分地区的供给服务供给量则呈现降低趋势, 苏州市区供给服务的平均供给量减少最为明显, 为 2.487 (图 2)。

长三角城市群调节服务的总供给量表现为降低趋势, 由 2000 年的 2.401×10^8 降低至 2015 年的 2.311×10^8 。由于城镇化的发展, 长三角城市群建设用地不断扩张, 导致生态用地面积不断缩减, 从而减弱了区域调节服务功能。图 2 表明各县域调节服务供给量差异显著, 呈现出南高北低的分布格局。调节服务供给量较高的区域主要集中在长三角南部林地资源较为集中的区域, 其中杭州市临安区调节服务的平均供给量在 2000 年和 2015 年均最高, 分别是 21.368 和 21.235, 而供给量的低值区主要集中在长三角城市群的北部地区, 其中上海市区的供给量最低, 分别为 0.531 和 0.529。2000—2015 年, 调节服务供给量增加的地区为池州市石台县, 其中, 苏州市区的调节服务供给量减少最为显著, 为 2.517。

文化服务的总供给量由 2000 年的 4.470×10^8 减少至 2015 年的 4.279×10^8 。如图 2 所示, 长三角城市群文化服务供给量具有较明显的分异性, 总体呈现南高北低的分布格局。其中, 文化服务供给量高值区主要分布在长三角城市群南部山区, 最高值位于淳安县, 2000 年和 2015 年淳安县文化服务平均供给量分别为 9.159 和 9.106。文化服务供给量低值区主要集中在长三角城市群社会经济发达地区, 如常州市区和上海市区, 常州市区 2000 年和 2005 年文化服务供给量平均值分别为 0.788 和 0.273。南部

山区林地与水体覆盖率高，因此具有较高的文化服务功能，而经济发达地区以城市用地为主，林地和水体较少，文化服务功能较低。2000—2005年，随着社会经济的快速发展，文化服务平均供给量小于2的县域由17个增加至29个，主要集中在长三角城市群北部地区。

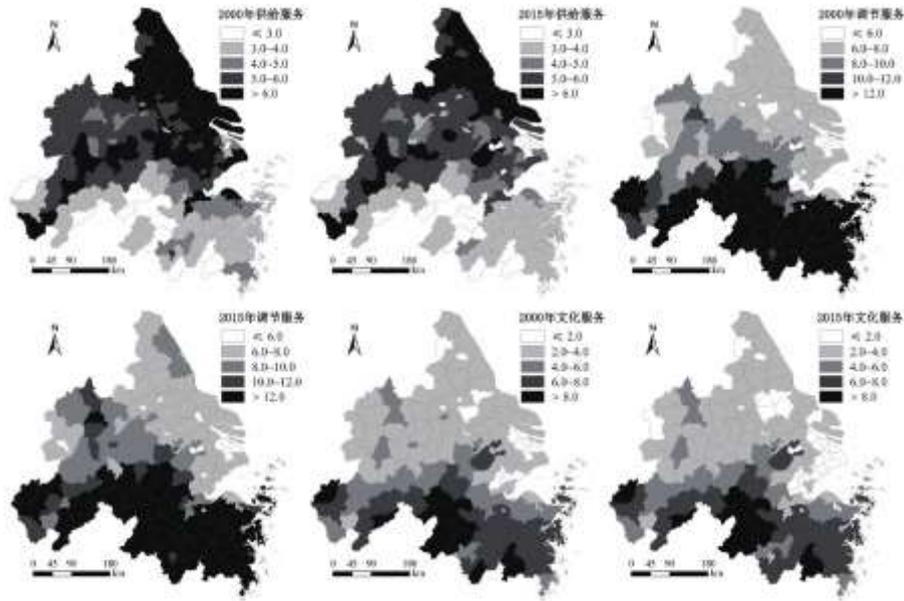


图2 2000—2015年长三角城市群生态系统服务供给空间分布

3.1.2 生态系统服务需求

总体来看，长三角城市群供给服务的总需求量由2000年的 0.567×10^8 增加到2015年的 0.701×10^8 。如图3所示，长三角城市群供给服务需求空间格局基本稳定，单位面积供给服务需求量呈现北高南低的格局，长三角城市群北部为主要的供给服务需求区，2000年和2015年最高值分别为14.116和14.123，位于上海市区，最低值分别为0.249和0.297，位于淳安县。长三角城市群的上海、苏州、常州、南京等区域的供给服务需求量较高。从时间变化上看，苏州、上海、南通、常州、无锡、合肥等长三角中部地区的供给服务需求量增加最为显著，其中苏州市区的单位面积需求增加量最大，为4.219。

2000—2015年，长三角城市群调节服务需求分布格局与供给服务需求基本一致，但需求总量呈上升趋势，由2000年的 1.403×10^8 上升到2015年的 1.584×10^8 。长三角城市群内部调节服务需求的差异较为显著。长三角城市群中部为调节服务需求的高值区，其中，2000年和2015年单位面积需求最高值分别位于上海市区和常州市区，而单位面积需求最低值位于淳安县。

长三角城市群文化服务需求总量呈现快速上升趋势，由2000年的 0.568×10^8 增加至2015年的 2.899×10^8 。上海、常州、扬州等地区是主要的文化服务需求区（图3），而需求低值区主要集中在淳安、石台、磐安等地区。从时间变化上看，各县域的文化服务需求量均有所增加。但不同区域增加程度不同，增加最快的地区为苏州市区和上海浦东新区，单位面积需求量分别增加了1.536和1.345。

3.2 生态系统服务供需关系分析

如图 4 所示，长三角城市群内部生态系统服务的供需分配具有一定的不均衡性，供大于求和供不应求的状况同时存在。从供需匹配度的空间分布可见，综合生态系统服务供需匹配度在长三角城市群内呈现北低南高的特点。长三角城市群北部多个地区供需匹配度均在 0 以下，表明该地区生态系统服务供需存在不匹配状况。供需匹配度小于-0.5 的供需严重不匹配区域呈逐年扩张趋势，数量由 2000 年的 9 个增加至 2015 年的 25 个，且主要集中在上海、苏南、杭州湾等社会经济水平较高的区域，生态系统服务供需平衡面临着紧张失调的风险。一方面，这类地区社会经济发展水平较高，且人口增长和城市扩张较为显著，农田和生态用地在城市快速扩张进程中被大量占用，生态系统服务的供给量相应缩小；另一方面，产业的发展与当地居民对于良好人居环境的需求导致生态系统服务的需求量不断上升，造成生态系统服务供需的严重不匹配。

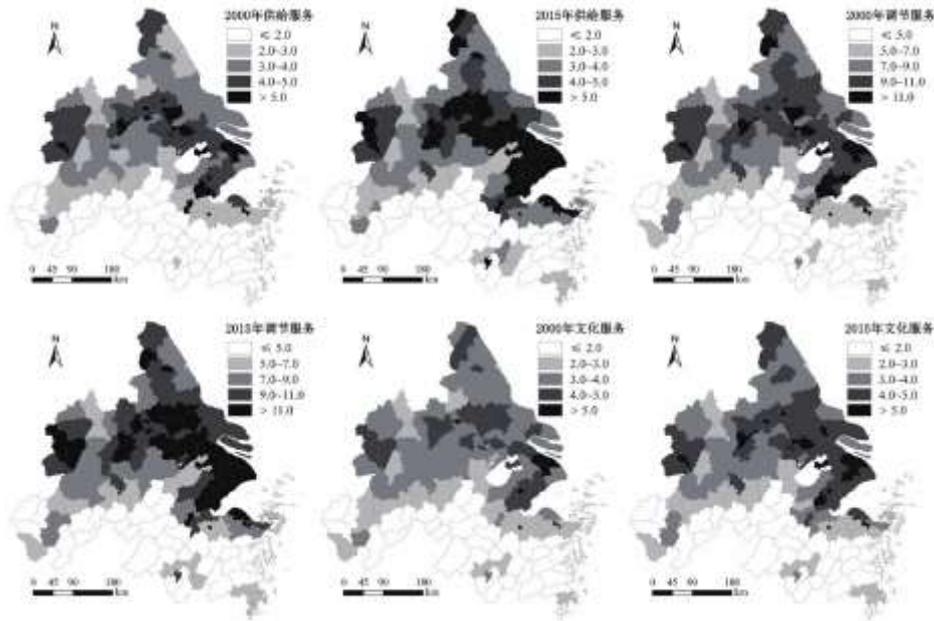


图 3 长三角城市群生态系统服务需求空间分布

供需匹配度大于 2.0 的地区集中在皖南、浙西、浙南地区，该地区生态资源丰富，是长三角地区重要的绿色生态屏障，并且设有较大规模的生态保护区，生态系统服务供给量较为充足。2000—2015 年，各个地区的供需匹配度均呈下降趋势，供需匹配状况趋于恶化。其中淳安和磐安的供需匹配度减少最为显著，分别为 4.494 和 3.216。尽管处于生态系统服务供给盈余地区，但是该类地区的社会经济快速发展导致生态系统服务需求不断增加，而生态本底在快速发展过程中受到扰动较大，从而导致供需匹配度发生了显著降低。

基于供需匹配度，利用 Moran' sI 指数和 LISA 进行长三角城市群生态系统服务供需匹配的全局和局部自相关分析。2000 年和 2015 年 Moran' sI 指数分别为 0.565 和 0.551。全局自相关分析结果表明，研究区 15 年间生态系统服务供需匹配度存在显著的空间正向关系，空间集聚显著。从时间变化上看，2015 年 Moran' sI 指数有所降低，说明长三角城市群供需匹配关系的空间集聚性有所减弱。

如图 5 所示，生态系统服务供需匹配度的 LISA 分析结果将长三角城市群在空间上划分为了一高一集聚、低一低集聚、低一高集聚和不显著四种类型区域，高一高集聚区主要集中在长三角城市群南部，该地区生态本底较好，生态功能完善，人口分布稀疏，受自然环境限制较大，社会经济发展相对缓慢。低一低集聚区主要集中在上海、苏南、杭州湾等地，生态系统服务供需匹配度较低。2015 年的 LISA 分析结果将金华市区划分为了一低一高集聚区，该地区生态系统服务供给量也面临着社会经济、城市用地和人口等方面的压力，供需关系较为紧张。与此同时，在金华市区周边则多为供需匹配度较高的区域。从时间变化上看，2000—

2015年，低—低集聚区的数量由27个增加至45个，而高一高集聚区的数量则从27个减少至17个，数量上的变化说明长三角城市群生态系统服务供需匹配关系区域恶化，生态风险在不断加大。

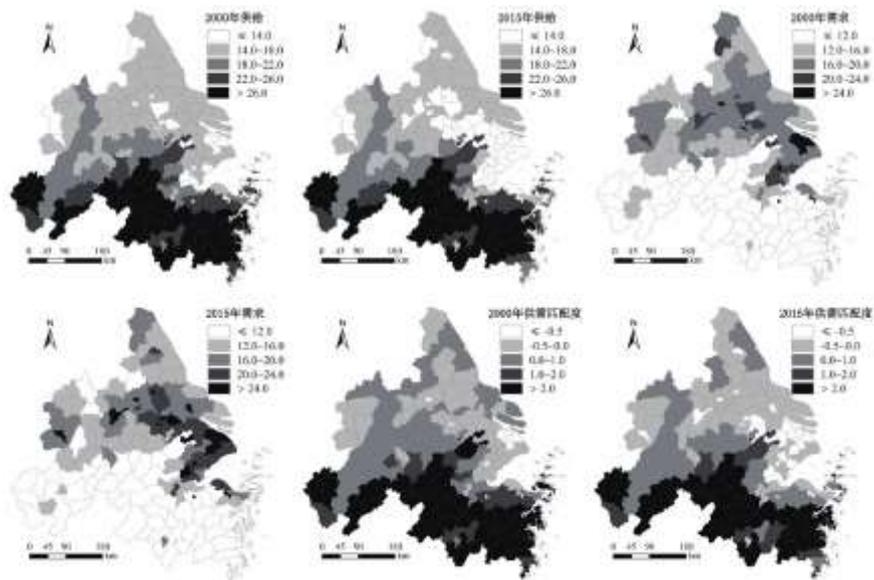


图4 长三角城市群生态系统服务供需匹配状况

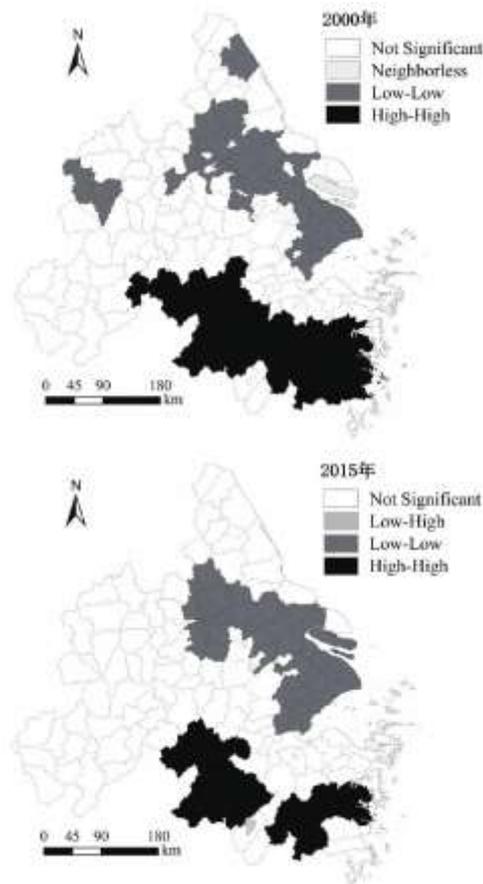


图 5 长三角城市群供需匹配度局部自相关图

3.3 生态系统服务供需匹配影响因素分析

为减少自变量存在共线性引起的 GWR 结果产生误差,需对自变量进行共线性诊断,并剔除存在共线性的自变量。本文利用方差膨胀系数(VIF)与显著性 P 检验来判定各自变量之间是否存在共线性。通过判断,将 VIF 大于 7.5 的因素(坡度、林地比例)排除在外,最终确定平均气温、降雨量、建设用地比例、耕地比例、单位面积 GDP 和人口密度作为 GWR 模型中的解释变量进行影响因子分析。

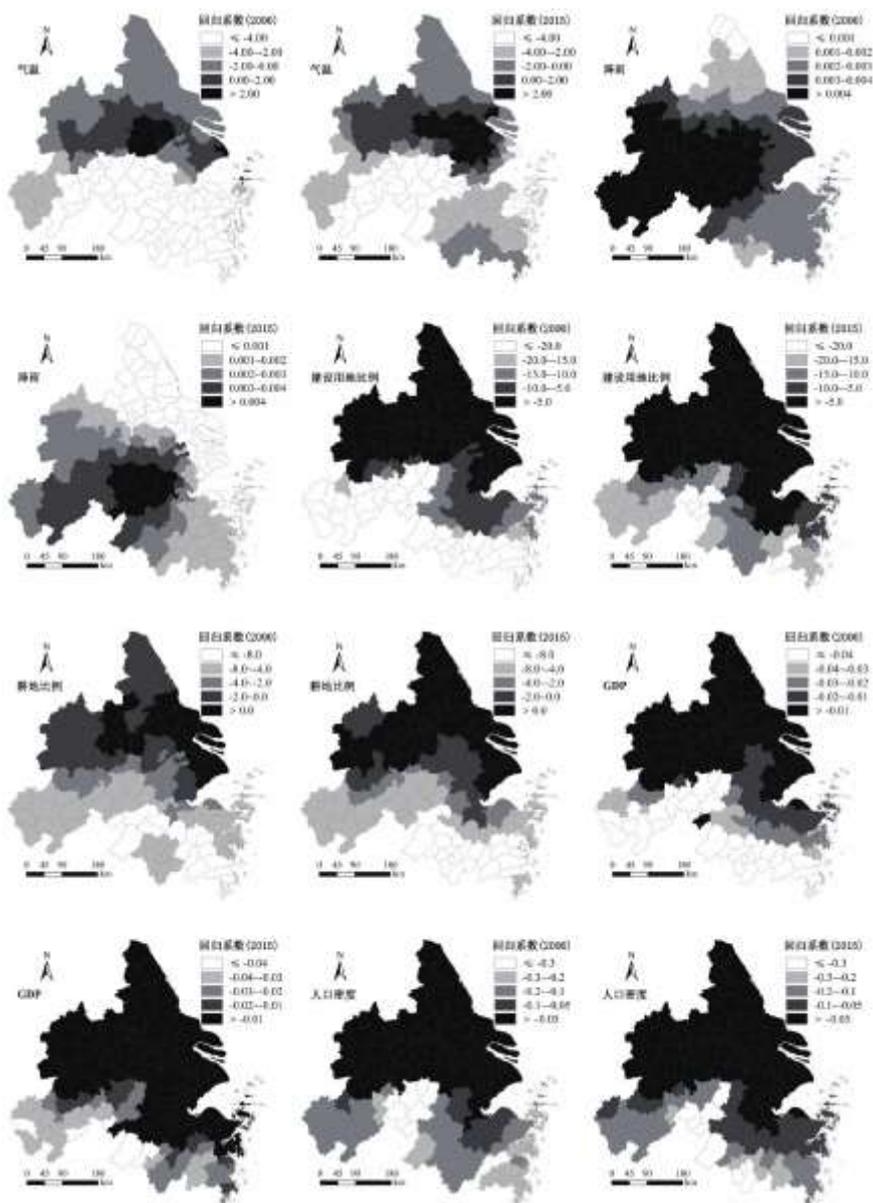


图 6 影响因子地理加权回归系数空间分布图

通过全局和局部自相关分析,长三角城市群生态系统服务供需匹配关系呈显著的空间自相关特征,表明以普通的线性回归

最小二乘法对供需匹配关系的影响因素进行分析可能会产生偏差。为了验证该假设，本研究分别利用 OLS 模型和 GWR 模型探究供需匹配关系空间分布的影响效应。通过对比两种模型的运行结果，GWR 模型调整后的拟合优度 (R^2) 相较 OLS 模型均有显著提高，AIC 值有明显降低，表明 GWR 模型表现优于 OLS 模型，能够更好地解释各因子对供需匹配关系空间分布的影响。相较于影响因子的全局作用分析，揭示关键影响因素及其作用的空间异质性对于生态系统管理与区域协调发展更具有显著指导意义。为此，本研究借助 GWR 模型深入剖析长三角城市群生态系统服务供需关系影响机制。不同影响因子回归系数的统计结果表明，影响因子对生态系统服务供需匹配度的作用关系具有空间非平稳性，可以此来揭示各因子在不同空间位置上对供需关系影响程度的差异性。

如图 6 所示，各影响因子的空间分布具有局部性和非均匀性，表明同一因子对不同空间位置处的生态系统服务供需关系的影响程度不同，存在显著的空间非平稳性。通过年平均气温地理加权回归系数分析结果（图 6）可见，气温对生态系统服务供需匹配关系的影响存在显著的空间异质性，从影响分析来看，其 2000 年的回归系数介于-11.219~5.612 之间，2015 年的回归系数介于-9.717~6.523 之间，表明气温对供需匹配度的正效应和负效应同时存在。空间分布上，苏中、皖南和浙江大部分区域的供需匹配度与平均气温呈现负相关，表明气温的上升会使供需关系趋于紧张，而在苏南地区，平均气温与供需匹配度呈正相关，该地区平均气温的升高会缓解供需关系紧张局面。

降雨量的回归系数均大于 0，表明降雨量对生态系统服务供需匹配具有正效应，降雨量的增加会提升供需匹配度，改善生态系统服务供需紧张的局面。空间分布上，回归系数高值区主要集中在长三角城市群西部，总体上自西到东逐渐降低，表明降雨对长三角城市群西部地区影响较强，对东部地区影响较弱。时间变化上，回归系数较大区域在逐步缩小，降雨量对供需匹配关系的作用力在逐步减弱。

通过对建设用地比例回归结果分析发现，建设用地对生态系统服务供需关系整体均为负效应，建设用地比例越高，生态系统服务供需匹配度越低。GWR 分析结果表明，建设用地比例回归系数绝对值由南到北递减，具有显著的梯度效应，即建设用地比例对供需匹配度的影响具有空间异质性。建设用地比例的增加对皖南、浙南地区生态系统服务供需关系影响最大，对江苏、皖中地区影响较弱。从时间变化上看，回归系数在-5.0 以上的区域不断扩大，而在-20.0 以下的区域不断缩小，表明建设用地对供需匹配度的影响程度在逐渐减弱。

耕地比例的回归系数空间分布格局表明，耕地比例对供需匹配度的作用关系具有显著的空间异质性，在长三角城市群的大部分地区，耕地比例对匹配度具有负效应，耕地的增加虽然会提高粮食产量，但是以占用生态用地为代价，导致调节服务供给能力下降，从而使供需匹配度降低。耕地比例对供需匹配度的正效应主要集中在上海和苏南地区，在 2015 年，正效应范围扩展至苏中和皖中地区，该类地区的城镇化速度较快，城市用地扩展显著，占用大量的耕地，导致供给服务功能的下降，从而引发供需关系的失衡。

从分析结果可见，对比 GDP、人口密度和建设用地比例的回归系数分布格局，可发现这 3 种影响因子对于生态系统服务供需匹配关系的影响是相似的，且随着时间的推移，回归系数的分布格局保持稳定。作为衡量经济社会发展的指标，单位面积 GDP 和人口密度对生态系统服务供需匹配度均呈现出负效应。社会经济的快速发展会造成生态系统服务需求量的激增，另外，对自然生态系统不断施加压力，生态系统服务功能持续退化，也会引起供需关系恶化。空间分布上，长三角城市群南部 GDP、人口密度和建设用地比例影响因子的回归系数绝对值大于北部地区。长三角南部山区是重要的绿色生态屏障区，植被覆盖率高，经济社会发展会占用生态用地，对生态系统服务供给的扰动要大于北部以耕地占用为主的发展方式，因此，相较于北方，社会经济发展对南部供需匹配度的影响力更显著。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文以长三角城市群为研究区，采用 2000 年和 2015 年的多源数据，结合生态系统服务供需矩阵和 ArcGIS 软件定量测度供给服务、调节服务和文化服务三类生态系统服务的供给、需求及其供需匹配度，在 OLS 模型支持下筛选出影响长三角城市群生态系统服务供需匹配关系的主要影响因素，采用 GWR 模型揭示其在时空尺度上对供需匹配关系的影响程度与作用机制，主要结论如下：

(1) 2000—2015 年，长三角城市群的供给服务、调节服务和文化服务在总量上均表现出供大于求的状态。在空间分布上，长三角城市群生态系统服务供给和需求存在较显著的区域分异性。随着经济社会的快速发展，生态系统服务总供给量呈现持续减少趋势，而总需求量在不断上升。

(2) 基于县域尺度的供需匹配度指数分析结果表明，生态系统服务供需匹配度在长三角城市群内呈现北低南高的特点，供需赤字区域主要集中在上海、苏南、杭州湾等社会经济发展水平较高地区，且在 2000—2015 年，供需赤字区域呈扩展趋势。供需盈余地区主要集中在皖南、浙西和浙南等生态资源丰富地区。

(3) 2000 年和 2015 年的 Moran' sI 指数分别为 0.565 和 0.551，长三角城市群供需匹配关系空间集聚性有所减弱，供需匹配度的空间集聚类型主要有两种，分别为高一高集聚和低一低集聚。高一高集聚区主要集中在长三角城市群南部，低一低集聚区主要集中在上海、苏南、杭州湾等地，2000—2015 年，低一低集聚区范围呈现不断扩张趋势，而高一高集聚区则表现为缩小趋势。

(4) 长三角城市群生态系统服务供需关系关键影响因子为平均气温、年降雨量、建设用地比例、农田比例、单位面积 GDP 和人口密度。降雨量呈现较明显的正相关作用特征，建设用地比例、单位面积 GDP 和人口密度表现为显著的负相关作用特征，年平均气温和耕地比例对供需匹配关系的正效应和负效应同时存在。在驱动强度特征中，各影响因素对生态系统服务供需关系的影响在空间上的表现存在显著差异，降雨量作用强度自西向东逐渐减弱，建设用地比例、单位面积 GDP 和人口密度对长三角城市群南部供需匹配度的影响力更为显著。

4.2 讨论

由于人类活动不断加剧，社会经济水平不断提升，生态系统服务供需矛盾日益突出，已成为影响人类福祉的重要因素^[6,19]，本研究可为城市群的生态系统管理与国土空间规划提供参考依据。长三角城市群生态系统服务供需关系与京津冀以及珠三角城市群类似^[27,28]。一方面，经济发展水平高、人口密度大、城市中心建设用地需求增加导致生态系统服务需求增加；另一方面，生态系统服务的供给能力在不断削弱，城市群外围生态屏障和生态保护重点区域是整个城市群生态系统服务供给的核心区域，但其需求相对较低，因此，表现为供需盈余状态。相关研究表明，自然环境与人类活动等多因素在不同程度上共同影响生态系统服务的供给和需求^[29]。本文通过 GWR 模型，揭示相关驱动因素对生态系统服务供需关系的作用关系，结果表明各主要驱动因素在不同区域的作用方向和程度呈现异质性特征，可为区域差异化生态管理策略的制定与实施提供重要的决策依据^[30,31]。

长三角城市群中生态系统服务赤字区域具有社会经济发展水平高且城市扩张迅速等特点，区域自然生态本底提供的生态系统服务严重不能满足社会经济发展与当地居民需求，同时，在该地区快速发展的背景下，供需矛盾不断激化。针对该类型的地区，一方面，在发展过程中要按照生态红线对现有生态空间存量进行严格保护，合理开展生态空间的规划与修复；在城市内部，可通过绿色基础设施建设，提升城市内部生态系统服务供给水平。另一方面，推进土地集约利用，采用向“土地存量”要“发展增量”的发展策略，从而降低生态系统服务需求水平，缓解供需紧张的局面。长三角城市群中生态系统服务盈余地区主要集中在长三角城市群南部山区，该地区是长三角城市群主要生态屏障，生态系统结构完整，供给水平较高，但社会经济整体发展水平较低。在促进社会经济发展的同时，依托自然保护区合理划定生态红线，适当引入绿色产业，建立健全生态安全监测与预警机制，严格把控城市发展规模，降低社会经济发展对生态本底的侵扰。针对生态系统服务供需基本匹配的地区，在发展过程中应保持良好的自然生态本底，结合当地自然资源承载力和国土空间开发适宜性，合理划定城镇开发边界，通过合理的发展空间与生态保护

布局规划使生态系统服务供需关系水平保持稳定。

目前本研究仍存在一定的局限性，生态系统服务可以在不同的时空尺度上产生^[32]，而不同尺度生态本底及社会经济条件的差异则会造成生态系统服务供给和需求的类型、能力水平、空间特征等多方面的差异性，本文从县域尺度出发研究生态系统服务供需关系，在后续研究中可针对多重尺度开展供需关系的研究，揭示其尺度效应与尺度异质性，有助于制定出更有针对性和可实施性的区域生态系统管理策略。

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]. Nature, 1997, 387:253-260.
- [2]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(4):1278-1288.
- [3]朱颖, 吕寅超. 基于生态系统服务价值优化模型的生态安全格局构建虚拟——以苏州市吴江区为例[J]. 现代城市研究, 2020(8):89-97.
- [4]IPBES(Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services[R]. Bonn:IPBES Secretariat, 2019.
- [5]张立伟, 傅伯杰. 生态系统服务制图研究进展[J]. 生态学报, 2014(2):316-325.
- [6]吴健生, 门·新纳, 梁景天, 等. 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[J]. 生态学报, 2020(19):6812-6820.
- [7]刘晶晶, 王静, 戴建旺, 等. 黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异[J]. 自然资源学报, 2021(1):148-161.
- [8]Schirpke U, Candiago S, Vigl L E, et al. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651:928-941.
- [9]MEA(Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and human well-Being[M]. Washington DC:Island Press, 2005.
- [10]张平, 朱翔, 贺清云, 等. 长江经济带生态系统服务供需时空分异与平衡格局分析[J]. 生态科学, 2020(6):155-166.
- [11]Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. Ecological Indicator, 2012, 21:17-29.
- [12]Peng J, Wang X Y, Liu Y X, et al. Urbanization impact on the supply-demand budget of ecosystem services: Decoupling analysis[J]. Ecosystem Services, 2020, 44:101139.
- [13]陈登帅, 李晶, 张渝萌, 等. 延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究[J]. 生态学报, 2020(1):112-122.

-
- [14]刘立程,刘春芳,王川,等.黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例[J].地理学报,2019(9):1921-1937.
- [15]吴晓,周忠学.城市绿色基础设施生态系统服务供给与需求的空间关系——以西安市为例[J].生态学报,2019(24):9211-9221.
- [16]白杨,王敏,李晖,等.生态系统服务供给与需求的理论与管理方法[J].生态学报,2017(17):5846-5852.
- [17]陈骏宇,王慧敏,刘钢,等.“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[J].长江流域资源与环境,2019(3):542-553.
- [18]谢余初,张素欣,林冰,等.基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区[J].自然资源学报,2020(1):217-229.
- [19]张蓬涛,刘双嘉,周智,等.京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变[J].生态学报,2021(9):3354-3367.
- [20]刘春芳,王伟婷,刘立程,等.西北地区县域生态系统服务的供需匹配——以甘肃古浪县为例[J].自然资源学报,2020(9):2177-2190.
- [21]翟天林,王静,金志丰,等.长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析[J].生态学报,2019(15):5414-5424.
- [22]潘梅,陈天伟,黄麟,等.京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素[J].生态学报,2020(15):5151-5167.
- [23]王庭辉,王喜,秦耀辰,等.丹江口库区生态系统服务价值与人类活动时空关联分析[J].长江流域资源与环境,2021(2):330-341.
- [24]吴会慧,赵艳玲,李素萃.基于 GEE 的淮南市土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J].生态经济,2021(2):146-152.
- [25]陈红娟,冯文钊,焦新颖.京津冀城市绿色发展水平及发展效率的时空格局演化[J].生态经济,2021(4):96-102.
- [26]Fotheringham A S,Brunsdon C,Charlton M.Geographically weighted regression[M].New York:Wiley,2002.
- [27]武爱彬,赵艳霞,沈会涛,等.京津冀区域生态系统服务供需格局时空演变研究[J].生态与农村环境学报,2018(11):968-975.
- [28]Xu Q,Yang R,Zhuang D C,et al.Spatial gradient differences of ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta region[J].Journal of Cleaner Production,2021,279:123849.
- [29]Sun X,Tang H J,Yang P,et al.Spatiotemporal patterns and drivers of ecosystem service supply and demand across the conterminous United States:A multiscale analysis[J].Science of the Total Environment,2020,703:135005.
- [30]Day J,Lewis B.Beyond univariate measurement of spatial autocorrelation:disaggregated spillover effects for Indonesia[J].Annals of GIS,2013,19:169-185.

[31] 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[J]. 生态学报, 2018(17):6337-6347.

[32] de Groot R S, Alkemade R, Braat L, et al. Challenges in integrating the concept of ecosystem services and values in landscape planning, management and decision making[J]. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3):260-272.