

湖南省多尺度生态系统服务供需关系及影响因素

杨君¹, 唐兴隆¹, 袁淑君², 孙颖¹, 刘畅¹, 王义博¹

(1.湖南农业大学 资源学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南工程职业技术学院, 湖南 长沙 410000)

摘要: [目的] 分析生态系统服务供需分布格局及主要驱动因素, 为区域生态保护实践、生态环境改善提供科学参考。[方法] 借助 InVEST 模型、ArcGIS 等工具, 评估湖南省 2000—2020 年粮食生产、碳固持、水源涵养、土壤保持以及生境质量共 5 项生态系统服务供需量, 分析其时空演变规律和空间匹配关系, 在网格尺度和县域尺度运用最优参数地理探测器模型探究影响生态系统服务供需比的驱动因子。[结果] ① 湖南省生态系统服务供给总量均大于需求总量, 碳固持服务和生境质量服务供给量以及水源涵养服务需求量下降, 其他生态系统服务供需量均上升。② 湖南省各项生态系统服务供需分布、供需比集聚特征以及供需空间匹配空间异质性明显。③ 两种尺度生态系统服务供需比主导因子有一定差异, 社会经济因子在县域尺度上的影响较网格尺度更为显著; 土地利用因子与其他因子的交互作用对生态系统服务供需比空间分异解释力较高。[结论] 不同尺度生态系统服务供需矛盾突出, 未来各级政府应制定更加精确的生态管理措施, 并以此为基础促进区域土地合理利用, 最终达到区域绿色发展的目标。

关键词: 生态系统服务; 供需平衡; 地理探测器; 驱动力; 湖南省

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0272-10

中图分类号: X171.1

文献参数: 杨君, 唐兴隆, 袁淑君, 等. 湖南省多尺度生态系统服务供需关系及影响因素[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 272-281. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.033; Yang Jun, Tang Xinglong, Yuan Shujun, et al. Supply and demand of multi-scale ecosystem services and their influencing factors in Hu'nan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 272-281.

Supply and Demand of Multi-scale Ecosystem Services and Their Influencing Factors in Hu'nan Province

Yang Jun¹, Tang Xinglong¹, Yuan Shujun², Sun Ying¹, Liu Chang¹, Wang Yibo¹

(1. College of Resources, Hu'nan Agricultural University, Changsha, Hu'nan, 410128,

China; 2. Hu'nan Vocational College of Engineering, Changsha, Hu'nan, 410000, China)

Abstract: [Objective] The distribution pattern of ecosystem service supply and demand and their main driving factors were analyzed in order to provide a scientific reference for regional ecological protection practices and ecological environmental improvement. [Methods] The supply and demand of five ecosystem services in Hu'nan Province from 2000 to 2020 were assessed, including food production, carbon sequestration, water conservation, soil conservation, and habitat quality by use of the InVEST model, ArcGIS, and other tools to analyze their spatial and temporal evolution patterns and spatial matching relationships, and to determine the driving factors affecting the supply-demand ratios of ecosystem services at the grid scale and county scale using an optimal parameter geodetector model. [Results] ① The total supply of ecosystem services in Hu'nan Province was greater than the total demand. The supply of carbon sequestration services and habitat quality services as well as the demand for water conservation services decreased over time, while the supply and demand of other ecosystem services increased. ② The distribution of supply and demand of various ecosystem services in Hu'nan Province, the clustering characteristics of

收稿日期: 2023-05-16

修回日期: 2023-06-16

资助项目: 湖南省自然资源厅科技计划项目“洞庭湖区城镇化与土地生态服务价值耦合关系研究”(20230175LY); 2023 年湖南省研究生科研创新项目“湖南省多尺度生态系统服务供需关系及影响因素研究”(CX20230735)

第一作者: 杨君(1976—), 女(汉族), 湖南省邵阳市人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事土地资源管理方面的研究。Email: yangjun_ly@163.com。

通信作者: 袁淑君(1983—), 女(汉族), 湖南省绥宁县人, 硕士, 副教授, 主要从事土地资源管理方面的研究。Email: 393544284@qq.com。

supply-demand ratios, and the spatial heterogeneity of the spatial matching of supply and demand were obvious. ③ There were some differences in the dominant factors of ecosystem service supply-demand ratios between the two scales, and the influence of socio-economic factors was more significant at the county scale than at the grid scale. The interaction between land use factors and other factors explained the spatial variation of ecosystem service supply-demand ratios more strongly. [Conclusion] The contradiction between supply and demand of ecosystem services at different scales was exceptional, and government agencies at all levels should develop more precise ecological management practices in the future, and use them as a basis to promote the rational use of regional land and to ultimately achieve the goal of regional green development.

Keywords: ecosystem services; supply and demand; geodetector; driving forces; Hu'nan Province

生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中获得的各种效用或产品,包含供给、支持、调节、文化共 4 类服务,是连接自然环境系统与人类社会系统的桥梁^[1]。生态系统服务供给是指生态系统提供的可供人类使用的各项服务^[2]。生态系统服务需求是指人类在生态系统中消费或使用的各项服务。生态系统服务供需关系能有效反映区域社会经济发展与自然环境本底是否协调^[3]。自进入 21 世纪以来,中国工业化和城市化进程快速推进,2020 年全年国内生产总值首次超过 100 万亿,经济高速发展的同时,生态环境问题层出不穷,国家生态安全受到严重威胁^[4]。因此开展生态系统服务供需评估,探究生态系统服务空间分异的影响因素对于区域科学管理具有重要意义。

早期针对生态系统服务供需关系的研究注重概念的界定与框架的构建,研究尺度单一、研究对象有限;近些年随着研究的深入,技术的创新,研究尺度更加多元、研究方法更加丰富,生态系统服务供需的评估及其驱动力的分析逐渐成为关注的重点^[5]。经验统计模型法、公众参与法、生态价值当量法、生态模型法等成为供需评估的常用方法^[6],已经广泛运用于不同区域各类生态系统服务的研究。如 Chen 等^[7]量化了产水、固碳等服务的供需量,分析了京津冀地区生态系统服务主要供需模式;赵雪雁等^[8]以黄土高原地区为例,绘制了粮食生产、土壤保持等多项生态系统服务供需关系图。林菲等^[9]评估了汾河流域生态系统服务价值的多年时空变化特征。对生态系统服务影响因素的定性研究能说明生态系统服务与各类影响因子间的关系,难以确定各因子对生态系统服务空间分异的影响程度^[10]。

定量研究方法有主成分分析、回归分析、地理加权模型等,能准确判断自然环境、社会经济等因子对生态系统服务空间分异的解释力度大小。例如,以珠三角城市群为例,使用随机森林模型分析了产水、粮食生产等 4 项服务对城市化的敏感性^[11];或借助地理加权模型探究了黄土高原土壤保持服务供需平衡

的主要驱动因素^[12]。大部分研究在空间上揭示了生态系统服务与驱动因子间关系,但基本都是以单一尺度进行研究,忽视了驱动因子与生态系统服务供需关系在不同尺度上的差异。最优参数地理探测器可以在解决连续变量空间离散化问题的基础上,定量分析因子及因子间交互作用对因变量的解释力度,是一种检验地理现象是否存在空间分异性的高效工具^[13]。

湖南省地处长江流域中游,是长江经济带重要组成部分,承担着国家粮食安全重任,是全国生态文明建设的领先省。伴随强烈的经济发展需求,人们不合理地使用自然资源等现象频发,使得省内生态资源萎缩,生态空间被不断挤压,对区域绿色和高质量发展造成威胁。

基于此,本研究运用 InVEST 模型、ArcGIS 软件、最优参数地理探测器等工具,在量化湖南省粮食生产服务、碳固持服务、水源涵养服务、土壤保持服务以及生境质量服务供给和需求量的基础上,分析各项生态系统服务供需数量和空间匹配时空变化特征,探究不同尺度下各项生态系统服务供需比的驱动因素,以为湖南省未来生态保护实践,生态环境改善提供科学借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

湖南省位于长江中游,洞庭湖以南,24°38′—30°08′N和 108°47′—114°15′E。该省土地总面积 211 829 km²,下辖 14 个州市,122 个区县,2020 年末承载常住人口 6 644 万人。东、南、西三面环山,北部以平原为主,中部间有山地、丘陵。湖南省地形地貌大体可分为湘东山丘区、湘南山丘区、湘西山地区、湘西北山原山地区、湘北平原区以及湘中丘陵区共 6 个地貌区。属于典型大陆性亚热带季风湿润气候,年均气温 16~19℃,常年降雨量 1 200~1 700 mm,降雨集中在 4—7 月,约占全年降雨量的 50%~60%。

1.2 数据来源与处理

研究所用数据包括:①土地利用数据、DEM 数

据以及 GDP 密度数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>); ②降水、温度、潜在蒸散发数据以及夜间灯光数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>); ③归一化植被指数 (NDVI) 数据来源于国家生态数据中心 (<http://www.nesdc.org.cn>); ④土壤数据采用基于世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集, 来源于寒旱区科学大数据中心 (<http://bdc.cas-nw.net/index.shtml>); ⑤人口密度栅格数据来源于 WorldPop (<https://www.worldpop.org/geodata/summary?id=131>); ⑥社会经济数据来源于《中国能源统计年鉴》《湖南省统计年鉴》《湖南水资源公报》。同时将土地、土壤、气象等栅格数据均统一重采样至 100 m, 投影坐标系统一采用 Krasovsky_1940_Albers。

2 研究方法

2.1 生态系统服务供需评估

2.1.1 粮食生产服务 本研究基于粮食总产量和耕地 NDVI 值确定粮食供给能力^[14]; 按照人口密度和人均粮食需求量计算粮食需求水平。

2.1.2 碳固持服务 利用 InVEST 模型的 Carbon 模块计算碳固持服务供给量; 借助碳排放因子法计算碳固持服务实际需求总量 (D_{CS}), 参考潘竞虎等基于夜间灯光数据和碳排放量统计数据构建的随机效应模型将碳固持服务理论需求量 (C_f) 空间化^[15], 基于能源消费量计算的实际碳排放总量 (D_{CS}) 对理论碳排放量 (C_f) 进行修正^[16], 计算公式为:

$$S_{CS} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (1)$$

$$D_{CS} = E \times NCV \times EF \quad (2)$$

$$\ln C_f = 0.36 \times \ln DN + 2.73 \quad (3)$$

$$C_m = (C_f / C_{f,all}) \times D_{CS} \quad (4)$$

式中: S_{CS} 为碳固持服务供给量 (t/hm^2); C_{above} 为地上物质碳储量 (t/hm^2); C_{below} 为地下物质碳储量 (t/hm^2); C_{soil} 为土壤碳储量 (t/hm^2); C_{dead} 为死亡有机物碳储量 (t/hm^2); D_{CS} 为碳固持服务实际需求总量; E 为能源消费总量 (t); NCV 为能源净发热值 (TJ/t), 取 $0.0209 TJ/t$; EF 为碳排放因子 (t/TJ), 取 $98.3 t/kJ$; C_f 为反演的栅格碳排放量; DN 为栅格夜间灯光值; C_m 为修正后的栅格碳排放量; $C_{f,all}$ 为反演的栅格碳排放总量。

2.1.3 水源涵养服务 基于水量平衡方程核算水源涵养服务供给量^[17], 分别将农业、生活、工业、生态用水量平均分配给耕地、城镇建设用地和农村居民点、

工矿用地、林地和草地, 以此表征水源涵养服务需求量。计算公式为:

$$S_{WR} = P - ET - R \quad (5)$$

$$D_{WR} = D_{agr} + D_{li} + D_{in} + D_{ec} \quad (6)$$

式中: S_{WR} 为水源涵养服务供给量 (m^3/hm^2); P 为降雨量 (m^3/hm^2); ET 为蒸散发量 (m^3/hm^2); R 为地表径流量 (m^3/hm^2); D_{WR} 为水源涵养服务需求量; D_{agr} 为农业用水量; D_{li} 为生活用水量; D_{in} 为工业用水量; D_{ec} 为生态用水量。

2.1.4 土壤保持服务 利用修正的土壤流失通用方程计算研究区域内的土壤保持服务供给量和需求量, 土壤保持服务供给量以潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差表示, 土壤保持服务需求量以人类期望被治理的实际土壤侵蚀量表示^[12]。

2.1.5 生境质量服务 利用 InVEST 模型 Habitat Quality 模块计算生境质量服务供给量 [$SHQ(x)$]; 参考已有研究^[18], 将湖南省生境质量平均值假设为生境质量服务需求标准值, 栅格实际生境质量服务需求量 [$DHQ(x)$] 为栅格生境质量与生境质量服务需求标准值之差。具体计算公式为:

$$D_{HQ}(st) = \sum_{k=1}^M S_{HQ}(x) / A \quad (7)$$

$$D_{HQ}(x) = \begin{cases} D_{HQ}(st) - S_{HQ}(x) & [S_{HQ}(x) < D_{HQ}(st)] \\ 0 & [S_{HQ}(x) \geq D_{HQ}(st)] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $D_{HQ}(st)$ 为生境质量服务需求标准值; $S_{HQ}(x)$ 栅格 x 的生境质量指数; A 为研究区面积 (hm^2)。

2.2 生态系统服务供需比

使用生态系统服务供需比 (ESDR) 将生态系统服务供给与需求联系起来, 揭示区域生态系统服务供需数量特征^[19]。

$$ESDR(x) = \frac{S(x) - D(x)}{(S_{max} + D_{max}) / 2} \quad (9)$$

式中: $S(x)$, $D(x)$ 分别为栅格 x 特定生态系统服务的供给量和需求量; S_{max} , D_{max} 分别为研究区内特定生态系统服务供给量、需求量的最大值。ESDR(x) 为正值表示栅格 x 处某项生态系统服务盈余, ESDR(x) 为零值表示平衡, ESDR(x) 为负值表示缺乏。

2.3 空间自相关

本文借助全局莫兰指数来分析各类生态系统服务供需比的空间集聚程度, 并采用双变量局部空间自相关模型 (LISA) 将生态系统服务供需匹配划分为高供给—高需求、高供给—低需求、低供给—低需求、低供给—高需求共 4 种供需匹配模式, 揭示区域生态系

统服务供需匹配特征。

2.4 最优参数地理探测器

本文在参考现有研究的基础上^[13,20],根据本研究实际情况和前期预试验结果,借助最优参数地理探测器模型,运用等间距、自然间距、分位数间距以及标准差间距分类方法,设置分类等级数3~7类,筛选出 q 值最大的参数组合进行空间离散化。以此为基础运用地理探测器中的“因子探测”与“交互探测”分析各类驱动因子及驱动因子组合对湖南省生态系统服务供需比的解释力。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务供需时空演变

3.1.1 粮食生产服务 2000—2020年湖南省粮食生产能力提高,单位面积粮食供给量由 1.36 t/hm^2 增加至 1.42 t/hm^2 ,增幅为4.41%。单位面积粮食需求量增加,由 0.45 t/hm^2 增加至 0.46 t/hm^2 ,增幅为2.22%。湖南省粮食供给量高值区主要分布在洞庭湖平原、湘中丘岗盆地等耕地集中地区(图1),期间区域内粮食供给量增加。粮食需求量高值区主要分

布在各个区县人口密集区域(图2),其中长株潭地区扩张最为明显。

3.1.2 碳固持服务 湖南省碳固持能力下降,单位面积碳固持量由 105.3 t/hm^2 下降至 104.72 t/hm^2 ,降幅为0.55%。单位面积碳排放量显著增加,由 3.95 t/hm^2 增加至 15.78 t/hm^2 ,增幅达299.49%。湖南省碳固持供给量呈“四周高,中部低”的分布格局(图1),期间桂东县、沅陵县等退耕还林工程效果明显的区县碳固持供给量显著增加。碳排放量高值区主要分布在各个区县建设用地集中区域(图2),期间面积不断扩大,由零星点状趋于带状分布。

3.1.3 水源涵养服务 湖南省水源涵养能力提高,单位面积水源供给量由 $8\,292.51 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 增加至 $9\,574.8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 增幅达15.46%。单位面积水源需求量由 $1\,491.66 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 下降至 $1\,439.8 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,降幅为3.48%。湖南省水源供给量总体呈“东高西低,南高北低”的分布格局(图1),其中湘西北山区水源供给量显著增加。水源需求量高值区呈零星点状分布在各个区县中心城区(图2),期间面积不断扩大,趋于面状分布。

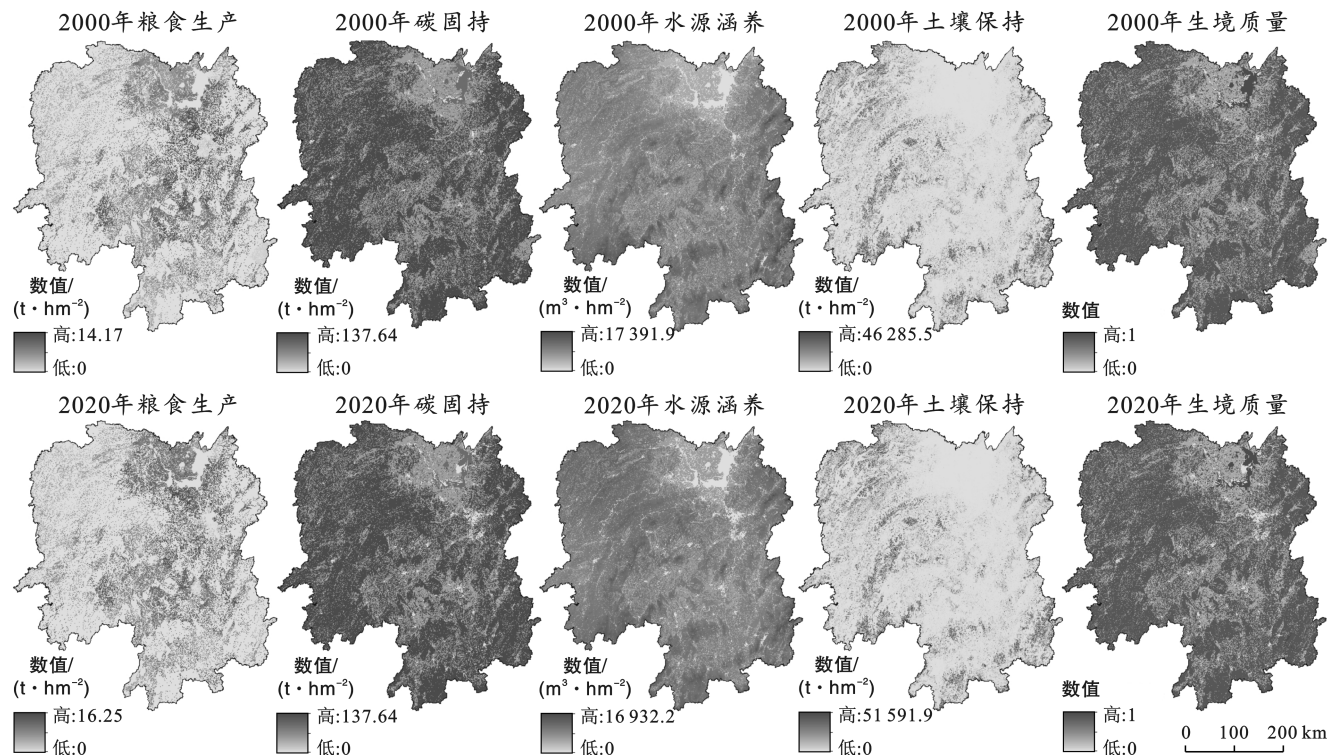


图1 湖南省2000和2020年生态系统服务供给量空间格局

Fig.1 Spatial pattern of ecosystem services supply in Hu'nan Province in 2000 and 2020

3.1.4 土壤保持服务 湖南省土壤保持能力提高,单位面积土壤保持供给量由 351.04 t/hm^2 增至 387.29 t/hm^2 ,增幅为10.33%。单位面积土壤保持需求量略微增加,由 5.68 t/hm^2 增至 5.72 t/hm^2 。湖

南省土壤保持供给量呈“四周高,中部低”的分布格局(图1),期间湘西北山区土壤保持供给量显著增加。湖南省土壤保持需求量与供给量分布区域一致(图2),高值区主要分布在湘南山丘区、湘西和湘西北山区,低

值区主要分布在洞庭湖平原区和湘中丘岗盆地。

3.1.5 生境质量服务 湖南省生境质量供给能力下降,单位面积生境质量供给量由 0.700 7 降至 0.696 6,降幅为 0.59%。单位面积生境质量需求量上升,由 0.133 1 增至 0.136 2,增幅为 2.33%。2000—2020 年

湖南省生境质量服务供给量呈“东、西、南部高(图 1),中部低”的分布格局,高值区主要分布在林地资源丰富、水域集中的区域。生境质量服务需求量高值区主要分布在耕地和建设用地所占比例较大以及人口分布密集区县(图 2)。

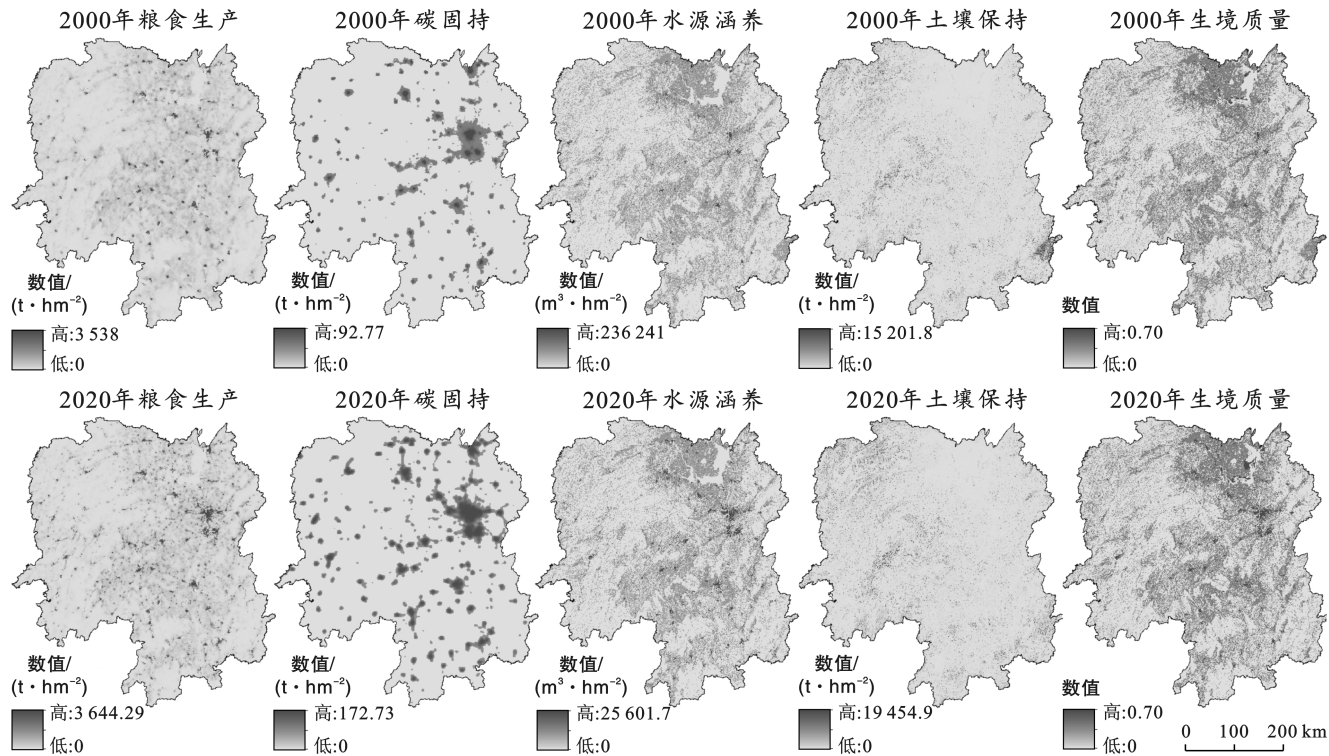


图 2 湖南省 2000 和 2020 年生态系统服务需求量空间格局

Fig.2 Spatial pattern of ecosystem services demand in Hu'nan Province in 2000 and 2020

3.2 生态系统服务供需盈亏及空间集聚分析

20 a 间湖南省各类生态系统服务总供给均大于总需求,但各地区供需不均造成盈余和不足同时存在(图 3)。由图 3 可以看出,湖南省 20 a 来粮食生产服务供需比增加了 3.54%,水源涵养服务供需比增幅达 6 倍,其他生态系统服务供需比下降。其中碳固持服

务供需比下降最为显著,降幅为 35.23%,土壤保持服务以及生境质量服务供需比略微降低,降幅均未超过 5%。利用全局莫兰指数对 2000 年和 2020 年 5 类生态系统服务供需比进行空间集聚分析,结果表明两个时期的 5 类生态系统服务供需比均为正向全局空间自相关(表 1)。

表 1 湖南省生态系统服务供需比 Moran's *I* 统计结果

Table 1 Moran's *I* statistical table of ecosystem services supply-demand ratio in Hu'nan Province

| 年份 | 粮食生产服务供需比 Moran's <i>I</i> 指数 | 碳固持服务供需比 Moran's <i>I</i> 指数 | 水源涵养服务供需比 Moran's <i>I</i> 指数 | 土壤保持服务供需比 Moran's <i>I</i> 指数 | 生境质量服务供需比 Moran's <i>I</i> 指数 |
|------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 2000 | 0.660 | 0.749 | 0.537 | 0.681 | 0.696 |
| 2020 | 0.673 | 0.885 | 0.759 | 0.680 | 0.705 |

期间土壤保持服务供需比莫兰指数变化不明显,其他 4 类生态系统服务供需比的莫兰指数均有提高,说明这 4 类生态系统服务供需比空间集聚性显著增强。借助双变量局部空间自相关指数对各类生态系统服务的供给量和需求量进行空间集聚分析,识别不同时期各类生态系统服务供需空间匹配类型。结果

表明:低低型空间匹配区是粮食生产服务和土壤保持服务供需主要匹配模式(图 4),其中粮食生产服务的低低型空间匹配区主要分布在武陵山区、南岭山区以及罗霄山区,土壤保持服务的低低型空间匹配区集中在洞庭湖平原。碳固持服务、水源涵养服务以及生境质量服务供需主要匹配模式为高低型空间错配区

(图 4), 主要分布在自然环境优渥、人类扰动较少的生态保护区, 期间低高型空间错配区在各区县人口分布

密集, 建设用地集中区域扩张, 其中长株潭城市群及周边地区最为明显。

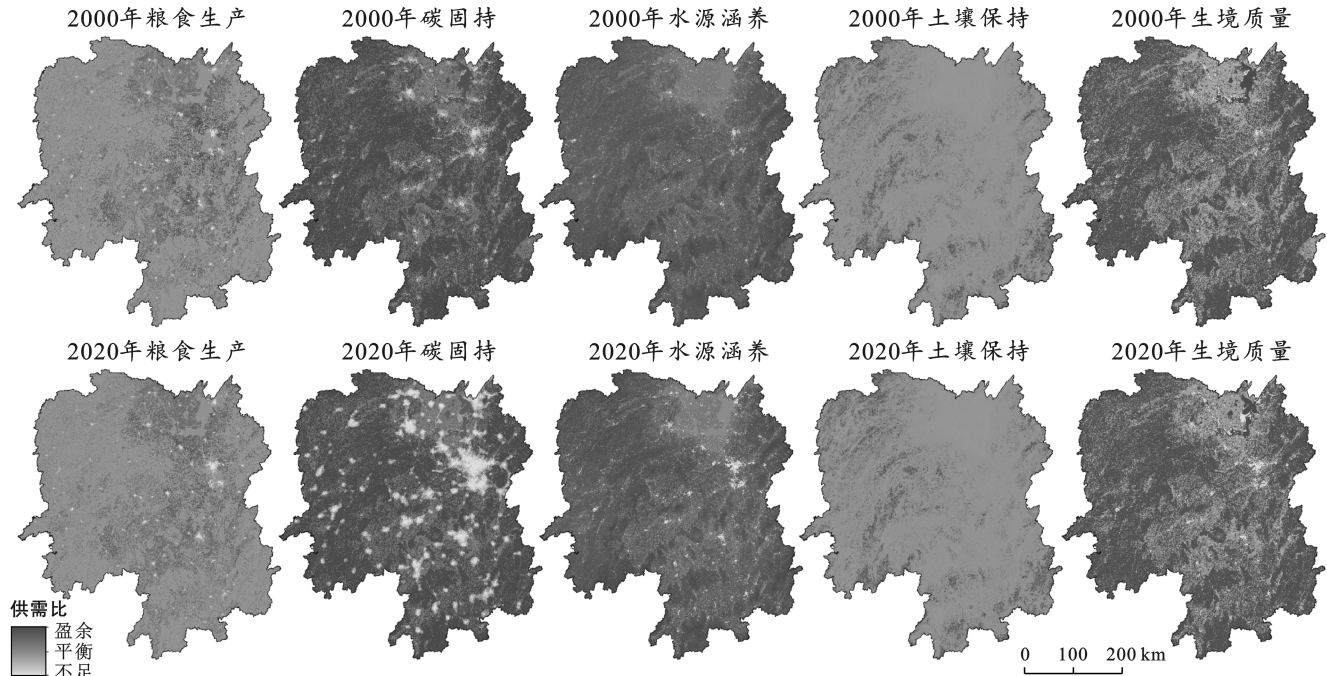


图 3 湖南省 2000 和 2020 年生态系统服务供需比空间格局

Fig.3 Spatial pattern of ecosystem services supply-demand ratio in Hu'nan Province in 2000 and 2020

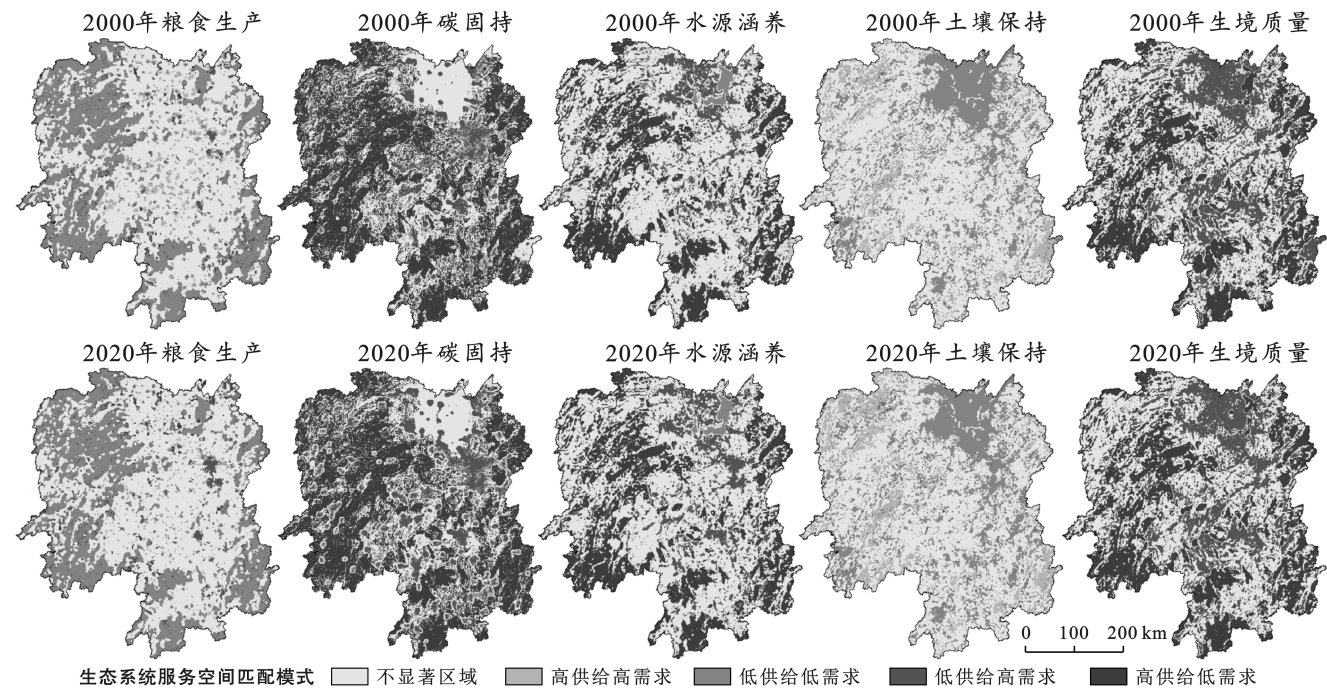


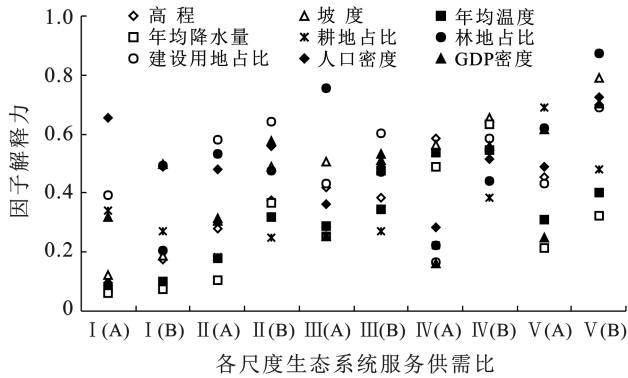
图 4 湖南省 2000 和 2020 年生态系统服务供需空间匹配关系

Fig.4 Spatial matching of ecosystem services supply and demand in Hu'nan Province in 2000 and 2020

3.3 生态系统服务供需比驱动因素分析

生态系统服务受气候、地形、土地利用以及社会经济活动等多种因素影响。本研究参考已有研究^[21-23], 遵循全面性、科学性、可获取性等原则, 选取高程、坡度、年均温度、年均降水量、耕地占比、林地占

比、建设用地比例、人口密度、GDP 密度共 9 个因素为自变量, 以 5 km 网格尺度和县域尺度的 5 项生态系统服务供需比为因变量, 借助最优参数地理探测器的因子探测器和交互探测器, 识别湖南省生态系统服务供需比空间分异的主要驱动因子(图 5)。



注:图中 I, II, III, IV, V 分别代表粮食生产服务、碳固持服务、水源涵养服务、水土保持服务、生境质量服务供需比; A, B 分别代表网格尺度、县域尺度上的生态系统服务供需比。

图 5 湖南省 2020 年各尺度生态系统服务供需比单因子探测结果

Fig.5 Single factor detection of supply-demand ratio of ecosystem services at all scales of Hunan Province in 2020

3.3.1 基于地理探测器的因子探测分析 因子探测结果显示仅县域尺度中粮食生产服务供需比的降雨因子未通过 0.05 显著性检验,其他因子均通过显著性检验,说明所选的驱动因子对不同尺度生态系统服务供需比空间格局均有一定解释力度。各驱动因子对生态系统服务供需比空间格局的影响程度如图 5 所示。人口密度、GDP 密度对网格尺度、县域尺度粮食生产服务供需比的影响最为显著, q 值分别达到 0.656, 0.496。建设用地占比、耕地占比对两种尺度的粮食生产服务供需比空间分异也有一定解释力度,高程、年均温度等自然环境因子的影响有限。土地利用因子对碳固持服务、水源涵养服务以及生境质量服务供需比空间格局的解释力度最大,其中建设用地占比对两种尺度碳固持服务供需比影响最大, q 值分别达到 0.579, 0.642。网格尺度水源涵养服务、生境质量服务供需比的主导因素分别是林地比例、耕地比例,区县尺度水源涵养服务、生境质量服务供需比的主导因素分别为建设用地比例、林地比例。自然环境因子对上述 3 类生态系统服务供需比的空间分布也起到了重要作用。水土保持服务供需比的空间格局主要受到自然环境因子影响,其中高程、坡度对网格尺度、区县尺度水土保持服务供需比贡献率最大, q 值分别达到 0.583, 0.655。年均降水量、年均温度的解释力明显高于人口密度等社会经济因子。城镇化水平通常用建设用地占比、人口密度、GDP 密度等指标衡量。研究发现城镇化水平的高低对生态系统服务供需具有显著影响。一方面,人口规模扩大和社会经济发展需要消耗大量粮食、水、能源等,增加了生态系统服务需求;另一方面人类频繁的生产活动伴随建设用

地的急剧扩张,改变土地利用结构,扰动自然生态系统秩序,抑制生态系统服务供需平衡。林地环境本底条件较好,生境质量较高。同时林地群落层次复杂,丰富的地上林冠层与地表枯落物不仅对碳储量有显著影响,其具备的截留作用,还增加土壤水分入渗量,减少地表径流量。耕地附着的农作物根系较浅,地上生物量较林地、草地少,碳储量低,保水能力弱;再者,农耕行为对土壤结构具有较大扰动,对邻近区域的自然环境具有胁迫作用,限制生态系统服务功能的发挥。受地形影响,高程和坡度限制了人类活动区域,缓解了生态系统服务需求端的压力。其次随着海拔和坡度的变化,区域水热条件差异明显,土壤类型以及植被覆盖状况呈垂直地带性分布,这对生态系统服务供给的空间分异起到了重要作用。降水量不仅可通过径流大小影响土壤侵蚀程度,还可配合温度的变化,促进或抑制植被生长,影响地表植被覆盖度,从而对生态系统服务供需产生显著影响。不同尺度上的各项生态系统服务供需比,主导因子有一定差异。总体来说自然环境因子在两种尺度上的影响差异不大,而社会经济因子在区县尺度的影响较网格尺度更为显著。

3.3.2 基于地理探测器的交互探测分析 交互探测结果显示,湖南省生态系统服务供需比受到自然环境与社会经济因子的综合作用,驱动因子间的交互作用对生态系统服务供需比的影响均超过任何单一驱动因子的影响,皆呈增强效应,并以双因子增强为主。图 6—7 分别为网格和区县尺度生态系统服务供需比空间格局的交互探测结果。由图 6 可知,人口密度与其他因子的交互作用对粮食生产服务供需比空间格局的影响最大,其中人口密度 \cap 耕地比例 q 值达到 0.894,说明人口密度一定时,耕地比例对粮食生产服务供需比空间格局具有决定作用。建设用地比例 \cap 其他因子对碳固持服务供需比影响最为显著,林地比例 \cap 其他因子对水源涵养服务供需比贡献率最高。其中建设用地比例 \cap 林地比例对碳固持服务供需比和水源涵养供需比空间格局解释力度最大, q 值分别达到 0.810, 0.897。在水土保持服务供需比中,高程与其他因子的因子交互作用对水土保持服务供需比空间分异的影响最大,其中高程 \cap 林地比例 q 更是达到 0.716,坡度、年均温度以及年均降水量 \cap 其他因子影响也较显著, q 值均超过 0.5。林地比例与其他因子的交互作用对生境质量服务供需比空间格局的解释力度最大,耕地比例 \cap 其他因子次之,其中林地占比 \cap 耕地占比 q 值最大,达到 0.817。

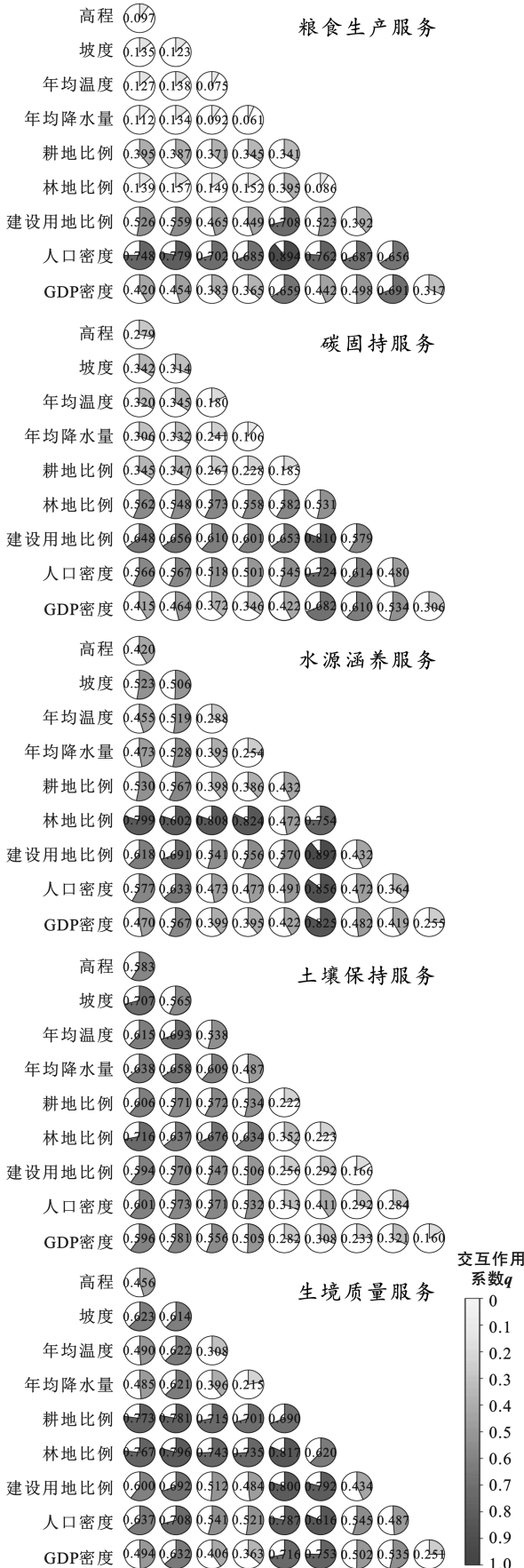


图 6 网格尺度生态系统服务供需比交互探测
 Fig.6 Detection of interaction of supply-demand ratio of ecosystem services at grid scale

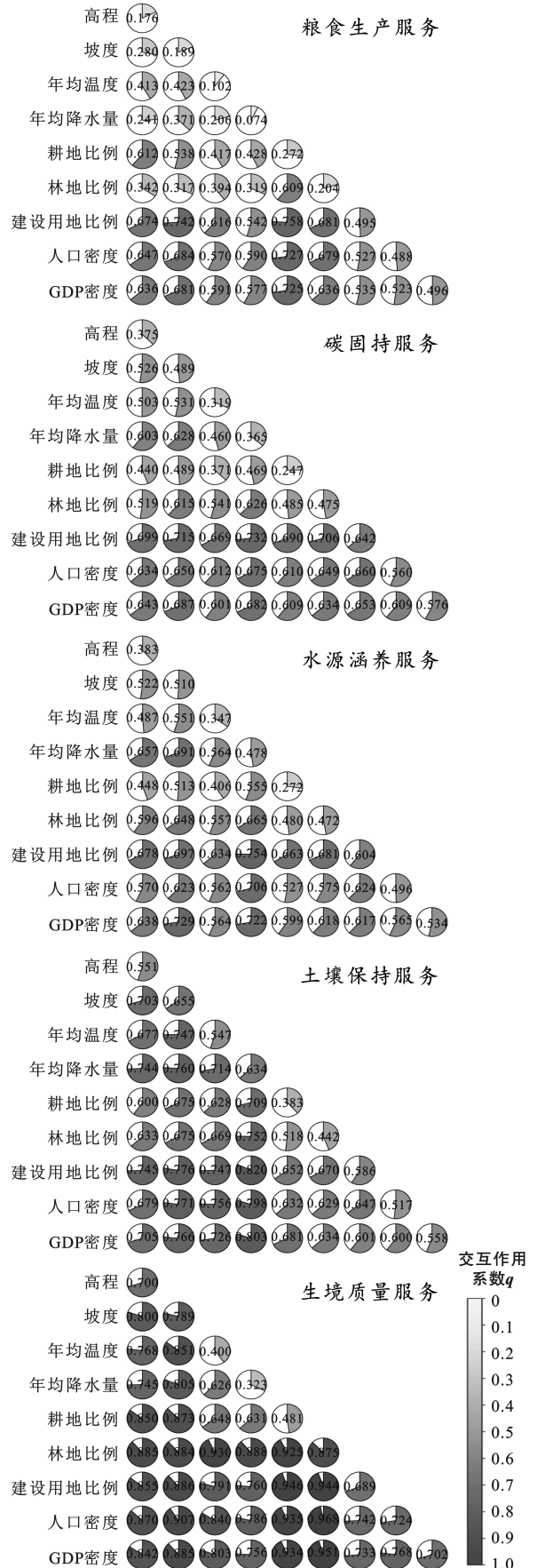


图 7 区县尺度生态系统服务供需比交互探测
 Fig.7 Detection of interaction of supply-demand ratio of ecosystem services at county scale

对区县尺度生态系统服务供需比空间格局的交互探测结果表明(图 7),建设用地占比与其他因子的交互作用对粮食生产服务供需比空间格局的影响最大,建设用地比例 \cap 耕地比例 q 值最大,为 0.758。人口密度、GDP 密度以及耕地比例 \cap 其他因子对粮食生产服务供需比也有较大影响。建设用地比例 \cap 其他因子对碳固持服务、水源涵养服务供需比空间分异的解释力度最大,年均降水量 \cap 其他因子对土壤保持服务供需比空间格局影响最为显著。建设用地比例 \cap 年均降水量对碳固持服务、水源涵养服务以及土壤保持服务供需比空间格局贡献率最大, q 值分别为 0.732,0.754,0.82。在生境质量服务供需比中,林地比例与其他因子的交互作用对生境质量供需比空间分异的影响最大,其中林地比例 \cap 人口密度 q 值更是达到 0.968,即林地比例一定时,人口密度的变化是影响生境质量供需比空间格局的主要因素。各驱动因子对不同尺度生态系统服务供需比的交互作用趋于一致,土地利用因子与其他因子的交互作用对粮食生产服务、碳固持服务、水源涵养服务以及生境质量服务供需比的空间格局影响较大,而地形因子、气象因子与其他因子的交互作用对土壤保持服务供需比空间分异解释力较强。

4 讨论与结论

4.1 讨论

生态系统服务供需反映了生态系统服务由自然环境流向人类社会的动态过程^[3]。量化生态系统服务供需关系,探究生态系统服务供需比时空演变规律及其驱动因子,对于区域生态管理、社会经济可持续发展具有重要意义。本研究中湖南省各项生态系统服务供给计算结果与已有研究结果相似;高潇潇^[24]的研究显示 2020 年长株潭地区单位面积固碳量为 97.86 t/hm²,杨君等在洞庭湖生态经济区的研究表明 2005—2018 年单位面积水源涵养量为 9 204.10 m³/hm²^[25],汪杰^[26]研究发现洞庭湖生态经济区 2005 年单位面积土壤保持量为 379.60 t/hm²。湖南省各项生态系统服务低高错配区主要分布在长株潭城市群等建设用地集中、人口分布密集区域,与王盈丽等^[27]研究结果相似。说明本研究能反映湖南省生态系统服务供需格局,可进行生态系统服务供需比空间分异的驱动因子分析。

本研究分别选用网格尺度与区县尺度进行生态系统服务供需比的驱动因子分析,因子探测显示社会经济因子在区县尺度的影响较网格尺度更为显著。这与夏楚瑜等^[28]研究结果相似,社会经济指标往往

以行政单元进行统计,在衡量社会经济因子对生态系统服务的影响时选用区县尺度更为合理。Cui Fengqi 等^[29]研究发现生态系统服务供需随着尺度的增大,空间分布随之发生改变,更高级别的尺度掩盖小尺度生态系统服务供需的空间异质性,这将导致不同尺度生态系统服务供需比驱动力存在差异。本研究发现生态系统服务主要受到社会经济因子驱动,低供给高需求空间错配区集中分布在各区县中心城区,这些区域经济持续高速发展,生产建设活动频繁,人口分布密集。未来应建立循环、低碳经济发展模式,将中心城区高能耗产业转移至生态压力较小的城市郊区,同时有序引导建设用地扩张,科学控制人口规模,推动城市绿心建设。生态系统服务供给盈余区主要分布在武陵—雪峰山地等生态保护区以及洞庭湖平原等粮食主产区,将来应严格控制生态保护红线与耕地红线,制定高品质生态旅游新模式,推广现代化农业生产新方式。不同尺度生态系统服务主导因子差异明显,未来各级政府应根据区域生态系统服务实际供需特征,制定更加精细化、持续化的生态管理措施,达到人地关系协调发展的最终目的。

本研究在量化湖南省 5 类生态系统服务供需量的基础上,分析了各类服务供需关系及其时空格局,探讨了网格尺度和县域尺度各类服务供需比的主要驱动因子,但仍存在一些不足。仅考虑部分因素对生态系统服务供需比的影响,忽视了土壤类型、景观指数等因素同样对供需比格局起到一定作用。本研究生态系统服务供需评估仅考虑当地效应,未充分考虑省域边界的异地效应,也并未在空间上定量分析各类服务具体流动路径,这可能导致评估结果与人们实际感知存在偏差。未来的研究应重点关注生态系统服务的边界效应和空间流动性,模拟各类服务边界效应,表述各类服务空间流动方向和数量,通过生态系统服务供需的流动将人类福祉和生态系统联系起来,为区域生态系统综合管理,社会经济绿色发展提供科学依据。

4.2 结论

(1) 2000—2020 年,湖南省碳固持服务和生境质量服务供给量以及水源涵养服务需求量下降,其他生态系统服务供需量均上升。湖南省各类生态系统服务总供给均大于总需求,粮食生产服务、水源涵养服务供需比上升,而其他生态系统服务供需比下降。

(2) 各类生态系统服务供需比都呈正向全局空间自相关;除土壤保持服务外,其他 4 类生态系统服务供需比空间集聚性均增强。湖南省生态系统服务供需空间匹配主导类型存在一定差异,低低型空间匹

配区是粮食生产服务和土壤保持服务供需主要空间匹配模式;高低型空间错配区是碳固持服务、水源涵养服务以及生境质量服务供需主要空间匹配模式。

(3) 各驱动因子对不同尺度各项生态系统服务供需比的影响具有空间异质性,其中因子探测显示社会经济因子在区县尺度的影响较网格尺度更为显著。土地利用因子与其他因子的交互作用对粮食生产服务、碳固持服务、水源涵养服务以及生境质量服务供需比解释力较高,而地形、气象因子与其他因子的交互作用对土壤保持服务供需比空间分异解释力度最高。

[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(6630): 253-260.
- [2] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets [J]. *Ecological Indicators*, 2012, 21(3): 17-29.
- [3] Huang Mengdong, Xiao Yu, Xu Jie, et al. A review on the supply-demand relationship and spatial flows of ecosystem services [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 3(5): 925-93.
- [4] 曲格平. 关注生态安全之一: 生态环境问题已经成为国家安全的热门话题[J]. *环境保护*, 2002(5): 3-5.
- [5] 庄智程, 李成, 顾思浩, 等. 基于 CiteSpace 的生态系统服务供需关系研究进展与热点分析[J]. *生态科学*, 2022, 41(4): 212-222.
- [6] 郭朝琼, 徐昔保, 舒强. 生态系统服务供需评估方法研究进展[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(6): 2086-2096.
- [7] Chen Yanmei, Zhai Yuepeng, Gao Jixi. Spatial patterns in ecosystem services supply and demand in the Jing-Jin-Ji region, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 361: 132177.
- [8] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J]. *地理学报*, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [9] 林菲, 池泽龙, 杨伟, 等. 1980—2020 年汾河流域生态系统服务价值的时空变化[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 322-329.
- [10] 黄欣, 彭双云, 王哲, 等. 基于地理探测器的云南省生态系统产水服务的空间异质性及驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(10): 2813-2821.
- [11] Zhang Zimo, Peng Jian, Xu Zihan, et al. Ecosystem services supply and demand response to urbanization: a case study of the Pearl River Delta, China [J]. *Ecosystem Services*, 2021, 49: 101274.
- [12] 王晓峰, 贾子续, 冯晓明, 等. 黄土高原土壤保持服务供需平衡及驱动因素分析[J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2722-2733.
- [13] Song Yongze, Wang Jinfeng, Ge Yong, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data [J]. *Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [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, 74(9): 1921-1937.
- [15] 潘竟虎, 张永年. 中国能源碳足迹时空格局演化及脱钩效应[J]. *地理学报*, 2021, 76(1): 206-222.
- [16] 杨宜男, 李敬, 王立, 等. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1555-1571.
- [17] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2017, 37(7): 2455-2462.
- [18] Shi Yishao, Shi Donghui, Zhou Liangliang, et al. Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 115: 106418.
- [19] Chen Junyu, Jiang Bo, Bai Yang, et al. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimization [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 1426-1439.
- [20] 张若婧, 陈跃红, 张晓祥, 等. 基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(4): 72-80.
- [21] 王秀明, 刘谓承, 龙颖贤, 等. 基于改进的 InVEST 模型的韶关市生态系统服务功能时空变化特征及影响因素[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 381-388.
- [22] 赵晓同, 苏军德, 王建, 等. 甘肃省生态服务供需关系及影响因素研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(10): 4926-4941.
- [23] 胡昂, 吴保思, 黄莹, 等. 高空间异质性区域生态系统服务供需与驱动力分析: 以四川省为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(5): 1062-1076.
- [24] 高潇潇. 长株潭绿心区生态系统服务时空特征及权衡与协同关系[D]. 湖南长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- [25] 杨君, 周鹏全, 袁淑君, 等. 基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 267-272.
- [26] 汪杰. 洞庭湖生态经济区生态系统服务价值评估[D]. 湖南长沙: 湖南师范大学, 2020.
- [27] 王盈丽, 徐新良, 庄大春, 等. 湖南省生态系统服务供需格局演变[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(10): 3268-3277.
- [28] 夏楚瑜, 国焜, 赵晶, 等. 京津冀地区生态系统服务对城镇化的多空间尺度动态响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2756-2769.
- [29] Cui Fengqi, Tang Haiping, Zhang Qin, et al. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: a case study in Hulunbuir, China [J]. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100984.