

基于城镇化分区的重庆生态系统服务供需时空演变及权衡协同

谭佳¹, 张军以^{1,2*}, 王灵芝¹

(1. 重庆师范大学地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 三峡库区地表过程与生态修复重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要: 为明晰地域发展系统中生态服务演化过程, 揭示区域人类活动扰动下生态系统服务间的相互作用, 该研究利用 InVEST 模型、Spearman 相关系数等方法, 评估 2005—2023 年重庆市城镇化分区中碳固存、粮食生产、土壤保持、产水、生境质量、休闲游憩 6 类生态系统服务, 分析其供需时空演变与权衡协同关系。结果表明: 1) 重庆生态系统服务虽存在盈余, 但盈余规模缩减, 综合供需比呈小变幅、缓下降的时间特征。碳固存、产水、土壤保持、生境质量及休闲游憩的生态供需比高值区集中于渝东北、渝东南, 低值区集中于主城都市区核心区。2) 重庆城镇化呈单核多点、西高东低; 城镇扩张、乡村收缩的总体特征。生态系统服务供需空间梯度变化显著: 需求由乡村向城镇递增, 供给则相反, 乡村是核心供给区, 城镇为赤字区。多数生态服务供需比下降, 城镇拓展区由平衡转为供不应求, 仅土壤保持、产水盈余增长。3) 乡村地区生态系统服务静态关系以强协同与强权衡为主且稳定性高, 城乡过渡区多为弱协同且波动显著, 城镇拓展区由权衡主导转为协同主导。城镇地区仅五对服务始终存在权衡协同且波动较小; 不同城镇化分区生境质量与休闲游憩始终协同、产水与休闲游憩始终权衡。乡村与城镇地区多数服务动态关系不显著, 城乡过渡区呈差异化特征, 城镇拓展区权衡与协同服务对并存, 但土壤保持与产水始终协同且随城镇化水平提升而增大, 生境质量与产水始终权衡。研究结果可为重庆社会经济与生态系统协调发展提供科学参考。

关键词: 生态系统服务; 供需平衡; 时空格局; 权衡协同; 城镇化分区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202510003

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2026)-12-0321-14

谭佳, 张军以, 王灵芝. 基于城镇化分区的重庆生态系统服务供需时空演变及权衡协同[J]. 农业工程学报, 2026, 42(12): 321-334. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202510003 <http://www.tcsae.org>

TAN Jia, ZHANG Junyi, WANG Lingzhi. Spatiotemporal evolution of ecosystem services supply-demand and trade-off/synergy relationships in Chongqing of China based on urbanization zoning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2026, 42(12): 321-334. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202510003 <http://www.tcsae.org>

0 引言

改革开放以来, 中国快速实现了由计划经济向市场经济的转型发展, 工业化与城镇化协同推进迅速, 经济持续高速增长。在高速发展背景下也引发了一系列尖锐的生态矛盾, 如建设用地无序扩张直接破坏了生态系统的结构完整性与功能连续性, 生态系统服务供给能力显著下降^[1]; 人口的快速集聚与产业升级导致城市交通拥堵、住房困难等问题, 催生了对优质人居环境等服务的高需求^[2], 但实际供需矛盾日益突出^[3]。同时, 在工业化城镇化及经济发展进程中生态系统服务间既有此消彼长的权衡关系, 又有相互促进的协同效应^[4], 其复杂的动态演变进一步加剧了其供需调控的复杂性。因此, 揭示城镇化进程中生态系统服务供需及权衡协同的时空规律, 是优化生态管理策略, 推进可持续发展的前提。

生态系统服务是自然生态系统形成、提供和维持人类赖以生存与发展的条件和过程, 也被定义为人类从生

态系统中直接或间接获得的产品或服务^[5]。现有研究已从单一的供给量化, 逐渐拓展至供需格局识别^[6]、交互特征探究^[7]及空间模式分析^[8]等综合性研究。研究方法上, 供给量化方法主要有基于市场理论的价值评估法^[9]或基于生态过程的 IBIS 模型^[10]、InVEST 模型^[11]等评估方法; 需求量化则多利用各类社会经济指标^[12]进行估算, 量化精度一般低于供给量化。研究内容上, 现阶段主要聚焦生态系统服务与社会经济系统的互动机制^[13], 以及各服务间权衡协同关系的量化和驱动机制分析^[14], 相关研究多使用供需比^[15]、供需协调度^[16]等指数量化供需特征, 生态系统服务权衡协同的研究则多使用相关性系数^[17]、权衡协同度^[18]解析权衡协同关系。

现有生态系统服务研究已取得显著进展, 但多数研究尺度聚焦于流域^[4]、省域^[9]、县域^[19]等宏观单元, 对城市内部城镇化梯度变化的关注不足, 无法捕捉生态系统服务供需在城乡梯度变化下的空间异质变化; 城市尺度的研究多将分析单元视为均质整体, 未能有效识别城乡梯度特征、刻画城乡梯度变化下的生态系统服务的空间分异规律^[20]; 同时, 针对山地城市的山多地少的地貌特征与城乡镶嵌的空间格局, 城市工业化城镇化进程中生态系统服务的演变规律更趋复杂, 现有平原城市研究结论难以直接套用。为此, 有必要在细化山地城市城镇化差异化分区的前提下, 深入解析不同城乡梯度区的生态系统服务供需及权衡协同的空间分异特征。

收稿日期: 2025-10-01 修订日期: 2026-03-25

基金项目: 重庆市教委科学技术重点项目 (KJZD-K202300507); 国家自然科学基金项目 (41901214)

作者简介: 谭佳, 研究方向为城乡可持续发展。

Email: Tanjia2501@163.com

*通信作者: 张军以, 博士, 教授, 研究方向为农户生计与乡村转型发展。

Email: hellojunyi@cqu.edu.cn

重庆是长江上游生态屏障的核心节点与成渝地区双城经济圈的双核之一，作为典型的大型山地城市，集大城市、大农村、大山区、大库区于一体^[21]。其城市地貌及城市形态结构显著复杂于平原城市，城镇化进程的空间梯度差异显著，存在由经济高度发达的主城都市区到以生态功能为主的渝东北、渝东南山区的显著梯度变化。基于此，以重庆为研究区，依据城镇化水平构建差异化分区体系，利用 InVEST 模型、Spearman 相关系数及权衡协同度指数，量化 2005—2023 年不同城镇化分区内生生态系统服务的供需时空演变，揭示服务间权衡协同关系的分异规律，以期为城市空间治理与社会经济与生态系统协调发展提供科学参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

重庆是长江上游生态屏障的重要组成部分，面积约 $8.24 \times 10^4 \text{ km}^2$ （图 1）。地处四川盆地东部的平行岭谷区，地势起伏，高差悬殊，山地丘陵占比 97% 且多位于东部，坡耕地占比高，缺乏大面积连片的平坝耕地。属亚热带季风性湿润气候，雨热同季，降水丰沛，年均降水量达 1 181.4 mm，主要植被类型为亚热带常绿阔叶林、常绿落叶阔叶混交林。2000—2023 年，重庆城镇化率由 37.4% 增至 71.7%，GDP 由 1 822 亿元增至 30 145 亿元。根据国土空间总体规划分为主城都市区、渝东北城镇群（简称渝东北）、渝东南城镇群（简称渝东南）。2023 年主城都市区一般公共预算收入达 11 790 433 亿元，占全市的 48.31%，经济集聚效应显著；渝东北、渝东南地区一般公共预算收入分别 2 963 973 亿元、1 113 901 亿元，经济发展相对落后。

1.2 数据来源

土地利用数据来源于武汉大学遥感信息处理研究所（http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809），空间分辨率为 30 m。NDVI 数据、夜间灯光数据均来源于国家地球科学数据中心（http://www.geodata.cn/），空间分辨率均为 100 m。DEM 高程数据来源于地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/），空间分辨率为 30 m。年均降水量、潜在蒸散发量数据来源于国家青藏高原科学数据中心

（http://data.tpdc.ac.cn/），空间分辨率为 100 m。人口密度数据来源于 Worldpop 平台（http://www.worldpop.org/），空间分辨率为 100 m。土壤可蚀性数据来源于全球土壤侵蚀性数据集^[22]。植物可利用水量数据来源于国际土壤参考和资料中心（https://data.isric.org/geonetwork/）。碳密度数据来源于 2010 年中国陆地生态系统碳密度数据集^[23]。人均能源消耗量等社会经济数据来源于《重庆市统计年鉴（2006—2021 年）》。所有栅格数据空间分辨率统一为 100 m，坐标统一为 Krasovsky_1940_Albers。并构建 $1\,000 \text{ m} \times 1\,000 \text{ m}$ 的格网作为研究单元（共 82 910 个）进行空间统计分析。

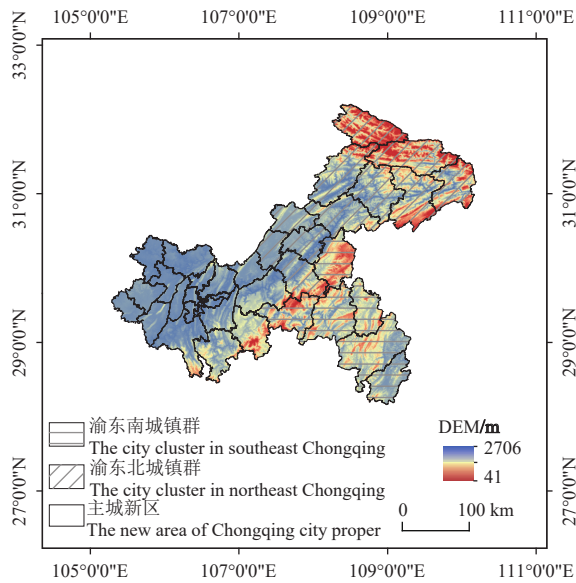


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of the study area

1.3 生态系统服务供需量化

1.3.1 生态系统服务供给量化

利用 InVEST 模型评估重庆市碳固存、土壤保持、产水、生境质量的供给量^[15]（表 1）；基于 NDVI 值与粮食产量间的线性关系^[24] 计算粮食生产供给量；将林地、草地、水域归为生态用地，利用生态用地面积占比量化重庆市休闲游憩供给量。

表 1 生态系统服务供给量化
Table 1 Quantification of ecosystem services supply

生态系统服务 Ecosystem services	计算公式 Calculation formula	变量解释 Variable explanation
碳固存	$S_{CS} = C_{above} + C_{under} + C_{soil} + C_{dead}$	S_{CS} 为碳固存供给量 ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)； C_{above} 、 C_{under} 、 C_{soil} 、 C_{dead} 分别为地上、地下、土壤、死亡有机质对应碳储量 ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)
粮食生产	$S_{GP} = \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \times GP_{sum}$	S_{GP} 为粮食生产供给量 ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)； $NDVI_i$ 为耕地像元 i 的 NDVI 值； $NDVI_{sum}$ 为研究区耕地的 NDVI 值总和； GP_{sum} 为研究区该年粮食总产量 (t)
土壤保持	$S_{SC} = R \times K \times LS - USLE + AEX$ $AEX = (R \times K \times LS - USLE) \times SDR + T_x$ $SDR = \frac{SDR_{max}}{1 + \exp\left(\frac{IC_0 - IC}{k}\right)}$	S_{SC} 为土壤保持供给量 ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)； $USLE$ 为通用土壤流失方程，代表坡面土壤侵蚀模数； R 为降雨侵蚀力因子； K 为土壤可蚀性因子； LS 为地形因子； C 为覆盖植被因子； P 为水土保持因子； T_x 是被滞留的上坡沉积物量； AEX 指上坡泥沙截留/沉积量； SDR_{max} 为理论最大土壤保持值，根据模型手册设定为 0.8； IC 和 k 为定义 SDR - IC 关系的校准参数， IC 为 2， IC_0 为 0.5
产水	$S_{WY} = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x$	S_{WY} 为产水供给量 ($\text{mm} \cdot \text{km}^{-2}$)； AET_x 为栅格年实际蒸散发量 (mm)； P_x 为栅格年平均降水量 (mm)
生境质量	$S_{HQ} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^c}{D_{xj}^c + K^Z} \right) \right]$	S_{HQ} 为生境质量供给量； H_j 为土地利用类型的生境适宜度； D_{xj} 为生境威胁等级，威胁因子及敏感性参数设置参考相关文献 ^[25] ， K 为半饱和常数； Z 为指数参数，根据模型规定设置为 2.5
休闲游憩	$S_{RL} = \frac{Area_{es}}{Area}$	S_{RL} 为休闲游憩供给量； $Area_{es}$ 为生态用地面积； $Area$ 为格网面积

1.3.2 生态系统服务需求量化

基于区域人口密度数据，分别利用人均能源、食物、用水消费量计算碳固存、粮食生产、产水的需求量；利用建设用地面积及 GDP 计算生境质量需求量；利用人均公园绿地面积计算休闲游憩需求量^[26]。土壤保持需求量则利用土壤侵蚀总量表示（表 2）。

表 2 生态系统服务需求量化
Table 2 Quantification of ecosystem services demand

生态系统服务需求 Ecosystem services demand	计算公式 Calculation formula	变量解释 Variable explanation
碳固存	$D_{CSI}=C_{CSI}\cdot\rho_i\cdot C_{transfer}$	D_{CSI} 为栅格 i 的碳固存需求量 ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$)； C_{CSI} 为栅格 i 的人均能源消费量 (吨标准煤)； ρ_i 为栅格 i 对应人口密度； $C_{transfer}$ 为国家发改委规定的标准煤碳排放系数，0.68 ^[27]
粮食生产	$D_{GPI}=\rho_i\cdot GC$	D_{GPI} 为栅格 i 粮食需求量 ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$)；GC 重庆市人均食物消费量 (t)
土壤保持	$D_{SC}=R\cdot K\cdot LS\cdot C\cdot P$	D_{SC} 为土壤保持需求量 ($\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$)
产水	$D_{WY}=D_P\cdot\rho_i$	D_{WY} 为产水需求量 ($\text{mm}\cdot\text{km}^{-2}$)； D_P 为人均用水消费量
生境质量	$D_{HQ}=\frac{D_{HQi}-D_{min}}{D_{max}-D_{min}}$ $D_{HQi}=C_i\cdot\lg\rho_i\cdot\lg E_i$	D_{HQ} 为生境质量需求量； D_{HQi} 为栅格 i 生境质量需求程度； C_i 为建设用地面积； E_i 为 GDP； D_{min} 、 D_{max} 分别为所有栅格 D_{HQi} 的最小值和最大值
休闲游憩	$D_{RL}=G\cdot\rho_i$	D_{RL} 为休闲游憩需求量； G 为人均公园绿地面积 (km^2)

1.3.3 生态系统服务供需比

利用生态系统服务供需比指数 (ecosystem service supply-demand ratio index, ESDR) 分别计算不同时段重庆市生态系统各项服务的供需比，并通过计算生态系统服务综合供需比 (comprehensive ecosystem service supply-demand ratio, CESDR) 了解重庆市整体生态系统服务匹配程度，计算式如下：

$$ESDR = \frac{S_i - D_i}{S_i + D_i} \tag{1}$$

$$CESDR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ESDR_i \tag{2}$$

式中 S_i 为生态系统服务 i 的供给量， D_i 为生态系统服务 i 的需求量。ESDR>0 表明供过于求，ESDR=0 表明供需平衡，ESDR<0 表明供不应求。

1.4 城镇化分区

基于人口集聚度、夜间灯光指数 (night light index, NLI)、不透水面占比 (impervious surface percentage, ISP) 从人口^[28]、经济、土地^[29]3 个方面衡量城镇化水平，计算公式如下：

$$PAD = \frac{POP_i}{A_i} \tag{3}$$

$$NLI = \frac{NTL_i}{A_i} \tag{4}$$

$$ISP = \frac{ISA_i}{A_i} \tag{5}$$

式中 PAD 为人口集聚度 ($\text{人}/\text{km}^2$)， POP_i 为栅格 i 的总人口， A_i 为栅格 i 面积； NTL_i 为栅格 i 夜间灯光指数和； ISA_i 为栅格 i 内不透水面总面积。

参考已有城镇化水平划分相关研究^[29]，考虑研究区综合发展特征，结合自然断点法划分为城镇地区、城镇拓展区、城乡过渡区、乡村地区 4 类，并利用德尔菲法^[30]进行赋权叠加计算得到综合城镇化水平（表 3）。

1.5 生态系统服务的权衡协同

将 6 类生态系统服务供给量标准化后提取至 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的网格表，并计算 Spearman 相关系数以评估各生态系统服务间的相关性^[31]。对相关系数进行显著性检验，通过检验的相关系数为正值时表明二者存在协同关系；

为负值时表明二者存在权衡关系；相关系数绝对值越大相互作用程度越显著。为评估不同城镇化分区生态系统服务间的空间权衡协同关系，基于数据线性拟合基础，利用生态系统服务权衡协同度 (ecosystem service trade-off and synergy degree, ESTD)^[18] 量化网格尺度中各类生态系统服务变化量的相互作用程度，计算式如下：

$$ESTDi_{mn} = \frac{ES_{m2005} - ES_{m2023}}{ES_{n2005} - ES_{n2023}} \tag{6}$$

式中 $ESTDi_{mn}$ 为栅格 i 生态系统服务 m 和 n 的权衡协同度， ES_{m2005} 、 ES_{m2023} 分别为栅格 i 生态系统服务 m 在 2005、2023 年的值， ES_{n2005} 、 ES_{n2023} 分别为栅格生态系统服务 n 在 2005、2023 年的值。 $ESTDi_{mn}>0$ 时两类生态系统服务协同， $ESTDi_{mn}<0$ 时两类生态系统服务权衡， $ESTDi_{mn}=0$ 时两类生态系统服务关系不显著。 $ESTDi_{mn}=0$ 的面积占比<50% 则两类生态系统服务关系显著。

表 3 城镇化分区划分标准
Table 3 Urbanization zoning classification criteria

类型 Type	乡村地区 Rural areas	城乡过渡区 Urban-rural transition zones	城镇拓展区 Urban expansion zones	城镇地区 Urban areas	权重 Weight
人口城镇化	0~0.03	0.03~0.12	0.12~0.36	0.36~1.00	0.292
经济城镇化	0~0.03	0.03~0.13	0.13~0.30	0.30~1.00	0.107
土地城镇化	0~0.06	0.06~0.25	0.25~0.55	0.55~1.00	0.601
综合城镇化	0~0.05	0.05~0.19	0.19~0.46	0.46~1.00	1

2 结果与分析

2.1 生态系统服务供需特征

2.1.1 生态系统服务供需时空特征

2005—2023 年重庆各项生态系统服务总供给量皆大于需求量，但不同生态系统服务的供需变化趋势存在明显差异（图 2、图 3）。碳固存供给量从 2005 年的 9 203.63 t/km^2 波动下降至 2015 年的 9 135.60 t/km^2 后，升至 2020 年的 9 228.57 t/km^2 ，在 2023 年又降至 9 206.21 t/km^2 ，总体微弱增长 0.28%；需求量则持续快速增长，从 2005 年的 213.53 t/km^2 增至 2023 年的 495.15 t/km^2 ，总体增幅达 131.88%。粮食生产供给量从 2005 年的 141.73 t/km^2 逐年下降至 2015 年的 127.52 t/km^2 后，又小幅回升至 2023 年的 132.96 t/km^2 ，总体下降 6.19%；需求量从 2005 年的 43.03 t/km^2 降至 2010 年的 36.57 t/km^2 后，后升至

2020 年的 40.48 t/km^2 , 在 2023 年又降至 38.75 t/km^2 , 总体降幅 9.95%。土壤保持供给量在 2005—2010 年由 $1\,677.36 \text{ t/hm}^2$ 降至 $1\,668.57 \text{ t/hm}^2$, 2015 年升至 $2\,166.12 \text{ t/hm}^2$, 后持续下降至 2023 年的 $1\,801.02 \text{ t/hm}^2$, 总体下降 6.18%; 需求量在 2005—2015 年从 108.42 t/hm^2 波动升至 138.99 t/hm^2 , 后逐渐降至 2023 年 116.82 t/hm^2 , 研究时段内增幅 7.75%。产水供给量先降后升再降: 2005 年为 618.24 mm/km^2 , 2010 年为 563.88 mm/km^2 , 2020

年升至 930.42 mm/km^2 , 2023 年又回落到 847.90 mm/km^2 , 总体增长 37.14%; 需求量 2005 年为 74.14 mm/km^2 , 2010 年升至 88.49 mm/km^2 后降至 2023 年的 60.98 mm/km^2 , 降幅 17.75%。生境质量供给量在 2005—2023 年从 0.594 降至 0.587, 总体下降 0.51%; 需求量则从 0.004 增至 0.020, 供需变化小。2005—2023 年休闲游憩供给量从 0.525 降至 0.517, 总体下降 1.59%; 需求量从 0.001 增至 0.005, 虽存在较大增幅, 但总体需求较小。

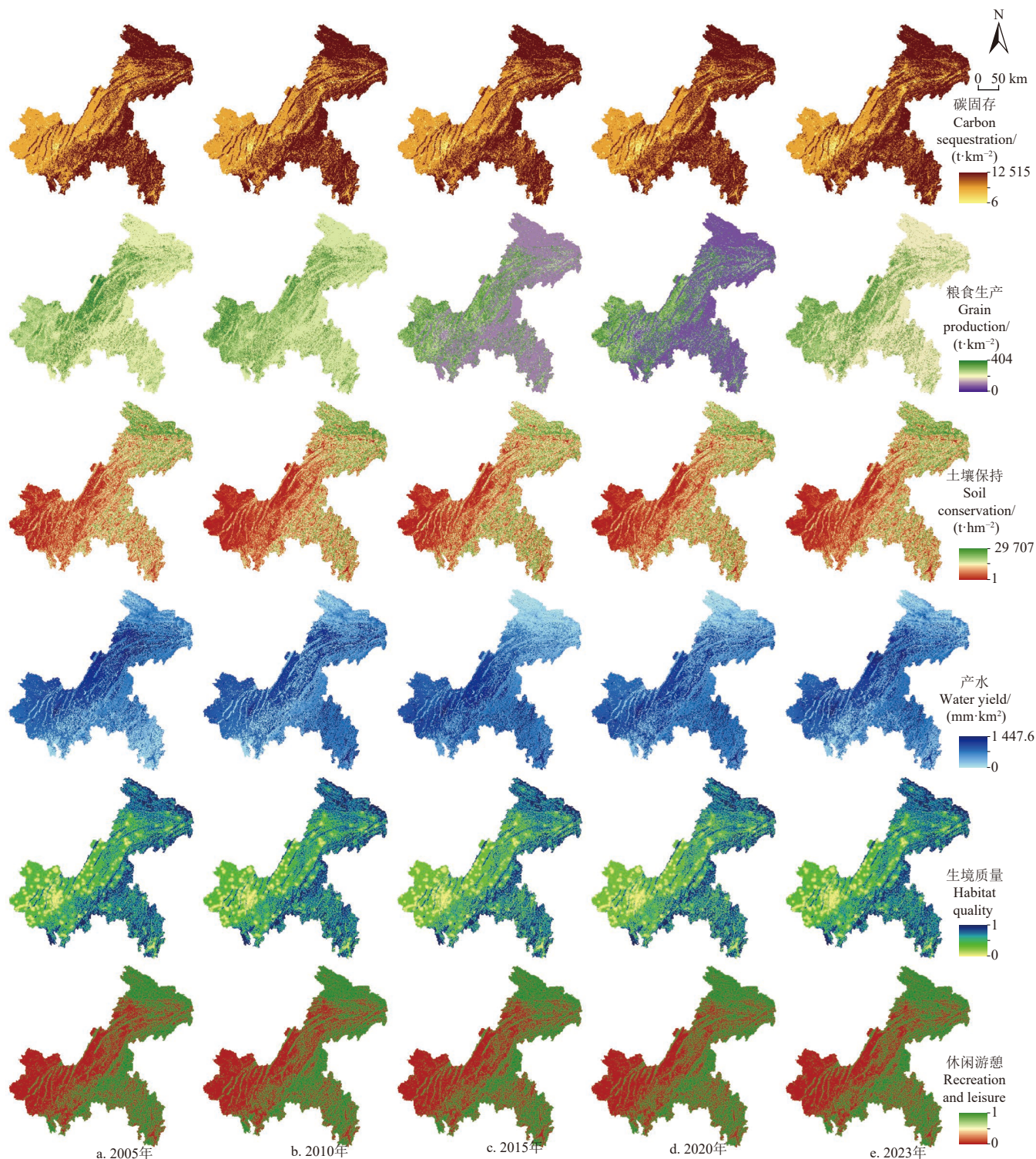


图2 重庆生态系统服务供给空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecosystem service supply in Chongqing

2005—2023 年重庆市各项生态系统服务的供给量基 本保持稳定或呈小幅波动, 碳固存、产水供给略有增加,

粮食生产、土壤保持、生境质量、休闲游憩供给则呈微弱下降趋势；需求量方面，除粮食生产和产水需求有所下降外其他生态系统服务需求均呈快速增长态势。

2005—2023 年重庆碳固存、土壤保持、产水、生境质量、休闲游憩供给总体呈现东北、东南高，西部低的空间分布格局（图 2）。其中渝东北的大巴山区、渝东南的武陵山区因植被覆盖度高、人类活动干扰较少，是各项服务供给的高值集聚区；而西部主城都市区由于城镇化水平高、建设用地占比大、生态空间被压缩，供给能力普遍较低。粮食生产供给高值区位于主城都市区的

外围区县，耕地资源相对丰富、农业生产条件较好；低值区则位于主城都市区核心区及渝东北、渝东南部分山区前者受城镇化挤压耕地面积减少，后者受地形条件限制，粮食生产供给能力有限。

2005—2023 年重庆除土壤保持外各类生态系统服务需求高值集中于主城都市区，渝东北、渝东南人类活动强度较小，需求较低（图 3）。主城都市区人口密集、经济活动活跃，对生态系统服务的消耗和占用程度较高；而渝东北、渝东南地区因人口相对稀疏、开发强度较低，需求水平整体偏低。

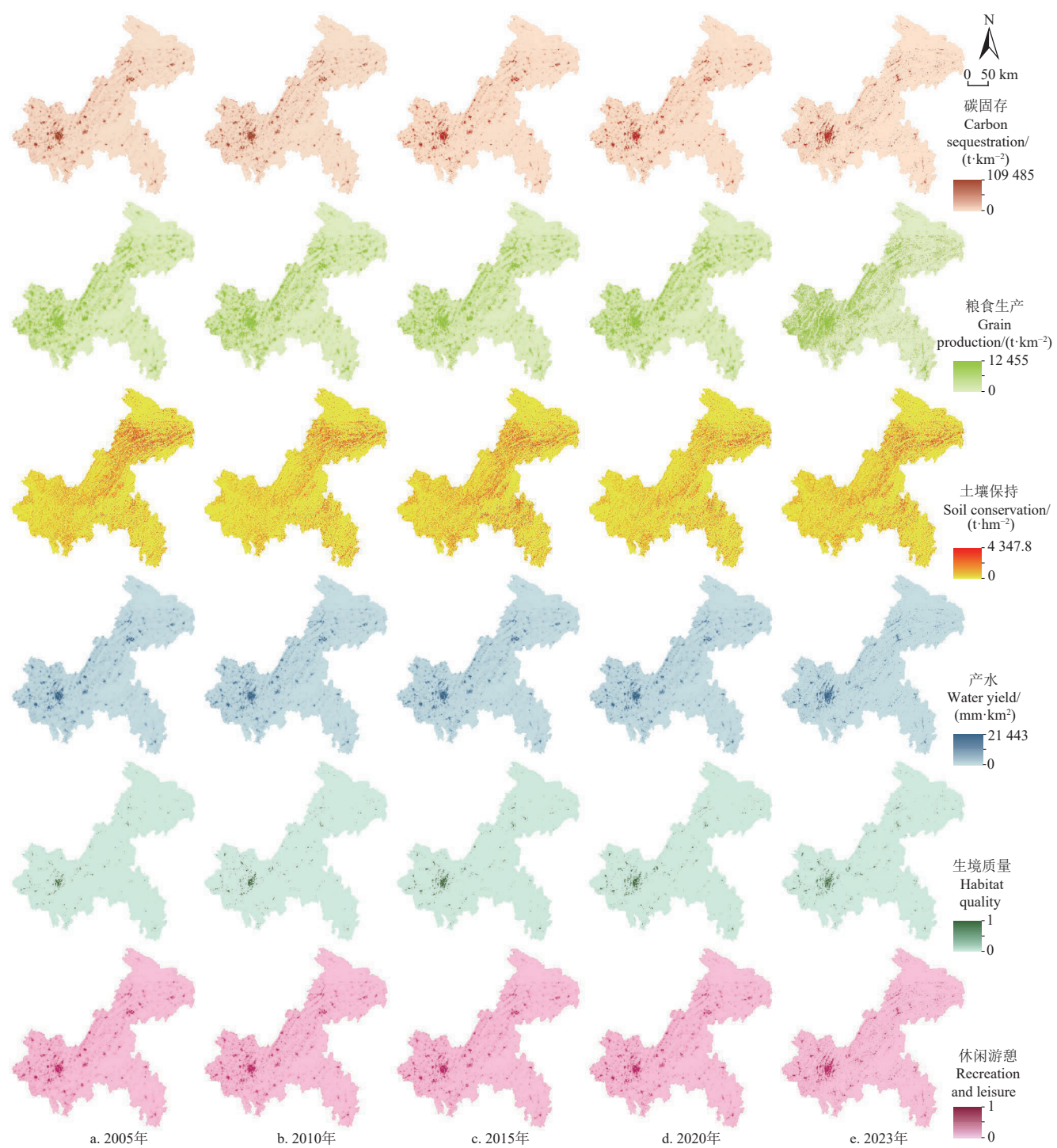


图 3 重庆生态系统服务需求空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem service demand in Chongqing

土壤保持服务的需求分布则呈现相反特征，高值区主要位于渝东南、渝东北的山地丘陵区，该区地形起伏大、降水集中，水土流失风险较高，对土壤保持服务的依赖更强；低值区则集中于主城都市区，该区地势相对平坦，土壤侵蚀压力较小。

2.1.2 生态系统服务供需匹配特征

2005—2023 年重庆生态系统服务综合供需比呈小变幅、缓下降的时间特征，5 个时间节点的平均值分别为 0.581、0.571、0.569、0.567、0.559，生态系统服务始终处于供过于求状态，但盈余程度逐渐减弱（图 4）。

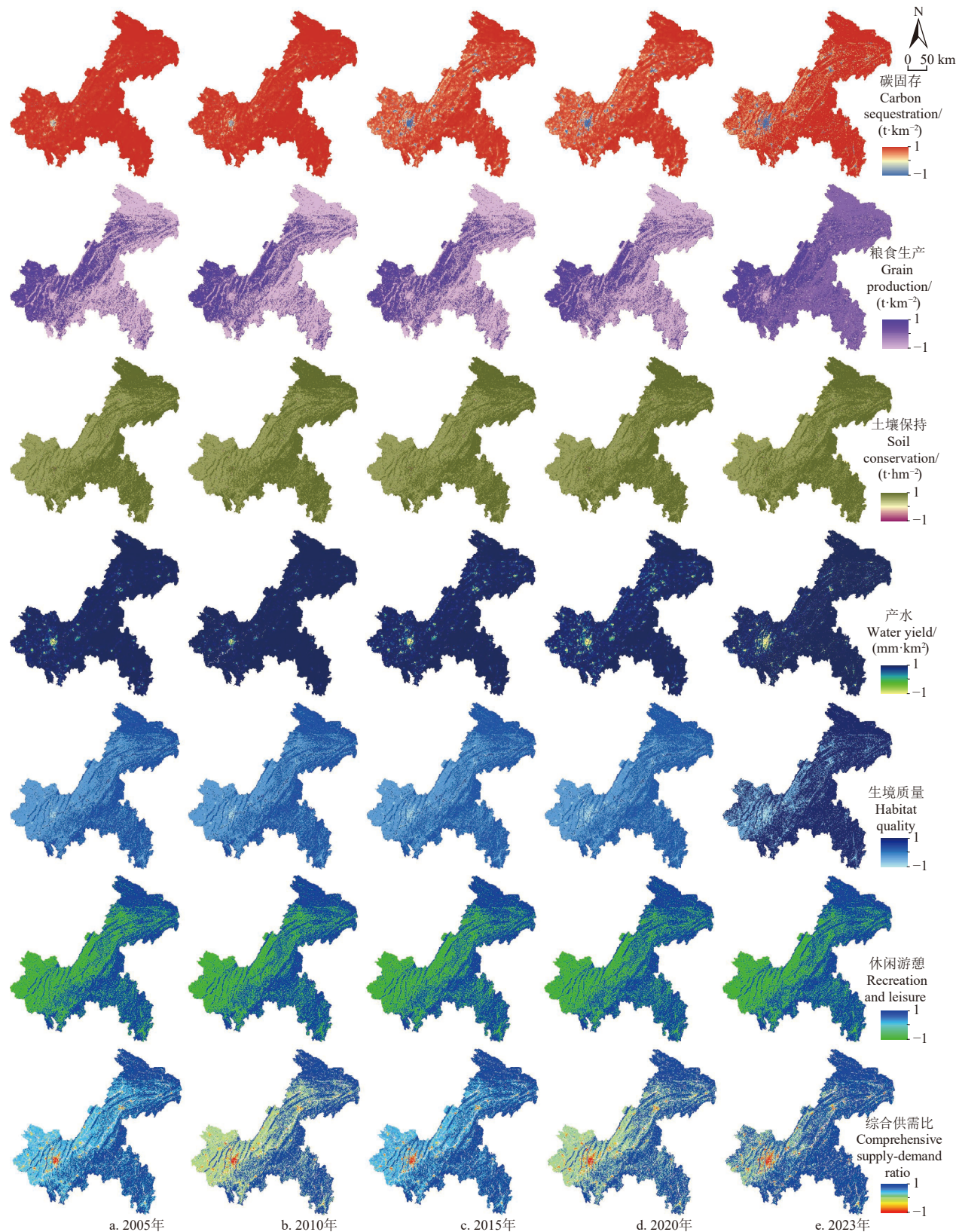


图 4 重庆生态系统服务供需比指数空间分布
Fig.4 Spatial distribution of ecosystem service supply-demand ratio in Chongqing

2005—2023 年仅粮食生产存在供需赤字且赤字区占比由 2005 年的 54.81% 持续上升至 2023 年的 55.98%，ESDR 则由 2005 年 -0.16 下降至 2015 年的 -0.19 后，在 2023 年升至 -0.18。其他生态系统服务皆存在供需盈余，但盈余变化趋势存在差异。2005—2023 年碳固存、生境质量、休闲游憩的 ESDR 指数皆随时间逐渐降低，由 2005 年的 0.94、0.98、0.05 降至 2023 年的 0.87、0.94、0.03，降低了 7.45%、4.08%、40.00%，盈余减少。土壤保持、产水的 ESDR 指数则随时间逐渐上升，由 2005 年的 0.82、0.86 升至 2023 年的 0.83、0.89，变化率分别为 1.21%、3.59%，盈余增多。

2005—2023 年重庆生态系统服务存在显著空间不平衡特征（图 4）。除粮食生产外，碳固存、产水、土壤保持、生境质量及休闲游憩的 ESDR 高值区均集中分布于渝东北、渝东南，低值区则高度集聚于城镇化水平高、建设用地密集的主城都市区的核心区。粮食生产 ESDR 高值区多位于主城都市区的外围区县，低值区主要位于主城都

市区的核心区、渝东北及渝东南。上述空间格局在研究时段内保持了较强的稳定性。演技时段内尽管各年份供需数值有所波动，但高值区与低值区的空间分布相对稳定。

2.2 城镇化分区及其生态系统服务供需特征

2.2.1 城镇化分区时空特征

2005—2023 年重庆综合城镇化水平呈现单核多点、西高东低、城镇扩张、乡村收缩的时空特征（图 5）。2005—2023 年，重庆乡村地区占比由 97.56% 降至 94.13%，变化较小；城乡过渡区占比由 1.79% 升至 3.46%，增幅达 1.67 个百分点；城镇拓展区占比由 0.51% 升至 1.81%，增幅显著，达 1.3 个百分点；城镇地区占比由 0.13% 升至 0.59%，增幅最大，达 0.46 个百分点。综合城镇化水平呈现显著核心高外围低的梯度变化特征：高值区集聚于主城都市区核心区，围绕核心区向外围圈层呈阶梯式梯度降低。此外，研究区内除主城都市区外，还分布有多个城镇化水平较高的点状集聚区域，而低值区则集中分布于渝东北、渝东南。

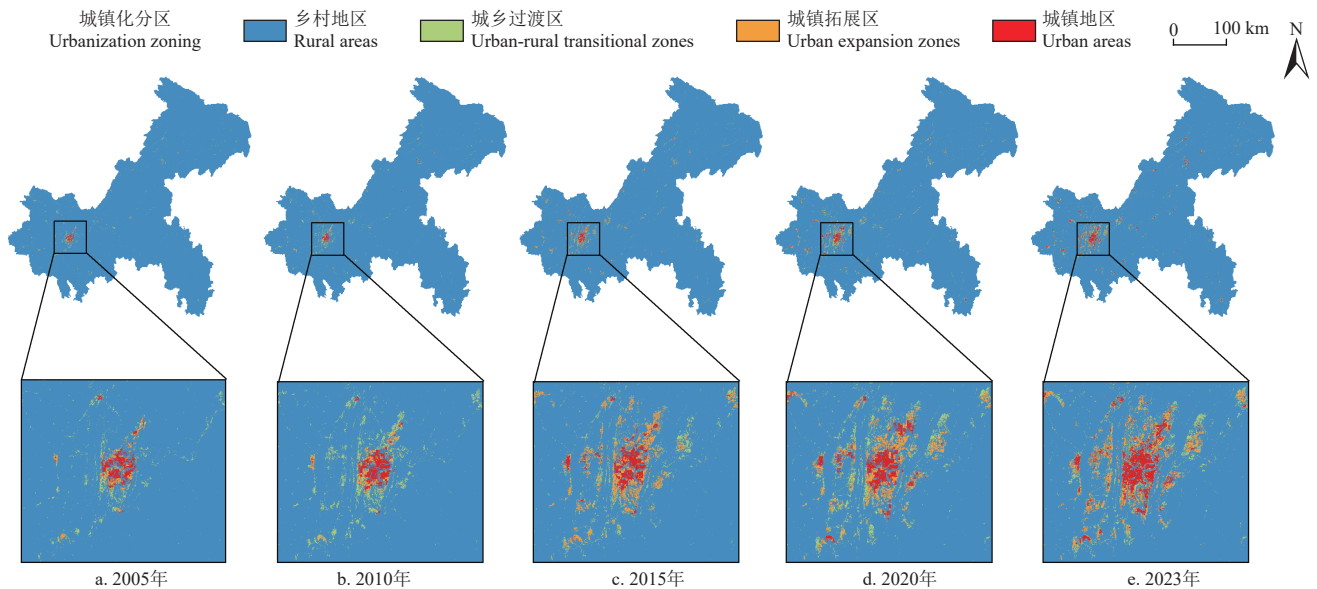


图 5 重庆城镇化分区空间分布

Fig.5 Spatial distribution of urbanization zoning in Chongqing

2.2.2 城镇化分区生态系统服务供需特征

以 2023 年城镇化分区作为分区基底，2005—2023 年重庆不同城镇化地区的生态系统服务需求呈差异化变化趋势（图 6）。碳固存、生境质量、休闲游憩 3 类生态服务的需求在所有分区内均出现上升，其中城镇拓展区的碳固存需求增量达 $3\,323.21\text{ t/km}^2$ ；粮食生产、产水需求在各分区均呈下降态势，城乡过渡区的粮食生产需求降幅 59.75%，相对突出；土壤保持需求在乡村地区、城乡过渡区呈上升趋势，城镇地区、城镇拓展区出现下降。2005—2023 年重庆不同城镇化地区土壤保持、产水供给皆存在上升，城乡过渡区增幅最大，土壤保持供给增长 50.36%、产水供给增长 36.02%；粮食生产供给皆出现下降，城镇地区下降最显著，降幅达 92.39%；碳固存供给在乡村地区、城乡过渡区增大，城镇拓展区、城镇地区减小；生境质量、休闲游憩供给除在乡村地区增

加外，在其他 3 类地区减少，城镇地区降幅最大，生境质量供给下降 84.71%、休闲游憩供给下降 82.35%。

在上述供需变化作用下，各分区生态系统服务供需比（ESDR）呈现差异化演变轨迹。除土壤保持与产水的 ESDR 有所增长外，其余 4 类服务及综合供需比均呈下降趋势。具体来看，综合供需比在乡村地区始终稳定在 0.59 左右；城乡过渡区从 0.452 持续降至 0.282，降幅明显；城镇拓展区综合供需比由 2005 年的 0.364 降至 2010 年的 0.302，2015 年进一步降至 0.166，2020 年转为负值，2023 年降至 -0.145，该区域在 2015 至 2020 年间由供需平衡转为供不应求，供需矛盾持续加剧；城镇地区综合供需比始终为负，从 0.046 降至 -0.433，生态系统服务愈发供不应求。碳固存、生境质量、休闲游憩的供需比在所有分区均呈下降趋势，其中城镇拓展区和城镇地区下降最为剧烈。粮食生产供需比除乡村地区赤字

略有收窄外, 城乡过渡区由盈转亏, 城镇拓展区和城镇地区赤字持续扩大。土壤保持供需比是唯一在所有分区

均呈上升的服务, 城镇地区盈余接近。总体而言, 城镇化水平越高的区域, 生态系统服务供需矛盾越突出。

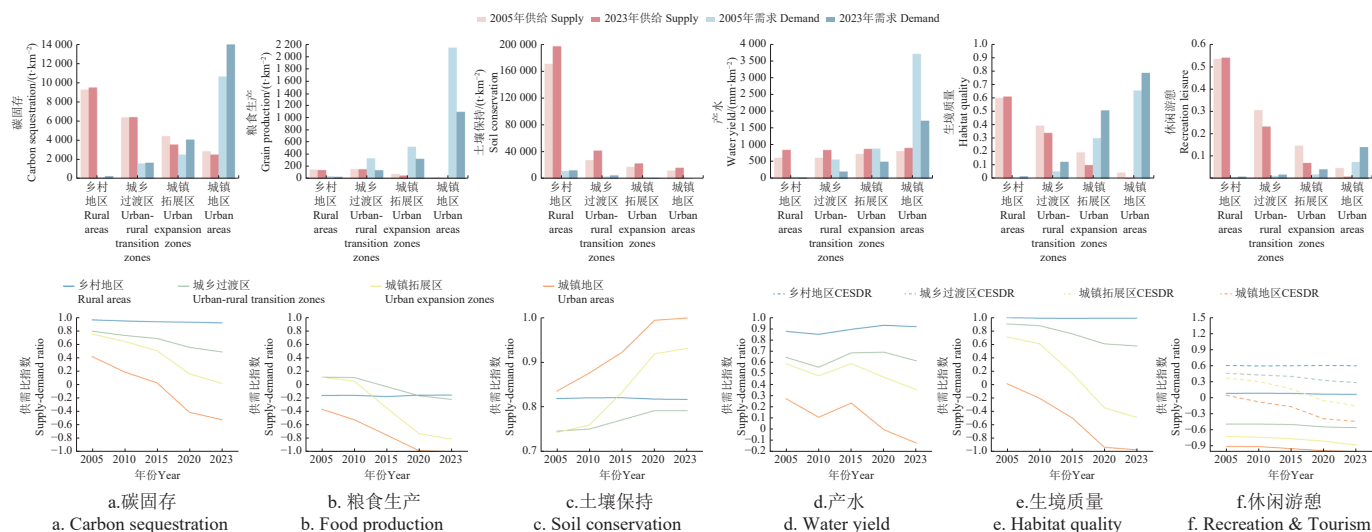


图6 重庆不同城镇化分区各类生态系统服务供给、需求及ESDR指数

Fig.6 Supply, demand, and ESDR of various ecosystem services across regions with different urbanization degrees in Chongqing

城镇到乡村在不同城镇化地区, 生态系统服务供需呈现显著空间梯度变化 (图6)。生态服务需求侧, 除土壤保持外, 其余服务的需求强度由乡村地区向城镇地区逐渐增强。2023年乡村地区土壤保持需求量达 $12\,298.29\text{ t/km}^2$, 远高于其他三类地区土壤保持需求量之和 ($5\,538.62\text{ t/km}^2$)。生态服务供给侧, 多数生态系统服务供给能力由乡村地区至城镇地区逐渐减弱: 2023年, 碳固存供给由 $9\,494.41\text{ t/km}^2$ 降至 $2\,549.69\text{ t/km}^2$; 土壤保持供给由 $195\,958.62\text{ t/km}^2$ 大幅降至 $16\,108.31\text{ t/km}^2$; 生境质量从 0.61 降至 0.01; 休闲游憩供给从 0.54 降至 0.01。粮食生产服务供给由城乡过渡区向乡村地区、城镇拓展区、城镇地区依次减少, 2023年由 147.51 t/km^2 逐步降至 0.83 t/km^2 。产水服务的供给量在各地区间差异相对较小, 均值为 869.47 mm/km^2 。2023年除土壤保持外的生态系统服务供需比均呈现城镇地区最低、乡村地区最高的空间特征; 土壤保持的供需比则表现为城镇地区最高、乡村地区最低。整体上, 城镇地区是生态系统服务的主要消费区 (赤字区), 而乡村地区是区域生态服务的核心供给区。

2.3 城镇化分区下生态系统服务权衡协同关系

2.3.1 生态系统服务静态相关性分析

基于碳固存、粮食生产、土壤保持、产水、生境质量、休闲游憩间的相关系数, 结合显著性检验结果, 分析发现 2005—2023 年重庆不同城镇化地区的生态系统服务权衡协同关系存在显著空间分异 (图7)。

2005—2023 年乡村地区的 15 对生态系统服务关系以强协同与强权衡为主, 强权衡关系略多于强协同关系。2023 年 CS-RL 协同关系最强, 相关系数为 0.91; GP-RL 权衡关系最强, 相关系数为 -0.93。研究时段内, 该区域生态系统服务关系的稳定性较高: 多数服务对的相关系数波动幅度小于 0.2, 仅 2010—2015 年 SC-WY 的权衡

程度存在较大增强 (由 -0.03 降至 -0.25), 反映乡村地区生态系统结构与服务供给的关联性较强。

2005—2023 年城乡过渡区的多数生态系统服务呈弱协同关系, 仅 WY-HQ、WY-RL、GP-RL 始终呈权衡关系。2023 年 HQ-RL 协同关系最显著, 相关系数为 0.74; WY-RL 权衡关系最显著, 相关系数为 -0.56。研究时段内, 多数服务对协同波动增强, WY-HQ 波动最明显, 2005—2015 年相关系数由 -0.59 降至 -0.78, 2023 年升至 -0.31, 与城乡过渡区土地利用方式快速转换密切相关。

2005—2023 年城镇拓展区的生态系统服务关系由权衡主导转化为协同主导: 2005 年通过显著性检验的服务对中, 共计 5 对生态系统服务呈权衡关系, WY-HQ 权衡最显著, 相关系数为 -0.80; 2023 年呈权衡关系的服务对权衡程度下降, WY-RL 权衡最显著, 相关系数为 -0.37, CS-GP 协同最显著, 相关系数为 0.81。研究时段内, 多数服务对协同波动增强, 且波动幅度较大, CS-WY 波动最明显, 2005—2015 年由 -0.34 降至 -0.62 后, 2023 年升至 0.25, 该区碳固存与产水从相互制约转向相互促进。

2005—2023 年城镇地区仅 CS-GP、GP-HQ、SC-WY、WY-RL、HQ-RL 始终存在权衡协同关系。2023 年 HQ-RL 协同最显著, 相关系数为 0.82, CS-RL 权衡最显著, 相关系数为 -0.41。研究时段内 CS-GP、GP-HQ、SC-WY 协同且协同波动减弱, 波动幅度较小; HQ-RL 协同且协同波动增强; WY-RL 权衡且权衡波动减弱。

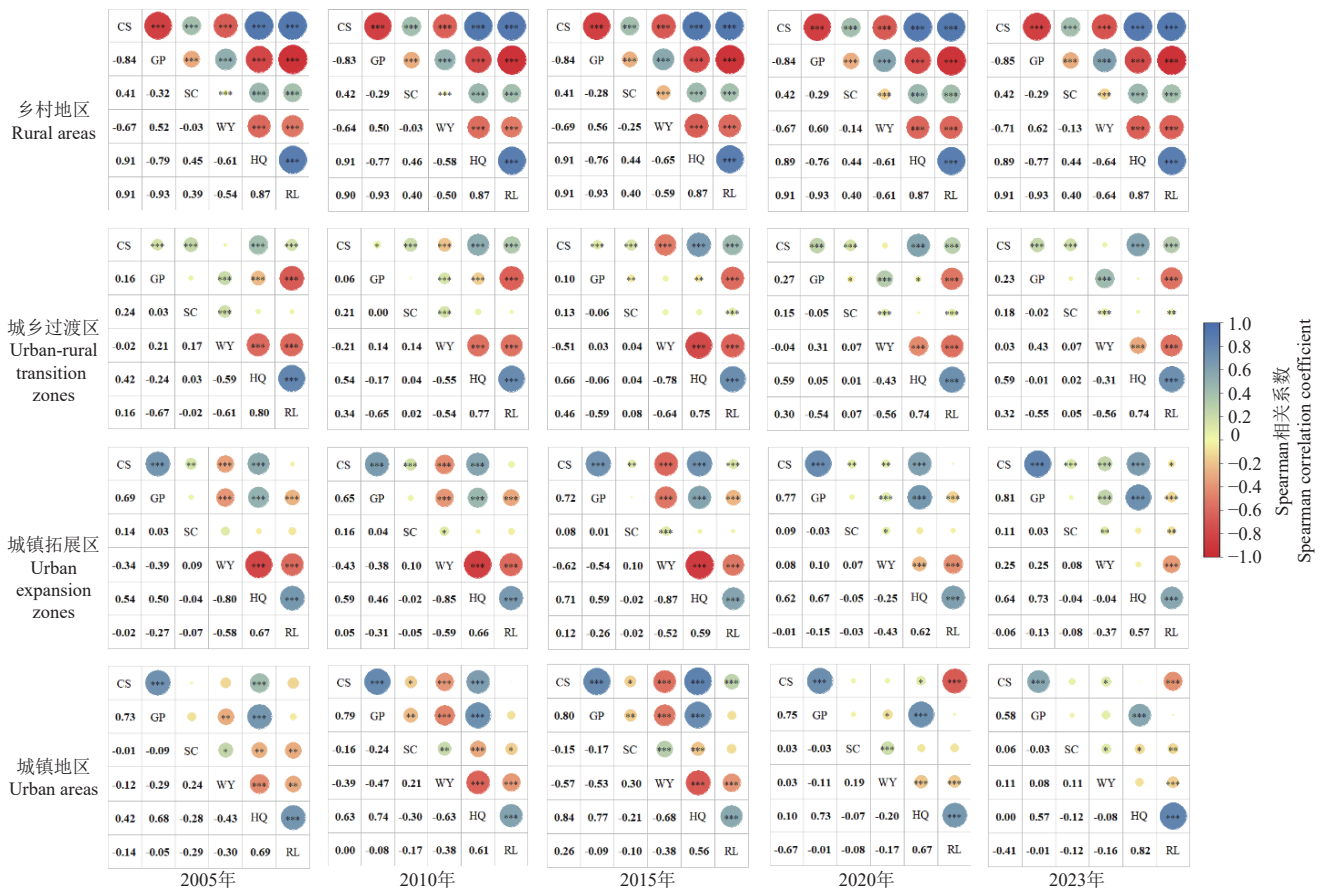
总体而言, 2005—2023 年所有城镇化分区中: HQ-RL 始终存在协同关系, 乡村地区协同稳定、城乡过渡区和城镇拓展区协同减弱、城镇地区协同增强; WY-RL 始终存在权衡关系, 乡村地区权衡增强、其他三类地区权衡减弱。

2.3.2 生态系统服务动态权衡协同度

2005—2023 年生态系统服务动态变化下的权衡协

同关系存在差异 (图 8)。乡村地区多数生态系统服务关系不显著, SC-RL 不显著面积占比最高 (73.1%); GP-SC、SC-HQ、WY-HQ 以权衡为主, 且 WY-HQ 最显著 (61.67%); GP-WY、SC-WY 以协同为主, 且 SC-WY 最显著协同 (71.00%)。城乡过渡区除 GP-HQ、GP-WY 外的生态系统服务关系与乡村地区相似, GP-HQ 呈协同关系的空间占比为 43.60%、GP-WY 呈权衡关系的空间占比为 52.43%。城镇拓展区仅 5 对生态系统服务关

系不显著, 其中 GP-RL 最不显著 (97.08%); 4 对生态系统服务协同, SC-WY 协同最显著 (81.42%); 6 对生态系统服务权衡, WY-HQ 权衡最显著 (78.03%)。城镇地区多数生态系统服务关系不显著, SC-RL 不显著面积占比最高 (95.88%); CS-WY (49.07%)、WY-HQ (50.31%) 呈权衡关系; CS-HQ (49.07%)、SC-WY (88.04%) 呈协同关系。总体而言, 四类城镇化分区中 SC-WY 的协同面积占比和 WY-HQ 的权衡面积占比最大。



注: *在 0.05, **在 0.01 水平, ***在 0.001 上显著相关。CS, GP, SC, WY, HQ, RL 分别表示碳固存、粮食生产、土壤保持、产水、生境质量、休闲游憩。下同。

Note: *, **, and *** mean significance at the 0.05, 0.01, and 0.001 levels. CS, GP, SC, WY, HQ, and RL refer to carbon sequestration, grain production, soil conservation, water yield, habitat quality, and recreation and leisure, respectively. The same below.

图 7 不同城镇化分区生态系统服务的权衡协同及变化

Fig.7 Trade-off and synergy intensity of ecosystem services across regions with different urbanization levels and temporal changes

2.3.3 生态系统服务静态与动态关联特征对比分析

2005—2023 年重庆生态系统服务静态相关性与动态权衡协同度存在明显差异。乡村地区各类生态系统服务皆存在强协同与强权衡关系, 且波动较小, 但动态权衡协同分析中多数生态系统服务关系不显著, 进一步表明该区生态系统服务的稳定, SC-WY 静态权衡而动态协同。城乡过渡区中 GP-WY、SC-HQ 静态协同而动态权衡; GP-HQ 静态权衡而动态协同。2023 年城镇拓展区生态系统服务关系静态表现为协同主导, 动态则表现为权衡主导。城镇地区静态分析表明该区域仅 CS-GP、GP-HQ、SC-WY、WY-RL、HQ-RL 始终存在权衡协同关系, 且波动幅度较小; 动态分析同样显

示多数生态系统服务关系不显著, 说明高度城镇化地区的生态系统服务相互作用机制已趋于固化, 受外界干扰的影响较小。

2005—2023 年从乡村地区到城镇地区 SC-WY 动态关系皆存在协同且随着城镇化水平的上升协同愈加显著, 与静态相关性分析下在协同方向上的变化特征一致。WY-HQ 在两类分析中皆表现为权衡关系, 但不同地区权衡强度存在明显差异: 动态权衡强度表现为城镇地区 (50.31%) < 乡村地区 (61.67%) < 城乡过渡区 (75.35%) < 城镇拓展区 (78.03%); 2023 年静态权衡强度则表现为城镇拓展区 (-0.04) < 城镇地区 (-0.08) < 城乡过渡区 (-0.31) < 乡村地区 (-0.64)。

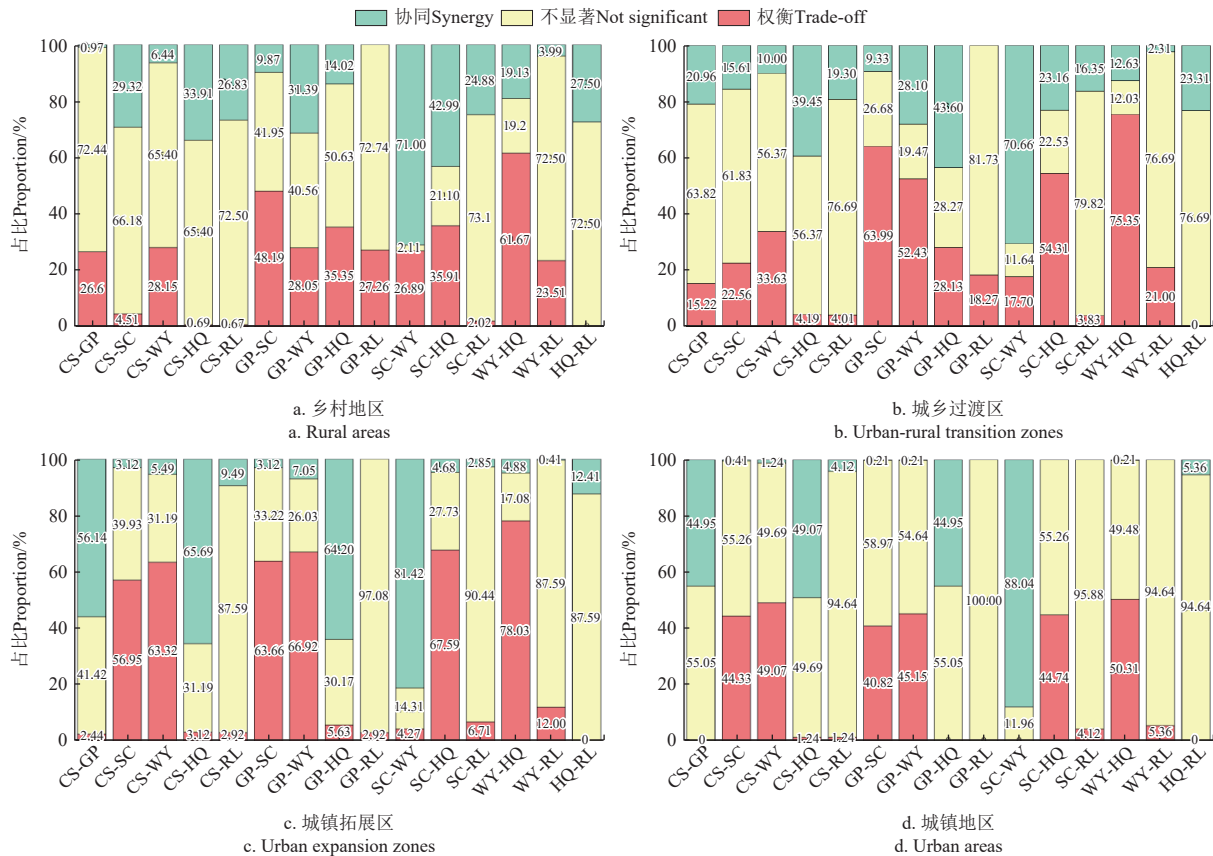


图8 不同城镇化分区生态系统服务的权衡协同空间占比

Fig.8 Spatial proportion of trade-off and synergy among ecosystem services across regions with different urbanization degrees

3 讨论

3.1 山地城市生态系统服务供需格局

2005—2023 年重庆生态系统服务供需呈现中心城区赤字、外围盈余的空间格局，生态系统服务供需空间格局受重庆大城市、大农村、大山区、大库区于一体的城市社会经济发展空间分异特征的控制^[21]。渝东北、渝东南整体城镇化水平低，拥有大面积的山地，植被覆盖度高，构成了区域的天然生态屏障，提供了远超本地需求的生态系统服务，是重庆碳固存、土壤保持、产水、生境质量、休闲游憩供给高值区与需求低值区。重庆主城区都市区的外围区县地形相对平坦，拥有一定面积的连片平坝耕地，是重庆粮食供给的主要地区。主城区都市区核心区是全市经济发展的核心，产业人口集聚，除分割城市的城中山地外，主要为建设用地、工矿用地，是全是高度城镇化地区，生态系统服务供给低但需求高。重庆生态系统服务显著的供需空间错配导致生态供需比高值区主要位于渝东北、渝东南，主城区都市区则存在供需赤字，该结果与三峡库区、成渝城市群生态系统服务供需的研究结论一致^[32-33]。

重庆作为典型超大型山地城市，其生态系统服务供需空间特征与京津、长三角等平原城市既有共性又存在显著差异。山地城市与平原城市生态系统服务均受城镇化驱动，整体呈现供减需增的失衡趋势，空间上均存在核心城区赤字、外围区域盈余的核心—外围供需错配梯度，土地利用变化与人口集聚是其共同的核心驱动因素。但重庆生态系统服务供需空间错配更为突出，城中山地

的对城市空间的分割阻隔使城区生态服务跨区流动成本更高，主城去周边区县的连片平坝耕地的缺乏导致粮食供给调节空间相当有限。同时，重庆生态系统服务的优势服务偏向碳固存、土壤保持等调节类及生境质量等支持类，而平原城市地粮食生产等供给类服务能力更突出。此外，山城镶嵌的城市空间结构导致城市发展对山地生态系统的干扰更为突出，加之山地生态系统敏感性高，使其生态系统服务恢复周期与成本远超平原城市。

3.2 生态系统服务权衡关系驱动机制

2005—2023 年重庆不同城镇化分区生态系统服务权衡协同关系主要受土地利用转型、人类活动强度、生态政策调控及山地地形约束的综合影响^[34]。重庆乡村地区占比高，人类活动干扰较弱，整体上植被覆盖度良好，生态系统结构相对完整^[35]，其碳固存与休闲游憩显著协同。乡村受制于地形和传统生产模式，农业生产导致的坡地植被减少及农药化肥施用造成的面源污染，既破坏了自然植被引起碳固存减少，又影响了游憩环境质量导致生境质量服务衰减^[36]。退耕还林还草建设主要驱动了耕地向林地的转换，坡耕地减少一定程度上导致粮食供给能力下降。因而乡村地区的粮食生产分别与碳固存、生境质量存在强权衡关系，该结果与钱塘江流域、四川省、云南省及贵州省对粮食生产、碳固存、生境质量相互作用关系的研究结论一致^[18,37]。土壤保持与产水静态权衡但动态协同，则与区域农业用水调控政策和水土保持工程的长期效应相关^[38]。

在城乡过渡区发展前期中城镇建设挤占耕地、林地

后又实施生态修复工程,产水与生境质量的相关系数从-0.59降至-0.78再升至-0.31。生境质量与休闲游憩始终保持显著协同,则与城乡过渡区是城市居民的主要休憩目的地,同时兼具生态保护与休闲需求的土地利用布局有关,生态绿地既是维持生境质量又是满足了居民游憩需求的载体。城镇拓展区静态多协同而动态多权衡,反映了短期土地利用建设与长期发展路径模式间的矛盾。2005年重庆建成区同比增长13.2%,城镇扩张致使5对生态系统服务权衡,其中产水与生境质量因工业用水激增、生境破坏而权衡最显著。2010年后退耕还林还草、海绵城市建设等生态修复建设的推进实施,以及产业升级减少了建设用地扩张速度,林地、绿地面积回升,碳固存与粮食生产的空间竞争缓解,协同显著增加。碳固存与产水关系的较大波动则反映了城镇拓展区在城镇建设与生态保护之间的动态关系,后期生态修复建设有效提升了植被覆盖与水文调节的协同性。

城镇地区静态仅粮食生产与碳固存、粮食生产与生境质量、产水与土壤保持、休闲游憩与产水、生境质量与休闲游憩存在权衡协同且波动小,动态多数不显著,生态空间局限于人工绿地与公园,生态服务间相互作用机制趋于稳定。生境质量与休闲游憩协同增强,与城市绿化品质提升、公园游憩功能优化密切相关,人工植被既改善了生境质量,又丰富了休闲场景^[39]。碳固存与休闲游憩的权衡则因城市绿地休闲游憩供给能力显著高于碳固存能力。各类服务波动减弱,说明其生态系统对外界干扰的响应趋于稳定,服务间相互作用已趋于稳定,静态与动态均以不显著为主。此外,山地地形导致乡村与拓展区的服务关系对土地利用变化更敏感,而平原城区的服务关系更易通过人工调控实现稳定^[40]。地形地貌作为基础约束因素,进一步放大了上述驱动因素的作用差异。

3.3 不同城镇化分区生态系统服务的差异化调控策略

基于2005—2023年不同城镇化分区的生态系统服务供需特征及权衡协同关系提出以下差异化调控策略。1)供需矛盾较大且用地固化的城镇地区全面推进生态恢复。通过立体绿化、口袋公园等建设挖掘存量生态潜力,严格保护并连接残存分散的生态斑块与廊道,完善生态网络。2)城镇拓展区与城乡过渡区推进生态红线与绿色增长建设。严格坚守生态保护红线,避免陡坡、水源地等敏感地带的开发,结合地形,基于保留的自然地貌及生态板块,因地制宜积极推行基于自然的解决方案的生态修复建设。3)乡村地区,进一步完善发展生态产业,加速生态资源价值转化。基于特色山地景观发展生态旅游、精品果蔬等山地生态产业;积极探索林草碳汇交易等,推动生态服务盈余的价值转化;构建基于生态系统服务供需消费的城乡间横向生态补偿机制,让城镇经济发达区反哺生态供给区。

本研究尝试构建融合人口、经济发展与土地利用等多维特征的城镇化分区框架,揭示了重庆不同城乡梯度变化下的生态系统服务供需与权衡协同关系的时空演变规律。生态系统服务的产生、流动与受益涉及多个尺度,受自然本底、土地利用模式、社会经济管理政策等多重驱动因子的影响,未来应从格网、乡镇及县域等多级空

间分析单元探究不同城乡梯度变化下的生态系统服务供需的跨尺度流动特征,以期为建立更加有效的空间治理与生态补偿提供科学支撑。

4 结 论

1)重庆生态系统服务虽存在盈余,但盈余规模缩减,综合供需比呈小变幅、缓下降的时间特征。碳固存、产水、土壤保持、生境质量及休闲游憩的生态供需比高值区均集中于渝东北、渝东南,低值区集中于主城区市区核心区。粮食生产高值区位于主城区市区的外围区县,低值区位于主城区市区核心区、渝东北及渝东南。

2)重庆城镇化呈单核多点、西高东低;城镇扩张、乡村收缩的总体特征。生态系统服务供需空间梯度变化显著:需求由乡村向城镇递增,供给则相反,乡村是核心供给区,城镇为赤字区。多数生态服务供需比下降,城镇拓展区由平衡转为供不应求,仅土壤保持、产水盈余增长。

3)乡村地区生态系统服务静态关系以强协同与强权衡为主且稳定性高,城乡过渡区多为弱协同且波动显著,城镇拓展区由权衡主导转为协同主导。城镇地区仅五对服务始终存在权衡协同且波动较小;不同城镇化分区生境质量与休闲游憩始终协同、产水与休闲游憩始终权衡。乡村与城镇地区多数服务动态关系不显著,城乡过渡区呈差异化特征,城镇拓展区权衡与协同服务对并存,但土壤保持与产水始终协同且随城镇化水平提升而增大,生境质量与产水始终权衡。

4)基于不同城镇化分区生态系统服务供需特征及权衡协同关系的差异性,提出差异化调控策略:城镇地区以立体绿化、口袋公园挖潜存量生态,完善生态网络;城镇拓展区与城乡过渡区严守生态红线,结合地形推行自然修复方案;乡村地区发展生态旅游与碳汇交易,建城乡生态补偿机制,转化生态服务价值。

【参 考 文 献】

- [1] 陈万旭, 刘志玲, 李江风, 等. 长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究[J]. *生态学报*, 2020, 40(15): 5137-5150.
CHEN Wanxu, LIU Zhiling, LI Jiangfeng, et al. Mapping the spatial relationship between ecosystem services and urbanization in the middle reaches of the Yangtze River Urban Agglomerations[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(15): 5137-5150. (in Chinese with English abstract)
- [2] 高明惠, 李成, 赵虎. 江苏省生态系统服务供需格局与影响因素[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(5): 315-324.
GAO Minghui, LI Cheng, ZHAO Hu. Spatiotemporal pattern of supply-demand of ecosystem services and influencing factors in Jiangsu Province[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(5): 315-324. (in Chinese with English abstract)
- [3] WU J. Landscape sustainability science (II): Core questions and key approaches[J]. *Landscape Ecology*, 2021, 36: 2453-2485.
- [4] 孙才志, 于涵, 郝帅. 辽河流域生态系统服务权衡-协同效应及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2025, 45(6): 2952-2967.
SUN Caizhi, YU Han, HAO Shuai. Analysis of the trade-off synergy effect and driving factors of ecosystem services in the

- Liaoh River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(6): 2952-2967. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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.
- [6] 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. ZHAO Xueyan, MA Pingyi, LI Wenqing, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(11): 2780-2796. (in Chinese with English abstract)
- [7] 陈俊辰, 贺淑钰, 薛晶, 等. 多尺度生态系统服务的权衡关系及其对景观配置的响应——以湖北省为例[J]. *生态学报*, 2023, 43(12): 4835-4846. CHEN Junchen, HE Shuyu, XUE Jing, et al. Exploring ecosystem service trade-offs and their response to landscape configuration at multi-scales: A case study of Hubei Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12): 4835-4846. (in Chinese with English abstract)
- [8] 龚享林, 白永平, 张春悦, 等. 典型“山地-绿洲-荒漠”系统的生态系统服务簇空间分布及其成因分析——以石羊河流域为例[J]. *地理研究*, 2025, 44(1): 292-304. GONG Xianglin, BAI Yongping, ZHANG Chunyue, et al. Spatial distribution of ecosystem service bundles and their causes in a typical "mountain-oasis-desert" system: A case study of Shiyang River Basin[J]. *Geographical Research*, 2025, 44(1): 292-304. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王文娟, 胡世玉, 赵振坤, 等. 不同土地利用情景下河南省生态系统服务价值时空特征分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2024, 40(5): 42-50. WANG Wenjuan, HU Shiyu, ZHAO Zhenkun, et al. Spatio-temporal Characteristics of Ecosystem Service Value in Henan Province under Different Land Use Scenarios[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2024, 40(5): 42-50. (in Chinese with English abstract)
- [10] MA W S, WU T H, WU X D, et al. Warming could shift steppes to carbon sinks and meadows to carbon sources in permafrost regions: Evidence from the improved IBIS model[J]. *Catena*, 2021, 200: 11.
- [11] KAFY A A, SAHA M, FATTAH M A, et al. Integrating forest cover change and carbon storage dynamics: Leveraging Google Earth Engine and InVEST model to inform conservation in hilly regions[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 152: 110374.
- [12] GONZALEZ-GARCIA A, Palomo I, GONZALEZ J A, et al. Quantifying spatial supply-demand mismatches in ecosystem services provides insights for land-use planning[J]. *Land Use Policy*, 2020, 94: 104493.
- [13] 陈红, 邓晓红, 李宗省, 等. 祁连山国家公园生态系统服务供需匹配[J]. *生态学报*, 2024, 43(6): 1901-1909. CHEN Hong, DENG Xiaohong, LI Zongxing, et al. Matching supply and demand of ecosystem services in Qilian Mountain National Park[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(6): 1901-1909. (in Chinese with English abstract)
- [14] 兰永真, 孙特生, 李韦韦. 陇东黄土高原农田生态系统服务及其权衡协同关系[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(12): 236-244. LAN Yongzhen, SUN Tesheng, LI Weiwei. Trade-offs and synergies of farmland ecosystem services in Loess Plateau: A case study of Longdong Region, Northwest China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(12): 236-244. (in Chinese with English abstract)
- [15] 邱大鹤, 张军以, 杨晓雪. 基于不同需求层次生态服务供需的四川盆地生态安全格局构建[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(6): 3343-3358. QIU Da'e, ZHANG Junyi, YANG Xiaoxue. Construction of ecological security pattern in Sichuan Basin based on the supply and demand of ecological services at different demand levels[J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(6): 3343-3358. (in Chinese with English abstract)
- [16] 韩增林, 刘澄浩, 闫晓露, 等. 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[J]. *生态学报*, 2021, 41(22): 9064-9075. HAN Zenglin, LIU Chenghao, YAN Xiaolu, et al. Coupling coordination and matches in ecosystem services supply demand for ecological zoning management: A case study of Dalian[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(22): 9064-9075. (in Chinese with English abstract)
- [17] 仲俊涛, 王蓓, 米文宝, 等. 农牧交错带禁牧草地生态系统服务空间权衡与协同关系[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(12): 268-275. ZHONG Juntao, WANG Bei, MI Wenbao, et al. Spatial trade-offs and synergies of ecosystem services for grazing-prohibited grassland in agro-pasture ecotone[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(12): 268-275. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘小波, 王玉宽, 刘勤, 等. 基于城市化梯度的中国西南地区生态系统服务权衡与协同[J]. *生态学报*, 2023, 43(22): 9416-9429. LIU Xiaobo, WANG Yukuan, LIU Qin, et al. Tradeoffs synergies analysis of ecosystem services along urbanization gradient in Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(22): 9416-9429. (in Chinese with English abstract)
- [19] ZHANG X, LIU Y, WANG Y, et al. Interactive relationship and zoning management between county urbanization and ecosystem services in the Loess Plateau[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 156: 111021.
- [20] RADFORD K G, JAMES P. Changes in the value of ecosystem services along a rural-urban gradient: A case study of Greater Manchester, UK[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 109(1): 117-127.
- [21] 豆浩健, 王成. 重庆市城乡要素流动赋能乡村多元价值实现机制[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(12): 206-215. DOU Haojian, WANG Cheng. Rural multi-values empowered by rural-urban factor flow: A case study of Chongqing of China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(12): 206-215. (in Chinese with English abstract)
- [22] GUPTA S, BORRELLI P, PANAGOS P, et al. An advanced global soil erodibility (K) assessment including the effects of saturated hydraulic conductivity[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168249.
- [23] 徐丽, 何念鹏, 于贵瑞. 2010s 中国陆地生态系统碳密度数据集[J]. *中国科学数据 (中英文网络版)*, 2019, 4(1): 90-96. XU Li, HE Nianpeng, YU Guirui. A dataset of carbon density in Chinese terrestrial ecosystems(2010s)[J]. *China Scientific*

- Data, 2019, 4(1): 90-96. (in Chinese with English abstract)
- [24] PANEK E, GOZDOWSKI D. Analysis of relationship between cereal yield and NDVI for selected regions of Central Europe based on MODIS satellite data[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2020, 17: 100286.
- [25] 张继, 杨世琦, 赵磊, 等. 基于 InVEST 模型的重庆市“一带三屏”生境质量时空演变特征分析[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(2): 167-180.
- ZHANG Ji, YANG Shiqi, ZHAO Lei, et al. Spatiotemporal Evolution Characteristics of Habitat Quality in the One Belt and Three Barriers Region of Chongqing City Based on the InVEST Model[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2025, 34(2): 167-180. (in Chinese with English abstract)
- [26] WU S, ZHAO C, YANG L, et al. Spatial and temporal evolution analysis of ecological security pattern in Hubei Province based on ecosystem service supply and demand analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 162: 112051.
- [27] 王若梅, 马海良, 王锦. 基于水-土要素匹配视角的农业碳排放时空分异及影响因素——以长江经济带为例[J]. *资源科学*, 2019, 41(8): 1450-1461.
- WANG Ruomei, MA Hailiang, WANG Jin. Spatial and temporal differences of agricultural carbon emissions and impact factors of the Yangtze River Economic Belt based on a water-land perspective[J]. *Resources Science*, 2019, 41(8): 1450-1461. (in Chinese with English abstract)
- [28] 田慧霞, 覃阳毅, 李祖政, 等. 北京市生态系统服务演变及其对城市化的多尺度响应[J]. *生态学报*, 2025, 45(5): 2209-2224.
- TIAN Huixia, QIN Yangyi, LI Zuzheng, et al. Changes of ecosystem services in Beijing and its multi-scale response to urbanization[J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(5): 2209-2224. (in Chinese with English abstract)
- [29] LI R, XU Q, YU J, et al. Multiscale assessment of the spatiotemporal coupling relationship between urbanization and ecosystem service value along an urban-rural gradient: A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 160: 111864.
- [30] 林攀, 余斌, 武洁萌. 多维城市化与乡村地域功能演化的时空关联研究: 以江汉平原为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(3): 345-362.
- LIN Pan, YU Bin, WU Jiemeng. Study on the spatiotemporal correlation between multidimensional urbanization and the evolution of rural territorial functions: A case study of Jianghan Plain[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2024, 40(3): 345-362. (in Chinese with English abstract)
- [31] 荀斌, 郑莹, 范蓉, 等. 陕西省生态系统服务权衡/协同关系阈值识别[J]. *生态学报*, 2024, 44(17): 7431-7444.
- XUN Bin, ZHENG Ying, FAN Rong, et al. Assessment of trade-off/synergy relationships between ecosystem services and identification of ecological restoration thresholds[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(17): 7431-7444. (in Chinese with English abstract)
- [32] 蔡俊飞, 汤曾伟, 王亚林, 等. 基于生态系统服务供需平衡的重庆市三峡库区生态空间分区[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2025, 42(1): 73-82.
- CAI Junfei, TANG Zengwei, WANG Yalin, et al. Ecological spatial zoning of the Chongqing Three Gorges Reservoir Area based on the balance of ecosystem services supply and demand[J]. *Journal of Chongqing Normal University: Natural Science*, 2025, 42(1): 73-82. (in Chinese with English abstract)
- [33] 陈田田, 黄强, 王强. 基于生态系统服务供需关系的成渝城市群生态安全分区识别[J]. *山地学报*, 2022, 40(5): 727-740.
- CHEN Tiantian, HUANG Qiang, WANG Qiang. Ecological security zoning identification of the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration based on supply-demand relation of ecosystem services[J]. *Mountain Research*, 2022, (5): 727-740. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘晶晶, 宋冰洁, 苏峥, 等. 顾及生态系统服务的黄河流域国土空间利用效率评估与影响因素[J]. *农业工程学报*, 2025, 41(5): 268-279.
- LIU Jingjing, SONG Bingjie, SU Zheng, et al. Evaluation and influencing factors of territorial space utilization efficiency considering ecosystem services in the Yellow River Basin[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2025, 41(5): 268-279. (in Chinese with English abstract)
- [35] 谢贤健, 苟千陶, 黄安. 快速城市化背景下重庆市生态系统服务价值时空特征及驱动因子分析[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(6): 348-360, 369.
- XIE Xianjian, GOU Qiantao, HUANG An. Analysis of spatio-temporal characteristics and driving factors of ecosystem service values in Chongqing City under rapid urbanization[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(6): 348-360, 369. (in Chinese with English abstract)
- [36] WEST T O, MARLAND G. Net carbon flux from agriculture: Carbon emissions, carbon sequestration, crop yield, and land-use change[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 63(1): 73-83.
- [37] XIA H, YUAN S, PRISHCHEPOV A V. Spatial-temporal heterogeneity of ecosystem service interactions and their social-ecological drivers: Implications for spatial planning and management[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 189: 106767.
- [38] 张思颖, 陈荣蓉, 程先. 重庆龙溪河流域水生态系统服务时空演变及对土地利用变化响应[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(4): 173-183.
- ZHANG Siying, CHEN Rongrong, CHENG Xian. Spatiotemporal changes of water-related ecosystem services and the responses to land use changes of the Longxi River Basin, Chongqing[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(4): 173-183. (in Chinese with English abstract)
- [39] 陈乾明, 郭青海, 毛齐正. 城市公园生态系统文化服务的空间格局特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2024, 44(21): 9567-9581.
- CHEN Qianming, GUO Qinghai, MAO Qizheng. Spatial pattern characteristics and influencing factors of cultural ecosystem services of urban park[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(21): 9567-9581. (in Chinese with English abstract)
- [40] 贾路, 于坤霞, 李占斌, 等. 长江经济带景观格局对生态系统服务价值影响的概率评估[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(15): 217-227.
- JIA Lu, YU Kunxia, LI Zhanbin, et al. Probability evaluation of the impact of landscape pattern on ecosystem service value in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(15): 217-227. (in Chinese with English abstract)

Spatiotemporal evolution of ecosystem services supply-demand and trade-off/synergy relationships in Chongqing of China based on urbanization zoning

TAN Jia¹, ZHANG Junyi^{1,2*}, WANG Lingzhi¹

(1. School of Geography and Tourism, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Surface Processes and Ecological Restoration in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China)

Abstract: Ecosystem services supply and demand can coordinate the socioeconomic and environmental systems for the regional ecological security. Their spatiotemporal dynamics can be used to identify the complex interactions among services under anthropogenic disturbance. In this study, six ecosystem services were assessed in Chongqing from 2005 to 2023. The InVEST model and Spearman correlation analysis were employed to quantify carbon sequestration, grain production, soil conservation, water yield, habitat quality, as well as recreation and leisure. Furthermore, a systematic analysis was also conducted on the spatiotemporal dynamics of their supply-demand relationships and trade-offs/synergies over urbanization zoning. The results indicate that: (1) Although Chongqing maintained a surplus of ecosystem services, the margin of the surplus consistently narrowed over the study period. The supply-demand ratio was slight but persistently declined. High supply-demand ratios for carbon sequestration, water yield, soil conservation, habitat quality, as well as recreation and leisure were concentrated in the northeastern and southeastern areas of Chongqing, whereas the low ratios were clustered in the key districts of the main metropolitan area. High values of grain production were distributed in the peripheral counties of the metropolitan region, with deficits in the urban, the northeastern, and southeastern parts of Chongqing. (2) Urbanization exhibited a monocentric-polycentric structure with the west-east gradient, which was characterized by urban expansion and concomitant rural contraction. There was an outstanding spatial gradient in the supply and demand of ecosystem services. Among them, the demand increased progressively from rural to urban areas, while the supply exhibited the inverse pattern. The rural areas were positioned as primary provisioning zones, while the urban as persistent deficit zones. Supply-demand ratios declined for most services; Urban expansion zones transitioned from a balance to a deficit, with the notable exceptions of soil conservation and water yield, indicating the increased surpluses. (3) Static relationships among ecosystem services in rural areas were dominated by strong, stable trade-offs or synergies. In urban-rural transition zones, the weak synergies prevailed and fluctuated significantly, whereas urban expansion zones exhibited a trade-off between synergy dominance. Only five service pairs exhibited consistent trade-off or synergy relationships with the minimal temporal variation in urban areas. Habitat quality was persistently synergistic with recreation and leisure over all urbanization zones. While water yield consistently traded off with recreation and leisure. Most dynamic relationships among services were not statistically significant in rural and urban areas. There was a pronounced differentiation in the urban-rural transition zones, whereas the trade-offs and synergies were in urban expansion zones; Soil conservation and water yield remained synergistic over the period. The strength of the synergy increased in urbanization intensity, whereas habitat quality and water yield remained persistently in trade-off. (4) Differentiated strategies were proposed to realize the divergent patterns of ecosystem services supply-demand and their interactions in the urbanization zones. In urban areas, ecological potential should prioritize enhancing the ecological network connectivity. Urban expansion and urban-rural transition zones are required for the enforcement of ecological redlines, particularly with context-specific natural restoration and topographic constraints. In rural areas, ecotourism and carbon sink markets can be coupled with the urban-rural ecological compensation. Ecological assets can also be translated into tangible values. Differentiation of urbanization zones in the mountainous metropolitan can be used to examine the spatial heterogeneity of ecosystem service dynamics along the urban-rural gradient. This finding can provide a robust scientific foundation to inform urban spatial and sustainable ecosystems in Chongqing.

Keywords: ecosystem services; supply-demand balance; spatiotemporal patterns; trade-off and synergy; urbanization zoning