

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^{*}

蔡俊飞, 汤曾伟, 王亚林, 刘建, 舒文强, 肖禾
(重庆市地理信息和遥感应用中心, 重庆 401147)

摘要:明晰生态系统服务供需关系并科学开展生态空间分区是落实差异化生态管理的重要前提。以重庆市三峡库区为研究区,基于多源数据,以乡级行政区(后简称乡镇)为研究单元,定量评估 2000—2020 年研究区生态系统服务总供需比和协调度变化关系,构建基于生态系统服务供需平衡的生态空间分区方法,划定生态分区并提出了相应的优化策略。结果表明:研究区多数乡镇的生态系统服务总供需比等级为轻度盈余、中度盈余和高度盈余,其中等级为轻度盈余的乡镇数量最多,等级为赤字的乡镇主要位于重庆市中心城区;2000—2020 年研究区生态系统服务总供需比以减小趋势为主,该指标呈现增长趋势的地区主要分布于研究区中北部和西南部的乡镇;研究区生态系统服务协调度总体呈“东北高、西南低”的空间分布特征;2000—2020 年研究区生态系统服务协调度变化以增长为主且相关区域主要分布在研究区南部和西南部地区,而该指标减小区域则集中分布在研究区东北部;耦合生态系统服务总供需比和协调度的时空变化,可将研究区划分为生态重点修复区、生态修复区、生态潜在修复区和生态核心保护区。根据生态分区类型提出差异化的优化策略,为开展研究区国土资源整治与生态修复提供了科学支撑。

关键词:生态系统服务;供需比;协调度;生态空间分区;重庆市三峡库区

中图分类号:X171

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)01-0073-10

生态系统服务与人类福祉密切相关。随着人类活动的日益加剧、城市化和经济的快速发展,土地利用发生了巨大变化,进而对生态系统服务产生了深远的影响^[1-3]。在经济发展过程中,环境污染、景观破碎化等一系列问题也随之而来,它们严重制约了生态系统服务的供给能力^[4]。与此同时,城市化发展与人口增长对生态系统服务有了更大的需求,由此也造成了相关服务供需数量失衡和供需错配,甚至导致生态系统服务短缺,并威胁到生态系统的健康和人与自然的可持续发展^[5]。因此,有必要厘清生态系统服务的供需关系,分析其中的特征关系,并据此进行分区。

生态空间分区是在区域生态特征的基础上,根据生态系统服务供需关系的时空差异划分出不同的区域单元。作为国土空间优化的重要基础,生态空间分区是管理生态系统服务、改善人类福祉以及促进区域生态文明建设和可持续发展的有效途径^[6-8]。迄今为止,生态系统服务供需关系在区域生态优化分区管理方面(领域)被广泛应用,进一步加深了人们对生态系统服务供需关系的理解,但相关研究方法存在许多差异。目前研究生态系统服务供需关系的主要方法包括供需比、耦合协调度、供需匹配和耦合分析等。这些研究大部分采用静态分析的方法,如谢余初等人^[9]通过测算 2015 年广西各县市生态系统服务的供需量,结合供需匹配关系,从生态修复的角度对广西进行分区。然而仅有少部分研究考虑基于生态系统服务供需动态变化的空间优化分区,如徐彩仙等人^[10]探讨了 1990—2016 年甘肃白龙江流域土壤保持服务的供需时空变化特征,分析了不同时间段区域供需风险等级变化;随后朱月华等人^[11]计算了 2002—2018 年该流域内生态系统服务供需量,通过评价供需风险将甘肃白龙江流域分为 5 级,并进一步将区域内乡级行政区(后简称乡镇)进行分区,还提出了相应的管理措施。静态分析方法可以根据当前生态系统服务供需状态来制定区域管理策略或建议,而动态变化分析则可以结合历史变化特征来反映生态系统服务供需的未来状态。在经济迅速发展的背景下,当前与未来的生态系统服务供需状态可能存在较大的差异,将供需的当前状态和历史变化特征相结合,可以反映生态系统服务的现状和未来变化趋势,实现区域生态空间分区,以制定更加科学合理的管理策略。然而,目前仍然缺少将上述 2 种分析方法相

^{*} 收稿日期:2024-05-24 修回日期:2024-10-21 网络出版时间:2025-03-14T13:01

资助项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(No. 42001269);重庆市科研机构绩效激励引导专项(No. 2023JXJL-YFX0028, No. DLYG2022JXJL005, No. CSTB2024JXJL-YFX0041);重庆市规划和自然资源局科技项目(No. KJ-2023030)

第一作者简介:蔡俊飞,男,工程师,研究方向为生态遥感应用,E-mail:caijunfei20@mails.ucas.ac.cn;通信作者简介:肖禾,男,正高级工程师,博士,E-mail:jeverxiao@163.com

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20250313.1802.012

结合来进行生态空间分区的研究。

三峡库区是长江流域重要的生态屏障区和重要的生态经济区^[12]。自三峡工程建成和相关移民工作完成以来,三峡库区生态系统的结构与功能发生了较大改变,区域间生态经济平衡发展格局出现了新变化^[13-15]。城市扩张、经济社会快速发展、生态修复工程等因素相互作用,给三峡库区生态系统功能带来挑战性压力。当前,有关重庆市三峡库区生态系统服务的综合研究较少,已有的研究中研究对象为单一生态系统服务,例如水源涵养服务^[16]。重庆市三峡库区是整个三峡库区的核心区域,它的面积占库区总面积的 85%^[17];该区域承担着重要的生态服务功能,同时为区域内外提供土壤保持、产水、粮食、释氧等生态系统服务。因此,重庆市三峡库区生态系统服务供需平衡既关系到三峡库区的稳定繁荣,也关系到长江经济带生态和经济的可持续发展。

基于上述背景,本研究以重庆市三峡库区为研究区,基于匹配性较强的生态系统服务供需评估方法,在计算土壤保持、产水服务、粮食服务和释氧服务供需量的基础上,结合供需现状和历史变化规律,分析研究区生态系统服务供需时空特征,综合考虑供需变化趋势和供需平衡,对研究区的生态空间进行讨论与划分,旨在利用遥感技术为研究区的生态保护、改善和管理提供基础理论依据和相关建议。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于长江上游末端,地理范围为北纬 28.52°~31.73°,东经 105.82°~110.20°,面积约为 46 200 km²,涵盖重庆市 22 个区(县、自治县),共 580 个乡镇(图 1)。研究区内地貌以山地丘陵为主,山地和丘陵的面积分别约占区域总面积的 74%和 22%,区域整体地形格局为东南高、西北低,长江干流自西向东横穿区域全境。研究区气候为潮湿的亚热带季风气候,主要特点是春季天气变化很大、夏季潮湿炎热、秋季干燥、冬季干燥寒冷。受地形影响,研究区内大部分地区年降水充沛,区域年平均降水量在 1 000 mm 以上,但降水的时空分布不均匀,其中约 85%的年降雨发生在夏季,且年际变化差异较大;同时研究区的气象灾害发生频率也较高。三峡大坝的建设促进了研究区的社会 and 经济发展,但区域人口和污染输入的增加给研究区生态系统带来了更大的压力。在多种环境压力和人为因素的影响下,当前研究区内生态系统服务供需关系较为复杂,迫切需要加以厘清。

1.2 数据来源

本研究所用基础数据除行政区边界以外,其余数据选取的时间节点均为 2000、2010 和 2020 年,栅格数据重采样至 30 m×30 m 空间分辨率;研究数据的类型、内容及来源信息如表 1 所示。

1.3 研究框架

综合考虑研究区特征,本研究选择土壤保持、产水服务、粮食服务和释氧服务这 4 种典型的生态系统服务以定量评估 2000—2020 年研究区上述各种服务的供需量,综合考虑生态系统服务供给和需求之间的数量匹配关系、协调度关系及动态变化趋势,构建基于生态系统服务供需平衡的生态空间优化分区方法。

首先,本研究权衡了景观多功能性与单一生态系统服务的独特性,将所选 4 种典型生态系统服务归一化后进行等权重叠加,获得生态系统服务总供给、总需求状态的评价指标,并计算归一化后生态系统服务总供需比(R_{EDS})。随后,构建生态系统服务协调度(D),反映生态系统服务供需协调发展状况,评价生态系统的可持续性。分别计算生态系统服务总供需比和协调度的变化趋势,变化值以 0 为临界。最终,耦合 2 项指标将生态系统服务供需状况划分为 4 个等级,其中:Ⅰ级为供需濒危,供需比变化呈下降趋势,且供需矛盾持续升级即协调度呈减小趋势($\Delta R_{EDS} < 0, \Delta D < 0$);Ⅱ级为供需危险,供需比变化呈下降趋势,供需矛盾相对缓和即协调度呈增长或不变趋势($\Delta R_{EDS} < 0, \Delta D \geq 0$);Ⅲ级为供需脆弱,供需比变化呈增长趋势或不变,而协调度呈减小趋势($\Delta R_{EDS} \geq 0, \Delta D < 0$);Ⅳ级为供需相对安全,供需比变化呈增长趋势,同时协调度呈增长或不变趋势($\Delta R_{EDS} \geq 0, \Delta D \geq 0$)。为了让分区结果具有较好的完整性从而有助于相关政策的制定,本研究以乡镇作为研究单元。

1.4 研究方法

1.4.1 生态系统服务供需评估

土壤保持服务供需量均利用 InVEST 模型的 SDR 模块进行估算^[18],它的原理基于修正后的土壤流失通用方程,通过计算栅格单元土壤侵蚀泥沙量,同时结合泥沙输移比考虑下游地块植被减缓侵蚀作用以及对于上游来沙的截留和沉积作用,以实现相对更为准确合理的评估。产水服务供给量计算基于水量平衡原理,即通过计算降水量和实际蒸散发之差来确定,采用 InVEST 模型的产水量模块进行定量评估;通过计算人类消耗需水量作为需求量^[19]。研究表明农作物产量与归一化植被指数(NDVI)之间存在明显的线性关系,粮食供给量以粮食生产能力度量,因此本研究将粮食总产量按照日照 NDVI 和总耕地 NDVI 的比值进行分配,确定各单元粮食供

给能力,由此计算粮食服务供给量;同时,以人类食物消耗量作为粮食服务的需求量^[20]。释氧服务是指自然生态系统通过植物光合作用释放氧气维持大气释氧稳定的功能,它的供给量基于 NPP 用植物光合作用中二氧化碳和氧气的转换关系来衡量;同时,以人类消耗释氧量作为释氧服务的需求量^[21]。

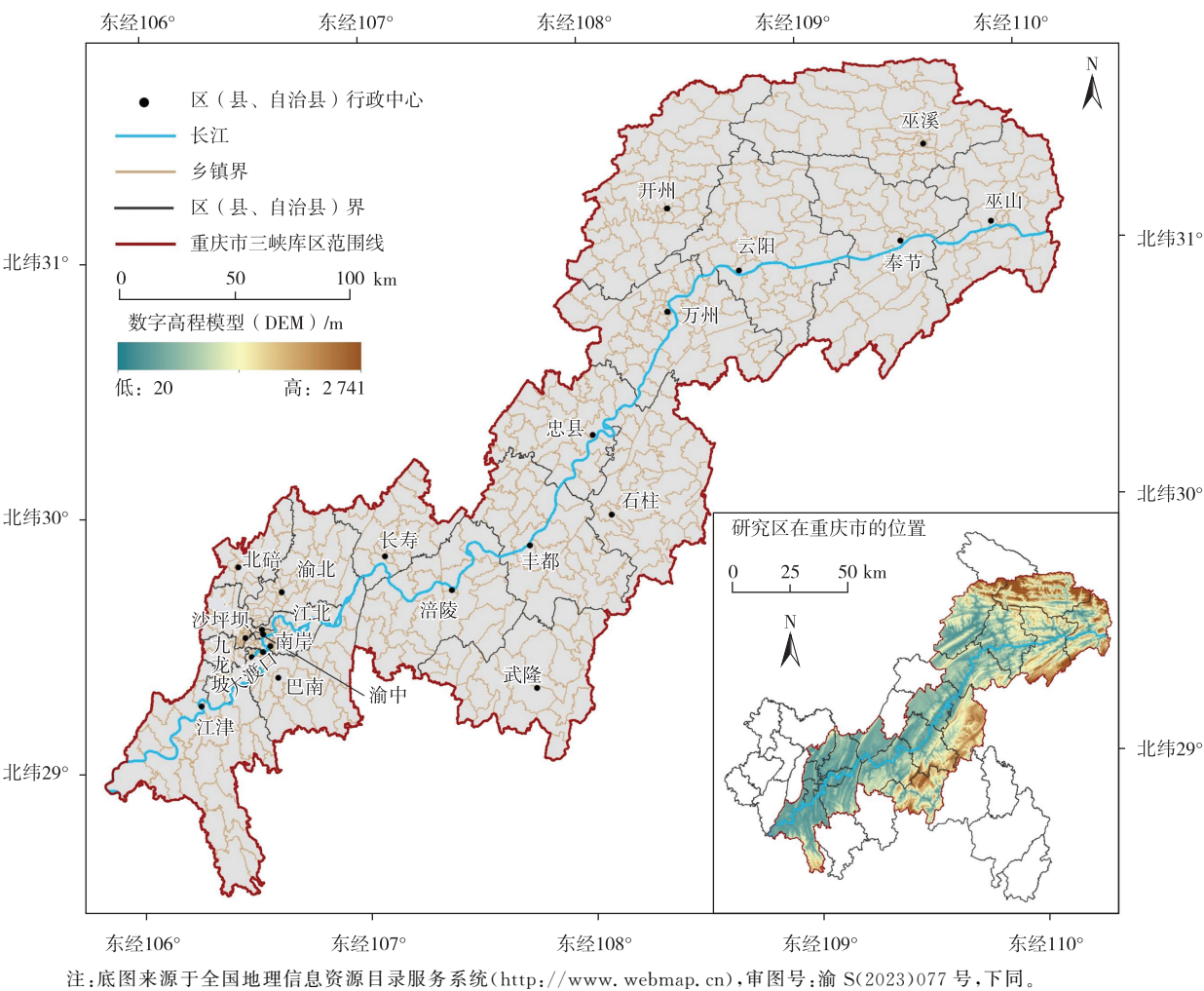


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of the study area

表 1 研究数据清单

Tab. 1 Research data lists

数据类型	数据内容	数据来源
气象数据	气温、降水	国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/)
遥感数据	土地利用、蒸散发、植被净初级生产力(NPP)	中国科学院资源环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/)
	DEM、坡度、坡向	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
社会经济数据	人口数据	《重庆统计年鉴》、美国航空航天局社会经济数据和应用中心(https://sedac.ciesin.columbia.edu/)
	水资源数据	《重庆市水资源公报》
	食物量数据	《重庆统计年鉴》
生态本底数据	土壤数据	世界土壤数据库(https://gaez.fao.org/pages/hwsd)
其他数据	行政区边界	全国基础地理数据库(www.webmap.cn)

1.4.2 生态系统服务总供需比

利用生态系统服务总供需比揭示生态系统服务供给和需求之间的数量关系^[19],当生态系统服务需求得到满

足时,供给处于过剩状态,供需比大于 0;供给处于平衡状态时,供需比等于 0;当生态系统服务供给处于赤字状态时,供需比小于 0。生态系统服务总供需比的计算公式如下:

$$R_{EDS} = (E_s - E_d) / [(E_{s,max} + E_{d,max}) / 2],$$

其中: E_s 和 E_d 分别为归一化生态系统服务的总供给和总需求,是在考虑到单一生态系统服务的不可替代性基础上假设所选 4 种典型生态系统服务同等重要,再通过这些生态系统服务供需评估结果归一化后等权重叠加而获得; $E_{s,max}$ 和 $E_{d,max}$ 分别表示归一化生态系统服务总供给量和总需求量最大值。

1.4.3 生态系统服务协调度

生态系统服务协调度可反映生态系统服务供需协调发展状况并用以评估生态系统的可持续性,相关计算公式如下^[22]:

$$D = \sqrt{CT}, C = \sqrt{\frac{E_s E_d}{[(E_s + E_d) / 2]^2}}, T = \alpha E_s + \beta E_d,$$

其中: D 值分布区间为 $[0, 1]$,当 $D=1$ 时,表示生态系统服务供需处于最佳协调状态,当 $D=0$ 时,供需协调性最差; C 为耦合度; T 为供需综合协调指数,反映供需综合协调效应或贡献; α 和 β 分别表示供给和需求的权重,因为供给和需求同等重要,因此两者取值均为 0.5。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务总供需比特征

结合文献[20, 23],综合考虑研究区生态系统服务功能供需本底特征,最终将研究区生态系统服务总供需比划分为 4 个等级,分别为:赤字($R_{EDS} \leq 0$)、轻度盈余($0 < R_{EDS} \leq 0.3$)、中度盈余($0.3 < R_{EDS} \leq 0.6$)、高度盈余($0.6 < R_{EDS} \leq 1$)。

2000—2020 年研究区各乡镇生态系统服务总供需比的空间分布如图 2 所示。从该图可见研究区内不同地区之间的生态系统服务供需关系存在较大差异,空间不平衡性特征明显,且大部分乡镇的生态系统服务总供需比等级都在轻度盈余、中度盈余和高度盈余,其中:等级为轻度盈余的乡镇数量最多,在 2000、2010 和 2020 年这 3 个时间节点上均超过乡镇总数的 70%;等级为中度盈余和高度盈余的乡镇数量较少。研究区生态系统服务总供需比等级为赤字的乡镇数量有微弱的上升趋势,在 2000—2020 年间增加了 17 个。生态系统服务总供需比等级为赤字的乡镇主要分布在重庆市中心城区,说明它们的生态系统服务供给匮乏,其中主要原因是这些区域内植被覆盖度较低且地表多为城市建成区,因此区域内的生态系统服务呈现出明显的供不应求局面。

为反映生态系统服务总供需比的变化程度,对 2000—2020 年研究区各乡镇该指标的时间变化进行分析,结果如图 3 所示。从该图可见研究区生态系统服务总供需比在研究期间以减小趋势为主,该指标增长和减小的乡镇个数分别为 177 和 403;整体上看,研究区乡镇生态系统服务总供需比变化值的平均值为 0.08,表明即使是生态系统服务总供需比呈减小的乡镇,该指标的变化值也较小。此外,图 3 还显示生态系统服务总供需比在研究区东北部、中东部边缘地区以及西部的重庆市中心城区乡镇呈减小趋势,在研究区中北部和西南部地区的乡镇呈增长趋势,其中又以在江津区乡镇的增长趋势最为明显。

2.2 生态系统服务协调度特征

运用生态系统服务协调度计算公式得到研究区 2000 年、2010 年和 2020 年的生态系统服务协调度平均值分别为 0.31、0.32 和 0.34,整体上呈现出增长的趋势。为了更加直观地对比上述各年份研究区生态系统服务协调程度,将生态系统服务协调度的数值以 0.1 为间隔划为 6 个等级,由此得到 2000—2020 年研究区生态系统服务协调度的空间分布(图 4)。

比较图 4a~c 后可知,不同年份之间研究区生态系统服务协调度的空间分布格局存在相似性,即总体上均呈现出“东北高、西南低”的分布特征;但不同区域乡镇的该指标存在较大差异,因此空间分布不平衡特征较为明显。此外,研究区大部分乡镇生态系统服务协调度处于低值区,只有少数乡镇的该指标处于高值区($D > 0.5$),数量占比在 10% 以下。然而 2000—2020 年研究区内生态系统服务协调度处于高值区的乡镇数量逐渐增多,由 2000 年的 22 个增长到 2020 年的 56 个,增长倍数超过 2.5。这些生态系统服务协调度转为高值区的乡镇主要位于研究区南部和西南部,大多为森林资源相对丰富的地区,表明研究区内生态系统服务供需之间的协调程度呈稳中向好发展趋势。

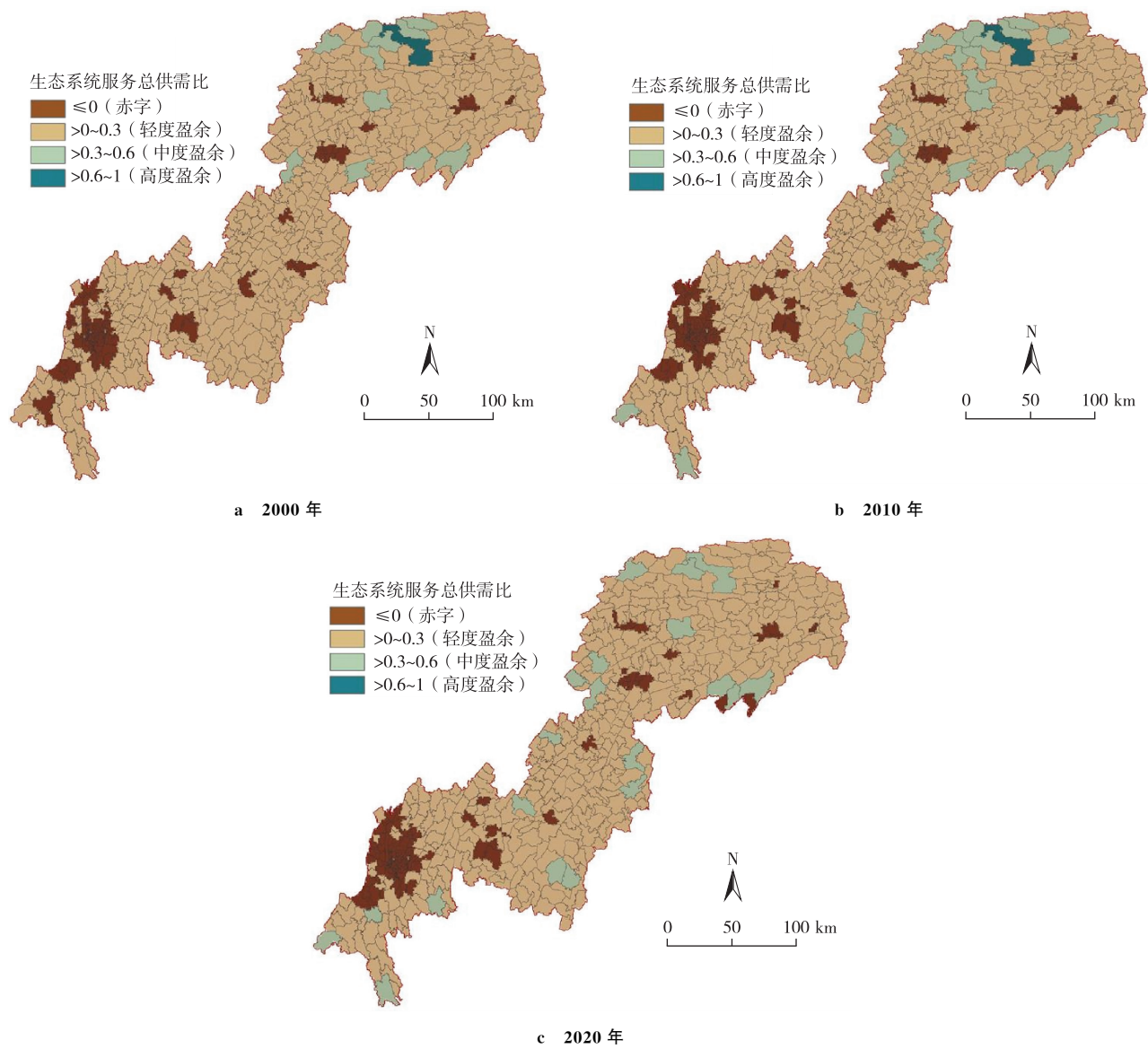


图 2 研究区生态系统服务总供需比空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of total supply and demand ratio of ecosystem services in the study area

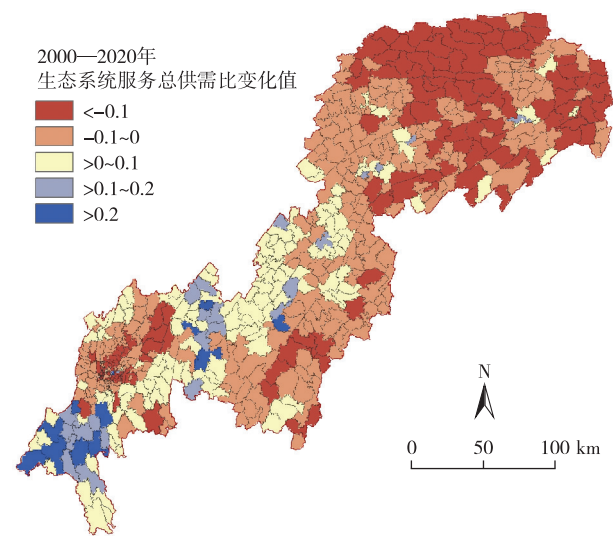


图 3 研究区生态系统总供需比变化

Fig. 3 Changes of total supply and demand ratio of ecosystem in the study area

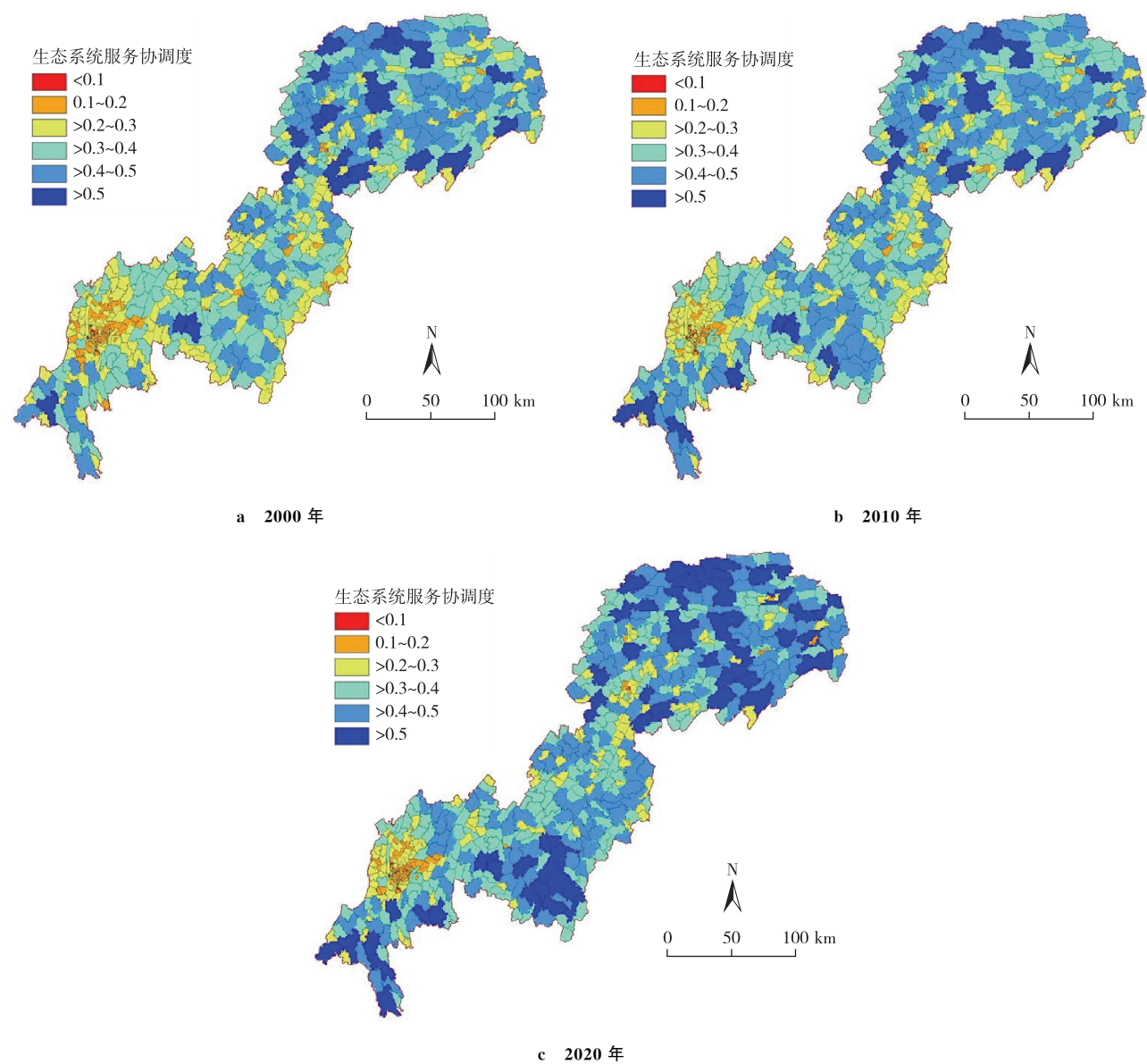


图 4 研究区生态系统服务协调度空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of ecosystem services coordination degree in the study area

为反映生态系统服务协调度变化程度,将它的变化值划分为 6 个等级,2000—2020 年研究区各乡镇该指标的时间变化如图 5 所示。从图 5 可知:研究区乡镇的生态系统服务协调度变化值在整体上以正值为主,平均值为 0.03,生态系统服务协调度在研究期间增长的乡镇有 467 个,数量占比在 80% 以上。此外,生态系统服务协调度减小的区域主要分布在研究区东北部尤其是万州、开州、云阳等地的乡镇,个别乡镇该指标减小数值超过了 0.03,表明这些地区在研究期间尚未处理好经济发展和环境保护之间的协调关系;该指标增长的区域位于研究区南部和西南部,集中分布在武隆、涪陵、江津、南岸等地,部分乡镇该指标增长数值超过 0.12,反映了这些地区在研究期间不断深入落实生态文明建设,逐步将生态环境保护放在重要的位置,使得生态系统服务协调程度有向好发展的趋势。

2.3 生态空间优化分区

在研究区生态系统服务总供需比与协调度进行分析的基础上,以这 2 个指标的变化趋势来指代研究区生态系统服务供需等级。根据研究区生态系统服务 2000—2020 年生态系统服务总供需比和协调度的时空变化特征,结合研究区地理环境,从生态系统服务供需平衡和区域发展提升角度,以乡镇为研究单元将研究区分为 4 个大分区(图 6),具体如下。

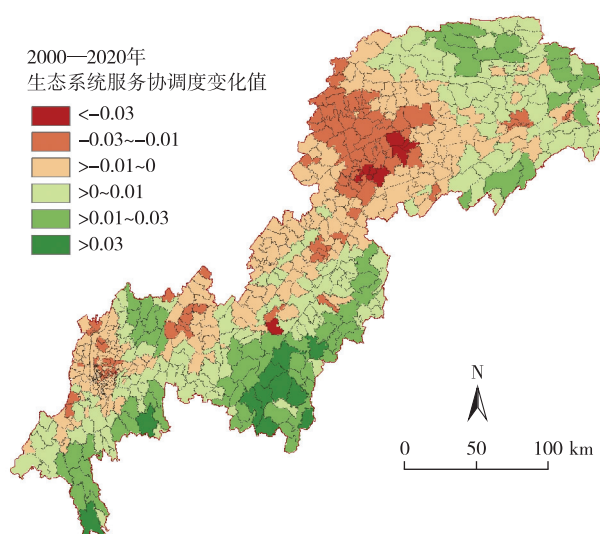


图 5 研究区生态系统服务协调度变化

Fig. 5 Changes of ecosystem services coordination degree in the study area

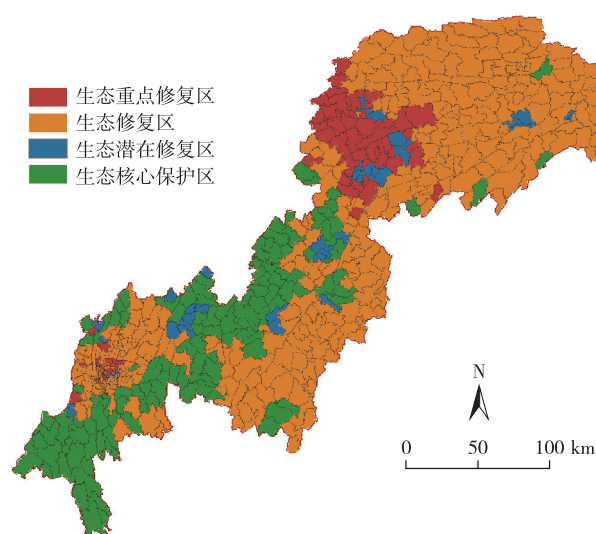


图 6 研究区生态空间优化分区

Fig. 6 Ecological space optimization zoning in the study area

1) 生态重点修复区。此类区域生态系统服务供需关系处于濒危状态,在 2000—2020 年生态系统服务总供需比和协调度变化值均小于 0,涉及乡镇的数量占比为 8.61%。此类区域主要位于万州区、开州区和云阳县,且成连片聚集;此外重庆市中心城区的北部部分街道以及江津区的双福街道也属于此类区域。

2) 生态修复区。此类区域生态系统服务供需关系处于危险状态,在 2000—2020 年生态系统服务总供需比和协调度分别呈减小及增长趋势,区域内尽管存在生态系统服务需求增加供给减少的趋势,但是生态系统服务协调程度有变好的趋势。生态修复区涉及乡镇的数量占比为 62.47%。此类地区主要分布在 3 个大区域,即:渝东北地区除该地区西部外的大部分乡镇、研究区中东部和南部乡镇、重庆市中心城区内北部中西部街道以及巴南区的东南部街道。

3) 生态潜在修复区。此类区域生态系统服务供需关系相对脆弱,涉及乡镇数量最少,仅占整个研究区乡镇总数的 3.93%,且分布较为零散。此类区域在 2000—2020 年生态系统服务总供需比和协调度分别呈增长和减小趋势,表明该区域的经济发展与生态环境之间的协调度有变差的趋势。

4) 生态核心保护区。此类区域生态系统服务供需关系相对安全,在 2000—2020 年不仅生态系统服务总供需比表现为增长的趋势,同时协调度也越来越均衡。此类区域面积占比相对较大,占整个研究区的 25%,主要分布在研究区的中西部,集中于江津区、巴南区、涪陵区、长寿区和丰都区以及忠县北部连片乡镇,此外在北碚区北部、武隆区腹地、石柱县中部等地均有少量分布。

3 讨论

本研究通过计算研究区生态系统服务供需量,基于生态系统服务总供需比与协调度变化特征,综合总供需变化关系能够较为全面地反映区域生态系统服务供需关系。以坚持“共抓大保护,不搞大开发”为出发点,根据《重庆市国土空间总体规划(2021—2035 年)》和《重庆市国土空间生态保护修复规划(2021—2035 年)》,结合区域社会生态现状和不同的供需平衡特征,本研究为有针对性地实施研究区区域生态保护和修复而提出了以下差异化治理和优化管理策略。

1) 生态重点修复区应重点改善生态系统服务供需关系。一方面,通过引入生态补偿资本恢复该类区域的生态本底;另一方面,如开州区作为农产品主产区之一,则要保障粮食安全,合理保护利用耕地资源,有效供给主要农产品。因此,在这类区域要进行高标准的农田建设和土地整治,严格保护基本耕地面积,通过发展绿色、可持续发展的有机农业以改善区域生态环境的质量,在实施生态环境保护的同时提升粮食供给能力,实现在保护中促发展。

2) 生态修复区分布较广,涉及乡镇存在较大差异,为此需进一步细化有关优化策略。渝东北地区的此类乡

镇应以城镇群为单位,鼓励相关部门改善生态本底和保护生态环境,努力构建“一心、一廊、五片”的带状网络化城镇空间。作为生态功能区的武隆、石柱等区县,拥有较为丰富的森林资源,则要以乡镇为单元将相关工作进一步细化,从而提升区域生态系统服务供给能力,增强生态产品供给能力并促进生态产品的价值实现。位于重庆市中心城区的乡镇处于经济相对发达地区,经济发展迅速、城市化程度高;在城市发展过程中,区域内大量的草地、林地、湿地等生态用地被占用,导致部分生态功能缺失,威胁到当地生态安全。未来此类区域应优先开发和保护城市绿地,将多种不同类型生态用地结合起来建设城市公园、生态廊道等,从而改善区域内的生态环境。

3) 生态潜在修复区涉及乡镇数量较少,大多位于区县城关;这些乡镇作为区县的经济中心,是各区县城市化程度和社会经济发展水平较高的地区。近些年来,快速的城市扩展导致大量的生态用地被占用并被变更为城市建设用地。因此,有必要对城镇荒地和闲置土地进行开发利用,提高建设用地利用效率,同时不断完善绿色基础设施,减小经济发展对生态系统功能的负面影响。

4) 生态核心保护区土地开发强度为中等,区域生态和自然条件良好,植被茂密,供需平衡协调,对生态系统服务的供给和确保研究区的区域生态安全具有重要意义。这些区域应以保护土壤、水源和自然生态作为主要目标,以维持生态系统原真性和功能性。应使用政策工具,在未来的发展中严禁大规模开发建设,严格控制城市建设用地的扩张,必须合理管控区域内生产建设活动,保护以自然保护地为核心和生态保护红线内的生态空间,维持区域生境质量。

需要指出的是,虽然本研究在一定程度上丰富了基于生态系统服务供需关系的生态空间分区方法,但依然存在一些局限。首先,生态系统服务供需关系的量化是生态系统服务研究的基础内容,而在本研究选择的方法中需根据研究区特征对估算模型的参数进行细化调整^[1],因此在供需量评估过程中存在不确定性。其次,从时空维度上看,本研究仅比较了 2000—2020 年研究区生态系统服务供需关系的变化,忽略了生态系统服务在时间尺度上的波动性^[7];本研究以乡镇作为研究单元,在一定程度上也忽略了尺度效应和生态系统服务空间流动性,增加了结果的不确定性。在未来研究中,可以充实更多生态系统服务类型用以综合评估区域生态系统服务供需关系,并纳入生态分区研究框架。同时需考虑生态系统服务的流动性,开展长时间序列、多空间尺度下的生态系统服务供需关系研究,此外,还需以乡镇为单元继续深化,结合宏观战略规划提升区域优化策略,制定能够指导乡镇具体操作的实施方案,进一步细化生态分区优化政策。

4 结束语

本研究基于多源数据,运用多种模型评估研究区生态系统服务供需量,分析生态系统服务总供需比和协调度变化关系,构建了基于生态系统服务供需平衡的生态空间优化分区,主要结果如下:1) 2000—2020 年,研究区大部分乡镇的生态系统服务总供需比等级为轻度盈余、中度盈余和高度盈余,且等级为轻度盈余的乡镇数量最多,重庆市中心城区大部分乡镇的生态系统服务总供需比等级为赤字;2) 生态系统服务协调度呈“东北高、西南低”的空间分布特征;研究期间协调度变化值在整体上以增长趋势为主,协调度减小区域主要分布在研究区东北部万州、开州、云阳等地的连片区域,协调度增长区域集中分布在研究区南部和西南部。3) 耦合生态系统服务总供需比和协调度变化趋势,将研究区划分为生态重点修复区、生态修复区、生态潜在修复区和生态核心保护区共 4 个大类型。本研究根据不同生态分区类型提出的差异化优化策略对保障研究区的区域生态安全具有重要意义,为开展研究区国土资源整治与生态修复提供了科学支撑。

参考文献:

- [1] 谢高地,肖玉,鲁春霞. 生态系统服务研究:进展、局限和基本范式[J]. 植物生态学报,2006,30(2):191-199.
XIE G D, XIAO Y, LU C X. Study on ecosystem services: progress, limitation and basic paradigm[J]. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(2): 191-199.
- [2] DAILY G C. Nature's services: societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington D. C.: Island Press, 1997.
- [3] 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[J]. 地理科学进展,2014,33(4):441-446.
FU B J, ZHANG L W. Land-use change and ecosystem services: concepts, methods and progress[J]. Progress in Geography, 2014, 33(4): 441-446.
- [4] 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.

- YANG Y N, LI J, WANG L, et al. Impact of urbanization on supply and demand of typical ecosystem services in Yangtze River Delta[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(6): 1555-1571.
- [5] YAHDIJIAN L, SALA O E, HAVSTAD K M. Rangeland ecosystem services: shifting focus from supply to reconciling supply and demand[J]. *Frontiers in Ecology & the Environment*, 2015, 13(1): 44-51.
- [6] 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 Z L, LIU C H, YAN X L, 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.
- [7] 岳文泽, 侯丽, 夏皓轩, 等. 基于生态系统服务供需平衡的宁夏固原生态修复分区与优化策略[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(1): 149-158.
- YUE W Z, HOU L, XIA H X, et al. Territorially ecological restoration zoning and optimization strategy in Guyuan City of Ningxia, China: based on the balance of ecosystem service supply and demand[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(1): 149-158.
- [8] 周汝波, 林媚珍, 吴卓. 生态系统服务供需视角下粤港澳大湾区国土空间生态修复分区研究[J]. *热带地理*, 2023, 43(3): 417-428.
- ZHOU R B, LIN M Z, WU Z. Land space ecological restoration zoning in Guangdong-Hong Kong-Macao Bay Area from the perspective of supply and demand of ecosystem services[J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(3): 417-428.
- [9] 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, 35(1): 217-229.
- XIE Y C, ZHANG S X, LIN B, et al. Spatial zoning for land ecological consolidation in Guangxi based on the ecosystem services supply and demand[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 217-229.
- [10] 徐彩仙, 巩杰, 燕玲玲, 等. 甘肃白龙江流域水土保持服务供需风险时空变化[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(5): 1397-1408.
- XU C X, GONG J, YAN L L et al. Spatiotemporal changes of supply and demand risk of soil conservation services in Bailongjiang Watershed, Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(5): 1397-1408.
- [11] 朱月华, 侯宗东, 徐彩仙, 等. 基于生态系统服务供需关系的甘肃白龙江流域生态风险识别与管理[J]. *地理科学*, 2023, 43(3): 423-433.
- ZHU Y H, HOU Z D, XU C X, et al. Ecological risks identification and management based on ecosystem service supply and demand relationship in the Bailongjiang River Watershed of Gansu Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(3): 423-433.
- [12] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 等. 1990—2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 5962-5973.
- YAN E P, LIN H, WANG G X, et al. Analysis of evolution and driving force of ecosystem service values in the Three Gorges Reservoir Region during 1990—2011[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [13] 程辉, 吴胜军, 王小晓, 等. 三峡库区生态环境效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(2): 127-140.
- CHENG H, WU S J, WANG X X, et al. Research progress on the effects of the Three Gorges Reservoir on the ecological environment[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(2): 127-140.
- [14] 滕明君, 曾立雄, 肖文发, 等. 长江三峡库区生态环境变化遥感研究进展[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3683-3693.
- TENG M J, ZENG L X, XIAO W F, et al. Research progress on remote sensing of ecological and environmental changes in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Chinese Journal of Science Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3683-3693.
- [15] 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 等. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 168-178.
- LI Y C, LIU C X, MIN J, et al. RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 168-178.
- [16] 叶勤玉, 杨世琦, 张强, 等. 三峡库区(重庆段)水源涵养功能遥感监测及时空分布特征分析[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(2): 184-193.
- YE Q Y, YANG S Q, ZHANG Q, et al. Analysis on water conservation function using remote sensing method in the Three Gorges Reservoir area (Chongqing Section)[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(2): 184-193.
- [17] 戴鹏, 肖作林, 刘睿, 等. 三峡库区(重庆段)土地覆被质变与量变的地貌分异特征[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 39(6): 52-64.
- DAI P, XIAO Z L, LIU R, et al. Geomorphologic differentiation characteristics of qualitative and quantitative change of land cover in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)[J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural*

- Science), 2022, 39(6): 52-64.
- [18] 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 X Y, MA P Y, LI W Q, 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.
- [19] 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.
LIU L C, LIU C F, WANG C, et al. Supply and demand matching of ecosystem services in loess hilly region: a case study of the region Lanzhou [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [20] 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 T T, HUANG Q, WANG Q. Ecological security zoning identification of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration based on supply-demand relationship of ecosystem services[J]. Mountain Research, 2022, 40(5): 727-740.
- [21] 郝亮. 基于生态系统服务供需关系的上海市生态安全格局分析[D]. 西安: 长安大学, 2021.
HAO L. Analysis of ecological security pattern in Shanghai based on the supply demand relationship of ecosystem services[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [22] 朱玉鑫, 姚顺波. 基于生态系统服务价值变化的环境与经济协调发展研究: 以陕西省为例[J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3331-3342.
ZHU Y X, YAO S B. The coordinated development of environment and economy based on the change of ecosystem service value in Shaanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3331-3342.
- [23] 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, 41(9): 3354-3367.
ZHANG P T, LIU S J, ZHOU Z, et al. Supply and demand measurement and spatio-temporal evolution of ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3354-3367.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Ecological Spatial Zoning of the Chongqing Three Gorges Reservoir Area Based on the Balance of Ecosystem Services Supply and Demand

CAI Junfei, TANG Zengwei, WANG Yalin, LIU Jian, SHU Wenqiang, XIAO He
(Chongqing Geomatics and Remote Sensing Application Center, Chongqing 401147, China)

Abstract: Clarifying the balance between supply and demand of ecosystem services and scientifically carrying out ecological spatial zoning are important prerequisites for the implementation of differentiated ecological management. Taking the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing as the study area, based on multi-source data and township-level townships as the research unit, it quantitatively evaluates the change relationship between the total supply-demand ratio and coordination degree of ecosystem services in the study area from 2000 to 2020, constructs an ecological spatial zoning method based on the balance of supply and demand of ecosystem services, delineates the ecological zoning and proposes a targeted optimization management strategy. The results show that: 1) Ecosystem services in the study area are dominated by surpluses, with the largest slight surplus, while the deficits located mainly in the central urban areas; the areas where the total supply/demand ratio is mainly decreasing, with growth dominating the townships in the north-central and southwestern parts of the study area. 2) The coordination degree of ecosystem services showed the spatial distribution characteristics of "high in northeast and low in southwest". The change in coordination degree is dominated by a increase, which is mainly distributed in the northeastern part of the study area, while the areas with decreased coordination degree were concentrated in the northeast of the study area. 3) Coupled with the change of ecosystem services supply and demand ratio and the change of coordination degree, the study area was divided into four types: key ecological restoration area, ecological restoration area, ecological potential restoration area and ecological core protection area. It proposes differentiated optimization strategies for corresponding ecological zones to provide scientific support for land resource regulation and ecological restoration.

Keywords: ecosystem services; supply and demand ratio; coordination degree; ecological spatial zoning; the Chongqing Three Gorges Reservoir Area

(责任编辑 方 兴)