

鸭绿江跨境流域生态系统服务供需时空演变

王耕, 苏芝榕

(辽宁师范大学 地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要: [目的] 探究跨境流域生态系统服务供给与需求的变化, 阐明鸭绿江流域生态系统服务的供需均衡关系, 为全境可持续发展及国际合作提供科学参考。[方法] 借助InVEST模型、ArcGIS等工具, 评估鸭绿江全流域1990—2020年固碳、生境质量和土壤保持生态系统服务供需量, 研究了其时空演变规律和供需比, 再基于SWAT划分子流域, 分析了各流域子单元的差异。[结果] (1) 研究期内, 固碳和生境质量服务供给量均呈下降趋势, 空间分布相似; 土壤保持服务在研究期内呈波动上升, 高值区由流域西部扩散到东部。(2) 生态系统各项服务需求量的变化趋势基本一致, 呈上升趋势; 固碳与生境质量空间分布基本一致, 土壤保持需求高值向流域东部与中上游扩散。(3) 各项服务的空间分布在栅格尺度上呈现供需不平衡的特征; 子流域尺度上, 供需比空间变化较小, 固碳与生境质量高值集中于流域东部; 土壤保持服务高值集中于流域西部。[结论] 鸭绿江流域的生态系统服务供需现象错配突出, 供需匹配不平衡, 中朝两国应建立跨境生态管理合作机制共同推动鸭绿江流域生态保护。

关键词: 鸭绿江流域; 生态系统服务; 供需关系; InVEST模型; 子流域

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0414-11

Spatiotemporal evolution of ecosystem service supply and demand in transboundary basin of Yalu River

Wang Geng, Su Zhirong

(School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian, Liaoning 116029, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate changes in ecosystem service supply and demand across transboundary river basins and clarify the supply-demand balance of ecosystem services in the Yalu River Basin, thereby providing scientific references for sustainable development across the entire region and international cooperation. [Methods] Using the InVEST model, ArcGIS, and other tools, the supply and demand of carbon sequestration, habitat quality, and soil conservation service were evaluated across the entire Yalu River Basin from 1990 to 2020, and their spatiotemporal evolution and supply-demand ratios were analyzed. Then, based on the SWAT model, sub-watersheds were divided and the differences among sub-units in each river basin were analyzed. [Results] (1) During the study period, both carbon sequestration and habitat quality service supply showed declining trends, with similar spatial distributions. The soil conservation service showed a fluctuating increase, and the high-value areas spread from the western to the eastern part of the river basin. (2) The demand for various ecosystem services showed a generally consistent upward trend. The spatial distributions of carbon sequestration and habitat quality were largely identical, and the high-demand areas for soil conservation spread to the eastern and middle-upper reaches of the river basin. (3) The spatial distribution of various services showed the characteristics of an imbalance between supply and demand on the grid scale. At the sub-watershed scale, the spatial variation of supply-demand ratio was small, and the high values of carbon sequestration and habitat quality

收稿日期: 2025-05-16

修回日期: 2025-06-16

接受日期: 2025-06-20

资助项目: 辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金“大连公共设施供给服务空间差异与影响因素分析”(LJ112410165047)

第一作者: 王耕(1973—), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 主要从事区域生态安全和可持续发展研究。E-mail: wanggeng@lnnu.edu.cn

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

were concentrated in the eastern part of the river basin. The high-value areas of soil conservation service were concentrated in the western part of the river basin. [Conclusion] The Yalu River Basin exhibits a pronounced mismatch between ecosystem service supply and demand, with an imbalance in supply-demand alignment. It is recommended that China and North Korea should establish a cross-border ecological management cooperation mechanism to jointly promote ecological conservation in the Yalu River Basin.

Keywords: Yalu River Basin; ecosystem services; supply and demand relationship; InVEST model; sub-watershed

生态系统服务功能是自然生态系统为人类提供的各种惠益,其服务包括供给、调节、支持和文化,这些功能不仅是维持地球生命支持系统的基础,也是人类社会可持续发展的核心要素^[1]。它能维持生态平衡与稳定性,促进经济发展与社会福祉,支撑人类生存与健康。然而,现如今生态系统服务功能面临着全球性挑战,鉴于生态系统服务功能的持续下降严重损害地域生态稳定与长远发展^[2]。因此,深入探究其供需关系对于优化生态环境与区域科学管理有着重要意义。

国内外学者已广泛聚焦于生态系统服务供需匹配关系的探索,如生态系统服务类型及权衡与协同关系^[3]、生态系统服务供需量化评估等^[4]方面。研究方法多采用土地利用估计^[5]、生态过程模拟^[6]、数据空间叠置^[7]、专家经验判别、InVEST模型、ARIES模型等,如刘立程等^[8]计算了兰州市产水、食物供给、碳固持和土壤保持4项服务的供给量及需求量,并应用双变量局部空间自相关指数为研究方法对区域内生态系统服务的供需匹配状况进行了分析与评价;王耕等^[9]以大连金普新区为例,研究小尺度下区域固碳项生态系统服务供需匹配及其时空变化;邓丽明等^[10]从不同空间尺度分析粤港澳大湾区生境质量服务、固碳服务和土壤保持服务供需关系和空间分异规律,基于冷热点分析探究生态系统服务供需多空间尺度效应特征并探究不同空间尺度生态系统服务供需关系对城市化的响应。王晓峰等^[11]采用InVEST等模型计算分析青藏高原土壤保持、产水和碳固定服务的供给与需求的时空演变特征及供需匹配状况,并分析其影响因素。车睿^[12]利用SWAT模型模拟鸭绿江和图们江流域(中国侧)蓝、绿水资源量。综上所述,当前生态系统服务需求研究多侧重于省市尺度等经济相对发达的地区,对经济落后、生态脆弱地区的研究较少;在流域的研究上,多集中于国内大型流域或跨境流域的中国段,对跨境流域全流域和跨境生态系统的研究较少,流域是由水介质将上中下游相联系的一个完整的生态域生态单元,生态系统服务不会因行政界线而被阻断。因此对跨境流域开展全域的生态服务过程研究,不仅可以从

生态整体性来有效解决生态服务供需匹配问题,而且可以为整个流域的生态系统管理和生态补偿提供决策依据。

鸭绿江流域作为中朝跨界流域重要生态屏障,具有独特的自然地理特征和生态调节机制,其服务价值对区域经济繁荣、社会福祉维系及生态屏障稳定性具有支撑性作用。以往对鸭绿江流域生态方面的研究较少,特别是生态系统供需方面。因此,本文以鸭绿江流域为例,基于InVEST模型和ArcGIS软件选择固碳、生境质量和土壤保持3项生态服务,界定各项生态服务在研究区内供给与需求的范围,解析其研究期内的时空变化,表明供给与需求的数量平衡度与空间匹配关系,从全流域出发进一步阐释生态系统服务的供需差异。这可以丰富流域全生态域的生态系统服务过程与功能研究,同时可为区域生态保护、可持续发展及跨境合作提供科学依据和实践指导。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

鸭绿江为中国朝鲜两国界河,全长795 km,位于39°43'—42°17'N,123°35'—128°45'E。河流发源于长白山天池南麓,向西南方向流经长白山脉、千山山脉北部,最后在辽宁省丹东市东港市汇入黄海北部的西朝鲜湾。鸭绿江流域指河流干流与支流的汇水区域,流域面积65 248.9 km²。支流主要有在中国境内的浑江、瑗河、蒲石河与在朝鲜境内的虚川江、长津江、秃鲁江等。鸭绿江流域地势东北高,西南低,上游河床坡度大,河流两岸山脉众多,水能资源丰富;中游水量增加,坡度变缓;下游河谷开阔,河岸多低山丘陵与平原,有江心洲。鸭绿江流域气候类型为湿润性温带季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,全年降水量800~1 200 mm。

鸭绿江不仅是重要的生态廊道,也是区域经济发展的关键纽带。流域内中国段主要种植玉米、水稻等粮食作物。近年来特色农业快速发展,形成以草莓、板栗为代表的高附加值农产品带。以丹东为中心形成装备制造、纺织服装等产业集群。沿江地区依托港

口优势,发展出口加工业。边境贸易和生态旅游成为新的经济增长点。流域内朝鲜段以资源开发和初级加工为主,惠山、满浦等边境城市是主要工业集中区。农业生产仍以传统方式为主,机械化程度较低。朝鲜境内已建设多个水电站,但开发程度相对较低。

1.2 数据来源与处理

土壤数据来源于世界土壤数据库(<https://www.fao.org/soils-portal/en/>);土地利用数据来源于GLC_FCS30土地利用数据(<https://data.casearth.cn/thematic/>);气象数据来源于美国国家海洋和大气管理局国家环境信息中心(<https://www.ncei.noaa.gov/>),选取鸭绿江流域及其周边地区20个气象站点获取1990年、2000年、2010年、2020年降水数据,进行反距离权重插值后得到流域年降水侵蚀力栅格图;DEM数据:来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),下载后在ArcGIS中经过拼接、裁剪、填注等处理;人口数据来源于GHS-POP全球人口数据集。同时将土地、土壤、人口等栅格数据统一重采样至30 m。

2 研究方法

2.1 生态系统服务评估

2.1.1 固碳供给服务与需求 固碳供给服务采用InVEST模型中Carbon模块计算,本研究依据流域数据及相关研究成果^[13-15],对4种碳密度数据进行分析,整理并生成碳密度表。通过估算7类土地利用方式中各有机碳库的平均密度,再将其与对应土地类型的面积相乘并累加,最终得到区域碳储量。公式为:

$$C_{\text{tot}} = C_{\text{above}} + C_{\text{below}} + C_{\text{soil}} + C_{\text{dead}} \quad (1)$$

式中: C_{tot} 为碳总储量(t/hm^2); C_{above} 为地上生物碳储量(t/hm^2); C_{below} 为地下生物碳储量(t/hm^2); C_{soil} 为土壤碳储量(t/hm^2); C_{dead} 为死亡有机碳储量(t/hm^2)^[16];

固碳的需求量,为生成研究期内固碳服务需求的分布图,首先将中国吉林省、辽宁省及朝鲜的年度碳排放总量分别除以其常住人口,得到相应年份的人均碳排放量;再将该人均排放量数据与栅格化人口密度数据相乘。计算公式为^[17-19]

$$D_y = \rho \times C_p \quad (2)$$

式中: D_y 为人类社会经济活动中的碳排放总量,即固碳服务需求(t/hm^2); ρ 为人口密度($\text{人}/\text{hm}^2$); C_p 为人均碳排放量。

2.1.2 生境质量供给服务与需求 生境质量供给服务采用InVEST模型的Habitat Quality模块计算,综合考量不同土地利用类型对威胁因子的敏感程度及外部威胁强度,得出生境质量,其中,威胁因子数据依据既有文献与专家咨询结果确定^[20],敏感性赋值

则参照相关研究,并结合区域特征进行校准。生境质量计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \quad (3)$$

式中: Q_{xj} 为土地利用类型 j 内栅格单元 x 的生境质量,其计算取决于4类参数:生境适宜度 H_j ,取值区间为0~1;栅格 x 的生境退化度 D_{xj} ;归一化系数 z (设定为2.5^[21])与半饱和参数 k (常规取值为退化程度最大值的50%)。

生境质量需求标准值依据既有文献^[22-23]设定为鸭绿江流域生境质量均值。栅格单元的实际需求强度通过其生境质量与该标准值的偏离程度表示。具体表达计算公式为:

$$D_{\text{Hq}}(\text{st}) = \frac{\sum_{k=1}^M S_{\text{Hq}}(x)}{A} \quad (4)$$

$$D_{\text{Hq}}(x) = \begin{cases} D_{\text{Hq}}(\text{st}) - S_{\text{Hq}}(x) & [S_{\text{Hq}}(x) < D_{\text{Hq}}(\text{st})] \\ 0 & [S_{\text{Hq}}(x) \geq D_{\text{Hq}}(\text{st})] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $D_{\text{Hq}}(\text{st})$ 表示生境质量服务需求标准值; $D_{\text{Hq}}(x)$ 表示栅格生境质量服务需求量; $S_{\text{Hq}}(x)$ 指栅格 x 的生境状况指数; A 为研究区域总面积(hm^2)。

2.1.3 土壤保持供给服务与需求 土壤保持供给服务采用InVEST模型的Soil conservation模块实现量化,各参数计算方案如下:降水侵蚀力基于Wischmeier等^[24]的公式,结合鸭绿江流域及邻近气象站点数据,经反距离权重空间插值生成年降水侵蚀力空间分布;土壤可蚀性采用Sharply Williams的EPIC模型^[25],从HWSD土壤数据库提取研究区土壤类型空间数据并参数化处理;地形因子由输入DEM数据经水文地形算法直接导出;植被覆盖因子与土壤保持因子依据既有研究^[26-27]结合流域特征进行赋值。计算公式如下:

$$SD_x = \text{RKLS}_x - \text{USLE}_x \quad (6)$$

$$\text{RKLS}_x = R_x \cdot K_x \cdot S_x \quad (7)$$

$$\text{USLE}_x = R_x \cdot K_x \cdot S_x \cdot LS_x \cdot P_x \cdot C_x \quad (8)$$

式中: R 为降水侵蚀力; K 为土壤可蚀性; LS 为地形因子; C 为植被覆盖因子; P 为土壤保持因子; SD_x 为土壤保持供给量; RKLS_x 为土壤潜在侵蚀量; USLE_x 是实际年均土壤侵蚀量,也为土壤保持需求量。

2.2 生态系统服务供需均衡关系分析

本研究引入生态系统服务供需比(ESDR)模型,定量解析鸭绿江流域生态服务供给能力与人类需求强度的空间匹配特征,从而阐明区域生态系统服务供需关系的数量规律与空间分异机制。公式如下^[28-29]:

$$ESDR = \frac{S_i - D_i}{\frac{S_{i\max} + D_{i\max}}{2}} \quad (9)$$

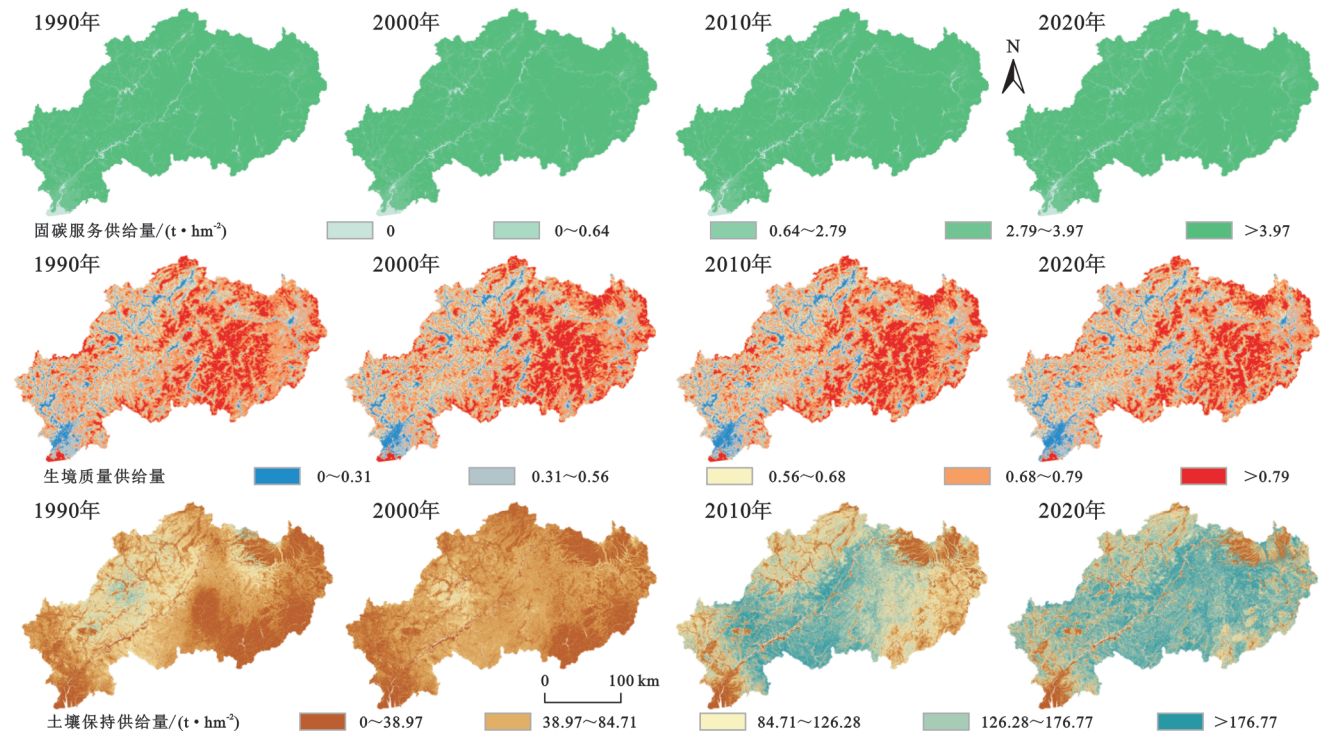
式中: S_i 为特定生态服务的供给能力; D_i 对应服务的人类需求强度; $S_{i\max}$ 为该服务供给的最大值; $D_{i\max}$ 为区域需求的最大值;ESDR指数表示供需匹配状态:正值指示生态盈余;负值指示生态赤字;零值标志供需平衡态。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务供给时空演变特征

本文从鸭绿江全流域角度出发,基于研究区的DEM与河流数据在SWAT的Watershed Delineation中划分为6个子流域,中朝各3个子流域,子流域面积分别为10 463.5,12 336.4,9 925.57,11 061.3,12 799.7,8 570 km²。

3.1.1 固碳服务供给时空变化 研究区1990—2020



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2016)2948号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图1 1990—2020年鸭绿江跨境流域生态系统服务供给时空格局

Fig. 1 Spatiotemporal patterns of ecosystem service supply in transboundary basin of Yalu River (1990—2020)

3.1.2 生境质量服务供给时空变化 1990—2020年研究区生境质量呈现显著下降趋势。具体分析显示,该区域1990年、2000年、2010年、2020年的平均生境质量指数分别为0.673 0,0.668 1,0.659 2,0.651 7。为便于不同时期空间格局的对比,采用自然断点法对上述4个年份的生境质量供给评估结果进行统一的空间分级处理。其中2000—2010年生境质量下降较大,其余时间相对平稳。从空间格局上来看,生境质量高值区(>0.79)分布于研究区东部即朝鲜两江道

与慈江道东侧,对应人类干扰强度较低的区域;反之,低值区(0~0.31)则主要分布在人类活动密集的区域,如辽宁丹东市、吉林通化市等城市化水平较高的地区。1990—2020年伴随着人类活动干扰的持续加剧,高值区范围呈现缩减态势,而低值区面积则显著扩张。从划分的子流域来看,生境质量服务最低值由流域西北部(瑗河流域附近)向流域西南部(中津河流域附近)过渡,高值区集中在河流上游人口较少的地区(图1—2)。

年固碳量呈现明显的时空分异。本研究选取1990年、2000年、2010年、2020年4个典型年份的固碳量数据深入分析。为确保不同时期评估结果的空间可比性,采用自然断点法对上述年份的固碳评估结果建立统一的空间分级体系。1990—2020年研究区固碳总量呈下降趋势,从1990年 1.3973×10^9 t到2000年 1.3956×10^9 t到2010年 1.3732×10^9 t到2020年 1.3726×10^9 t。其中1990—2000年与2010—2020年变化较小,2000—2010年下降较多。固碳量的变化主要受林地与草地的影响,研究区固碳量的空间分布特征及其动态演变与土地利用格局呈现出高度的一致性,固碳量高值分布在朝鲜部分,植被覆盖率较高,具有较高的固碳量。从划分的子流域来看,固碳服务整体变化较小,低值集中在河流入海口,高值由流域南部(秃鲁江流域附近)逐渐向流域东部(慈城河与长津河流域附近)过渡(图1—2)。

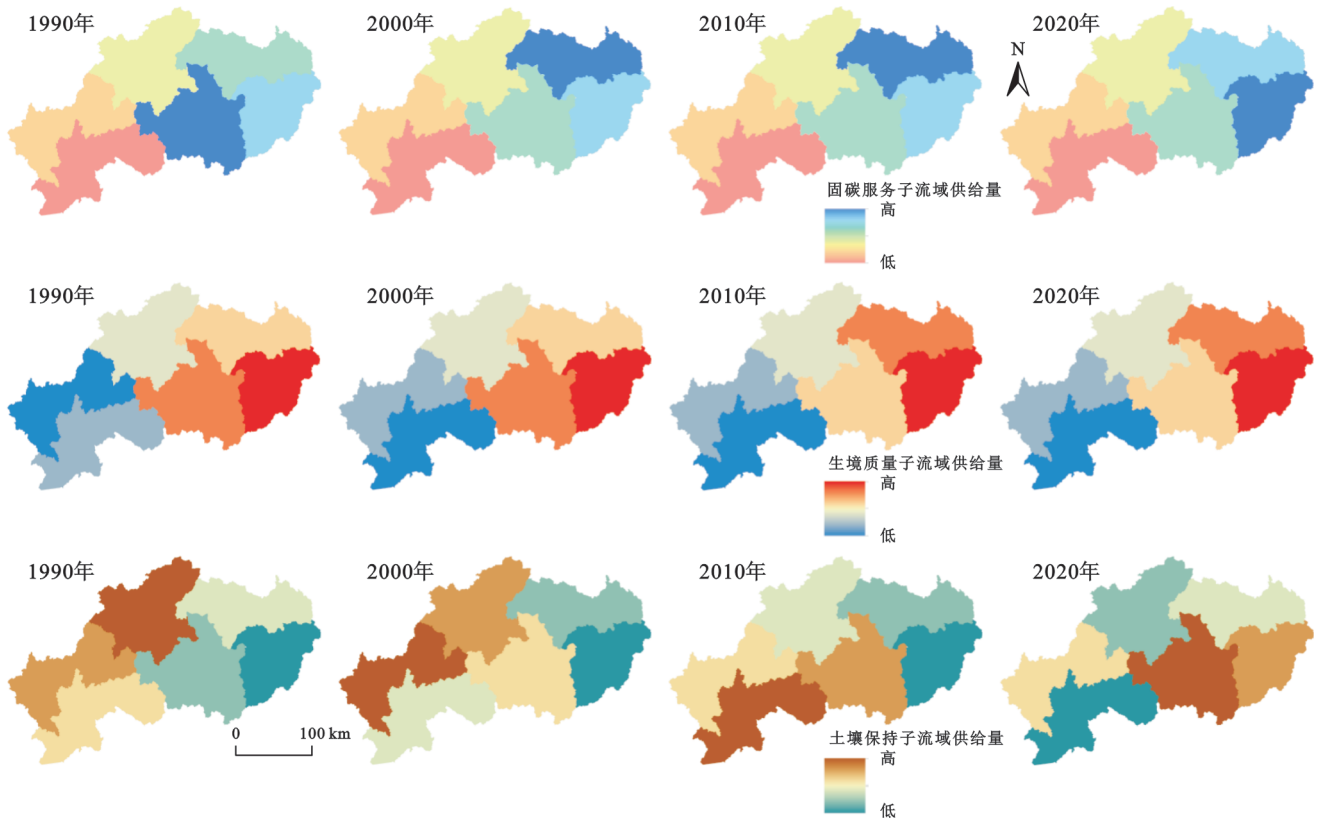


图2 1990—2020年鸭绿江跨境流域生态系统服务供给子流域统计

Fig. 2 Sub-watershed statistics of ecosystem service supply in transboundary basin of Yalu River (1990—2020)

3.1.3 土壤保持服务供给时空变化 1990—2020年研究区土壤保持服务呈现明显的时空分异。1990年、2000年、2010年及2020年4个时期的平均土壤保持量依次为50.324, 39.218, 116.689, 144.627 t。为保障跨时期空间分布特征的可比性,应用自然断点法对上述年份的土壤保持评估结果构建统一的空间分级体系。1990—2020年土壤保持量呈波动增长趋势,从1990年的 4.2747×10^9 t,减少到2000年 3.3312×10^9 t, 2000—2020年呈增长趋势,在2010年增加至 9.9118×10^9 t,在2020年增加至 1.2285×10^{10} t。其中,2000—2010年土壤保持量增长最显著。从空间格局上来看,土壤保持量高值区范围逐渐扩大,从辽宁吉林省交界处扩散到朝鲜平安南道。从划分的子流域来看,土壤保持服务时空变化较大,低值集中在流域东南部(长津河流域附近),2020年最低值转移到西南部(中津河流域附近),高值变化较大,主要集中于流域中下游地区(图1—2)。

3.2 生态系统服务需求时空演变特征

3.2.1 固碳服务需求时空变化 1990—2020年研究区碳排放呈现出显著增长趋势。这种上升主要归因于区域人口持续增长和经济快速发展,导致碳排放总量持续攀升,从1990年的 1.7030×10^{10} t到2000年的 1.8476×10^{10} t增长到2010年的 4.0930×10^{10} t,

最终增长到2020年的 5.8010×10^{10} t,其中2000—2010年增长速度最快,其余时间段增速较慢。研究区内碳排放量较高的地区主要位于中国境内城市化发展进程快、程度高与工业区较密集的地区。从划分的子流域来看,固碳服务需求量低值集中在流域上游,该区域人口较少,人类活动不频繁。高值区域由流域下游扩散到中部浑江流域附近(图3—4)。

3.2.2 生境质量服务需求时空变化 1990—2020年研究区生境质量需求展现出显著的时空演变特征。分析结果显示,该区域在1990年、2000年、2010年及2020年的平均生境质量需求指数分别为0.067 0, 0.069 0, 0.072 2, 0.073 9,呈现递增态势。为保障不同时期空间格局的可比性,应用自然断点法对上述年份的生境质量需求评估结果构建统一的空间分级框架。1990—2020年生境质量需求整体呈现微弱但上升态势。受人为干扰影响加剧,如城市化扩张、工业活动增强、交通网络建设及耕地开垦等,区域生境质量发生退化。与此相对应,生境质量需求的高值区域范围呈现出明显的扩大趋势,其中流域中国部分变化显著,集中在辽宁丹东与吉林通化以及其余城镇化区域。从划分的子流域来看,生境质量服务时空变化较小,高值在研究期内始终集中在流域西南部(中津河流域附近),最低值在河流上游(图3—4)。

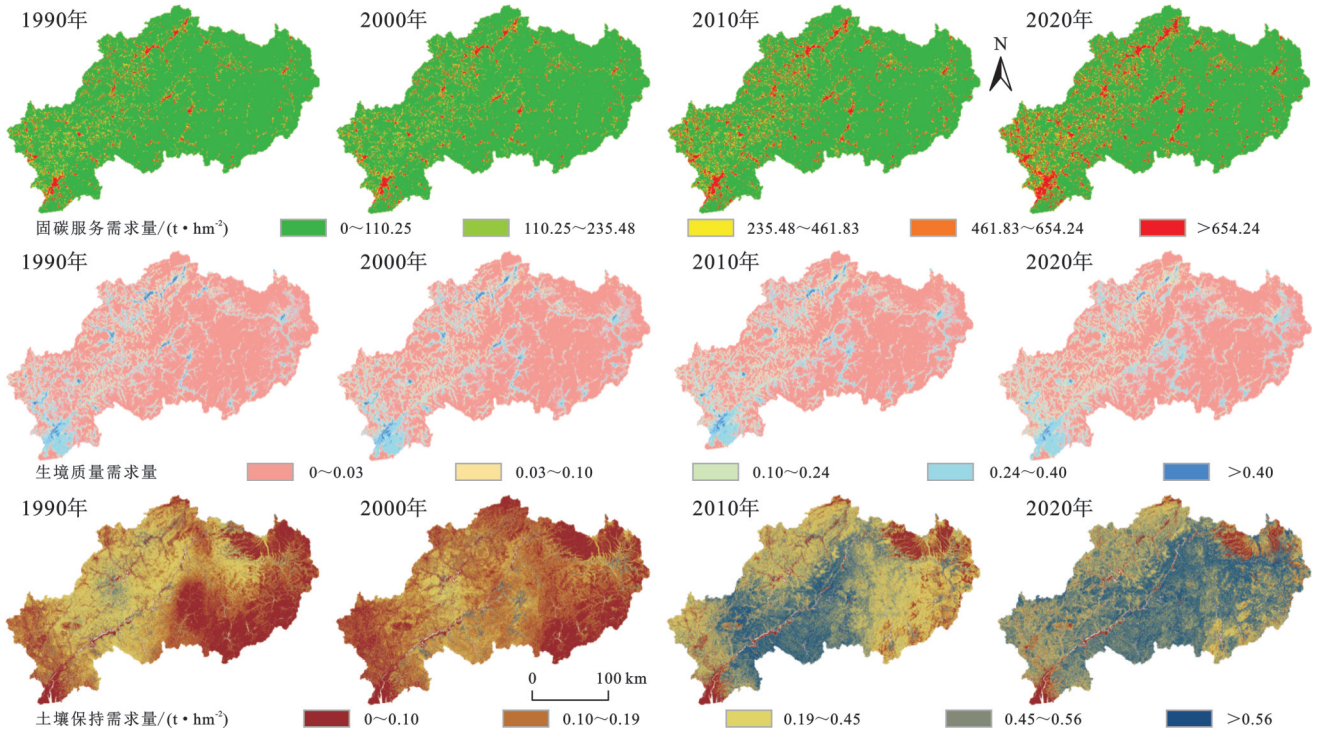


图 3 1990—2020 年鸭绿江跨境流域生态系统服务需求时空格局

Fig. 3 Spatiotemporal patterns of ecosystem service demand in transboundary basin of Yalu River (1990—2020)

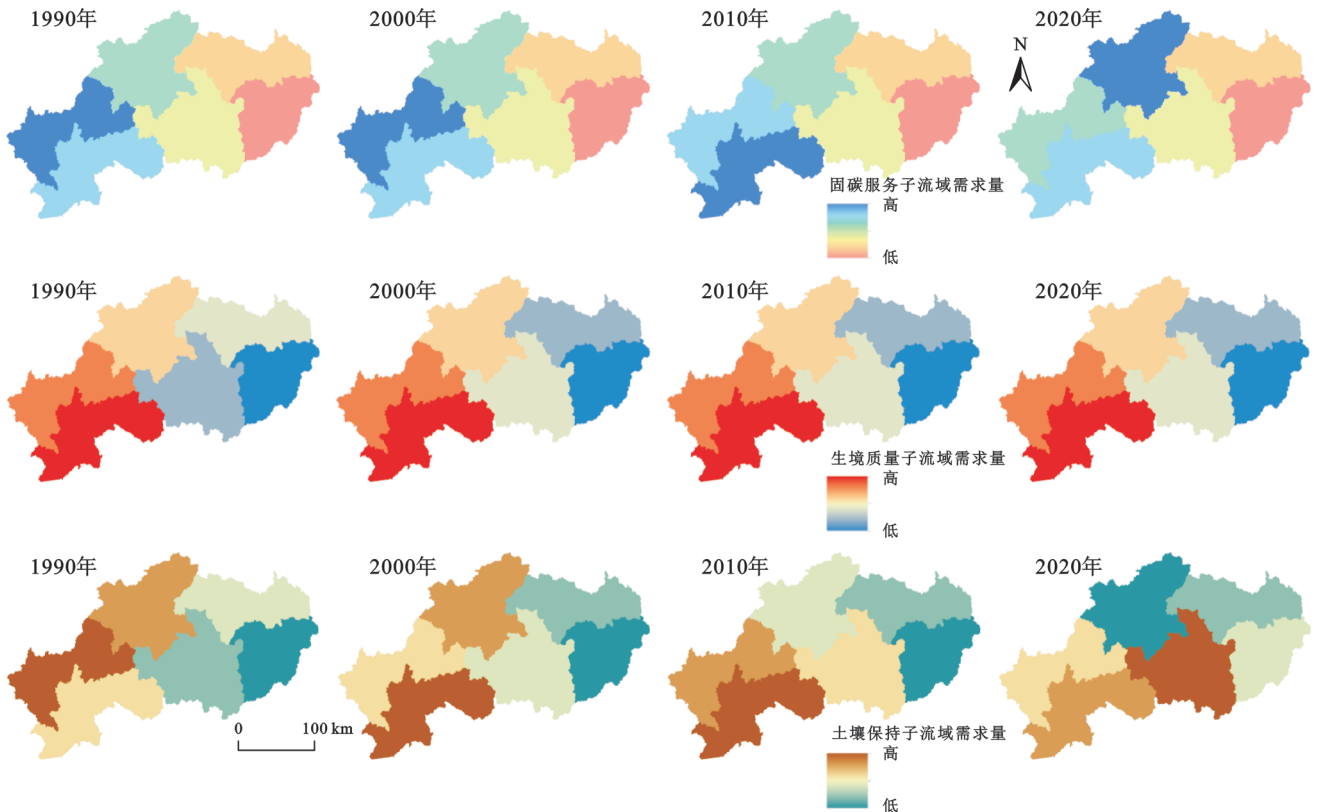


图 4 1990—2020 年鸭绿江跨境流域生态系统服务需求子流域统计

Fig. 4 Sub-watershed statistics of ecosystem service demand in transboundary basin of Yalu River (1990—2020)

3.2.3 土壤保持服务需求时空变化 1990—2020 年研究区土壤侵蚀表现出显著的时空分异特征。其侵蚀量呈现波动变化:1990 年总量为 2.5613×10^6 t, 至 2000 年下降至 1.9838×10^6 t; 2010 年后侵蚀量显

著增加, 2010 年达 7.5568×10^6 t, 2020 年进一步增至 9.7672×10^6 t, 2000—2010 年增幅大。为便于跨时期空间格局对比, 采用自然断点法对上述 4 个年份的土壤侵蚀评估结果构建统一的空间分级体系。1990

—2000年土壤侵蚀量主要在中国辽宁部分变化,2010年土壤高值区[$>0.56\text{ t}/(\text{hm}^2\cdot\text{a})$]分布于鸭绿江干流附近及朝鲜平安北道北部与慈江道西部地区,随着时间的推移,高值地区扩散,范围扩大,以朝鲜区域为主。从划分的子流域来看,水土保持服务时空变化显著。最低值由河流上游在2020年转移到流域中部(浑江流域附近),高值集中于河流下游,最高值在研究期内有一定变化(图3—4)。

3.3 生态系统服务供需均衡关系分析

3.3.1 固碳服务供需均衡关系分析 1990—2020年研究区固碳服务供需比的时空格局相对稳定。具体数据显示:1990年,供需盈余区占比仅为0.004%,短缺区占比达99.995%,平均供需比为 -2.42×10^{-3} ;2000年,盈余区占比升至0.018%,短缺区占比99.981%,平均供需比 -2.32×10^{-3} ;2010年,盈余区占比0.024%,短缺区占比99.975%,平均供需比

-2.39×10^{-3} ;2020年,盈余区占比0.047%,短缺区占比99.952%,平均供需比 -2.23×10^{-3} 。表明研究区固碳服务供需整体呈增加趋势。平均供需比在研究时期内呈负数,1990—2020年研究区内为供需短缺区,其中中国部分城市化地区供需比低于平均水平,为固碳赤字区域;其余部分趋于平衡状态;不同时期,各区域固碳盈余赤字状态存在差异,随时间推移,城市化程度高的区域固碳赤字程度加深。赤字程度较高的区域主要分布于人口稠密及人类活动强度大的地区。截至2020年,研究区整体供需比已趋近于零值,表明在空间尺度上,大部分区域的固碳供需关系正逼近平衡临界点。将整个鸭绿江流域按照水系划分为6个子流域,从划分的子流域来看,各子流域供需比差异小,1990—2010年供需比低值集中在入海口附近,2020年各子流域固碳供需比低值变化显著,流域北部(浑江流域附近)供需值最低(图5—6)。

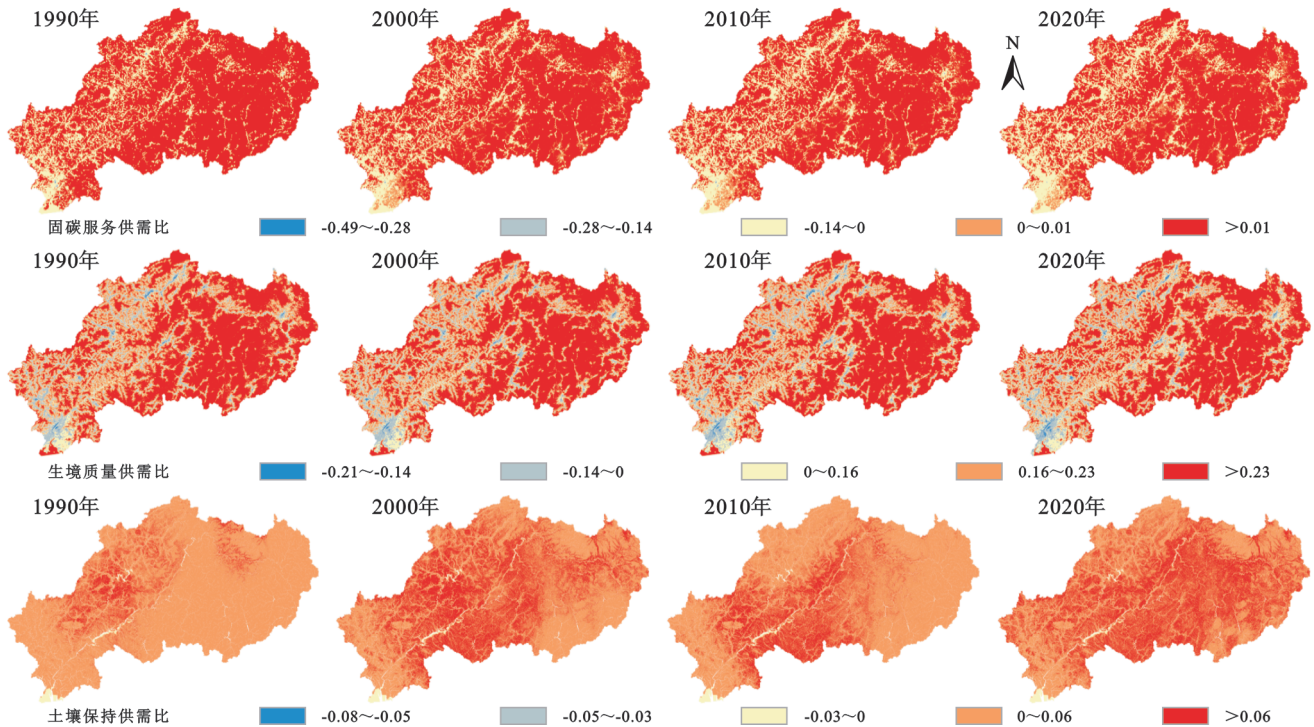


图5 1990—2020年鸭绿江跨境流域生态系统服务供需关系时空格局

Fig. 5 Spatiotemporal patterns of ecosystem service supply and demand in transboundary basin of Yalu River (1990—2020)

3.3.2 生境质量供需均衡关系分析 1990—2020年研究区生境质量服务供需比时空格局变化明显。具体数据:1990年,供需盈余区占比为90.35%,短缺区占比为9.65%,平均供需比0.1928;2000年,供需盈余区占比为89.88%,短缺区为10.12%,平均供需比0.1912;2010年,盈余区占比为89.49%,短缺区为10.21%,平均供需比0.1884;2020年,盈余区占比为89.73%,短缺区为10.27%,平均供需比0.1864;表明研究区生境质量服务供需匹配整体呈降低趋势。研究期间内生境质量供需盈亏格局变化明显,生境质

量大部分供大于求,朝鲜地区更为显著,该地区人口少,人为干扰度低;供需赤字地区主要分布于鸭绿江干流及中国部分城区如辽宁丹东市、吉林通化市,该区人类活动强烈,人类密度呈增长趋势,对生境质量服务的需求更大,故造成供需失衡。如图5—6所示,将整个鸭绿江流域按照水系划分为6个子流域,从划分的子流域来看,1990年平均供需比最低的在流域西北部(瑷河流域附近),2000年及之后,平均供需比最低在流域西南部(中津河流域附近)。研究期内供需比最高都在流域东南部(长津河流域附近)。

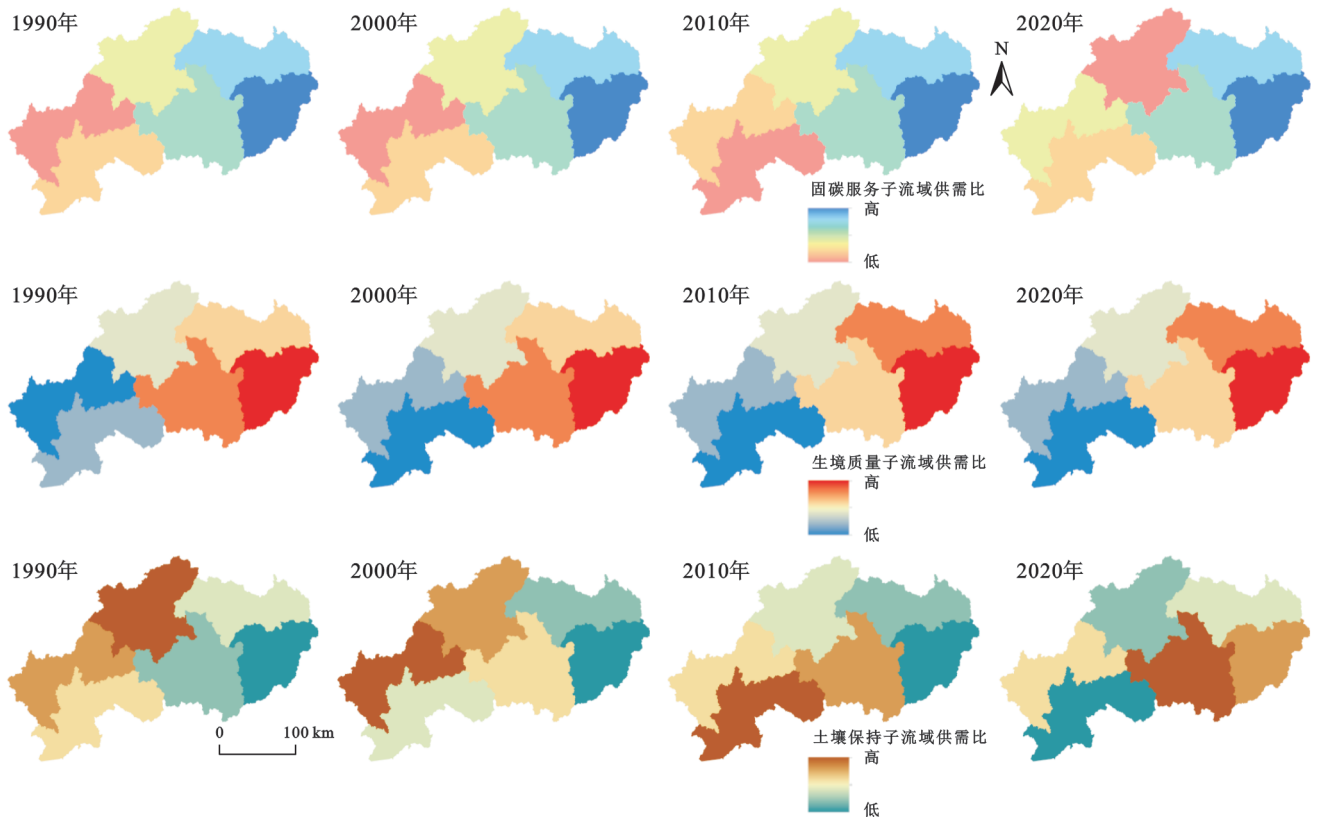


图6 1990—2020年鸭绿江跨境流域生态系统服务供需关系子流域统计

Fig. 6 Sub-watershed statistics of ecosystem service supply and demand in transboundary basin of Yalu River (1990—2020)

3.3.3 土壤保持供需均衡关系分析 1990—2020年研究区土壤保持服务供需比时空格局变化显著。具体数据:1990年,盈余区占比高达98.42%,短缺区仅占1.57%,平均供需比0.029 2;2000年,盈余区占比97.93%,短缺区为2.06%,平均供需比0.048 7;2010年,盈余占比为99.31%,短缺区为0.69%,平均供需比0.039 7;2020年,盈余区占98.51%,短缺区为1.48%,平均供需比则达到研究期内最高值0.051 5。表明研究区土壤保持服务供需匹配整体呈波动变化趋势,其中2000—2010年有所下降,其余研究期内呈上升趋势。1990—2020年鸭绿江流域土壤保持服务供需关系具有明显的空间特征:除入海口干流河段零星分布短缺区外,供给盈余广泛覆盖其他区域。该服务在研究区内大多数位置的供需比为正值,表明其供给在整体上能够满足当地需求。高值区1990年集中在中国辽宁部分,2000年扩散到整个流域中部,2010年高值集中在干流与朝鲜慈江道附近,2020年扩散到流域大部,高值区域为林地密集区域。由图5—6可知,将整个鸭绿江流域按照水系划分为6个子流域,从划分的子流域来看,供需比低值在研究期内集中在流域东南部(长津河流域附近),此区域土壤保持供给少于需求。高值区域变化较大,1990—2000年集中在流域西部(瑗河流域、中津河流域附近)。

4 讨论

梳理生态系统服务功能供需关系的时空演变可为生态系统服务供需关系调整提供有力支持,从而指导区域生态系统管理。与常馨悦等^[30]对鸭绿江流域跨国界地区水土保持功能时空格局的研究对比,后者集中于对流域水土保持单一模块的分析,本研究利用InVEST模型等手段分析鸭绿江流域生态系统服务功能的3个模块:固碳、生境质量和土壤保持,对三项具体服务指标的质量进行核算和供需关系分析,更加详细地在栅格尺度上展现供需关系的时空分布格局,其结果更具客观性和直接性。与车睿^[12]对鸭绿江流域(中国侧)蓝、绿水资源变化规律的分析相比,本文从鸭绿江全流域出发,其生态系统是一个整体,上游、中游和下游之间通过水流、物质循环和生物迁徙等过程紧密联系。研究全流域有利于保证生态系统的完整性。

本研究基于多源遥感数据、地理信息系统(GIS)技术和生态系统服务评估模型(如InVEST模型),系统分析鸭绿江流域1990—2020年固碳、生境质量和土壤保持3种关键生态系统服务功能的时空演变特征,并从供给、需求和供需比的角度探讨其空间匹配关系。研究结果表明,鸭绿江流域的生态系统服务功能总体呈现下降趋势,其中生境质量和土壤保持

功能的退化尤为显著,而固碳功能的变化相对较小。空间分布上,上游森林区域的生态系统服务功能较高,而中下游城市化区域的生态系统服务功能较低。上游森林区域的生态系统服务功能供给较高,但由于人口密度较低,需求相对较小;而中下游城市化区域的生态系统服务功能供给较低,但由于人口密度和经济活动强度较高,需求显著增加。这种供需错配问题在城市化快速发展的区域尤为突出,可能导致生态风险的加剧。如:(1)水资源矛盾。中下游地区人口相对稠密,水资源需求远高于供给,可能引起水资源短缺,进一步为农业与居民用水带来不便;(2)土壤侵蚀风险。城市化区域的土壤保持功能较低,而土地利用强度较高,可能导致土壤侵蚀加剧,进而影响农业生产和生态安全。(3)固碳功能的区域差异。上游固碳功能较高,但由于人口密度较低,其碳储存的社会经济价值未能充分发挥;而中下游城市化区域的固碳功能较低,但碳排放需求较高,可能导致区域碳平衡的失调。鸭绿江流域的生态系统服务功能退化及其供需错配问题凸显跨境生态管理的重要性。本研究为中朝两国在跨境生态管理、数据共享和政策协调方面提供以下政策启示:加强跨境合作,中朝两国应建立跨境生态管理合作机制,共同制定生态系统保护与恢复的政策措施。如:(1)通过跨境自然保护区网络保护上游森林和湿地生态系统,减少跨境生态风险;优化土地利用规划:在城市化快速发展的区域,应优化土地利用规划,减少对生态系统服务功能的负面影响。(2)通过生态廊道建设缓解生境破碎化问题,通过退耕还林和湿地恢复工程提升生态系统服务功能;推动数据共享与技术合作,中朝两国应加强生态系统监测数据的共享与技术合作,为跨境生态管理提供科学依据。(3)建立联合监测站,实时监测流域生态系统服务功能的变化,并通过数据共享平台促进研究成果的交流与应用。

尽管本研究揭示了鸭绿江流域生态系统服务功能的供需演变,但仍存在一些局限性:由于跨境数据获取的困难,部分数据(如中朝两国的人类活动数据)可能存在不完整性,可能影响研究结果的准确性。未来研究应加强跨境数据共享,提高数据的时空分辨率。本研究主要关注固碳、生境质量和土壤保持3种生态系统服务功能,未来研究应进一步探讨多种服务功能之间的协同与权衡关系。未来研究可从多方面开展:结合气候变化和土地利用变化情景,模拟和预测生态系统服务功能的未来变化趋势;通过案例研究,总结跨境生态管理的成功经验,为类似区域的生态管理提供参考。

5 结论

(1) 1990—2020年鸭绿江流域固碳和生境质量供给量服务呈现出不同程度的下降趋势,固碳和生境质量服务在研究期内空间分布相似,高值区主要分布在流域上游朝鲜部分;土壤保持服务在研究期内呈波动上升趋势,高值区集中在流域西部,随时间推移扩散到东部地区。

(2) 1990—2020年鸭绿江流域生态系统服务的需求量总体呈波动性增加。其中固碳和生境质量服务在研究期内空间分布相似,高值位于流域中下游城市化程度相对高的区域;土壤保持需求量高值向流域东部与中上游扩散。

(3) 鸭绿江流域固碳、生境质量和土壤保持服务的空间分布在栅格尺度上呈现供需不平衡、地区差异较大的特征;生境质量与土壤保持服务平均供需比为正,其中生境质量供需比呈下降趋势,土壤保持供需比呈波动上升趋势;固碳服务平均供需比为负,供需比呈上升趋势。以全流域为整体,按照河流流向划分子流域,子流域尺度上,供需比空间变化较小,固碳和生境质量高值集中于流域上游;土壤保持服务高值集中于流域中下游。

(4) 中朝两国在鸭绿江流域生态系统中应分工明确,中国侧重生态修复与污染控制,朝鲜侧重森林保护与可持续农业。两国应通过建立跨境生态管理机制统筹协调两国在生态保护、资源利用和污染防治方面的政策。制定跨境生态保护规划,明确两国在流域内的生态保护目标和责任分工。数据共享,建立跨境生态系统监测网络,共享水质、气象、土地利用等数据,实时监测生态系统服务功能的变化。定期发布联合监测报告,为跨境生态管理提供科学依据。联合生态修复项目、生态补偿机制和公众参与,共同推动鸭绿江流域的生态保护与可持续发展。

参考文献(References):

- [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] Costanza R, De Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
 - [3] 方露露,许德华,王伦澈,等.长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究[J].*地理研究*, 2021, 40(3): 821-838.
- Fang L L, Xu D H, Wang L C, et al. The study of ecosystem services and the comparison of trade-off and synergy in Yangtze River Basin and Yellow River Basin [J].

- Geographical Research, 2021, 40(3):821-838.
- [4] Wolff S, Schulp C J E, Kastner T, et al. Quantifying spatial variation in ecosystem services demand: a global mapping approach[J]. *Ecological Economics*, 2017, 136: 14-29.
- [5] 王少剑,周诗洁,方创琳.1980—2020年中国陆地生态系统碳储量时空格局与演进规律[J]. *中国科学:地球科学*, 2024, 54(10):3323-3339.
Wang S J, Zhou S J, Fang C L. Spatial-temporal patterns and evolution of carbon storage in China's terrestrial ecosystems from 1980 to 2020[J]. *Scientia Sinica (Terra)*, 2024, 54(10):3323-3339.
- [6] 杨岚,寇旭阳,付晓,等.长白山温带森林生态系统关键要素耦合及演替过程动态模拟[J]. *生态学报*, 2024, 44(12):5377-5388.
Yang L, Kou X Y, Fu X, et al. Coupling key elements and simulating the succession dynamic in the Changbai Mountain temperate forest ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(12):5377-5388.
- [7] Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(2):161-185.
- [8] 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 Lanzhou [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(9):1921-1937.
- [9] 王耕,俞乔山.大连金普新区碳固持生态服务供需格局时空差异[J]. *生态学报*, 2023, 43(12):4847-4857.
Wang G, Yu Q S. Spatio-temporal pattern of supply and demand of carbon sequestration services in Jinpu New Area, Dalian City [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(12):4847-4857.
- [10] 邓丽明,杨骥,尹小玲,等.粤港澳大湾区生态系统服务供需关系及其对城市化多空间尺度的响应[J]. *生态学报*, 2024, 44(20):9094-9107.
Deng L M, Yang J, Yin X L, et al. Supply and demand of ecosystem services and its multi-spatial scale response to urbanization in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(20): 9094-9107.
- [11] 王晓峰,尧文洁,冯晓明,等.青藏高原生态系统服务供需变化及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2023, 43(17): 6968-6982.
Wang X F, Yao W J, Feng X M, et al. Changes and driving factors of ecosystem services supply and demand on the Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(17):6968-6982.
- [12] 车睿.鸭绿江和图们江流域(中国侧)蓝、绿水资源时空变化及归因分析[D].长春:东北师范大学,2022.
Che R. Temporal and spatial changes and attribution analysis of blue and green water resources in Yalu River and Tumen River basins (China side) [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2022.
- [13] 解宪丽,孙波,周慧珍,等.中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1):35-43.
Xie X L, Sun B, Zhou H Z, et al. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1):35-43.
- [14] Tao H, Nan Y, Liu Z F. Spatiotemporal patterns of forest in the transnational area of Changbai Mountain from 1977 to 2015: a comparative analysis of the Chinese and DPRK sub-regions [J]. *Sustainability*, 2017, 9(6):1054.
- [15] 甘雪刚.中朝俄跨国界地区土地退化过程对区域生态系统服务的影响研究[D].吉林延吉:延边大学,2022.
Gan X G. Impacts of land degradation on regional ecosystem services in the transnational area of China, north Korea and Russia area [D]. Yanji, Jilin: Yanbian University, 2022.
- [16] 李成,赵洁,庄智程,等.长三角城市群生态系统服务权衡强度时空演变及影响因素[J]. *生态学报*, 2022, 42(14):5708-5720.
Li C, Zhao J, Zhuang Z C, et al. Spatiotemporal dynamics and influencing factors of ecosystem service trade-offs in the Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14):5708-5720.
- [17] 刘春芳,王韦婷,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, 35(9):2177-2190.
Liu C F, Wang W T, Liu L C, et al. Supply-demand matching of county ecosystem services in Northwest China: a case study of Gulang county [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9):2177-2190.
- [18] 施开放.多尺度视角下的中国碳排放时空格局动态及影响因素研究:基于DMSP-OLS夜间灯光遥感数据的分析[D].上海:华东师范大学,2017.
Shi K F. A multiscale analysis on spatiotemporal pattern of carbon emissions and its impact factors in China using DMSP-OLS data [D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.
- [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, 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.
- [20] 刘芮言.环日本海地区土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响研究[D].吉林延吉:延边大学,2021.
Liu R Y. Impact of land use/cover change on ecosystem services in the surrounding area of Japan Sea [D].

- Yanji, Jilin: Yanbian University, 2021.
- [21] Gao Y, Ma L, Liu J X, et al. Constructing ecological networks based on habitat quality assessment: a case study of Changzhou, China [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1):46073.
- [22] Shi Y S, Shi D H, Zhou L L, et al. Identification of ecosystem services supply and demand areas and simulation of ecosystem service flows in Shanghai [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 115:106418.
- [23] 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.
- Yang J, Tang X L, Yuan S J, 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.
- [24] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning [M]. Washington, D. C.: Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.
- [25] Sharpley A N, Williams J R. EPIC. Erosion/productivity impact calculator: 1. model documentation [J]. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, 1990, 1768:3-9.
- [26] 田一辰. 基于 3S 的退耕还林工程生态服务功能评估及权衡分析 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- Tian Y C. The study on ecological service evaluation and trade-off analysis of the gain for green project based on 3S technology [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.
- [27] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究 [J]. *水土保持学报*, 2000, 14(2):19-24.
- Cai C F, Ding S W, Shi Z H, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2000, 14(2):19-24.
- [28] 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, 37(17):5846-5852.
- Bai Y, Wang M, Li H, et al. Ecosystem service supply and demand: theory and management application [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(17):5846-5852.
- [29] 陶芹, 陶宇, 欧维新. 不同碳减排目标下长三角地区碳固持服务供需演变分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(1):191-201.
- Tao Q, Tao Y, Ou W X. Mapping the changes in supply and demand of carbon sequestration service in the Yangtze River Delta under different carbon emission reduction targets [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(1):191-201.
- [30] 常馨悦, 董禹麟, 包广道, 等. 鸭绿江流域跨国界地区水土保持功能时空格局研究 [J]. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2022, 42(2):139-150.
- Chang X Y, Dong Y L, Bao G D et al. Spatial temporal pattern of soil and water conservation function in trans-boundary area of Yalu River Basin [J]. *Journal of Southwest Forestry University: Natural Sciences*, 2022, 42(2):139-150.
-
- (上接第 413 页)
- [25] 肖笃宁, 李秀珍. 当代景观生态学的进展和展望 [J]. *地理科学*, 1997, 17(4):356-364.
- Xiao D N, Li X Z. Progress and prospect of contemporary landscape ecology [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 17(4):356-364.
- [26] 梁发超, 刘诗苑, 起晓星, 等. 近 30 年闽南沿海乡村聚落用地空间演化过程研究 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(22):18-26.
- Liang F C, Liu S Y, Qi X X, et al. Spatial evolution process of rural settlement land in coastal areas of southern Fujian in recent 30 years [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22):18-26.
- [27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望 [J]. *地理学报*, 2017, 72(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [28] 楼雨晨, 黄璐, 李昂, 等. 太湖流域乡村聚落百年格局演变及其影响因素: 以浙江省湖州市为例 [J]. *水土保持研究*, 2025, 32(4):320-331.
- Lou Y C, Huang L, Li A, et al. Evolution of the spatial pattern and influencing factors of rural settlements in the Taihu Basin over the past century: a case study of Huzhou City, Zhejiang Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(4):320-331.
- [29] 金贵, 邓祥征, 赵晓东, 等. 2005—2014 年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征 [J]. *地理学报*, 2018, 73(7):1242-1252.
- Jin G, Deng X Z, Zhao X D, et al. Spatio-temporal patterns of urban land use efficiency in the Yangtze River Economic Zone during 2005—2014 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(7):1242-1252.
- [30] 刘荣萍, 周忠发, 朱孟, 等. 易地扶贫搬迁驱动下喀斯特山区乡村聚落时空演变特征 [J]. *地理科学*, 2023, 43(11):2024-2032.
- Liu R P, Zhou Z F, Zhu M, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of rural settlements in Karst mountainous areas driven by poverty-alleviation relocation [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, 43(11):2024-2032.