DOI: 10.20103/j.stxb.202403280665

雷鸣,马国霞,於方,唐泽,杨威杉,周颖,彭菲.基于供需关系的黄河流域生态系统服务流研究.生态学报,2025,45(13): - .

Lei M, Ma G X, Yu F, Tang Z, Yang W S, Zhou Y, Peng F.Study on the ecosystem service flow based on the relationship of between supply and demand in Yellow River .Acta Ecologica Sinica,2025,45(13): - .

基于供需关系的黄河流域生态系统服务流研究

雷 鸣[1],马国霞[1,*],於 方[1],唐 泽[1,2],杨威杉[1],周 颖[1],彭 菲[1]

1 生态环境部环境规划院生态环境与经济核算中心, 北京 100041

2 北京师范大学, 北京 100091

摘要:生态系统为人类供给产品与服务,是人类社会可持续发展的基础。研究生态系统服务的供给以及人类社会对生态系统服务的需求与消费,分析生态系统服务流的供需特征与流动关系,对区域生态系统的管理和生态补偿的开展具有重要意义。研究以黄河流域为例,计算了 2021 年的生态系统服务供给与需求指数,基于最小累计阻力(MCR)模型、重力模型和城市断裂点理论等多种方法和模型,确定生态系统服务供给区到需求区的生态系统服务空间流转路径和流转量。结果表明:1)黄河流域上游地区的单位面积生态系统服务供给量高于中游和下游地区,黄河流域下游区域生态系统服务需求量高于中上游地区,供给和需求呈现空间异质性;2)从黄河流域生态系统服务供需平衡关系看,黄河流域上游地区主要为生态系统服务供需盈余区,中游的陕西省、山西省和宁夏回族自治区的大部分地市为生态系统服务供需平衡区,下游的河南省和山东省为生态系统服务供需赤字区。3)2021 年,黄河流域生态系统服务流转量共计 5794.3 亿元,其中甘肃省生态系统服务流转量 2223.9 亿元,青海省生态系统服务流转量 1650.3 亿元,青海省和甘肃省的生态系统服务主要流向山西省。研究结果为黄河流域横向生态补偿机制构建提供理论支撑,建议优化青海省和甘肃省重点生态功能区转移支付,形成受益者付费、保护者得到合理补偿的良性局面。4)生态系统服务流转强度会随着传输距离增加而衰减,生态系统服务很难从远距离的生态系统服务供给区传递至需求区,应当加强生态系统服务需求区周边的生态建设,通过增加周边的生态系统服务供给提高需求区的人类生态福祉。

关键词:黄河流域;生态系统服务流;生态系统服务价值;供需关系

Study on the ecosystem service flow based on the relationship of between supply and demand in Yellow River

LEI Ming[1], MA Guoxia[1,*], YU Fang[1], TANG Ze[1,2], YANG Weishan[1], ZHOU Ying[1], PENG Fei[1]

1 *Center for Eco-Environmental Accounting, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing* 100041, *China*

2 *Beijing Normal University, Beijing* 100091, *China*

Abstract: Ecosystem provides humans with goods and services that form the foundation of sustainable human development. The study of ecosystem services supply, demand and consumption as well as flow characteristics and relationships, is significant for regional ecosystem management and the development of ecological compensation policies. This study adopts the Yellow River Basin as a case study, calculates ecosystem service supply and demand indices for 2021, and identifies spatial flow paths and quantities of usage from the supply area to the demand area using various methods and models, including the Minimum Cumulative Resistance (MCR) model, the gravity model, and the urban breakpoint theory. The results indicated that: 1). The ecosystem service supply per unit area in the upstream region of the Yellow River exceeds that of the middle and lower reaches. Meanwhile, the regional demand for ecosystem services in the lower stream of the Yellow River has surpassed that in the middle and upper stream, demonstrating spatial heterogeneity in both supply and

基金项目:国家自然科学基金(42277491)

收稿日期:2024-03-28; **网络出版日期**:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: magx@ caep.org.cn

demand across the Yellow River Basin. 2). Additionally, in terms of the balance between supply and demand of ecosystem services in the Yellow River, the upstream area primarily exhibits a surplus of ecosystem service in supply. Most of the cities in Shaanxi Province, Shanxi Province, and Ningxia Hui Autonomous Region in the middle stream maintain a balance in ecosystem service supply, while Henan Province and Shandong Province in the downstream experiencing a deficit in ecosystem service supply. 3). In 2021, the total value of ecosystem service flows in the Yellow River Basin was 579.43 billion yuan. This total includes 222.39 billion yuan from Gansu Province and 165.03 billion yuan from Qinghai Province, with ecological services predominantly transferred to Shanxi Province. This study provides theoretical support for the construction of a horizontal ecological compensation mechanism in the Yellow River Basin, and suggests optimizing the transfer payments for key ecological functional areas in Qinghai and Gansu Provinces, so as to form a benign situation in which the beneficiaries pay and the protectors are reasonably compensated. 4). The intensity of ecosystem service flows demonstrates distance-decay characteristics, with long-distance transmission from supply to demand areas remaining constrained. Ecological restoration around ecosystem service demand areas should be enhanced to improve human ecological well-being in the demand areas by increasing the supply of ecosystem services in the vicinity.

Key Words: Yellow River Basin; ecosystem service flow; ecosystem service values; supply and demand relationship

生态系统为人类提供各种产品和服务,是人类社会赖以生存和发展的基础。自上世纪 90 年代以来,生态系统服务研究逐步成为地理学和生态学研究的热点和前沿[1—3]。随着我国“两山”理论实践和习近平生态文明思想的践行,掀起了我国生态系统服务价值核算的研究热潮,促使国内生态系统服务价值核算由理论探讨转向实践应用[4—9]。在实践应用的新时期,如何基于生态系统服务价值核算进行生态补偿政策设计成为关注的重点,但已有研究主要从生态系统服务供给视角出发,忽视了生态系统服务供给-流动-需求的作用关系[10],无法准确刻画生态系统服务的受益对象、空间溢出范围和溢出价值量,影响了生态系统服务价值核算结果的政策应用。

生态系统服务流作为连接生态系统服务供给和需求的纽带,逐渐成为国内外生态系统服务研究的热点[11—14]。生态系统服务流是在一定时间尺度内具有流动性、传递性的某种服务在不同空间区域的动态过程[15],是对当前生态系统服务价值评估、权衡协同及其空间异质性等研究的综合与延伸[16]。识别生态系统服务流动路径,提取生态系统服务供给区和需求区,分析生态系统服务供需平衡关系,研判生态系统服务权衡与协同作用,量化生态系统服务流转量,刻画生态系统服务的形成、输送、转化和维持过程[17],能够有效支撑生态补偿政策等管理措施的制定[18]。

然而,我国生态系统服务流的研究尚处于理论探索和实践应用初期,重点聚焦在服务流的量化和服务流的供需评估两大方面[19—20],如通过 InVEST 模型、RUSLE 模型、风沙扩散模型等生态模型开展单一生态系统服务类型的评估,并通过构建数据矩阵等统计模型对服务流进行空间模拟。但生态系统服务作为一项或者多项生态功能综合作用的结果,不同生态系统服务之间可能存在此消彼长的权衡和协同关系,单一的生态系统服务流动研究容易造成研究结果的相互矛盾,需要将生态系统服务作为一个整体,系统性的完成从供给区传递至需求区的全过程链式路径研究。同时,生态系统服务流是一个复杂的时空动态过程,生态系统服务流具有空间异质性和时空尺度依赖性[21—22],不同生态系统服务类型的服务流量和不同的服务流空间流转路径存在一定差异性,为此,Fisher 等(2009)[23]将生态系统服务流划分为原位服务流、全向服务流和定向服务流三类,探析生态系统服务流的复杂性。此外,当前生态系统服务流的研究多集中于小流域尺度[24—25],其形成的框架与范式不具备推广性,亟需开展更大尺度的生态系统服务流研究。为此,需要从更加宏观的流域尺度,从整体服务流的视角,加强对不同生态系统服务类型内在过程机理的深入理解,重视生态系统服务的地理空间特征,准确把握服务流的流向、流动路径以及在空间流动过程中可能产生的传递效益[26—27]。

黄河流域作为我国第二大流域,涵盖了森林、草原、河流、湖泊、湿地等众多生态系统类型,拥有三江源草

原草甸湿地生态功能区、祁连山冰川与水源涵养生态功能区、秦巴生物多样性生态功能区等 6 个国家重点生态功能区,是国家财政转移支付的主要区域,也是开展生态补偿实践的重要区域。为此,本文以黄河流域为研究区域,构建生态系统服务空间流动模型,厘清生态系统服务在自然系统和人类社会系统间的转移过程,辨识黄河流域生态系统服务供给区和需求区,揭示生态系统服务的传输路径和空间效应,进行黄河流域生态系统“源汇”地区与流转量时空变化分析,对生态系统服务的空间溢出范围、溢出价值进行科学定量评估,为黄河流域生态补偿等政策制定提供科学依据。

1　研究方法及数据来源

1.1　研究区概况

黄河流域位于我国北部,发源于青藏高原的巴颜喀拉山脉,沿途流经青海、甘肃、四川、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南和山东九省区,流域面积占中国国土面积的 8.3%,是我国重要的生态安全屏障,也是人口活动和经济发展的重要区域(图 1)。

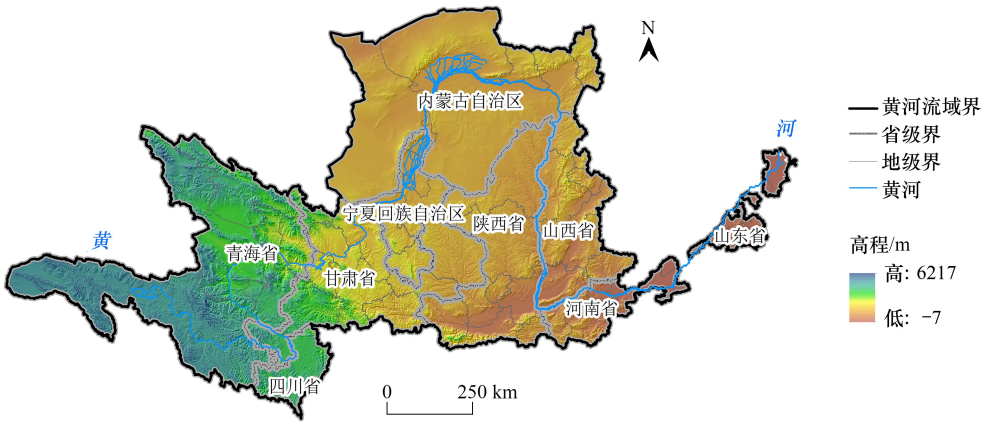

图 1　研究区黄河流域

Fig.1　Yellow River Basin of the study area

1.2　研究方法

1.2.1　生态系统服务价值核算

生态系统服务包括物质供给、调节服务、文化服务三大服务[28],其中,调节服务又包括固碳释氧、土壤保持、水源涵养、洪水调蓄、气候调节、防风固沙等 10 多个指标,但这些指标并不都具备流动性,不能给其他地区带来生态福祉。结合区域特征,本文只对防风固沙、固碳释氧、水源涵养、洪水调蓄、土壤保持、气候调节等具有流动性的生态系统服务指标进行价值核算,具体实物量计算模型参见表 1,价值量评估方法均为替代成本法[28]。

1.2.2　生态系统服务需求指数计算

本文通过计算人类社会可获得或希望获得的生态系统服务价值来量化生态系统服务需求[29],考虑到生态系统服务需求的影响因素和数据的可得性,选择人口密度、单位面积 GDP、土地利用强度和城市扩张水平这四项指标[27,30],综合反映生态系统服务的需求。

$$D = d_{i1} \times \lg(d_{i2}) \times \lg(d_{i3}) \times \lg(d_{i4})$$

式中,D:评估单元的生态系统服务需求指数,反映了评估单元对生态系统服务需求的高低;d_{i1}:土地使用强度,通过建设用地占土地总面积的百分比进行计算;d_{i2}:单位面积 GDP(万元/km^2);d_{i3}:人口密度(人/km^2);d_{i4}:城市扩张水平,表征城市扩张的综合指标,通过夜间灯光数据和行政区域面积计算[30]。

表 1 生态系统服务指标及其实物量核算方法

Table 1 Ecosystem service indicators and accounting methods

生态系统服务指标 Ecosystem service indicators	模型 Models	公式 Formulas	参数 Parameters
防风固沙 Windbreak and sand fixation	RWEQ	$SR=SL_r-SL$ $SL_r=\frac{2z}{S_r^2}Q_{r\max}\times e^{-\left(\frac{z}{S_r}\right)^2}$ $Q_{r\max}=109.8\times(WF\times EF\times SCF\times K')$ $S_r=150.71\times(WF\times EF\times SCF\times K')^{-0.3711}$ $SL=\frac{2z}{S^2}Q_{\max}\times e^{-\left(\frac{z}{S}\right)^2}$ $Q_{\max}=109.8\times(WF\times EF\times SCF\times K'\times C)$ $S=150.71\times(WF\times EF\times SCF\times K'\times C)^{-0.3711}$	SR 为生态系统防风固沙量；SL_r 为潜在风蚀量；SL 为实际风蚀量；$Q_{r\max}$ 为潜在风力的最大输沙能力；S_r 为潜在关键地块长度；z 为所计算的下风向距离；$Q_{\max}$ 为风力的最大输沙能力；S 为关键地块长度；WF 为气候侵蚀因子；EF 为土壤侵蚀因子；SCF 为土壤结皮因子；K'为地表糙度因子；C 为植被覆盖因子。
固碳释氧 Carbon sequestration and oxygen release	净生态系统生产力法	$Q_{tCO_2}=M_{CO_2}/M_C\times NEP$ $Q_{op}=M_{O_2}/M_{CO_2}\times Q_{tCO_2}$	Q_{tCO_2}为陆地生态系统固碳量；$M_{CO_2}/M_C=44/12$ 为 C 转化为 CO_2的系数；NEP 为净生态系统生产力；Q_{op}为生态系统释氧量；$M_{O_2}/M_{CO_2}=32/44$ 为 CO_2 转化为 O_2的系数
水源涵养 Water conservation	水量平衡法	$Q_{wr}=\sum_{i=1}^{n}A_i\times(P_i-R_i-ET_i)\times10^{-3}$	Q_{wr}为水源涵养量；P_i为产流降雨量；R_i 为地表径流量；ET_i为蒸散发量；A_i为 i 类生态系统的面积；i 为生态系统类型；n 为生态系统类型总数
洪水调蓄 Flood regulation and storage	水量贮存模型	$C_{fm}=C_{rc}+C_{lc}+C_{mc}$ $C_{rc}=0.35\times C_t$ $C_{lc}=e^{5.653}\times A^{0.680}\times0.26$ $C_{mc}=C_{sws}+C_{sr}$ $C_{sws}=S\times h\times\rho\times(F-E)\times10^{-2}/\rho_w$ $C_{sr}=S\times H\times10^{-2}$	C_{fm}为洪水调蓄量；C_{rc}为水库防洪库容；C_{lc}为湖区洪水调蓄量；C_t为水库总库容；C_{mc}为沼泽洪水调蓄量；A 为湖泊面积；C_{sws}为沼泽土壤蓄水量；C_{sr}为沼泽地表滞水量；S 为沼泽总面积；h 为沼泽湿地土壤蓄水深度；ρ 为沼泽湿地土壤容重；ρ_w为水的密度；F 为沼泽湿地土壤饱和含水率；E 为沼泽湿地洪水淹没前的自然含水率；C_{sr}为沼泽地表滞水量；H 为沼泽湿地地表滞水高度。
土壤保持 Soil conservation	RUSLE	$Q_{sr}=R\times K\times L\times S\times(1-C\times P)$	Q_{sr}为土壤保持量；R 为降雨侵蚀力因子；K 为土壤可蚀性因子；L 为坡长因子；S 为坡度因子；C 为植被覆盖和管理因子；P 为水土保持措施因子
气候调节 Climate regulation	蒸散模型	$E_{tt}=E_{pt}+E_{we}$ $E_{pt}=\sum_{i}^{3}\mathrm{EPP}_i\times S_i\times D\times10^6/(3600\times r)$ $E_{we}=E_w\times q\times10^3/(3600)+E_w\times y$	E_{tt}为生态系统蒸腾蒸发消耗的总能量；E_{pt}为生态系统植被蒸腾消耗的能量；E_{we}为湿地生态系统蒸发消耗的能量；EPP_i为 i 类生态系统单位面积蒸腾消耗热量；S_i为 i 类生态系统面积；D 为日最高气温大于 26℃天数；r 为空调能效比；i 为生态系统类型；E_w为水面蒸发量；q 为挥发潜热；y 为加湿器将 $1m^3$水转化为蒸汽的耗电量。

RWEQ：修正的土壤风蚀方程 Revised wind erosion equation；RULSE：修正的通用土壤流失方程 Revised universal soil loss equation

1.2.3 生态系统服务供给区和需求区识别

本文使用生态系统服务供需比率将生态系统服务潜在供给与人类潜在需求联系起来[18]，基于生态系统服务供需比率，利用 ArcMap 工具箱中热点分析功能进行供需比率 R 值的空间集聚度（R_i^*）分析，得出生态系统服务的实际供给区和需求区。当 R_i^* 为 0 时，表示 R 没有发生聚集，为供需平衡区；$R_i^*>0$，为高值聚集区，即供需盈余区，$R_i^*<0$，为低值聚集区，即供需赤字区。

$$R_i=\frac{S_i-D_i}{(S_{\max}+D_{\max})/2}$$

$$R_i^*=\frac{\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}x_j-\bar{X}\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}}{S\sqrt{\frac{n\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}^2-\left(\sum_{j=1}^{n}w_{i,j}\right)^2}{n-1}}}$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^{n} x_j}{n}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{n} x_j^2}{n} - (\bar{X})^2}$$

式中,R_i为 i 斑块的生态系统服务供需比率,S_i和D_i分别为归一化处理后的 i 斑块生态系统服务价值与需求指数,S_{max}为生态系统服务供给最大值,D_{max}为生态系统服务需求最大值;R_i^* 是R_i的热点分析,j 为 i 斑块邻域内的所有要素,x_j代表邻域内第 j 个要素的属性值,$w_{i,j}$代表了要素 i 和 j 之间的空间距离,n 是邻域内的要素总数;$\bar{X}$ 是邻域内所有要素属性值的平均值;S 是邻域内所有要素属性值的总体标准差。

基于供需比率,进行黄河流域生态系统服务供给区和需求区的热点分析,将研究区域分别划分为供需赤字严重区($R_i^* \leqslant -2$)、赤字一般区($R_i^* = -1$)、供需平衡区($R_i^* = 0$)、盈余一般区($R_i^* = 1$)和盈余充足区($R_i^* \geqslant 2$)。

1.2.4　生态系统服务最佳流转路径确定

生态系统服务供需盈余区为生态系统服务供给区,生态系统服务供需赤字区为生态系统服务需求区,生态系统服务空间流转路径是连接生态系统服务供给区和需求区的重要通道,是区域内物质交换及能量流动的主要载体。采用最小累积阻力模型(MCR)进行生态系统服务流转潜在路径研究,进一步采用重力模型计算生态系统服务供给区与需求区之间的相互作用力矩阵,确定生态系统服务流转路径。

$$G_{a,b} = \frac{N_a N_b}{D_{ab}^2} = \frac{\left[\frac{1}{P_a} \times \ln(S_a)\right]\left[\frac{1}{P_b} \times \ln(S_b)\right]}{\left(\frac{L_{ab}}{L_{max}}\right)^2} = \frac{L_{max}^2 \ln(S_a)\ln(S_b)}{L_{ab}^2 P_a P_b}$$

式中,$G_{a,b}$是生态系统服务供给区与生态系统服务需求区之间的相互作用力;N_a和 N_b分别是两个区域的权重值;D_{ab}是 a 和 b 两个区域间潜在流转路径阻力的标准化值;P_a为区域 a 的阻力值,P_b 为区域 b 的阻力值,S_a是区域 a 的面积(km^2),S_b 是区域 b 的面积(km^2);L_{ab}是 a 和 b 之间流转路径的累计阻力值;L_{max}是研究区所有流转路径累计阻力的最大值。

1.2.5　生态系统服务价值流转量计算

生态系统服务价值流转基本遵循距离衰减规律[31]。利用断裂点公式模拟生态系统服务价值从生态系统服务供给区流向生态系统服务需求区的边界,并根据场强理论计算单位区域内生态系统服务流转强度[32],最终得到生态系统服务供给区到需求区的流转量。

$$E_{s,d} = I_{s,d} A\, k_{s,d}$$

$$I_{s,d} = \frac{E_s}{D_{s,d}^2}$$

$$A = D_s^2 \pi$$

$$D_s = \frac{D_{s,d}}{1 + \sqrt{E_s / E_d}}$$

式中,$E_{s,d}$是生态系统服务供给区到需求区流转量;$I_{s,d}$为生态系统服务从供给区到需求区的流转强度(万元/km^2);A 为生态系统服务从供给区到需求区的辐射面积(km^2);$k_{s,d}$为影响生态系统服务供给区到需求区的生态系统服务空间流转影响因子,与水流、风速及风向等流动因子相关,取值范围为[0—1],本文取 0.6[33];D_s为生态系统服务供给区质心与断裂点的距离(km);$D_{s,d}$为生态系统服务供给区质心与需求区质心的距离(km);E_s和 E_d分别为生态系统服务供给区与需求区的生态系统服务价值(万元)。

1.3 数据来源

本文计算所需数据主要为黄河流域 2021 年的土地利用、夜间灯光、植被净初级生产力、归一化植被指数、地表蒸散发、地形、土壤、气象、人口和 GDP 等自然、社会和经济数据(表 2)。

表 2 数据来源表

Table 2 Data sources

数据类型 Data types	数据描述 Data description	数据来源 Resource	分辨率 Resolution
遥感数据 Remote data	土地利用遥感监测数据	中国环境监测总站	30m
	夜间灯光数据	NOAA/NGDC Earth Observation Group 全球年度灯光数据集 Annual VNL V2[34]	500m
	植被净初级生产力(NPP)	美国 NASA EOS/MODIS 的 MOD17A3 全球年度 NPP 数据产品	1km
	归一化植被指数(NDVI)	美国 NASA EOS/MODIS 的 MOD13Q1 全球 16 天 NDVI 数据产品	250m
	地表蒸散发(ET)	美国 NASA EOS/MODIS 的 MOD16A3 全球年度 ET 数据产品	500m
地形土壤 Terrain and soil	高程数据(DEM)	资源环境科学数据平台(http://www.resdc.cn/)	250m
	中国土壤数据集	中国科学院南京土壤所	1km
气候数据 Climate data	中国地面气候资料日值数据集(V3.0)	中国气象数据网(http://data.cma.cn)	d
社会经济 Social-economic	人口空间分布数据	资源环境科学数据平台(http://www.resdc.cn/)	1km
	GDP 空间分布数据	资源环境科学数据平台(http://www.resdc.cn/)	1km
	碳交易价格数据	2021 年全国碳排放权交易市场平均价格	a
	水库单位库容建设成本	《生态系统生产总值(GEP)核算技术规范》(DB3201/T 1041—2021)	a
	单位治沙工程成本	参考莫宏伟等的研究成果[35]	a
	氧气生产价格	《中国森林生态服务功能评估》(ISBN: 9787503858086)	a
	电价	发展改革部门	a
	水库单位清淤工程费用	《生态系统生产总值(GEP)核算技术规范》(DB3201/T 1041—2021)	a
	肥料价格	中国化肥网(https://www.fert.cn/)	a

2 结果分析

2.1 黄河流域生态系统服务供给区和需求区研究

2.1.1 黄河流域生态系统服务供给空间特征分析

通过黄河流域生态系统服务总价值和流域面积,得到 2021 年黄河流域单位面积生态系统服务价值约为 5.8 万元/hm^2(图 2),其空间分布呈东西高、中部低特征,高值主要聚集在青海、甘肃和四川等省份,大体上分布在黄河上游地区,与祁连山冰川与水源涵养生态功能区、甘南黄河重要水源补给生态功能区、若尔盖草原湿地生态功能区和三江源草原草甸湿地生态功能区存在空间重合,主要包括:玉树州、果洛州、海西州、海北州、海南州、黄南州、甘南州、阿坝州和武威市等地区。该区域生态环境本底优良,单位面积提供的生态系统服务能力较强。其中,青海省玉树藏族自治州湖泊众多,共有湖水面积 1km^2以上的咸、淡水湖 287 个,湖水面积 3531.34km^2,气候调节和洪水调蓄服务价值高,2021 年单位面积生态系统服务价值为 30.64 万元/hm^2,是黄河流域单位面积生态系统服务价值最高的地市单元。单位面积生态系统服务价值低值区主要分布在甘肃东部、内蒙古中部、陕西北部和山西西部等区域,与黄土高原丘陵沟壑区存在空间重合。该区域地表沟壑纵横,水土流失严重,单位面积生态系统服务最低值出现在甘肃省庆阳市,2021 年为 1.79 万元/hm^2。

2.1.2 黄河流域生态系统服务需求空间特征分析

2021 年黄河流域生态系统服务需求指数平均值为 1.2,黄河流域生态系统服务需求指数各地市差异明

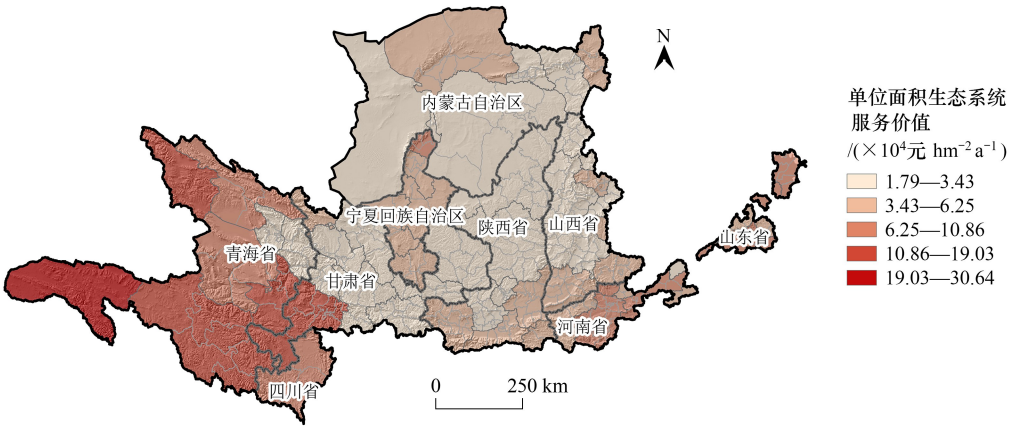

图 2　2021 年黄河流域单位面积生态系统服务价值

Fig.2　Value of ecosystem services per unit area in the Yellow River Basin in 2021

显,呈现东高西低的空间特征,生态系统服务需求高值主要聚集在河南、山东等省份(图 3),该地区人口稠密,经济发展水平高,对生态系统服务的需求较高。需求最高区为河南省郑州市,2021 年需求指数为 5.7。郑州市地处黄河中、下游分界处,社会经济发展水平较高,城镇化率超过 80%,人口密度是黄河流域的 14 倍,人均 GDP 是黄河流域的 1.3 倍。需求低值区主要分布在青海省、甘肃省和内蒙古等省份,需求最低区为青海省玉树藏族自治州,2021 年玉树藏族自治州的生态系统服务需求指数为 0.0002。玉树藏族自治州地处中国第一阶梯地带,地形复杂,气候多变,环境严酷,属于典型的高寒性气候,地广人稀,经济相对落后。2021 年人均 GDP 为 1.66 万元/人,人口密度 32 人/km^2,土地开发程度不足,各项指标远低于黄河流域平均值。

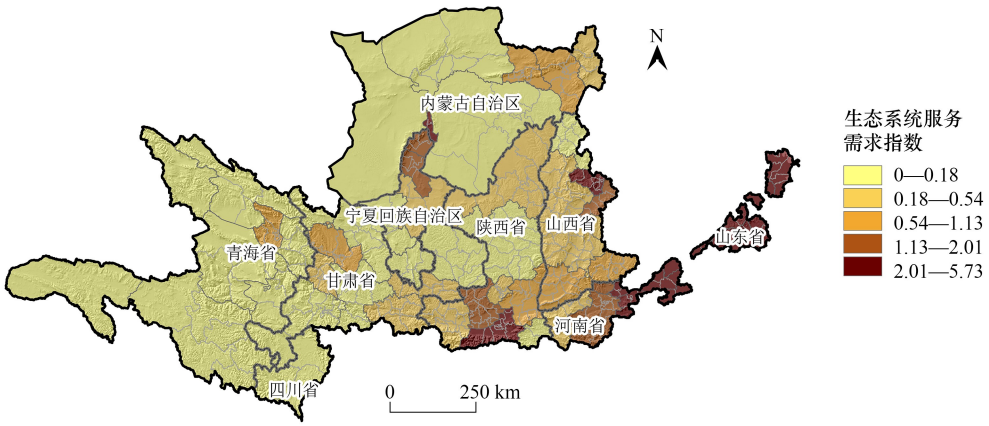

图 3　2021 年黄河流域各地市生态系统服务需求分布

Fig.3　Demand distribution of ecosystem services in the Yellow River Basin in 2021

2.1.3　黄河流域生态系统服务供需关系分析

供需赤字区主要分布在黄河流域中下游(图 4),其中济源市、焦作市、郑州市、新乡市、安阳市、泰安市、济南市、滨州市和东营市等地形成供需赤字严重区,这些区域人口稠密、经济发达、城市化发展水平较高,生态系统服务需求日益增长,远超出区域内的生态系统服务供给。供需盈余区主要分布在黄河流域上游,其中青海和甘肃部分地区形成供需盈余充足区域,该区域单位面积生态系统服务价值水平较高,在黄河流域内占据第一梯队。供需平衡区主要分布在黄河流域中游地区,集中分布在内蒙、陕西和山西等省份。需要说明的是,宁夏石嘴山市单位面积的生态系统服务价值尽管相对较高,但未能形成空间集聚,为供需平衡区。

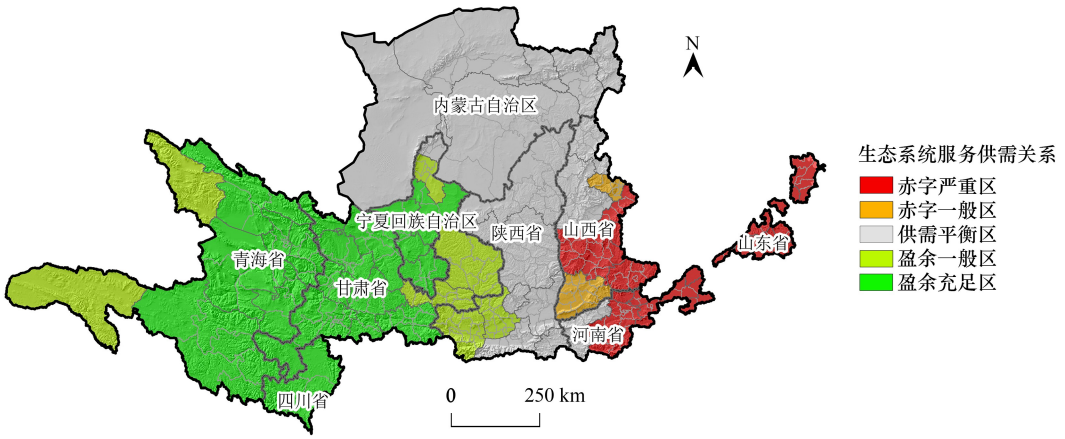

图 4 2021 年黄河流域生态系统服务供需关系分布图

Fig.4 Distribution of the relationship between supply and demand of ecosystem services in the Yellow River Basin in 2021

2.2 黄河流域生态系统服务空间流转路径和流转量研究

2.2.1 生态系统服务空间流转路径

2021 年黄河流域的生态系统服务供给区主要分布在青海、甘肃和四川北部等上游地区,生态系统服务需求区主要分布在山西、河南和山东等下游地区。通过最小累积阻力模型(MCR)生成生态系统服务供给区和需求区之间的若干条潜在空间流转路径。为确定生态系统服务流转可能性最大的路径,进一步使用重力矩阵计算得到了 2021 年生态斑块间的相互作用力矩阵(图 5),通过设置阈值标准(相互作用力>9,供需比率 R>0.

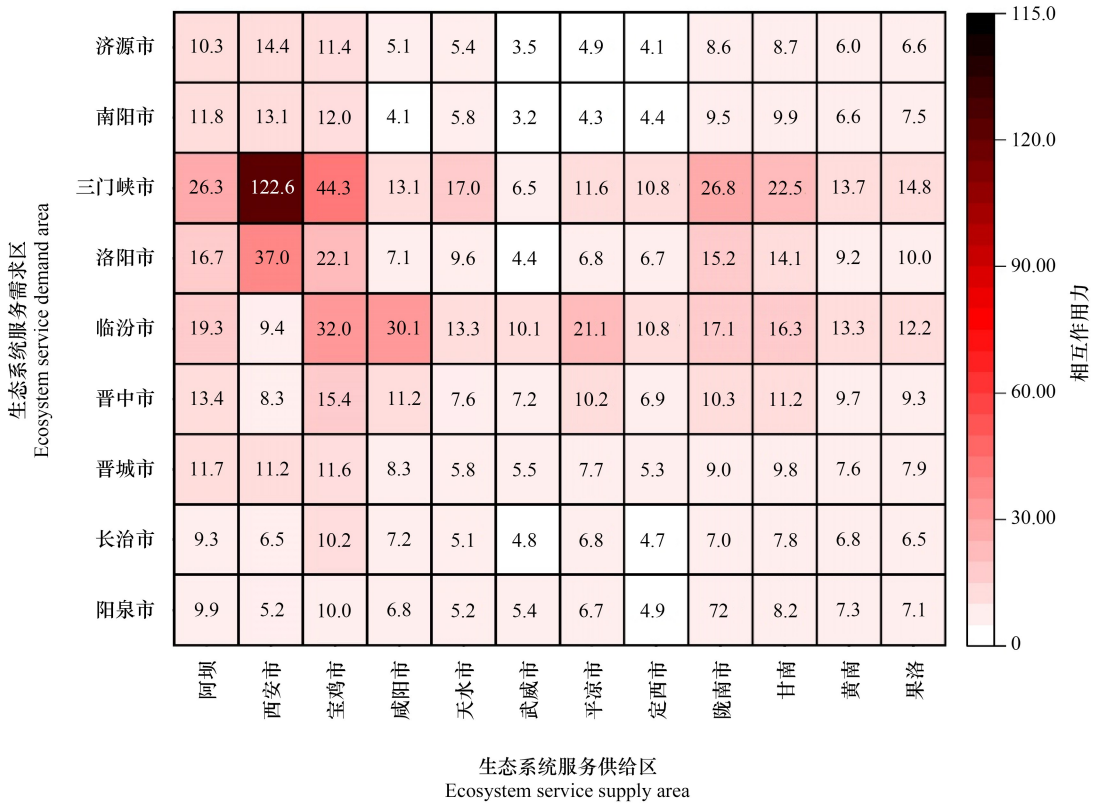

图 5 2021 年生态系统服务供给区和需求区的相互作用力矩阵

Fig.5 Matrix of interacting forces between ecosystem service supply areas and ecosystem service demand areas in 2021

2),在 2021 年筛选出 35 条最佳空间流转路径,并得到对应的生态系统服务供给区和生态系统服务需求区(图 6)。

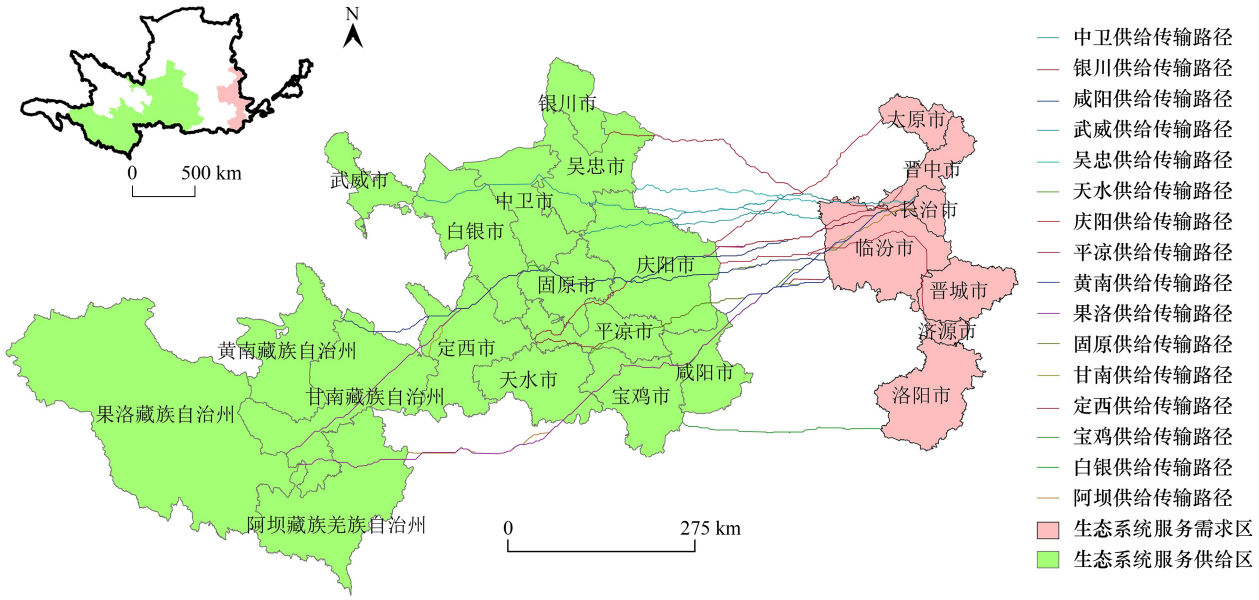

图 6　2021 年黄河流域生态系统服务空间流转路径、生态系统服务供给区和生态系统服务需求区的分布

Fig.6　Distribution of spatial flow paths of ecosystem services, ecosystem service supply areas and ecosystem service demand areas in the Yellow River Basin in 2021

2.2.2　黄河流域生态系统服务价值流转量

利用断裂点公式和场强模型,计算 2021 年黄河流域生态系统服务供给区向需求区流转的生态服务流。2021 年黄河流域生态系统服务供给区生态服务流转量为 5794.3 亿元,从省级行政区来看,青海省和甘肃省是黄河流域主要的生态系统服务供给区,生态服务流转量分别为 1650.3 亿元和 2223.9 亿元,山西省为黄河流域主要的生态系统服务需求区,总生态系统服务流入量为 5556.6 亿元(图 7)。从地市来看,临汾市和长治市是黄河流域主要生态系统服务需求区,2021 年生态系统服务流入量分别为 4027.9 亿元和 1384.7 亿元,生态系统服务流入量是其 GDP 的 2.1 倍和 0.6 倍左右。临汾市生态系统服务流入量主要来自青海省的果洛藏族自治州、甘南藏族自治州和黄南藏族自治州等地区,分别占临汾市总生态服务流入量的 20%、17%和 13%。生态系统服务流转强度会随着传输距离增加而衰减,郑州市和济南市虽然也是生态系统服务需求区,但因周边没有生态系统服务供给区,较远地区的生态系统服务流无法流入郑州市和济南市,导致这两个地区没有形成生态系统服务流入量。因此,生态建设应尽量在生态需求地周边进行,方便生态系统服务流转,促进生态效益提高。

2.2.3　黄河流域重点区域生态系统服务流分析

祁连山冰川与水源涵养生态功能区、甘南黄河重要水源补给生态功能区、若尔盖草原湿地生态功能区和三江源草原草甸湿地生态功能区都是黄河流域内的重要生态功能区,在本研究中分别对应甘肃省武威市、青海省甘南藏族自治州、四川省阿坝藏族羌族自治州和青海省果洛藏族自治州,单位面积生态系统服务价值分别为 5.7 万元/hm^2、19.0 万元/hm^2、7.4 万元/hm^2和 16.7 万元/hm^2,甘南和三江源生态功能区的单位面积生态系统服务价值最高,相应的这两个区域生态系统服务流转量也最高。从计算结果来看,甘南和三江源生态功能区的生态系统服务流转量分别为 846.5 亿元和 995.3 亿元,高于祁连山生态功能区和若尔盖生态功能区的 232.4 亿元和 137.2 亿元(图 8)。从生态系统服务流的受体来看,黄河流域生态功能区的生态系统服务价值主要流入临汾市和长治市,分别为 1679.7 亿元和 531.7 亿元。生态系统服务流在传输过程中会随距离衰减,

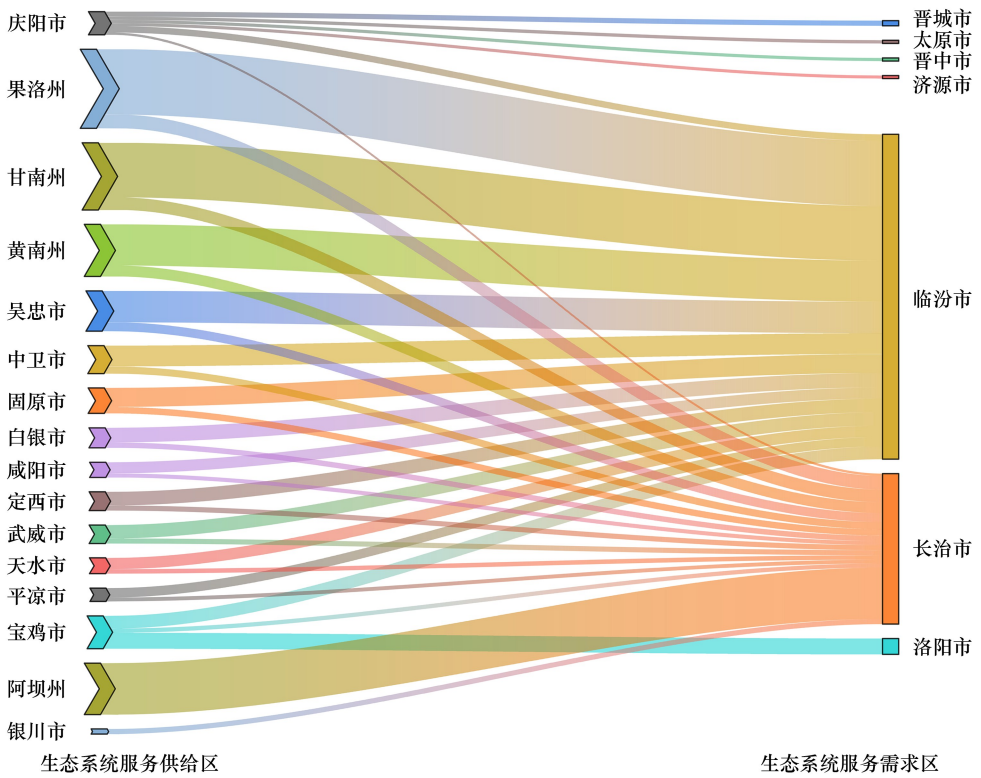

图 7 2021 年黄河流域生态系统服务供给区向需求区的生态服务流转

Fig.7 Flow of ecosystem services from supply areas to demand areas in the Yellow River Basin in 2021

且临汾市在物理距离上更接近黄河流域重点生态功能区,导致临汾市生态系统服务流入量要高于长治市。

3 讨论

3.1 探析基于生态系统服务流的生态补偿政策

《支持引导黄河全流域建立横向生态补偿机制试点实施方案》《关于深化生态保护补偿制度改革的意见》提出推动建立黄河流域横向生态保护补偿机制,以受益者付费原则为基础,构建市场化、多元化补偿格局。在黄河流域横向生态补偿中,豫鲁段、川甘段、甘宁段、青甘段都先后以水质为生态补偿的重要依据,采用“双向补偿”模式,探索建立了黄河流域上下游之间的横向生态补偿机制,但生态补偿资金有限,对生态系统服务提供者的正向激励不足。生态系统服务流有助于明晰生态系统对人类生存与发展所需的各种产品与服务的供给能力,以及生态系统服务供给与需求时空分布特征。因此,通过研究黄河流域生态系统服务的空间分布和空间需求,识别黄河流域生态服务流转路径,以生态服务流转量作为黄河流域生态补偿依据[19],进行生态系统保护者和受益者之间的利益调配和“两山”转化的平衡机制构建,对推动黄河流域横向生态补偿机制构建具有重要意义。

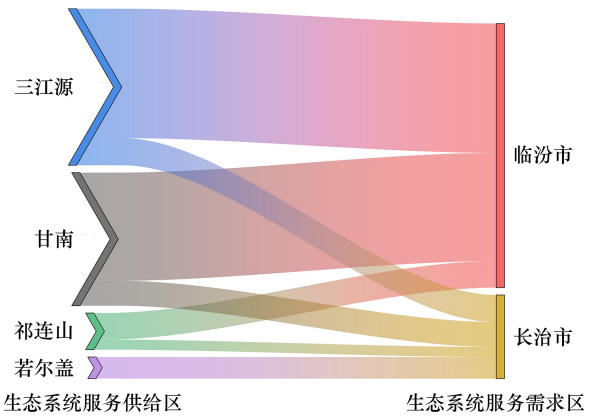

图 8 2021 年黄河流域重点区域生态系统服务供给区向需求区的生态服务流转

Fig.8 Flow of ecosystem services from supply areas to demand areas in the Yellow River Basin key regions in 2021

青海省和甘肃省是黄河流域主要的生态系统服务供给区,山西省是黄河流域主要的生态系统服务需求

区。2021 年,甘肃省生态服务流转量 2223.9 亿元,青海省生态服务流转量 1650.3 亿元,山西省生态服务流入量为 5556.6 亿元,青海省和甘肃省的生态服务主要流向山西省。流向山西省的生态服务流主要来自甘肃省的甘南藏族自治州(15.2%)、青海省的果洛藏族自治州(17.9%)和黄南藏族自治州(11.8%)。黄河在甘肃省境内“两进两出”,其中甘南藏族自治州以不足黄河流域 5%的流域面积,蕴藏了黄河流域 20%的水资源,贡献了黄河中下游 40%以上的径流量,被誉为“黄河蓄水池"。青海境内黄河干流长度 1694 公里,流经 16 个县域,流域面积 15.23 万 km^2,多年平均出境水量占全流域径流量的 49.4%,被誉为“中华水塔”。

青海省和甘肃省生态优势突出,但经济发展水平一般,2021 年青海省和甘肃省 GDP 分别为 3385.1 亿元和 10243.3 亿元,位居全国 31 省份倒数第二和倒数第五,人均 GDP 低于全国平均水平。2021 年甘肃省和青海省生态补偿金额为 74.06 亿元和 46.53 亿元,远低于计算得到的生态系统服务流转量。建议根据生态系统服务流转量及流转路径,进一步优化对青海省和甘肃省重点生态功能区转移支付,建立差异化生态补偿机制。并以青海省和甘肃省流入山西省的生态服务流为依据,探索构建山西省与青海省和甘肃省之间的横向生态补偿机制,形成受益者付费、保护者得到合理补偿的良性局面。

3.2　生态系统服务流研究难点与展望

科学认知生态系统服务流,对于理解实际的生态系统服务传递、满足人类对于生态系统服务的需求至关重要[36],但由于生态系统服务流动受自然和人为多重因素影响,流动过程复杂,需要从流向、流速和流量多个方面进行刻画。且不同生态系统服务类型表现出不同的时空尺度差异性,空气净化、温度调节、休闲娱乐等服务更多的属于局地尺度[37—38],影响的范围相对较小;而水源涵养、土壤保持、防风固沙、洪水调蓄等服务属于区域的尺度,存在上下游之间的空间传递[39—42],可以作为区域生态补偿标准制定的依据之一。目前,学者们对生态系统服务的潜在供给研究较多,对生态系统服务的需求方面研究较少,生态系统服务从供给区到需求区的传递的机理与规律仍有很大的研究空间,且研究尺度以中小尺度为主,对跨尺度和跨区域的生态系统服务流特征认识不足[43],这在一定程度上限制了生态系统服务流研究的发展[11]。

本文采用生态模型进行生态系统服务价值核算,评估模型中用于反映自然影响因素的生态系统服务空间流转影响因子采用经验值。同时,生态系统服务需求量是通过人口、灯光和土地利用等指标构建的一个虚拟需求量,因此,本文研究确定的生态系统服务供需关系还属于相对供需范畴。采用最小累积阻力模型(MCR)进行生态系统服务流动模拟,模拟过程只考虑了地理因素,忽略了气象因素、人为因素和生态系统服务流动特征因素的影响[44]。未来需要重点突破生态系统服务实际需求量的核算方法,同时考虑生态系统服务供给区自身服务需求,综合考虑地形起伏、植被覆盖、土壤质地、土地利用以及生态系统服务流动特征等影响生态系统服务供需异质性的关键要素,确定生态系统服务供给区与需求区的空间分布特征,对生态系统服务流转的路径方向、流量大小、衰减特征进行准确、具体的描述。

4　结论

本文通过生态系统服务空间流动模型,辨识黄河流域生态系统服务供给区和需求区,核算黄河流域生态系统服务的空间流转量,主要得出以下结论:

(1)从单位面积生态系统服务供给量看,黄河流域上游地区高于中游和下游地区。从单位面积生态系统服务需求来看,黄河流域下游高于中上游,黄河流域生态系统服务供给和需求呈现空间异质性。

(2)黄河流域生态系统服务供需平衡关系看,黄河流域上游地区主要为生态系统服务供需盈余区,中游的陕西省、山西省和宁夏回族自治区的大部分地市为生态系统服务供需平衡区,下游的河南省和山东省为供需赤字区。

(3)2021 年黄河流域生态系统服务流转量共计 5794.3 亿元,其中甘肃省和青海省是黄河流域主要的生态系统服务供给区,生态系统服务流转量分别为 2223.9 亿元和 1650.3 亿元。山西省是黄河流域主要的生态系统服务需求区,2021 年山西省生态服务流入量为 5556.6 亿元,青海省和甘肃省的生态服务主要流向山西

省。建议山西省加大生态建设,增强其生态系统服务供给,并提高对青海省和甘肃省的生态补偿力度,形成受益者付费、保护者得到合理补偿的良性局面。

(4)生态系统服务流转强度会随着传输距离增加而衰减,生态系统服务很难从远距离的生态系统服务供给区传递至需求区,应当加强生态系统服务需求区周边的生态建设,通过增加周边的生态系统服务供给提高需求区的人类生态福祉。

参考文献(References):

[1] Reid W V, Mooney H A, Cropper A, Capistrano D, Chopra K. Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington DC: Island Press, 2005.

[2] Brink P, Berghfer A, SchrterSchlaack C, Sukhdev P, Vakrou A, White S, Wittmer H. TEEB-The Economics of Ecosystems and Biodiversity for National and International Policy Makers-Summary: Responding to the Value of Nature. 2009.

[3] United Nations, European Commission, Organization for Economic Co-Operation and Development, and World Bank Group. (2021). System of environmental-economic accounting 2021: ecosystem accounting. New York: United Nations.

[4] 鲁春霞, 谢高地, 肖玉, 于云江. 青藏高原生态系统服务功能的价值评估. 生态学报, 2004, 24(12): 2749-2755.

[5] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.

[6] 马国霞, 於方, 王金南, 周夏飞, 袁婧, 牟雪华, 周颖, 杨威杉, 彭菲. 中国2015年陆地生态系统生产总值核算研究. 中国环境科学, 2017, 37(4): 1474-1482.

[7] Ma G X, Wang J N, Yu F, Yang W S, Ning J, Peng F, Xiafei Zhou, Ying Zhou, Cao D. Framework construction and application of China's gross economic-ecological product accounting. Journal of Environmental Management, 2020, 264: 109852.

[8] Ouyang Z Y, Song C S, Zheng H, Polasky S, Xiao Y, Bateman I J, Liu J G, Ruckelshaus M, Shi F Q, Xiao Y, Xu W H, Zou Z Y, Daily G C. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(25): 14593-14601.

[9] 张林波, 虞慧怡, 李岱青, 贾振宇, 吴丰昌, 刘旭. 生态产品内涵与其价值实现途径. 农业机械学报, 2019, 50(6): 173-183.

[10] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 杜昱璇. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化. 地理学报, 2021, 76(11): 2780-2796.

[11] Wang J, Zhai T L, Lin Y F, Kong X S, He T. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China. Science of the Total Environment, 2019, 657: 781-791.

[12] 夏沛, 彭建, 徐子涵, 顾恬玮, 王佳斌. 生态系统服务流概念内涵与量化方法. 地理学报, 2024, 79(3): 584-599.

[13] 陶宇, 欧维新, 孙晓. 生态系统服务供需关系评估的几点思考. 应用生态学报, 2024, 35(9): 2423-2431.

[14] 马琳, 刘浩, 彭建, 吴健生. 生态系统服务供给和需求研究进展. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289.

[15] 王嘉丽, 周伟奇. 生态系统服务流研究进展. 生态学报, 2019, 39(12): 4213-4222.

[16] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, Villa F. Spatial dynamics of ecosystem service flows: a comprehensive approach to quantifying actual services. Ecosystem Services, 2013, 4: 117-125.

[17] Wu X, Liu S L, Zhao S, Hou X Y, Xu J W, Dong S K, Liu G H. Quantification and driving force analysis of ecosystem services supply, demand and balance in China. Science of the Total Environment, 2019, 652: 1375-1386.

[18] 吴春生, 张鹏, 戴尔阜, 尹君. 基于生态系统服务的生态补偿政策制定探讨. 生态学报, 2023, 43(24): 10032-10041.

[19] 刘春芳, 王佳雪, 许晓雨. 基于生态系统服务流视角的生态补偿区域划分与标准核算 ——以石羊河流域为例. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(8): 157-165.

[20] 张欣蓉, 王晓峰, 程昌武, 刘世荣, 周潮伟. 基于供需关系的西南喀斯特区生态系统服务空间流动研究. 生态学报, 2021, 41(9): 3368-3380.

[21] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973.

[22] 戴尔阜, 王晓莉, 朱建佳, 赵东升. 生态系统服务权衡: 方法、模型与研究框架. 地理研究, 2016, 35(6): 1005-1016.

[23] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. Ecological Economics, 2009, 68(3): 643-653.

[24] 张城, 李晶, 周自翔. 基于水供给服务空间流动模型的渭河流域水资源安全格局. 地理科学, 2021, 41(2): 350-359.

[25] Shen J K, Wang Y C. Allocating and mapping ecosystem service demands with spatial flow from built-up areas to natural spaces. Science of the Total Environment, 2021, 798: 149330.

[26] Lorilla R S, Kalogirou S, Poirazidis K, Kefalas G. Identifying spatial mismatches between the supply and demand of ecosystem services to achieve a

sustainable management regime in the Ionian Islands (Western Greece). Land Use Policy, 2019, 88: 104171.

[27] Xu Q, Yang R, Zhuang D C, Lu Z L. Spatial gradient differences of ecosystem services supply and demand in the Pearl River Delta region. Journal of Cleaner Production, 2021, 279: 123849.

[28] 国家发展和改革委员会. 生态产品总值核算规范. 北京: 人民出版社, 2022.

[29] Baró F, Palomo I, Zulian G, Vizcaino P, Haase D, Gómez-Baggethun E. Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: a case study in the Barcelona metropolitan region. Land Use Policy, 2016, 57: 405-417.

[30] Gu Y Y, Qiao X N, Xu M J, Zou C X, Liu D, Wu D, Wang Y. Assessing the impacts of urban expansion on bundles of ecosystem services by dmsp-ols nighttime light data. Sustainability, 2019, 11(21): 5888.

[31] 乔旭宁, 张婷, 杨永菊, 牛海鹏, 杨德刚. 渭干河流域生态系统服务的空间溢出及对居民福祉的影响. 资源科学, 2017, 39(3): 533-544.

[32] 陈江龙, 徐梦月, 苏曦, 高金龙, 南京市生态系统服务的空间流转.生态学报, 2014, 34(17): 5087-5095.

[33] Reynolds T W, Farley J, Huber C. Investing in human and natural capital: an alternative paradigm for sustainable development in Awassa, Ethiopia. Ecological Economics, 2010, 69(11): 2140-2150.

[34] Elvidge C D, Zhizhin M, Ghosh T, Hsu F C, Taneja J. Annual time series of global VIIRS nighttime lights derived from monthly averages: 2012 to 2019. Remote Sensing, 2021, 13(5): 922.

[35] 莫宏伟, 任志远, 王欣. 植被生态系统防风固沙功能价值动态变化研究——以榆阳区为例. 干旱区研究, 2006, 56-59.

[36] Wolff S, Schulp C J E, Verburg P H. Mapping ecosystem services demand: a review of current research and future perspectives. Ecological Indicators, 2015, 55: 159-171.

[37] Goldenberg R, Kalantari Z, Cvetkovic V, Mörtberg U, Deal B, Destouni G. Distinction, quantification and mapping of potential and realized supply-demand of flow-dependent ecosystem services. Science of the Total Environment, 2017, 593: 599-609.

[38] Egarter Vigl L, Depellegrin D, Pereira P, de Groot R, Tappeiner U. Mapping the ecosystem service delivery chain: Capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes. Science of the Total Environment, 2017, 574: 422-436.

[39] Nedkov S, Burkhard B. Flood regulating ecosystem services—mapping supply and demand, in the etropole municipality, *Bulgaria*. Ecological Indicators, 2012, 21: 67-79.

[40] Li D L, Wu S Y, Liu L B, Liang Z, Li S C. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: a case study in Beijing-Tianjian-Hebei region, China. Ecological Indicators, 2017, 81: 159-170.

[41] Stürck J, Poortinga A, Verburg P H. Mapping ecosystem services: The supply and demand of flood regulation services in Europe. Ecological Indicators, 2014, 38: 198-211.

[42] Liu J G, Yang W, Li S X. Framing ecosystem services in the telecoupled anthropocene. Frontiers in Ecology and the Environment, 2016, 14(1): 27-36.

[43] García-Nieto A P, García-Llorente M, Iniesta-Arandia I, Martín-López B. Mapping forest ecosystem services: From providing units to beneficiaries. Ecosystem Services, 2013, 4: 126-138.

[44] Li K, Hou Y, Andersen P S, Xin R H, Rong Y J, Skov-Petersen H. An ecological perspective for understanding regional integration based on ecosystem service budgets, bundles, and flows: a case study of the Jinan metropolitan area in China. Journal of Environmental Management, 2022, 305: 114371.