DOI: 10.20103/j.stxb.202407011533
马元博,翟天林,毕庆生,陈鹏,李玲,陈昱润.基于调节服务流视角的黄河流域生态补偿优化研究.生态学报,2025,45(8):3763-3775.
Ma Y B, Zhai T L, Bi Q S, Chen P, Li L, Chen Y R.Optimization of ecological compensation in the Yellow River Basin from the perspective of regulation service flow.Acta Ecologica Sinica,2025,45(8):3763-3775.

# 基于调节服务流视角的黄河流域生态补偿优化研究

马元博[1],翟天林[1,*],毕庆生[1],陈 鹏[2],李 玲[1],陈昱润[1]
1 河南农业大学资源与环境学院,郑州 450000
2 河南省国土空间调查规划院,郑州 450000

**摘要**:生态补偿是促进区域生态保护和社会经济协调发展的有效手段。目前,基于生态系统服务流的生态补偿探讨较少,定量评估较为匮乏。基于生态系统调节服务供-流-需理论,提出了一种新型生态补偿模式,明确黄河流域调节服务供需关系,结合风场分析、水文分析以及热点分析识别生态系统服务流供给区、需求区、传递路径,并通过比较生态辐射力获取服务流量,最终确定黄河流域调节服务生态补偿受偿城市、补偿城市以及补偿金额。研究结果表明:(1)2020 年黄河流域水源涵养和固碳服务供给在空间上表现为"南高北低、西高东低"的分布格局;需求分布与人口密度分布密切相关,在空间上则表现为"东高西低"的分布格局。(2)黄河流域水源涵养服务供给与需求关系整体上呈现赤字状态,供给难以满足需求;黄河流域大部分地区固碳服务供给能够满足需求,但已接近生态赤字警戒线。(3)黄河流域水源涵养服务受偿城市共 8 个,补偿城市共 22 个;固碳服务受偿城市共 10 个,补偿城市共 28 个。黄河流域生态系统调节服务生态补偿总金额为 676.54 亿元,其中水源涵养服务生态补偿总金额为 160.54 亿元,固碳服务生态补偿总金额为 516 亿元。研究结果可以为黄河流域生态系统管理政策的制定以及生态补偿的实际应用提供参考。

**关键词**:生态补偿;生态系统服务流;生态系统调节服务;供需平衡

# Optimization of ecological compensation in the Yellow River Basin from the perspective of regulation service flow

MA Yuanbo[1], ZHAI Tianlin[1,*], BI Qingsheng[1], CHEN Peng[2], LI Ling[1], CHEN Yurun[1]
1 *College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou* 450000, *China*
2 *Hennan Provincial Institute of Land and Space Investigation and Planning, Zhengzhou* 450000, *China*

**Abstract**: Ecological compensation is an effective strategy for promoting regional ecological protection as well as coordinated socio-economic development. Currently, limited interest is garnered for ecological compensation schemes predicated on the flow of ecosystem services. Quantitative assessments remain scarce. Herein, a novel ecological compensation mode based on supply-flow-demand theory of ecosystem regulatory services was proposed to clarify the supply-demand relationship of regulatory services in Yellow River Basin. Combined with analysis on wind field, hydrology and hot spot, the supply area, demand area and transmission paths in between are identified. Through the comparison of service flows stemming from eco-radiation and ecological compensation, encompassing recipient cities, compensating cities, and the compensation amounts, a clear delineation was ultimately achieved for regulatory services within the Yellow River Basin. It was found that (1) The spatial distribution of water conservation and carbon sequestration service supply in the Yellow River Basin in 2020 is "high in the south and low in the north, high in the west and low in the east". The demand distribution is strongly associated with

**基金项目**:国家自然科学基金(42101298);河南省科技研发计划联合基金重点项目(225200810045);河南农业大学哲学社会科学类科研创新基金(SKJJ2023B14);河南省高等学校大学生创新训练计划项目(202410466072)
**收稿日期**:2024-07-01; **网络出版日期**:2025-01-20
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: gavinzhai@126.com

the population density, reflecting "high in the east and low in the west". (2) The supply-demand relationship of water conservation services in the Yellow River Basin is overall in deficit with difficulties in meeting the supply demand. Even though the supply of carbon sequestration services in most areas can satisfy the demand, the warning line for ecological deficit is approaching. (3) 8 recipient cities and 22 compensated cities were determined for water conservation, while the numbers of recipient and compensated cities were 10 and 28, respectively, for carbon sequestration service. The total amount of ecological compensation for ecosystem regulation services in the Yellow River Basin was 67.654 billion RMB, of which 16.054 billion RMB worked for water conservation services, and 51.6 billion RMB acted as carbon sequestration compensation. These results are expected to provide insights for establishing ecosystem management policies and practical application in ecological compensation in the Yellow River Basin.

**Key Words**: ecological compensation; ecosystem service flow; ecosystem regulation services; balance between supply and demand

生态系统服务是维系人类社会发展的关键基础[1—2]。当前,学术界的研究焦点集中于生态系统服务的供给与需求及其相互关系。众多研究揭示了生态系统服务供需之间存在显著的空间错配现象[3—5]。此外,该错配现象在一定程度上加剧了环境不平等现象[6]。在我国,生态系统服务领域的环境不平等问题尤为突出[7]。东部地区经济繁荣,工业活动频繁,对生态系统服务的需求量大,然而该地区的生态系统服务供给能力却相对不足。相对地,西部地区作为生态敏感区,承担了大量生态系统服务的供给任务,其产生的社会环境效益主要被东部地区所享有。这种生态责任与利益分配的不均衡,进一步激化了区域间的环境不平等问题[8]。为了缓解环境不公,促进区域间的公平与可持续发展,有必要对西部地区提供更多的政策和经济支持。生态补偿作为一种灵活的策略,为解决这一问题提供了可能的途径。

生态补偿机制是一种运用经济手段以应对生态系统服务的溢出效应的策略[9]。该策略通过向损害或保护资源环境的行为征收费用或提供补偿,调整相关行为的成本与收益,进而实现外部效应的内部化[10—11]。自 20 世纪 80 年代起,众多国家和地区已广泛实施了生态补偿的实践活动[12]。我国亦相继实施了“退耕还林”、“退牧还草”、“天然林保护”等具有生态补偿性质的项目[13]。为了进一步巩固生态保护补偿机制的成效,我国已于 2024 年 4 月正式颁布《生态保护补偿条例》,旨在加强和规范生态保护补偿工作,以协调环境保护与经济发展的矛盾。当前,生态补偿的方法大致可以归纳为机会成本法、支付意愿法和生态系统服务价值法三大类[14—15]。然而,机会成本法存在较多不确定性,支付意愿法易受主观因素干扰,而生态系统服务价值法由于其基于客观环境数据的核算过程受主观因素影响较小,被多数学者认为是理论上最优的补偿方法[15]。该方法通过货币形式对生态系统服务的成本与效益进行量化评估,并将其作为生态补偿的金额,以实现生态效益的最大化[16]。因此,越来越多的学者倾向于采用此方法进行生态补偿的研究[9,17]。生态补偿的核心议题在于明确补偿主体、受偿主体以及补偿额度,而生态系统服务流恰好能为解决这一问题提供有效的途径。

生态系统服务流的研究关注于生态系统服务从其产生地至消费地的完整流动过程,构成了生态系统服务供给与需求之间的重要桥梁[18—19]。已有学者尝试运用多种方法对生态系统服务流进行深入研究与分析。例如,徐洁等基于 RWEQ 模型对中国防风固沙型重点生态功能区的防风固沙服务进行了量化分析,并通过 HYSPLIT 模型模拟了该服务的空间流动路径,进而计算出防风固沙型重点生态功能区的防风固沙总量、受益区域面积以及服务流动路径[20]。王健等采用 D8 流向法对太湖流域水供需服务的时空关系、流动路径及属性特征进行了模拟量化,并推演出县域尺度生态系统服务的盈余占用、外溢核算[21]。杨丽雯等基于 SPANs 模型对引黄入晋工程南干线区域的固碳服务供需平衡关系进行了量化,并以研究区主风向为依据,绘制了服务流传输路径图,量化了服务流[22]。张欣蓉等研究者基于 RUSLE、InVEST 等多种模型和方法量化了中国西南喀斯特区 2000—2015 年土壤保持、产水、固碳服务的供给与需求量以及供需空间盈余变化特征,并确定了服务流传输路径和流量[23]。上述研究揭示了生态系统服务供给在满足本区域需求时可能出现的盈余或缺口,

这些盈余或缺口会因自然和人为因素在不同区域间传递和补偿[5]。因此,对生态系统服务流的研究和分析不仅能够明确自然生态系统的供给能力和社会经济系统的需求能力,还能识别“自然-社会系统”之间生态产品和服务转移的路径和关键区位,为解决生态系统服务供需空间不匹配问题提供了新的研究视角[24—25]。然而,目前大多数关于生态系统服务流动的研究仍停留在概念层面,且许多研究侧重于易于量化的生态系统服务[26—27]。将生态系统服务流与生态补偿相结合的研究仍较为稀缺。

调节服务作为生态系统服务的四大亚类之一,涵盖了空气质量调节、气候调节、水文调节、水土保持、水净化等多个方面[28]。调节服务具有显著的外部性特征,其在满足特定区域需求的同时,能够向区域外产生辐射效应。调节服务通过调整自然生态系统的功能,为人类生存提供支撑和维护,其直接作用于自然环境,对区域环境产生的影响深远且显著[1,29]。相较于其他间接服务于人类的生态系统服务亚类,调节服务的直接作用使其影响更为显著。同时,调节服务的特性与生态补偿理论具有较高的契合度。对调节服务进行量化分析并开展生态补偿研究,对于改善区域生态环境,促进区域自然与经济的可持续发展具有重要意义。

黄河流域作为我国关键的生态屏障,其生态系统服务功能退化严重,生态基础相对脆弱,且流域内各省区发展不均衡、不充分的问题尤为显著。为深入贯彻习近平总书记关于生态文明建设的重要论述,积极践行“绿水青山就是金山银山”的理念,响应国家“黄河流域生态保护和高质量发展”战略部署,本研究选取黄河流域作为研究区域,以区县级行政单位作为基础研究单元,针对生态系统中的水源涵养和固碳服务两大调节功能进行空间量化分析,评估其供需匹配程度。研究同时运用热点分析方法,识别服务供给与需求的关键区域,并结合水文分析、风场分析以及黄河流域的实际情况,模拟生态系统服务的流动方向与路径。此外,本研究引入比较生态辐射力概念,模拟服务流在传递过程中的衰减效应,进而确定黄河流域调节服务的生态补偿额度。本研究将为黄河流域的生态管理政策制定和生态方案设计提供科学依据,同时为流域环境与经济的协调可持续发展提供理论支持和实践指导。

## 1　研究区概况及数据来源

### 1.1　研究区概况

黄河流域地势呈现西高东低的特征,贯穿中国九个省区,流域覆盖面积约为 75 万 $km^2$。本项研究的区域界定以黄河流域涵盖的县市级行政区划为基准,总面积约达 117 万 $km^2$(图 1)。流域内分布着众多关键的生态功能区和粮食生产区,构成了我国至关重要的生态屏障和经济带。长期以来,粗放型发展模式导致黄河流域人地关系紧张,流域内人口、资源、环境与经济发展之间存在显著的不平衡现象[30]。上游地区的过度放牧和土地退化问题严重损害了区域的水源涵养能力,中下游地区则面临严峻的水土流失问题,水资源短缺,生态系统的脆弱性较高,黄河流域的生态压力持续增加。因此,实现黄河流域生态保护与社会经济的协调可持续发展,已成为当前亟需解决的关键问题。

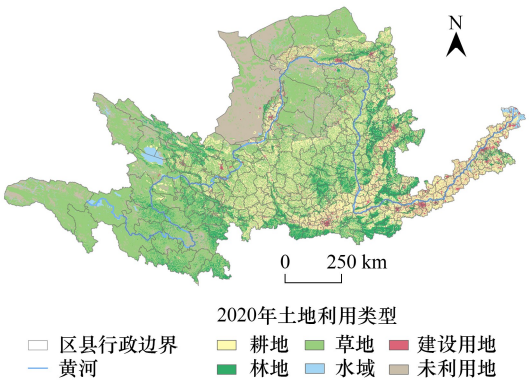


**图 1　研究区概况**

**Fig.1　Situation of study area**

### 1.2　数据来源

研究中使用的土地利用数据与行政区边界数据均来源于中国科学院环境与数据中心;气象数据、蒸散数据均来源于国家系统科学数据中心;数字高程数据来源于地理空间数据云平台;风向数据来源于国家气象科学数据中心的中国地面气候标准值数据集;土壤数据来源于联合国粮农组织的世界土壤数据库土壤数据集。所有数据均为 2020 年,使用 ArcGIS 10.8 软件重新采样为 1000m 空间分辨率,并统一为 Albers 投影坐标(表 1)。

表 1 数据来源

Table 1 Data source

| 数据 Data | 来源 Source |
|---|---|
| 土地利用数据、行政区边界 Land use data、administrative boundaries | 中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn/) |
| 气象数据、蒸散数据 Meteorological data、evaporation data | 国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn/) |
| 土壤数据 Soil data | 世界土壤数据库(HWSD)土壤数据集(http://www.fao.org) |
| 数字高程模型 Digital elevation model | 地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/) |
| 风向数据 Wind direction data | 国家气象科学数据中心(http://data.cma.cn/) |

## 2 研究方法

### 2.1 研究框架

生态补偿机制作为调节区域生态保护与社会经济发展之间关系的有效策略,其核心在于明确利益相关者、补偿标准及补偿方式。本研究依托生态系统调节服务的供给-流动-需求理论框架,对黄河流域的水源涵养与固碳服务的供需关系进行了深入分析,提出了一种新型生态补偿模式。通过运用风场分析、水文分析及热点分析方法,本研究精确识别了生态系统服务流的供给区域、需求区域以及服务流的传递路径。其中,服务流动的路径代表了生态补偿受偿区接受补偿的方向,服务流供给区作为流域生态补偿的受偿区域,服务流的受益区为生态补偿的补偿区域。在此基础上,结合比较生态辐射力以获取服务流的流量,进而确定了黄河流域水源涵养与固碳服务的受偿城市、补偿城市及相应的补偿额度。同时,考虑了风向因素对固碳服务流传递的影响,对固碳服务生态补偿金额进行了优化,最后明确黄河流域调节服务生态补偿利益双方以及补偿金额。

### 2.2 生态系统服务供给与需求

基于黄河流域生态系统分类及其数据的可获取性,本研究选取了生态系统调节服务中的水源涵养功能与固碳功能进行评估与分析。水源涵养功能作为生态系统所展现的水文功能之一,与水资源安全紧密相关,因此具有极高的研究价值[31]。本研究采用 InVEST 模型的产水模块对黄河流域的产水量进行了评估。在此过程中,$Z$ 系数的选取参考了先前的相关研究[32],并结合《黄河水资源公报》对 $Z$ 系数进行了适当的调整与确定。随后,将产水量结果与地形、土壤物理特性及流速数据进行综合校正,以推算出水源涵养的供给量。而水源涵养的需求量则是通过人口密度数据与人均耗水量数据的计算得出,其中人均耗水量数据参考了《中国水资源公报》中的全国人均用水量数据。

固碳服务在缓解大气中二氧化碳浓度、调节全球气候系统以及维护全球碳循环平衡中扮演着至关重要的角色[33]。本研究采用 InVEST 模型中的固碳模块对固碳服务的供给量进行定量评估,并依据 InVEST 模型的建议参数值以及先前的相关研究[34]来确定不同土地利用类型的碳储量参数。固碳的需求量则是基于人均碳排放量与人口密度数据进行估算,其中人均碳排放量数据源自 Our World in Data(http://ourworldindata.org/)。计算方法如下(表 2、表 3):

### 2.3 生态系统服务供需匹配关系

为深入探讨区域生态系统服务供给与需求的匹配程度,本研究采用生态系统服务供需差与市场价格(中国水权交易所的黄河水权交易价格或全国碳排放权交易试点市场价格)的乘积,作为衡量不同区域生态系统服务供需差异(Difference between Supply and Demand of Ecosystem Service,DSDES)的指标。通过将供需差额进行货币化处理,能够更直观地从价格角度揭示研究区域内的生态赤字与生态盈余区域。具体计算公式如下:

$$DSDES = (ES_s - ES_d) \times P_r$$

式中,DSDES 表示供给与需求差异结果,当 DSDES<0 时,表明该区域属于生态需求区,呈现赤字状态;当 DSDES>0 时,表明该区域属于生态供给区,呈现盈余状态。$ES_s$ 为生态系统服务供给;$ES_d$ 为生态系统服务需求;$P_r$ 在水源涵养服务测算中为中国水权交易所的黄河水权交易价格,在固碳服务中为全国碳排放权交易试点市场价格。

表 2　生态系统服务供给计算方法

Table 2　Calculation Method of ecosystem service supply

| 生态系统服务供给 Ecosystem service supply | 计算公式 Calculation formula | 变量解释 Variable interpretation |
|---|---|---|
| 水源涵养服务 Water conservation supply | $WC=\min\left(1,\frac{249}{\text{Velocity}}\right)\times\min\left(1,\frac{0.9\times TI}{3}\right)\times\min\left(1,\frac{K_{\text{sat}}}{300}\right)\times Y$<br>$TI=\lg\frac{\text{Drainage}_{\text{area}}}{\text{Soil}_{\text{depth}}\times\text{Percent}_{\text{slope}}}$<br>$K_{\text{sat}}=60.96\times10^{(-0.6+0.0126S-0.0064C)}$ | $WC$ 为水源涵养量($m^3$);Velocity 为流速系数;$TI$ 为地形指数;$K_{\text{sat}}$ 为土壤饱和导水率(mm/d);$Y$ 为产水量(mm);$\text{Drainage}_{\text{area}}$ 为集水区栅格数量;$\text{Soil}_{\text{depth}}$ 为土壤深度(mm);$\text{Percent}_{\text{slope}}$ 为百分比坡度;$S$ 为土壤砂粒含量;$C$ 为土壤粘粒含量。 |
| 固碳服务 Carbon sequestration supply | $C_{\text{total}}=C_a+C_b+C_s+C_d$ | $C_{\text{total}}$ 为碳储量(t/hm);$C_a$ 为地上生物碳储量(t/hm);$C_b$ 为地下生物碳储量(t/hm);$C_s$ 为土壤碳储量(t/hm);$C_d$ 为凋落物碳储量(t/hm)。 |

表 3　生态系统服务需求计算方法

Table 3　Calculation Method of ecosystem service demand

| 生态系统服务需求 Ecosystem service demand | 计算公式 Calculation formula | 变量解释 Variable interpretation |
|---|---|---|
| 水源涵养服务 Water conservation demand | $WD=D_{\text{pcwc}}\times P_{pop}$ | $WD$ 为水源涵养需求量($m^3$);$D_{\text{pcwc}}$ 为人均耗水量($m^3$/人);$P_{\text{pop}}$ 为人口密度(人/km) |
| 固碳服务 Carbon sequestration demand | $CD=C_{cp}\times P_{pop}$ | $CD$ 为固碳需求量(t/hm);$C_{cp}$ 为人均碳排放量(t/人);$P_{\text{pop}}$ 为人口密度(人/km) |

## 2.4　生态系统服务流

水源涵养服务流,作为河流水网传输载体,借助地形高差产生的重力势能差异,形成自上游至下游的定向流动[35—36]。本研究旨在通过分析水源涵养服务的供需差异,明确水源涵养服务的供给区域与需求区域;并结合水文分析方法,利用河流水网确定水源涵养服务流的流动路径。

在固碳服务流的研究中,碳汇与碳源通过大气环流实现相互作用。区域内的固碳服务能够固定一定量的碳,而未被固定的碳则会随风力传播至其他区域,并被那里的固碳服务所固定[13,36]。基于此,本研究通过分析固碳服务的供需关系,确定固碳服务的供给区域与需求区域。通过气象站点数据进行风场分析,依据年均风流场确定固碳服务流的流动路径,以构建一个未受人类活动影响的自然状态下的固碳服务流模型。

生态系统服务从供给区流向需求区会受到如地形、风向、土地利用类型以及人口等各种自然和社会因素的影响[11]。随着流动距离的增加,生态系统服务在流动过程中会产生一定的消耗,最终到达需求区的服务量也会随距离的增加而逐渐减少[9]。陈江龙等基于物理学中的引力模型,并借鉴断裂点公式,提出了地区比较生态辐射力的概念,以此分析区域生态系统服务对周边区域的影响效应[37]。比较生态辐射力与生态系统服务流理论相似,因此在本研究中引入比较生态辐射力来研究生态系统服务流[38]。具体公式如下:

$$E_C=\frac{e^{-\frac{D_{ij}}{H}}}{1+\sqrt{\frac{N_i}{N_j}}}$$

式中,$E_c$ 为比较生态辐射力;$D_{ij}$ 是需求区 $i$ 到供给区 $j$ 之间的距离;$H$ 为研究区中不同供需之间的最大距离;$N_i$ 为生态系统服务需求区的 DSDES;$N_j$ 为生态系统服务供给区的 DSDES。

## 2.5　生态补偿

在生态补偿的实施过程中,选取关键区域进行补偿或受偿已成为一种普遍采纳的策略。空间冷热点分析作为一种聚类技术,被广泛应用于识别空间数据中的显著高值与低值区域。在此技术框架下,高值聚集区域被定义为热点,而低值聚集区域则被称为冷点。本研究采用热点分析技术,对生态系统服务供需差异(DSDES)的空间分布模式进行了计算与统计,以揭示其高值与低值区域的聚集特征。认为热点区域为接受

资金受偿的重点区域,冷点区域则为提供资金补偿的关键区域。热点分析公式如下:

$$G_i^* = \frac{\sum_i w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_j^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{n \sum_j^n w_{ij}^z - \left( \sum_j^n w_{ij} \right)^2}{n-1}}}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_j^n x_j^z}{n} - (\bar{x})^2}$$

式中,$G_i^*$ 为栅格 $i$ 的集聚指数;$w_{ij}$为区域 $i$ 和 $j$ 之间的空间权重;$\bar{x}$ 为所有数据的平均值;$S$ 为所有数据的标准差。$G_i^*$ 越高,表明热点聚集越密集,实施生态补偿的必要性越高;$G_i^*$ 越低,表明冷点聚集越密集,实施生态支付必要性越高。本研究借助 ArcGIS 空间聚类中的冷热点分析工具对研究区进行分析。

根据生态系统服务流以及热点分析结果,受偿区应接受或补偿区应支付的金额计算方式如下:

$$\mathrm{ECA} = \mathrm{DSDES} \times P_{ro}$$

式中,ECA 为生态补偿金额;DSDES 为生态系统服务的供需差;$P_{ro}$为不同供给区流出的生态服务供给,经过不同因素产生衰减(本研究以比较生态辐射力表示)到达不同需求区的比例。

在固碳服务过程中,碳源与碳汇通过大气环流相互联系,风流场在很大程度上决定了服务流的传递路径[39]。在此过程中,碳源区(需求区)未固定的碳会随风传递至碳汇区(供给区),并被碳汇区的固碳能力所消耗。值得注意的是,尽管研究区内碳汇区域的累年风向与碳固定路径方向可能存在差异,但这并不意味着碳源区域未固定的碳无法到达碳汇区。实际上,碳源产生的碳在大气中的传递与循环是一个连续且完整的过程,最终未固定的碳仍会抵达碳汇区并被固碳服务所消耗。当研究区内碳汇区域的累年风向与碳固定路径方向不一致时,固碳服务流的传递会受到风场风向的影响,从而产生一定的消耗。然而,以往研究中对此类消耗的量化鲜有涉及。因此,本研究提出以下假设:当碳汇区域累年风向与固碳路径方向完全相反时,固碳服务流会随风场运动形成最长的传递路径,并在此过程中会损失一半的固碳服务流。相反,若碳汇区的累年风向与固碳路径方向相同时,则固碳服务流的传递路径最短,且不受风向影响,因此不产生损耗。当风向与固碳路径方向处于上述两种情况之间时,则根据碳汇区累年风向的中心角度确定固碳服务流在传递过程中的损失比例。因此,对固碳服务生态补偿公式进行优化,计算方式如下:

$$\mathrm{ECA}_C = \mathrm{ECA} - \mathrm{ECA} \times P_{\mathrm{wind}}$$

式中,$\mathrm{ECA}_C$为优化后固碳服务生态补偿金额;ECA 为生态补偿金额;$P_{\mathrm{wind}}$为受风场风向影响固碳服务流在传递过程中损耗的比例。具体情况如下:假设固碳路径方向为由东向西,根据风向方位,碳汇区累年风向方位共有十六种可能。累年风向方位为西时,$P_{\mathrm{wind}}$为 0;累年风向方位为西西北、西西南时,$P_{\mathrm{wind}}$为 1/16;累年风向方位为西北、西南时,$P_{\mathrm{wind}}$为 2/16;累年风向方位为北西北、南西南时,$P_{\mathrm{wind}}$为 3/16;累年风向方位为北、南时,$P_{\mathrm{wind}}$为 4/16;累年风向方位为北东北、南东南时,$P_{\mathrm{wind}}$为 5/16;累年风向方位为东北、东南时,$P_{\mathrm{wind}}$为 6/16;累年风向方位为东东北、东东南时,$P_{\mathrm{wind}}$为 7/16;累年风向方位为东时,$P_{\mathrm{wind}}$为 8/16。

其中,水源涵养生态补偿金额方式按原公式计算。故此,黄河流域调节服务生态补偿金额计算方式如下:

$$\mathrm{ECA}_{\mathrm{reg}} = \mathrm{ECA}_w + \mathrm{ECA}_c$$

式中,$\mathrm{ECA}_{\mathrm{reg}}$为调节服务生态补偿总金额;$\mathrm{ECA}_w$为水源涵养生态补偿金额;$\mathrm{ECA}_c$为固碳服务生态补偿金额。

## 3 结果与分析

### 3.1 生态系统服务供需空间分布

在研究区域内,调节服务的供给与需求的空间分布差异显著(图 2)。综合分析表明,两种调节服务的供给高值区域主要分布在黄河上中游流域的南部地区,而低值区域则主要位于黄河流域北部的黄土高原地区以及黄河下游平原地区。两种调节服务的需求空间分布模式相似,其高值区域主要集中在黄河“几”字弯以及

黄河下游平原地区。具体而言,水源涵养服务的供给在空间上呈现出明显的南高北低、西高东低的分布格局。高值区域主要位于黄河流域西南部的黄河源地区。该区域生态环境优良,土地利用以草地、林地为主,人口密度较低,降雨量充足,植被覆盖度高,因此具有较强的固水能力,从而水源涵养能力也相对较强。相对地,水源涵养服务供给的低值区域主要集中在黄河流域北部的黄土高原地区,该区域位于 400mm 等降水量线以北,土地利用类型以荒漠戈壁为主,降雨量较少,植被覆盖率低,不利于水源的储存。

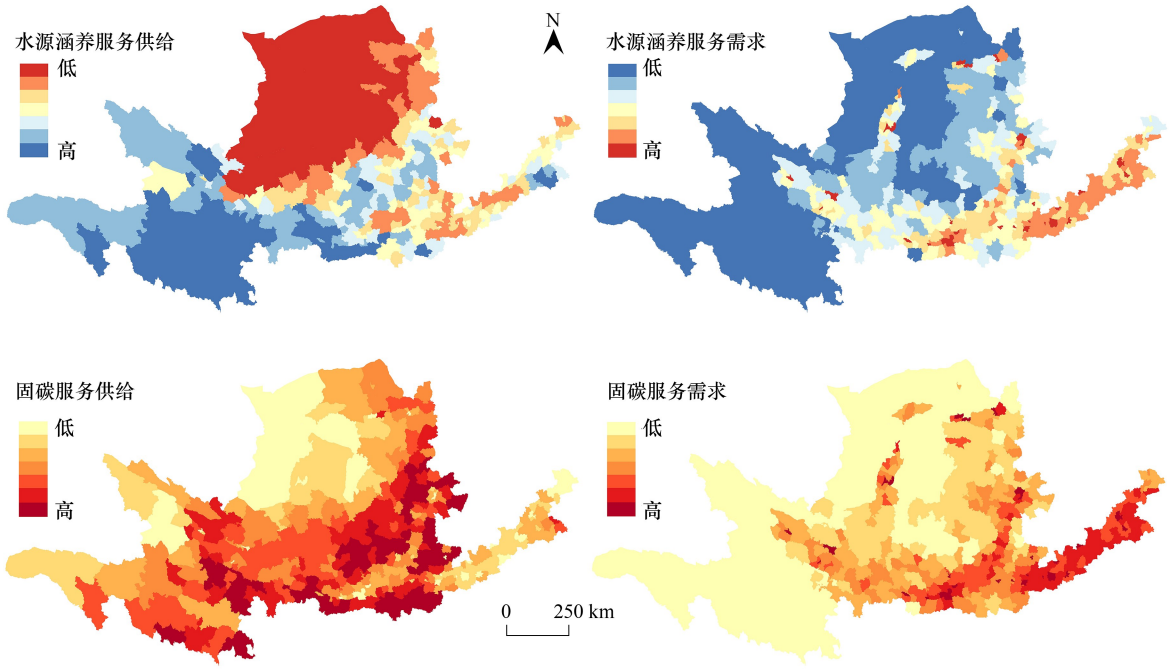


**图 2　生态系统服务供需空间分布**

**Fig.2　Spatial distribution map of ecosystem service supply and demand**

固碳服务供给的空间分布也呈现出南高北低的趋势,高值区域主要集中在黄河流域内山西陕西境内的秦岭、中条山、吕梁山、太行山地区。这些区域的土地利用类型以林地为主,植被覆盖度相对较高,因此具有较强的碳汇能力。而低值区域则主要集中在黄河流域北部的黄土高原地区以及黄河下游平原,这些区域的土地利用类型以荒漠戈壁以及耕地为主,碳汇能力较弱,固碳能力较低。

水源涵养服务和固碳服务的需求在空间格局上具有相似性,高值区域主要集中在黄河下游平原、关中平原以及河套平原。这些区域人口密集,城镇化程度高,生产生活中对水源的消耗量大,碳排放量高,因此对水源涵养和固碳能力的需求强烈;而调节服务需求的低值区域则主要分布在黄河中上游人口密度相对较低的区县。总体而言,两种调节服务的供给与需求均受到人口密度、环境条件等多种因素的影响。

### 3.2　生态系统服务供需匹配关系

黄河流域水源涵养服务整体上呈现赤字状态,供给难满足需求。仅在黄河流域西南部地区,供给超过需求,而其余大部分区域则呈现供给不足的状况,尤其在黄河下游平原地区,水源涵养的供给能力难以满足日益增长的需求(图 3)。黄河流域的水资源是支撑我国农业与工业发展的重要基础,然而,人口增长、工业扩张以及气候变化等因素,正对黄河流域的水资源构成前所未有的威胁与挑战。特别是在人口密集、农业与工业需水量大、水污染严重、水资源环境压力大的黄河下游平原,地下水资源的过度开采导致了严重的水源涵养供需错配问题。针对这一问题,黄河下游平原应严格控制水污染,加强工业废水与农业面源污染的治理,限制地下水的过度开采,并采取地下水回灌等措施以恢复地下水位,调整产业结构,降低农业与工业对水资源的高需求,发展节水型农业与工业。黄河流域中部如黄土高原等水源涵养供给低于需求的区域,人口密度较小,经济

发展水平较低,水源涵养供给错配程度低于黄河下游平原,但该区域存在草地退化、土地荒漠化、水土流失等问题。因此,该区域则应提高水资源的利用效率,减少浪费,推进水土保持工程,加强水源监管,确保水资源的合理分配与使用。黄河流域西南部供给大于需求的区域,降水充沛,水资源丰富,应进一步优化水资源配置,强化生态保护措施,保持水源涵养能力,防止过度开发导致的水资源退化,确保水资源的可持续利用。

黄河流域的碳固存服务总体上表现出供应能力超越需求的态势,仅在黄河下游的若干区县及省会城市(例如郑州、济南、西安)中,存在供应能力不及需求的赤字现象。其他区域尽管碳固存服务的供应能够满足需求,但已濒临生态赤字的临界状态(图 3)。黄河流域的土地利用类型以草地为主导,特别是在上游的青海地区,由于人口稀少和经济产业相对欠发达,碳排放量较低,碳汇功能较为强大。这些区域应保持现有的草地生态系统,防止过度放牧和土地退化,提升区域碳汇功能。同时,应利用当地的自然景观和文化资源,发展低碳生态旅游,以促进经济发展。然而,在下游的华北平原,碳固存服务的供需失衡现象尤为显著,供应能力远不能满足需求。关中平原、河套平原以及汾河平原亦面临相似的供需矛盾。这些区域作为黄河流域的人口密集区和粮食主产区,人口密度高,产业发达,碳排放量大,对碳固存服务的需求相应较高。因此,这些区域亟需优化产业结构,实施节能减排措施,发展绿色农业,优化城市绿地布局,提升区域绿化率,增强区域碳固存能力,同时减少区域碳排放,并完善碳交易及碳补偿机制。

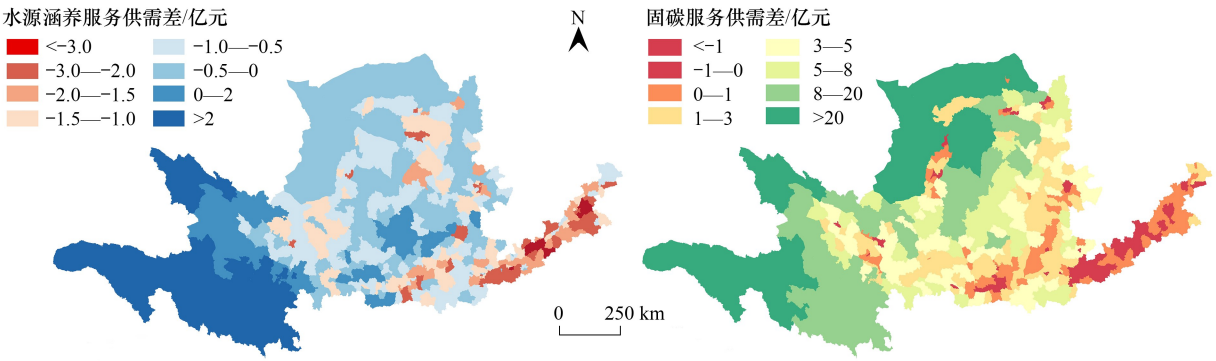


**图 3 生态系统服务供需匹配关系**

**Fig.3 Matching between supply and demand of ecosystem services**

### 3.3 生态系统服务流与生态补偿优化

依据热点分析法所得结果,黄河流域的水源涵养功能与固碳功能供需关系呈现出明显的空间聚集性。具体而言,水源涵养功能的热点区域主要分布于黄河流域西部的青海、四川以及甘肃西南部地区,而冷点区域则主要位于黄河流域东部的河南、山东、陕西东部以及山西南部地区(图 4)。其中,表现为极显著热点(99%置信度)的区县共计 32 个,极显著冷点(99%置信度)的区县共计 110 个。固碳服务的热点集中在黄河流域西部青藏高原以及北部黄土高原地区,而冷点则集中在黄河流域东部河南、山东以及山西、陕西南部部分区县。其中,表现为极显著热点(99%置信度)的区县供给共计 28 个,极显著冷点(99%置信度)的区县共计 177 个。因此,表现为极显著热点的区县被认为生态系统服务的供给区,表现为极显著冷点的区县被认为生态系统服务的需求区。

生态系统服务流构成了生态系统服务从供给端产生至需求端使用的全过程。当某一区域的生态系统服务供给量超过本地需求时,剩余的服务将通过特定路径传递至需求区域。以水源涵养服务为例,水资源在重力作用下从高地向低地汇聚,并通过河流网络从上游向下游区域输送(图 5)。在黄河上游地区,32 个区县作为水源涵养服务的主要供给区,在满足本地需求后,过剩的水资源会沿着大通河、湟水、洮河等河流汇入黄河,并流向下游需求区。在自然生态系统中,碳固定是一个涉及多个步骤和物质转化的复杂生物化学过程。对于固碳服务而言,碳固定过程指的是碳源区产生的碳在大气环流等生态过程的作用下,最终被固定在碳汇区,从

而实现固碳服务功能。碳源与碳汇通过大气环流相互连接,风流场在很大程度上决定了固碳服务流的传递路径。因此,固碳服务流的传递路径与研究区域内的风流场运动路径具有高度一致性(图 5)。

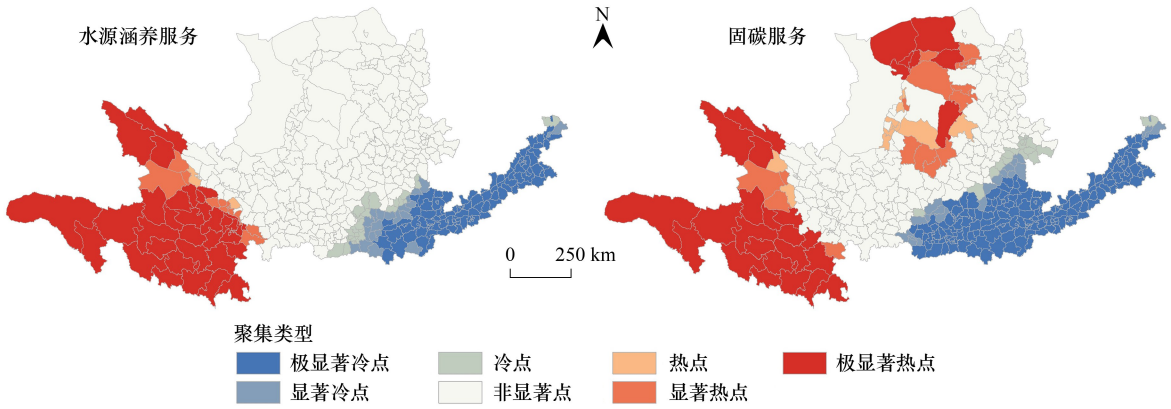


**图 4　热点分析**

**Fig.4　Hot spot analysis**

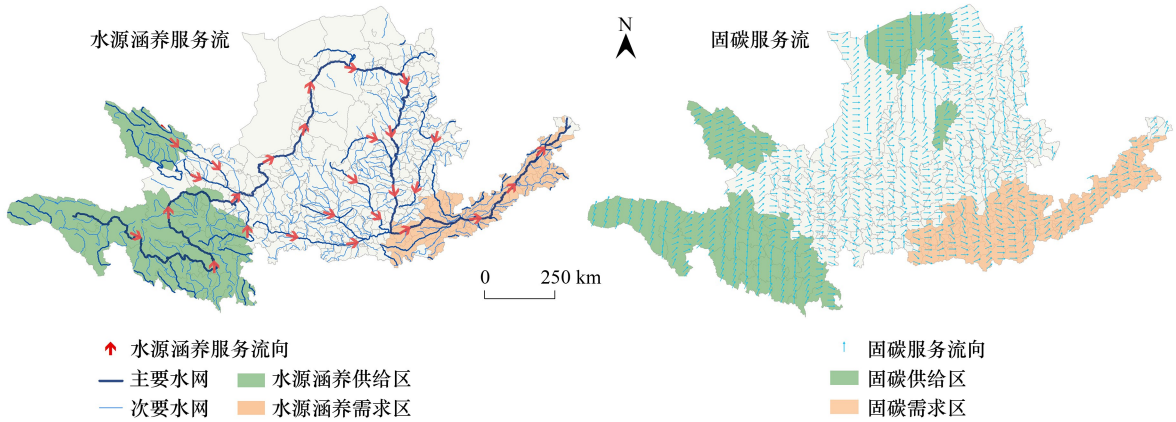


**图 5　生态系统服务流流向**

**Fig.5　Direction of ecosystem service flow**

依据热点分析及生态系统服务流动性的研究成果,本研究确定了生态系统服务的供给区域作为生态补偿的受益区域,而生态系统服务的需求区域则作为生态补偿的支付区域。鉴于在区县级尺度上分析涉及的区县数量庞大,导致生态补偿的空间分析难以实施,而在市级尺度上进行横向生态补偿则更便于量化权利与义务,并且有利于生态补偿政策的制定与执行。因此,将生态补偿主体和客体从区县级归纳到市级,共有 8 个城市作为水源涵养服务的受偿城市,22 个城市作为补偿城市;10 个城市作为固碳服务的受偿城市,28 个城市作为补偿城市(图 6)。生态系统服务的流动性从供给区域向需求区域传递,其流量与供给区域的服务供给能力及需求区域的服务需求程度密切相关。在服务流动过程中,流量会因距离的增加而产生损耗。因此,在确定生态补偿金额时,应依据生态系统服务流量进行考量,距离供给区域较远的城市由于接受的服务流量比例较小,其应支付的生态补偿金额相对较低。

黄河流域调节服务生态补偿总金额为 676.54 亿元。其中,果洛藏族自治州和鄂尔多斯受偿金额最高,分别为 132.94 亿元和 106.64 亿元。即便是受偿金额最少的海西蒙古藏族自治州,受偿金额也达到了 26.71 亿元。果洛藏族自治州,作为黄河流域调节服务受偿金额最高的城市,地处青藏高原东部,是三江源地区的核心组成部分,亦是黄河流域关键的水源涵养区。该地区凭借其独特的地理位置和气候条件,成为众多河流的发源地,对黄河流域水资源平衡和生态安全的维护发挥着至关重要的作用。鄂尔多斯市拥有丰富的草原和森林

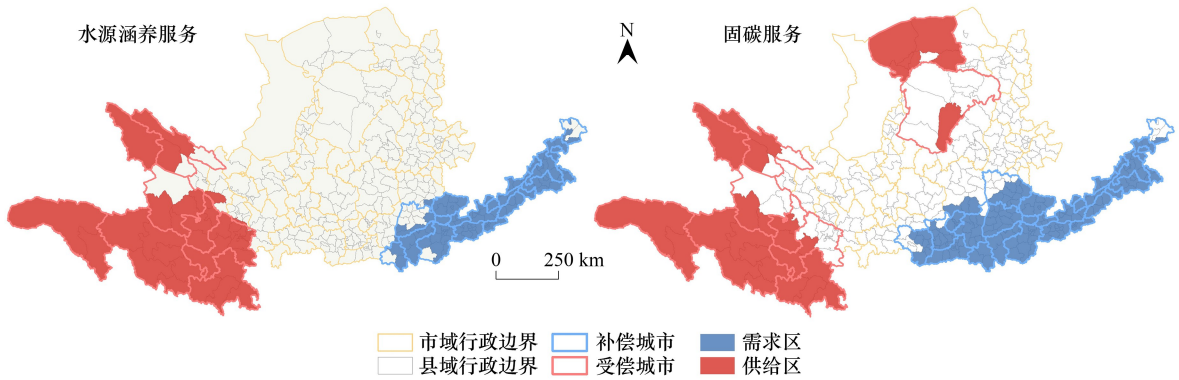


**图 6 生态补偿市域识别**

**Fig.6 Identification of ecological compensation municipalities**

资源,是“三北”防护林体系工程、退耕还林、退耕还草等生态建设重点工程的关键节点城市。作为黄河流域中重要的碳汇区,不仅通过碳固定缓解了流域气候变化,还维护了流域的生态平衡和生物多样性。在补偿城市方面,郑州需支付补偿金额最高为 38.04 亿元,其余城市需支付金额都在 20 亿以上。只有宝鸡、渭南以及临汾需支付补偿金额低于 20 亿元,分别为 19.46 亿元、19.52 亿元、17.05 亿元。这些补偿城市在黄河流域的经济社会发展中扮演着关键角色,作为流域内重要的经济中心,其经济总量、人口规模及产业结构等方面均处于流域领先地位。例如,2020 年郑州市的 GDP 达到 1.185 万亿元,即使补偿金额最低的临汾市 GDP 也达到了 0.152 万亿元,而果洛藏族自治州的 GDP 仅为 48.9 亿元。在水源涵养服务的生态补偿中,总金额为 160.54 亿元,其中果洛藏族自治州受偿金额最高,为 45.45 亿元。阿坝藏族羌族自治州和甘南藏族自治州分别以 37.26亿元和 25.87 亿元位列其后。其余城市受偿金额都低于 20 亿元,海北藏族自治州受偿金额最少,为 7.54 亿元。在补偿城市方面,郑州需支付的补偿金额最高,为 12.16 亿元,其余城市需支付的补偿金额均未超过 10 亿元,东营需支付的补偿金额最少,为 6.33 亿元。在固碳服务的生态补偿方面,生态补偿总金额高达 516 亿元。鄂尔多斯受偿金额最高,为 106.64 亿元,反映了其在固碳服务方面的显著贡献。受偿金额最低的城市是黄南藏族自治州,为 20.17 亿元。在需支付补偿金额的城市方面,郑州、西安、咸阳以及铜川需支付金额都达到了 20 亿元,分别为 25.87、22.23、21.01 以及 20.87 亿元,东营需支付的补偿金额最少,为 15.43 亿元(图 7)。

**表 4 生态补偿城市分类**

**Table 4 Classification of Ecological Compensation Cities**

| 生态系统服务<br>Ecosystem service | 类型<br>Type | 城市<br>Cities |
|---|---|---|
| 水源涵养服务<br>water conservation service | 补偿城市 | 运城市、郑州市、焦作市、济源市、洛阳市、开封市、三门峡市、鹤壁市、晋城市、菏泽市、新乡市、商洛市、聊城市、济宁市、濮阳市、德州市、泰安市、安阳市、济南市、滨州市、淄博市、东营市 |
| | 受偿城市 | 阿坝藏族羌族自治州、甘南藏族自治州、果洛藏族自治州、海北藏族自治州、海南藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州、黄南藏族自治州、玉树藏族自治州 |
| 固碳服务<br>Carbon sequestration service | 补偿城市 | 西安市、商洛市、宝鸡市、三门峡市、洛阳市、咸阳市、渭南市、郑州市、铜川市、运城市、济源市、焦作市、开封市、新乡市、晋城市、安阳市、菏泽市、鹤壁市、濮阳市、临汾市、济宁市、延安市、聊城市、泰安市、德州市、济南市、淄博市、滨州市、东营市 |
| | 受偿城市 | 阿坝藏族羌族自治州、鄂尔多斯市、甘南藏族自治州、果洛藏族自治州、海北藏族自治州、海南藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州、黄南藏族自治州 |

## 4 讨论

### 4.1 生态补偿方法优化

本研究构建了一种基于生态系统服务流动性的生态补偿机制框架,其特点在于具有较高的客观性,不易

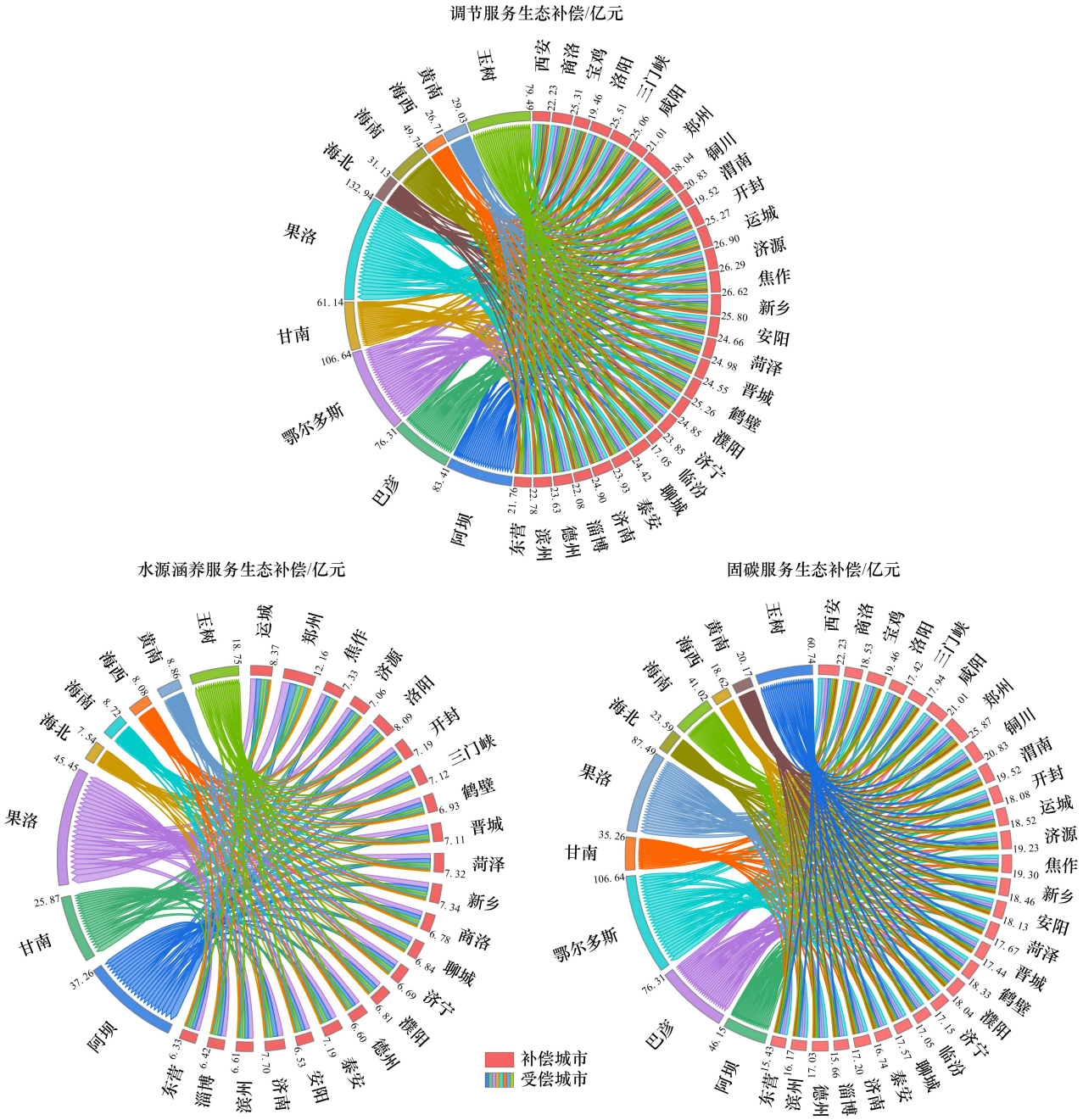


图 7　生态补偿金额

**Fig.7　Amount of ecological compensation**

受到主观因素的干扰。与现有研究相比,本研究通过水文与风场分析确定了生态系统服务流动的路径,明确了补偿主体与受偿主体;综合考虑了服务流在传递过程中的衰减效应,基于利益相关者所获得的生态系统服务流量比例来确定支付额度,使得研究结果更为合理,从而为区域间横向生态补偿的分析与量化提供了更为科学的方法论。

本研究之特色在于对生态系统服务流传递过程中,地形、风向、水流、土地利用类型等环境因素所产生的影响进行了深入分析与研究。对固碳服务的生态补偿金额进行优化时,特别纳入了风向因素对服务流传递潜在影响的考量。鉴于当前尚无量化研究明确界定该影响的具体程度,本研究依据生态学原理,假定服务流自碳源区发端,最终汇集于碳汇区。然而,风向的变动可导致服务流传递路径的改变,并可能在不同路径上产生

不同程度的损耗。为更精确地评估此影响,本研究提出了一个基于碳汇区历年风向中心角度的假设,用以估算固碳服务流在传递过程中的损失比例。该方法不仅依托于长期气候数据,而且考虑了风向对服务流传递效率的实际作用,从而使得固碳服务生态补偿金额的优化更趋科学与合理。通过此类优化,能够更准确地体现生态系统服务的实际价值,为生态补偿机制的完善与优化提供坚实的理论支撑。

### 4.2 调节服务流生态补偿的现实意义

黄河流域在我国生态与经济发展中占据着核心地位,作为我国重要的生态屏障以及经济动脉,其流域覆盖我国东部至西部地区。流域内人口与经济活动主要集中在下游平原地带。相对地,上游与中游地区则主要承担生态功能区的角色。受偿区域的地理分布亦展现出高度相似性,主要位于黄河流域的上游与中游地区。尽管这些区域的人口密度较低,经济发展水平有限,但它们在维持生态功能区的角色、为其他区域提供关键生态服务方面具有不可替代的重要性。与此同时,补偿城市主要分布于黄河下游平原地带,这些城市在经济总量、人口规模及产业规模方面均在黄河流域占据主导地位。它们在流域生态系统服务需求方面扮演着至关重要的角色。本研究的成果不仅与现实情况高度一致,而且对于改善黄河流域的生态环境、推动该流域生态与经济的协调发展具有重要的现实意义。

### 4.3 研究方法的局限性和未来的研究期望

鉴于数据采集的局限性以及技术方法的不完善,本项研究在分析黄河流域生态系统服务流的过程中,仅纳入了自然因素对生态系统服务流传递所造成的衰减效应。实际上,生态系统服务流在传递过程中亦会受到经济社会因素及人类活动的显著影响,并表现出累积效应;同时,不同类型的生态系统服务流在传递过程中亦存在相互作用。在确定补偿金额时,本研究亦未充分考虑区域经济规模是否具备承担补偿金额的能力,补偿标准主要基于数量指标,而未充分考量质量维度。因此,未来研究应从生态系统服务流的流量、流速、增损以及不同类型生态系统服务流之间的相互作用等多维度进行深入探讨,以揭示生态系统服务流在区域间的传递规律。在探究生态补偿机制时,补偿标准的制定应结合当地生态与经济的实际情况,横向补偿不应仅限于政府参与,还应积极引导社会资本参与,探索多元化的补偿方式。

## 5 结论

(1)在 2020 年,黄河流域的生态系统调节服务,包括水源涵养与固碳功能,在供需格局上表现出显著的差异性。供给方面,空间分布呈现出“南高北低、西高东低”的特征,而需求方面则与人口密度紧密相关,整体上呈现“东高西低”的格局。这两种调节服务的供给与需求均受到人口密度、环境条件等多重因素的综合影响。

(2)在黄河流域,水源涵养服务整体上处于赤字状态。除西南地区外,其他大部分地区供给不足,特别是在下游平原地区,水源涵养供给能力明显偏弱。相比之下,固碳服务整体上供给高于需求,但黄河下游部分区县和省会城市处于赤字状态,其余地区的固碳服务供给虽然能满足需求,但已接近生态赤字警戒线。

(3)本研究共识别出黄河流域水源涵养服务的受偿城市 8 个、补偿城市 22 个,固碳服务的受偿城市 10 个、补偿城市 28 个。通过调节服务流,并考虑地形、气候等因素的影响,确定补偿城市向受偿城市支付的生态补偿总金额为 676.54 亿元。其中,水源涵养服务的生态补偿总金额为 160.54 亿元,固碳服务的生态补偿总金额为 516 亿元。

**参考文献(References):**

[1] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.

[2] 李文华, 张彪, 谢高地.中国生态系统服务研究的回顾与展望. 自然资源学报, 2009, 24(1): 1-10.

[3] Hou W Y, Hu T Z, Yang L P, Liu X C, Zheng X Y, Pan H Y, Zhang X H, Xiao S J, Deng S H. Matching ecosystem services supply and demand in China's urban agglomerations for multiple-scale management. Journal of Cleaner Production, 2023, 420: 138351.

[4] 刘春芳, 王韦婷, 刘立程, 李鹏杰. 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. 自然资源学报, 2020. 35(9): 2177-2190.

[5] Wu C S, Lu R R, Zhang P, Dai E F. Multilevel ecological compensation policy design based on ecosystem service flow: a case study of carbon sequestration services in the Qinghai-Tibet Plateau. Science of the Total Environment, 2024, 921: 171093.
[6] Zhai T L, Wang J, Jin Z F, Qi Y, Fang Y, Liu J J. Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices? Ecological Indicators, 2020, 111: 106068.
[7] 沈静, 王少谷, 周楚平. 环境公正视角下广州市污染企业分布与区域人口社会特征的时空关系研究. 地理研究, 2022, 41(1): 46-62.
[8] Liotta C, Kervinio Y, Levrel H, Tardieu L. Planning for environmental justice-reducing well-being inequalities through urban greening. Environmental Science & Policy, 2020, 112: 47-60.
[9] 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.
[10] 袁伟彦, 周小柯. 生态补偿问题国外研究进展综述. 中国人口·资源与环境, 2014, 24(11): 76-82.
[11] 赵晶晶, 葛颜祥, 李颖. “多主体协同”对流域生态补偿运行绩效的影响研究. 中国土地科学, 2022, 36(11): 95-105.
[12] 欧阳志云, 郑华, 岳平. 建立我国生态补偿机制的思路与措施. 生态学报, 2013,33(3): 686-692.
[13] 秦艳红,康慕谊. 国内外生态补偿现状及其完善措施. 自然资源学报, 2007,(4): 557-567.
[14] 郭荣中, 申海建, 杨敏华. 澧水流域生态系统服务价值与生态补偿策略. 环境科学研究, 2016, 29(5): 774-782.
[15] 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.
[16] Zhai T L, Wu L K, Chen Y M, Nazir M F, Chang M Y, Ma Y B, Cai E X, Ding G Y, Zhao C C, Li L, Huang L Y. Ecological compensation in the context of carbon neutrality: a case involving service production-transmission and distribution-service consumption. Land, 2022, 11(12): 2321.
[17] Zhang J X, He C Y, Huang Q X, Li L. Understanding ecosystem service flows through the metacoupling framework. Ecological Indicators, 2023, 151: 110303.
[18] 姚婧, 何兴元, 陈玮. 生态系统服务流研究方法最新进展. 应用生态学报, 2018, 29(1): 335-342.
[19] 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.
[20] 徐洁, 肖玉, 谢高地, 王洋洋, 江源, 陈文辉. 防风固沙型重点生态功能区防风固沙服务的评估与受益区识别. 生态学报, 2019, 39(16): 5857-5873.
[21] 王健, 曹巍, 黄麟. 基于水供需服务流及外溢价值核算的太湖流域横向生态补偿机制. 生态学报, 2024, 44(3): 955-965.
[22] 杨丽雯, 董丽青, 张立伟, 何秉宇, 张永清. 固碳服务供需平衡和服务流量化评估——以引黄入晋南干线为例. 资源科学, 2019,41(3): 557-571.
[23] 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.
[24] 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.
[25] Zhai T L, Wang J, Fang Y, Huang L Y, Liu J J, Zhao C C. Integrating ecosystem services supply, demand and flow in ecological compensation: a case study of carbon sequestration services. Sustainability, 2021, 13(4): 1668.
[26] Costanza R, d′Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O′Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world′s ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 387: 253-260.
[27] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 徐洁. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展. 生态学报, 2016, 36(10): 3096-3102.
[28] 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. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
[29] 欧阳志云,王如松. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展. 世界科技研究与发展, 2000,(5): 45-50.
[30] 王静, 刘晶晶, 宋子秋, 黄隆杨, 方莹, 李泽慧. 黄河流域高质量发展的生态保护与国土空间利用策略. 自然资源学报, 2022, 37(11): 2930-2945.
[31] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
[32] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 模型的黄河流域产水量时空变化及其对降水和土地利用变化的响应. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2731-2739.
[33] Zhai T L, Zhang D, Zhao C C. How to optimize ecological compensation to alleviate environmental injustice in different cities in the Yellow River Basin? A case of integrating ecosystem service supply, demand and flow. Sustainable Cities and Society, 2021, 75: 103341.
[34] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 基于 InVEST 和 CA-Markov 模型的黄河流域碳储量时空变化研究. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1018-1029.
[35] 陈登帅, 李晶, 张渝萌, 张城, 周自翔. 延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究. 生态学报, 2020, 40(1): 112-122.
[36] Wu J S, Fan X N, Li K Y, Wu Y W. Assessment of ecosystem service flow and optimization of spatial pattern of supply and demand matching in Pearl River Delta, China. Ecological Indicators, 2023, 153: 110452.
[37] 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.
[38] Yu Y Y, Li J, Han L Q, Zhang S J. Research on ecological compensation based on the supply and demand of ecosystem services in the Qinling-Daba Mountains. Ecological Indicators, 2023, 154: 110687.
[39] Liang J, Pan J H. Identifying carbon sequestration′s priority supply areas from the standpoint of ecosystem service flow: a case study for Northwestern China′s Shiyang River Basin. Science of the Total Environment, 2024, 927: 172283.