

基于生态系统服务流的长江三角洲地区生态补偿研究

袁佳¹, 杨金礼², 戴嘉豪¹, 吴润泽², 冯焕彩², 冯少鹏², 穆永丽^{1*}

¹贵州师范学院地理与资源学院, 贵州 贵阳

²新疆大学生态与环境学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年7月7日; 录用日期: 2025年8月6日; 发布日期: 2025年8月15日

摘要

区域经济发展与生态环境不平衡背景下, 生态补偿(EC)区域的准确识别和补偿标准确定成为研究热点, 其目标是完善区域间EC的长效机制。本研究采用建模和生态经济学方法计算长江三角洲地区(YRD)生态系统服务价值(ESV), 根据生态系统服务供需并引入断点模型, 揭示生态系统服务流(ESF)特征, 综合自然、经济、社会要素转移修正系数体系, 构建基于ESF的EC模型, 计算YRD的EC量。结果表明: 1) 高价值区集中于北部地区(资源丰富但经济滞后), 低价值区分布于中部和沿海城市化密集区域, 生态系统服务供给不足。2) 资金流向由沿海经济发达地区至内陆欠发达地区; 上海市无资金流动。3) 2020年长三角生态补偿金额差异显著, 浙江、江苏、安徽三省为受偿区, 黄山市(1.5亿元)与丽水市为主要受益地; 安庆市支付最高补偿金(362万元)。所提出的基于环境效应的区域经济合作模式为长三角地区区域合作机制的构建提供了依据和参考。

关键词

生态系统服务价值, 生态补偿, 长江三角洲, 服务流

Research on Ecological Compensation in the Yangtze River Delta Region Based on Ecosystem Service Flow

Jia Yuan¹, Jinli Yang², Jiahao Dai¹, Runze Wu², Huancai Feng², Shaopeng Feng², Yongli Mu^{1*}

¹School of Geography and Resources, Guizhou Education University, Guiyang Guizhou

²College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

Received: Jul. 7th, 2025; accepted: Aug. 6th, 2025; published: Aug. 15th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 袁佳, 杨金礼, 戴嘉豪, 吴润泽, 冯焕彩, 冯少鹏, 穆永丽. 基于生态系统服务流的长江三角洲地区生态补偿研究[J]. 可持续发展, 2025, 15(8): 150-160. DOI: 10.12677/sd.2025.158230

Abstract

Against the background of regional economic development and ecological environment imbalance, the accurate identification of ecological compensation (EC) regions and the determination of compensation standards have become research hotspots. The goal is to improve the long-term mechanism of inter-regional EC. This study used modeling and ecological economics methods to calculate the value of ecosystem services (ESV) in the Yangtze River Delta (YRD). According to the supply and demand of ecosystem services, the breakpoint model is introduced to reveal the characteristics of ecosystem service flow (ESF). Based on the correction coefficient system of natural, economic and social factors, the EC model based on ESF is constructed to calculate the EC of YRD. The results show that: 1) High-value areas are concentrated in the northern region (rich in resources but lagging in economy), while low-value areas are distributed in the central and coastal urbanization-intensive areas, and the supply of ecosystem services is insufficient. 2) The flow of capital flows from coastal economically developed areas to inland underdeveloped areas; there is no capital flow in Shanghai. 3) The amount of ecological compensation in the Yangtze River Delta in 2020 is significantly different. Zhejiang, Jiangsu and Anhui provinces are the compensation areas, and Huangshan City (150 million yuan) and Lishui City are the main beneficiaries. Anqing City paid the highest compensation (3.62 million yuan). The proposed regional economic cooperation model based on environmental effects provides a basis and reference for the construction of regional economic cooperation mechanisms in the Yangtze River Delta region.

Keywords

The Value of Ecosystem Services, Ecological Compensation, Yangtze River Delta, Service Flow

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

长江三角洲城市群作为中国经济发展最活跃、开放程度最高的区域之一，在高速城市化进程中面临着生态保护与资源利用的深刻矛盾。区域内密集的河网水系与跨界流域特征，使得生态系统的服务功能呈现显著的时空流动性与外部性，如何通过科学的补偿机制实现生态效益的公平分配，成为区域协同治理的核心命题。

自 2012 年新安江流域启动全国首个跨省生态补偿试点以来[1]，“保护者受益、受益者付费”的机制创新已初见成效，新安江连续多年水质达标，并向千岛湖输送优质水源，形成了可推广的“新安江模式”。然而，现有补偿机制仍以水质考核与资金单向转移为主，未能充分反映生态系统服务流(如水源涵养、碳汇调节、生物多样性维持等)的空间传递特征与动态价值。例如，补偿标准多基于断面水质或水量核算，缺乏对上游地区生态保护投入与下游地区服务受益的精细化关联，导致补偿额度与生态贡献的匹配度不足。此外，补偿方式过度依赖政府财政，市场化的生态产品交易平台与多元补偿渠道尚未健全，制约了生态保护的可持续动力。近年来，长三角生态补偿实践逐步从单一资金补偿向“资金 + 产业 + 人才”的多元模式升级。2023 年浙皖两省签署的《新安江 - 千岛湖生态保护补偿样板区协议》[2]，通过建立生态产品价值核算体系与市场化交易平台，尝试将生态系统服务流纳入补偿框架，标志着区域生态治理进入“量化服务 - 动态补偿 - 协同发展”的新阶段。但如何科学量化跨尺度服务流、构建上下游权责对等

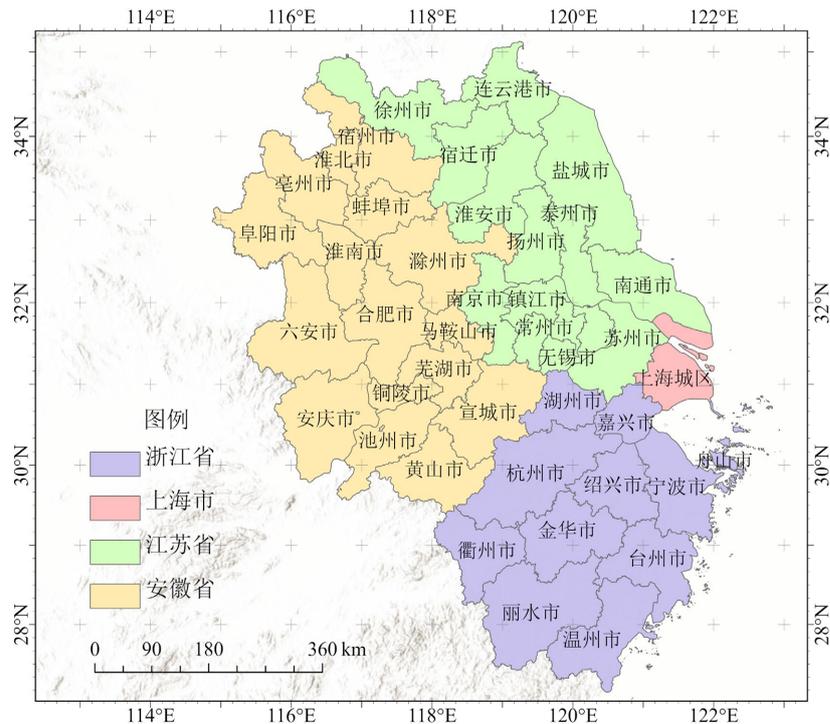
的补偿模型，仍是理论和实践的双重挑战。

本研究以生态系统服务流理论为基础，聚焦长江三角洲城市群的生态补偿机制优化，旨在解决以下关键问题：1) 定量分析长江三角洲城市群 2020 年生态系统服务的供需特征；2) 基于服务价值供需关系的服务流空间分布特征；3) 识别长江三角洲城市群生态补偿在空间上的分布特征。研究成果可为长三角生态一体化政策制定提供科学依据，并为全国流域生态补偿机制的完善提供范式参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概括

长三角全称长江三角洲地区(北纬 30°40′~31°53′, 东经 120°52′~122°12′), 坐拥长江下游的黄金水道。由上海、江苏、浙江、安徽三省一市组成(图 1)。区域面积 35.8 万平方公里, 人口 2.27 亿。如今一体化的长三角以不到 4% 的国土面积创造了中国 1/4 的经济总量。长三角经济区是我国规模最大、最完备、经济水平最高和城镇最密集的经济区。以上海为中心, 南京、杭州为副中心辐射周边 41 个城市。然而, 经济的迅猛发展同样带来了资源压力、环境污染和生态退化等问题。推动生态经济的发展显得尤为重要。生态经济强调在经济增长的同时, 注重生态环境的保护和改善, 实现经济、社会和环境的和谐发展。



该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 3189 号的标准地图制作, 底图无修改。

Figure 1. Regional map of the Yangtze River delta area
图 1. 长江三角洲地区区域图

2.2. 研究数据信息

本研究聚焦于长江三角洲城市群地区, 为了深入开展分析, 首先进行了多源空间数据的整合工作。具体而言, 研究收集并处理了包括人口密度、土地利用、气象、土壤以及其他类别在内的遥感空间数据(表 1)。

Table 1. Research data information**表 1.** 研究数据信息

数据	来源	分辨率
行政区划数据	http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/	-
人口密度数据	https://hub.worldpop.org/	1 km
土地利用数据	https://www.cas.cn/	30 m
NPP数据	https://lpdaac.usgs.gov/	500 m
DEM数据	http://www.gsccloud.cn/	30 m
降水数据	http://www.geodata.cn/	1 km
土壤数据	https://data.tpdac.cn/home	1 km
土壤质地数据	https://www.resdc.cn/DOI/	1 km
潜在蒸发蒸腾数据	https://www.gleam.eu/	1 km
统计年鉴数据	https://www.stats.gov.cn/	-

2.3. 研究方法

2.3.1. 生态系统服务价值计算

为改善长江三角洲地区生态环境问题，基于可得性数据，选取对长江三角洲地区生态系统服务相对重要的 3 种典型生态系统服务进行研究。利用建模方法和生态经济学方法计算各服务价值，利用 ArcGIS 软件中的辅助工具增加三个单一生态系统服务价值，得到整体 ESV。

1) 固碳释氧价值

在陆生植被生态系统中，植物通过光合作用吸收 CO₂ 并释放氧气，产生碳水化合物。陆地生态系统在大气调节方面的价值量可通过计算其固定 CO₂ 和释放氧气的价值量之和来估算，具体计算公式详见王红等人研究[3]。相关成本为：碳折算的造林成本 260.9 元/t，氧气折算的造林成本 352.93 元/t。

2) 水源涵养价值

长江三角洲流域水源涵养价值量的估算主要运用影子工程法，也就是利用修建相应库容的水库成本来测评水源涵养的经济价值[4] [5]。本研究单位库容造价成本为 6.1107 元/m³，周瑞娇等人研究[6]详细描述了该模型的表达式。

3) 土壤保持价值

本研究运用 InVEST 模型，结合长江三角洲城市群的土地利用数据与碳密度数据，对研究区的碳储量进行了测算，同时计算了土壤保持价值。周瑞娇等人研究[6]对模型表达式进行了详细描述。

2.3.2. 生态输出与输入评估

本文分别将固碳释氧服务量和水源涵养服务量作为这两种服务的供给量[7]。将研究区人均碳排放与人口密度的乘积、人均用水量与人口密度的乘积分别作为固碳需求、释氧需求和节水需求[8]。同时，利用水土保持量来估算水土保持供给。由于实际的水土流失和风蚀量是研究区居民希望解决的问题，故将研究区实际的水土流失量作为水土保持服务的需求量[9] [10]。

生态系统服务供需比(ESDR)可以表征区域生态系统服务的供需状况[11]。当 ESDR 小于 0 时，存在赤字；当 ESDR 等于 0 时，存在余额；当 ESDR 大于 0 时，存在盈余。通过计算 3 种服务的生态需求算术平均值，得到长江三角洲城市群的综合生态供需比(CESD)，以此来表示研究区的总体生态供需状况。

在本研究中,把 ESDR 盈余的县(区)视作 ESV 输出区,而把 ESDR 赤字的县(区)视作 ESV 输入区。具体计算公式如下:

$$\text{ESDR}_i = \frac{S_i - D_i}{S_i + D_i} \quad (1)$$

$$\text{CESD}_i = \frac{1}{\beta} \sum_{n=1}^{\beta} \text{ESDR}_n \quad (2)$$

其中 ESDR_i 为县(区) i 的 ESDR; S_i 为县(区) i 的生态系统服务供给; D_i 为县(区) i 的生态系统服务需求; CESD_i 为县(区) i 的 CESD; β 为生态系统服务类型数量。

2.3.3. 生态系统服务流分析

在空气和水等自然媒介的驱动下,生态系统服务不断流动,其价值也随着生态环境因子的变化而变化。固碳释氧服务、水源涵养服务通过大气循环和水循环系统在区域间流动,达到空气净化和气候调节的效果。土壤保持服务流通过地下水循环系统将地上植被吸收和产生的水、有机质层和特定的土壤粘粒转移到外部地区[12]。综上所述,三种生态系统服务均表现出显著全方位迁移和随距离衰减的特征[13]。本研究引入断点公式和场强模型[14][15],用于对区域间的电磁场进行定量分析,断点公式为:

$$D_p = \frac{D_{dp}}{1 + \sqrt{\frac{N_d}{N_p}}} \quad (3)$$

其中, D_p 为从输出区域 p 的核心至断裂点的距离,也就是流动半径; D_{dp} 表示输出区域 p 的核心到输入区域 d 的核心的距离; N_d 为输入区域 d 的 ESV, N_p 为输出区域 p 的 ESV。

场强模型[8]是:

$$I_{dp} = \frac{N_p}{D_{dp}^2} \quad (4)$$

式中, I_{dp} 表示 ESV 从输出区 p 向输入区 d 转移的强度,也就是流量强度(元/m²)。另外,从输出区域转移到输入区域的 ESV 通过以下方式获取:

$$V_{dp} = kS_{dp}I_{dp} \quad (5)$$

其中, V_{dp} 为输出区 p 向输入区 d 转移的 ESV; k 为生态系统服务自然流的影响因子,取值范围为 0~1。参考现有的研究标准[14][16](一般取 0.6),考虑长江三角洲(YRD)中水、风、生物等介质传递的阻力, k 取 0.6; S_{dp} 为过流面积。

2.3.4. 生态补偿评估

不同地区的自然环境、经济水平和社会发展存在差异,对 ESV 产生一定的影响。为了更准确地核算电子商务金额,本文在电子商务价值转移的基础上,提出了电子商务价值转移调整系数,构建了 YRD 电子商务模型。具体公式如下:

$$F_{dp} = V_{dp} \times Q_d \times T_d \times K_d \quad (6)$$

式中 F_{dp} 为输入区, p 为输出区 d 所需支付的 EC 金额; Q_d 为输入区 d 的自然差异系数; T_d 为输入区 d 的经济水平系数; K_d 为输入区 d 的社会发展系数。其中,自然差异系数、经济水平系数和社会发展系数的计算主要参考于现有的研究[17]。

3. 结果与分析

3.1. 长江三角洲地区生态系统服务价值特征

长江三角洲地区的生态系统服务功能具有明显空间异质性,固碳释氧高价值区集中于北部地区(资源丰富但经济滞后),低价值区分布于中部和沿海城市化密集区域(图 2),而水源涵养、水土保持呈现出西南高、东北低的空间格局。单位面积环境价值高值区($228\sim 314 \times 10^6 \text{ ¥/hm}^2$)集中于长三角北部山区及南部森林带(森林、湿地贡献显著),中高值区($99\sim 227 \times 10^6 \text{ ¥/hm}^2$)分布于丘陵过渡带(农田、草地为主),低值区($0\sim 98 \times 10^6 \text{ ¥/hm}^2$)则位于中部沿海城市化区域(如上海、杭州湾),因建设用地扩张导致生态密度锐减。县域总环境价值高值区($73\sim 120 \times 10^6 \text{ ¥}$)覆盖北部山区及平原农业区,依赖广域生态系统累积效应;中低值区($0\sim 72 \times 10^8 \text{ ¥}$)集中于碎片化的城市群与工业带(图 3)。空间关联显示:北部山区及南部森林带兼具单位面积高值与总价值贡献,需优先保护。

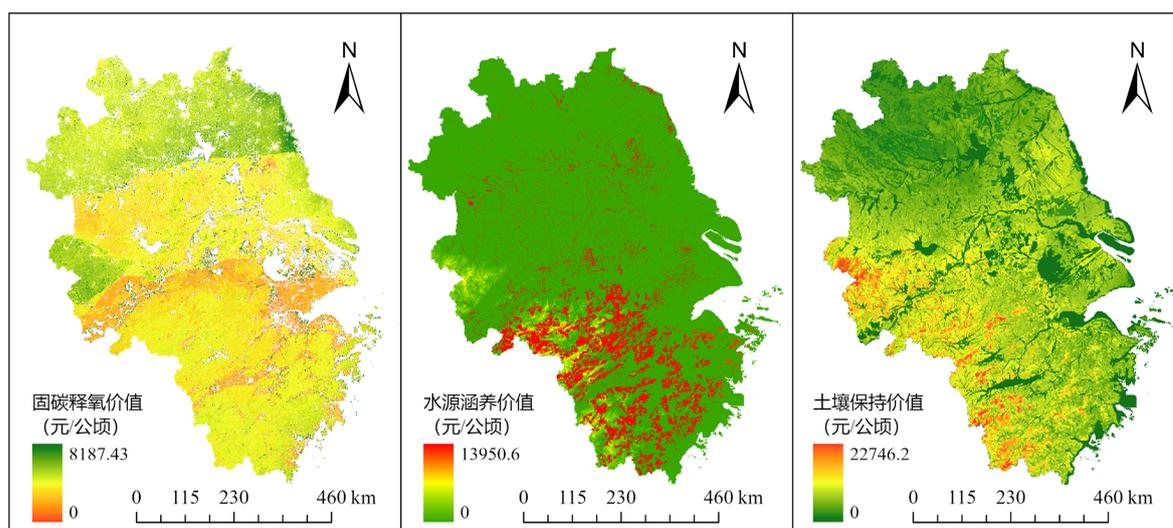


Figure 2. Value of ecosystem services

图 2. 生态系统服务价值量

固碳释氧、水源涵养、土壤保持的供需空间分异显著(图 4)。固碳释氧输入区覆盖长三角全域,反映区域整体碳汇需求压力,需依赖全域自然生态系统(如森林、湿地)协同提升固碳能力;水源涵养输入区集中于水资源需求高的城市及农业区(如中部沿海),输出区为南部山区森林,凸显南部生态屏障的核心作用,需强化跨流域保护以平衡区域性供需矛盾;土壤保持输出区均覆盖全域,其依赖广泛分布的农田与植被基底缓冲侵蚀风险,但输入区可能集中于城市化或生态脆弱区域(如坡耕地),需优化土地利用与保护机制(图 2)。

3.2. 长江三角洲地区生态系统服务流特征

2020 年研究区域内,各输出区的流量强度范围为 $0.004219\sim 0.051201 \text{ 元/m}^2$,平均强度 0.0163 元/m^2 ,主要集中于浙江、安徽两省。受流动半径限制,流量强度空间分布集中于研究区西南部(图 5),东北部县(区)未受影响。价值转移方面,低价值区城市数量骤减,转移金额均低于 1 万元,高价值区仅存屯溪区且金额较前期减少。生态系统服务价值(ESV)减少的主要原因是:生态服务功能(ESF)发生区集中在东南部,该区域因过度开发、森林砍伐、草场过牧等人为活动导致生态环境退化,森林覆盖率下降进一步削弱了 ESV 与 ESF。

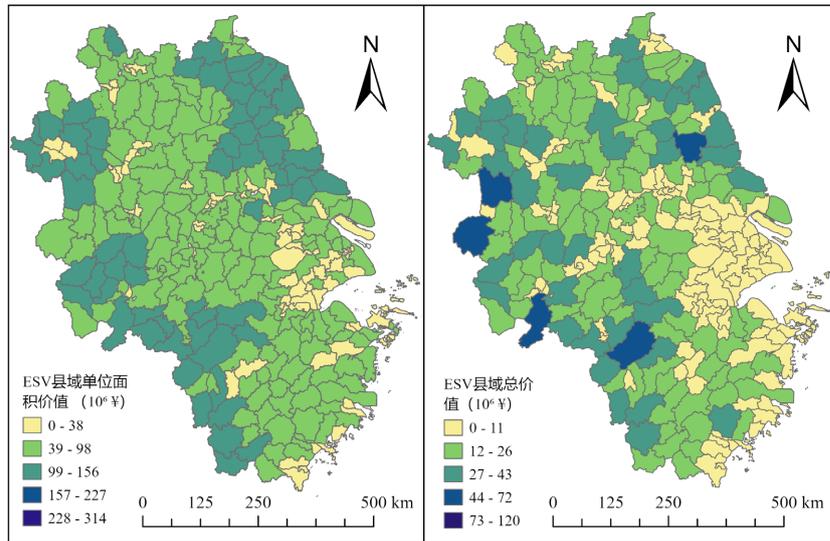


Figure 3. The environmental value per unit area and the total environmental value of the county in 2020
图 3. 2020 年单位面积环境价值、县域总环境价值

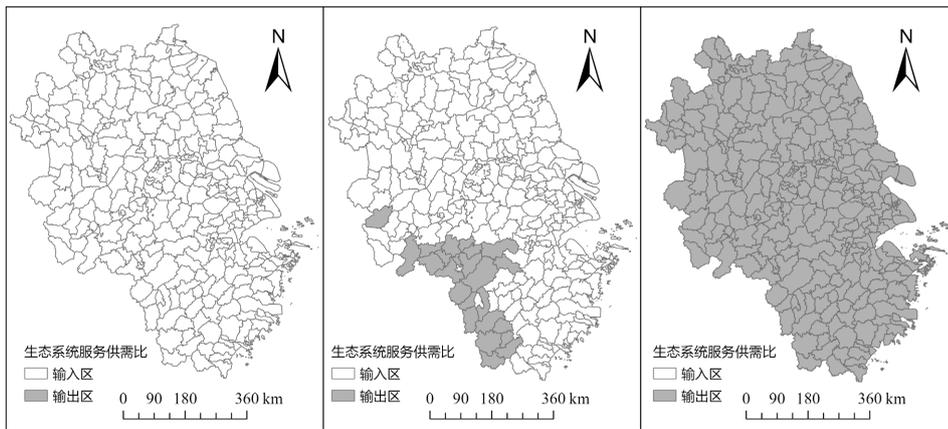


Figure 4. The distribution of the output and input regions of the three indicators
图 4. 三个指标输出和输入区域的分布

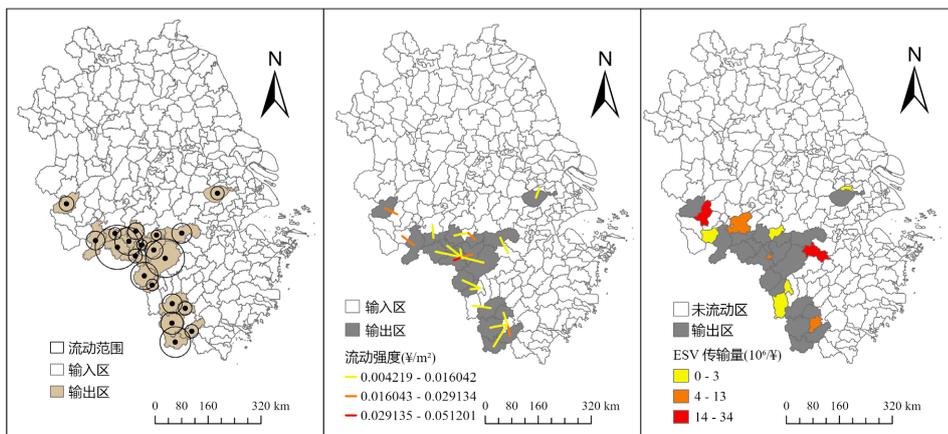


Figure 5. ESV flow range, flow intensity, county flow intensity
图 5. ESV 流动范围、流动强度、县域流动强度

3.3. 长江三角洲地区中生态补偿特征

利用所提出的 EC 模型计算了 YRD 生态系统服务的支付和接受金额(图 6)。其中浙江省、江苏省、安徽省均接收补偿款。主要受益地区位于安徽省[18]。采用的“自然间断点”分类法,县(区)的支付和接受金额被分为五个等级。安徽省安庆市需支付最多补偿金,达 362 万元,而安徽省黄山市则是最大的受益区,得到 1.5 亿元。商业区和住宅区也是重要的支付地区。受影响较小的地区如苏州市边缘区则支付和接受的金额相对较低。未受 ESV 影响的县(区)无需支付补偿金。

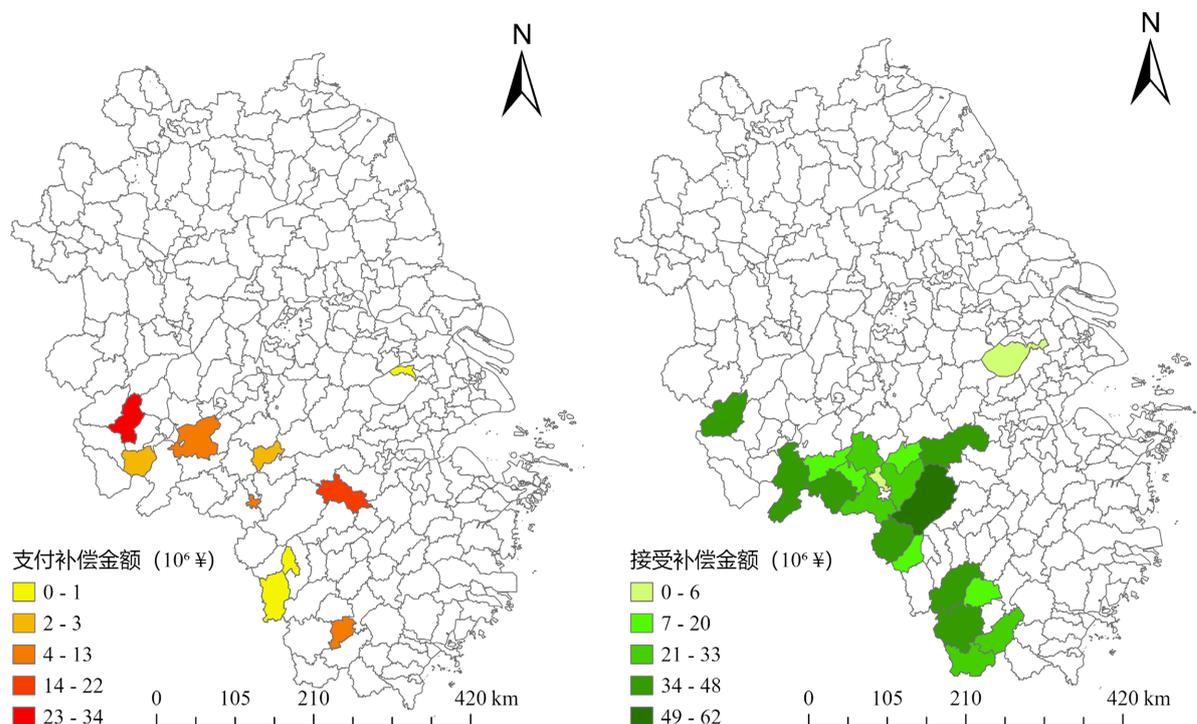


Figure 6. Amounts paid and received for ecosystem services in YRD for 2020

图 6. 2020 年 YRD 中的生态系统服务支付和接受金额

4. 讨论

4.1. 生态系统服务供需与 ESF 响应的不匹配

生态系统服务供需不匹配是一个普遍存在的问题。尽管在研究期间长江三角洲地区的 ESV 有所改善,但 CESD 表明,不到 10% 的县(区)的生态系统服务有盈余[18],主要集中在长三角的西南部[19]浙江省、安徽省部分地区[20] [21]。这些区域主要是山地和水域,资源丰富,地形复杂,交通阻力大,人口稀少,经济发展缓慢。其他大部分区域是平原,这些地区的城市化正在迅速发展。这些地区的建设用地扩张、自然土地的稀缺以及人口密度高,将不可避免地导致生态系统服务的供应不足。正是供需之间的不匹配促进了跨区域 ESF 的存在。分析 ESF 可以缓解仅在分析生态系统服务的供需平衡时考虑本地供需的劣势。明确生态系统服务从输出区域到输入区域的范围和流量,不仅有助于识别生态系统服务供应不足的区域,规范生态系统服务供应的流程和方式,而且可以帮助决策者进行管理。为了缓解生态系统服务供需之间的压力,需要从供给侧和需求侧同时采取措施。在供给侧,必须继续实施生态工程,根据当地条件设立自然保护区或国家公园,建设绿色生态屏障,如京津风沙源治理项目、三北防护林工程和太行山

绿化工程。城市中心区域也应开展绿化项目，增加植被覆盖率。在需求侧，土地利用规划应严格执行“城市发展边界、生态保护红线和永久基本农田”的划定，控制建设用地数量，保护自然区域。提高节能和环保意识，发展低能耗产业。政策制定还应为不同服务设置相应的限制，如设定碳排放目标，减少对气候的影响，建立水资源监测和预警系统，协调生产、生活和生态用水。人类始终是复杂 ESF 网络的最终节点，并享受 ESF 的好处。然而，人类活动将干扰 ESF 过程中的载体、方向、速度和流量，这将最终影响人类的福祉。因此，有必要采取相应措施减少 ESF 的障碍，增强其积极影响。以长江三角洲为例，管理者应依靠构建的生态安全模式保护生态源，建设生态走廊，并关注城市绿化基础设施网络建设和景观连通性。这不仅可以提高生态系统的质量，还可以增强生态系统服务的流动性，实现长三角的协调发展。

4.2. 生态系统服务流对生态补偿的影响

生态环境问题是城市群共同面临的问题，需要城市合作解决。目前，经济发展与生态保护之间的不平衡已成为制约长江三角洲协调发展的关键问题，生态补偿已成为重要解决方案之一。在此背景下，基于 ESF 提出的生态补偿模型为加强城市间合作和沟通、实现区域间生态共建共享提供了新途径。研究结果明确了各县(区)的生态补偿支付和接受金额，这对长江三角洲的协调发展具有重要意义。研究人员已经证明，支付生态系统服务或生态补偿可以直接改善生态环境，造福人类福祉。为了促进生态补偿的实施，有必要进一步完善生态补偿机制。首先，应建立一个生态补偿管理委员会，负责生态补偿的核算。其主要工作包括开设专门财务账户，协调生态补偿的收支，审计生态项目，组织专家审查生态项目以确保其科学性和可行性，监督资金的实施，确保资金用于生态恢复、生态建设和生态管理。其次，应建立一个长期的生态补偿机制。对于不同的服务，应建立评估体系以衡量生态保护是否符合标准。根据评估结果给予一定的奖励或惩罚，以激发相关利益相关者对生态保护的热情，从而实现生态保护和经济利益的有效平衡。第三，生态补偿方法应多样化。参考“精准扶贫”政策，除了提供财政支持外，还应引入产业转移、技术支持、人才引进、就业培训等项目，以提高生态保护区域居民的生存和发展能力。发展生态旅游和生态农业是有效方案，这不仅有利于提高居民的幸福感和幸福感，而且有利于生态补偿的良性循环。因此，本文构建的生态补偿模型和相应的生态补偿政策可以为长江三角洲乃至全球具有类似特征的其他城市群实现协调的经济和环境发展、提高城市可持续性提供参考。

4.3. 局限性和前景

为推动长江三角洲生态系统的协调发展并完善生态补偿机制，关键在于依据科学估算制定合理的生态补偿标准。本研究存在以下局限性：首先，尽管采用县级行政区作为研究单元是本研究的核心特点，有效解决了生态系统服务范围与生态补偿边界模糊这一关键政策落地难题，但这也意味着我们的分析侧重于生态补偿的结果核算即“谁支付、谁接受、金额多少”。其次，本研究构建的 ESF 模型核心优势在于量化并可视化服务流，但其核心假设之一是将距离作为影响服务流衰减的主要因子。地形、水文连通性、土地利用格局、基础设施等自然和人为条件作为服务流的载体或障碍，其具体作用机制和相对重要性在本模型中尚未充分探讨。本研究采用的 ESF 模型为政策制定提供了超越传统静态供需平衡分析的新视角：优势在于直观揭示了生态系统服务跨区域流动的路径、方向与强度，清晰识别了“输出区”与“输入区”，为制定基于“受益者付费、保护者受益”原则且空间目标明确的生态补偿政策提供了直接有力的科学依据，克服了仅关注本地供需平衡而忽略区域依赖关系的局限；然而，其潜在陷阱在于模型可靠性高度依赖核心假设如距离衰减函数、阻力因子选取和输入数据精度，这些因素的偏差可能导致服务流路径与规模的误判，进而影响生态补偿政策的公平性和有效性。未来研究应聚焦服务流机制如载体与路径、整合多维阻力因素如地形、水文、发展区分定向/全向服务的精细化核算框架，并评估模型假设敏感

性,使补偿更精准。

5. 结论

本研究基于生态系统服务流(ESF)对长江三角洲地区的生态补偿机制进行了深入探讨,并采用网络模型等方法对生态系统的空间动态及社会生态相互作用进行了研究。研究结论如下:

1) 空间分布特征:高价值区主要分布在长江三角洲城市群的北部地区,这些区域自然资源丰富但经济发展相对缓慢。低价值区则集中在中部和沿海地区,这些区域由于城市化进程快速导致生态系统服务供应不足。

2) 生态系统服务功能的流动:资金主要流向从沿海经济发达地区流向内陆经济相对落后地区,从生态系统服务综合供需比来看,上海市是供需平衡,既不流入也不流出。

3) 生态补偿金额:2020年长江三角洲地区的生态补偿支付和接受金额的区域差异显著。浙江省、江苏省、安徽省均接收补偿款,其中安徽省的黄山市和丽水市是主要受益地区。安庆市需支付最多补偿金,高达362万元,而黄山市则是最大的受偿区,得到1.5亿元。

基金项目

贵州师范学院国家级大学生创新创业训练计划项目(2024142230473)。

参考文献

- [1] 杨霞,何刚,吴传良,等.生态补偿视角下流域跨界水污染协同治理机制设计及演化博弈分析[J].安全与环境学报,2024,24(5):2033-2042.
- [2] 于文轩,孙啸宇.生态保护补偿的三大实现机制[J].中国发展观察,2024(5):41-46.
- [3] Wang, H., Zhou, S., Li, X., Liu, H., Chi, D. and Xu, K. (2016) The Influence of Climate Change and Human Activities on Ecosystem Service Value. *Ecological Engineering*, **87**, 224-239. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.11.027>
- [4] Chen, J., Wang, D., Li, G., et al. (2020) Spatial and Temporal Heterogeneity Analysis of Water Conservation in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on the Geodetector and Spatial Elastic Coefficient Trajectory Models. *Geo-health*, **4**, e2020GH000248.
- [5] 汤峰,王力,张蓬涛,等.基于生态保护红线和生态网络的县域生态安全格局构建[J].农业工程学报,2020,36(9):263-272.
- [6] 周瑞娇,张虹,钱敏.近30年三峡库区生态系统服务流时空演变与影响因素研究[J/OL].生态环境学报,2025,34(6):876-887.
- [7] 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.
- [8] Chen, X., Li, F., Li, X., Hu, Y. and Hu, P. (2020) Evaluating and Mapping Water Supply and Demand for Sustainable Urban Ecosystem Management in Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production*, **251**, Article ID: 119754. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119754>
- [9] Gong, J., Shi, J., Zhu, C., Li, X., Zhang, Z., Zhang, W., et al. (2022) Accounting for Land Use in an Analysis of the Spatial and Temporal Characteristics of Ecosystem Services Supply and Demand in a Desert Steppe of Inner Mongolia, China. *Ecological Indicators*, **144**, Article ID: 109567. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109567>
- [10] Zheng, T., Zhou, Z., Zou, Y., Pulatov, B. and Biswas, A. (2021) Analysis of Spatial and Temporal Characteristics and Spatial Flow Process of Soil Conservation Service in Jinghe Basin of China. *Sustainability*, **13**, Article No. 1794. <https://doi.org/10.3390/su13041794>
- [11] 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.
- [12] Wu, J., Huang, Y. and Jiang, W. (2022) Spatial Matching and Value Transfer Assessment of Ecosystem Services Supply and Demand in Urban Agglomerations: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area in China. *Journal of Cleaner Production*, **375**, Article ID: 134081. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134081>
- [13] de Groot, R.S., Wilson, M.A. and Boumans, R.M.J. (2002) A Typology for the Classification, Description and Valuation of Ecosystem Functions, Goods and Services. *Ecological Economics*, **41**, 393-408.

- [https://doi.org/10.1016/s0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/s0921-8009(02)00089-7)
- [14] 孙贤斌, 孙良萍, 王升堂, 等. 基于 GIS 的跨流域生态补偿模型构建及应用——以安徽省大别山区为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(3): 458-466.
- [15] Zhai, T., Wang, J., Fang, Y., Huang, L., Liu, J. and Zhao, C. (2021) Integrating Ecosystem Services Supply, Demand and Flow in Ecological Compensation: A Case Study of Carbon Sequestration Services. *Sustainability*, **13**, Article No. 1668. <https://doi.org/10.3390/su13041668>
- [16] Wang, C., Li, W., Sun, M., Wang, Y. and Wang, S. (2021) Exploring the Formulation of Ecological Management Policies by Quantifying Interregional Primary Ecosystem Service Flows in Yangtze River Delta Region, China. *Journal of Environmental Management*, **284**, Article ID: 112042. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112042>
- [17] Du, H., Zhao, L., Zhang, P., Li, J. and Yu, S. (2023) Ecological Compensation in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Ecosystem Services Flow. *Journal of Environmental Management*, **331**, Article ID: 117230. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117230>
- [18] Zheng, T., Zhou, Z., Zou, Y., Pulatov, B. and Biswas, A. (2021) Analysis of Spatial and Temporal Characteristics and Spatial Flow Process of Soil Conservation Service in Jinghe Basin of China. *Sustainability*, **13**, Article No. 1794. <https://doi.org/10.3390/su13041794>
- [19] 闵婕, 刘晓煌, 肖粤新, 等. 长江三角洲生态系统服务时空格局与权衡关系[J]. 地质通报, 2025, 44(1): 136-149.
- [20] 李春莹, 李桂娥, 李杰, 等. 长江三角洲城市群生态系统服务协同权衡的时空异质性[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2): 992-1006.
- [21] 樊晓凤. 长江流域生态系统服务供需流定量化评估与优化[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.