

焦芳菲, 郑航, 刘悦忆. 汉江流域水源涵养服务价值及改进的空间转移评价[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 144-159. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.012

JIAO Fangfei, ZHENG Hang, LIU Yueyi. Spatial transfer evaluation of water conservation service value and improvement in Hanjiang River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 144-159. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.012

汉江流域水源涵养服务价值及改进的空间转移评价

焦芳菲, 郑航, 刘悦忆

(东莞理工学院 生态环境与建筑工程学院, 广东 东莞 523808)

摘要:【目的】为评估汉江流域2020年的水源涵养能力,计算水源涵养服务的生态价值,并深入分析水源涵养服务价值在流域内各个省份之间的空间转移情况【方法】使用分布式水文模型SWAT和生态系统服务评估模型InVEST对汉江流域2020年的水源涵养能力进行定量评估,并利用影子工程法计算流域内水源涵养服务的生态价值,以及采用改进的断裂点-场强模型,考虑水文特征,分析水源涵养服务价值的空间转移。改进模型包括加入河流方向系数以确定水力联系,优化转移路径(调整转移起点和设定最大半径),并比较四种不同的转移方法。【结果】结果显示:汉江流域2020年的水源涵养总量为305.84亿 m^3 ,相应的服务价值达到316.85亿元。在各个省份中,湖北省的水源涵养量及其服务价值最为显著,而河南省则相对较低。在空间转移方面,陕西省的水源涵养服务价值的转出量最大,随后是河南和湖北;而在接收方面,河南省接收最多,其次是湖北和陕西。其中,出水口直线转移法的转移强度最强,转移量最多;出水口河道转移法的转移强度和转移量次之;入水口直线转移法和入水口河道转移法的转移强度相近,转移量也相近;入水口河道转移法的转移强度最弱,入水口直线转移法的转移量最少。【结论】通过定量评估和空间转移分析,揭示了汉江流域水源涵养能力的空间分布和服务价值,并提供了不同转移方法的比较,为流域管理和生态保护提供了科学依据。

关键词: 水源涵养; 价值转移; InVest模型; SWAT模型; 水资源; 洪水; 汉江流域; 生态价值

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.012

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: F062.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0144-16



Spatial transfer evaluation of water conservation service value and improvement in Hanjiang River Basin

JIAO Fangfei, ZHENG Hang, LIU Yueyi

(School of Environment and Civil Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] To assess the water conservation capacity of the Han River Basin in 2020, calculate the ecological value of

收稿日期: 2024-07-08; 修回日期: 2024-10-07; 录用日期: 2024-10-08; 网络出版日期: 2024-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目“长江水科学研究联合基金”(U2040206); 国家自然科学基金青年基金项目(51909035); 国家自然科学基金项目(52179009)

作者简介: 焦芳菲(1997—),女,硕士研究生,研究方向为流域生态服务评估和生态补偿研究。E-mail: jiaofangfei999@163.com

通信作者: 郑航(1982—),男,副教授,博士,研究方向为流域水资源和水环境治理研究。E-mail: zhenghang00@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

water conservation services, and conduct an in-depth analysis of the spatial transfer of water conservation service values among various provinces within the basin, [Methods] quantitative evaluation of the water conservation capacity of the Han River Basin in 2020 was carried out using the distributed hydrological model SWAT and the ecosystem service assessment model InVEST. The ecological value of water conservation services within the basin was calculated using the shadow pricing method. An improved break-point-field intensity model considering hydrological characteristics was adopted to analyze the spatial transfer of water conservation service values. The improved model includes the addition of a river direction coefficient to determine the hydraulic connection, optimization of transfer pathways (adjusting the starting point of transfer and setting the maximum radius), and comparison of four different transfer method. [Results] The results show that the total water conservation volume in the Han River Basin in 2020 was 30.584 billion cubic meters, with the corresponding service value reaching 31.685 billion yuan. Among the provinces, Hubei Province had the most significant water conservation volume and service value, while Henan Province was relatively lower. In terms of spatial transfer, Shaanxi Province had the largest outflow of water conservation service values, followed by Henan and Hubei; for reception, Henan Province received the most, followed by Hubei and Shaanxi. Among these, the straight-line transfer method at the outflow outlet had the strongest transfer intensity and the largest amount of transfer; the river channel transfer method at the outflow outlet had the next strongest transfer intensity and amount; the straight-line and river channel transfer method at the inflow inlet had similar transfer intensities and amounts; the river channel transfer method at the inflow inlet had the weakest transfer intensity, and the straight-line transfer method at the inflow inlet had the least amount of transfer. [Conclusion] Through quantitative evaluation and spatial transfer analysis, the spatial distribution and service value of water conservation capacity in the Han River Basin were revealed, and a comparison of different transfer method was provided, which provided a scientific basis for basin management and ecological protection.

Keywords: water conservation; value transfer; InVest model; SWAT model; water resources; flood; Han River Basin; ecological value

0 引言

生态系统是由相互依赖的生物和非生物组成部分构成的多样化网络,是维持地球生命的重要支持系统,其服务给我们带来巨大福利。生态价值评估不仅可以从规模、背景、关联性等方面更全面地理解生态系统的复杂性,同时也为这些复杂动态系统提供了一种量化方法,对制定有效的环境政策至关重要。1997年,COSTANZA等首次提出了一种评估生态系统服务和自然资本经济价值的方法^[1]。该研究对各种生态系统服务进行了货币价值的计算,包括空气和水的净化、洪水和干旱的缓解、授粉、害虫控制以及肥沃土壤的生成等。通过这种量化评估方法,COSTANZA等为理解和评估生态系统在全球经济中的角色提供了一个新的视角,同时也为环境保护和政策制定提供了重要的经济论据。在此之后,涌现了大量的量化评估方法以衡量这些服务的直接和间接经济价值,提高了公众和决策者对于这些不可或缺的服务的认识。然而,尽管取得了显著进展,生态系统服务的全面评估仍面临诸多挑战,如价值量化的复杂性和跨学科整合的需求等。

在生态系统服务的众多方面中,水源涵养尤为重要,它是生态系统服务价值评估的一个关键组成部

分^[2]。水源涵养是指生态系统对降水进行截留、吸收和储存的能力,进而维持和提供水资源的过程^[3]。这个过程主要发生在森林、湿地等自然环境中,通过植物的林冠层、地表的枯落物层和土壤层等,能够有效地收集、过滤和储存雨水或雪水^[4-5]。这一服务对于保障饮用水供应、灌溉农业以及维持生物多样性具有不可替代的作用。特别是在面对全球气候变化和日益增长的水资源需求的背景下,理解和保护这一服务的价值变得尤为迫切。水源涵养不仅是生态系统服务价值评估的一个重要案例,也是全球环境管理和可持续发展策略中不可忽视的关键要素^[6]。现有评估水源涵养量的方法有很多,主要有土壤蓄水量法^[7]、林冠层截留剩余法^[8]、水量平衡法^[9]和降水储存量法^[10]等,各有其优势和局限性,且方法选择应基于区域特性和实际情况,这些方法为理解和比较不同地区水源涵养服务功能提供了重要工具。

由于水源涵养能力在不同地理区域之间存在显著差异,因此,探讨水源涵养服务价值在空间上的转移成为一个重要议题。许多学者分析了不同区域水土保持服务变化的特征及其相互关系。JIA等^[11]采用SWAT模型以月尺度数据研究了变化环境下伊罗河流域水源涵养时空分布,并确定了近几年来罗南县、栾川县和罗宁县是该流域水源涵养能力下降的重点区

域。CHEN 等^[12]运用 PLUS 模型和 InVest 模型研究了西北干旱区博斯腾湖流域水源涵养时空变化并设置 3 种情景进行预测, 确定了和景县是重要的水源涵养功能区, 其中小西乐都寺盆地东部尤为重要。JING 等^[13]运用 InVEST 模型和 ArcGIS 软件, 定量分析了延安市水土保持和水源涵养生态系统服务功能的时空分布和变化特征, 并揭示了二者之间的协同关系。XIE 等^[14]结合 InVEST 模型和随机森林模型, 对 1980—2018 年三江源地区用水量的时空特征及影响因素进行了综合分析, 研究发现在此期间三江源区的水源涵养能力持续增长, 但不同流域之间存在明显的区域差异, 特别是澜沧江流域, 尽管节水能力最高, 但仍有下降趋势。这种服务并非仅限于其直接发生的地理位置, 而是通过水循环和生态系统间的相互作用, 在更广泛的地理范围内展现其影响。例如, 在流域尺度, 上游提供的水源涵养和水土保持等功能, 可以通过水流传递至下游地区, 带来明显的效益^[15]。生态系统服务的空间转移测算在环境管理和政策制定中扮演着至关重要的角色。这种测算不仅有助于建立有效的生态补偿机制, 还能优化资源管理策略, 从而推动区域间的可持续发展^[16]。在这一领域的研究中, 南平等^[17]提供了关于价值转移量的计算思路, 旨在揭示城市与区域之间的互动关系。他们采用了断裂点理论来解释这种关系, 认为尽管中心城市对周边区域的影响显著, 但由于城市规模的差异(例如人口、经济等的差异), 这种影响会随着距离的增加而逐渐减弱, 最终被邻近其他城市所取代。简而言之, 城市对周边地区的辐射力存在着距离衰减规律^[18]。这一发现与生态服务在空间转移方面呈现出相似的规律。在此基础上, 范小杉等^[19]提出了一种创新的生态资产评估技术模型—断裂点场强模型。通过在北京市门头沟区等地的案例中应用该模型, 他们演示了如何评估生态资产在不同区域之间的转移, 还成功将该模型应用于官厅水库^[20]、渭干河流域^[21]等多个地区。然而, 水源涵养服务的空间转移具有与其他生态服务截然不同的特征, 它受到流域内水文循环路径和河流水量输送的影响, 呈现出一种单向由上游到下游的转移模式。在这种模式下, 上游区域的水源涵养服务主要向下游区域转移, 而下游区域的水源涵养服务却难以向上游转移。现有的研究往往忽略了这一水文学特性, 错误地将上下游之间的水源涵养服务转移视为等量对待, 从而导致评估结果与实际的流域水循环物理过程不符。

为了解决上述提到的问题, 本研究对断裂点—场

强模型从服务的转移方向、转移的路径, 以及转移的起点和终点三个维度进行了改进。在模型的转移方向方面, 经过改进的版本增添了河流方向系数, 以便更精确地评估流域上游和下游之间的水力联系作用。这表明, 在评估水源涵养服务的空间转移时, 我们综合考虑了河流的水文特性, 从而提高了评估的可靠性。除此之外, 我们还采用了 InVEST 模型中的产水模块来估算流域内各个区域的水源涵养量, 并利用影子工程方法来评估水源涵养服务的经济价值, 从而为水源涵养服务的空间转移提供了全面的基础数据。在应用于汉江流域的过程中, 我们不只是对该流域的水源涵养服务价值进行了评估, 同时也估算了流域内各个省份间的水源涵养服务的转移量。这为汉江流域上下游生态补偿政策的制定提供了宝贵的数据依据和理论指导。通过这些综合性的研究工作, 本研究为推动生态补偿机制的完善、资源管理策略的优化, 以及区域间可持续发展的实现, 以及未来的环境管理和政策制定提供科学依据和方法论指导。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域概况

汉江是长江最长的支流, 全长约 1 577 km, 源于陕西省蟠冢山, 流经陕西、河南与湖北三省至武汉汇入长江(见图 1)。河流全程落差 1 964 m, 带来显著气候与生态多样性。流域位于亚热带季风气候区, 年均降水量为 700~1 400 mm, 多年平均气温为 12 ℃至 16 ℃, 适宜农业与生态保护^[22]。汉江水资源丰富, 支持地区水产养殖与灌溉, 但随着社会经济的发展, 如何在水资源的合理利用和生态保护之间实现平衡已成为该流域面临的重大挑战。优化汉江流域的环境保护和水资源管理策略对维持该地区的生态平衡和推动可持续发展具有至关重要的意义。

1.2 数据来源

本研究所用的数据及其来源如表 1 所列。

2 原理和方法

2.1 InVEST 模型原理与校验

InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs)是一种评估生态系统服务对人类的贡献的模型, 由斯坦福大学和世界自然基金会等机构开发。它利用 GIS 数据, 通过空间分析估算不同环境下生态服务的产出, 支持用户设定多种土地使用场景以预测对生态服务的影响^[23]。此外, 模型考虑服务间的相互作用, 帮助决策者了解不同管理措施对生态

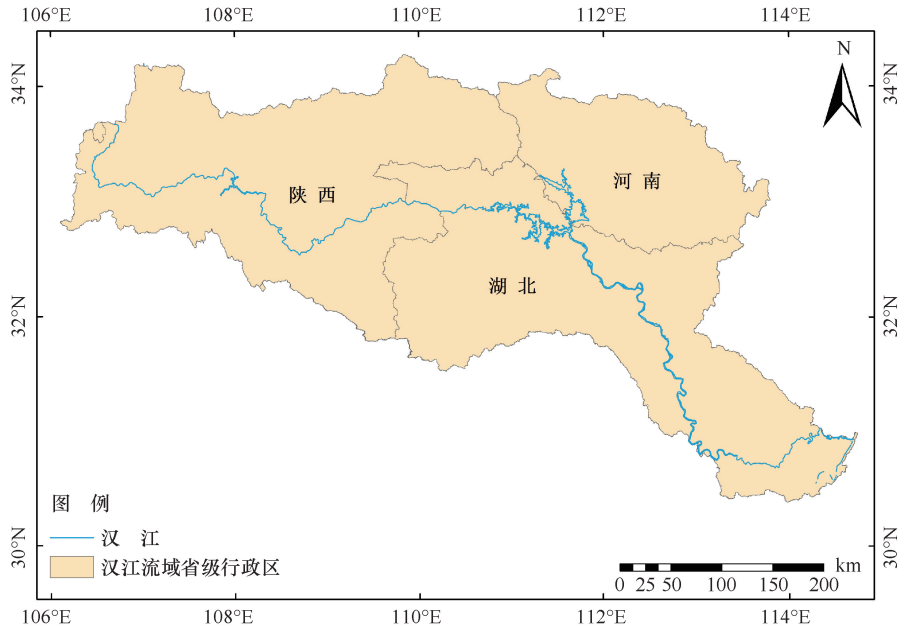


图 1 研究区概况

Fig. 1 Summary map of the study area

表 1 数据来源

Table 1 Data source

数据	时空特征	来源
降水量、土地利用类型	2020年 1 km×1 km	中国科学院资源环境与数据中心
潜在蒸散发	1970—2000年 1 km×1 km	CGIAR-CSI-Consortium for Spatial Information (cgisrcsi. community)
土壤最大根茎深度、植物可用含水率	2009年 1 km×1 km	基于世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集 (v1.1) (2009). 国家青藏高原科学数据中心
固定资产投资价格指数	2005—2020年	EPS 数据库 https://www. epsnet. com. cn/
降雨、气温、相对湿度、日照、风速	1996—2021年日数据	中国气象数据网
DEM、土地利用、土壤	2015年 1 km×1 km	中国科学院资源环境科学与数据中心
流量	1996—2012年; 1996—2021年; 日数据	长江水利委员会
丹江口水库出流	1970—2021年, 日数据	长江水利委员会

系统服务的具体影响, 广泛应用于环境影响评估、城市规划等领域, 促进自然资源的可持续管理。本研究是基于 InVEST 模型的产水模块进行的水源涵养研究, 模型产水模块对区域内各个栅格进行产水评估^[24], 其基本原理如图 2 所示。

InVEST 模型产水模块计算的基本公式为

$$Y(x) = \left[1 - \frac{AET(x)}{P(x)} \right] \times P(x) \quad (1)$$

式中, $AET(x)$ 为栅格 x 的年实际蒸散量; $P(x)$ 为栅格 x 上的年降水量。

为了检验 InVEST 模型的准确性, 本研究根据《长江流域及西南诸河水资源公报》发布的汉江流域地表水资源量数据作为基准。通过调整季节性调节因

子, 即 ZHANG 系数, 进行模型比对。多次调整后发 现, 当 ZHANG 系数设置为 9 时, 模型的输出值与实际值的吻合度超过了 90%。因此, 本研究最终选定 ZHANG 系数为 9, 用以优化汉江流域的水资源估算。

2.2 SWAT 模型原理与率定验证

SWAT 模型是根据水文学原理设计的工具, 主要用于模拟和管理流域的水文过程及水资源。该模型通过模拟地区内的各种水文现象, 预测流域内的水文变化。在 SWAT 模型的框架下, 研究区域被划分为若干子流域, 并根据土地使用情况、坡度、土壤类型等因素, 进一步将每个子流域划分为多个水文响应单元 (HRU)。这些 HRU 作为模型模拟的基础单元, 用来模拟地表径流、土壤水分和地下水等过程。模型的输

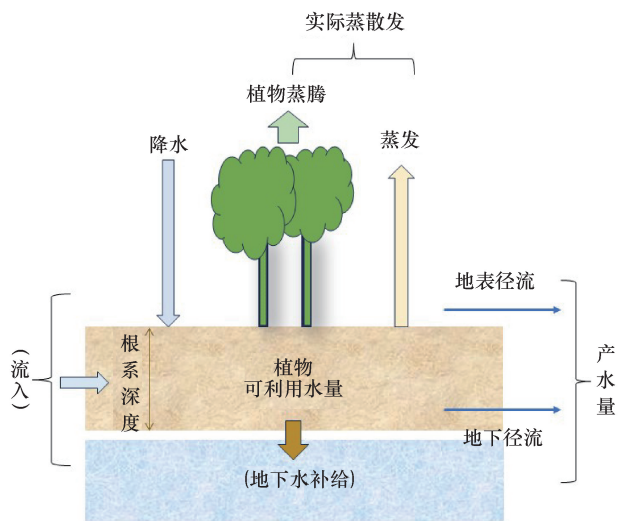


图2 InVEST模型产水模块原理

Fig. 2 InVEST model water production module principle

出结果通常以 HRU 和子流域级别呈现^[25], 并可输出相应的表格方便后续计算。产水量, 即在特定时间内, 从各个子流域流入河流的净水量。产水量的计算公式为

$$Y_i = SURQ_i + LATQ_i + GWQ_i - TLOSS_i \quad (2)$$

式中, Y_i 为第 i 个子流域的产水量 (mm); $SURQ_i$ 为子流域的地表径流量 (mm); $LATQ_i$ 为侧向流量 (mm); GWQ_i 为流入河流的地下水量; $TLOSS_i$ 为水流穿越河床时的传输损失量。

文中采用汉中、安康、白河、襄阳、沙洋五个水文站的实测径流进行率定和验证, 其中率定期为 1998—2008 年, 验证期为 2009—2012 年。率定和验证结果如表 2 所列。各水文站实测和模拟径流变化过程如图 3—图 7 所示。可以看出, 率定的效果较好, 纳什系数均达到 0.7 以上。在验证期, 位于流域上游的汉中、白河以及安康站的验证结果较好, 纳什系数达到 0.8 以上。由于流域中下游水库及取水过程的影响, 中下游的襄阳、沙洋站的验证效果不高。

2.3 水源涵养量的计算

本研究采用水量平衡法并结合 InVEST 模型和 SWAT 模型产水模块来计算水源涵养量。从水源涵养量的定义可知, 水源涵养量是从降水量中减去蒸散量

和地表径流量计算得到。但是, 水源涵养量并不能直接通过 InVEST 模型或 SWAT 模型模拟得到, 因此, 本研究结合 YANG 等^[26-29]的计算方法来计算水源涵养量, 计算公式为

$$R_i = P - E - Q \quad (3)$$

式中, R_i 为流域水源涵养量 (mm); P 为流域降水量 (mm); E 为流域蒸散量 (mm); Q 为流域地表径流量 (mm)。

根据式 (2) 和式 (3), 基于 SWAT 模型的第 i 个子流域的水源涵养量 R_i 可以表示为

$$R_i = P_i - E_i - SURQ_i \quad (4)$$

结合式 (1) 和式 (4), 基于 SWAT 模型的第 i 个子流域的水源涵养量 W_i 可以表示为

$$R_i = Y_i - SURQ_i \quad (5)$$

式中, R_i 表示第 i 个子流域的水源涵养量 (mm); Y_i 表示第 i 个子流域的产水量 (mm), 即降水量减去蒸散量; $SURQ_i$ 表示第 i 个子流域的地表径流量 (mm)。

得到计算公式后, 为了匹配这两种模型, 采用 SWAT 模型划分的子流域作为 InVEST 模型的基本空间单元, 使 SWAT 模型的子流域可以与 InVEST 模型的栅格单元相对应, 从而保证数据在空间上的连续性和一致性; 并对两种模型设置相同的时间尺度, 都计算 2020 年的数据, 保证数据在时间上也一致。通过上述方法, 可以确保 InVEST 模型和 SWAT 模型在时间和空间尺度上的有效匹配, 从而提高研究的准确性和可靠性。

2.4 水源涵养服务价值的计算

在这项研究中, 使用影子工程方法来评估水源涵养服务的经济价值, 具体的评估方式是依据相应水库的建设成本来进行计算^[30]。由于水库和自然水源涵养服务在功能上有一定的相似性, 水库通过蓄水和调节水流, 可以实现对水资源的储存和管理, 这与自然生态系统中的水源涵养功能相似; 且如果水源涵养服务 (调节水分、增加地下水补给、改善水质等) 没有自然提供, 人类可能需要通过建设水库等人工设施来实现类似的功能。因此水库的建设成本可以被视为提供这些服务的一种成本, 以此间接估算出自然水

表 2 汉江水文模拟的率定与验证结果

Table 2 Calibration and verification results of Hanjiang River hydrological simulation

项目	汉中市		白河站		安康站		襄阳站		沙洋站	
	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期	率定期	验证期
R^2	0.80	0.92	0.87	0.96	0.85	0.96	0.91	0.82	0.93	0.80
纳什系数	0.77	0.86	0.77	0.82	0.79	0.87	0.86	0.59	0.81	0.44

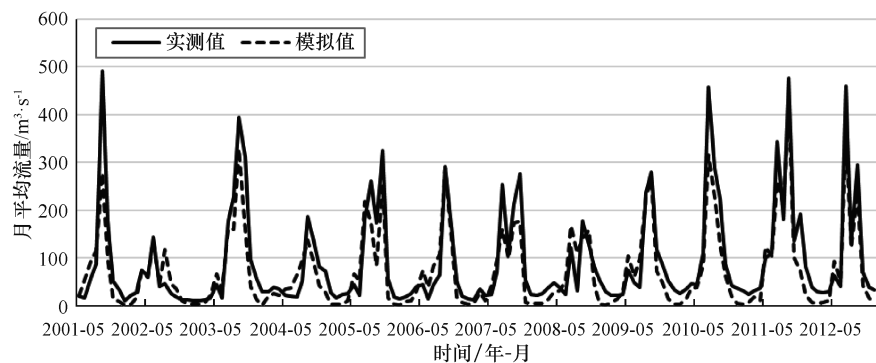


图3 汉中站水文率定和验证结果

Fig. 3 Hydrologic calibration and verification results of Hanzhong Station

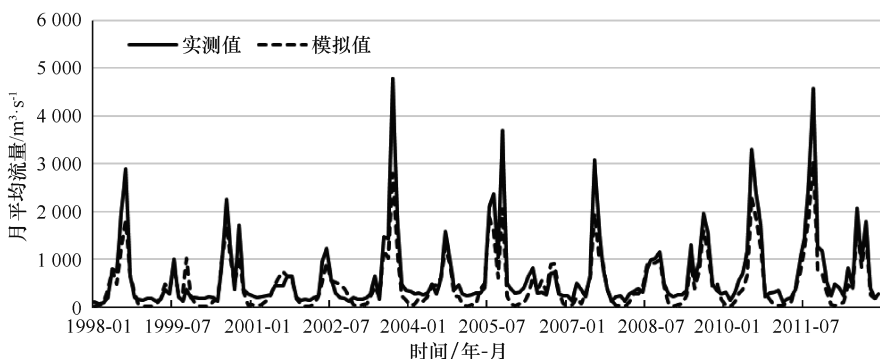


图4 白河站水文率定和验证结果

Fig. 4 Hydrologic calibration and verification results of Baihe Station

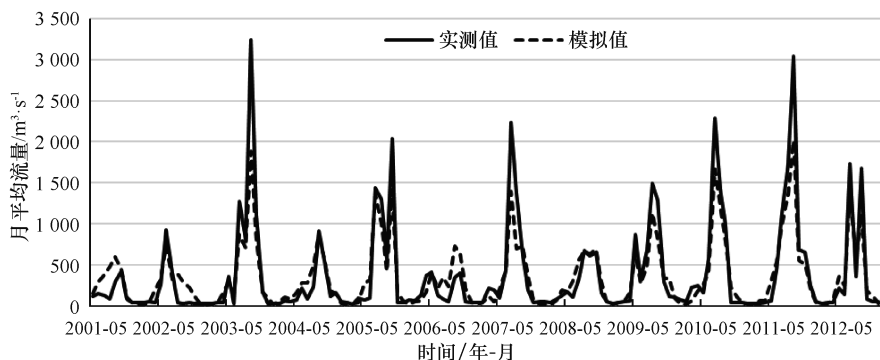


图5 安康站水文率定和验证结果

Fig. 5 Hydrological calibration and verification results of Ankang Station

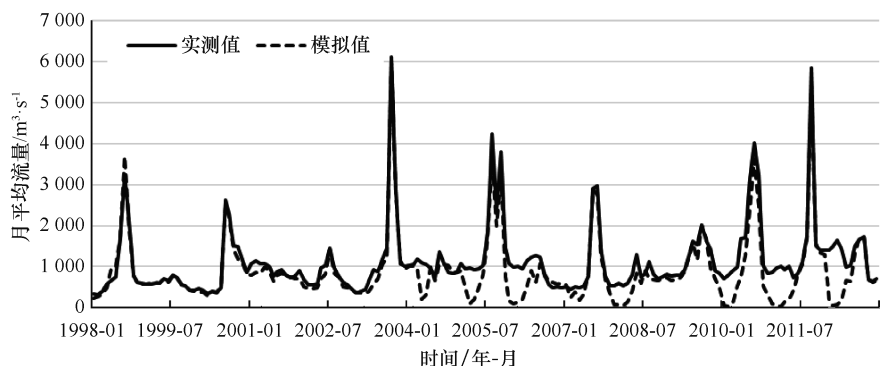


图6 襄阳站水文率定和验证结果

Fig. 6 Hydrologic calibration and verification results of Xiangyang Station

源涵养服务的经济价值。根据江波等^[31]及其团队的研究数据,水库的每立方米建设费用达到了6.11元(2005年)。接下来,基于固定资产投资价格指数的增长速度和申梦姝^[32]及其团队的研究成果,将单位库容造价调整为8.82元/m³(2020年)。考虑到水库的使用寿命和折现率,以及赖敏等^[33]的水库资产计算方法,最终确定了水库库容的造价为1.036元/m³。因此,本文提出了一种新的水库水资源涵养服务价值计算模型。关于水源涵养服务价值的具体计算方法,相关公式为

$$Q = \sum_{i=1}^n (c \times R_i) \quad (6)$$

式中, Q 为水源涵养的总价值(元); c 为单位面积水库的库容造价(元/m³); R_i 为水源涵养量(m³); n 为栅格的数量。

2.5 水源涵养服务价值的转移量计算

本研究中水源涵养服务价值的转移采用了改进后的断裂点-场强模型来估算,该模型在申梦姝等^[30]的研究基础上进一步做了改进。模型的改进主要包括以下几点。

(1) 转移路径的改进。传统的模型,即未改进的断裂点-场强模型,通常以区域的几何中心作为生态服务转移的起点和终点,并根据起点与终点之间的直线距离来确定服务转移的最大可能范围,如图8所示。这种设置可能会导致生态服务从起始点开始就逐渐衰减,并可能因衰减过度而难以到达目的。这种模型设定并不完全符合水资源在区域间实际转移的特性。鉴于水流的连续性和流域间的上下游关系,水源涵养服务在上游到下游的转移过程中,其传输效率应高于其他类型的生态服务。基于这一假设,本研究对比了以下四种不同的转移路径,如表3所列。

(2) 转移方向的改进。主要参

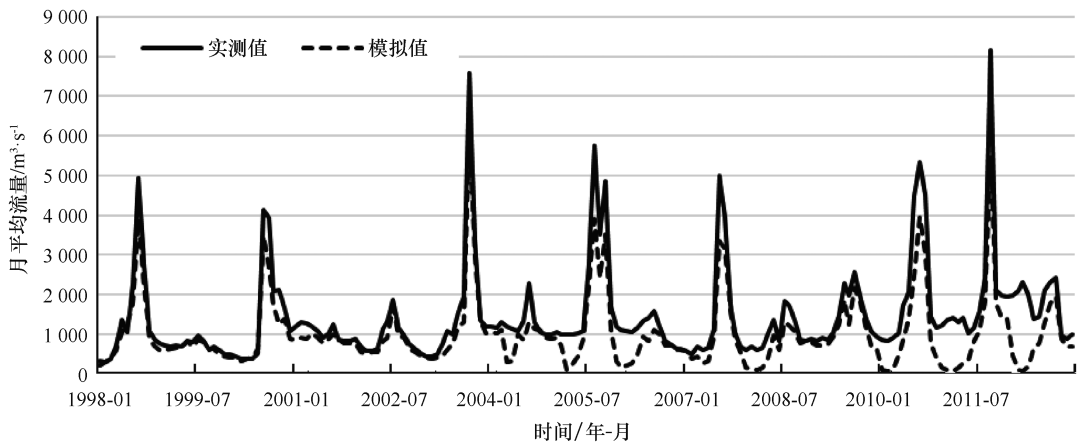


图7 沙洋站水文率定和验证结果

Fig. 7 Hydrologic calibration and verification results of Shayang Station

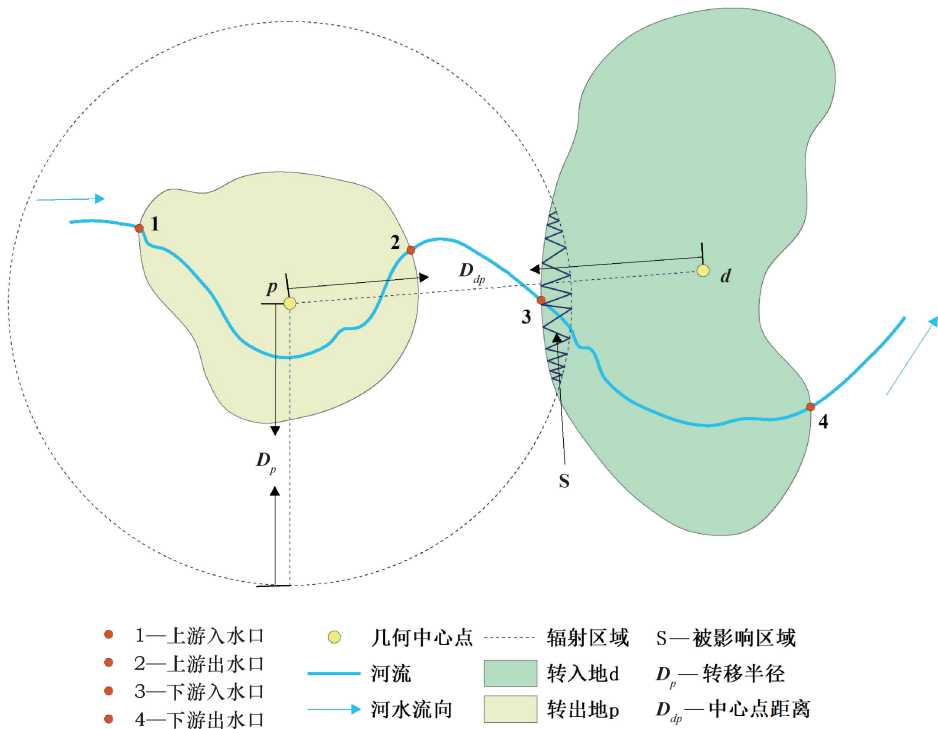


图8 断裂点-场强模型示意

Fig. 8 Breaking point-field strength model diagram

表3 水源涵养服务价值转移方法

Table 3 Water conservation service value transfer method

转移方法	转移起点	可转移的最大半径
出水口直线转移法	上游区域的河流出水口	流域上游区域出水口到流域下游区域出水口之间的直线距离
出水口河道转移法	上游区域的河流出水口	流域上游区域出水口到流域下游区域出水口之间的河流长度
入水口直线转移法	上游区域的河流入水口	流域上游区域入水口到流域下游区域出水口之间的直线距离
入水口河道转移法	上游区域的河流入水口	流域上游区域入水口到流域下游区域出水口之间的河流长度

考申梦姝等^[30]的研究。在转移方向的设定上, 通过在原有模型的基础上引入河流方向系数 A 来增强模型的现实适用性。这个系数 A 被用于描述水源涵养

服务的传递方向, 以确保这些服务的迁移与流域水循环的特性保持一致。更具体地说, 水源涵养服务的迁移主要应该是从上游到下游, 而如果不同的支流之间

没有水力联系, 那么转移的量应该是较小的。

改进后的模型中的关键参数和公式为

$$D_p = A_{dp} \times \frac{D_{dp}}{1 + \sqrt{\frac{N_d}{N_p}}} \quad (7)$$

$$I_{dp} = \frac{N_p}{D_{dp}^2} \quad (8)$$

$$V_{dp} = KSI_{dp} \quad (9)$$

式中, D_p 为转移半径(km); D_{dp} 为可转移的最大半径(km); N_d 、 N_p 分别为流域下游地区 d 和流域上游地区 p 的水源涵养生态系统服务价值(元); A_{dp} 为河流方向系数, 若上游向下游转移, 则 A 取 1, 若下游向上游转移或两者为同一条河流的平级支流的关系时 A 取 0; I_{dp} 为转移强度(元/km²); V_{dp} 为转移价值量(元); k 为生态系统服务自然流转的影响因子, 值越大表示转移介质对生态系统服务的转移能力越强, 由于水源涵养服务介质为水, 损耗较少, 则取 0.9; S 为水源涵养生态系统服务转移面积(km²), 以流域上游 p 的出水口为圆心, 转移半径 D_{dp} 为半径画圆, 与下游 d 相交区域的面积即为 S 。

3 结果与分析

3.1 汉江流域水源涵养量

依据 2.3 节提供的数学公式, 计算出汉江流域的水源涵养量, 并在图 9 中展示了其空间分布情况。在 2020 年, 汉江流域的水源涵养量达到了 305.84 亿 m³, 平均每平方千米的水源涵养量是 19.85 万 m³, 具体的数据如表 4 所列。湖北省的东南部、西南部以及陕西省的东南部是汉江流域水源涵养量相对较高的地方。水源涵养量较低的地区主要为河南省、湖北省西北部和陕西省东北部。其中, 湖北省的水源涵养量最高, 其总量超过了陕西和河南两地之和, 河南省的水源涵养量最少, 只有 15.95 亿 m³。在单位面积水源涵养量中, 同样是湖北省最多, 河南省最少。

表 4 汉江流域各省水源涵养量

Table 4 Water conservation of every province in Hanjiang River Basin

省 份	均值/万 m ³ · km ⁻²	总量/亿 m ³
陕 西	20.48	129.07
湖 北	25.31	160.24
河 南	5.80	15.95

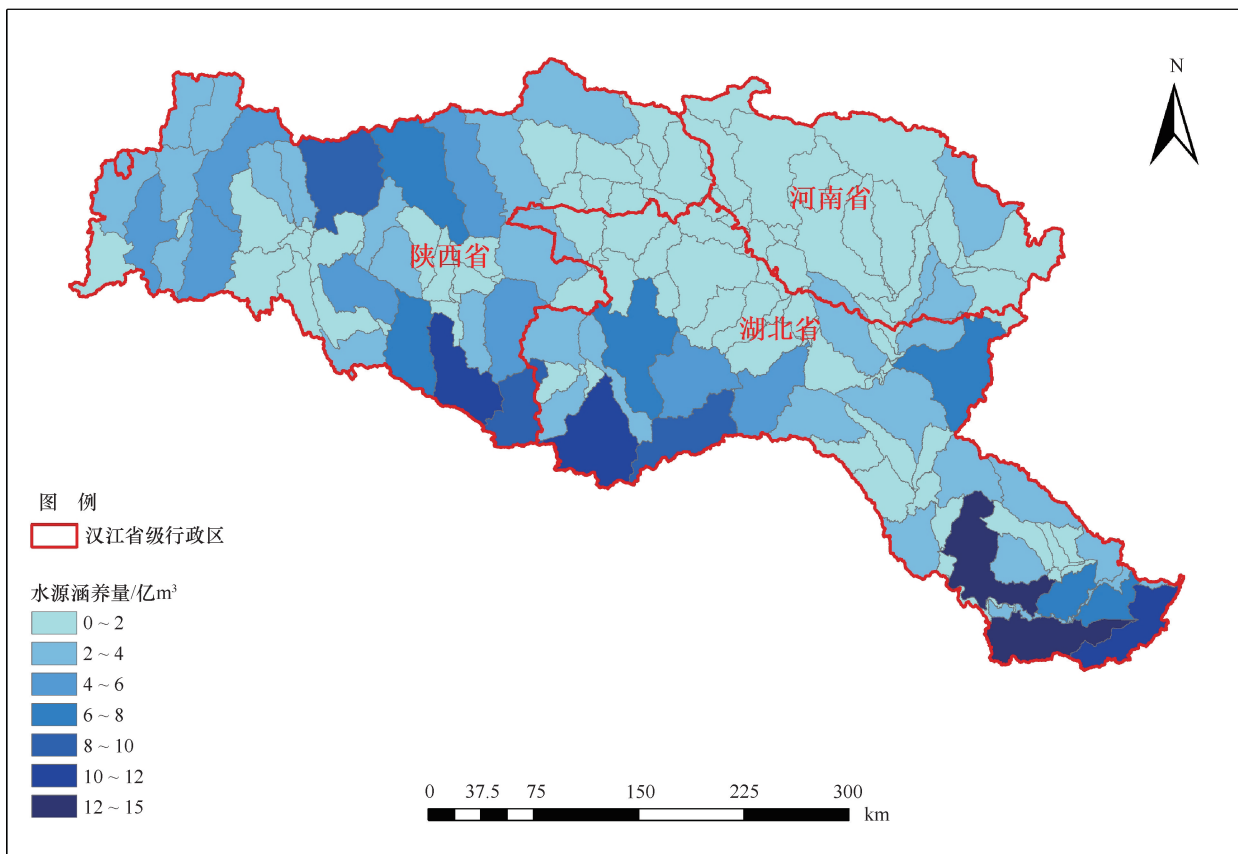


图 9 汉江流域水源涵养量空间分布

Fig. 9 Spatial distribution map of water conservation in Hanjiang River Basin

3.2 水源涵养生态系统服务价值

2020年汉江流域水源涵养服务价值量为316.85亿元,其中湖北省最多,陕西省次之,河南省最少。图10是2020年汉江流域单位面积水源涵养服务价值空间分布图。对比图9和图10可知,汉江流域单位面积的水源涵养生态系统服务价值和水源涵养量的空间分布呈现一定的相似性,高值均分布在湖北省东南部、西南部和陕西省东南部,低值主要在河南省。

表5展示了2020年汉江流域内各个省份在水源涵养生态系统服务价值方面的计算结果。根据计算结果可以帮助分析各地区的水源涵养生态补偿标准,并对汉江流域内各省市的水源涵养生态系统服务功能进行评估。根据提供的数据表格,2020年汉江流域在陕西、湖北和河南三个省份的水源涵养服务总价值达到316.25亿元。其中,湖北省的贡献最为显著,紧随其后的是陕西省和河南省,它们的贡献比例分别为52.39%、42.20%和5.21%。

3.3 水源涵养服务的转移量

表6给出了2020年汉江流域水源涵养服务的转移强度和转移量。从数据可见,在不同方法下,陕西

表5 汉江流域水源涵养服务价值

Table 5 Service value of water conservation in Hanjiang

River Basin		
省份	涵养价值/亿元	占比/%
陕西	133.72	42.20
湖北	166.01	52.39
河南	16.52	5.21

省的水源涵养服务转出量均为最高,其次是河南省,而湖北省没有转出记录。在接收方面,河南省的转入量最大,湖北省次之,陕西省没有转入记录。具体到各转移方法,出水口直线转移法的转移量最高。在该方法中,陕西省的水源涵养服务转出价值达到107.73亿元,占其本身服务价值的81%;河南省较少,转出1.54亿元,占其本身服务价值的9%。对于转入量,河南省接收最多,高达88.05亿元,是其自身服务价值的5倍多。相比之下,入水口直线转移法的转移量相对较少。在这种情况下,陕西省向外转移的水源涵养服务价值为10.78亿元,占其自身服务价值的8%,而河南省没有任何转出。在接收量方面,河南省通过这种方法接收到了总价值8.61亿元的服

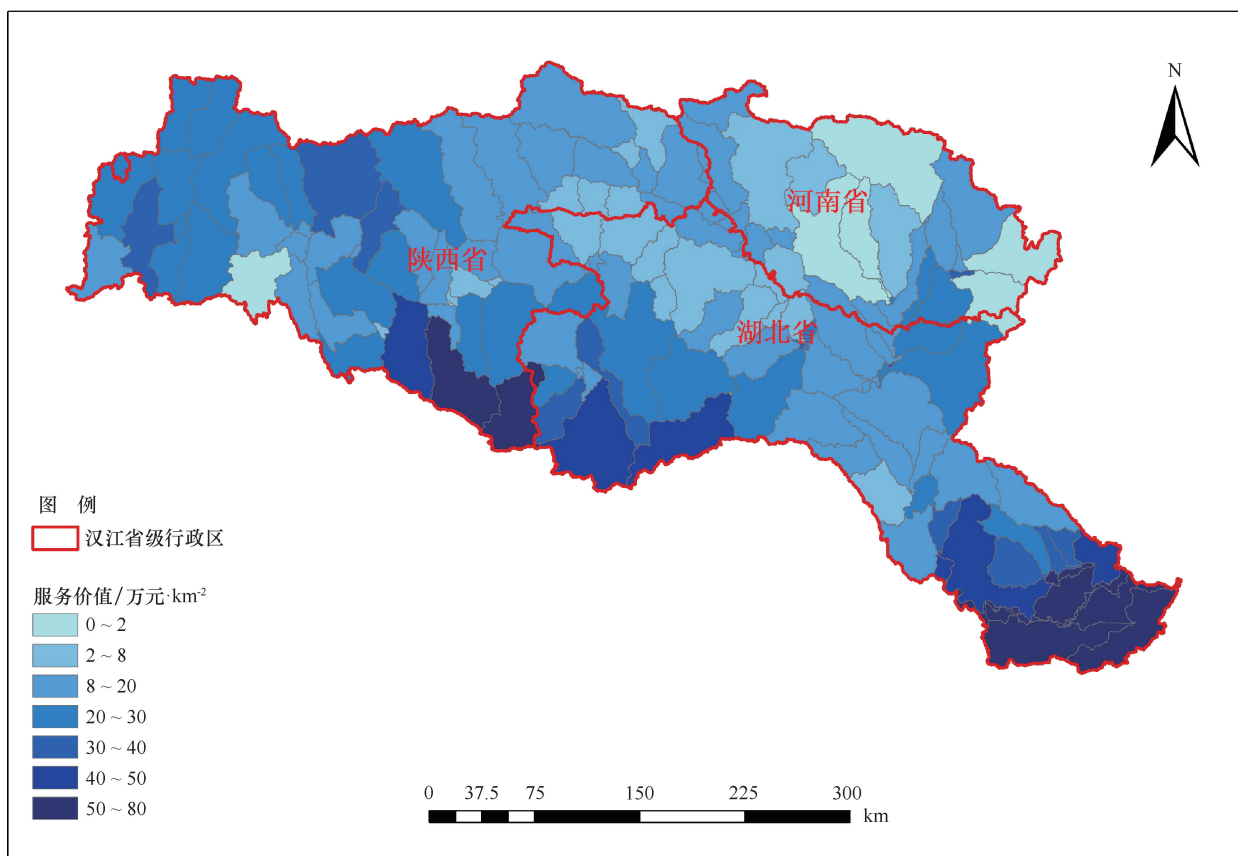


图10 汉江流域水源涵养服务价值

Fig. 10 Service value of water conservation in Hanjiang River Basin

表 6 汉江流域各省水源涵养服务价值转移量

Table 6 Transfer of water conservation service value in each province of Hanjiang River basin

转移方法	转出地	转入地	转移半径/km	转移面积/km ²	转移强度/万元·km ⁻²	转移量/亿元
改进前断裂点-场强模型	陕西	湖北	158.19	4 229.72	12.00	4.57
	陕西	河南	249.65	2 082.57	11.77	2.21
	河南	湖北	36.04	0	0	0
出水口直线转移法	陕西	湖北	223.10	36 234.22	6.03	19.68
	陕西	河南	64.08	5 475.57	178.67	88.05
	河南	湖北	65.16	7 666.75	2.24	1.54
出水口河道转移法	陕西	湖北	386.12	55 668.77	2.01	10.09
	陕西	河南	78.85	7 715.67	118.00	81.94
	河南	湖北	135.74	24 949.35	0.52	1.16
入水口直线转移法	陕西	湖北	379.16	11 532.40	2.09	2.17
	陕西	河南	171.74	3 847.41	24.88	8.61
	河南	湖北	99.59	0.00	0.96	0
入水口河道转移法	陕西	湖北	675.65	52 192.74	0.66	3.09
	陕西	河南	225.20	9 540.58	14.47	12.42
	河南	湖北	197.32	22 663.19	0.24	0.50

务,虽然数额较小,但也反映了一定的区域内水资源管理和需求的需求。

在这项研究里,从图 11—图 15,可以看到水源涵养服务价值转移网络在改进之前和之后的变化情况。图 11 是基于原始的断裂点-场强模型来计算的,而图 12 则采用了经过改进的模型。详细的对比如下:图 11 采用了改进前的方法,其独特之处在于以各个区域的几何中心作为生态系统服务迁移的起始点和结束点,而迁移的距离则是由从转出地的中心点到转入地的中心点的直线距离来确定的,这代表了服务可迁移的最大半径。这种方法虽然在处理上相对简单,但它忽略了地理和生态特性的复杂性,导致其计算出的水源涵养服务转移面积较小。如图 11 所示,河南省的水源涵养服务没有向湖北省转移,这明显与流域内的水循环特征不符,因为自然状态下河流的流动是不会受到行政区划界限的限制的。图 12 采用出水口直线转移法计算,改进点在于将上游区域的河流出水口作为生态系统服务转移的起点,并以流域上游区域出水口到流域下游区域出水口之间的直线距离作为生态系统服务可转移的最大半径。这种方法能更真实地反映水源涵养服务的流动特征,因为它基于水流的实际发生和终止位置来确定转移的可能性和范围。结果显示,图 12 的模型计算得到的水源涵养服务转移面积比图 11 更大,转移距离也更远。例如,陕西向下游的转移可以达到湖北省的较大部分地区,并且河南省的水源涵养服务也向下游的湖北省发生了转移,这样的改进使得模型的输出更加符合水源涵养服务依赖水流转移的生态特性。

图 13 进一步发展了图 12 的模型,采用出水口河

道转移法。与直线距离不同,此法考虑的是河流的实际长度,从而更精确地模拟了水源涵养服务的流动路径。图 13 的计算结果表明,转移面积和距离相对于图 12 有所增加,例如陕西省对湖北的转移能够覆盖到湖北的大部分区域。这种方法的实施,尽管转移强度和总量略有减少(最大转移强度从图 12 的 178.67 万元/km² 减少到 118.00 万元/km²,最大转移量由图 12 的 88.05 亿元降低到 81.94 亿元),但提供了更加细致和广泛的水源涵养服务转移图。

图 14 和图 15 分别尝试了入水口直线转移法和入水口河道转移法,这两种方法都试图从不同的角度进一步精细化水源涵养服务的转移模拟。图 14 将上游区域的河流入水口作为起点,这种改变虽然在理论上能提供新的视角,但实际上导致了转移面积和距离的减小,因为入水口通常位于河流的较高处,直线距离到下游出水口较短,限制了潜在的服务转移范围。因此,与图 12 相比,图 14 的水源涵养服务转移面积较小,距离也较短,这可能不足够充分地反映流域内部的实际水资源转移动态。

相比而言,图 15 则采用了一种更为复杂的入水口河道转移法,它考虑的是从入水口到出水口沿河道的实际距离。这种方法尽管计算复杂,但它能更精确地模拟水流的实际路径,提供了对水源涵养服务转移范围和强度的深入理解。图 15 的结果表明,尽管转移强度和总量较图 12 有所减少(最大转移强度从图 12 的 178.67 万元/km² 减少到 14.47 万元/km²,最大转移量由图 12 的 88.05 亿元降低到 14.42 亿元),但它能覆盖更广阔的区域,如陕西省对湖北省和河南省的转移覆盖面积显著大于图 12 的结果。这显示了河

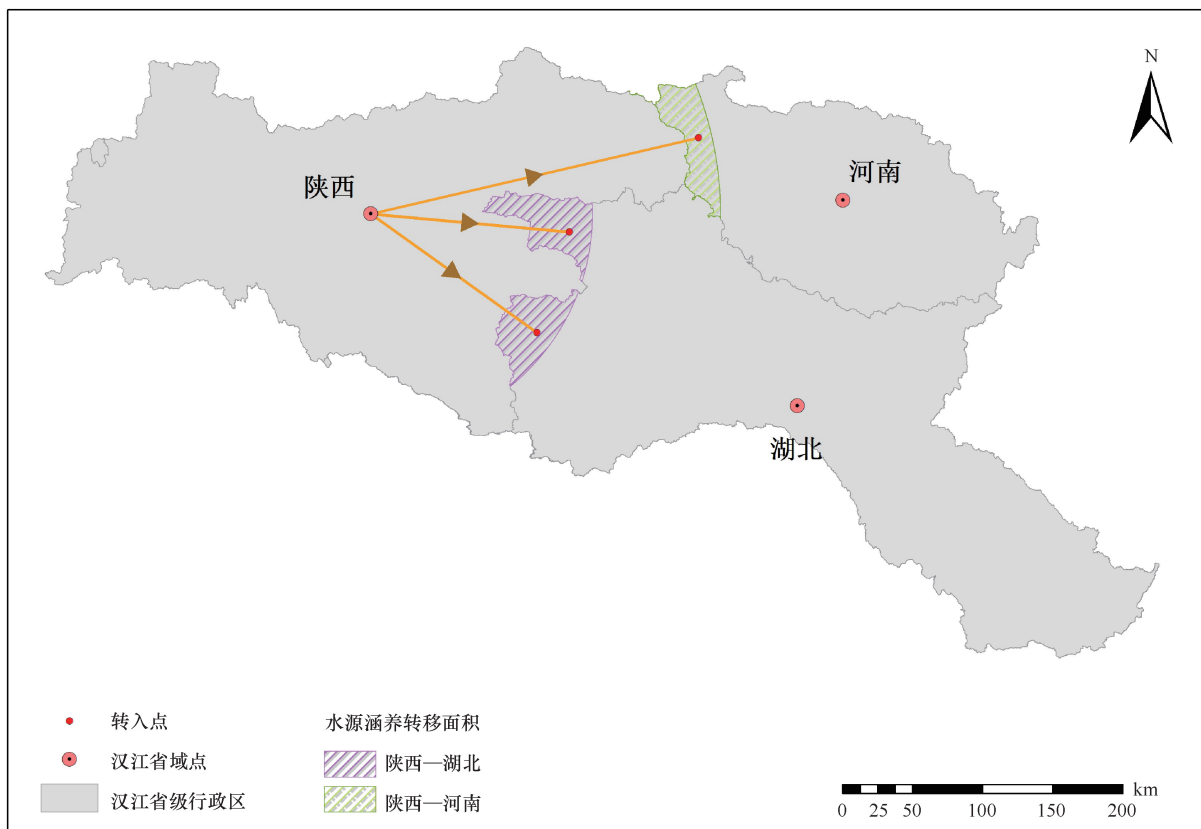


图 11 水源涵养服务价值转移网络-改进前

Fig. 11 Water conservation service value transfer network-before improvement

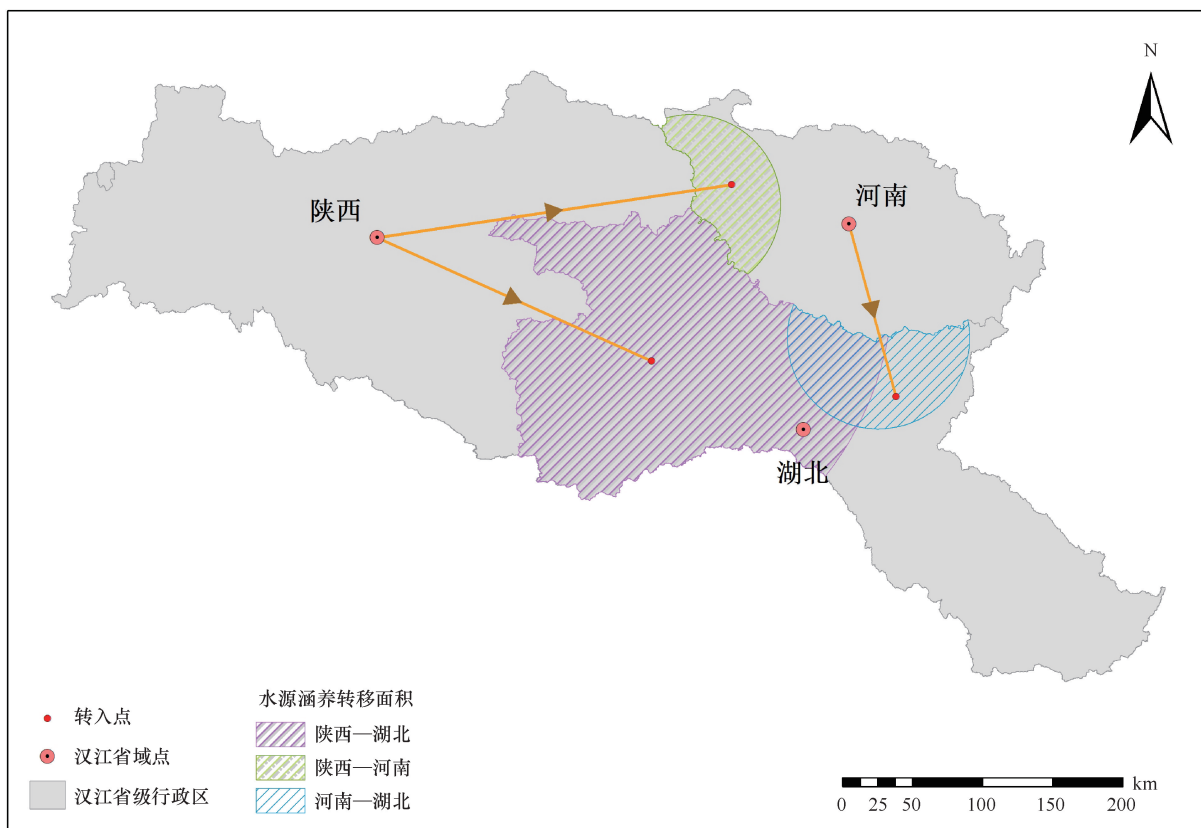


图 12 出水口直线转移法水源涵养服务价值转移网络

Fig. 12 Water outlet linear transfer method water conservation service value transfer network

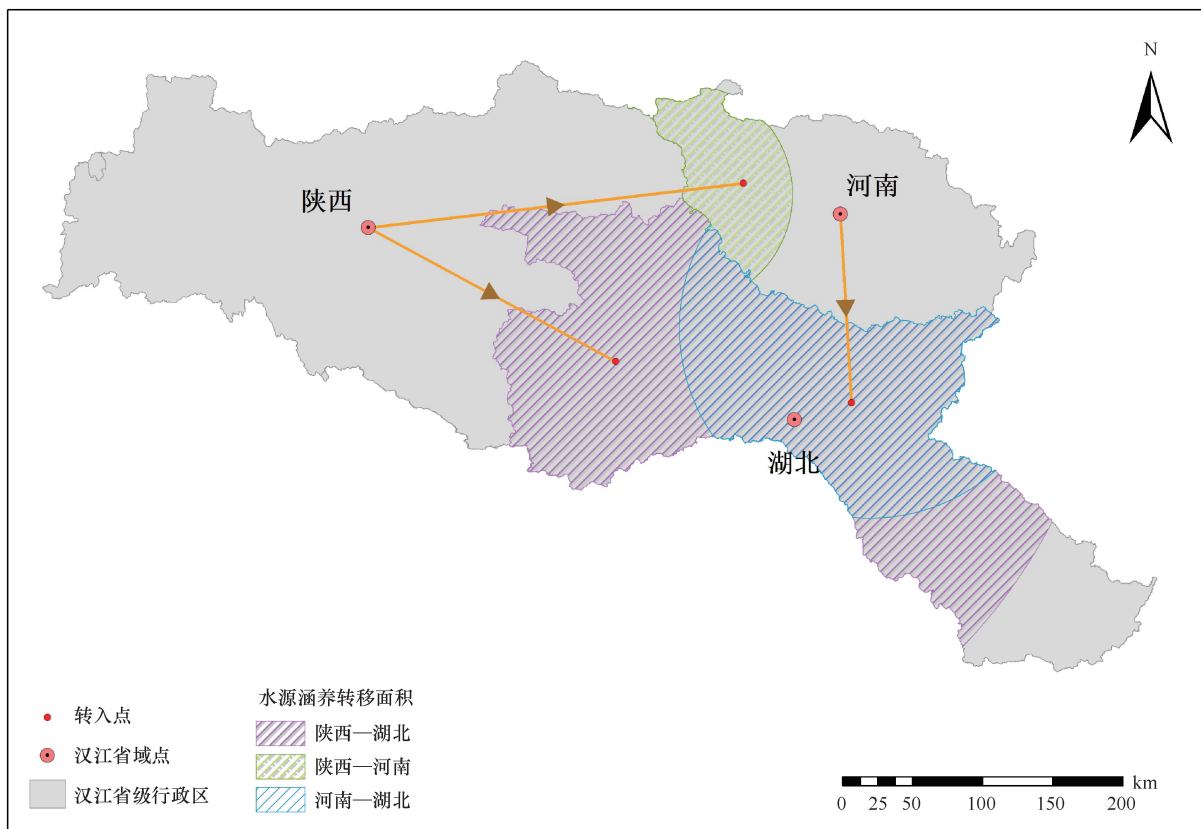


图 13 出水口河道转移法水源涵养服务价值转移网络

Fig. 13 Water source conservation service value transfer network of water outlet channel transfer method

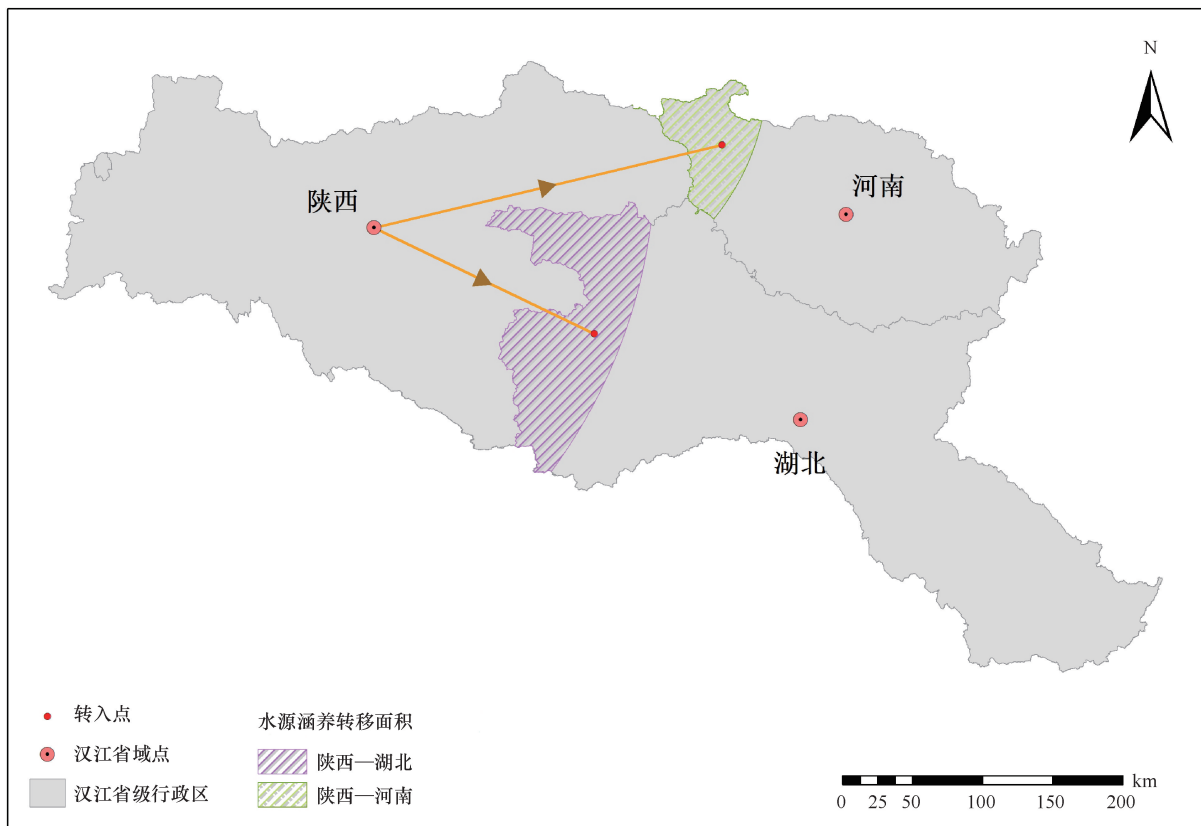


图 14 入水口直线转移法水源涵养服务价值转移网络

Fig. 14 Water conservation service value transfer network by linear transfer method of water inlet

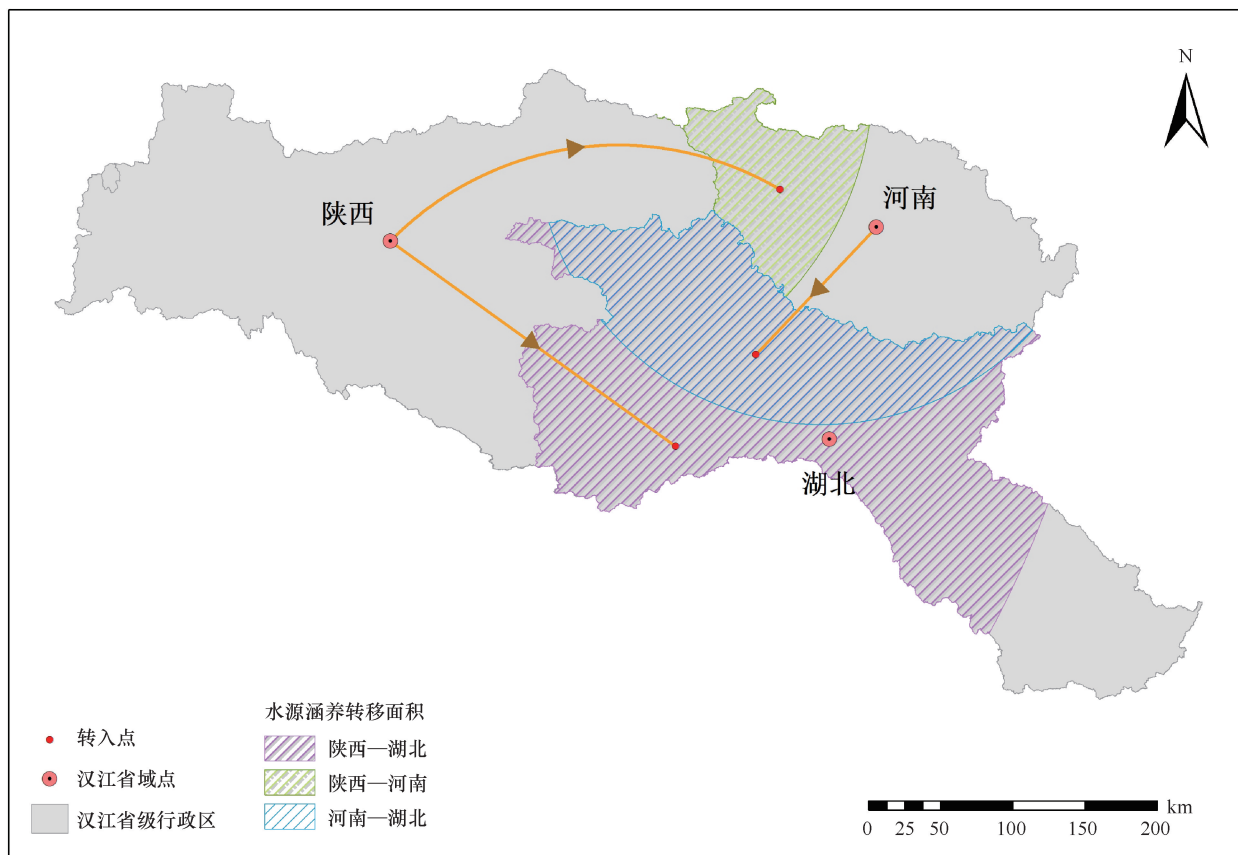


图 15 入水口河道转移法水源涵养服务价值转移网络

Fig. 15 Water conservation service value transfer network of water inlet channel transfer method

道转移法在模拟水资源管理中的实用性和有效性,尤其是在涉及大范围流域管理时。

在这几种转移方法中,出水口直线转移法是最适用于汉江流域的。该方法将上游区域的河流出水口作为生态系统服务转移的起点,以流域上游区域出水口到流域下游区域出水口之间的直线距离作为生态系统服务可转移的最大半径,它基于水流的实际发生和终止位置来确定转移的可能性和范围,能更真实地反映水源涵养服务的流动特征。并且,从表6的计算结果来看,该方法的转移强度是最强的,转移量也最多,这符合汉江流域水量丰沛水资源丰富的特点。

4 讨论

在本研究中,提出了一种全面的计算方法,评估了汉江流域的水源涵养能力及其生态服务价值,并通过影子工程法和改进的断裂点-场强模型,分析了该流域水源涵养服务价值及其空间转移情况。与传统的“水源涵养深度乘以流域面积”算法相比,本文方法通过更细致的模型处理,提升了评估的准确性。具体而言,本文利用每个子流域的产水量和地表径流量的差值计算水源涵养量,从而避免了简单粗略

的估算。以2020年汉江流域为例,本文计算的水源涵养量为305.84亿 m^3 ,远高于先前研究的101.10亿 m^3 ^[34]。这种差异主要是由于不同的计算方法和数据使用所致。相比之下,白淑英等^[34]采用了简单的流域面积和水源涵养深度乘积算法,而本文方法则更精确地反映了水文过程的复杂性与流域数据的多样性,计算结果更加接近实际。在评估水源涵养服务价值方面,本文通过多维度结合影子工程法、SWAT模型及改进的断裂点-场强模型,不仅提供了对水源涵养服务的全面评估,还详细分析了其空间转移路径。本文计算出的水源涵养服务价值为316.85亿元人民币。改进后的断裂点-场强模型表现出了在服务转移强度、半径和面积方面的优势,能够更清晰地揭示生态服务的空间传递动态。尽管该模型提高了水源涵养评估的精度,但在地表径流量超过产水量的情况下,出现了水源涵养量为负值的现象。为简化计算并确保所有数据为正值,本文在这种情况下将水源涵养量调整为零,但这一处理方法可能忽略了一些复杂的水文过程。

通过与其他研究方法的对比,本文方法展现了其在精确评估和数据综合处理方面的优越性。然而,本

文方法在某些区域可能存在过于简化的问题, 特别是在处理复杂水文过程或输入数据不足时, 可能会影响结果的准确性。此外, 尽管断裂点-场强模型有效地揭示了水源涵养服务价值的转移情况, 但在处理跨区域生态系统服务转移时仍有待进一步优化。未来应加强模型的参数优化, 提升其对更复杂生态系统和多变环境的适应能力。同时, 应进一步扩展案例研究的适用范围, 以验证本文方法的普适性和应用价值。通过更多的实际案例验证, 未来应研究跨区域生态服务转移的路径分析和关键参数识别, 进而为政策制定和水资源管理提供更加科学的依据。

5 结论

本研究对汉江流域的水源涵养能力进行了全面评估, 并采用影子工程法估算了该流域的生态系统服务价值, 以及通过引入改进的断裂点-场强模型探讨了水源涵养服务价值在流域内的转移情况。

(1) 2020年汉江流域的水源涵养总量达到了305.84亿 m^3 , 对应的生态服务价值达到316.85亿元人民币, 这一结果反映了流域内丰富的自然资源和良好的生态保护状态。

(2) 在省份具体分析中, 湖北省在水源涵养量和生态服务价值方面均表现出色, 显著高于其他地区; 相比之下, 河南省的表现则相对较弱, 其水源涵养量和服务价值均为各省中最低。

(3) 在水源涵养服务的价值转移方面, 改进的断裂点-场强模型揭示了陕西省水源涵养服务的转出量最多, 这主要是由于陕西省地处上游, 自然条件和地理位置促使其向下游地区转移较多的水源涵养服务; 相反, 湖北省作为主要的水源涵养服务接收区, 没有记录到显著的服务价值转出, 但其转入量最多, 这强调了其在区域水源涵养网络中的中心地位; 河南省虽然水源涵养服务价值低, 但其接收的服务量也超过了陕西省, 反映出该省在区域水循环中较为依赖水源涵养服务。

此外, 改进的模型不仅准确地描述了水源涵养服务价值的区域分布, 还通过精确的数学表达, 增强了对水文循环特征的描述, 尤其是在揭示服务价值从流域上游向下游的转移过程中表现出色。这种方法的应用不仅提高了水源涵养量计算的精确度, 也为流域管理和生态保护提供了科学依据, 促进了可持续水资源管理和生态文明建设的进程。总之, 通过综合利用影子工程法和断裂点-场强模型, 本研究为汉江流域的水源涵养和生态服务价值研究提供了新的视角, 为未

来的环境保护和资源管理策略制定提供了重要参考。同时, 模型也有待进一步优化, 未来研究应进一步优化模型, 探索水源涵养服务在不同时间尺度上的动态变化, 并结合气候变化、土地利用变化等因素, 深化对流域生态服务价值转移机制的理解, 以支持更全面的生态保护和水资源管理策略。

参考文献(References):

- [1] DAILY G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [2] ZHANG G C, WU Y P, LI H W, et al. Assessment of water retention variation and risk warning under climate change in an inner headwater basin in the 21st century[J]. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128717.
- [3] WU C X, GAO P, XU R R, et al. Influence of landscape pattern changes on water conservation capacity: A case study in an arid/semiarid region of China [J]. Ecological Indicators, 2024, 163: 112082.
- [4] 高红凯, 刘俊国, 高光耀, 等. 水源涵养功能概念的生态和水文视角辨析[J]. 地理学报, 2023, 78(1): 139-148.
GAO Hongkai, LIU Junguo, GAO Guangyao, et al. Discrimination of the concept of water conservation function from the perspective of ecology and hydrology[J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(1): 139-148.
- [5] 孙桥, 胡周汉, 张婕, 等. 南水北调东线平原水库生态服务效益评估: 以大屯水库为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1213-1222.
SUN Q, HU Z H, ZHANG J, et al. Evaluation of ecological service benefits of the plain reservoirs along the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project: A case study of Datun Reservoir [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(6): 1213-1222.
- [6] CHEN G, ZUO D P, XU Z X, et al. Changes in water conservation and possible causes in the Yellow River Basin of China during the recent four decades[J]. Journal of Hydrology, 2024, 637131314.
- [7] 张乐开, 左其亭, 钟涛, 等. 基于 SWAT 的沁河流域水源涵养能力分析 & 预测 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 862-872.
ZHANG L K, ZUO Q T, ZHONG T, et al. Analysis and prediction of water conservation capacity in Qinhe River basin based on SWAT [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 862-872.
- [8] 邓坤枚, 石培礼, 谢高地, 等. 长江上游森林生态系统水源涵养量与价值的研究[J]. 资源科学, 2002(6): 68-73.
DENG Kunmei, SHI Peili, XIE Gaodi, et al. Study on water conservation capacity and value of forest ecosystem in the upper

- reaches of Yangtze River [J]. Resources Science, 2002(6): 68-73.
- [9] 侯晓臣, 孙伟, 李建贵, 等. 森林生态系统水源涵养能力计量方法研究进展与展望[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(1): 121-127.
- HOU Xiaochen, SUN Wei, LI Jianguai, et al. Research progress and prospect of measurement methods for water conservation capacity of forest ecosystem [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(1): 121-127.
- [10] 张三焕, 赵国柱, 田允哲, 等. 长白山珲春林区森林资源资产生态环境价值的评估研究[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2001(2): 126-134.
- ZHANG Sanhuan, ZHAO Guozhu, TIAN Yunche, et al. Evaluation of ecological environment value of forest resource assets in Hunchun forest area of Changbai Mountain [J]. Journal of Yanbian University (Natural Science Edition), 2001(2): 126-134.
- [11] JIA Y, JIN J, WANG Y, et al. Evaluating the spatiotemporal distributions of water conservation in the Yiluo River Basin under a changing environment[J]. Water, 2024, 16(16): 2320-2320.
- [12] CHEN J, KASIMU A, REHEMAN R, et al. Temporal and spatial variation and prediction of water yield and water conservation in the Bosten Lake Basin based on the PLUS-InVEST model[J]. Journal of Arid Land, 2024, 16(6): 852-874.
- [13] JING W, YANG Z, Longfei X, et al. Soil conservation and water conservation services and trade-offs following the land consolidation project: a case study of Yan'an city, China [J]. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: 1425199.
- [14] XIE X, PENG M, ZHANG L, et al. Assessing the impacts of climate and land use change on water conservation in the Three-River Headstreams Region of China based on the integration of the InVEST model and machine learning[J]. Land, 2024, 13(3): .
- [15] 郭中伟, 甘雅玲. 关于生态系统服务功能的几个科学问题[J]. 生物多样性, 2003(1): 63-69.
- GUO Zhongwei, GAN Yaling. Some scientific issues about ecosystem service functions [J]. Biodiversity Science, 2003(1): 63-69.
- [16] GUAN D, CHEN S, ZHANG Y, et al. Influencing factors and the establishment of a basin ecological compensation mechanism from the perspective of water conservation; A case study of the upper Yangtze River in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 456: 142332.
- [17] 南平, 姚永鹏, 张方明, 等. 甘肃省城市经济辐射区及其经济协作区研究[J]. 人文地理, 2006(2): 89-92.
- NAN Ping, YAO Yongpeng, ZHANG Fangming, et al. Study on urban economic radiation area and its economic cooperation area in Gansu Province [J]. Human Geography, 2006(2): 89-92.
- [18] 杨志恒. 山东省复合型核心城市系统发展研究[J]. 国土与自然资源研究, 2003(1): 16-18.
- YANG Zhiheng. Composite core city system development and research in Shandong province [J]. Journal of Land and Natural Resources Research, 2003(1): 16-18.
- [19] 范小杉, 高吉喜, 温文, 等. 生态资产空间流转及价值评估模型初探[J]. 环境科学研究, 2007(5): 160-164.
- FAN Xiaosang, GAO Jixi, WEN Wen, et al. Study on spatial circulation and valuation model of ecological assets [J]. Research of Environmental Sciences, 2007(5): 160-164.
- [20] 文一惠, 马良, 谢婧, 等. 生态服务功能空间转移量化研究: 以官厅水库流域为例[J]. 环境保护科学, 2018, 44(1): 95-102.
- WEN Yihui, MA Liang, XIE Jing, et al. Quantitative study on spatial transfer of ecological service function: A case study of Guanting Reservoir basin [J]. Science of Environmental Protection, 2018, 44(1): 95-102.
- [21] 乔旭宁, 杨永菊, 杨德刚, 等. 生态服务功能价值空间转移评价: 以渭干河流域为例[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 1008-1014.
- QIAO Xuning, YANG Yongju, YANG Degang, et al. Evaluation of spatial transfer of ecological service function value: A case study of the Weigan River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(4): 1008-1014.
- [22] 徐杨, 王字翔, 汪维维, 等. 长江流域全面强化河湖长制的推进与探索研究[J]. 水利发展研究, 2024, 24(4): 43-50.
- XU Yang, WANG Yuxiang, WANG Weiwei, et al. A study on the promotion and exploration of fully strengthening the river and lake chief system in the Yangtze River Basin [J]. Water Resources Development Research. 2024, 24(4): 43-50.
- [23] 王旭辉. 基于 InVEST 模型的山东省生态系统服务时空演变[J]. 四川林业科技, 2023, 44(2): 137-142.
- WANG Xuhui. Spatio-temporal evolution of ecosystem services in Shandong Province based on InVEST model [J]. Sichuan Forestry Science and Technology, 2023, 44(2): 137-142.
- [24] 杨钦, 晏点逸, 刘欢, 等. 基于 InVEST 模型的长江源区水源涵养功能评估[C]//汤鑫华. 2022 中国水利学术大会论文集(第二分册). 北京: 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 2022: 69-76.
- YANG Qin, YAN Dianyi, LIU Huan, et al. Evaluation of water conservation function in the source area of Yangtze River based on InVEST model [C]// TANG Xinhua. Proceedings of the 2022 China Water Conservancy Academic Conference (Volume 2). Beijing: State Key Laboratory of Watershed Water Cycle Simulation and Regulation, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022: 69-76.
- [25] 冯娟. 基于 InVEST 模型和 SWAT 模型的秦岭北麓水源涵养时空格局分析[D]. 西安: 西北大学, 2021.
- FENG Juan. Spatial-temporal Pattern Analysis of Water Conservation

- in Northern Qinling Mountains Based on InVEST Model and SWAT Model [D]. Xi'an: Northwestern University, 2021.
- [26] 李盈盈, 刘康, 胡胜, 等. 陕西省子午岭生态功能区水源涵养能力研究[J]. 干旱区地理, 2015, 38(3): 636-642.
LI Yingying, LIU Kang, HU Sheng, et al. Shaanxi meridian hill ecological function areas water conservation capacity study [J]. Journal of arid areas in geography, 2015, 38 (3): 636-642.
- [27] 曾莉, 李晶, 李婷等. 基于贝叶斯网络的水源涵养服务空间格局优化[J]. 地理学报, 2018, 73(9): 1809-1822.
ZENG Li, LI Jing, LI Ting, et al. Spatial pattern optimization of water conservation services based on Bayesian networks [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(9): 1809-1822.
- [28] 左强, 李素雅, 房成泰, 等. 新疆生产建设兵团水土保持遥感监管实施成效及相关建议[J]. 水利发展研究, 2024, 24(5): 53-58.
ZUO Qiang, LI Suyu, FANG Chengtai, et al. Implementation effectiveness of remote sensing supervision on soil and water conservation in Xinjiang Production and Construction Corps and related suggestions [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(5): 53-58.
- [29] BAI Y, OCHUODHO O T, YANG J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA [J]. Ecological Indicators, 2019, 102: 51-64.
- [30] 申梦姝, 刘悦忆, 郑航, 等. 长江流域水源涵养服务价值及其空间转移评估[J]. 长江科学院院报, 2024, 41(4): 14-22.
SHEN Mengshu, LIU Yuanyi, ZHENG Hang, et al. Evaluation of water conservation service value and its spatial transfer in the Yangtze River Basin [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 41(4): 14-22.
- [31] 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 等. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2236-2244.
JIANG Bo, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong, et al. Evaluation of wetland ecosystem service function value in Haihe River Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(8): 2236-2244.
- [32] 申梦姝. 长江流域生态系统服务价值及空间转移评价[D]. 东莞: 东莞理工学院, 2024.
SHEN Mengshu. The Yangtze River Basin Ecosystem Service Value and Space Transfer Evaluation [D]. Dongguan: Dongguan Institute of Technology, 2024.
- [33] 赖敏, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 三江源区生态系统服务间接使用价值评估[J]. 自然资源学报, 2013, 28(1): 38-50.
LAI Min, WU Shaohong, DAI Erfu, et al. Assessment of indirect use value of ecosystem services in the source area of three rivers [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(1): 38-50.
- [34] 白淑英, 吴梦珂, 于焯婷. 汉江流域水源涵养功能的关键生态修复区识别与植被优化配置[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 123-128.
BAI Shuying, WU Mengke, YU Yeting. Identification of key ecological restoration areas and optimal allocation of vegetation for water conservation in Hanjiang River Basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 43(3): 123-128.

(责任编辑 王海锋)