

DOI: 10.20103/j.stxb.202404180863

陈龙, 徐丽, 于名召, 贺桂珍. 水生态系统服务流研究进展. 生态学报, 2025, 45(2): 1000-1012.

Chen L, Xu L, Yu M Z, He G Z. Research progress of water ecosystem service flows. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 1000-1012.

水生态系统服务流研究进展

陈 龙^{1, 2}, 徐 丽¹, 于名召¹, 贺桂珍^{1, 2, *}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:水生态系统服务流是目前生态系统服务的研究热点。基于动态视角的服务流动评估可以帮助更好的分析水生态系统服务供需之间的矛盾, 从而实现对水资源的科学管理和分配以提高人类福祉。总结目前已有的水生态系统服务流文献, 阐述了水生态系统服务流的定义和分类、尺度特征、载体特征、国内外研究区域分布和研究对象。目前主要是从两个角度探讨了水生态系统服务流的概念, 一个是强调流动路径, 另一个强调流动的结果, 不同的研究角度使得水生态系统服务流的相关概念尚未统一。梳理了目前水生态系统服务流评估的基本流程与方法, 主要包括数据的收集、供需计算、水生态系统服务物质流评估和价值流评估, 接着总结了目前水生态系统服务流应用方向, 包括区域水生态安全评估、流域生态补偿以及洪水管理。论述了水生态系统服务流的研究不足: (1) 可用水生态系统服务流分析模型较少, 现有网络模型缺陷较多; (2) 缺乏水生态系统服务流与其他服务流的权衡与协同分析; (3) 对水生态系统服务与自然生态系统相互作用的研究尚未充分开展。最后对未来水生态系统服务流的研究进行展望: (1) 开发适配程度更高的水生态系统服务流模型; (2) 多尺度整合研究; (3) 进行水生态系统服务流耦合分析, 以期促进水生态系统服务流研究朝着更加系统以及科学的方向发展。

关键词:水生态系统服务流; 评估流程; 水生态安全; 生态补偿

Research progress of water ecosystem service flows

CHEN Long^{1, 2}, XU Li¹, YU Mingzhao¹, HE Guizhen^{1, 2, *}

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

Abstract: Water ecosystem service flow is currently a hot topic in the field of ecosystem services. Assessing the ecosystem service flow from a dynamic perspective can help better analyze the contradictions between supply and demand of water ecosystem services, so as to achieve scientific management and allocation of water resources to improve human well-being. This paper summarizes the existing literature on water ecosystem service flows, describes definition and classification, the scale characteristics and carrier characteristics of the water ecosystem service flows, and analyses domestic and international distribution of research regions and study objects. The concept of water ecosystem service flow has been described mainly from two perspectives. One focuses on the path of the water ecosystem service flow and the other focuses on the outcome of the water ecosystem service flow. Different research perspectives have made the concepts of water ecosystem service flow not yet unified. There are also differences in the main influencing factors of water ecosystem service flows at different spatial and temporal scales. Meanwhile, water as the main carrier of water ecosystem service flows, has brought great convenience to the research with its figurative biophysical properties. Then the basic processes and methods of current water ecosystem service flow assessment are sorted out, mainly including data collection, water ecosystem service supply and demand calculation, assessment of material flow of water ecosystem services and assessment of value flow of water ecosystem services. Current

基金项目:国家自然科学基金项目 (U21A2041, 32201435); 国家重点研发计划项目 (2023YFC3804905)

收稿日期:2024-04-18; **网络出版日期:**2024-10-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gzhe@rcees.ac.cn

applications of water ecosystem service flows to water resources management are summarized, including the assessment of regional water ecosystem security, watershed ecological compensation, and flood management. The shortcomings of current researches on water ecosystem service flows are discussed as follows: (1) fewer available models for analyzing water ecosystem service flow and more defects in the existing network models; (2) a lack of trade-offs and synergistic analyses of water ecosystem service flows and other service flows; (3) insufficient research on the interactions between water ecosystem services and natural ecosystems. Finally, the future prospects for research on water ecosystem service flows are proposed to: (1) develop more adaptable models for water ecosystem service flows; (2) integrate research at multiple scales; and (3) perform coupled analyses of water ecosystem service flows, with a view to promoting the research on water ecosystem service flows in a more systematic as well as scientific direction.

Key Words: water ecosystem service flow; assessment process; water ecological safety; ecological compensation

水关乎人类健康与福祉,全球很多国家和地区存在水资源短缺问题。根据《2024 联合国世界水发展报告》^[1],世界约一半人口在一年中至少有一部分时间面临严重的缺水问题,世界 1/4 的人口面临着“极高”的水资源短缺压力,由于工业用水和生活用水的消耗加剧,全球淡水使用量仍在以每年略低于 1% 的速度增长。为了应对这一情况,“国际水行动 10 年”计划通过将现有的水和卫生项目与“2030 年可持续发展目标”进行整合,通过科学合理的管理手段缓解水资源紧张的情况。在诸多的管理方法中,水生态系统服务流是当前较为重要的水资源管理方法之一。

生态系统服务是指人类从自然生态系统中获得的益处^[2],生态系统服务流衍生于生态系统服务供需的空间关系研究^[3],自从 Ruhl 等^[4]以及 Fisher 等^[5]描述了一种服务从供给区向受益区传递的模式,生态系统服务的流动开始受到关注,但在当时并未对生态系统服务流的量化和制图提供系统的方法和工具^[6]。近些年来,随着模型、制图方法的普及以及人工智能技术的进步,对生态系统服务流进行空间化和定量化,以及分析服务在传递过程中流量和流向等关键因素的变化,已经成为了生态系统服务流的重要研究方向^[7-9]。目前,大多数的研究集中在水资源供给以及洪水调节服务上,如 Liu 等^[10]模拟了青藏高原生态系统供水服务的空间流动格局和传递机制;Bagstad 等^[11]基于 ARIES 模型对美国华盛顿的普吉特湾的洪水调节服务流进行了量化和流动模拟。在研究尺度上,目前已在全球尺度、国家尺度、区域尺度、流域尺度以及行政尺度等多个尺度下开展了水生态系统服务流研究^[12-16];在研究方法上,基于模型的水生态系统服务流定量化研究逐渐成为当前生态系统服务流研究的热点。

1 水生态系统服务流的概念及特征

1.1 水生态系统服务流的相关概念

由于研究的角度不同,导致水生态系统服务流的相关定义尚未统一。目前主要是从两个角度探讨了水生态系统服务流的概念^[3]:首先,它被视为一个“转移过程”,强调的是水生态系统服务在自然或人为因素的驱动下,沿着一定的方向或路径,从供应方转移到需求方的机制^[6];其次,从“结果”(最终效用或实际使用)的角度考虑,强调了水生态系统服务供应中被人类利用的部分^[17]。

水生态系统服务流基于“源-汇-流”框架。如图 1,对于一个特定的水生态系统来说,产水或蓄水单位本身可以作为生态系统服务的提供者,本研究将其称为生态系统服务的供给区(Service Provide Areas, SPAs),产生的生态系统服务如水资源的供给、洪水调节等会依附于水体沿着水流方向流动,服务流动途中会给周围的人类社会以及其他自然生态系统带来福祉,即生态系统服务的受益区(Service Benefit Areas, SBAs),一般为该流域范围内的其他生态系统或人类社会^[18]。水生态系统服务流又被分为潜在流和实际流,前者表示 SPAs 水生态系统服务理论产出,后者表示水服务通过流动进入 SBAs 实际消耗流量^[19]。

联合国千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)将生态系统服务分为四大类(供给服务、支持服务、调节服务以及文化服务),水生态系统服务流延续了水生态系统服务的研究,因此水生态系统服务流

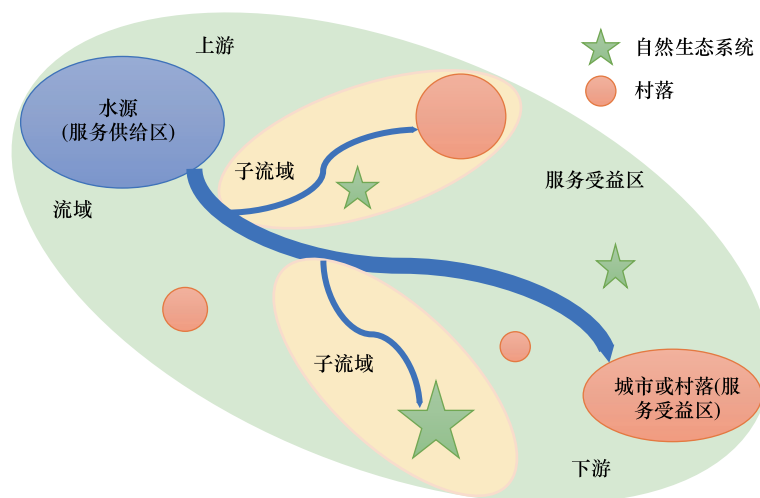


图1 水生态系统服务流示意图

Fig.1 Schematic of water ecosystem service flows

也可以分为供给服务流、调节服务流、支持服务流以及文化服务流。同时也可以基于水生态系统服务流的自身研究特点进行分类,如生态系统服务空间关系、驱动力特征、供需主体的移动性、服务流距离长短等^[5, 20]。

1.2 水生态系统服务流的尺度特征

水生生态系统服务流的时空尺度是影响其评估分析的重要因素。从空间尺度来看,目前的研究已经从全球尺度、区域尺度以及流域尺度等多个不同的尺度进行,不同空间尺度下的景观结构以及考虑的水生态系统服务流影响因素各不相同^[21]。在全球尺度上,水生态系统服务流受到全球变化驱动因素的影响,如全球性气候变化会影响到气候调节服务流,而全球的贸易政策会影响到国际水产品服务流^[13, 22];在区域尺度下,水生态系统服务流涉及多个流域和不同生态系统类型的相互作用,受到区域气候、土地利用变化和政策的影响^[12];在流域尺度上,水生态系统服务流与流域的整体水文状况、生态连接性等密切相关^[23]。

时间尺度是指生态系统服务流在时间上的跨度,主要有短期尺度,如季节性洪水调节、短期水质变化等,短期变化通常与降雨模式、气温和人类活动密切相关;中期尺度,大概为几年的跨度,涉及水生态系统服务流的中期动态变化^[24],如土地利用变化对水量的影响^[7];长期尺度,一般为几十年甚至更长的跨度,如湖泊以及河流长期演变过程对生态系统服务流的影响。

在水生态系统服务流研究中,还需注意到尺度联动,首先是时空尺度的匹配,例如在流域的管理中,不仅要考虑时间尺度上的水文过程,还需要考虑空间尺度上的景观结构^[25-26];其次是尺度交互,不同尺度上的水生态系统服务流是相互关联的,如区域气候变化可以影响整个流域的水资源状况,进而导致水生态系统服务流的变化^[27]。

1.3 水生态系统服务流的载体特征

不同水生态系统服务流的载体有所差异。水体是水生生态系统服务流的主要载体,具有具象性,该具象性不仅体现在水体可视化,也体现在水体生物物理性质方面。水体以及其流动路径的可视化可以帮助更好的绘制和分析水生态系统服务的流动过程。同时,水流作为载体,其生物物理性质较为明确,所提供的水生态系统服务会随着水体在重力的作用下从上游的 SPAs 流动至下游的 SBAs,在满足该区域的需求后若服务量还有盈余,剩余的服务量会随着水体继续朝下一个 SBAs 流动,直至服务耗尽^[28-29]。

区别于一般水生态系统服务流,水文化服务流作为信息流的一种,其载体较为抽象,在小的空间范围内,服务的传递更多是依赖于人类个体的主观感觉;在大范围内,网络媒介等已经成为目前水文化服务流的传播的主流,具有快速、高效等特征。

2 研究区域和对象

2.1 研究区域分布

通过关键词在 Web of Science 和知网上进行搜索和筛选后,找到了 80 多篇与水生态系统服务流相关的文章。目前世界上已有多个国家和地区开展了水生态系统服务流研究,主要集中在亚洲、欧洲、非洲以及北美等国家和地区,如表 1 所示。研究主要集中在欧洲的多瑙河流域国家^[53];欧洲与非洲交界的地中海流域国

表 1 水生态系统服务流研究概况
Table 1 Overview of water service flow studies

水生态系统服务类别 Water ecosystem services categories	服务流特点 Service flow characteristics	研究目的 Research purpose	国内研究区域 Domestic study areas	国外研究区域 Foreign study areas
水资源供给 Water supply	(1)以水流作为载体 (2)具有经济属性,可转化为价值流进行研究 (3)与大多数生态系统服务流存在协同和权衡关系	区域水生态安全评估	钱塘江流域 ^[30] 、青藏高原 ^[10] 、太行山地区 ^[14] 、福建省 ^[16] 、黄河流域(干流以及支流) ^[15,31—34] 、长江流域(干流以及支流) ^[31,35—36] 、西南喀斯特地区 ^[37] 、山东河南两省 ^[38] 、涟水流域 ^[39]	乌干达乔治湖集水区 ^[25] 、贝宁乌里约里流域 ^[40] 、西班牙多尼亚纳国家公园和内华达山脉国家公园 ^[41] 、阿尔卑斯山脉以及邻近区域 ^[27]
		区域生态补偿	北京密云水库 ^[23] 、宁夏省 ^[42] 、长三角地区 ^[43] 、石羊河流域 ^[44] 、桃溪河流域 ^[45] 、太湖流域 ^[46] 、福州市 ^[47] 、粤港澳大湾区 ^[48]	NA
		探究某种因素对区域水生态系统服务流变化的影响	三江源地区 ^[7] 、福建省东北部 ^[49] 、涟水流域 ^[50] 、花山溪流域 ^[51]	瓦利迪亚泻湖 ^[9]
		探究水供给服务流动过程中与粮食以及能源之间的关系	宿州市 ^[52]	欧洲多瑙河流域 ^[53]
洪水调控 Flood regulation	由自然生态系统与人类防洪设施共同组成,服务的流动机制较为复杂	探究洪水调控服务流机制	浏阳河流域 ^[54]	美国加州奥兰治县和华盛顿普吉特湾 ^[11] 、瑞典斯德哥尔摩地区 ^[29]
		确定防洪优先区域,进行区域可持续洪水管理	汉江流域 ^[55]	德国及周边国家 ^[56]
水质净化 Water purification	服务流通常可加强其他水生态系统服务过程	探究水质净化服务与其他服务之间的相互作用	NA	阿尔卑斯山脉以及邻近区域 ^[57]
		水质净化服务等自然资本与其他类型资本(社会经济资本等)的相互作用	九龙江流域 ^[58] 、无定河流域 ^[59]	NA
土壤保持 Soil conservation	属于原位服务流,即供给与受益区在同一区域	探究土壤保持服务对于不同生态系统可持续管理的帮助	NA	越南萨帕 ^[60]
		基于服务流的动态指标,评估区域自然生态资源	青藏高原地区 ^[61]	NA
气候调节 Climate regulation	(1)水以各种形式参与循环 (2)通过参与自然界的各种自然生态活动进行服务流传递	探讨气候调节服务对服务流过程中的条件依赖程度	NA	瑞典斯德哥尔摩地区 ^[29]
文化服务 Cultural service	(1)不以水体作为载体 (2)依赖于人类活动进行服务流传递	探究文化服务流动机制,制定自然资本的可持续管理政策	NA	中亚五国(乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦) ^[12] 、阿尔卑斯山脉以及邻近区域 ^[27]

NA; 不可得 Not available

家^[62];东亚的中国、越南^[60],西亚的印度^[24],中亚的哈萨克斯坦等国^[12];北美的美国^[11]以及加拿大^[63]等国。

国内的研究大多集中在以下三种区域:流域及湖泊、城市及城市群、其他特殊自然地貌区。其中黄河流域和长江流域是研究热点,Liu 等^[15]和 Guan 等^[31]分别对黄河和长江干流流域的水供给服务的空间流动进行了分析,此外还有黄河的支流如渭河^[32]、湟水^[64]、伊洛河^[65]等和长江的支流如湘江^[35]、浏阳河^[54]等。城市作为人类社会的载体,其水生态系统服务的流动直接影响到人类的福祉,国内的几大重要城市群也都进行了水生态系统服务流的评估,如中国东北地区^[28]、京津冀地区^[8]、长三角地区^[66]、珠三角地区^[67]等。青藏高原地区^[7, 10, 61]、太行山脉^[14]以及西南喀斯特地貌区^[37]等特殊自然地貌区,也有部分文献对其水生态系统服务流进行了评估。

2.2 研究对象分析

目前水生态系统服务流的研究对象主要为水资源供给服务流与洪水调控服务流。如表 1 所示,也有部分研究对水质净化、土壤保持、气候调节以及文化服务流进行了评估。针对水生态系统服务流的不同特点,水生态系统服务流的研究目的也有所不同。

对于水资源供给服务流来说,目前主要的研究集中在区域水生态安全评估与流域生态补偿上。区域水生态安全评估是基于水生态系统服务流动的视角来计算服务供需之间的关系,如国内的长江^[31]以及黄河流域^[15]都有进行区域水生态安全的评估。流域生态补偿则是基于水生态系统服务价值的流动,对流域生态损益主体以及赔偿金额进行裁定^[23]。同时有小部分研究聚焦于不同因素变化对水生态系统服务流的影响,包括土地利用变化^[9]、水质条件变化^[51]等。此外,水-粮食-能源之间的耦合关系^[52-53]也是研究的方向之一。

洪水调节服务包括自然调节以及人类防洪设施调节,服务流的评估需要同时考虑两个方面,使得洪水调节服务流的分析更加复杂,所以目前的研究多集中在洪水调节服务流的机制探究^[11, 29]以及防洪区域等级评估^[55-56]上。

水质净化、土壤保持、气候调节以及文化服务流相关的研究较少,目前已有的文献主要研究服务流动的机制,包括服务流的传递^[27]、服务流的条件依赖程度^[29]以及服务流的相互作用上^[57]。

3 水生态系统服务流评估过程及方法

目前存在多种水生态系统服务流评估分析方法,这是由于水生态系统服务流定义的不一致以及水生态系统本身特征的复杂性所导致的。在对文献进行阅读整理后,总结出了目前最为常见的服务流分析框架。如图 2 所示,水生态系统服务流评估主要包括物质流与价值流评估。

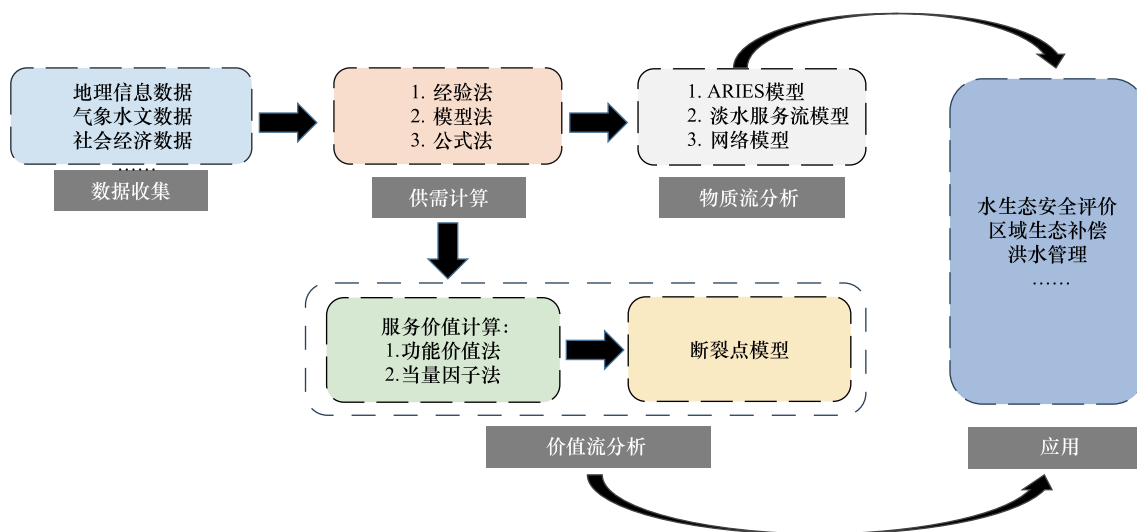


图 2 水生态系统服务流评估流程

Fig.2 Assessment process of water ecosystem service flows

3.1 数据收集

水生态系统服务流的研究数据的收集取决于后续方法的选择,不同的方法所需收集的数据会有部分差异。但大部分研究^[27, 55]都需收集地理信息数据、气象水文数据以及社会经济数据。

地理信息数据包括 DEM(Digital Elevation Model)数据、土地利用数据以及区域边界数据等;气象水文数据主要有降雨数据、蒸散数据以及流域水文数据等;人口数据、GDP 数据以及用水数据等社会经济数据可以去到对应区域的政府网站进行收集^[8, 50]。收集的数据按照所用公式或模型的要求进行后续处理。

受限于目前的监测技术,水文数据中的地下水流数据目前无法直接获取,基于土壤水文数据计算的地表水下渗可能会与实际情况存在些许偏差,特别是在地下水系发达的区域,如喀斯特地貌区,基于地下水流数据计算水流的渗漏情况会使计算结果更加科学,考虑地表水与地下水的流动循环也是水生态系统服务流研究的方向之一。同时生态用水量数据目前很难收集,目前大部分研究只考虑生产以及生活的用水数据,导致计用水量的计算数据比实际数据低。

3.2 供需计算

水生态系统服务流的供需计算大致分为三类,包括基于专家知识的经验法、精确定量的模型法以及利用统计数据的公式法。

经验法适合于大尺度、跨区域的水生态系统服务流评估,专家利用经验对研究区域的水生态系统服务供需进行打分。如 Goldenberg 等^[29]通过构建专家矩阵来对斯德哥尔摩地区的气候调节以及雨水调节的供需进行打分,计算潜在服务与实际服务的差值,作为净服务量。Palomo 等^[41]在对西班牙多尼亚纳国家公园和内华达山脉国家公园两个保护区的供水服务等一系列生态系统服务流动进行绘制时,通过专家经验的选择确定了生态系统服务供给热点区、退化的供给热点区以及受益区,并确定了生态系统服务供需以及退化的强度。但经验法无法对区域水生态系统服务流进行定量化研究。

模型是进行水生态系统服务供需计算的一大助力,目前水生态系统服务供给计算的主流模型包括: InVEST (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)^[26], VIC (Variable Infiltration Capacity Macroscale Hydrologic Model)^[32], SWAT (Soil and Water Assessment Tool)^[68]以及 HSPF (Hydrological Simulation Program Fortran)^[49]等。其中 InVEST 模型可用于计算区域水供给量,而 VIC、SWAT 和 HSPF 都是水文模型,通过划分子流域,并汇总计算不同子流域的径流量从而对产水、洪水调节等服务的供给进行计算。模型的输出结果受到输入数据准确度的直接影响,同一数据的不同处理方法也会使得数据的结果出现一定程度的偏差,因此需要按照实际数据对模型的结果进行修正。

公式法适用范围较广,可同时用于生态系统服务的供需计算,但目前的研究多用于水生态系统服务的需求计算。公式法依赖于统计数据进行,数据的可获得性是公式法的最大局限。张欣蓉等^[37]在对西南喀斯特地区的水供给服务的需求量进行计算时利用统计数据分别对 SBA 的工业用水、农业用水以及居民生活用水进行计算,并将总和作为水供给服务的需求量。Kleemann 等^[56]利用人口密度数据与 10 年间泛洪区的位置计算了德国洪水调节服务需求的估算值。

水服务供需的平衡程度通常使用净服务量^[29]或供需比来进行表征^[69-70]。净服务量(Net Service, NS)是利用供需差来对供需平衡程度进行表征;供需比则是通过供需之间的比率关系对平衡程度进行表示。在水资源供给服务中,为了增加供需差异的可视化程度,使用水安全指数(Water security index, WSI)对区域水安全进行表征^[71],即对常见的供需比取常用对数,考虑到水体流动的特性,通过将自身水供给与上游水流量相加,然后将该综合供给量与需求量进行比值,并最终取常用对数,这也被称为动态水安全指数,这种定义方式更全面地考虑了水资源供给的时空动态变异,提高了水安全指数的科学精确性^[8]。

3.3 水生态系统服务物质流分析

分析水流作为载体的物理特性是物质流分析的核心,包括水流的流向、流量和流速,但目前尚未有关于水生态系统服务流流速的研究。目前常用水生态系统服务物质流分析方法有 ARIES(Artificial Intelligence for

Ecosystem Services)模型、淡水生态系统服务流模型以及网络模型。

(1) ARIES 模型

ARIES 模型多用于评估和模拟水生态系统服务流从供给到应用的流量和路径^[72],以捕捉水生态系统服务流的空间动态特性^[49]。ARIES 在通过搭建源-汇-使用者框架来进行生态系统服务供需的空间制图与生态系统服务流的可视化分析,源即生态系统服务的供给区域,汇即在流动过程中能够对生态系统服务造成影响的各种潜在因素,使用者即生态系统服务的受益对象^[72]。

ARIES 的子模块 SPANs (Service Path Attribution Network)用于对水生态系统服务流从供给到需求的流动路径和流量进行模拟研究。分析流程大致有五个步骤:(1)基于网络智能辨析生态系统服务主体及受益对象;(2)数据获取与初步准备;(3)基于人工智能迭代过程的模型构建与校准;(4)生态系统服务流过程模拟;(5)生态系统服务定量评估^[73]。

Bagstad 等^[72]在开发 ARIES 模型时为美国加州的奥兰治县和华盛顿州西部开发了洪水调节模型,同时为美国亚利桑那州的圣佩德罗河流域以及墨西哥的安提瓜河流域开发了当地的供水模型。Zank 等^[74]利用 ARIES 模型分析了美国华盛顿州普吉特湾两种土地利用变化发展情景对生态系统服务流动的影响,其中包括该区域的洪水调节服务。

由于 ARIES 需要大量的数据准备,数据质量会严重影响模型的准确度。同时 ARIES 模型需要在线进行访问,从而无法更改源代码来适配不同的研究区域^[75]。基于以上一些因素,ARIES 模型并未被广泛使用。

(2) 淡水服务流模型

淡水服务流模型的构建可通过模拟网格尺度下的水流量。如图 3 所示,通过对研究区域进行网格单元划分,利用 GIS 软件和数字高程模型(DEM)进行水系提取分析,得出不同网格单元的服务流动方向^[39],通过计算区域静止状态下的服务供需量后,从而明晰服务供需的空间平衡程度。基于水体的流动特征,计算各区域的动态补充后的服务供需差异量。考虑上游的补充服务流量也被称为动态生态系统服务流量,与仅考虑服务供给与消耗的静态服务流量有所不同。考虑上游补充的动态服务流量对于区域生态系统服务流的研究更有

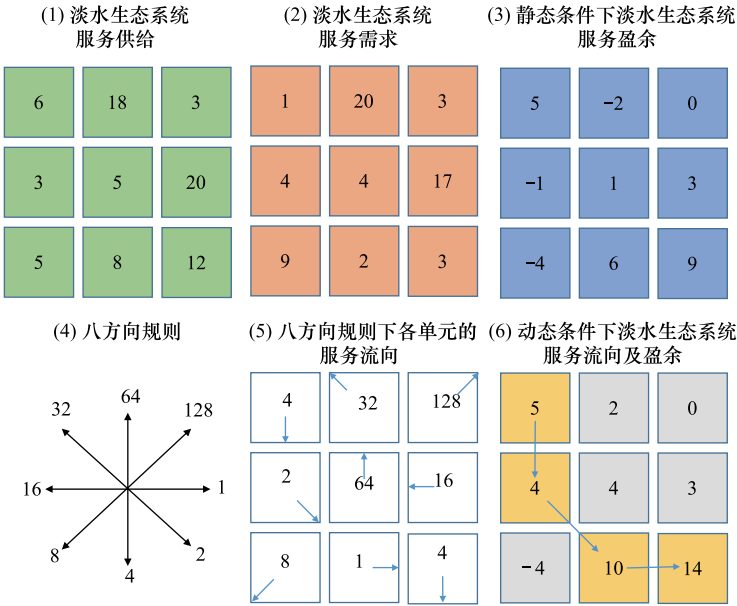


图 3 淡水服务流模型

Fig.3 Freshwater service flow modelling

(1)(2)(3)中的数字分别代表研究区各单元淡水生态系统服务供给量、需求量以及淡水生态系统盈余量;(4)中用数字代表水生态系统服务流的 8 个方向;(5)中数字代表研究区各单元水生态系统服务流方向;(6)中数字表示动态情况下的研究区各单元淡水生态系统服务盈余量

意义^[28]。淡水服务流模型只适合以水流作为载体的水生态系统服务流分析,特别是水供给服务流的分析,对于不依赖重力流传递的服务流来说,该方法并不适用。

Schirpke 等^[27]基于淡水生态系统服务流模型理论对,利用输水管道代替河流水系,对欧洲阿尔卑斯山脉淡水供给服务流进行分析。Zou 等^[39]根据静态水安全指数描述了涟水流域的水服务供需平衡特征,利用淡水生态系统服务流模型分析淡水供给服务在不同子流域间的空间流动过程。Li 等^[8]基于淡水生态系统服务流模型分别在网格尺度和行政尺度下对京津冀区域的淡水供给服务流进行了模拟。

(3) 网络模型

水生态系统服务在自然和人类因素的作用下,沿着流动路径进入到人类社会,影响人类的福祉。同时人类社会的相关政策、土地利用变化以及服务偏好的变化都会影响水生态系统服务的流动。自然系统和人类社会是一个耦合系统,水生态系统服务流的空间结构是多目标、多路径、多方向的,因此通过构建网络模型可以清晰表达水服务的流动^[6]。供给区和受益区之间的生态系统流动本质上是自然系统和社会经济系统之间要素或物体的动态相互作用,可以按照地理位置和水供给服务流量的盈亏权重定义节点,按照是否流动定义边界,来为流域构建水生态系统服务流网络。通过分析节点与边界属性、网络连接方式、模块化程度、中心度及冗余度等,可以让生态系统服务流的时空传导过程更加清晰^[61]。

网络理论在国内目前受到广泛应用。Wang 等^[59]构建了网络模型对延河流域的水生态系统服务流进行评估。吕悦风^[19]通过重构耦合社会-生态网络方法的分析框架,对杭州市多项生态系统服务,其中包括产水服务的流动进行了分析。

目前网络模型的应用中,为了捕捉节点之间的关键空间关系,简化了自然-社会研究框架下的服务流影响因素,这也可能导致了分析结果会与实际情况产生偏差,因此在后续的网络模型使用中,需要尽可能考虑到各个因素带来的影响。

3.4 水生态系统服务价值流分析

不同于物质流分析,水生态系统服务价值流是通过将服务量货币化,从而分析价值量的流转,与物质流分析相似,价值流的分析只是多一步服务量的市场化。目前常用的水生态系统服务价值计算方法大致分为两类:一是基于单位服务功能价格的功能价值法^[76],二是基于单位面积生态系统服务价值的当量因子法^[77]。水生态系统服务价值的空间转移量可以通过断裂点模型进行计算。

3.4.1 生态系统服务价值计算

功能价值法是通过水生态系统服务功能以及单位功能价格计算而来^[78]。在计算方法上,首先要计算每种服务的物质量,物质量的获得多通过问卷调查、实验测定、统计数据等方法^[79],目前也常用模型对物质的量进行计算。之后再通过市场化的方法将物质量转化为价值量,市场化的方法又包括直接市场法、间接市场法以及模拟市场法等^[80-81]。市场化的方法适合于水供给服务与文化服务等市场化水平高的服务,水源涵养等调节服务需要通过其他方法进行核算,如影子工程法^[82]等。

当量因子法是通过构建的当量因子表进行生态系统服务价值评估。谢高地等^[83-84]基于 Costanza 等^[2]生态系统服务功能分类的基础上,通过对我国 200 名专家的问卷结果,制定了我国生态系统服务价值当量因子表,并在之后的文章中进行了改进和发展^[77]。

3.4.2 断裂点模型

断裂点模型在社会科学中被广泛用于分析地区的经济影响,常用于评估区域水生态系统服务价值的流动。生态系统服务功能一般随距离的增加而下降,其影响程度随风向、水流、地形、人口流动量等自然条件而变化^[43],衰减的原理是生态服务价值的空间转移常随着距离的增加而不断递减,距离衰减原理是牛顿万有引力在地理实体之间空间相互作用的表现^[75]。该理论也存在局限与不足,包括其假设条件过于理想,未考虑不同水生态系统服务的差异性,在计算时经验因子的值难以确定。

Zhang 等^[64]使用元耦合框架对湟水流域及其周边系统进行耦合分析,利用断裂点模型计算了生态系统服

务价值流量。杜贺秋^[82]等运用场强模型和断裂点公式分析了京津冀地区水源涵养价值的空间流动时空特征,并构建水源涵养生态补偿模型。

4 水生态系统服务流应用场景

目前,水生态系统服务流主要应用于水生态安全评价、流域生态补偿以及洪水调控。三者皆是基于物质流和价值流评估的结果,是水生态系统服务流在自然生态系统和人类社会的具体实践。

4.1 水生态安全评价

水生态安全是指自然生态系统提供的水生态系统服务能够满足其他自然生态系统以及人类的社会发展的需求,即区域水生态系统服务供需处于平衡状态^[16],兼有自然、社会、经济和人文的属性。区域水安全是水资源评价和管理的常用指标,是自然和人类等多种因素共同作用的结果,例如气候条件、土地利用改变、人类活动变化都会影响区域水资源供需平衡,从而直接或间接地影响水生态安全。在生态系统服务流背景下,水生态安全的研究大多集中在水资源供需的量化,通过计算供需平衡状态来分析区域水生态安全情况^[85-86]。传统的水安全评价只是粗略估计静态水资源供需格局,忽略了水资源供给、流动和使用过程中复杂的多尺度动态过程^[87]。而基于水生态系统服务流的区域水安全评价,充分考虑了上游补充水量的影响,能更加精确的计算水生态系统服务的供给和需求,从而更加精确的描述水资源供需的平衡程度。

目前基于水生态系统服务流的水安全研究案例非常丰富,特别是流域尺度的研究较多,已在我国的东北地区^[28]、京津冀地区^[8]、山东与河南两省^[38]、渭河流域^[32]、东江湖流域^[26]、涟水流域^[39]、黄河干流流域^[15]、东江流域^[36]、湘江流域^[35]、伊洛河流域^[65]、延河流域^[71]以及青藏高原地区^[10]等地区开展。研究方法上多采用模型和指数评估方法,如 Li 等^[8]通过淡水服务流模型对京津冀地区的水安全进行了评估,Zhu 等^[28]基于淡水服务流模型,将淡水服务提供、消费和空间流动纳入水安全评价指标,量化淡水服务跨界流动,从而对我国东北地区的水安全进行定量研究与评价。通过利用动态情境下的水安全指数来表征区域的水资源供需平衡情况,可以分析研究区的水生态安全状况,其中 Zhang 等^[32]以及 Fan 等^[65]进一步利用地理探测器分析了区域水资源安全的主要驱动因素。Qin 等^[38]通过构建九种情景,预测 2035 年的土地利用变化、水供给、水消耗、水流供给以及水安全指数,并对九种情景进行水安全等级评定,从而对未来水生态系统服务流管理提出意见。

4.2 区域生态补偿

流域上游的污染会随水体流向下游从而对下游居民的福祉造成损害,继而引发上下游居民之间的矛盾,区域生态补偿是解决流域保护与发展冲突的重要经济手段。对于区域生态补偿来说,基于水生态系统服务流的价值空间流动分析可以帮更好的厘清生态受益方与受损方以及双方主体受益和受损程度,从而能够更加科学和公平的制定生态补偿政策^[46]。

基于水生态系统服务流的生态补偿研究很多都应用了 InVEST 模型。Pei 等^[23]基于 InVEST 模型和综合储水量法,对位于北京和河北的密云水库上游供水量的价值流动进行了分析。Xu 等^[42]基于 InVEST 模型和影子工程法计算了宁夏的供水服务价值流,并考虑区域差异调整指数,确保生态补偿的公平性。Wang 等^[43]利用 InVEST 计算了长三角地区水资源供给量,并利用断裂点模型和场强模型计算生态系统服务价值的转移量。杜贺秋等^[82]利用 InVEST 模型与影子工程法分析了水源涵养生态系统服务价值的空间流动,基于价值转移量和地理探测器模型计算了京津冀各区县的水源涵养生态补偿额度。王健等^[46]通过构建流域横向生态补偿标准核定框架和淡水服务流模型,在全面分析水资源外溢、占用及其价值的基础上,形成了补偿资金收取与分配方案。此外在石羊河流域^[44]、桃溪河流域^[45]、粤港澳大湾区^[48]以及太湖流域^[46]等地皆开展了利用水生态系统服务流进行区域补偿的研究。

4.3 洪水管理

洪水调控是受植被、土壤、强降雨径流等多种因素影响的综合水文过程,湖泊、河流及湿地等生态系统在为洪水提供滞留空间方面发挥着作用^[55],但同时,城镇化的加剧,使得不透水地面积增加,在很大程度上削弱

了洪水调节能力^[54]。基于服务流视角可以帮助更好确定防洪优先区域,从而合理分配资源,达到缓解洪涝灾害的目的。

洪水调节服务流的机制是复杂的,如何确定洪水调节生态系统服务的供应、需求和流量的关键区域的进行洪水管理的关键环节。Bagstad 等^[11]、Goldenberg 等^[29]、Kleemann 等^[56]以及 Liu 等^[55]分别对美国华盛顿州的普吉特湾、瑞典斯德哥尔摩、德国及周边国家以及中国的汉江流域的洪水调节服务流进行了评估。Wanghe 等^[88]开发了防洪生态系统服务流(FRESF)模型,用于综合评估洪水调节生态系统服务的供应、需求和流量。Zhou 等^[54]利用一维降雨-径流模型法和二维洪水传播模型对浏阳河流域的洪水调控生态系统服务流进行了评估,并基于源-汇-流分析,提出了考虑供需关系的洪水调控服务管理框架。

5 总结与展望

(1) 可用的水生态系统服务流分析模型较少,现有分析模型缺陷较多。目前水生态系统服务供需计算模型较为完善,但服务流的评估模型发展较为缓慢。ARIES 模型作为生态系统服务流研究的一个典型模型,并未得到持续更新,导致适配的研究区域较少。SWAT 等模型大多是水文模型,其服务流分析是基于水文关系进行,对于一些不以水流作为载体的服务,如气候调节服务等,难以进行分析。

(2) 缺乏水生态系统服务流与其他服务流之间的权衡与协同分析。水生态系统服务流与其他生态系统服务流之间存在此消彼长的关系,如洪水调节服务流与土壤保持之间存在着一定的权衡;同时水资源供给服务流与粮食生产服务流之间存在协同关系。调节区域生态系统服务流间的相对平衡是保持区域生态系统稳定的重要因素,因此需要对水生态系统服务流与其它服务流之间的权衡与协调进行分析,从而为生态系统服务流管理提供基础信息。

(3) 水生态系统服务与自然生态系统之间相互作用的研究尚未充分开展。生态系统通过提供各种服务来支持水生态系统服务流的运行,而水生态系统服务流也影响着自然生态系统的结构和功能,如水生态系统服务流的变化会使得水生态系统中的生物多样性、生境质量和生态系统稳定性受到影响。水生态系统服务流与自然生态系统之间是互相依存的关系,探究和理解二者之间的相互作用关系对于自然生态系统保护与管理以及增进人类福祉具有重要意义。

基于以上对水生态系统服务流目前研究局限的总结,本研究对其未来发展提出了以下展望:

(1) 开发适配程度更高的水生态系统服务流模型。随着模型技术的日趋成熟以及“3S 技术”的进步,量化以及空间可视化是未来生态系统服务流研究的主要方向,开发新模型,以适配不同类型的水生态系统服务流是未来研究的重要工作,同时结合人工智能以及机器学习以提高模型精度,从而得到更加准确的结果。

(2) 多尺度整合研究。水生态系统服务的流动机制是复杂的,单一尺度的研究是片面的,在未来的研究中需要加强对不同空间和时间尺度上水生态系统服务流的综合研究,以揭示其复杂动态和相互作用机制。

(3) 水生态系统服务流耦合分析。目前已有大量研究对单一水生态系统服务流的供需以及流动机制进行探究,但仍欠缺对水生态系统服务流的耦合分析,如与其他生态系统服务流之间的耦合。生态系统的结构和功能是复杂多样的,单一的水生态系统服务流分析不足以支撑对于区域生态系统的探究,只有清楚了解不同生态系统服务流之间乃至不同区域生态系统服务流之间的相互作用,才能更好地对自然生态系统进行管理以增进人类福祉。

参考文献 (References):

- [1] Global Water Partnerships. Water for Prosperity and Peace: 2024 United Nations World Water Development Report. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2024.
- [2] 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.
- [3] Wang L J, Zheng H, Chen Y Z, Ouyang Z Y, Hu X F. Systematic review of ecosystem services flow measurement: main concepts, methods, applications and future directions. *Ecosystem Services*, 2022, 58: 101479.

- [4] Ruhl J B, Kraft S E, Lant C L. The law and policy of ecosystem services. Washington, D.C.: Island Press, 2007.
- [5] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [6] 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.
- [7] Jiang C, Li D Q, Wang D W, Zhang L B. Quantification and assessment of changes in ecosystem service in the Three-River Headwaters Region, China as a result of climate variability and land cover change. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 199-211.
- [8] 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-Tianjin-Hebei region, China. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159-170.
- [9] Khomalli Y, Elyagoubi S, Maanan M, Razinkova-Baziukas A, Rhinane H, Maanan M. Using analytic hierarchy process to map and quantify the ecosystem services in Oualidia Lagoon, Morocco. *Wetlands*, 2020, 40(6): 2123-2137.
- [10] Liu J Y, Qin K Y, Xie G D, Xiao Y, Huang M D, Gan S. Is the 'water tower' reassuring? Viewing water security of Qinghai-Tibet Plateau from the perspective of ecosystem services 'supply-flow-demand'. *Environmental Research Letters*, 2022, 17(9): 094043.
- [11] Bagstad K J, Villa F, Batker D, Harrison-Cox J, Voigt B, Johnson G W. From theoretical to actual ecosystem services: mapping beneficiaries and spatial flows in ecosystem service assessments. *Ecology and Society*, 2014, 19(2): art64.
- [12] Wang Y W, Hong S, Wang J Z, Lin J Y, Mu H, Wei L Y, Wang Z, Bryan B A. Complex regional telecoupling between people and nature revealed via quantification of trans-boundary ecosystem service flows. *People and Nature*, 2022, 4(1): 274-292.
- [13] Serna-Chavez H M, Schulp C J E, van Bodegom P M, Bouten W, Verburg P H, Davidson M D. A quantitative framework for assessing spatial flows of ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 24-33.
- [14] Gao H, Fu T G, Zhu J J, Wang F, Zhang M, Qi F, Liu J T. Supply and demand patterns investigations of water supply services based on ecosystem service flows in a mountainous area: Taihang Mountains case study. *Sustainability*, 2023, 15(17): 13248.
- [15] Liu Y, Yang Y, Wang Z J, An S S. Quantifying water provision service supply, demand, and spatial flow in the Yellow River Basin. *Sustainability*, 2022, 14(16): 10093.
- [16] Chen Z L, Lin J Y, Huang J L. Linking ecosystem service flow to water-related ecological security pattern: A methodological approach applied to a coastal province of China. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118725.
- [17] Wang Z Z, Zhang L W, Li X P, Li Y J, Frans V F, Yan J P. A network perspective for mapping freshwater service flows at the watershed scale. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101129.
- [18] 董丽青. 基于 SPANs 模型碳固定服务和水产出服务供给/需求和服务流的量化评估与制图[D]. 临汾: 山西师范大学, 2018.
- [19] 吕悦风. 城乡生态系统服务流的传导机理与量化模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [20] 刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 生态系统服务流研究进展. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2161-2171.
- [21] 肖华斌, 郭妍馨, 王玥, 吴扬睿. 从效用评估到过程测度: 生态系统服务流研究进展. *风景园林*, 2022, 29(10): 32-37.
- [22] Verhagen W, Kukkala A S, Moilanen A, van Teeffelen A J A, Verburg P H. Use of demand for and spatial flow of ecosystem services to identify priority areas. *Conservation Biology*, 2017, 31(4): 860-871.
- [23] Pei S, Zhang C X, Liu C L, Liu X N, Xie G D. Forest ecological compensation standard based on spatial flowing of water services in the upper reaches of Miyun Reservoir, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100983.
- [24] Momblanch A, Beevers L, Srinivasalu P, Kulkarni A, Holman I P. Enhancing production and flow of freshwater ecosystem services in a managed Himalayan river system under uncertain future climate. *Climatic Change*, 2020, 162(2): 343-361.
- [25] Vrebas D, Staes J, Vandenbroucke T, D'Haeyer T, Johnston R, Muhumuza M, Kasabeke C, Meire P. Mapping ecosystem service flows with land cover scoring maps for data-scarce regions. *Ecosystem Services*, 2015, 13: 28-40.
- [26] Xu J, Xiao Y, Xie G D, Jiang Y. Ecosystem service flow insights into horizontal ecological compensation standards for water resource: A case study in Dongjiang Lake basin, China. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(2): 214-230.
- [27] Schirpke U, Tappeiner U, Tasser E. A transnational perspective of global and regional ecosystem service flows from and to mountain regions. *Scientific Reports*, 2019, 9: 6678.
- [28] Zhu Q, Tran L T, Wang Y, Qi L, Zhou W M, Zhou L, Yu D P, Dai L M. A framework of freshwater services flow model into assessment on water security and quantification of transboundary flow: A case study in northeast China. *Journal of Environmental Management*, 2022, 304: 114318.
- [29] 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, 593-594: 599-609.
- [30] Li X, Sun W, Zhang D, Huang J L, Li D H, Ding N, Zhu J F, Xie Y J, Wang X R. Evaluating water provision service at the sub-watershed scale by combining supply, demand, and spatial flow. *Ecological Indicators*, 2021, 127: 107745.
- [31] Guan D J, Deng Z, Zhou L L, Fan X F, Yang W, Peng G C, Zhu X S, Zhou L J. How can multiscenario flow paths of water supply services be simulated? A supply-flow-demand model of ecosystem services across a typical basin in China. *Science of The Total Environment*, 2023, 893: 164770.
- [32] Zhang C, Li J, Zhou Z X, Sun Y J. Application of ecosystem service flows model in water security assessment: A case study in Weihe River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2021, 120: 106974.
- [33] Sun S Q, Lü Y H, Fu B J. Relations between physical and ecosystem service flows of freshwater are critical for water resource security in large dryland river basin. *Science of The Total Environment*, 2023, 857(Pt 3): 159549.
- [34] Chen D S, Li J, Yang X N, Zhou Z X, Pan Y Q, Li M C. Quantifying water provision service supply, demand and spatial flow for land use

- optimization; A case study in the YanHe watershed. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101117.
- [35] Deng C X, Zhu D M, Liu Y J, Li Z W. Spatial matching and flow in supply and demand of water provision services; A case study in Xiangjiang River Basin. *Journal of Mountain Science*, 2022, 19(1): 228-240.
- [36] Wang X Y, Zhang Z D, Liu F R, Chen S J, Dong J B, Mao Y Y, Cao J. Study on supply-demand balance analysis and service flow of water resources in Dongjiang River Basin. *Water*, 2022, 14(13): 2060.
- [37] 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.
- [38] Qin K Y, Liu J Y, Yan L W, Huang H J. Integrating ecosystem services flows into water security simulations in water scarce areas: present and future. *Science of The Total Environment*, 2019, 670: 1037-1048.
- [39] Zou Y, Mao D H. Analysis of water yield service of Lianshui River Basin in China based on ecosystem services flow model. *Water Supply*, 2022, 22(1): 335-346.
- [40] Togbévi Q F, Bossa A Y, Yira Y, Preko K, Sintondji L O, van der Ploeg M. A multi-model approach for analysing water balance and water-related ecosystem services in the Ouriyori Catchment (Benin). *Hydrological Sciences Journal*, 2020, 65(14): 2453-2465.
- [41] Palomo I, Martín-López B, Potschin M, Haines-Young R, Montes C. National Parks, buffer zones and surrounding lands; Mapping ecosystem service flows. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 104-116.
- [42] Xu J, Xiao Y, Xie G D, Liu J Y, Qin K Y, Wang Y Y, Zhang C S, Lei G C. How to coordinate cross-regional water resource relationship by integrating water supply services flow and interregional ecological compensation. *Ecological Indicators*, 2021, 126: 107595.
- [43] Wang C D, Li W Q, Sun M X, Wang Y T, Wang S B. Exploring the formulation of ecological management policies by quantifying interregional primary ecosystem service flows in Yangtze River Delta region, China. *Journal of Environmental Management*, 2021, 284: 112042.
- [44] 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.
- [45] Tu Z S, Chen Z L, Ye H D, Chen S Y, Huang J L. Integrating water quality restoration cost with ecosystem service flow to quantify an ecological compensation standard; A case study of the Taoxi Creek watershed. *Water*, 2022, 14(9): 1459.
- [46] 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.
- [47] Gao X L, Huang B B, Hou Y, Xu W H, Zheng H, Ma D C, Ouyang Z Y. Using ecosystem service flows to inform ecological compensation: theory & application. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(9): 3340.
- [48] Wu J Y, Huang Y T, Jiang W K. 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*, 2022, 375: 134081.
- [49] Lin J Y, Huang J L, Prell C, Bryan B A. Changes in supply and demand mediate the effects of land-use change on freshwater ecosystem services flows. *Science of The Total Environment*, 2021, 763: 143012.
- [50] Zou Y, Mao D H. Simulation of freshwater ecosystem service flows under land-use change; A case study of Lianshui River Basin, China. *Sustainability*, 2022, 14(6): 3270.
- [51] 陈梓隆, 林静玉, 黄金良. 水质胁迫下闽东南地区流域淡水生态系统服务流研究. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(8): 1051-1063.
- [52] 林咏园, 税伟, 李志攀, 杨海峰, 朱粟锋, 付银. 基于水-粮食-能源级联关系的水服务流矩阵构建. *福州大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(5): 646-652.
- [53] Karabulut A, Egoh B N, Lanzanova D, Grizzetti B, Bidoglio G, Pagliero L, Bouraoui F, Aloe A, Reynaud A, Maes J, Vandecasteele I, Mubareka S. Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube River Basin. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 278-292.
- [54] Zhou K J, Jiao S, Han Z W, Liu Y C. Assessment of flood regulation service based on source-sink landscape analysis in urbanized watershed. *River Research and Applications*, 2023, 39(7): 1382-1398.
- [55] Liu W P, Li Y, Chen S P. Navigating the ecosystem flood regulation service flows from subbasin to catchment in the Han River Basin. *Environmental Research Letters*, 2023, 18(10): 104026.
- [56] Kleemann J, Schröter M, Bagstad K J, Kuhlicke C, Kastner T, Fridman D, Schulp C J E, Wolff S, Martínez-López J, Koellner T, Arnhold S, Martín-López B, Marques A, Lopez-Hoffman L, Liu J G, Kissinger M, Guerra C A, Bonn A. Quantifying interregional flows of multiple ecosystem services-A case study for Germany. *Global Environmental Change*, 2020, 61: 102051.
- [57] Schirpke U, Candiago S, Egarter Vigl L, Jäger H, Labadini A, Marsoner T, Meisch C, Tasser E, Tappeiner U. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services. *Science of The Total Environment*, 2019, 651(Pt 1): 928-941.
- [58] Lin J Y, Huang J L, Hadjikakou M, Huang Y L, Li K, Bryan B A. Reframing water-related ecosystem services flows. *Ecosystem Services*, 2021, 50: 101306.
- [59] Wang Y D, Li J, Wang Y D, Bai J Z. Regional social-ecological system coupling process from a water flow perspective. *Science of The Total Environment*, 2022, 853: 158646.
- [60] Dang K B, Burkhard B, Müller F, Dang V B. Modelling and mapping natural hazard regulating ecosystem services in Sapa, Lao Cai Province, Vietnam. *Paddy and Water Environment*, 2018, 16(4): 767-781.
- [61] Lin Z Y, Xiao Y, Ouyang Z Y. Assessment of ecological importance of the Qinghai-Tibet Plateau based on ecosystem service flows. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(7): 1725-1736.

- [62] Liqueste C, Piroddi C, Macías D, Druon J N, Zulian G. Ecosystem services sustainability in the Mediterranean Sea: assessment of status and trends using multiple modelling approaches. *Scientific Reports*, 2016, 6: 34162.
- [63] Goyette J O, Cimon-Morin J, Mendes P, Thériault M, Pellerin S, Poulin M. Planning wetland protection and restoration for the safeguard of ecosystem service flows to beneficiaries. *Landscape Ecology*, 2021, 36(9): 2691-2706.
- [64] Zhang J X, He C Y, Huang Q X, Li L. Understanding ecosystem service flows through the metacoupling framework. *Ecological Indicators*, 2023, 151: 110303.
- [65] Fan Z, Wang X B, Zhang H J. Water security assessment and driving mechanism in the ecosystem service flow condition. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(47): 104833-104851.
- [66] 陈燕, 谭堰琴, 邱晓敏, 宋新山, 周镇宇, 万荣荣. 供需关系下长三角城市群生态系统服务空间流转. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 403-411.
- [67] 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.
- [68] 郑婷, 周自翔, 白继洲. 生态系统服务流模拟与特征分析——以泾河流域水土保持服务为例. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(4): 21-33.
- [69] Boithias L, Acuña V, Vergoñós L, Ziv G, Marcé R, Sabater S. Assessment of the water supply: demand ratios in a Mediterranean Basin under different global change scenarios and mitigation alternatives. *Science of The Total Environment*, 2014, 470-471: 567-577.
- [70] Chen J Y, Jiang B, Bai Y, Xu X B, Alatalo J M. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimisation. *Science of The Total Environment*, 2019, 650(Pt 1): 1426-1439.
- [71] 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.
- [72] Bagstad K, Villa F, Johnson G W, Voigt B J. ARIES-Artificial Intelligence for Ecosystem Services: A guide to models and data, version 1.0. ARIES report series, 2011, 1.
- [73] 吕一河, 张立伟, 王江磊. 生态系统及其服务保护评估: 指标与方法. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1237-1243.
- [74] Zank B, Bagstad K J, Voigt B, Villa F. Modeling the effects of urban expansion on natural capital stocks and ecosystem service flows: A case study in the Puget Sound, Washington, USA. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 149: 31-42.
- [75] 孙雪萍. 生态系统服务流动性分析——以张承地区水资源供给服务为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [76] 欧阳志云, 赵同谦, 王效科, 苗鸿. 水生态服务功能分析及其间接价值评价. *生态学报*, 2004, 24(10): 2091-2099.
- [77] 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.
- [78] 张杰, 周业晶, 袁玉乔, 周敬宣. 生态系统服务价值核算方法比较研究. *环境与可持续发展*, 2023, 48(5): 110-118.
- [79] Olschewski R, Klein A M, Tschamtké T. Economic trade-offs between carbon sequestration, timber production, and crop pollination in tropical forested landscapes. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3): 314-319.
- [80] Kareiva P, Marvier M. Conserving Biodiversity Coldspots: Recent calls to direct conservation funding to the world's biodiversity hotspots may be bad investment advice. *American Scientist*, 2003, 91(4): 344-351.
- [81] Robertson G P, Swinton S M. Reconciling agricultural productivity and environmental integrity: a grand challenge for agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, 3(1): 38-46.
- [82] 杜贺秋, 于铎, 张蓬涛, 张路路. 京津冀地区水源涵养价值流动分析及生态补偿额度. *生态学报*, 2022, 42(23): 9871-9885.
- [83] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
- [84] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [85] Tong H L, Shi P J. Using ecosystem service supply and ecosystem sensitivity to identify landscape ecology security patterns in the Lanzhou-Xining urban agglomeration, China. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(11): 2758-2773.
- [86] Zhang J Y, Wang L C. Assessment of water resource security in Chongqing City of China: what has been done and what remains to be done? *Natural Hazards*, 2015, 75(3): 2751-2772.
- [87] Villa F, Bagstad K J, Voigt B, Johnson G W, Portela R, Honzák M, Batker D. A methodology for adaptable and robust ecosystem services assessment. *PLoS One*, 2014, 9(3): e91001.
- [88] Wanghe K Y, Guo X L, Ahmad S, Tian F, Nabi G, Igorevich Strelnikov I, Li K M, Zhao K. FRESF model: An ArcGIS toolbox for rapid assessment of the supply, demand, and flow of flood regulation ecosystem services. *Ecological Indicators*, 2022, 143: 109264.