

生态系统水供给服务空间流动研究进展

王丹妮^{1,2}, 郭青云¹, 王志浩¹, 林慧龙¹

(1.兰州大学草地农业生态系统国家重点实验室,兰州大学农业农村部草牧业创新重点实验室,
兰州大学草地农业科技学院,兰州 730020;2.河西学院,甘肃 张掖 734000)

摘要: 20世纪90年代以来,生态系统服务流动是目前生态学、经济学和地理学综合研究领域的热点问题。水供给服务流动特征明显,且在众多生态系统服务中占据中心位,是连接生态系统(供给区)与人类生产生活(需求区或受益区)的桥梁,是调节水流量、水循环、水质的重要途径。从供需角度分析水供给服务流动(输送区),模拟流动路径,对于实现水供给服务效益起到关键纽带作用,与此同时,它更强调社会经济与生态环境的协调配合,为建立生态系统和社会经济系统之间的联系具有重要理论和实践意义。因此,针对国内水供给服务空间流动的研究亟待开展。试图构建生态系统水供给服务分析思路框架,识别供给和受益范围,确定服务流动方式、流量及流动路径,探索水供给与需求之间的因果关系。采用文献分析方法系统梳理水供给服务空间流研究进展,分别进行纵向和横向对比。结果表明:(1)按照时间顺序可以分为基础萌芽期、理论发展期、空间关联研究期3个时期;(2)按功能区域可划分为水流供给区、需求区和输送区3个部分,并对比分析各区域定量分析的方法;(3)综合分析结果,国外研究发展快,主要以模型模拟为主。国内水供给服务的研究整体处于起步阶段,停留在生态系统供给与需求的各自时空格局研究层面,水供需服务和空间路径之间的关联缺乏深入研究。

关键词: 生态系统服务; 水供给服务; 空间流动; 供需平衡关系

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)03-0001-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.03.001

Research Progress on Spatial Flow of Ecosystem Water Supply Services

WANG Danni^{1,2}, GUO Qingyun¹, WANG Zhihao¹, LIN Huilong¹

(1.State Key Laboratory of Grassland Agro-ecosystems, Key Laboratory of Grassland Livestock

Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Pastoral Agriculture

Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020; 2.Hexi University, Zhangye, Gansu 734000)

Abstract: The flow of ecosystem services has been a hot topic in the comprehensive research fields of ecology, economics and geography since the 1990s. Water supply service has obvious flow characteristics and occupies a central position among many ecosystem services. It is a bridge connecting the ecosystem (supply area) and human production and life (demand area or beneficiary area), and is an important way to regulate water flow, water circulation, and water quality. Analyzing the flow of water supply services (conveyor area) from the perspective of supply and demand, and simulating the flow path, play a key role in realizing the benefits of water supply services. It also emphasizes the coordination and cooperation of social economy and ecological environment. It has important theoretical and practical significance for establishing the relationship between ecosystems and socio-economic systems. Therefore, research on the spatial flow of domestic water supply services needs to be carried out urgently. This research attempts to build a framework for the analysis of ecosystem water supply services, identify the scope of supply and benefit, determine the service flow mode, flow and flow path, and explore the causal relationship between water supply and demand. The literature analysis method is used to systematically sort out the research progress of the spatial flow of water supply services, and the vertical and horizontal comparisons are carried out respectively. The results show that: (1) According to the time sequence, it can be divided into three periods the basic germination period, the

收稿日期:2021-09-14

资助项目:国家自然科学基金项目(32171680,31772666)

第一作者:王丹妮(1993—),女,在读博士研究生,主要从事草业经济与社会发展研究。E-mail:wangdn18@lzu.edu.cn

通信作者:林慧龙(1965—),男,教授,博导,主要从事草业系统分析、草地生态经济模型与模拟、草业经济与政策研究。E-mail:linhuilong@lzu.edu.cn

theoretical development period and the spatial correlation research period. (2) According to the functional area, it can be divided into three parts, water supply area, demand area and transportation area, and the quantitative analysis methods of each area are compared and analyzed. (3) Comprehensive analysis results, foreign research has developed rapidly, mainly based on model simulation. The research on domestic water supply services as a whole is in its infancy, and stays at the research level of the respective temporal and spatial patterns of ecosystem supply and demand. There is a lack of in-depth research on the relationship between water supply and demand services and spatial paths.

Keywords: ecosystem services; water supply services; spatial flow; balance between supply and demand

20 世纪以来,生态系统服务的研究逐渐成为生态、经济、地理等学科综合研究的热点。随着专家学者们对生态系统服务研究的深入,研究内容的深度和广度也发生变化。早期的研究主要关注生态系统服务的形成和内在机制,认为生态系统服务是维系人类生存生活的环境条件,强调对生态系统服务的研究。随着千年生态系统评估(millennium ecosystem assessment, MA)在全球范围内开展,学者们的研究方向发生了转变^[1]。已有学者^[2-4]开始关注生态系统与人类福利之间的关系,通过研究某类生态系统服务的增减情况,来预判其对人类福利的影响。然而,这些研究忽略了空间匹配不均的问题,如生态系统提供的资源能否满足人类的需求^[5-6]。部分学者开始关注生态系统空间流动的研究,并在生态学、经济学的基础上融入了地理学知识,对生态系统服务(产生、空间路径及使用)的全过程进行研究。

近年来,在全球气候变暖和水质恶化的背景下,水资源短缺现象日益加剧,水资源供给与人类需求之间的矛盾愈发强烈^[7-8]。水供给服务是生态服务系统调节水流量、水循环、改善水质的重要途径,是表征生态系统安全的关键指标。该功能对整个流域的生态系统和水资源产生影响。研究我国水供给服务功能,明确不同区域水供给服务与人类福利之间的影响关系。生态系统中河流湖泊星罗密布,河道交错纵横,水资源供给是非常复杂的过程。因此,理清水供给服务从供给到需求的空间流动过程,深入探究生态系统服务对人类福利产生的影响,有助于建立水供给与需求之间的因果关系。

1 水供给服务流研究历程

1.1 基础萌芽期

水供给服务功能的研究可追溯至 19 世纪对森林生态系统水供给功能的研究^[9-10]。此阶段研究以水供给量及其价值研究为主,而供给研究是空间流动研究的基础。

从生态学角度出发基于水供给服务的过程进行研究。已有研究者^[11]通过观测野外试验和小流域对比试验来探讨生态系统与水源涵养供给之间的关系,并分析

内在机制。森林水供给的影响因素主要有地表蒸散发、降雨截留、植被等因素。德国学者 Ebmager 等在巴伐利亚地区观测林区首次探究地表蒸散发的因素^[11];1971 年 Rutter 等^[12]开始林冠截留模型的研究,Gash^[13]在 Rutter 的基础上精进模型,此后出现了众多计算枯落物持水量、土壤蓄水量和森林蒸散发的经验公式。Robinson 等^[14]在瑞士山区布置了 2 个集水区对比试验,深入研究了植被对集水区径流量的影响;姜志林^[15]和王绍忠^[16]通过田间试验探究影响因素,并初步使用模型模拟定量研究水源涵养供给量。但这些研究更多关注生态系统水供给服务的形成和内在机制,忽略了人类需求。

从经济学角度出发开展水供给服务经济价值评价的研究。在 1997 年和 2003 年分别出现了影响未来发展的 2 座里程碑:(1)Costanza 等^[2]估算了全球生态系统服务与自然资本价值,将生态系统服务功能定义为“人类直接或间接地从生态系统功能得到的效益”;(2)联合国前秘书长安南^[17]呼吁 2001—2005 年间组织开展了全球千年生态系统评估对全球生态系统状况进行评估,将生态系统服务功能分为供给、调节、支持和文化 4 类。这一时期生态系统服务功能的研究颇多,成果显著,定义了生态系统服务的概念,建立和完善了生态系统服务功能的分类体系,成为 20 世纪学者们运用最广泛的经济评价和功能分类框架体系。后来的学者在此基础上评估了生态系统的价值,核算方法主要有 4 种:(1)欧阳志云等^[18]运用生态系统生产总值 GEP(gross domestic product)指标核算经济价值,2018 年浙江省丽水市 GEP 为 5 024.47 亿元,是 GDP 的 3.6 倍,Ouyang 等^[19]以青海省为例,运用 GEP 指标核算生态价值,研究结果表明,青海省 2000 年 GEP 大于 GDP,2015 年 GEP 约为 GDP 总值的 75%;(2)Xie 等^[20]运用当量因子法进行自然资源资产价值化;(3)还有学者^[21-22]将生态服务转化成太阳能的价值核算方法;(4)通过寻找相关替代产品和服务的市场价格,间接得出其具有的价值,经常采用替代市场法计算水供给价值^[23-26]。这些成果评价了水供给服务功能对人类的贡献,考虑了人对

水资源的需求,但人类需求有不确定性,同时受到地理区域的影响,很难准确把握水供给和人类需求之间的平衡关系。

1.2 理论发展期

生态系统供给服务是指特定区域和时间段内提供生态系统产品和服务的能力,如水供给服务即提供水供给、净化水质、水产品供给等。生态系统单元具有空间属性,供给单元也具有显著的空间异质性,生态系统服务空间特征的研究是生态系统服务流研究的基础。21世纪初,空间模拟和绘图成为生态系统空间流动的主要研究。水供给可以通过流域尺度水量平衡公式来模拟,将日降雨、蒸散发、土壤蓄水量与水文模型相联系模拟日径流,并通过长期日降雨和河流监测数据校准^[27]。随着供给服务模拟和绘图研究的发展,逐渐出现 InVEST、SWAT、VIC 等水文模型工具,其中 InVEST 模型应用最广泛,已在非洲尼罗河流域^[28]、印度尼西亚西爪哇省 Citarum 河流域^[29]、中国渭河流域^[30]、疏勒河流域上游地区^[31]等多个地区应用,并取得良好的模拟效果,模型模拟有助于了解水供给服务的空间格局,有利于不同生态管理措施下供给服务的变动调节。然而大多研究没有把供给与需求关联起来,难以提出系统有效的生态系统管理政策措施。

1.3 空间关联研究期

已有报道水供给研究较多,需求研究较少,且彼此独立没有关联,而生态系统服务流动研究实质上就是在服务供给与需求之间建立时空关联。水供给服务空间流动由供给区、需求区、传输区(包含流量和流向)3个部分组成,进入21世纪中期,有学者^[32]逐渐开始关注需求和传输区2个区域的研究。水供给服务需求的研究多为定性分析,定量研究从较大的区域尺度对水足迹、水消费结构及用水效率进行评价。张城等^[33]基于VIC模型模拟2005年、2010年和2015年的渭河水资源安全格局,结合流域所涉辖区的社会经济数据和水资源使用情况分析能量源区和受益区之间的供需关系。Syrbe等^[34]提出服务输送区域的研究认为,存在供给与需求连接的地理区域,而服务的流动传输及其变换过程是研究的难点。Costanza等^[35]将生态系统服务按照空间特征划分,分为全球非临近、局部临近、流动方向型、原位型和使用者迁移型。Fisher等^[36]在Costanza等^[35]研究的基础上将服务产生和效益实现空间关系分为:(1)原位——服务供给和效益实现在同样位置;(2)全方向——服务在一个位置提供,但是惠及周边景观而没有方向偏好;(3)方向性——服务供给惠及服务流动方向的特定位置。因此,理解服务产生及其效益实现之间的空间关系是研究生态系统服务空间流动的基础。Maass等^[37]对墨西哥太平洋海岸的

Chamela 热带干旱地区淡水供给、洪水控制等9项生态系统供给服务功能评价,并刻画了生态系统服务从供给区向受益区单元能量输送的示意图。肖玉等^[38]对20世纪90年代以来国内外生态系统服务空间流动研究进行概述,阐释了生态系统服务空间流动研究的重要性及必要性,提出未来发展的方向是分布式空间模拟。徐洁^[39]对宁夏防风固沙服务和水供给服务物质流与价值流的供给、需求、流动的作用机理进行深入研究,并构建横向生态补偿框架。Li等^[40]建立简化版的地表水资源流动模型,以栅格为流动单元模拟研究区上下游间和输送区之间的空间关联,并判定下游供小于求,需要水资源补给。美国佛蒙特大学在美国自然基金的资助下开展生态系统服务人工智能(artificial intelligence for ecosystem services, ARIES)研究,提出“服务路径属性网络”^[41],带动了输送区的流量、流向以及过程消耗的空间路径研究,并绘制地理空间栅格图,但该模型需要大量的数据和科学知识支撑,模型的应用推广受到影响。

总体来看,人们对水供给服务空间流动的研究处于起步和概念化阶段(图1),对空间流动路径、流量和范围等空间属性特征和空间位置之间反馈机制的研究也尚不成熟。因此,需要长足的时间去深入研究。

2 水供给服务定义及其内涵

水供给服务是生态系统服务功能中的重要功能之一,不同研究者对其有不同的认识和理解,至今未形成一个统一的定义。在以往多数研究中,水源涵养、水供给二者的定量计算方法一致,没有对其进行明确的区分,这导致研究中出现概念混淆、案例无法对比的问题。为明确研究对象,现对已有报道归纳梳理。

2.1 水源涵养

目前最为全面的研究是森林生态系统,主要表现形式是通过林冠层、枯落物层和土壤层拦截降水,对降水进行二次分配,从而调节径流、净化水质。张彪等^[42]对森林水源涵养的定义有广义和狭义之分,狭义是指森林拦截降雨、调节径流流量的功能,广义是指森林生态系统水文过程及其效应的过程。李士美等^[43]认为,水源涵养和水供给定义之间相互联系又相互区别,森林水源涵养服务包括水文调节和水供给2项功能。王晓学等^[44]认为常用的定量计算方法是公式计算方法,包括水量平衡法、综合蓄水量法。水源涵养的研究从生态学角度出发,更关注生态系统服务的过程和效应,但其定量研究方法仅限于简单的公式换算,对内在深层的讨论不足,如森林土壤蓄水量和小流域试验观测,是否能推至大尺度流域范围等^[45]。

2.2 水供给

Xu 等^[46]从广义和狭义角度区分水供给的定义,狭义上水供给是指生态系统中植被生长需水和生产生活用水,广义是指产水量。肖玉等^[38]认为水供给由 2 部分组成:一是自然生态系统中植被、土壤拦蓄水、蒸散发量、灌溉用水等;二是降水流向下游水生态系统以及人类需求用水。因此,水供给量定量研究也常被学者们分为 2 类:从狭义上,水供给量是植被作物需水量、径流量与土壤含水量之和,与水源涵养的

定量计算方法一致;从广义上,水供给是流域内水资源从供给端(降水量)与需求端(实际蒸散发)之差,常用生态模型模拟大尺度区域^[47]。本文认为二者之间对于降水拦截保蓄及二次分配调节的过程理解是相同的,不同在于水源涵养注重生态系统自身水流动循环调节的过程,而水供给服务在水源涵养的基础上延伸,对二次分配后人类需求进行考量,更注重生态服务与人类福祉之间的关系,探寻下游地区水供给平衡和人类需求之间的因果关系。

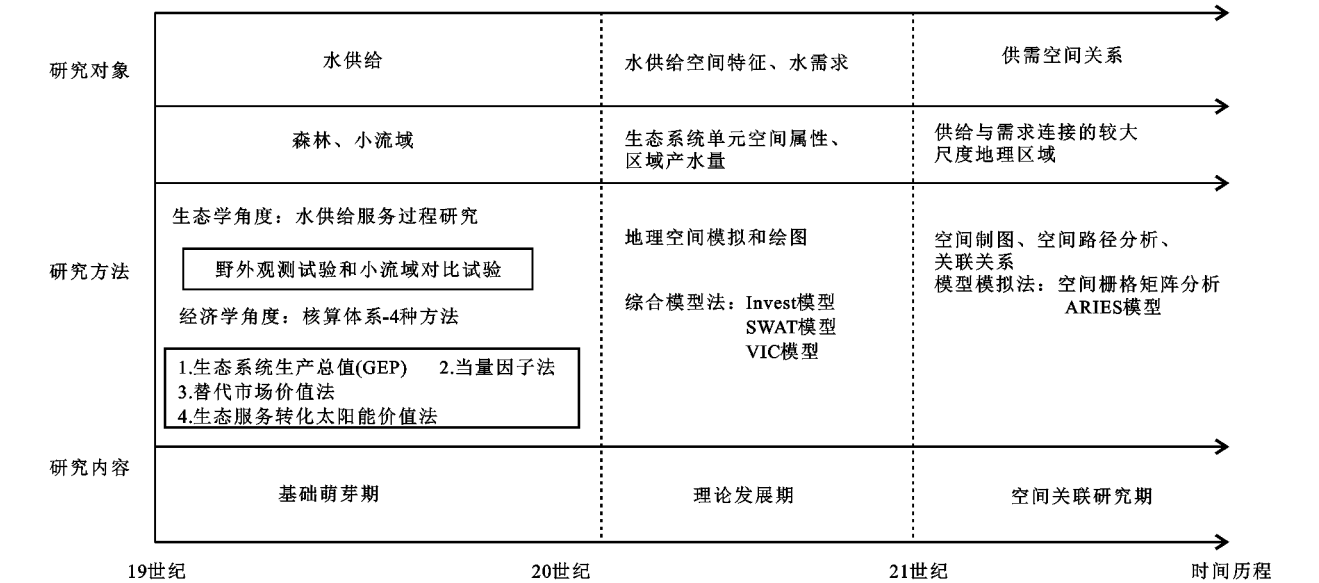


图 1 水供给服务空间流动研究历程

水供给服务空间流动是一个纵向和横向相结合的动态过程:(1)大气降雨降雪垂直向下的过程中,一部分水被森林植被截留、蒸散发,另一部分水下渗至表层土壤,经过包气带、饱水带潜入深层土壤,成为深层地下水(即纵向流动);(2)降雨、降雪流入河流中,因地势高低不同(DEM),伴随河流自上游向下游流动(即横向流动)。水供给服务极具流动性和特殊性,空间关系极其复杂,定量计算存在重复计算的风险。因此,水供给服务空间流动的研究必须有全局意识,供给区、需求区、输送区 3 个部分相互关联,缺一不可。水供给区模型评估生态系统产水量,即定量模拟纵向流动过程,而水需求模型估算生产生活区用水量(用水总量),则是定量模拟横向流动过程,输送区在流动过程中传递物质和能量(物质能量流,包含流量和流向)。水供给平衡和人类需求之间的因果关系,是在供给区和需求区定量研究的基础上,运用空间栅格运算,得到研究区范围内供需平衡时空格局分布,从而判断该区域属于哪种供需类型,科学合理地调节和管理水资源。

3 水供给服务空间流量化评估方法

水供给服务空间流具有显著的空间属性和流动性,纵横交织的河流(干支流)是供给区向需求区输送能量

物质的重要路径,不仅传递水资源,还传递水产品。供给区产生多少能量物质、能传输多少、传输方向、途中损耗以及需求区是否满足等是目前研究的重要问题,因此水供给服务空间流动量化研究极其重要。

3.1 供给区评估方法

3.1.1 中小尺度公式计算法 水量平衡法是一个流域的实际蒸散发量由水分的供应条件(降水量)和能量的供应条件(蒸发能力)达到均衡的状态^[48]。将降水量与蒸散量、径流量的差视为水供给量,缺点是忽略了地表水和地下水的相互作用^[49]。水量平衡的原理适用于所有时空尺度,数据处理方法简单易于操作,是目前评估水源涵养服务最有效和应用最广泛的基础公式和原理^[50]。蓄水能力法包括土壤蓄水能力法、林冠截留剩余量法和综合蓄水能力法等。土壤蓄水能力法假设水源涵养量是雨水降落到林地后渗入土壤的蓄水量,忽视其他作用层的水源涵养能力,可能造成评估结果偏低。综合蓄水能力法则综合考虑了植被冠层最大截留能力、枯落物层最大持水能力、土壤层最大蓄水能力,效果最为理想^[51]。曹叶琳等^[52]基于水量平衡法对陕西省区域生态系统水源涵养进行科学评估表明,2000—2014 年陕西省水源涵养呈整体上升、局部下降趋势,气候因素对水源涵养的影响较强。王鹏

程^[53]运用综合蓄水能力法对三峡库区森林水源涵养功能评估发现,植被层截留为 288.82~586.00 mm,枯落物持水量为 30.58~117.58 mm,土壤层入渗为 549.36~710.78 mm。这 2 种方法适用于中小尺度水供给定量化研究,但是存在 2 个缺陷:一是实际的陆地蒸散发量难以计算,检验系数法易导致显著的计算误差;二是传统方法多利用径流系数法来估算流域径流量,径流量也并非真正的水供给量。

3.1.2 基于生态模型的评估方法 目前使用最广泛的生态模型有 InVEST 模型、SWAT 模型和 VIC 模型(表 1)。美国斯坦福大学开发的 InVEST(integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型中的 InVEST 产水模块根据 Budyko 假设的水热耦合平衡方程,基于气候、地形高程和土地利用的数据计算流域内每个栅格的径流量,产水量为区域上每个栅格单元的降

水量减去实际蒸散量的差值。经过计算,最后得到区域产水量的空间分布图。该模型目前已在中国丹江流域^[54]、秦岭^[55]、黄土高原^[56]、黄河流域^[57]、美国肯塔基^[58]、西非^[59]等多个国家及地区应用,取得较好的模拟效果,但模型参数的取值具有不确定性,需进一步模拟验证。美国农业研究部研发的 SWAT 模型是分布式生态水文模型,可分析预判流域内水文过程的长期动态变化,物理机制强,能准确分析水文时空变化特征^[60-61]。VIC 分布式水文模型(variable infiltration capacity)由华盛顿大学、加利福尼亚大学、伯克利分校以及普林斯顿大学的研究者共同开发,基于水量平衡“黑箱”原理^[62]。VIC 模型将区域栅格化,每个栅格包含几组数据并单独计算,数据包括土壤数据、植被数据和气象数据,用空间分布函数计算水量的变化,目前已广泛应用于大规模的水文过程模拟中^[63]。

表 1 水供给区生态模型定量评估方法

模型	公式	尺度(时间/空间)	描述	研究机构
InVEST	$WY=(1-\frac{AET}{P})\times P$ $R=\min(1,\frac{249}{v})\times\min(1,\frac{0.9\times TI}{3})\times\min(1,\frac{K_{sat}}{300})\times WY$	年/流域	可视化模型、动态评估;评估年平均水供给量,输入数据较多	美国斯坦福大学
SWAT	$Q=\sum_{i=1}^n (P_i-ET_i-SURQ_{ij})\cdot A_i$	日、月、年/流域	模型物理机制强,能精确模拟,但模型校正困难,受参数影响大	美国农业研究部
VIC	$Water_{supply}=Water'_{supply}\times Area_{grid}\div 1000$ $Water_{supply}=Runoff+Baseflow-Evap_flow$	年/流域	以数学公式的方式进行集成处理,使 VIC 模型具备扎实的数学意义和较高的物理基础	美国由华盛顿大学、加利福尼亚大学、伯克利分校以及普林斯顿大学的研究者共同研制开发

注:WY 为产水量(mm);AET 为实际蒸散发量(mm);P 为降水量(mm);R 为水供给量(mm);TI 为地形指数;K_{sat} 为土壤饱和导水率(cm/d);ET 为蒸散发(mm);SURQ 为地表径流量(mm);A 为面积(km²)。

3.2 需求区评估方法

水供给服务流动是由生态系统单元组成,每个单元是一个栅格,通过栅格运算得到水需求量。水需求量是指人类从事生产生活等活动对水资源的需求与消耗,以及空间分布的特征分析,不包含自然界中植被生长用水、河流截留、下渗等地表水分损失部分。Gao 等^[64]将水供给服务的需求量被认定为用水量,用水量数据采用水资源公报中各行政分区(地市级)的实际数据,包括农业用水、工业用水、居民生活用水(城镇生活、城镇公共、农村人畜取水)、生态用水(生态环境用水)4 部分。用水类别和统计方式在不同省份之间有一定的差别。基于各省市人口数量、土地利用类型,以及用水量和用水类别数据进行空间计算,并通过栅格运算最终得到研究区水需求量的时空分布图。

水需求服务空间模型构建分为 2 步:一是基于行政区域的流域用水量进行公式计算(公式(1));二是依据行政区域空间分布图、土地利用类型和用水分配表,将用水数据空间离散化,得到空间水需求数据,绘制水需求服务时空图。

$$W_{Ux}=W_{agrx}+W_{indx}+W_{domx}+W_{livx} \tag{1}$$

式中:W_{Ux} 为 x 行政区域的水需求总量(m³);W_{agrx} 是指 x 行政区域的农业用水量(m³);W_{indx} 是指 x 行政区域的工业用水量(m³);W_{domx} 是指 x 行政区域的居民生活用水量(m³);W_{livx} 是指 x 行政区域的放牧饲养牲畜用水量(m³)。

3.3 传输区评估方法

3.3.1 区域尺度矩阵和生态模型综合模拟 水流动模拟是基于自然水流汇流状态过程,不考虑人为因素、水流的产生、流向、流量以及过程消耗。区域水供给量受到高程(DEM)、土地利用类型(LUCC)、水流流向等因素影响,试验观测还不能推至区域范围尺度,需要借助模型大数据和矩阵分析法综合模拟。Li 等^[40]运用相同行列数的 5 个矩阵,分别是水供给服务的区域界线(a)、土地利用类型 LUCC(b)、水流流向规则(c)、水供给量(d)和水需求量(e),基于 InVEST 模型和水量平衡方程计算得出水供给服务的供给矩阵(d),基于不同类别用水量和相对应的土地利用类型建立空间对应关系得出需求矩阵(e),流向矩阵是由 DEM 高程数据提取获得。但是水供给与需求之间存在供需不对等的情况,即供过于求(供>

需)和供不应求(供<需)(图 2)。那么如何将矩阵和供需问题相结合,分析供需因果关系成为现今学者们研究的重点。刘颂等^[65]运用矩阵分析法对嘉兴市水文调节服务进行研究,2015 年嘉兴市大部分地区处于供不应求的状态。徐洁^[39]模拟宁夏回族自治区水供给服务空间流动,首先建立 5 个基础矩阵,再构建水供给服务静态剩余水量(f)、基于区域(或流域)DEM 高程数据活动空间流动路径(g)、动态剩余水量(h)和区域间流动(i)4 个矩阵,各数据层通过转换投影分辨率获得相同的栅格形式,运用 IDL 编程进行模拟。模拟结果表明,2000—2015 年水供给总量为 $194.49 \times 10^8 \sim 275.57 \times 10^8 \text{ m}^3$,需求量为 $137.62 \times 10^8 \sim 464.66 \times 10^8 \text{ m}^3$,静态剩余水量逐年递减,下游受益区需要上游补给,动态剩余水量波动较大,水供给服务需引起高度关注。

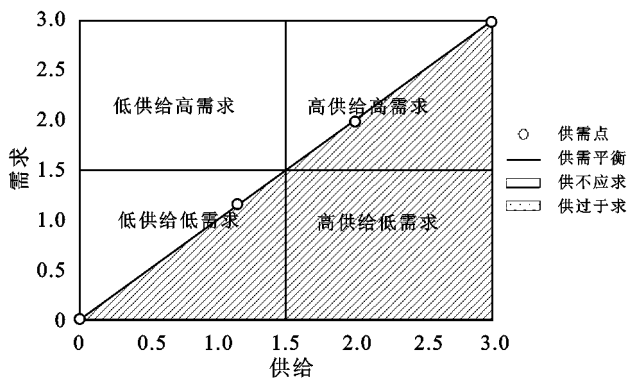


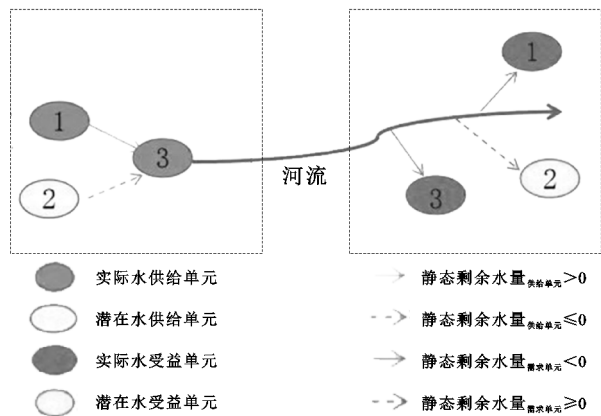
图 2 供给与需求的 4 种关系类型

3.3.2 生态系统服务流空间动态模型 美国佛蒙特大学开发一款生态系统人工智能模型(artificial intelligence for ecosystem services, ARIES),适用于评估生态系统服务流动空间格局。它是由供给区、需求区以及可以消耗的生物物理特征构建模型,并绘制空间服务流^[66]。该模型工作流程为:首先确定需求区(受益人)的需求量,然后确定水供给服务供需之间的服务传递,判断出水供给流动服务过程是正向还是负向流动,有益还是有害,最后确定服务流类型以及服务和效益的空间关系^[67]。陈登帅等^[68]运用 ARIES 模型对延河流域水供给服务平衡与服务流研究表明,2005—2015 年延河流域水需求量呈逐年增长趋势,而供给量却逐年下降,供不应求。模型物理属性强,数据要求高,存在一定的数据误差风险,目前应用于数据链全、小流域范围,是否能在不同地区推广还有待验证。

4 水供给服务空间流框架构建

水供给服务流动模拟研究框架搭建的水供给分析框架由 3 个模块组成(图 3):(1)供给端基于模型法和水量平衡方程公式得到水供给服务空间格局;(2)基于水资源公报、国家、省市统计年鉴的社会经济

数据与土地覆盖、土地利用等数据得到需水量空间格局;(3)基于栅格运算输送区传输物质量,依据水系分布绘制出水供给服务地理空间流动图。供给端基于水量平衡原理,结合生态水文模型定量计算水供给量;需求端基于市区用水类别和用水量,定量计算出水需求量,然后将水供给需求量栅格化空间处理,最后通过空间关联方法制定空间流动路径,绘制空间水供给服务流动地图,最终确定水供给服务的供需平衡关系。



注:实际供给单元即静态剩余水量为正值(供给量>需求量),潜在供给单元即静态剩余水量为负值;实际受益单元是静态剩余水量为正值,潜在受益单元是静态剩余水量为负值;箭头曲线表示水流动路径;数字表示水供给单元上下游关系以及距离河道的远近,具有优先顺序,数字越小获得的优先级别越高;路径箭头曲线粗细表示水供给服务流动的物质质量多少;水供给服务流动路径在供给与受益单元之间构建定量空间关系。

图 3 水供给服务空间流动研究框架

水供给服务流动研究的实质是对水供给服务的供给与需求进行定量化评估,建立服务供给与需求之间的时空关系,即供需平衡。明确服务流或水流的流动路径与流量大小。其中,对水资源的供给量与需求量进行定量评估及其空间特征研究是开展水供给服务空间流动研究的重要基础性工作。水供给服务是最具有流动特征的服务,以往研究更多关注静态模式下水资源供给量,而忽略了水资源的流动性和跨区域补给调节的特征。因此,明确生态系统服务产生的效益在什么时间和地点被享用,有助于生态保护和补偿政策的制定实施。

参考文献:

- [1] Finlayson M, Cruz R D, Davidson N, et al. Millennium ecosystem assessment: Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis [J]. Data Fusion Concepts and Ideas, 2005, 656(1): 87-98.
- [2] Costanza R, d'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387(15): 253-260.
- [3] 邱坚坚,刘毅华,袁利,等.人地系统耦合下生态系统服

- 务与人类福祉关系研究进展与展望[J].地理科学进展, 2021,40(6):1060-1072.
- [4] Kontogianni A, Luck G W, Skourtos M. Valuing ecosystem services on the basis of service-providing units: A potential approach to address the “endpoint problem” and improve stated preference methods [J].Ecological Economics,2010,69(7):1479-1487.
- [5] Vollmer D, Grêt-Regamey A. Rivers as municipal infrastructure: Demand for environmental services in informal settlements along an Indonesian river [J].Global Environmental Change,2013,23(6):1542-1555.
- [6] Hummel C, Poursanidis D, Orenstein D, et al. Protected Area management: Fusion and confusion with the ecosystem services approach [J].Science of the Total Environment,2019,651:2432-2443.
- [7] Li X, Sun W, Zhang D, et al. Evaluating water provision service at the sub-watershed scale by combining supply, demand, and spatial flow [J].Ecological Indicators,2021,127:e107745.
- [8] Torres A V, Tiwari C, Atkinson S F. Progress in ecosystem services research: A guide for scholars and practitioners [J].Ecosystem Services,2021,49(2):e101267.
- [9] 虞依娜,徐曼,叶有华.近5年森林生态系统服务价值评估研究进展:基于Cite Space文献计量学分析方法[J].生态环境学报,2020,29(2):421-428.
- [10] Himes C A, Pendleton L, Atiyah P. Valuing ecosystem services from blue forests: A systematic review of the valuation of salt marshes, sea grass beds and mangrove forests [J].Ecosystem Services,2018,30(A):36-48.
- [11] 王礼先,于志民.水源涵养林效益研究[M].北京:中国林业出版社,1999.
- [12] Rutter A J, Kershaw K A, Robins P C, et al. A predictive model of rainfall interception in forests, 1. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine [J].Agricultural Meteorology,1971,9:367-384.
- [13] Gash J H C. An analytical model of rainfall interception by forests [J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1979,105(443):43-55.
- [14] Robinson M, Cognard-Plancq A L, Cosandey C, et al. Studies of the impact of forests on peak flows and baseflows: A European perspective [J].Forest Ecology and Management,2003,186(1/3):85-97.
- [15] 姜志林.森林生态学(五):森林生态系统蓄水保土的功能(1)[J].生态学杂志,1984(6):58-61,63.
- [16] 王绍忠.森林凋落物涵养水源生态功能研究进展[J].中南林业调查规划,2014,33(3):43-46,56.
- [17] Millennium ecosystem assessment. Ecosystems and human well-being: Multiscale assessments [M].Washington D C: Island Press,2005.
- [18] 欧阳志云,林亦晴,宋昌素.生态系统生产总值(GEP)核算研究:以浙江省丽水市为例[J].环境与可持续发展,2020,45(6):80-85.
- [19] Ouyang Z Y, Song C S, Zheng H, et al. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making [J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2020,117(25):14593-14601.
- [20] Xie G D, Zhang C X, Zhen L, et al. Dynamic changes in the value of China's ecosystem services [J].Ecosystem Services,2017,26:146-154.
- [21] 詹淦峰,俞明坤,祝青松,等.江西婺源饶河源国家湿地公园森林固碳释氧转化太阳能和净化环境价值核算[J].江西科学,2017,35(3):352-354.
- [22] 安艳,毕凌峰,江捷,等.江西赣江源自然保护区森林固碳释氧及转化太阳能的价值核算[J].江西科学,2011,29(1):59-61.
- [23] 刘军政,白绍斌,张新华,等.江河源头区生态补偿标准测算方法研究[J].灌溉排水学报,2020,39(5):120-126.
- [24] 韩美,李云龙.湿地生态补偿的理论与实践:以黄河三角洲湿地为例[J].理论学刊,2018(1):71-77.
- [25] 邢一明,马婷,舒航,等.泰山保护地生态资产价值评估[J].生态科学,2020,39(3):193-200.
- [26] 汪晓珍,吴建召,吴普侠,等.2000—2015年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和NPP服务的时空分布与权衡/协同关系[J].水土保持学报,2021,35(4):114-121,128.
- [27] Hanjra M A, Qureshi M E. Global water crisis and future food security in an era of climate change [J].Food Policy,2010,35(5):365-377.
- [28] Belete M, Deng J S, Zhou M M, et al. A new approach to modeling water balance in Nile River Basin, Africa [J].Sustainability,2018,10(3):1-14.
- [29] Nahib I, Ambarwulan W, Rahadiati A, et al. Assessment of the impacts of climate and LULC changes on the water yield in the Citarum River Basin, West Java Province, Indonesia [J].Sustainability,2021,13(7):e3919.
- [30] 李子,张艳芳.基于InVEST模型的渭河流域干支流生态系统服务时空演变特征分析[J].水土保持学报,2021,35(4):178-185.
- [31] Wei P J, Chen S Y, Wu M H, et al. Using the InVEST Model to assess the impacts of climate and land use changes on water yield in the upstream regions of the Shule River Basin [J].Water,2021,13(9):e1250.
- [32] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets [J].Ecological Indicators,2012,21:17-29.
- [33] 张城,李晶,周自翔.基于水供给服务空间流动模型的渭河流域水资源安全格局[J].地理科学,2021,41(2):350-359.
- [34] Syrbe R U, Walz U. Spatial indicators for the assessment of ecosystem services: Providing, benefiting and connecting areas and landscape metrics [J].Ecological Indicators,2012,21:80-88.
- [35] Costanza R. Ecosystem services: Multiple classification systems are needed [J].Biological Conservation,2008,141(2):350-352.

- [36] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(3): 643-653.
- [37] Maass J M, Balvanera P, Castillo A, et al. Ecosystem services of tropical dry forests: Insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico [J]. *Ecology and Society*, 2005, 10(1): e17.
- [38] 肖玉, 谢高地, 鲁春霞, 等. 基于供需关系的生态系统服务空间流动研究进展 [J]. *生态学报*, 2016, 36(10): 3096-3102.
- [39] 徐洁. 生态系统服务空间流动研究: 以宁夏回族自治区为例 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [40] Li D L, Wu S Y, Liang Z. Evaluating regional water security through a freshwater ecosystem service flow model: A case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 81: 159-170.
- [41] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, et al. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services [J]. *Ecosystem Services*, 2013, 15(4): 117-125.
- [42] 张彪, 李文华, 谢高地, 等. 森林生态系统的水源涵养功能及其计算方法 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(3): 529-534.
- [43] 李士美, 谢高地, 张彩霞, 等. 森林生态系统水源涵养服务流量过程研究 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25(4): 585-593.
- [44] 王晓学, 沈会涛, 李叙勇, 等. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法 [J]. *生态学报*, 2013, 33(4): 1019-1030.
- [45] 王晓学, 李叙勇, 莫菲, 等. 基于元胞自动机的森林水源涵养量模型新方法: 概念与理论框架 [J]. *生态学报*, 2010, 30(20): 5491-5500.
- [46] Xu J, Xiao Y, Xie G D, et al. Ecosystem service flow insights into horizontal ecological compensation standards for water resource: A case study in Dongjiang Lake Basin, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(2): 214-230.
- [47] Budyko M I. *Climate and life* [M]. New York: Academic Press, 1974.
- [48] Xiao Y, Ouyang Z Y. Spatial-temporal patterns and driving forces of water retention service in China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(1): 100-111.
- [49] Xu J, Xiao Y, Xie G D. Analysis on the spatio-temporal patterns of water conservation services in Beijing [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2019, 10(4): 362-372.
- [50] 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.
- [51] 吴丹, 邵全琴, 刘纪远. 江西泰和县森林生态系统水源涵养功能评估 [J]. *地理科学进展*, 2012, 31(3): 330-336.
- [52] 曹叶琳, 宋进喜, 李明月, 等. 陕西省生态系统水源涵养功能评估分析 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 217-223.
- [53] 王鹏程. 三峡库区森林植被水源涵养功能研究 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.
- [54] Li M Y, Liang D, Xia J, et al. Evaluation of water conservation function of Danjiang River Basin in Qinling Mountains, China based on InVEST model [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 286: e112212.
- [55] 王辉源, 宋进喜, 孟清. 秦岭水源涵养功能解析 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 211-218.
- [56] 刘宥延, 刘兴元, 张博, 等. 基于 InVEST 模型的黄土高原丘陵区水源涵养功能空间特征分析 [J]. *生态学报*, 2020, 40(17): 6161-6170.
- [57] 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 [J]. *应用生态学报*, 2020, 31(8): 2731-2739.
- [58] Bai Y, Ochuodho T O, Yang J. Impact of land use and climate change on water-related ecosystem services in Kentucky, USA [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 51-64.
- [59] Leh M D, Matlock M D, Cummings E C, et al. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2013, 165: 6-18.
- [60] Arnold J, Moriasi D, Mikayilov F. SWAT: Model use, calibration, and validation [J]. *Transactions of the Asabe*, 2012, 55(44): 1491-1508.
- [61] Sagar G, Christine C, Claire B, et al. Assessing long-term hydrological impact of climate change using an ensemble approach and comparison with Global Grid-based Model: A case study on goodwater greek experimental watershed [J]. *Water*, 2018, 10(5): 564-570.
- [62] 杜婷婷, 郭梦京, 张晋梅, 等. VIC 模型在西江流域的水文模拟及其应用 [J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 121-127.
- [63] 吴志勇, 陆桂华, 张建业, 等. 基于 VIC 模型的逐日土壤含水量模拟 [J]. *地理科学*, 2007, 27(3): 359-364.
- [64] Gao Y, Feng Z, Li Y, et al. Freshwater ecosystem service footprint model: A model to evaluate regional freshwater sustainable development-A case study in Beijing-Tianjin-Hebei, China [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 39: 1-9.
- [65] 刘颂, 杨莹, 王云才. 基于矩阵分析的水文调节服务供需关系时空分异研究: 以嘉兴市为例 [J]. *生态学报*, 2019, 39(4): 1189-1193.
- [66] Villa F, Ceroni M, Bagstad K, et al. ARIES (Artificial Intelligence for Ecosystem Services): A new tool for ecosystem services assessment, planning, and valuation [J]. *Journal of Bioeconomics*, 2009, 13(6): 1-10.
- [67] Villamagna A M, Angermeier P L, Bennett E M. Capacity, pressure, demand, and flow: A conceptual framework for analyzing ecosystem service provision and delivery [J]. *Ecological Complexity*, 2013, 15: 114-121.
- [68] 陈登帅, 李晶, 张渝萌, 等. 延河流域水供给服务供需平衡与服务流研究 [J]. *生态学报*, 2020, 40(1): 112-122.