水利学报
Journal of Hydraulic Engineering
ISSN 0559-9350,CN 11-1882/TV

《水利学报》网络首发论文

题目：水利工程生态服务价值系统研究
作者：付意成，张剑，赵进勇，彭文启，张春玲
DOI：10.13243/j.cnki.slxb.20240441
收稿日期：2024-07-14
网络首发日期：2025-05-22
引用格式：付意成，张剑，赵进勇，彭文启，张春玲．水利工程生态服务价值系统研究[J/OL]．水利学报. https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20240441

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2025-05-22 09:00:41　网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1882.tv.20250520.2147.001

水　利　学　报
XXXX 年 XX 月　　SHUILI　XUEBAO　　第 XX 卷　第 XX 期

文章编号：0559-9350(XXXX)XX-0001-12

水利工程生态服务价值系统研究

付意成[1,2]，张　剑[1,2]，赵进勇[1,2]，彭文启[1,2]，张春玲[1,2]
（1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环水安全全国重点实验室，北京　100038；
2. 水利部京津冀水安全保障重点实验室，北京　100038）

摘要：水利工程作为人类与自然之间利用水资源的重要纽带，其建设和运行管理与流域生态系统服务价值的实现密切相关。本文旨在系统解析水利工程生态服务价值的内涵及关键要素，构建科学的价值测算体系，并探索生态服务价值的实现与优化途径。本文基于水利工程的分类及其功能特征，以“理论分析-体系构建-方法选取-价值实现”为主线，通过融合多学科理论和方法，系统开展水利工程生态服务价值内涵及要素特征的研究，构建涵盖多维服务类型的生态价值测算体系；进行水利工程生态服务价值的时空异质性研究，构建以提升生态服务价值为目标的价值实现可达性判定体系，并完善价值实现途径及优化过程。研究成果揭示了水利工程生态服务价值的空间分布特征及其驱动机制，为提升流域生态系统服务价值提供了理论基础和方法支撑。

关键词：水利工程生态服务价值；价值测算体系；时空异质性；价值实现
中图分类号：F062.2　　**文献标识码：**A　　**doi**：10.13243/j.cnki.slxb.20240441

1　研究背景

水利工程作为人类利用水资源的重要纽带，其建设显著影响了流域生态系统服务价值的显性化[1]。水利工程不仅在防洪、发电、供水、灌溉、治污及水运等方面为人类提供了显著惠益，还在维护区域生态平衡和服务功能方面发挥了重要作用。随着各类水利工程的兴建，人类活动对自然-社会二元水循环系统及生态系统健康的维持产生了深远影响[2]。水利工程建设如何影响生态系统功能的发挥及影响程度如何衡量，以及如何评估不同生态系统服务价值的重要性，已成为进行水利工程建设利弊分析的关键问题[3]。本文基于水利工程的分类及功能分析，系统解析其价值内涵及关键影响要素，并构建科学的价值测算体系，旨在为水利工程生态服务功能的提升提供坚实的理论基础。

生态服务价值测算是量化生态系统服务功能并增进人类福祉的重要基础。生态服务价值的稳定与可持续实现依赖于生态系统的结构完整性及其功能的有效发挥[4]。根据 Costanza 等[5]在《Nature》期刊中的研究，生态系统服务被定义为生态系统为人类提供的多种商品和服务，涵盖直接与间接两大类共计 17 种服务类型。随着生态服务价值关注度的持续提升，为实现水利工程生态系统服务价值的量化与市场化交易，系统化研究水利工程生态服务价值显得尤为迫切。当前，针对水利工程生态服务价值的研究尚缺乏系统性方法和整体性体系。为了支持和完善生态产品价值实现机制，本文以“理论分析-体系构建-方法选取-价值实现”为主线，系统梳理国内外在该领域的理论研究进展及研究方法的优缺点，构建价值测算与实现可达性判定体系，并探讨以水流生态补偿为主要手段的价值实现途径。

收稿日期：2024-07-14；
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1882.tv.20250520.2147.001
基金项目：国家自然科学基金项目黄河水科学研究联合基金(U2243601，U2443208)；广西重点研发计划（桂科 AB25069137）；三峡后续工作项目(WE0161A022025)；山东省流域中心 2020 年度科研项目“弥河治理修复型流域水生态补偿标准研究”
作者简介：付意成(1983-)，博士，教授级高级工程师，主要从事流域生态补偿研究。E-mail：swfyc@126.com

2 水利工程分类及功效研究

水利工程在人类发展史中占据重要地位，并发挥着显著作用。中国古代沿用至今的都江堰、灵渠及京杭大运河等水利工程，有效沟通了河网水系，促进了经济社会发展[6]。兴修水利是中华民族生存发展的首要条件，历来被视为安邦治国的重要措施。新中国成立后，广泛开展水利工程建设，大力整治江河，不仅取得了举世瞩目的成就，还显著提升了水利工程生态服务价值的显性化水平。

2.1 水利工程范畴 水利工程的概念及内涵与人类社会的发展密切相关，并随着人类社会的进步而不断完善。1933年，中国水利工程学会第三届年会提出水利工程范畴涵盖防洪、排水、灌溉、水力、水道、给水、污渠、港工等八类。1970年代，为满足维护生态系统可持续性及生物多样性的需求，生态水利工程应运而生。因此，在兴建多目标的复杂水利工程体系时，应以满足人类生产和生活的需要为出发点，妥善处理好人与水的关系，提升生态系统的健康和可持续性水平[7]。

2.2 水利工程生态服务功能 水利工程的服务功能随着治水、兴水的历史变迁及用水、管水的理念变化而不断扩展和细化，但始终以保障流域水安全、提升区域发展水平和增进人民福祉为目标。我国幅员辽阔，大部分地区旱涝频繁，主要江河普遍存在洪水威胁、河床淤积等问题，洪水灾害风险较高。因此，在水利工程综合效益评估中，许多缺乏市场价值的水生态服务功能容易被忽视[8]。生态系统是指在自然界的空间范围内，由不同类型的生物与多样化的环境共同组成的动态平衡有机整体，强调自然要素间的功能协调与相互作用[9]。水利工程生态服务功能是指以水为主要媒介、以水利工程为联系纽带的生态要素互相配合、协同促进，形成并实现的各种生态功效，强调在人类行动的干预下，如何扩大自然生态系统的功效和价值，揭示了在遵循经济社会-生态要素复合系统运行规律的情况下，如何体现人类用水、兴水、利水的正向功能与价值。依据Costanza等[5]及千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment， MEA)[10]的研究成果，本文将水利工程生态服务功能划分为物质供给、调节服务和文化服务三大类，共20种服务类型(结合水利工程的主要功能，对Costanza给出的部分支持和调节功能进行了归并和调整)，具体分类为(1)物质供给：包括生产、生活所需的清洁水资源供给，矿泉水等可饮用的淡水产品，水力发电、潮汐等能源产品，渔获及其衍生产品，涉水农产品及其衍生产品等；(2)调节服务：涵盖水源涵养、洪水调蓄、水质净化、土壤保持、泥沙调节、固碳释氧、物种保育、气候调节、空气净化等；(3)文化服务：包括水利风景区、康养休闲、水生态体验、水情教育基地、水利遗产、水域经济等。目前，测算生态系统服务功能量的方法主要有市场价格法、等效因子法、机会成本法、影子价格法、成本重置法和旅行费用法等，这些方法在理论上是合理可行的[11]。开展水利工程生态服务功能划定研究有助于更准确地测算流域水生态服务价值，为水流生态补偿优化管理提供科学依据。

3 水利工程生态服务价值研究

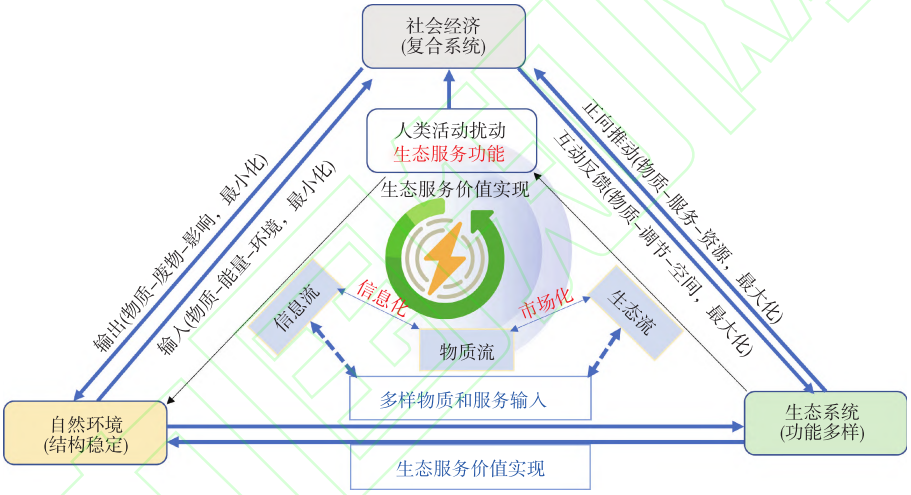
水利工程生态服务价值的测算是量化流域水利工程效益的关键，也是评估区域可持续发展与流域生态保护协调程度的重要指标。水利工程生态服务价值是指水利设施通过调节水循环过程对自然生态系统提供的多种正向服务效能，包括但不限于水文调节、资源供给和生境维持等多维度功能。本文基于Costanza等[5]及MEA[10]的研究成果，结合水利工程生态服务功能的差异，探讨水利工程生态服务价值的内涵与要素特性，以构建科学的生态服务价值测算体系。

3.1 价值产生和内涵 生态服务价值不仅直接决定生态保护政策制定及实施效果的合理性，还影响生态要素间的响应效率。当资源和物品存在稀缺性时，经济学的作用尤为显著。借助经济分析，本文主要探讨在有限的生态环境和自然资源条件下，人类如何实现可持续发展的主题，并研究与此相关的价值特性。价值通常通过“稀缺性”进行衡量，针对生态环境和生态服务的“稀缺性”，经济系统如何

衡量和应对是当前研究的重点[12]。尽管生态系统在为人类提供多种服务的过程中实现了增值，但其价值减损仍然不可避免[13]。与此同时，生态系统为经济发展提供的原材料经过一系列社会作用转化为消费品，并最终有一部分转化为废物重新回归自然界。如果这些废物未能得到妥善处理，随着其积累，可能会进一步降低生态系统服务价值。生态系统与经济社会之间的关系如图1所示。

生态系统服务作为一种特殊的资源，具有显著的公共物品属性。在经济学中，通常根据物品的排他性和消费的竞争性对其进行分类(见图2)。根据这两项特性，物品可以划分为个人物品、准公共物品、公共物品和公共资源四类。当前，对公共物品和公共资源的研究与其外部性的研究密不可分。受外部性影响，私人消费与生产决策往往导致资源配置无效率，并可能加剧社会不公平的风险。政府干预可以通过纠正这些无效率和不公平性现象，提升人类福祉[14]。

由于“搭便车”现象的存在，即人们享受了生态系统服务带来的价值却未支付相应费用，这使得生态系统服务的价值受到极大损失，降低了民众生产和维护公共物品的动力，进而影响可持续发展。随着生态保护和可持续发展意识的提升，生态系统服务的部分商业价值已得到广泛认可，大多数人也愿意为此部分价值支付费用。然而，具有明确商业价值的生态系统服务仅占整体的一部分，目前民众所享受的大部分生态系统服务仍然是大自然的馈赠，民众并未为此部分服务支付任何形式的费用[15]。



注：生态服务价值 $ESV=f$(物质流，信息流，生态流，公平性)。

图1　生态系统与经济社会间关系示意图

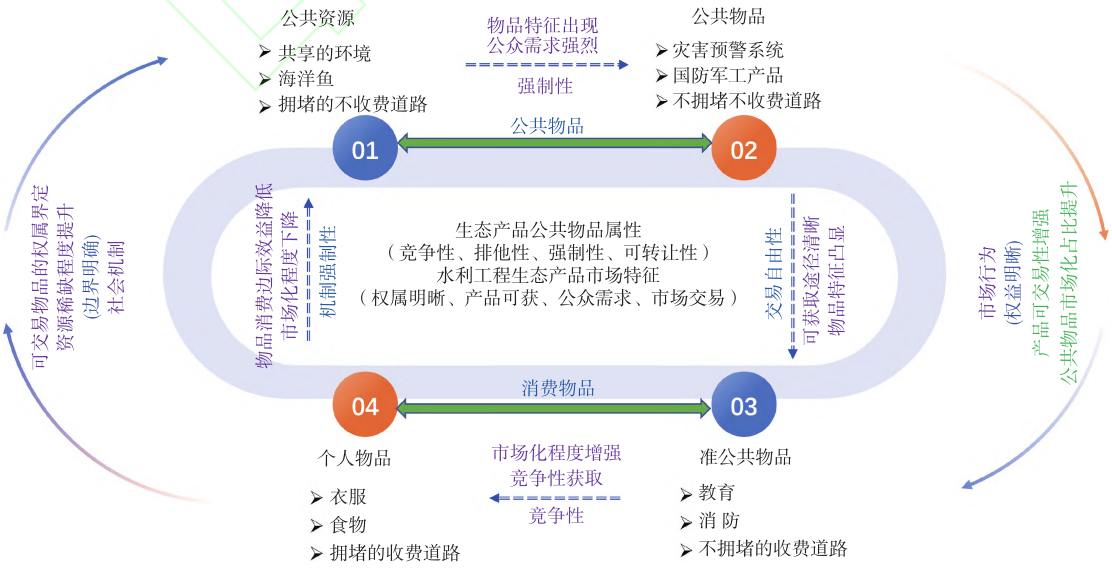


图2　生态产品的生成与交易转化关系

人类的生存与发展依赖于健康的生态系统，而当前大多数生态系统正面临诸多严峻挑战。为应对这些挑战，必须保护和恢复生物圈的完整性，以确保生态系统服务的可持续性。此外，流域水利工程作为人类发展的重要基础设施，在其运行过程中提供了多种生态服务。然而，这一过程中的生态产品与服务交换可能对人类福祉产生负面影响。因此，在开展水利工程建设之前，必须全面评估生态保护与经济发展之间的平衡，以实现可持续发展。要实现人类福祉的可持续提升，需深入关注经济增长与生态环境之间的关系，推动绿色发展和循环经济模式的实施[16]。流域水利工程生态服务价值与经济发展模式之间的相关性如图3所示。

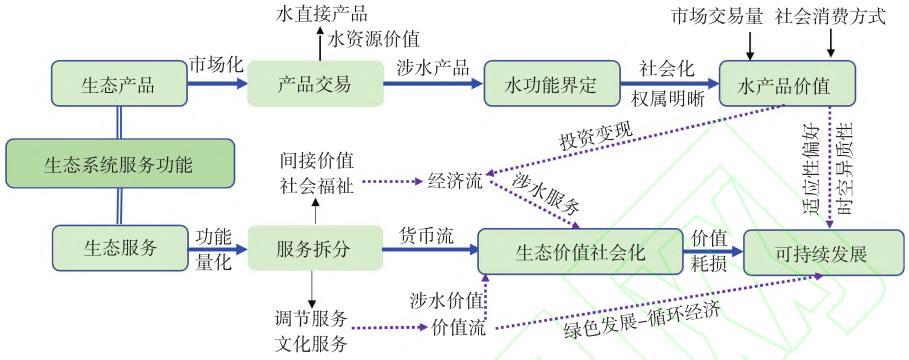


图3　流域水利工程生态系统服务价值与经济发展间关联性

3.2　服务功能划分与提升　生态系统服务与生态服务功能密切相关，但两者之间并非存在着一一对应的关系。生态服务功能的分类对于人类认识、保护和合理利用生态系统具有重要的理论和实践意义。一种生态服务功能可以向人类提供多种服务；同样，多种生态服务功能也可能共同为人类提供某一特定的服务。在研究生态系统服务时，应关注生态服务功能与服务价值之间的耦联关系，以更好地理解和评估生态系统为人类带来的多种福祉，从而更有效地保护生态系统，实现可持续发展。早期学者们主要依据Tietenberg团队提出的基本分类进行生态服务价值评估[17]。尽管该团队在生态服务价值研究方面取得了显著进展，但在学术界仍存在一定的争议。De等[18]在总结前人研究成果与经验的基础上，创新性地提出了生态系统功能的整体评价与价值评估综合框架，重点解决了尺度互嵌和逻辑衔接问题，并通过流程图展示了生态服务功能的发展变化及其与经济社会要素之间的相关性(见图4)。

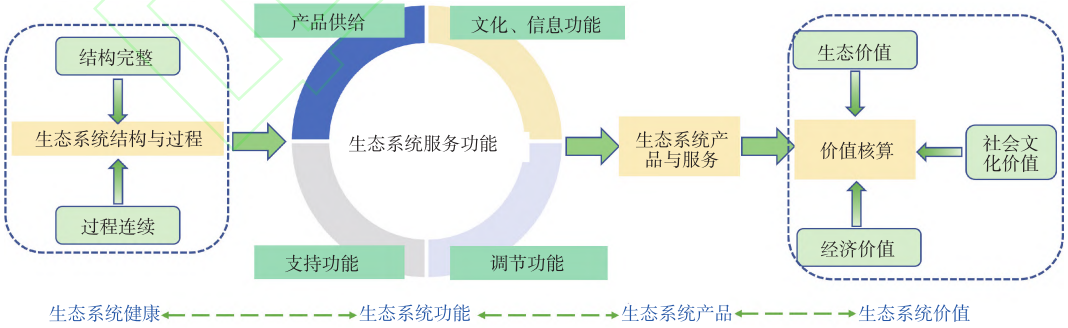


图4　生态服务功能整体评价流程

人类活动对生态系统的影响日益显著。随着人类对生态系统的各种索取，累积的负效应逐步威胁到生态系统的稳定性，因此，科学合理的利用生态系统服务功能具有重要意义。De等[19]在2002年将生态系统服务划分为调节功能、栖息地功能、生产功能和信息功能。MEA基本沿用了Costanza的观点，并将其归纳为物质供给、调节服务、支持服务和文化服务。国内对生态系统服务的研究起步相对较晚，且学者对生态系统服务的定义已趋于一致[20]。基于综合分析，本文将生态系统服务界定为生态系统及其生态过程为人类提供的赖以生存的产品和服务。

3.3　服务价值影响因素　水利工程生态服务的发挥受到多种因素的制约，主要包括生态系统的组成及其生理过程。生态系统的组成要素，包括生产者、消费者和分解者，通过相互作用维持系统的平衡。本文从生态系统组分、生态过程和生物多样性三个方面系统分析水利工程生态系统的支持和调节功能。首先，通过研究生产者、消费者和分解者之间的相互作用，揭示它们在水利工程生态系统中的具体作用；其次，探讨生态系统生理过程在水利工程生态系统服务中的关键作用；最后，分析生物多样性对水利工程生态系统服务的重要性，并评估生物多样性丧失可能带来的潜在影响。

本文深入探讨水利工程生态服务的复杂性及其多层次实现过程，从生态组分、生态过程和生物多样性三个角度分析水利工程生态系统的服务功能，揭示服务产生过程中的生理生态机制，并在此基础上阐明水利工程生态服务价值的形成机理。水利工程生态服务功能的主要能量来源包括太阳能、地球内部热能和化学能等多种形式。该系统中的物质交换、能量流动和信息传递共同构成了一个复杂而有序的整体，为人类提供了多样化的生态服务。通过对这些功能的深入理解，有助于挖掘水利工程建设在生态服务价值实现方面的新增长点，并促进更有效的利用和保护水利工程生态服务功能。水利工程生态服务价值的产生机理及价值流过程见图5。

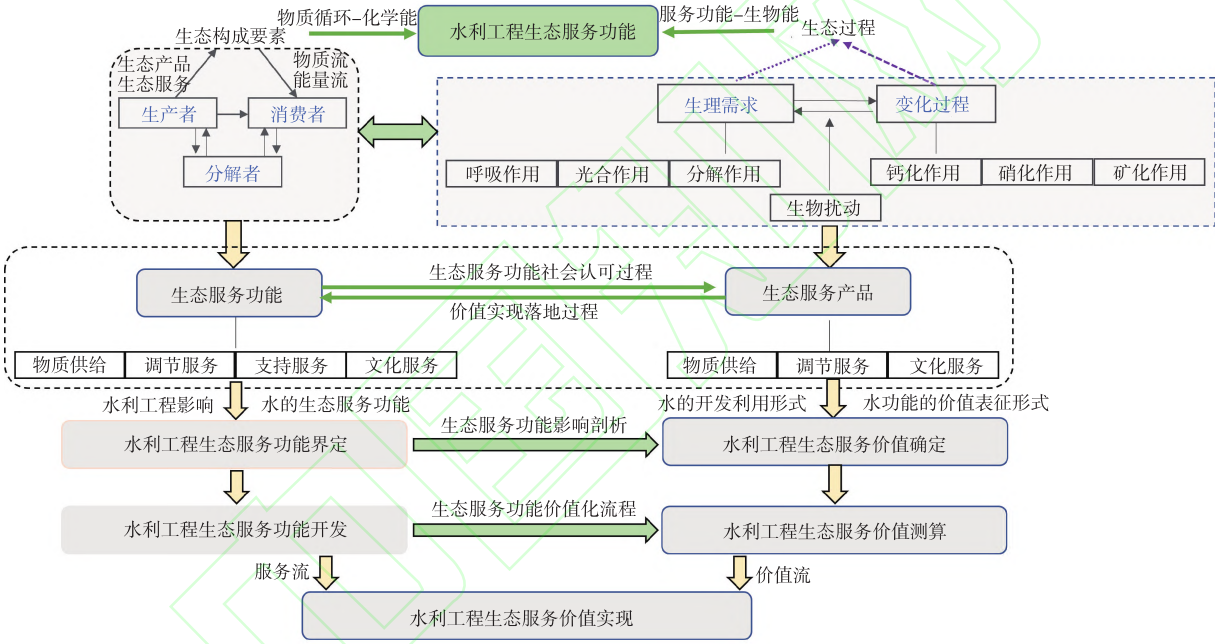


图5　水利工程生态服务价值产生机理及价值流过程

4　水利工程生态服务价值测算

4.1　价值测算体系　由于生态服务功能和生态产品的多样性，生态系统服务与保护资本具有多重价值。生态产品与服务的经济评估是实现生态系统服务对人类福祉及生态环境可持续性促进作用的重要手段。本文将非市场生态产品和服务功能纳入价值计算体系，有助于更全面地理解影响生态价值显性化的因素及其程度。生态系统服务的总经济价值包括利用价值(直接利用价值和间接利用价值)、存在价值和选择价值[21]。为实现生态系统中多样生态因子与服务功能的有机结合，从而体现其在经济发展中的价值贡献，亟需构建生态系统服务价值数据库，为价值测算提供基础数据支撑。生态服务价值计算中资本投入与受益价值的量化过程有助于更准确地衡量生态服务功能对经济发展的贡献，从而在政策制定中更加充分地考虑生态因素的影响。对水利工程生态服务功能进行经济价值评估和科学分类是实现流域系统治理和综合功能提升的关键。当前的评价技术能够较为清晰地区分利用价值与非利用价值，但由于选择价值、遗产价值和存在价值之间存在重叠，迫切需要开展面向生态保护与经济发展的

综合评估方法研究。此外，现有的生态价值经济化程度分类体系尚不完善，缺乏以复合生态系统服务功能量化和价值提升为目标的系统测算体系。本文从流域生态系统完整性的视角出发，基于影响水生态要素服务价值发挥的关键因素之间的相互作用，构建了水利工程生态服务价值测算体系（见图6）。本测算体系以水利工程的种类为基础，识别生态系统服务功能类型，划定生态服务功能的影响范围，并依据水体变化过程及其价值特性编制水生态产品目录清单，计算不同功能水体对生态服务价值的贡献率，以实现生态服务价值的显性化。本文所提出的测算体系在水生态产品目录的制定及价值核算方法方面具有显著的推动作用，对完善生态产品价值实现路径具有重要意义。

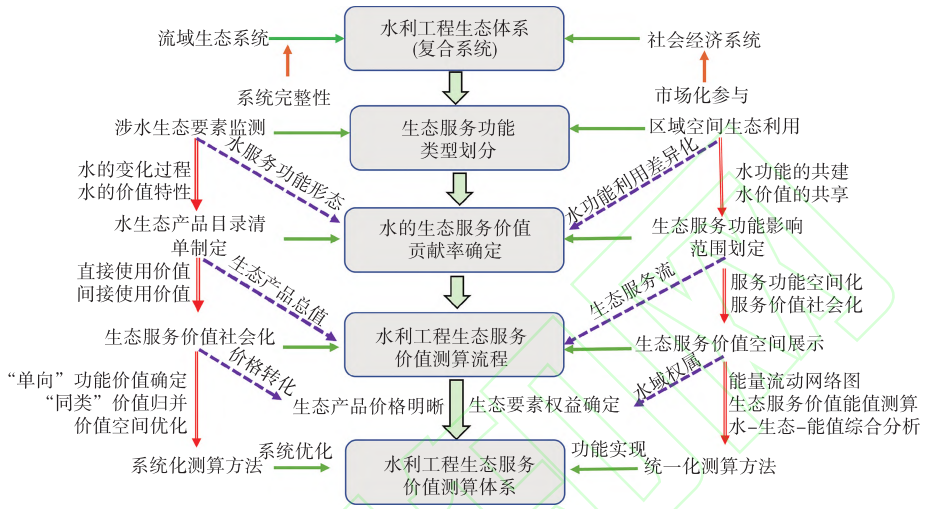


图6　水利工程生态服务价值测算体系

4.2　价值测算方法　为确保生态投入及保护措施的实施效果得到公平合理的反映，必须对生态系统进行估值，尽管该估值不一定以货币形式呈现。生态系统服务估值在多个时空尺度上具有广泛的应用前景，包括提升公众生态保护意识、科学核算生态系统保护成本及其总价值、评估政策实施效果以及制定生态系统服务支付方案[22]。鉴于人们更习惯于以货币形式表达价值，明确评估生态系统服务的货币价值有助于更有效地支持流域生态修复决策。

国际上对生态系统服务价值的评估研究始于1970年代末，但由于地理信息获取难度较大及数据统计方法的局限性，相关理论与方法体系的研究进展相对缓慢。本文基于对生态系统服务价值评估尺度的深入探讨，依据生态系统服务和自然资本的市场化水平，对当前常用的服务价值评估方法的适用范围及其优缺点进行了系统分析，为推动价值评估方法从静态向动态评估转变、从笼统向精确化方向发展、从单一向综合方向拓展，提供坚实的方法支撑。为了测算流域水利工程的生态服务价值，本文根据水利工程影响范围内生态服务的类型与特点，结合资源经济学和生态经济学等相关领域的最新研究成果，采用系统分析和数理统计方法，以实现其内在价值的外部化。

水利工程生态体系作为一个将陆域与水域生态系统基本功能耦合的复杂体系，其功能的发挥受到自然要素变化节律、市场调控机制以及公众对生态服务需求程度等因素的影响，导致生态系统功能与生态服务之间并非一一对应。流域水利工程生态体系和服务间关系的多面性，使得生态系统服务具有多价值性。本文在对常用的价值核算方法（如成本-收益分析、局部均衡分析、多目标分析、贴现率与收益计算、回归模型分析和问卷调查）的优缺点及其适用范围进行系统分析的基础上，以提升生态系统的整体结构稳定性和功能为目标，提出当前我国进行水利工程生态服务价值测算的主要方法包括能值分析法、物质量评价法和价值量评价法等[23]。

4.3　价值测算步骤　水利工程生态服务价值测算基于土地利用/土地覆盖基础信息与InVEST生态模型，以量化生态系统的生物物质供应量和产品产出量。在此基础上，使用经济估值方法或成本-收益转化方法对生态服务价值进行评估。本文基于对水利工程生态服务功能的识别，从流域生态系统服务

功能整体提升的角度提出了两种组合评估方法：(1)基于生态系统单位价值统计量，结合土地利用/土地覆盖变化数据叠加收益转化进行综合评估；(2)基于生态功能要素的统计数据，采用生态模型和经济估值技术进行价值评估。受篇幅所限，作者将在后续的研究中对这两种方法计算过程进行详细阐述。当前基于时空和价值量原始数据的实证研究成果为利益转移与收益转化的应用提供了参考。然而，这些研究主要集中在特定地点的特定生态服务价值的具体测算[24]。本文对近20年来社会经济发展与生态服务价值评估结果之间的关系进行了深入分析，发现现有典型案例未能全面涵盖中国所有类型的生态系统，并且对多元化的生态保护投入数据缺乏系统性研究。本文基于现有研究数据，通过对典型生态系统服务价值数据库中的单位价值数据进行分析，考虑我国不同生态系统类型所提供的多种服务价值的空间异质性及其服务功能特点，开展价值测算。

5　水利工程生态服务价值实现与优化

5.1　价值实现途径　随着人类对资源的持续需求，自然生态环境遭受了一定程度的破坏，进而引发了对生态服务价值的广泛关注。在此背景下，水流生态补偿应运而生，成为水利工程生态服务价值的重要实现路径，同时也是实现生态系统结构稳定与功能提升的关键途径。水利工程生态补偿标准的计算与流域上游生态流量下泄要求、上游生态保护成本投入、下游生态受益支付意愿以及下游控制断面水质目标等因素密切相关，这些因素对均衡博弈模型的构建与优化求解具有重要影响。本文采用均衡博弈动态模型进行求解，将生态补偿标准确定过程中的博弈寻优与我国流域生态保护制度特征相结合，在耦合流域生态服务价值与社会经济因素的基础上，从理论阐述、模型构建、参数确定和过程优化等层面进行了系统研究。在生态系统服务价值付费实施过程中，面临“动态均衡与合作博弈”的挑战。在以自然解决方案(Nature-based Solution，NbS)为基础的流域生态保护补偿标准确定过程中，本文运用演化博弈理论分析不同情境下流域各主体策略的演化趋势，并借助模拟仿真模型界定补偿标准的上下限。为实现多元博弈的广义纳什均衡，通常采用动态一致性估算对决策方案进行优化求解，以获得多期议价博弈的唯一均衡值[25]。

水利工程生态服务价值的实现路径需构建“政府主导、市场调节、社会参与”的协同机制。在具体实施过程中，应建立基于生态系统生产总值(GEP)核算的阶梯式补偿体系，其中政府通过生态转移支付保障基础补偿额度，市场机制引导发展水权交易、碳汇交易等衍生补偿方式。技术层面应融合遥感监测、水动力模型和区块链技术，构建流域生态服务价值智能评估平台，以实现补偿标准的动态修正与精准实施。政策创新方面，积极推行“生态银行”制度，将水利工程产生的生态增量价值转化为可交易的绿色金融产品。通过多维度价值转化路径的协同作用，最终实现水利工程生态效益向经济社会效益的有效传导。

5.2　价值实现过程优化　本文通过引入元分析方法并结合数理统计手段，构建了一个全面的水利工程生态系统综合价值测算体系。鉴于生态系统服务特性及其实现途径的多样性，在测算生态系统服务价值时，必须平衡效率与公平之间的关系。水利工程生态系统所提供的服务通常具有显著的溢出效应，而生态服务功能的发挥及其破坏所导致的损失往往存在时间上的滞后性。因此，在进行生态系统服务价值测算时，妥善处理社会发展指标与生态服务价值在时空上的协调性、生态价值经济化转化的有效性，以及区域生态保护投入与生态受益价值的共享性等问题，是确保科学测算及其价值空间分布的关键所在。

为了实现生态系统的最大效益，亟需开展生态保护成本分摊的研究。由于生态系统服务的提供区与受益区在空间上通常不重合，因此，在决策过程中应进行全面的成本与收益分析，以确保区域生态服务价值的最大化。为保障生态系统服务功能的可持续性，需建立生态服务受益区向供给区付费补偿的机制[26]。生态系统服务付费作为一种激励机制，旨在促使生态保护区持续进行环境保护投入，以确保生态服务价值的稳定输出。通过分析消费者与生产者的行为经济约束，便于更好的理解生态服务付

费对受益区和服务供给区行为的影响。为提高水利工程生态服务付费的效率，除了政府间的转移支付外，还应考虑引入市场机制。鉴于生态系统服务的特殊性，其价值通常需要由政府和市场共同决定。在市场经济中，首先应明确稀缺资源(产品)的产权，并在此基础上，进一步明确生态保护投入与生态产品价值之间的相关性。生态服务供给方仅需对产生正向生态效益的环境改善行为进行投入，而受益方则遵循受益-付出对等原则，不会承担全部的生态保护投入费用。为此，政府可以积极促进买卖双方及利益相关者建立相应的水流生态保护补偿机制，实现“外部性内在化”，从而激励利益相关者充分考虑其行为的外部影响。

6 水利工程生态服务价值实现可达性判定

为了实现流域生态服务功能和社会经济的可持续发展，基于时间博弈的生态服务价值“博弈战”有助于促进跨区域的流域生态补偿的开展[27]。流域上游i(服务供给方)提供的生态产品服务价值记为$s_i\in[0,+\infty)$，流域下游j(服务受益方)期望的生态产品服务价值记为$s_j\in[0,+\infty)$。在考虑对称信息消耗战的情况下，当流域上下游同时采取相应举措时，其收益函数可表示为：

$$u_i(s_i,s_j)=\begin{cases}-s_i & s_j\geqslant s_i\\ \hat{\theta}-s_j & s_j<s_i\end{cases} \tag{1}$$

式中$\hat{\theta}$为流域上下游期望的生态收益。

假设上游生态收益θ_i的累计分布为P，密度函数为p，对于每一个θ_i，$s_i(\theta_i)$应满足：

$$s_i(\theta_i)\in\arg\max_i\left\{-s_iP\left[s_j(\theta_j)\geqslant s_i\right]+\int_{\left\{\theta_j\middle|s_j(\theta_j)<s_i\right\}}\left[\theta_i-s_j(\theta_j)\right]p_j(\theta_j)\mathrm{d}\theta_j\right\} \tag{2}$$

在这个博弈中，存在一种非对称均衡：在“无干预”的水流生态保护补偿实施过程中，上游地区倾向于选择“实施”，而下游地区则更倾向于选择“退出”。每位参与者根据分布函数$F(s)$评估生态补偿实施策略的可行性。计算公式为：

$$F(s)=1-\exp\left(-\frac{s}{\hat{\theta}}\right) \tag{3}$$

$F(s)$的密度函数为：

$$f(s)=\frac{1}{\hat{\theta}}\exp\left(-\frac{s}{\hat{\theta}}\right) \tag{4}$$

分布函数$F(s)$的似然率为$\mathrm{d}s/\hat{\theta}$。上述策略组合存在均衡解，因为其期望收益等于投入成本$\mathrm{d}s$($\mathrm{d}s=\hat{\theta}\cdot(\mathrm{d}s/\hat{\theta})$)。在同一时刻，流域上下游对生态资源(产品)进行无序争夺，那么每个参与者从该时刻起的收益将为零。因此，在这种情况下，流域上下游在实施与放弃生态补偿策略之间的收益是等价的。

流域生态补偿的混合策略均衡最终会收敛到某一纯策略均衡。为了求得弱收敛于$\hat{\theta}$这一均衡的连续分布序列，上下游的参与者应选择一个纯策略，同时，均衡行动的分布将逐渐收敛于对应的完全信息博弈中的均衡混合策略[28]。考虑$[0,+\infty)$上的对称分布序列$p^n(\cdot)$，其累积分布函数$P^n(\cdot)=0$，并且对于所有的$\varepsilon>0$，

$$\lim_{n\to\infty}\left[P^n(\hat{\theta}+\varepsilon)-P^n(\hat{\theta}-\varepsilon)\right]=1 \tag{5}$$

令$s^n(\cdot)$为对应于p^n的对称均衡策略，Φ^n为s^n的反函数。$s_i(\theta_i)$表达式为：

$$s_i(\theta_i)\in\arg\max_i\left\{-s_i\left[1-P_j(\Phi_j(s_i))\right]+\int_0^{s_i}(\theta_i-s_j)P_j[\Phi_j(s_j)]\Phi_j'(s_j)\mathrm{d}s_j\right\} \tag{6}$$

对上式进行积分得：

$$P^n[\Phi^n(s)] = 1 - \exp\left[-\int_0^s \frac{1}{\Phi^n(b)}\,\mathrm{d}b\right] \tag{7}$$

式中b为生态收益变量，$b \in [s^n(\hat{\theta}-\varepsilon,\ s)]$，$\varepsilon \in (0,\ \hat{\theta})$。

依据收敛性分析，可得：

$$\begin{cases} \lim\limits_{n\to\infty} P^n(\hat{\theta}-\varepsilon) = 0 \\ P^n(\hat{\theta}-\varepsilon) = P^n[s^n(\hat{\theta}-\varepsilon)] \end{cases} \tag{8}$$

在$s^n(\hat{\theta}-\varepsilon) < s < s^n(\hat{\theta}+\varepsilon)$时，

$$P^n[\Phi^n(s)] = 1 - \exp\left[-\int_0^{s^n(\hat{\theta}-\varepsilon)} \frac{1}{\Phi^n(b)}\,\mathrm{d}b\right]\exp\left[-\int_{s^n(\hat{\theta}-\varepsilon)}^{s} \frac{1}{\Phi^n(b)}\,\mathrm{d}b\right] = 1 - [1 - P^n(\hat{\theta}-\varepsilon)]\exp\left[-\int_{s^n(\hat{\theta}-\varepsilon)}^{s} \frac{1}{\Phi^n(b)}\,\mathrm{d}b\right] \tag{9}$$

对于所有的$\varepsilon>0$，

$$P^n[\Phi^n(s)] \to P[\Phi(s)] = 1 - \exp\left(-\frac{s}{\hat{\theta}}\right) \tag{10}$$

综合分析表明，不完全信息博弈中的均衡纯策略序列会逐渐收敛于相应的完全信息博弈的混合均衡策略。因此，在考虑均衡概率分布的情况下，流域最优生态补偿标准是存在的。

在多维均衡博弈存在唯一解的情况下，本文借助支付函数模型构建满足博弈行为的协方差，以求解多个均衡下的确定参数[29]。Chatterjee等[30]研究了双边拍卖中最基本的情形：单一买方与单一卖方在是否交易一个单位产品或服务之间进行选择。具体来说，卖方(即流域上游)的生态保护成本投入为c，而该产品或服务对买方(即流域下游)的价值为v，其中v和c位于区间[0，1]内。在没有协商的情况下，双方同时选择竞价b_1(即流域上游的成本付出)和b_2(即流域下游的支付意愿)，b_1和b_2均位于区间[0，1]内。依据Chatterjee等的假设，双方拍卖的成交价为$kb_1+(1-k)b_2$，其中$k\in[0,\ 1]$。如果$b_1>b_2$，双方不会发生交易，也没有货币转移；如果$b_1\leqslant b_2$，双方以价格$t=(b_1+b_2)/2$成交。在这种情况下，流域上游的效用为：如果$b_1\leqslant b_2$，则$u_1=(b_1+b_2)/(2-c)$，否则为零；流域下游的效用为：如果$b_1\leqslant b_2$，则$u_2=v-(b_1+b_2)/2$，否则为零。

如果流域上下游在水利工程建设的生态服务价值信息上达成一致(即双方共同认可v和c的概念)，那么上述问题可被视为纳什需求博弈。本文假设$v>c$，因此在这种对称信息博弈中存在连续的纯策略有效均衡[31]。在这些均衡状态下，流域上下游的叫价相同，即$b_1=b_2=t\in[c,\ v]$。这样一来，交易双方都能获得正向的价值剩余。然而，如果双方过于“自私”，例如，流域上游卖出方要价高于t或流域下游买方出价低于t，交易就不会发生。此时，博弈将陷入无效均衡，即双方随意叫价，导致卖方要价超过v而买方出价低于c。为了避免这种情况，只有双方在协商过程中保持开放与合作的态度，才能实现互利共赢的局面。

如果流域上游的生态保护成本$c>3/4$，其报价(即价值底限)$1/4+2c/3$实际上会低于成本。然而，在这种情况下，流域下游的最高出价$s_1(c)$也会超过3/4，因此，流域上游的参与者不会以低于成本的价格出售生态服务或产品。同理，当$v<1/4$时，尽管流域下游的出价超过了其实际价值，但交易永远都不会发生。只有当且仅当$v\geqslant c+1/4$时，均衡交易才会发生。与事后有效交易条件(即当且仅当$v\geqslant c$时交易)相比，可以看出在均衡状态下，交易量显得过低。为了确保双方的利益，建议在协商过程中充分考虑这些因素，以实现更合理的交易结果。

类似于博弈论中的对称信息确定过程，此博弈还存在其他均衡。例如，当流域上下游随意报价(如$b_1=1$和$b_2=0$)时，可以构成一个均衡。此外，该博弈在区间[0，1]上还存在一组“单一价格”均衡：如果$c\leqslant b$，流域上游会报价b；如果$c>b$，则报价1；如果$v\geqslant b$，流域下游会出价b；如果$v<b$，则出价0。由于在流域生态服务交易中，价格是固定的(等于b)，因此流域上下游的任何参与者都不会改变其策略，从而形成一个稳定的均衡策略组合。此外，Leininger等[32]证明了该博弈存在单参数可微对称

（但非线性）的均衡策略集，进一步丰富了我们对该博弈的理解。

本文以弥河流域为例，通过现场调研和数值计算，基于博弈论分析确定水利工程生态服务价值实现的可达性条件。弥河位于山东半岛中部（地理坐标：118°36′N—119°8′N，36°11′E—37°8′E），发源于临朐县沂山西麓九山镇水石屋村附近。弥河干流自南向北流经潍坊市的临朐县、青州市、寿光市，于滨海经济技术开发区注入渤海湾。弥河全长206 km，流域面积3863 km^2，主要支流包括石河、丹河、石沟河等[33]。流域多年平均径流量为3.61亿m^3。弥河流域拥有众多水利工程，如冶源水库、淌水崖水库、黑虎山水库及弥河东方橡胶坝、青州市弥河拦河闸、弥河分流分洪闸等。基于弥河流域多维信任支付意愿调研结果，上游临朐县在“清醒”状态下选择“争取”时的成本投入c为3.45元/（人·月）；中游和下游在上游“清醒”行动的影响下，“支付”的生态受益价值v为9.35元/（人·月）。在对调查结果进行非零和处理的基础上，当前的流域生态补偿投入值和生态支付意愿的关系满足$v>c+1/4$。弥河流域具有实施水流生态补偿的可行性。

7　结论

本文通过系统解析水利工程生态服务价值的内涵与要素特性，构建了涵盖物质供给、调节服务和文化服务三大类的功能分类体系，并建立了多维价值测算体系。本文重点解决了传统评估中功能界定模糊、非市场价值核算缺失及区域异质性处理不足等关键问题，通过博弈论框架验证了生态补偿标准在$v\geqslant c+1/4$条件下的适用性。当前技术体系整合了经济学与生态学多学科方法，实现了从单一价值评估向综合价值核算的范式转变，其方法论对水利工程生态效益评估具有重要的理论意义。未来研究需重点突破多源数据融合分析、跨尺度价值传导机制解析，以及动态补偿标准优化技术，致力于构建覆盖“功能识别-价值量化-决策支持”全链条的技术体系，为流域水生态产品价值实现提供系统性解决方案。

参　考　文　献：

[1] 张建香，汪亚峰，张耀宗，等. 延河流域生态系统服务权衡/协同关系阈值效应[J]. 生态学报，2024，44（23）：10573-10581.

[2] 王浩，王佳，刘家宏，梅超. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报，2021，52（1）：3-11.

[3] 武曼曼，李俊宏，李林林. 水利工程社会影响后评价指标体系构建及应用[J]. 水电能源科学，2024，42（1）：88-92.

[4] TINCH R，BEAUMONT N，SUNDERLAND T，et al. Economic valuation of ecosystem goods and services：a review for decision makers[J]. Journal of Environmental Economics and Policy，2019，8（4）：359-378.

[5] COSTANZA R，D'ARGE R，DE GROOT R. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature，1997，387：253-260.

[6] 左其亭，秦西，马军霞. 对水利新质生产力的理解及发展思考[J]. 中国水利，2024（6）：21-25.

[7] 董哲仁，孙东亚，赵进勇，等. 河流生态系统结构功能整体性概念模型[J]. 水科学进展，2010，21（4）：550-559.

[8] 陈欣蔚，李红波，张文博，等. 里下河地区土地利用转型对生态系统服务价值的影响[J]. 基于Markov-FLUS模型的多情景模拟分析[J]. 资源科学，2025，47（1）：182-195.

[9] 黄羽，幸悦，熊文. 河湖水生态系统服务价值核算研究及应用展望[J]. 水生态学杂志，2023，44（1）：1-8.

[10] 郑阳，于福亮，桑学锋，等. 长江流域水系统生态服务价值评价方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报（中英文），2023，21（3）：222-235.

[11] LONG X R，LIN H，AN X X，et al. Evaluation and analysis of ecosystem service value based on land use/cover change in Dongting Lake wetland[J]. Ecological Indicators，2022，136：108619.

[12] 石惠春，师晓娟，刘鹿，等. 兰州城市生态系统服务价值评估方法与结果比较[J]. 中国人口·资源与环境，

2013，23：30-35.
[13] HUANG J，GUANG P H，GAO J M，et al. Multiscale spatiotemporal characteristics and influencing factors of ecosystem service value of groundwater in China[J]. Journal of Environmental Management，2024，368：122196.
[14] ZHENG P，JIN L T，HUANG Y X，et al. Spatial and temporal dynamic evolution and correlation of ecological quality and ecosystem service value in Fujian Province[J]. Sustainability，2024，16(12)：5063.
[15] 廖桂堂，林正雨，何鹏，等. 基于“三生用地”的四川丘陵区乡村生态系统服务价值及其供需格局评估[J]. 生态科学，2024，43(2)：151-162.
[16] LI F，ALTERMATT F，YANG J H，et al. Human activities' fingerprint on multitrophic biodiversity and ecosystem functions across a major river catchment in China[J]. Global Change Biology，2020，26(12)：6867-6879.
[17] TIETENBERG T. Environmental and Natural Resource Economics[M]. NewYork：Harpers Collins Publishers，1992.
[18] DE GROOT R，BRANDER L，VAN DER PLOEG S. Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units[J]. Ecosystem Services，2012，1(1)：50-61.
[19] DE GROOT R，WILSON M A，BOUMANS R M J. A typology for the classification，description and valuation of ecosystem functions，goods and services[J]. Ecological Economics，2002，41：393-408.
[20] 于宏宇，刘丰，吴巍巍，等. 长三角一体化示范区生态系统服务时空变化及权衡分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文)，2024，22(6)：590-600，650.
[21] 滕皎，李慧，赵彩云，等. 基于土地利用变化的长江上游生态系统服务价值核算及预测模拟[J]. 西北林学院学报，2024，39(2)：274-284.
[22] 贾婉琳，吴赛男，陈昂. 基于InVEST模型的赤水河流域生态系统服务功能评估研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报，2020，18(4)：313-320.
[23] SCHÄGNER J P，BRANDER L，MAES J，et al. Mapping ecosystem services' values：Current practice and future prospects[J]. Ecosystem Services，2013，4：33-46.
[24] 杨朝晖，王浩，褚俊英，等. 海河流域生态系统价值评估与空间特征[J]. 水利学报，2010，41(9)：1121-1127.
[25] SHAKED A，SUTTON J. Involuntary unemployment as a perfect equilibrium in a bargaining game[J]. Econometrica，1984，52：1351-1364.
[26] 付意成，吴文强，阮本清. 永定河流域水量分配生态补偿标准研究[J]. 水利学报，2014，45(2)：142-149.
[27] MAYNARD S J. The theory of games and evolution in animal conflicts [J]. Journal of Theoretical Biology，1974，47：209-221.
[28] 付湘，谈广鸣，黄莎，等. 水资源利用与排污控制的非合作博弈方法[J]. 水利学报，2022，53(1)：78-85.
[29] TOMIYAMA H A，OTSU T. Inference on incomplete information games with multi-dimensional actions[J]. Economics Letters，2022，215：110440.
[30] CHATTERJEE K，SAMUELSON W. Bargaining under incomplete information[J]. Operations Research，1983，31：835-851.
[31] SCALZO V. On the existence of maximal elements，fixed points and equilibria of generalized games in a fuzzy environment[J]. Fuzzy Sets and Systems，2015，272：126-133.
[32] LEININGER W，LINHART P，RADNER R. Equilibria of the sealed-bid mechanism for bargaining with incomplete information[J]. Journal of Economic Theory，1989，48：63-106.
[33] 张剑，付意成，彭文启，等. 生态服务价值与社会经济因素交互影响下的流域生态补偿标准研究[J]. 水利学报，2024，55(6)：654-665.

Systematic research on ecological service value of water conservancy projects

FU Yicheng[1,2], ZHANG Jian[1,2], ZHAO Jinyong[1,2], PENG Wenqi[1,2], ZHANG Chunling[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*; 2. *Key Laboratory of Water Safety for Beijing-Tianjin-Hebei Region of Ministry of Water Resources, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Water conservancy projects serve as a critical nexus between human society and natural water resource utilization, with their construction and operational management being intrinsically linked to the realization of watershed ecosystem service values. This paper aims to systematically investigate the connotation and key elements of ecological service values in water conservancy projects, establish a scientific value quantification system, and explore pathways for value realization and optimization. Guided by the methodological framework of "theoretical analysis-system construction-method selection-value realization", and based on the classification and functional characteristics of water conservancy projects, this research integrates multidisciplinary theories and methods to achieve the following objectives: 1) develop a multidimensional ecological value quantification system through systematic investigation of value connotations and elemental characteristics; 2) conduct spatiotemporal heterogeneity analysis of ecosystem service value, establishing an accessibility assessment framework for enhancing value realization; and 3) optimize value realization pathways through systematic refinement. The findings reveal the spatial distribution patterns and driving mechanisms of ecological service values in water conservancy projects, providing theoretical foundations and methodological support for enhancing watershed ecosystem service values.

Keywords: ecosystem service value of water conservancy projects; value calculation system; spatial-temporal heterogeneity; value realization

(责任编辑：李　娜)