

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. (in Chinese)

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

孙桥, 胡周汉, 张婕, 王济干

(河海大学商学院, 南京 211106)

摘要: 为评估南水北调东线平原水库生态服务效益, 基于生态系统服务理论, 综合影子工程法、意愿支付法等方法提出服务价值核算标准; 将粗糙集理论和层次分析法作为权重确定方法, 进一步评估平原水库对地区人类福祉的贡献; 以大屯水库为实际案例开展应用研究。结果表明: 平原水库具备洪水调蓄、固碳释氧、水源涵养等共计 12 项生态服务功能; 以水量供给为纽带, 为地区带来经济、生态、社会效益, 促进地区福祉提升; 大屯水库具备 8 项服务功能, 2021 年时该水库总服务价值达 2.365 亿元, 供给服务价值是其主要构成, 该水库为地区提供的经济、生态和社会效益各占 50%、41% 和 9%。研究成果在指导管理机构实现科学管理, 促进水利工程更好地实现生态价值方面具有实践意义。

关键词: 南水北调东线; 平原水库; 生态系统服务; 价值核算; 地区福祉获益

中图分类号: TV697 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0120

南水北调东线工程借助京杭大运河以及沿线的天然河流水道, 实现了水资源的逐级翻水北送。沿线覆盖总土地面积 37 980 km², 有效缓解了受水地区的用水压力^[1]。受水地区的地下水位在调水工程连通之后实现了止跌回升, 地下水以及地表水生态系统得到了显著恢复^[2]。平原水库是东线工程中的重要组成部分, 不仅起到引水和输水中间节点的作用, 也保障了沿线地区的用水安全。对南水北调东线平原水库的生态服务功能进行分析, 搭建合适的综合服务效益评估体系是十分必要的。

对平原水库工程的效益评估一般局限于经济收益^[3], 工程投入运行后为服务地区的社会发展以及河流、湖泊等生态系统的修复价值往往被忽略了, 而且也缺乏较为科学的评估方法和理论体系。近年来随着对生态环境问题的日益关注, 广大学者聚焦于生态系统与人类福祉获益之间的关系研究, 生

态系统服务理论得到逐步完善和发展^[4]。生态系统服务理论认为自然/人工生态系统为人类社会提供了自然资源和生态健康, 促进人类福祉的提升^[5]。人类从生态系统中的这种获益被定义为生态系统服务。联合国在 2005 年提出的千年生态系统评估项目^[6], 以及中国生态环境部公布的陆地生态系统生产总值核算项目^[7], 为评估生态系统的服务价值提供了科学框架。生态系统服务理论为评估平原水库的生态服务效益提供了理论支撑, 并且得到了初步应用^[8]。

南水北调东线平原水库作为人造生态系统工程, 具备多项生态服务功能, 供应工农业生产用水的同时也兼顾为沿线地区生态系统进行生态补水。水资源的供给与流动形成了平原水库与区域系统之间的关系纽带, 搭建起水库工程与服务地区的紧密联系, 促进了地区整体人类福祉的提升^[9]。由于受

收稿日期: 2023-06-10 修回日期: 2023-11-16 网络出版时间: 2023-11-30

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20231130.1047.002>

基金项目: 国家社会科学基金项目(20BGL196)

作者简介: 孙桥(1993—), 男, 江苏泰州人, 博士研究生, 主要从事生态系统服务理论、水利工程生态效益评估等方面研究。E-mail: qsun_hhu@163.com

通信作者: 张婕(1980—), 女, 江苏宿迁人, 教授, 博士, 主要从事环境会计、资源环境管理等方面研究。E-mail: zhangjie_jie@126.com

到地质、地貌等自然因素的影响,平原水库对建设方案存在严格要求,更加强调工程运行的生态效应和管理模式的可持续性。因而,对于平原水库工程的生态效益进行评估,应结合工程特性,充分考虑与地区经济、生态、社会系统之间的交互关系,确定平原水库具备的服务功能体系后制定合适的评估标准。齐娜等^[10]确定了密云水库所具备的生态服务功能,制定相应评估标准,直观反映 2008—2019 年该水库的生态服务价值变化。Sun 等^[11]整理了山东境内水库工程特征,确定了水库所具备的服务功能体系,进一步从系统视角出发,构建了水库工程与地区之间的动态演化模型,并将其应用到了水库建设方案的选择过程之中。张代青等^[12]则是将河道生态价值评估与对水库水量调度相结合,以实现水库生态效益最大化为目标完成水量优化配置。

本研究以生态系统服务理论为基础,针对平原水库对地区的综合服务收益开展下列研究:确定南水北调东线平原水库具备的生态系统服务功能体系,进一步探究平原水库与地区人类福祉之间的交互关系;综合影子工程法、支付意愿法等多种方法提出各生态功能服务价值的核算标准,应用粗糙集和层次分析法对平原水库提供的地区福祉获益进行评估;以鲁北补水工程大屯水库为实际案例,对其 2015—2021 年生态系统服务价值和提供的地区福祉获益开展应用研究。

1 平原水库生态系统服务与地区福祉获益

1.1 平原水库生态系统服务功能

南水北调东线平原水库主要功能是为沿线地区提供水资源,用以支持经济生产和居民生活,同时肩负保障沿线水系生态水位、水质净化等功能。部分水库还具备向湿地、沼泽等自然生态系统进行生态补水的功能。水利风景区的建设也为地区居民提供了娱乐休憩的便利,部分水库更是发展成为国家级景点,为地区带来旅游效益。

本研究按照生态系统服务功能分类^[13-14],包括调节服务、支持服务、供给服务和文化服务四大类服务。在咨询相关领域专家后,综合考虑了平原水库工程与服务地区的交互关系^[15-16],结合平原水库的工程特性,最终确定平原水库可能具备的生态系统服务功能见表 1。平原水库调节服务包括气候调节、调蓄洪水、水质净化、空气净化;支持服务包括

固碳释氧、水量存蓄、生物多样性;供给服务包括水资源供给、渔业产品、水力发电;文化服务包括教育科研、风景旅游。共计 12 项细分服务功能。

表 1 平原水库生态系统服务功能
Tab. 1 Ecosystem service functions of plain reservoir

生态服务类型	细分服务功能
调节服务	气候调节、调蓄洪水、水质净化、空气净化
支持服务	固碳释氧、水量存蓄、生物多样性
供给服务	水资源供给、渔业产品、水力发电
文化服务	教育科研、风景旅游

1.2 平原水库与地区福祉交互关系

生态系统服务对人类福祉的改善主要表现在为地区提供了资源和生态环境,自然景观也为人类提供了休闲娱乐的场所,满足生理和精神需求^[17]。健康可持续的生态系统通过调节、供给和文化服务提升地区人类福祉。生态系统服务理论认为生态系统为地区带来的人类福祉获益既包括水资源这类直接资源收益,也包括满足人类精神层面需求的间接收益。人类福祉获益是一个复合概念,包括客观福祉和主观福祉,客观福祉指的是人类生活环境中的资源、住房等客观物质,以及收入、教育等社会资源,主观福祉则是人类对生活条件的主观感受。

与自然生态系统类似,平原水库这类人工生态系统为地区提供直接和间接收益,共同促进居民生活质量改善^[18]。平原水库工程为地区提供福祉获益的过程可以大致分为 3 个阶段:首先,水库的日常运行提供了生态系统服务;其次,经过水量调配等与其他自然生态系统之间的交互过程,使得地区的经济社会系统以及生态系统获得直接或间接的收益;最后,这些收益使得该地区居民的整体生活水平实现了提升。平原水库提供的地区福祉获益以水资源的流动为载体,连接于地区的经济生产、社会生活和自然生态系统之中^[19]。

图 1 给出了平原水库各生态服务功能与经济、生态、社会 3 个维度服务效益之间的交互关系。水量调配满足了服务地区的农业灌溉、工业生产以及渔业生产的需求,保障了当地的粮食供应和经济活动,而水文发电等功能直接提供了清洁能源,也带来了可观的经济获益。对于社会获益而言,满足了居民基本生活对水资源的需求、风景区的建设及促

进了当地旅游业的发展,也为居民提供了休闲娱乐的场所。生态维度的获益则包含了直接和间接两部分^[20]。水库的部分生态系统服务,例如气候调节、水质净化等以及生态补水这类直接修复当地生态

系统的过程,为当地居民带来了直接的生态性获益。间接收益则来源于水资源供给的替代效应,外地调水缓解了当地的水资源压力,避免了对当地生态的进一步破坏。

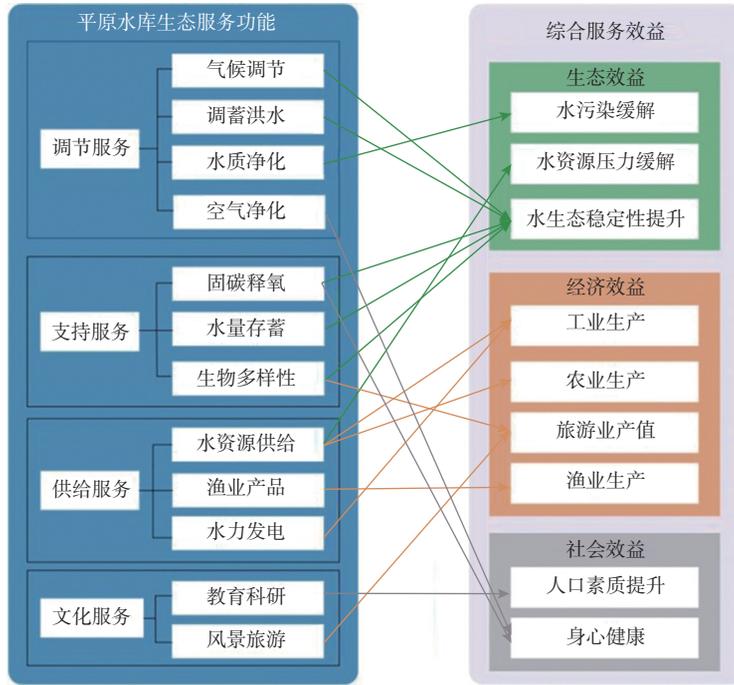


图1 平原水库与地区福祉获益

Fig. 1 Plain reservoirs and regional human well-being benefits

2 评估方法

2.1 平原水库生态系统服务功能核算方法

参照已有研究中关于各类生态系统服务价值的核算方法,综合直接价值法^[21]、影子工程法^[22]、当量因子法^[23]、支付意愿法^[24]等多种核算方法,确定出平原水库各项生态系统服务功能的价值核算方法。

2.1.1 调节服务

平原水库的构成主体是人工或天然湖泊,经过库区的存蓄过程,实现了水体的去污提质,为当地居民提供了高质量用水的同时也净化了周边水体水质。此外,平原水库在设计初始,也考虑到了防汛防洪的作用,库体绿化和水体经过蒸散、沉积吸收等化学过程,显著调节了服务地区的生态系统稳定性。

2.1.1.1 气候调节服务价值 V_{ij}

由于气候调节服务价值无法直接计算,故采用影子工程法,用平原水库生态系统水面蒸发消耗能量从而节约用电量产生的价值对其评估。

$$V_{ij} = q_{ij} p_{qj} E \quad (1)$$

式中: q_{ij} 表示水库年均蒸发量, m^3 ; p_{qj} 表示受水区城

市的平均电价,元/($kW \cdot h$), E 为单位水蒸发耗电量, $kW \cdot h/m^3$,本研究按照周文昌等^[25]研究中的标准取值为125。

2.1.1.2 调蓄洪水服务价值 V_{ix}

平原水库对洪水调蓄价值采用影子工程法进行

$$V_{ix} = (Q_{max} - Q_c) C_{ix} \quad (2)$$

式中: Q_{max} 、 Q_c 分别表示平原水库的最大蓄水量和实际蓄水量,万 m^3 ; C_{ix} 表示的是单位蓄洪成本,本研究参照刘海燕等^[26]研究中的标准,取值为0.67元/ m^3 。

2.1.1.3 水质净化服务价值 V_{sz}

水质净化服务价值以多种污染物的直接净化成本作为计算标准,本研究选取总磷、总氮含量作为污染物。

$$V_{sz} = \sum w_i Q_c C_{sz_i} \quad (3)$$

式中: w_i 表示的是第 i 种污染物的减少量, kg/m^3 ; C_{sz_i} 表示的是第 i 种污染物的单位净化成本,元/ kg , $i=1, 2$ 分别为总磷和总氮。

2.1.1.4 空气净化服务价值 V_{kq}

$$V_{kq} = \sum t_i A C_{kq_i} \quad (4)$$

式中: t_i 表示的是单位水体面积对第 i 种空气污染物

的净化效率, kg/km^2 ; A 表示的是平原水库水体面积, km^2 ; C_{kq_i} 则是第 i 种空气污染物直接处理的单位成本, $\text{元}/\text{kg}$ 。 $i=1, 2$ 分别表示二氧化硫和一氧化碳。

2.1.2 支持服务

平原水库由以湖泊水体和周边绿地等构成, 与所在地区的生态系统之间存在着生态物质流交互, 为沿线地区的河流、湖泊等水生态系统提供水资源的同时也起到存蓄的效果, 此外在土壤保持和碳氧循环方面也起到支持作用。

2.1.2.1 固碳释氧服务价值 V_{gtsy}

平原水库固碳释氧服务价值的核算包括了固碳、释氧两个部分, 具体计算过程如下式。

$$\begin{aligned} V_{\text{gtsy}} &= V_{\text{gt}} + V_{\text{sy}} \\ V_{\text{gt}} &= q_{\text{gt}} p_{\text{CO}_2}, \quad q_{\text{gt}} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{C}}} s Q_{\text{c}} \\ V_{\text{sy}} &= q_{\text{sy}} p_{\text{O}_2}, \quad q_{\text{sy}} = \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{CO}_2}} q_{\text{gt}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: V_{gt} 、 V_{sy} 分别表示固碳价值、释氧价值; p_{CO_2} 、 p_{O_2} 分别表示二氧化碳和氧气的单位市场价格, $\text{元}/\text{t}$; q_{gt} 、 q_{sy} 分别表示平原水库固存的二氧化碳量和释放的氧气量, t ; s 表示单位水体 CO_2 的吸收速率, $\text{t}/(\text{m}^3 \cdot \text{a})$; Q_{c} 则是平原水库存贮的水体水量, m^3 ; $M_{\text{CO}_2}/M_{\text{C}}$ 表示 C 化学转化为 CO_2 的换算比例, 取值为 $44/12$; $M_{\text{O}_2}/M_{\text{CO}_2}$ 表示 CO_2 化学转换为 O_2 的换算比例, 取值为 $32/12$ 。

2.1.2.2 水量存蓄服务价值 V_{sl}

$$V_{\text{sl}} = p_{\text{sl}} Q_{\text{c}} \quad (6)$$

式中: p_{sl} 表示单位贮水价值, 本研究参照贾亦真等^[27] 研究, 取值为 $6.11 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

2.1.2.3 生物多样性服务价值 V_{sw}

$$V_{\text{sw}} = \sum r_i p_{\text{sw}_i} q_{\text{sw}_i} N \quad (7)$$

式中: r_i 表示生物保护系数^[28]; p_{sw_i} 表示当地居民对第 i 种生物保护的意愿支付成本, 元 ; q_{sw_i} 为第 i 种保护生物数量; N 为服务地区的人口数。

2.1.3 供给服务

2.1.3.1 水资源供给服务价值 V_{ws}

水资源供给是平原水库的主要供给功能, 本文选择影子价格法, 从受水区视角构建用水净效益影子价格模型来评估平原水库提供各类用水的价值。

$$V_{\text{ws}} = \sum_{i=1}^4 p_{w_i} q_{w_i} \quad (8)$$

式中: p_{w_i} 为各类型供水的影子价格方案; q_{w_i} 为各类型供水水量, 万 m^3 , $i=1, 2, 3, 4$ 分别代表供水类型为工业、农业、生活和生态用水。

2.1.3.2 渔业产品供给服务价值 V_{ys}

渔业产品供给价值指的是平原水库的各种水产品养殖所带来的收益, 采用市场价值法对其评估。

$$V_{\text{ys}} = \sum_{i=1}^n q_{y_i} p_{y_i} \quad (9)$$

式中: p_{y_i} 为 i 种渔业产品在服务地区的市场价格, $\text{元}/\text{t}$; q_{y_i} 为第 i 种渔业产品的供给量, t 。

2.1.3.3 水力发电供给服务价值 V_{fd}

水力发电供给服务价值同样采用市场价值法进行核算, 在发电总量 q_{fd} 的基础上以服务地区的年平均单位电价 p_{d} 作为核算标准, 计算如下:

$$V_{\text{fd}} = p_{\text{d}} q_{\text{fd}} \quad (10)$$

2.1.4 文化服务

平原水库为服务地区提供了风景旅游和休闲娱乐的功能, 同时也担负了安全教育、水利科研等活动的任务。平原水库的文化服务功能包括了教育科研、风景旅游两类。目前对于文化服务价值的核算主要采用意愿支付法^[29], 本文以服务地区的人均可支配收入作为依据, 在咨询当地居民对三种文化服务功能的支付意愿的基础上确定支付比例, 分别计算文化服务的价值。计算过程如下:

$$\begin{aligned} V_{\text{iy}} &= NR \zeta_{\text{iy}} \\ V_{\text{ij}} &= NR \zeta_{\text{ij}} \end{aligned} \quad (11)$$

式中: V_{iy} 、 V_{ij} 分别代表教育科研、风景旅游两类文化服务价值; R 表示服务地区当年人均可支配收入水平; ζ_{iy} 、 ζ_{ij} 分别表示服务地区居民愿意从可支配收入中为两类文化服务的支付百分比。

2.2 地区福祉获益评估方法

基于平原水库与地区福祉交互关系, 将平原水库生态系统服务价值按照功能特性分别归纳为生态、经济和社会 3 个维度收益, 以此反映地区福祉获益情况。为进一步评估平原水库提供的福祉获益水平, 将各维度对应的生态系统服务价值进行主观客观加权计算。首先, 运用粗糙集信息熵方法计算客观权重^[30], 以避免主观因素以及信息质量的影响; 其次, 利用层次分析法计算主观权重; 最后, 借助非线性规划模型及拉格朗日函数求解得到最终的权重组合, 从而完成平原水库地区福祉获益的评估工作。具体权重计算过程如下。

2.2.1 确定客观权重 w_{kg}

应用粗糙集方法基于信息熵计算得到客观权重 w_{kg} 。定义知识信息集 $S = (U, C, D, V, f)$, 其中, U 是论域, C 是条件指标集, D 是决策指标集, V 是属性值域;

$f: U \times R \rightarrow V$ 是一个函数。决策属性 (D) 对条件属性 (C) 的依赖度为 $\gamma_B(D) = |\text{POS}_B(D)|/|U|$ 。

将 U 上任意属性集合 $S \subseteq C \cup D$ 看成定义在 U 上的子集组合出的代数上的随机变量并计算其概率分布 $[S : p] = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 & \dots & S_t \\ P(S_1) & P(S_2) & \dots & P(S_t) \end{bmatrix}$ 。

进一步计算决策属性集 D ($U/D = \{D_1, D_2, \dots, D_k\}$) 对条件属性 C ($U/C = \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$) 的条件信息熵 $I(D|C) = \sum_{i=1}^m \frac{|C_i|^2}{|U|^2} \sum_{j=1}^k \frac{|D_j \cap C_i|}{|C_i|} \left| 1 - \frac{|D_j \cap C_i|}{|C_i|} \right|$ 。

在决策信息表 $S = (U, C, D, V, f)$ 中, $\forall c \in C$, 将指标 c 的重要度定义为对条件属性集 $\text{NewSig}(c) = I(D|(C - \{c\})) - I(D|C) + I(D|\{c\})$ 。

计算根据信息熵得出的权重

$$\omega(c) = \frac{\text{SigNew}(c)}{\sum_{a \in C} \text{SigNew}(a)}$$

并通过价值指标自身属性重要度和指标属性在属性集中的重要度, 计算得出指标的客观权重。

2.2.2 应用层次分析法计算主客观权重 w_{zg}

按 9 标度法对评价指标构建判断矩阵。判断矩阵为 $A = (a_{ij})_{n \times n}, a_{ij} > 0; a_{ij} = 1/a_{ji}, a_{ii} = 1$ 。该矩阵具有对称性。

层次单排序。根据专家打分结果将每一个因对其准则的重要性进行排序, 并计算得到了判断矩阵的最大特征根 λ_{\max} 。

一致性检验。计算专家权重结果的一致性指标 $I_c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$, 并查询平均随机一致性 I_R , 进一步计算一致性比例 $R_c = I_c/I_R$ 。当 $R_c < 0.1$ 时, 认为判断矩阵的一致性是可以接受的; 反之, 判断矩阵不符合一致性的要求, 需要对该判断矩阵进行重新修正。

2.2.3 最终权重组合

基于非线性规划模型以及拉格朗日函数来确定权重组合, 求解后得到最终各指标权重组合 w_i , 用于地区福祉获益评估。令 $w_i = \alpha w_{kg_i} + \beta w_{zg_i}$ 构造非线性规划模型如下:

$$\begin{aligned} \max Z &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} (\alpha w_{kg_i} + \beta w_{zg_i}) \\ \text{s.t.} \quad &\alpha^2 + \beta^2 = 1 \\ &\alpha, \beta \geq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: X_{ij} 表示初始矩阵标准化后的标准化矩阵; w_{kg_i} 、 w_{zg_i} 分别对应各细分效益评估指标的客观和主客观权重系数; $\max Z$ 表示综合服务效益最大值。构造拉格朗日函数 $L = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} (\alpha w_{kg_i} + \beta w_{zg_i}) + \lambda (\alpha^2 + \beta^2 - 1)$

进行求解, 得到最优解 α^* 和 β^* , 分别对其进行归一化处理得到 $\bar{\alpha}^*$ 、 $\bar{\beta}^*$, 则最终各指标权重组合为 $w_i = \bar{\alpha}^* w_{kg_i} + \bar{\beta}^* w_{zg_i}$ 。

3 大屯水库案例应用

3.1 工程概况及数据来源

3.1.1 大屯水库工程概况

南水北调大屯水库是南水北调东线一期工程中的鲁北输水工程的重要组成部分, 位于山东省德州市武城县东侧。主要供水区域为山东省德州市德城区和武城县, 设计年供水量 13 334 万 m^3 , 总库容 5 209 万 m^3 , 设计蓄水位 29.80 m, 占地总面积约 6.37 km^2 , 水域面积可达 61 km^2 , 工程总投资 101 422.43 万元。大屯水库基本解决了德城区和武城县城区的供水需要, 保障了德州市的工农业生产, 缓解了当地的水资源负载压力, 对提高当地人民生活质量起到了积极推动作用。

3.1.2 数据来源

主要使用包括水库工程服务地区的经济、社会、生态相关数据以及水库的工程参数和日常水量管理调度数据, 其中社会、经济、生态统计数据主要来源于 2015—2021 年《山东省统计年鉴》《德州市统计年鉴》《山东省水资源公报》。实际案例计算中大屯水库的具体数据则由大屯水库管理处提供, 包括水库参数、扩建方案、水质监测数据、历年供水量等。

3.2 大屯水库生态服务功能构成

大屯水库向德州市德城区供应工业用水, 向武城县供应生活用水, 且输水过程采用的是管涵直送形式, 故对大屯水库的生态服务价值核算中并不考虑输水过程中产生的蒸散、渗漏等水量损失, 仅考虑水库水域日常蓄水过程中存在的水量蒸发情况, 用于计算气候调节服务价值。经过对大屯水库实地调研和分析发现, 大屯水库为保障水质开展“以鱼养水”生态养殖, 还是德州市水生态和水安全教育基地, 担负着为社会大众提供水文化和水科学研究知识的传播工作。此外, 由于大屯水库属于人工修建的平原水库, 工程主体是在盐碱地基础上进行修复建设的, 且主要以混凝土建筑为主, 参照了齐娜等^[10]、Guo 等^[18] 的研究, 认为该水库并不具备湖泊等自然水生态具备的生物多样性、栖息地等生态功能。此外, 经过对大屯水库实地调研和分析后, 确定该平原水库具备的生态服务功能体系见表 2。

表 2 大屯水库生态服务功能体系

Tab. 2 Ecological service function of Datun Reservoir

调节服务	支持服务	供给服务	文化服务
气候调节 水质净化	固碳释氧 水资源存蓄	工业用水供给 生活用水供给 渔业产品	教育科研

3.3 大屯水库生态系统服务价值

表 3 给出了 2015—2021 年大屯水库的生态系统服务价值核算结果。图 2(a)为大屯水库调节服务、支持服务、供给服务、文化服务以及生态服务总价值的变化情况。图 2(b)堆积图反映了 4 类生态服务价值在研究期内的占比变化。

表 3 2015—2021 年大屯水库生态服务价值计算结果

Tab. 3 Results of Datun Reservoir's ecological service value from 2015 to 2021

单位: 10⁶元

服务价值	年份						
	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年
调节服务	64.454	60.062	52.503	69.466	59.653	59.320	58.997
支持服务	27.305	33.519	38.453	43.386	37.145	32.438	38.839
供给服务	29.291	44.840	56.452	113.349	104.953	98.826	117.654
文化服务	8.961	10.095	14.855	16.204	17.723	19.390	21.003
总服务价值	130.011	148.516	162.262	242.406	219.474	209.974	236.493

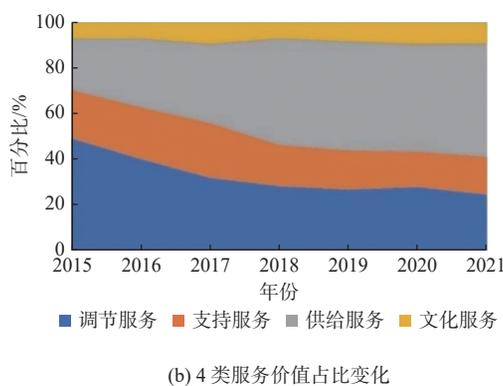


图 2 2015—2021 年大屯水库生态服务价值变化情况

Fig. 2 Changes in ecological service value of Datun Reservoir from 2015 to 2021

大屯水库生态系统服务总价值自 2015 年开始逐年上升, 2018 年时达到极大值。2015—2021 年供给服务价值的上升趋势最明显, 2021 年时达到了 11 765.4 万元, 相较于 2015 年时的 2 929.1 万元上升了 8 836.3 万元。调节服务价值并未发生显著变化, 2021 年为 5 899.7 万元, 相较于 2015 年时的 6 445.4 万元下降 545.7 万元。文化服务价值的数值最小, 2021 年时仅为 2 100.3 万元。在 4 类服务价值各自占比方面, 调节服务和支持服务价值占总服务价值的比例在 2015—2021 年均出现了下降, 供给服务价值占比在 2015—2018 年表现出显著增长。相较于 2015 年, 2021 年时文化服务价值占比实现了扩大, 但与其他 3 类服务价值仍存在着较大的差距。

图 3 分别给出了大屯水库调节、支持、供给和

文化 4 类服务及具体服务功能的价值变化情况。从图 3(a)中可知, 对于大屯水库而言, 气候调节服务价值呈现出稳定的增长趋势, 而水质服务价值在 2015—2021 年发生较大波动, 2021 年时甚至达到最小值。调节服务总价值基本相对稳定, 这表明大屯水库对服务地区生态系统的调节作用已趋于成熟。从图 3(b)可知, 大屯水库固碳释氧服务价值在波动中逐步增加。水量存蓄价值由于年蓄水量的减少, 在 2019 和 2020 年时出现了下降, 但整体上与支持服务价值保持了相似的上升态势。大屯水库对服务地区生态系统起到了显著的支持作用, 且随着水库的稳定运行能够进一步改善地区的生态系统健康, 为地区带来可观的生态获益。图 3(c)反映了大屯水库供给服务价值在研究期内实现巨大增长, 2021 年时接近 1.2 亿元, 远超出 2015 年时的水平。

这一现象主要是由于该水库的工业用水供给、生活用水供给以及渔业产品供给在研究期内均保持了明显的上升趋势。供给服务能够为服务地区带来水资源、渔业产品等直接收益,是水库提供地区福祉获益的主要构成。与水资源管理过程高度关联的水资源存蓄、供给等生态系统服务功能易受到当年用水需求、引水量等因素影响,从而造成平原水库生态系统服务价值水平的变化。2019年、2020年时,由于工业用水需求量减少,工业用水供给价

值显著下降,进而造成了这期间供给服务价值总体出现了下滑。图3(d)中,文化服务价值也保持稳定增长,但在数值上相较其他服务价值还存在着较大差距。这是因为大屯水库作为人工建造的水利工程,在文化服务方面存在局限性,对于大屯水库管理机构而言,应充分挖掘该水库在社会服务层面的潜力,拓展与服务地区教育科研和文化单位的交流,丰富其社会服务和水文化功能。

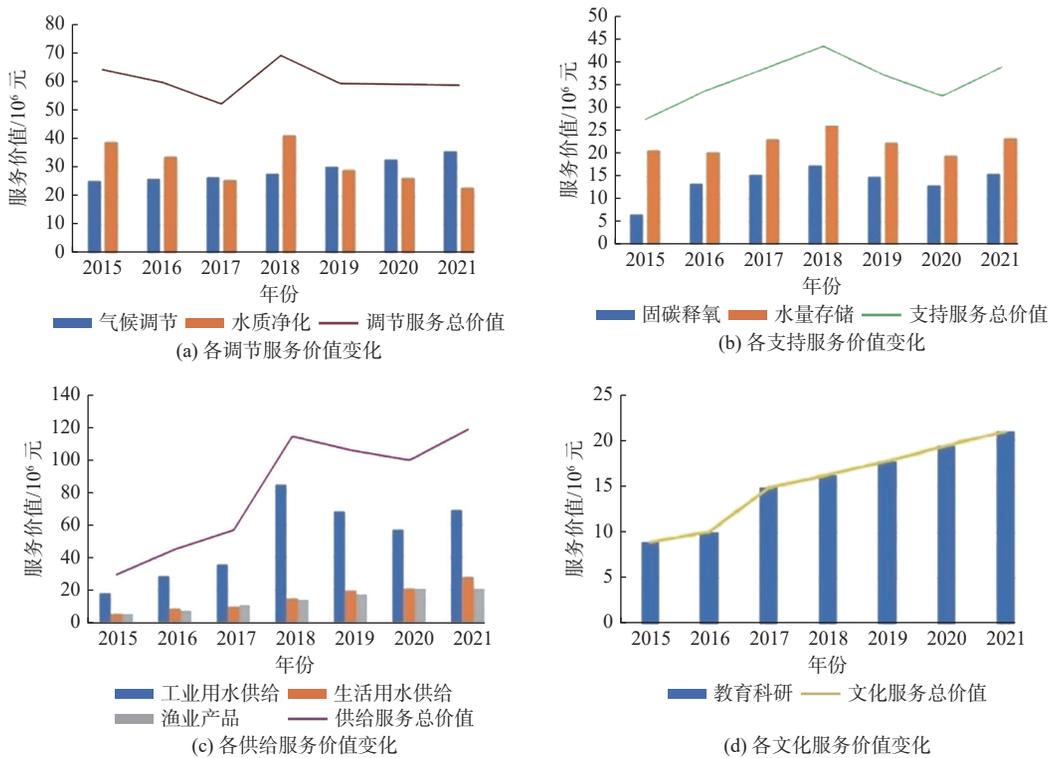


图3 大屯水库各类生态服务价值变化

Fig. 3 Changes in the Datun Reservoir's various ecological service value

3.4 大屯水库提供的地区福祉获益

按照前文提出的平原水库福祉获益评估过程,依次计算经济、生态和社会3个维度效益的主、客观权重和组合权重,得到权重结果(表4)。大屯水库提供的生态效益由调节、支持服务组成,包括气候调节、水质净化、固碳释氧和水量存蓄服务价值。经济效益则来自供给服务,包括工业用水供给、生活用水供给和渔业供给服务价值。社会效益则对应文化服务中的教育科研服务价值。大屯水库提供的地区福祉总获益则由表4中组合权重计算得到。

表5给出了大屯水库2015—2021年为地区提供的经济、社会 and 生态效益的变化。大屯水库提供的地区福祉获益以经济和生态效益为主,2015年、

2021年分别为4447.6万元和8561.8万元。2015—2021年生态效益占比呈现下降趋势,由70.58%下降至41.37%。经济效益占比不断增加,从2015年22.53%增至2021年的49.75%,并逐渐趋于稳定。社会效益占比并未出现显著变化,基本维持在6~9%,2017年时最高为9.15%。各维度效益占比上的这种变化表明,该水库对地区人类福祉的提升能力已接近稳定状态,此状态下,经济、生态和社会效益占比分别维持在50%、41%和9%。平原水库提供生态系统服务和地区福祉获益的能力受到工程规模、自然条件等要素的限制。以库容为例,直接影响了平原水库水量存蓄能力和水域面积,水量存蓄、气候调节、固碳释氧功能随之改变进而影响水库的支持和调节服务能力。对大屯水库维护和管

理而言,随着地区居民生活质量的不断改善,对生态环保的需求也随之上升,库区管理机构应在保证基础供水功能前提下,将运营理念从经济生产主导逐步向建设生态功能型水利工程的思路转变,通过生态补水、库区生态维护和改进等手段,促使大屯水库与自然水生态系统之间建立起更为紧密的联系,缓解水生态压力的同时发挥出更多的生态支持作用。

表 4 权重计算结果
Tab. 4 Weight calculation results

权重系数	生态获益	经济获益	社会获益
客观权重 (粗糙集信息熵)	0.296	0.392	0.312
主观权重 (层次分析法)	0.336	0.423	0.241
组合权重 (优化模型求解)	0.329	0.407	0.264

表 5 地区福祉获益评估结果
Tab. 5 Assessment results of the regional
human well-being benefits 单位: 10^6 元

年份	生态效益	经济效益	社会效益	综合服务效益
2015	91.759	29.291	8.961	44.476
2016	93.581	44.840	10.095	51.703
2017	90.956	56.452	14.855	56.822
2018	112.852	113.349	16.204	87.539
2019	96.798	104.953	17.723	79.241
2020	91.758	98.826	19.390	75.530
2021	97.836	117.654	21.003	85.618

4 结论

本研究基于生态系统服务理论框架,对南水北调东线平原水库的生态服务功能进行了分析,以水供给过程为纽带提出平原水库生态系统服务价值核算方法,进一步评估了平原水库提供的地区福祉获益。以鲁北供水工程大屯水库作为案例,对其 2015—2021 年的生态系统服务价值和地区福祉获益进行了评估。

研究发现:平原水库的核心服务功能是水资源供给,在促进地区经济生产的同时保障了水生态安全,为地区提供了经济、生态和社会效益,提升了地区人类福祉水平;综合影子工程法、支付意愿法等多种方法确定了平原水库服务价值的评估标准,将粗糙集和层次分析法作为权重方法,进一步提出平

原水库提供地区福祉获益的评估方法。在大屯水库实际案例应用中,确定了该水库具备的 8 项服务功能,总服务价值从 2015 年的 1.301 亿元增长至 2021 年时的 2.365 亿元,与水量配置密切相关的供给服务是主要构成,2021 年达到 1.177 亿元。由于受到服务地区用水需求和水库本身库容等设计因素的影响,2019 年、2020 年大屯水库的供给和支持服务价值均出现了较大下降。该水库能够持续稳定地促进地区福祉提升,2021 年提供的综合福祉获益达到 0.856 亿元,经济、生态和社会三类效益占比逐渐保持在 50%、41% 和 9%。

南水北调东线工程平原水库为服务地区提供了可观的生态服务价值,调节了自然生态系统的健康状态,促进了地区人类福祉提升。对于水库管理机构而言,应该通过管理模式和建设方案等手段强化水库生态调节功能,拓展其在社会服务层面的功能,在保障经济效益的同时更好地为服务地区提供生态和社会效益。

参考文献:

- [1] 方国华,李智超,钟华昱,等.考虑供水均衡性的南水北调东线工程江苏段优化调度[J].*河海大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(3): 10-18. DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.02.
- [2] 耿世达,屈吉鸿.天津市地下水生态系统服务价值演变[J].*南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1139-1147. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0112.
- [3] 王静,王艳艳,李娜,等.2016年太湖流域洪灾损失及骨干工程防洪减灾效益评估研究[J].*水利水电技术*, 2019, 50(9): 176-183. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2019.09.024.
- [4] 张宇硕,刘博宇,毕旭,等.基于利益相关者感知视角的生态系统服务研究进展[J].*自然资源学报*, 2023, 38(5): 1300-1317. DOI: 10.31497/zrzyxb.20230512.
- [5] 令狐克睿,简兆权,李雷.服务生态系统:源起、核心观点和理论框架[J].*研究与发展管理*, 2018, 30(5): 147-158. DOI: 10.13581/j.cnki.rdm.20180830.006.
- [6] 冯漪,曹银贵,李胜鹏,等.生态系统服务权衡与协同研究:发展历程与研究特征[J].*农业资源与环境学报*, 2022, 39(1): 11-25. DOI: 10.13254/j.jare.2021.0640.
- [7] 王爱国,郭胜川,朱乐.自然资源资产负债表编报体系:概念界定与总体框架[J].*山东社会科学*,

- 2023(4):86-93. DOI: [10.14112/j.cnki.37-1053/c.2023.04.015](https://doi.org/10.14112/j.cnki.37-1053/c.2023.04.015).
- [8] MENG Y, ZHANG H, JIANG P, et al. Quantitative assessment of safety, society and economy, sustainability benefits from the combined use of reservoirs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 324: 129242. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.129242](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129242).
- [9] YANG Z, HUANG X, FANG G, et al. Benefit evaluation of East Route Project of South-to-North Water Transfer based on trapezoid cloud model[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 254: 106960. DOI: [10.1016/j.agwat.2021.106960](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106960).
- [10] 齐娜, 孙威威, 阚海明, 等. 密云水库2008—2019年水生态服务功能评价[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 276-283, 291. DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.037](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.037).
- [11] SUN Q, WANG J G, ZHANG J, et al. Selecting reservoir reconstruction schemes from an ecological-economic trade-off perspective: Model building and case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376: 134183. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.134183](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134183).
- [12] 张代青, 沈春颖, 于国荣, 等. 基于河道流量生态服务效应的水库生态价值优化调度[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2020, 53(2): 101-109, 116. DOI: [10.14188/j.1671-8844.2020-02-002](https://doi.org/10.14188/j.1671-8844.2020-02-002).
- [13] 赵晶晶, 葛颜祥, 李颖, 等. 基于生态系统服务价值的大汶河流域生态补偿适度标准研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(4): 1-8. DOI: [10.13448/j.cnki.jalre.2023.081](https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.2023.081).
- [14] PAHL W C, LUKAT E, STEIN U, et al. Improving the socio-ecological fit in water governance by enhancing coordination of ecosystem services used[J]. *Environmental Science and Policy*, 2023, 139: 11-12. DOI: [10.1016/j.envsci.2022.10.010](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.10.010).
- [15] SAFAEI H, MOTLAGH M G, KHORSHIDIAN M, et al. Introducing a process to select the appropriate dam compensation option based on ecosystem services[J]. *Environment, Development and Sustainability: A Multidisciplinary Approach to the Theory and Practice of Sustainable Development*, 2022, 24(11): 13011-13034. DOI: [10.1007/s10668-021-01980-2](https://doi.org/10.1007/s10668-021-01980-2).
- [16] 王庭辉, 王喜, 秦耀辰, 等. 丹江口库区生态系统服务价值与人类活动时空关联分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(2): 330-341. DOI: [10.11870/cj-lyzyyhj202102008](https://doi.org/10.11870/cj-lyzyyhj202102008).
- [17] 程宪波, 陶宇, 欧维新. 生态系统服务与人类福祉关系研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(7): 885-893. DOI: [10.19741/j.issn.1673-4831.2020.0496](https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2020.0496).
- [18] GUO Z, BOEING W J, BORGOMEIO E, et al. Linking reservoir ecosystems research to the sustainable development goals[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 781: 146769. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.146769](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146769).
- [19] WANG B, ZHANG Q, CUI F. Scientific research on ecosystem services and human well-being: A bibliometric analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107449. DOI: [10.1016/j.ecolind.2021.107449](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107449).
- [20] SUN J, YUAN X, LIU H, et al. Emergy and eco-emergy evaluation of wetland reconstruction based on ecological engineering approaches in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 122: 107278. DOI: [10.1016/j.ecolind.2020.107278](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107278).
- [21] 陈东军, 钟林生. 生态系统服务价值评估与实现机制研究综述[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(1): 84-94. DOI: [10.7621/cjarrp.1005-9121.20230109](https://doi.org/10.7621/cjarrp.1005-9121.20230109).
- [22] 郭妍, 苏子龙, 范振林, 等. 生态产品价值核算研究进展与应用展望[J/OL]. *中国国土资源经济*: 1-16 [2023-10-31] <https://doi.org/10.19676/j.cnki.1672-6995.000903>.
- [23] 程琳琳, 黄婷, 刘焱序. 基于改进价值当量因子的1992—2015年青藏高原生态系统服务价值演化分析[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(5): 242-248, 345-346. DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.034](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2019.05.034).
- [24] 罗琳, 杨璐, 谢红彬, 等. 生态修复背景下矿山公园生态系统服务价值研究: 以福建紫金山为例[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(11): 2171-2179. DOI: [10.13292/j.1000-4890.202210.023](https://doi.org/10.13292/j.1000-4890.202210.023).
- [25] 周文昌, 张维, 胡兴宜, 等. 湖北省湿地生态系统的服务价值评估[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 305-311, 364. DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.040](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.040).
- [26] 刘海燕, 郝海广, 刘焱杰, 等. 北方农牧交错生态脆弱区农户生态足迹及其与收入的关系[J]. *生态经济*, 2019, 35(7): 148-154.
- [27] 贾亦真, 沈菊琴, 王晗. 区域水资源资产确认, 计量及报表编制[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(12): 3297-3312. DOI: [10.31497/zrzyxb.20221218](https://doi.org/10.31497/zrzyxb.20221218).
- [28] AKIF D M, RECEP U, EYUP D. Analyzing the envi-

- ronmental Kuznets curve for the EU countries: The role of ecological footprint[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25: 29387-29396. DOI: 10.1007/s11356-018-2911-4.
- [29] 李雯雯, 何帅, 郝林华, 等. 海岛生态系统文化服务价值评估方法及应用研究[J]. *生态经济*, 2022, 38(10): 119-124.
- [30] 刘姗, 张南, 魏振. 基于粗糙集: 信息熵的水质综合评价方法研究[J]. *人民长江*, 2019, 50(2): 75-78, 89. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.02.014.

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

SUN Qiao, HU Zhouhan, ZHANG Jie, WANG Jigan

(Business School, Hohai University, Nanjing 211106, China)

Abstract: The plain reservoir is an important part of the Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project, supplying water resources for residents, industrial production, and agricultural irrigation, and also providing ecological water replenishment for natural water systems such as mudflats, wetlands, and rivers. Evaluating the ecological service benefits of plain reservoirs will not only help management organizations fully understand the reservoirs' operational status but also guide them in improving the ecological functions, thus promoting human well-being in the service areas. To construct an ecological benefit assessment framework consistent with the engineering characteristics, various calculation methods were synthesized to study the ecological functions and comprehensive benefits of plain reservoirs.

The ecological service functions of the plain reservoir were sorted out based on the ecosystem services theory. The accounting standards of ecological service functions' value were determined by various methods such as shadow engineering, market value, willingness-to-pay and so on. To further explore the comprehensive benefits provided by plain reservoirs, the interactive relationship between the service functions of the plain reservoir and the ecological and socio-economic systems of the service areas was analyzed. Using rough set theory and hierarchical analysis as weight determination methods, an assessment model was further built. The Datun Reservoir in Dezhou, Shandong Province was taken as a practical case to carry out the applied research.

It was found that: The overall service value of Datun Reservoir shows a general upward trend between 2015 and 2021, peaking in 2018, and the total service value reached 236.493 million yuan in 2021. The value of regulating, supplying, supporting, and cultural services has the largest share of supplying services and fluctuates the most due to its relation to water allocation, reaching 117.654 million yuan in 2021, up 88.363 million yuan compared to 29.291 million yuan in 2015. The smallest cultural services value was 21.003 million yuan in 2021. The comprehensive benefits brought by Datun Reservoir to the human well-being in the service area mainly dominated by ecological and economic benefits. The total benefits in 2015 and 2021 were 44.476 and 85.618 million yuan, respectively. The proportion of economic, ecological, and social benefits, showed a stabilizing trend, gradually remaining at 50%, 41%, and 9%.

An accounting standard was proposed for the ecological service value of plain reservoirs and ideas were provided for further assessing the comprehensive benefits of human well-being brought by reservoirs to the region, which not only helps to intuitively reflect the operational status of plain reservoirs but also has practical significance in promoting the realization of the functional value and scientific management.

Key words: Eastern Route of the South-to-North Water Transfers Project; plain reservoir; ecosystem service; value accounting; regional human well-being benefit