水　利　学　报
2025年11月　SHUILI　XUEBAO　第56卷　第11期

文章编号：0559-9350(2025)11-1408-12

水利工程生态服务价值多要素测算与其空间异质性研究

付意成[1,2]，张　剑[1,2]，赵进勇[1,2]，韩振江[3]，张春玲[1,2]

（1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环与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；3. 廊坊市广阳区水务中心，河北 廊坊　065000）

摘要：区域可持续发展及经济社会水平提升与水利工程生态服务功能发挥密不可分。开展区域水利工程生态服务价值测算是实现区域水生态保护和水环境改善的关键举措，亟需从评价方法科学筛选、多因素动态耦合分析以及区域特征识别等方面开展多要素测算。构建系统化的水利工程生态服务价值测算流程，开展水利工程影响程度评价，提出水生态产品市场价值量化方法；从地物空间-功能价值匹配性层面出发，利用InVEST模型量化区域影响程度及模块价值，并通过系统优化方法对水利工程生态服务价值进行提升；基于空间利用转化矩阵，绘制不同时期水利工程生态服务价值的空间展布图，探讨其时空变化特征和空间展布规律。研究结果显示，2000—2020年间，廊坊市城市化土地的空间范围增加，植被空间范围略有下降，动态指数为-0.03%；水利工程生态服务价值呈上升趋势，增长58.42%；水利工程生态服务价值与植被分布面积、水域面积呈显著正相关关系，与裸地面积呈显著负相关关系；基于自然解决方案(NbS)的生态环保产业和生态修复相关的经济社会指标与生态服务价值的相关系数大于0.3，表明其具有较强的相关性。研究成果可为实现区域水生态安全和水土资源的可持续利用提供技术支撑。

关键词：水利工程；生态服务价值；多要素测算；空间展布；廊坊市

中图分类号：F062.2　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20240517

1　研究背景

生态系统服务价值(Ecosystem Services Value，ESV)测算是量化生态系统服务功能并增进人类福祉的关键举措，其中区域可持续发展与经济社会水平的提升，与水利工程生态服务功能的有效发挥密切相关，其价值评估更是实现水生态安全的重要手段[1]。科学评价ESV并定量描述其时空演变特征，可为开展流域水生态环境复苏提供重要参考。近年来，随着系统、生态、绿色发展逐渐变为可持续发展框架的核心，开展水利工程生态服务价值的研究尤为重要[2]。尽管已有学者对ESV的评估方法进行了广泛探讨，但当前仍缺乏一套能够全面考量多要素影响并有效反映空间异质性的统一评估方法[3]。此外，评估方法、研究体系、区域特征等因素均对水利工程生态服务价值测算结果造成影响，导致很难用单一方法全面评估其价值[4]。目前，测算ESV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[5-6]。本研究在水利工程生态服务价值评估中选择采用等效因子法进行测算，该方法虽相对简便且在区域尺度具有应用基础，但其测算结果对等效因子高度敏感。鉴于此，为提升水利工程生态服务价值评估的科学性和区域适用性，本文将通过深入剖析等效因子法的敏感性，识别并量化影响其测算结果的关键因素。

收稿日期：2024-08-11；网络首发日期：2025-11-17

网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/11.1882.TV.20251116.2032.002

基金项目：国家重点研发计划项目(2024YFC321090003)；国家自然科学基金项目(黄河水科学研究联合基金)(U2443208，U2243601)；广西重点研发计划项目(桂科AB25069137)；北京院核心技术攻关项目(ZT2024-07)

作者简介：付意成(1983—)，博士，正高级工程师，主要从事流域生态补偿研究。E-mail：swfyc@126.com

通信作者：张剑(1989—)，博士，工程师，主要从事水生态产品价值测算研究。E-mail：swzjian@126.com

中国知网　https://www.cnki.net

鉴于传统基于单位服务功能量的价值测算方法涉及参数较多、计算过程复杂，且缺乏统一的评价参数标准，本研究在前述采用等效因子法的基础上，为进一步识别由生态系统服务类型和质量变化所引起的时空差异影响，并准确刻画其时空演变特征，引入生态系统服务与权衡综合评估模型（InVEST），以实现对水利工程生态服务功能及其价值的动态评估[7]。为此，本文以等效因子法为评估基础，结合InVEST模型对廊坊市水利工程生态服务价值当量进行修正与校准，并融合相关统计资料，开展ESV的动态测算。在测算过程中，将各类土地利用类型的面积与其对应的经InVEST模型修正后的价值系数相乘，得出各类型土地的生态服务价值量，依据功能相似性原则进行归并汇总，最终计算得出廊坊市水利工程生态服务价值总量。研究技术框架见图1。

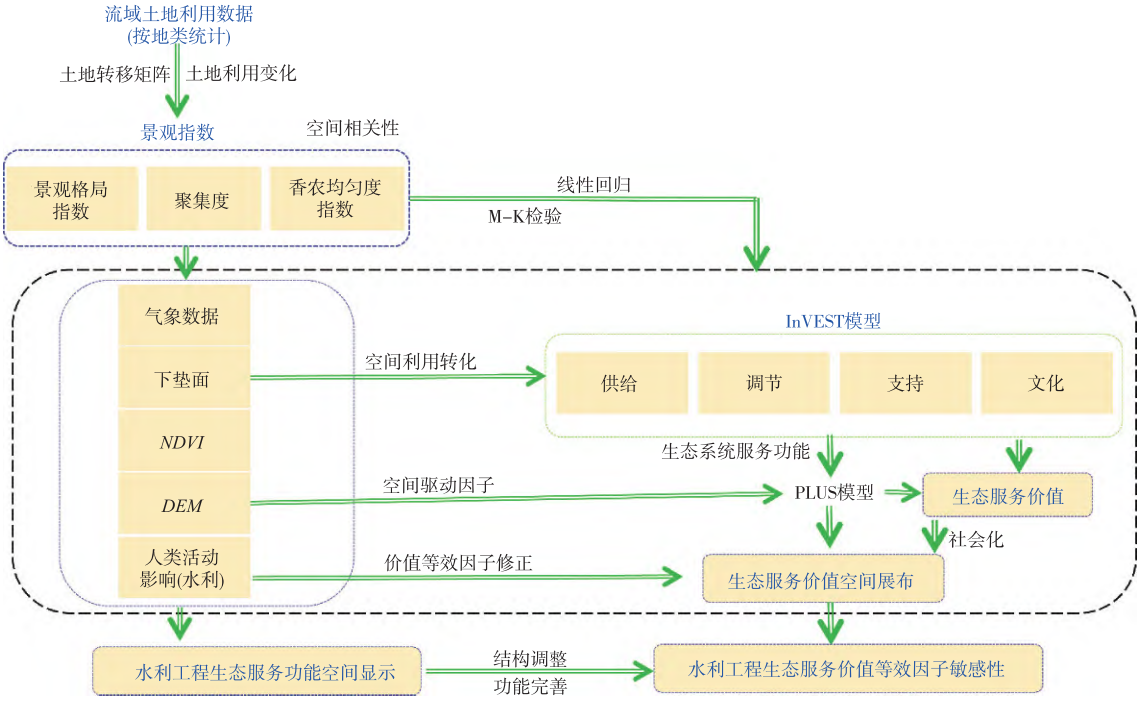


图1　水利工程生态服务价值多要素测算框架

2　研究区与方法

水利工程生态服务价值测算对于生态要素空间管控至关重要。本文以功能识别为导向，结合区域发展与生态保护定位，系统开展*ESV*多要素测算与空间展布分析。

2.1　研究区概况　廊坊市地处海河流域中下游，介于38°30′N—40°05′N、116°07′E—117°15′E间，市域面积6429 km^2，现辖10个县（市、区）。廊坊市域内河网密布、水利工程众多，共有水域及水利设施用地403.4 km^2，占廊坊市域总面积6.32%，其中，流域面积50 km^{2}以上河渠总长度2021 km，流域面积50 km^{2}以下的河渠长度约5096 km。近年来，随着京津冀一体化进程的加快，廊坊市域内生态空间受到挤压。廊坊市地理位置见图2。

2.2　数据来源　本文的数据来源涵盖不同空间及时间尺度的多种资料，包括Landsat系列遥感影像、行政区划图、地形图、数字高程模型（DEM）、土壤图、土地利用总体规划以及社会经济统计年鉴等。这些综合性资料为深入分析研究区域的地理、生态和社会经济特征，评估土地利用现状及未来趋势，并开展生态服务价值测算提供了基础支撑。其中，2000—2020年期间的土地利用数据是基于美国地质调查局（https://earthexplorer.usgs.gov/）提供的Landsat系列遥感影像（空间分辨率30 m×30 m）经处理后获取的。本文采用ENVI 5.3软件对这些遥感影像进行波段组合、几何校正、投影转换、图像拼接和裁剪等预处理操作。此外，为确保所有数据的空间一致性与可用性，DEM数据来源于美国国家基础地理信

中国知网　https://www.cnki.net

息中心(http://www.ngcc.cn/ngcc/)，并与其他获取数据一并进行了统一的投影与校正处理。

为有效捕捉廊坊市土地利用在重大政策周期和发展阶段中的显著变化，本文以2000年、2010年和2020年为关键时间节点，开展土地利用结构变化分析。其中，土地利用及覆被变化分析所用的景观地图来源于30 m分辨率的Landsat TM/ETM+/OLI图像，并采用ENVI 5.3版本进行图像分类处理。此外，土地利用、年降水量、年平均气温和归一化植被指数(NDVI)数据来源于资源环境数据中心(https://www.resdc.cn)；粮食作物产量、粮食作物单价、粮食作物种植面积等统计数据来自河北省廊坊市《统计年鉴》和《国民经济和社会发展统计公报》；高程数据来源于SRTM；土壤数据则来自国家地球系统数据中心。

图2　廊坊市地理位置

2.3　土地利用分类　为支撑对2000年、2010年和2020年土地利用结构变化的分析，本文基于廊坊市下垫面特征和研究需求，将土地利用类型划分为农田、林地、建设用地、水域、草地及裸地6类。其中，农田、林地和草地不作细分；建设用地细分为城镇用地、工矿用地和交通用地；水域包括滩地、河渠和湿地。基于ENVI 5.3对3期Landsat影像进行图像分类处理，并在ArcGIS环境下，结合实地调研和已有研究成果，对2000年、2010年、2020年的土地利用图进行解译、订正及统一性处理。

2.4　研究方法　为深入理解廊坊市土地利用结构及其生态效应，特别是水利工程建设对区域生态系统的潜在影响，本文基于已分类的2000年、2010年和2020年土地利用数据集，系统分析其景观格局(通过形状指数*LSI*、聚集指数*AI*和Shannon多样性指数*SHDI*等量化)的演变特征。在此基础上，重点评估水利工程生态服务价值的时空变化特征。为全面揭示*ESV*的演变趋势、驱动机制及未来空间分布特征，本文综合采用改进的*ESV*系数法、M-K趋势检验、地理探测器模型以及PLUS模型等方法进行分析。

2.4.1　*ESV*测算　本文基于廊坊市30 m×30 m分辨率的土地利用数据及区域经济社会发展、产业布局等相关社会经济数据，采用改进的*ESV*系数法，量化土地利用变化对水利工程生态服务价值的综合影响。该方法结合中国陆地生态系统类型的不同服务功能价值评估系数，并根据廊坊市水利工程建设实际情况及其影响范围内的土地利用特征，对基础当量进行基于时间动态性和空间异质性的精细化修正。测算过程如下：

$$E_s = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{m_i \times p_i \times q_i}{M}\right) \tag{1}$$

式中：E_s为标准等效因子值；n为研究区内土地利用类型的总数量；m_i、p_i、q_i分别为第i种土地利用类型的面积、产出的单价和单产；M为水利工程影响区土地利用总面积。

我国陆地生态系统单位面积生态服务价值当量确定过程中忽略了同种用地类型内部因生物量等的地域差异而导致的空间异质性和随时间变化呈现出的动态性。本文综合考虑自然地理因素和社会经济因素的影响，借鉴谢高地等[8]研究成果对价值计算过程中的标准当量系数进行时空修正，考虑到海河流域、廊坊市生物多样性和生态服务价值的差异，2000年、2010年、2020年分别按照差异0.58、0.75、0.95的生物量因子修正。水利工程生态服务价值与社会经济发展密切相关。鉴于廊坊市的社会经济发展水平，本文对*ESV*测算系数进行二次修正，并采用*S*曲线模型对其发展趋势进行拟合与表征。

综合上述修正方法，改进后的*ESV*计算公式如下：

中国知网　https://www.cnki.net

$$\begin{cases} ESV_t = \sum_{i=1}^{n} (Area_{i,t} \times VC'_{i,t}) \\ VC'_{i,t} = VC_{i,\text{base}} \times BF_t \times SCF_t \end{cases} \tag{2}$$

式中：ESV_t为廊坊市在时间t的生态服务价值总量；$Area_{i,t}$为时间t时，第i种土地利用类型的面积；$VC'_{i,t}$为在时间t时，第i种土地利用类型经过修正后的单位面积生态服务价值系数；$VC_{i,\text{base}}$为第i种土地利用类型的基础单位面积生态服务价值系数，通常来源于谢高地等研究的基础当量表，并乘以单位当量经济价值（如当地粮食作物单产的市场价格）；BF_t为时间t的生物量因子，用于修正生态系统内部的空间异质性和时间动态性，2000年为0.58，2010年为0.75，2020年为0.95；SCF_t为时间t的社会经济修正因子，反映廊坊市的社会经济发展水平。

SCF_t通过S曲线模型$f(SED_t)$拟合与表征，其一般形式可表示为：

$$SCF_t = f(SED_t) = \frac{L}{1 + e^{-k(SED_t - SED_{\text{mid}})}} \tag{3}$$

式中：SED_t为时间t时，廊坊市的社会经济发展水平指标（如人均GDP或综合指数）；L为S曲线的上限值；k为曲线的增长速率参数；SED_{mid}为曲线中点对应的社会经济发展水平。

SED_t的计算通常涉及多个相关指标（如人均GDP、城镇化率、第三产业占比、居民可支配收入等），并通过主成分分析、熵值法或简单加权平均等方法进行综合计算，计算公式为：

$$SED_t = \sum_{b=1}^{T} (w_b \times I_{b,t}) \tag{4}$$

式中：$I_{b,t}$为时间t时，第b个社会经济指标的标准化值；w_b为第b个指标的权重（$\sum w_b$=1），各指标需先进行标准化处理以消除量纲影响；T为社会经济指标总数。

廊坊市水利工程生态服务价值的发挥受京津冀一体化建设及生态保护目标的制约，同时城市化进程给生态保护工作的开展造成了一定的影响。在人为活动和自然因素作用下，各类生态系统服务之间往往表现为此消彼长的权衡关系和相互增益的协同关系，基于此，本文设定生态保护、社会发展、生态保护-社会发展3种不同情境[9]。针对廊坊市特殊的地理位置和发展情景，其生态服务价值系数是随着生态保护力度的加大在逐渐增加[10]。本文借助敏感性分析开展ESV的变化情况分析。在农田、林地、草地、水域和建设用地的ESV系数分别调整50%的情况下，敏感系数（CS）计算公式如下：

$$CS = \left| \frac{(ESV_j - ESV_o)/ESV_o}{(VC_{ij} - VC_{it})/VC_{it}} \right| \tag{5}$$

式中：CS为敏感性系数；ESV_o、ESV_j分别为初始和调整后的ESV值；VC_{ij}、VC_{it}分别为土地利用类型i的调整系数和初始值系数。

计算过程中，如果CS>1，ESV相对于VC是弹性的；当CS<1时，ESV是非弹性的。若CS越低，则ESV调整系数越可靠。InVEST模型在计算过程中评估系数的取值多从依靠不同ESV的中位数构建的经验值数据库中选取。

2.4.2 *异质性分析* 为确定各因子对ESV空间异质性的干扰程度，本文使用因子检测器进行表征。衡量指标q计算公式为：

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^{Y} N_h \sigma_h^2 \tag{6}$$

式中：q为因子检测器的解释力，表示自变量因子（如$NDVI$、降水PRE、DEM、温度TEM等）对因变量（ESV）空间异质性的解释程度，q值在0到1之间，其值越大，说明该因子对ESV空间分布的解释能力越强；N为研究区域内所有空间单元（如网格单元、土地利用斑块等）的总数量；Y为根据某个自变量因子（如$NDVI$值被划分为低、中、高多个等级）所划分的层级总数；N_h为在第h个层级（或子区域）内的空间单元数量；σ_h^2为在第h个层级内ESV的方差，反映了在该层级内部ESV的离散程度；σ^2为整个研究区域内ESV的总方差，反映了整个研究区域ESV的总体离散程度。

2.4.3 *景观格局指数* 景观格局指数（Landscape Pattern Indices，LPIs）已被广泛用于衡量景观格局及其

中国知网 https://www.cnki.net

与土地利用、生物多样性分布、生态过程和生态系统功能间的关系。本文利用*LSI*、*SHDI*、*AI*等指标进行LPIs计算，以表征景观演变的时空规律(见表1)。景观格局指数利于开展景观差异性在空间分布中的表征，且各景观要素的分布存在明显的不均匀性，土地利用分类对景观格局指数具有显著影响。

表1　LPIs及其相关的生态意义

指标	尺度	范围	计算公式	解释
景观形状指数(*LSI*)	景观	[1，+∞)	$LSI=\frac{P_{\text{total}}}{2\sqrt{\pi\cdot A_{\text{total}}}}$	P_{total}为景观中所有斑块的周长总和；A_{total}为研究景观的总面积。*LSI*体现景观形状的复杂性，其值越高，景观形态越不规则，景观类间相互干扰越明显。
聚合指数(*AI*)	景观	[0，100]	$AI=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}g_i}{\sum_{i=1}^{n}\max(g_i)}\right]\times 100\%$	n为景观中土地利用类型的总数量；g_i为第i种土地利用类型中，相同类型单元(像元)之间相邻边界的数量；max(g_i)为在给定第i种土地利用类型单元数量的情况下，其可能达到的最大相邻边界数量。*AI*衡量景观组成的聚集程度。*AI*值越高，斑块越聚合，反之亦然。
香农多样性指数(*SHDI*)	景观	[0，+∞)	$SHDI=-\sum_{i=1}^{n}(A_i\times\ln A_i)$	A_i为第i种土地利用类型所占A_{total}的比例。*SHDI*体现景观的丰富性和复杂性。只有一个景观斑块且无其他多样性时，*SHDI*为0。*SHDI*值越高，景观中各种斑块类型的分布越均匀。

2.4.4　M-K趋势检验　为量化水利工程生态服务价值受景观格局影响的长期效应，本文采用非参数Mann-Kendall(M-K)趋势检验方法，对表征价值变化的LPIs时间序列数据进行单调趋势分析。M-K检验方法不依赖于数据的特定分布形式，且对异常值具有较强的鲁棒性，适用于*ESV*时间序列的趋势分析。该方法的原假设(H_0)为时间序列不存在单调趋势，备择假设(H_α)为时间序列存在上升或下降的单调趋势。其检验统计量S的计算公式如下：

$$S=\sum_{t_1=1}^{r-1}\sum_{t_2=t_1+1}^{r}\operatorname{sgn}(x_{t_2}-x_{t_1}) \tag{7}$$

式中：r为时间序列数据的长度；x_{t_1}和x_{t_2}分别表示时间序列中第t_1和第t_2个时刻的观测值；sgn(·)为符号函数，当$x_{t_2}-x_{t_1}>0$时为1，当$x_{t_2}-x_{t_1}<0$时为-1，当$x_{t_2}-x_{t_1}=0$时为0。

当数据中存在重复值时，S的方差$var(S)$计算公式为：

$$var(S)=\frac{r(r-1)(2r+5)-\sum_{p=1}^{g}c_p(c_p-1)(2c_p+5)}{18} \tag{8}$$

式中：g为重复值组的数量；c_p为第p个重复值组中重复数据的数量。

当$r>10$时，检验统计量Z近似服从标准正态分布，其计算公式为：

$$Z=\begin{cases}(S-1)/\sqrt{var(S)} & S>0\\ 0 & S=0\\ (S+1)/\sqrt{var(S)} & S<0\end{cases} \tag{9}$$

在双尾检验中，给定显著性水平α(本文设定$\alpha=0.05$)，若$|Z|>Z_{\alpha/2}$，则拒绝原假设H_0，认为时间序列存在显著的单调趋势。其中，$Z_{\alpha/2}$为标准正态分布的临界值(当$\alpha=0.05$时，$Z_{0.025}\approx1.96$)。若$Z>0$且检验结果显著，表明LPIs呈现显著上升趋势，水利工程生态服务价值呈改善趋势；反之，若$Z<0$且检验结果显著，则呈现显著下降趋势。

2.4.5　人类活动强度　为精准评估水利工程建设影响区内人类活动对*ESV*的潜在干扰程度，本文构建了人类活动强度(*HAILS*)指标。*HAILS*通过土地利用类型及其对应的活动强度当量，综合反映区域人类活动的总体水平。*HAILS*值越高，表明区域内人类活动强度越大，对生态系统(特别是*ESV*)的压力和潜在影响越显著[11]。其计算公式如下：

中国知网　https://www.cnki.net

$$HAILS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(SL_i \times CI_i)}{S_{total}} \times 100\% \quad (10)$$

式中：$HAILS$为水利工程建设影响区内的人类活动强度指数，为无量纲值；S_{total}为水利工程影响区的总土地面积；SL_i为第i种土地利用类型的面积；CI_i为第i种土地利用类型转化为“建设用地当量”的转换系数（建设用地为1，农田为0.8～0.9，林地为0.2～0.4，草地为0.1～0.3，水域为0.05～0.2，裸地为0～0.1）。

2.4.6 *ESV*空间格局模拟与验证 为精确模拟水利工程建设影响下廊坊市网格尺度上的*ESV*动态，将元胞自动机（CA）嵌入PLUS模型的CARS模块，实现分区土地利用变化驱动下的*ESV*动态模拟。CA模型以其离散的时空计算特性，能够有效刻画不同土地利用类型在时间和空间上的演变过程，进而反映其对*ESV*的影响[12]。CA模型的一般表达式为：

$$G_{t+1} = f(G_t, Q_t, R_t) \quad (11)$$

式中：G_{t+1}为元胞在t+1时刻的状态，表示其土地利用类型；G_t为元胞在t时刻的状态，表示其土地利用类型；Q_t为元胞在t时刻的邻域状态，即周围元胞的土地利用类型，邻域通常包括Moore邻域（8个方向）或Von Neumann邻域（4个方向）；R_t为在t时刻元胞状态变化的转移规则，由模型根据驱动因子（如自然条件、社会经济因素和政策、水利工程建设等）和地块发展概率确定。

为精确量化水利工程建设对区域ESV空间格局的潜在影响，本文采用PLUS模型和CA-Markov模型对土地利用需求进行预测。PLUS模型能够高效整合自然地理与社会经济驱动因子，实现高精度的多类型土地利用格局演变模拟。模型的模拟精度采用K_{appa}系数进行验证，以评估模拟土地利用格局与实际利用格局间的一致性，间接反映*ESV*模拟结果的可靠性。K_{appa}系数计算公式为：

$$K_{appa} = (P_O - P_C)/(P_P - P_C) \quad (12)$$

式中：P_O为总体分类精度；P_C为实际模拟精度；P_P为理想模拟精度（100%）。

一般情况下，当$K_{appa} \geq 0.75$时，实际值与模拟值的吻合度较高；当$0.4 < K_{appa} < 0.75$时，符合一般规律；当$K_{appa} \leq 0.4$时，一致性较低[13]。

2.4.7 相关性分析 本文计算水利工程生态服务价值与各类土地利用面积及社会经济统计数据之间的相关系数，并据此分析影响水利工程生态服务价值变化的主要因素。本文选取总人口、GDP、人均GDP、第一、第二、第三产业总产值等14项社会经济指标，以探讨其与*ESV*之间的相关性。在计算过程中，若相关系数小于等于0.3，则判定两者相关性较弱；若大于0.3，则认为存在较强的相关性，可进一步开展要素间的关联性及其程度分析。计算公式如下：

$$\rho = [\sum(u - \bar{u})(v - \bar{v})] / \sqrt{\sum(u - \bar{u})^2 \cdot \sum(v - \bar{v})^2} \quad (13)$$

式中：u，v为参与分析的两个变量；$\bar{u}$、$\bar{v}$为参与分析的两个变量的平均值。

3 研究结果与讨论

3.1 土地利用结构变化 在采用监督分类与人工神经网络方法进行图像处理的基础上，开展土地利用类型的数据分析与实地验证，以确保每幅地图的整体分类精度达到80%以上。本文对廊坊市的农田、森林、草地、水域、建设用地及裸地6种土地利用类型的分类图像进行精度评估，结果显示，2000年、2010年和2020年3个典型年的土地利用类型总体分类精度分别为80.4%、83.0%和85.1%，对应的K_{appa}系数分别为0.79、0.82和0.83。分析表明，各项性能统计指标均处于Olofsson等[14]所推荐的合理范围内，因此该数据可用于不同土地利用类型的*ESV*的计算。

3.1.1 数据合理性 本文采用最大似然（ML）算法对预处理后的遥感数据进行检查，将像素按最大似然概率归类，并结合土地利用动态指数分析土地利用变化。图像预处理后，依据目标地物在光谱、形状及纹理特征的差异，选取代表性训练样本，利用ML算法将研究区土地利用类型划分为植被分

中国知网 https://www.cnki.net

布区(含林地、农田、草地)、水域、建设用地和裸地四类，并计算其空间分布范围。通过训练样本验证分类结果，采用生产者精度(*PA*)、用户精度(*UA*)、总体精度(*OA*)和K_{appa}系数评估精度，确保分类的准确性与可靠性[15-16]。相关参数有助于揭示土地利用类型的面积变化、景观特征、时空变异及转化速率的空间分布趋势。参数分析结果从空间位置和数量维度定量阐明景观变化过程中数量、位置及综合信息的演变。最后，计算土地利用动态指数，系统分析研究区土地利用变化过程。

本文基于2000—2020年遥感数据，采用监督分类法中的最大似然估计，在训练样本支持下，对廊坊市土地利用分区进行精度评价(见表2)。*PA*平均值分别为：植被分布区93.15%、水域95.68%、裸地77.90%、建设用地83.24%；*UA*平均值分别为：植被分布区90.66%、水域99.83%、裸地75.03%、建设用地83.54%；*OA*为90.04%，K_{appa}系数为0.86。评价结果表明，该分类精度满足廊坊市水利工程生态服务价值测算的要求。

表2　土地利用分类精度评价

时间	植被分布区		水域		裸地		建设用地		*OA*/%	K_{appa}系数
	PA/%	*UA*/%	*PA*/%	*UA*/%	*PA*/%	*UA*/%	*PA*/%	*UA*/%		
2000	96.66	87.47	90.70	99.96	85.71	91.48	83.75	83.88	90.35	0.87
2010	86.31	96.99	98.33	99.66	69.57	61.71	87.17	82.09	90.05	0.86
2020	96.47	87.52	98.02	99.87	78.41	71.88	78.81	84.65	89.71	0.85
平均	93.15	90.66	95.68	99.83	77.90	75.03	83.24	83.54	90.04	0.86

廊坊市的土地利用类型以农田为主，建设用地次之。2000—2020年间，农田面积呈减少趋势，建设用地则持续增加。在各类土地利用中，农田面积减少最为显著，累计减少293.1 km²；建设用地增幅最大，研究期间增加了284.49 km²。水域面积在研究期内基本保持稳定，仅增长1.25 km²。其他土地利用类型的面积总体维持动态平衡，未出现显著变化。

3.1.2　*土地转移矩阵*　基于2000年、2010年和2020年三期典型土地利用类型图，利用ArcGIS 10.3和Excel等工具对三个阶段的土地利用面积进行统计，生成土地转移矩阵(见图3)，分析面积与空间变化状况，并进一步评估*ESV*在空间变化下的转移情况。根据2000—2020年土地利用转移矩阵数据分析结果，农田和建设用地的面积变化最为显著，其次为水域。农田面积整体呈下降趋势，而建设用地面积则持续上升。土地转移矩阵能够实现对土地利用类型及其生态服务功能动态变化的空间表达，并对其相互关系进行定量分析。

基于廊坊市土地利用变化图谱分析，2000—2020年期间，农田面积呈现显著减少趋势，其中北三县变化最为突出；与此同时，建设用地面积大幅增加，主要集中在北三县，该变化特征与区域经济发展模式及流域生态保护格局高度契合。土地利用格局的演变是流域*ESV*变化的核心驱动因素，农田、林地和草地面积的减少直接导致*ESV*整体呈下降趋势。生态用地面积由2000年的5309.96 km²减少至2020年的5019.76 km²，这一变化与京津冀城市一体化发展战略及廊坊市的城市功能定位密切相关。研究期内，建设用地持续扩展，植被与裸地面积有所缩减，水域面积则缓慢增长，主要得益于永定河生态补水工程、华北平原地下水压采政策的实施。随着水利工程调控作用的持续发挥，城镇用地面积在20年间增长26.26%(即290.2 km²，土地利用动态指数为10.05%)，植被空间范围略有下降(动态指数为−0.03%)。

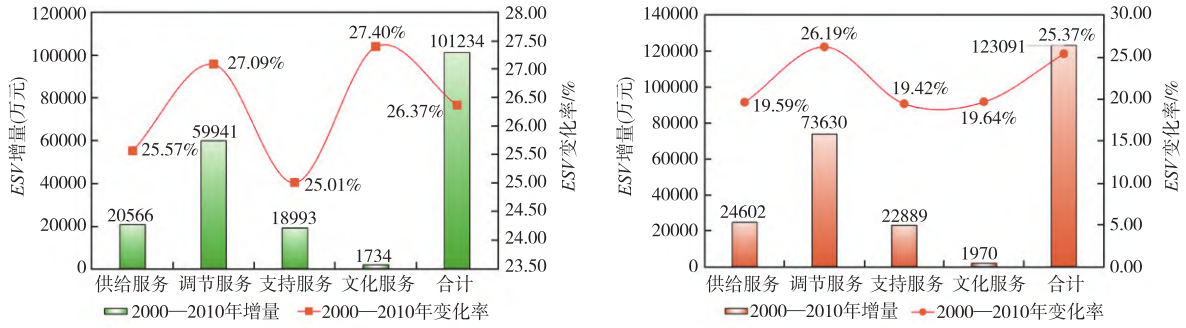
3.2　价值量测算结果　在京津冀协同发展战略推动下，廊坊市城市建设进入快速发展阶段，建筑用地面积显著增加。考虑到土地转化的必要性以及土地利用政策调整等社会经济因素对*ESV*的潜在影响，本文引入经修正的生态因子与社会经济因子，对水利工程生态服务价值进行评估。尽管研究期内生态用地面积有所减少，但由于社会经济综合因素驱动下生态产品价值的提升，水利工程生态服务价值仍呈增长趋势。2000—2020年，研究区土地利用变化主要表现为农田和草地向建设用地及水域的转化，受此影响，*ESV*呈现波动上升趋势[17]。已有研究普遍指出，在自然、社会、经济等多重因素驱动及土

中国知网　https://www.cnki.net

地利用动态变化的共同作用下，区域*ESV*即便在面临局部生态用地面积调整或波动时，其总体仍呈现增长趋势[18-19]。

研究区水利工程生态服务价值由2000年的383 906万元增长至2020年的608 231万元，增幅达58.42%。其中，生态用地敏感区域中水域、植被分布区及裸地的*ESV*分别增长64.1%、54.6%和190.9%。廊坊市水利工程影响范围内，各类土地利用类型的敏感性指数均小于1，表明生态系统对价值协同效率的响应较弱，缺乏弹性。因此，所采用的生态服务价值系数具有合理性，测算结果具备可信度。从功能分类来看，2000年调节服务价值为221 197万元(占57.61%)，供给服务为80 427万元(20.95%)，支持服务为75 954万元(19.79%)，文化服务为6 328万元(1.65%)，凸显了水利工程在调节功能方面的主导作用，也反映出其在区域*ESV*提升中的关键地位。研究成果与华北地区及海河流域生态服务价值构成特征基本一致，进一步印证了水利工程在北方半干旱地区生态调控中的重要作用。2000年，廊坊市水利工程生态服务价值约占区域GDP的11.7%，而陆地水生态系统服务价值约为全国GDP的10.97%，两者结论高度吻合[20]。至2020年，调节服务价值达356 474万元(占比57.61%)，供给服务为124 907万元(20.95%)，支持服务为116 852万元(19.79%)，文化服务为9 998万元(1.65%)。由此可见，水利工程的生态服务功能仍以调节作用为主，充分体现了其在间接生态效益中的关键地位。

不同时期廊坊市水利工程生态服务价值的变化趋势存在差异，但总体呈现增长态势。2000—2010年和2010—2020年的生态服务价值分别增长了26.37%和25.37%。在四类服务功能中，2000—2010年间增长幅度最大的为文化服务，达27.40%；而2010—2020年间增长幅度最高的是调节服务，为26.19%(见图3)。



(a) 2000—2010年*ESV*变化情况　　(b) 2010—2020年*ESV*变化情况

图3　廊坊市水利工程*ESV*变化情况

2000—2020年期间，廊坊市生态用地面积因社会建设活动总体呈下降趋势，主要表现为城市中心城区建设用地的持续扩展，而湿地和水域面积则略有增加[21]。水利工程生态服务价值的稳步提升，反映出区域在水环境综合治理与水生态系统保护方面取得了显著成效，表明生态服务功能的正向作用显著优于工程建设对生态环境的干扰影响。廊坊市河渠网络发达，农田、林地和草地多沿河流分布，生态用地占比由北向南逐渐升高，尤以南部子牙河水系区域最为突出。同时，单位面积*ESV*随时间推移持续增长，增长率分布在10%～50%之间，显示出区域生态功能的持续优化趋势。

3.3　结果讨论

3.3.1　相关性分析　廊坊市土地利用类型、自然因素以及社会经济指标的变化对水利工程生态服务价值的演变具有显著影响。研究表明，生态资源与经济活动(以GDP表征)之间存在正相关关系，表明经济增长是流域生态环境改善和*ESV*提升的重要基础[22]。在分析廊坊市水利工程影响范围内各类土地利用面积与生态价值总量相关性的基础上，结合当前衡量区域社会经济发展的核心指标，本文通过查阅廊坊市经济社会年鉴与统计资料，并依据区域生态功能定位与保护目标，选取了14项社会经济指标，进一步计算典型土地利用类型与水利工程生态服务价值间的相关系数。结果显示，植被状况、水域及裸地的相关系数分别为0.3578、0.75623和−0.3998。计算结果表明，裸地面积的增加与*ESV*呈负相关，抑制了生态服务价值的增长；植被状况和水域面积则与*ESV*呈正相关关系，表明其对生态服务价值的

中国知网　https://www.cnki.net

提升具有积极推动作用；区域生态保护措施的实施有效提升了以水为载体的生态服务价值。其中，水域与总*ESV*的相关系数最高，表明水域面积变化对*ESV*具有显著影响。此外，*ESV*与常规社会经济指标的相关系数普遍低于0.3，相关性较弱；而与基于自然的解决方案(NbS)的生态环保产业及生态修复类指标的相关系数均高于0.3，显示出较强的相关性(见表3)，体现出此类措施对区域可持续发展的支撑作用。相关系数分析结果有助于阐明廊坊市水利工程生态服务价值及其关键测算要素之间的关联性，从而为生态系统的科学管理与可持续生态服务供给提供理论支持。

表3　水利工程生态服务价值与经济指标间的相关系数

指标	相关系数	指标	相关系数
人口	0.248	水利工程调蓄农业需水量后农业总产值	0.334
GDP	0.096	水利工程调蓄林业需水量后林业总产值	0.246
人均GDP	0.092	基于NbS的水量保障举措效益	0.374
一产总产值	0.106	基于NbS的水质改善举措效益	0.346
二产总产值	0.087	基于NbS的水生态修复举措效益	0.377
三产总产值	0.103	水利工程固定资产投入	0.269
工业总产值	0.093	涉水空间及生态服务开发旅游业总收入	0.253

3.3.2　*敏感性分析*　研究期间，廊坊市水域面积的增加导致调节服务和供给服务价值上升，而植被面积的减少则导致粮食生产和原料生产服务价值下降。为评估廊坊市水利工程生态服务价值计算结果的可靠性与准确性，本文对计算结果进行了敏感性分析。通过将生态服务价值系数(*VC*)上下调整50%，并依据敏感性指数公式计算各土地利用类型的敏感性指数(见表4)，结果显示，所有类别的敏感性指数均小于1，表明*ESV*对价值系数的变化不敏感，计算结果具有较高可信度[23]。在各类土地利用类型中，植被的敏感性指数最高，水体次之，说明二者对总生态服务价值的影响较大；裸地的敏感性指数较低，表明其价值系数的变化对总生态服务价值量影响较小。

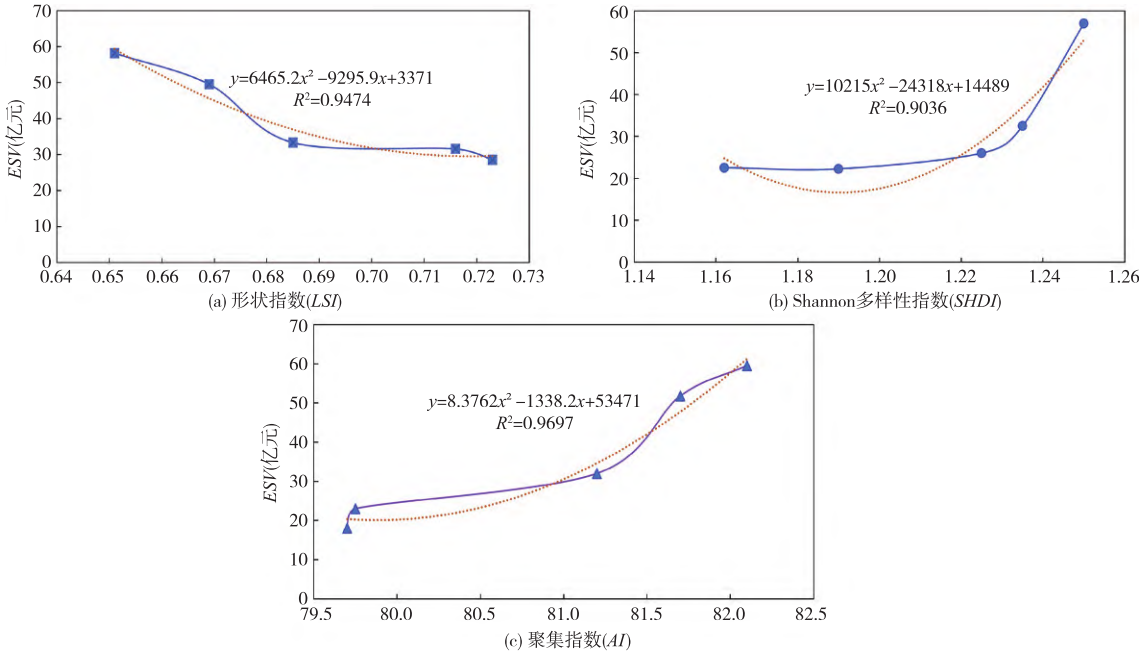
表4　水利工程生态服务价值系数敏感性指数

土地利用类型	*VC*	2000年	2010年	2020年
植被分布区	±50%	0.8472	0.7749	0.7287
水域	±50%	0.1476	0.2213	0.2651
裸地	±50%	0.0052	0.0038	0.0062

水利工程的建设对区域土地利用开发模式产生显著影响，导致相关土地利用类型的扩张或收缩，进而引发区域建设格局与生态资源配置方式的变动。M-K趋势检验结果表明，在2000—2020年间，*ESV*、*LSI*、*AI*和*SHDI*均呈现显著的单调变化趋势($P<0.05$)。其中，*LSI*呈逐渐下降趋势，表明廊坊市景观形态趋于规整，生态用地逐步向建设用地转化；而*SHDI*与*AI*则显著上升，说明水利工程建设推动了土地利用类型的分布更加均匀且集中。在空间分布方面，廊坊市水利工程生态服务价值与最大*LPIs*呈显著相关性(见图4)，*ESV*与*LSI*呈负相关，而与*SHDI*和*AI*呈正相关。研究结果进一步表明，土地利用斑块越密集，景观要素形态越规整，越有利于生态系统生物多样性的维持与功能的发挥。*ESV*与*AI*之间存在显著正相关关系，表明廊坊市各类土地利用类型分布较为均衡，空间格局趋于协调，有助于提升整体生态服务价值。

基于廊坊市水利工程的修正价值系数，并结合景观空间格局变化与*ESV*数值的相关性分析可知，农田是造成*ESV*变化的主要贡献者，其次为水域。从不同土地利用类型的生态服务价值来看，农田的*ESV*增长显著，约占生态环境价值总增长量的50%；未利用地的*ESV*略有上升；尽管水域与未利用地的面积呈减少趋势，其*ESV*仍呈现增长态势。*ESV*的变化主要源于水利工程影响区域内生态用地面积的变动。2000—2020年间，各类土地利用类型的*ESV*总体呈上升趋势，其中水域和林地的单位面积*ESV*高于其他土地类型。结合廊坊市水利工程生态服务价值空间格局特征及参数敏感性分析结果，本文计算并列出了不同土地利用类型的*ESV*贡献率(*CS*)，见表5。整体来看，水利工程生态

中国知网　https://www.cnki.net



注：数据在双侧检验0.05水平上相关性显著。图中用于分析的数据系列为2000、2005、2010、2015、2020年。

图4　廊坊市水利工程生态服务价值与区域景观格局相关性

服务服务价值总量呈上升趋势，其中调节服务价值占比最大，但其增长速度较慢，空间依赖性较弱[24]。

表5　廊坊市水利工程生态服务价值的*CS*计算结果

时间	林地	草地	农田	水域	裸地
2000年	0.0702	1.0065	0.2434	0.4135	0.8935
2010年	0.0625	0.9912	0.2866	0.4245	0.8906
2020年	0.0584	1.1605	0.4456	0.1957	0.0329

注：因建设用地产生*ESV*较小，在不同土地利用类型对*ESV*贡献率的计算中暂不考虑。

3.3.3　异质性分析　本文对*ESV*异质性的影响因子进行了探测分析，所有变量均通过0.005显著性水平检验，*q*值排序依次为：*HAILS*（0.351）> *NDVI*（0.132）> *PRE*（0.127）> *TEM*（0.124）> *DEM*（0.098）。交互作用探测结果显示，任意两个因子之间的交互作用均比单一因子具有更强的解释力，主要表现为双边增强效应（见表6）。其中，*HAILS*与*PRE*的交互作用最强，*q*为0.581。因子探测结果表明，*HAILS*对*ESV*的影响最为显著。随着廊坊市城市化进程和水利工程建设的持续推进，土地利用变化对生态系统产生了一定的负面影响。气候变化在驱动土地利用格局和*ESV*动态演变过程中具有重要作用。降水增加有助于缓解植被生长的水资源限制，并促进裸地向其他土地类型的恢复，特别是向草地和林地转化，从而提升*ESV*。降水和气温的变化在一定程度上影响地表植被覆盖度，进而推动研究区域*ESV*逐年上升。

*LPIs*是评估水利工程影响区生态状况最稳定的指标之一；*AI*和*SHDI*均与*ESV*呈正相关关系，表明工程建设区域分布越均匀、聚集程度越高，越有利于*ESV*的提升[24]。作物种植结构对农田生态价值具

表6　因子检测和交互检测结果

因子检测	*NDVI*	*PRE*	*TEM*	*DEM*	*HAILS*
q	0.132	0.127	0.124	0.098	0.351
NDVI	0.132				
PRE	0.362	0.127			
TEM	0.391	0.173	0.124		
DEM	0.416	0.195	0.178	0.098	
HAILS	0.552	0.581	0.561	0.463	0.351

中国知网　https://www.cnki.net

有显著的正向影响，回归分析结果显示，经济作物种植面积每扩大1%，农田生态价值平均提升0.061%。自京津冀协同发展战略实施以来，廊坊市凭借其区位和经济优势，吸引了大量建设用地扩张，部分林地、草地和农田被转化为建设用地，导致*LSI*下降，*SHDI*上升，不同土地利用类型斑块分布趋于均匀[25]。这一变化为流域水土资源综合管理及水利工程的可持续发展提供了科学依据。

4 结论

本文构建了水利工程生态服务价值的多要素测算与时空动态评估方法，结合长期遥感数据及融合生态与社会经济因子修正的综合等效因子进行量化分析。研究结果显示，在廊坊市生态用地面积减少的背景下，水利工程生态服务价值仍呈现上升趋势，主要受社会综合影响驱动，且其对土地利用类型变化的敏感性较低。基于NbS的生态环保产业及相关社会经济指标与*ESV*之间存在显著关联性；同时，*ESV*与景观格局指数(*LSI*、*SHDI*、*AI*)以及关键驱动因子(*HAILS*、*PRE*)亦表现出显著相关关系。上述发现有效验证了在京津冀一体化发展背景下，实现区域生态保护与城市发展的协同共赢具有现实可行性。未来研究将聚焦于基于生态系统结构与功能完整性的*ESV*测算方法的科学筛选与多要素动态评估体系构建，以支撑生态要素的空间一体化管理与调控。

参 考 文 献：

[1] WANG B, HE W J, AN M, et al. Natural capital accounting of land resources based on ecological footprint and ecosystem services value[J]. Science of the Total Environment, 2024, 914: 170051.

[2] 付意成，张剑，赵进勇，等. 水利工程生态服务价值系统研究[J]. 水利学报，2025，56(5)：564-575.

[3] 付意成，张剑，赵进勇，等. 水利工程生态服务价值系统化测算体系研究[J]. 水利学报，2025，56(7)：909-919，932.

[4] ZHANG X Q, DUAN B S, HE S Y, et al. Assessment of the value of ecosystem services in water sources of the South-North Water Diversion Central Project: the case of Dengzhou City, Henan Province[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(10): 670.

[5] KANG L, JIA Y, ZHANG S L. Spatiotemporal distribution and driving forces of ecological service value in the Chinese section of the "Silk Road Economic Belt" [J]. Ecological Indicators, 2022, 141: 109074.

[6] ZHENG Y, SANG X F, LI Z H, et al. Ecological services value of 'natural-artificial' water cycle: Valuation method and its application in the Yangtze River Basin of China[J]. Ecological Indicators, 2024, 158: 111324.

[7] 邵薇薇，邵蕊，倪广恒，等. 北京市主城区高分辨率的城市水碳通量模拟研究[J]. 水利学报，2024，55(5)：516-527.

[8] 谢高地，张钇锂，鲁春霞，等. 中国自然草地生态系统服务价值[J]. 自然资源学报，2001，16(1)：47-53.

[9] 李双成，张才玉，刘金龙，等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. 地理研究，2013，32(8)：1379-1390.

[10] 崔浩浩，张光辉，王茜，等. 石羊河流域下游天然绿洲地下水生态功能强弱周期性与机制[J]. 水利学报，2023，54(2)：199-207，219.

[11] 张华兵，王娟，刘玉卿，等. 人类活动与互花米草扩张对滨海湿地生境质量演变的影响—以盐城国家级珍禽自然保护区核心区为例[J]. 长江流域资源与环境，2021，30(5)：1153-1163.

[12] GOUNARIDIS D, CHORIANOPOULOS I, SYMEONAKIS E. A Random Forest-Cellular Automata modelling approach to explore future land use/cover change in Attica (Greece), under different socio-economic realities and scales[J]. Sci. Total Environ., 2019, 646: 320-335.

[13] 岳东霞，杨超，江宝骅，等. 基于CA-Markov模型的石羊河流域生态承载力时空格局预测[J]. 生态学报，2019，39(6)：1993-2003.

[14] OLOFSSON P, FOODY G M, HEROLD M. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change[J]. Remote Sens. Environ., 2014, 148: 42-57.

[15] 云兆得，胡庆芳，王银堂，等. 遥感和再分析蒸散发数据精度评估：基于GRACE和流域月水量平衡模型的比较研究[J]. 水利学报，2023，54(1)：117-127.

[16] 李胡跃，戴全厚，胡泽银，等. 黔中城市群生态系统服务价值评估及预测[J]. 水土保持研究，2024，31(4)：

中国知网 https://www.cnki.net

248-257.
[17] 潘悦，王锦，李婧熹，等. 滇中城市群绿色空间生态系统服务价值时空演变及驱动分析[J]. 水土保持研究，2023，30(2)：352-360.
[18] 乐荣武，李巍，周思杨，等. 呼包鄂榆城市群生态系统服务价值驱动因素及其交互效应[J]. 生态学报，2023，43(23)：9967-9980.
[19] 戚琦，王玲，陈俊辰，等. 武汉市城市快速扩张与生态系统服务价值权衡/协同的交互作用[J]. 地理科学，2024，44(6)：953-963.
[20] 赵同谦，欧阳志云，王效科，等. 中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J]. 自然资源学报，2003，18(4)：443-452.
[21] 王庆明，张越，窦鹏，等. 1985—2020年京津冀平原水面面积演变特征及归因分析[J]. 水利学报，2023，54(4)：451-460.
[22] 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.
[23] 李火坤，王刚，魏博文，等. 基于敏感性分析与粒子群算法的拱坝原型动弹性模量反演方法[J]. 水利学报，2020，51(11)：1401-1411.
[24] 谢高地，张彩霞，张雷明，等. 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[J]. 自然资源学报，2015，30(8)：1243-1254.
[25] 于海云，覃湘栋，庞治国，等. 2021年十大孔兑区域土壤侵蚀空间分布特征[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文)，2023，21(6)：546-556.

Multi-element valuation of ecosystem service value of water conservancy projects accounting for spatial heterogeneity

FU Yicheng[1,2], ZHANG Jian[1,2], ZHAO Jinyong[1,2], HAN Zhenjiang[3], 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*; 3. *Water Affairs Center of Guangyang District, Langfang City, Langfang* 065000, *China*)

Abstract: Regional sustainable development and socio-economic progress are inherently dependent on the effective delivery of ecological services provided by water conservancy projects. Quantifying the ecosystem service value (ESV) of regional water conservancy projects is essential for advancing water ecosystem conservation and environmental improvement, requiring multi-element valuation approaches that incorporate rigorous methodological selection, dynamic multi-factor coupling analysis, and the identification of regional characteristics. This study constructed a systematic valuation framework for the ESV of water conservancy projects, conducted an assessment of project impact, and proposes a method for quantifying the market value of water ecological products. From the perspective of land cover-function value matching, the InVEST model was utilized to quantify regional impact extent and module value, and the ESV of water conservancy projects was enhanced through system optimization methods. Based on a land use conversion matrix, spatial distribution maps of water conservancy project ESV for different periods were generated to explore their spatiotemporal variation characteristics and distribution patterns. The study results indicate that from 2000 to 2020, Langfang City experienced an increase in urbanized land area and a slight decrease in vegetation cover, with a dynamic index of -0.03%. Concurrently, the ESV of water conservancy projects showed an upward trend, increasing by 58.42%. The ESV of water conservancy projects exhibited a significant positive correlation with vegetation and water body areas, and a significant negative correlation with bare land area. Furthermore, socio-economic indicators related to Nature-based Solutions (NbS)-oriented eco-environmental industries and ecological restoration showed a correlation coefficient greater than 0.3 with the ESV, indicating a strong correlation. These findings can provide technical support for achieving regional water ecological security and the sustainable utilization of water and soil resources.

Keywords: water conservancy projects; ecological service value; multi-element valuation; spatial distribution; Langfang City

(责任编辑：李　娜)

中国知网 https://www.cnki.net