

燕翔, 牛存稳, 贾仰文, 等. 基于曼宁公式的汾河生态系统服务价值研究[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 927-936.
YAN X, NIU C W, JIA Y W, et al. Ecosystem service value of Fenhe River based on Manning formula[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 927-936. (in Chinese)

基于曼宁公式的汾河生态系统服务价值研究

燕翔, 牛存稳, 贾仰文, 岁姚炳, 王东东, 晏思怡

(中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要: 河流生态系统服务价值核算可为确定河道生态流量以及分析生态补水的效益提供重要参考。选择汾河为典型研究对象, 考虑汾河水库、义棠、河津等6个干流水文站的断面形状、河道坡降和糙率等河道参数, 基于水力学原理和生态系统服务价值核算方法, 开展不同流量下的河流生态系统服务价值变化规律研究。结果表明: 河流生态系统服务价值随流量的增加呈逐步减缓的上升趋势, 而单方水的河流生态系统服务价值随流量的增加呈逐步减缓的下降趋势; 按照汾河枯水期流量不低于 $15\text{ m}^3/\text{s}$ 的保障要求进行生态补水, 需要年引黄水量6亿 m^3 , 可带来生态效益52.44亿元/a。研究结果可为生态与经济用水的竞争权衡、河道生态流量的确定和保障提供科学依据。

关键词: 曼宁公式; 生态系统服务价值; 河道断面形状; 当量因子法; 汾河

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0092

“绿水青山就是金山银山”^[1-3], 在大力推进生态文明建设的背景下, 国内外学者对生态环境价值评估越来越重视, 而生态系统服务价值核算是践行绿水青山就是金山银山理念的重要举措。自1997年Costanza等^[4]提出生态系统服务价值评估方法并估算了全球生态系统服务价值以来, 国内外逐渐形成了当量因子法^[5-7]和功能价值法^[8-10]两种主要的核算方法。河流生态系统是由水生和陆地生态系统组合而成的复合生态系统, 具有多种生态系统服务功能: 既可以在河道外为人类提供工农业用水、渔业产品、科研文化等与人类社会发展密切相关的服务, 也可以在河道内提供维持生物多样性、调蓄洪水、净化水质等维持人与自然和谐的生态系统服务^[11-12]。由于取用水的不合理, 河流生态系统受到不同程度的污染和破坏, 从而影响生态系统服务功能发挥, 所以不能仅从经济角度衡量河流的价值, 生态估值的必要性也不容忽视。因此, 从经济的角度对河流生态系统展开研究可为区域可持续发展提供依据。近年来关于河流生态系统服务价值的评估方法研究成果较多,

例如: 成波等^[13]和岳思羽等^[14]采用当量因子法计算了河道生态基流的价值, 并且对河道生态基流价值的时间变化特征进行了研究; 张代青等^[15]采用功能价值法对河道流量及其变化程度对河流生态系统服务价值的影响进行了研究; 王德旺等^[16]在横向上将河流分为河槽、河漫滩和岸坡几个部分并分别计算了这几个部分的生态系统服务价值。这些研究多根据生态系统服务功能的划分、内涵等间接进行价值核算或者根据单一流量资料进行价值核算, 已有研究鲜少根据河道流量直接计算河流生态系统服务价值, 进而体现河流生态系统服务价值随流量的动态变化。由于河道大断面不是规则的几何形状, 当流量发生变化时, 在不同的水深情况下, 河流水面面积也是变化的, 因此如果不联系河道实际地质情况进行河流生态系统服务价值计算, 会导致核算结果与实际有偏差。为此, 本文以汾河干流为例, 采用水力学结合当量因子法分析不同流量下的河流生态经济价值动态变化特征, 旨在使核算结果能够真实地反映河流生态经济价值变化, 从而为生态工程的经济投资和生

收稿日期: 2023-12-06 修回日期: 2024-07-15 网络出版时间: 2024-08-02

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20240801.1639.006>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201105); 国家高层次人才特殊支持计划项目(WR0166A012019); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究项目(SKL2020ZY04)

作者简介: 燕翔(1997—), 男, 山西长治人, 博士研究生, 主要从事生态系统服务价值核算等研究。E-mail: yanxiang@iwhr.edu.cn

通信作者: 牛存稳(1979—)男, 河南安阳人, 正高级工程师, 主要从事流域水循环研究。E-mail: niucw@iwhr.com

态效益比较提供参考,降低工程的投资风险。

1 研究区概况

汾河发源于山西省忻州市宁武县东寨镇管涔山脚下的雷鸣寺泉,是山西省第一大河、黄河的第二大支流。汾河干流长 716 km,太原兰村以上为上游,是一条长 217.6 km 的山地河道,平均坡度 4.4‰;兰村至洪洞石滩为中游,全长 266.9 km,穿越太原盆地,地形平坦,纵坡度为 1.7‰;洪洞至黄河口为下游,全长 231.5 km,地形更为平坦,纵坡度为 1.3‰^[17]。河津水文站为汾河干流最下游控制站,位于山西省河津市,至河口距离 22 km, Tennant 法的生态基流为 3.19 m³/s,现状满足程度为 89.2%;近 10 a 最枯月平均流量法的生态基流为 14.9 m³/s,现状满足程度为 46.7%^[18]。

2 数据与方法

2.1 数据来源

DEM 等数据源于地理空间数据网站(www.gscloud.cn);2020 年流量数据、水文气象数据、河道断面形状以及河道坡降、糙率等水力学参数来源于《中华人民共和国水文年鉴第 4 卷之黄河流域水文资料第 4 册》(2020 年)等;粮食作物种植面积、粮食产量及粮食价格等数据来源于《中国统计年鉴-2021》《山西统计年鉴-2021》等。

2.2 研究方法

从河道实际断面形状出发,根据不同水深通过水力学法^[19-20]的曼宁公式计算不同水面宽下的流量,确定不同流量对应的水面面积,然后采用生态系统服务价值当量因子法计算河道水面面积对应的价值,得到流量和河流生态系统服务价值的关系。为减少不确定性,未考虑水深的影响,仅针对河道水面面积对河流生态系统服务价值的影响展开研究。

2.2.1 河流水面面积

采用水力学法的曼宁公式计算河流不同流量下的水面面积。

选取研究区河流,根据河道的几何特性,将河道概化成 k 段的规整河道,选取 k 个水文站分别代表 k 段河道的水文地质特性,在第 i 个概化点上收集水深 h_i 、概化段的河长 L_i 等河道大断面形状资料,根据水深 h 将河道大断面概化成规则的几何形状。

在每段河道概化点的大断面上,根据概化得出

的大断面形状,利用曼宁公式计算在第 i 个概化点上的水面宽 w_i 和流量 Q_i ,从而建立流量 Q 和水面宽 w 的关系曲线,计算公式为

$$v = \frac{K}{n_i} (R_h)_i^{\frac{2}{3}} S_i^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$v = \frac{Q}{\omega_i} \quad (2)$$

$$R_h = \frac{\omega_i}{\chi_i} \quad (3)$$

$$\omega_i = w_i h_i \quad (4)$$

式(1)~(4)中: v 为流速,m/s; K 为转换系数,国际单位制中为 1; n_i 为第 i 段河道的糙率,是综合反映管渠断面粗糙情况对水流影响的系数; R_h 为水力半径,m; S_i 为第 i 段河道明渠的坡度; ω_i 为第 i 个概化点上水深 h_i 时的断面面积,m²; χ_i 为湿周,m; Q 为流量,m³/s。

根据前述计算结果,通过河道水面宽 w 计算得出第 i 段河道的水面面积 A_i ,计算公式为

$$A_i = w_i L_i \quad (5)$$

式中: A_i 为第 i 段河道的水面面积,m²。

2.2.2 河流生态系统服务价值系数

采用生态系统服务价值当量因子法计算河流生态系统服务价值系数。具体步骤如下:

步骤 1,河流生态系统服务的划分。根据谢高地等^[5]对生态系统服务的划分,以及徐宗学等^[21]对河道生态基流的定义和对河道生态基流生态服务功能的解析,选择 9 种生态系统服务作为计算河流生态系统服务价值系数的基础,见表 1。

表 1 河流生态系统服务价值当量因子

Tab. 1 Equivalent factors of river ecosystem service value

生态系统服务	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	生物多样性	美学景观	科研文化	食物生产
当量因子	0.77	2.29	5.55	102.24	0.93	2.55	1.89	2.14	0.88

步骤 2,生态系统服务价值基础当量表的建立。基于谢高地等^[5]2015 年修正的当量因子表建立河流生态系统服务价值当量因子表,见表 1。

步骤 3,价值系数计算。河流生态系统服务价值系数采用农田生态系统单位面积生产粮食作物的经济价值和水域生态系统服务功能的当量因子(表 1)的乘积表示。谢高地等^[5]将 1 个标准生态系统服务价值当量因子定义为 1 hm² 全国平均产量的农田每年的经济价值,其意义在于体现生态系统对生态服务贡献相对大小的潜在能力。随着我国农

村土地使用产权的改革,通过合理的土地流转,土地的集中化提高了农业的收益,农田生态系统对生态服务贡献潜力获得提升^[22-24]。因此仅凭粮食亩产量已经无法体现农田的经济价值,因此,采用耕地的土地流转价格表示农田经济价值,并且结合修正后的当量因子表和专家知识确定河流生态系统服务的当量因子,对河流生态系统的生态服务功能价值进行核算,其计算公式为

$$V_c = DC_T = T_a C_T \quad (6)$$

式中: V_c 为河流生态系统服务价值系数,元/ hm^2 ; D 为 1 个标准单位生态系统服务价值量,元/ hm^2 ; C_T 为河流生态系统中所有生态系统服务的当量因子和; T_a 代表研究区域耕地的土地流转价格,元/ hm^2 。

2.2.3 河流生态系统服务价值

河流生态系统服务价值计算公式为

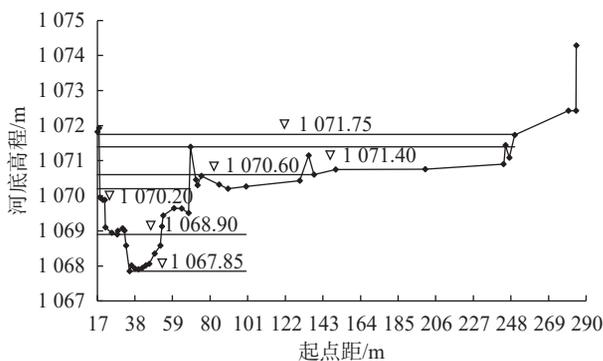
$$V = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n V_c A_i \quad (7)$$

式中: V 为河流生态系统服务价值,亿元; V_i 为第 i 段河道生态系统服务价值,亿元。

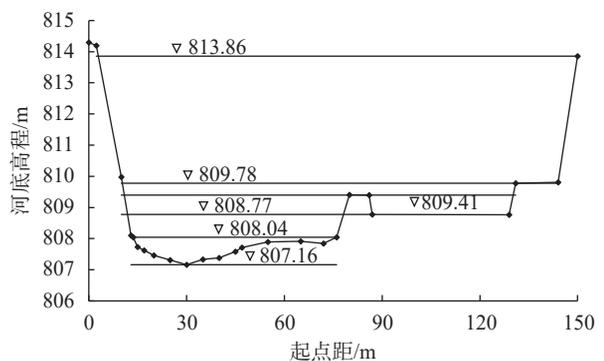
河流单方水生态价值计算公式为

$$V_{cm} = \frac{V}{R} \quad (8)$$

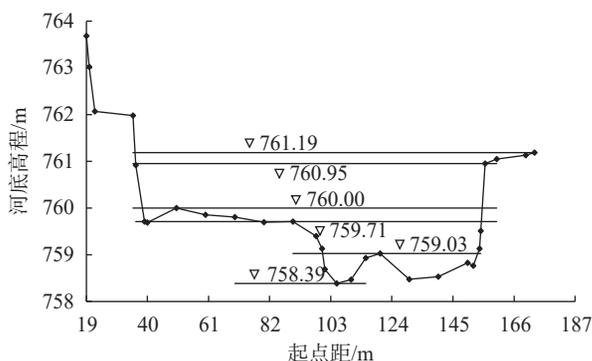
式中: V_{cm} 为河流单方水生态价值,元/ m^3 ; R 为河道年径流量,亿 m^3 。



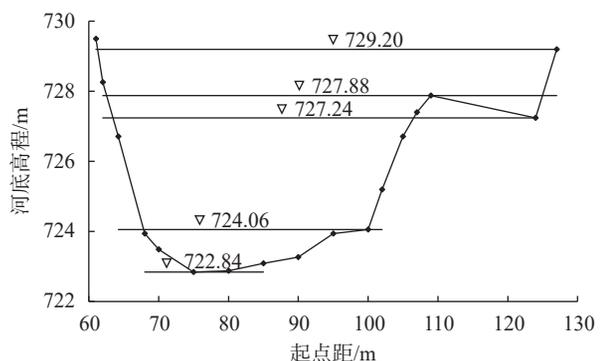
(a) 汾河水库(坝下)站



(b) 兰村(四)站



(c) 汾河二坝(河道二)站



(d) 义棠(二)站

3 结果与分析

3.1 关键参数

结合汾河干流的实际情况以及现有资料,将其概化为上中下游 3 段,在 3 个河段内分别选取 2 个水文站,其中选择兰村(三)站作为上下游分界点,由于石滩站资料短缺,选择义棠站和柴庄(河道)代表中下游分界处的河道。然后根据水文站断面形状资料对河道大断面进行概化,见表 2 和图 1。

表 2 汾河干流河道划分

Tab. 2 Division of main stream of Fenhe River

河段	站点名称	河道长/m	坡降/%
I	汾河水库(坝下)站	144.0	4.4
	兰村(四)站	73.6	4.4
II	汾河二坝(河道二)站	182.4	1.7
	义棠站	84.5	1.7
III	柴庄(河道)站	187.5	1.3
	河津(三)站	44.0	1.3

由于水文站资料短缺,为减少研究的不确定性,对汾河干流概化暂时没有考虑支流水文站对干流的影响,并且以河道断面形状为切入点研究河流生态系统服务价值,因此以河道干流水文站处河道的断面形状作为研究的着力点。

根据水深范围将 6 个水文站所在河道大断面划分成几段不同的几何形状,见表 3。

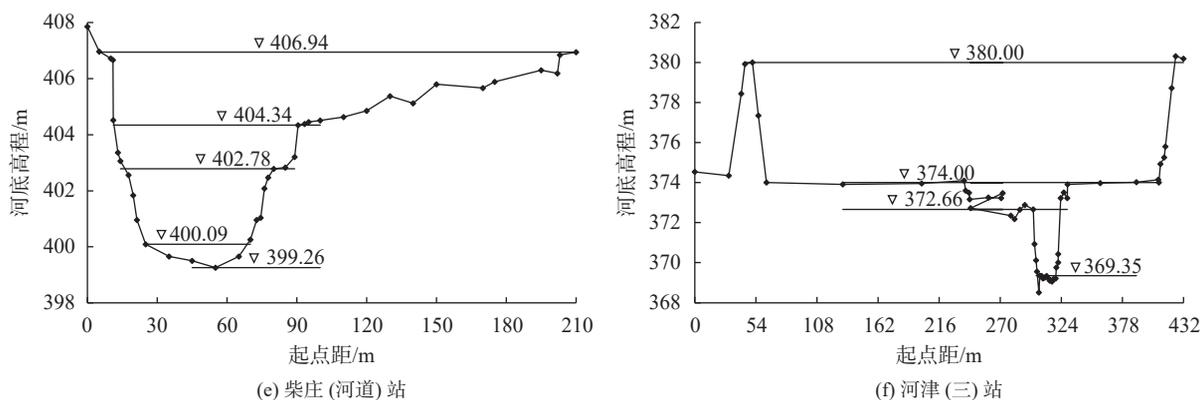


图 1 河道大断面形状概化

Fig. 1 Overview of large section shape of river channel

表 3 河道大断面形状概化

Tab. 3 Overview of large section shape of river channel

单位: m

站点名称	河底高程	断面形状	水深	水面宽					
				下底 a_1	上底 b_1	下底 a_2	上底 b_2	下底 a_3	上底 b_3
汾河水库 (坝下)站	1 067.85~1 068.90	梯形1	0~1.05	5.00	25.00				
	1 068.90~1 070.20	梯形2	1.05~2.35	25.00	50.60				
	1 070.20~1 070.60	梯形3+三角形1	2.35~2.75	50.60	51.10	0	58.00		
	1 070.60~1 071.40	梯形4.5.6	2.75~3.55	51.10	52.10	58.00	65.90	106.00	110.00
	1 071.40~1 071.75	梯形7	3.55~3.90	228.00	233.00				
兰村(四)站	807.16~808.04	三角形	0~0.88	0	62.40				
	808.04~808.77	梯形1	0.88~2.61	62.40	65.55				
	808.77~809.41	梯形2+梯形3	1.61~2.25	65.55	68.85	42.00	45.00		
	809.41~809.78	梯形4	2.25~2.62	119.85	121.00				
	809.78~813.86	梯形5	2.62~6.70	134.00	147.34				
汾河二坝 (河道二)站	758.39~759.03	三角形1+2	0~0.64	0	20.00	0	34.10		
	759.03~759.71	梯形1	0.64~1.32	54.10	64.50				
	759.17~760.00	梯形2+三角形3	1.32~1.61	74.50	105.00	0	11.00		
	760.00~760.95	梯形3	1.61~2.56	116.00	120.00				
	760.95~761.19	梯形4	2.56~2.80	120.00	137.00				
义棠(二)站	722.84~724.06	三角形1	0~1.22	0					
	724.06~727.24	梯形1	1.22~4.40	25.00	42.00				
	727.24~727.88	梯形2+三角形2	4.40~5.04	42.00	46.50	0	16.00		
	727.88~729.20	梯形3	5.04~6.36	62.50	66.00				
柴庄 (河道)站	722.84~724.06	三角形1	0~0.83	0					
	724.06~727.24	梯形1	0.83~3.52	45.00	63.50				
	727.24~727.88	梯形2	3.52~5.08	68.10	77.80				
河津(三)站	727.88~729.20	梯形3	5.08~7.68	77.80	206.20				
	369.35~372.66	梯形1	0~3.31	3.31	17.20				
	372.66~374.00	梯形2	3.31~4.65	42.00	227.50				
	374.00~380.00	梯形3	4.65~10.65	334.20	375.00				

3.1.1 河流水面面积

采用式(1)、(2)、(3)、(4)计算不同河道流量对应的水面宽度时,需要考虑参数选取,根据河道大断面形状概化,并结合地理因素与汾河相近的河例如渭河等研究结果^[24],河段参数选取为 n 取

0.038、 k 取 1,并在此依据图 1 和表 3 所示的各个站点河道断面形状变化时水面宽的情况,以断面形状变化时的水面宽为转折点计算得出此时的流量,以此流量结果作为图 2 中横轴所示的流量节点,通过计算可以得到流量和水面宽的关系曲线,见图 2。

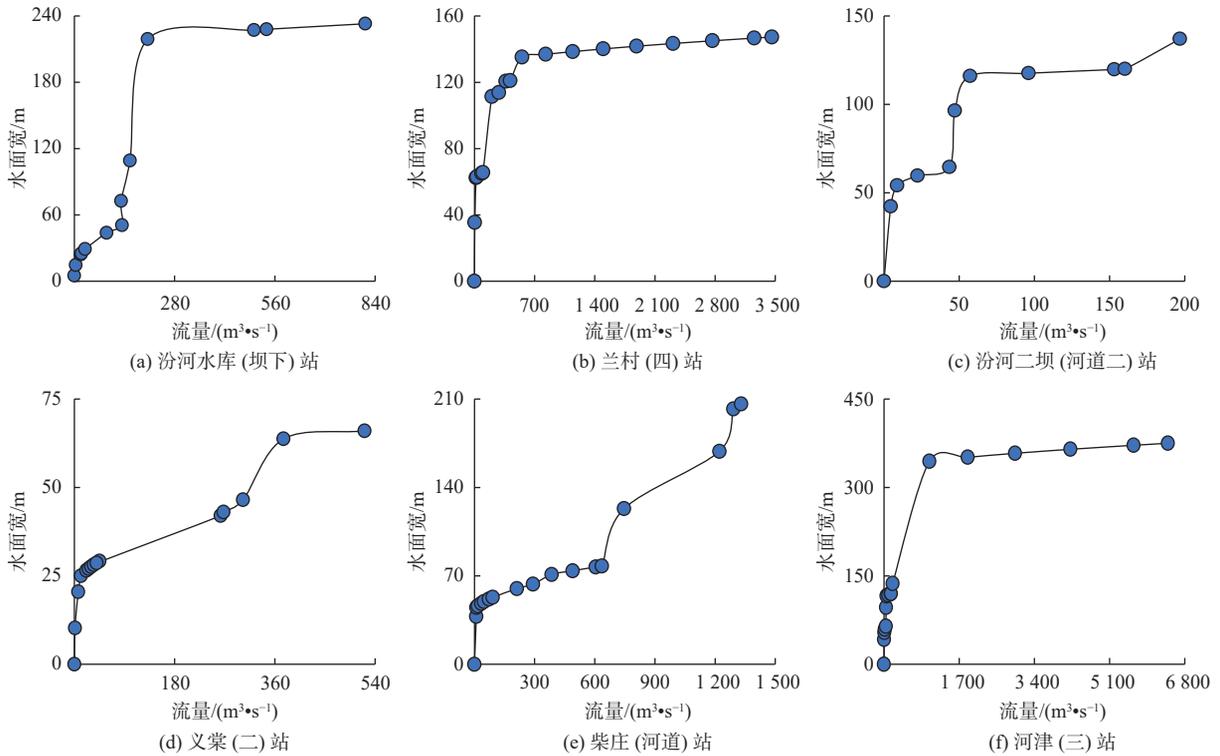


图 2 河道断面流量-水面宽关系曲线

Fig. 2 Discharge water surface width curve of river section

从图 2、图 3 和表 1 可以看出,流量和水面宽的关系与河道大断面形状关系密切。以河段 III 内的河津(三)站为例:当河道流量为 $125.69 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,此时河道断面形状由梯形 1 变成了梯形 2,二者的关系发生突变;当流量大于 $457.96 \text{ m}^3/\text{s}$,此后河道断面形状保持不变,二者关系保持不变。以此分析可以得出,由于不同水深变化下断面形状的差异很大,因此断面形状发生变化会导致水面宽会发生较大的变化,从而导致河流水面面积发生较大的变化,由此反向计算得出的流量变化较大,因此当流量发生变化时,尤其流量变化下,水深发生变化,从而断面形状发生变化导致水面宽发生较大的差异。

3.1.2 河流生态系统服务价值系数

根据 2.2.2 提出的价值系数方法,在 Wang 等^[25]的研究中根据 2020 年山西省土地流转交易市场信息计算出汾河流域 2020 年标准生态系统服务价值当量因子的经济价值为 $12\ 000 \text{ 元}/\text{hm}^2$,因此根据 Wang 等^[25]的研究结果选取 $12\ 000 \text{ 元}/\text{hm}^2$ 作为

2020 年标准生态系统服务价值当量因子的经济价值。结合汾河干流的实际情况,利用式(6)计算表 1 中各个生态系统服务的价值系数,结果见表 4。

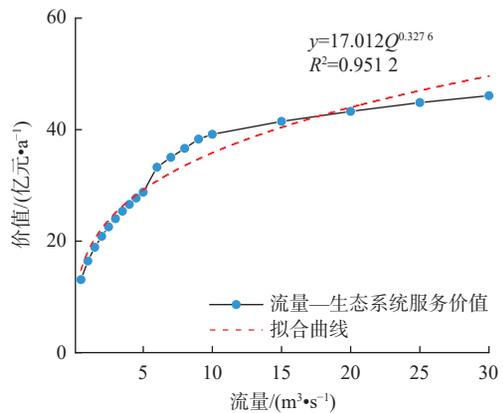


图 3 汾河干流生态系统服务价值和流量的关系

Fig. 3 Relationship between ecosystem services value and flow in the main stream of Fenhe River

3.2 河流生态系统服务价值

根据 3 个河段内流量和水面宽的关系、汾河干

流生态系统服务价值系数以及河段长权重(表 1), 采用式(5)、(7)计算得出汾河干流生态系统服务价值。在这里不考虑特大暴雨等情况, 即不考虑河道流量达到极值情况, 仅考虑河道流量的常态, 根据《中华人民共和国水文年鉴之黄河流域水文资料

2020 年》, 选取流量低于 $50 \text{ m}^3/\text{s}$ 时计算汾河干流的生态系统服务价值, 并分析汾河干流生态系统服务价值与流量的关系, 计算结果见表 5。汾河干流生态系统服务价值与流量的关系, 见图 3。

表 4 汾河干流生态系统服务价值系数

Tab. 4 Value coefficient of ecosystem services value in the main stream of Fenhe River

单位: 元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)

生态系统服务 价值系数	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	生物多样性	美学景观	科研文化	食物生产
	9 240	27 480	66 600	1 226 880	11 160	30 600	22 680	25 680	10 560

表 5 汾河干流生态系统服务价值

Tab. 5 Ecosystem services value in the main stream of Fenhe River

流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	分站价值/(亿元· a^{-1})						总价值/(亿元· a^{-1})
	汾河水库(坝下)站	兰村(四)站	汾河二坝(河道二)站	义棠(二)站	柴庄(河道)站	河津(三)站	
0.5	1.68	1.46	4.83	0.92	3.10	1.10	13.09
1.0	1.98	1.89	6.24	1.20	4.01	1.11	16.44
1.5	2.21	2.20	7.28	1.39	4.68	1.12	18.89
2.0	2.40	2.45	8.11	1.55	5.22	1.13	20.86
2.5	2.56	2.67	8.82	1.69	5.67	1.14	22.54
3.0	2.71	2.86	9.44	1.81	6.07	1.14	24.03
3.5	2.84	3.02	10.00	1.91	6.43	1.15	25.36
4.0	2.97	3.18	10.51	2.01	6.76	1.15	26.59
4.5	3.08	3.32	10.99	2.10	7.07	1.16	27.73
5.0	3.19	3.46	11.43	2.19	7.35	1.17	28.78
6.0	3.39	3.70	12.24	2.34	10.40	1.17	33.26
7.0	3.57	3.92	12.97	2.48	10.89	1.18	35.02
8.0	3.73	4.12	13.63	2.61	11.34	1.19	36.63
9.0	3.88	4.31	14.42	2.73	11.75	1.20	38.29
10.0	4.03	4.48	14.53	2.84	12.08	1.21	39.16
15.0	4.64	5.22	14.99	3.09	12.30	1.24	41.48
20.0	5.14	5.81	15.39	3.18	12.49	1.27	43.27
25.0	5.58	6.32	15.74	3.26	12.66	1.30	44.86
30.0	5.97	6.58	16.07	3.33	12.82	1.32	46.09

分析表 5 和图 4 可以得出: 从整体上看, 河流生态系统服务价值随着流量的增加呈上升趋势, 但是随着流量的增加, 河流生态系统服务价值增长速度越来越缓慢, 并最终趋于稳定。增长情况符合边际效应。

3.3 河流单方水生态价值

根据表 5 计算结果, 采用式(8)计算得出各个水文站点流量及其单方水生态价值的关系, 最终拟合得出汾河干流流量与单方水生态价值的关系曲线(以年为尺度), 见图 4。流量与河流单方水生态价

值的关系式为

$$V_{\text{cm}} = 53.946Q^{-0.672} \quad (9)$$

分析图 4 可以得出: 汾河干流流量与单方水生态价值的关系呈现非线性变化, 河流单方水生态价值随着流量的增加呈下降趋势, 并且河流单方水生态价值的下降趋势越来越缓慢, 最终趋于稳定。根据河道流量与单方水生态价值的关系, 分析河流单方水生态价值以及河流总生态系统服务价值, 确定经济最优条件下的河道生态流量: 生态流量为 $3.19 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 河流生态系统服务价值是 24.80 亿元, 河流

单方水生态价值是 24.74 元;生态流量为 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,河流生态系统服务价值是 52.44 亿元,河流单方水生态价值是 8.74 元。

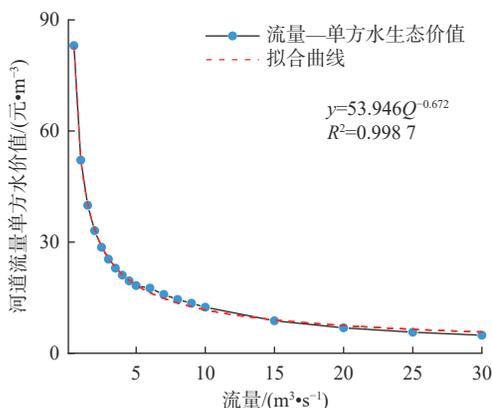


图4 流量与河流单方水生态价值的关系

Fig. 4 Relationship between flow and ecosystem service value of river per cubic meter of water

3.4 结果分析

河流生态系统服务价值的评估是一项确定河道生态流量、权衡生态用水与经济用水、比较生态补水工程的经济成本和生态效益基础性工作。基于从实际出发、理论联系实际思路,对汾河干流流量和河流生态系统服务价值的关系进行初步评价。

经过初步探索,在河道生态环境良好、河道形状保持稳定的情况下,当河道断面形状发生变化时,流量和水面宽的关系随之变化,从而导致流量和河流生态系统服务价值发生变化。河道断面形状和河道糙率、坡降等水力学因素是影响河流生态系统服务价值随流量变化的重要因素,可见利用生态系统服务价值理论时结合河道断面实际情况可以更好地反映河流生态系统服务价值与流量的关系。对于河流单方水生态系统服务价值,河道流量单方水生态价值随着河道流量的增加呈下降趋势,从最初的趋向于无穷大直到最终趋向于零,并且河道流量单方水生态价值的下降趋势越来越缓慢。当河道流量趋于零时,河道流量单方水生态价值趋向于无限大,这表明当河道流量从无到有时,1个河道流量蕴含着巨大的生态服务价值,符合生态系统服务价值理论^[4];当河道流量趋于无穷大时,河道流量单方水生态价值趋向于零,这表明随着河道流量的增加,1个流量所具有的生态服务价值在降低。

汾河作为黄河的第二大支流,有关汾河生态系统服务价值的研究内容不多,而作为黄河第一大支流的渭河流域,南有东西走向的秦岭横亘,北有六

盘山屏障,西为黄土丘陵沟壑区,东为关中平原区,其地质地形与汾河流域上游山地,中下游太原盆地、汾河盆地的地质地形相似,因此选择横向对比渭河流域的河流生态系统服务价值的相关研究,其中:岳思雨等^[14]等根据径流资料确定河道生态基流对应“水面面积”,进而采用当量因子法计算河道生态基流价值和并探索分析了河道生态基流价值的时间变化特征,结果表明单方河道生态基流价值为 $6.27 \text{ 元}/\text{m}^3$,单方价值与价值总量变化趋势相反,与本文的研究结果相似;张代青^[15]以河道内“流量”为量化指标,建立了河流生态系统服务价值评价模型,给出了通过流域“流量”量化河流生态系统服务价值的方法,结果表明河流生态系统服务价值与河流生态系统的类型划分、结构组成、特征功能、河道内流量和健康程度等密切相关,但主要取决于河道内流量,虽没有给出具体的价值量,但是证明了流量对河流生态系统服务价值的重要性。这些研究表明本文通过河道实际情况的水面宽情况确定水面面积,进而研究流量与河流生态系统服务价值关系的研究方法是合理的,结果也是符合实际情况的。

利用河道实际情况确定的河流生态系统服务价值作为河流带来的生态效益,首先根据生态补水及供水工程确定的生态流量计算河流带来的生态效益,进而与生态补水及供水工程的经济成本作对比,从而验证工程的生态经济合理性。根据河流生态系统服务价值的研究进一步丰富河流生态效益的构成可作为下一步研究的重点之一。自引黄济汾工程实施以来,截至2023年5月末,万家寨引黄工程已累计向太原及汾河生态补水 40.22 亿 m^3 ,根据本研究的河流生态系统服务价值计算结果,当生态流量为 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,河流单方水生态价值是 8.74 元,以此计算可得引黄工程带来的效益约为 351 亿元。结果表明引黄济汾工程为汾河干流提供了较大的生态效益。万家寨作为引黄济汾工程的水源地,受偿区应及时获得生态补偿来保证生态质量,而太原作为补偿区,应提供补偿资金来维持整体生态建设。

作为探索性研究,未考虑不同水深下的河流生物多样性变化、环境变化等因素,导致没有体现河流实际情况在空间上和时间上的变化情况,后续研究需要将水深变化引入从而构建考虑时空变化差异的河流生态系统服务价值动态模型。

4 结论

根据所得的流量和河流水生态价值的关系,并结合研究区域的实际情况可以得出既可以维持河道生态环境良好,又可以实现经济社会发展最大化的河道流量区间。

河道断面形状的变化会导致流量和水面宽的关系发生变化,从而改变流量和河流水面面积的关系;河流生态服务总价值随着流量的增加呈上升趋势,但增长速度越来越缓慢;河流生态价值和流量的关系符合边际效应递减理论,呈负相关关系,随着流量增加,河流单方水生态价值呈指数型递减。

按照汾河调引黄河水 6 亿 m^3 , 枯水期不低于 15 m^3/s 生态补水时, 每年可带来生态价值 52.44 亿元, 16 年带来总生态价值 839.04 亿元, 约为汾河生态补水及供水工程 104.1 亿元投资的 8 倍, 对于维持汾河生态流量有着积极的意义。

在确定生态系统服务价值系数时, 视河道为一个整体, 未考虑水深的动态变化对生态价值的影响, 如何构建考虑时空变化差异的河流生态系统服务价值动态模型是进一步研究的工作重点之一。

参考文献:

- [1] 周心欣, 方世南. 习近平生态文明思想的环境权益观研究 [J]. *南京工业大学学报(社会科学版)*, 2021, 20(1): 23-31. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7287.2021.01.004.
- [2] 张伊华. 基于机会成本法和生态系统服务价值核算的水资源生态补偿标准研究: 以黄河流域为例 [J]. *灌溉排水学报*, 2023, 42(5): 108-114. DOI: 10.13522/j.cnki.ggbs.2022632.
- [3] 王雨, 王会肖, 杨雅雪, 等. 水-能源-粮食纽带关系定量研究方法综述 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(6): 42-63. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2020.0114.
- [4] COSTANZA R, D'ARGE R, DE G R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature: International Weekly Journal of Science*, 1997, 387(6630): 253-260. DOI: 10.1016/S0921-8009(98)00020-2.
- [5] 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. DOI: 10.11849/

zrzyxb.2015.08.001.

- [6] 白琪阶, 焦志倩, 王红瑞, 等. 自然资源资产负债表编制实证研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(2): 7-13. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0032.
- [7] WU C, MA G, YANG W, et al. Assessment of ecosystem service value and its differences in the Yellow River basin and Yangtze River basin [J]. *Sustainability*, 2021, 13(7): 3822. DOI: 10.3390/su13073822.
- [8] 管欣, 张玉玲, 贾晓宇, 等. 永定河上游流域水生态系统服务价值评估 [J]. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1326-1337.
- [9] 王云飞, 叶爱中, 乔飞, 等. 水源涵养内涵及估算方法综述 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1041-1071. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0109.
- [10] 马尚钰, 王富强, 王雪彦, 等. 南水北调中线工程河南省受水城市地下水生态系统服务价值评估 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(6): 1204-1212. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0119.
- [11] 于子斌, 赵进勇, 彭文启, 等. 小水电河流水文地貌-生态响应关系研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(6): 137-146. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.06.012.
- [12] 申梦姝, 郑航, 刘悦忆, 等. 2020 年东江流域生态服务价值的空间转移网络研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2022, 53(1): 124-134. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.01.013.
- [13] 成波, 李怀恩. 河道生态基流生态经济价值及其时间变化研究 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2021, 52(3): 94-102. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2021.03.011.
- [14] 岳思羽, 李怀恩, 成波. 河道生态基流的功能与价值构成研究 [J]. *水利水电技术*, 2020, 51(11): 138-144. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.11.017.
- [15] 张代青, 沈春颖, 于国荣. 基于河道内流量的河流生态系统服务价值评价模型研究 [J]. *水利经济*, 2019, 37(5): 16-20. DOI: 10.3880/j.issn.1003-9511.2019.05.004.
- [16] 王德旺, 何萍, 徐杰, 等. 宽滩型河流生态系统服务价值核算: 以辽河干流为例 [J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(3): 447-458. DOI: 10.12153/j.issn.1674-991X.20200271.
- [17] 张亚琼, 蔺彬彬. 汾河流域土地利用土地覆被变化分析 [J]. *水资源开发与管理*, 2021(11): 34-37. DOI: 10.16616/j.cnki.10-1326/TV.2021.11.07.

- [18] 张沛雷. 汾河入河口基本生态流量分析计算 [J]. *陕西水利*, 2020(10): 34-35. DOI: [10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2020.10.014](https://doi.org/10.16747/j.cnki.cn61-1109/tv.2020.10.014).
- [19] 姚云泽, 姜翠玲, 万福涛. 基于多种水文学方法的滦河典型断面生态基流研究 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(5): 941-949. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0098](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0098).
- [20] 王一艳. 基于改进生态水力半径法的渭河流域生态基流量研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2020. DOI: [10.27292/d.cnki.gsxfu.2020.000257](https://doi.org/10.27292/d.cnki.gsxfu.2020.000257)
- [21] 徐宗学, 李鹏, 侯昕玥. 河道生态基流理论基础与计算方法研究 [J]. *人民黄河*, 2019, 41(10): 119-127. DOI: [CNKI:SUN:RMHH.0.2019-10-024](https://doi.org/CNKI:SUN:RMHH.0.2019-10-024).
- [22] 杜挺, 朱道林. 中国土地流转价格时空演化与宏观机制研究 [J]. *资源科学*, 2018, 40(11): 2202-2212. DOI: [10.18402/resci.2018.11.07](https://doi.org/10.18402/resci.2018.11.07).
- [23] 郝宇彪, 管智超. 中国农村土地流转价格形成机制的比较分析 [J]. *区域经济评论*, 2018(6): 105-113. DOI: [10.14017/j.cnki.2095-5766.2018.0119](https://doi.org/10.14017/j.cnki.2095-5766.2018.0119).
- [24] 徐丹, 屈博, 方园皓. 黄河下游宽滩区土地利用格局时空演变及影响因素 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(5): 966-975. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0096](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0096).
- [25] WANG D D, JIA Y W, NIU C W, et al. A multiple criteria decision-making approach for water allocation of environmental flows considering the value trade-offs : A case study of Fen River in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 912: 169588. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.169588](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169588).

Ecosystem service value of Fenhe River based on Manning formula

YAN Xiang, NIU Cunwen, JIA Yangwen, SUI Yaobing, WANG Dongdong, YAN Siyi

(State Key Laboratory of Simulation and Regulatory of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The value of river ecosystem services was a crucial factor in determining the necessary ecological flow of river courses and ensuring the success of ecological water supplement projects. The primary course of the Fenhe River served as a case study to improve the traditional method of calculating river ecosystem service values by incorporating the Manning formula. Six hydrological stations, including Fenhe Reservoir Station, Yitang Station, and Hejin Station, were analyzed for their complex cross-sectional configurations and hydraulic parameters such as longitudinal gradient ratio and river roughness. This comprehensive approach was essential in understanding the diverse and variable nature of river ecosystem service values.

A detailed analysis was conducted to explore the variability of river ecosystem service values. The results indicated a clear increase in river ecosystem service values with rising flow levels, although this increase exhibited diminishing marginal returns. The ecological and economic value of a single cubic meter of river water showed a gradual decrease as flow levels increased, indicating a progressively slower rate of decline. This phenomenon underscored the importance of optimizing flow levels to maximize both ecological and economic benefits without overburdening the river system. The relationship between flow and river water ecological value, combined with the actual situation of the study area, suggested that there was a range of flow rates that could both maintain a healthy river ecosystem and maximize socio-economic development. Significant insights were revealed when the Fenhe River introduced six hundred million cubic meters of Yellow River water, ensuring an ecological water supplement of at least fifteen cubic meters per second during the dry season. Under these conditions, the ecological economic value of a single cubic meter of water in the main stream of the Fenhe River was determined to be 8.74 yuan. Consequently, the annual ecological value of the river was calculated to be 4.131 billion yuan. These figures highlighted the substantial economic contributions of maintaining adequate ecological flows in river systems. The shape of the river channel cross-section affected the relationship between flow and water surface width, thus altering the relationship between flow and river water surface area. The total value of river ecological services increased with flow, but the rate of increase slowed down, consistent with the law of diminishing marginal returns.

Several conclusions were derived from this study: First, based on the relationship between flow rates and river

water ecological value found in this study, and considering the actual situation of the study area, it was determined that there is a range of flow rates that can maintain a healthy river ecosystem while maximizing socio-economic development. The shape of the river channel cross-section affected the relationship between flow and water surface width, thus altering the relationship between flow and river water surface area. Second, the total value of river ecological services increased with flow, but the rate of increase slowed down, consistent with the law of diminishing marginal returns. The relationship between river water ecological value and flow followed the theory of diminishing marginal returns, showing a negative correlation. As flow increased, the ecological value per cubic meter of river water decreased exponentially. Whatever, when six hundred million cubic meters of Yellow River water were introduced into the Fenhe River, with an ecological water supplement of no less than fifteen cubic meters per second during the dry season, an annual ecological value of 52.44 billion yuan was generated. Over sixteen years, the total ecological value reached 839.04 billion yuan, approximately eight times the investment of 10.41 billion yuan for the Fenhe ecological water replenishment and supply project. This has significant implications for maintaining the ecological flow of the Fenhe River. Finally, constructing a dynamic model of river ecosystem service value that accounts for spatiotemporal variations remains a key focus for future research. This approach will help provide a more accurate assessment and management strategy for river ecosystems, ensuring their sustainability and the long-term benefits they provide to both the environment and society.

Key words: Manning formula; ecosystem service value; river section shape; equivalent factor method; Fenhe River



背景图所有权属《南水北调与水利科技(中英文)》编辑部

滹沱河7号溢流堰