

# 水生生态系统服务功能与辐射效应

## ——以河南省洛阳市为例

徐金鹏<sup>1</sup>, 许迎君<sup>2</sup>, 孟钰<sup>2</sup>, 石悸锋<sup>2</sup>, 管新建<sup>2</sup>

(1.河南省南阳水文水资源勘测局, 河南 南阳 473000; 2.郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** [目的] 分析区域水生生态系统服务功能的价值变化和辐射效应, 为区域水资源可持续发展和流域生态补偿提供科学依据。[方法] 利用 ArcGIS 软件对 2000—2020 年河南省洛阳市土地利用数据进行提取得到水域类型面积, 采用能值方法对水生生态系统服务功能进行量化, 并分析其变化。同时通过断裂点模型分析其功能辐射。[结果] 2000—2020 年洛阳市水生生态服务总能值分别为  $8.01 \times 10^{21}$  sej,  $1.29 \times 10^{22}$  sej,  $1.27 \times 10^{22}$  sej,  $1.29 \times 10^{22}$  sej,  $1.31 \times 10^{22}$  sej, 总体上呈增长趋势。其中, 服务构成重心已由供给功能向文化功能偏移, 系统中生物多样性保护、水产品生产、水资源供给、水资源调蓄和休闲娱乐功能居于支配地位, 且休闲娱乐功能已成为核心功能。此外, 洛阳市水生生态系统服务功能主要转出地区为嵩县和洛宁县, 向外转移总量分别为  $3.10 \times 10^{20}$  sej 和  $3.21 \times 10^{20}$  sej, 主要转入地区为栾川县、宜阳县、伊川县及汝阳县。[结论] 在洛阳市同类地区, 需要重视水生态保护, 加大对区域旅游事业的扶持引导, 同时合理地进行流域内生态补偿, 促进各地区经济、社会、生态协调发展。

**关键词:** 水生生态系统; 服务功能; 能值分析; 断裂点; 辐射效应; 河南省洛阳市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)04-0170-08

中图分类号: TV213.4

**文献参数:** 徐金鹏, 许迎君, 孟钰, 等. 水生生态系统服务功能与辐射效应[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 170-177. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.021; Xu Jinpeng, Xu Yingjun, Meng Yu, et al. Radiation effects and service function of aquatic ecosystem [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 170-177.

## Radiation Effects and Service Function of Aquatic Ecosystem

### —Taking Luoyang City, Henan Province as an Example

Xu Jinpeng<sup>1</sup>, Xu Yingjun<sup>2</sup>, Meng Yu<sup>2</sup>, Shi Jifeng<sup>2</sup>, Guan Xinjian<sup>2</sup>

(1. Nanyang Bureau of Hydrology and Water Resources, Nanyang, Henan 473000, China;

2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou, Henan 450001, China)

**Abstract:** [Objective] The value change and radiation effect of the regional aquatic ecosystem service function were analyzed in order to provide a scientific basis for sustainable development of regional water resources and ecological compensation of a river basin. [Methods] ArcGIS software was used to extract land use data for Luoyang City, Henan Province from 2000 to 2020 in order to obtain the area of water type. The emergy method was used to quantify and analyze the changes of aquatic ecosystem service functions, and the functional radiation was analyzed by the break point model. [Results] From 2000 to 2020 (in five-year time steps), the total emergy values of aquatic ecosystem services at Luoyang City were  $8.01 \times 10^{21}$  sej,  $1.29 \times 10^{22}$  sej,  $1.27 \times 10^{22}$  sej,  $1.29 \times 10^{22}$  sej, and  $1.31 \times 10^{22}$  sej, respectively, with a general increasing trend. Among these emergy values, the focus of service composition had shifted from supply function to cultural function. In this system, biodiversity protection, aquatic product production, water resource supply, water resource regulation, and leisure and entertainment functions were dominant. Leisure and entertainment functions have become core functions. In addition, the main transfer areas of the aquatic ecosystem service function in Luoyang City were Songxian County and Luoning County, with total outward transfer values of  $3.10 \times 10^{20}$  sej and  $3.21 \times 10^{20}$  sej, respectively. The main transfer areas were Luanchuan County, Yiyang

收稿日期: 2022-10-30

修回日期: 2022-12-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“水质水量双控作用下流域生态补偿机制研究”(51879241)

第一作者: 徐金鹏(1974—), 男(汉族), 河南省唐河县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水文水资源方面的研究。Email: xujinpeng828@126.com。

通讯作者: 孟钰(1988—), 女(壮族), 广西壮族自治区河池市人, 博士, 副教授, 主要从事水环境规划与管理方面的研究。Email: mengyu8@zzu.edu.cn。

County, Yichuan County, and Ruyang County. [Conclusion] Greater attention will need to be given to ecological protection of water, increasing support and guidance for regional tourism, and reasonably carrying out ecological compensation in areas similar to Luoyang City to promote the coordinated development of the economy, society, and ecology in various regions.

**Keywords:** aquatic ecosystem; service function; emergy analysis; break point; radiation effect; Luoyang City of Henan Province

水生生态系统服务功能是指水生生态系统与生态过程所形成及所维持的人类赖以生存的自然环境条件与效用<sup>[1]</sup>。中国是缺水型国家,社会经济的高速发展导致水资源过度开发利用,水生态环境不断恶化;同时由于人们节水意识不强,水资源浪费现象严重,因此水资源可持续发展正面临着严峻的挑战。对水生生态系统服务功能的量化评估不仅是有效提高人们对水系统保护的重要性认知的一种有效途径<sup>[2]</sup>,也是维持水生态环境、促进水生态可持续发展的重要科学支撑。目前有关生态系统服务功能的辨识在国内外已有众多研究<sup>[3-4]</sup>,但对于水生生态系统服务功能价值的量化仍是重难点,目前大多是用经济学方法进行价值量化<sup>[5]</sup>,主要集中在利用价值量和物质量方法研究生态系统服务功能价值。价值量法直接以货币的形式呈现各项功能的效用,1925年比利时的Drumarx首次以对野生生物游憩的费用支出作为野生生物的经济价值<sup>[6]</sup>,使人们能够直观地了解健康的水生态具有巨大的经济潜力从而更加保护水资源<sup>[7]</sup>。物质量法从物质量的角度对生态系统提供的各项服务进行定量评价。薛达元等<sup>[8]</sup>较早对长白山自然保护区生态系统生物多样性的经济价值进行了评估。但由于并不是每一类生态系统服务功能都能在市场上找到相应的实际交易价格<sup>[9]</sup>,因此经济学方法还是存在一定的主观性,部分学者也对此意见不一。能值理论是由著名生态学家 Odum<sup>[10]</sup>于20世纪80年代在系统生态、能量生态和生态经济相关理论的基础上提出的科学理论体系,它通过分析系统内能量的输入输出及内部流转将不同量纲的生态系统服务进行统一量化,进一步将经济系统和生态系统有效连接起来,使生态系统服务研究更具科学性和客观性<sup>[9]</sup>。同时由于生态系统服务具有流动性,不同类型的功能可以通过一定的介质向区域外发生作用,因此分析生态系统服务功能的辐射影响可以为生态补偿提供重要依据<sup>[11]</sup>。本文采用能值方法针对水生生态系统4大类服务功能即供给、调节、支撑和文化功能,提出一套能值价值量化方法体系,根据辐射转移特征分析具有代表性的功能并应用断点理论明确功能从转出区域向附近转入区域转移的空间辐射效应,期望为城市水生生态保护和水资源可持续利用提供重要理论方法参考。

## 1 研究区概况

洛阳市位于河南省西部,横跨黄河中下游南北两岸,地处东经 $112^{\circ}16'$ — $112^{\circ}37'E$ ,北纬 $34^{\circ}32'$ — $34^{\circ}45'N$ ,总面积 $15\,066\text{ km}^2$ ,总人口717万人,是华夏文明的发祥地之一。洛阳市地势西高东低,属于暖温带大陆性季风气候,具有较为丰富的自然资源。洛阳市境内干、支河流及较大沟、涧、溪约2.7万多条,有分布于黄河、淮河、长江三大流域的黄河干流、伊洛河、沙颍河、丹江和唐白河5个河系(图1),境内修建有小浪底和陆浑等4座大型水库、11座中型水库以及若干座小型水库。洛阳市目前属于人水矛盾关系比较严重的地区,水质性缺水和水资源量不足并存,不合理的水资源开采已经成为阻碍区域经济发展的重要因素。因此,研究洛阳市水生生态系统服务功能价值能够为解决人水矛盾关系和区域环境高质量发展提供科学支撑。

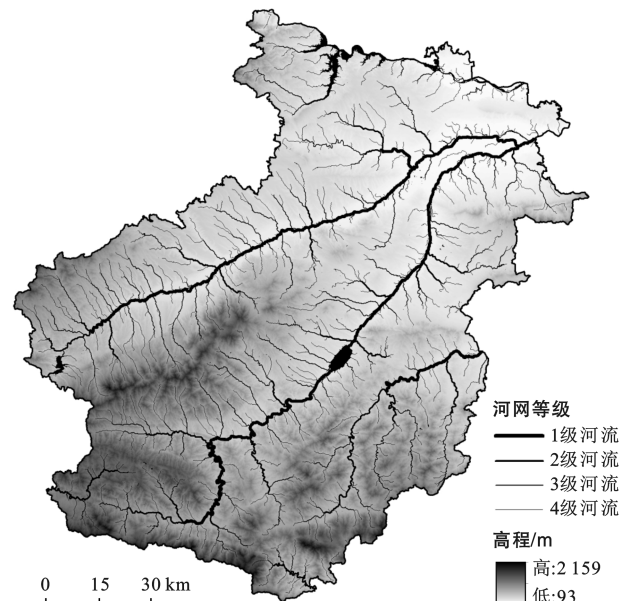


图1 洛阳市流域河网分布

Fig.1 River network distribution of Luoyang watershed

## 2 研究方法

### 2.1 生态系统服务功能分类

生态系统服务功能分类方法有很多,目前较为常

用且得到国际广泛认可的分类方法是联合国千年生态系统评估工作组 (millennium ecosystem assessment, MA) 在 2002 年提出的分类方法<sup>[4]</sup>。采用 MA 分类法将水生生态系统服务功能分为如下 4 类: ①供给功能。指水生态直接为人类生活及生产提供的各种产品及资源, 主要包括水资源供给、水产品生产及水力发电等; ②调节功能。指人类在水生态的调节作用发挥的过程中获得的收益, 主要包括水资源调蓄、气候调节、水质净化及空气净化等; ③支撑功能。指水生生态系统所形成的支撑发展的条件与效用, 主要包括初级生产、固碳释氧、营养物质循环、生活环境改善及生物多样性保护等; ④文化功能。指水生态的美学、文化和教育等方面的非物质效益, 包括休闲娱乐和科学研究等。

## 2.2 水生生态系统服务功能量化方法

基于能值理论, 本文构建了水生生态系统服务功能能值价值量化方法体系, 将能物质流、信息流和经济流等流派有效地联系在一起, 实现了生态经济系统中各类形式的能量对接。遴选供给、调节、支撑、服务 4 大类功能的代表性细分项, 考虑到细分项功能的显著性与数据的可操作性, 选取供给功能的水资源供给、水产品生产、水力发电; 调节功能的水资源调蓄、气候调节; 支撑功能的生物多样性保护、固碳释氧; 以及文化功能的休闲娱乐、科学研究, 共 9 项生态系统服务功能指标。其中, 各类功能量化公式及参数的获取主要依据前人研究<sup>[12-15]</sup>, 可有效支撑研究区实际情况。

### 2.2.1 供给功能

(1) 水资源供给。指人类为满足生活需要及工农业发展直接从水系统取水资源<sup>[14-15]</sup>。

$$E_P = \sum Q_{P_i} \cdot \alpha_{W_i} \quad (1)$$

式中:  $E_P$  为水生态水资源供给服务的能值 (sej);  $Q_{P_i}$  为地表水、地下水供给量 ( $m^3$ );  $\alpha_{W_i}$  为地表水、地下水的能值转换率, 分别取  $5.77 \times 10^{11}$  sej/ $m^3$ ,  $12.36 \times 10^{11}$  sej/ $m^3$ <sup>[14]</sup>。

(2) 水产品生产。指水生态为人类提供的可直接进入市场交换的水产品, 如各种鱼类、蟹等<sup>[14]</sup>。

$$E_F = Q_F \cdot \eta_F \cdot \alpha_F \quad (2)$$

式中:  $E_F$  为水生态水产品生产服务的能值 (sej);  $Q_F$  为水产品产量 (t);  $\eta_F$  为水产品吉布斯自由能, 取 20 930 J/g;  $\alpha_F$  为水产品的能值转换率, 取  $2.00 \times 10^6$  sej/J<sup>[14]</sup>。

(3) 水力发电。利用河道落差产生势能的原理建立水电站进行发电并用于人民生活<sup>[13-15]</sup>。

$$E_E = Q_E \cdot \alpha_E \quad (3)$$

式中:  $E_E$  为水生态水力发电服务的能值 (sej);

$Q_E$  为水力发电量 ( $kW \cdot h$ );  $\alpha_E$  为水力发电的能值转换率, 随着水电建设效率的提高能值转换率不断下降, 2000—2020 年水力发电的能值转换率分别取  $2.26 \times 10^{12}$  sej/( $kW \cdot h$ ),  $2.11 \times 10^{12}$  sej/( $kW \cdot h$ ),  $1.12 \times 10^{12}$  sej/( $kW \cdot h$ ),  $3.37 \times 10^{11}$  sej/( $kW \cdot h$ ) 和  $1.82 \times 10^{11}$ <sup>[13]</sup>。

### 2.2.2 调节功能

(1) 水资源调蓄。水库等蓄积水量、调节洪峰的作用<sup>[14]</sup>。

$$E_W = Q_W \cdot \alpha_W \quad (4)$$

式中:  $E_W$  为水生态水资源调蓄服务的能值 (sej);  $Q_W$  为水库蓄水量 ( $m^3$ );  $\alpha_W$  为工程水体的能值转换率, 取  $12.35 \times 10^{11}$  sej/ $m^3$ <sup>[14]</sup>。

(2) 气候调节。水系统通过水面蒸发吸收热量从而增加空气湿度以缓解“城市小气候”的能力<sup>[14]</sup>。

$$E_S = (2507.4 - 2.39t) P_F \cdot \rho \cdot A_W \cdot \alpha_S \quad (5)$$

式中:  $E_S$  为水生态调节气候的能值 (sej);  $t$  为区域平均温度 ( $^{\circ}C$ );  $P_F$  为蒸发量 (mm);  $\rho$  为水的密度 ( $kg/m^3$ );  $A_W$  为水域面积 ( $hm^2$ );  $\alpha_S$  为蒸汽的能值转换率, 取 12.2 sej/J<sup>[14]</sup>。

### 2.2.3 支撑功能

(1) 生物多样性保护。指水生生态系统为多种生物提供栖息地, 也为生物的生存提供一些必要物质条件以维持生物多样性的能力<sup>[14]</sup>。

$$E_M = \omega_M \cdot \xi_W \cdot \alpha_M \quad (6)$$

式中:  $E_M$  为水生态保护生物多样性的能值 (sej);  $\omega_M$  为区域水系统中物种数 (种);  $\xi_W$  为区域物种活动面积占全球面积 (取  $5.21 \times 10^{14} m^2$ ) 的比例;  $\alpha_M$  为物种的能值转换率, 取  $1.26 \times 10^{25}$  sej/种<sup>[14]</sup>。

(2) 固碳释氧。指水生态中浮游植物通过光合作用将无机物生成有机物的过程中吸收二氧化碳同时释放氧气<sup>[15]</sup>。

$$E_C = \sum q_i \cdot A_W \cdot d \cdot \alpha_i \quad (7)$$

式中:  $E_C$  为水生态固碳释氧服务的能值 (sej);  $q_i$  为浮游植物日初级生产力,  $O_2$  和  $CO_2$  分别取 3 g/( $m^2 \cdot d$ ) 和 4.11 g/( $m^2 \cdot d$ );  $d$  为 1 a 的天数, 取 365;  $\alpha_i$  分别为  $O_2$  和  $CO_2$  的能值转换率, 分别取  $5.11 \times 10^7$  sej/g 和  $3.78 \times 10^7$  sej/g<sup>[15]</sup>。

### 2.2.4 文化功能

(1) 休闲娱乐。指水生态为人类提供的各种娱乐活动, 这里主要体现为给当地人民带来的旅游收入<sup>[15]</sup>。

$$E_T = \lambda_W \cdot I \alpha \quad (8)$$

式中:  $E_T$  为水生态提供景观旅游的能值 (sej);  $\lambda_W$  为

水生态提供的旅游收入与区域旅游总收入的比值,取12.3%;  $I$  为区域旅游总收入(元);  $\alpha$  为能值货币比率,2000—2020年分别取  $7.54 \times 10^{11}$ ,  $7.17 \times 10^{11}$ ,  $6.18 \times 10^{11}$ ,  $5.04 \times 10^{11}$ ,  $3.78 \times 10^{11}$  sej/元<sup>[15]</sup>。

(2) 科学研究。指学者对水生生态系统的自然科学与内在规律进行学术研究<sup>[15]</sup>。

$$E_A = Q_A \cdot \alpha_A \quad (9)$$

式中: $E_A$  为水生态提供科学研究的能值(sej);  $Q_A$  为以区域水资源为关键词检索到的论文数量(页);  $\alpha_A$  为论文的能值转换率,取  $3.39 \times 10^{15}$  sej/P<sup>[15]</sup>。

### 2.3 生态系统服务功能辐射估算

通常引入物理学中的引力模型来解释两区域的生态系统服务功能的互相作用关系,场强模型可以有效衡量单位面积生态系统服务功能的强度,裂点模型则可以计算区域的生态系统服务功能价值的作用边界<sup>[16]</sup>。

(1) 生态系统服务功能作用边界的计算公式:

$$D_l = \frac{D_{lj}}{1 + \sqrt{V_j/V_l}} \quad (10)$$

式中: $D_l$  为转出地生态服务价值向周围地区作用的最大半径;  $D_{lj}$  为生态服务价值转出地几何中心点与转入地几何中心点间的距离;  $V_l$  为转出地生态服务功能能值;  $V_j$  为转入地生态服务功能能值;  $l$  为生

态服务功能的转出地;  $j$  为生态服务功能的转入地。

(2) 生态系统服务功能能值辐射强度计算公式:

$$I_{lj} = V_l / D_{lj}^2 \quad (11)$$

式中: $I_{lj}$  为转出地  $l$  向转入地  $j$  的生态服务价值平均转移强度;  $V_l$  为转出地生态服务功能能值;  $D_{lj}$  为转出地几何中心点与转入地几何中心点间的距离。

(3) 生态系统服务功能能值转移量计算公式:

$$V_{lj} = k_{lj} I_{lj} A \quad (12)$$

式中: $V_{lj}$  为从转出地  $l$  到转入地  $j$  转移的生态服务功能能值总量;  $k_{lj}$  为转出地  $l$  到转入地  $j$  的生态服务自然流转的经验参数,取 0.8;  $A$  为转出地生态服务价值辐射半径内的区域与转入地相交部分的面积。

### 2.4 数据来源

研究时段内计算水生生态系统服务功能能值价值用到的相关数据是通过查阅水资源公报、统计年鉴,并结合文献调查收集的,包括降雨量、水产品产量、物种数、旅游收入等原始数据以及能值货币比率和能值转换率等其他数据。

2000—2020年洛阳市土地利用数据来源于“地球大数据科学工程”数据共享服务系统(<https://data.casearth.cn/>),计算中所用到的数据具体来源详见表1,且数据来源能够满足各项服务功能的计算参数需求。

表1 基础数据来源统计  
Table 1 Basic data source statistics

基础数据	数据来源
降雨量、供水量等	2000—2020年《洛阳市水资源公报》
水产品产量、发电量、旅游收入等	2000—2020年《洛阳市统计年鉴》
能值转换率	相关文献等 <sup>[14]</sup>

## 3 结果与分析

### 3.1 水生生态系统服务功能能值及变化分析

3.1.1 功能项目能值计算 本文计算的时间边界为2000—2020年,共5期,空间范围为洛阳市各行政区包括嵩县、洛宁县、主城区等10个行政区。根据公式(1)—(9)对洛阳市2000—2020年的水生生态系统服务功能进行核算,结果详见表2。各项功能能值变化如图2所示。

由图2可知,洛阳市2000,2005,2010,2015和2020年水生生态系统服务功能总能值分别为  $8.01 \times 10^{21}$ ,  $1.29 \times 10^{22}$ ,  $1.27 \times 10^{22}$ ,  $1.29 \times 10^{22}$  和  $1.31 \times 10^{22}$  sej,且在研究时段内(2000—2020年)增幅显著(63.79%),表明洛阳市水生生态系统具备巨大的服务潜力并能为人类增创服务效益。

其中供给服务中水资源供给功能能值有先增加

后减小趋势,而水力发电功能能值明显下降。调节服务能值变化较为稳定,其中水资源调蓄功能能值虽呈下降趋势,但该功能对调节服务总体的贡献率始终维持在75%左右。支撑服务整体变化幅度较小,文化服务中两类细分功能均有上升趋势但休闲娱乐功能能值更为突出。

3.1.2 水生生态系统服务功能构成分析 通过对2000—2020年洛阳市水生生态系统服务功能的价值构成分析可知(图3),2000年以来洛阳市水生生态系统供给功能所占比例呈先升后降的趋势,调节功能和支撑功能所占比例变化较小,而文化功能所占比例大幅上升,由2000年仅5.87%的贡献率增长至2020年的46.86%。其中,归属于供给功能的水资源供给、水产品生产功能稳定居于支配地位,而归属于文化功能的休闲娱乐功能自2000年以来逐渐成为核心功能,对整体水生态影响最为突出。

表 2 洛阳市水生生态系统(2000—2020 年系列)服务功能能值

Table 2 Service function energy of water ecosystem data series at Luoyang City during 2000—2020

服务功能	原始数据					能值/sej					
	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2019 年	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	
供给	水资源 地表水/ $10^8 \text{ m}^3$	5.00	5.22	7.64	7.87	6.81	$1.19 \times 10^{21}$	$1.34 \times 10^{21}$	$1.28 \times 10^{21}$	$1.21 \times 10^{21}$	$1.16 \times 10^{21}$
	供给 地下水/ $10^8 \text{ m}^3$	7.33	8.38	6.82	6.10	6.23					
	水产品生产/ $10^{14} \text{ J}$	2.19	3.99	8.07	11.2	8.60	$0.44 \times 10^{21}$	$0.80 \times 10^{21}$	$1.61 \times 10^{21}$	$2.23 \times 10^{21}$	$1.72 \times 10^{21}$
调节	水力发电/ $10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$	1.02	2.81	3.56	3.78	5.40	$2.30 \times 10^{21}$	$5.92 \times 10^{21}$	$3.98 \times 10^{21}$	$1.27 \times 10^{21}$	$0.98 \times 10^{21}$
	水资源调蓄/ $10^9 \text{ m}^3$	1.06	1.20	1.26	1.09	1.00	$1.66 \times 10^{21}$	$1.97 \times 10^{21}$	$1.52 \times 10^{21}$	$1.32 \times 10^{21}$	$1.11 \times 10^{21}$
支撑	气候调节/ $10^{19} \text{ J}$	4.34	5.28	5.59	4.45	4.38	$0.18 \times 10^{21}$	$0.23 \times 10^{21}$	$0.29 \times 10^{21}$	$0.24 \times 10^{21}$	$0.23 \times 10^{21}$
	生物多样性保护/种	153	153	153	153	153	$1.75 \times 10^{21}$	$1.75 \times 10^{21}$	$1.75 \times 10^{21}$	$1.75 \times 10^{21}$	$1.75 \times 10^{21}$
文化	固碳释氧/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	3	3	3	3	3	$1.23 \times 10^{19}$	$1.56 \times 10^{19}$	$1.67 \times 10^{19}$	$1.77 \times 10^{19}$	$1.86 \times 10^{19}$
	休闲娱乐/ $10^9 \text{ 元}$	6.25	1.29	3.71	9.59	16.20	$0.47 \times 10^{21}$	$0.92 \times 10^{21}$	$2.29 \times 10^{21}$	$4.84 \times 10^{21}$	$6.15 \times 10^{21}$
	科学研究/页	24	30	102	126	108	$0.81 \times 10^{17}$	$1.02 \times 10^{17}$	$3.46 \times 10^{17}$	$4.27 \times 10^{17}$	$3.66 \times 10^{17}$
合计							$8.01 \times 10^{21}$	$1.29 \times 10^{22}$	$1.27 \times 10^{22}$	$1.29 \times 10^{22}$	$1.31 \times 10^{22}$

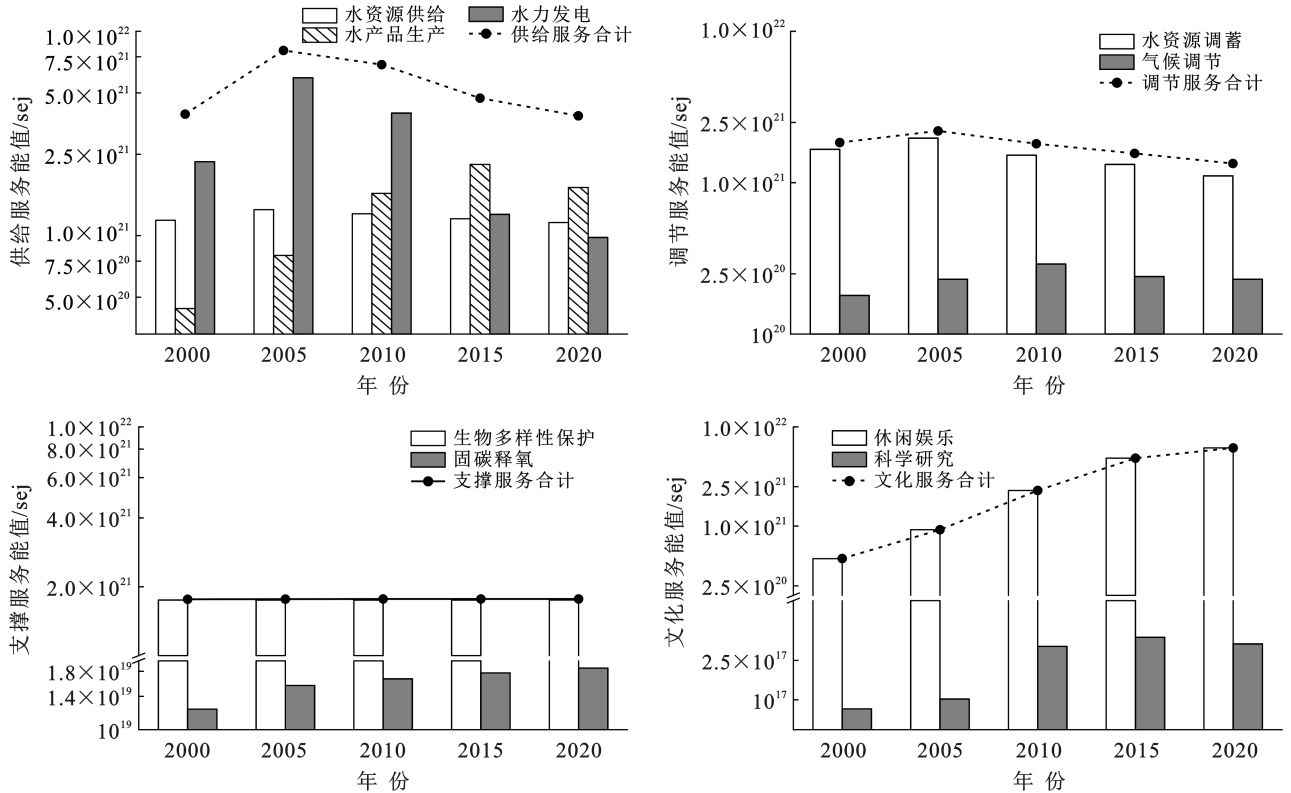


图 2 洛阳市水生生态系统(2000—2020 年系列)能值变化

Fig.2 Energy change of water ecosystem data series at Luoyang City during 2000—2020

### 3.2 水生生态系统服务功能辐射效应估算

根据不同生态系统服务功能类型的辐射特征<sup>[17]</sup>选取水资源调蓄、气候调节和固碳释氧三项功能进行分析,这里水资源调蓄功能被认为只能通过上下游进行辐射,而气候调节和固碳释氧功能可以在区域之间进行辐射。另外根据洛阳市 2020 年气候调节和固碳

释氧功能总能值空间分布,洛宁县和嵩县的功能总能值远远高于其他地区,因此这里只将洛宁县和嵩县作为相应功能辐射的转出区域,分析功能在此区域对其他区域的辐射情况。通过河网分析确定上下游关系进而确定功能转入和转出区,确定洛阳市各个行政区之间的距离详见表 3。

表 3 洛阳市区县几何距离  
Table 3 Geometric distance of counties at Luoyang City

区县	几何距离/km								
	洛宁县	栾川县	嵩县	汝阳县	伊川县	宜阳县	偃师县	孟津县	新安县
洛宁县	—	49.05	62.31	91.20	91.68	50.45	122.14	100.58	78.87
栾川县	49.05	—	41.39	77.36	99.59	73.78	134.78	130.35	112.72
嵩县	62.31	41.39	—	36.07	62.45	52.41	97.63	100.34	91.88
汝阳县	91.20	77.36	36.07	—	41.59	59.84	72.21	86.26	90.47
伊川县	91.68	99.59	62.45	41.59	—	43.39	35.35	44.92	56.16
宜阳县	50.45	73.78	52.41	59.84	43.39	—	71.73	57.81	40.25
偃师县	122.14	134.78	97.63	72.21	35.35	71.73	—	34.57	63.99
孟津县	100.58	130.35	100.34	86.26	44.92	57.81	34.57	—	33.23
新安县	78.87	112.72	91.88	90.47	56.16	40.25	63.99	33.23	—

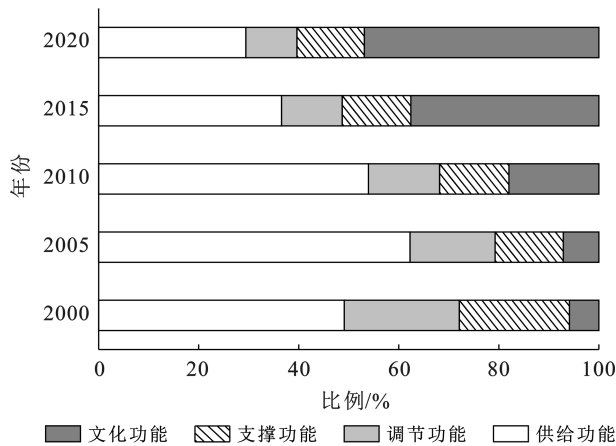


图 3 洛阳市 2000—2020 年水生生态系统服务构成比例  
Fig.3 Composition and proportion of water ecosystem services in Luoyang City from 2000 to 2020

通过对应的几何距离和功能能值得到相应功能转移半径详见表 4—5。通过 ArcGIS 进行缓冲区分析后应用上述计算方法得到 2020 年洛阳市相应功能辐射转移量如图 4—5 所示。2020 年水生生态系统提

供的水资源调蓄功能辐射时主要转出区域为洛宁县和嵩县,且对宜阳县转移量最多,为  $4.85 \times 10^{19}$  sej。气候调节和固碳释氧功能辐射时,嵩县向外辐射总量为  $2.85 \times 10^{19}$  sej,洛宁县向外辐射总量为  $2.73 \times 10^{19}$  sej,且均对栾川县转移量最多,均体现出了功能能值较高的地区向外辐射量也较大且辐射量随着空间距离的增加递减的特点。

表 4 洛阳市水资源调蓄功能转移半径  
Table 4 Transfer radius of water resources regulation function at Luoyang City

转入地	转出地/km				
	宜阳县	嵩县	伊川县	主城区	偃师市
洛宁县	45.91	—	—	96.12	118.56
宜阳县	—	—	—	45.71	54.95
栾川县	—	7.12	56.94	113.37	114.54
嵩县	—	—	54.04	79.94	94.17
伊川县	—	—	—	21.79	28.60
新安县	—	—	—	40.72	50.92

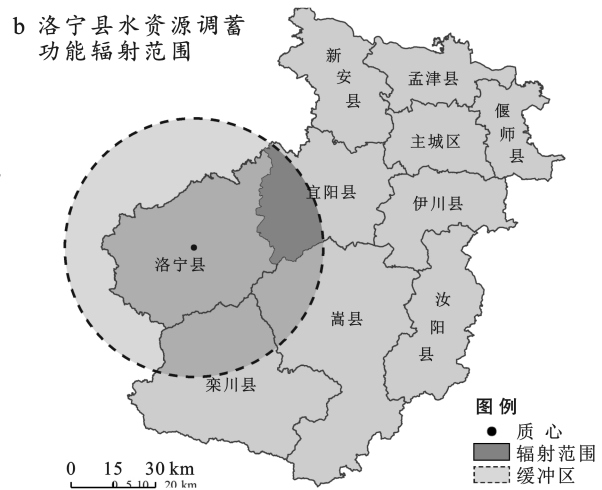
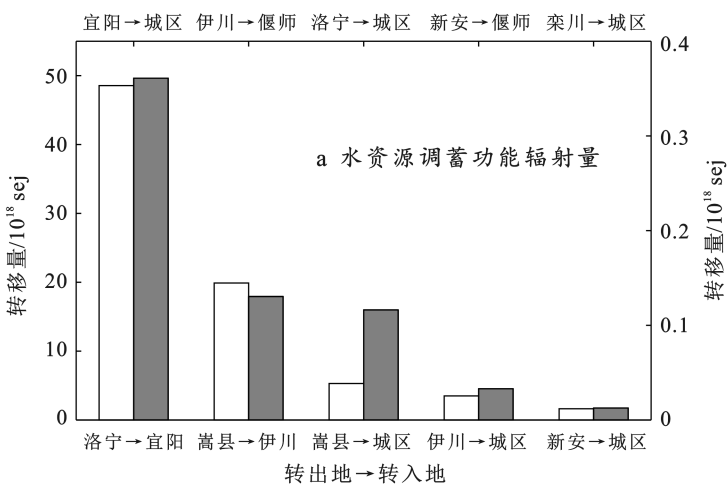


图 4 洛阳市水资源调蓄功能辐射分析  
Fig.4 Radiation analysis of water resources regulation function at Luoyang City

表 5 气候调节和固碳释氧功能转移半径

Table 5 Transfer radius of climate control, carbon sequestration and oxygen release function

km

转入地	转出地									
	主城区	偃师市	孟津县	新安县	栾川县	嵩县	汝阳县	宜阳县	洛宁县	伊川县
嵩县	43.01	86.65	74.23	64.70	34.07	—	28.57	43.42	28.69	52.80
洛宁县	81.01	110.22	77.36	58.06	41.45	33.62	74.51	42.88	—	79.31

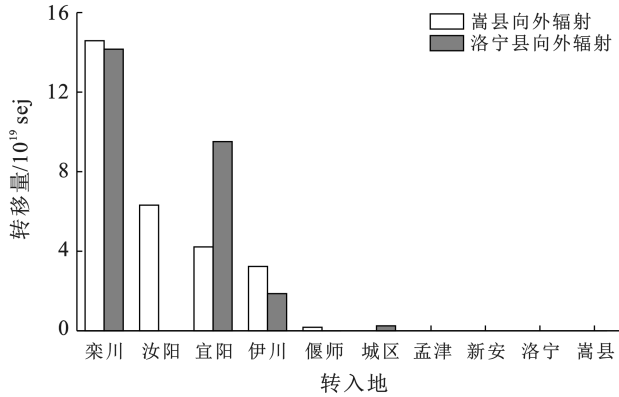


图 5 气候调节和固碳释氧功能辐射分析

Fig.5 Radiation analysis on climate control, carbon sequestration and oxygen release function

## 4 讨论

### 4.1 服务功能价值时间变化分析

总体而言,2000—2020年间洛阳市水生生态系统服务功能价值的演变由初期(2000—2005年)显著上升到后期(2005—2020年)变化趋于平缓,表明其生态系统格局不断优化,所产生的生态服务功能价值逐渐稳定。这与张翔等<sup>[18]</sup>的研究结果相符,即区域生态系统服务功能价值随着时间序列的发展呈现出整体增加的趋势。另外,从单项服务时间变化趋势来看,水力发电功能和休闲娱乐功能贡献最为突出,表明水电工程效率较高且当地水资源的开发利用兼顾了社会经济和生态保护。这与社会发展规律一致,人类活动一直是区域生态的主要影响因素。一方面,水力发电功能的突出源于中国对绿色能源的需求逐渐增加从而导致2000年以来水力发电逐渐替代火力发电<sup>[13]</sup>;另一方面,得益于洛阳市2000年以来旅游事业的迅猛发展,休闲娱乐功能价值不断增加,而2019年后受新冠疫情的影响休闲娱乐功能受到限制,但随着中国疫情防控阻击的有效性不断提高,生态系统服务功能价值也会不断恢复。

水系统为人类带来的服务效益是持续增加的且水生态具有较大的经济发展潜力<sup>[15]</sup>,水生态正在为人类提供更多的产品及资源,但也反映出人类对于水生态开发利用程度在不断增加。人类活动对于生态系统服务功能价值的影响大多是负面的<sup>[19-20]</sup>,因而土

地利用程度与生态系统服务价值是呈负相关的<sup>[19]</sup>,过度的开发利用必然会阻碍水生态环境的健康稳定进而影响生态系统服务效益。另外,水生态的服务构成重心正由供给功能向文化功能偏移,休闲娱乐已成为水生态的核心功能。同时,水生生态系统服务中生物多样性保护、水产品生产、水资源供给、水资源调蓄和休闲娱乐功能居于支配地位,因此在后续水资源管理中需要重视水生态水质水量保护,合理调整水产品养殖规模与捕捞强度;加大对区域旅游业的宣传和推广,促进区域经济与生态协调发展;严格控制对水系统的开发利用红线,加强人类环保意识,维护水生态环境。

### 4.2 水生生态系统服务功能空间辐射特征

生态系统服务功能辐射情况与生态系统服务功能能值空间分布情况是相似的。生态服务功能能值较大的区域向外辐射的量也较高且随着空间距离的增加,上游地区生态系统服务功能价值对下游各县的流转强度在不断减少。这与空间转移规律是一致的<sup>[17]</sup>。水生生态系统服务功能的空间转移分析给生态补偿提供了一种新的思路,即由于生态系统服务功能溢出地区的生态服务价值有盈余,因此该区域不仅具备保护自身主体健康绿色发展的能力,还具备保护其他区域乃至全流域整体生态环境可持续发展的能力。从生态供给和消费的角度来讲,生态溢出区即可作为生态供给主体,不仅可以为自身区域发展带来价值,还可以用于补偿生态消费主体,应该获得生态补偿资金<sup>[21]</sup>。依据断裂点理论,生态供给和消费主体可根据各辐射效应的辐射范围来确定,参考流域上下游的生态损益(或生态服务功能价值的转移量)由下游生态亏缺地区对上游生态溢出地区进行补偿,这为流域下游向上游进行生态补偿提供了依据,为水生生态系统可持续性发展提供保障。

### 4.3 优势与意义

本文剖析了水生生态系统内部特性,提出水生生态系统服务功能能值价值量化方法体系,实现水生生态系统供给、调节、支撑与文化功能的各细分项以能值为度量单位的统一量化。与传统的经济学量化方法相比,本文采用的能值分析法在一定程度上避免了经济学方法量化出现的主观性较强的问题,减少了人

类的支付意愿和市场需求对生态系统服务功能的评估产生的重大影响<sup>[5]</sup>。另外,本文应用断裂点模型对区域生态系统服务功能进行空间流转分析,找出空间流转规律,为流域水资源调控和区域内各行政区之间的规划管理及生态补偿标准的制定提供科学支撑。

## 5 结论

(1) 洛阳市 2000—2020 年水生生态服务总能值分别为  $8.01 \times 10^{21}$  sej,  $1.29 \times 10^{22}$  sej,  $1.27 \times 10^{22}$  sej,  $1.29 \times 10^{22}$  sej 和  $1.31 \times 10^{22}$  sej, 整体上呈增长趋势。其中水产品生产、休闲娱乐、科学研究功能增长明显,水资源供给功能略微下降,水力发电功能 2005 年达到峰值后下降明显,水生态的服务构成重心正由供给功能向文化功能偏移,休闲娱乐已成为水生态的核心功能。水系统正在为人类提供越来越多的产品和资源。

(2) 2020 年洛阳市水生生态系统服务功能主要转出地区为嵩县和洛宁县,向外转移总量分别为  $3.10 \times 10^{20}$  sej 和  $3.21 \times 10^{20}$  sej, 主要转入地区为栾川县、宜阳县、伊川县及汝阳县。空间上体现出辐射量随着空间距离的增加而递减的特点。

(3) 本研究采用能值方法量化水生生态系统服务功能,在一定程度上能够反映出区域水生态环境状况以及核心功能转变走向,为水资源管理和发展提供依据。同时通过断裂点模型利用各行政区相关功能的能值数据对其功能辐射效应进行分析,能够为流域水资源调控及生态补偿提供科学支撑。但文中对于水生生态系统服务功能的量化还不够全面,断裂点模型未考虑离散聚集及空间异质性问题,后续研究尚要进一步探讨。

### [ 参 考 文 献 ]

[1] 欧阳志云,赵同谦,王效科,等.水生生态服务功能分析及其间接价值评价[J].生态学报,2004,24(10):2091-2099.

[2] 齐娜,孙威威,阚海明,等.密云水库 2008—2019 年水生生态服务功能评价[J].水土保持通报,2021,41(4):276-283,291.

[3] Daily G. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems [M]. Washington D C: Island Press, 1997.

[4] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and Human Well-being: Synthesis [M]. Washing D C: Island Press, 2005.

[5] 咎欣,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.

[6] 刘玉龙,马俊杰,金学林,等.生态系统服务功能价值评估

方法综述[J].中国人口·资源与环境,2005,15(1):91-95.

[7] Meng Yu, Zhang Hao, Jiang, Pengkun, 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.

[8] 薛达元,包浩生,李文华.长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值评估[J].中国环境科学,1999,19(3):247-252.

[9] 马程,王晓玥,张雅昕,等.北京市生态涵养区生态系统服务供给与流动的能值分析[J].地理学报,2017,72(6):974-985.

[10] Odum H T. Self-organization, transformity, and information [J]. Science, 1988,242(4882):1132-1139.

[11] 王耕,张红玉.辽西北地区防风固沙辐射效应空间差异研究[J].水土保持研究,2022,29(6):161-166.

[12] Brown M T, Ulgiati S. Energy quality, emergy, and transformity: H T Odum's contributions to quantifying and understanding systems [J]. Ecological Modelling, 2004,178(1/2):201-213.

[13] 贺成龙.水力发电的能值转换率计算方法[J].自然资源学报,2016,31(11):1958-1968.

[14] 吕翠美.区域水资源生态经济价值的能值研究[D].河南郑州:郑州大学,2009.

[15] 张佩,姚娟.大喀纳斯旅游区湖泊—河流生态系统服务能值变化研究[J].水电能源科学,2015,33(8):37-41.

[16] 乔旭宁,杨永菊,杨德刚.生态服务功能价值空间转移评价:以渭干河流域为例[J].中国沙漠,2011,31(4):1008-1014.

[17] 陈璐,牟子平,秦惠平,等.湿地生态系统生态服务功能及其辐射效应研究[J].环境科学与技术,2017,40(5):179-186.

[18] 张翔,陈德超,范金鼎,等.生态系统服务价值变化及其与人类活动关联性研究:以常州市为例[J].环境工程技术学报,2022,12(6):2124-2131.

[19] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等.海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J].生态学报,2019,39(7):2366-2377.

[20] Wang Hong, Zhou Shunli, Li Xiaobing, et al. The influence of climate change and human activities on ecosystem service value [J]. Ecological Engineering, 2016,87:224-239.

[21] Zhao Yue, Wu Fengping, Li Fang, et al. Ecological compensation standard of trans-boundary river basin based on ecological spillover value: a case study for the Lancang-Mekong River basin [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021,18(3):1251.