

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20220657

# 郑州市水资源生态经济价值时间演化趋势 及其影响因素分析

吕翠美, 郇晓雨, 郭溪, 吴泽宁

(郑州大学水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 水资源生态经济价值是经济价值、社会价值和生态环境价值的统一, 分析其价值变化规律对合理优化配置水资源、促进水资源生态经济系统可持续发展具有重要意义。在采用能值分析方法核算郑州市 2009~2020 年水资源生态经济价值的基础上, 对其时间演化规律及影响因素进行探讨, 并采用 R/S 分析法分析了其未来发展趋势。结果表明, 郑州市水资源生态经济价值总体呈增长趋势, 价值变化主要受 GDP、人均可支配收入、污水排放量等多种因素的影响, 其时间序列结果显示未来趋势与过去特征呈正相关关系, 即郑州市水资源生态经济价值未来仍呈增长趋势。

**关键词:** 水资源; 生态经济价值; 能值; R/S 分析法; 演化规律; 影响因素

**中图分类号:** TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)02-0035-05

## 1 引言

郑州市位于河南省中部偏北, 境内大小河流 35 条, 分属黄河、淮河两大水系, 属温带大陆性气候。郑州市水资源在时间分配上具有夏秋多、冬春少和变化大的特点, 整体呈现水资源短缺、时间分布不均的特点, 供需矛盾突出。水资源合理配置是解决该问题的重要举措, 而水资源价值量化与核算是合理配置水资源的前提, 因此研究水资源价值时间变化规律及其影响因素对水资源的可持续利用和优化配置具有一定的支撑意义。目前水资源价值研究<sup>[1,2]</sup>已较多, 但均采取内部效果外部化的经济代替思路来核算水资源的生态环境价值, 未能体现水资源生态环境系统与社会经济系统之间的联系。能值理论可为认识和分析生态系统与社会经济系统间的关系提供新的价值理论基础, 但现有研究均存在一定局限性<sup>[3-5]</sup>。因此, 本文以郑州市为例, 将生态经济学的能值分析方法与 R/S 分析法相结合, 在实现经济价值、社会价值和生态环境价值统一度量的基础上, 分析了郑州市水资源生态经济价值时间演变规律和影响因素; 并合理预测其时间发展趋势, 以揭示未来水资源价值随时间的变化趋势, 为制定差别化的水

资源分配政策提供理论依据和决策参考。

## 2 数据来源及研究方法

### 2.1 数据来源

由于水资源生态经济价值时间变化趋势在短期不易显示和郑州市相关资料的获取情况, 选取 2009~2020 年为研究时段。研究所需的社会经济资料来自《郑州市统计年鉴》(2009~2020)、《郑州市国民经济和社会发展统计公报》(2009~2020) 和《2012~2020 年郑州都市区生态水系规划》, 水资源数据取自《郑州市水资源公报》(2009~2020)、《黄河泥沙公报》(2009~2020), 采用的能值转换率主要参考 ODUM H T<sup>[6]</sup>、蓝盛芳等<sup>[7]</sup> 和 BROWN M T 等<sup>[8]</sup> 的相关研究成果。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 能值分析法

能值<sup>[6]</sup>计算公式为:

$$E_{EM} = \tau B \quad (1)$$

式中,  $E_{EM}$  为能值;  $\tau$  为能值转换率;  $B$  为能量或物质的量。

生态经济学能值量化方法以太阳能值为单位, 使用传统经济学的观点来衡量自然资源价值

收稿日期: 2022-04-04, 修回日期: 2022-05-24

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51909240)

作者简介: 吕翠美(1982-), 女, 教授、硕导, 研究方向为水文与水资源, E-mail: lvcuimei305@163.com

通讯作者: 郭溪(1990-), 女, 副教授、硕导, 研究方向为水文与水资源, E-mail: zzuguoqi@163.com

较为普遍。根据能值分析方法,可通过能值货币比率( $E_{EDR}$ )建立太阳能值与传统货币之间的联系,即:

$$E_{EM_S} = E_{EM} / E_{EDR} \quad (2)$$

式中, $E_{EM_S}$ 为与能值相当的货币价值; $E_{EDR}$ 为能值货币比率。

结合文献[4,9]中研究成果,给出水资源经济、社会及生态环境价值的量化方法体系,其主要计算公式见表1。

表 1 水资源生态经济价值计算及其主要能值指标

Tab. 1 Calculation of ecological economic value of water resources and its main emergy indexes

分类	项目	公式	指标含义
水资源经济价值	工业生产价值/sej	$E_{EM_I} = W_{WCR_I} E_{EM_{IY}}$	$E_{EM_{IY}}$ 为工业总产出能值, $W_{WCR_I}$ 为水资源工业贡献率
	农业生产价值/sej	$E_{EM_A} = W_{WCR_A} E_{EM_{AY}}$	$E_{EM_{AY}}$ 为农业总产出能值, $W_{WCR_A}$ 为水资源农业贡献率
水资源社会价值	劳动力恢复价值/sej	$E_{EM_L} = E_{EM_{IN}} W_{WCR_L} E$	$E$ 为恩格尔系数, $E_{EM_{IN}}$ 为年人均可支配收入相当的能值, $W_{WCR_L}$ 为水资源生活贡献率
	休闲娱乐价值/sej	$E_{EM_{娱乐}} = 12.3\% I E_{EDR}$	$I$ 为旅游收入, $E_{EDR}$ 为能值货币比率
水资源生态环境价值	科学研究价值/sej	$E_{EM_{研究}} = T \times 6 \times 3.39 \times 10^{15} \text{ sej} / P$	$T$ 为研究时段内发表的学术论文数量, $P$ 为页数
	降温增湿价值/sej	$L = 2.5074 - 2.397T$ ; $E = LG; E_{EM_q} = E \tau_q$	$L$ 为蒸发潜热; $T$ 为计算区域平均气温; $E$ 为天然气蒸发能量; $G$ 为蒸发量; $\tau_q$ 为蒸汽能值转换率
	输沙价值/sej	$E_{EM_f} = R S \tau_d$	$R$ 为多沙河流的年径流量, $S$ 为水流输沙能力, $\tau_d$ 为沙的能值转换率
	水体自净价值/sej	$E_{EM_f} = W_{in} f \tau_{in}$	$W_{in}$ 为入河污染物的排放量, $f$ 为水体自净系数, $\tau_{in}$ 为入河污染物能值转换率
	净初级生产力能值和生物量能值/sej	$E_{EM_{NPP}} = \tau_{NPP} A \alpha$ $E_{EM_B} = \tau_B A \beta$	$\tau_{NPP}$ 为净初级生产力能值转换率, $\tau_B$ 为生物量能值转换率, $A$ 为河道面积, $\alpha$ 为年NPP量, $\beta$ 为年生物量
	生物多样性保护价值/sej	$E_{EM_S} = \tau_s N R$	$R$ 为区域生物活动面积占全球面积的比例; $\tau_s$ 为全球物种能值转换率, $N$ 为计算区域内水生生物物种总数
	底泥释氮价值/sej	$E_{EM_n} = G_n \tau_n$	$G_n$ 为底泥氮素释放量, $\tau_n$ 为氮素的能值转换率
	稀释净化价值/sej	$E_{EM_r} = W_r \tau_w$	$W_r$ 为河湖人工补水水量, $\tau_w$ 为人工补水的能值转换率
	除尘价值/sej	$E_{EM_c} = Ah \Delta PM_{10} \tau_n \times 48.62\%$	$h$ 为洒水高度,取5 m, $\tau_n$ 为水泥的能值转换率
	固碳释氧价值/sej	$E_{EM_g} = (G_{CO_2} \tau_{CO_2} + G_{O_2} \tau_{O_2})$ ; $r = W_1 / (W_1 + W_\beta)$	$G_{CO_2}$ 、 $G_{O_2}$ 分别为人工水生态系统绿色植被年固碳量和年释氧量, $\tau_{CO_2}$ 、 $\tau_{O_2}$ 分别为 $CO_2$ 和 $O_2$ 的能值转换率, $r$ 人工补给率, $W_1$ 为绿化用水量, $W_\beta$ 为天然降水补给量;
水资源生态环境总价值	水污染损失/sej	$E_{EM_p} = S_p \tau_p$	$S_p$ 为污染物超标量, $\tau_p$ 为污染物的能值转换率
	生态恢复价值/sej	$E_{EM_f} = W_o (\tau_a - \tau_b)$	$W_o$ 为河道外生态修复生态用水量, $\tau_b$ 为污水能值转换率, $\tau_a$ 为处理后水体能值转换率
	中水回用价值/sej	$E_{EM_z} = W_z (\tau_z - Z_b)$	$W_z$ 为中水回用量, $\tau_z$ 为中水能值转换率
	水资源生态经济总价值/sej	$E_{EM_{EE}} = E_{EM_F} + E_{EM_S} + E_{EM_E}$	$E_{EM_F}$ 为水资源经济总价值, $E_{EM_S}$ 为水资源社会总价值, $E_{EM_E}$ 为水资源生态环境总价值
经济价值	水资源生态经济货币价值/¥	$E_{EM_{SE}} = E_{EM_{EE}} / E_{EDR}$	$E_{EM_{EE}}$ 生态经济能值
	单方水能值价值/(sej·m <sup>-3</sup> )	$E_{EM_{FEE}} = E_{EM_{EE}} / W_{FE}$	$W_{FE}$ 为生态经济系统总用水量
	单方水货币价值/(¥·m <sup>-3</sup> )	$E_{EM_{FEE}} = E_{EM_{EE}} / W_{FE}$	$E_{EM_{FEE}}$ 为水资源生态经济货币能值

$$X(i, N) = \sum_{i=1}^N [E_{EM_{EE}}(i) - \overline{E_{EM_{EE}}(i)}] \quad (3)$$

极差  $R(N)$ 为:

$$R(N) = \max_{1 \leq i \leq N} X(i, N) - \min_{1 \leq i \leq N} X(i, N) \quad (4)$$

标准差  $S(N)$ 为:

$$S(N) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [E_{EM_{EE}}(i) - \overline{E_{EM_{EE}}(i)}]^2} \quad (5)$$

$$R(N)/S(N) = (\alpha N)^H \quad (6)$$

式中, $R(N)/S(N)$ 为重标极差; $\alpha$ 为常数,一般取0.5; $N$ 为时间长度,不同的 $N$ 值可得到不同的重标极差值; $H$ 为Hurst指数。

### 2.2.2 R/S 分析法

R/S分析法基于时间序列的极差与标准差比值确定Hurst指数,能合理预测事物时间发展趋势,在揭示未来水资源价值随时间变化趋势上具有独特的优势。其原理为设水资源生态经济价值的时间序列 $\{E_{EM_{EE}}(i)\}, i=1, 2, \dots, N$ 为时间间隔, $\overline{E_{EM_{EE}}(i)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{EM_{EE}}(i)$ 为该序列的平均值,在 $N$ 时刻,定义累积离差 $X(i, N)$ 为:

对式(6)两边取对数,得Hurst指数 $H^{[10]}$ 为:

$$H = \ln(R/S) / \ln(\alpha N) \quad (7)$$

$$\ln(R/S) = H \ln \alpha + H \ln N \quad (8)$$

Hurst指数可反映水资源生态经济价值发展变化的长记忆性程度及水资源生态经济价值过去、现在和未来之间的内在联系,确定水资源生态经济价值序列的自相关性和长程相关性。①当 $H=0.5$ 时,该序列要素是随机的,反映在水资源价值上则表示各计算结果相互独立,水资源生态经济价值与时间变化无必然关系;②当 $0.5 < H < 1.0$ 时,未来的趋势变化与过去的特征呈正相关,

即未来水资源生态经济价值的变化趋势与过去相同;③当  $0 < H < 0.5$  时,过去的趋势变化与未来的趋势变化呈负相关,即未来水资源生态经济价值的变化趋势与过去相反;④当  $H = 1$  时,该序列要素未来是可以预测的,说明该水资源生态经济价值时间序列可完全确定。

### 3 结果与分析

#### 3.1 基础水量数据

在水资源经济价值能值核算中,经济用水量包括工业、农业用水量。在水资源劳动力恢复价值能值计算时,将生活用水过程抽象为水资源的投入产出过程,故劳动力恢复价值用水量用生活用水量表示,生活用水包括居民生活用水和城镇公共用水。休闲娱乐价值以旅游收入计算。郑州市当地水资源匮乏,因此水上旅游主要集中在水资源丰富的黄河滩地,所以休闲娱乐价值用水量取黄河滩地水体的水量。根据文献[3],科学研究价值用水量取郑州市地表水的水量;在量化水资源生态环境价值时,采用田桂桂<sup>[4]</sup>的方法,河道内生态环境用水主要指生态基流、河口生物等的河道及河口的生态用水。河道外生态环境用水主要用于植树造林、水土保持、河湖补水,取郑州市生态环境用水量。郑州市用水量汇总见表 2。

#### 3.2 水资源生态经济价值能值量化

##### 3.2.1 经济价值

郑州市地处中原,属严重缺水地区,河流为内流河,可忽略水资源的发电及航运价值,只需计算工农业生产系统的水资源价值。收集相关数据,如可更新资源(太阳能、风能、工农业取水)、不可更新资源(原煤及煤制品、劳务、电力、氮磷肥等)、系统产出(种植业产品、原煤生产量、发电量、自然水等等),计算郑州市经济价值,汇总见表 3。

##### 3.2.2 社会价值

水资源的社会价值主要包括劳动力恢复价值、休闲娱乐价值和科学研究价值 3 部分。郑州市水资源社会价值见表 4。

##### 3.2.3 生态环境价值

稀释净化价值、净初级生产力和生物量价值、生物量价值是河道内外共有的,输沙价值和底泥释氮价值属于河道内生态环境价值,其余均属于河道外生态环境价值。水体自净系数直接引用文献[11]的成果,取水体自净系数  $f = 0.47^{[10]}$ 。在计算郑州市河道内生态用水生物多样性保护价值时,由于缺乏郑州市水生生物种类数据资料,以黄河湿地生物物种来代替。郑州市水资源生态环境价值见表 5。

##### 3.2.4 水资源生态经济价值汇总

为了使评估结果更为直观,通过能值/货币比率,将水资源的能值价值折算成货币价值。最后汇总郑州市的水资源经济价值、社会价值和生态环境价值,得到水资源生态经济价值,见表 6。

表 2 郑州市用水量汇总

Tab. 2 Summary of water consumption of Zhengzhou City

项目	指标	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
经济用水量/ $10^8 \text{ m}^3$	工业	5.1	5.5	5.6	6.0	4.9	4.6	4.8	4.9	4.9	5.3	5.0	4.7
	农业	6.1	4.8	4.2	4.3	4.4	4.7	4.7	5.1	4.3	4.2	4.2	4.0
社会用水量/ $10^8 \text{ m}^3$	劳动力恢复	3.0	4.9	4.5	4.7	4.6	5.0	5.2	5.4	6.0	6.6	7.3	7.3
	休闲娱乐	3.7	6.5	6.6	4.9	3.5	3.5	4.2	4.5	2.8	3.6	3.7	2.4
	科学研究	8.6	6.9	3.2	5.4	5.9	5.8	5.3	6.2	7.8	7.9	7.5	8.6
生态环境用水量/ $10^8 \text{ m}^3$	河道内	2.1	4.3	4.4	2.7	1.8	1.9	4.4	2.8	1.7	1.8	2.0	2.1
	河道外	2.5	5.1	1.9	2.0	2.1	2.0	2.1	2.6	3.5	4.6	5.1	5.1

表 3 郑州市水资源经济价值汇总

Tab. 3 Summary of economic value of Zhengzhou City

项目	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
工业生产价值/ $10^{20} \text{ sej}$	75.4	73.8	89.1	91.3	100.1	114.5	124.9	128.8	123.6	138.1	138.6	141.2
农业生产价值/ $10^{20} \text{ sej}$	27.8	18.7	20.0	18.3	30.8	33.5	30.7	31.5	33.3	35.9	35.9	36.3
经济价值/ $10^{20} \text{ sej}$	103.2	92.5	109.1	109.6	130.9	148.0	155.6	160.3	156.9	174.0	174.5	177.5
单方水经济价值/ $(10^{12} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-3})$	9.2	9.0	11.1	10.6	14.1	15.9	16.3	16.0	17.2	18.3	18.9	20.4

表 4 郑州市水资源社会价值汇总

Tab. 4 Summary of social value of Zhengzhou City

项目	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
劳动力恢复价值/ $10^{20} \text{ sej}$	85.5	97.4	113.3	109.0	90.0	94.7	92.0	118.3	123.9	138.5	141.1	148.6
休闲娱乐价值/ $10^{19} \text{ sej}$	7.5	8.2	8.5	7.7	8.7	8.5	8.9	10.0	10.6	10.9	10.9	11.0
科学研究价值/ $10^{17} \text{ sej}$	11.0	13.3	15.2	15.1	16.3	18.2	18.3	18.9	19.5	22.4	22.8	26.0
社会价值/ $10^{20} \text{ sej}$	86.3	98.2	114.2	109.8	89.9	95.6	92.9	119.3	125.0	139.6	142.2	149.7
单方水社会价值/ $(10^{12} \text{ sej} \cdot \text{m}^{-3})$	5.6	5.4	8.0	7.3	6.4	6.7	6.3	7.5	7.5	7.7	7.7	8.2

表 5 郑州市水资源生态环境价值

Tab. 5 Ecological and environmental value of water resources in Zhengzhou City

项目	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
降温增湿价值/ $10^{20}$ sej	2.1	2.1	1.7	1.2	1.1	1.4	1.8	1.5	1.3	1.5	1.5	1.7
输沙价值/ $10^{20}$ sej	0.9	1.8	4.6	2.0	1.1	1.6	4.1	2.0	1.9	4.2	2.1	2.7
水体自净价值/ $10^{20}$ sej	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
净初级生产力价值/ $10^{20}$ sej	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
生物量价值/ $10^{20}$ sej	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
生物多样性保护价值/ $10^{20}$ sej	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
底泥释氮价值/ $10^{20}$ sej	0.2	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2
稀释净化价值/ $10^{20}$ sej	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7
除尘价值/ $10^{15}$ sej	4.7	5.0	5.3	5.7	6.1	6.5	6.9	5.7	4.3	3.9	4.3	3.9
固碳释氧价值/ $10^{20}$ sej	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
水污染损失/ $10^{20}$ sej	0.0	0.0	0.0	-0.1	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
生态修复价值/ $10^{20}$ sej	2.7	3.2	3.9	3.6	3.6	4.9	5.7	4.8	6.1	6.7	7.0	7.4
中水回用价值/ $10^{20}$ sej	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7
生态环境价值/ $10^{20}$ sej	11.1	12.8	15.9	12.4	11.2	13.3	17.3	13.7	14.8	18.0	16.5	17.7
单方水生态环境价值/ $(10^{12}$ sej· $m^{-3})$	2.4	1.4	2.5	2.6	2.9	3.4	2.7	2.6	2.8	2.8	2.3	2.5

表 6 郑州市水资源生态经济价值

Tab. 6 Ecological and economic value of water resources in Zhengzhou City

项目	指标	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
单方水能值价值	经济	9.2	9.0	11.1	10.6	14.1	15.9	16.3	16.0	17.2	18.3	18.9	20.4
	社会	5.6	5.4	8.0	7.3	6.4	6.7	6.3	7.5	7.5	7.7	7.7	8.2
	生态环境	2.4	1.4	2.5	2.6	2.9	3.4	2.7	2.6	2.8	2.8	2.3	2.5
单方水货币/价值	经济	11.5	10.1	14.7	13.6	14.5	15.7	15.9	16.3	15.9	16.5	15.4	16.7
	社会	10.7	12.3	16.2	15.7	20.2	23.3	25.7	23.3	29.1	34.2	39.2	43.6
	生态环境	6.5	7.4	11.6	10.8	9.2	9.8	9.9	10.9	12.7	14.4	16.0	17.5
生态经济	经济	2.8	1.9	3.6	3.9	4.1	5.0	4.3	3.8	4.7	5.2	4.8	5.3
	社会	13.3	13.8	21.4	20.1	20.7	23.0	25.1	23.7	26.9	30.8	32.0	35.7

注:单方水能值价值单位为  $10^{12}$  sej/ $m^3$ ; 单方水货币/价值单位为  $¥/m^3$ 。

### 3.3 水资源生态经济价值时间演化规律及影响因素分析

#### 3.3.1 经济价值

由表 3 可知,近 12 年间,经济价值从  $103.2 \times 10^{20}$  sej 增长到  $177.5 \times 10^{20}$  sej,增长了  $74.3 \times 10^{20}$  sej,呈明显上升趋势。从 GDP、轻重工业比例、农业用水量、化肥施用量等因素入手,分析其对经济价值的影响程度。从构成来看,工业价值所占比例明显超过农业价值,并呈稳步增长趋势,从 2009 年的  $75.4 \times 10^{20}$  sej,增长到 2020 年的  $141.2 \times 10^{20}$  sej,说明近 12 年来郑州市生产力发达,经济水平提高,人们越来越重视水资源的可持续利用,使水资源有了更高的价值。同时工业结构得到合理的调整,注重发展重工业,用水工艺不断改进及提高,从而导致工业系统内水资源产生的价值越来越大。郑州市农业部门水资源价值总体呈增长趋势,但在 2010 年农业部门产生的水资源价值出现短暂的下降,原因在于:①气候不稳定,降雨量减少,农业用水量亦随之减少,水资源贡献率下降,所以农业系统内水资源产生的价值减少;②化肥使用量增加,过高的化肥施用量会损害土壤的理化性能,使土壤易于板结,降低土壤肥力,引起土地的退化及农业生态的恶化,进而降低农业生产率。所以应控制化肥施用量,结合土壤实

际情况,合理施用化肥,在保证粮食产量的同时,注意生态环境的保护。

#### 3.3.2 社会价值

由表 4 可知,水资源的社会价值从 2009 年的  $86.3 \times 10^{20}$  sej 增长到 2020 年的  $149.7 \times 10^{20}$  sej,增长了  $63.4 \times 10^{20}$  sej,其中水资源的劳动力恢复价值远大于休闲娱乐价值和科学研究价值,主要是因为水资源作为人类生活不可缺少的基础性物质,在很大程度上影响着人民生活质量的提高,因此其构成占比最大。郑州市水资源劳动力恢复价值呈上升趋势,说明随着经济社会发展和人民生活水平的提高,居民人均可支配收入逐渐增长,恩格尔系数下降,家庭越来越富足,水资源的劳动力恢复价值持续增长。水资源的劳动力恢复价值在 2011~2013 年出现下降,主要是近年来随着全民节水意识的提高,市场上出现了很多节水型的居民水器具,人均生活用水量减少,从而导致劳动力恢复价值减少。

#### 3.3.3 生态环境价值

由表 5 可得,在社会经济的参与下,生态修复价值和中水回用价值所占比重较大,表明社会经济要素对郑州市生态环境价值的贡献更大。历年除尘价值相对最小,与其他价值相差四个数量级。这说明生态用水在除尘方面的作用很小,洒水对于雾霾治理、空气净化的效果并不明显。根据占比情况,本文着重分析降温增湿、稀释净化、中水回用和输沙价值的变化规律,见图 1。由图 1 可看出,2011 年之后降温增湿价值出现下降,这是因为 2011 年之后气温出现下降,气候越寒冷对植物的生长越不利,所以水资源的降温增湿价值较低。2011、2015、2018 年输沙价值变化显著,这可能与不合理的土地利用、毁林开荒、陡坡耕种有关。中水回用量与中水回用价值变化趋势保持一

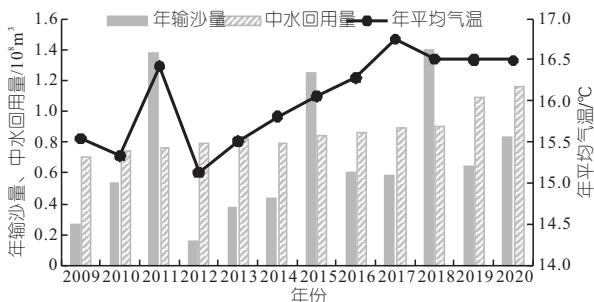


图 1 郑州市水资源生态环境价值影响因素分析图

Fig. 1 Analysis chart of water resources ecological environment influencing factors in Zhengzhou City

致,中水回用量日益增大,说明郑州市注重对生态环境的保护,生态环境质量逐渐改善。

### 3.3.4 水资源生态经济价值

基于郑州市水资源生态经济价值量化结果,参照表 6 绘制水资源生态经济价值随时间变化的趋势图,并引入能值货币比率、环境负荷率、水资源利用率等指标,分析其对水资源生态经济价值的影响,见图 2。

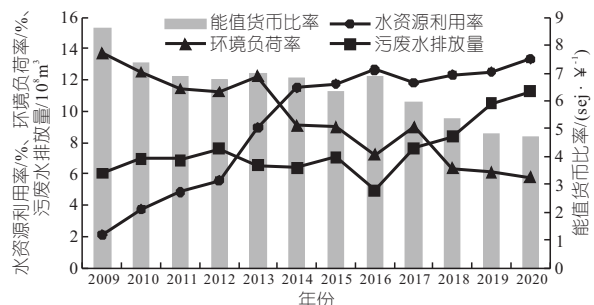


图 2 郑州市水资源生态经济价值影响因素分析图

Fig. 2 Analysis chart of influencing factors of ecological and economic value of water resources in Zhengzhou City

根据表 6 的计算结果,2009~2020 年郑州市水资源生态经济系统的单方水资源价值整体呈增加趋势(13.3~35.7 ¥/m<sup>3</sup>),说明郑州市经济和生活水平的提高,使能值货币比率减小。同时近 10 年来水资源保护政策的顺利实行,环境负荷率减小,对环境造成的压力也逐年减少,从而导致水资源利用率大幅提高,水资源带来的价值日益增大。但水资源生态经济价值在 2017 年出现大幅下降,这是由于:①郑州市过度注重发展的速度而忽略环境的影响,污水排放量增大,环境承受的压力增大,环境负荷率增大;②水资源的利用率低,导致成本高、产值效益不佳,从而导致水资源生态经济价值减少。郑州市今后应改进灌溉方式,回收利用废污水以提高水资源利用率,加强水资源的管理,建立节水型经济。

根据计算结果,对比分析了郑州市水价和水资源生态经济价值,以 2018 年为例,居民生活用

水的水价为 4.50 ¥/m<sup>3</sup>,而生活单方水货币价值的计算结果为 12.57 ¥/m<sup>3</sup>,是相应水价的 2.8 倍,由此可见郑州市水价远低于水资源价值,水价还有上调空间。

### 3.4 未来水资源生态经济价值变化趋势

根据 R/S 分析得到  $H$  值,从而基于水资源生态经济价值的历史变化趋势,判读其未来水资源价值的变化趋势。经计算,经济、社会、生态环境、生态经济价值的  $H$  值分别为 0.978、0.813、0.845、0.873,均位于 0.5~1.0 之间,说明郑州市水资源生态经济价值的未来变化趋势与过去保持一致,呈正持续关系,未来水资源生态经济价值将继续呈增长趋势。郑州市水资源经济和生态经济价值的  $H$  值分别为 0.978、0.873,大于 0.860,说明未来郑州市水资源价值的变化过程与过去具有较强的持续性。社会价值和生态环境价值的  $H$  值分别为 0.813、0.845,持续性可能相对稍弱一点。

## 4 结论

a. 基于生态经济学的能值理论,核算了郑州市的水资源生态经济价值,分析了郑州市水资源生态经济价值的时间变化规律及主要影响因素。并运用 R/S 分析法,求得 Hurst 指数,对其未来发展趋势进行了合理的预测。对 2009~2020 年的郑州市水资源生态经济进行核算,结果表明水资源带来的价值日益增大,对社会的贡献也越来越大,但未来仍需注重水资源的优化配置,发展节水型经济,有助于水资源的可持续利用。

b. 以郑州市为整体进行研究,不能全面分析各分区的水资源生态经济价值及其变化规律,今后仍需进一步实现空间维度的价值核算及演变规律分析。

### 参考文献:

- [1] 孙宗凤,董增川. 水资源的生态经济价值模型分析[J]. 水利水文自动化,2005(1):10-13,39.
- [2] 李友辉,董增川,孔琼菊. 江西省水资源生态系统服务功能价值评价[J]. 江西农业学报,2007(1):95-98.
- [3] 吕翠美. 区域水资源生态经济价值的能值研究[D]. 郑州:郑州大学,2009.
- [4] 田桂桂. 基于物质循环的生态用水价值能值评估方法研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.
- [5] 吴泽宁,黄硕倩,狄丹阳,等. 黄河流域农业系统水资源价值及其空间分布研究[J]. 灌溉排水学报,2019,38(12):93-100.

[4] XIAO H, SHAHAB A, XI B, et al. Heavy metal pollution, ecological risk, spatial distribution, and source identification in sediments of the Lijiang River, China[J]. *Environmental pollution*,2020,DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116189.

[5] 温泉, 赵艳民, 曹伟, 等. 潮白河中游沉积物中重金属分布来源及生态风险评估[J]. *环境科学研究*, 2020,33(3):599-607.

[6] 时春景, 李红霞, 张言, 等. 永定河上覆水、间隙水和沉积物中重金属的分布特征[J]. *环境化学*, 2017,36(1): 48-61.

[7] 唐文忠, 王立硕, 单保庆, 等. 大清河水系河流表层沉积物重金属污染特征[J]. *环境科学学报*, 2015,35(11):3620-3627.

[8] 张淑珍. 海河流域子牙河水系平原段沉积物毒害污染物分布特征及风险评价[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2016.

[9] 向语兮, 王晓, 单保庆, 等. 白洋淀表层沉积物重金属形态分布特征及生态风险评估[J]. *环境科学学报*, 2020,40(6):2237-2246.

[10] JAFARABADI A R, MITRA S, RAUDONYTÉ-SVIRBUTAVIČIENE E, et al. Large-scale evaluation of deposition, bioavailability and ecological risks of the potentially toxic metals in the sediment cores of the hotspot coral reef ecosystems (Persian Gulf, Iran) [J]. *Journal of hazardous materials*, 2020,400:122988.

[11] 张拓, 王鑫鑫, 陈芯怡, 等. 攀枝花煤矿区周围农田重金属污染特征及风险分析[J]. *地球与环境*, 2022,50(2):192-201.

[12] ZHUANG S, LU X, YU B, et al. Ascertaining the pollution, ecological risk and source of metal(loid)s in the upstream sediment of Danjiang River, China [J]. *Ecological indicators*,2021,125(3):107502.

### Chemical Fractions of Heavy Metals in Surface Sediments from Upper Reaches of Zhanghe River and Risk Assessment

GAO Peng-yang<sup>1,2</sup>, ZHAO Dong-liang<sup>3</sup>, WU Jin-kun<sup>1,2</sup>, WANG Yu-chun<sup>1,4</sup>, CHENG Yao<sup>1,2</sup>

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Handan 056038, China; 3. China Water Resources Beifang Investigation, Design and Research Co. Ltd., Tianjin 300222, China; 4. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to reveal the pollution characteristics of heavy metals in surface sediments in the upper reaches of the Zhanghe River, the chemical fractions and contents of Cr, As, Cd and Pb in 32 samples were determined. The potential ecological risks were assessed by ratios of secondary phase and primary phase, and risk assessment code method. The correlation analysis was used to analyze the sources of heavy metals. The results show that the average contents of heavy metals Cr, As, Cd and Pb are  $91.51 \pm 24.30$ ,  $9.81 \pm 3.05$ ,  $0.12 \pm 0.05$ ,  $18.30 \pm 5.43$  mg/kg, respectively, and only the average contents of Cd do not exceed the background value. Only the content of Cd does not exceed the background value. The exchangeable fraction of Cd is larger than Cr, As, and Pb, and its biochemical activity is relatively high. The potential risks of heavy metals are sorted as  $Cd > Pb > As > Cr$ , and the risks are mainly concentrated in the source of Zhuozhang River and the west headwater of Qingzhang River. These four heavy metals mainly come from mineral exploitation, and mining activities contribute to the content and potential risks of heavy metals.

**Key words:** upper reaches of Zhanghe River; surface sediments; chemical fractions of heavy metals; risk assessment; source analysis



(上接第 39 页)

[6] ODUM H T. *Environmental accounting: energy and environmental decision making* [M]. New York: John wiley&sons,1996.

[7] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. *生态经济系统能值分析* [M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.

[8] BROWN M T, ULGIATI S. *Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems* [J]. *Journal of cleaner production*, 2002, 10(4): 321-334.

[9] 吕翠美, 吴泽宁. 区域水资源生态经济系统可持续发展评价的能值分析方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(7): 1293-1298.

[10] MANDELBROT B. *The fractal geomtry of nature* [M]. New York: Freeman company, 1982.

[11] 王平, 史晓新. 水体自净系数的研究[J]. *环境科学与技术*, 1997(2): 13-16.

### Time Evolution Trend and Influencing Factors of Ecological Economic Value of Water Resources in Zhengzhou City

LV Cui-mei, HUAN Xiao-yu, GUO Xi, WU Ze-ning

(School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** The ecological and economic value of water resources is the unity of economic value, social value and ecological environmental value. It is of great significance to analyze the change rule of its value for rationally optimizing the allocation of water resources, promoting the sustainable development of the ecological and economic system of water resources. The emergy theory analysis method was used to calculate the ecological and economic value of water resources in Zhengzhou City from 2009 to 2020. Its time evolution law and influencing factors were discussed, and its future development trend was analyzed by R/S analysis method. The results show that there is a growing trend for water ecological economic value in Zhengzhou City on the whole. The value change is mainly affected by GDP, per capita disposable income, sewage wastewater emissions and other factors. The results show that the future trend in the past time series characteristics were positively related, namely, water ecological economic value in Zhengzhou City still showed a trend of growth in the future.

**Key words:** water resources; ecological economic value; emergy; R/S; evolution law; influencing factors