

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdtk.2022.0011

李红艳,付景保,褚钰,等.基于人水和谐的南水北调中线运行效果评价:以河南典型受水区为例[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(1):93-101. LI H Y, FU J B, CHU Y, et al. Assessment on operating effect on the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project considering human-water harmony: Case of the typical water receiving areas in Henan Province [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(1): 93-101. (in Chinese)

基于人水和谐的南水北调中线运行效果评价

——以河南典型受水区为例

李红艳^{1,2}, 付景保^{1,2}, 褚钰^{1,2}, 翟鹏辉¹

(1. 河南工程学院管理工程学院, 郑州 451191; 2. 南水北调与黄河流域生态环境研究中心, 郑州 451191)

摘要:为合理地分析和评价南水北调中线工程的运行效果,优化工程水资源配置和精准调度,以河南典型受水区为例,基于人水和谐理论,将水资源作为影响经济社会发展的关键因素,构建水资源与经济社会和谐发展评价模型,并对关键时间节点的和谐度进行对比研究。结果显示:河南典型受水区的和谐度从时间维度大致可分为 3 个阶段:第一阶段在南水北调中线工程建设前(1999—2003 年),整体和谐度值在 0.5 以下,数值较低但呈上升趋势;第二阶段为工程开工后(2003—2008 年),部分地区和谐度值达到 0.6,但整体和谐度值没有明显上升,有些地方甚至出现下降;第三阶段是工程通水后(2014—2018 年),整体和谐度开始上升,最高值达到 0.7。从空间维度看,离水源区较近的南阳、许昌两地的和谐度稳步增加,而郑州、平顶山市的和谐度则先增后减。建议省级层面统筹河南省南水北调可用水量,建立水权交易机制,加强高耗水行业管理,提高水资源利用效率。

关键词:南水北调;人水和谐;和谐发展;和谐评价;河南典型受水区

中图分类号:TV68 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



南水北调中线工程从丹江口水库引水至北京,2014 年通水至 2021 年 7 月 20 日,已累计调水 400 多亿 m^3 ,对沿线受水区经济社会发展起到很大的支撑和推动作用。但工程具体效果如何定量评价,受水区水资源与经济社会的发展关系处于什么样的水平,既是国家水利工程项目管理部门密切关心的问题,也是受水区内人民群众密切关心的问题。

国内外都有关于水资源与经济社会、生态系统关系的研究。在定性分析方面:Bertalanffy^[1]从系统论的角度出发,认为水资源、经济社会、生态系统三者构成了一个复杂的巨系统;方国华等^[2]分析了水、生态环境与社会经济之间的关系,认识到三者关系彼此联系并彼此制约。在定量评价方面:左其亭

等^[3]建立了利用水资源匹配度进行计算的理论和办法,研究了水资源和经济社会之间的各种相应协调和匹配的程度;张羽威等^[4]对新疆经济发展与水资源利用空间关联性进行研究;张沛^[5]利用钟摆模型,分析了塔里木河流域生态-社会-水资源的耦合关系;Nagy 等^[6]针对沿海地区城市的大规模扩展对跨域河流水的历史文化及沿海地区水资源质量的气候变化影响课题研究进行了综合分析,发现城市沿河流域大规模的扩张可能会进一步提高沿海地区河道退化的可能性和风险;杨莹等^[7]用相关分析和回归分析的方法,对水资源-经济社会-生态环境复合系统的互馈响应关系进行了分析。关于人水和谐发展的研究:比较有代表性的是 2004 年的中国水周,将

收稿日期:2021-08-27 修回日期:2021-09-25 网络出版时间:2021-10-07

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210930.1656.002.html

基金项目:国家自然科学基金项目(42077449;U1704121;71804042);教育部人文社会科学项目(19YJC630075);河南省科技创新团队项目(19IRTSTHN015);河南省科技创新人才(人文社科)项目(2021-CX-050)

作者简介:李红艳(1979—),女,河南周口人,教授,博士,主要从事管理系统工程、水资源管理研究。E-mail:hylihn@126.com

活动主题定为“人水和谐”,随后逐步形成了“人水和谐论”;由左其亭等^[8]提出的以健康、发展、和谐三大量化准则形成的研究框架奠定了人水和谐量化研究的基础,后又引入博弈论模型^[9]、模糊物元模型^[10]和云模型^[11]等。关于南水北调中线工程的效益分析:夏军等^[12]探讨了南水北调中线工程对区域经济社会可持续发展影响的相关科学问题;曹文庚等^[13]研究发现,随着南水北调工程通水,地下水压采工作持续推进,河湖生态补水工作的全面展开,华北平原局部地区地下水位已呈现回升趋势;汪林等^[14]对 2000 年以来南水北调东、中线一期工程受水区生态环境状况和所辖 72 座城市用水状况进行了统计分析,结果表明一期工程对受水区城市供水和农业生态环境改善具有较显著的作用。关于南水北调工程受水区水资源与经济社会的关系:周姣等^[15]在充分考虑地下水超采的基础上,以区域社会经济发展、生态环境修复和水资源可持续利用为目标,利用系统分析原理,建立水资源优化配置模型;马骏等^[16]在界定水资源与经济社会和谐内涵基础上,将水资源作为投入、经济社会作为产出,构建南水北调东中线受水区水资源与社会经济和谐度评价模型;也有学者^[17-20]从水资源与经济社会的耦合协调角度分析它们之间的关系。以上成果为研究南水北调中线工程水资源与经济社会的关系提供了思路和参考,但这些研究主要以静态评价为主,且所选指标不太全面,在工程运行效果有效评价方面仍有缺失。本研究拟选择南水北调中线工程河南典型受水区工程建设前、建设开始、通水后的关键时间节点,从健康、发展、协调 3 个角度评价受水区水资源与经济社会和谐发展度,以期全面、有效地评价工程运行效果提供技术参考。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

南水北调中线工程共向河南 11 座地级市供水,其中,黄河以北有 5 座(安阳、焦作、濮阳、新乡、鹤壁),黄河以南有 6 座(许昌、郑州、漯河、周口、南阳、平顶山)。本研究主要以 6 个比较典型的受水区(郑州、焦作、南阳、平顶山、新乡、许昌)为研究对象,分析在工程项目建设前(1999 年、2000 年)、建设期(2003 年)、建设中(2008 年)及工程项目通水后(2014 年、2018 年)不同地区水资源与其经济社会和谐发展情况。河南受水区及研究区见图 1,其中蓝

色部分为研究区(河南典型受水区)。



图 1 河南受水区及研究区
Fig. 1 Water receiving areas in Henan Province and research area

1.2 数据来源

各监测指标特征值的主要数据来自《河南省水利年鉴》《河南省统计年鉴》《河南省水资源公报》、河南省县级以上城市的水环境资源状况统计调查年鉴、环境资源保护统计公报和河南省省级水资源环境保护管理局统计公报等。

2 南水北调中线河南典型受水区水资源与经济社会和谐度评价

2.1 研究方法

本研究主要采用左其亭等^[21]提出的单指标与人水和谐度综合量化评价方法中的单指标 SMI-P 综合方法,即单指标准则量化-多指标准则综合-多指标准则综合集成的评价方法,具体步骤如下:

步骤 1,确定指标方向。指标变化方向测定是用来衡量一个单固定指标和谐程度是否随指标值的不断变化而发生变化的基本方向和变化趋势,其主要方法可分为正向、逆向两种,其中,指标值越大、和谐程度越高的固定指标值被称为正向的固定指标,指标值越大、和谐程度越低的固定指标则被称为逆向的固定指标。

步骤 2,确定指标特征值。人水和谐指标量化的方法将单个人水指标和谐的程度函数随指标值的变化过程概化为 $[0, 1]$ 的人水和谐分段点量化函数,而每个分段点都有其分段点特征值。每个人水和谐指标都应具有最差值(a)、较差值(b)、合格值(c)、较优值(d)、最优值(e)5 个分段点特征值,各自对应的单指标和谐值量化程度分别为 0、0.3、0.6、0.8、1.0。最差平均值(a)即为最坏的水平,参考国内最

差的水平或者国内外的科学研究成果水平进行综合确定;较差最优值(e)确定时即为最好的水平,参照现阶段行业普遍公认的国际标准水平进行确定;较差合格值(c)进行量化确定时,根据国内的平均水平;较差的最优值(d)则主要根据最差合格值(c)、最优值(e)插值进行量化得到;较差平均值(b)则主要根据最差平均值(a)、及格值(c)插值而进行量化得到。

步骤3,单指标量化。单指标和谐度量化的方法就是采用模糊计算隶属度的方法,将各个指标的值通过隶属度分段计算的函数统一地映照到 $[0, 1]$ 的隶属度范围之上,即可以根据对应的指标值从而计算得出相对应的单指标和谐度(Sub Index Harmony Degree,简称 SHD),用 I_{SHD} 表示。正向指标、逆向指标的 I_{SHD} 和谐度变化过程见图2,计算公式见式(1)、(2)。

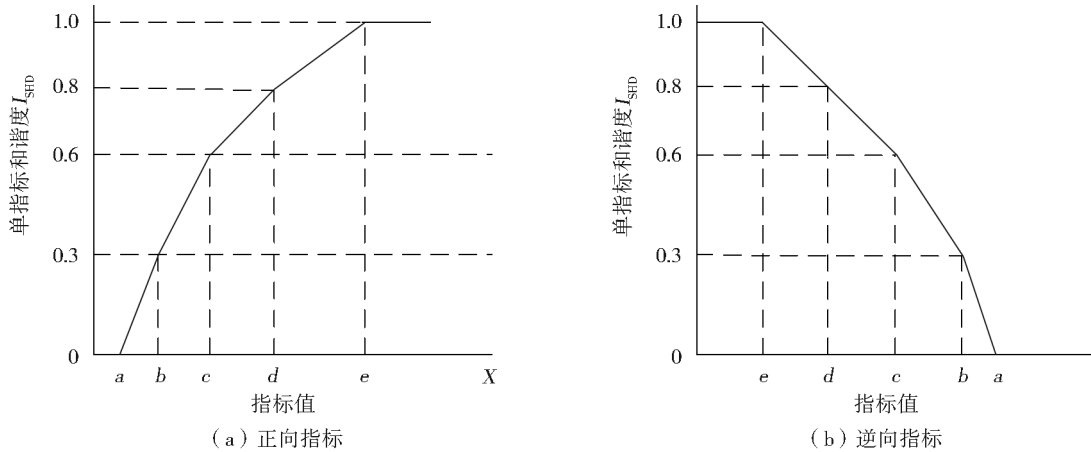


图2 I_{SHD} 和谐度变化过程

Fig.2 Map of harmony degree change process of I_{SHD}

正向单指标和谐度:

$$I_{SHD_i} = \begin{cases} 0 & x_i \leq a_i \\ 0.3 \left(\frac{x_i - a_i}{b_i - a_i} \right) & a_i < x_i \leq b_i \\ 0.3 + 0.3 \left(\frac{x_i - b_i}{c_i - b_i} \right) & b_i < x_i \leq c_i \\ 0.6 + 0.2 \left(\frac{x_i - c_i}{d_i - c_i} \right) & c_i < x_i \leq d_i \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{x_i - d_i}{e_i - d_i} \right) & d_i < x_i \leq e_i \\ 1 & e_i < x_i \end{cases} \quad (1)$$

逆向单指标和谐度:

$$I_{SHD_i} = \begin{cases} 1 & x_i \leq e_i \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{d_i - x_i}{d_i - e_i} \right) & e_i < x_i \leq d_i \\ 0.6 + 0.2 \left(\frac{c_i - x_i}{c_i - d_i} \right) & d_i < x_i \leq c_i \\ 0.3 + 0.3 \left(\frac{b_i - x_i}{b_i - c_i} \right) & c_i < x_i \leq b_i \\ 0.3 \left(\frac{a_i - x_i}{a_i - b_i} \right) & b_i < x_i \leq a_i \\ 0 & a_i < x_i \end{cases} \quad (2)$$

步骤4,确定评估指标体系权重。本研究认为各个指标的重要程度相等,因此给予所有指标相同

的权重,即以所有指标和谐度的算术平均值作为整体的和谐度。

步骤5,多指标综合与多准则集成。通过加权函数求和的方法,即对单指标和谐度由小至大的函数进行综合计算得到最终和谐度。首先,对各目标分类层的指标和谐度进行综合,得到各目标分类层和谐度;然后,对准则层下各分类层的指标和谐度进行综合,得到各目标准则层和谐度;最后,对准则层的指标进行综合得到目标准则层和谐度。得到的结果即为水资源与经济社会和谐度 I_{HESHSD} 。和谐度计算公式为

$$I_{HED(T)} = \sum_{i=1}^{n_1} w_i I_{SHD_1}(Y_{1,i}(T)) \quad (3)$$

$$I_{DED(T)} = \sum_{i=1}^{n_2} w_i I_{SHD_2}(Y_{2,i}(T)) \quad (4)$$

$$I_{HAD(T)} = \sum_{i=1}^{n_3} w_i I_{SHD_3}(Y_{3,i}(T)) \quad (5)$$

式中: $I_{HED(T)}$ 为 T 时刻的健康度; $DED(T)$ 为 T 时刻的发展度指数; $I_{HAD(T)}$ 为 T 时刻的协调度指数; w_i 为各个量化准则指标的权重; n_1, n_2, n_3 分别为健康、发展、协调3个量化准则指标层的量化指标的个数; $I_{SHD_i}(Y_{1,i}(T))$ 分别为单量化指标权重量化的平均结果, $Y_{1,i}(T)$ 为某量化指标在 T 时刻的值。

水资源与经济社会和谐的程度(I_{HESHSD})用公式

来表示,其表达式为

$$I_{\text{HESHDT}} = I_{\text{HED}(T)}\beta_1 + I_{\text{DED}(T)}\beta_2 + I_{\text{HAD}(T)}\beta_3 \quad (6)$$

其中: β_1 、 β_2 、 β_3 分别为 3 个准则层的权重。

2.2 评价指标体系构建

评价指标主要从人文与水系统的健康、人文

与水系统的持续健康发展、人文系统和水环境生态系统之间的协调等角度考虑,首先对健康度、发展度、协调度指标的频率进行统计,然后在专家咨询基础上得到 4 个层次的评价指标体系,具体见表 1。

表 1 水资源与经济社会和谐发展评价指标

Tab. 1 Evaluation index of harmonious development of water resources and economy and society

目标层	准则层	分类层	指标层	指标方向
水资源与经济社会和谐发展度	健康度	水资源状况	水资源总量/万 m ³	正
			地下水埋深/m	正
		生态环境状况	产水系数	正
	发展度	社会发展水平	人口密度/(人·km ⁻²)	逆
			城镇化率/%	正
		经济发展水平	人均 GDP/(元·a ⁻¹)	正
			GDP 增长率/%	正
			第三产业产值占 GDP 比例/%	正
		技术发展水平	万元 GDP 水耗/m ³	逆
			万元 GDP 用水量/m ³	逆
	发展安全保障	人均粮食产量/kg	正	
		城市人均生活用水量(L·d ⁻¹)	正	
	协调度	水对人文系统的服务功能	人均水资源量/m ³	正
		人对水系统的开发与保护	污水处理率/%	正

为了计算和表述方便,根据水资源与经济社会和谐度($I_{\text{HESH D}}$)的大小,以 0.2 为间隔,把和谐程度分成 5 个等级,即和谐($0.8 \leq I_{\text{HESH D}} \leq 1$)、较为和谐($0.6 \leq I_{\text{HESH D}} < 0.8$)、较不和谐($0.4 \leq I_{\text{HESH D}} < 0.6$)、不和谐($0.2 \leq I_{\text{HESH D}} < 0.4$)、严重不和谐($0 \leq I_{\text{HESH D}} < 0.2$)^[8]。

2.3 和谐评价结果

本文给出如下假设:每个较差合格指标都至少存在着具有 5 个非常具有代表性的数值,即最差合格值、较差值、合格值、较优值和最优合格值。其中取最差合格值时该指标的子和谐度为 0,取较差合格值时此指标和谐度一般为 0.3,取合格差更优值时该指标的和谐度为 0.6,取较差最优值时该合格指标的和谐度为 0.8,取最优值或者比最优值更优时该指标的子和谐度一般为 1。当某个合格指标的值等于最差合格值时, $I_{\text{SHD}} = 0$,说明“完全不和谐”;当某个指标值等于较差合格值时, $I_{\text{SHD}} = 0.3$,说明“较不和谐”;当某个合格指标值等于较差合格指标最优值时, $I_{\text{SHD}} = 0.6$,说明“基本和谐”;当某个指标值等于较差最优值时, $I_{\text{SHD}} = 0.8$,说明“较为和

谐”;当某个指标值等于最优值时, $I_{\text{SHD}} = 1$,说明“完全和谐”。

每个量化指标的特征值需要处理后方可用于计算,具体根据该指标特征值的最大值、最小值以及平均值确定,再将每个指标的最大值乘以 1.1、最小值乘以 0.9 得到其最优值(e)和最差值(a),得到这些地市和谐评估指标基本特征平均值见表 2。

将各地数据代入 SMI-P 模型,得到河南省典型受水区水资源与经济社会和谐发展评价结果。健康度、发展度和协调度情况见表 3 至表 5。

和谐度指数变化情况见图 3。

3 结果分析与对策建议

3.1 评价结果分析

健康度评价结果。由表 3 可知,各地健康度表现出先增加后大幅度减少,最后又大幅度增加的变化情况。从时间维度看,2003 年各地健康度达到最大;从空间维度看,焦作市健康度相对较高,郑州市较低。从具体指标特征值来看,各地市水资源状况相差不大,主要差别在于生态环境状况。

表 2 河南省和谐评估指标基本特征平均值

Tab. 2 Average values of basic characteristics of harmony evaluation index in Henan Province

指标层	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>
水资源总量/万 m ³	5.09	14.88	24.66	96.42	168.17
地下水埋深/m	2.99	4.91	6.82	10.32	13.82
产水系数	0.14	0.21	0.28	0.42	0.56
人口密度/(人·km ⁻²)	1 497.10	1129.43	761.75	557.73	353.70
城镇化率/%	7.29	23.28	39.27	60.01	80.74
人均 GDP/(元·a ⁻¹)	4 182.30	14 197.65	24 213.00	67 146.10	110 079.20
GDP 增长率/%	-11.88	-1.35	9.18	12.84	16.50
第三产业产值占 GDP 比例/%	19.58	26.69	33.79	46.98	60.17
万元 GDP 水耗/m ³	905.94	561.71	217.48	117.93	18.38
万元 GDP 用水量/m ³	904.20	557.28	210.36	110.04	9.72
人均粮食产量/kg	139.50	294.55	449.60	641.15	832.70
城市人均生活用水量/(L·d ⁻¹)	71.10	102.69	134.18	199.26	246.33
人均水资源量/m ³	64.017	191.760	319.500	1 037.460	1 755.420
污水处理率/%	0	27.81	55.61	81.71	107.80

表 3 1999—2018 年各时间点 6 个城市健康度指数

Tab. 3 Health index of six cities at different time points from 1999 to 2018

年份	1999	2000	2003	2008	2014	2018
郑州市	0.213	0.323	0.443	0.215	0.322	0.269
平顶山市	0.279	0.687	0.532	0.467	0.309	0.381
新乡市	0.457	0.511	0.508	0.479	0.496	0.373
焦作市	0.533	0.536	0.604	0.554	0.604	0.566
许昌市	0.343	0.509	0.467	0.321	0.319	0.374
南阳市	0.236	0.742	0.662	0.584	0.373	0.643

表 4 1999—2018 年各时间点 6 个城市发展度指数

Tab. 4 Development index of six cities at different time points from 1999 to 2018

年份	1999	2000	2003	2008	2014	2018
郑州市	0.601	0.596	0.577	0.635	0.617	0.705
平顶山市	0.476	0.496	0.554	0.633	0.624	0.680
新乡市	0.356	0.440	0.557	0.624	0.667	0.776
焦作市	0.404	0.458	0.581	0.587	0.649	0.726
许昌市	0.461	0.475	0.526	0.603	0.672	0.745
南阳市	0.422	0.421	0.520	0.597	0.677	0.744

表 5 1999—2018 年各时间点 6 个城市协调度指数

Tab. 5 Coordination index of six cities at different time points from 1999 to 2018

年份	1999	2000	2003	2008	2014	2018
郑州市	0.097	0.164	0.592	0.529	0.502	0.471
平顶山市	0.580	0.631	0.766	0.692	0.583	0.620
新乡市	0.181	0.306	0.505	0.612	0.594	0.568
焦作市	0.164	0.213	0.538	0.474	0.594	0.584
许昌市	0.116	0.309	0.485	0.521	0.527	0.505
南阳市	0.202	0.477	0.669	0.628	0.679	0.740

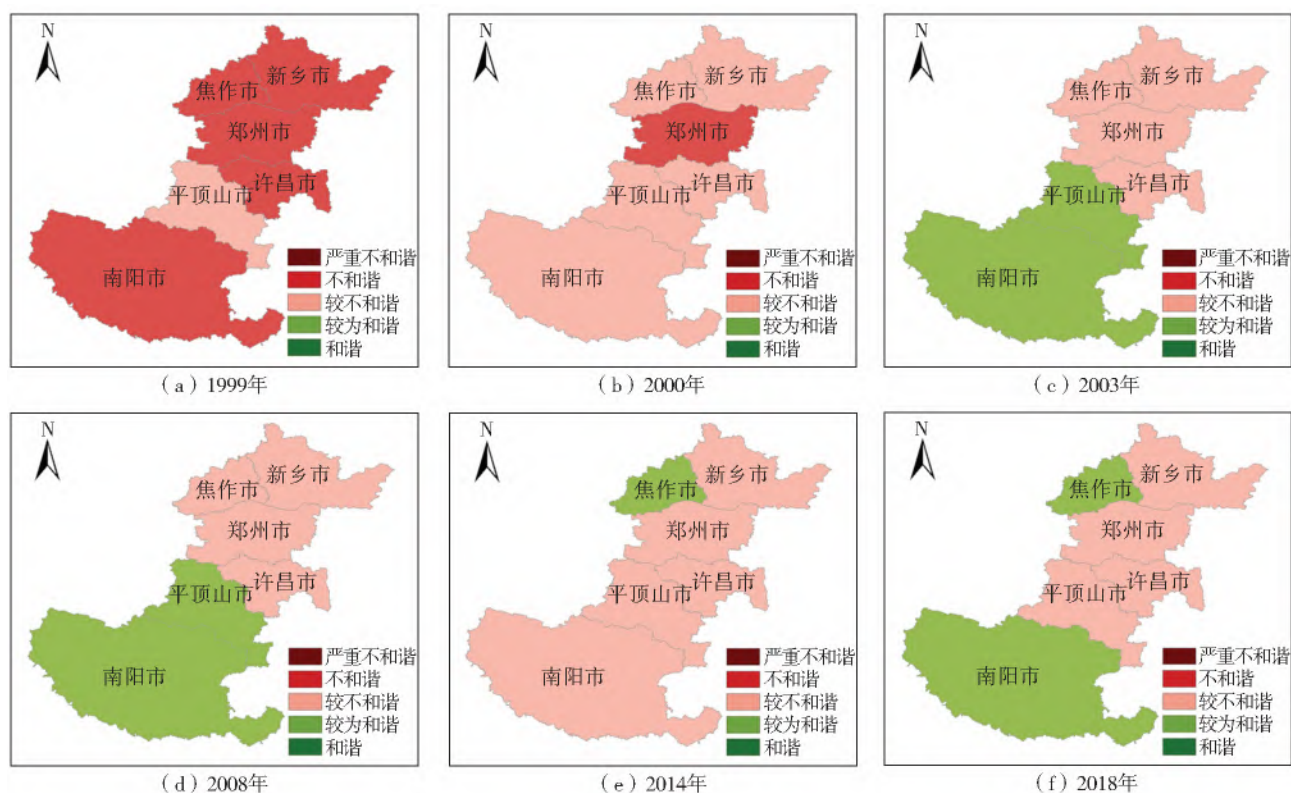


图 3 1999—2018 年 6 个城市和谐发展指数变化情况

Fig. 3 Map of change chart of urban harmonious development index of six cities from 1999 to 2018

发展度评价结果。由表 4 可知,各地发展度稳步提高,其中,离中线工程水源地较近的南阳、许昌发展速度最快。各地发展度稳步提高的主要原因是:南水北调中线工程的实施为河南省带来了生机和很多机遇,促进了河南省经济的快速发展,人均 GDP 增长较快,GDP 增长率也有提高;城镇化率逐年增高,并且单位 GDP 水耗呈现降低趋势,水资源利用效率提高;万元工业产值用水量降低幅度也比较大。

协调度评价结果。由表 5 可知,各地协调度的变化趋势为先增加后减少再增加,呈波动性上升,其中,南阳市协调度最高,其次是平顶山市。经分析可知协调度变化的主要原因是:人口激增,且河南省本就属于缺水省份,河南省人均水资源量呈现逐渐减少趋势;在 2008 年前河南省各市的污水处理系统还不完善,污水处理率不高;后下降阶段河南省 2010 年又遭遇了干旱,导致水资源更少;2014 年往后增加呈上升趋势,2014 年 12 月南水北调中线正式通水,缓解了河南省水资源短缺的压力,同时也促进了经济的发展。

和谐度评价结果。由图 3 可知,各地水资源与经济社会和谐度从时间上基本呈现先增加后减少再增加的现象,总体呈波动性上升趋势。从空间上看,新乡、焦作、许昌、南阳的和谐度变化基本上稳步增

加,南阳由于离中线工程水源地最近,分配的水资源量较大,经济发展没有受到缺水的限制。河南省西部地区河流比较多,治理方面也比较看重,其和谐程度较高。郑州、平顶山市先增后减,是因为地处河南省中部,水资源基础比较差,水资源利用水平低,污水处理设施也不完善,特别是郑州作为国家中心城市,近些年经济社会发展速度迅速,水资源需求量也在急剧增加,造成二者间的和谐度下降。

3.2 促进受水区水资源与经济社会和谐发展的建议

综上所述,南水北调中线工程河南典型受水区水资源与经济社会和谐发展总体呈上升趋势,但总体和谐度不高,且部分地区和谐度不增反降,为了提高水资源利用效率,最大程度发挥工程效益,提出以下建议:

水资源方面。应核算河南省南水北调中线受水区工程水的利用效率,综合考虑南水北调中线来水量、水质波动的复杂不确定条件,针对受水区的实际情况,在省级层面统筹河南省南水北调可用水量,构建信息共用-需水共商-生态共建-风险共担-损益共享的调水水权交易机制,实现工程水资源的优化配置;各受水区需加强对高耗水行业的管理,特别是和谐度较低的地区,如平顶山、许昌、焦作、新乡等地,应注重引进先进用水技术,提升用水效率。

经济社会方面。应改革经济社会发展模式,优

化产业结构,考虑地区实际情况,政策引导增加第三产业所占比重,提高居民收入,尤其针对发展度较低的地区,如平顶山市,因地制宜种植经济、耐旱、高产作物,调整作物种植面积和空间布局,保障粮食安全的同时提升经济效益;各地合理调控地区人口密度,适当加快城镇化进程,营造良好生活环境以满足居民美好生活需求。

生态环境方面。加大污水处理设施投资,提升污水处理能力,严格把控污水排放标准。对水资源相对丰富的地区,充分利用其水体自净能力;控制作物化肥、农药使用量,开发高效利用技术,控制污染传播范围以减少面源污染;提高污水回用率,保障地区生态用水;提高森林覆盖率和建成区绿化覆盖率,维持生态系统可持续性。

4 结 论

本文基于人水和谐量化方法,计算了南水北调中线河南典型受水区 1999—2018 年指定时间点的水资源与经济社会和谐发展度,得到以下结论:

时间维度看,各指标在工程开工年 2003 年出现拐点。其中 1999—2003 年增加是因为此时河南省发展迅速,发展潜力巨大,经济增长快。健康度、发展度、协调度都稳步增加。健康度在 2003—2008 年降低,原因是:一方面,快速发展经济,对环境保护不太重视,导致健康度下降,水资源总量减少,产水系数降低,总体和谐度也降低;另一方面,2007 年的全球金融危机对我国造成了很大影响,河南省在危机中也有很多企业受到牵连,经济发展受到打击。

空间维度看,郑州、新乡、焦作、许昌的和谐度呈现增长,但平顶山市和南阳市的和谐度下降,造成此现象的原因是 2007 年遭遇金融危机,河南省又在 2008 年往后两年遭遇了不同程度的干旱。2010 年后注意到了和谐发展的重要性,开始降低水污染,水资源总量和产水系数有所回升。

和谐度总体呈波动性上升趋势。1999 年大多数受水区的和谐度值都在 0.4 以下,1999—2003 年一直上升,平顶山、南阳两地和谐度值首次超过 0.5。但 2008 年上升趋势不太明显,个别地区还有轻微下降,2008—2018 年又开始稳步上升。其原因是南水北调中线工程在 2014 年通水,在一定程度上缓解了水资源严重短缺的一些问题,比如水资源短缺对经济发展的限制,水污染对环境的限制。此外工程的运行也为河南省带来了不少的机遇,促进了经济的蓬勃发展,但各受水区水资源与经济社会之间和谐程度依然较低。

由于统计资料受限,本研究仅从河南典型受水区水资源与经济社会和谐发展度评价角度,主要反映的是河南配套工程实施前后的效果对比。但南水北调中线工程除配套工程外,还有干渠工程,因此工程效果还需从全国范围进行综合评价,下一步还需对中线上所有受水区及水源地进行研究,探究工程运行的整体供水效果,为实现南水北调后续工程高质量发展提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] BERTALANFFY L V. General system theory: Foundations, development, applications[M]. 17th ed. New York: Georage Braziller, 1969. DOI: 10. 1109/TSMC. 1974. 4309376.
- [2] 方国华,国延恒. 水资源、社会经济与生态环境相互作用关系研究[J]. 水利经济, 2007, 25(3): 4-8. (FANG G H, GUO Y H. Researches on the relationship among water resources, social economy and ecological environment[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2007, 25(3): 4-8. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-9511. 2007. 03. 002.
- [3] 左其亭,赵衡,马军霞,等. 水资源利用与经济社会发展匹配度计算方法及应用[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(6): 1-6. (ZUO Q T, ZHAO H, MA J X, et al. A calculation method and its application on the matching degree of the water resources utilization and socioeconomic development[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2014, 34(6): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2014. 06. 001.
- [4] 张羽威,张昊哲. 新疆经济发展与水资源利用空间关联性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报(社会科学版), 2018, 20(2): 129-134. (ZHANG Y W, ZHANG H Z. Spatial correlation analysis of economic development and water resources utilization in Xinjiang[J]. Journal of Harbin Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2018, 20(2): 129-134. (in Chinese)) DOI: 10. 16822/j. cnki. hitskb. 20180306. 003.
- [5] 张沛. 塔里木河流域社会-生态-水资源系统耦合研究[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2019. (ZHANG P. Research on the coupling system of society, eco-environment and water in Tarim River basin[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019. (in Chinese))
- [6] NAGY R C, LOCKABY B G, KALIN L, et al. Effects of urbanization on stream hydrology and water quality: the Florida Gulf coast [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(13): 2019-2030. DOI: 10. 1002/hyp. 8336.
- [7] 杨莹,叶文,岳卫峰,等. 基于水资源-经济社会-生态系

- 统互馈关系的水资源承载能力评价指标优选[J]. 中国水利, 2020(19):34-36, 43. (YANG Y, YE W, YUE W F, et al. Index optimization of water resources carrying capacity evaluation based on reciprocal relationship among water resources-economic society-ecological environment system[J]. China Water Resources, 2020(19), 34-36, 43. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;SLZG. 0. 2020-19-021.
- [8] 左其亭,张云,林平. 人水和谐评价指标及量化方法研究[J]. 水利学报, 2008, 39(4): 440-447. (ZUO Q T, ZHANG Y, LIN P. Index system and quantification method for human-water harmony[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4): 440-447. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn:0559-9350. 2008. 04. 008.
- [9] 左其亭,赵春霞. 人水和谐的博弈论研究框架及关键问题讨论[J]. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1315-1324. (ZUO Q T, ZHAO C X. Discussion on game theory research framework and key problems of human-water harmony[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(7): 1315-1324. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2009. 07. 019.
- [10] 王梅,唐德善,孟珍珠,等. 基于模糊物元的综合评价模型在区域人水和谐评价中的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2): 160-163, 134. (WANG M, TANG D S, MENG Z Z, et al. Application of comprehensive evaluation model based fuzzy matter-element in evaluation of regional human-water harmony[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(2), 160-163, 134. (in Chinese)) DOI:Journal Article/5b3b797bc095d70f00778288.
- [11] 张金鑫,唐德善,丁亿凡,等. 基于云模型的流域人水和谐评价方法[J]. 水电能源科学, 2015, 33(9): 155-158, 127. (ZHANG J X, TANG D S, DING Y F, et al. River-human harmony evaluation method based on cloud model[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(9): 155-158, 127. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SDNY. 0. 2015-09-039.
- [12] 夏军,黄国和,占车生. 南水北调中线工程对区域经济社会可持续发展影响研究的几个关键问题[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(Z1): 484-489. (XIA J, HUANG G H, ZHAN C S. Some key issues of the impact of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project on regional sustainable development [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2009, 45(Z1): 484-489. (in Chinese)) DOI: http://192. 168. 22. 105/handle/311030/5806.
- [13] 曹文庚,杨会峰,高媛媛,等. 南水北调中线受水区保定平原地下水质量演变预测研究[J]. 水利学报, 2020, 51(8): 924-935. (CAO W G, YANG H F, GAO Y Y, et al. Prediction of groundwater quality evolution in the Baoding Plain of the SNWDP benefited regions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(8): 924-935. 2020, 51(8): 924-935. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20200035.
- [14] 汪林,甘泓,赵世新,等. 南水北调东、中线一期工程对受水区生态环境影响分析[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7(6): 4-7, 53. (WANG L, GAN H, ZHAO S X, et al. Ecological and environmental impact analysis of first phase of South-to-North Water Diversion Project on water-recipient areas [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7(6): 4-7, 53. (In Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-1683. 2009. 06. 002.
- [15] 周姣,史安娜. 南水北调东、中线受水区水资源、经济、生态和谐发展模型[J]. 水利经济, 2007, 25(5): 5-7, 67. (ZHOU J, SHI A N. Sustainable development of water resources, economy and ecology in water intake areas of the East and Middle Routes of South-to-North Water Diversion Project [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2007, 25(5): 5-7, 67. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; SLJJ. 0. 2007-05-001.
- [16] 马骏,郑垂勇. 南水北调东中线受水区水资源与社会经济和谐度评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(11): 36-41. (MA J, ZHENG C Y. Water resources and social-economic harmony degree evaluation of water conservancy area of South-to-North Water Diversion Project [J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(11): 36-41. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-2104. 2010. 11. 007.
- [17] 宋冬凌,马悦. 黄河流域绿色水资源利用率与经济高质量发展耦合研究: 以河南省为例[J]. 生态经济, 2021, 37(5): 14-19, 4. (SONG D L, MA Y. Research on coupling relationship of green water resources utilization rate and high quality development in the Yellow River basin; A case of Henan Province [J]. Ecological Economy, 2021, 37(5): 14-19, 4. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STJJ. 0. 2021-05-006.
- [18] 吴青松,马军霞,左其亭,等. 塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 55-62. (WU Q S, MA J X, ZUO Q T, et al. Quantitative analysis on harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 55-62. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2021. 02. 009.
- [19] 杨胜苏,张利国,喻玲,等. 湖南省社会经济与水资源利用协调发展演化[J]. 经济地理, 2020, 40(11): 86-94. (YANG S S, ZHANG L G, YU L, et al. The coordinated development and evolution of social economy and water resources utilization in Hunan Province [J]. Economic Geography, 2020, 40(11): 86-94. (in Chinese)) DOI: 10. 15957/j. cnki. jldl. 2020. 11. 010.
- [20] 韩雁,贾绍凤,鲁春霞,等. 水资源与社会经济发展要素时空匹配特征: 以张家口为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(6): 1392-1401. (HAN Y, JIA S F, LU C X, et al. Spatiotemporal matching between water resources and social economy: A case study in Zhangjiakou [J]. Journal of Natural Resources, 2020, 35(6): 1392-1401. (in Chinese)) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20200612.

[21] 左其亭,高丹盈. 人水和谐理论与实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006. (ZUO Q T,GAO D Y. Theory

and practice of human-water harmony[M]. Beijing:China Water & Power Press,2006. (in Chinese))

Assessment on operating effect on the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project considering human-water harmony: Case of the typical water receiving areas in Henan Province

LI Hongyan^{1,2}, FU Jingbao^{1,2}, CHU Yu^{1,2}, ZHAI Penghui¹

(1. School of Management Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. Research Center of South-to-North Water Diversion and Ecological Environment of Yellow River Basin, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: Since the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project began to supply water in 2014, it has transferred more than 40 billion cubic meters of water and directly benefited 79 million people. However, how to quantitatively evaluate the specific effect of the project and what level the relationship between water resources and economic and social development in the water receiving areas is closely concerned by the national water project management department, the people in the receiving areas. There is need to understand the optimization of water resource allocation and accurate dispatching of the project.

Water resources were looked at as a key factor affecting economic and social development. The evaluation model of the harmonious development of water resources and economic society in the water receiving area was constructed based on human-water harmony. Six key time nodes in the typical water receiving area in Henan Province such as before the construction of the project (1999, 2000), during the construction period (2003), under construction (2008) and after the water supply of the project (2014, 2018) are selected to conduct a comparative study on the harmony between water resources and economy and society in the water receiving areas.

The harmony degree of typical water receiving areas in Henan Province can be roughly divided into three stages from the time dimension. The first stage was before the construction of the project (1999-2003), the overall degree was below 0.5, the value was low but showed an upward trend. The second stage was after the commencement of the project (2003-2008), the harmony degree in some places reached 0.6, but the overall degree of harmony has not increased significantly. The third stage was after the water supply of the project (2014-2018), the degree of harmony in each receiving area began to rise again, maximum degree reached 0.7. From the spatial dimension, the harmony degree of Nanyang City and Xuchang City, which were closed to the water source area, basically increased steadily, while that of Zhengzhou City and Pingdingshan City increased and then decreased.

In terms of a time dimension, each index showed an inflection point in the year of project commencement 2003. The increase from 1999 to 2003 is due to the rapid development, and potential economic growth of Henan Province. Health, development, and coordination have increased steadily. The health degree decreased from 2003 to 2008. On the one hand, due to the rapid economic development and less attention to environmental protection, the health degree decreased, the total amount of water resources decreased, the water production coefficient decreased, and the overall harmony degree also decreased. From the perspective of spatial dimension, the degree of harmony of Zhengzhou, Xinxiang, Jiaozuo and Xuchang increased, but the degree of harmony of Pingdingshan and Nanyang decreased. The financial crisis in 2007 and drought in different degrees may be the reason behind this decrease. After 2010, the importance of harmonious development started to develop and began to reduce water pollution and the total amount of water resources and water production coefficient rebounded. The degree of harmony generally showed fluctuated upward trend. In 1999, the degree of harmony in most water receiving areas was very low and basically in an inharmonious state. It has been rising from 1999 to 2003, the harmony degree of Pingdingshan and Nanyang reached 0.5 for the first time. However, the upward trend in 2008 was not obvious, and there was a slight decline in some regions. It began to rise steadily from 2008 to 2018. The reason is that the water supply of the Middle Route of South-to-North Water Diversion Project in 2014 has alleviated some problems of serious shortage of water resources to a certain extent, such as the restrictions of water shortage on economic development and water pollution on the environment. Moreover, the operation of the project has also brought many opportunities for Henan Province and promoted the vigorous development of the economy, but the degree of harmony between water resources and economy and society is still low. It is suggested that the available water quantity of South-to-North Water Diversion Project in Henan Province should be coordinated at the provincial level, the water right trading mechanism should be established, the management of high water consumption industries should be strengthened, and the utilization efficiency of water resources should be improved.

Key words: South-to-North Water Diversion Project; human-water harmony; harmony development; harmony evaluation; typical water receiving area in Henan Province