

朱伟, 付柯锦, 李红艳, 等. 南水北调中线水源地水生态与经济发展系统适配性: 以南阳市为例[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1063-1070. ZHU W, FU K J, LI H Y, et al. Adaptability of economy and water system in Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project water source area: Taking Nanyang City as an example[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1063-1070. (in Chinese)

# 南水北调中线水源地水生态与经济发展系统适配性

——以南阳市为例

朱伟<sup>1</sup>, 付柯锦<sup>2</sup>, 李红艳<sup>3</sup>, 付景保<sup>3</sup>, 张康<sup>1</sup>

(1. 河南工程学院管理工程学院, 郑州 451191; 2. 墨尔本大学文学院, 墨尔本 3000, 澳大利亚;  
3. 河南工程学院南水北调与黄河流域生态环境研究中心, 郑州 451191)

**摘要:**以南水北调中线水源地南阳市6个县(市、区)为研究对象,探讨水生态与经济发展之间的适配性。从经济规模、经济结构、经济活力、经济潜力、经济响应、水生态状况、水生态压力及水生态响应8个维度出发,构建基于压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)模型的系统适配性评估指标体系。采用坎雷赋权法分配指标权重,测算2012—2022年南阳市6个县(市、区)的系统适配度,并深入分析其时空差异及变化趋势。发现南阳市6个县(市、区)在研究期间内系统适配度整体上升,表明该区域在水生态保护和经济发展方面取得了积极进展;6个县(市、区)间系统适配性的变化表现出较强的趋同性,这一现象与6个县(市、区)以农业为主要支柱产业的实际密切相关;随着南水北调中线一期工程通水,南阳市6个县(市、区)的系统适配度显著提高,工程通水不仅明显改善该区域的水资源状况,还对当地的生态环境保护、农工业发展及经济结构优化产生了积极影响。揭示了南阳市6个县(市、区)在水生态保护与经济可持续发展方面的互动关系,为制定区域发展战略和水资源管理政策提供了科学依据;强调了在大型水利工程项目带动下,区域发展要综合考虑生态保护与经济发展的协调,以实现真正的可持续发展。

**关键词:**南水北调中线工程;水生态;经济发展;系统适配性;坎雷赋权法;南阳市  
**中图分类号:**X171.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0105

南水北调中线一期工程自南阳陶岔渠首向京津冀豫等省市调水,明显地改善了我国水资源南北不均的状况,工程自2014年12月通水以来,已惠及沿线24座大中城市及200多个县(市、区)。受水区,城市居民的生活用水保障率显著提升,从原来的不足75%增长到超过95%,同时,工业用水保障率达到了90%以上,水质持续稳定达到或优于地表水环境质量Ⅱ类标准。南水北调中线工程已成为“润民心、慰民意”的“供水生命线”<sup>[1]</sup>,在改善沿线居民生产生活用水状况、推进沿线生态文明建设方面发挥了重要作用。

作为国家重点生态功能区,南水北调中线工程水源地担负着水生态保护及水资源涵养的重要功能。在生态文明和绿色发展的背景下,为确保一渠清水永续北送,构建水源地水生态保护与经济发展的适配模型及测算适配度指标具有重要意义。模型不仅能促进水源地经济的有序协调发展,实现产业结构的转型和升级,还能有效控制点源和面源污染,推动水生态保护的可持续发展。结果将有助于解决水源地在水生态保护与经济发展之间的矛盾,实现二者的协调发展。

适配性主要指不同主体间的协调一致性,被广

收稿日期:2024-03-24 修回日期:2024-10-08 网络出版时间:2024-10-11

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/13.1430.tv.20241010.1623.006

基金项目:国家自然科学基金项目(42377490;42077449);科技部和教育部高等学校学科创新引智计划项目(D23015);河南省重大科技专项项目(221100320200);教育部人文社会科学项目(19YJC630075);河南省哲学社会科学规划项目(2021BWX009;2022BJJ035);河南省高校人文社会科学一般项目(2021-ZZJH-068)

作者简介:朱伟(1970—),男,江苏徐州人,副教授,主要从事水资源管理研究。E-mail:314560255@qq.com

通信作者:付景保(1966—),男,河南南阳人,教授,主要从事区域生态环境保护与可持续发展研究。E-mail:fujingbao@126.com

泛应用于分析复合系统中不同主体间的适应、协调和匹配关系,涵盖结构规模适配、供需偏好适配以及承载适配等多个方面<sup>[2]</sup>。最初,适配性概念主要用于研究不同生物种群的环境适应性及其进化路径<sup>[3]</sup>。它通过分析复杂的系统关系,为系统间的适应性、协调性和匹配性等特征提供了一种客观的评估方法,且通常以耦合协调效应作为研究的出发点<sup>[4]</sup>。在早期,生物种群间及生物群落与非生物环境间的供需适配关系是西方学者<sup>[5-6]</sup>关注的重点。随后,适配性研究跨越系统生态学<sup>[7]</sup>、工业生态学<sup>[8]</sup>、经济学<sup>[9]</sup>和社会学<sup>[10]</sup>等多个领域,强调了生物、社会和工业系统之间的协调性和可持续性。到 20 世纪末,适配性研究聚焦于生态系统的复杂性和动态性,共生<sup>[11-12]</sup>和耦合<sup>[13-15]</sup>的理念促进了适配性研究<sup>[16-18]</sup>的深化。与此同时,中国学者针对适配性问题,结合国内实际情况,在农业科技<sup>[19]</sup>、工程技术<sup>[20]</sup>、规划方法<sup>[21]</sup>等领域进行了深入研究,并在经济社会<sup>[22]</sup>、人才培养方式<sup>[23]</sup>、国家战略<sup>[24]</sup>等方面展开了广泛讨论。另外,有许多研究<sup>[1,25]</sup>聚焦于适配模型与南水北调工程之间的关联性问题的。

鉴于南水北调中线水源地水生态与经济发展系统的适配性是研究水源地生态经济可持续发展的关键,以南阳市为例,从生态学适配性视角,对南水

北调中线水源地的水生态与经济发展适配性进行定量分析,旨在为优化产业结构和加强水生态保护提供决策支持。

## 1 理论基础

适配理论强调系统要素间通过协调和匹配达到稳定生存与发展的状态,其本质在于实现系统要素间的高水平匹配,从而最优化系统效力。从系统论角度,水生态与经济发展系统适配过程符合 Rapport 等<sup>[26]</sup>提出的压力-状态-响应(pressure-state-response, PSR)模型。在区域“水生态-经济发展”系统中,由于经济系统中的经济规模、经济结构等因素变化,给水生态系统造成压力,污染甚至损坏了水生态,改变了水生态系统状态,表现为水生态系统中的水生态状况、水生态效应等因素发生相应的变化。同样,水生态系统状态变化会反馈给经济发展系统,对经济发展系统形成压力,引起社会做出改善经济发展系统的响应,表现为经济发展系统要优化对水资源的需求和配置、提高水资源的利用效率、加强对水生态的保护等,从而使经济发展系统状态得以优化。水生态与经济发展系统适配机理见图 1。

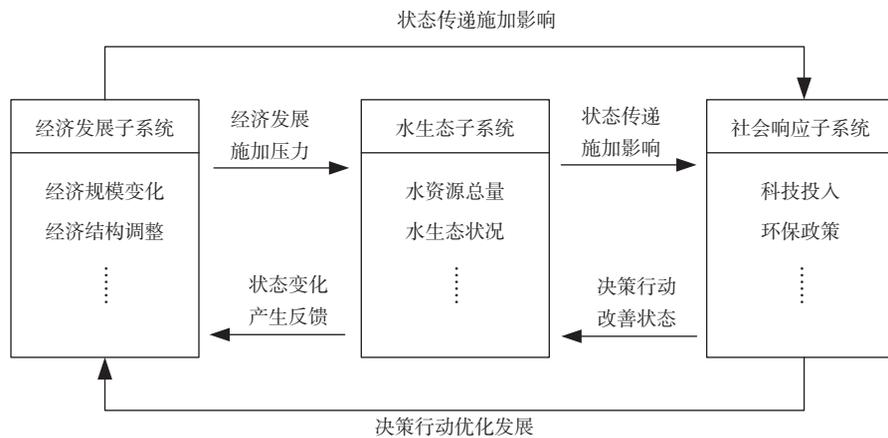


图 1 水生态与经济发展系统适配机理

Fig. 1 Adaptation mechanism of water ecology and economic system

## 2 研究方法

### 2.1 构建评价初始矩阵

为消除量纲对指标产生的影响,对样本数据进行归一化处理。正向指标归一化公式为

$$X_{ij} = \left( x_{ij} - \min_{1 \leq i \leq m} (x_{ij}) \right) / \left( \max_{1 \leq i \leq m} (x_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m} (x_{ij}) \right) \quad (1)$$

逆向指标归一化公式为

$$X_{ij} = \left( \max_{1 \leq i \leq m} (x_{ij}) - x_{ij} \right) / \left( \max_{1 \leq i \leq m} (x_{ij}) - \min_{1 \leq i \leq m} (x_{ij}) \right) \quad (2)$$

形成初始评价矩阵  $X = (X_{ij})_{m \times n}$ 。式中:  $x_{ij}$  为样本数据;  $X_{ij}$  为同度化后的指标值;  $i$  表示测评对象;  $j$  表示测评指标;  $m$  表示测评对象个数;  $n$  表示测评指标个数。

### 2.2 赋权评价指标

坎蒂雷赋权法是一种客观赋权法,广泛应用于综合评价系统。该方法将矩阵  $R \times S$  最大特征值对

应的特征向量归一化结果赋权给相应指标<sup>[27]</sup>。由于综合了信息含量赋权及相关性赋权的特点,该方法弥补了熵权法考虑数据相关性不足和因子分析法忽视数据信息量的缺陷。权重大小与指标和评价目标的相关性及信息含量有关,相关性越大、信息含量越大,权重越大。赋权过程<sup>[28]</sup>为

根据式(3),构建相关系数矩阵  $R$ :

$$r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_j)(X_{ik} - \bar{X}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (X_{ij} - \bar{X}_j)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m (X_{ik} - \bar{X}_k)^2}} \quad (3)$$

式中:  $\bar{X}_j$ 、 $\bar{X}_k$ 为标准化指标  $j$ 、 $k$ 的均值;  $r_{jk}$ 为指标  $j$ 和  $k$ 的相关系数。将相关系数填入矩阵对应位置,形成相关系数矩阵  $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

根据式(4),构建指标  $j$ 的标准差矩阵  $S$ :

$$s_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{X}_j)^2 / m} \quad (4)$$

式中:  $s_j$ 为指标  $j$ 的标准差。将  $s_j$ 填入矩阵对角线的相应位置,形成标准差矩阵  $S = (s_j)_{n \times n}$ 。

求解矩阵  $R \times S$ 的最大特征值  $\lambda$ 对应的特征向量  $p$ 。设  $p = (p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_n)$ ,对  $p$ 进行归一化处理得到  $p = (p_1^*, p_2^*, \dots, p_j^*, \dots, p_n^*)$ 。指标  $j$ 的权重为

$$\omega_j = |p_j^*| = \left| p_j^2 / \sqrt{\sum_{j=1}^n p_j^2} \right| \quad (5)$$

### 2.3 系统适配性计算

构建基于 TOPSIS 的水生态与经济发展系统适配性评价模型<sup>[28]</sup>。设  $X_\alpha = (1, 1, \dots, 1)$ 为评价系统“正理想解”, $X_\beta = (0, 0, \dots, 0)$ 为评价系统“负理想解”。 $X_i$ 与“正理想解”的距离为

$$d(X_i, X_\alpha) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j^2 (X_{ij} - X_{\alpha,j})^2} \quad (6)$$

$X_i$ 与“负理想解”的距离为

$$d(X_i, X_\beta) = \sqrt{\sum_{j=1}^n \omega_j^2 (X_{ij} - X_{\beta,j})^2} \quad (7)$$

系统适配度为

$$F = 1 / (1 + (d(X_i, X_\alpha) / d(X_i, X_\beta))^2) \quad (8)$$

式中:  $0 \leq F \leq 1$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ ,且  $F$ 值越大,系统适配度越高。

## 3 实证分析

### 3.1 南阳市概况

南阳市位于河南省的西南部,是豫、鄂、陕3个省的交汇点,为东西北3面环山的盆地,具有典型的大陆性半湿润季风气候特征。区域内有10条超过百公里的河流,分别汇入长江、淮河和黄河三大流域,其可开采水资源量达到8.58亿  $m^3$ ,总水资源量约为70.35亿  $m^3$ ,无论是人均水量、亩均水量和水储量,均居河南省首位。2022年,南阳市地表水资源量为290466万  $m^3$ ,地下水资源量为157915万  $m^3$ ,扣除地表水和地下水之间的重复量86071万  $m^3$ ,水资源总量为362310万  $m^3$ ,产水模数13.7万  $m^3/km^2$ ,产水系数0.22。相比2021年,南阳市各行政分区水资源总量均有下降。其中:桐柏县下降最少,为29.5%;南召县下降最多,为87.5%。与多年均值比较:社旗县下降最少,为17.0%;南召县下降最多,为73.1%。水资源利用率宛城区最高,为76.3%;淅川县最低,仅为27.4%。以上数据均表明南阳市面临着不利的水资源条件。作为南水北调中线的水源地及渠首所在地,南阳市市内工程总干渠贯穿淅川等6个县市区,覆盖26个乡镇,全长185.3 km。

### 3.2 数据来源与指标体系

研究数据主要源于2012—2022年《南阳市国民经济与社会发展统计公报》、2012—2022年《南阳统计年鉴》、2012—2022年《河南省环境状况公报》和2012—2022年《河南省统计年鉴》等资料,缺失数据采取牛顿插值法赋值补齐<sup>[29]</sup>。

遵循数据的可获得性、系统关联性和指标典型性等原则,并考虑横纵向指标间的可比性及匹配性,本文从经济规模、经济结构、经济活力、经济潜力、经济响应、水生态保护要求、水生态保护压力及水生态保护响应8个维度出发,遴选35个单项指标,构建水生态保护与经济发展系统适配度评价体系,见表1。其中,万元GDP的废水排放量、万元GDP的固体废物量、人口密度为逆向指标。

### 3.3 水生态与经济发展系统适配度评价

利用坎蒂雷算法为水生态和经济发展系统适配性评价指标赋权,见表1。根据公式(8)评估南阳市域淅川等6个县市区的系统适配度,涉及对这些区域在水生态保护及经济社会发展等方面的综合考量,结果见表2。

表 1 水生态与经济系统评价指标体系及其权重

Tab. 1 Evaluation index system and its weight of water ecology and economic system

一级指标	二级指标	三级指标	权重
经济系统	经济规模	GDP	0.080 5
		固定资产投资	0.090 6
		财政收入	0.075 5
		社会消费品零售额	0.077 5
	经济结构	第二产业占GDP比重	0.060 4
		第三产业占GDP比重	0.060 4
		就业人数比重	0.041 3
	经济活力	研发投入占GDP比重	0.042 3
		基本建设投资总额	0.030 2
		科技教育占GDP比重	0.040 3
	经济潜力	GDP增长率	0.050 4
		固定资产投资增长率	0.055 4
		第三产业产值增长率	0.070 5
		城市化率	0.038 3
		科技人员总数	0.037 3
经济响应	万人在校大学生数	0.043 3	
	全员劳动生产率	0.055 4	
水生态系统	水质指标	工业增加值率	0.050 4
		水质指标	0.063 3
	水生态状况	水生物多样性	0.059 1
		水资源总量	0.084 3
		地下水埋深	0.053 9
		人均水资源量	0.077 5
		农业、城镇及工业用水保证率	0.075 9
	水生态压力	水生态保护政策	0.075 6
		万元GDP耗水量	0.059 1
		万元GDP废水排放量	0.056 6
		万元GDP固体废物量	0.054 9
		人口密度	0.050 7
	水生态效应	水生态保护投资占GDP比重	0.042 3
		森林覆盖率	0.048 2
		固体废物综合利用率	0.042 3
农业废水、污水处理率		0.044 0	
工业废水排放达标率		0.052 1	
水资源开发利用率	0.060 2		

为验证计算结果的合理性,本文另外采用了基于 AHP-熵值法组合赋权的 TOPSIS 法评价南阳市 6 个县(市、区)水生态与经济发展系统适配度<sup>[30]</sup>,计算结果几近相同。

根据表 2,分别得到系统适配度折线图和堆积折线图,见图 2 和图 3。

表 2 2012—2022 年南阳市 6 个县(市、区)系统适配值

Tab. 2 Adaptation value of six counties and districts in Nanyang City from 2012 to 2022

年份	系统适配度					
	淅川	邓州	镇平	宛城	卧龙	方城
2012	0.368	0.403	0.335	0.387	0.383	0.388
2013	0.401	0.408	0.401	0.388	0.404	0.391
2014	0.396	0.405	0.398	0.403	0.416	0.413
2015	0.641	0.614	0.604	0.638	0.627	0.637
2016	0.637	0.631	0.635	0.622	0.638	0.635
2017	0.630	0.643	0.628	0.632	0.623	0.629
2018	0.650	0.635	0.619	0.613	0.643	0.649
2019	0.644	0.650	0.652	0.641	0.664	0.653
2020	0.677	0.664	0.672	0.661	0.682	0.664
2021	0.707	0.678	0.688	0.682	0.689	0.676
2022	0.735	0.696	0.690	0.707	0.699	0.672

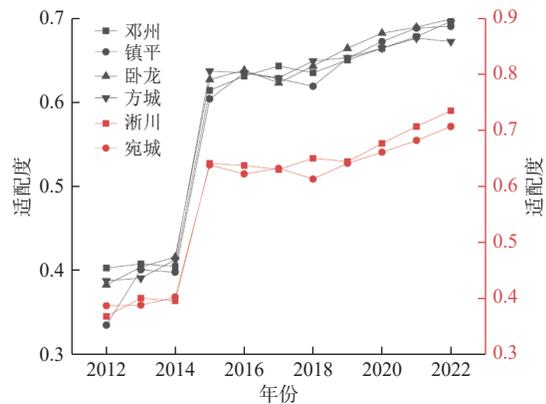


图 2 2012—2022 年南阳市 6 个县(市、区)系统适配度变化

Fig. 2 Adaptability changes in six counties and districts of Nanyang City from 2012 to 2022

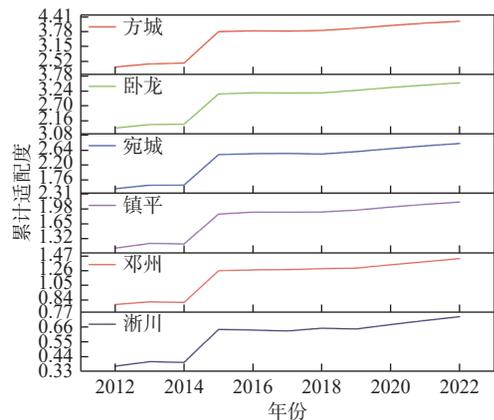


图 3 2012—2022 年南阳市 6 个县(市、区)系统累计适配度变化

Fig. 3 Accumulated adaptability changes in six counties and districts of Nanyang City from 2012 to 2022

### 3.4 结果分析

据表2与图2、图3可知,2012—2022年南阳市6个县(市、区)水生态与经济发展系统适配度变化表现出如下特点:

2012—2022年6个县(市、区)系统适配度水平有一定的起伏,但总体呈现上升的变化趋势。2012—2014年和2016—2022年两时期均表现为上升趋势,但增幅不大;相比2014年,2015年系统适配度水平跃升,增幅达50%以上,增幅率为整个研究期内最高。南水北调中线一期工程自2014年12月通水后,不仅改善了南阳市6个县(市、区)的水资源状况,而且对当地的生态环境、工农业发展和经济结构优化等方面都产生了积极的推动作用,从而提升了整个系统的适配度和综合效益。

系统适配性变化具有较明显的空间趋同性,表

现为它们具有相近的变化趋势,这与6个县市趋同的经济结构强相关。具体来说,农业是南阳市的主要支柱产业,农业生产总值占GDP的比重较大。农业属于高耗水行业,水资源约束对经济社会系统运行影响较大。随着南水北调工程的实施,加之国家不断加大对生态功能区的保护力度,南阳市森林面积大幅增加,森林覆盖率不断攀升。综合利用农业节水、产业调整升级、工艺改善优化等措施,南阳市逐步提高资源配置与利用效益,降低单位经济产出的资源耗用,并减少相应的污染物排放,从而缓解水资源压力、降低环境污染,推进循环经济和生态建设,进而提升水生态和经济发展系统适配度<sup>[31-32]</sup>。

图4反映了2012—2022年南阳市6个县(市、区)系统适配性的统计变化状况。

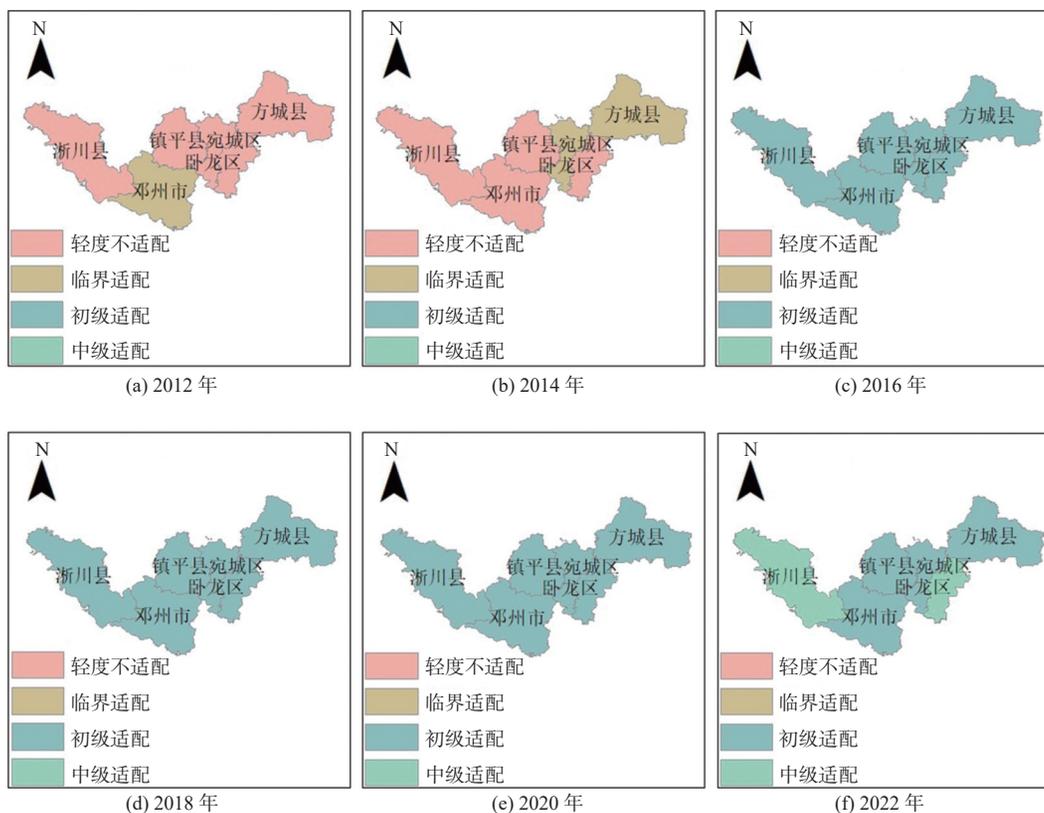


图4 2012—2022年南阳市6个县(市、区)系统适配性统计

Fig. 4 Adaptability statistical description for six counties and districts of Nanyang City from 2012 to 2022

2012年南阳市6个县(市、区)中,浙川县、镇平县、方城县、宛城区和卧龙区的水生态和经济发展系统处于轻度不匹配状态,邓州市处于临界适配状态。这是因为浙川县、镇平县和方城县等地区因为农业灌溉和工业用水需求高,水资源供需矛盾突出,这种过度的水资源利用对水生态系统造成了较大压力,而邓州市因为经济结构的逐步优化减少了

对水资源的压力,但这种改变尚未达到彻底缓解生态压力的程度。

2014年南阳市6个县(市、区)的系统适配度有一定变化。其中,方城县和宛城区的系统适配度由轻度不匹配状态上升至临界适配状态,而邓州市则由临界适配状态下滑至轻度不匹配状态,其他区域没有变化。方城县和宛城区的适配度改善至临界

适配状态是由于这些区域加强了水资源管理、改进了工业和生活污水处理设施,同时逐步将经济结构调整向更少水资源依赖的行业。相对地,由于水资源管理和环境保护措施未能与经济发展速度同步提升,邓州市的适配度反弹回轻度不匹配状态。淅川县、卧龙区和镇平县的系统适配度未见变化,可能是它们未实施有效的政策或措施来改善其水生态与经济系统的适配状态。

2016—2020 年 6 个县(市、区)的适配度发生了较为显著的变化。其中,方城县和宛城区的系统适配度由临界适配提升至初级适配状态,淅川县、卧龙区、镇平县和邓州市的适配度由轻度不匹配越过临界适配状态直接跃升至初级适配状态。南水北调中线工程通水,改善了这些地区的水资源供应状况,缓解之前存在的水资源短缺问题。方城县和宛城区的适配度由临界适配改善至初级适配状态,而淅川县、卧龙区、镇平县和邓州市的适配度则从轻度不匹配直接跃升至初级适配状态。这一跃升主要得益于南水北调工程带来的稳定水源,使得这些地区能够有效实施水资源管理和环境保护措施,促进了经济的可持续发展与环境的改善。

2022 年邓州市、镇平县、方城县和宛城区的适配度依然保持了初级适配状态,而淅川县和卧龙区则实现了系统适配度由初级适配到中级适配的提升。通过实施更有效的水污染控制技术、加强生态恢复项目、推广可持续农业和工业实践,淅川县和卧龙区在经济发展与生态保护之间找到了更好的平衡。此外,地方政府加大了对环境法规的执行力度,并提高了公众对水资源保护的意识,这些综合措施促进了系统适配度从初级提升到中级。与此同时,邓州市、镇平县、方城县和宛城区虽然维持了初级适配状态,但也表明这些地区已建立了一定的水资源管理和环境保护机制。

借助南水北调中线工程的发展契机,南阳市 6 个县(市、区)均以提高城镇化水平、加大研发经费投入、减少污染物排放及严格水污染控制等措施为发力点,对资源开发利用愈加强调节约、效益、环境及生态保护,从技术和管理角度,提高资源的转化利用率,强化水生态和经济系统间的耦合协调,提升二者的适配性。

### 3.5 南阳市水生态与经济发展系统适配性改善建议

南水北调中线工程通水以来,南阳市水生态与

经济发展系统适配性有了显著改善,但仍存在较大的提升空间。为此,提出以下改善建议。

提升农业用水利用效率。作为农业大市,积极推广滴灌和喷灌技术是提升农业用水利用效率的重要措施。同时,利用当地丰富的农业资源,南阳市可以积极发展具有地方特色的节水型和高附加值农产品。通过这些措施,不仅可以优化农业产业结构,还能提升农产品的市场竞争力和经济效益。

促进产业结构优化升级。针对南阳市工业以资源型和重工业为主的特点,推动工业向清洁生产和循环经济转型,鼓励发展低耗水、高技术含量的产业,如电子信息、生物医药等,减少对水资源的依赖。同时,利用南阳市丰富的自然景观和历史文化资源,发展生态旅游和文化旅游,打造特色旅游品牌。

加强水生态保护和水资源循环利用。加大对丹江口水库等重要水源地的保护力度,实施水源地生态修复和保护项目,严格控制水源地周边工业和农业活动,减少污染。同时,建立区域水资源循环利用体系,在工业和农业领域推广水资源循环利用技术,如工业废水处理回用、农业灌溉尾水回收等,提高水资源的利用效率。

增强区域协同发展和科技创新能力。针对南阳市 6 个县(市、区)的地理位置和资源特点,建立区域合作机制,协调各区域的产业发展和生态保护。同时加大对科技创新的投入,建立技术研发中心,培养适应南阳市产业发展需要的人才。

政府引领,多方协作,共促生态与水资源可持续。南阳市政府应制定并推行一系列产业政策,以激励资本向节水和生态保护领域倾斜。通过税收优惠和财政补贴等激励措施,鼓励企业和个人积极参与水资源保护与水生态建设项目。同时,强化社区的参与度,通过教育和宣传活动提升居民的环保意识,促进公众对水资源保护和水生态建设的认识。

## 4 结论

本研究以南阳市 6 个县(市、区)为研究对象,探讨南水北调中线工程对水生态与经济发展系统适配性的影响。结论如下:

南水北调中线一期工程通水显著提升了南阳市 6 个县(市、区)的水资源供应能力,改善了水生态环境,并促进了产业结构的优化升级,为经济的持续健康发展提供了支撑。同时,通水后水生态与经济系统的适配性得到了提升,实现了水资源的可

持续利用和水生态环境的保护。

研究期内,南阳市6个县(市、区)水生态与经济发展系统适配性表现出趋同性。南水北调中线工程通水后,6个县(市、区)的适配度均出现了显著提升,其中方城县和宛城区由临界适配提升至初级适配,而淅川县、卧龙区、镇平县和邓州市则直接从轻度不适配跃升至初级适配状态。

尽管南阳市6个县(市、区)在水生态与经济发展系统适配性上表现出一定的趋同性,但不同区域的经济基础、产业结构、发展理念及水资源禀赋的差异,导致适配度提升路径存在差异。

下一步研究将应用时间序列分析和GIS技术,探究水生态与经济发展系统适配性的时空演变,识别影响适配性的关键因素及其在不同时间和空间尺度上变化的规律性。

#### 参考文献:

- [1] 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. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0011.
- [2] 高佳斌.大数据背景下的城市承载适配性评价研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [3] 王宏亮,吴健生,高艺宁,等.城市公共资源与人口分布的空间适配性分析:以深圳市为例[J].*北京大学学报(自然科学版)*,2021,57(6):1143-1152. DOI: 10.13209/j.0479-8023.2021.088.
- [4] 李涛,崔磊波,李继园,等.黄河流域县域交通供给格局及其空间适配性[J].*地理科学进展*,2022,41(11):2030-2043. DOI: 10.18306/dlkxjz.2022.11.004.
- [5] JOHNSON B. Abiotic. ecosystems? A critical examination of Arthur Tinsley's ecosystem definition[J].*Environmental Ethics*,2020,42(1):39-53. DOI: 10.5840/enviroethics20204215.
- [6] DAKOS V, MATTHEWS B, HENDRY A P, et al. Ecosystem tipping points in an evolving world[J].*Nature Ecology & Evolution*,2019,3(3):355-362. DOI: 10.1038/s41559-019-0797-2.
- [7] SIEGENFELD A F, BAR-YAM Y. An introduction to complex systems science and its applications[J].*Complexity*,2020,2020(1):6105872.
- [8] SINGH J, ASHFAQ M, SKINNER C B, et al. Author correction: Enhanced risk of concurrent regional droughts with increased ENSO variability and warming[J].*Nature Climate Change*,2022,12(4):408-408. DOI: 10.1038/s41558-022-01340-6.
- [9] JAYACHANDRAN S. How economic development influences the environment[J].*NBER Working Papers*,2022,14(8):229-252.
- [10] 陈义忠,乔友凤,郝灿,等.长江中游城市群生态足迹指标与社会经济发展的适配性[J].*资源科学*,2022,44(10):2137-2152. DOI: 10.18402/resci.2022.10.15.
- [11] 王嵩,孙才志,范斐.基于共生理论的中国沿海省市海洋经济生态协调模式研究[J].*地理科学*,2018,38(3):342-350. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.03.003.
- [12] 王绍博,罗小龙,唐蜜,等.基于共生理论的临京临沪地区跨界融合发展对比研究[J].*地理科学*,2019,39(11):1681-1690. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2019.11.001.
- [13] 马恩朴,蔡建明,韩燕,等.人地系统远程耦合的研究进展与展望[J].*地理科学进展*,2020,39(2):310-326. DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.02.012.
- [14] 宫清华,张虹鸥,叶玉瑶,等.人地系统耦合框架下国土空间生态修复规划策略:以粤港澳大湾区为例[J].*地理研究*,2020,39(9):2176-2188. DOI: 10.11821/dlyj020200413.
- [15] 杜霞,孟彦如,方创琳,等.山东半岛城市群城镇化与生态环境耦合协调发展的时空格局[J].*生态学报*,2020,40(16):5546-5559. DOI: 10.5846/stxb201908201740.
- [16] 张玲玲,陆森,张蕊,等.经济发展与环境规制双重作用下长江经济带水污染治理研究[J].*水利水电技术(中英文)*,2022,53(5):128-136. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2022.05.014.
- [17] ALLEN C, METTERNICHT G, WIEDMANN T. Initial progress in implementing the sustainable development goals (SDGs): A review of evidence from countries[J].*Sustainability Science*,2018,13(5):1453-1467. DOI: 10.1007/s11625-018-0572-3.
- [18] MCGOWAN P J K, STEWART G B, LONG G, et al. An imperfect vision of indivisibility in the sustainable development goals[J].*Nature Sustainability*,2019,2(1):43-45. DOI: 10.1038/s41893-018-0190-1.
- [19] 支彦玲,陈军飞,王慧敏,等.共生视角下中国区域“水-能源-粮食”复合系统适配性评估[J].*中国人口.资源与环境*,2020,30(1):129-139. DOI: 10.12062/cpre.20190502.
- [20] 吴雪薇,秦承志,朱阿兴.数字地形分析应用适配性知识的案例表达与推理方法[J].*地理科学进展*,2016,35(1):89-97. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.01.010.
- [21] 张辉,苏晓静,张聪,等.基于适配性评价的合成孔径雷达景象匹配航迹规划方法研究[J].*测试技术学报*,2018,32(1):60-64. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7449.2018.01.012.
- [22] 熊珍琴,范雅萌.我国房价与经济成长的适配性分析[J].*统计与决策*,2018,34(17):129-132. DOI: 10.13546/j.cnki.tjyj.2018.17.032.
- [23] 王秀梅,黄春晓,蒋宇阳.大城市人才保障房居住空间与人才需求偏好的适配性分析:以南京市为例[J].*现代城市研究*,2020(5):46-53. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6000.2020.05.007.
- [24] 王是业.中国基建模式对“一带一路”国家的适配性研究[J].*国际经济合作*,2019(1):110-117.
- [25] 刘欢,甘永德,杨钦,等.基于水网视角的水与关联

- 要素适配性评价 [J/OL]. 水资源保护, 1-12. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1356.tv.20240304.1329.002.html>.
- [26] RAPPORT D J, FRIEND A M. Towards a comprehensive framework for environmental statistics: A stress-response approach[M]. Ottawa: Statistics Canada, 1979.
- [27] 马辉. 综合评价系统中的客观赋权方法 [J]. 合作经济与科技, 2009(17): 50-51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-190X.2009.17.028.
- [28] 周颖, 张舒明. 基于不变权重约束的综合评价模型 [J]. 管理科学学报, 2017, 20(10): 70-91. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9807.2017.10.006.
- [29] 黄亚, 周建旭. 水泵全特性曲线的预测及对数值分析的影 响 [J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(8): 777-783. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.20.0225.
- [30] 赵宾华, 黄金华, 李占斌, 等. 基于 AHP-熵值法组合赋权的甘肃省城市生态用水安全综合评价及影响因素分析 [J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 167-173. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.020.
- [31] 王靖. 南阳市“十三五”林业生态建设成果丰硕 绿水青山铸辉煌 金山银山著华章 [EB/OL]. [2024-08-31]. <https://www.henan.gov.cn/2021/04-27/2135080.html>.
- [32] 魏飞, 李玮琦. 推进南水北调中线工程高质量发展的“渠首”担当 [EB/OL]. [2024-08-31]. [http://paper.people.com.cn/rmlt/html/2023-11/20/content\\_26032929.htm](http://paper.people.com.cn/rmlt/html/2023-11/20/content_26032929.htm).

## Adaptability of economy and water system in Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project water source area: Taking Nanyang City as an example

ZHU Wei<sup>1</sup>, FU Kejin<sup>2</sup>, LI Hongyan<sup>3</sup>, FU Jingbao<sup>3</sup>, ZHANG Kang<sup>1</sup>

(1. Department of Management Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. Faculty of Arts, University of Melbourne, Melbourne 3000, Australia; 3. Research Center for South-To-North Water Diversion and The Ecological Environment of the Yellow River Basin, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China )

**Abstract:** The research focused on six counties and districts in Nanyang City, which is a vital part of the water source area for the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project. The study aimed to explore the adaptability between water ecology and economic development. The study aimed to assess the progress made in the region regarding the protection of water ecology and economic advancement.

An evaluation index system for system adaptability was constructed based on the Pressure-State-Response (PSR) model using economic scale, economic structure, economic vitality, economic potential, economic response, water ecological status, water ecological pressure, and water ecological response. The Kaley weighting method was applied to distribute weights to various indicators. The system adaptability of the six counties and districts in Nanyang City from 2012 to 2022 was calculated, and an in-depth analysis of their spatiotemporal differences and changing trends was conducted.

The study's findings were as follows: (1) The overall system adaptability of the six counties and districts in Nanyang City showed an upward trend during the research period, indicating positive progress in the region's water ecological conservation and economic development. (2) The changes in system adaptability among the counties exhibited strong convergence, closely related to agriculture being the primary pillar industry in these areas. (3) With the launch of the Middle Route Project for water transfer, the adaptability of the six counties and districts in Nanyang City has considerably improved. This advancement has not only enhanced water resource conditions but has also positively influenced the local ecological environment, agricultural and industrial development, and the optimization of the economic structure.

The study revealed the interactive relationship between water ecological protection and sustainable economic development in the study area. It provided a scientific basis for formulating regional development strategies and water resource management policies. The research emphasized that regional development under the influence of large-scale hydraulic projects should consider the coordination between ecological conservation and economic growth to achieve proper sustainable development.

**Key words:** Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project; water ecology; economic development; system adaptability; Kaley weighting method; Nanyang City