

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20222176

# 基于 DPSIR 模型和熵权模糊综合评价的 郑州市水循环健康状态预测

邱璠豪<sup>1</sup>, 王富强<sup>1,2</sup>, 吕素冰<sup>1</sup>, 赵 衡<sup>1</sup>, 张红璐<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室, 河南 郑州 450046)

**摘要:** 水循环的健康状况是区域高质量发展的关键因素。水循环健康状态预测对区域水资源系统、经济社会系统和生态环境系统协调发展具有重要意义。以郑州市为典型研究区, 构建了城市水循环健康评价 DPSIR 模型, 运用熵权模糊综合评价方法分析了郑州市 2010~2020 年水循环健康状况演化过程; 采用系统动力学模型和熵权模糊综合评价方法预测了综合协调型、经济发展型、水资源优化型等 5 种类型下郑州市 2021~2030 年的水循环健康状态。结果表明, 近 10 年郑州市水循环健康状况向好发展, 人均 GDP、城市化率、水资源管理智慧化水平等指标达到“健康”状态; 5 种预测情景下城市水循环均达到“亚健康”及以上状态, 在兼顾经济发展、生态保护、水资源优化的综合协调型情景下郑州市水循环健康状况达到“健康”状态, 该方案为最优方案。研究结果可为郑州市生态保护和高质量发展提供理论依据和技术支持。

**关键词:** 水循环健康; 熵权法; DPSIR 模型; 系统动力学; 郑州市

**中图分类号:** TV21

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)12-0045-04

## 1 概况

郑州市为河南省省会, 位于东经  $112^{\circ}42' \sim 114^{\circ}14'$ , 北纬  $34^{\circ}16' \sim 34^{\circ}58'$  之间, 区域面积  $7\,567\text{ km}^2$ 。下辖 6 区、5 市、1 县, 城市建成区面积  $1\,284.89\text{ km}^2$ , 城镇化率 78.4%。郑州市作为国务院支持建设的国家中心城市和中原城市群中心城市, 区域优势显著。2020 年郑州市水资源总量为  $8.59 \times 10^8\text{ m}^3$ , 人均水资源量  $83.86\text{ m}^3$  仅为全国的 1/10, 属于严重缺水地区。因此, 了解郑州市水循环健康状态十分重要。水循环作为水资源形成、演化的客观基础, 是维持经济发展与生态稳定的主要驱动力<sup>[1]</sup>。综合国内外相关研究, 目前, 有关城市水循环评价及预测研究日趋成熟<sup>[2]</sup>, 各要素间的关系也更加复杂, 栾清华等<sup>[3]</sup> 构建了 KPI 的城市水循环健康评价体系; 应卓晖等<sup>[4]</sup> 应用系统动力学模型分析评价了京津冀水—经济—生态耦合协调发展状况。在此背景下, 以郑州市为典型研究区, 运用 DPSIR 模型和熵权模糊综合评价方法<sup>[5]</sup> 分析郑州市水循环健康状态演化过

程, 并采用系统动力学模型预测综合协调型、现状发展型、水资源优化型等 5 种类型下郑州市水循环健康状态, 旨在为区域水资源管理和水安全保障提供科技支撑。

## 2 研究方法

### 2.1 DPSIR 模型

DPSIR 模型<sup>[6]</sup> 是综合 PSR 模型和 DSR 模型优点于一体的应用于分析水资源问题与经济社会发展之间关系的综合评价模型。就水循环健康评价而言, “驱动力” 主要指社会经济和人口增长等反映影响水循环系统健康变化的潜在因素; “压力” 主要指水资源的利用等对水循环系统结构和功能带来的影响; “状态” 是指驱动力和压力共同作用引起的水循环系统的改变, 是影响和响应分析的出发点; “影响” 反映了水循环系统所处状态对人类健康和社会发展带来的影响; “响应” 是指水循环系统对驱动力和压力做出的反馈。基于此, 本研究构建了 DPSIR 水循环健康评价体系,

**收稿日期:** 2022-10-08, **修回日期:** 2022-11-07

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52279014, 51879106); 中原科技创新领军人才计划(214200510001); 河南省高校科技创新团队支持计划(20IRTSTHN010); 郑州市软科学研究计划重点(重大)项目(2020RKXF0090)

**作者简介:** 邱璠豪(1995-), 男, 硕士研究生, 研究方向为水资源系统分析, E-mail: 418183168@qq.com

**通讯作者:** 王富强(1979-), 男, 教授、博导, 研究方向为水循环模拟与调控、生态水文学, E-mail: wangfuqiang@ncwu.edu.cn

同时参考国家规范标准、文献资料及相关研究成果,确定各水循环健康评价指标阈值见表 1,并采

用综合评价指数( $C_{CEI}$ )来反映郑州市水循环健康状况,见表 2。

表 1 DPSIR 水循环健康评价体系

Tab. 1 DPSIR water cycle health assessment system

目标层	准则层	指标层	评价指标体系				
			健康	亚健康	不健康	疾病	重病
水循环健康评价	驱动力 $D$	$D_1$ 人均 GDP/万元	(20,15]	(15,10]	(10,5]	(5,1]	<1
		$D_2$ 城市化率/%	$\geq 80$	(80,60]	(60,40]	(40,20]	<20
		$D_3$ 人口自然增长率/%	<5	[5,10]	[10,15]	[15,20]	>20
		$D_4$ 科学技术支出/亿元	>50	(50,40]	(40,30]	(30,20]	<10
	压力 $P$	$P_1$ 人均生活用水量/ $m^3$	(100,80]	(80,60]	(60,40]	(40,20]	<20
		$P_2$ 万元 GDP 用水量/( $m^3 \cdot 万元^{-1}$ )	[5,15]	[15,25]	[25,45]	[45,60]	$\geq 60$
		$P_3$ 万元工业增加值用水量/( $m^3 \cdot 万元^{-1}$ )	[5,15]	[15,25]	[25,45]	[45,60]	$\geq 60$
		$P_4$ 农业用水量/ $10^8 m^3$	$\leq 2$	(2,3]	(3,4]	(4,5]	>5
		$P_5$ 生态用水量/ $10^8 m^3$	(25,20]	(20,15]	(15,10]	(10,5]	<5
		状态 $S$	$S_1$ 水资源总量/ $10^8 m^3$	$\geq 15$	(15,10]	(10,7]	(7,3]
	$S_2$ 人均水资源量/ $m^3$		(900,500]	(500,400]	(400,200]	(200,100]	<100
	$S_3$ 地下水供水占比/%		[10,25]	[25,40]	[40,55]	[55,70]	$\geq 70$
	$S_4$ 产水模数/( $10^4 m^3 \cdot km^{-2}$ )		$\geq 20$	(20,15]	[15,10]	[10,5]	$\leq 5$
	$S_5$ 农田有效灌溉面积/kha		$\geq 300$	(300,200]	(200,100]	(100,50]	<50
	$S_6$ COD 排放量/ $10^4 t$		<1	[1,2]	[2,3]	[3,4]	$\geq 4$
	$S_7$ 生态环境状况指数/EI		>75	(75,55]	(55,35]	(35,15]	<15
	影响 $I$	$I_1$ 水资源开发利用率/%	<20	[20,40]	[40,60]	[60,100]	$\geq 100$
		$I_2$ 农业用水占比/%	(40,30]	(30,20]	(20,15]	(15,10]	<10, $\geq 40\%$
		$I_3$ 水功能区水质达标率/%	[100,90]	(90,60]	(60,40]	(40,20]	<20
		$I_4$ 建成区绿化覆盖率/%	[100,50]	(50,40]	(40,30]	(30,20]	<20
响应 $R$	$R_1$ 水资源管理智慧化水平	优	良好	中	较低	低	
	$R_2$ 用水户满意度程度	很满意	满意	一般	较差	不满意	
	$R_3$ 节约用水量/ $10^4 m^3$	$\geq 1$	(1,0.8]	(0.8,0.6]	(0.6,0.4]	<0.4	
	$R_4$ 再生水用水量/ $10^8 m^3$	$\geq 8$	(8,5]	(5,3]	(3,1]	<1	

注:健康、亚健康、不健康、疾病、重病对应评分分别为 5、(5,4]、(4,3]、(3,2]、(2,1]。

表 2 水循环健康程度分级标准

Tab. 2 Grading standard of health degree of water cycle

水循环健康程度	$C_{CEI}$	水循环健康程度	$C_{CEI}$
健康	[0.85,1.00]	疾病	[0.40,0.55]
亚健康	[0.7,0.85]	重病	<0.40
不健康	[0.55,0.70]		

### 2.2 系统动力学模型构建

系统动力学(SD)<sup>[7]</sup>通过输入原始数据,进行仿真来实现对问题的求解。结合郑州市社会经济发展的实际情况及水循环健康评价指标体系将区域水循环健康系统划分为经济社会系统、水资源系统、生态环境系统 3 个子系统,见图 1。

## 3 结果分析

### 3.1 郑州市水循环健康状况评价

基于 DPSIR 水循环健康评价体系。通过熵权法计算各准则层及指标层权重,见表 3。由表 3 可知,科学技术支出、人均生活用水量、生态环境指数、建成区绿化面积、用水户满意程度 5 项指标所占权重较大。

运用熵权-模糊综合评价法评价郑州市 2010~2020 年水循环健康状况,结果见图 2。由图 2 可知,2010~2020 年郑州市水循环  $C_{CEI}$  评分呈逐年

升高趋势,由 2010 年的“疾病”状态到 2015 年的“不健康”状态再到 2018 年的“亚健康”状态,表明近年来郑州市水循环的健康程度整体上有很大改善。

### 3.2 郑州市水循环健康状态预测

#### 3.2.1 水循环系统校验

郑州市水循环系统是由社会经济、水资源、生态环境三个系统和多种要素组成的复杂系统。采用系统动力学方法,在深化 DPSIR 评价指标体系及其相关影响要素间关系的基础上,对各要素进行动态化数据预测。为确保模型的有效性和真实性,需对初步构建的动力学模型进行历史检验。以 2010~2020 年作为检验历史年,将检验值与现有历史数据进行误差对比(以经济系统为例)。

(1)经济社会系统。选取 GDP、城市化率等 6 项检验指标,将郑州市 2010~2020 年经济社会系统各指标实际值与检验值进行对比(图 3)。由图 3 可知,经济社会系统各指标检验值与实际值的误差基本在 15%以内,仅人均教育支出和在校生成人数指标个别年份误差大于 15%,且变化趋势与实际值的变化趋势一致,因此判定经济社会系统模型具有较好的精度。

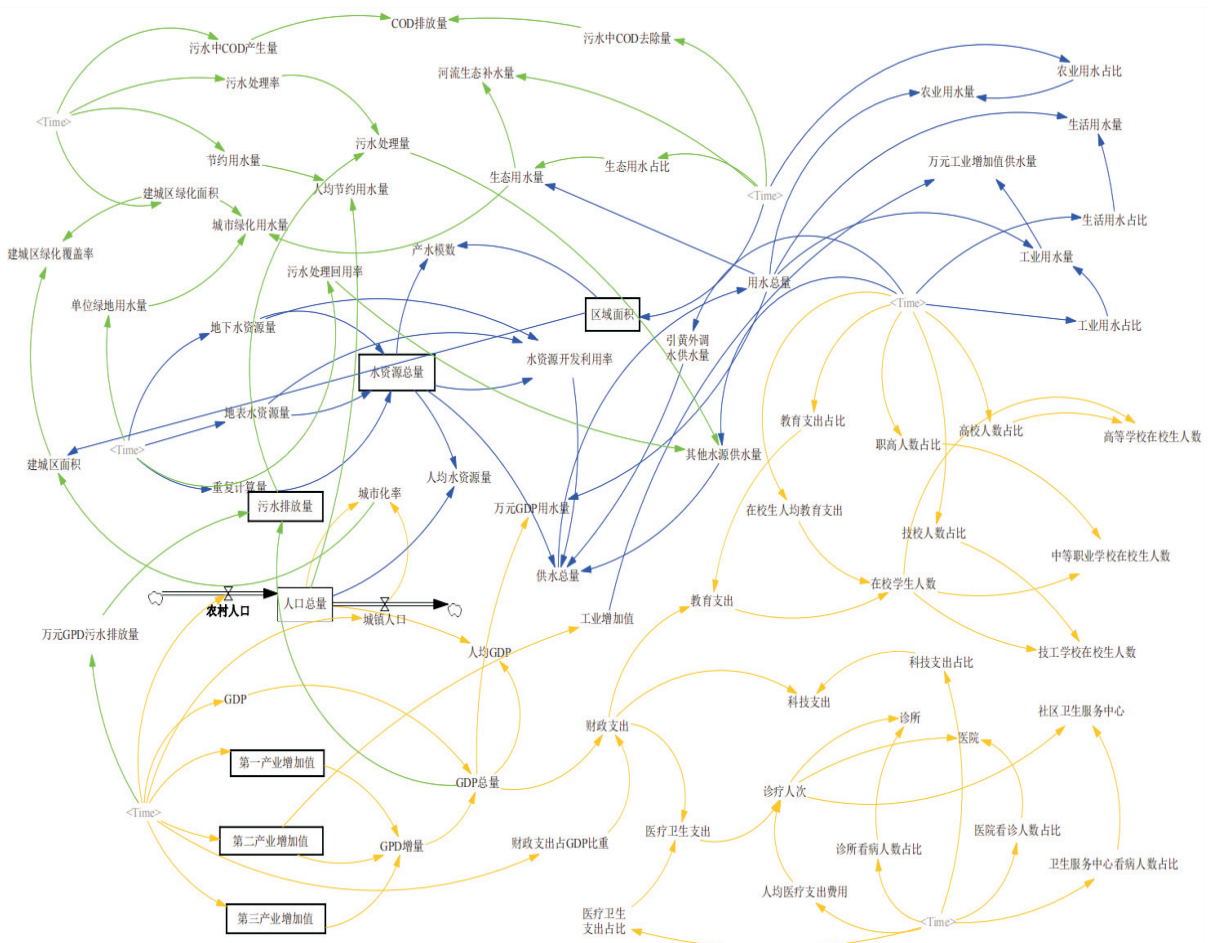


图 1 水循环健康系统流图

Fig. 1 Flow diagram of water circulation healthy system

表 3 郑州市水循环健康评价指标权重  
Tab. 3 Weight of water cycle health evaluation index in Zhengzhou

准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	准则层	准则层权重	指标层	指标层权重
驱动力 $D$	0.153	$D_1$	0.030	状态 $S$	0.195	$S_4$	0.019
		$D_2$	0.042			$S_5$	0.032
		$D_3$	0.022			$S_6$	0.026
		$D_4$	0.060			$S_7$	0.038
压力 $P$	0.263	$P_1$	0.064	影响 $I$	0.198	$I_1$	0.031
		$P_2$	0.056			$I_2$	0.059
		$P_3$	0.042			$I_3$	0.042
		$P_4$	0.046			$I_4$	0.066
		$P_5$	0.055			响应 $R$	0.191
状态 $S$	0.195	$S_1$	0.019	$R_2$	0.062		
		$S_2$	0.024	$R_3$	0.043		
		$S_3$	0.037	$R_4$	0.027		

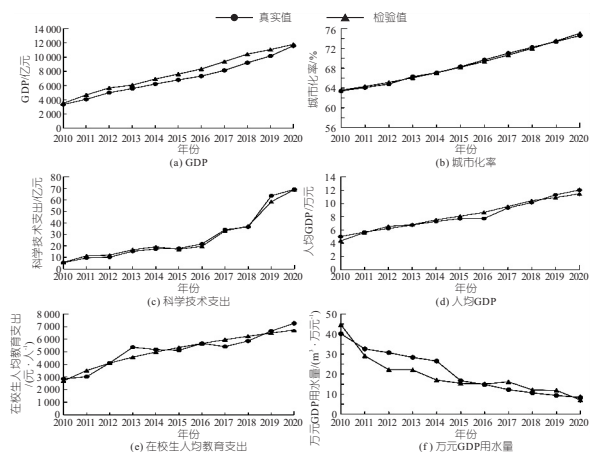


图 3 经济社会系统对比图

Fig. 3 Comparison of economic and social systems

量、人均水资源量等 6 项检验指标,对比 2010~2020 年水资源系统各指标实际值与检验值。结果显示,水资源系统各指标误差基本都在 15% 以内,仅农业需水量、万元工业增加值用水增量和万元 GDP 增加值用水量个别年份误差大于 15%,且变化趋势与实际值的变化趋势一致,因此判定水资源系统模型具有较好的精度。

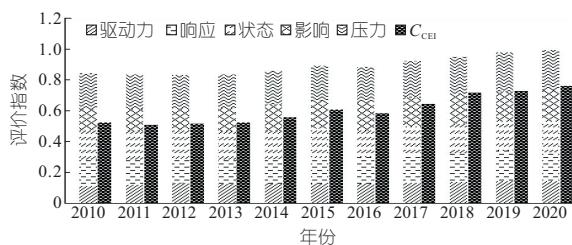


图 2 综合评价指数堆积图

Fig. 2 Accumulation diagram of comprehensive evaluation index

(2) 水资源系统。选取水资源系统水资源总

(3) 生态环境系统。选取生态用水量、绿化覆

盖率等 6 项检验指标,对比郑州市 2010~2020 年生态环境系统各指标实际值与检验值。结果显示,生态环境系统各指标误差基本都在 15% 以内,仅生态用水量、城市绿化用水量部分年份误差大于 15%,且变化趋势与实际值的变化趋势一致,因此判定生态环境系统模型精度良好。

### 3.2.2 郑州市水循环健康状况预测

根据 2010~2020 年郑州地区水资源、经济社会和生态环境系统内各指标发展趋势,假定预测期内水资源总量及降水量等自然因素无极端变化情况,结合郑州地区实际供用水情况、经济指数发展情况及排污减污能力,设定以下 5 种预测类型:  
 ①现状发展型。即维持现有状态不变;②水资源优化型。即以现状型为基础,调整用水结构,实现区域用水效率最优;③经济发展型。即以现状型为基础,以经济高速发展为核心,推动各产业高速增长;④生态保护型。即以现状型为基础,以降低污染,优化生态环境为核心,提高城市生态服务质量;⑤综合协调型。即综合水资源优化、经济社会发展和生态保护多个因素,着眼长期可持续协调发展,各项指标居中调和,保持较快速发展的状态下同时推动高质量发展。

根据郑州市《国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》以及《河南省城镇体系规划》(2016~2030 年)等规划,结合郑州市地区发展现状,确定 5 种情景下 2021~2030 年相关参数的设定,具体参数设置见表 4。

表 4 情景参数设定

Tab. 4 Scenario parameter setting

参数	现状发展型	水资源优化型	经济发展型	生态调节型	综合协调型
$D_1$	0.060	0.030	0.090	0.030	0.060
$D_2$	0.010	0.010	0.016	0.005	0.016
$D_3$	-0.040	-0.040	-0.040	-0.040	-0.030
$D_4$	0.090	0.005	0.100	0.030	0.050
$P_1$	-0.030	-0.030	-0.030	-0.050	-0.030
$P_2$	-0.100	-0.150	-0.050	-0.100	-0.130
$P_3$	-0.130	-0.180	-0.050	-0.130	-0.070
$P_4$	-0.070	-0.090	-0.070	-0.070	-0.008
$P_5$	-0.008	0.010	-0.008	0.050	0.030
$S_1$	0.003	0.006	0.003	0.003	0.006
$S_2$	0.060	0.060	0.030	0.005	0.060
$S_3$	-0.100	-0.100	-0.080	-0.010	-0.100
$S_4$	0.030	0.060	0.030	0.030	0.060
$S_5$	0.008	0.008	0.050	0.008	0.020
$S_6$	-0.100	-0.100	-0.050	-0.130	-0.150
$S_7$	0.040	0.040	0.040	0.060	0.050
$I_1$	0.050	-0.050	0.050	0.050	-0.010
$I_2$	0.030	-0.030	-0.010	-0.030	-0.030
$I_3$	0.025	0.025	0.025	0.040	0.030
$I_4$	0.007	0.060	0.007	0.070	0.030
$R_1$	0.020	0.080	0.020	0.020	0.080
$R_2$	0.050	0.150	0.050	0.050	0.100

根据 2021~2030 年郑州市多种发展类型下各项指标的预测结果,采用熵权-模糊综合评价方法计算不同情景下的水循环健康综合指数,结果见图 4。

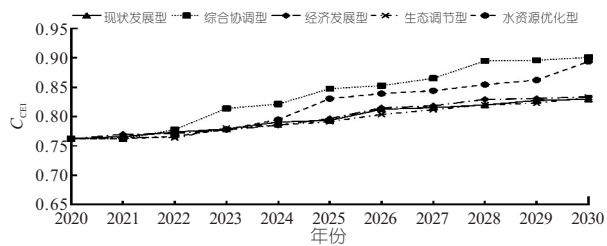


图 4 综合评价指数变化趋势

Fig. 4 Change trend of comprehensive evaluation index

根据预测结果可知,郑州市 2021~2030 年水循环健康状况在 5 种发展类型下均呈上升趋势。其中,2030 年郑州市现状发展型水循环健康状况较低,水资源优化型与经济发展型均达到“亚健康”状态;生态调节型与综合协调型均达到“健康”状态。

## 4 结论

a. 分析现状数据发现郑州市水循环状况逐渐向健康状态演化,至 2017 年已经基本表现为“不健康”及以上状态。

b. 维持现状型、经济发展型和水资源优化型三种情景下郑州市的水循环健康状况均呈现“亚健康”状态,生态调节型略低于综合协调型。综合协调型属于最优发展方案。

c. 当前的主要任务是进一步改善区域的水资源开发利用,优化水资源结构,打造健康的水循环状态。

### 参考文献:

- [1] 王浩,王佳,刘家宏,等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报,2021,52(1):3-11.
- [2] 王浩,贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报,2016,10(47):1219-1226.
- [3] 栾清华,张海行,褚俊英,等. 基于关键绩效指标的天津市水循环健康评价[J]. 水电能源科学,2016,34(5):38-41.
- [4] 应卓晖,赵衡,王富强,等. 基于 DEA 和 Tobit 模型的河南省水资源利用效率评价及影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(2):255-262.
- [5] 王富强,马尚钰,赵衡,等. 基于 AHP 和熵权法组合权重的京津冀地区水循环健康模糊综合评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):67-74.
- [6] 贾守东,郑从奇,庄会波,等. 基于 DPSIR 模型的沂河水资源可持续利用评价[J]. 水文,2022,42(3):61-66.
- [7] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海:上海财经大学出版社,2009.

