

基于系统动力学和向量模法的亮子河流域水环境承载力评价

赵传起¹, 朱悦², 王留锁², 刘岚昕², 王辉¹, 吴昊¹, 王英刚¹

(1. 沈阳大学环境学院区域污染环境生态修复教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110044;
2. 辽宁省生态环境保护科技中心, 辽宁 沈阳 110031)

摘要: 文章以亮子河流域水环境现状为基础, 建立了基于系统动力学模型和向量模法的水环境承载力评价体系, 从水资源、社会经济和水环境3个方面对水环境承载力的变化情况进行评估, 并提出超载流域水环境承载能力的调控对策。结果表明, 亮子河流域在2013年承载力情况最好, 2015年承载力最差, 2014~2018年属于轻度超载。以2018年为调整起点, 4种调整方案均可以实现水环境承载力的提升。通过总结提升方案可知, 提升对策应该以水资源量提高为主, 社会经济指标提高为辅, 兼顾提升水环境质量, 可以有效提高亮子河流域的水环境承载力整体水平。

关键词: 水环境承载力; 亮子河流域; 系统动力学; 向量模法; 提升方案

中图分类号: X824

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2021.01.021

Evaluation of Water Environment Carrying Capacity of Liangzihe River Basin Based on System Dynamics and Vector Norm Method

ZHAO Chuanqi¹, ZHU Yue², WANG Liusuo², LIU Lanxin², WANG Hui¹, WU Hao¹, WANG Yinggang¹

(1. School of Environmental Science and Technology, Key Lab of Regional Environment and Eco-restoration, Ministry of Education, Shenyang University, Shenyang 110044, China; 2. Liaoning Science and Technology Center for Ecological and Environmental Protection, Shenyang 110031, China)

Abstract: Based on the current situation of the water environment in Liangzihe River Basin, this paper established an evaluation system of the water environment carrying capacity based on the system dynamics model and the vector norm method. The carrying capacity was evaluated by the change of the carrying capacity from three aspects of water resources and social economy as well as water environment. And the regulation and control countermeasures of the overloaded basin were proposed. The results showed that the carrying capacity of Liangzihe River was the best in 2013, while the lowest value of carrying capacity appeared in 2015. And the carrying capacity from 2014 to 2018 belonged to slightly overload. Four adjustment schemes starting from 2018 could achieve the improvement of the water environment carrying capacity. It was found that the improvement of water resources, social economy and water environment quality could effectively improve the overall level of water environment carrying capacity of Liangzihe River.

Keywords: Water Environment Carrying Capacity; Liangzihe River Basin; System Dynamics; Vector Norm Method; Promotion Strategy

CLC number: X824

水资源是基础性自然资源, 是制约社会经济发展的战略性资源, 是生态环境的控制要素。近年来, 由于水资源的过度使用和严重的水环境污染, 使水资源的紧缺问题日益严重。水环境承载力, 指在某一时期、某种状态下, 某一区域或流域水环境对人口、经济及社会可持续发展的支持能力^[1]。辽

河流域为缺水区域, 水资源分配极不平衡, 由于经济结构转型和人民生活水平提高, 水资源消耗量巨大, 环境保护与经济社会发展矛盾突出, 水资源、水环境承载能力不足^[2-3], 流域水污染防治形势十分严峻。

关于水环境承载力的研究, 目前已有较多报

收稿日期: 2020-06-08

基金项目: 国家水污染控制与治理重大科技专项项目(2018ZX07601-002); 辽宁省自然科学基金资助项目(2019-ZD-0560)

作者简介: 赵传起(1985-), 男, 博士、副教授、硕士研究生导师。研究方向: 水体污染控制、农业面源污染治理。

E-mail: zcqs@aliyun.com

引用格式: 赵传起, 朱悦, 王留锁, 等. 基于系统动力学和向量模法的亮子河流域水环境承载力评价[J]. 环境保护科学, 2021, 47(1): 136-142.

道。例如刘朝霞等^[4]采用模糊评价法和熵值法联合评价了临海市 2010~2015 年水资源承载力水平,并提出了承载力动态变化的驱动因素。崔兴齐等^[5]利用向量模法及雷达图对河南省水环境承载力进行评价分析,并提出影响河南省水环境承载力的主要因素有水资源总量、用水效率、水质及水污染处理能力等。齐士强^[3]分析了水环境与污染水平、经济和人口增长以及资源紧缺等因素的相互关系,运用多目标优化模型评价了辽河流域 2010~2016 年水环境承载力的变化趋势。白辉等^[6]利用向量模法对胶州市 2007~2011 年水环境承载力进行了评价,并提出水资源短缺为制约胶州市水环境承载力的主要因素。然而,目前的研究多集中在城市、区域或者大尺度的流域层面,聚焦在控制单元等小尺度流域的承载力评估则较少涉及^[7]。在实际工作中,由于控制单元的尺度较小,往往难以获得多年的数据为支撑,因此,如何构建基于小尺度流域的承载力评估体系,使其具有代表性和易获取性,同时兼具普遍适用性,是推广水环境承载力亟待解决的问题之一。本研究选取辽河流域典型的优先控制单元——亮子河流域为研究对象,结合经济发展、社会结构以及水质、水量现状水平,对其承载力进行评估,并从社会经济活动和水环境系统

相协调的角度,有针对性地提出典型超载流域水环境承载能力的调控对策。

1 资料与评价方法

1.1 数据来源

研究所涉及到的数据主要来源于 2012~2018 年的《铁岭市统计年鉴》《铁岭市水资源公报》、铁岭市环境统计数据以及《辽宁省水利发展“十三五”规划》和《辽宁省水污染防治工作方案》《国家生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》《中共辽宁省委关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》等文件。承载力的评估数据是对原始数据的收集并通过 vensim 软件计算得到。

1.2 亮子河流域概况

本文选择的优先控制单元为亮子河流域,属于辽河的一级支流,发源于昌图县棋盘山北麓,经开原市庆云镇后施堡村汇入辽河,流域面积为 668.0 km²,河流长 114 km,昌图县境内约 83 km,开原市境内约 31 km,河道宽 30~50 m。

亮子河流域内有国控断面一个,即亮子河入河口(后施堡)断面。通过分析该断面的水质监测数据,可以反映亮子河水环境质量随时间的变化情况。根据 2012~2017 年的监测数据,见表 1。

表 1 2012~2017 a 亮子河入河口断面水质监测结果统计表

项目	2012 a	2013 a	2014 a	2015 a	2016 a	2017 a	IV类	V类
pH	7.540	7.410	7.360	7.600	7.530 0	7.650 0	6~9	6~9
溶解氧	6.600	5.900	4.700	4.100	6.270 0	6.200 0	3.00	2.0
电导率/mS·m ⁻¹	56.600	52.100	61.300	55.600	73.120 0	113.900 0	—	—
化学需氧量	28.000	20.900	40.000	48.300	36.790 0	37.600 0	30.00	40.0
生化需氧量	7.000	4.600	15.300	10.700	11.990 0	10.300 0	6.00	10.0
氨氮	1.140	0.950	3.080	2.900	2.200 0	5.480 0	1.50	2.0
总磷	0.300	0.260	0.650	0.650	0.740 0	0.930 0	0.30	0.4
石油类	0.100	0.090	0.110	0.090	0.071 0	0.060 0	0.50	1.0
挥发酚	0.003	0.003	0.002	0.003	0.006 1	0.002 7	0.01	0.1
六价铬	—	—	0.005	—	0.006 4	0.010 0	0.05	0.1
高锰酸盐指数	7.300	6.800	8.800	9.000	8.530 0	9.100 0	10.00	15.0
阴离子表面活性剂	0.110	0.130	0.130	0.090	0.081 0	0.090 0	0.30	0.3
粪大肠菌群/个·L ⁻¹	15 900.000	10 091.000	16 600.000	17 000.000	18 666.000 0	—	20 000.00	40 000.0
氟化物	0.500	0.200	0.280	—	0.350 0	0.460 0	—	—

2012~2013 年,亮子河流域水质指标符合 IV 类水标准,2014~2017 年为劣 V 类水质标准。根据流域内水质的变化情况,可以一定程度上判断承载力的预测结果是否准确。从变化趋势来看,亮子河流

域水质在 2013 年最佳,各项监测指标均为最好。2013 年以后水质逐渐变差,2015~2017 年最差。水质的变化情况与流域内历年的降水情况、产业结构调整 and 污染治理等因素相关。

1.3 研究方法

水环境承载力的评价方法主要包括向量模法、多目标决策分析法、系统动力仿真模型法、模糊综合评价法等^[8]。向量模法是较为常用的评价方法,它将水环境承载力表示为 n 个定量描述的指标,以归一化后的向量模表征水环境承载力的大小,数值越接近 1,表明承载力水平越高^[9]。

本研究中,为了便于对承载力进行分级,参考了加权求和的方法计算水环境承载力,见式(1)。

$$|\bar{E}| = \sum_{i=1}^n W_i \times \bar{E}_i \quad (1)$$

式(1)中: $|\bar{E}|$ 为水环境承载力评价价值; \bar{E}_i 为评价对象第 i 个指标的标准值; W_i 为第 i 个指标的权重; n 为指标的个数。

该方法具有简单易行和数学理论基础坚实等优点,但由于忽略了水环境承载力各个指标之间的指向关系,使向量模法具有一定的局限性。

系统动力学(System Dynamics, SD)是一门分析研究信息反馈控制理论的科学。系统动力学方法从系统的内部要素和结构分析入手,通过微分方程组来反映系统各个变量之间的因果反馈关系,从而建立系统动力学模型。SD 模型以实际存在的数据为基础,通过改变系统的参数和结构,模拟不同设定方案下资源、社会经济和承载力之间的动态变化。它强调因

素之间彼此的联系和系统性整体发展的观点,被广泛应用于生态环境规划、城市规划、人口承载力、水资源以及土地承载力等众多领域^[10]。水环境承载力往往涉及到人口、经济、水资源和水环境等构成要素,同时,这些要素之间存在着相互影响、相互制约的动态联系,因此,利用系统动力学方法进行水环境承载力的评价与预测,具有很强的适用性与优势^[11]。本文应用系统动力学方法与向量模法对亮子河流域水环境承载力现状进行定量评价,并根据最终的现状评价结果对历年水环境承载力进行等级划分。

1.4 水环境承载力 SD 模型的构建

SD 系统模拟的空间边界为亮子河流域,模拟的时间边界为 2012~2032 年,仿真时间步长为 1 年,其中 2012~2018 年基础数据年份,2018 年为预测基准年。系统要素主要涉及控制单元内社会经济、水环境和水资源 3 个方面,研究内容集中于流域内水资源供、需、用平衡和水环境纳污平衡 2 个方面。为了能够定性定量相结合的描述各要素,SD 模型用 vensim 软件描述水平变量、速率变量和辅助变量等信息,模型见图 1,参数设置见表 2。SD 模型图清晰地描绘出水环境承载力系统的因果关系以及系统要素的传递方向,也可以正确辨析出各构成要素之间的相互作用关系,有利于模拟和预测系统的动态运行和后续的政策调整。

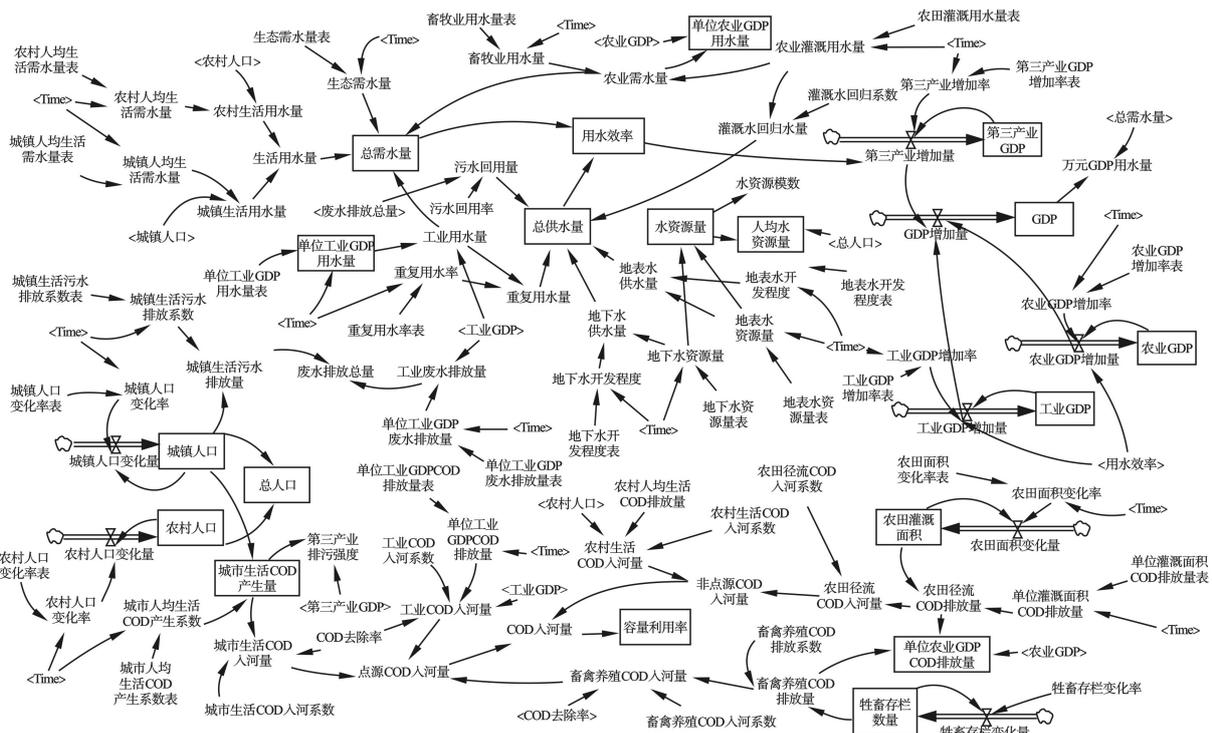


图 1 系统动力学模型流图

表 2 系统动力学模型模拟参数

变量	数值	参数	数值
城镇人口/人	32 480.00	城市生活COD入河系数	0.80
农村人口/人	102 747.00	COD去除率	0.80
农田灌溉面积/ hm ²	9 453.40	工业COD入河系数	0.80
牲畜存栏数量/万头	96.80	农村生活COD入河系数	0.20
工业GDP/亿元	42.05	畜禽养殖COD入河系数	0.20
农业GDP/亿元	10.51	农田径流COD入河系数	0.20
第三产业GDP/亿元	28.23	牲畜存栏变化率	-0.05
灌溉水回归系数	0.45	农村人均COD排放量/g·(人·天) ⁻¹	16.40
污水回用率	0.10	畜禽养殖COD排放系数/t·万头 ⁻¹	266.10

1.5 指标权重的确定方法

指标权重是不同指标在评价过程中的重要程度,根据权重的计算方法,可分为主观赋权法和客观赋权法两大类。主观赋权法在很大程度上依赖于人们的经验,主观因素的影响较大。客观赋权法是利用数据的信息熵来确定各评价指标的权重,该方法虽然客观性强,但在赋权时对于异常数据过于敏感,使某些指标的客观权重过大,导致综合权重不切实际。为了减少误差,本文采用主观与客观相结合的方法,即层次分析法(AHP)与熵值法相结合(1 : 1)对指标进行赋权^[1,12]。

2 结果与分析

2.1 指标体系与权重

流域水环境承载能力受到流域经济社会发展

状况、水资源禀赋和水环境治理等因素的影响,是这些因素彼此联系、彼此制约和彼此耦合的结果。本研究借鉴国内外的研究成果,并综合考虑数据的可获得性,选定如下 14 个评价指标构建亮子河优控单元水环境承载力指标体系: A₁ 人均水资源量, m³/人; A₂ 水资源模数, m³/km²; A₃ 用水效率, %; A₄ 单位农业 GDP 用水量, m³/万元; A₅ 单位工业 GDP 用水量, m³/万元; A₆ 城镇化率, %; A₇ 人均 GDP, 万元/人; A₈ 工业 GDP 增长率, %; A₉ 农业 GDP 增长率, %; A₁₀ 第三产业比重, %; A₁₁ 工业增加值排污强度, kg/万元; A₁₂ 农业增加值排污强度, kg/万元; A₁₃ 第三产业排污强度, kg/万元; A₁₄ 环境容量利用率, %; A₁₅ 废水重复利用率, %。指标的计算方法及其内涵定义、影响效益,见表 3。

表 3 水环境承载力评价指标体系与权重

子系统	指标	指标涵义	计算方法	效应	熵值法	层次法	综合权重
水资源利用	A ₁	水资源丰富程度	水资源总量/总人口	+	0.114 1	0.157 1	0.136 0
	A ₂	水资源丰缺程度	水资源总量/流域面积	+	0.114 8	0.104 9	0.109 9
	A ₃	水资源利用效率	用水量/供水量	+	0.038 3	0.073 7	0.056 0
	A ₄	农业用水效率压力	农业用水量/农业GDP	-	0.049 8	0.055 4	0.052 6
	A ₅	工业用水效率压力	工业用水量/工业GDP	-	0.107 1	0.061 2	0.084 2
水环境承载力	A ₆	人口对水环境的压力	城镇人口/总人口	+	0.103 3	0.033 9	0.068 6
	A ₇	社会经济发展水平	GDP总量/总人口	+	0.101 0	0.027 7	0.064 4
	A ₈	工业经济发展水平	工业GDP增加值/上年工业GDP	+	0.049 9	0.034 4	0.042 2
	A ₉	农业经济发展水平	农业GDP增加值/上年农业GDP	+	0.026 8	0.030 6	0.028 7
	A ₁₀	产业结构发展水平	第三产业GDP/GDP总量	+	0.060 5	0.052 0	0.056 3
水污染控制	A ₁₁	水环境污染潜在风险	工业COD排放量/工业GDP	-	0.027 5	0.099 5	0.063 5
	A ₁₂	农业水污染控制能力	农业COD排放量/农业GDP	-	0.047 4	0.066 4	0.056 9
	A ₁₃	生活水污染控制能力	城镇生活COD排放量/第三产业GDP	-	0.072 2	0.043 9	0.058 1
	A ₁₄	水资源质量及利用效益	COD入河量/环境容量	-	0.057 3	0.123 5	0.090 4
	A ₁₅	工业废水利用效率	重复用水量/用水总量	+	0.030 1	0.035 8	0.032 9

以 2012 ~ 2018 年的统计数据为基础,利用 SD 模型模拟运算得到指标体系中的评估数据,见

表 4。利用离差标准化法对评估数据进行归一化处理,以便后续承载力的评估计算。

表 4 水环境承载力指标值

子系统	指标	t/a						
		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
水资源利用	$A_1 / \text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$	1 345.89	1 660.66	878.40	766.61	729.14	694.30	659.33
	$A_2 / \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$	29.64	36.32	19.22	16.78	16.02	15.26	14.50
	$A_3 / \%$	0.67	0.71	0.69	0.73	0.74	0.74	0.75
	$A_4 / \text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$	524.57	480.25	485.22	456.68	719.69	679.83	631.51
	$A_5 / \text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$	0.66	1.12	3.39	17.04	15.77	16.03	16.30
社会经济	$A_6 / \%$	0.24	0.25	0.25	0.26	0.37	0.38	0.39
	$A_7 / \text{万元} \cdot \text{人}^{-1}$	6.02	6.36	5.27	3.05	1.53	1.46	1.51
	$A_8 / \%$	0.16	-0.23	-0.65	-0.72	-0.01	0.08	0.08
	$A_9 / \%$	0.06	0.02	0.00	-0.40	0.02	0.02	0.03
	$A_{10} / \%$	0.35	0.29	0.30	0.37	0.43	0.40	0.39
水污染控制	$A_{11} / \text{kg} \cdot \text{万元}^{-1}$	1.12	0.74	1.28	5.57	1.81	1.82	1.84
	$A_{12} / \text{kg} \cdot \text{万元}^{-1}$	265.91	239.54	224.04	213.74	333.57	312.57	288.54
	$A_{13} / \text{kg} \cdot \text{万元}^{-1}$	1.66	1.88	1.94	1.52	4.20	4.88	4.86
	$A_{14} / \%$	2.07	2.00	1.96	1.93	1.74	1.69	1.64
	$A_{15} / \%$	0.32	0.39	0.42	0.37	0.38	0.39	0.40

2.2 水环境承载力计算

以 SD 模型的模拟运算结果为基础,耦合向量模法,计算出亮子河优控单元的水环境承载力历年变化情况,见图 2。

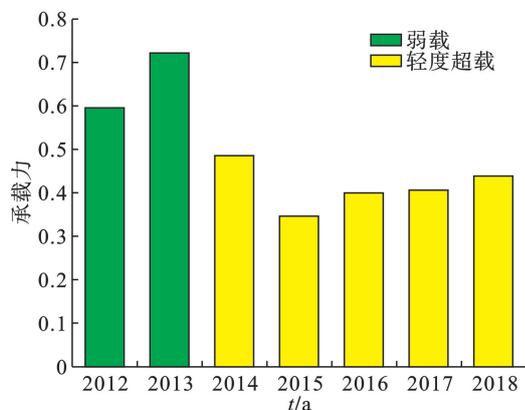


图 2 亮子河流域水环境承载力的变化趋势

总体上亮子河流域的水环境承载力经历了由好变坏、再次提升的过程。2013 年承载力情况最好,随后开始下降,2015 年为承载力最差,2016 年后略有改善。目前对于水环境承载力的等级划分没有相应的标准,如朱银银等^[13]利用系统动力学评估了某市的水环境承载力,并将承载力分为 4 级:0~0.2 为不可承载,0.2~0.6 为弱可承载,0.6~0.8 为基本可承载,0.8~1 为良好可承载;孙亚飞等^[14]利用加权求和法评估了辽河流域水环境承载力,将其分为 3 级:<0.1 为不可承载,0.1~0.5 为可承载,>0.5 为承载性良好;董徐艳等^[15]通过加权求

和法评估了云南省的水环境承载力,认为数值在 0~0.2 为极差,0.2~0.5 为差,0.5~0.8 为一般,0.8~1 为好。因此,参考文献结果,本文将水环境承载力分为 4 级:0~0.2 为承载力严重超载,0.2~0.5 为轻度超载,0.5~0.8 为较弱承载,0.8~1 为适载。

对亮子河流域的水环境承载力等级进行划分(图 2),2012 年和 2013 年属于弱载,2014~2018 年属于轻度超载,承载力的评价结果与流域内的水质变化情况相一致(表 1)。对承载力变化的原因进行分析,由指标体系中的原始数据可知,2013 年以后水资源量逐年降低,亮子河流域的干旱情况逐年严重,导致水资源其他指标也随之降低,因此承载力呈现出下降的趋势。同时,由于农村生活和养殖污水点源污染也对流域水功能区水质产生一定影响,使水体自净能力减弱,导致水功能区超载。经济因素是承载力分析重要的一环。亮子河流域经济状况不容乐观,工业和农业 GDP 下降明显,导致指标体系中 GDP 增长率为负值,对评价指标较为不利。于此同时,污染物排放的强度、工业用水量和工业废水排放量的数据却没有相应的减少,因此这些负向的指标对承载力的结果影响较大。

2.3 水环境承载力的提升

在系统动力学模型中,通过调整相关的参数,可以模拟承载力的提升以及其他年份的预测。在

众多参数中, 污染物入河系数与污染源到河流的距离有关, 通常情况下取常数, 难以调整。污染物产生系数, 即人均 COD、氨氮和总磷等污染物的产生系数, 常取规划数值, 难调控。通过调整人口数量来提高亮子河流域的水环境承载力不合理, 而且有悖于目前我国的人口政策调整趋势。地表水/地下水开发程度受自然条件和技术水平的影响, 更受到政策的影响, 不宜做调控参数, 并且过度开采也不符合政策调控的目的。参考《辽宁省水利发展“十三五”规划》《辽宁省水污染防治工作方案》和《中共辽宁省委关于制定国民经济和社会发展第十三个

五年规划的建议》等重要文件, 对于提升方案进行如下设置。

情景 1: 以经济提高为主, 即调控参数中经济参数取较高数值, 其他水环境与水资源的参数维持现状; 情景 2: 以水环境质量提高为主, 即调控参数中水环境的参数取较高数值, 其他经济与水资源的参数维持现状; 情景 3: 以水资源量提高为主, 即调控参数中水资源量的参数取较高数值, 其他水环境与社会经济的参数维持现状; 情景 4: 调控参数中经济、水环境和水资源等参数均取最佳数值, 评估在最佳条件下, 水环境承载力的提升情况, 调整的参数, 见表 5。

表 5 水环境承载力提升方案

参数编号	参数名称	参数值			
		情景1	情景2	情景3	情景4
R1	工业GDP增长率/%	6.60	-	-	6.60
R2	农业农业GDP增长率/%	6.60	-	-	6.60
R3	第三产业GDP增长率/%	6.60	-	-	6.60
R4	畜禽存栏变化率/%	-10.00	-5.00	-5.0	-10.00
R5	COD污染物去除率/%	80.00	95.00	80.0	95.00
R6	农业灌溉水有效利用系数	0.45	0.45	0.6	0.60
R7	重复用水率/%	40.00	40.00	80.0	80.00
R8	污水回用率/%	10.00	10.00	30.0	30.00
R9	万元GDP用水量比2015年下降比例/%	-10.00	-10.00	-30.0	-30.00
R10	人均水资源量/m ³ ·人 ⁻¹	-	-	779.0	779.00

将 SD 模型中的相关参数按照上述步骤进行设置, 未涉及的参数则保持不变, 重新运行系统动力学模型, 得到优化后的模拟数据, 部分涉及到的数据, 见图 3。提升方案 2 和方案 4 中, 将污染物处理效率提高到 95%, 同时控制畜禽养殖的存栏量, 显著降低了 COD 污染物的入河量, 进而降低了整个

流域的容量利用率。提升方案 1 和方案 2 中对于工业用水重复率、污水回用率和农田灌溉水有效利用系数的设置, 直接影响了供水量水资源利用率等指标, 这些可以从图 3b 中得以体现。水环境承载力的模拟趋势, 见图 4。

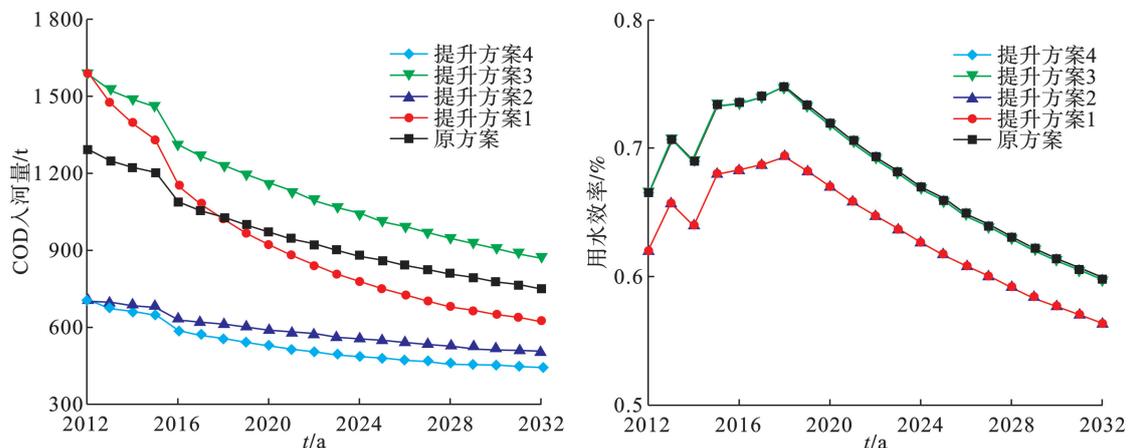


图 3 不同提升方案下的 SD 模型模拟结果

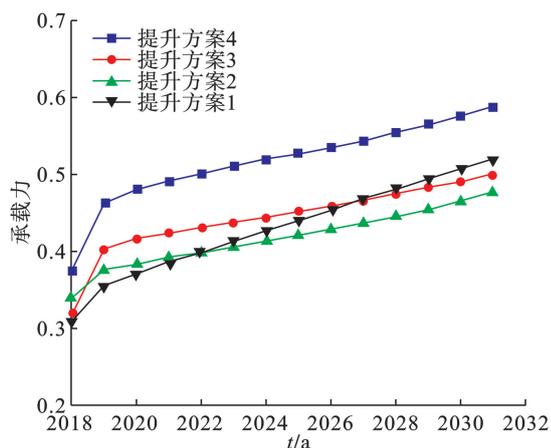


图 4 水环境承载力的模拟趋势

以 2018 年为调整起点, 4 种提升方案均可以实现水环境承载力的提升。分析结果可以发现, 方案 4 的提升效果最优, 从 2021 年开始, 承载力可以提升至 0.5 以上; 方案 1 和方案 3 对于承载力的提升效果相近, 可以在 2030 年左右提升至 0.5 附近; 方案 2 则提升效果有限。通过提升方案可知, 提升对策应该以水资源量提高为主, 社会经济指标提高为辅, 兼顾提升水环境质量, 可以有效地提高亮子河流域的水环境承载力整体水平。

3 结论

本文以亮子河优控单元为研究区域, 结合经济发展以及水质、水量现状水平, 对其承载力进行评估, 得到了以下结论: 亮子河流域的承载力水平在 2013 年最好, 属于较弱承载水平, 随后承载力开始下降, 2014~2018 年属于轻度超载, 2015 年的承载力最差。分析原因, 2013 年以后亮子河流域由于干旱等因素造成水资源紧缺, 导致评价指标呈现出下降的趋势; 同时, 由于小支流农村生活、养殖污水点源污染汇入, 导致水功能区超载; 流域内 GDP 呈现逐年下降趋势, 导致指标体系中 GDP 增长率为负值, 对评价指标较为不利。以 2018 年为调整起点,

本文中的调整方案均可以实现水环境承载力的提升。通过提升方案可知, 提升对策应该以水资源量提高为主, 社会经济指标提高为辅, 兼顾提升水环境质量, 可以有效提高亮子河流域的水环境承载力整体水平。

参考文献

- [1] 曾现进, 李天宏, 温晓玲. 基于 AHP 和向量模法的宜昌市水环境承载力研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 200-205.
- [2] 田家乐. 基于辽宁省的水环境承载力分析[J]. 黑龙江水利科技, 2018, 46(12): 9-13.
- [3] 齐士强. 辽河流域水环境承载力及其动态变化特征分析[J]. 地下水, 2019, 41(5): 150-152.
- [4] 刘朝露, 陈星, 崔广柏, 等. 临海市水资源承载力动态变化及驱动因素分析[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(1): 46-52.
- [5] 崔兴齐, 孙文超, 鱼京善, 等. 河南省近十年水环境承载力动态变化研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(增 2): 359-362.
- [6] 白辉, 刘雅玲, 陈岩, 等. 层次分析法与向量模法在水环境承载力评价中的应用——以胶州市为例[J]. 环境保护科学, 2016, 42(4): 60-65.
- [7] 王硕. 基于流域尺度的可持续复合水生态承载力研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [8] 周翟允佳, 张惠远, 郝海广. 环境承载力评估方法研究综述[J]. 生态经济, 2018, 34(4): 164-168.
- [9] 郑毅, 蒋进元, 杨延梅, 等. 基于向量模法的南宁市水环境承载力评价分析[J]. 环境影响评价, 2017, 39(1): 65-68+79.
- [10] 阿琼. 基于 SD 模型的天津市水资源承载力研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [11] 封金利. 基于 SD 模型的铁岭市水资源承载力研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.
- [12] 范嘉炜, 黄锦林, 袁明道, 等. 基于子系统熵权模型的珠三角水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 100-105.
- [13] 朱银银, 柴磊. 基于系统动力学的某市水环境承载力动态变化研究[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(9): 1039-1041.
- [14] 孙亚飞, 何俊仕, 王捷, 等. 基于层次分析法的辽河干流水环境承载力评价研究[J]. 节水灌溉, 2015(5): 37-41.
- [15] 董徐艳, 陈豪, 何开为, 等. 云南省水环境承载力动态变化研究[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(增 1): 346-352.