

汉江流域(陕西段)水生态承载力评估

孙佳乐¹, 王颖¹, 辛晋峰²

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048; 2. 博元生态修复(北京)有限公司, 北京 100082)

摘要:为缓解汉江上游支流污染严重、生态环境质量差、潜在威胁多等问题,实现对国家南水北调中线工程重要水源区的保护,提出了基于“驱动力-压力-状态-影响-响应”框架模型的汉江流域(陕西段)水生态指标体系及权重,构建了可用于汉江流域水生态承载力的系统动力学模型。基于系统动力学和隶属度相结合的方法量化评估汉江流域(陕西段)水生态承载力,根据社会发展和技术水平设计7种调控方案研究汉江流域(陕西段)水生态承载力对方案的响应程度。研究结果表明:现状发展条件下汉江流域(陕西段)处于弱可承载状态,方案7实施后汉江流域(陕西段)水生态承载力将显著提高,达到基本可承载状态。

关键词:水生态指标;水生态承载力;系统动力学;汉江陕西段

中图分类号:TV213.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)03-0080-07

Water ecology carrying capacity evaluation on Shaanxi section of Hanjiang River basin

SUN Jiale¹, WANG Ying¹, XIN Jinfeng²

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Poten Environment Group Co., Ltd, Beijing 100082, China)

Abstract: In order to solve the issues of server pollution from tributary in upper section of Hanjiang River, low eco-environmental quality and some potential threat and to protect the water resources in Middle Line South-to-North Water Diversion, the aquatic ecology index system and weight and system dynamic model which could be used to evaluate the water ecology carrying capacity were developed based on the frame model of driving force-pressure-state-influence-response. Based on the combination of system dynamic model and membership degree, the water ecology carrying capacity of Shaanxi section, Hanjiang River were evaluated quantitatively. Moreover, seven regulation scenarios were implemented to investigate the response degree of water ecology carrying capacity in Hanjiang River (Shaanxi section) based on social development and technological level. The results show that Hanjiang River is now in the low load capacity on the current development and the water ecology carrying capacity will be improved largely and it will be up to the basic load capacity after the implementation of seventh regulation scenario.

Key words: water ecology index; water ecology carrying capacity, system dynamics; Shaanxi section of Hanjiang River

1 研究背景

流域水生态承载力^[1-3](WECC)是在水环境承载力^[4-5]和水资源承载力^[6-8]研究基础上发展起来旨在为流域水生态系统综合管理提供科学依据,是一个具有自然和社会双重属性的自然科学与社会科学的综合概念,然而目前对于该概念仍未形成一

个统一的认识,研究方法也在探索之中^[9-12]。大多研究采用系统动力学法、指标体系评价法、生态足迹法、多目标优化法及资源供需平衡法,其中系统动力学法应用最为广泛。系统动力学模型的实质是带时滞的一阶微分方程组,可以便利地处理非线性和时变现象,对于社会发展、经济建设、资源保护、生态建设等等有重要意义,被誉为复杂系统的“战略与策

收稿日期:2017-11-06; 修回日期:2018-01-27

基金项目:陕西省水利科技项目(2015slkj-03)

作者简介:孙佳乐(1993-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,研究方向为环境及生态水力学。

略实验室”^[13]。利用建立好的系统动力学模型模拟分析各个发展方案,在此基础上预测决策变量,并将其看作评价指标,即可利用指标评价方法,最终通过比较获得最优的发展方案和生态承载能力。如 Randhir 等^[14]利用系统动力学模型和情景分析对哈特菲尔德河流流域的土地利用和水生态系统的响应关系进行了模拟分析。Hassanzadeh 等^[15]建立伊朗乌尔米耶湖的系统动力学仿真模型,模拟分析了湖泊水位变化对湖泊环境造成的影响。王西琴等^[16]利用 vensim 软件建立了 SD 模型对常州市水生态承载力进行了模拟和预测,并利用投影寻踪法对 5 种情景方案进行了优化选择。李靖等^[13]、李珊^[17]利用系统动力学模型对太子河流域水生态承载力进行了动态模拟分析。本文以汉江流域上游(陕西段)为例,结合层次分析法、系统动力学和隶属度法建立汉江流域上游(陕西段)水生态承载力量化模型,对水生态承载力进行评估,旨在使生态环境受到最小影响的前提下,最大规模的发展社会经济。

2 汉江上游流域概况

2.1 自然经济概况

汉江上游北依秦岭,南障巴山、米仓山,西与嘉陵江为邻,其源头位于陕西省宁强县米仓山西端的蟠冢山。汉江上游干流在陕西境内长 709 km,东西贯穿,流域面积近 60 000 km²,沿岸流经共 13 个城

市和县区,包括汉中、石泉、安康、旬阳以及南郑等。流域水资源较丰富,但有年内和地域分布不均现象,其平均产流模数 $42.645 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{a} \cdot \text{km}^2)$,多年平均降水量和多年平均降水总量分别为 914.1 mm 和 $569.17 \times 10^8 \text{ m}^3$,地表水径流量和浅层地下水资源量分别为 265.52×10^8 和 $71.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。汉江上游流域支流密布,水系呈现羽状排列,左岸和右岸和流域面积占全流域面积的分别为 60% 和 40%,统计梯级河段沿岸主要支流 30 条。

汉江在陕西段流域内出现污染物的城市为宝鸡、汉中、安康与商洛。重点污染城市为安康与汉中,排污口或排污支流排放的大部分有机污染物是 COD 和 NH₃—N,2000 年安康市 COD 年排放量 40 696.1 t, NH₃—N 年排放量 2 427.7 t。汉中市 COD 年排放量 16 718 t, NH₃—N 年排放量 1 856 t,其中汉台区 COD 和 NH₃—N 的排放量最大,分别为 3 012 和 373 t;安康市 COD 年排放量 11 307 t, NH₃—N 年排放量 1 170 t,其中汉滨区 COD 和 NH₃—N 排放量最大,分别为 4 976 和 600 t。

2.2 水功能区划分

本文以陕西省人民政府办公厅颁发的[2004]100 号《陕西省人民政府办公厅文件陕西省水功能区划》^[18]为基础,综合考虑流域的实际情况,将汉江上游(陕西段)流域划分为 15 个水功能区,如表 1 所示。

表 1 汉江上游(陕西段)流域水功能分区

功能区 编号	功能区名称	干流区间		适用国家标准类别	
		起始断面	长度/km	地表水环境质量标准	污水综合排放标准
1	宁强源头水保护区	潘冢山—金牛驿	34.0	Ⅱ	禁排,不得新建排污口
2	勉县保留区	金牛驿—武侯镇	43.0	Ⅱ	禁排,不得新建排污口
3	勉县开发利用区	武侯镇—前进村	17.5	Ⅲ	一级
4	勉汉保留区	前进村—叶家营	46.0	Ⅱ	禁排,不得新建排污口
5	汉中开发利用区	叶家营—圣水镇	25.5	Ⅲ	一级
6	汉中保留区	圣水镇—汶川河口	27.5	Ⅱ	禁排,不得新建排污口
7	城固开发利用区	汶川河口—三合	15.0	Ⅲ	一级
8	洋县保留区	三合—党水河口	27.0	Ⅱ	禁排,不得新建排污口
9	洋县开发利用区	党水河口—东村	16.0	Ⅲ	一级
10	石泉、紫阳保留区	东村—安康水库大坝	226.5	Ⅱ	禁排,不得新建排污口
11	安康开发利用区	安康水库大坝—关庙	19.0	Ⅲ	一级
12	旬阳、安康保留区	关庙—菜湾	48.0	Ⅱ	禁排,不得新建排污口
13	旬阳开发利用区	菜湾—庙岭	10.0	Ⅲ	一级
14	旬阳保留区	庙岭—兰滩	53.0	Ⅱ	禁排,不得新建排污口
15	白河缓冲区	兰滩—白河下卡子	40.0	Ⅱ	禁排,不得新建排污口

3 水生态承载力指标体系建立

3.1 指标的选取

根据国内外学者在水资源、水环境、水生态承载力指标体系的相关研究成果,在水生态承载力概念、内涵和影响因素的基础上,结合汉江上游陕西段社会经济、自然生态环境特征,依据水生态系统的 DP-SIR 概念框架,协助建立汉江上游陕西段的水生态承载力评价指标体系,从驱动力、压力、状态、影响、响应五个部分进行描述。采用目标分层法,建立水生态承载力指标体系的多级递阶结构,如图 1。

指标层包括了水资源系统指标、水环境系统指标、水生态系统指标和社会经济系统指标,综合考虑载体与受载体间彼此依赖与制约的特征,并明确了指标体系的层次,在准则层的基础上对目标层加以分析,系统性的将人口、经济、社会与资源和生态环境等描述出来,展示其优点与特色,以期能更好的反映复合系统的水生态承载力。

3.2 指标权重的确定

根据上述所建立的汉江上游陕西段的水生态承载力评价指标体系,采用 yaahp 软件确定各个要素的权重,构造判断矩阵,计算一致性比率(CR)。

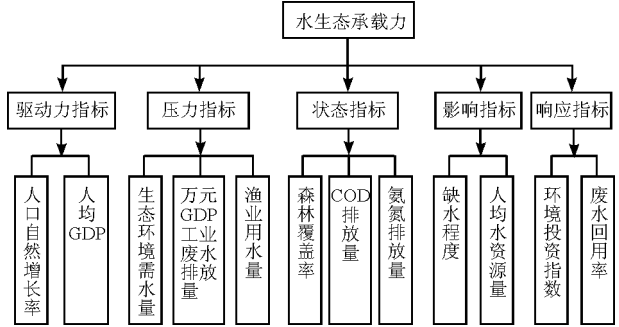


图 1 汉江上游(陕西段)水生态承载力评价指标体系图

设水生态承载力为A,驱动力指标为B₁、压力指标为B₂、状态指标为B₃、影响指标为B₄、响应指标为B₅,水生态承载力权重判断矩阵如表2,其中CR=0.0816<0.1,满足一致性要求。

表 2 水生态承载力权重判断矩阵

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	W _i
B ₁	1.0000	0.5000	0.5000	2.0000	2.0000	0.1944
B ₂	2.0000	1.0000	2.0000	2.0000	2.0000	0.3141
B ₃	2.0000	0.5000	1.0000	0.5000	2.0000	0.1944
B ₄	0.5000	0.5000	2.0000	1.0000	2.0000	0.1944
B ₅	0.5000	0.5000	0.5000	0.5000	1.0000	0.1027

在驱动力子系统指标体系中,设人口自然增长率为C₁,人均GDP为C₂,驱动力子系统指标权重判断矩阵如表3,其中CR=0<0.1,满足一致性要求。

表 3 驱动力子系统指标权重判断矩阵

B ₁	C ₁	C ₂	W _i
C ₁	1.00	0.50	0.33
C ₂	2.00	1.00	0.67

在压力子系统指标体系中,设生态环境需水率为C₃,万元GDP工业废水排放量为C₄,渔业用水量为C₅,压力子系统指标权重判断矩阵如表4,其中CR=0.0516<0.1,满足一致性要求。

表 4 压力子系统指标权重判断矩阵

B ₂	C ₃	C ₄	C ₅	W _i
C ₃	1.00	3.00	3.00	0.5936
C ₄	0.33	1.00	2.00	0.2493
C ₅	0.33	0.50	1.00	0.1571

在状态子系统指标体系中,设森林覆盖率为C₆,COD排放量为C₇,氨氮排放量为C₈,状态子系统指标权重判断矩阵如表5,其中CR=0.0176<0.1,满足一致性要求。

表 5 状态子系统指标权重判断矩阵

B ₃	C ₆	C ₇	C ₈	W _i
C ₆	1.00	0.3333	0.50	0.1692
C ₇	3.00	1.00	1.00	0.4434
C ₈	2.00	1.00	1.00	0.3874

在影响子系统指标体系中,设缺水程度为C₉,人均水资源量为C₁₀,影响子系统指标权重判断矩阵如表6,其中CR=0<0.1,满足一致性要求。

表 6 影响子系统指标权重判断矩阵

B ₄	C ₉	C ₁₀	W _i
C ₉	1.00	2.00	0.6667
C ₁₀	0.50	1.00	0.3333

在响应子系统指标体系中,设环保投资指数为C₁₁,废水回用率为C₁₂,响应子系统指标权重判断矩阵如表7,其中CR=0<0.1,满足一致性要求。

表 7 响应子系统指标权重判断矩阵

B ₅	C ₁₁	C ₁₂	W _i
C ₁₁	1.00	3.00	0.75
C ₁₂	0.33	1.00	0.25

4 水生态承载力模型体系的建立

4.1 系统动力学模型构建

根据水生态承载力的概念,构建汉江上游陕西段流域水生态承载力系统动力学模型,借助 VEN-SIM 软件描绘出水生态承载力系统动力学流图,并通过咨询专家,参考已有的研究,确定状态变量、速

率变量和辅助变量,确定系统的基本方程,从而得到系统内部联系。通过上述分析与研究,得到的系统动力学流图见图 2。

4.2 模型有效性检验

对建立的系统动力学模型进行有效性检验,对汉江流域(陕西段)2010-2013 年的仿真结果模拟值与实测值进行比较,结果如表 8 所示。

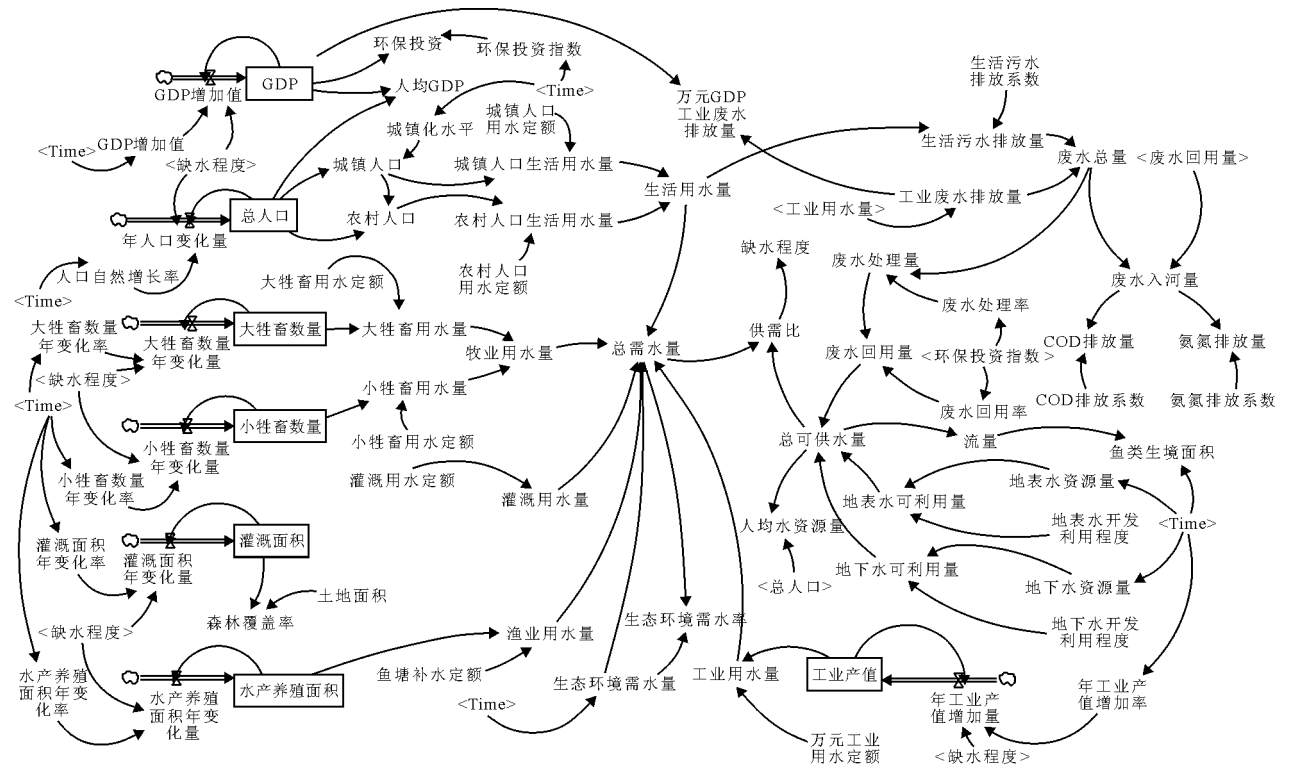


图 2 汉江流域(陕西段)水生态承载力系统动力学流图

表 8 系统动力学模型有效性检验结果

年份	人均 GDP/元			灌溉用水量/ 10^8 m^3			渔业用水量/ 10^4 m^3			森林覆盖率/%		
	实测值	模拟值	相对误差/%	实测值	模拟值	相对误差/%	实测值	模拟值	相对误差/%	实测值	模拟值	相对误差/%
2010	1.246	1.278	2.584	18.17	17.20	5.34	129017	124826.9	3.248	0.378	0.378	0
2011	1.459	1.504	3.085	18.77	17.22	8.26	129275	125076.6	3.248	0.378	0.378	0
2012	1.676	1.738	3.690	18.14	17.25	4.91	132041	127753.2	3.247	0.379	0.379	0
2013	1.940	2.028	4.564	18.10	17.26	4.64	137413	132965.5	3.237	0.379	0.379	0

检验结果表明,汉江流域(陕西段)水生态承载力系统动力学模型模拟的生产总值、灌溉面积、工业产值、灌溉用水量的真实值与模拟值的相对误差均小于 10%^[19],吻合度较好,说明该模型可以用于汉江流域(陕西段)水生态承载力的预测。

5 水生态承载力评估及调控

5.1 水生态承载力评估

借助建立的水生态承载力系统动力学模型,对水生态承载力进行模拟,得到各指标的数据,将其进行指标化分析得到其数值,随后采用隶属度法将转

化为可量化的数据,得到最终的生态承载力。针对汉江流域(陕西段)采用以下的量化模型来计算水生态承载力分值。

$$E_j = \sum_{i=1}^n w_i S_{ij} \tag{1}$$

式中: E_j 为 j 方案的水生态承载力分值; W_i 为 i 指标在系统中的层次总权重值; S_{ij} 为 j 方案 i 指标的分数值。

根据求得的水生态承载力分值可以对整个系统的“可承载状况”进行分级,见表 9,每个级别对应不同的分值区间,以此来描述水生态承载。

表 9 水生态承载力承载程度分级

承载程度	0~0.2	0.2~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
分级类型	不可承载	弱可承载	基本可承载	良好可承载

依据已建立的流域水生态承载力系统动力学模型,结合流域水生态承载力指标体系中各个指标的模拟和由层次分析法求出的各个指标的总权重值,利用公式(1)可计算得出汉江上游(陕西段)流域水生态承载力量化值如下图 3 所示。

由图 3 中可以看出自 2012 年之后各生态分区承载力逐年减小,其原因主要是近年来,汉江流域区域工农业经济的发展和人口剧增,越来越多工业污水、农田排水进入水体,导致水体水质变差,与此同时,汉江上游的过度开垦,乱砍滥伐,水土流失不断

加重,生态环境遭到破坏。根据图 3 的结果,结合可承载度的类型分类表 9,分析可得汉江上游(陕西段)流域水生态承载力整体处于弱可承载的状态。

5.2 水生态承载力调控

为了使汉江上游(陕西段)流域水生态承载状况得到改善。根据汉江上游(陕西段)流域的实际情况采用以下 7 个策略来模拟汉江上游(陕西段)流域水生态承载力状况,使汉江上游(陕西段)流域水生态承载力系统持续良好的发展的同时让其生态环境资源的利用达到最大化。各方案汇总如表 10。

根据以上 7 种调整方案利用已建立的汉江上游(陕西段)流域水生态承载力系统动力学模型对各水功能分区进行模拟,部分结果如图 4~9 所示。

综合比较各调控方案可以看出:各方案均使水生态承载力得到明显的提升,但总体依然呈下降趋势。相较于原始方案,采用方案 7 对流域水生态承载力进行调控后,流域水生态承载力的下降趋势明显降低,流域水生态承载力有了明显地提高。根据上述 7 个方案模拟的结果可以得出,采取的调控措施越多,流域水生态承载力的提高就越显著,改善汉江上游(陕西段)流域各水功能分区的水生态承载力状况的效果就越明显。所以,应进行工业、人口、植被面积、污水处理、水资源开发程度等多个方面的全面综合调控,才能较好提高汉江上游(陕西段)流域水生态承载力。

表 10 水生态保护方案设计

											%
方案	年份	人口增长率	城镇化率	环保投资指数	万元产值用水量	COD 排放系数	渔业用水量	灌溉面积变化率	牲畜数量变化率	GDP 增长率	水资源开发程度
1	2010-2015	-0.2	-0.2	0.3	-1	-0.2	-	-	-	-	-
2		-0.2	-0.2	-	-	-	-0.5	0.03	-0.2	-	-
3		-0.2	-0.2	-	-	-	-	-	-	-0.5	-0.1
4		-	-	0.3	-1	-0.2	-0.5	0.03	-0.2	-	-
5		-	-	0.3	-1	-0.2	-	-	-	-0.5	-0.1
6		-	-	-	-	-	-0.5	0.03	-0.2	-0.5	-0.1
7		-0.2	-0.2	0.3	-1	-0.2	-0.5	0.03	-0.2	-0.5	-0.1
1	2016-2020	-0.1	-0.1	0.2	-0.8	-0.1	-	-	-	-	-
2		-0.1	-0.1	-	-	-	-0.3	0.02	-0.1	-	-
3		-0.1	-0.1	-	-	-	-	-	-	-0.2	-0.05
4		-	-	0.2	-0.8	-0.1	-0.3	0.02	-0.1	-	-
5		-	-	0.2	-0.8	-0.1	-	-	-	-0.2	-0.05
6		-	-	-	-	-	-0.3	0.02	-0.1	-0.2	-0.05
7		-0.1	-0.1	0.2	-0.8	-0.1	-0.3	0.02	-0.1	-0.2	-0.05

注:表中各数据的正负表示逐年增加或减小;“-”表示在原基础上保持不变。

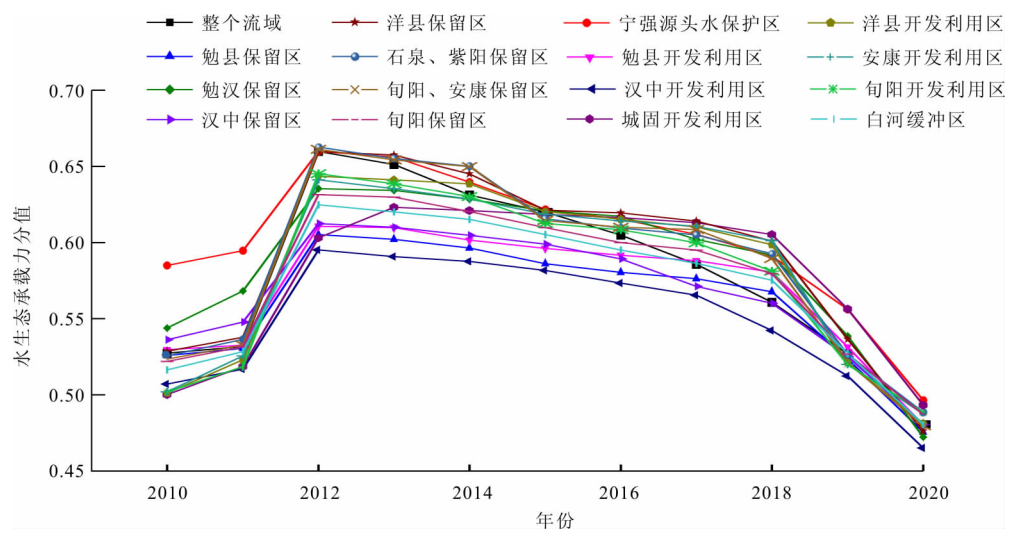


图3 汉江流域(陕西段)水生态承载力变化

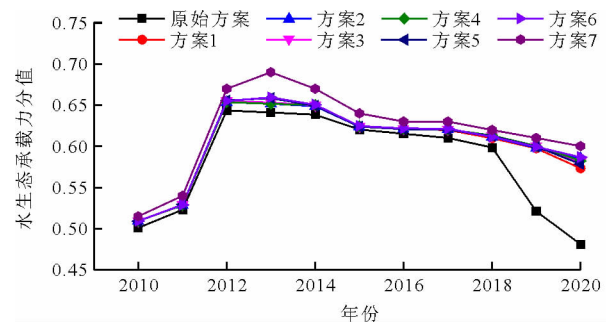


图4 各方案下宁强源头水保护区水生态承载力模拟

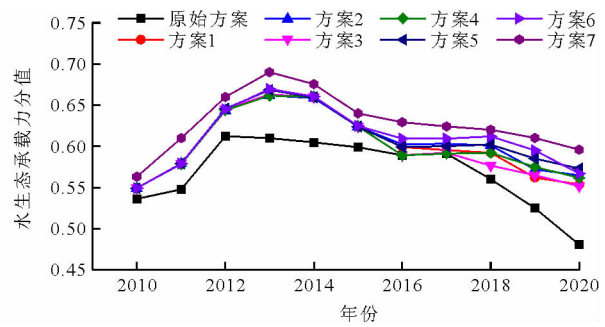


图5 各方案下汉中开发利用区水生态承载力模拟

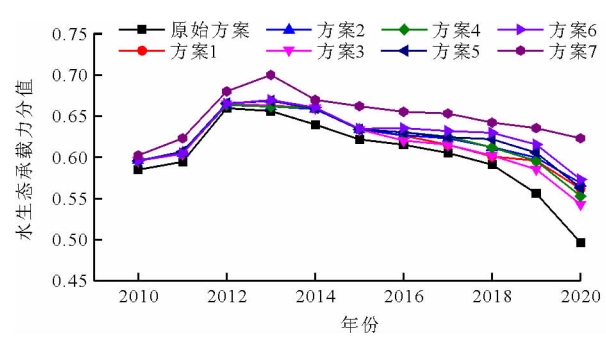


图6 各方案下城固开发利用区水生态承载力模拟

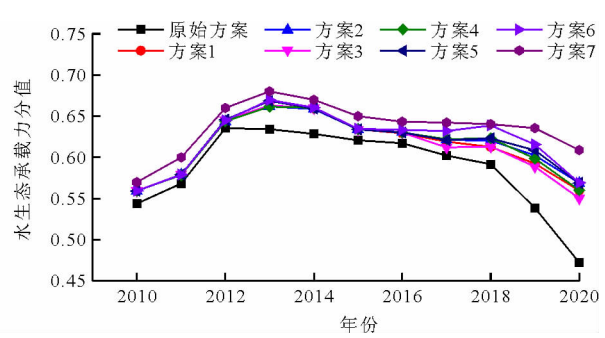


图7 各方案下洋县开发利用区水生态承载力模拟

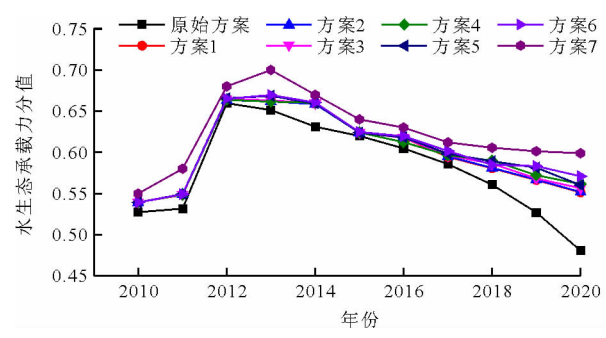


图8 各方案下安康开发利用区水生态承载力模拟

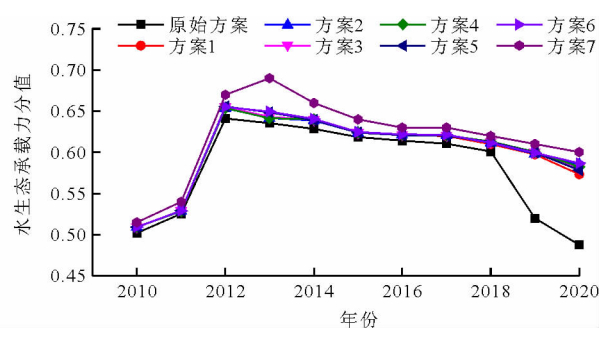


图9 各方案下汉江上游(陕西段)水生态承载力模拟

6 结 论

(1) 构建了基于 D-P-S-I-R 框架模型的汉江流域(陕西段)水生态指标体系,并在此基础上确定了汉江流域(陕西段)水生态指标的权重。对汉江流域(陕西段)进行了系统结构分析和因果关系分析,构建了汉江流域水生态承载力的系统动力学模型,经过有效性检验表明该模型可用于汉江流域(陕西段)水生态承载力的研究。

(2) 基于系统动力学、层次分析法和隶属度方法建立的水生态承载力量化模型来量化评估汉江流域(陕西段)水生态承载力,得到在现状发展的情况下汉江流域(陕西段)处于弱可承载状态。

(3) 根据社会发展和技术水平研究了 7 种调控方案对水生态承载力进行分析对比,各方案均使水生态承载力得到提升并且在综合方案下水生态承载力提高最为显著,使汉江流域(陕西段)达到了基本可承载状态。

参考文献:

- [1] 曾 晨,刘艳芳,张万顺,等. 流域水生态承载力研究的起源和发展[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(2):203-210.
- [2] 谭红武,杜 强,彭文启,等. 流域水生态承载力及其概念模型[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2011,9(1):1-8.
- [3] 王西琴,高 伟,何 芬,等. 水生态承载力概念与内涵探讨[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2011,9(1):41-46.
- [4] 王玉敏,周孝德,冯成洪,等. 湖泊水环境承载力研究[J]. 水土保持学报,2004,18(1):179-184.
- [5] 崔凤军. 城市水环境承载力及其实证研究[J]. 自然资源学报,1998,13(1):58-62.
- [6] ZHU Yonghua, DRAKE S, LÜ Haishen, et al. Analysis of temporal and spatial differences in eco-environmental carrying capacity related to water in the Haihe River Basins, China[J]. Water Resources Management, 2010,24(6):1089-1105.
- [7] 姚治君,王建华,江 东,等. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探析[J]. 水科学进展,2002,13(1):111-115.
- [8] SONG Xiaomeng, KONG Fanzhe, ZHAN Chesheng. Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin City of China[J]. Water Resources Management, 2011, 25(3):857-873.
- [9] 金菊良,沈时兴,郦建强,等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(1):1-9.
- [10] 张万顺,齐 迪,幸 娅,等. 区域水生态承载力的量化研究与应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2011,44(5):560-564.
- [11] 宋 策,李 靖,周孝德. 基于水生态分区的太子河流域水生态承载力研究[J]. 西安理工大学学报,2012,28(1):7-12.
- [12] 刘子刚,郑 瑜. 基于生态足迹法的区域水生态承载力研究——以浙江省湖州市为例[J]. 资源科学,2011,33(6):1083-1088.
- [13] 李 靖,周孝德. 叶尔羌河流域水生态承载力研究[J]. 西安理工大学学报,2009,25(3):249-255.
- [14] RANDHIR T O, HAWES A G. Watershed land use and aquatic ecosystem response: ecohydrologic approach to conservation policy[J]. Journal of Hydrology, 2009, 364(1):182-199.
- [15] HASSANZADEH E, ZARGHAMI M, HASSANZADEH Y. Determining the main factors in declining the urmia lake level by using system dynamics modeling[J]. Water Resources Management, 2012, 26(1):129-145.
- [16] 王西琴,高 伟,曾 勇. 基于 SD 模型的水生态承载力模拟优化与例证[J]. 系统工程理论与实践,2014, 34(5):1352-1360.
- [17] 李 珊. 太子河流域水生态承载力研究[D]. 西安:西安理工大学,2012.
- [18] 陕西省人民政府办公厅. 陕西省人民政府办公厅文件 陕西省水功能区划[S]. 2004.
- [19] 李 靖,周孝德,程 文. 太子河流域不同生态分区的水生态承载力年内变化研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2011, 9(1):74-80.