

资源性缺水地区流域水环境承载力 评价模型及其应用

焦露慧, 吴巍, 周孝德, 李景远, 吴皎

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培养基地, 陕西 西安 710048)

摘要: 在深入探讨水环境承载力理论体系的基础上, 构建了基于水环境容量和生态环境需水量的水环境承载力评价预测模型, 形成了适用于我国西北干旱区资源性缺水地区的水环境承载力研究体系。以陕西渭河段为例, 通过建立河流水环境容量模型、生态需水量模型, 应用系统动力学法并结合层次分析法模拟了流域水环境系统的动态变化, 并且预测了2010-2020年不同方案下的水环境承载能力。结果表明: 将开源、节流、治污等结合的综合方案可有效提高渭河流域水环境承载能力, 所建模型对西北干旱区水环境承载力评价具有很好的适用性。

关键词: 资源性缺水; 水环境承载力; 水环境容量; 生态环境需水量; 系统动力学

中图分类号: X828 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)06-0077-06

Evaluation model and application of water environmental carrying capacity in basins short of water resources

JIAO Luhui, WU Wei, ZHOU Xiaode, LI Jingyuan, WU Jiao

(State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The article constructed the prediction and evaluation model of water environment carrying capacity of water environment capacity and ecological environment water demand based on the profound research of water environment carrying capacity systems, and formed a set of mature water environment carrying capacity research systems which is suitable for the arid area of northwest China short of water resources. Taking Weihe River in Shaanxi as an example, this paper applied system dynamics combined with analytic hierarchy process to simulate the dynamic changes of river water environmental system through the establishment of river water environmental capacity model and ecological water demand model, and forecasted the water environmental carrying capacity for different schemes from 2010 to 2020. The results showed the integrated scheme of open-source, throttle and pollution control can effectively improve the water environment carrying capacity in Weihe River basin. The constructed model has good applicability to the evaluation of water environment carrying capacity in northwest arid areas.

Key words: shortage of water resources; water environment carrying capacity; water environment capacity; ecological environment water demand; system dynamics

水资源短缺和水环境破坏已经成为全球性的严峻问题, 其中在西北、华北等干旱与半干旱地区, 资源性缺水问题是制约该地区工农业及社会经济发展的主要因素^[1]。水环境承载力作为衡量水资源是否具有可持续性的重要指标, 对协调流域经济-社会-环境的可持续发展具有重要意义。

目前国内诸多学者就水环境承载力的定义内涵、计算指标及量化方法等开展了大量分析研究, 并取得了丰富成果。王俭等^[2]采用层次分析法和向量模法相结合的方法, 应用系统动力学模型模拟了辽宁省水环境系统的动态变化, 预测了2000-2050年辽宁省水环境在不同发展方案下的承载能力; 杨

收稿日期: 2015-06-29; 修回日期: 2015-07-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)前期研究专项项目(2012CB723200); 国家自然科学基金项目(50579061); 陕西省自然科学基金研究计划项目(2014JQ7285)

作者简介: 焦露慧(1990-), 女, 山西晋城人, 在读硕士研究生, 主要从事水环境模拟方面的研究。

通讯作者: 吴巍(1980-), 男, 陕西西安人, 博士, 讲师, 主要从事环境水力学方面的研究。

丽花等^[3]在分析流域水环境承载力与经济发展非线性关系的基础之上,建立了基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型,并将其应用到吉林省松花江流域的研究中;李如忠^[4]构建了城市区域水环境承载力评价指标体系,提出了层次分析法与统计学法相结合的区域水环境承载力状态趋势评价模型;蒋晓辉等^[5]通过建立多目标大系统分析协调模型,对陕西关中地区的水环境承载力进行了研究。总体来看,由于水环境承载力研究涉及范围广、内容复杂,至今仍未形成成熟的理论和方法体系,如何建立适用于资源性缺水地区的水环境承载力评价模型,仍是需要深入研究的问题。

基于上述因素,本研究立足于我国西北资源性缺水地区,深入探讨水环境承载力的理论体系;结合可靠、适宜的量化方法,建立水环境承载力评价模型;通过对实际流域的评价研究,寻求科学、完整的流域水生态承载力评价思路;为资源性缺水地区的流域管理决策提供切实可行的方案,对于协调水资源利用与经济活动之间的关系,实现流域生态环境与社会经济的科学、健康、可持续发展,具有重要而深远的意义。

1 水环境承载力概念及指标评价体系

1.1 水环境承载力定义及内涵

针对我国西北地区水资源短缺、生态环境脆弱的特点,本研究在全面总结和深入辨析相关理论发展演变历程的基础上,以可持续发展的观点完善了早期用“阈值”定义的水环境承载力^[6],最终将水环境承载力定义为:在一定时期和区域内,在一定社会经济发展和环境质量保护要求下,水环境功能可持续发展且不朝恶性方向转变或者发展的条件下,水环境系统所能支撑的人口、经济、社会可持续发展规模的阈值。

这一定义体现了水环境承载力的客观性(由“一定时期和区域”即时空性决定),可调性(受“社会经济发展和环境质量保护要求”等人为因素影响)及相对极限性(通过“阈值”体现)3个重要特征,强调了水环境功能健康是支撑社会经济可持续发展的前提和水环境承载力的基础,在明确水环境承载力的承载对象是“人口、经济、社会可持续发展规模”的同时,又暗含了水环境承载力对自身纳污能力与生态健康的承载要求。

1.2 资源性缺水地区水环境承载力指标体系

1.2.1 指标体系的构建与权重确定 根据水环境

承载力的概念及影响因素,结合资源性缺水地区的区域特点,本研究将水环境承载力指标体系涵盖至水资源、水环境、社会经济和水生态等多个方面,包括了从水资源-水生态-社会经济复合系统等宏观领域到水污染控制、水环境容量、生态环境需水量等微观领域,涉及众多学科,影响因素众多。在对上述指标进行筛选后,建立具有多层结构,多个单项指标的水环境承载力指标体系。

对于指标权重,采用层次分析法确定^[7]。首先根据表1所示的标度准则构造判断矩阵,在对同一层次的各元素进行两两比较时,按选取的标度确定每一准则下各个指标的相对重要程度,用数值形式给出判断^[8]。

表1 相对重要性标度

标度	定义
1	两个元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 对某个属性同等重要
3	两个元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 比较, <i>i</i> 比 <i>j</i> 稍微重要
5	两个元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 比较, <i>i</i> 比 <i>j</i> 比较重要
7	两个元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 比较, <i>i</i> 比 <i>j</i> 十分重要
9	两个元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 比较, <i>i</i> 比 <i>j</i> 绝对重要
2,4,6,8	表示介于上述两个标准之间折衷时的标度
$1/b_{ij}$	两个元素 <i>i</i> 与 <i>j</i> 的反比较

(1)单层次排序。根据判断矩阵确定各层次指标项的相对权重,即计算判断矩阵最大特征根及其对应的特征向量。

(2)层次总排序。即同一层次所有元素对于目标层相对重要性的排序权值。

(3)一致性检验。根据一致性比率,见公式(1),对判断矩阵进行检验。当 $CR < 0.1$ 时,判断矩阵具有可接受的一致性,符合层次分析法的要求,否则,需对判断矩阵的标度进行修正^[9]。其中 CI 计算公式如(2), RI 从表2中选取。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (1)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1} \quad (2)$$

式中: CR 、 CI 、 RI 为检验指标; n 为元素个数; λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征根。

表2 平均随机一致性指标 RI 值

		阶数										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.52	1.54	

1.2.2 区域水环境承载力的量化 基于模糊数学中“隶属度”的概念,可以对整个水环境系统的“可承载”状况进行分类。考虑到各个指标对水环境承载力的影响大小不同,引入总权重 w_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 表示各分指标对总体的影响程度,则 j 方案水环境承载度可用公式计算^[10]:

$$E_j = \sum_{i=1}^n w_i s_{ij} \quad (3)$$

式中: s_{ij} 为 j 方案 i 指标的分数值; w_i 为 i 指标在系统中的层次总权重。

将经过无量纲化处理的各指标分数值与对应权重之积加和,便得出水环境承载力的最终计算结果。根据可承载隶属度大小,可对整个区域水环境系统的“可承载”状况进行分类,如表3。

表3 可承载隶属度与可承载类型的对比

可承载隶属度	0~0.2	0.2~0.6	0.6~0.8	0.8~1.0
类型	不可承载	弱承载	基本可承载	良好可承载

2 基于水环境容量和生态需水量的区域水环境承载力研究

水环境承载力,是在水质满足当前水环境质量标准,流域能够维持自身生态环境健康发展的前提下的水环境承载能力。对于资源性缺水地区,流域生态需水量计算是水环境承载力研究的一个关键限制因子,而水环境容量则是反映水生态环境与社会经济活动密切关系的度量尺度。鉴于以上原因,在研究资源性缺水地区的水环境承载力时,纳入了水环境容量和生态需水量的分析计算。

2.1 基于水动力学模型的水环境容量研究

2.1.1 基于水动力学的水质预测模型 本研究采用的水环境容量概念是在给定区域和水文、水力学条件,给定排污口位置情况下,满足水域某一水质标准的最大污染物排放量,即为该区域在上述条件下所能容纳的污染物质总量,通称区域允许纳污量或水环境容量。而水质模型是水体中污染物变化规律的数学描述,可以为水环境容量计算提供重要的理论基础。在河流水环境容量计算中,认为污染物在河段横断面上均匀混合,仅考虑污染物在水流方向上的浓度变化,因此可采用一维水流-水质模型为基础计算水环境容量。河流一维水质模型控制方程为^[11]:

$$u \frac{\partial c}{\partial x} = E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - kc + c^* \quad (4)$$

忽略弥散作用, $E = 0$:

$$C_x = C_0 \exp\left(-K \frac{x}{u}\right) \quad (5)$$

式中: u 为断面平均流速, km/d; c 为污染物浓度, mg/L; x 为河水流经距离, km; E 为纵向弥散系数, km^2/d ; k 为污染物降解系数, $1/\text{d}$; c^* 为污染物侧向排污均匀入流的浓度, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{d})$; C_x 为流经 x 距离后的污染物浓度, mg/L; C_0 为上游来水的污染物浓度, mg/L。

2.1.2 河流水环境容量模型^[12]

(1) 段首控制:

$$E = E_0 + \sum E_i = Q_0(C_s - C_0) + \sum_{i=1}^n [(Q_i + q_i)C_s - Q_i C_s f(x_i - x_{i-1})] \quad (6)$$

(2) 段尾控制:

$$E = E_0 + \sum E_i = Q_0(C_s - C_0) + \sum_{i=0}^{n-1} \left[C_s(Q_{i+1} + q_i + 1) \frac{1}{f(x_{i+1} - x_i)} - Q_{i+1} C_s \right] \quad (7)$$

(3) 功能区段段末控制:

$$C_n = \frac{(Q_n C_n f(x_n - x_{n-1}) + q_n c_n)}{Q_n + q_n} \quad (8)$$

式中: E_0 为功能区段段首的稀释容量, t/d ; C_s 为功能区段水质标准, mg/L; Q_0 为来水流量, m^3/s ; C_0 为来水的污染物浓度, mg/L; Q_i 为混合后干流流量, m^3/s ; q_i 为第 i 河段的排污量, m^3/s ; x 为沿河段的纵向距离, m; $f(x)$ 为污染物随河水流动的降解函数。 Q_n 、 C_n 为最终控制断面的干流流量, m^3/s 及浓度, mg/L; q_n 、 c_n 为最终控制断面处的排污流量, m^3/s 及浓度, mg/L。

2.2 河流生态需水量模型研究

根据水在河流生态系统中的功能和作用,从河道外生态需水和河道内生态需水两方面进行考虑。河道外生态需水主要是天然植被和人工植被需水量;河道内生态需水则包括河道生态基流量、河道输沙需水量、河道蒸发渗漏需水量、河流自净需水量这几个方面。其中河道生态基流量即河道基本生态环境需水量,是生态环境需水的一个重要组成部分,其定义为一定时间和空间范围内,为维系和保护河流最基本的生态功能不受破坏,河道内持续流动的最小水资源总量。较为常用的方法有 Tennant 法、流量历时曲线法、湿周法和最枯月平均流量法^[13-15]。

具体数学模型应根据流域自然环境状况和基础资料进行选择,对于上述指标中有重叠的计算结果还需进一步分析确定最终的取值。

2.3 系统动力学模型的构建

在分析对比已有水环境承载力研究方法的基础之上,将系统动力学模型用于资源性缺水地区的水环境承载力评价与预测,利用其处理高阶次、非线性、多重反馈时变系统问题的优势,描述水环境承载力体系中变量间的交互关系^[16]。具体建模流程为:

(1)分析水环境承载力概念模型,确定子系统中各指标之间的因果反馈关系;

(2)构建水环境承载力系统动力学模型;

(3)依据区域或流域边界确定系统边界;

(4)对不同年的各指标值进行归一化处理,再结合运用层次分析法确定的各指标权重代入隶属度公式,计算得出现状条件下,不同年份的水环境承载力可承载度;

(5)对模型的有效性和可靠性进行检验,同时模拟预测区域当前及未来一段时间内,各年各指标的具体值。

3 实例分析—以陕西渭河段为例

3.1 流域概况

渭河是黄河的最大支流,发源于甘肃省渭源县西南的鸟鼠山,自西向东流经甘肃、宁夏、陕西三省区,由宝鸡县风铃阁进入陕西关中地区,横贯宝鸡、咸阳、西安、渭河、铜川等5地市数十城镇,在潼关县港口注入黄河,在陕境内总长度 504.4 km,流域面积 6.71 万 km²。渭河流域关中地区工农业发达,人口密集,是陕西省主要的经济支柱。近 30 年来,随着周边城市化和沿线工业经济的发展,大量工业废水、农田排水及城市生活污水进入渭河,使其水质恶化,生态环境发展失衡。水污染严重、水资源短缺、水供需矛盾等问题日益突出,成为制约渭河流域可持续发展的主要因素之一。

3.2 研究方法

3.2.1 指标体系的构建及权重确定 根据科学性、协调性、全面性、客观性、层次性等准则并结合流域自身的特点,将水环境承载力系统分为社会经济、水环境和水生态 3 大子系统,构成含有 10 项单项指标的渭河流域水环境承载力指标体系,如图 1。采用层次分析法计算各指标权重结果见表 4。

3.2.2 水环境容量研究 根据渭河多年的水质监测结果,COD 为渭河流域的主要污染物,因此选取

COD 作为流域水环境容量的评价因子,在一维稳态水质模型条件下,采用段首控制高功能段和段末控制低功能段相结合的方法,分别计算了 50%、75%、95% 频率下 COD 的水环境容量,如表 5。

结果表明渭河中游区段污染较为严重,同时设计流量越大,水环境容量越大,为了充分地利用河流的自净能力进行排污,可以在不同流量下提出不同的排污量。

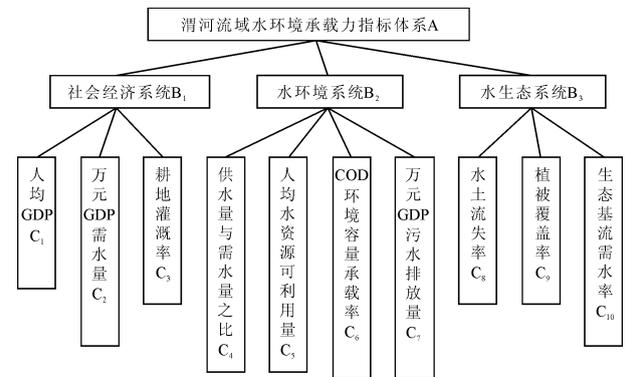


图 1 渭河陕西段水环境承载力指标体系

表 4 水环境承载力指标权重

目标层	准则层	权重	指标层	分权重	综合权重
水环境承载力指标体系 A	社会经济 B ₁	0.3108	C ₁	0.3325	0.1034
			C ₂	0.5278	0.1641
		C ₃	0.1396	0.0434	
	水环境 B ₂	0.4934	C ₄	0.3635	0.1793
			C ₅	0.2161	0.1066
			C ₆	0.0821	0.0405
			C ₇	0.3383	0.1669
	水生态 B ₃	0.1958	C ₈	0.1634	0.0320
			C ₉	0.2970	0.0581
			C ₁₀	0.5396	0.1057

3.2.3 生态基流量计算 针对生态环境需水量模型,结合渭河流域现有的资料情况,选择 Tennant 法与最枯月平均流量法分别对渭河的生态基流量进行计算,见表 6,然后根据两种方法结果的合理性对比分析,来确定渭河生态基流量。结果表明,渭河河道生态基流量与天然来水量的变化趋势基本一致。考虑到渭河周边的生态环境,本研究采用取大的原则,暂定渭河林家村、魏家堡、咸阳、临潼和华县各断面生态基流量较佳值分别为:10.74、20.61、42.59、62.14、62.48 m³/s。

表 5 渭河陕西段各频率年的 COD 水环境容量计算

功能区段名称	河段长度/km	COD 年允许排放量/ 10 ³ (t·a ⁻¹)		
		95%	75%	50%
		林家村-卧龙寺	20.1	1.569
卧龙寺-虢镇	12.3	0.522	1.016	1.818
虢镇-蔡家坡	22.4	0.634	1.423	2.689
蔡家坡-汤峪入渭	44.0	0.839	1.904	3.174
汤峪入渭-漆水河口	16.2	0.604	1.423	2.041
漆水河口-咸阳公路桥	63.0	4.106	7.789	10.405
咸阳公路桥-铁路桥	3.8	1.077	2.906	4.177
铁路桥-沔河入口	5.4	0.099	0.279	0.405
沔河入口-210 国道桥	19.5	5.282	7.931	9.770
210 国道桥-零河入口	56.4	8.368	16.597	24.010
零河入口-王家城子	96.8	28.026	36.240	53.537
王家城子-入黄口	29.7	3.535	5.048	7.021
合计		54.660	85.094	123.222

表 6 渭河多年平均河道生态基流量计算 m³/s

方法	林家村	魏家堡	咸阳	临潼	华县	
Tennant 方法	25%	8.83	15.68	23.10	38.48	41.70
	50%	5.85	8.73	12.15	22.34	21.03
	75%	3.11	5.19	6.57	10.42	9.82
	95%	1.61	1.27	2.61	9.18	8.47
多年平均	6.31	9.26	12.05	20.75	20.58	
最枯月平均流量法	10.74	20.61	42.59	62.14	62.48	

3.3 结果与讨论

3.3.1 水环境承载力评价 通过系统动力学模型对水环境承载力指标体系的各指标值进行模拟,对其进行分数确定,然后再把计算的各个指标权重,代入公式(3)中便可以计算出现状条件下不同年份的水环境承载力可承载隶属度,见表 7。可以看出,按目前发展,若不采取任何措施,渭河流域陕西段水环境承载力呈现连续下降的趋势,处于弱可承载范围。

表 7 现状条件下水环境可承载隶属度

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
可承载隶属度	0.402	0.389	0.375	0.366	0.358	0.344	0.332	0.319	0.308	0.296	0.282

3.3.2 不同提高方案下的水环境承载力 根据上述建立的渭河流域陕西段水环境承载力评价指标体系,依据《国家环境保护“十二五”规划》、《陕西省水利发展“十二五”规划》以及《渭河流域水污染防治 3 年行动方案(2012-2014 年)》,本文设计 8 种不同的提高方案模拟 2010-2020 年各指标的变化情况,从而提高流域水环境承载力,促进生态环境和社会经济协调发展,具体拟定方案如表 8 所示。将不同方案下,渭河流域陕西段水环境承载力的可承载隶属度绘制成图,见图 2。可以看出,方案 1 的工业节水措施优于方案 2 的农业节水措施,能够较大幅度地提高流域水环境承载力,但两者总体都有下降的趋势,不能长时间

满足发展需求。方案 3 和 4 相比,污染源的控制效果更为明显,但相差不大,且在一定的科技水平下,污水排放系数和 COD 排放系数的减少量都有限,因此对整个系统承载力的提升不够理想。开源方案 5 和 6 对水环境承载力的改善不大,保持在不下水平,但在方案 7 中,水资源开发量增加,能够有效改善流域水环境现状,但随着社会经济的发展,水资源供需矛盾还会不断增加,使得水环境承载力升高趋势逐渐变缓。综合方案考虑了节水、治污、开源等多项措施,使渭河流域水环境承载力有显著的提高,达到基本可承载的程度,较任何一个单一措施下的水环境承载力都要大,因此为最佳发展方案。

表 8 渭河流域水环境承载力提高方案

方案	策略	手段	对应指标
原始方案	保持现状	以现状水处理水平为基础,作为参考方案	
方案 1	工业节水	通过调整产业结构,改进生产工艺和设备,增加工业用水重复利用率,降低工业万元产值用水量	C ₁ 、C ₂ 、C ₇
方案 2	农业节水	增加农业灌溉水利用系数,降低农田、草场、林果等地的灌溉用水定额	C ₃ 、C ₉
方案 3	治污	逐年降低工业污水、城镇生活污水排放系数	C ₇
方案 4	治污	降低 COD 排放系数	C ₆
方案 5	开源	提高农业灌溉回归系数	C ₃ 、C ₉
方案 6	开源	提高工业废水、生活污水回用率	C ₆ 、C ₇
方案 7	开源	提高地表水和地下水资源开发利用程度	C ₄ 、C ₅ 、C ₈ 、C ₁₀
综合方案	节水、治污、开源	综合方案 1~7,将节水、治污和开源相结合	C ₁ ~C ₁₀

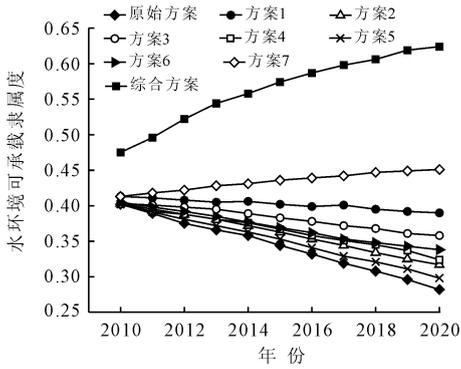


图2 不同方案下的渭河流域水环境承载力对比

4 结 语

(1) 针对我国西北干旱区资源性缺水区域的水环境、水生态及社会经济特点,本研究系统完善了用阈值定义的水环境承载力概念,优化了资源性缺水地区流域水环境承载力指标体系,形成了一套成熟的水环境承载力研究体系。将基于水动力学模型的的水环境容量和生态环境需水量计算纳入水环境承载力研究,运用层次分析法确定水环境承载力指标权重,借助系统动力学方法描述水环境承载力评价体系中各子系统之间的关系,并引入隶属度的概念,量化分析了流域水环境承载力,进而为资源性缺水地区的流域水环境管理提供理论依据与技术支持。

(2) 以渭河流域陕西段为例,建立了水环境承载力评价指标体系并确定出各单项指标相对于目标层的权重,计算了COD的水环境容量和河流的生态基流量,结合系统动力学法进行了水环境承载力指数的计算,并预测了不同方案下流域水环境承载力的变化趋势,得出流域发展的最优方案。根据综合方案,可以采取工业农业节水、污水资源化、提高污水处理率、加强生态建设、健全水资源保护等具体措施,保证渭河流域生态环境的可持续发展。

参考文献:

[1] 王 瑗,盛连喜,李 科,等. 中国水资源现状分析与可持续发展对策研究[J]. 水资源与水工程学报, 2008,19(3): 10-14.

[2] 王 俭,李雪亮,李法云,等. 基于系统动力学的辽宁省水环境承载力模拟与预测[J]. 应用生态学报, 2009,20(9):2233-2240.

[3] 杨丽花,佟连军. 基于BP神经网络模型的松花江流域(吉林省段)水环境承载力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013,27(9):135-140.

[4] 李如忠. 基于指标体系的区域水环境动态承载力评价研究[J]. 中国农村水利水电, 2006(9):42-46.

[5] 蒋晓辉,黄 强,惠洪河,等. 陕西关中地区水环境承载力研究[J]. 环境科学学报, 2001,21(3):312-317.

[6] 王 俭,孙铁珩,李培军,等. 基于人工神经网络的区域水环境承载力评价模型及其应用[J]. 生态学, 2007,26(1):139-144.

[7] 张小君,徐中民,宋晓谕,等. 几种水环境质量评价方法在青海湖入湖河流中的应用[J]. 环境工程, 2013,31(1):117-121.

[8] 李 磊,贾 磊,赵晓雪,等. 层次分析-熵值定权法在城市水环境承载力评价中的应用[J]. 长江流域资源与环境, 2014,23(4):456-460.

[9] 李 新,石建屏,曹 洪. 基于指标体系和层次分析法的洱海流域水环境承载力动态研究[J]. 环境科学学报, 2011,31(6):1338-1344.

[10] 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.

[11] 杨杰军,王 琳,王成见,等. 中国北方河流环境容量核算方法研究[J]. 水利学报, 2009,40(2):194-200.

[12] 周孝德,郭瑾珑,程 文,等. 水环境容量计算方法研究[J]. 西安理工大学学报, 1999,15(3):1-6.

[13] 冯夏清,章光新,尹雄锐. 基于生态保护目标的太子河下游河道生态需水量计算[J]. 环境科学学报, 2010,30(7):1466-1471.

[14] 崔 瑛,张 强,陈晓宏,等. 生态需水理论与方法研究进展[J]. 湖泊科学, 2010,22(4):465-480.

[15] 王根绪,张 钰,刘桂民,等. 干旱内陆流域河道外生态需水量评价——以黑河流域为例[J]. 生态学报, 2005,25(10):2467-2476.

[16] 朱 洁,王 烜,李春晖,等. 系统动力学方法在水资源系统中的研究进展述评[J]. 水资源与水工程学报, 2015,26(2):32-39.