

# 基于改进熵权法的水资源承载力评价

——以曲陆坝区为例

王正选<sup>1,2</sup>, 王静<sup>1,2</sup>, 杨婷婷<sup>2,3</sup>, 曹扬<sup>1,2</sup>, 行仙峰<sup>2,3</sup>, 刘寒梅<sup>1,2</sup>, 李靖<sup>1</sup>

(1. 云南省高校水安全与节水减排重点实验室, 云南昆明 650201; 2. 云南农业大学水利学院, 云南昆明 650201; 3. 云南农业大学资源与环境学院, 云南昆明 650201)

**摘要:** 水资源是一种战略性自然资源, 对于维护区域生态环境安全和促进社会经济可持续发展具有重要意义。通过构建水资源的模糊综合评价模型, 利用秩比法和最小相对信息熵原理对传统熵权法进行改进。在耦合客观与主观因素的基础上, 结合区域特点选取 14 个评价指标对曲陆坝区 5 个水平年水资源承载力进行评价分析。结果表明在无调水的情况下, 5 个水平年水资源承载力综合评价值分别为: 0.479、0.390、0.335、0.287、0.283; 在有调水的情况下, 5 个水平年水资源承载力综合评价值分别为 0.446、0.367、0.323、0.351、0.365, 通过比较分析, 说明外流域调水能显著改善水资源承载力状况。

**关键词:** 水资源承载力; 模糊综合评价法; 改进熵权法; 评价指标

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0082-06

## Evaluation of water resources carrying capacity based on improved entropy weight method: A case study in Qulu dam area

WANG Zhengxuan<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>1,2</sup>, YANG Tingting<sup>2,3</sup>, CAO Yang<sup>1,2</sup>,  
XING Xianfeng<sup>2,3</sup>, LIU Hanmei<sup>1,2</sup>, LI Jing<sup>1</sup>

(1. Yunnan Province Key Laboratory of Water Security and Water Saving and Emission Reduction, Kunming 650201, China; 2. College of Water Resources and Hydraulic Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** Water resource is one kind of strategic natural resource, which is of great significance for the maintenance of regionally ecological security and sustainable development of society and economy. Based on the fuzzy comprehensive evaluation model of water resources, this paper makes use of the rank ratio method and the minimum relative entropy principle to improve the traditional entropy weight method. Based on the coupling of objective and subjective factors and considering the regional characteristics, 14 evaluation indicators were selected to evaluate the water resources carrying capacity of Qu Lu dam area of five level years. The results show that in the case of no water transfer, the comprehensive evaluation of water resources carrying capacity are 0.479, 0.390, 0.335, 0.287, and 0.283, respectively. in the case of water transfer, the water resources carrying capacity of five years of Qu Lu dam area are 0.446, 0.367, 0.323, 0.351, and 0.365, respectively, which indicates water resources carrying capacity can be improved significantly by external basin water transfer.

**Key words:** water resources carrying capacity; fuzzy comprehensive evaluation; improved entropy method; evaluation index indicator

水资源承载力是一个国家或地区持续发展过程中各种自然资源承载力的重要组成部分。作为资源

收稿日期: 2017-04-18; 修回日期: 2017-05-11

基金项目: 云南省高校重点实验室建设计划项目; 国家科技支撑计划项目子课题(2012BAD40B02)

作者简介: 王正选(1992-), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生, 研究方向为水文水资源。

通讯作者: 李靖(1969-), 男, 云南曲靖人, 教授, 硕士生导师, 研究方向为水资源与环境工程。

的可持续利用和水资源安全研究中的一个重要内容,水资源承载力研究已引起国内外学者的高度关注,并成为当前水资源科学中的一个重点和热点研究问题<sup>[1-3]</sup>。目前,国内对水资源承载力的研究,大致可分为两类:一类是从传统的水资源供需平衡分析基础上发展起来的对区域水资源承载力的评价;另一类是选择反映区域水资源承载力的主要影响因素指标,借助一定的评价模型和方法,综合评价水资源承载力,这种方法是目前国内学者研究的热点<sup>[4-6]</sup>。

本文采用模糊综合评价法分别对云南省曲陆坝区水资源承载力进行评价分析。模糊综合评价法是一种定性定量、精确与非精确的评价方法,在评价影响水资源承载力的各要素以及各要素之间的相互作用时,具有独特的优越性,已较好地应用于水资源承载力评价中<sup>[7-9]</sup>。传统熵权法完全根据指标的属性来度量指标权重的大小,有时候由于数据本身的随机干扰会影响权重的真实可靠性,为了能使指标的赋权能够达到主观与客观的统一,本文提出利用秩比法和最小相对信息熵原理对传统熵权法进行改进,把改进后的熵权法确定的权重作为模糊权向量来进行水资源承载力评价分析。

# 1 水资源承载力的评价指标体系

水资源承载力评价指标体系是区域水资源承载力研究的核心内容<sup>[10]</sup>。区域水资源承载力是一个具有自然和社会双重属性的概念,本文选取水资源承载能力遵循六大原则:科学性、整体性、动态与静态相结合、定性与定量相结合、可行性、完备性。在此基础上,充分考虑区域经济社会、生态与水资源系统,以及开发利用方式特征,借鉴相似地区<sup>[11]</sup>,选取了以下 14 个评价指标并将评价指标分为 3 个等级,评价指标体系见图 1,各评价指标意义和评价指标分级见表 1 和表 2。

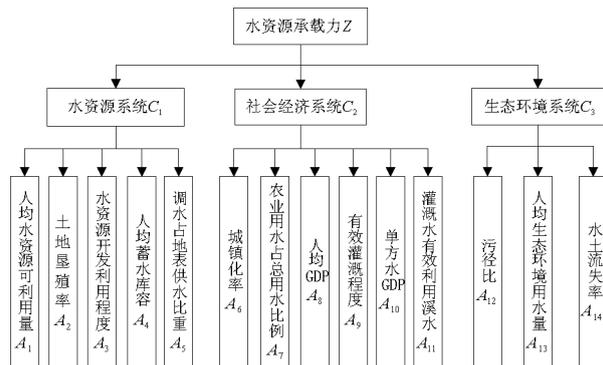


图 1 水资源承载力评价指标

表 1 水资源承载力评价指标意义

指标层 A	指标计算公式	指标作用
A <sub>1</sub>	水资源可利用总量 / 总人口数	反映水资源丰欠状况及发展潜力
A <sub>2</sub>	实际垦殖面积 / 土地面积	反映土地资源的发展水平
A <sub>3</sub>	水资源年供水量 / 地表水总量	反映地区水资源开发程度和可利用潜力
A <sub>4</sub>	库容蓄水量 / 总人口数	反映人利用水库容量的大小和发展水平
A <sub>5</sub>	外流域调水量 / 总供水量	反映外流域调水量对区域水资源供给状况
A <sub>6</sub>	城镇人口 / 总人口数	反映社会发展水平及人口素质
A <sub>7</sub>	农业用水量 / 总用水量	反映农业用水在用水结构的发展水平
A <sub>8</sub>	国内生产总值 / 总人口数	反映区域经济发展水平、人民生活水平和收入水平
A <sub>9</sub>	有效灌溉面积 / 总耕地面积	反映区域农业灌溉发展水平
A <sub>10</sub>	地区生产总值 / 总用水量	反映区域水资源与经济发展协调状况
A <sub>11</sub>	农田净灌溉用水量 / 农田毛灌溉用水量	反映灌溉工程质量、灌溉技术水平和灌溉用水管理状况
A <sub>12</sub>	入河污水量 / 河流径流量	反映稀释能力和水质污染情况
A <sub>13</sub>	生态环境用水量 / 总人口数	反映社会对生态环境重视程度和生态环境状况
A <sub>14</sub>	水土流失面积 / 土地面积	反映水土资源不合理开发和经营水平

表 2 中 V<sub>1</sub> 级表示很好,表明水资源承载力较高,可供开发的空间和潜力较大;V<sub>3</sub> 级表示很差,表明水资源承载力低,水资源可供开发程度十分有限,

极易发生水资源短缺;V<sub>2</sub> 级介于 V<sub>1</sub> 与 V<sub>3</sub> 之间,表示一般,说明水资源已开发到一定程度,可利用空间有所减小可持续利用程度一般,水资源承载力适中。为

更好地反映各等级水资源承载能力状况,对评判等级采用1分制数量化即: $V_1 = 0.95$ 、 $V_2 = 0.50$ 、 $V_3 = 0.05$ 。数量化后可定量反映各等级因素对承载能力的影响程度,数值越高,水资源承载力越强。

表2 各评价指标分级值标准

指标	分级		
	$V_1$	$V_2$	$V_3$
人均水资源可以用量/ $m^3$	850	650 ~ 850	650
土地垦殖率/%	6.67	26.7 ~ 6.67	26.7
水资源开发利用率/%	30	45 ~ 30	45
人均蓄水库容/ $m^3$	550	300 ~ 550	300
调水占地表水比重/%	35	10 ~ 35	10
城镇化率/%	25	40 ~ 25	40
农业用水占总供水量比例/%	65	55 ~ 65	55
人均GDP/元	7000	81000 ~ 7000	81000
有效灌溉程度/%	20	60 ~ 20	60
单方水GDP/元	24.4	24.4 ~ 40	40
灌溉水有效利用系数	0.65	0.55 ~ 0.65	0.55
污径比/%	2	10 ~ 2	10
人均生态环境用水量/ $m^3$	5	2 ~ 5	2
水土流失率/%	10	50 ~ 10	50

## 2 水资源承载力评价模型的建立

### 2.1 构造隶属度函数

建立隶属度函数是模糊数学的关键,根据隶属度函数可以确定各个指标实际值的隶属度,进行单因素评价,并得到隶属度模糊关系矩阵  $R$ :

$$R_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $R$ 是指标集到评语集的模糊关系; $r_{ij}(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$ 表示从第*i*个指标出发,对水资源承载能力做出第*j*种评价的可能程度。

### 2.2 传统熵权法

熵的概念来源于热力学,后来被引入到信息论中。根据信息论的基本原理,信息是系统有序度的一个度量,而熵是系统无序程度的一个度量。在评价体系中信息熵越小表明指标的变异程度越大,提供的信息量也就越大,则在评价体系中占的权重就越大;反之亦然。因此可以根据各个指标的变异程度,利用信息熵计算各个指标的权重,为整个评价体系提供

可靠的依据。熵权法的计算步骤如下:

#### (1) 原始数据矩阵归一化处理

设有  $m$  个评价指标,  $n$  个评价对象的原始数据矩阵  $A_{m \times n} = (a_{ij})_{m \times n} (i = 1, 2, \dots, n)$ , 归一化后得到  $R_{m \times n} = (r_{ij})_{m \times n}$ 。对于大者为优的指标:  $r_{ij} = \frac{a_{ij} - \min\{a_{ij}\}}{\max\{a_{ij}\} - \min\{a_{ij}\}}$ ; 对于小者为优的指标:  $r_{ij} = \frac{\max\{a_{ij}\} - a_{ij}}{\max\{a_{ij}\} - \min\{a_{ij}\}}$

#### (2) 定义熵

第  $i$  个指标的熵为:  $h_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}$ ;

其中:

$$f_{ij} = \frac{1 \pm r_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + r_{ij})} \quad (2)$$

#### (3) 定义熵权

$$w_i = \frac{1 - h_i}{m - \sum_{i=1}^m h_i} \quad (0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1) \quad (3)$$

### 2.3 改进熵权法

秩比法<sup>[12]</sup>广泛应用于食品安全、生产安全的评价中,将选取的评价指标按照优至劣编秩,通过校正系数可消除某些异常极值的干扰,能显示出指标的微小变动,适用于各种评价对象。在综合考虑影响区域水资源承载力因素的基础上,分别将各项指标对区域水资源承载力影响程度由优至劣排序赋值  $r_i$ , 对区域水资源承载力影响程度越大,则该指标性能越优,反之,越劣。最优指标将赋值为  $n$ , 次优指标赋值为  $n - 1, \dots$ , 最劣指标赋值为  $1$ , 则赋值后  $i$  的指标偏好校正系数为:

$$R_i = \frac{r_i}{n} \quad (4)$$

用最小信息熵原理将偏好校正系数和传统熵权法确定的权重进行耦合得到改进的熵权重。根据最小相对信息熵原理<sup>[13]</sup>有:

$$\min F = \sum_{j=1}^m W_j (\ln W_j - \ln W_{1j}) + \sum_{j=1}^m W_j (\ln W_j - \ln W_{2j}) \quad (5)$$

$$\text{st: } \sum_{j=1}^m W_j = 1; W_j > 0, j = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

用拉格朗日乘子法解上述优化问题得:

$$WR_i = \frac{(W_i \cdot R_i)^{0.5}}{\sum_{i=1}^m ((W_i \cdot R_i)^{0.5})} \quad (7)$$

$(j = 1, 2, \dots, m)$

### 2.4 模糊复合运算

根据构造的隶属度函数和修正后的熵权权重进行模糊变换,模型为:

$$B = W \cdot R$$

$$= (W_1, W_2, \dots, W_m) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

$$= (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (8)$$

## 3 曲陆坝区水资源承载力评价

### 3.1 研究区域概况

曲陆坝区位于云南省东部,地理坐标为东经 $102^{\circ}55' \sim 104^{\circ}14'$ ,北纬 $24^{\circ}45' \sim 25^{\circ}55'$ 之间,是云贵高原上土地面积最大的盆地,属于低纬度高原季风气候,素有“入滇门户”之称。曲陆坝区在行政区划上包括麒麟区、沾益区、陆良县,是云南省最大

的灌区,坝区内土壤肥沃,盛产粮食、烤烟、桑蚕、和生猪。曲陆坝区2010年,总人口148.9万人,其中城镇人口91.6万人,城镇化水平61.5%,GDP总量 $500.4 \times 10^8$ 元,人均27889元,是曲靖市的政治、经济、文化中心,也是以昆明为中心的滇中经济区、滇中一体化城市群的重要组成部分。坝区内主要河流为南盘江,南盘江干流自东北向西南贯穿整个曲陆坝区,控制流域面积 $3\,263\text{ km}^2$ ,干支流为灌区工农业生产主要水源。曲陆坝区经济发达,工业、农业和生活水资源消耗量大,水资源供需矛盾突出,是云南省仅次于滇池流域的水资源严重缺乏地区。因此,进行坝区水资源承载力评价分析对区域水资源可持续发展具有重要意义。

### 3.2 基础数据

本次对曲陆坝区2000年、2004年、2010年3个水平年进行水资源承载评价,对2020年、2030年两个规划年的水资源承载力进行了预测和评价。水资源承载力评价指标值数据来源于《车马水库水库工程水资源配置专题报告》和区域相关的“十二五”规划数据。为了比较外流域调水对区域水资源承载力的影响,计算了有、无外调水情况下的14个指标,见表3。

表3 曲陆坝区水资源承载力评价指标数据

指标	无调水					有调水				
	2000	2004	2010	2020	2030	2000	2004	2010	2020	2030
$A_1$	671.65	646.41	604.51	400.94	334.62	671.65	646.41	610.93	491.19	486.53
$A_2$	0.18	0.17	0.17	0.16	0.15	0.18	0.17	0.17	0.16	0.15
$A_3$	0.47	0.53	0.58	0.84	1.00	0.47	0.53	0.40	0.64	0.67
$A_4$	280.95	305.78	311.34	250.41	208.99	280.95	305.78	311.34	250.41	208.99
$A_5$	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.21	0.34
$A_6$	0.34	0.48	0.62	0.80	0.87	0.34	0.48	0.62	0.8	0.87
$A_7$	0.74	0.71	0.66	0.51	0.43	0.74	0.71	0.66	0.51	0.43
$A_8$	7747.12	13528.88	30923.35	44659.43	65561.29	7747.12	13528.88	30923.35	44659.43	65561.29
$A_9$	0.52	0.58	0.70	0.85	0.97	0.52	0.58	0.70	0.85	0.97
$A_{10}$	19.34	30.94	69.36	131.26	222.32	19.34	30.94	68.38	103.74	146.73
$A_{11}$	0.56	0.57	0.59	0.64	0.66	0.49	0.50	0.54	0.65	0.69
$A_{12}$	0.04	0.06	0.07	0.07	0.10	0.04	0.06	0.07	0.07	0.10
$A_{13}$	0.75	1.16	1.72	2.97	4.08	0.75	1.16	3.43	5.94	8.16
$A_{14}$	0.45	0.59	0.66	0.55	0.45	0.45	0.59	0.66	0.55	0.45

首先根据表3的评价指标基础数据按公式(2)至(3)计算得到传统熵权的权重,其次根据区域特点重点考虑产业结构及生产力水平、水资源条件及开发利用程度、生态环境状况、其他潜力资源等影响

水资源承载力的因素,利用秩比法对各项指标从优至劣进行排序,按公式(4)计算偏好校正系数 $R_i$ ,最后按公式(5)得出无偏权重,计算结果见表4。

表4 评价指标权重计算结果

指标层 A	传统熵权		偏好校正系数 $R_i$	改进熵权	
	无调水	有调水		无调水	有调水
$A_1$	0.076	0.088	0.643	0.105	0.091
$A_2$	0.066	0.065	0.857	0.103	0.105
$A_3$	0.066	0.074	0.286	0.039	0.035
$A_4$	0.062	0.061	0.500	0.056	0.058
$A_5$	0.131	0.098	0.429	0.078	0.104
$A_6$	0.071	0.070	1.000	0.129	0.132
$A_7$	0.070	0.069	0.357	0.046	0.046
$A_8$	0.061	0.061	0.571	0.064	0.065
$A_9$	0.065	0.065	0.786	0.094	0.095
$A_{10}$	0.060	0.063	0.714	0.083	0.080
$A_{11}$	0.080	0.088	0.929	0.151	0.138
$A_{12}$	0.053	0.053	0.143	0.014	0.014
$A_{13}$	0.073	0.078	0.071	0.010	0.010
$A_{14}$	0.067	0.067	0.214	0.027	0.027

## 4 水资源承载力综合评价

根据公式(6),得出曲陆坝区5个水平年的水资源承载力评价结果,并根据计算式  $A = 0.95V_1 + 0.5V_2 + 0.05V_3$  求得各水平年的水资源承载力的综合评分值。结果见表5、图2。

表5 曲陆坝区水资源承载力综合评价结果

年份	无调水				有调水			
	$V_1$	$V_2$	$V_3$	综合评分	$V_1$	$V_2$	$V_3$	综合评分
2000	0.165	0.619	0.248	0.479	0.172	0.536	0.292	0.446
2004	0.096	0.563	0.341	0.390	0.100	0.507	0.386	0.367
2010	0.049	0.536	0.415	0.335	0.052	0.504	0.444	0.323
2020	0.057	0.414	0.512	0.287	0.093	0.482	0.426	0.351
2030	0.089	0.341	0.571	0.283	0.162	0.374	0.464	0.365

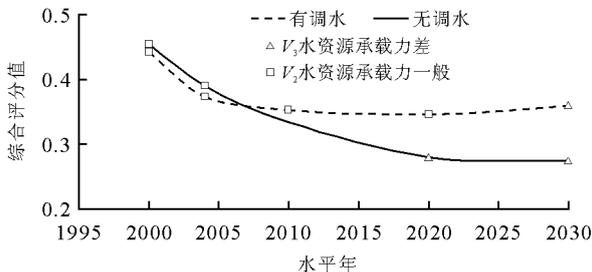


图2 曲陆坝区水资源承载力变化过程图

由图2可看出,在无外流域调水的情况下,曲陆坝区水资源承载力综合评分值随时间呈逐渐下降趋

势,造成下降的原因主要有:曲陆坝区经济发达,随着经济社会不断发展,用水量逐年增加,曲陆坝区水资源供需矛盾越来越突出,水资源开发潜力及承载力逐渐下降。在2000-2010年之间,水资源综合评价价值下降率为30%,2010-2020年下降率为14.4%,2020-2030年下降率为1.2%,下降程度减弱。主要原因是随着经济发展到一定程度,区域水资源承载力已经接近饱和,水资源开发利用程度已经接近阀限<sup>[14]</sup>,进一步开发的潜力很小。

由表5可看出,2020年前 $V_2$ 的隶属度均高于 $V_1$ 、 $V_3$ ,说明曲陆坝区水资源已开发到一定程度,可利用空间有所减小可持续利用程度一般,水资源承载力适中;2020年及以后 $V_3$ 的隶属度均高于 $V_1$ 、 $V_2$ ,表明曲陆坝区水资源承载力差,水资源可供开发程度十分有限,极易发生水资源短缺,水资源将制约国民经济的发展。

增加外流域调水后,曲陆坝区水资源承载力综合评分值随时间呈现逐渐下降趋势,但下降率比无调水情况小,2020年后有明显上升,说明外流域调水对水资源承载力有显著的影响。无外流域调水的情况下,从2020年开始,水资源承载力将达到极限,外流域调水后2020年水资源承载力恢复到一般水平,2020年及2020年以前,各水平年 $V_2$ 的隶属度均高于 $V_1$ 、 $V_3$ ,到2030年虽然有大量外调水,但是 $V_3$ 的隶属度高于 $V_1$ 、 $V_2$ ,较无调水有明显的回升,且有扭转之前水资源承载力逐年下降的趋势。

2030年,虽然有大量外流域调水,但是水资源承载力仍然处于差的状态,主要因为本区域水资源开发利用率高,已经远远超过珠江流域32%<sup>[15]</sup>的最大允许开发利用率,进一步开发利用水资源将破坏区域生态系统。要改善2030年的水资源承载力状况,可以采取调整区域经济发展结构,优化水资源配置或者增加新的调水工程等措施。

## 5 结论

(1)在借鉴其他学者研究的基础上,结合区域水资源的可持续发展,根据水资源承载力评价指标体系选择原则结合曲陆坝区地区特点,选取了14个评价指标建立曲陆坝区水资源承载力评价指标体系。这一指标体系可以反映出曲陆坝区水资源的承载状况及其开发利用潜力,水资源的数量与质量、可利用量、开发利用状况及其动态变化对水资源承载力的影响,以及被承载的社会经济发展、结构及发展水平变化对水资源承载力的影响。

(2) 提出利用秩比法和最小相对信息熵原理对传统熵权法进行改进,修正后的熵权权重耦合了主客观因素,更加符合实际情况,将修正后的权重作为模糊权重对水资源承载力进行评价。

(3) 采用模糊综合评价模型对曲陆坝区5个水平年水资源承载力进行评价。结果表明在无调水的情况下,5个水平年水资源承载力综合评价价值分别为:0.479、0.390、0.335、0.287、0.283;在有调水的情况下,5个水平年水资源承载力综合评价价值分别为0.446、0.367、0.323、0.351、0.365。研究结果可以为水资源的保护和管理提供决策依据。

#### 参考文献:

[1] 张永勇,夏军,王中根. 区域水资源承载力理论与方法探讨[J]. 地理科学进展,2007,26(2):126-132.

[2] 左其亭. 论水资源承载能力与水资源优化配置之间的关系[J]. 水利学报,2005,36(11):1286-1291.

[3] 夏军,朱一中. 水资源安全的度量:水资源承载力的研究与挑战[J]. 自然资源学报,2002,17(3):262-269.

[4] 王友贞. 区域水资源承载力评价研究[D]. 南京:河海大学,2004:75.

[5] 杨鑫,王莹,王龙,等. 基于集对分析理论的云南省水资源承载力评估模型[J]. 水资源与水工程学报,2016,27(4):98-102.

[6] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等. 区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J]. 地理学报,2010,65(1):82-90.

[7] 段新光,栾芳芳. 基于模糊综合评判的新疆水资源承载力评价[J]. 中国人口·资源与环境,2014,24(3):119-122.

[8] 熊黑钢,付金花,王凯龙. 基于熵权法的新疆奇台绿洲水资源承载力评价研究[J]. 中国生态农业学报,2012,20(10):1382-1387.

[9] 闵庆文,余卫东,张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J]. 水土保持研究,2004,11(3):14-16+129.

[10] 王友贞,施国庆,王德胜. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报,2005,20(4):597-604.

[11] 葛强,雷艳娇. 滇中典型流域水资源生态足迹与生态承载力研究[J]. 亚热带水土保持,2014,26(4):27-31.

[12] 宋丽婧,魏探,宋玲梅. 五元系数法-改进熵权法在水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技,2015,13(2):268-273.

[13] 吴开亚,金菊良. 区域生态安全评价的熵组合权重属性识别模型[J]. 地理科学,2008,28(6):754-758.

[14] 高彦春,刘昌明. 区域水资源开发利用的阀限分析[J]. 水利学报,1997,28(13):73-78.

[15] 王西琴,张远. 中国七大河流域水资源开发利用率阈值[J]. 自然资源学报,2008,23(3):500-506.

(上接第81页)

[7] 曹雷,周维博,庄妍. 基于遗传投影寻踪模型的延安市水资源利用效率分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(2):126-128.

[8] 张云宁,袁军,陈培然. 基于投影寻踪分类法的苏北地区水足迹及用水效率评价[J]. 水利经济,2016,34(2):16-19.

[9] 张明,王贵作,张寅熙. 水文相似流域最大熵优选模型研究[J]. 水利水电技术,2012,43(2):14-16+21.

[10] 雷波,刘钰,许迪,等. 农业水资源利用效用评价研究进展[J]. 水科学进展,2009,20(5):732-738.

[11] 高媛媛,许新宜,王红瑞,等. 中国水资源利用效率评估模型构建及应用[J]. 系统工程理论与实践,2013,33(3):776-784.

[12] 岳立,白婧,郭山宁. 基于超效率的中国工业用水效率分析[J]. 石家庄经济学院学报,2013,36(6):51-55.

[13] 播丹,应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实

证——基于非期望产出的SBM模型分析[J]. 生态学报,2013,33(12):3837-3845.

[14] 黄健元,金广宇,于彦博. 投影寻踪模型在行蓄洪区运用风险评价中的应用[J]. 水利经济,2016,34(5):60-63.

[15] 崔东文. 鸡群优化算法投影寻踪洪旱灾害评估模型[J]. 水利水电科技进展,2016,36(2):16-23.

[16] Hadi Eskandar, Ali Sadollah, Ardeshir Bahreininejad, et al. Water cycle algorithm - A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems[J]. Computers and Structures, 2012, 110-111: 151-166.

[17] 章纯,刘锋,廖国维,等. 基于WCA优化算法的空间桁架结构优化设计[J]. 建筑钢结构进展,2014,16(1):34-41.