

康健, 王建华, 王素芬. 海河流域农业水资源承载力评价研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(4): 47-56.

KANG Jian, WANG Jianhua, WANG Sufen. Study on evaluation of agricultural water resources carrying capacity in Haihe River Basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(4): 47-56.

# 海河流域农业水资源承载力评价研究

康健<sup>1,2</sup>, 王建华<sup>1</sup>, 王素芬<sup>3</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 水利部发展研究中心, 北京 100038; 3. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为充分了解水资源支撑当前农业发展规模所处的状态, 以科学调整农业发展战略及相应政策, 保障海河流域水安全及粮食安全, 开展农业水资源承载力评价研究。在构建农业水资源承载力评价体系的基础上, 通过熵权法确定权重, 采用基于集对分析理论的五元联系数法对海河流域农业水资源承载力进行评价, 并通过模糊综合分析法验证该结果。研究表明: 两者计算结果基本相同, 表明计算方法可行。研究结论为: 山西、内蒙古、辽宁的承载潜力处于  $V_3$  级临界状态, 北京、天津、河北、河南、山东的农业水资源承载力处于  $V_4$  级饱和状态, 表明海河流域的农业水资源承载力的强弱与地下水失衡状况密切相关。通过承载能力“等级逆推”, 得出现状条件下流域内各行政区的地下水开采率及有效灌溉面积的适宜区间, 即: 未来海河流域地下水需减少开采  $1.782 \times 10^{10} \sim 2.031 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。

**关键词:** 农业水资源承载力; 集对分析; 模糊综合评价; 熵权法

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: F323

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)04-0047-10



## Study on evaluation of agricultural water resources carrying capacity in Haihe River Basin

KANG Jian<sup>1,2</sup>, WANG Jianhua<sup>1</sup>, WANG Sufen<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Development Research Center of the Ministry of Water Resources of China, Beijing 100038, China; 3. College of Water Resources & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to fully understand the status of the current agricultural development scale supported by water resources for scientifically adjusting the agricultural development strategy and the corresponding policies to guarantee the water security and food security of Haihe River Basin, a study on the evaluation of the agricultural water resources carrying capacity is made. On the basis of constructing the evaluation system of agricultural water resources carrying capacity, the agricultural water resources carrying capacity in Haihe River Basin is evaluated by means of the set pair analysis theory – based five – element connection number method through determining the weight by entropy weight method, while the result is verified with fuzzy comprehensive analysis

收稿日期: 2019-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109211); 国家重点研发计划项目(2016YFC0401408); 农业部公益性行业项目(201203077); 国家国际科技合作项目(2013DFG70990); 863计划“作物生命需水过程控制与高效用水生理调控技术及产品”(2011AA100502)

作者简介: 康健(1989—), 女, 工程师, 博士研究生, 主要从事水文水资源及水利经济方面研究。E-mail: kangjianbeijing.ok@163.com

通信作者: 王建华(1972—), 男, 教授级高级工程师, 副院长, 博士研究生导师, 博士, 主要从事流域水循环、水资源和节水型社会建设等研究。E-mail: wjh@iwhr.com

method as well. The study result shows that both the calculated results are basically consistent, thus the calculation method is indicated to be feasible. It is concluded from the study that the agricultural water resources carrying potentials of Shanxi, Inner Mongolia and Liaoning are all within the critical state of  $V_3$ , while all the carrying potentials of Beijing, Tianjin, Hebei, Henan, and Shandong are in the saturated state of  $V_4$  within Haihe River Basin; which indicates that the agricultural water resources carrying capacity of Haihe River Basin is closely related to the status of the groundwater imbalance therein. Through the "grade inversion" of the carrying capacity, the suitable intervals of both the groundwater exploitation rates and effective irrigation areas of all the administrative regions within the basin under the current conditions are obtained; in other words, the groundwater exploitation of Haihe River Basin is necessary to be reduced by  $1.782 \times 10^{10} \sim 2.031 \times 10^{10} \text{ m}^3$ .

**Keywords:** agricultural water resources carrying capacity; set pair analysis; fuzzy comprehensive evaluation; entropy method

## 0 引言

农业是用水大户,在我国占用水总量的比例高达65%,但农业灌溉用水有效利用系数仅为0.5,水资源利用方式比较粗放,与世界先进水平0.7~0.8有不小的差距。随着“南粮北运”向“北粮南运”的演变,北方水资源开发利用成为影响我国粮食安全的重要因素。然而北方水资源短缺与灌溉用水粗放并存,致使北方不少地区水资源功能衰退,以华北地区为例,华北地下水超采1800亿 $\text{m}^3$ ,其中河北省占1500亿 $\text{m}^3$ ,面积达6.98万 $\text{km}^2$ 。水资源功能的衰退使得取水特别是地下水取水越来越困难,为保证粮食生产而不断加深打井,忽略农业水资源承载力而造成的用水恶性循环和农业生产不均衡布局,严重制约着经济、社会的可持续发展。

农业水资源承载力由承载力演化而来。承载力(carrying capacity)在生态研究中特指在一定环境条件下某种生物个体能够存活的数量最高值,伴随着人类社会发展与资源短缺的矛盾加剧,承载力概念也有了进一步发展。20世纪80年代初,联合国教科文组织提出了“资源承载力”的概念。1989年我国新疆水资源软科学课题组首次提出了新疆水资源及其承载能力概念并进行了开发战略的研究,水资源承载力的研究以近20a为盛,其研究尺度主要为流域、灌区、行政区(市、县),其研究方法主要有模糊评价方法<sup>[1-8]</sup>、主成分分析法<sup>[9-13]</sup>、系统动力学法<sup>[14-17]</sup>、多目标决策法<sup>[18-21]</sup>、投影寻踪法<sup>[22-25]</sup>、人工神经网络法<sup>[26-30]</sup>、物元法<sup>[31-35]</sup>等,这为农业水资源承载力的研究奠定了方法基础。

国际上对涉及农业水资源承载力的单项研究成果较少,大多将其纳入可持续发展理论中。FALK-ENMARK等<sup>[36]</sup>用较简单的数学计算研究了一些发展中国家的水资源使用限度,为水资源承载力的专门研究提供了一定的基础;HARRIS等<sup>[37]</sup>在考虑全

球气候变暖的趋势下,研究了一定生产区域的水资源对农业的承载能力,并将此作为区域发展潜力的一项衡量标准;MITCHELL<sup>[38]</sup>在可持续发展的原则下,结合微观模拟与计量经济学建立了区域灌溉蓄水预测模型;美国URS公司采用模型的方法对Florida Keys流域的社会经济和生态系统整体进行了模拟和评价,该模型允许用户切换不同的用地方案并评估其对环境承载力的影响。随着城市化不断推进,生活用水和工业用水比例持续升高,农业用水不断被挤占,与此同时水污染和水资源短缺问题日益突出。进行农业水资源承载力综合评价,可为调整农业种植结构、推进节水灌溉政策制定和流域农业水资源中长期开发利用规划提供科学依据,它对指导区域农业生产规模和社会经济发展,协调区域生态建设、农业发展和水资源的关系有着重要意义。

海河流域是我国北方粮食主产区之一,战略地位显著。目前海河流域的相关研究大多集中在水资源承载力的综合评价方面<sup>[39-42]</sup>,并多与生态研究相结合,研究思路大体为“建立评价指标体系-计算评价”,而农业水资源承载力研究较少。本文针对海河流域农业水土资源紧缺状况,在实地调研和专家咨询的基础上,主要研究内容:(1)建立海河流域农业水资源承载力评价体系;(2)基于集对分析理论的五元联系数法和模糊综合评价法对海河流域农业水资源承载力进行评价;(3)通过“等级逆推”,对农业水资源承载能力进行优化调整计算,得到现状条件下各行政区的地下水开采率适宜区间;(4)对相应结果做出分析总结,并结合实地调研和专家咨询提出合理化建议。

## 1 研究内容

### 1.1 农业水资源承载能力的内涵和外延

综合文献分析研究<sup>[43-47]</sup>,水资源承载能力归纳

总结为:以不破坏生态系统为前提,在一定流域或区域内,水资源能够支撑的最大社会经济发展规模。农业是用水大户,从行业而言,农业水资源承载能力定义为:在地区现有水权分配模式下,以维护生态良性循环发展为条件,水资源所能支撑的农业生产系统发展的最大规模。在该概念中,承载主体是可供农业发展使用的水资源,承载客体是农业生产系统。设定水资源开发使用量为不变值,且开发使用不破坏生态环境时,农业生产规模越大,即单方供水支撑农业生产效率越高,则农业水资源承载能力越大;反之,则农业水资源承载能力越低,承载能力弱。农业生产规模设定为不变值,水资源开发利用程度越高,即单方供水支撑农业生产效率越低,则农业水资源承载能力越弱,当水资源开发利用程度大于生态承受程度时,则为超载。总而言之,区域农业水资源承载农业生产的理想状态为最大程度提高供水保证率、减少用水量、提高用水效率。

研究区域农业水资源承载能力,判断区域当前农业生产规模下水资源的承载状态,对于区域内农业发展战略的系统研判与科学调整具有重要作用。鉴于农业生产活动中农作物灌溉用水耗费最大,研究中的农业用水设定为灌溉用水。海河流域既属于水资源短缺区,又属于我国粮食主产区,农业用水短缺与高耗水供应矛盾并存。为充分了解支撑当前流域内农业发展

规模的水资源所处的状态,以科学调整农业发展及相应政策,保障海河流域水安全及粮食安全,进行农业水资源承载能力评价。综合评价分数的物理意义在于能够横向比较不同地区的农业水资源承载状态,为判断农业水资源承载力等级提供依据,在受制于水资源总量供应的农业发展战略调整制定方面是一项较有实用性的研究。

## 1.2 研究区域概况

海河流域是中国7大流域之一,位于北纬 $35^{\circ}$ — $43^{\circ}$ 、东经 $112^{\circ}$ — $120^{\circ}$ 之间,流域包括海河、滦河和徒骇马颊河三大水系、七大水系、十条骨干河流,流域内河道呈扇形分布(见图1)。海河流域水资源的主要特点是水资源总量少、降水时空分布不均。流域总面积 $31.8$ 万 $\text{km}^2$ ,占全国总面积的 $3.3\%$ ;人口 $1.3$ 亿,占全国总人口的 $10\%$ 左右;耕地面积超过 $1.067 \times 10^7$   $\text{hm}^2$ (约 $1.6$ 亿亩),占全国耕地面积的 $11\%$ ;多年平均水资源总量为 $370$ 亿 $\text{m}^3$ ,仅占全国的 $1.3\%$ ;人均水资源占有量为 $276$   $\text{m}^3$ ,仅为全国平均水平的 $13\%$ 。海河流域耕地灌溉面积常年在 $7.4 \times 10^6$   $\text{hm}^2$ 以上,节水灌溉方式趋于多元化。近年来,受人口规模、经济社会发展压力和气候的影响,海河流域水资源衰减问题十分突出,不同行业用水竞争激烈,水资源短缺、水环境污染和水生态锐化问题极其严重,直接影响到农业水资源的利用。

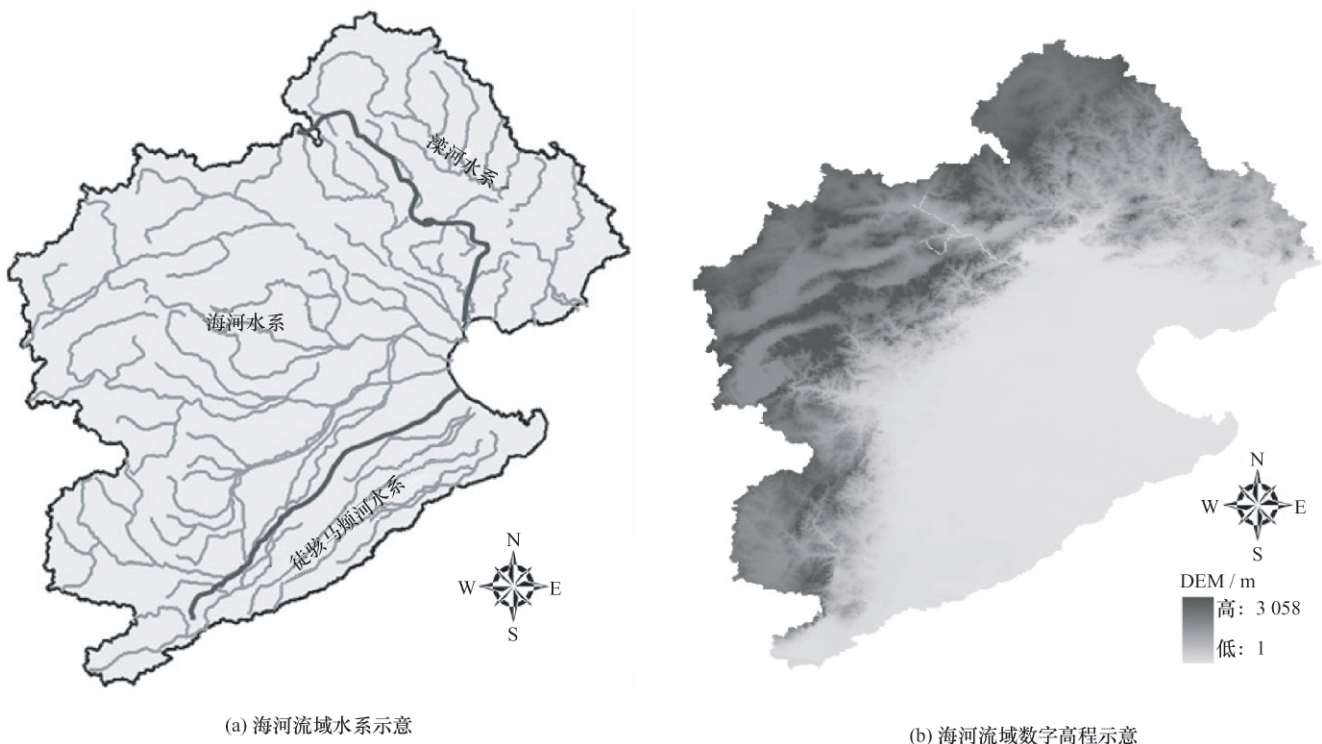


图1 海河流域示意

### 1.3 海河流域农业水资源承载力评价指标体系的建立

#### 1.3.1 评价指标选取原则

海河流域农业用水比重较高,常年超过65%(见图2),主要受流域内降雨、水资源开发利用状况、灌溉工程设施配套情况和农作物种植结构等的影响。农业供水分地表水供水和地下水供水。按照第1.1节关于农业水资源承载能力内涵和外延的分析,应以可操作性、代表性、通用性为原则,能够反映单位面积农业用水量、用水效率等关键因素为原则选取农业水资源承载力评价指标。在农业生产活动中,有效灌溉面积越大,节水效果越好,且耕地抗干旱能力越高,产量越高;单位面积供水量越少,在供水总量不变和供需平衡的情况下,农业再生产的能力越高;农业系统正常运行的情况下,社会总体用水结构中农业用水比率越低,表明同一区域内工业等用水比率越高,反哺农业生产能力越强,进行行业间水权交易进而促进全面节水的可行性越大;亩均灌溉用水量越低,耕地面积不变情况下灌溉用水总量越少;在保持农业生产不变的情况下,地表水和地下水的开发程度越低,则对生态环境扰动越小,越易满足达到水资源供需平衡的状态。以上因素基本能从不同角度直接衡量农业水资源承载能力,综合专家咨询意见、当地流域机构等单位所掌握的源数据以及统计年鉴数据,经过对比筛选,从反映农业水资源承载力承受主体情况出发,选取有效灌溉面积比率、供水模数、农业用水比率、单位灌溉用水量、地下水开发利用程度、地下水开发利用程度等6项评价指标。

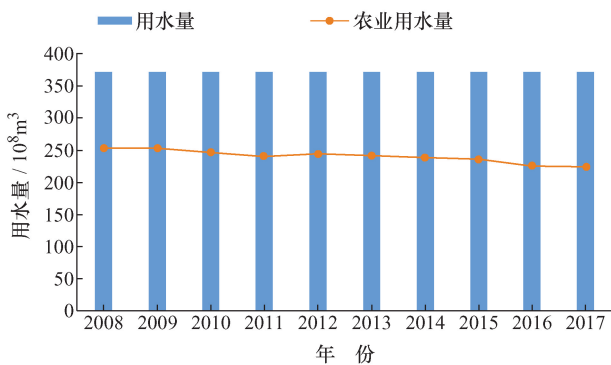


图2 海河流域农业用水量情况

以上指标中,有效灌溉面积比率为有效灌溉面积与耕地面积之比,反映了区域灌溉工程或设备配备情况;供水模数为用水量与计算土地面积之比,表征单位土地面积的用水程度;农业用水比率为农业用水量与总用水量之比,表征农业用水水平;每公顷灌溉用水量为灌溉用水与土地面积之比,反映灌溉用水状

况,受降雨影响显著;地下水开发程度为年地下水供水量与地下水资源可开采量之比,反映地下水资源开发潜力的大小;地表水开发程度为地表水供水量与地表水资源可利用量之比,反映地区地表水的开发程度及可利用的潜力。第一项指标属于效益型指标,后五项指标属于成本型指标。结合其他研究成果<sup>[44-45]</sup>,制定出等级界定标准(见表1)。

表1 农业水资源承载力评价指标体系及等级界定标准

评价指标	分级值				
	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>
	潜力较大	有一定承载潜力	临界	饱和	过饱和
有效灌溉面积比率/%	90	70	50	30	10
供水模数/万 m <sup>3</sup> · km <sup>-2</sup>	4.28	5.71	7.14	8.57	10
农业用水比率/%	32.2	42.93	53.67	64.4	75.13
亩均灌溉用水量/m <sup>3</sup>	180	215	250	285	320
地下水开发程度/%	13.7	18.26	22.83	27.39	31.96
地表水开发程度/%	40.9	54.54	68.17	81.8	95.44

注: V<sub>1</sub>级表明现有灌溉规模和水资源利用程度都较小,水资源对农业生产的承载潜力较大; V<sub>2</sub>级表明农业灌溉发展虽具有一定规模,但仍有一定的承载潜力; V<sub>4</sub>级表明状况较差,处于承载力饱和状态; V<sub>5</sub>级表明状况很差,处于承载力的过饱和状态,农业用水已经出现严重短缺; V<sub>3</sub>级的情况介于 V<sub>2</sub>和 V<sub>4</sub>之间,属临界状态

#### 1.3.2 熵权法

权重赋值一般分为客观计算赋值和主观赋值,熵权法属于客观计算赋值,也是广为应用的方法,相对于主观赋值法,精度较高且客观性更强,规避了主观认知带来的影响,能够较好地解释所得到的结果。熵原是热力学中的概念,表示物质系统所处的状态,后由 SHANNON 将其引入信息论,用以表示系统内部的稳定程度。当信息熵越小时,信息无序度就越小,则信息效用值越大;而信息熵越大时,信息的无序程度就越高,则信息效用值越小。在综合评价中,运用信息熵确定权重的基本思想为根据指标在待评单位之间的变异程度确定。变异程度越大,则该指标包含的信息量越多,在综合评价中所起的作用就越大,权值相应也较高。如果每个方案的某项指标值全部相等或较为接近,则其提供的信息量也越低,对方案的区分能力越弱,权重也越小。熵权法可以尽量消除各指标权重计算中的主观干扰,使评价结果更接近实际。熵值法确定权重步骤如下。

(1) 构建  $m$  个评价对象  $n$  个评价指标的判断矩阵

$$R = (x_{ij})_{m \times n} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中,  $x_{ij}$  为第  $i$  个评价对象的第  $j$  个评价指标的实测值。

(2) 将判断矩阵  $R$  归一化处理,得到归一化判断

矩阵  $B$

$$b_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中,  $x_{\max}$ 、 $x_{\min}$  分别表示同指标下不同评价对象中最满意者和最不满意者(越大越满意或越小越满意)。

(3) 根据熵的定义, 可确定各评价指标的熵为

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \left( \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (3)$$

$$f_{ij} = \frac{1 + b_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1 + b_{ij})}$$

$$(i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m) \quad (4)$$

(4) 各项评价指标的熵权为

$$w_j = \frac{1 - H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j}, \left( \sum_{j=1}^n w_j = 1 \right) \quad (5)$$

### 1.3.3 集对分析法

集对是由一定联系的两个集合组成的单位, 由赵克勤在 1989 年正式提出。集对分析是在一定的问题背景下, 对集对中两个集合的确定性与不确定性以及它们的相互作用所进行的一种数学分析, 其核心思想是把确定与不确定视作一个系统, 在这个系统中将确定性分为“同一”和“对立”两个方面, 将不确定性做为“差异”, 从同、异、反三方面分析事物和系统。

设集合  $A$  和集合  $B$  共有  $N$  个特性, 其中  $S$  个为集对中两个集合所共有, 这两个集合又在另外  $P$  个特性上相对立, 在其余  $F$  个特性上关系不确定, 则两个集合的联系度为

$$\mu = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (6)$$

令  $a = S/N$ ,  $b = F/N$ ,  $c = P/N$ , 且满足  $a + b + c = 1$ , 则式(6)可简写为

$$\mu = a + bi + cj \quad (7)$$

式中,  $\mu$  为联系度, 可以系统、全面地刻画所需研究集对之间的同异反联系, 所以又称作同异反联系度; 同一度  $a \in [0, 1]$ , 差异度  $b \in [0, 1]$ , 对立度  $c \in [0, 1]$ ,  $a, c$  相对确定,  $b$  相对不确定, 且满足  $a + b + c = 1$ ;  $i$  为差异度系数,  $i \in [-1, 1]$ , 主要体现研究体系的不确定性,  $i$  越接近 0 表明系统所包含的不确定性信息越大;  $j$  为对立度系数, 规定恒取值为  $-1$ , 以表示对立度  $P/N$  与同一度  $S/N$  是相反的。

五元联系数是集对分析理论中同、异、反联系数的一种推广, 将部分细分为偏同异和偏反异, 增强了其完整性和有效性, 可以更准确地分析系统中的不确定信息。表达式可写为

$$\mu = a + b_1i_1 + b_2i_2 + b_3i_3 + cj \quad (8)$$

式中,  $a \in [0, 1]$ ,  $b \in [0, 1]$ ,  $c \in [0, 1]$ , 且满足  $a + b_1 + b_2 + b_3 + c = 1$ ;  $i \in [-1, 1]$ ,  $j = -1$ 。

五元联系数集对分析模型为

$$\mu_s = \sum_{j=1}^n (w_j \mu_{sj}) = a + b_1i_1 + b_2i_2 + b_3i_3 + cj \quad (9)$$

式中,  $\mu_s$  为该地区总联系度;  $w_k$  为各指标的权重;  $\mu_{sk}$  为第  $k$  项指标联系度;  $n$  为 6。  $a$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $c$  分别代表综合指标意义上农业水资源承载力状况与一至五级的相关系数。根据均分原则, 令  $i_1 = 0.5$ ,  $i_2 = 0$ ,  $i_3 = -0.5$ ,  $j = -1$ , 对应可以计算得出各地区农业水资源承载力综合评价联系主值数及对应等级, 即

$$\mu_s = a + 0.5 \cdot b_1 + 0 \cdot b_2 + (-0.5) \cdot b_3 + (-1) \cdot c \quad (10)$$

评价体系中各项指标均为成本型指标, 农业水资源承载力五元联系数的计算方法如表 2 所列, 分别计算各个指标的参数  $a$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $c$ 。将  $[-1, 1]$  均分成五部分,  $[-1, -0.6]$ ,  $(-0.6, -0.2]$ ,  $(-0.2, 0.2]$ ,  $(0.2, 0.6]$ ,  $(0.6, 1]$  分别对应农业水资源承载力的  $V_5$  级,  $V_4$  级,  $V_3$  级,  $V_2$  级,  $V_1$  级。各区综合评分结果  $\mu_s$  与以上区间对比可得出基于集对分析法的农业水资源承载力评价等级。

表 2 五元联系数计算方法

五元联系数 $u_{sk}$	成本型指标 (2) - (6)	效益性指标 (1)
$1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j$	$x < k_1$	$x > k_1$
$\frac{x - k_2}{k_1 - k_2} + \frac{k_1 - x}{k_1 - k_2}i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j$	$k_1 \leq x < k_2$	$k_2 < x \leq k_1$
$0 + \frac{x - k_3}{k_2 - k_3}i_1 + \frac{k_2 - x}{k_2 - k_3}i_2 + 0i_3 + 0j$	$k_2 \leq x < k_3$	$k_3 < x \leq k_2$
$0 + 0i_1 + \frac{x - k_4}{k_3 - k_4}i_2 + \frac{k_3 - x}{k_3 - k_4}i_3 + 0j$	$k_3 \leq x < k_4$	$k_4 < x \leq k_3$
$0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{x - k_5}{k_4 - k_5}i_3 + \frac{k_4 - x}{k_4 - k_5}j$	$k_4 \leq x < k_5$	$k_5 < x \leq k_4$
$0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + j$	$x \geq k_5$	$x \leq k_5$

### 1.3.4 模糊综合评价法

模糊综合评价法是一种模糊推理为主的定性定量相结合、精确与非精确相统一的分析评判方法。它可以在对影响农业水资源承载能力的各个因素进行单因素评价的基础上, 通过综合评判矩阵对其承载能力做出多因素综合评价, 从而可较全面地分析出流域内农业水资源承载能力的状况。

设给定两个有限域

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\} \quad (11)$$

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (12)$$

式中,  $U$  代表综合评判因素所组成的集合,  $V$  代表评语所组成的集合。模糊评判为下列模糊变换

$$B = A \cdot R \quad (13)$$

式中,  $A$  为  $U$  上的模糊子集, 而评判结果  $B$  则是  $V$  上的模糊子集, 且可以表示为

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \quad 0 \leq a_i \leq 1 \quad (14)$$

$$B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\} \quad 0 \leq b_j \leq 1 \quad (15)$$

式中,  $a_i$  为  $u_i$  对  $A$  的隶属度, 它表示单因素  $u_i$  在总评定因素中所起作用大小的变量;  $b_j$  表示等级  $v_j$  对综合评定所得模糊子集  $B$  的隶属度, 他们表示综合评判的结果。评判矩阵  $R$  为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中,  $r_{ij}$  表示因素  $u_i$  的评价对等级  $v_j$  的隶属度, 因而矩阵  $R$  中第  $i$  行 ( $r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}$ ) 即为对第  $i$  个因素  $u_i$  的单因素评判结果。

评价计算中  $A = (a_1, a_2, \dots, a_m)$  代表了各因素对综合评判重要性的权系数, 且满足  $a_1 + a_2 + \dots + a_m = 1$ , 计算方法见第 1.2.2 节。隶属度计算公式如表 3 所列。

表 3 隶属度计算方法

隶属度计算公式	成本型指标 (2) - (6)	效益性指标 (1)
$r_{i1} = 1 \quad r_{i2} = r_{i3} = r_{i4} = r_{i5} = 0$	$u_i < v_{i1}$	$u_i > v_{i1}$
$r_{ij+1} = (u_i - v_{ij}) / (v_{i,j+1} - v_{ij})$	$v_{ij} \leq u_i \leq v_{i,j+1}$	$v_{i,j+1} \leq u_i \leq v_{ij}$
$r_{ij} = 1 - (u_i - v_{ij}) / (v_{i,j+1} - v_{ij})$		
$r_{i5} = 1 \quad r_{i1} = r_{i2} = r_{i3} = r_{i4} = 0$	$u_i \geq v_{i5}$	$u_i \leq v_{i5}$

为了更好地反映各等级农业水资源承载能力状况, 对这 5 个等级进行 0~1 之间的评分, 设  $w_1 = 0.95, w_2 = 0.75, w_3 = 0.5, w_4 = 0.25, w_5 = 0.05$ , 各区综合评分计算公式为

表 4 现状海河流域评价指标数据统计

序号	区划	有效灌溉面积 比率/%	供水模数 /万 $m^3 \cdot km^{-2}$	农业用水 比率/%	亩均灌溉用 水量/ $m^3$	地下水 开发程度/%	地表水开发 程度/%
1	北京	91	21.42	31	246.03	112	99
2	天津	78	18.81	49	247.74	132	290
3	河北	75	10.20	74	214.93	143	66
4	山西	31	3.43	55	191.39	41	38
5	河南	78	16.87	62	253.29	115	106
6	山东	86	13.21	84	234.90	45	94
7	内蒙古	39	1.44	65	283.04	100	40
8	辽宁	60	0.45	79	143.02	37	2
各指标权重 $w_j$		0.164	0.199	0.156	0.139	0.217	0.126

$$w = \sum_{j=1}^5 b_j w_j / \sum_{j=1}^5 b_j \quad (17)$$

将  $[-1, 1]$  均分成五部分,  $[0, 0.2]$ 、 $(0.2, 0.4]$ 、 $(0.4, 0.6]$ 、 $(0.6, 0.8]$ 、 $(0.8, 1]$  分别对应农业水资源承载力的  $V_5$  级、 $V_4$  级、 $V_3$  级、 $V_2$  级、 $V_1$  级。各区综合评分结果  $w$  与以上区间对比可得基于模糊综合评价法的农业水资源承载力评价等级。

#### 1.4 数据收集

本文数据资料主要来源于《中国统计年鉴》《海河年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《海河水资源公报》《海河流域农田水循环过程与农业高用水机制》以及水利部海河流域委员会。经整理, 现状海河流域评价指标数据统计及指标权重计算结果如表 4 所列。

## 2 评价结果

### 2.1 权重计算结果

根据式(1)一式(5), 计算得到各指标权重值如表 4 所列。从表中可以看出, 各权重由高到低排列为 0.217(地下水开采率) > 0.199(供水模数) > 0.163(有效灌溉面积比率) > 0.156(农业用水比率) > 0.139(亩均灌溉用水量) > 0.126(地表水开采率), 其中地下水开采率的权重相对最高, 对农业水资源承载力影响最大。

### 2.2 基于集对分析法和模糊综合评价法的评价结果分

通过集对分析法, 根据式(6)一式(10), 可以得出海河流域各地区农业水资源承载力综合评价联系主值数和对应等级, 如表 5 所列。通过模糊综合评判法, 根据式(11)一式(16), 可以得出海河流域各地区农业水资源承载力综合评分值及对应等级, 如表 5 所列。计算结果对比表明, 根据集对分析法和模糊综合评判法所得到的计算结果相同, 承载力分布情况如图 3 所示。

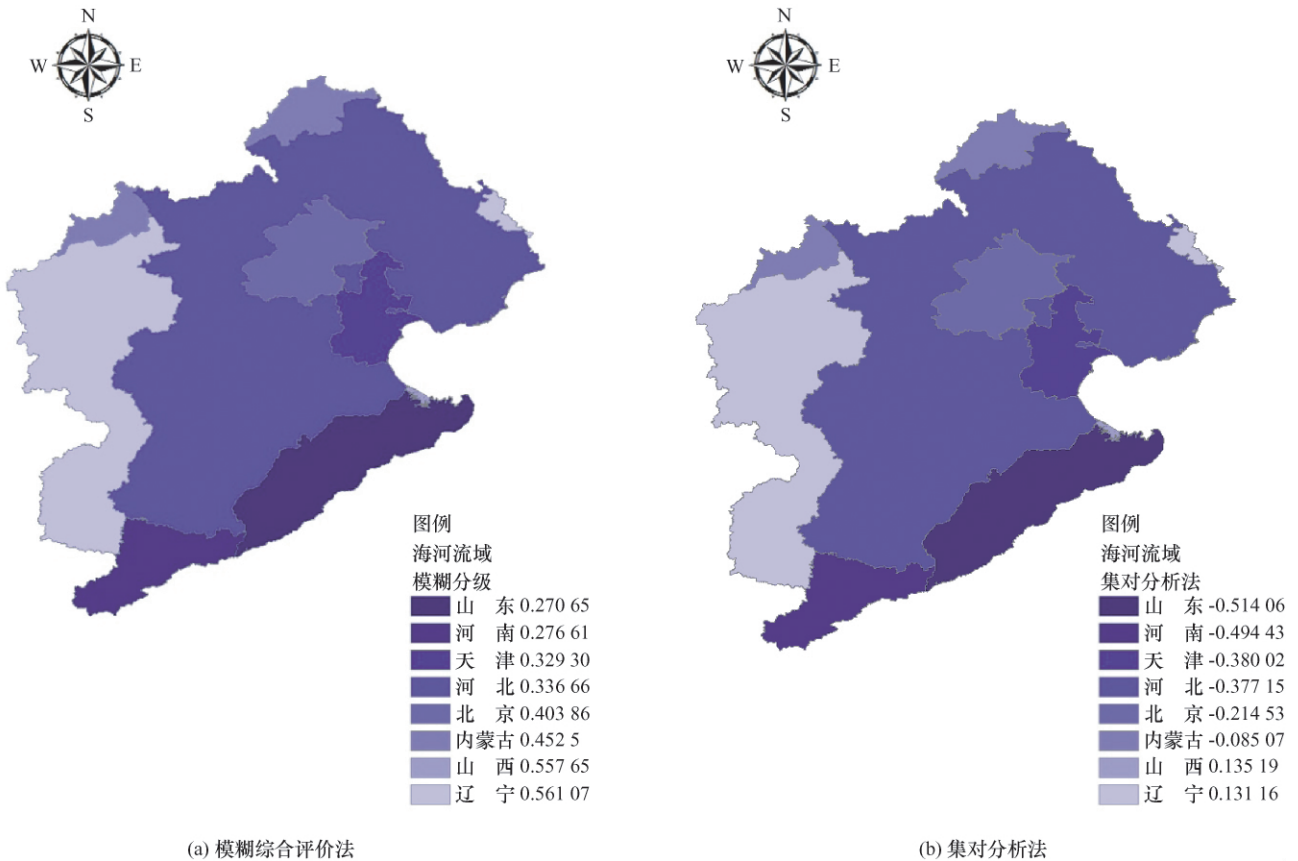


图3 海河流域农业水资源承载力情况示意

表5 海河区各省农业水资源承载力计算结果

区 划	集对分析法		模糊综合评判法	
	综合评价联系主值数	对应等级	综合评分值	对应等级
北 京	-0.21	IV	0.39	IV
天 津	-0.39	IV	0.33	IV
河 北	-0.38	IV	0.34	IV
山 西	0.14	III	0.56	III
河 南	-0.50	IV	0.28	IV
山 东	-0.51	IV	0.27	IV
内 蒙 古	-0.09	III	0.45	III
辽 宁	0.13	III	0.56	III

山西、内蒙古、辽宁的农业水资源承载潜力处于 $V_3$ 级临界状态。以上三个地区的有效灌溉面积比率分别为31%、39%、60%，灌溉工程基础设施配套不完善，导致灌溉用水量较大。北京是中国的政治、经济、文化中心，也是海河流域中城市化发展和人口增长最迅猛的地区，农田水利基础设施相对完善，但城市生活用水比例不断升高，挤占农业用水，导致农业水资源承载力较低。天津、河北、河南、山东的农业水资源承载力处于 $V_4$ 级饱和状态。河北、天津、山东德州市等地的漏斗区连成一片，形成大面积的漏斗

群，地下水超采严重，影响农业可持续发展，农业水资源承载力很低。河南省水资源紧缺，人均资源占有量仅 $420\text{ m}^3$ ，供需矛盾突出，而约占总用水量80%的农业用水效率很低，灌区灌溉水利用系数平均不足0.40，浪费严重，农业水资源承载力较低。

### 3 农业水资源承载能力计算

在基于农业水资源承载力综合评价的基础上，针对每个地区的评价结果，结合当地社会经济的生态环境情况，以灌溉粮田最高粮食单产为目标函数，以地下水开采率 $x_5$ 作为决策变量，将各地区承载力评价等级作为约束条件，通过“等级逆推”(即以现有等级向上等级的上下边界值作为约束条件，反推向上的这一等级下决策变量的值，如Ⅲ级向上一级为Ⅱ级，Ⅱ级向上一级为Ⅰ级)，建立线性规划模型。评价的八个区中，设北京、山西、内蒙古、辽宁从Ⅲ级逆推到Ⅱ级，天津、河北、河南、山东从Ⅳ级逆推到Ⅲ级。结合区间数理论，线性规划模型构建如下。

目标函数

$$\max f^{\pm} = \frac{c^{\pm} \cdot (W_1 + W_2 \cdot x_5^{\pm} + W_3) \cdot r_1 \cdot r_2}{x_1 \cdot r_3^{\pm}} \quad (18)$$

式中,  $c^{\pm}$  为粮食水分生产率;  $W_1$  为地表水供水;  $W_2$  为地下水资源量;  $x_5$  为地下水开采率;  $W_3$  为其他水源供水;  $r_1$  为粮田灌溉用水占总用水的比例, 设为现状灌溉用水比例上下波动 5%;  $r_2$  为灌溉粮田产粮量占粮食总产量的比例;  $x_1$  为有效灌溉面积;  $r_3^{\pm}$  为灌溉粮田面积占总灌溉面积的比例, 设为现状灌溉用水比例上下波动 5%。

约束条件

$$\mu_s^{\pm} \leq K^{\pm} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \mu_s^{\pm} &= \sum_{j=1}^n w_j \cdot \mu_{sj}^{\pm} \\ &= \sum_{j=1}^n w_j \cdot \mu^{sj} + w_5 \cdot \mu_{s5}^{\pm} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\mu_{s5}^{\pm} = \begin{cases} 1+0i_1+0i_2+0i_3+0j & 0 \leq x_5^{\mp} < k_1' \\ \frac{x_5^{\mp}-k_2'}{k_1'-k_2'} + \frac{k_1'-x_5^{\mp}}{k_1'-k_2'} i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j & k_1' \leq x_5^{\mp} < k_2' \\ 0 + \frac{x_5^{\mp}-k_3'}{k_2'-k_3'} i_1 + \frac{k_2'-x_5^{\mp}}{k_2'-k_3'} i_2 + 0i_3 + 0j & k_2' \leq x_5^{\mp} < k_3' \\ 0 + 0i_1 + \frac{x_5^{\mp}-k_4'}{k_3'-k_4'} i_2 + \frac{k_3'-x_5^{\mp}}{k_3'-k_4'} i_3 + 0j & k_3' \leq x_5^{\mp} < k_4' \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{x_5^{\mp}-k_5'}{k_4'-k_5'} i_3 + \frac{k_4'-x_1^{\pm}}{k_4'-k_5'} j & k_4' \leq x_5^{\mp} < k_5' \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + j & x_5^{\mp} \geq k_5 \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $K^+$  和  $K^-$  分别为将各地区评价等级调整上升一级后, 对应等级的综合评分上下限值;  $k_1' - k_5'$  为地下水开采率等级分界值, 其中  $k_1' = 13.7$ ,  $k_2' = 18.26$ ,  $k_3' = 22.86$ ,  $k_4' = 27.39$ ,  $k_5' = 31.96$ ;  $x_5$  为地下水开采率。

在 lingo11.0 环境下对模型进行编程与运行, 得各地区现状年有效灌溉面积比率和地下水开采率现状下优化结果如表 6 所列。

表 6 基于线性规划的有效灌溉面积和地下水开采率调整区间

区划	实际地下水开采率/%	实际地下水资源量/ $10^8 \text{ m}^3$	调整后地下水开采量适宜区间/ $10^8 \text{ m}^3$
北京	112	25.6	[3.67, 7.96]
天津	132	5.71	[0.68, 1.32]
河北	143	118.06	[16.01, 28.78]
山西	41	32.4	[4.35, 8.63]
河南	115	18.32	[2.49, 3.50]
山东	45	31.54	[4.21, 5.87]
内蒙古	100	2.64	[0.34, 0.51]
辽宁	37	0.66	[0.08, 0.17]

#### 4 结论与建议

本文根据海河流域实际状况, 选取六个指标构建

了农业水资源承载力评价体系, 采用基于集对分析理论的五元联系数法和模糊综合评价法对海河流域农业水资源承载力进行评价计算, 相关结论及有关建议具体如下。

(1) 海河流域北京、山西、内蒙古、辽宁的农业水资源承载能力处于  $V_3$  级, 天津、河北、河南、山东的农业水资源承载力处于  $V_4$  级饱和状态, 地下水开采量过大。这表明海河流域的农业水资源承载力的强弱与地下水失衡状况密切相关, 超载状态从东部平原不断向山前冲积洪积平原扩展。为保证国家粮食安全、保护生态环境, 建议将国家现行节水限采补贴直接用于南水北调的水价补贴, 充分利用南水北调中线给予海河流域内的天津、河北、河南、山东省内有关地区的分水指标, 以最大程度减少用于农业灌溉的地下水开发。同时, 加强海河流域各地区地下水开采的监测监控, 以水定电, 以电控水, 实行农业用水总量和效率控制。

(2) 现状条件下通过“等级逆推”, 北京地区地下水开采量需减少  $17.64 \times 10^8 \sim 21.93 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 天津需减少  $4.39 \times 10^8 \sim 5.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 河北需减少  $89.28 \times 10^8 \sim 102.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 山西需减少  $23.77 \times 10^8 \sim 28.05 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 河南需减少  $14.82 \times 10^8 \sim 15.83 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 山东需减少  $25.67 \times 10^8 \sim 27.33 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 内蒙古需减少  $2.13 \times 10^8 \sim 2.30 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 辽宁需减少  $0.49 \times 10^8 \sim 0.58 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。目前海河流域大部分地区地下水的抽取与涵养处于失衡状态, 北京、天津、河北的地下水开采率达 100% 以上, 失衡程度从西部山前冲积洪积地区不断向东部平原扩展加深, 各地区地下水开采量均应减少 68% 以上, 以保证地下水安全和生态安全, 进而维持、提高农业水资源承载能力。

(3) 建议适度压缩京津冀地区地下水严重超采区高耗水蔬菜和粮食产能, 压减的农作物产出考虑从其他省份输入; 适当压缩河北河南地区冬小麦种植面积(冬小麦具备生态功能, 短期内不宜大规模压缩其种植面积); 山东地区适当扩大地下水限采区和禁采区。各地农业部门应引导农民调整农业种植结构、降低灌溉用水强度, 不断提升灌溉水生产力, 优化耗水时空格局, 发展非充分灌溉, 压减灌溉用水总量。

(4) 流域内山前冲积洪积平原地区的种植大户、家庭农场、合作社等新型经营主体, 应优先全面推广节水农业, 加大相关财政资金的补贴力度, 在供水模数不增加的条件下尽量降低亩均用水量, 充分发挥以上新型经营主体发展节水灌溉的内在驱动力, 将土地

规模化经营与节水灌溉同步推进,改善灌溉条件,促进农业灌溉用水总量降低。

受当前水资源税改革推进影响,农业水资源承载力超载状态可能有一定程度的减轻,但鉴于改革以试点形式推进,且农作物种植结构调整并未同步跟进,亩均用水量短期内不会明显下降,超载改善状态并不乐观。研究地下水允许开采阈值,确定合理的适水种植模式,包括现有供水条件下具体农作物种植的压减范围,以及外调耗水作物的合理量值,是下一步深入开展农业水资源承载力研究的方向。

#### 参考文献:

- [1] 戴明宏,王腊春,魏兴萍.基于熵权的模糊综合评价模型的广西水资源承载力空间分异研究[J].水土保持研究,2016,23(1):193-199.
- [2] 安强,魏传江,贺华翔,等.基于模糊综合评价法的河南省中原城市群水资源承载力评价研究[J].节水灌溉,2019(12):65-71.
- [3] 袁艳梅,沙晓军,刘煜晴,等.改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J].水资源保护,2017,33(1):52-56.
- [4] 邢军,孙立波.基于因子分析与模糊综合评判方法的水资源承载力评价[J].节水灌溉,2014(4):52-55.
- [5] 苏永红,冯起,刘蔚,等.应用模糊综合评判方法评价石羊河流域水资源承载力[J].干旱区研究,2009,26(2):169-175.
- [6] 卜楠楠,唐德善,尹笋.基于AHP法的浙江省水资源承载力模糊综合评价[J].水电能源科学,2012,30(3):42-44.
- [7] 张晓鹏,张鑫.基于模糊综合评价法的区域水资源承载力研究[J].中国农村水利水电,2009(7):18-21.
- [8] MENG L H, CHEN Y N, LI W H, et al. Fuzzy comprehensive evaluation model for water resources carrying capacity in Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. Chinese Geographical Science, 2009, 19(1): 89-95.
- [9] 赵自阳,李王成,王霞,等.基于主成分分析和因子分析的宁夏水资源承载力研究[J].水文,2017,37(2):64-72.
- [10] 许朗,黄莺,刘爱军.基于主成分分析的江苏省水资源承载力研究[J].长江流域资源与环境,2011,20(12):1468-1474.
- [11] 曹丽娟,张小平.基于主成分分析的甘肃省水资源承载力评价[J].干旱区地理,2017,40(4):906-912.
- [12] 李燕,张兴奇.基于主成分分析的长江经济带水资源承载力评价[J].水土保持通报,2017,37(4):172-178.
- [13] 邢旭光,史文娟,张译丹,等.基于主成分分析法的西安市地下水水资源承载力评价[J].水文,2013,33(2):35-38.
- [14] 余思敏,胡雨村.生态城市水资源承载力的系统动力学仿真[J].四川师范大学学报(自然科学版),2013,36(1):126-131.
- [15] 卢超,王蕾娜,张东山,等.水资源承载力约束下小城镇经济发展的系统动力学仿真[J].资源科学,2011,33(8):1498-1504.
- [16] 姜秋香,赵蚰竹,王子龙,等.系统动力学在水土资源系统中应用研究进展[J].东北农业大学学报,2017,48(7):91-96.
- [17] 徐志,马静,王浩,等.长江口影响水资源承载力关键指标与临界条件[J].清华大学学报(自然科学版),2019,59(5):364-372.
- [18] 李淑芹,董洁,李恩博,等.基于多目标决策的临沂市水资源承载力研究[J].人民黄河,2008,30(6):55-56.
- [19] 刘旭东,曾现来,巩如英,等.基于多目标决策与主成分分析的水资源承载力评价及预测——以河北省为例[J].安徽农业科学,2008(2):751-753.
- [20] 戴洪刚,梁虹,张美玲.基于多目标决策——理想区间模型的喀斯特地区枯水资源承载力评价[J].水土保持研究,2007,14(6):23-26.
- [21] 熊雁晖.海河流域水资源承载能力及水生态系统服务功能的研究[D].北京:清华大学,2004.
- [22] 王彦,孟令爽.基于熵权理想点的水资源承载力风险评价[J].人民长江,2019,50(4):142-146.
- [23] 李如意,束龙仓,鲁程鹏,等.济宁市水资源承载能力评价方法的应用与对比[J].水资源保护,2018,34(6):65-70.
- [24] 苏永军,王慧,孔淑芹.基于投影寻踪-物元可拓模型的区域水资源承载力评价[J].节水灌溉,2017(2):80-84.
- [25] 李宁,张文丽,李经纬.“三条红线”约束下的鄂尔多斯市水资源承载力评价[J].中国农村水利水电,2016(1):8-11.
- [26] 郭晓英,陈兴伟,陈莹,等.基于粗糙集和BP神经网络组合法的水资源承载力动态变化分析[J].南水北调与水利科技,2015,13(2):236-240.
- [27] 杨琳琳,李波,付奇.基于BP神经网络模型的新疆水资源承载力情景分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(2):216-222.
- [28] 刘树锋,陈俊合.基于神经网络理论的水资源承载力研究[J].资源科学,2007,29(1):99-105.
- [29] 许莉,赵高正,杨海光.水资源承载力的BP神经网络评价模型研究[J].计算机工程与应用,2008(8):217-219.
- [30] 郑长统,梁虹.基于人工神经网络的喀斯特地区水资源承载力综合评价——以贵州省为例[J].中国岩溶,2010,29(2):170-175.
- [31] 门宝辉,王志良,梁川,等.物元模型在区域地下水水资源承载力综合评价中的应用[J].四川大学学报(工程科学版),2003,35(1):34-37.
- [32] 谷红梅,贾丽,蒋晓辉,等.基于熵权物元可拓法的黑河中游水资源承载力评价[J].灌溉排水学报,2016,35(6):87-92.
- [33] 郭嘉伟,张军,陈彦.基于熵权可拓物元模型的会宁县水土资源承载力评价[J].甘肃农业大学学报,2018,53(6):195-203.
- [34] 田静宜,王新军.基于熵权模糊物元模型的干旱区水资源承载力研究——以甘肃民勤县为例[J].复旦学报(自然科学版),2013,52(1):86-93.
- [35] 陈南祥,徐敏.基于熵权可拓模型的水资源承载能力评价[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(6):205-210.
- [36] FALKENMARK M, LUNDQVIST J. Towards water security: political determination and human adaptation crucial [J]. Natural Resources Forum, 1998, 22(1): 37-51.
- [37] HARRIS J M, KENNEDY S. Carrying capacity in agriculture: glob-

- al and regional issues [J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 443-461.
- [38] MITCHELL G. Demand forecasting as a tool for sustainable water resource management [J]. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 1999, 6(4): 231-241.
- [39] 孙富行. 水资源承载力分析与应用 [D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [40] 袁鹰. 区域水资源承载力评价方法研究 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2006.
- [41] 张旋. 天津市水环境承载力的研究 [D]. 天津: 南开大学, 2010.
- [42] 贾建辉, 龙晓君. 水资源承载力预测模型研究 [J]. *水利水电技术*, 2018, 49(10): 21-27.
- [43] 刘玉邦, 梁川. 基于模糊物元分析的长江上游水资源承载力综合评价 [J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(3): 39-42.
- [44] 许有鹏. 干旱区水资源承载能力综合评价研究——以新疆和田河流域为例 [J]. *自然资源学报*, 1993(3): 229-237.
- [45] 张红丽. 新疆节水生态农业系统理论与制度创新研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2004.
- [46] 赵建世, 王忠静, 甘泓, 等. 双要素水资源承载力计算模型及其应用 [J]. *水力发电学报*, 2009, 28(3): 176-180.
- [47] DOU M, MA J X, LI G Q, et al. Measurement and assessment of water resources carrying capacity in Henan Province, China [J]. *Water Science and Engineering*, 2015, 8(2): 102-113.

(责任编辑 王海锋)