

黄河流域水资源承载力评价

张宁宁, 栗晓玲, 周云哲, 牛纪莘

(西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨陵 712100)

摘要: 定量评价水资源承载力, 可为有效调控水资源, 提高水资源承载力和消除水资源超载区提供依据。从水资源承载力新内涵出发, 构建“量—质—域—流”的四维水资源承载力评价指标体系, 确定指标评价等级标准。针对水资源承载力评价涉及许多不确定因素以及指标间存在耦合关系等特点, 采用可考虑指标间耦合关系的EFAST算法计算权重, 结合可处理评价不确定问题的联系熵模型进行水资源承载力评价。以黄河流域为例, 计算得权重与熵权法进行比较, 对2015年流域61个地市的水资源承载力状况进行了综合评价。结果表明: EFAST算法计算权重比熵权法更合理; 黄河流域水资源承载力处于Ⅰ级(极高)、Ⅱ级(较高)、Ⅲ级(中等)、Ⅳ级(较低)和Ⅴ级(极低)的地市数量占评价总地市数的比例分别为0.4.9%、18.1%、63.9%和13.1%, 其中Ⅳ级和Ⅴ级分布在除青海省外的其他省区的地市。

关键词: 黄河流域; 水资源承载力; 联系熵模型; EFAST算法

水资源是维持自然环境和人类生存发展的最重要的一种基础资源^[1-2]。经济发展和人口增长伴随着水资源短缺和水环境污染问题日益加剧, 区域水资源承载力的研究已经引起政府和专家学者的高度重视^[3]。因此, 合理评价水资源承载力可为区域水资源的可持续利用和社会的可持续发展提供决策指导^[4]。王建华等^[5]认为水资源承载能力或水资源承载力是以维系良好的水生态环境系统为前提, 在特定的经济条件与技术水平下, 区域水资源的最大可开发利用规模是对经济社会发展的最大支撑能力。

以往水资源承载力评价以水量、水质方面为主选取指标分析, 较少结合水域空间和水动力过程属性综合分析, 难以全面评价水资源承载力^[5]。已有对水资源承载力的评价方法较多, 包括物元综合评价模型^[6]、主成分分析法^[7]、模糊物元模型^[8]、熵模型^[9]、综合评价指标法^[10]、人工神经网络^[11]等。由于水资源承载力受水量、水质等多种因素的影响, 因此具有随机性、模糊性。联系熵模型能有效地处理不确定问题, 已在水资源脆弱性评价^[12]、煤矿安全预评价^[13]、围岩稳定性评价^[14]、项目组合脆性风险评价^[15]等领域被广泛使用。权重评价方法有层次分析法、主观加权法和熵权法等, 主观赋权法较易受个人主观影响, 客观赋权法客观性强, 有时与实际情况不相符。这些权重计算方法没有考虑到指标之间的耦合关系。扩展傅里叶振幅敏感性分析(简称EFAST)方法, 常用于全局灵敏度分析, 可以量化指标对结果的敏感性, 同时可以定量计算指标间关系的不确定性。Luan等^[16]在可持续性发展评价采用EFAST计算权重, 发现EFAST权重算法与传统熵权法相比

收稿日期: 2019-01-07; 修订日期: 2019-05-19

基金项目: “十三五”国家重点研发计划(2016YFC0401306)

作者简介: 张宁宁(1994-), 女, 陕西延安人, 硕士, 研究方向为水资源承载力研究。E-mail: 1062153157@qq.com

通讯作者: 栗晓玲(1968-), 女, 四川开江人, 教授, 博士生导师, 研究方向为水资源规划与管理。

E-mail: suxiaoling17@126.com

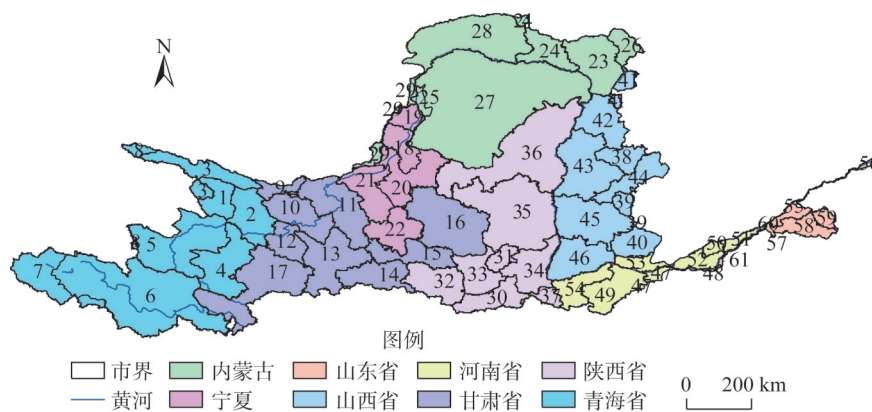
提供了更多信息,并且在定量分析和综合评价方面更加具体。

为了定量剖析水资源在量质域流四个维度下承载力的状况,本文根据水资源承载力内涵建立了“量一质一域一流”四维水资源承载力评价指标体系,采用联系熵模型与EFAST权重算法相结合,对2015年黄河流域水资源承载力进行综合评价,为有效调控黄河流域水资源,提高水资源承载力和消除水资源超载区提供依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

黄河发源于青海省巴颜喀拉山脉,流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南、山东9个省区(图1),最后于山东省东营市垦利县注入渤海。全长约5464 km,流域面积79.5万km²,介于32°~42°N、96°~119°E。



注:图中数字1~61分别表示61个地市的编号。

图1 黄河流域概况

Fig. 1 Overview of the Yellow River Basin

黄河流域是中国重要的灌溉农业区,重要工业带,承载着全国12.5%的人口,但多数地市面临水资源短缺,河流污染严重,地下水超采,湿地退化等问题,评价黄河流域水资源承载力的空间变化特征,为提高水资源承载力和消除水资源超载区提供依据,未来规划水资源配置方案提供参考。

1.2 研究方法

1.2.1 水资源承载力评价指标体系构建

参考王建华等^[5]对水资源承载力内涵的界定,从量(水资源数量)—质(水环境容量)—域(水域空间)—流(水动力过程)四个维度展开。

根据综合评价遵循的层次性、完备性、可操作性等原则,黄河流域水资源、水生态环境现状和特征,水量维度上重点考虑水资源自然禀赋条件和社会经济发展用水水平;水质维度上选取水功能区水质达标率、人均污染物排放量;水域维度上考虑水域面积率,湿地面积变化情况,植被覆盖率;水流维度上主要考虑河流流态和河流连通性。

从水量、水质、水域、水流四个方面建立由17个指标构成的水资源承载力评价指标体系。参考国内外水资源承载力评价分级指标及国家规范标准,结合黄河流域各地市水资源

特点,将评价等级分为五个等级,具体分级标准见表1。

I级(极高)表示承载潜力大,Ⅲ级(中等)表示该指标已经基本处在临界水平,V级(极低)表示该指标已成为限制社会经济和人类发展的重要因素,Ⅱ级(较高)和Ⅳ级(较低)属于过渡级别,分别介于I级和Ⅲ级、Ⅲ级和V级之间。

1.2.2 EFAST算法

EFAST法是由结合Sobol's法以及傅里叶振幅灵敏度检验法提出的基于方差分解的全局敏感性分析方法,即认为模型输出结果的敏感性可以用模型结果的方差来反映。该方法将模型的敏感性分为单个参数独立作用的敏感性及各参数之间相互作用的敏感性^[17]。

根据Sobol方法的分解模型思路,模型输出的总方差可以分解为单个参数和组合参数的函数:

$$V=\sum_i V_i+\sum_{i\neq j} V_{ij}+\sum_{i\neq j\neq k} V_{ijk}+\cdots+\sum V_{12\cdots n}$$

(1)

表1 黄河流域各地市水资源承载力等级评价标准及权重

Table1 Classification criteria and the weights for water resources carrying capacity evaluation in the Yellow River Basin				I级(极高)	Ⅱ级(较高)	Ⅲ级(中等)	Ⅳ级(较低)	V级(极低)
准则层	指标代码	指标名称	权重	承载潜力大	可承载	临界超载	超载	严重超载
量	C1	人均水资源量/(m ³ /人)	0.072	3000~4000	2000~3000	1000~2000	500~1000	300~500
	C2	降水深/mm	0.057	800~1000	600~800	400~600	200~400	0~200
	C3	万元农业产值用水量/(m ³ /万元)	0.047	0~40	40~100	100~200	200~400	400~600
	C4	人均生活用水量/(L/人·d)	0.037	10~30	30~40	40~50	50~60	60~80
	C5	地下水开采系数	0.118	0~0.5	0.5~0.75	0.75~0.9	0.9~1.05	1.05~1.3
	C6	万元工业增加值用水量/(m ³ /万元)	0.034	0~10	10~20	20~40	40~100	100~200
	C7	生态环境用水率/%	0.120	6~8	4~6	2~4	1~2	0~1
质	C8	水功能区水质达标率/%	0.064	90~100	70~90	60~70	40~60	30~40
	C9	人均氨氮排放量/(kg/人)	0.035	0~0.5	0.5~1	1~2	2~3	3~4
	C10	人均化学需氧量排放量/(kg/人)	0.045	0~2	2~5	5~10	10~15	15~20
域	C11	水域面积率/%	0.052	5~8	3.5~5	2~3.5	1~2	0.5~1
	C12	湿地保留率/%	0.065	90~100	70~90	50~70	30~50	20~30
	C13	植被覆盖率/%	0.072	65~75	55~65	45~55	30~45	15~30
流	C14	河网密度/(1/km)	0.037	0.6~0.8	0.35~0.6	0.1~0.35	0.05~0.1	0~0.05
	C15	最小3日流量千分比/%	0.067	3.5~5	3.0~3.5	2.5~3.0	1.5~2.5	1.0~1.5
	C16	流量逆转次数/次	0.043	60~70	70~80	80~100	100~120	120~140
	C17	纵向连通性/(座/10 ³ km)	0.035	0~50	50~100	100~200	200~300	300~400

注: C5为万元农业产值用水量,农灌用水量/农业生产总值; C11为水域面积率,直接反映水面面积,表征水域的自然生态和社会功能; C12为湿地保留率,指规划区域内2015年湿地总面积/1995年湿地总面积,表征湿地在不同人类干扰强度下的分布情况; C15为最小3日流量千分比,年最小三日径流量/多年平均径流量,满足植被扩张、河流河道地貌和自然栖息地的构建、河流和滞洪区的养分交换湖、池塘、滞洪区的植物群落分布的需要^[18],表征河流流态对水生态的影响; C16为流量逆转次数,代表日流量由增加变成减少或由减少变成增加的次数,表征导致植物的干旱,促成岛上、滞洪区的有机物的诱捕、低速生物体的干燥胁迫等行为^[18]; C17为纵向连通性,水利工程等障碍物数量/水系长度,本文指大坝对河流连通性的影响,指标能够在一定程度上反映水坝等障碍物对生物迁移、能量及营养物质传递过程的影响。

式中: V_i 是参数 x_i 的方差; V_{ij} 、 V_{ijk} 、 $V_{12\cdots n}$ 等是各参数相互作用的方差。参数 x_i 对模型输出总方差的直接贡献可以用一阶敏感性指数 S_i 反映, 同理, 参数 x_i 与其他参数相互作用的二阶 S_{ij} 、三阶 S_{ijk} 和高阶敏感性指数 $S_{ij,\cdots,n}$ 可以定义为:

$$S_i = \frac{V_i}{V}, S_{ij} = \frac{V_{ij}}{V}, S_{ijk} = \frac{V_{ijk}}{V}, S_{ij,\cdots,n} = \frac{V_{ij,\cdots,n}}{V} \quad (2)$$

参数 x_i 对模型输出总方差的直接贡献和通过参数间相互作用间接对模型输出方差的贡献可用总敏感性指数 S_{ii} 来表示, 即各阶敏感性指数之和:

$$S_{ii} = S_i + S_{ij} + S_{ijk} + \cdots + S_{12\cdots n} \quad (3)$$

不同指标对模型结果的影响不同, 各指标之间相互耦合的影响在评价结果中产生一定的不确定性。为了使权重更加全面, 将耦合效应添加到权重确定中。因此, 通过计算每个指标的 S_{ii} , 可以得到第 i 个指标的权重。

$$w_i = S_{ii} / \sum_{i=1}^n S_{ii} \quad (4)$$

式中: w_i 是指标权重。

1.2.3 联系熵

联系熵是 1992 年由赵克勤^[19]提出, 其表达式如下:

$$S = \sum_{i=1}^n a_i \ln(a_i + e) + \sum_{i=1}^n b_i \ln(b_i + e) \times I + \sum_{i=1}^n c_i \ln(c_i + e) \times J \quad (5)$$

针对实际情况, 对集对分析^[20]联系度 $u = a + bI + cJ$ 推广加以应用:

$$u = a_1 + a_2 + b_1 I_1 + b_2 I_2 + b_3 I_3 + c_1 J_1 + c_2 J_2 \quad (6)$$

式中: a_1 和 a_2 分别表示同一度和偏同一度, 它们的系数假设一致; b_1 、 b_2 和 b_3 相应地表示偏同差异度, 中差异度和偏反差异度; 对应系数 I_1 、 I_2 、 I_3 分别是偏同差异度系数、中差异度系数和偏反差异度系数; c_1 和 c_2 分别为偏异对立度和对立度; J_1 和 J_2 分别偏异对立度系数和对立度系数, 可均取 -1。

水资源承载力一般分为 5 个等级, x_i 为指标数据, s_i 为等级的边界值, 联系度的确定方法为:

$$u_i = \begin{cases} \frac{x_i - s_1}{2(s_0 - s_1)} + 0.5 + \frac{s_0 - x_i}{2(s_0 - s_1)} I_1 + 0 I_2 + 0 I_3 + 0 J_1 + 0 J_2 & x_i \in \text{I 级} \\ 0 + \frac{x_i - s_2}{2(s_1 - s_2)} + 0.5 I_1 + \frac{s_1 - x_i}{2(s_1 - s_2)} I_2 + 0 I_3 + 0 J_1 + 0 J_2 & x_i \in \text{II 级} \\ 0 + 0 + \frac{x_i - s_3}{2(s_2 - s_3)} I_1 + 0.5 I_2 + \frac{s_2 - x_i}{2(s_2 - s_3)} I_3 + 0 J_1 + 0 J_2 & x_i \in \text{III 级} \\ 0 + 0 + 0 I_1 + \frac{x_i - s_4}{2(s_3 - s_4)} I_2 + 0.5 I_3 + \frac{s_3 - x_i}{2(s_3 - s_4)} J_1 + 0 J_2 & x_i \in \text{IV 级} \\ 0 + 0 + 0 I_1 + 0 I_2 + \frac{x_i - s_5}{2(s_4 - s_5)} I_3 + 0.5 J_1 + \frac{s_4 - x_i}{2(s_4 - s_5)} J_2 & x_i \in \text{V 级} \end{cases} \quad (7)$$

设水资源承载力指标样本集为 $A = \{x_i (i=1, 2, \cdots, n)\}$, 等级阈值为集合 $B_k = \{s_k (k=0, 1, 2, \cdots, 5)\}$, 这两个集合构成集合对 $H_k = (A, B_k)$, 利用式 (7) 计算联系度, 承载力指标的联系熵的计算式如下:

$$S_i = a_{1i} \ln(a_{1i} + e) + a_{2i} \ln(a_{2i} + e) + b_{1i} \ln(b_{1i} + e) \times I_1 + b_{2i} \ln(b_{2i} + e) \times I_2 + b_{3i} \ln(b_{3i} + e) \times I_3 + c_{1i} \ln(c_{1i} + e) \times J_1 + c_{2i} \ln(c_{2i} + e) \times J_2 \quad (8)$$

式中: $S_{s1} = a_{1i} \ln(a_{1i} + e)$ 表示同熵; $S_{s2} = a_{2i} \ln(a_{2i} + e)$ 表示偏同熵; $S_{f1} = b_{1i} \ln(b_{1i} + e) \times I_1$ 表示偏同差异熵; $S_{f2} = b_{2i} \ln(b_{2i} + e) \times I_2$ 表示中差异熵; $S_{f3} = b_{3i} \ln(b_{3i} + e) \times I_3$ 表示偏反差异熵; $S_{p1} = c_{1i} \ln(c_{1i} + e) \times J_1$ 表示临界反熵; $S_{p2} = c_{2i} \ln(c_{2i} + e) \times J_2$ 表示反熵。

经加权计算,得到水资源承载力综合联系熵:

$$S = \sum_{i=1}^m w_i \times S_i \quad (9)$$

1.3 数据来源

选取2015年作为评价年,对黄河流域61个地市进行水资源承载力评价。水量,水质指标数据来源于黄河流域各地市水资源公报、统计年鉴、水文年鉴,水域指标数据来源于中国科学院资源与环境数据中心网站的1995年及2015年中国土地利用现状遥感监测数据,水流指标数据主要来源于黄河水利委员会网站和各地市网站统计。

为消除量纲的不统一性,将指标分成越大越优和越小越优型,并进行标准化处理。基于建立的水资源承载力评价指标体系和评价方法,由MATLAB软件编写程序进行评价。黄河流域各地市水资源承载力联系熵评分及等级结果见表2。

表2 黄河流域各地市水资源承载力评分与等级

Table 2 Scores and grades of water resources carrying capacity of cities in the Yellow River Basin

省(自治区)	编号	地市	水量		水质		水域		水流		综合	
			评分	等级	评分	等级	评分	等级	评分	等级	评分	等级
青海	1	西宁市	-0.35	4	-0.61	4	-0.83	5	0.07	3	-0.40	4
	2	海东市	-0.02	3	0.51	2	-0.58	4	0.15	3	-0.02	3
	3	海北州	0.26	2	0.66	2	-0.67	4	0.03	3	0.10	3
	4	黄南州	0.19	3	0.57	2	-1.04	5	0.11	3	0.00	3
	5	海南州	0.53	2	0.73	2	0.18	3	0.07	3	0.41	2
	6	果洛州	0.71	2	0.82	1	-0.59	4	0.05	3	0.36	2
	7	玉树州	0.92	1	0.72	2	-0.65	4	0.18	3	0.46	2
	8	海西州	0.36	2	-0.54	4	-1.14	5	0.13	3	-0.12	3
甘肃	9	武威市	-0.73	4	-0.25	4	-1.04	5	0.05	3	-0.65	4
	10	兰州市	-1.26	5	0.00	3	-0.49	4	-0.33	4	-0.76	4
	11	白银市	-1.02	5	-0.56	4	-0.90	5	0.06	3	-0.93	5
	12	临夏州	-0.79	4	0.01	3	-0.46	4	-0.25	4	-0.52	4
	13	定西市	-1.06	5	0.40	2	-0.83	5	-0.01	3	-0.62	4
	14	天水市	-0.50	4	0.32	2	-0.37	4	-0.30	4	-0.32	4
	15	平凉市	-0.23	4	-0.13	3	-0.77	4	-0.34	4	-0.34	4
	16	庆阳市	-0.74	4	0.04	3	-0.76	4	-0.28	4	-0.54	4
宁夏	17	甘南州	0.39	2	0.47	2	-0.55	4	0.03	3	0.16	3
	18	银川市	-0.93	5	-0.38	4	-0.53	4	-0.07	3	-0.62	4
	19	石嘴山	-0.80	5	-0.34	4	-0.33	4	-0.15	3	-0.53	4
	20	吴忠市	-0.78	4	-0.52	4	-0.99	5	-0.13	3	-0.66	4
	21	中卫市	-0.76	4	-0.78	4	-0.54	4	-0.13	3	-0.61	4
	22	固原市	-0.31	4	-0.97	5	-0.58	4	-0.32	4	-0.46	4

续表2

省(自治区)	编号	地市	水量		水质		水域		水流		综合	
			评分	等级	评分	等级	评分	等级	评分	等级	评分	等级
内蒙古	23	呼和浩特市	-0.93	5	-0.21	4	-0.42	4	-0.12	3	-0.58	4
	24	包头市	-1.04	5	-0.57	4	-0.51	4	-0.08	3	-0.83	5
	25	乌海市	-0.81	5	-0.70	4	-0.39	4	-0.27	4	-0.62	4
	26	乌兰察布市	-1.03	5	-0.40	4	-0.62	4	-0.13	3	-0.70	4
	27	鄂尔多斯	-0.81	5	-1.04	5	0.18	3	-0.49	4	-0.60	4
	28	巴彦淖尔	-0.96	5	-0.81	5	-0.09	3	-0.15	3	-0.94	5
	29	阿拉善盟	-1.08	5	-0.53	4	-1.15	5	-0.87	5	-0.98	5
陕西	30	西安市	0.18	3	-0.34	4	-0.44	4	-0.42	4	-0.12	3
	31	铜川市	-0.43	4	-0.33	4	-0.94	5	-0.48	4	-0.52	4
	32	宝鸡市	-0.82	5	0.08	3	-0.71	4	-0.41	4	-0.59	4
	33	咸阳市	-1.04	5	0.07	3	-0.18	3	-0.51	4	-0.62	4
	34	渭南市	-0.82	5	0.12	3	-0.31	4	-0.48	4	-0.53	4
	35	延安市	-0.07	3	0.06	3	-0.91	5	-0.76	4	-0.34	4
	36	榆林市	-0.75	4	-0.47	4	-1.01	5	-0.93	5	-0.88	5
山西	37	商洛市	0.05	3	0.17	3	-0.83	5	-0.22	4	-0.15	3
	38	太原市	-1.06	5	-0.04	3	-0.47	4	-1.06	5	-0.92	5
	39	长治市	-0.76	4	0.14	3	-0.54	4	-0.42	4	-0.53	4
	40	晋城市	-0.50	4	-0.12	3	-0.47	4	-1.10	5	-0.55	4
	41	朔州市	-0.52	4	-0.10	3	-0.43	4	-0.51	4	-0.44	4
	42	忻州市	0.10	3	0.07	3	-0.36	4	-0.44	4	-0.09	3
	43	吕梁市	-0.69	4	-0.22	4	-0.69	4	-0.54	4	-0.59	4
河南	44	晋中市	-0.52	4	-0.10	3	-0.76	4	-0.50	4	-0.50	4
	45	临汾市	-0.37	4	-0.62	4	-0.69	4	-0.54	4	-0.50	4
	46	运城市	-1.11	5	-1.08	5	-0.06	3	-1.20	5	-1.05	5
	47	郑州市	-0.70	4	-0.27	4	-0.37	4	-0.69	4	-0.58	4
	48	开封市	0.10	3	0.03	3	-0.22	4	-0.25	4	-0.03	3
	49	洛阳市	0.40	2	0.23	2	-0.21	4	-0.49	4	0.10	3
	50	安阳市	0.01	3	-0.24	4	-0.76	4	-0.67	4	-0.29	4
山东	51	濮阳市	-0.60	4	-0.98	5	-0.30	4	-0.46	4	-0.62	4
	52	新乡市	-0.48	4	-0.58	4	-0.28	4	-0.27	4	-0.42	4
	53	焦作市	-0.79	4	-0.65	4	-0.13	3	-0.43	4	-0.58	4
	54	三门峡	-0.02	3	0.09	3	-0.37	4	-1.00	5	-0.31	4
	55	济南市	-0.39	4	-0.20	4	-0.35	4	-1.15	5	-0.52	4
	56	东营市	-0.35	4	0.11	3	0.03	3	-0.86	5	-0.44	4
	57	济宁市	0.01	3	-0.09	3	0.03	3	-0.68	4	-0.13	3
	58	泰安市	-0.07	3	-0.12	3	-0.12	3	-0.92	5	-0.37	4
	59	莱芜市	-1.01	5	0.34	2	-0.36	4	-1.11	5	-0.80	5
	60	聊城市	-0.41	4	-0.52	4	-0.31	4	-1.07	5	-0.53	4
	61	菏泽市	-0.35	4	-0.27	4	-0.28	4	-0.84	5	-0.42	4

2 结果分析

2.1 EFAST算法与熵权法权重对比

根据黄河流域各地市2015年资料,运行软件SimLab 2.2及式(4)得到各指标的权重,结果见表1。各指标敏感性指数见图2,EFAST算法和熵权法计算权重结果见图3。

从图2看,各指标一阶敏感性指数小于总敏感性指数,红色条显示指标间耦合效应,其范围为0.027~0.164,耦合效应值最大达到一阶敏感性指数的7.9倍,改变了一阶敏感性指数对应的指标敏感性排序,即一阶敏感性指数的排序为生态环境用水率>地下水开采系数>植被覆盖率>湿地保留率>最小3日流量千分比,总敏感性指数为生态环境用水率>地下水开采系数>人均水资源量>植被覆盖率>最小3日流量千分比,因此各指标之间可能存在耦合关系并且不能被忽略。

从图3看,EFAST算法的前五项指标分别为生态环境用水率、地下水开采系数、人均水资源量、植被覆盖率和最小3日流量千分比,权重分别0.120、0.118、0.072、0.072和0.067,占总贡献率的45%,包括水量、水域、水流指标,应作为改善黄河流域水资源承载力的重点,其余指标的权重介于0.034和0.065之间,可能对评估结果影响较小。熵权法前五项指标为:人均水资源量(0.086),植被覆盖率(0.082),最小3

日流量千分比(0.078),水功能区水质达标率(0.073),地下水开采系数(0.068),结果不同于EFAST方法计算的前五项权重指标,生态环境用水率计算差异较大,因为EFAST方法考虑指标间的耦合效应。由于五项指标和其他指标间的作用不确定,这种作用足以产生高敏感性,因此EFAST方法可以更有效地识别指标的重要性。熵权法分配权重时仅基于分散状态的数据,忽略与其他指标相关联的耦合效应。对于水资源承载力指标体系,权重的微小变化可能导致不同评价结果。因此,指标间的相互影响对于准确评价是不可忽视的。

2.2 评价结果与分析

使用式(9)计算联系熵,参考文献[12]并结合黄河流域实际状况将其分为五个等级:(0.8, 1.31], (0.2, 0.8], (-0.2, 0.2], (-0.8, -0.2], (-1.31, -0.8], 分别表示Ⅰ级(极高)、Ⅱ级(较高)、Ⅲ级(中等)、Ⅳ级(较低)和Ⅴ级(极低)。黄河流域各地市水资源

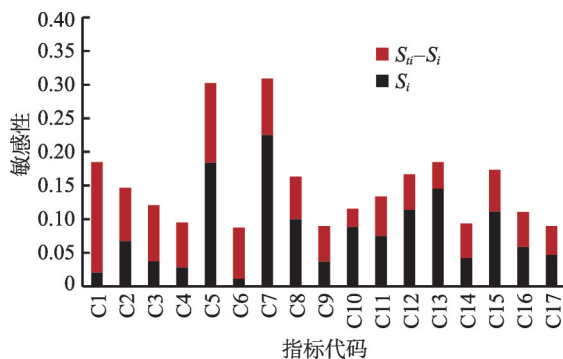


图2 各指标敏感性指数

Fig. 2 Sensitivity index value of each indicator

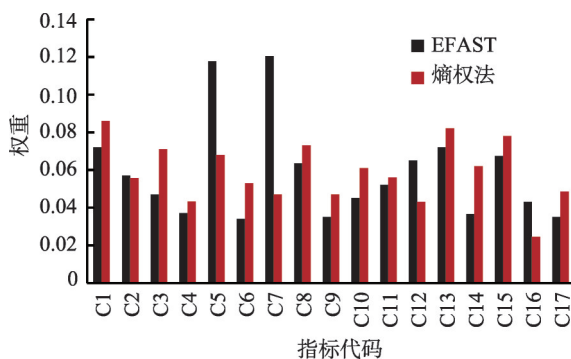


图3 EFAST算法和熵权法计算权重对比

Fig. 3 Weights calculated by the entropy method and the EFAST algorithm

源承载力评分与等级见表2。用ArcGIS绘制各地市水资源承载力等级图(图4),各地市量质域流四维水资源承载力等级图分别见图5。

从图4看,青海省除西宁水资源承载力超载,海南州、果洛州和玉树州处于可承载状态,其余地市处于临界超载状态。甘肃省甘南州水资源承载力临界超载,白银市严重超载,其余地市处于超载状态。宁夏回族自治区各地市均处于超载状态。内蒙古全省水资源承载力超载,其中包头、巴彦淖尔和阿拉善盟严重超载。陕西省西安和商洛处于临界超载状态,除榆林市处于严重超载状态外,其余地市处于超载状态。山西省水资源承载力除忻州临界超载,太原和运城严重超载,其余地市处于超载状态。河南省开封和洛阳处于临界超载状态,其余地市处于超载状态。山东省济宁处于临界超载状态,莱芜处于严重超载状态,其余地市处于超载状态。

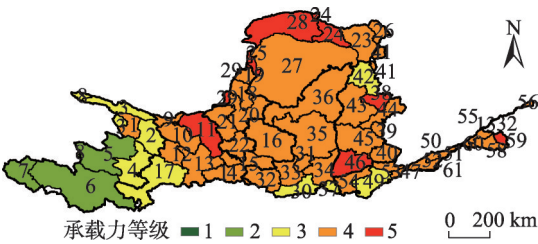


图4 黄河流域各地市水资源承载力等级
Fig. 4 Gradation of water resources carrying capacity of cities in the Yellow River Basin

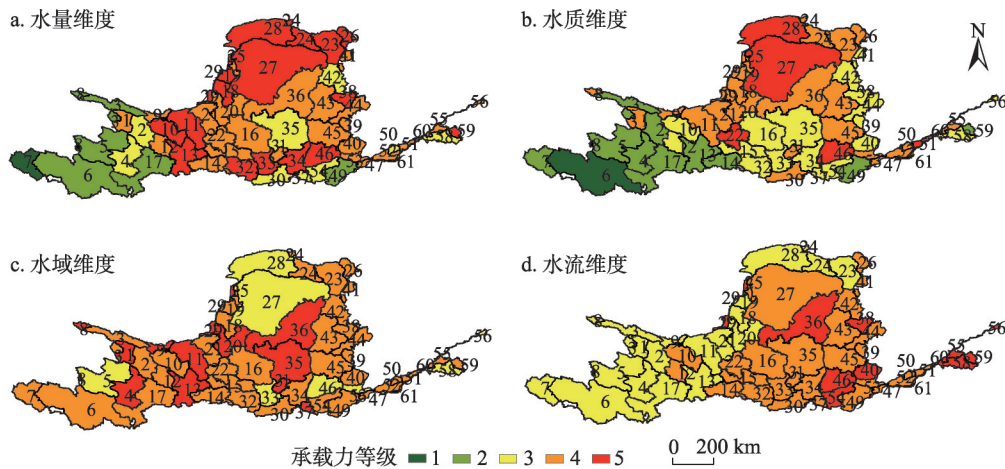


图5 黄河流域各地市“量质域流”四维水资源承载力等级
Fig.5 Gradation of "Quantity - quality - watershed - flow" water resources carrying capacity in Yellow River Basin

从图5a水量承载力看,总体上黄河流域用水总量负荷过大,甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西地市水量承载力处于超载及严重超载状态,除青海省和甘肃省甘南州人均水资源量处于极高等级,其余地市多处于较低及极低等级,万元工业增加值用水量、地下水开采系数和生态环境用水率均处于较低及极低等级,其中内蒙古除阿拉善盟各地市地下水开采系数均在15以上,地下水开发利用程度极高,农田灌溉用水占用水总量的72.5%,生态环境用水率仅4.7%。从图5b水质承载力看,黄河中下游水质较差,青海省水质承载力多处于可超载状态,西宁市处于超载状态;宁夏、内蒙古和山西三省区部分地市水质承载力处于严重超载状态,水功能区水质达标率、人均污染物排放量均处于较

低及极低等级。根据评价结果,各地市应继续加强“三条红线”管理,加强用水总量控制、用水效率控制和水功能区限制纳污方面的工作,全面推进节水型社会建设,优化用水结构和推进节水型社会,降低万元工业增加值用水量,提高灌溉水利用系数,优化生产、生活、生态用水配置,严格控制入河排污量,加强污水处理水平,改善当前水资源紧缺、水环境污染和水生态破坏等方面的综合性水问题。从图5c水域承载力看,黄河流域水域承载力整体处于超载状态,河南和山东两省水域面积率处于较低等级,其余省处于极低等级,湿地保留率各地市基本达到100%或更高,湿地立法、规划、自然保护区建设、湿地恢复重建等方面工作使湿地面积逐渐恢复乃至扩大,黄河流域植被覆盖率不超过50%,低于全国植被覆盖率70%。从图5d水流承载力看,黄河流域水流承载力处于超载状态,山西和山东部分地市处于严重超载状态。山东省纵向连通性处于极差等级,水库的建设阻隔了河流连通性。受流速流态的变化的影响,生物栖息地的环境改变,对当地物种的种类和数量产生影响,严重的可能会丧失生物多样性,原本的生态平衡系统被打破。水生态系统时刻被大坝建设及洪涝、干旱影响着。通过生态修复如封山育林、退耕还林还草等有效措施,实施河湖湿地周边水生态修复建设,提高生态环境用水率,逐步恢复地下水协调采补。减少湖泊生态系统退化的问题,全面推进节水型社会建设;优化产业结构和控制经济社会发展规模;各地落实最严格水资源管理制度。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 在总结水资源承载力的研究发展基础上,从水资源承载力新概念出发,建立质量域流四维水资源承载力评价指标体系,运用基于EFAST权重算法的联系熵模型对2015年黄河流域61个地市水资源承载力进行评价,通过ArcGIS 10.2实现黄河流域水资源承载力空间分布可视化,结果表明黄河流域水资源承载力达到超载状态的占评价地市数量的77%,宁夏和内蒙古全省处于超载及严重超载状态,其中水域承载力最大达到88%,甘肃和宁夏全省处于超载和严重超载状态,该区域应加强水域、重要湿地等的保护与重建,提高植被保护率。水量和水流承载力比例低于水域承载力,分别为71%和68%,应在水量、水域、水流三方面有效调控水资源,以提高水资源承载力。

(2) 评价结果与已有文献的对应省区的水资源承载力结果一致,表明该模型进行水资源承载力是有效的可靠的。

3.2 讨论

(1) 为验证模型的可行性,以苏贤保等^[21]评价2015年甘肃段水资源承载力为例,该论文结果表明甘肃省大部分区域的水资源系统承载力呈超载状态,超载的流域集中在西北,不超载的流域集中在东南,与本文得出的甘肃省除甘南州外其他各市水资源承载力均处于超载及严重超载状态的结论相同。

以马付苍^[22]对2016年山东省水资源承载力评价为例,山东省水资源承载力呈空间异质性分布,菏泽属较安全区域;济南属较不安全区域;济宁、莱芜、东营和泰安属临界安全等级区域,与本文得出山东省济宁处于临界超载状态,莱芜处于严重超载状态,其余地市处于超载状态的结论略有不同。分析原因有两点,一是前者对水资源承载力评价

分为三级,较安全、临界安全和较不安全,等级划分不同可导致评价结果不同,二是前者未考虑水域、水流维度,仅从水量、水质维度进行评价,表明水域、水流两个维度对于评价结果也将形成较大影响。

综上表明该模型进行水资源承载力评价是可行的。

(2) 通过比较EFAST算法与熵权法,发现EFAST算法基于近万组样本数据计算权重,且定量分析时考虑指标间的耦合关系,同时EFAST算法计算的各指标间权重相差较大,便于分离出重要指标,在构建指标体系时有助于筛选不重要的指标,因此EFAST算法计算权重比熵权法更合理。

参考文献(References):

- [1] 左其亭,张修宇.气候变化下水资源动态承载力研究.水利学报,2015,46(4): 387-395. [ZUO Q T, ZHANG X Y. Dynamic carrying capacity of water resources under climate change. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 387-395.]
- [2] 金菊良,董涛,郦建强,等.不同承载标准下水资源承载力评价.水科学进展,2018,29(1): 31-39. [JIN J L, DONG T, LI J Q, et al. Water resources carrying capacity evaluation method under different carrying standards. Advances in Water Science, 2018, 29(1): 31-39.]
- [3] 汪嘉杨,李祚泳,余静.水资源承载力评价的升半 Γ 型分布指数公式.自然资源学报,2014,29(5): 868-874. [WANG J Y, LI Z Y, YU J. Water resources carrying capacity evaluation based on Γ -type distribution function. Journal of Natural Resources, 2014, 29(5): 868-874.]
- [4] 姜秋香,付强,王子龙.三江平原水资源承载力评价及区域差异.农业工程学报,2011,27(9): 184-190. [JIANG Q X, FU Q, WANG Z L. Evaluation and regional differences of water resources carrying capacity in Sanjiang Plain. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 184-190.]
- [5] 王建华,姜大川,肖伟华,等.水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题.水利学报,2017,48(12): 1399-1409. [WANG J H, JIANG D C, XIAO W H, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: Definition and scientific topics. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1399-1409.]
- [6] 门宝辉,王志良,梁川,等.物元模型在区域地下水资源承载力综合评价中的应用.四川大学学报:工程科学版,2003, (1): 34-37. [MEN B H, WANG Z L, LIANG C, et al. Application of matter element model to evaluating on of resources carrying capacity of regional groundwater. Journal of Science University: Engineering Science Edition, 2003, (1): 34-37.]
- [7] 周亮广,梁虹.基于主成分分析和熵的喀斯特地区水资源承载力动态变化研究:以贵阳市为例.自然资源学报,2006,21(5): 827-833. [ZHOU L G, LIANG H. A study on the evolution of water resource carrying capacity in Karst area based on component analysis and entropy. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5): 827-833.]
- [8] 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.复旦学报:自然科学版,2013,52(1): 86-93. [TIAN J Y, WANG X J. A study on the evolution of water resource carrying capacity in Karst area based on component analysis and entropy. Journal of Fudan University: Natural Science, 2013, 52(1): 86-93.]
- [9] 赵军凯,李九发,戴志军,等.基于熵模型的城市水资源承载力研究:以开封市为例.自然资源学报,2009,24(11): 1944-1951. [ZHAO J K, LI J F, DAI Z J, et al. Study on water resources carrying capacity of urbanized area based on entropy model: A case study in Kaifeng city. Journal of Natural Resources, 2009, 24(11): 1944-1951.]
- [10] 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.中国农村水利水电,2016, (1): 8-11. [LI N, ZHANG W L, LI J W. Water resources carrying capacity evaluation in Erdos under the restriction of three red line. China Rural Water and Hydropower, 2016, (1): 8-11.]
- [11] 刘树锋,陈俊合.基于神经网络理论的水资源承载力研究.资源科学,2007,29(1): 99-105. [LIU S F, CHEN J H. Water resources carrying capacity based on the theory of ANN. Resources Science, 2007, 29(1): 99-105.]
- [12] PAN Z, JIN J, LI C, et al. A connection entropy approach to water resources vulnerability analysis in a changing environment. Entropy, 2017, 19(11): 591.

- [13] 王莉, 田水承, 王晓宁. 联系熵在煤矿安全预评价中的应用. 中国安全科学学报, 2006, 16(9): 129-133. [WANG L, TIAN S C, WANG X N. Application of connection entropy in safety pre evaluation of coalmine. China Safety Science Journal, 2006, 16(9): 129-133.]
- [14] 常晓林, 张美丽, 杨海云, 等. 基于联系熵的围岩稳定性评价研究. 岩土力学, 2010, 31(1): 99-101. [CHANG X L, ZHANG M L, YANG H Y, et al. Application of connection entropy to stability evaluation of adjoining rock. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 99-101.]
- [15] 管杜娟, 郭鹏. 基于脆性联系熵的项目组合脆性风险分析. 管理学报, 2015, 12(10): 1553-1561. [GUAN D J, GUO P. Brittleness risk analysis of project portfolio based on brittle link. Chinese Journal of Management, 2015, 12(10): 1553-1561.]
- [16] LUAN W, LU L, LI X, et al. Weight determination of sustainable development indicators using a global sensitivity analysis method. Sustainability, 2017, 9(2): 303.
- [17] 马晓超, 栗晓玲. 渭河生态水文特征变化研究. 水资源与水工程学报, 2011, 22(1): 16-21. [MA X C, SU X L. Research on ecohydrological alternation of Weihe River Basin. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011, 22(1): 16-21.]
- [18] 任启伟, 陈洋波, 舒晓娟. 基于 Extend FAST 方法的新安江模型参数全局敏感性分析. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(3): 127-134. [REN Q W, CHEN Y B, SHU X J. Global sensitivity analysis of Xinanjiang model parameters based on extend FAST method. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2010, 49(3): 127-134.]
- [19] 赵克勤. 集对分析与熵的研究. 浙江大学学报, 1992, 6(2): 65-72. [ZHAO K Q. Study on set pair analysis and entropy. Journal of Zhejiang University, 1992, 6(2): 65-72.]
- [20] 南彩艳, 栗晓玲. 基于改进 SPA 的关中地区水土资源承载力综合评价. 自然资源学报, 2012, 27(12): 104-114. [NAN C Y, SU X L. Comprehensive evaluation for soil-water resources carrying capacity in Guanzhong area based on improved Set Pair Analysis. Journal of Natural Resources, 2012, 27(12): 104-114.]
- [21] 苏贤保, 李勋贵, 赵军峰. 水资源—水环境阈值耦合下的水资源系统承载力研究. 资源科学, 2018, 40(5): 1016-1025. [SU X B, LI X G, ZHAO J F. Carrying capacity of water resources system coupling water resources with water environment thresholds. Resources Science, 2018, 40(5): 1016-1025.]
- [22] 马付苍. 山东省水资源时空分布及其承载力综合评价. 陕西水利, 2018, 5(9): 11-14. [MA F C. Spatial and temporal distribution of water resources and comprehensive evaluation of bearing capacity in Shandong province. Shaanxi Water Resources, 2018, 5(9): 11-14.]

Water resources carrying capacity evaluation of the Yellow River Basin based on EFAST weight algorithm

ZHANG Ning-ning, SU Xiao-ling, ZHOU Yun-zhe, NIU Ji-ping

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest Agriculture
and Forestry University, Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: Quantitative evaluation of water resources carrying capacity can provide a basis for effective regulation of water resources, improvement of water resources carrying capacity and elimination of water resources overload areas. Based on the new connotation of water resources carrying capacity, an evaluation index system for water resources carrying capacity was constructed which considered four aspects of water quantity, water quality, watershed and water flow. In traditional research of water resources carrying capacity, there existed many uncertain factors and coupling relationships between indicators. In order to address this issue, this paper calculated the weights using EFAST method, which considers the coupling relationship between indicators. The connection entropy model that can overcome the uncertainty of evaluation was carried out to evaluate comprehensive water resources carrying capacity. By taking the Yellow River Basin as an example, the weights of the carrying capacity indices were calculated using EFAST method and weight entropy method respectively and made a comparison between the two methods. Finally, the water resources carrying capacity of 61 cities in this basin in 2015 was comprehensively evaluated. The results showed that: EFAST method was more reasonable than entropy weight method in identifying important indicators. Cities whose water resources carrying capacity were at grade I (very high), grade II (higher), grade III (medium), grade IV (lower) and grade V (very low) levels accounted for 0%, 4.9%, 18.1%, 63.9% and 13.1% respectively of the number of cities in the Yellow River Basin. The cities of grades IV and V were distributed in provinces except Qinghai.

Keywords: Yellow River Basin; water resources carrying capacity; connection entropy model; EFAST algorithm