

区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用

闵庆文¹, 余卫东², 张建新³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2 河南省商丘市气象局, 商丘 476000; 3 山西省气象局, 太原 030000)

摘 要: 水资源是一种战略性资源, 对于区域生态环境安全和区域可持续发展具有重要意义。水资源承载力是进行区域生态环境建设和确定社会经济发展方向的基础。介绍了基于模糊数学理论的区域水资源承载力评价方法, 选取了人均水资源可利用量、人均实际供水量、水资源利用率、耕地灌溉率、供水模数、需水模数、生活用水定额、生态用水率等 8 个主要因素作为评价因素, 并以山西省河津市为例进行了具体计算与分析。评判结果表明: 目前水资源开发利用已经达到相当规模, 在现有经济技术条件下, 该地的水资源承载潜力已相对较小, 水资源供需矛盾突出。地下水的大量超采、水环境破坏等因素, 极大地限制了水资源的进一步开发利用潜力。从社会、经济的进一步发展和保护生态环境出发, 提高水资源承载能力的根本措施是加强全面节水战略的实施, 合理利用本地水资源并实行引、提黄河水工程。

关键词: 水资源; 承载力; 模糊数学; 山西省河津市

中图分类号: S273.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)03-0014-03

Fuzzy-based Evaluation of Water Resources Carrying Capacity and Its Application

M N Q ing-wen¹, YU W ei-dong², ZHAN G J ian-x in³

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China;

2 Shangqiu Meteorological Bureau of Henan Province, Shangqiu 476000, China;

3 Meteorological Bureau of Shanxi Province, Taiyuan 030000, China)

Abstract: As one of the most strategic resources, water resources play a very important role in ensuring regional ecological safety and implementing sustainable development. Therefore, evaluation to regional water resources capacity is the basis of improving eco-environmental construction and socio-economic development. Based on the principle of Fuzzy, the Fussy comprehensive evaluation model of regional water resources capacity was introduced. The selected evaluation factors include per capita available water resource, per capita practical water supply, use efficiency of water resources, irrigation ratio of arable land, water supply modulus, water demand modulus, quota of living water use and ecological water use ratio. Taking Hejin City of Shanxi Province as an example, the evaluated results show that the current water exploitation and use has reached a relative high degree. Under the present economic and technical conditions, there is only a very limited water carrying capacity and there exists a serious conflict between water supply and water demand. Besides, over exploitation of underground water and degradation of water eco-environment all influence the further exploitation and use of the limited water resources. Viewing from sustainable development of society and economy and ecoenvironmental protection, the fundamental measures to promote water carrying capacity are to strengthen the practices of overall water saving strategies, utilize the regional water resources rationally, and launch water use project drawing from the Yellow River.

Key words: water resources; carrying capacity; Fuzzy; Hejin City of Shanxi Province

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。随着经济建

设的快速发展和城乡居民生活的不断提高, 对水资源的需求量也日益增加。水资源承载能力已经成为衡量区域可持续发

展的一项重要指标,是当前水科学研究中的一个重点和热点问题^[1~3]。

所谓水资源承载能力,是指在某一具体的历史发展条件下,以可以预见的技术、经济和社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以维护生态环境良性发展为条件,经过合理的优化配置,水资源对该地区社会经济可持续发展的最大支撑能力^[4]。水资源承载力分析关系到区域生态环境和社会经济可持续发展,涉及面广、内容复杂。本文介绍区域水资源承载力的模糊综合评价方法,并以山西省河津市为例进行具体分析和计算。

1 评价模型简介

水资源承载力的综合评判是在对区域水资源特征、保证程度、开发利用状况及工农业生产、人民生活 and 生态环境对水资源的需求程度的供需诸方面综合分析的基础上,经过多因素分析平级而得出的结论。通过建立模糊综合评价模型能够较好地对水资源承载力作多因素、多层次地综合评价,更全面地反映区域水资源承载能力的状况。综合评判模型如下:

给定两个有限域 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, $V = \{V_1, V_2, \dots, V_n\}$, 其中 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, 则模糊评判为 $B = A \cdot R$, 式中 A 为 U 上的模糊子集, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $0 \leq a_i \leq 1$, a_i 为 U 对 A 的隶属度, 它表示单因素 U_i 在评定因素中所起作用的大小, 也在一定程度上代表 U_i 评定等级; 而评判结果 B 则是 V 上的模糊子集, $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$, $0 \leq b_j \leq 1$, b_j 则为等级 V_j 对综合评判所得模糊子集 B 的隶属度, 它们表示综合评判的结果。

评判矩阵为:

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

式中 r_{ij} 表示 U_i 的评价对等级 V_j 的隶属度, 矩阵 R 中第 i 行 $R_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 即为对第 i 个因素 U_i 的单因素评判结果。评价计算中矩阵 A 代表各因素对综合评判重要性的权系数, 因此满足 $a_1 + a_2 + \dots + a_m = 1$, 同时模糊变换 $A \cdot R$ 也就可退化为普通矩阵计算。

2 河津市自然条件及水资源利用现状

河津市位于山西省西南部, 北依吕梁, 西临黄河, 汾河横贯市境东西。是汾河和黄河汇流的三角地带, 国土总面积 593 km^2 , 人口 36.16×10^4 (2001 年)。自然气候属于温带大陆性气候, 多年平均年降水量 479.5 mm , 年平均气温 13.5 , 年日照时数 $2\,276.2 \text{ h}$, 无霜期一般为 200 d 左右。

河津市由于濒临黄河、汾河, 水资源比较丰富, 人均水资源 615 m^3 , 高于全省 (480 m^3), 低于全国 ($2\,700 \text{ m}^3$)。据河津市水资源管理委员会提供的有关资料, 全市水资源总量 $22\,233 \times 10^4 \text{ m}^3$, 可供水资源量 $21\,032 \times 10^4 \text{ m}^3$, 地下水资源量 $20\,538.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 地下水可开采量 $9\,334 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。其中

洪水年径流量 $0.137 \times 10^8 \text{ m}^3$, 泉水年径流量 $0.094 \times 10^8 \text{ m}^3$; 另外, 过境年径流量 $351.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中黄河北出龙门, 顺西缘流长 15 km , 年平均流量为 $336.9 \times 10^8 \text{ m}^3$; 汾河由东向西横贯境内, 流经黄村乡、城关镇和阳村乡西入黄河, 年平均流量 $14.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[5]。

近年来河津市的工业得到了快速发展, 由于工业产业主要集中于煤焦、炼铁、氧化铝、电解铝、发电等能源和原材料加工行业, 具有高耗电、高耗水等特点, 工业用水量急剧增长。2001 年全市用水总量为 $12\,831.4 \times 10^4 \text{ m}^3$, 其中工业用水 $6\,599.4 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占 51.4% ; 农业用水 $5\,237.6 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占用水总量的 40.8% ; 城镇生活用水量 $412.6 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占 3.3% ; 农村生活用水 $581.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占 4.5% 。2001 年引用地表水资源量 $1\,458.1 \times 10^4 \text{ m}^3$, 开采地下水总量 $11\,373.3 \times 10^4 \text{ m}^3$, 地下水超采量高达 $2\,039.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。地下水的严重超采, 已经造成了地下水位下降, 导致工业用井加深, 企业用水成本不断增长, 群众生活用水困难, 使用水问题成为制约经济可持续发展和影响人民群众生活的主要问题。

3 水资源承载力评价指标体系

水资源承载力评价指标体系的建立是水资源承载力研究中的一个关键问题。核心是用什么指标体系反映“社会-经济-自然复合生态系统”的发展规模与质量。影响区域水资源承载能力的因素很多, 涉及到水资源系统的各个方面, 其指标的选取也常因研究者而有不同^[6,7]。

全面分析水资源承载能力的各影响因素, 参照了全国水资源供需分析中的指标体系和其它水资源评价指标体系及其标准^[8,9], 在本次水资源承载力综合评价中, 选取了人均水资源可利用量, 人均实际供水量, 水资源利用率, 耕地灌溉率, 供水模数, 需水模数, 生活用水定额, 生态用水率等 8 个主要因素作为评价因素, 各因素的含义如下:

人均水资源可利用量 (u_1): 可供水资源量与总人口数量之比 ($\text{m}^3/\text{人}$);

人均供水量 (u_2): 频率 75% 的供水量与总人口数量之比 ($\text{m}^3/\text{人}$);

水资源利用率 (u_3): 现状 75% 频率的供水量与可利用的水资源总量之比 ($\%$);

耕地灌溉率 (u_4): 灌溉面积与耕地面积之比 ($\%$);

供水模数 (u_5): 频率 75% 的供水量与土地面积之比 ($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$);

需水模数 (u_6): 需水总量与土地面积之比 ($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$);

生活用水定额 (u_7): 生活用水总量与总人口之比 ($\text{L}/\text{人} \cdot \text{d}$);

生态用水率 (u_8): 生态用水总量与总需水量之比 ($\%$)。

按照上述 8 个评价因素对区域水资源承载力的影响程度, 将上述因素对水资源承载能力影响程度划分为 3 个等级, 每个因素各等级的数量指标见表 1。其中 V_3 级表示状况

较差,表示了水资源承载能力已经接近饱和值,进一步开发利用潜力较小,发展下去将发生水资源短缺。因而水资源将制约国民经济的发展,这时应采取相应的对策; V_1 级属情况较好,表示本区水资源仍有较大的承载能力,本区水资源利用程度、发展规模都较小,因而这时本区发展对水资源的需求是有保障的,本区水资源供给情况较为乐观; V_2 级情况介于以上两级之间,表明本区水资源供给开发利用已有相当规模,但仍有一定的开发利用潜力,区内国民经济发展对水资源供给需求有一定的保证。

表 1 综合评价因素的分级指标

评价因素	V_1	V_2	V_3
人均水资源可利用量/($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	> 600	600~ 400	< 400
人均供水量/($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	> 400	400~ 240	< 240
水资源利用率/%	< 30	30~ 80	> 80
供水模数/($10^4 \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	< 10	10~ 60	> 60
耕地灌溉率/%	< 40	40~ 80	> 80
生活用水定额/($\text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	< 70	70~ 130	> 130
需水模数/($10^4 \text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	< 10	10~ 60	> 60
生态用水率/%	> 5	5~ 2	< 2
评分值 α_j	0.95	0.5	0.05

为了更好地反映各等级水资源承载能力情况,对 V_1 、 V_2 、 V_3 进行 0~ 1 之间的评分,取 $\alpha_1 = 0.95$, $\alpha_2 = 0.5$, $\alpha_3 = 0.05$ 。这样可以定量反映各等级因素对承载能力的影响程度,数值越高,表明水资源的开发潜力越大。综合评定时,按照上述 α_j 的值以及 B 矩阵中各等级隶属度 b_j 的值,按下式分析计算基于综合评判结果矩阵 B 的水资源承载能力的综合评分值。

$$\alpha = \frac{\sum_{j=1}^3 b_j^k \cdot \alpha_j}{\sum_{j=1}^3 b_j^k}$$

K 值是为了突出占优势等级的作用,干旱区通常 $k = 1^{[10]}$ 。

4 评判矩阵 R 的计算

上述分析可以看出评价因素 $u = \{u_1, u_2, \dots, u_8\}$ 对应着评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3\}$,而评判矩阵 R 中 r_{ij} 可以通过评价因素的实际数值对照各因素的分级指标来分析计算。为了消除各等级之间数值相差不大,而评价等级相差一级的跳跃现象,使隶属函数在各级之间能平滑过渡,将其进行模糊化处理。对于 V_2 级即中间区间,令其落在区间中点隶属度为 1,两侧边缘点的隶属度为 0.5,中点向两侧按线性递减处理。对于 V_1 和 V_3 两侧区间,则令距临界值越远属两侧区间的隶属度越大,在临界值上则属于两侧等级的隶属度各为 0.5,按上述设想构造了各评价等级隶属函数的计算式。 V_1 和 V_2 级的临界值为 k_1 , V_2 和 V_3 的临界值为 k_3 , V_2 等级区间中点值为 k_2 , $k_2 = (k_1 + k_3)/2$ 。

对于评价因素 u_3, u_4, u_5, u_6, u_7 各评语级相对隶属度函数的计算公式为:

$$\mu_{v1} = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{k_1 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i < k_1 \\ 0.5(1 - \frac{u_i - k_1}{k_2 - k_1}) & k_1 \leq u_i < k_2 \\ 0 & u_i \geq k_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{v2} = \begin{cases} 0.5(1 - \frac{k_1 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i < k_1 \\ 0.5(1 + \frac{u_i - k_1}{k_2 - k_1}) & k_1 \leq u_i < k_2 \\ 0.5(1 + \frac{k_3 - u_i}{k_3 - k_2}) & k_1 \leq u_i < k_3 \\ 0.5(1 - \frac{k_3 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i \geq k_3 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{v3} = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{k_3 - u_i}{k_2 - u_i}) & u_i \geq k_3 \\ 0.5(1 - \frac{u_i - k_3}{k_2 - k_3}) & k_2 \leq u_i < k_3 \\ 0 & u_i < k_2 \end{cases} \quad (3)$$

对于评价因素 u_1, u_2, u_8 各评语级相对隶属度函数的计算公式只需将以上 (1)~ (3) 式右端 u_i 区间号“ $<$ ”改为“ \leq ”,而将“ $<$ ”该为“ $>$ ”后采用同样的计算式即可。

通过上述公式可以求出各评判因素对应于各个等级的隶属度 r_{ij} , 其中

$$r_{i1} = \mu_{v1}(u_i), r_{i2} = \mu_{v2}(u_i), r_{i3} = \mu_{v3}(u_i) \quad (i = 1, 2, \dots, 8).$$

根据各评判因素对水资源承载能力影响程度的大小,将各评判因素对水资源承载能力的影响赋予不同的权重,权重矩阵 $A = (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8)$ 。根据上述 A 和 R 矩阵,将 $B = A \cdot R$ 按普通矩阵计算规则即可求得水资源承载能力的最终评判结果矩阵,然后根据 V_1 、 V_2 、 V_3 分级指标对应的评分值 α_1 、 α_2 、 α_3 即可求得区域水资源承载能力综合评判值,最后进行区域水资源承载力的综合评价与分析。

5 水资源承载力的模糊综合评判

根据水资源承载能力综合评价指标体系,结合河津市社会经济发展速度、需水总量和供水量的预测结果^[11],考虑两种不同情景基础上的供水方案。其中方案 1 代表未来供水以本地水资源为主,且不考虑生态用水中地下水超采后的回灌用水量;方案 2 代表供水除本地水资源外,还包括引、提黄河水及污水处理回用,并考虑回灌超采的地下水量。

权重矩阵 A 的确定:对于河津市而言,人均可供水量、人均供水量和水资源利用率对水资源承载能力影响较大,故分别赋予权重 0.15,及 $a_1 = a_2 = a_3 = 0.15$ 。另外,生态用水率对于生态环境的维护,人类生存和发展以及对水资源的可持续开发利用影响也较大,故也赋予权重 0.15($a_8 = 0.15$)。其它评判因素都赋予权重 0.10($a_4 = a_5 = a_6 = a_7 = 0.10$),因此权重矩阵 $A = (0.15, 0.15, 0.15, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.15)$ 。

根据综合评价各指标的隶属度函数,求得各指标因素在不同年份关于 V_1 、 V_2 、 V_3 的隶属度矩阵,然后结合上述权重矩阵,可以计算出河津市水资源承载力的评判结果矩阵 B 。

(下转第 129 页)

参考文献:

[1] 赵晓光, 吴发启 坡面水蚀过程的力能体系及研究思路[J]. 水土保持研究, 2000, 7(1): 23- 25

[2] 周健, 吴世明, 徐建平. 环境与岩土工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.

[3] 陈业裕, 黄昌发. 应用地貌学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1994

[4] 谭继清, 刘建秀, 谭志坚. 草坪地被景观设计与应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003

[5] 崔晓明, 方怀龙. 城市绿地土壤及其管理[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.

(上接第 16 页)

按同样的方法可以计算出天津市各年份水资源承载力 b_j 都是各个评价因素共同影响的结果。根据 B 中各 b_j 的值
力多因素综合评价结果 B 的数值见表 2, 矩阵 B 中所有元素 与对应的 α_j 值即可推求出水资源承载能力的综合评分值。

表 2 天津市水资源承载能力的综合评价结果

年份	方案 I				方案 II			
	V_1	V_2	V_3	评分值	V_1	V_2	V_3	评分值
2001 年	0.197	0.662	0.141	0.525	0.197	0.662	0.141	0.525
2005 年	0.121	0.723	0.156	0.484	0.386	0.556	0.058	0.648
2010 年	0.067	0.765	0.168	0.455	0.376	0.542	0.082	0.632
2030 年	0.027	0.674	0.299	0.378	0.368	0.440	0.192	0.579
2050 年	0.027	0.609	0.364	0.348	0.379	0.357	0.265	0.552

表 2 的评判结果表明: 现状年(2001 年)的水资源开发利用已经达到相当规模。水资源承载能力综合评价结果 b_j 对 V_2 的隶属度很大, 在现有经济技术条件下, 水资源承载潜力已相对较小, 水资源供需矛盾突出。由于受地下水的大量超采, 水环境破坏, 本地水资源进一步开发利用潜力很小。从社会、经济的进一步发展和保护生态环境出发, 提高水资源承载能力的根本措施是加强全面节水战略的实施, 合理利用本地水资源并实行引、提黄河水工程。

方案 1: 由于人口、社会的发展, 需水总量的逐年增加, 在没有引用黄河水资源的情况, 天津市本地的水资源量已经很难承受社会发展对水资源的需求, 水资源承载力逐年下降, b_j 对 V_1 的隶属度由现状年(2001 年)的 0.197 下降到 2050 年的 0.027, 而对 V_3 的隶属则由 0.141 上升到 0.364, 承载力综合评分值也从 0.525 下降到 2050 年 0.348。届时水

资源因素将严重制约着天津市的发展。

方案 2: 由于 2005 年前禹门口提水工程的投入使用, 天津市供水量的迅速增加, 水资源承载能力得到了很大的提高, 对 V_1 的隶属度由现状年的 0.197 提高到 0.386, 相应的综合评分值也从 0.525 提高到 0.648; 2005 年以后, 虽然引用黄河水量在不断增加, 但由于社会的迅速发展, 需水总量也快速增加, 水资源利用率进一步加大, 天津市水资源承载力综合评分值一直呈下降趋势。但水资源承载力对于 V_1 的隶属度在 2030 年后开始增加, 虽然对 V_3 的隶属度也在增加, 但水资源承载力的综合评分值减少的速度趋于缓和, 2050 年的水资源承载力仍将高于现状年的承载力。2050 年以后随着农业、工业需水零增长期的到来, 需水总量将趋于稳定甚至减少, 天津市水资源承载力有望得到提高。

参考文献:

[1] 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.

[2] 王煜, 杨立彬, 张海新, 等. 西北地区水资源可利用量及承载能力分析[J]. 人民黄河, 2002, 24(6): 10- 12.

[3] 周爱国, 徐恒力, 甘义群, 等. 西北地区水资源- 生态可持续发展的若干问题探讨[J]. 长江流域资源与环境, 2001, 10(5): 419- 425.

[4] 钱正英, 张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告及各专题报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001. 27- 59.

[5] 山西省农业区划委员会. 山西省农业自然资源丛书- 运城地区卷[M]. 北京: 中国地图出版社, 1991. 158- 192.

[6] 卞建民, 杨建强. 水资源可持续利用评价地指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 43- 45.

[7] 徐良芳, 冯国章, 刘俊民. 区域水资源可持续利用及其评价指标体系研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(2): 119- 122.

[8] 水利电力部水文局. 中国水资源评价[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987. 78- 103.

[9] 朱玉仙, 黄义星, 王丽杰. 水资源可持续开发利用综合评价方法[M]. 吉林大学学报(地球科学版), 2002, 32(1): 55- 57.

[10] 许有鹏. 干旱区水资源承载力综合评价研究- 以新疆和田河流域为例[J]. 自然资源学报, 1993, 8(3): 229- 237.

[11] 余卫东, 闵庆文, 张建新. 天津市水资源供需平衡的趋势预测及其对策研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(2): 55- 60.