

三江平原地下水承载能力综合评价模型的构建及其应用^{*}

韩丽伟, 付强, 刘东, 李天霄

(东北农业大学 水利与建筑学院, 哈尔滨 150030)

摘要:以三江平原为研究背景, 分析了三江平原地下水资源开发利用的现状及存在的问题。为解决这些问题, 根据地下水资源承载力分析中的结构特点, 构建了基于熵权的模糊物元综合评价模型, 并将该模型应用到三江平原红兴隆分局, 对其 12 个农场地下水资源承载力进行综合评价, 取得了较好的效果。该模型在传统的模糊物元模型的基础上, 将熵值法引入权重计算中, 有效的解决了多目标决策中权重系数确定的主观性问题, 更能全面、客观的对地下水资源承载力进行综合评价, 且该模型思路清晰, 计算简单, 科学合理; 为地下水资源承载力评价提供了一种更为简便有效的方法。

关键词: 三江平原; 地下水; 承载力; 综合评价模型

中图分类号: TV211.12

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)02-0182-04

Construction and Application of the Model on Groundwater Resources Carrying Capacity in Sanjiang Plain

HAN Li-wei, FU Qiang, LIU Dong, LI Tian-xiao

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to explore and utilize the groundwater, the paper took the groundwater in Sanjiang Plain as the research background to analyze the issue that exists in the groundwater exploration and use in Sanjiang Plain. According to the structural analysis of groundwater resources Carrying Capacity, the Fuzzy Matter—Element Model based on entropy was constructed to deal with these problems. Through taking Hongxinglong branch bureau as example and better results had been obtained by using the comprehensive evaluation model. Using the law of entropy to calculate coefficient of weight, which can avoid the problem of calculating coefficient of weight subjectively and carry on evaluating groundwater resources bearing capacity with a more effective method. The method is suitable to evaluate groundwater resources bearing capacity with reasonable conclusion. And the results indicate that this model is rational and feasible.

Key words: Sanjiang Plain; groundwater; carrying capacity; comprehensive evaluation model

三江平原是我国重要的商品粮基地, 对我国粮食生产起着重要的保障作用。但自 20 世纪 80 年代以来, 随着三江平原农场耕地面积的不断扩大及早田改水田趋势的不断加大, 三江平原水田种植面积迅速增加, 已由 1986 年的 57.7 万 hm^2 增加到了 2005 年的 150.9 万 hm^2 ^[1], 其中近 80% 水田采用地下水进行灌溉。三江平原多年平均地下水埋深已由

4.11 m 增到 5.50 m, 地下水位下降了 1.39 m。地下水资源平衡遭到了严重的破坏, 地下水超采已经成为制约三江平原特色农业可持续发展的“瓶颈”因素。因此, 正确评价三江平原地下水资源承载能力, 对该地区社会、经济的可持续发展、生态环境的良性循环和地下水资源的持续开发利用具有重要作用^[2]。目前, 雷能忠, 王顺久分别应用了模糊集法、

^{*} 收稿日期: 2009-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(30400275)

作者简介: 韩丽伟(1982—), 女, 黑龙江依安人, 硕士, 从事农业水资源优化利用与管理方面的研究。E-mail: aishimianderen@163.com
通信作者: 付强(1973—), 男, 辽宁锦州人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土资源系统分析、节水灌溉及农业系统工程建模与优化技术研究。E-mail: fuqiang@near.edu.cn

投影寻踪法对地下水承载力进行了评价^[3-4], 这些方法都在一定程度上得到了应用, 但都有其自身局限性。在我国学者蔡文教授提出的物元分析理论的基础上^[5], 结合模糊集和欧式贴近度的概念, 并将熵权法引入到权重的计算中, 建立了基于熵权的模糊物元模型, 将该模型应用于三江平原红兴隆分局 12 个农场地下水资源承载力评价中, 取得了较好的效果, 并将评价结果与其他方法进行分析比较。

1 基于熵权的模糊物元模型的构建

1.1 模糊物元和复合模糊物元

给定事物的名称 N , 它关于特征 c 的量值为 v , 以有序三元 $R=(N, c, v)$ 组作为描述事物的基本元, 简称物元。如果 m 个事物的 n 维物元组合在一起, 便构成 m 个事物 n 维复合物元, 记作 R_{mn} 。若将 R_{mn} 的量值改为模糊物元量值, 称为 m 个事物 n 维复合模糊物元, 记作 \underline{R}_{mn} , 见式(1)^[6]。

$$\underline{R}_{mn} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ c_1 & u_{11} & u_{21} & \cdots & u_{m1} \\ c_2 & u_{12} & u_{22} & \cdots & u_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & u_{1n} & u_{2n} & \cdots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: M_i ——第 i 个事物 ($i=1, 2, \cdots, m$); c_j ——第 j 项特征 ($j=1, 2, \cdots, n$); u_{ij} ——第 i 个事物第 j 项特征对应的模糊量值。

1.2 从优隶属度原则

各单项评价指标相应的模糊量值, 从属于标准方案各对应评价指标相应的模糊量值隶属程度, 称为从优隶属度。由此建立的原则, 称为从优隶属度原则。一般有两种类型的指标。

越大越优型 $u_{\bar{j}} = X_{ij} / \max X_{\bar{j}} \quad (2)$

越小越优型 $u_{\bar{j}} = \min X_{\bar{j}} / X_{ij} \quad (3)$

式中: $u_{\bar{j}}$ ——第 i 个事物第 j 项特征对应的模糊量值; $X_{\bar{j}}$ ——第 i 个事物第 j 项特征对应的量值, $i=1, 2, \cdots, m, j=1, 2, \cdots, n$; $\max X_{\bar{j}}, \min X_{\bar{j}}$ ——各事物中每一项特征所有量值 X_{ij} 中的最大值和最小值。

1.3 标准模糊物元与差平方复合模糊物元

由式(1)可以构成标准方案的 n 维模糊物元 \underline{R}_n , 其中各项由 \underline{R}_{mn} 中各方案从优隶属度中的最大值或最小值确定; 若以 Δ_{ij} ($i=1, 2, \cdots, n; j=1, 2, \cdots, m$) 表示标准模糊物元 \underline{R}_n 与复合模糊物元 \underline{R}_{mn} 中各项差的平方, 则组成差平方复合模糊物元 R_Δ , 即

$$R_\Delta = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ c_1 & \Delta_{11} & \Delta_{21} & \cdots & \Delta_{m1} \\ c_2 & \Delta_{12} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_n & \Delta_{1n} & \Delta_{2n} & \cdots & \Delta_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $\Delta_{ij} = (u_{oj} - u_{ij})^2, i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, n$ 。

1.4 熵值法确定权重系数

一般来说, 地下水资源承载力的各个评价指标的重要程度是不相同的, 常用权重系数来衡量。目前, 权重的确定方法大致可分为两种: 一种是客观赋权法, 一种是主观赋权法。采用主观赋权法, 会使评价结果受人的主观性影响较大; 采用客观赋权法则无法表达评判者的主观意识。熵是系统无序程度的一个度量, 信息熵值越小, 系统无序度越小, 故可用信息熵评价所获系统信息的有序度及其效用, 即由评价指标值构成的判断矩阵来确定指标权重, 它能尽量消除各指标权重计算的人为干扰, 使评价结果更符合实际。 m 个评价事物 n 个评价指标, 可以确定评价指标的熵为 H_j , 见式(5)^[7]。

$$H_j = \frac{1}{\ln m} \left(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad f_{ij} = \frac{b_{\bar{j}}}{\sum_{i=1}^m b_{\bar{j}}} \quad (5)$$

当 $f_{\bar{j}}=0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij}=0$, 当 $f_{ij}=1$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij}=0$ 。这显然与熵所反映的信息无序化程度相悖, 不切合实际, 故需对 $f_{\bar{j}}$ 加以修正, 见式(6)。

$$f_{ij} = \frac{1+b_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1+b_{\bar{j}})} \quad b_{\bar{j}} = \frac{x_{\bar{j}} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

$$(i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, n)$$

式中: x_{\max} 和 x_{\min} 分别为同指标下不同事物中最满意者或最不满意者(最小越满意者或越大越满意者)评价指标的熵权 W 为:

$$W = (w_j)_{1 \times n} \\ w_j = \frac{1-H_j}{n - \sum_{j=1}^n H_j} \quad (7)$$

且满足 $\sum_{j=1}^n w_j = 1, (j=1, 2, \cdots, n)$

1.5 欧式贴近度和综合评价

贴近度是指被评价样品与标准样品两者互相接近的程度, 其值越大表示两者越接近, 反之则相离较远。考虑到本文的具体评价的意义, 采用 $M(\circ, +)$ 算法, 即先乘后加运算欧式贴近度 ρH_j , 以此来构造欧式贴近度复合模糊物元 $R_{\rho H}$, 则^[8]

$$R_{\rho H} = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ \rho H_j & \rho H_1 & \rho H_2 & \cdots & \rho H_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

2 基于熵权的模糊物元模型应用实例

以三江平原红兴隆分局为例,采用基于熵权的模糊物元模型对红兴隆分局各农场 2006 年的地下水资源承载力进行评价。参照全面水资源供需分析中的指标体系和一些关于水资源评价指标体系的研究成果。选取了以下 8 个相对性评价指标。分别为:地下水资源耕地灌溉率 I_1 ,地下水资源利用率

I_2 ,地下水资源开发利用程度 I_3 ,供水模数 I_4 ,需水模数 I_5 ,重复利用率 I_6 ,人均供水量 I_7 ,生态环境用水率 I_8 ^[9-13]。把上述因素按对地下水资源承载力影响的程度划分为 3 个等级 I、II 和 III。其中 I 级表示该区仍有较大的承载力,II 级表示该区地下水资源开发利用已有相当规模,但仍有一定的开发利用潜力,III 级表示水资源的承载力已接近饱和值,进一步开发利用的潜力较小。各指标数据见表 1。

表 1 各评价指标实测值及分级标准值

农 场	$I_1/\%$	$I_2/\%$	$I_3/\%$	$I_4/$ (万 m ³ · km ⁻²)	$I_5/$ (万 m ³ · km ⁻²)	$I_6/\%$	I_7 (m ³ /人)	$I_8/\%$
友 谊	19.38	74.45	63.28	6.49	6.76	10.79	1181.56	0.57
五九七	27.81	87.35	74.99	7.93	8.23	10.87	2627.16	0.88
八五二	1.92	106.67	53.36	0.71	0.81	9.43	202.44	7.31
八五三	35.46	106.75	74.72	3.72	11.36	10.84	1306.78	1.45
饶 河	55.68	106.95	58.83	9.81	16.14	10.95	5475.24	0.88
二九一	54.45	108.71	97.85	17.59	23.85	10.91	5745.47	0.62
双鸭山	3.62	44.16	26.50	0.62	1.33	7.21	119.18	7.17
江 川	77.02	99.33	94.37	17.63	24.95	10.93	4944.91	1.01
曙 光	13.97	101.50	87.11	5.50	6.30	10.57	758.13	5.92
北 兴	2.23	95.76	57.47	1.54	0.70	10.62	600.52	5.18
红旗岭	27.28	82.57	66.03	2.23	9.44	10.55	913.77	6.59
宝 山	93.61	63.95	60.76	11.35	40.26	10.95	2858.46	4.83
I	15	50	30	10	10	50	150	5
II	15~50	50~75	30~70	10~15	10~15	50~80	150~100	5~2
III	50	75	70	15	15	80	100	2

2.1 建立评价模型

(1)构建复合模糊物元。根据表 1 数据,对红兴隆分局 12 个农场和分级标准构建 15 个样本 8 个评价指标的复合模糊物元。

(2)确定从优隶属度。根据步骤 1 所确定的复合物元,对 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 、 I_6 越小越优型指标采用式(3)计算;对 I_7 、 I_8 越大越优型指标采用式(2)计算构建从优隶属度模糊物元 $R_{8 \times 15}$ 。

(3)确定标准模糊物元和差平方复合模糊物元 R_{Δ} 。这里取最大值组成标准模糊物元,即 $u_{0j}=1.0$ 。

由式(4)得其差平方复合模糊物元 R_{Δ} 。用熵权法计算各指标的权重。根据式(6)对各指标的实测值进行归一化处理得其判断矩阵 B_{ij} 。

(4)计算各指标的熵 H_j :由式(7)计算得各指标的权重 W_j 。

$$H_j = \begin{pmatrix} 0.9922 & 0.9897 & 0.9955 & 0.9932 \\ 0.9937 & 1.0000 & 0.9873 & 0.9862 \end{pmatrix}$$
$$W_j = \begin{pmatrix} 0.1250 & 0.1653 & 0.0725 & 0.1089 \\ 0.1012 & 0.0001 & 0.2046 & 0.2223 \end{pmatrix}$$

(5)计算贴近度。由式(8)计算各指标的贴近度 R_{θ}

$$R_{\theta} = \begin{bmatrix} \text{友谊} & \text{五九七} & \text{八五二} & \text{八五三} & \text{饶河} & \text{二九一} & \text{双鸭山} & \text{江川} \\ 0.1972 & 0.2302 & 0.4796 & 0.2033 & 0.2516 & 0.2260 & 0.5011 & 0.2376 \\ \text{曙光} & \text{北星} & \text{红旗岭} & \text{宝山} & \text{I 级} & \text{II 级} & \text{III 级} \\ 0.2819 & 0.4504 & 0.3182 & 0.3364 & 0.3128 & 0.2325 & 0.1449 \end{bmatrix}$$

2.2 结果与分析

三江平原红兴隆分局 12 地农场中,友谊、五九七、八五三、饶河、二九一、江川农场地下水承载力为 II 级,表示这 6 个农场地下水资源开发利用已有相当规模,但仍有一定的开发潜力,地下水资源的供给和需求在一定程度上能满足该区域内社会经济发

展;其余 8 个农场地下水资源承载力为 I 级,表示这 8 个农场地下水资源仍有较大的承载力,地下水资源供给情况较乐观。根据贴近度的大小可以看出,各农场承载力大小顺序为:友谊<八五三<二九一<五九七<江川<饶河<曙光<红旗岭<宝山<北

兴< 八五二< 双鸭山。该模型评价结果与集对分析方法评价方法基本一致^[13], 见表 2。

表 2 评价结果对比

农 场	评价结果	
	集对分析	基于熵权的模糊物元模型物元模型
友 谊	I ~ II	II
五九七	I ~ II	II
八五二	I	I
八五三	II	II
饶 河	II ~ III	II
二九一	III	II
双鸭山	I	I
江 川	III	II
曙 光	I	I
北 兴	I	I
红旗岭	I	I
宝 山	II	I

3 结 论

由于地下水资源承载力概念的模糊性和评价指标的多样性, 地下水资源承载力评价中权重系数的确定是重点也是难点, 以往的方法如专家评分法等, 在评价指标较多时实现起来困难且具有较强的主观性。文章引入熵权理论, 由评价指标本身所反映的信息无序化效用值来计算权重系数, 避免了计算指标权重的人为干扰, 有效的减少了多指标模糊性评价中权重系数确定的主观性, 从而得出了更加准确、客观、可信评价结果。基于熵权的模糊物元模型计算简便、科学合理, 为三江平原以及其它地区地下水资源承载力评价提供了一种新的评价方法。

参考文献:

[1] 黄妮, 刘殿伟, 王宗明. 1986—2005 年三江平原水田与旱地的转化特征[J]. 资源科学, 2009, 31(2): 324-329.

[2] 傅湘, 纪昌明. 区域水资源承载力综合评价: 主成分分析法的应用[J]. 长江流域资源与环境, 1999, 8(2): 168-173.

[3] 雷能忠, 许峰, 阮丽缘, 等. 多级模糊综合评判在自然资源承载力评价中的应用: 以阜阳地区地下水资源为例[J]. 安徽技术师范学院学报, 2004, 18(1): 53-57.

[4] 王顺久, 杨志峰, 丁晶. 关中平原地下水资源承载力综合评价的投影寻踪方法[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 104-110.

[5] 蔡文. 物元模型及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 22-23.

[6] 付强. 数据处理方法及其农业应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 339-341.

[7] 闫文周, 顾连胜. 熵权决策法在工程评标中的应用[J]. 西安建筑科技大学学报, 2004 36(1): 98-100.

[8] 肖芳淳. 模糊物元贴近度聚类分析的研究[J]. 新疆石油地质, 1999, 19(4): 281-283.

[9] 张鑫, 王纪科, 蔡焕杰, 等. 区域地下水资源承载力综合评价研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 24-27.

[10] 施嘉场. 水资源综合利用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.

[11] 惠泱河, 蒋晓辉. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2000, 21(1): 30-34.

[12] 金光炎. 平原地下水资源评价[M]. 北京: 水利出版社, 1992.

[13] 刘东, 付强, 孟军. 集对分析法在三江平原井灌区地下水资源承载力评价中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2009(2): 1-4.

(上接第 181 页)

[7] 李晶, 阎秀峰, 祖元刚. 低温胁迫下红松幼苗活性氧的产生及保护酶的变化[J]. 植物学报, 2000, 42(2): 148-152.

[8] 李霞, 阎秀峰, 于涛. 水分胁迫对黄檗幼苗保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2353-2356.

[9] 李雪华, 蒋德明, 阿拉木萨, 等. 科尔沁沙地 4 种植物抗旱性的比较研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1185-1188.

[10] 马玉心, 满秀玲, 崔大练. 紫穗槐种子萌发对水分胁迫的响应[J]. 种子, 2009, 28(2): 46-50

[11] 马玉心, 蔡体久, 宋丽萍, 等. 兴安鹿蹄草在雪盖前后丙二醛及渗透调节物质的变化规律[J]. 生态学报, 2007, 27(11): 4596-4602

[12] Hare P D, Cress W A, Van staden J. Dissecting the roles of osmolyte accumulation during stress[J]. Plant Cell and Environment, 1998, 21: 535-553

[13] 庞晓斌, 毛新国, 景俊凤, 等. 小麦幼苗水分胁迫应答基因表达谱分析[J]. 作物学报, 2007, 33(2): 333-336.

[14] Souch C A, Stephens W. Growth productivity and water use in three hybrid poplar clones[J]. Tree Physiology, 1998, 18: 829-833.

[15] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 302-306.

[16] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. (3 版). 北京: 高等教育出版社, 2001: 190-191.