DOI：10.19789/j.1004-9398.2022.01.012
文献引用：薛淑慧，张玉虎，于森，等．基于SVM与FCE模型的城市水资源管理评价研究：以北京市为例[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2022，43（1）：71-75+96. XUE S H，ZHANG Y H，YU S，et al. Urban water resource management based on SVM and FCE model：a case study of Beijing[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2022，43（1）：71-75+96.

基于SVM与FCE模型的城市水资源管理评价研究：以北京市为例*

薛淑慧[1]，张玉虎[1**]，于　森[2]，孙凤华[2]

（1. 首都师范大学资源环境与旅游学院，北京　100048；
2. 北京市水科学技术研究院，北京　100048）

摘要：加强水资源管理评价能够为缺水地区水资源精细化管理提供科学决策支撑．本研究建立了由12个指标构成的北京市水资源管理评价指标体系，应用可以优势互补的支持向量机（SVM）和模糊综合评价（FCE）模型，对2016—2019年北京市水资源管理水平进行评价分析．结果表明：利用SVM和FCE评价模型得出的综合评价结果一致，评价结果均为北京市水资源管理水平整体呈上升趋势；北京市在公众参与、农村居民生活用水方面存在不足，未来应在这2个方面采取更加有效的措施．

关键词：支持向量机（SVM）；模糊综合评价（FCE）；水资源管理；评价指标；北京市
中图分类号：TV213.4

Urban water resource management based on SVM and FCE model：a case study of Beijing*

XUE Shuhui[1]，ZHANG Yuhu[1**]，YU Sen[2]，SUN Fenghua[2]

（1. School of Resources，Environment and Tourism，Capital Normal University，Beijing　100048；
2. Beijing Water Science and Technology Institute，Beijing　100048）

Abstract：Strengthening the evaluation of water resources management can provide scientific decision support for the fine management of water resources in water-scarce areas. This study establishes Beijing water resources management evaluation index system composed of 12 indicators. The evaluation models of support vector machine（SVM）and fuzzy comprehensive evaluation（FCE）can complement each other’s advantages，which are used to evaluate and analyze the level of water resources management in Beijing from 2016 to 2019. The results show that the comprehensive evaluation results obtained by the two evaluation models of SVM and FCE are consistent，and the overall level of water resources management in Beijing is on the rise；Beijing is inadequate in terms of public participation and rural residents’ domestic water use，more effective measures should be taken in these two aspects in the future.

收稿日期：2021-05-24
* 首都用水精细化管理研究项目（Z201100009519008）
** 通信作者：zhang_yuhu@163.com

Keywords: support vector machine (SVM); fuzzy comprehensive evaluation (FCE); water resource management; evaluation index; Beijing
CLC: TV213.4

0 引 言

水资源短缺是21世纪世界发展面临的主要限制因素之一.实施水资源管理是提高水资源利用效率、缓解水资源短缺的重要途径.定量评估城市水资源管理有利于查找管理的薄弱环节,形成"精准、细化、规范、严格"的水资源管理模式,是城市可持续水资源管理和规划的必要前提,也是当前水资源领域的研究热点[1].

国外学者对水资源管理评价的研究主要集中在综合水资源管理(integrated water resource management, IWRM)[2]方面.目前国外学者IWRM评价的对象主要是流域,多采用单一的综合指数法或决策模型[3-7].国内学者在水资源管理评价方面的研究主要集中在评价指标体系的合理构建和评价方法的选择.选取的评价指标有用水双控和限制纳污等指标[8-9],评价方法有Topsis法[10]、层次分析法[11]、灰色关联分析[12]、模糊综合评价(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)[13]等.总结国内外相关文献表明,多数学者采用一种评价方法,且在水资源管理评价方法的比较选择方面探讨得较少.

选择不同的评价方法对同一对象进行评价往往会得到不同的评价结果[14].为了更为客观、准确地评价水资源管理水平,寻找限制因子,为水资源管理决策提供支撑,需要多种方法的配合使用,取长补短[15].支持向量机(support vector machine, SVM)是一个有效解决高维特征分类问题的监督式学习模型,能够较好地解决过拟合、高维度问题,通过性能指标说明评价结果的准确性[16-17],但只能得到综合评价结果;FCE是一种基于模糊数学的综合评价方法,能够充分考虑评价指标之间的模糊性和复杂性,获取更丰富的评价结果[18-19],但结果的准确性不确定,因此这2种方法可优势互补.

鉴于此,本文制定一套符合实际的水资源管理评价指标体系及评价标准,采用SVM和FCE这2种方法展开评价,并对二者的综合评价结果进行对比分析,在说明评价结果的准确度的同时,可以为区域水资源管理发展提供更多指导信息.

1 研究区概况

北京市属于温带季风气候,多年平均降水量585 mm. 2019年水资源总量24.6亿 m^3,其中地表水和地下水资源量所占比例分别为35%和65%.人均水资源量114 m^3,按照国际公认的缺水标准,北京市人均水资源量低于500 m^3,是一个极度缺水的特大型城市.北京市供水水源由地表水、地下水、外调水和再生水组成.2019年全市用水总量41.7亿 m^3,其中生活和环境用水所占比例分别为45%和38%[20].

2 研究方法及数据来源

2.1 水资源管理评价指标体系

(1)评价指标体系构建.为了缓解水资源供需矛盾,政府及社会各界在水资源管理方面付出诸多努力.然而,目前的水资源管理水平与城市精细化管理要求相比存在差距.为了定量评估区域水资源管理现状,本文遵循可操作性、代表性、独立性、定性与定量相结合的原则[21],按照目标层、准则层和指标层3个层次建立了水资源管理评价指标体系(表1).

(2)评价指标体系分级标准.按照上述已构建的水资源管理评价指标体系,参考专家意见、已有的国家标准、国内相对发达地区的现状值或有关规划的目标值、相关指标的国际水平或目标值确定水资源管理评价指标的标准.按照水资源管理水平的高低将评价结果划分为很高(I级)、较高(II级)、中等(III级)、较低(IV级)和很低(V级)5个等级,具体标准见表1.

2.2 水资源管理评价模型

2.2.1 SVM模型

(1)样本生成以及归一化处理.SVM进行分类需要一定数量的训练样本和测试样本.因每一类水资源管理评价等级仅能对应1组临界值,所以按照标准要求只能提供5组训练样本,无法满足SVM对训练样本量的需求.训练样本不足,会导致数据不能反映水资源管理评价的内部规则,评价精度低[19].同时考虑到样本的特征值较多,故采用rand函数在各评价分级标准阈值内随机插值生成样本[22].每个

表1　水资源管理指标体系目标层及分级标准

准则层(X_i)	指标层(X_{ij}/单位)	I级	II级	III级	IV级	V级
综合层(X_1)	法律制度建设(X_{11}/分)	95	85	75	65	55
	水务技术标准建设(X_{12}/分)	95	85	75	65	55
	公众参与(X_{13}/分)	95	85	75	65	55
水源配置层(X_2)	非常规水源利用替代水资源比例(X_{21}/%)	30.00	28.50	27.00	25.50	24.00
供水保障层(X_3)	中心城区城镇公共供水管网漏损率(X_{31}/%)	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00
	供水安全系数(X_{32})	1.30	1.23	1.15	1.08	1.00
用水管理层(X_4)	万元GDP水耗(X_{41}/m^3)	11.00	12.50	14.00	15.50	17.00
	污水处理率(X_{42}/%)	97.00	94.50	92.00	89.50	87.00
	城镇居民人均生活用水量(X_{43}/m^3)	40.20	43.85	47.50	51.15	54.80
	农村居民人均生活用水量(X_{44}/m^3)	40.20	43.85	47.50	51.15	54.80
	居民家庭节水器具普及率(X_{45}/%)	100.00	98.50	97.00	95.50	94.00
	节水灌溉工程控制面积比(X_{46}/%)	100.00	95.00	90.00	85.00	80.00

水资源管理等级类别分别生成200个随机样本,总共生成1 000个.取1~5分别作为I~V级这5类水资源管理水平的期望输出.为了提高模型的学习能力,将1 000个样本随机打乱,利用origin软件对样本数据进行归一化处理.

(2)模型核函数的选择.在利用SVM进行分类时会用到核函数,核函数的真正意义在于可以使向量直接在原来的低维空间进行内积运算,避免在高维空间中的复杂计算.常见的核函数有线性核函数、高斯核函数、多项式核函数和sigmoid核函数[23].考虑到样本的特征值数量较多,故选用线性核函数进行分类.

(3)模型性能评价指标.为了控制模型中的欠拟合和过拟合问题,选用决定系数(R^2)、均方根误差(root mean square error,RMSE)和偏差(bias)这3个统计学指标对模型的性能进行评价.其中:bias是指模型的预测误差,越低说明模型的性能越好;R^2范围为0~1,越接近1说明模型的性能越好;RMSE越接近0说明模型的性能越好[24].

(4)网络训练.本研究利用python语言以及sklearn工具包建立SVM模型.然后对训练样本进行训练和检验,经多次交叉验证得出,将"test size"设为0.7,"随机种子"设为420时,训练集R^2、RMSE、bias分别为0.998 5、0.057 7、0.003 3. SVM模型学习曲线如图1所示,2条曲线上下阴影部分为曲线误差,训练样本数为300个时,2条曲线准确率较高,逐渐拟合且误差越来越小,说明训练样本和预测样本未出现欠拟合或过拟合现象.

2.2.2　FCE模型

FCE模型采用"加权平均型$M(.,+)$"模糊算子和"最大隶属度"原则进行评价,具体步骤如下:

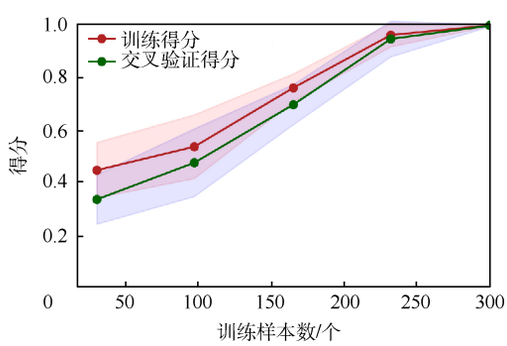


图1　支持向量机模型学习曲线

(1)确定各指标权重.主观赋权法能够较好地反映评价者的意图,客观赋权法规避了权重计算过程中的主观随意的缺点,为了保证权重的合理性,采用AHP-熵权法组合赋权法,计算公式为

$$E_{ij}=\frac{W_{ij}W'_{ij}}{\sum_{i=1}^{t}W_{ij}W'_{ij}},\tag{1}$$

式中:E_{ij}为第i(i=1,2,3,…,t)个准则层,第j(j=1,2,3,…,m)项指标权重,W_{ij}为熵权法确定的权重,W'_{ij}为层次分析法确定的权重[8].

(2)隶属度计算.评价指标隶属度采用线性函数计算,正向指标公式为

$$r=\begin{cases}\dfrac{X_{ij}-X_a}{X_b-X_a}\text{或}\dfrac{X_b-X_{ij}}{X_b-X_a},(X_a<X_{ij}<X_b),\\1,(X_{ij}>X_b),\\0,(X_{ij}<X_a),\end{cases}\tag{2}$$

逆向指标公式为

$$r=\begin{cases}\dfrac{X_{ij}-X_{\mathrm{a}}}{X_{\mathrm{b}}-X_{\mathrm{a}}}\text{或}\dfrac{X_{\mathrm{b}}-X_{ij}}{X_{\mathrm{b}}-X_{\mathrm{a}}},(X_{\mathrm{a}}<X_{ij}<X_{\mathrm{b}}),\\ 1,(X_{ij}<X_{\mathrm{a}}),\\ 0,(X_{ij}>X_{\mathrm{b}}),\end{cases}\tag{3}$$

式中:Y为对应X_{a}或X_{b}所规定的那一级的隶属度,X_{ij}为第i个准则层第j项指标值,X_{a}、X_{b}为某指标值相邻2级的标准值.

利用隶属度函数和分级标准对各个指标X_{ij}进行量化,确定从单因素来看评价对象对等级模糊子集的隶属度,从而得到第i个准则层模糊关系矩阵

$$\boldsymbol{R}_{ij}=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{21}&\cdots&r_{51}\\ r_{12}&r_{22}&\cdots&r_{52}\\ \vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\ r_{1m}&r_{2m}&\cdots&r_{5m}\end{bmatrix},\tag{4}$$

矩阵$\boldsymbol{R}_{ij}$表示被评样本评价指标X_{ij}分别对应5个等级的隶属度.

(3)单因素评价.单因素评价计算公式为

$$\boldsymbol{B}_i=\left[E_{i1},E_{i2},\cdots,E_{im}\right]\times\boldsymbol{R}_{ij}.\tag{5}$$

(4)综合评价.确定各准则层权重,公式为

$$W_t=\frac{1-0.4}{t-1},\tag{6}$$

式中:W_t为除综合层以外各准则层的权重,考虑到综合层指标的重要性,将其权重设为0.4.综合评价计算公式为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{W}_i\times\boldsymbol{B}_i,\tag{7}$$

根据模糊数学的最大隶属度原则,选择$\boldsymbol{F}$的最大值为最终评价结果,$\boldsymbol{W}_i=\left[W_1,W_2,\cdots,W_t\right]$.

2.3 数据来源

文中综合层评价指标数据通过专家打分法获取,供水保障层评价指标数据来源于北京市水务局,水源配置层和用水管理层评价指标数据来源于《北京市水务统计年鉴》.

3 结果和讨论

3.1 SVM模型评价结果

利用上述已训练的SVM模型对北京市2016—2019年的水资源管理进行评价,模型输出的评价结果分别处于III、III、II和II级状态.评价性能指标R^2接近1,RMSE和bias接近0,说明评价结果较好地反映了北京市不同年份的水资源管理实际水平,可以为北京市水资源管理规划提供一定的参考.

3.2 FCE模型评价结果

(1)权重计算.根据FCE中指标权重确定的方法,得到各指标的权重见表2.准则层包括:综合层、水源配置层、供水保障层和用水管理层.

(2)隶属度计算.根据隶属度函数和实测值分别计算4年样本各准则层的隶属度矩阵,2019年每个指标属于北京市水资源管理各等级的隶属度结果见表2.目前北京市水资源管理评价结果为I级的指标有城镇居民人均生活用水量、居民家庭节水器具普及率、节水灌溉工程控制面积比例;评价结果为II级的指标有法律制度建设、水务技术标准建设、非常规水源利用替代水资源比例、中心城区城镇公共供水管网漏损率、供水安全系数、万元GDP水耗、污水处理率;评价结果为III级的指标为公众参与,在举办的节水宣传活动中,受众人群和数量有限,公众对于节水普遍关心,但水短缺意识尚未在全社会普遍建立,节水氛围不够浓厚;评价结果为IV级的指标为农村居民人均生活用水量,虽然北京市已经实施“一户一表”改造,但是在农村地区存在

表2 2019年北京市水资源管理评价结果

准则层	评价指标	权重	I级	II级	III级	IV级	V级	隶属等级
综合层	法律制度建设	0.54	0	0.50	0.50	0	0	II
	水务技术标准建设	0.27	0	0.95	0.05	0	0	II
	公众参与	0.19	0	0.40	0.60	0	0	III
水源配置层	非常规水源利用替代水资源比例	1.00	0.23	0.77	0	0	0	II
供水保障层	中心城区城镇公共供水管网漏损率	0.29	0	0.86	0.14	0	0	II
	供水安全系数	0.71	0	0.69	0.31	0	0	II
用水管理层	万元GDP水耗	0.28	0.48	0.52	0	0	0	II
	污水处理率	0.15	0.00	1.00	0	0	0	II
	城镇居民人均生活用水量	0.14	0.54	0.46	0	0	0	I
	农村居民人均生活用水量	0.14	0	0	0	0.77	0.23	IV
	居民家庭节水器具普及率	0.14	0.60	0.40	0	0	0	I
	节水灌溉工程控制面积比例	0.15	1.00	0	0	0	0	I

水表损坏、跑表不准等现象,居民用水方式相对粗放.

(3)单因素评价.将隶属度矩阵和权重矩阵进行复合运算得到单因素评价结果,如表3所示,各个准则层评价等级均呈上升趋势.供水保障层和用水管理层变化最大,主要原因是第十水厂等供水水厂的投入运行以及自备井置换和老旧小区内部供水管网改造提升了北京市供水安全;节水规范的提升以及节水技改措施的推广应用提高了北京市各行业的用水效率.

表3　2016—2019年北京市水资源管理单因素评价结果

年份	综合层	水源配置层	供水保障层	用水管理层
2016	III	III	IV	III
2017	III	II	III	II
2018	III	II	III	I
2019	II	II	II	I

(4)综合评价.在单因素评价结果的基础上进行综合评价,按照最大隶属度原则确定2016、2017、2018和2019年北京市水资源管理水平分别处于III、III、II和II级.

4　结　论

本研究基于水资源管理评价指标体系,应用SVM和FCE这2种模型对2016—2019年北京市水资源管理进行评价,主要结论如下:

(1)由2个模型的综合评价结果可知,在相同的评价指标体系和评价标准下,由SVM和FCE模型得到的2016—2019年北京市水资源管理综合评价结果均相同.

(2)由SVM模型评价性能指标结果可知,SVM模型综合评价结果的准确度较高.而SVM模型和FCE模型综合评价结果一致,说明FCE模型评价结果的准确度也较高,FCE模型隶属度结果和单因素评价结果具有较高的可信度.

(3)由FCE隶属度结果可知,虽然有的单项指标已经达到了II级及以上级别,但2019年北京市水资源管理综合评价结果为II级.主要原因是仍有公众参与和农村居民人均生活用水量2项指标处于III、IV级,北京市水资源管理下阶段应创新公众参与模式、开展节水文化建设、加强农村“一户一表”计量用水监督.

参 考 文 献

[1] DOLL P, HAUSCHILD M. Model-based regional assessment of water use an example for semi-arid northeastern Brazil[J]. Water International, 2002, 27(3):310-320.

[2] Al RADIF A. Integrated water resources management (IWRM):an approach to face the challenges of the next century and to avert future crises[J]. Desalination, 1999, 124(1):145-153.

[3] SANDOVAL-SOLIS S, MCKINNEY D C, LOUCKS D P. Sustainability index for water resources planning and management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 137(5):381-390.

[4] BORA M, GOSWAMI D C. Water quality assessment in terms of water quality index (WQI):case study of the kolong river, Assam, India[J]. Applied Water Science, 2017, 7(6):3125-3135.

[5] MERABTENE T, KAWAMURA A, JINNO K, et al. Risk assessment for optimal drought management of an integrated water resources system using a genetic algorithm[J]. Hydrological Processes, 2002, 16(11):2189-2208.

[6] TRAN VAN T, SUNADA K, ICHIKAWA Y, et al. Scenario-based impact assessment of land use/cover and climate changes on water resources and demand:a case study in the srepok river basin, Vietnam-Cambodia[J]. Water Resources Management, 2012, 26(5):1387-1407.

[7] KUMAR P, JOHNSON B A, DASGUPTA R, et al. Participatory approach for more robust water resource management:case study of the santa rosa sub-watershed of the Philippines[J]. Water, 2020, 12(4):1172.

[8] 朱奕丞.大通湖区水资源管理指标构建及应用研究[D].长沙:长沙理工大学,2017.

[9] 郭巧玲,杨云松.节水型社会建设评价:以张掖市为例[J].中国农村水利水电,2008(5):25-30.

[10] 徐鸿.一种区域水资源管理绩效评价模型及实证研究[J].人民黄河,2016,38(9):42-45.

[11] 王琛茜,张玉虎,沈涛.我国水资源短缺风险评估及空间分析[J].首都师范大学学报(自然科学版),2015,36(1):81-87.

[12] 郝光玲,王烜,罗阳,等.基于改进的综合评价模型的北京市水资源短缺风险评价[J].水资源保护,2017,33(6):27-31.

(下转第96页)

染物残留检测[J].湖北农业科学,2019,58(8):129-132.
[33] 王媛.固相微萃取新方法及应用[D].北京:中国科学院大学,2014.
[34] 马继平,王涵文,关亚风.固相微萃取新技术[J].色谱,2002,20(1):16-20.
[35] ULRICH S. Solid-phase microextraction in biomedical analysis[J]. Journal of Chromatography A, 2000, 902(1):167-194.
[36] 孟凡生,王业耀,陈晶.我国水环境有机物分析前处理技术[J].环境监测管理与技术,2010,22(4):15-18.
[37] 饶竹.环境有机污染物检测技术及其应用[J].地质学报,2011,85(11):1948-1962.
[38] 郭景海,李锡清.顶空固相微萃取气相色谱法测定地下水中硝基苯[J].吉林化工学院学报,2011,28(11):91-94.
[39] 余明月,杨小秋,樊蓉,等.顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用法用于非目标性筛选饮用水中挥发性有机物[J].分析化学,2020,48(9):1228-1235.
[40] WANG Y,WANG X Y,GUO Z P,et al. Ultrafast coating procedure for graphene on solid-phase microextraction fibers[J]. Talanta,2014,119:517-523.
[41] 毕兴.气相色谱法分析水质中有机污染物的研究[J].环境与发展,2019,31(9):135+137.
[42] 韦方洋,丁银,李艳丽.水质中挥发性有机物在线监测技术研究进展[J].环境与发展,2019,31(5):90+92.
[43] 何芸菁.饮用水中挥发性有机物(VOCs)检测技术的研究进展[J].福建分析测试,2017,26(2):31-35.
[44] 郭琴,丛庆美,张吉芬,等.吹扫捕集气相色谱(FID)内标法测定水中28种挥发性有机物[J].预防医学论坛,2010,16(2):144-148.
[45] 郭燕金.GC-MS原理及在食品添加剂检测中的应用[J].海峡药学,2013,25(7):126-128.
[46] 范慧群.气相与气质联用测定地表水中VOC的方法比较[J].环境保护科学,2013,39(4):108-111.
[47] 普学伟,林奕,李蕾,等.P&T-GC-MS联用技术测定水中的25种挥发性有机物[J].环境科学导刊,2020,39(增刊):101-105.
[48] 张艳勤.吹扫捕集/气相色谱-质谱法测定水中59种挥发性有机物[J].广东化工,2018,45(4):150-152.
[49] 张子豪,余建龙,李春燕,等.吹扫捕集-气相色谱-质谱法同时测定环境水中101种挥发性有机物[J].化学分析计量,2016,25(6):17-21.
[50] 许峰,邵云飞,段立红,等.吹扫捕集/气相色谱/质谱联用测定水中30种挥发性有机物[J].中国给水排水,2017,33(8):132-135.

(责任编辑:王 媛)

(上接第75页)

[13] 李延峰.基于最严格水资源管理的城市节水综合评价及管理对策研究[D].郑州:华北水利水电大学,2016.
[14] 高雄,王红瑞,高媛媛,等.基于迭代修正的水资源利用效率评价模型及其应用[J].水利学报,2013,44(4):478-488.
[15] 靳京,吴绍洪,戴尔阜.农业资源利用效率评价方法及其比较[J].资源科学,2005(1):146-152.
[16] 代兴兰.最严格水资源管理评价的神经网络模型及其应用[J].水资源与水工程学报,2015,26(2):119-125.
[17] CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. Machine Learning,1995,20(3):273-297.
[18] ZADEH L A. Fuzzy sets[J]. Information and Control, 1965,8(3):338-353.
[19] 刘会文.基于模糊综合评价和BP神经网络的景观河道水质评价研究[D].天津:河北工业大学,2015.
[20] 北京市水务局.北京市水资源公报[R].北京:北京市水文总站,2019.
[21] 刘君龙,陈进,袁喆,等.基于DPSIR-模糊集对评价模型的湖北省水资源评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(3):57-64.
[22] 崔东文.支持向量机在湖库营养状态识别中的应用[J].水资源保护,2013,29(4):26-30.
[23] 周志华.机器学习[M].北京:清华大学出版社,2016.
[24] 崔东文.支持向量机在水资源类综合评价中的应用:以全国31个省级行政区水资源合理性配置为例[J].水资源保护,2013,29(5):20-27.

(责任编辑:李拓宇)