

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0056

薛辰影,方红远,吉久伟.水资源承载力评价指标约简方法研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(3):23-30,78. XUE C Y, FANG H Y,JI J W. An index reduction method for water resources carrying capacity[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(3):23-30,78. (in Chinese)

水资源承载力评价指标约简方法研究

薛辰影,方红远,吉久伟

(扬州大学 水利与能源动力工程学院,江苏 扬州 225009)

摘要:针对传统水资源承载力评价指标数量较多且分类过细,对资料要求较高,部分指标独立性较低,指标间存在明显相关或间接相关等不足,提出了基于敏感度分析及动态聚类分析的指标约简方法,以剔除不必要的指标,建立一套简洁实用的水资源承载力评价指标体系。首先采用敏感度分析进行指标初步筛选,其次运用关联系数对指标进行动态聚类,根据聚类结果进一步约简指标,实现了评价指标的有效约简。采用上述方法对湖州市水资源承载力评价指标进行约简,将约简后的指标集用于湖州市2011年至2016年水资源承载力动态评价,评价方法采用集对评价法。评价结果表明湖州市2011年至2016年水资源承载状态总体呈向好态势,与湖州市实际情况基本相符,验证了该套指标约简方法在湖州地区的合理性和有效性,为其他地区水资源承载力评价指标约简提供了一些新思路。

关键词:水资源承载力;指标约简;敏感度分析;动态聚类;集对评价法

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



An index reduction method for water resources carrying capacity

XUE Chenying, FANG Hongyuan, JI Jiuwei

(School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: An index reduction method was proposed to eliminate unnecessary indexes and to establish a simple and practical water resources carrying capacity (WRCC) model, based on sensitivity analysis and dynamic cluster analysis. It overcame the shortcomings of the traditional WRCC model, such as, many quantities, fine classifications, rich data requirements and not independence or indirect correlations. Firstly, the sensitivity analysis was used to screen the indexes initially. Secondly, the correlation coefficient was used to cluster the indexes dynamically. According to the clustering results, the number of index was further reduced, and the effective reduction of indexes was achieved. This model was then used in Huzhou City to calculate its WRCC from 2011 to 2016. The results showed that the WRCC states of Huzhou has been developed well from 2011 to 2016, which was basically consistent with the actual conditions, which verified the rationality and effectiveness of the model. Meanwhile, the proposed method provided some new aspects of the WRCC evaluation and can be used in other regions of the country to estimate WRCC.

Key words: water resources carrying capacity; index reduction; sensitivity analysis; dynamic clustering; set pair evaluation

收稿日期:2018-10-27 修回日期:2018-12-11 网络出版时间:2019-01-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190122.1158.004.html>

基金项目:国家自然科学基金项目(51379181)

作者简介:薛辰影(1995—),女,江苏苏州人,主要从事水资源规划及管理研究。E-mail:489692899@qq.com

通信作者:方红远(1963—),男,江苏人,教授,博士,主要从事水资源规划及管理研究。E-mail:hyfang@yzu.edu.cn

随着我国城市化水平不断提高,经济社会发展加剧了水资源供需矛盾,很多地区出现了水资源短缺、水环境污染、水生态恶化等问题。这一系列水资源问题严重制约了经济社会的发展,在不破坏区域生态及环境的前提下,水资源能够承载的最大社会经济规模一直是水利行业研究的热点^[1]。由于区域人口和经济规模呈动态变化,单一、静态的水资源承载力评价难以满足需求,水资源承载力研究逐渐由静态走向动态,由现状评价向监测预警转变。

评价指标体系的选取是进行水资源承载力研究的核心,指标体系建立须遵循科学性、完备性、可获取性、可比性、独立性、动态性、实用性等原则^[2-34]。目前,区域水资源承载力评价指标体系尚无统一标准。研究水资源承载力,目的是为了解决动态变化下水资源供需平衡和社会经济发展之间的矛盾,为合理配置区域资源、调整产业结构与生产布局、制定经济社会发展战略提供参考,以支撑我国水资源承载力监测预警工作^[5]。为了对区域水资源承载力进行实时动态评价和实现承载力预警目标,需要建立一套快速、实用且合理、准确的评估技术手段。本文根据适用于区域水资源承载力预警指标体系的建立原则,采用敏感度分析^[6]与动态聚类分析^[7-8]相结合的方法,对目前使用较频繁且罗列宽泛的指标体系进行筛选,忽略敏感度低以及不适合用于实时动态预警的指标,在保证系统分类能力不变的情况下,获得最大程度的约简指标集;并通过集对评价法对湖州市水资源承载力进行动态评价,以验证该套指标约简方法的合理性、实用性。

1 水资源承载力指标约简方法与步骤

我国学者对水资源承载力评价指标体系已有一定的研究,王友贞^[3]等根据水资源承载力大小、所处承载状况和协调状况三个方面构建了八个层次共 38 个指标的区域水资源承载力综合指标体系,层次结构合理清晰,具有一定的代表性;刘佳骏^[9]等综合频度统计与理论分析法,构建了一套包含 41 个指标的区域社会、经济、生态与水资源复合系统评价指标体系,对中国各省区水资源承载力状况进行了综合分析,指标体系结构完整且覆盖面广;屈小娥^[10]基于“水-社会-经济-生态”复合系统理论,针对陕西省水资源承载力综合评价,选取 24 个指标,划分为三个层次,构建了一套全面科学的指标体系;王建华^[11]等从“量、质、域、流”四大方面出发,构建了水资源承载力“四层三级”指标体系,并提出对应指标计算的重要影响因子。上述各类指标体系的建立均

具有一定代表性,指标层次划分清晰,指标体系完备性较高,对水资源承载力评价指标选取具有指导性作用,但指标体系构成较为繁复且部分指标数据获取难度高,加之部分指标统计时间尺度不统一,难以满足水资源承载力动态评价需求,在水资源承载力预警应用中更缺乏实用性,故需通过一定方法对指标体系加以简化。聚类分析法可以在保证系统分类能力不变的前提下,最大程度地约简指标,方法精度较高,但由于初始指标集指标数量较多,直接运用聚类分析法计算量大,可操作性较低,不利于方法推广。故本文先采用敏感度分析对繁复的指标进行约简,即采用向量模^[12-13]来表征水资源承载力的相对强弱程度,并运用敏感性分析定量评价水资源承载力对各指标变化的响应以删去敏感度低的指标;然后通过聚类分析对剩余指标进行精确筛简,以建立一套合理可行、易于操作的区域水资源承载力动态评价及承载力预警指标体系。

1.1 数据标准化

将指标数据进行标准化^[14],首先将逆向指标(指标值越小评价结果越优)转化为正向指标(指标值越大评价结果越优);其次通过坐标平移将指标值为负的指标进行非负处理;接着利用列和等于 1 的归一化方法进行标准化处理,记结果为 y_{ij} ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$);最后,为了避免待评价对象较多(m 比较大)造成 y_{ij} 很小,可以让 y_{ij} 乘以 m ,这样如果 y_{ij} 接近平均值,也就接近 1。

1.2 敏感度分析

1.2.1 向量模表征水资源承载力

水资源承载力的定义至今尚无定论,结合前人研究成果,本文认为水资源承载力是指某一区域在某一历史时段上,以可预见的社会经济、科学技术发展水平为依据,以可持续发展为前提,以维护生态环境良性循环为基础,经过合理优化配置,其水资源可支撑的社会经济规模和具有一定生活水平的人口数量^[15-16]。本文为了量化水资源承载力以便于进行约简分析,在对承载力敏感度进行计算时所采取的承载力内涵是以向量模来表示的。

向量模法是一种综合评价方法^[12],假设有 m 个不同的水平年;或者对于同一水平年而言,假设有 m 个不同的分区,这两种情况都会有 m 个承载力评价,记为 E_j ($j=1, 2, \dots, m$),再设每个 E_j 包括 n 个具体指标确定的分量即 $E_j = (E_{1j}, E_{2j}, \dots, E_{nj})$,第 j 个承载力的第 i 个指标的权重为 w_{ij} ,指标标准化后记为 $\tilde{E}_j = (\tilde{E}_{1j}, \tilde{E}_{2j}, \dots, \tilde{E}_{nj})$ 。这样,第 j 个承载力

评价值的大小可用标准化后的向量模表示,即

$$|\tilde{E}_j| = \left(\sum_{i=1}^n (w_{ij} \tilde{E}_{ij})^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中:

$$\tilde{E}_{ij} = E_{ij} \sum_{j=1}^m E_{ij} \quad (i=1,2,\dots,n)(j=1,2,\dots,m) \quad (2)$$

1.2.2 各指标对承载力影响的敏感度计算

计算敏感度系数,并根据计算结果进行敏感程度类型的划分,从而定量评价水资源承载力对影响因素变化的敏感性特征,即水资源承载力对影响因素变化的响应。具体计算公式^[6]

$$\beta = \frac{(I_{t+1} - I_t) / I_t}{(L_{t+1} - L_t) / L_t} \quad (3)$$

式中: β 为敏感度系数; I_t 和 I_{t+1} 分别为不同时期的水资源承载力; L_t 和 L_{t+1} 分别为不同时期的影响因素(以各评价指标实际值表示)。采用控制变量法,计算各指标对水资源承载力的敏感度系数, β 值越大,说明水资源承载力对该评价指标变化的敏感度越高,即该项评价指标的较小变动会造成水资源承载力的较大波动。

1.3 动态聚类分析法

对敏感度分析后保留的数据集采用 SPSS19.0 统计软件进行动态聚类分析^[10]。其原理是计算各评价指标间两两相关系数,通过关联系数对所列指标进行聚类。(1)建立相关矩阵,找出关联系数矩阵中最大关联度系数 X_{ij} ,则将第 i 和第 j 个样本聚为一类;之后去掉矩阵中第 i 行和第 j 列,在形成的新的关联系数矩阵中继续找出最大的关联度系数,将所对应的样本聚类,以此循环往复。(2)去掉第一个指标,重复上述步骤,得到去掉第一个指标后的样本聚类结果,依次去掉第2至第 n 个指标,并依次进行相关分析及样本聚类,得到所有样本的聚类结果。(3)将去掉每一个指标后的聚类结果与全指标聚类结果作比较,若相同,表明该指标对评价样本分类的作用不显著,可删除该指标;否则,保留该指标。

1.4 集对评价法

集对评价法结构简单概念清晰,能够简洁地计算出评价结果。将评价样本某指标值 x_i 看成一个集合 A_i ,把相应指标的评价标准看成另一个集合 B_k ,则和可构成一个集对 $H(A_i, B_k)$ 。根据集对分析法原理,可用 K 元联系度 μ_i 描述集对 $H(A_i, B_k)$ 的关系。

根据评价指标等级分类标准,确定联系度计算方法。王文圣等^[17]在传统联系度计算方法上有所创新,提出了新的联系度计算方法。

采用置信度准则 $h_k = (f_1 + f_2 + \dots + f_k) > \lambda$, $k=1,2,\dots,K$,可判断样本所属的评价等级。其中 $f_1 = \sum_{l=1}^m w_l a_l$, $f_2 = \sum_{l=1}^m w_l b_{l,1}$, \dots , $f_{k-1} = \sum_{l=1}^m w_l b_{l,K-2}$, $f_k = \sum_{l=1}^m w_l c_l$; λ 为置信度,取值越大则评价结果越趋于保守,取值范围通常为 $[0.5, 1.0]$,一般取0.6与0.7之间^[18]。

2 实例研究

2.1 研究区概况

湖州市地处浙江省北部,长江中下游太湖流域西南侧,介于北纬 $30^{\circ}22' \sim 31^{\circ}11'$ 、东经 $119^{\circ}14' \sim 120^{\circ}29'$,东西长度126 km,南北宽度90 km,土地面积5 818 km²,自然资源丰富^[19]。地处北亚热带季风气候区,年降水量761~1 780 mm,年降水日数116~156 d,年平均相对湿度均在80%以上,年平均风速1.7~3.2 m/s,境内平原河网湖荡密布,河流、湖泊面积496 km²,过境水资源量丰富,水资源禀赋条件较好。但近年来随着经济社会的不断发展以及人口规模的扩大,生活生产用水逐年增多,水资源需求量不断增加,加之废污水大量排放,存在水质型缺水,水资源供需矛盾加剧。通过对水资源承载力评价指标的研究,建立一套快速且合理的评价指标体系,用于湖州市水资源承载力的动态评价,实时掌握水资源承载力变化情况,及时采取相应管控措施,以顺应可持续发展理念,实现湖州市水资源与社会经济统筹协调发展。

2.2 构建指标集

根据现有学者较为系统的理论性指标体系研究成果(本文称之为全指标体系)^[3,9-11],结合湖州市水资源供需情况、经济社会发展、水资源开发利用等实际情况,有针对性地对全指标系统进行了一定的简化处理,去掉了部分指标数据获取难度大,统计时间尺度不统一,代表性较差的指标,构建了一套包含水资源系统、社会系统、经济系统、生态系统在内4个层次共29个指标的湖州市水资源承载力监测预警指标集。数据资料来源于相应年份《湖州市水资源公报》、《湖州市统计年鉴》^[20]等。权重确定采用层次分析法、熵权法相结合的组合赋权法^[21]。数据标准化结果见表1。

2.3 敏感度分析

2.3.1 向量模计算

向量模法数学理论坚实、形式简单直观、运算便捷、结果客观合理,在承载力状况评价领域得到广泛

表 1 2011 至 2016 年湖州市各指标数据标准化结果
Tab. 1 Standardization WRCC index of Huzhou from 2011 to 2016

目标系统	指标	类型	2011	2012	2013	2014	2015	2016	组合权重
水资源系统 B ₁	水资源总量 C ₁	正	0.681 7	1.108 9	0.592 8	0.7746	1.190 6	1.651 4	0.297 6
	年降水量 C ₂	正	0.838 0	1.091 0	0.797 4	0.898 7	1.012 1	1.362 9	0.100 6
	水资源开发利用 C ₃	逆	0.571 2	1.175 8	0.813 1	1.004 9	1.188 3	1.246 7	0.088 3
	人均水资源量 C ₄	正	0.757 3	1.106 9	0.589 3	0.766 4	1.170 6	1.609 6	0.023 8
	大中型水库蓄水量 C ₅	正	0.930 4	0.887 7	0.788 3	0.910 9	1.264 4	1.218 3	0.043 3
社会系统 B ₂	户籍人口 C ₆	逆	1.008 1	1.005 8	1.002 5	0.996 0	0.995 9	0.991 7	0.007 5
	人口密度 C ₇	逆	1.008 5	1.005 7	1.002 8	0.995 7	0.995 7	0.991 5	0.046 6
	城镇化率 C ₈	逆	1.034 0	1.018 3	1.005 8	0.994 8	0.980 6	0.966 5	0.042 7
	人口自然增长率 C ₉	逆	1.291 9	1.464 7	0.903 1	0.000 0	1.649 2	0.691 1	0.018 2
	居民生活用水 C ₁₀	逆	0.975 8	1.072 7	1.010 4	1.010 4	0.982 7	0.948 1	0.013 4
	城镇公共用水 C ₁₁	逆	1.141 4	1.130 9	0.994 8	0.921 5	0.973 8	0.837 7	0.011 9
	人均日生活用水量 C ₁₂	逆	1.039 1	1.018 9	0.988 6	0.982 3	1.001 2	0.969 7	0.094 5
水资源承载力评价经济系统 B ₃	人均 GDP C ₁₃	正	0.827 6	0.891 8	0.956 7	1.029 3	1.098 5	1.196 0	0.030 0
	人均 GDP 增速 C ₁₄	正	1.226 5	0.986 0	0.998 0	0.937 9	1.022 0	0.829 7	0.017 9
	GDP C ₁₅	正	0.820 2	0.886 4	0.953 7	1.031 0	1.104 1	1.204 6	0.004 7
	GDP 增速 C ₁₆	正	1.223 1	0.992 3	0.992 3	0.957 7	1.015 4	0.819 2	0.016 5
	万元 GDP 用水量 C ₁₇	逆	0.723 7	0.837 3	0.924 1	1.070 1	1.156 7	1.288 2	0.008 6
	一产业占 GDP 比重 C ₁₈	正	1.178 7	1.145 3	1.026 3	0.921 6	0.885 2	0.843 0	0.005 6
	工业占 GDP 比重 C ₁₉	正	1.040 7	1.022 7	1.023 4	1.010 2	0.961 2	0.941 8	0.003 9
	三产业占 GDP 比重 C ₂₀	正	0.922 7	0.951 8	0.978 2	1.004 4	1.056 9	1.085 8	0.004 7
	灌溉用水定额 C ₂₁	逆	0.827 3	0.817 3	0.896 1	1.070 3	1.161 6	1.227 4	0.018 9
	灌溉覆盖率 C ₂₂	逆	1.065 2	1.054 9	1.055 7	0.995 1	0.927 9	0.901 3	0.011 8
生态系统 B ₄	林牧渔畜用水量 C ₂₃	逆	0.976 3	1.090 9	0.924 9	1.023 7	0.917 0	1.067 2	0.003 9
	工业用水量 C ₂₄	逆	0.934 9	0.922 4	0.931 8	1.038 8	1.045 1	1.127 0	0.021 4
	城市绿化覆盖率 C ₂₅	正	0.892 5	0.924 5	0.962 3	1.038 6	1.075 8	1.106 3	0.010 2
	生态环境补水 C ₂₆	正	1.271 4	0.454 5	1.433 7	1.136 2	1.082 1	0.622 2	0.015 9
	水功能区水质达标率 C ₂₇	正	0.915 7	0.942 4	0.988 1	1.009 3	1.050 5	1.093 9	0.032 7
	城市水域功能区水质达标率 C ₂₈	正	0.959 7	1.008 1	1.008 1	1.008 1	1.008 1	1.008 1	0.002 5
	城市集中式饮用水水源地水质达标率 C ₂₉	正	0.870 9	1.025 8	1.025 8	1.025 8	1.025 8	1.025 8	0.002 5

应用^[12,22-24]。本文中结合水资源、社会、经济、生态四个方面,将水资源承载力视为 1 个由 29 个指标构成的向量,对 6 个年份的 29 个指标进行标准化,将标准化后的向量模作为一个综合评价价值,以评定研究区水资源承载力的相对优劣。结合水资源承载力指标体系权重系数,按照式(1),计算 2011 年至 2016 年湖州市水资源承载力综合评价价值,评价价值越大说明承载力状态相对较优。计算结果见图 1。

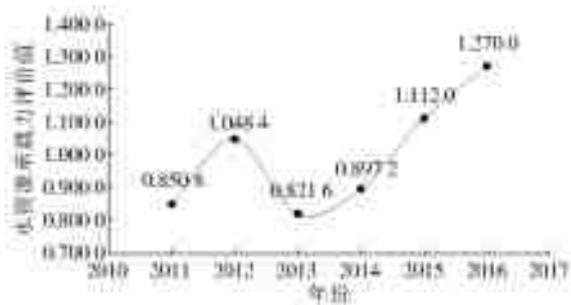


图 1 2011—2016 年湖州市水资源承载力综合评价价值
Fig. 1 Comprehensive evaluation values of WRCC in Huzhou from 2011 to 2016

2.3.2 敏感度分析

根据 2011—2016 年湖州市水资源承载力综合评价价值变化曲线(图 1)可以看出,2012 年评价价值变化较为突出,是序列的一个极值点,分析原因,主要是由于这一年的降水量比较丰富,降水有效地增加了水资源的天然供应,使得 2012 年水资源承载压力得到缓解。根据湖州市的实际数据进行 2011—2016 年的敏感度分析,按照式(3)计算水资源承载力对所有指标的敏感度系数并降序排列,敏感度系数在 0.002 4~0.234 2。根据系数区间进行分级,保留所有敏感度大于 0.01 的指标,即删除低敏感度指标,保留中、高敏感度指标。根据计算结果保留 20 个指标(表 2),即 C₁、C₂、C₃、C₄、C₅、C₇、C₈、C₉、C₁₀、C₁₁、C₁₂、C₁₃、C₁₄、C₁₆、C₂₁、C₂₂、C₂₄、C₂₅、C₂₆、C₂₇,作为进行动态聚类的初始指标集。

2.4 动态聚类分析

利用 SPSS19.0 对 2.3 节中保留的 20 个指标进行全指标聚类。根据聚类表,绘制聚合系数随分

表2 湖州市水资源承载力指标敏感性分析

Tab. 2 Sensitivity analysis of WRCC indexes in Huzhou

指标	C ₁	C ₁₂	C ₂	C ₃	C ₇	C ₈	C ₅	C ₂₇	C ₁₃	C ₉
敏感度系数	0.234 2	0.108 4	0.093 9	0.056 1	0.051 9	0.048 7	0.044 6	0.033 1	0.027 5	0.025 9
指标	C ₁₄	C ₂₆	C ₁₆	C ₂₄	C ₄	C ₂₁	C ₁₁	C ₁₀	C ₂₂	C ₂₅
敏感度系数	0.024 2	0.022 3	0.022 3	0.022 2	0.020 0	0.017 3	0.015 1	0.014 5	0.013 8	0.010 1

类数变化曲线,见图2。在曲线开始变得平缓的点选择合适的分类数,本文分类数取12。依次去掉20个指标,分别进行聚类,聚类结果详见表3。将聚类结果与全指标聚类结果相比较,当聚类结果与全指标聚类结果不同时,保留该指标,反之则可删去该指标。根据聚类分析结果,最终保留C₂降水量、C₃水资源开发利用、C₅大中型水库蓄水量、C₈城镇化率、C₉人口自然增长率、C₁₁城镇公共用水量、C₁₃人均GDP、C₂₁灌溉用水定额、C₂₆生态环境补水量9个指标。

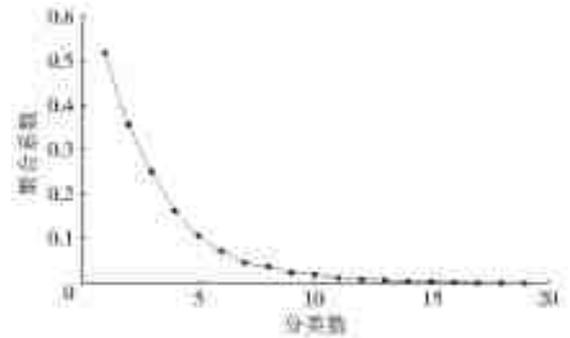


图2 聚合系数随分类数变化曲线

Fig. 2 Relationship between polymerization coefficient and classification number

表3 全指标及依次去除各指标后的聚类结果

Tab. 3 Clustering results of full index set and sub-index set

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₆	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆	C ₂₇	比选结果
全指标	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7	5	8	9	9	10	5	11	11	12	11	参照组
去C ₁		1	2	3	4	5	5	6	5	7	5	8	9	9	10	5	11	11	12	11	去除
去C ₂	1		2	1	3	4	4	5	4	6	4	7	8	8	9	10	11	11	12	11	保留
去C ₃	1	2		1	3	4	4	5	4	6	4	7	8	8	9	10	11	11	12	11	保留
去C ₄	1	2	3		4	5	5	6	5	7	5	8	9	9	10	5	11	11	12	11	去除
去C ₅	1	2	3	1		4	4	5	4	6	4	7	8	8	9	10	11	11	12	11	保留
去C ₇	1	2	3	1	4		5	6	5	7	5	8	9	9	10	5	11	11	12	11	去除
去C ₈	1	2	3	1	4	5		6	5	7	5	8	9	9	10	11	8	8	12	8	保留
去C ₉	1	2	3	1	4	5	5		5	6	5	7	8	8	9	10	11	11	12	11	保留
去C ₁₀	1	2	3	1	4	5	5	6		7	5	8	9	9	10	5	11	11	12	11	去除
去C ₁₁	1	2	3	1	4	5	5	6	5		5	7	8	8	9	10	11	11	12	11	保留
去C ₁₂	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7		8	9	9	10	5	11	11	12	11	去除
去C ₁₃	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7	5		8	8	9	10	11	11	12	11	保留
去C ₁₄	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7	5	8		9	10	5	11	11	12	11	去除
去C ₁₆	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7	5	8	9		10	5	11	11	12	11	去除
去C ₂₁	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7	5	8	9	9		10	11	11	12	11	保留
去C ₂₂	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7	5	8	9	9	10		11	11	12	11	去除
去C ₂₄	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7	5	8	9	9	10	5		11	12	11	去除
去C ₂₅	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7	5	8	9	9	10	5	11		12	11	去除
去C ₂₆	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7	5	8	9	9	10	11	12	12		12	保留
去C ₂₇	1	2	3	1	4	5	5	6	5	7	5	8	9	9	10	5	11	11	12		去除

2.5 指标合理性论证

所保留的9个指标从水资源、社会、经济、生态等4个角度反映了区域水资源承载力的情况。

降水是一个流域或区域水资源数量多少的重要影响因素之一,是研究一个区域或流域水资源特性

的首选指标。水资源开发利用反映地表水和地下水综合利用的程度,体现了水资源开发利用特征及管理水平。选择大中型水库蓄水量以表征水资源工程系统对水资源承载力的影响,体现了水资源人工系统对经济社会发展的重要性。人

口是社会系统的核心,区域人口的数量、构成、迁移等变化都会对区域发展及水资源的开发利用产生影响。城镇化率、人口自然增长率、城镇公共用水等指标从人口数量变化及用水情况量方面反映了人作为区域水资源的“用水户”对区域水资源承载力的影响。人均 GDP 指标可用于量度区域经济发展的平均水平,研究区内农业用水量占比较大,选择灌溉用水定额能够反映农业用水量变化对水资源承载力的影响,生态环境补水量能够反映生态系统对水资源的需求。

2.6 研究区水资源承载力动态评价

采用集对分析法对水资源承载力进行评价,参考相关研究成果^[25-28]确定评价标准,主要分为四级,不超载(1级)、临界(2级)、超载(3级)、严重超载(4级)。根据各指标值以及分级标准(表 4),计算湖州市 2011—2016 年各指标与该指标 1 级评价标准的联系度 μ_i ,结合各指标权重计算各样本与 1 级标准联系度以及 h_k 值,结果详见表 5。权重采用主客观综合赋权法确定^[10],各指标权重分别为 0.235 6、

表 4 湖州市水资源承载力评价样本指标值及分级标准

Tab. 4 Index values and standards for WRCC evaluation in Huzhou

评价 指标	评价样本						分级标准			
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	不超载 1 级	临界 2 级	超载 3 级	严重超载 4 级
C_2	1 282.40	1 669.500	1 220.20	1 375.20	1 675.10	2 043.20	>1 500	1 200~1 500	1 000~1 200	<1 000
C_3	29.90	15.400	24.100	19.50	15.10	11.80	<15	15~30	30~60	>60
C_5	20 880.00	53 749.000	23 532.00	26 189.00	33 426.00	24 387.00	>25 000	22 000~25 000	20 000~22 000	<20 000
C_8	59.50	60.300	61.00	61.40	62.20	62.90	<60	60~70	70~80	>80
C_9	1.17	-0.150	2.20	3.45	0.41	2.91	<2	2~3	3~4	>4
C_{10}	0.80	0.810	0.94	1.01	0.96	1.09	<0.9	0.9~1.2	1.2~1.6	>1.6
C_{13}	5.83	6.370	6.88	7.43	7.90	8.64	<8	6~8	2~6	<2
C_{21}	448.00	455.000	448.00	408.00	371.00	342.00	<250	250~400	400~600	>600
C_{26}	0.47	0.168	0.53	0.42	0.40	0.23	>0.45	0.4~0.45	0.2~0.4	<0.2

表 5 各样本联系度及 h_k 值

Tab. 5 Connection degree and h_k of each sample

年份	f_1	f_2	f_3	f_4	h_1	h_2	h_3	h_4
2011	0.247	0.384	0.349	0.020	0.247	0.631		
2012	0.820	0.090	0.051	0.040	0.820			
2013	0.193	0.632	0.175	0.000	0.193	0.825		
2014	0.417	0.496	0.087	0.000	0.417	0.913		
2015	0.833	0.146	0.020	0.000	0.833			
2016	0.682	0.242	0.048	0.028	0.682			

0.227 4、0.168 7、0.106 3、0.067 0、0.033 5、0.074 8、0.047 1、0.039 7。

由置信度准则($\lambda=0.6$),可得湖州市 2011—2016 年水资源承载力评价等级,见表 6。2011 年处于临界状态,表明水资源承载能力一般,开发利用已有相当规模,可利用空间有所减小,可持续利用度一般,若不合理利用水资源,则会对社会经济发展产生一定的制约。2012 年由于降水量充足,水资源承载力处于不超载状态,水资源供给情况较为乐观,处于可持续利用程度较高状态;2013—2014 年均处于临界状态,2015—2016 年恢复至不超载状态。对照 2017 年完成的湖州市水资源承载能力试评价项目得出的“如分水量、水质要素对湖州市 2014 年水资

源承载状况进行评价,则结果为临界状态”结论,以及同年完成的太湖流域片县域水资源承载力评价项目的“在以县域为单元对湖州市 2015 年水资源承载状况进行评价的情况下,结果为不超载”结论,本文计算结果和相关结论与上述湖州市的一系列研究评价结果一致,也符合该地区水资源承载力客观演变趋势。实际上,自“十二五”时期以来,湖州市展开了全面综合治水计划,深入推进“五水共治”、“清四乱”等专项行动,坚持节水优先、综合施策,全面提升水资源管理水平,开展各项节水措施,适度提高生态建设标准,出台水工程生态建设技术规范,水生态环境日渐好转,水资源承载力不断得到增强。

表 6 湖州市水资源承载力动态评价结果

Tab. 6 Dynamic evaluation results of WRCC in Huzhou

年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016
评价结果	临界	不超载	临界	临界	不超载	不超载

3 结 语

本文针对目前覆盖面较广的水资源承载力评价理论性指标体系,运用基于敏感度分析及动态聚类法的指标约简方法,在保证系统分类能力不变的前

前提下,删除其中不相关或者不重要的指标,较为客观、迅速地选取一套简洁、实用、合理的评价指标体系,用以进行水资源承载力动态评价,在一定程度上解决了传统确定指标方法指标繁复实用性不强、指标时间统计尺度不一等问题。经实例研究,将该套方法约简后的指标体系用以对湖州市水资源承载力进行动态评价,评价结果与实际情况基本吻合,能够满足区域水资源承载力实时动态评价的要求,为水资源承载力监测预警机制建设奠定了基础,对今后浙江省乃至其他地区研究水资源承载力动态评价及预警工作具有借鉴作用。不足之处,一是由于逐月数据获取难度较大,本文选择的承载力动态评估时间尺度为年,从实时动态预警角度出发,最好应该做到逐月动态评价;二是目前对于指标标准的确定尚无确切的规范,仅通过参考国家现行标准、发达国家水平、相关参考文献以及研究区实际情况来确定,在一定程度上具有主观性,指标标准确定有待进一步深入研究。

参考文献(References):

- [1] 夏军,张永勇,王中根,等. 城市化地区水资源承载力研究[J]. 水利学报, 2006, 37(12): 1482-1488. (XIA J, ZHANG Y Y, WANG Z G, et al. Water carrying capacity of urbanized area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1482-1488. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0559-9350. 2006. 12. 013.
- [2] 惠洪河,蒋晓辉,黄强,等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 30-34. (HUI Y H, JIANG X H, HUANG Q, et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2001, 21(1): 30-34. (in Chinese)) DOI: 10. 13961/j. cnki. st-bctb. 2001. 01. 008.
- [3] 王友贞,施国庆,王德胜. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 597-604. (WANG Y Z, SHI G Q, WANG D S. Study on evaluation indexes of regional water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(4): 597-604. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1000-3037. 2005. 04. 016.
- [4] 来海亮,汪党献,吴涤非. 水资源及其开发利用综合评价指标体系[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 95-101. (LAI H L, WANG D X, WU D F. Comprehensive assessment indicator system for water resources and its development and use[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(1): 95-101. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1001-6791. 2006. 01. 015.
- [5] 党丽娟,徐勇. 水资源承载力研究进展及启示[J]. 水土保持研究, 2015, 22(3): 341-348. (DANG L J, XU Y. Review of research progress in carrying capacity of water resources[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 341-348. (in Chinese)) DOI: 10. 13869/j. cnki. rswc. 2015. 03. 062.
- [6] 刘彦随,王介勇,郭丽英. 中国粮食生产与耕地变化的时空动态[J]. 中国农业科学, 2009, 42(12): 4269-4274. (LIU Y S, WANG J Y, GUO L Y. The spatial-temporal changes of grain production and arable land in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(12): 4269-4274. (in Chinese)) DOI: 10. 3864/j. issn. 0578-1752. 2009. 12. 018.
- [7] 马卫鹏,刘红瑛,王映月,等. 基于土地功能的陕西省土地资源承载力评价[J]. 湖北农业科学, 2016, 55(3): 612-615. (MA W P, LIU H Y, WANG Y Y, et al. Evaluation on bearing capacity of land resources in Shaanxi Province based on land function[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2016, 55(3): 612-615. (in Chinese)) DOI: 10. 140880. cnki. issn0439-8114. 2016. 03. 016.
- [8] 侯娜,李战江,苏金梅,等. 基于灰色动态聚类-粗糙集的绿色资源环境评价指标构建模型[J]. 统计与信息论坛, 2017, 32(8): 96-103. (HOU N, LI Z J, SU J M, et al. Establishment of green resource environment indicators system based on grey dynamic clustering and rough set[J]. Statistics & Information Forum, 2017, 32(8): 96-103. (in Chinese))
- [9] 刘佳骏,董锁成,李泽红. 中国水资源承载力综合评价研究[J]. 自然资源学报, 2011, 26(2): 258-269. (LIU J J, DONG S C, LI Z H. Comprehensive evaluation of China's water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 258-269. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2011. 02. 009.
- [10] 屈小娥. 陕西省水资源承载力综合评价研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(2): 91-97. (QU X E. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Shaanxi Province[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(2): 91-97. (in Chinese)) DOI: 10. 13448/j. cnki. jalre. 2017. 050.
- [11] 王建华,翟正丽,桑学锋,等. 水资源承载力指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报, 2017, 48(9): 1023-1029. (WANG J H, ZHAI Z L, SANG X F, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1023-1029. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20170377.
- [12] 邢有凯,余红,肖杨,等. 基于向量模法的北京市水环境承载力评价[J]. 水资源保护, 2008, 24(4): 1-3. (XING Y K, YU H, XIAO Y, et al. Water environ-

- mental carrying capacity evaluation in Beijing City with vector norm method[J]. *Water Resources Protection*, 2008, 24(4): 1-3. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2008.04.001.
- [13] 刘磊, 卢宏伟, 侯保俊, 等. 流域水环境承载力动态变化特征研究[J]. *水利规划与设计*, 2017(12): 28-32. (LIU L, LU H W, HOU B J, et al. Study on dynamic change characteristics of water environment carrying capacity of watershed[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2017(12): 28-32. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2017.12.009.
- [14] 李美娟, 陈国宏, 陈衍泰. 综合评价中指标标准化方法研究[J]. *中国管理科学*, 2004, 12(s1): 45-48. (LI M J, CHEN G H, CHEN Y T. Study on target standardization method of comprehensive evaluation[J]. *China Journal of Management Science*, 2004, 12(s1): 45-48. (in Chinese) DOI: 10.3321/j.issn:1003-207X.2004.zl.012.
- [15] 刘晓, 陈隽, 范琳琳, 等. 水资源承载力研究进展与新方法[J]. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2014, 50(3): 312-318. (LIU X, CHEN J, FAN L L, et al. Progress and a review of new methods in water resources capacity research[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2014, 50(3): 312-318. (in Chinese))
- [16] 沈珍瑶, 祝莹欣, 贾超, 等. 基于动态模拟递推算法和向量模法的水环境承载力计算方法[J]. *水资源保护*, 2015, 31(6): 32-39. (SHEN Z Y, ZHU Y X, JIA C, et al. Calculation method of water environment carrying capacity based on dynamic simulation-recursion algorithm and vector norm method[J]. *Water Resources Protection*, 2015, 31(6): 32-39. (in Chinese) DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.005.
- [17] 王文圣, 金菊良, 丁晶, 等. 水资源系统评价新方法——集对评价法[J]. *中国科学(E辑: 技术科学)*, 2009, 39(9): 1529-1534. (WANG W S, JIN J L, DING J, et al. A new approach to water resources system assessment; Set pair analysis method[J]. *Science in China (Series E: Technological Sciences)*, 2009, 39(9): 1529-1534. (in Chinese) DOI: 10.1360/ze2009-39-9-1529.
- [18] 程乾生. 属性识别理论模型及其应用[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1997, 33(1): 12-20. (CHENG Q S. Attribute recognition theoretical model with application[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 1997, 33(1): 12-20. (in Chinese) DOI: 10.13209/j.0479-8023.1997.002.
- [19] 闫慧敏, 封志明, 杨艳昭, 等. 湖州/安吉: 全国首张市/县自然资源资产负债表编制[J]. *资源科学*, 2017, 39(9): 1634-1645. (YAN H M, FENG Z M, YANG Y Z, et al. First report of the national natural resources balance sheet for Huzhou City and Anji County[J]. *Resources Science*, 2017, 39(9): 1634-1645. (in Chinese) DOI: 10.18402/resci.2017.09.03.
- [20] 湖州市统计局, 国家统计局湖州调查总队. 湖州统计年鉴(2012版-2017版)[M]. 北京: 中国统计出版社. (Statistical Bureau of Huzhou City, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Huzhou. *Huzhou statistical year books (from 2012 to 2017)*[M]. Beijing: Statistics Publishing Company of China. (in Chinese))
- [21] 史毅超, 唐德善, 孟令爽, 等. 基于改进可变模糊方法的区域水资源承载力预警模型[J]. *水电能源科学*, 2018, 36(1): 36-39. (SHI Y C, TANG D S, MENG L S, et al. Early-warning model of regional water resources carrying capacity based on improved variable fuzzy method[J]. *Water Resources and Power*, 2018, 36(1): 36-39. (in Chinese))
- [22] 王玉梅, 丁俊新. 山东省水环境承载力动态变化趋势分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2011, 22(6): 50-55. (WANG Y M, DING J X. Analysis on dynamic changing tendency of water environment carrying capacity in Shandong Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2011, 22(6): 50-55. (in Chinese))
- [23] 薛冰, 宋新山, 严登华. 基于系统动力学的天津市水资源模拟及预测[J]. *南水北调与水利科技*, 2011, 9(6): 43-47. (XUE B, SONG X S, YAN D H. Simulation and prediction of water resources carrying capacity based on a system dynamic model in Tianjin[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2011, 9(6): 43-47. (in Chinese) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.06043.
- [24] 曾现进, 李天宏, 温晓玲. 基于 AHP 和向量模法的宜昌市水环境承载力研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(6): 200-205. (ZENG X J, LI T H, WEN X L. Analysis on carrying capacity of water environment in Yichang City based on AHP and vector norm method[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(6): 200-205. (in Chinese) DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2013.06.040.
- [25] 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. (GUO X Y, CHEN X W, CHEN Y, et al. Dynamic variation analysis of water resources carrying capacity in Xiamen City based on rough set theory and BP neural network[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2015, 13(2): 236-240. (in Chinese) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.02.010.

(下转第 78 页)

- [26] 赵彩霞,梅旭荣,居辉,等.黄淮海平原各农业亚区潜在蒸散量变化及其对气候要素的敏感性分析[J].中国农业气象,2015,36(5):570-577. (ZHAO C X,MEI X R,JU H, et al. Changes of potential evapotranspiration and sensitivity to climatic factors in various agricultural sub-regions of the Huang-Huai-Hai Plain [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36 (5): 570-577. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-6362. 2015. 05. 006.
- [27] 钱多,查天山,吴斌,等.毛乌素沙地参考作物蒸散量变化特征与成因分析[J].生态学报,2017,37(6):1966-1974. (QIAN D,ZHA T S,WU B, et al. Analysis of variation characteristics and genesis of reference crop evapotranspiration in Mu Us Sandland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37 (6): 1966-1974. (in Chinese)) DOI:10. 5846/stxb201510182101.
- [28] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,2007:63-66. (WEI F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: Meteorology Press, 2007: 63-66. (in Chinese))
- [29] 汤国安,杨昕,等.地理信息系统空间分析实验教程[M].北京:科技出版社,2012:289-291. (TANG G A,YANG X, et al. GIS spatial analysis experiment tutorial [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2012:289-291. (in Chinese))
- [30] 张素云.近 47 a 河北省风速演变特征[D].南京:南京信息工程大学,2011. (ZHANG S Y. Characteristics of wind speed evolution in Hebei Province in recent 47 a [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2011. (in Chinese)) DOI: 10. 7666/d. y1891447.
- [31] 任国玉,郭军,徐铭志,等.近 50 年中国地面气候变化基本特征[J].气象学报,2005,63(6):942-956. (REN G Y, GUO J, XU M Z, et al. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2005, 63 (6): 942-956. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0577-6619. 2005. 06. 011.
- [32] 马晓燕.外部强迫因子对气候变化影响的数值试验研究[D].北京:中国科学院大气物理研究所,2002. (MA X Y. Numerical experimental study on the influence of external forced factors on climate change [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences Institute of Atmospheric Physics, 2002. (in Chinese))
- [33] 赵宗慈,王绍武,徐影,等.近百年我国地表气温趋势变化的可能原因[J].气候与环境研究,2005,10(4):808-817. (ZHAO Z C, WANG S W, XU Y, et al. Possible reasons for the change of surface temperature trend in China in the past 100 years [J]. Climate and environmental research, 2005, 10 (4): 808-817. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1006-9585. 2005. 04. 012.
- [34] 曹永强,高璐,袁立婷,等.辽宁省潜在蒸散发量及其敏感性规律分析[J].地理科学,2017,37(9):1422-1429. (CAO Y Q, GAO L, YUAN L T, et al. Analysis of potential evapotranspiration and its sensitivity law in Liaoning Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37 (9): 1422-1429. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2017. 09. 015.

(上接第 30 页)

- [26] 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[J].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 [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48 (12): 1399-1409. (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20170651.
- [27] 王锦,郝晋珉,陈爱琪,等.基于模糊聚类分析的天津市生态环境承载力评价[J].中国农业大学学报,2018,23(10):112-121. (WANG J,HAO J M,CHEN A Q, et al. Evaluation of ecological environment carrying capacity in Tianjin based on fuzzy cluster analysis [J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(10): 112-121. (in Chinese)) DOI: 10. 11841/j. issn. 1007-4333. 2018. 10. 14.
- [28] 李辉,金菊良,吴成国,等.基于联系数的安徽省水资源承载力动态诊断评价研究[J].南水北调与水利科技,2018,16(1):42-49. (LI H, JIN J L, WU C G, et al. Dynamic evaluation and diagnostic analysis for water resources carrying capacity in Anhui province based on connection number [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 42-49. (in Chinese)) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 20180007.