

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180007

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)

基于联系数的安徽省水资源承载力动态诊断评价研究

李辉^{1,2}, 金菊良^{1,2}, 吴成国^{1,2}, 张礼兵^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 水资源与环境系统工程研究所, 合肥 230009)

摘要: 为定量评价安徽省水资源承载力的整体状况和发展趋势、识别引起水资源承载力不安全的主要因素, 采用“评价-诊断-调控-再评价”的研究思路, 构建了基于联系数的区域水资源承载力诊断评价模型, 对安徽省水资源承载力进行了动态诊断评价研究, 并利用减法集对势识别水资源承载力的脆弱性指标。结果表明: 安徽省 2005-2015 年的水资源承载力综合评价等级值均处于 2 级临界超载附近, 虽存在缓慢改善的趋势, 但承载状况不理想; 将诊断识别出引起水资源承载状况不安全的主要指标进行调控后, 再次对水资源承载力的总体安全状况进行综合评价, 调控后再评价的承载状况结果得到明显改善; 上述所采用的诊断评价方法及研究思路可为安徽省水资源合理配置与调控提供技术支持。

关键词: 水资源承载力; 诊断评价; 动态评价; 调控; 联系数; 减法集对势; 安徽省

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0042-08

Dynamic evaluation and diagnostic analysis for water resources carrying capacity in Anhui province based on connection number

LI Hui^{1,2}, JIN Juliang^{1,2}, WU Chengguo^{1,2}, ZHANG Libing^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the overall status and the development trend of the water resources carrying capacity in Anhui Province and diagnose the key indexes which made the system vulnerable, we used connection number method to establish an evaluation model for the water resources carrying capacity of Anhui Province, and used the set pair subtractive situation to identify vulnerable indexes. In this study we proposed a new research idea. First, we evaluated the overall status of the water resources carrying capacity. Second, we identified vulnerable indexes based on the evaluation results. Then we regulated the vulnerable indexes. At last, we re-evaluated the water resources carrying capacity. The results showed that the comprehensive evaluation grade of water resources carrying capacity in Anhui Province from 2005 to 2015 was near Grade 2 overload. Despite the tendency of slow improvement, the carrying capacity was not satisfactory. After the vulnerable indexes were regulated, the evaluation results improved significantly. The evaluation and diagnostic methods and research ideas used in this paper can provide technical support for the rational allocation and regulation of water resources in Anhui Province.

Key words: water resources carrying capacity; diagnostic evaluation; dynamic evaluation; regulation; connection number; set pair subtractive situation; Anhui Province

收稿日期: 2017-05-09 修回日期: 2018-01-18 网络出版时间: 2017-12-26

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171226.1010.014.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0401305; 2016YFC0401303); 国家自然科学基金(51579059; 51479045)

Funds: National Key Research and Development Program of China(2016YFC0401305; 2016YFC0401303); National Natural Science Foundation of China(51579059; 51479045)

作者简介: 李辉(1992-), 男, 山东日照人, 主要从事水利水电系统工程研究。E-mail: lhlcehui@foxmail.com

通讯作者: 吴成国(1982-), 男, 甘肃民乐人, 讲师, 博士, 主要从事水资源系统工程研究。E-mail: wule9825@163.com

作为支撑经济社会发展和生态环境建设不可或缺的基础性自然资源,水资源短缺会直接影响到食物或粮食安全^[12],也会严重制约21世纪全球经济与社会的发 展^[34]。目前学术界高度关注资源环境承载力相关问题的研究,针对水资源承载力的研究已成为当前水资源研究中的重点和热点^[14]。在文献[5]中所提及水资源承载力评价和诊断含义的基础上,结合文献[6]在水安全诊断评价中所提及的“调控”思想,重新归纳提炼了区域水资源承载力诊断评价的含义:区域水资源承载力诊断评价,就是在综合分析区域水资源承载时空、承载标准、承载原则、承载条件和承载状态等承载要素基础上,从水资源承载的支撑力、压力和调控力三方面建立相应的水资源承载力评价指标体系、评价标准和评价模型,对区域水资源的总体承载状况进行综合评判并识别导致区域水资源超载的主要指标,将识别出导致区域水资源超载的主要指标进行调控后,用评价模型再次综合评判区域水资源承载状况^[56]。水资源承载力诊断评价能够对区域水资源承载力进行宏观评价和微观诊断,是实现水资源调控和合理配置的关键环节,也是区域水资源承载力监测预警机制建设的重要内容,对实行最严格水资源管理制度的“三条红线”^[7]控制、实现区域可持续发展具有重要意义。目前,在区域水资源承载力诊断评价研究中尚有两个关键问题亟待解决^[5]:一是如何构建适用性强的区域水资源承载力定量诊断评价模型,二是如何综合评价水资源承载力承载现状、诊断识别区域水资源承载力脆弱性指标。对水资源承载力诊断评价的现有研究较少,大多数研究只是综合评价水资源承载力所处宏观整体状态,未见有从微观层面分析水资源承载力与关键驱动因子的响应关系。目前用于水资源承载力评价的主要方法有:综合指标法^[8]、模糊综合评价法^[9]、主成分分析法^[10]、系统动力学法^[11]、多目标决策分析法^[12]、投影寻踪法^[13]等。这些方法在水资源承载力评价中得到了较广泛的应用,但都存在一定的局限性,尤其在处理评价指标与评价标准之间的不确定性关系方面。与上述评价方法相比,集对分析法(Set Pair Analysis method, SPA)对处理确定性和不确定性问题具有独特优势^[14],方法较为客观、计算简便^[15],且集对分析方法能从同、异、反3个方面分析评价指标样本、评价指标子系统、各评价指标值与评价标准之间的变化关系、分析各指标值的优劣对水资源承载力的影响,分析问题全面,已有的研究成果也充分说明集对分析方法在水资源承载力评价和诊断领域有较强的适用

性和独特优势^[56,1518]。基于此,本文在重新归纳提炼水资源承载力诊断评价概念与内涵的基础上,采用集对分析方法,依据“评价-诊断-调控-再评价”的研究思路构建基于联系数的区域水资源承载力诊断评价定量分析模型,并与减法集对势^[5]共同用于诊断识别区域水资源承载力脆弱性指标,在安徽省水资源承载力动态诊断评价中开展实证研究。

1 基于联系数的区域水资源承载力诊断评价模型的建立

1.1 诊断评价指标体系的建立及权重的计算

在对水资源承载力诊断评价的概念和目标分析的基础上,遵循综合性、层次性、协调性、实用性及可操作性原则^[1920],按照与区域水资源承载力物理成因相关的影响因素,将区域水资源承载力评价系统分为水资源承载支撑力、压力和调控力3个子系统以及这些子系统下多项指标的区域水资源承载力诊断评价指标体系。利用AGA-FAHP^[21]方法计算各子系统及各项指标的权重 $\{w_j | j = 1, 2, \dots, n_j\}$,其中 w_j 为第 j 个指标的权重。

1.2 确定评价等级标准

考虑区域水资源-经济社会-生态环境复杂系统,在参考已有研究资料^[22-24]及咨询专家意见的基础上,建立区域水资源承载力评价等级标准 $\{s_{kj} | k = 1, 2, \dots, n_k; j = 1, 2, \dots, n_j\}$,将评价指标样本数据集记为 $\{x_{ij} | i = 1, 2, \dots, n_i; j = 1, 2, \dots, n_j\}$,其中 n_k, n_j, n_i 分别为评价标准的等级数目、评价指标数目和评价样本数目。为了简便又不失一般性,这里取不超载、临界超载、超载3个评价标准等级^[25]:1级为不超载,说明被评价对象水资源承载能力较强,其水资源供给情况较为乐观,处于可持续利用程度较高的状态;2级为临界超载,说明被评价对象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;3级为超载,说明被评价对象水资源承载力很脆弱,开发利用已接近饱和值,水资源不再处于可持续发展状态,且极易引发水资源短缺、水环境恶化等一系列资源环境问题,制约区域的可持续发展。

1.3 基于联系数的区域水资源承载力综合评价方法

采用文献[5]提出的方法计算评价指标联系数与平均联系数,具体步骤如下。

步骤1:计算评价样本联系数。用集对分析方法计算区域水资源承载力评价样本联系数分量 v_{lik} ,其

中 $i = 1, 2, \dots, n_i$ (n_i 为评价样本数目); $k = 1, 2, 3$ 分别代表三元联系数的 3 个联系数分量。可用式

(1) 计算评价样本联系数^[5]:

$$u_{ii} = v_{i11} + v_{i12}I + v_{i13}J = a + bI + cJ \quad (1)$$

式中: u_{ii} 为样本 i 的三元联系数; a, b 和 c 分别为集对的同度、差异度和对立度, $a, b, c \in [0, 1]$, 且 $a + b + c = 1$; I 为差异度系数, J 为对立度系数^[3]。

u_{ii} 的 3 个联系数分量可用式 (2) 计算^[5]:

$$v_{i11} = \sum_{j=1}^{n_i} w_j, v_{i12} = \sum_{j=n_a+1}^{n_a+n_b} w_j, v_{i13} = \sum_{j=n_a+n_b+1}^{n_a+n_b+n_c} w_j \quad (2)$$

式中: w_j 为第 j 个评价指标的权重; n_a, n_b, n_c 分别为样本 i 的 n_j 个指标中分别落在 1 级、2 级和 3 级评价等级中的指标数目, 它们满足:

$$n_a + n_b + n_c = n_j \quad (3)$$

步骤 2: 计算评价指标值联系数。用集对分析计算样本 i 指标 j 的样本值 x_{ij} 与评价标准等级 s_{kj} 之间的评价指标值联系数 u_{2ijk} 。其中 $i = 1, 2, \dots, n_i$; $j = 1, 2, \dots, n_j$; $k = 1, 2, 3$ 。用式 (4) - 式 (6) 计算三元联系数^[5-6, 14]:

$$u_{2ij1} \begin{cases} 1, \text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j}, \text{或反向指标 } x_{ij} \geq s_{1j} \\ 1 - 2(x_{ij} - s_{1j}) / (s_{2j} - s_{1j}), \text{正向指标} \\ s_{1j} < x_{ij} \leq s_{2j}, \text{或反向指标 } s_{1j} > x_{ij} \geq s_{2j} \\ -1, \text{正向指标 } x_{ij} > s_{2j}, \text{或反向指标 } x_{ij} < s_{2j} \end{cases} \quad (4)$$

$$u_{2ij2} \begin{cases} 1 - 2(s_{1j} - x_{ij}) / (s_{1j} - s_{0j}), \text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j}, \\ \text{或反向指标 } x_{ij} \geq s_{1j} \\ 1, \text{正向指标 } s_{1j} < x_{ij} \leq s_{2j}, \\ \text{或反向指标 } s_{1j} > x_{ij} \geq s_{2j} \end{cases} \quad (5)$$

$$u_{2ij3} \begin{cases} 1 - 2(x_{ij} - s_{2j}) / (s_{3j} - s_{2j}), \text{正向指标} \\ s_{2j} < x_{ij} \leq s_{3j}, \text{或反向指标 } s_{2j} > x_{ij} \geq s_{3j} \\ -1, \text{正向指标 } x_{ij} > s_{3j}, \text{或反向指标 } x_{ij} < s_{3j} \\ -1, \text{正向指标 } x_{ij} \leq s_{1j}, \text{或反向指标 } x_{ij} \geq s_{1j} \\ 1 - 2(s_{2j} - x_{ij}) / (s_{2j} - s_{1j}), \text{正向指标 } s_{1j} < x_{ij} \leq s_{2j}, \\ \text{或反向指标 } s_{1j} > x_{ij} \geq s_{2j} \\ 1, \text{正向指标 } s_{2j} < x_{ij} \leq s_{3j}, \text{或反向指标 } s_{2j} > x_{ij} \geq s_{3j} \end{cases} \quad (6)$$

式中: 正向指标是指评价标准等级值 k 随评价指标值 x_{ij} 的增大而增大, 反向指标是指评价标准等级值 k 随评价指标值 x_{ij} 的增大而减小; s_{0j} 为各指标 1 级评价标准等级的另一端点值; s_{1j} 为 1 级与 2 级评价标准等级之间的限值; s_{2j} 为 2 级与 3 级评价标准等级之间的限值; s_{3j} 为各指标 3 级评价标准等级的另一端点值; $i = 1, 2, \dots, n_i$; $j = 1, 2, \dots, n_j$ 。样本值 x_{ij} 隶属于模糊集“标准等级 k ”的相对隶属度可表示为^[5-6, 22, 26]:

$$v_{2ijk}^* = 0.5 + 0.5u_{2ijk} \quad (i = 1, 2, \dots, n_i; j = 1, 2, \dots, n_j; k = 1, 2, \dots, n_k) \quad (7)$$

对式 (7) 进行归一化处理, 可得评价指标值联系数分量 v_{2ijk} :

$$v_{2ijk} = v_{2ijk}^* / \sum_{g=1}^3 v_{2ijg}^* \quad (8)$$

由评价指标值联系数分量 v_{2ijk} 可得评价指标值联系数 u_{2ij} :

$$u_{2ij} = v_{2ij1} + v_{2ij2}I + v_{2ij3}J \quad (9)$$

式中: I 为差异度系数; J 为对立度系数。

步骤 3: 计算平均联系数。由式 (9) 可得样本 i 的评价指标值联系数 u_{2i} :

$$u_{2i} = v_{2i1} + v_{2i2}I + v_{2i3}J = \sum_{j=1}^{n_i} w_j v_{2ij1} + \sum_{j=1}^{n_i} w_j v_{2ij2}I + \sum_{j=1}^{n_i} w_j v_{2ij3}J \quad (i = 1, 2, \dots, n_i) \quad (10)$$

式中: I 为差异度系数; J 为对立度系数。根据最小相对熵原理, 取几何平均数^[5]:

$$v_{ik} = (v_{1ik} v_{2ik})^{0.5} / \sum_{k=1}^3 (v_{1ik} v_{2ik})^{0.5}, \quad u_i = v_{i1} + v_{i2}I + v_{i3}J \quad (i = 1, 2, \dots, n_i) \quad (11)$$

步骤 4: 确定水资源承载力评价等级。用级别特征值法^[15-16, 24, 26] 计算平均联系数对应的样本 i 的水资源承载力评价等级值作为区域水资源承载力的评价结果(综合评价), 计算评价指标值联系数对应的样本 i 第 j 个指标的水资源承载力评价指标等级值(单指标评价):

$$h(i) = \sum_{k=1}^3 v_{ik} k \quad (12)$$

$$h(j) = \sum_{k=1}^3 v_{2ijk} k \quad (13)$$

1.4 基于减法集对势的区域水资源承载力诊断方法

这里采用金菊良等^[5] 提出的减法集对势诊断识别区域水资源承载力脆弱性指标和承载状态。按照集对分析理论, 联系数的集对势函数 $s_f(u)$ 是式 (1) 联系数的伴随函数, 它实质上所描述的是联系数所表达的研究对象在当前宏观期望层次上所处的相对确定性状态和发展趋势, 减法集对势 $s_f(u)$ 定义为^[5]:

$$s_f(u) = a - c + ba - bc = (a - c)(1 + b) \quad (14)$$

根据“均分原则”^[14] 可把减法集对势 $s_f(u)$ 划分为 5 个势级^[5]: 反势 $s_f(u) \in [-1.0, -0.6]$, 偏反势 $s_f(u) \in (-0.6, -0.2]$, 均势 $s_f(u) \in (-0.2, 0.2]$, 偏同势 $s_f(u) \in (0.2, 0.6]$, 同势 $s_f(u) \in (0.6, 1.0]$ 。处于反势和偏反势的指标是引起区域水资源承载力较弱的主要因素, 可诊断识别为区域水资源承载力的脆弱性指标, 是水资源承载力调控的主要对象^[5]。

1.5 区域水资源承载力诊断评价分析

根据“评价诊断-调控-再评价”的研究思路, 用 1.3 节建立的综合评价模型对水资源承载力评价指

标各时期样本系列进行综合评价,用式(13)计算出水资源承载力单个指标评价等级、用式(14)计算评价指标值联系数的减法集对势,识别导致水资源承载力处于不安全状态的主要指标,对这些指标提出相应的调控措施后,重复1.3节中的步骤1到步骤4,再次对水资源承载力的总体状况进行综合评价,确定导致水资源承载状况较差的不确定性的主要来源。

2 模型在安徽省水资源承载力动态诊断评价中的应用

应用上节的模型对安徽省2005-2015年水资源承载状况进行动态诊断评价。根据该地区水资源承载支撑力、承载压力和承载调控力3方面综合分析、参考已有研究成果^[22-24]、在咨询专家意见的基础上,建立的评价指标体系包括如下15个指标:人均水资源量 x_1 、产水模数 x_2 、人均供水量 x_3 、植被覆盖率 x_4 等4个指标属于水资源承载支撑力子系统;人均日生活用水量 x_5 、万元GDP用水量 x_6 、万元工业增加值需水量 x_7 、人口密度 x_8 、城市化率 x_9 、农田灌溉定额 x_{10} 等6个指标属于水资源承载压力子系统;水资源开发利用率 x_{11} 、人均GDP x_{12} 、入河污水排放达标率 x_{13} 、水功能区水质达标率 x_{14} 、生态用水率 x_{15} 等5个指标属于水资源承载调控力子系统。对于确定的安徽省水资源承载力指标体系,邀请10位专家打分取平均值后构建判断矩阵,采用AGA-FAHP方法修正各判断矩阵的一致性并计算权重,

评价标准及权重详见表1。该权重计算结果说明:水资源承载支撑力子系统和承载压力子系统的权重均为0.4,调控力子系统所占权重为0.2,说明专家认为在水资源承载力评价系统中水资源承载系统自身的承载支撑力和所承受的外部压力具有相同的重要性,它们比调控力子系统更重要些。在水资源承载支撑力子系统中权重最大的是指标 x_1 “人均水资源量”和指标 x_2 “产水模数”,说明专家认为水资源量在水资源承载支撑力子系统中最为重要,从物理成因角度分析,一个区域水资源量的多少大致决定了该区域所能承载的人口和经济规模,故而最为重要。在水资源承载压力子系统中,指标 x_6 “万元GDP用水量”、指标 x_8 “人口密度”、指标 x_{10} “农田灌溉定额”最为重要,表明专家认为经济、人口和农业是水资源承载力系统所承受的主要外部压力。水资源承载调控力子系统中指标 x_{15} “生态用水率”权重最小,专家认为安徽省全省境内降水丰富,多年平均生态需水(供水)量较小,生态用水率对水资源承载力的影响最小。针对安徽省实际情况,经各专家研究分析,各评价指标及权重计算结果合理可靠,可应用于安徽省水资源承载力诊断评价中。

从《安徽省水资源公报》和《安徽省统计年鉴》^[27]中收集整理2005-2015年各评价指标的数据及相关资料,用上节构建的评价模型对安徽省水资源承载力进行动态评价,并用减法集对势^[5]和集对指数势^[28]分析水资源承载状态,结果见表2。

表1 安徽省水资源承载力评价指标、等级标准及权重

Tab. 1 The standards and weights of the indexes of water resources carrying capacity in Anhui Province

目标层	子系统	权重	指标层	评价标准			权重
				不超载(1级)	临界超载(2级)	超载(3级)	
水资源承载力评价	水资源承载支撑力子系统	0.4	人均水资源量 $x_1/(m^3)$	≥ 1670	$< 1670 \sim 1000$	< 1000	0.1332
			产水模数 $x_2/(万m^3 \cdot km^2)$	≥ 80	$< 80 \sim 50$	< 50	0.1332
			人均供水量 $x_3/(m^3 \cdot a^{-1})$	≥ 450	$< 450 \sim 350$	< 350	0.1056
			植被覆盖率 $x_4(\%)$	≥ 40	$< 40 \sim 25$	< 25	0.0280
	水资源承载压力子系统	0.4	人均日生活用水量 x_5/L	≤ 70	$> 70 \sim 180$	> 180	0.0396
			万元GDP用水量 x_6/m^3	≤ 100	$> 100 \sim 400$	> 400	0.0792
			万元工业增加值需水量 $x_7, m^3/万元$	≤ 50	$> 50 \sim 200$	> 200	0.0596
			人口密度 $x_8/(人 \cdot km^2)$	≤ 200	$> 200 \sim 500$	> 500	0.0792
			城市化率 $x_9(\%)$	≤ 50	$> 50 \sim 80$	> 80	0.0632
			农田灌溉定额 $x_{10}/(m^3 \cdot hm^2)$	≤ 3750	$> 3750 \sim 6000$	> 6000	0.0792
	水资源承载调控力子系统	0.2	水资源开发利用率 $x_{11}(\%)$	≤ 40	$> 40 \sim 70$	> 70	0.0582
			人均GDP $x_{12}/元$	≥ 24840	$< 24840 \sim 6624$	< 6624	0.0484
			入河污水排放达标率 $x_{13}(\%)$	≥ 90	$< 90 \sim 70$	< 70	0.0288
			水功能区水质达标率 $x_{14}(\%)$	≥ 95	$< 95 \sim 70$	< 70	0.0454
			生态用水率 $x_{15}(\%)$	≥ 5	$< 5 \sim 1$	< 1	0.0192

注:不同年份比较时,采用2000年不变价计算国内生产总值。

由表2评价结果可知:全省在2006年水资源承载力评价等级最高、承载状况最差,2015年水资源

承载力评价等级最低、承载状况最好;安徽省2005-2015年水资源承载状况基本呈逐年缓慢改善的趋

势,但全省水资源承载力在 2006 年、2011 年和 2013 年的波动较大;全省在 2005-2007 年、2011 年和 2013 年水资源承载力平均联系数处于偏反势,2008-2010 年和 2012 年处于均势,2014 年和 2015 年处于偏同势,水资源承载状况呈改善趋势,这与联系数的综合评价结果一致。本文采用的减法集对势与集

对指数势相比,减法集对势将态势划分为 5 级,考虑了反势、均势、同势相邻两个态势之间边界的过渡性,评价结果与集对指数势相比偏安全、可靠。最终结果表明,安徽省 2005-2015 年的水资源承载力综合评价等级值均处于 2 级临界超载附近,虽存在波动性的缓慢改善趋势,但承载状况不容乐观。

表 2 安徽省水资源承载力各年平均联系数及评价等级、减法集对势和集对指数势值

Tab. 2 Set pair situation of the connection number in years and the grade of water resources carrying capacity in Anhui Province

年份	平均联系数	评价等级	减法集对势	态势分析	集对指数势	态势分析
2005	0.1328+ 0.5360I+ 0.3312J	2.20	-0.31	偏反势	0.82	强反势
2006	0.1281+ 0.4131I+ 0.4588J	2.33	-0.47	偏反势	0.72	强反势
2007	0.1643+ 0.5421I+ 0.2936J	2.13	-0.20	偏反势	0.88	强反势
2008	0.1763+ 0.6517I+ 0.1720J	1.99	0.01	均势	1.00	微同势
2009	0.1563+ 0.6480I+ 0.1957J	2.04	-0.07	均势	0.96	微反势
2010	0.1995+ 0.6872I+ 0.1133J	1.91	0.15	均势	1.09	微同势
2011	0.1149+ 0.6444I+ 0.2407J	2.13	-0.21	偏反势	0.88	微反势
2012	0.1291+ 0.7653I+ 0.1056J	1.98	0.04	均势	1.02	微同势
2013	0.1148+ 0.587I+ 0.2978J	2.18	-0.29	偏反势	0.83	强反势
2014	0.1490+ 0.8510I+ 0J	1.85	0.28	偏同势	1.16	微同势
2015	0.1656+ 0.8344I+ 0J	1.83	0.31	偏同势	1.18	微同势

用评价指标值联系数的减法集对势对第 i 个评价样本的第 j 个指标进行诊断分析,可得到安徽省 2005-2015 年各评价指标联系数的减法集对势(表 3),利用减法集对势可诊断识别出该省各年水资源承载力的脆弱性指标,即导致区域水资源承载力不安全的主要指标。表 3 中处于反势和偏反势的指

标,是引起区域水资源承载力较弱的主要因素,可被诊断识别为区域水资源承载力的脆弱性指标,是水资源承载力调控的主要对象^[5,28]。

由于篇幅原因,现选部分具有代表性指标,采用减法集对势方法、单指标评价方法、偏联系数^[29-30]方法进行动态对比分析。图 1 说明:指标 x_1 “人均水

表 3 安徽省水资源承载力各年评价指标联系数的减法集对势

Tab. 3 Set pair subtractive situation of the connection number in years of evaluation indexes for water resources carrying capacity in Anhui Province

评价指标	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
人均水资源量 x_1	-0.45	-0.77	-0.38	-0.44	-0.31	0.54	-0.73	-0.37	-0.76	-0.12	0.36
产水模数 x_2	-0.67	-0.82	-0.70	-0.74	-0.62	0.12	-0.81	-0.72	-0.82	-0.46	0.03
人均供水量 x_3	-0.83	-0.79	-0.76	-0.07	0.45	0.43	0.43	0.27	0.41	-0.12	0.23
植被覆盖率 x_4	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.50	-0.50	-0.50	-0.50	-0.39	-0.39
人均日生活用水量 x_5	0.49	0.54	0.46	0.39	0.32	0.24	0.21	0.21	0.20	0.20	0.19
万元 GDP 用水量 x_6	-0.68	-0.72	-0.28	-0.19	-0.20	0.06	0.28	0.41	0.47	0.60	0.59
万元工业增加值需水量 x_7	-0.98	-0.97	-0.87	-0.81	-0.79	-0.41	0.02	0.04	0.15	0.28	0.28
人口密度 x_8	-0.58	-0.60	-0.65	-0.67	-0.69	-0.70	-0.72	-0.73	-0.73	-0.74	-0.74
城市化率 x_9	0.88	0.87	0.85	0.84	0.82	0.81	0.80	0.78	0.77	0.76	0.73
农田灌溉定额 x_{10}	0.05	-0.13	0.38	-0.24	-0.41	-0.34	-0.17	-0.38	0.11	0.66	0.43
水资源开发利用率 x_{11}	0.85	0.88	0.82	0.77	0.75	0.83	0.30	0.69	0.22	-0.75	0.82
人均 GDP x_{12}	-0.66	-0.57	-0.47	-0.37	-0.25	-0.05	0.10	0.11	0.13	0.18	0.24
入河污水排放达标率 x_{13}	-0.75	-0.94	-0.91	-0.67	-0.80	-0.79	-0.83	-0.76	-0.61	-0.52	-0.40
水功能区水质达标率 x_{14}	-0.78	-0.81	-0.87	-0.62	-0.43	-0.24	-0.49	-0.67	-0.72	-0.53	-0.22
生态用水率 x_{15}	-0.84	-0.86	-0.83	-0.86	-0.84	-0.81	-0.62	-0.63	-0.61	-0.48	-0.49

资源量”在 2006 年、2011 年和 2013 年处于反势, 指标等级处于 2.5 到 3.0 之间, 说明“人均水资源量”是引起安徽省这 3 年水资源承载力较弱、导致水资源承载状况向差的方向波动的最主要因素, 人均水资源量的波动性与不确定性也是导致全省水资源承载状况在时间尺度上呈现一定波动性与不确定性的最主要因素。图 2 说明: 指标 x_6 “万元 GDP 用水量”在 2008 年之前为反势, 在 2011 年变为偏同势, 评价结果随时间变化基本呈逐年稳步提高的趋势。图 3 说明: 指标 x_7 “万元工业增加值需水量”在 2010 年之前为反势, 是引起安徽省 2005–2009 年水资源承载力较弱的主要因素之一, 而 2011 年提高为均

势, 在 2014 年提高为偏同势, 说明随着时间的发展, 指标 x_7 由水资源承载力的脆弱性指标逐渐发展为较安全的指标。图 4 说明: 指标 x_{12} “人均 GDP”作为水资源承载调控力指标, 其评价结果呈逐年提高的趋势, 在时间尺度上, 人均 GDP 向着有利于提高安徽省水资源承载状况的趋势发展。图 1 至图 4 中减法集对势对指标诊断结果与传统的单指标评价结果和偏联系数的诊断结果完全一致, 且减法集对势与偏联系数^[29,30]之间的相关系数为 1.0。减法集对势具有计算简洁、直观、结果可靠的特点, 在区域水资源承载力诊断分析时可以用减法集对势代替偏联系数进行诊断分析。

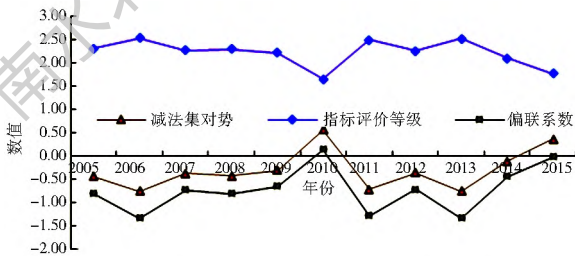


图 1 人均水资源量动态诊断分析结果

Fig. 1 The results of dynamic diagnostic analysis of the water resources per capita

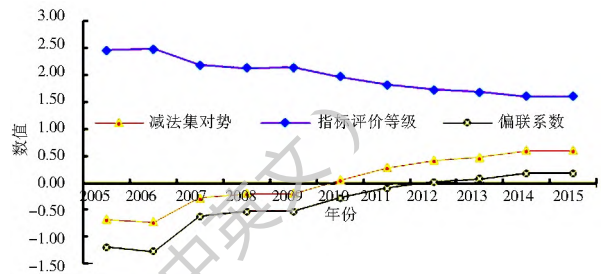


图 2 万元 GDP 用水量动态诊断分析结果

Fig. 2 The results of dynamic diagnostic analysis of the water consumption per ten thousand RMB GDP

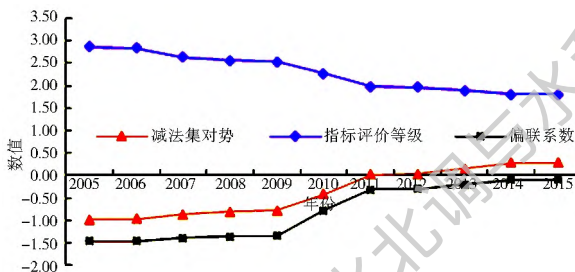


图 3 万元工业增加值需水量动态诊断分析结果

Fig. 3 The results of dynamic diagnostic analysis of the water consumption per ten thousand RMB industrial added value

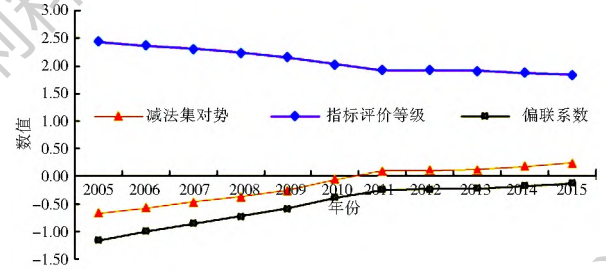


图 4 人均 GDP 动态诊断分析结果

Fig. 4 The results of dynamic diagnostic analysis of the GDP per capita

根据表 2 综合评价结果, 识别出水资源承载力处于临界超载(2 级)状态以下且为反势和偏反势的年份(2005 年、2006 年、2007 年、2011 年和 2013 年), 由表 3 中各指标联系数的减法集对势识别使水资源承载力处于不安全状态的主要指标, 对这些指标提出相应的调控措施(通过不断调控试算得到: 只需将联系数处于反势的指标调控为偏反势, 即可使当年的水资源承载力评价结果改善到 2.0 级以下)后, 重复 1.3 节中的步骤 1 到步骤 4, 再次对水资源承载力的总体安全状况进行综合评价, 结果见表 4。由表 3、表 4 可知, 2005 年处于反势且诊断结果明显差于常年的指标有“产水模数”、“万元 GDP 用水量”、“万元工业增加值需水量”、“人均 GDP”, 若将

这些指标调控为偏反势, 2005 年水资源综合评价结果由 2.20 级改善为 1.92 级, 且由偏反势变为均势, 水资源承载状况有很大改善。同样地, 若将引起 2006 年、2007 年、2011 年和 2013 年水资源承载力不安全的指标进行调控后, 则这几年水资源承载力的综合评价结果均由 2.0 级以上改善为 2.0 级以下, 且 2006 年和 2007 年由偏反势变为均势, 2011 年和 2013 年由偏反势变为同势, 水资源承载力得到较大幅度的提高。说明本文采用减法集对势方法识别出来的不安全指标是引起区域水资源承载力较弱的主要因素, 这些指标可被诊断识别为区域水资源承载力的脆弱性指标, 也是水资源承载力调控的主要对象。

表 4 安徽省水资源承载力不安全年份调控后的评价结果

Tab. 4 Post regulation evaluation results of water resources carrying capacity in vulnerable years in Anhui Province

年份	调控前平均联系数	评价等级	减法集对势	态势分析	调控后平均联系数	评价等级	减法集对势	态势分析
2005	0.1328+ 0.5360I+ 0.3312J	2.20	- 0.31	偏反势	0.1485+ 0.7805I+ 0.0711J	1.92	0.14	均势
2006	0.1281+ 0.4131I+ 0.4588J	2.33	- 0.47	偏反势	0.1575+ 0.7738I+ 0.0687J	1.91	0.16	均势
2007	0.1643+ 0.5421I+ 0.2936J	2.13	- 0.20	偏反势	0.1658+ 0.7688I+ 0.0654J	1.90	0.18	均势
2011	0.1149+ 0.6444I+ 0.2407J	2.13	- 0.21	偏反势	0.1450+ 0.8550I+ 0J	1.86	0.27	偏同势
2013	0.1148+ 0.587I+ 0.2978J	2.18	- 0.29	偏反势	0.1408+ 0.8592I+ 0J	1.86	0.26	偏同势

3 结论

本文采用“评价-诊断-调控-再评价”的研究思路构建了基于联系数的区域水资源承载力诊断评价模型,并对安徽省水资源承载力进行了动态诊断评价研究,分析了安徽省水资源承载力的现状及随时间变化的发展趋势,并采用减法集对势识别出了水资源承载力的脆弱性指标,确定了导致水资源承载状况较差的主要来源。结果如下。(1)安徽省在 2006 年水资源承载力评价等级最高、承载状况最差,2015 年水资源承载力评价等级最低、承载状况最好;除 2006 年、2011 年和 2013 年波动较大外,安徽省水资源承载状况基本呈逐年提高的趋势,但综合评价等级较高、承载状况较差;安徽省 2005—2015 年的水资源承载力综合评价等级值均处于 2 级临界超载附近、承载状况不理想,但存在缓慢改善的趋势。(2)利用减法集对势的诊断分析结果说明,各评价指标中“人均水资源量”与安徽省水资源承载力的相关性最大,人均水资源量的波动性与不确定性是导致全省水资源承载状况在时间尺度上呈现一定波动性与不确定性的最主要因素。(3)调控后再评价的结果表明,利用减法集对势诊断识别出的脆弱性指标是导致水资源承载力处于不安全状态的主要因素,也是水资源承载力调控的主要对象。经实例验证表明,基于联系数的诊断评价方法在水资源承载力诊断评价领域分析结果合理可靠、具有较强的适用性,可为区域水资源承载力诊断评价提供一定的方法参考、可为水资源调控提供技术支持。

参考文献(References):

- [1] GONG G. China's water shortage could shake world food security[J]. *Future & Development*, 1998, 11(4): 16-21.
- [2] 许有鹏. 干旱地区水资源承载能力综合评价—以新疆和田河流域为例[J]. *自然资源学报*, 1993, 8(3): 229-237. (XU Y P. A study of comprehensive evaluation of the water resource carrying capacity in the arid area—A case study in the Hetian river basin of Xinjiang[J]. *Journal of Natural Resources*, 1993, 8(3): 229-237. (in Chinese))
- [3] SAGOFF M. Carrying capacity and ecological economics[J]. *BioScience*, 1995, 45(9): 610-620.
- [4] DAILY G C, EHRLICH P R. Socioeconomic equity, sustainability, and earth's carrying capacity[J]. *Ecological Application*, 1996, 6(4): 991-1001.
- [5] 金菊良, 沈时兴, 酃建强, 等. 基于联系数的区域水资源承载力评价与诊断分析方法[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(1): 31-39. (JIN J r liang, SHEN Sh i xing, LI Ji an Qiang, et al. Assessment and diagnosis analysis method for regional water resources carrying capacity based on connection number[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(1): 31-39. (in Chinese))
- [6] 吴开亚, 金菊良, 魏一鸣, 等. 基于指标体系的流域水安全诊断评价模型[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2008, 47(4): 105-113. (WU K Y, JIN J L, WEI Y M, et al. Diagnosis assessment model of watershed water security based on index system[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(4): 105-113. (in Chinese))
- [7] 中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定[N]. *人民日报*, 2011-01-30(1). (The CPC Central Committee, the State Council Proposed Decision on Accelerating Water Reform and Development[N]. *People's Daily*, 2011-01-30(1). (in Chinese))
- [8] 王琳, 宫兆国, 张炯, 等. 综合指标法评价城市河流生态系统的健康状况[J]. *中国给水排水*, 2007, 23(10): 97-100. (WANG L, GONG Z G, ZHANG T, et al. Comprehensive index system for evaluation of urban river ecosystem health[J]. *China Water & Wastewater*, 2007, 23(10): 97-100. (in Chinese))
- [9] MENG L, CHEN Y, LI W, et al. Fuzzy comprehensive evaluation model for water resources carrying capacity in Tarim River Basin, Xinjiang, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2009, 19(1): 89-95.
- [10] 陈腊娇, 冯利华, 毛小军. 主成分分析法在水资源承载力影响因素评价中的应用[J]. *水利科技与经济*, 2006, 12(6): 362-364. (CHEN L J, FENG L H, MAO X J. Application the principal components method in evaluating the influence factors of water resources carrying capacity[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2006, 12(6): 362-364. (in Chinese))
- [11] WINZ I, BRIERLEY G, TROWSDALE S. The use of system dynamics simulation in water resources management[J]. *Water Resources Management*, 2009, 23(7): 1301-1323.
- [12] 楼成君, 陈有才, 吕有名. 熵权多目标决策法在水资源系统决策分析中的应用[J]. *浙江水利科技*, 2005(1): 20-22. (LOU C

- J, CHEN Y C, LV Y M. Using entropy multipurpose decision for analyzing water resources system[J]. Zhejiang Hydraulics and Hydropower, 2005. (in Chinese)
- [13] 马峰, 王千, 蔺文静, 等. 基于指标体系投影寻踪模型的水资源承载力评价—以石家庄为例[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 62-66. (MA F, WANG Q, LIN W J, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on index system with parameter projection pursuit model—A case study in Shijiazhuang[J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 62-66. (in Chinese))
- [14] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科技出版社, 2000. (ZHAO K Q. Set pair analysis and its application[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000. (in Chinese))
- [15] 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]. Sci China Ser E Tech Sci, 2009, 52(10): 3017-3023. (in Chinese))
- [16] 杨鑫, 王莹, 王龙, 等. 基于集对分析理论的云南省水资源承载力评估模型[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 98-102. (YANG X, WANG Y, WANG L, et al. Assessment model of water resources carrying capacity based on set pair analysis in Yunnan Province[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(4): 98-102. (in Chinese))
- [17] 王志良, 李楠楠, 张先起, 等. 基于集对分析的区域水资源承载力评价[J]. 人民黄河, 2011, 33(4): 40-42. (WANG Z L, LI N N, ZHANG X Q, et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity based on Set Pair Analysis[J]. Yellow River, 2011, 33(4): 40-42. (in Chinese))
- [18] 张欣, 陈华伟, 仕玉治, 等. 基于集对分析的黄河三角洲东营市水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 17-21. (ZHANG X, CHEN H W, SHI Y Z, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of Dongying City in Yellow River Delta based on set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 17-21. (in Chinese))
- [19] 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, et al. Study on evaluation indexes of regional water resources carrying capacity[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(4): 597-604. (in Chinese))
- [20] SONG Xiaomeng, KONG Farzhe, ZHAN Chesheng. Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin City of China[J]. Water Resources Management, 2011, 25(3): 857-873.
- [21] 金菊良, 洪天求, 王文圣. 基于熵和 FAHP 的水资源可持续利用模糊综合评价模型[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 22-28. (JIN J L, HONG T Q, WANG W S. Entropy and FAHP based fuzzy comprehensive evaluation model of water resources sustaining utilization[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(4): 22-28. (in Chinese))
- [22] 景林艳. 区域水资源承载力的量化计算和综合评价研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007. (JING L Y. Study on the account computation and the comprehensive evaluation of regional water resources carrying capacity[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [23] 范通达. 水资源承载力评价及其在安徽省的应用研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007. (FAN T D. Study on the evaluation of water resources carrying capacity and the application in Anhui[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [24] 陆君, 舒荣军, 李响, 等. 黄山市太平湖流域水资源承载力分析[J]. 复旦学报(自然科学版), 2013, 52(6): 822-828. (LU J, SHU R J, LI X, et al. Analysis of water resources carrying capacity of Taiping Lake Basin, Huangshan City, Anhui Province[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2013, 52(6): 822-828. (in Chinese))
- [25] 李云玲, 郭旭宁, 郭东阳, 等. 水资源承载能力评价方法研究及应用[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 342-349. (LI Y L, GUO X N, GUO D Y, et al. An evaluation method of water resources carrying capacity and application[J]. Progress in Geography, 2017, 36(3): 342-349. (in Chinese))
- [26] 陈守煜. 水资源与防洪系统可变模糊集理论与方法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2005. (CHEN S Y. Theory and method of variable fuzzy sets for water resources and flood control system[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2005. (in Chinese))
- [27] 安徽省统计局, 国家统计局安徽调查总队. 安徽统计年鉴(2001版-2015版)[M]. 北京: 中国统计出版社. (Statistical Bureau of Anhui Province, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Anhui. Anhui statistical year books (from 2001 to 2015)[M]. Beijing: Statistics Publishing Company of China. (in Chinese))
- [28] 潘争伟, 吴成国, 周玉良, 等. 基于集对指数势的流域水资源系统脆弱性影响因子分析[J]. 水电能源科学, 2014, 32(3): 39-43. (PAN Z W, WU C G, ZHOU Y L, et al. Driving factors analysis of basin water resources system vulnerability based on set pair exponential potential[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(3): 39-43. (in Chinese))
- [29] 覃杰, 赵克勤. 基于偏联系数的医院医疗质量发展趋势综合分析[J]. 中国医院统计, 2007, 14(2): 127-129. (QIN J, ZHAO K Q. A synthetic analysis of the developing trend of hospital medical quality based on partial connection coefficient[J]. Chinese Hospital Statistics, 2007, 14(2): 127-129. (in Chinese))
- [30] 陆广地, 吴宝明, 赵克勤. 用偏联系数与态势函数对高校评价的聚类分析[J]. 数学的实践与认识, 2015, 45(19): 50-59. (LU G D, WU B M, ZHAO K Q. With partial connection number and function of university evaluation of clustering analysis[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2015, 45(19): 50-59. (in Chinese))