

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.018

基于动态差异度系数的区域水资源承载力评价与诊断

崔毅^{1,2}, 唐慧彦^{1,2}, 金菊良^{1,2}, 周玉良^{1,2}, 杨鹏博³

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009; 3. 中国长江三峡集团有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:为定量识别区域水资源承载状态及其障碍因子,充分挖掘评价样本与等级标准之间的微观不确定性,提出了随实际样本值连续变化的动态差异度系数计算方法,构建了基于联系数值的区域水资源承载力评价与诊断模型,并在安徽省各市进行了实证研究。结果表明:安徽省水资源承载力联系数值由2011年的-0.171逐步增长至2018年的0.067,说明近年来安徽省水资源承载形势仍相当严峻,但各市均已向良好态势发展,且2013年后趋势更为显著;皖北、皖中和皖南地区2011—2018年的联系数均值分别为-0.235、0.071、0.114,说明安徽省不同地区水资源承载状态差异明显,呈皖南优于皖中、皖北较差的空间分布;补充水资源量、提高植被覆盖、控制水资源开发、增加生态用水和发展节水灌溉是改善安徽省水资源承载形势的有效手段;基于动态差异度系数的区域水资源承载力评价与诊断模型应用结果合理,为保障区域水安全提供了决策支撑。

关键词:水资源承载力评价;障碍因子诊断;动态差异度系数;联系数;安徽省

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0152-09

Evaluation and diagnosis of regional water resources carrying capacity based on dynamic difference degree coefficient//CUI Yi^{1,2}, TANG Huiyan^{1,2}, JIN Juliang^{1,2}, ZHOU Yuliang^{1,2}, YANG Pengbo³ (1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Water Resources and Environmental Systems Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China)

Abstract: In order to quantitatively identify regional water resources carrying status and its obstacle factors, and to fully mine the micro-uncertainty between evaluation sample and grade criteria, this study proposed a calculation method of dynamic difference degree coefficient that continuously varied with the actual sample value. Then an evaluation and diagnosis model of regional water resources carrying capacity (WRCC) using connection number value was established, and an empirical study was carried out in Anhui Province. The results showed that the connection number value of WRCC in Anhui Province gradually increased from -0.171 in 2011 to 0.067 in 2018, indicating that although the water resources carrying situation in Anhui Province was still quite severe in recent years, the status of each city had been all improved, and the trend after 2013 was more significant. In addition, the average connection number values from 2011 to 2018 in Northern Anhui, Central Anhui, and Southern Anhui were -0.235, 0.071, and 0.114, respectively. It reflected that the water resources carrying situations in different regions of Anhui Province were markedly different, presenting a spatial distribution that the carrying situation of Southern Anhui was superior to that of Central Anhui, while the carrying situation of Northern Anhui was weak. Supplementing water resources amount, improving vegetation coverage, controlling water resources exploitation, increasing ecological water supply, and developing water-saving irrigation were effective means to improve the water resources carrying situation in Anhui Province. The application results of regional WRCC evaluation and diagnosis model based on dynamic difference degree coefficient are reasonable, which provides decision support for guaranteeing regional water security.

Key words: water resources carrying capacity evaluation; obstacle factor diagnosis; dynamic difference degree coefficient; connection number; Anhui Province

基金项目:国家自然科学基金项目(52109009, U2240223);安徽省自然科学基金项目(2108085QE254)

作者简介:崔毅(1990—),男,讲师,博士,主要从事水资源系统工程研究。E-mail:ycui@hfut.edu.cn

通信作者:金菊良(1966—),男,教授,博士,主要从事结构水资资源学研究。E-mail:JINJL66@126.com

区域水资源承载力是水资源系统与社会经济系统、生态环境系统相互作用的结果,是区域水安全的重要度量^[1-2]。水资源超载会严重制约经济社会高质量发展,直接威胁国家粮食安全和生态安全^[3-4]。水资源承载力问题始终受到学术界广泛关注,它是实现水资源可持续开发利用的重点和难点^[5-6]。

受水资源、社会经济、生态环境等诸多因素影响,水资源承载力系统是一典型的复杂系统^[7]。目前,通过构建评价指标体系和评价模型进行系统综合评价是较为有效的水资源承载力评价方法^[8-9]。然而,多数研究在评价过程中对评价样本与等级标准之间的微观不确定性考虑不足,导致评价结果出现偏差。集对分析是一种有效的系统不确定性分析方法,可通过评价样本与等级标准所构集对的联系系数同异反系统结构,充分反映两者之间的确定性和不确定性关系^[10],已在水资源系统综合评价方面得到了广泛应用^[11-13]。然而,在采用集对分析理论进行评价时,大部分研究仅通过联系系数分量反映评价结果,而对于完整的联系数值尚难以确定,易造成部分信息丢失,严重限制了集对分析理论的发展和运用。其中,差异度系数作为联系系数同异反系统结构的核心纽带,是确定联系数值的关键。

差异度系数用以定量描述所构集对在微观层次上的不确定性^[10,14],对评价结果影响显著,已有学者对其取值方法开展了研究^[15-20]。唐耀平^[15]提出了差异度系数的专家估测法;邬敏等^[16]通过联系数的目标值采用遗传算法优化求解了差异度系数;潘争伟等^[17]、胡启玲等^[18]分别构造了差异度系数的梯形模糊数和三角模糊数,确定了某一给定截集水平下的差异度系数取值区间;Li等^[19]、Zhou等^[20]分别利用全偏联系数和减法集对势,对差异度系数进行了分配计算。然而,目前差异度系数的取值方法大多较为粗糙,仅能得到差异度系数的近似值或区间范围,尚难以准确度量差异度系数值,导致评价结果与实际情况偏差较大。因此,亟待研究合理有效的差异度系数计算方法。

为此,本研究从区域水资源承载力系统结构角度,建立反映水资源承载支撑力、承载压力和承载调控力3个子系统相作用这一承载机理的区域水资源承载力评价指标体系及等级标准,基于集对分析理论,充分挖掘评价样本本身所蕴含信息,提出随实际样本值连续变化的动态差异度系数计算方法,得到完整的联系数值,进而构建区域水资源承载力定量评价与诊断模型,用于识别区域水资源承载状态、诊断水资源承载力障碍因子,并在安徽省各市进行实证研究,以期为区域水资源管理决策提供参考。

1 模型构建

集对分析是一种系统不确定性分析理论^[10],其中,最常用的三元联系系数 u 表达式为

$$u = a + bI + cJ \quad (1)$$

式中: a 、 b 、 c 分别为联系系数的同一度、差异度和对立度分量, $a + b + c = 1$; I 为差异度系数,它的取值随所构集对的不同对立关系而不同,本文所构集对属于正负型对立关系, I 的取值范围为 $[-1, 1]$; J 为对立度系数,本文中取 -1 。

确定差异度系数 I 是定量描述集对微观不确定性的核心,而该不确定性主要来源于研究问题样本数据本身所蕴含的信息。依据集对分析理论,联系系数系统结构中同、异、反分量之间具有迁移、转化的动态演化特性^[10,19],而 I 是实现差异度 b 与同一度 a 、对立度 c 在微观层次上动态演化的关键^[10]。结合偏联系系数内涵, I 的物理意义可解释为 b 转化为 a 或 c 的程度,而转化的方向(转化为 a 还是 c)和程度应和评价样本值与各评价等级的接近程度密切相关, a (或 c)的值越大, b 转化为 a (或 c)的部分越多。因此, I 应随所论问题实际样本值动态变化。本文中, I 的绝对值表示转化的程度,当 $I \in [-1, 0)$ 时,表示 b 总体上转化为 c ; 当 $I \in (0, 1]$ 时,表示 b 总体上转化为 a ; 当 $I = 0$ 时表示 b 不发生转化或等量转化为 a 和 c 。

基于动态差异度系数的区域水资源承载力评价与诊断模型构建包括以下步骤:

步骤1 基于对承载支撑力、承载压力、承载调控力相作用形成的水资源承载力系统结构分析和功能分析^[21-22],结合研究区域的实践调研以及专家咨询、文献统计,建立区域水资源承载力评价指标体系 $\{x_{kj} | k=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, n_k\}$,评价指标样本集为 $\{x_{ij} | i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, n_k\}$,其中, x_{ij} 为评价样本 i 子系统 k 中评价指标 j 的值, m 为评价样本数目, $k=1, 2, 3$ 分别表示水资源承载支撑力、承载压力和承载调控力子系统, n_k 为子系统 k 中评价指标数目。不失一般性,本研究将区域水资源承载力划分为3个评价等级,等级标准为 $\{s_{gkj} | g=1, 2, 3; k=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, n_k\}$, $g=1, 2, 3$ 分别表示区域处于水资源可载(表示水资源对支撑经济、人口和生态等发展仍有较大的承载力,水资源供需状态良好)、临界超载(表示水资源开发利用已有相当规模,但仍有一定潜力,水资源供需可在一定程度上支撑经济、人口和生态等发展)和超载(表示承载力已接近饱和值,长期下去将发生水资源短缺,严重制约经济、人口和生态等发展,须及

时采取调控措施)状态。

步骤2 采用基于加速遗传算法的改进模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process based on accelerating genetic algorithm, AGA-FAHP)^[23]求解子系统及其中各指标权重 $\{w_{kj}|k=1, 2, 3; j=1, 2, \dots, n_k\}$ 。

步骤3 依据集对分析理论和区域水资源承载力评价问题,由评价指标样本值与等级标准两个集构成集对,根据两集合接近程度这一可变模糊集^[24-25],计算评价单指标系数。研究区域水资源承载力评价指标样本值 x_{ikj} 与等级标准 s_{gkj} 之间的单指标三元系数初始分量 u_{gikj} 计算公式可见文献^[14]。三元系数初始分量 u_{gikj} 依据评价指标样本值 x_{ikj} 落在“标准等级 g ”的相同区间、相邻区间或相隔区间,而分别取 1 、 $(-1, 1)$ 内的值或 -1 。由此可见, u_{gikj} 可看作可变模糊集“标准等级 g ”的一种相对差异度^[24-25],评价指标样本值 x_{ikj} 隶属于模糊集“标准等级 g ”的相对隶属度^[26]可表示为

$$\begin{cases} a_{ikj}^* = 0.5 + 0.5u_{1ikj} \\ b_{ikj}^* = 0.5 + 0.5u_{2ikj} \\ c_{ikj}^* = 0.5 + 0.5u_{3ikj} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)经归一化后得到区域水资源承载力评价单指标三元系数最终分量 a_{ikj} 、 b_{ikj} 和 c_{ikj} :

$$\begin{cases} a_{ikj} = a_{ikj}^*/(a_{ikj}^* + b_{ikj}^* + c_{ikj}^*) \\ b_{ikj} = b_{ikj}^*/(a_{ikj}^* + b_{ikj}^* + c_{ikj}^*) \\ c_{ikj} = c_{ikj}^*/(a_{ikj}^* + b_{ikj}^* + c_{ikj}^*) \end{cases} \quad (3)$$

步骤4 本文认为区域水资源承载力评价单指标三元系数的差异度系数值 I_{ikj} 随评价指标样本值 x_{ikj} 动态变化,当 x_{ikj} 越靠近评价等级1级的下限值 s_{0kj} 时, I_{ikj} 越接近 1 ;当 x_{ikj} 越靠近1级与2级的临界值 s_{1kj} 时, I_{ikj} 越接近 $1/3$;当 x_{ikj} 越靠近2级与3级的临界值 s_{2kj} 时, I_{ikj} 越接近 $-1/3$;当 x_{ikj} 越靠近等级3级的上限值 s_{3kj} 时, I_{ikj} 越接近 -1 。基于以上分析和差异度系数内涵研究^[14],提出了一种随区域水资源承载力评价样本值连续变化的单指标三元系数动态差异度系数计算方法,如式(4)所示(以正向指标为例说明):

$$I_{ikj} = \begin{cases} 1 - \frac{2(x_{ikj} - s_{0kj})}{3(s_{1kj} - s_{0kj})} & s_{0kj} \leq x_{ikj} \leq s_{1kj} \\ -\frac{2[x_{ikj} - (s_{1kj} + s_{2kj})/2]}{3(s_{2kj} - s_{1kj})} & s_{1kj} < x_{ikj} \leq s_{2kj} \\ -1 + \frac{2(s_{3kj} - x_{ikj})}{3(s_{3kj} - s_{2kj})} & s_{2kj} < x_{ikj} \leq s_{3kj} \end{cases} \quad (4)$$

步骤5 计算区域水资源承载力评价样本 i 子系统 k 中指标 j 的三元系数 u_{ikj} :

$$u_{ikj} = a_{ikj} + b_{ikj}I_{ikj} + c_{ikj}J \quad (5)$$

结合子系统 k 中指标 j 的权重 w_{kj} 计算区域水资源承载力评价样本 i 子系统 k 的三元系数 u_{ik} :

$$u_{ik} = \sum_{j=1}^{n_k} w_{kj}a_{ikj} + \sum_{j=1}^{n_k} w_{kj}b_{ikj}I_{ikj} + \sum_{j=1}^{n_k} w_{kj}c_{ikj}J \quad (6)$$

综上,区域水资源承载力评价样本 i 的三元系数 u_i 为

$$u_i = \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{n_k} w_k w_{kj} a_{ikj} + \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{n_k} w_k w_{kj} b_{ikj} I_{ikj} + \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{n_k} w_k w_{kj} c_{ikj} J \quad (7)$$

式中 w_k 为区域水资源承载力子系统 k 的权重,采用AGA-FAHP^[23]确定。

依据式(7)计算的联系数值 u_i 判别区域水资源承载力等级值。可证明 $u_i \in [-1, 1]$,按照均分原则将其划分为3个评价等级,分别对应区域处于水资源超载状态 $u_i \in [-1.00, -0.33]$ 、临界超载状态 $u_i \in [-0.33, 0.33]$ 和可载状态 $u_i \in (0.33, 1.00]$ 。

为与联系数值的评价结果进行对比分析,运用级别特征值法^[27]计算评价样本 i 的水资源承载力等级值 h_i (式(8)),并按照均分原则将其划分为3个等级,分别对应区域处于水资源可载状态 $h_i \in [1.00, 1.67]$ 、临界超载状态 $h_i \in [1.67, 2.33]$ 和超载状态 $h_i \in (2.33, 3.00]$ 。

$$h_i = \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{n_k} w_k w_{kj} a_{ikj} + 2 \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{n_k} w_k w_{kj} b_{ikj} + 3 \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{n_k} w_k w_{kj} c_{ikj} \quad (8)$$

进一步计算评价样本 i 的减法集对势 s_i (式(9))^[22,28]进行对比,按照均分原则将其划分为3个等级,分别对应区域处于水资源超载状态 $s_i \in [-1.00, -0.33]$ 、临界超载状态 $s_i \in [-0.33, 0.33]$ 和可载状态 $s_i \in (0.33, 1.00]$ 。

$$s_i = \left(1 + \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{n_k} w_k w_{kj} b_{ikj}\right) \cdot \left(\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{n_k} w_k w_{kj} a_{ikj} - \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^{n_k} w_k w_{kj} c_{ikj}\right) \quad (9)$$

步骤6 依据式(5)计算的评价指标联系数值 u_{ikj} 诊断阻碍区域水资源承载力提升的主要因子。可证明 $u_{ikj} \in [-1, 1]$,按照均分原则,将评价指标分为强阻碍型 $u_{ikj} \in [-1.00, -0.60]$ 、中阻碍型 $u_{ikj} \in [-0.60, -0.20]$ 、弱阻碍型 $u_{ikj} \in [-0.20, 0.20]$ 、弱提升型 $u_{ikj} \in (0.20, 0.60]$ 、强提升型 $u_{ikj} \in (0.60, 1.00]$ 5个类型。其中,强阻碍型和中阻碍型指标是

严重阻碍区域水资源承载力提升的障碍因子,是水资源承载力调控的重点对象。

2 实证研究

以安徽省各市为研究对象进行实证分析。为探讨安徽省不同地区水资源承载机制,依据《安徽省城镇体系规划(2011—2030年)》以及长江、淮河流域区域,将安徽省划分为皖北(淮北、亳州、宿州、蚌埠、阜阳、淮南)、皖中(合肥、滁州、六安、安庆)、皖南(马鞍山、芜湖、宣城、铜陵、池州、黄山)三大地区。

2.1 水资源承载力评价指标体系构建

从区域水资源承载力系统结构^[21]和评价目标出发,综合分析水资源承载支撑力、承载压力和承载调控力3个子系统的承载特征,参考已有研究^[22,27]并结合安徽省实际水资源和社会经济情况,建立安徽省水资源承载力评价指标体系及相应等级标准,子系统及其中各评价指标权重采用AGA-FAHP^[23]计算,见表1。根据《安徽统计年鉴》(2012—2019)和《安徽省水资源公报》(2011—2018)的统计数据,计算得到2011—2018年安徽省16个地级市15个水资源承载力评价指标的样本值。

2.2 水资源承载力评价分析

依据2011—2018年安徽省各地级市水资源承载力评价指标样本数据和表1中各指标评价等级标准,得到各指标联系数分量,结合式(4)计算各指标联系数的动态差异度系数,再依据表1中各指标权重和各市评价指标、子系统和水资源承载力系统的联系数值,同时,利用式(8)(9)分别计算相应的级别特征值^[27]和减法集对势^[22,28]进行对比分析。安

徽省16个地级市2011—2018年水资源承载力评价结果均值见表2,其中,联系数值越小或级别特征值越大、减法集对势越小,评价等级越高,区域水资源承载状态越差,反之亦然。

由表2可知,由联系数值法、级别特征值法和减法集对势法得到的安徽省16市2011—2018年水资源承载力评价结果基本一致,大多数市处于水资源临界超载状态。但联系数值法判别出地处皖南地区的宣城、池州和黄山3市为水资源可载状态,而级别特征值法仅判别出黄山市处于水资源可载状态,说明本文提出的区域水资源承载力评价模型结果合理可靠。相比级别特征值法,本文方法可充分挖掘和利用评价样本所蕴含信息,基于随实际样本值变化的动态差异度系数进一步精准量化评价指标值与等级标准之间的微观不确定性,相比减法集对势法可计算得到完整的联系数值,判别灵敏度更高,结果差异性更显著。此外,从多年平均发展看,安徽省整体水资源承载状态较为严峻,亟须调控。

分别选取皖北、皖中和皖南地区的典型地级市进行分析,阜阳、合肥、黄山市2011—2018年水资源承载力评价结果如图1所示。由图1可看出,由联系数值法和级别特征值法得到的3市水资源承载力评价结果较为一致,但联系数值的变幅相比级别特征值更为明显。如阜阳市2011—2018年联系数最大值和最小值之差相对其取值范围的变幅(13.85%)高于级别特征值(11.40%);合肥市联系数值变幅较大的2016年相比2015年变化了0.226,高于级别特征值的0.168;黄山市联系数最大值和最小值之差相对其取值范围的变幅为7.85%,高于级别特征值的6.95%。说明本文提出的区域水资

表1 安徽省水资源承载力评价指标体系及权重

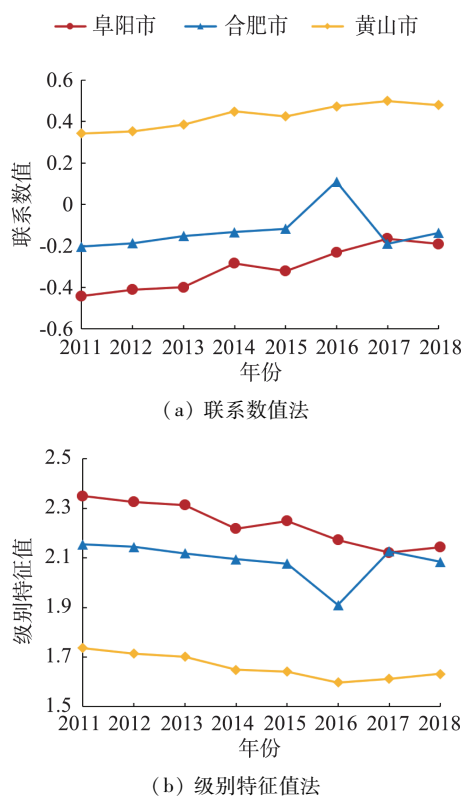
Table 1 Water resources carrying capacity evaluation index system and weights of indexes in Anhui Province

子系统	评价指标	单位	评价指标权重	评价等级标准		
				1级(可载状态)	2级(临界超载状态)	3级(超载状态)
水资源承载支撑力子系统	人均水资源量(x_{11})	m^3	0.15	$\geq 1\ 670$	[1 000, 1 670)	$< 1\ 000$
	产水模数(x_{12})	$万\ m^3/km^2$	0.10	≥ 80	[50, 80)	< 50
	人均供水量(x_{13})	m^3/a	0.10	≥ 450	[350, 450)	< 350
	植被覆盖率(x_{14})	%	0.05	≥ 40	[25, 40)	< 25
水资源承载压力子系统	人均日生活用水量(x_{21})	L	0.03	≤ 70	(70, 180]	> 180
	万元GDP用水量(x_{22})	m^3	0.08	≤ 100	(100, 400]	> 400
	万元工业增加值需水量(x_{23})	m^3	0.08	≤ 50	(50, 200]	> 200
	人口密度(x_{24})	$人/km^2$	0.08	≤ 200	(200, 500]	> 500
	城市化率(x_{25})	%	0.05	≤ 50	(50, 80]	> 80
	单位面积农田灌溉用水量(x_{26})	m^3/hm^2	0.08	$\leq 3\ 750$	(3 750, 6 000]	$> 6\ 000$
水资源承载调控力子系统	水资源开发利用效率(x_{31})	%	0.06	≤ 40	(40, 70]	> 70
	人均GDP(x_{32})	万元	0.04	$\geq 24\ 840$	[6 624, 24 840)	$< 6\ 624$
	城市污水处理率(x_{33})	%	0.02	≥ 95	[90, 95)	< 90
	节水灌溉面积比例(x_{34})	%	0.05	≥ 60	[20, 60)	< 20
	生态用水率(x_{35})	%	0.03	≥ 5	[1, 5)	< 1

表2 安徽省各市2011—2018年水资源承载力评价结果均值

Table 2 Average values of water resources carrying capacity evaluation results in cities of Anhui Province from 2011 to 2018

地级市	联系系数分量				联系数值法		级别特征值法		减法集对势法	
	a	b	c	bl	联系数值	承载状态	级别特征值	承载状态	减法集对势	承载状态
淮 北	0.232	0.370	0.398	-0.046	-0.213	临界超载	2.166	临界超载	-0.228	临界超载
亳 州	0.210	0.395	0.395	-0.062	-0.247	临界超载	2.185	临界超载	-0.257	临界超载
宿 州	0.229	0.393	0.378	-0.048	-0.196	临界超载	2.148	临界超载	-0.206	临界超载
蚌 埠	0.214	0.452	0.334	-0.046	-0.167	临界超载	2.120	临界超载	-0.174	临界超载
阜 阳	0.180	0.403	0.417	-0.069	-0.306	临界超载	2.237	临界超载	-0.331	临界超载
淮 南	0.182	0.412	0.407	-0.060	-0.284	临界超载	2.225	临界超载	-0.315	临界超载
合 肥	0.246	0.418	0.336	-0.037	-0.126	临界超载	2.089	临界超载	-0.126	临界超载
滁 州	0.273	0.463	0.264	0.003	0.012	临界超载	1.992	临界超载	0.014	临界超载
六 安	0.326	0.481	0.193	0.047	0.180	临界超载	1.866	临界超载	0.198	临界超载
安 庆	0.343	0.473	0.184	0.057	0.217	临界超载	1.841	临界超载	0.234	临界超载
马鞍山	0.175	0.428	0.397	-0.079	-0.301	临界超载	2.222	临界超载	-0.316	临界超载
芜 湖	0.204	0.465	0.331	-0.040	-0.167	临界超载	2.127	临界超载	-0.185	临界超载
宣 城	0.427	0.458	0.116	0.106	0.417	可载	1.689	临界超载	0.453	可载
铜 陵	0.247	0.451	0.302	-0.022	-0.077	临界超载	2.055	临界超载	-0.079	临界超载
池 州	0.429	0.428	0.143	0.102	0.389	可载	1.714	临界超载	0.408	可载
黄 山	0.473	0.392	0.134	0.087	0.426	可载	1.661	可载	0.471	可载



市水资源承载力联系数值对应的评价等级分布,如图2所示。

a. 2011—2018年多数市处于水资源临界超载状态,且主要分布在长江以北的皖中和皖北地区;部分市处于可载状态,主要分布在皖南地区南部(黄山、宣城、池州市);马鞍山市和皖北地区西部的阜阳、淮南市为少数处于超载状态的市。说明当前安徽省整体水资源承载形势依然相当严峻,有必要制定科学合理的调控方案^[29-30]。此外,皖北、皖中和皖南地区2011—2018年的水资源承载力联系系数均值分别为-0.235、0.071、0.114,各市中最小的为阜阳市-0.306(皖北),最大的为黄山市0.426(皖南),不同地区承载状态差异显著,呈皖南优于皖中、皖北较差的空间分布特征,说明安徽省各市水资源承载状态与其地理属性存在一定的联系^[31-32]。

b. 从2011—2018年各市水资源承载状态变化看,2011年有5个市处于超载状态,2013年后基本为0,处于可载状态的市由2011年的1个增加到2018年的4个;2011年皖北、皖中和皖南地区的水资源承载力联系数值均值分别为-0.334、-0.152、-0.020,2018年分别增加了0.228、0.342、0.178;各市的联系数值均呈增加趋势,其中最显著的为六安市(2018年比2011年增加0.562)、最不显著的为合肥市(增加0.067)。说明近年来安徽省各市水资源承载形势虽仍相当严峻,但均已向良好态势发展,且在2013年开始全面落实最严格水资源管理制度后趋势更为明显^[22,33],然而,由于各市水资源条件和经济社会发展差异,承载状态改善程度不同^[34]。因此,有必要进一步诊断安徽省各市水资源承载力

图1 安徽省典型市2011—2018年水资源承载力评价结果
Fig.1 Water resources carrying capacity evaluation results in typical cities of Anhui Province from 2011 to 2018

源承载力评价模型合理可靠,灵敏度更高。此外,阜阳、合肥、黄山市的水资源承载力联系数值均呈增加趋势,且黄山市大于合肥市,阜阳市最小,说明近年来3市的水资源承载状态均有所改善,总体上黄山市相对较好,阜阳市相对较差。

为探讨安徽省各地区水资源承载机制和承载状态变化原因,给出2011—2018年安徽省16个地级

■ 超载状态 ■ 临界超载状态 ■ 可载状态

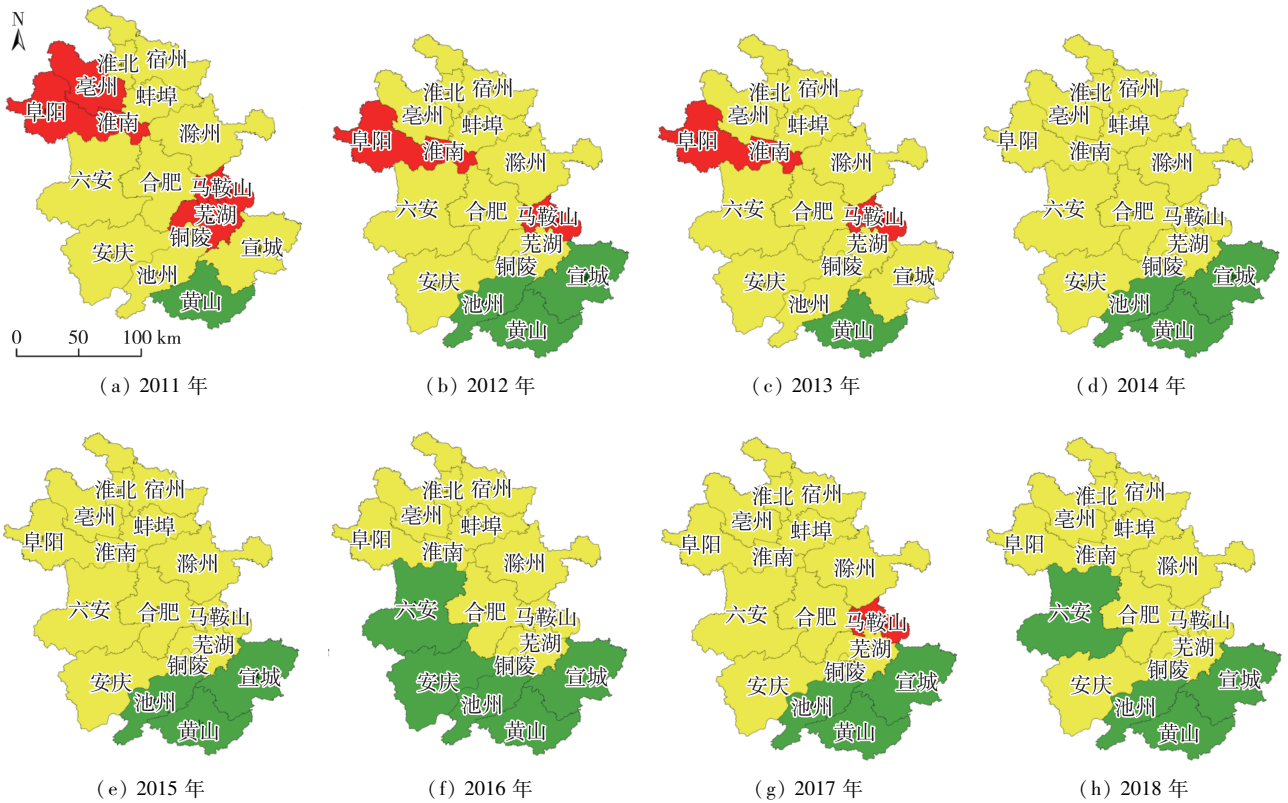


图2 安徽省各市2011—2018年水资源承载力联系数值对应评价等级空间分布

Fig.2 Spatial distributions of evaluation grades corresponding to water resources carrying capacity connection number value in cities of Anhui Province from 2011 to 2018

关键障碍因子。

2.3 水资源承载力障碍因子诊断分析

由式(5)计算得到的2011—2018年安徽省各市15个水资源承载力评价指标系数多年平均值,见表3,其中,强阻碍型指标和中阻碍型指标是严重阻碍安徽省各市水资源承载力提升的障碍因子,是

水资源承载力调控的重点对象。

a. 从多年平均发展看,皖北、皖中和皖南地区的障碍因子分别有8、5、5个,各市中马鞍山(9个)、亳州(8个)、宿州(8个)、阜阳(8个)和芜湖(8个)的障碍因子较多,池州(2个)、六安(3个)、安庆(3个)、宣城(3个)和黄山(3个)较少,这与上述水资

表3 安徽省各市2011—2018年水资源承载力评价指标系数均值

Table 3 Average connection number values of water resources carrying capacity evaluation indexes in cities of Anhui Province from 2011 to 2018

地级市	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}
淮 北	-0.96	-0.87	-0.87	-0.79	0.27	0.85	0.86	-0.76	0.21	0.94	-0.36	0.16	0.89	-0.19	-0.57
亳 州	-0.91	-0.86	-0.91	-0.80	0.44	0.60	0.29	-0.75	0.80	0.93	0.47	-0.46	0.80	-0.82	-0.53
宿 州	-0.90	-0.86	-0.92	-0.53	0.24	0.71	0.41	-0.72	0.78	0.95	0.58	-0.35	0.68	-0.49	-0.71
蚌 埠	-0.84	-0.79	0.19	-0.83	0.17	0.53	0.64	-0.71	0.57	0.33	-0.44	0.22	0.96	-0.53	-0.40
阜 阳	-0.94	-0.82	-0.91	-0.80	0.35	0.48	0.44	-0.84	0.78	0.82	-0.01	-0.56	-0.14	-0.67	-0.48
淮 南	-0.92	-0.46	0.66	-0.88	-0.02	0.15	-0.64	-0.82	0.03	0.09	-0.87	0.04	0.89	0.43	-0.49
合 肥	-0.84	-0.63	0.19	-0.88	0.04	0.87	0.88	-0.71	-0.22	0.32	-0.32	0.74	0.99	-0.68	-0.19
滁 州	-0.25	-0.80	0.69	-0.86	0.17	0.26	0.61	0.05	0.66	0.46	0.15	0.04	0.58	-0.89	-0.78
六 安	0.32	-0.35	0.61	0.56	0.28	-0.13	0.37	-0.08	0.74	0.00	0.66	-0.39	0.21	0.22	-0.67
安 庆	0.63	0.14	0.59	0.53	0.16	0.31	-0.05	-0.15	0.73	-0.29	0.83	0.00	0.30	-0.93	-0.43
马 鞍 山	-0.60	-0.47	0.92	-0.83	-0.09	0.13	-0.87	-0.70	0.03	-0.47	-0.85	0.72	0.64	-0.74	-0.50
芜 湖	-0.51	-0.21	0.77	-0.79	-0.07	0.53	0.03	-0.71	0.16	-0.46	-0.55	0.72	0.08	-0.96	-0.47
宣 城	0.78	0.44	0.69	0.80	0.08	0.41	0.53	0.55	0.62	-0.27	0.93	0.24	0.03	-0.85	-0.28
铜 陵	-0.44	0.32	0.89	-0.23	-0.18	0.44	-0.47	-0.77	-0.03	-0.06	-0.63	0.77	-0.27	-0.76	0.22
池 州	0.84	0.64	0.73	0.82	0.17	0.22	-0.71	0.69	0.61	0.09	0.94	0.22	0.03	-0.98	0.22
黄 山	0.93	0.81	-0.65	0.95	0.09	0.71	0.59	0.79	0.68	-0.08	0.99	0.27	0.33	-0.70	-0.55

源承载状态皖南优于皖中、皖北较差,马鞍山市长期处于超载或临界超载状态、池州市基本处于水资源可载状态的评价结果一致(表2和图2)。说明联系数障碍因子诊断模型可靠有效,诊断出的强阻碍型和中阻碍型障碍因子数目可大致反映区域水资源承载状态的相对优劣,障碍因子越多,水资源承载状态相对越差,反之亦然。

b. 对于皖北地区,障碍因子有 x_{11} 、 x_{12} 、 x_{13} 、 x_{14} 、 x_{24} 、 x_{31} 、 x_{34} 、 x_{35} ,说明阻碍该地区水资源承载力提升的主要原因是水资源量较少、植被覆盖程度较低,同时,人口较多、水资源开发程度过高、生态用水不足、节水灌溉面积有限导致其水资源承载支撑力和调控力较弱,限制水资源承载力提升;对于皖中地区,障碍因子有 x_{11} 、 x_{12} 、 x_{14} 、 x_{34} 、 x_{35} ,说明水资源量少、植被覆盖程度低、生态用水和节水灌溉面积不足限制该地区水资源承载状态改善;对于皖南地区,障碍因子

有 x_{23} 、 x_{24} 、 x_{31} 、 x_{34} 、 x_{35} ,说明工业增加值用水量较大、人口较多、水资源开发程度过高、生态用水不足、节水灌溉面积有限,导致其水资源承载压力过大、调控力较弱,制约水资源承载力提高。综上,采用调水等方式补充水资源量、提高植被覆盖、控制水资源开发、增加生态用水比重和发展节水灌溉技术是改善安徽省水资源承载形势的有效手段^[27,35],此外,实施引江济淮工程对提升整个安徽省水资源承载力水平具有重要战略意义^[22,36]。

分别选取皖北、皖中和皖南地区典型地级市,分析3个水资源承载力子系统中各评价指标联系数值变化,从指标层面探讨安徽省典型市近年来水资源承载状态变化原因。阜阳、合肥、黄山市2011—2018年15个水资源承载力评价指标联系数值如图3所示。

a. 对于阜阳市,指标 x_{11} 、 x_{12} 、 x_{13} 、 x_{14} 、 x_{24} 、 x_{32} 、 x_{34}

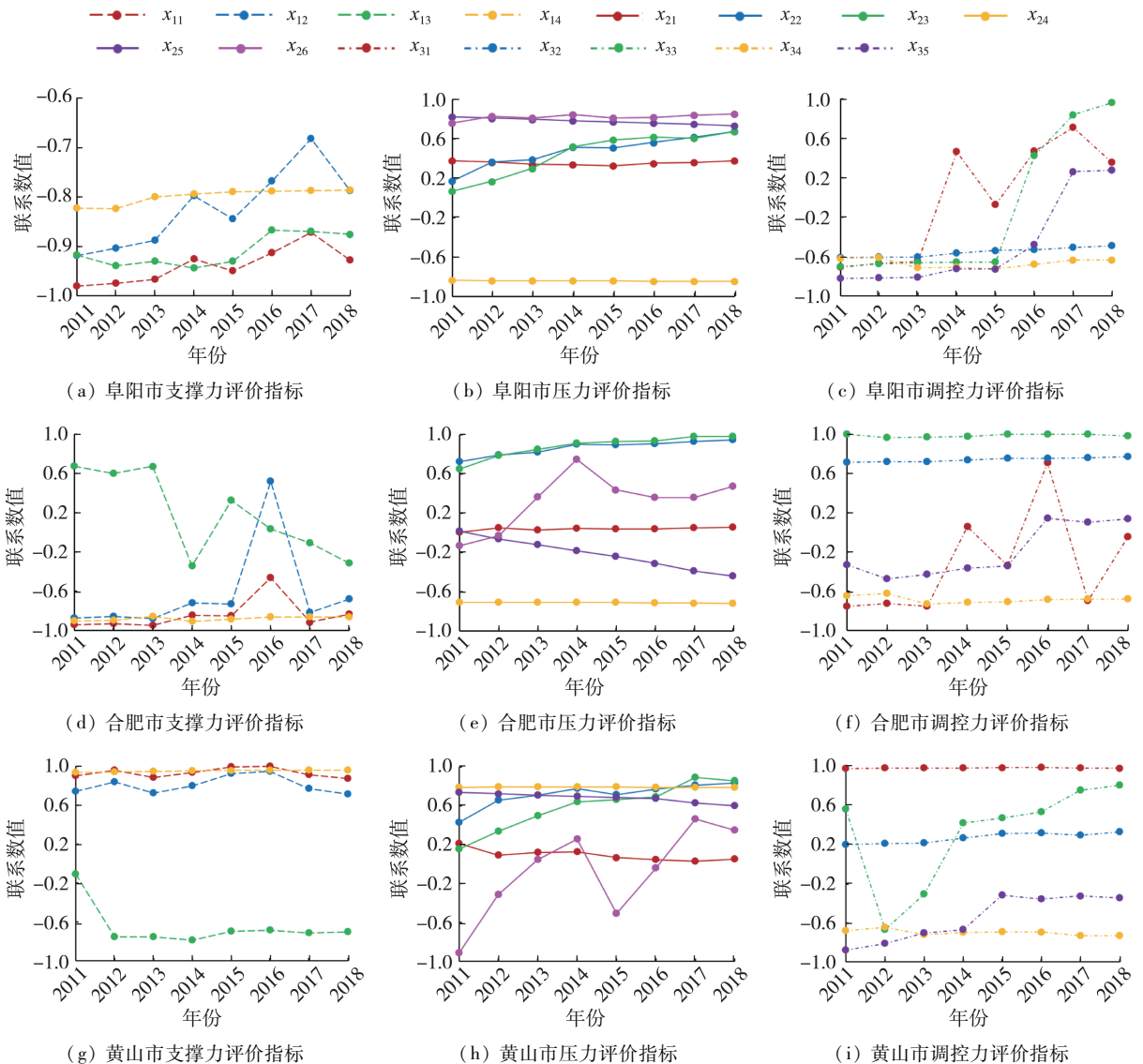


图3 安徽省各地区典型市2011—2018年水资源承载力评价指标联系数值

Fig. 3 Connection number values of water resources carrying capacity evaluation indexes in typical cities of Anhui Province from 2011 to 2018

变化较小,长期属于强阻碍型; x_{21} 、 x_{25} 、 x_{26} 波动也较小,长期属于弱提升或强提升型。阜阳市2013年之后由水资源超载状态改善为临界超载状态(图2),主要是由于 x_{22} 、 x_{23} 、 x_{31} 、 x_{33} 、 x_{35} 改善明显。说明近年来阜阳市产业用水量,特别是工业用水量得到了有效控制,水资源开发程度显著降低,城市污水处理水平显著提高,生态用水显著增加,使得承载压力降低、调控力增强,促进了该市水资源承载力明显提升。但承载支撑力依然较弱,限制了承载力的进一步提升,有必要通过引江济淮等手段增加该市水资源可利用量。

b. 对于合肥市,指标 x_{11} 、 x_{14} 、 x_{21} 、 x_{24} 、 x_{34} 长期属于强阻碍或弱阻碍型, x_{22} 、 x_{23} 、 x_{32} 、 x_{33} 长期属于强提升型, x_{13} 由强提升型退化为中阻碍型, x_{25} 由弱阻碍型退化为中阻碍型, x_{26} 由弱阻碍型改善为弱提升型, x_{31} 由强阻碍型改善为弱阻碍型, x_{35} 由中阻碍型改善为弱阻碍型。合肥市一直处于水资源临界超载状态(图2),主要是由于各指标改善不明显,甚至退化。说明近年来省会合肥市发展迅速,城镇化进程加快,人口显著增加,供水能力出现不足。虽农业用水效率有所提升,水资源开发得到控制,生态用水有所增加,但承载支撑力、压力和调控力仍处于较低水平,无法有效提升水资源承载力。应考虑适当控制城市发展速度和规模,增加水资源量,提高植被覆盖和节水灌溉水平。

c. 对于黄山市,指标 x_{11} 、 x_{12} 、 x_{14} 、 x_{22} 、 x_{24} 、 x_{25} 、 x_{31} 长期属于强提升型, x_{13} 、 x_{34} 长期属于强阻碍型, x_{21} 长期属于弱阻碍型, x_{32} 长期属于弱提升型。黄山市一直处于水资源可载状态(图2),主要是由于较多指标长期处于强提升型,且其他指标未发生明显退化,承载支撑力较强,压力较小。说明近年来黄山市充足的水资源量、较高的植被覆盖程度和产业用水效率、适度的城市发展规模和水资源开发程度,保障了该市较强的水资源承载力。然而,黄山市供水能力和节水灌溉水平仍较低,生态用水和经济发展也有一定提升空间,这些是进一步改善该市水资源承载状态的关键突破口。

3 结论

a. 2011—2018年安徽省多数地级市处于水资源临界超载状态,整体水资源承载形势依然相当严峻,且各地区差异显著,总体呈现皖南优于皖中、皖北较差的空间分布特征。

b. 2011—2018年安徽省各市水资源承载形势均已向良好态势发展,2013年开始全面落实最严格水资源管理制度后趋势更为明显,其中改善最显著

的为六安市,最不显著的为合肥市。

c. 对于皖北地区,阻碍其水资源承载力提升的主要原因是水资源量较少、植被覆盖程度较低,同时,人口较多、水资源开发程度过高、生态用水不足、节水灌溉面积有限,导致其水资源承载支撑力和调控力较弱;对于皖中地区,水资源量少、植被覆盖程度低、生态用水和节水灌溉面积不足,严重限制了其水资源承载状态的改善;对于皖南地区,工业增加值用水量较大、人口较多、水资源开发程度过高、生态用水不足、节水灌溉面积有限,导致其水资源承载压力过大、调控力较弱,限制水资源承载力的提高。采用调水等方式补充水资源量、提高植被覆盖、控制水资源开发、增加生态用水比重和发展节水灌溉技术是改善安徽省水资源承载形势的有效手段。

d. 安徽省各市水资源承载力评价与障碍因子诊断结果与实际情况一致,本文构建的评价与诊断模型合理可靠,为准确识别区域水资源承载状态及其障碍因子、全面提升国家水安全保障能力提供了重要支撑。

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. (XIA Jun, ZHU Yizhong. The measurement of water resources security: a study and challenge on water resources carrying capacity [J]. Journal of Natural Resources,2002,17(3):262-269. (in Chinese))
- [2] WANG Ge, XIAO Changlai, QI Zhiwei, et al. Development tendency analysis for the water resource carrying capacity based on system dynamics model and the improved fuzzy comprehensive evaluation method in the Changchun City, China[J]. Ecological Indicators,2021,122:107232.
- [3] 王红瑞,李一阳,杨亚锋,等. 水资源集约安全利用评估模型构建及应用[J]. 水资源保护,2022,38(1):18-25. (WANG Hongrui, LI Yiyang, YANG Yafeng, et al. Construction and application of evaluation model for intensive and safe utilization of water resources[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 18-25. (in Chinese))
- [4] HU Mengqi, LI Changjia, ZHOU Wenxin, et al. An improved method of using two-dimensional model to evaluate the carrying capacity of regional water resource in Inner Mongolia of China [J]. Journal of Environmental Management,2022,313:114896.
- [5] 李少朋,赵衡,王富强,等. 基于AHP-TOPSIS模型的江苏省水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2021,37(3):20-25. (LI Shaopeng, ZHAO Heng, WANG Fuqiang, et al. Evaluation of water resources carrying capacity of

- Jiangsu Province based on AHP-TOPSIS model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 20-25. (in Chinese)
- [6] 高玉琴, 吴迪, 刘海瑞, 等. 城市化影响下区域水资源承载力评价[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(3): 1-8. (GAO Yuqin, WU Di, LIU Hairui, et al. Evaluation of regional water resources carrying capacity under urbanization[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3): 1-8. (in Chinese))
- [7] LIAO Xia, REN Yitian, SHEN Liyin, et al. A “carrier-load” perspective method for investigating regional water resource carrying capacity [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 269: 122043.
- [8] 门宝辉, 王志良, 梁川, 等. 物元模型在区域地下水资源承载力综合评价中的应用[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(1): 34-37. (MEN Baohui, WANG Zhiliang, LIANG Chuan, et al. Application of matter element model to evaluating on of resources carrying capacity of regional groundwater[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2003, 35(1): 34-37. (in Chinese))
- [9] ZUO Qiting, GUO Jiahang, MA Junxia, et al. Assessment of regional-scale water resources carrying capacity based on fuzzy multiple attribute decision-making and scenario simulation[J]. Ecological Indicators, 2021, 130: 108034.
- [10] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
- [11] 傅博, 黄国如. 基于集对分析的江门市四堡水库健康综合评价[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 46-50. (FU Bo, HUANG Guoru. Comprehensive evaluation of health of Sibao Reservoir in Jiangmen City based on set-pair analysis method[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(8): 46-50. (in Chinese))
- [12] 张志君, 陈伏龙, 龙爱华, 等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 53-58. (ZHANG Zhijun, CHEN Fulong, LONG Aihua, et al. Xinjiang water resources security evaluation based on fuzzy set pair analysis[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 53-58. (in Chinese))
- [13] 杨亚锋, 王红瑞, 赵伟静, 等. 水资源承载力的集对势—偏联系数评价模型[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 99-105. (YANG Yafeng, WANG Hongrui, ZHAO Weijing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on set pair potential and partial connection number[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 99-105. (in Chinese))
- [14] CUI Yi, JIN Juliang, BAI Xia, et al. Quantitative evaluation and obstacle factor diagnosis of agricultural drought disaster risk using connection number and information entropy[J]. Entropy, 2022, 24(7): 872.
- [15] 唐耀平. 联系数中差异度系数 i 的专家估测法及应用[J]. 数学的实践与认识, 2009, 39(5): 67-70. (TANG Yaoping. The methods to fetch i in difference degree coefficient of set pair analysis and its applications [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2009, 39(5): 67-70. (in Chinese))
- [16] 邬敏, 李祚泳, 刘智勇, 等. 一种改进的集对分析法在湖泊富营养化评价中的应用[J]. 水资源保护, 2009, 25(2): 5-9. (WU Min, LI Zuoyong, LIU Zhiyong, et al. Application of improved set pair analysis to assessment of lake eutrophication [J]. Water Resources Protection, 2009, 25(2): 5-9. (in Chinese))
- [17] 潘争伟, 金菊良, 吴开亚, 等. 巢湖流域水安全评价的集对分析模型[J]. 水资源保护, 2012, 28(3): 9-15. (PAN Zhengwei, JIN Juliang, WU Kaiya, et al. Set pair analysis model for water safety evaluation of Chaohu Watershed [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(3): 9-15. (in Chinese))
- [18] 胡启玲, 董增川, 杨雁飞, 等. 基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5): 425-432. (in Chinese))
- [19] LI Zheng, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Dynamic evaluation of regional water resources carrying capacity based on set pair analysis and partial connection number [J]. Water Supply, 2022, 22(3): 2407-2423.
- [20] ZHOU Rongxing, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Agricultural drought vulnerability assessment and diagnosis based on entropy fuzzy pattern recognition and subtraction set pair potential [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(1): 51-63.
- [21] 金菊良, 周戎星, 崔毅, 等. 结构水资源学概论[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 7-19. (JIN Juliang, ZHOU Rongxing, CUI Yi, et al. Introduction to structural water resources science [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 7-19. (in Chinese))
- [22] CUI Yi, FENG Ping, JIN Juliang, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method [J]. Entropy, 2018, 20(5): 359.
- [23] 金菊良, 魏一鸣, 丁晶. 基于改进层次分析法的模糊综合评价模型[J]. 水利学报, 2004, 35(3): 65-70. (JIN Juliang, WEI Yiming, DING Jing. Fuzzy comprehensive evaluation model based on improved analytic hierarchy process [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(3): 65-70. (in Chinese))

- (10):1223-1233. (SHU Anping, WANG Mengyao, QIN Jiping, et al. The characteristics for flow field distribution and sediment incipient movement around the typical artificial reefs area in Bohai Bay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(10):1223-1233. (in Chinese))
- [23] 赵娜. 河床演变对底栖动物群落的影响研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
- [24] MISHRA A S, NAUTIYAL P. Substratum as determining factor for the distribution of benthic macroinvertebrate fauna in a river ecosystem[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences, 2016, 86(3):735-742.
- [25] 李春波, 黄晓荣, 冯广朋, 等. 不同发育阶段中华绒螯蟹对底质的喜好性研究[J]. 水生生物学报, 2022, 46(6):888-895. (LI Chunbo, HUANG Xiaorong, FENG Guangpeng, et al. Preference for substrate in different developmental stages of *eriocheir sinensis* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2022, 46(6):888-895. (in Chinese))

(收稿日期:2022-10-16 编辑:施业)

(上接第 160 页)

- [24] 陈守煜. 可变模糊集合理论与可变模型集[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(18):146-153. (CHEN Shouyu. Theory of variable fuzzy sets and variable model sets[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(18):146-153. (in Chinese))
- [25] 陈守煜, 李敏. 基于可变模糊集理论的水资源可再生能力评价模型[J]. 水利学报, 2006, 37(4):431-435. (CHEN Shouyu, LI Min. Assessment model of water resources reproducible ability based on variable fuzzy set theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(4):431-435. (in Chinese))
- [26] 金菊良, 吴开亚, 魏一鸣. 基于联系数的流域水安全评价模型[J]. 水利学报, 2008, 39(4):401-409. (JIN Juliang, WU Kaiya, WEI Yiming. Connection number based assessment model for watershed water security[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(4):401-409. (in Chinese))
- [27] ZHOU Rongxing, JIN Juliang, CUI Yi, et al. Spatial equilibrium evaluation of regional water resources carrying capacity based on dynamic weight method and Dagum Gini coefficient [J]. Frontiers in Earth Science, 2022, 9:790349.
- [28] 门宝辉, 李晨, 尹世洋. 基于减法集对势的大兴区地下水开采强度评价与诊断[J]. 水资源保护, 2022, 38(5):17-25. (MEN Baohui, LI Chen, YIN Shiyang. Research on evaluation and diagnosis of groundwater exploitation intensity in Daxing District based on subtraction set pair potential [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5):17-25. (in Chinese))
- [29] 何刚, 夏业领, 秦勇, 等. 长江经济带水资源承载力评价及时空动态变化[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1):287-292. (HE Gang, XIA Yeling, QIN Yong, et al. Evaluation and spatial-temporal dynamic change of water resources carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(1):287-292. (in Chinese))
- [30] WU Chengguo, ZHOU Liyang, JIN Juliang, et al. Regional water resource carrying capacity evaluation based on multi-dimensional precondition cloud and risk matrix coupling model [J]. Science of the Total Environment, 2020, 710:136324.
- [31] 鲍珂宇, 何刚, 金兰, 等. 基于突变级数法的安徽省相对资源承载力研究[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(4):39-44. (BAO Keyu, HE Gang, JIN Lan, et al. Research on relative resources carrying capacity of cities in Anhui Province based on catastrophe progression method [J]. Areal Research and Development, 2021, 40(4):39-44. (in Chinese))
- [32] BAI Xia, JIN Juliang, ZHOU Rongxing, et al. Coordination evaluation and obstacle factors recognition analysis of water resource spatial equilibrium system [J]. Environmental Research, 2022, 210:112913.
- [33] 左其亭. 关于最严格水资源管理制度的再思考[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版), 2015, 17(4):60-63. (ZUO Qiting. Rethinking of the strictest water resources management system [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2015, 17(4):60-63. (in Chinese))
- [34] 程翠云, 阎伍玖. 安徽区域水资源可持续利用评价[J]. 环境科学研究, 2006, 19(5):154-158. (CHENG Cuiyun, YAN Wujiu. Evaluation of regional sustainable utilization of water resources in Anhui Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(5):154-158. (in Chinese))
- [35] 钱筱暄, 孙传辉, 许一, 等. 基于负载指数的皖中皖北地区水资源开发潜力研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(10):49-50. (QIAN Xiaoxuan, SUN Chuanhui, XU Yi, et al. Study on water resources development potential in Central and Northern Anhui based on load index [J]. China Rural Water and Hydropower, 2013(10):49-50. (in Chinese))
- [36] HUANG Qidong, ZHANG Hairong, XU Jiajun, et al. Scalar configuration, power strategies and water governance: insights from the politics of the Yangtze-to-Huai Water Transfer Project [J]. International Journal of Water Resources Development, 2022, 38(4):658-679.

(收稿日期:2022-09-21 编辑:施业)