第32卷第3期
2021年 6月

水资源与水工程学报
Journal of Water Resources & Water Engineering

Vol. 32 No. 3
Jun. ,2021

DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2021.03.14

基于理想点-正态云模型的区域水资源可持续性动态评价

阮 君, 何 刚, 王莹莹, 赵杨秋
(安徽理工大学 经济与管理学院, 安徽 淮南 232001)

摘 要: 以淮河生态经济带安徽段8座城市为研究对象,基于PSR模型构建水资源持续性综合评价指标体系,利用理想点法合理确定各指标权重,引入正态云模型对其综合发展状况进行动态评价,并通过GIS软件对结果进行可视化。结果表明:2010-2018年,淮河生态经济带安徽段水资源可持续性整体呈现上升趋势,但是仍处于较低水平;区域内部发展不平衡,其中阜阳市、六安市已经达到Ⅳ级,其余城市均处于Ⅱ级及以下;响应子系统发展速度较快,压力、状态子系统是制约区域整体发展的主要因素。

关键词: 水资源可持续性; PSR模型; 理想点; 正态云模型; 动态评价; 淮河经济带
中图分类号:TV213.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2021)03-0099-07

Dynamic evaluation of regional water resources sustainability based on ideal-normal cloud model

RUAN Jun, HE Gang, WANG Yingying, ZHAO Yangqiu
(*School of Economics and Management, Anhui University of Science & Technology, Huainan* 232001, *China*)

Abstract: Taking eight cities in the Anhui section of the Huaihe Eco-economic Belt as the research objects, a comprehensive index system for evaluating the sustainability of water resources is constructed based on the PSR (pressure-state-response) model. The weight of each index is determined by the ideal point method, and then the normal cloud model is introduced to evaluate its comprehensive development status, which is visualized by GIS software. The results show that the sustainability of water resources in the Anhui section of the Huaihe Eco-economic Belt showed an overall upward trend from 2010 to 2018, but it was still at a low level. The internal development of the region was not balanced, among which Fuyang and Lu'an City had reached Grade IV, but the rest of the cities were at Grade II or below. The response subsystem developed faster, the pressure and state subsystems were the main factors restricting the overall development of the region.

Key words: sustainability of water resources; PSR (pressure-state-response) model; ideal point; normal cloud model; dynamic evaluation; Huaihe Eco-economic Belt

1 研究背景

水资源是社会发展的重要基础。近年来,中国经济发展迅速,2019年国内生产总值已高达99.09×10^{12}元[1]。随着城镇化与工业化的不断推进,人类社会对水资源的需求持续增加,同时带来了水资源浪费、水资源污染、过度开发等诸多环境问题。水资源持续性是制约一个地区社会发展的重要因素,对其进行分析研究与合理评价是促进区域高质量发展的重要组成部分。

针对水资源可持续研究,国外学者多偏向于水资源承载力的研究,如Ati-Aoudia等[2]从生活供水的角度对阿尔及尔的水资源承载力和生活用水能力进行了定量评价;Reghunathan等[3]采用主成分分

收稿日期:2020-11-26; 修回日期:2021-03-21
基金项目:安徽省哲学社会科学规划项目(AHSKY2019D026); 安徽理工大学研究生创新基金项目(2020CX2089)
作者简介:阮 君(1996-),女,安徽合肥人,硕士研究生,研究方向为水资源管理与评价。
通讯作者:何 刚(1966-),男,安徽淮南人,研究员,博士生导师,研究方向为水资源管理与评价。

析测算了热带淡水湖泊环境承载力及其影响因素；Kuspilic 等[4]利用灵敏度和不确定性对 Cres 岛的水资源承载力状况展开了分析；Wang 等[5]基于协同理论综合评价了武汉城市群的水资源承载力状况。

国内大部分学者主要针对水资源可持续性的评价方法展开研究，如朱光磊等[6]采用生态足迹模型对吉林省 2004－2018 年水资源可持续利用情况进行了分析；王雅晴等[7]基于灰水足迹分析了我国城市的水资源可持续利用状况；杨光明等[8]以重庆市为例，将模糊数学隶属度和系统动力学相结合对其水资源可持续发展能力进行了动态评价与仿真预测；李冰瑶等[9]采用层次分析法对缺水地区水资源可持续利用状况进行了研究，并制定出 3 种优化情景；陈继光[10]利用灰面积关联决策研究了山东半岛蓝色经济区的水资源可持续利用潜力，说明了该模型的准确性；张杰等[11]采用模糊综合评价模型定量评价了广西水资源可持续利用问题，并提出合理化建议。此外，部分学者也对水资源利用效率进行了研究，如郑乐等[12]采用超效率 DEA 模型和 Malmquist 指数法对宁夏回族自治区 2006－2016 年的工业水资源利用效率进行了分析；应卓晖等[13]借助 SBM－DEA 和 Malmquist 分析了 18 个地市的水资源利用效率，并采用 Tobit 模型剖析了其影响因素；张国基等[14]通过构建的基于水系统混合网络结构的 DEA 模型测算了 2006－2015 年我国水资源利用效率，在此基础上利用莫兰指数和脉冲效应分析了其空间交互影响。

综上所述，学者们主要采用模糊评价、生态足迹理论、灰色关联模型、主成分分析法等方法来研究水资源的可持续性问题，较少关注评价过程中出现的随机性和模糊性问题。鉴于此，本文引入正态云模型，结合理想点赋权对淮河生态经济带安徽段 8 座城市 2010－2018 年水资源可持续利用问题进行了动态研究，有效解决了评价过程中出现的信息不确定性问题，提高了评价结果的科学性，以期为促进区域水资源可持续发展提供一定理论依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

淮河流域水源充沛，矿产资源丰富，是我国三大河流之一，更是我国重要水上交通枢纽[15]。淮河生态经济带安徽段主要包括蚌埠、淮南、阜阳、六安、亳州、宿州、淮北以及滁州 8 座城市，大部分为资源型城市。自 2018 年《淮河生态经济带发展规划》[16]正式发布以来，区域经济增长迅速，同时带来了水资源消耗加快、水污染严重等问题，一定程度上制约了区域的整体发展。因此，聚焦于淮河生态经济带水资源可持续利用问题，是促进淮河生态经济带健康发展的重要内容。

2.2 数据来源

本文数据主要来源于 2010－2018 年《安徽省统计年鉴》和《安徽省水资源公报》，部分缺失数据通过查询各城市统计年鉴及公报加以补充。

2.3 研究方法

2.3.1 正态云模型简介　1995 年李德毅院士提出云模型概念，是一种用语言值处理定性概念与定量描述之间发生不确定转换的模型[17]。运用正态云模型能够有效避免水资源可持续性评价中出现的离散型和随机性问题，该模型计算过程如下[18－20]：

（1）首先生成以 En 为期望，He^2 为方差的正态随机数 $En' = \mathrm{NORM}(En, He^2)$；

（2）再生成以 Ex 为期望、En'^2 为方差的正态随机数 $x_i = \mathrm{NORM}(Ex, En'^2)$；

（3）按公式（1）计算 $\mu(x_i)$：

$$\mu(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - Ex)^2}{2En'^2}\right) \tag{1}$$

（4）$\mu(x_i)$ 中的 x_i 则成为数域中的 1 个云滴；

（5）重复步骤（1）～（4），直至产生所需要的 n 个云滴为止。

2.3.2 基于理想点－正态云评价模型的水资源可持续性评价步骤

（1）基于理想点确定各指标权重[21]。本文运用将主观赋权和客观赋权相结合的理想点赋权法，以减少指标权重对评价结果的影响。现记主观赋权法得到权重为 $u = (u_1, u_2, \cdots, u_n)$，客观赋权法得到权重为 $v = (v_1, v_2, \cdots, v_n)$，组合权重为 $w = (w_1, w_2, \cdots, w_n)$。定义各个指标属性的理想值为 r_j^* $(j = 1, 2, \cdots, n)$，从而得到理想方案为 $A^* = (w_1 r_1^*, w_2 r_2^*, \cdots, w_n r_n^*)$，计算某一方案 i 到理想点的距离为：

$$d_i = \left\{\sum_{j=1}^{n} [(r_{ij} - r_j^*) w_j]^2\right\}^{1/2} \tag{2}$$

式中：d_i 值越小，说明方案 i 与理想方案越接近。

对各向量进行单位化，则：

$$u' = \frac{u}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \cdots + u_n^2}},$$

$$v' = \frac{v}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \cdots + v_n^2}},$$

$$w' = \frac{w}{\sqrt{w_1^2 + w_2^2 + \cdots + w_n^2}} \tag{3}$$

现需要构建组合权重与主、客观权重方案到理想方案距离偏差量的非线性规划模型,以使主、客观组合赋权下权重偏差尽可能小:

$$\begin{aligned} f(w) &= (d_{i(w')}^2 - d_{i(u')}^2)^2 + (d_{i(w')}^2 - d_{i(v')}^2)^2 \\ &= \sum_{j=1}^{n}[(r_{ij} - r_j^*)^2(w_j'^2 - u_j'^2)]^2 + \\ &\quad \sum_{j=1}^{n}[(r_{ij} - r_j^*)^2(w_j'^2 - v_j'^2)]^2 \end{aligned} \tag{4}$$

构造拉格朗日函数求解式(4)的极值,能够得到:

$$w' = \sqrt{(u_j'^2 + v_j'^2)/2} \tag{5}$$

通过归一化可以得到组合权重为:

$$w_j = w'_j / \sum_{j=1}^{n} w'_j \quad (j = 1,2,\cdots,n) \tag{6}$$

(2)构建综合评价的因素域 $Z = \{z_1, z_2, \cdots, z_n\}$,建立评价域为 $V = \{v_1, v_2, \cdots, v_m\}$。

(3)建立模糊矩阵 $\boldsymbol{R}$。假设因素 $i(i = 1,2,\cdots,n)$ 在对应等级 $j(j = 1,2,\cdots,m)$ 的上边界和下边界分别为 x_{ij}^1 和 x_{ij}^2,则因素 i 对应等级 j 这一定性概念用云模型表示为:

$$Ex_{ij} = \frac{x_{ij}^1 + x_{ij}^2}{2} \tag{7}$$

$$En_{ij} = \frac{x_{ij}^1 - x_{ij}^2}{6} \tag{8}$$

$$He_{ij} = k \tag{9}$$

式中:超熵值 He 表示熵的不确定性度量,其取值越小,则表明云滴的离散程度越小,同时云的厚度也越小,反之则越大。本研究根据经验将超熵值 He 取为 0.01[22]。

(4)建立模糊隶属度矩阵 $\boldsymbol{Z}$。根据各指标实际数值,利用正向云发生器,利用公式(1)进行计算得出指标 i 对应等级 j 下的确定度 z_{ij},构建隶属度矩阵 $\boldsymbol{Z} = (z_{ij})_{n \times m}$。

(5)利用权重向量 $\boldsymbol{W}$ 和隶属度矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 进行模糊转换得出评价集 $\boldsymbol{V}$ 上的模糊子集 $\boldsymbol{B}$:

$$\boldsymbol{B} = \boldsymbol{W} \times \boldsymbol{Z} = (b_1, b_2, b_3, \cdots b_m) \tag{10}$$

$$b_j = \sum_{i=1}^{n} w_i z_{ij} \quad (j = 1,2,\cdots,m) \tag{11}$$

式中:z_{ij} 为评价对象指标 i 对第 j 条评语的隶属度。

3 评价指标体系构建

根据 PSR 模型构建淮河生态经济带安徽段水资源可持续性综合评价指标体系,如表 1 所示。其中 P(pressure)为生产及生活过程中对区域水资源造成的压力,S(state)为在压力作用下水资源的综合状态,R(response)为水资源状态发生变化后人类社会对其做出的响应措施,从而实现区域水资源的可持续发展。基于前人研究成果[23-26],现将研究区水资源可持续性状况分为 5 个等级,具体为Ⅰ级(非常差)、Ⅱ级(差)、Ⅲ级(警戒)、Ⅳ级(好)以及Ⅴ级(非常好)。

表 1　淮河生态经济带安徽段水资源可持续性评价等级划分标准

准则层	指标层	评价等级				
		Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
压力(P)	人均 GDP Z_1 /10^4 元	[0,2)	[2,4)	[4,6)	[6,8)	[8,10]
	人口密度 Z_2 /(人·km^{-2})	[2900,4000]	[1600,2900)	[1400,1600)	[550,1400)	[100,550)
	人均用水量 Z_3 /m^3	[800,1200]	[600,800)	[400,600)	[200,400)	[100,200)
	万元 GDP 用水量 Z_4 /m^3	[0,80)	[80,160)	[160,240)	[240,400)	[400,500]
	人均污水排放量 Z_5 /m^3	[70,60]	(60,45]	(45,25]	(25,10]	(10,0]
状态(S)	人均水资源量 Z_6 /m^3	[0,500)	[500,1500)	[1500,2000)	[2000,3000)	[3000,4500]
	年降水量 Z_7 /$10^8 m^3$	[0,20)	[20,80)	[80,160)	[160,240)	[240,500]
	地表水资源量 Z_8 /$10^8 m^3$	[0,10)	[10,20)	[20,30)	[30,40)	[40,50]
	地下水资源量 Z_9 /$10^8 m^3$	[0,4)	[4,8)	[8,12)	[12,16)	[16,20]
	供水总量 Z_{10} /$10^8 m^3$	[0,10)	[10,20)	[20,30)	[30,40)	[40,50]
响应(R)	第三产业占比 Z_{11} /%	[10,15)	[15,25)	[25,35)	[35,45)	[45,55]
	城市污水处理率 Z_{12} /%	[20,40)	[40,60)	[60,80)	[80,90)	[90,100]
	产水模数 Z_{13} /%	[0,50)	[50,150)	[150,250)	[250,350)	[350,500]
	森林覆盖率 Z_{14} /%	[0,10)	[10,20)	[20,35)	[35,50)	[50,65]
	生态环境用水率 Z_{15} /%	[0,1)	[1,2)	[2,3)	[3,4)	[4,5]

若通过公式(7)、(8)计算并得出评价指标体系中各指标在不同等级下的隶属云,则需要构建淮河生态经济带安徽段水资源可持续性基于正态云模型下的等级标准,如表 2 所示。

将表 2 中各指标对应的正态云标准代入 MATLAB 软件中,能够得到各指标在不同等级下的正态云图形。限于篇幅,现以人均 GDP、人口密度为例,所得正态云图形如图 1、2 所示。

表 2 淮河生态经济带安徽段水资源可持续性的正态云标准

评价指标	评价等级				
	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
Z_1	(1,0.33,0.01)	(3,0.33,0.01)	(5,0.33,0.01)	(7,0.33,0.01)	(9,0.33,0.01)
Z_2	(3450,183.33,0.01)	(2250,216.67,0.01)	(1500,33.33,0.01)	(975,141.67,0.01)	(325,75,0.01)
Z_3	(1000,66.67,0.01)	(700,33.33,0.01)	(500,33.33,0.01)	(300,33.33,0.01)	(100,33.33,0.01)
Z_4	(40,13.33,0.01)	(120,13.33,0.01)	(200,13.33,0.01)	(320,26.67,0.01)	(450,16.67,0.01)
Z_5	(65,1.67,0.01)	(52.5,2.5,0.01)	(35,3.33,0.01)	(17.5,2.5,0.01)	(5,1.67,0.01)
Z_6	(250,83.33,0.01)	(1000,166.67,0.01)	(1750,83.33,0.01)	(2500,166.67,0.01)	(3750,250,0.01)
Z_7	(10,3.33,0.01)	(50,10,0.01)	(120,13.33,0.01)	(200,13.33,0.01)	(370,43.33,0.01)
Z_8	(5,1.67,0.01)	(15,1.67,0.01)	(25,1.67,0.01)	(35,1.67,0.01)	(45,1.67,0.01)
Z_8	(2,0.67,0.01)	(6,0.67,0.01)	(10,0.67,0.01)	(14,0.67,0.01)	(18,0.67,0.01)
Z_{10}	(5,1.67,0.01)	(15,1.67,0.01)	(25,1.67,0.01)	(35,1.67,0.01)	(45,1.67,0.01)
Z_{11}	(12.5,0.83,0.01)	(20,1.67,0.01)	(30,1.67,0.01)	(40,1.67,0.01)	(50,1.67,0.01)
Z_{12}	(30,3.33,0.01)	(50,3.33,0.01)	(70,3.33,0.01)	(85,1.67,0.01)	(95,1.67,0.01)
Z_{13}	(25,8.33,0.01)	(100,16.67,0.01)	(200,16.67,0.01)	(300,16.67,0.01)	(425,25,0.01)
Z_{14}	(5,1.67,0.01)	(15,1.67,0.01)	(27.5,2.5,0.01)	(42.5,2.5,0.01)	(57.5,2.5,0.01)
Z_{15}	(0.5,0.17,0.01)	(1.5,0.17,0.01)	(2.5,0.17,0.01)	(3.5,0.17,0.01)	(4.5,0.17,0.01)

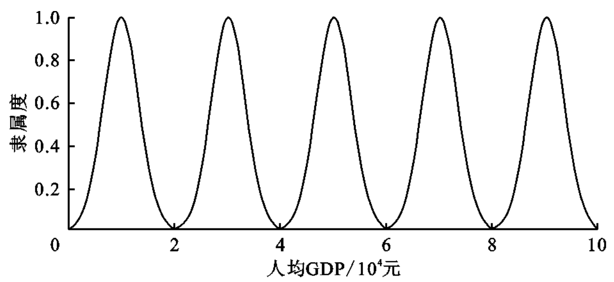

图 1 淮河生态经济带安徽段人均 GDP 正态云图形

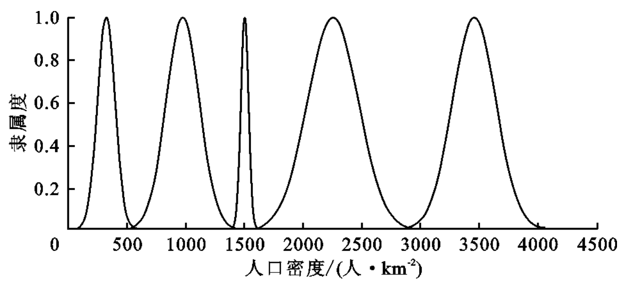

图 2 淮河生态经济带安徽段人口密度正态云图形

4 结果与分析

4.1 指标权重计算

运用三标度(0,1,2)改进的层次分析法,分别构造各准则层至指标层的判断矩阵,借助 MATLAB 软件计算对应特征向量,进行归一化后得到各指标的主观赋权权重[27];利用熵权法计算得出各指标的客观赋权权重,根据公式(5)、(6)得到淮河生态经济带安徽段水资源可持续性各指标的理想点权重。以蚌埠市为例,其各指标权重计算结果如表 3 所示。

4.2 正态云模型计算结果与分析

4.2.1 横向年份分析 利用淮河生态经济带安徽段 8 个城市 2010 -2018 年相关数据,根据上述方法和步骤,按照最大隶属度原则,确定区域水资源可持续性综合评价结果所属等级及对应得分,具体如表 4 所示。

现利用 ArcGIS 软件对 2010、2014、2018 年淮河生态经济带安徽段水资源可持续性评价结果进行可视化表示,如图 3 所示。

从图 3 可以看出,2010 -2018 年淮河生态经济带安徽段水资源可持续性状况整体呈现上升趋势,但是仍处于较低水平。区域内部发展差异显著,在淮河生态经济带安徽段 8 个城市中,阜阳市、六安市的水资源评价等级进步明显,在 2018 年已经达到Ⅳ

级较好状态,其余城市的水资源综合评价等级均为Ⅱ级及以下水平。

表 3　蚌埠市各指标权重计算结果

指标	主观权重	客观权重	组合权重	指标权重	主观权重	客观权重	组合
Z_1	0.0598	0.0635	0.0603	Z_9	0.1409	0.0700	0.1071
Z_2	0.1367	0.0773	0.1072	Z_{10}	0.0352	0.0425	0.0383
Z_3	0.0353	0.1061	0.0787	Z_{11}	0.1162	0.1406	0.1265
Z_4	0.0507	0.0441	0.0463	Z_{12}	0.0398	0.0307	0.0345
Z_5	0.0507	0.0576	0.0531	Z_{13}	0.0240	0.0440	0.0350
Z_6	0.0610	0.0708	0.0648	Z_{14}	0.0800	0.0469	0.0633
Z_7	0.0610	0.0765	0.0679	Z_{15}	0.0734	0.0860	0.0783
Z_8	0.0352	0.0435	0.0388				

表 4　2010 - 2018 年淮河生态经济带安徽段水资源可持续性综合评价结果

地区	类别	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
蚌埠	得分	0.2063	0.2283	0.2088	0.2130	0.2084	0.2092	0.2866	0.1840	0.1958
	等级	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
淮南	得分	0.1954	0.1947	0.1882	0.1521	0.2498	0.2853	0.3078	0.3319	0.2053
	等级	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
阜阳	得分	0.2580	0.2122	0.2027	0.1381	0.1934	0.1429	0.2666	0.1309	0.1272
	等级	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅳ
六安	得分	0.0739	0.0658	0.1114	0.1179	0.1282	0.1062	0.1523	0.2407	0.1325
	等级	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅳ
亳州	得分	0.2257	0.2057	0.1975	0.1539	0.1309	0.1458	0.0956	0.1363	0.0848
	等级	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅳ	Ⅱ
宿州	得分	0.1410	0.1172	0.0987	0.1456	0.1792	0.2068	0.1572	0.1251	0.1269
	等级	Ⅱ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ
淮北	得分	0.1398	0.2041	0.1964	0.1602	0.1426	0.1593	0.2196	0.2370	0.1990
	等级	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ
滁州	得分	0.1826	0.1476	0.1817	0.1699	0.1716	0.1290	0.0645	0.0921	0.0957
	等级	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ

结合原始数据和研究区实际发展情况具体来看,2010 - 2018 年阜阳水资源可持续性等级从Ⅱ级下降到Ⅰ级又上升为Ⅳ级,主要得益于地区产业结构的优化调整以及水资源环境的保护,2019 年阜阳市第三产业占比已稳定在 40% ,森林覆盖率逐年提升。2010 - 2018 年六安的水资源评价等级呈倒“N”形变化,是由于 2016 - 2017 年人口密度、万元 GDP 用水量等压力指标骤增,导致水资源可持续性状态有所下降。在其余城市中,淮北水资源评价等级最低,在 2010 - 2018 年始终处于Ⅰ级的非常差状态,但是综合得分从 0.139 8 增大到 0.199 0,说明区域的水资源可持续性状态得到一定改善。2010 - 2018 年蚌埠、亳州和宿州水资源可持续性等级基本保持在Ⅰ ~ Ⅱ级状态,滁州因为城镇化进程加快导致区域水资源消耗和污染加重,水资源可持续状态从Ⅲ级下降到Ⅱ级。此外,淮河以南区域的水资源状况明显优于淮河以北地区,主要原因是淮河以北地区多为资源型城市,长期以来一直为依赖能源生产的单一发展方式,对区域资源环境造成了极大负担;而淮河以南地区自然资源丰富,多山区,天然水

资源也较为丰富,且以发展农业和旅游业为主,对原生态环境保持较好。

4.2.2 纵向指标分析 运用相同的正态云模型和计算方法,得出 2010 和 2018 年淮河生态经济带安徽段 8 座城市的水资源可持续性各准则层的评价结果,如表 5 所示。

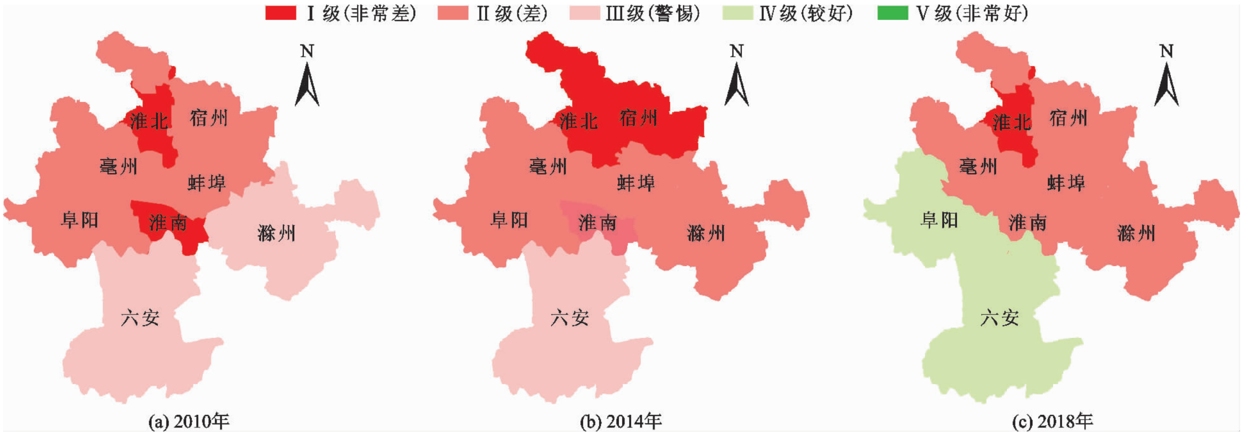

图 3 2010 -2018 年淮河生态经济带安徽段水资源可持续性状态分布

表 5 2010、2018 年淮河生态经济带安徽段水资源可持续性准则层评价结果

城市	准则层	2010 年					等级	2018 年					等级
		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	
蚌埠	P	0.0109	0.0009	0.0871	0.0021	0.0000	Ⅲ	0.0005	0.0236	0.0755	0.0005	0.0000	Ⅲ
	S	0.0866	0.1253	0.0000	0.0000	0.0000	Ⅱ	0.0863	0.0941	0.0003	0.0000	0.0000	Ⅱ
	R	0.0002	0.0801	0.0095	0.0334	0.0000	Ⅱ	0.0000	0.0781	0.0010	0.0263	0.0069	Ⅱ
淮南	P	0.0198	0.0774	0.0007	0.0136	0.0000	Ⅱ	0.0000	0.0991	0.0326	0.0013	0.0000	Ⅱ
	S	0.1353	0.0023	0.0066	0.0000	0.0000	Ⅰ	0.0220	0.0463	0.0095	0.0000	0.0000	Ⅱ
	R	0.0404	0.0438	0.0382	0.0169	0.0000	Ⅱ	0.0000	0.0599	0.0421	0.0271	0.0014	Ⅱ
阜阳	P	0.0561	0.0930	0.0000	0.0257	0.0475	Ⅱ	0.0001	0.0266	0.0000	0.0012	0.0021	Ⅱ
	S	0.0165	0.1049	0.0009	0.0000	0.0000	Ⅱ	0.0061	0.0247	0.0148	0.0000	0.0000	Ⅱ
	R	0.1213	0.1381	0.0024	0.0209	0.0000	Ⅱ	0.0000	0.0020	0.0475	0.0549	0.0047	Ⅳ
六安	P	0.0431	0.0000	0.0489	0.0000	0.0684	Ⅴ	0.0477	0.0322	0.0651	0.0020	0.0001	Ⅲ
	S	0.0062	0.0000	0.0051	0.0403	0.0017	Ⅳ	0.0090	0.0000	0.0467	0.0757	0.0004	Ⅳ
	R	0.0024	0.0000	0.0199	0.0024	0.0027	Ⅲ	0.0000	0.0220	0.0000	0.0548	0.0061	Ⅳ
亳州	P	0.0654	0.0000	0.0212	0.0048	0.0723	Ⅴ	0.0003	0.0148	0.0000	0.0017	0.0009	Ⅱ
	S	0.0441	0.1134	0.0000	0.0000	0.0000	Ⅱ	0.0277	0.0394	0.0004	0.0000	0.0000	Ⅱ
	R	0.0882	0.1123	0.0002	0.0052	0.0251	Ⅱ	0.0000	0.0306	0.0005	0.0536	0.0141	Ⅳ
宿州	P	0.0380	0.0050	0.0001	0.0005	0.0023	Ⅰ	0.1081	0.0438	0.0000	0.0000	0.0206	Ⅰ
	S	0.0517	0.0783	0.0003	0.0000	0.0000	Ⅱ	0.0188	0.0831	0.0367	0.0000	0.0000	Ⅱ
	R	0.0200	0.0577	0.0516	0.0002	0.0000	Ⅱ	0.0000	0.0000	0.0858	0.0000	0.0382	Ⅲ
淮北	P	0.0009	0.0233	0.0000	0.0367	0.0000	Ⅳ	0.1124	0.0000	0.0095	0.0123	0.0012	Ⅰ
	S	0.1389	0.0006	0.0000	0.0000	0.0000	Ⅰ	0.0865	0.0087	0.0000	0.0000	0.0000	Ⅰ
	R	0.0000	0.0825	0.0128	0.0000	0.0177	Ⅱ	0.0000	0.0000	0.0729	0.0709	0.0029	Ⅲ
滁州	P	0.0035	0.0001	0.0424	0.0818	0.0254	Ⅳ	0.0000	0.0549	0.0290	0.0525	0.0000	Ⅱ
	S	0.0265	0.0464	0.0312	0.0000	0.0000	Ⅱ	0.0127	0.0005	0.0199	0.0036	0.0000	Ⅲ
	R	0.1008	0.0001	0.1090	0.0159	0.0012	Ⅲ	0.0000	0.0403	0.0007	0.0091	0.0545	Ⅳ

从压力子系统来看,2010 - 2018 年淮河生态经济带安徽段 8 个城市的压力子系统均处于较低水平,其中蚌埠、淮南和阜阳的综合评价等级未发生变化,但是综合得分有所下滑;六安、亳州、淮北以及滁州的压力子系统所处等级下滑明显,主要原因是城镇化的快速推进造成区水资源消耗加快,造成区域水资源短缺、污染加大等问题;宿州的压力子系统虽始终处于Ⅰ级状态中,但是综合评价得分从 0.038 0 增大到 0.108 1,说明其压力子系统状态的好转。

由表 5 可看出,2010 - 2018 年区域状态子系统两极分化严重。淮北处于最低水平,始终处于Ⅰ级状态中,且综合状态也呈现下滑趋势,从原始数据中能够看出,与 2010 年相比,2018 年淮北的人均水资源量、地表地下水资源量存储量下降幅度较大;六安和滁州的状态子系统发展速度较快,在 2018 年已经达到Ⅲ级及以上水平,其余城市居中间水平。由表 5 还可看出,2010 - 2018 年淮河生态经济带安徽段响应子系统提升显著。其中阜阳、六安、亳州以及滁州的状态子系统在 2018 年已经达到Ⅳ级的较好状态,主要得益于治理水资源状况的众多举措,例如积极探寻产业转型升级之路、进行城市绿化建设、提升城市污水处理等;然而蚌埠、淮南的响应子系统仍处于Ⅱ级水平,在未来需要加大关注及治理力度,以促进区域水资源的可持续发展。

5 结　论

本文以淮河生态经济带安徽段 8 座城市为研究对象,基于理想点 - 正态云模型对其 2010 - 2018 年的水资源可持续性发展状况进行了实证分析,得出以下主要结论:

(1)2010 - 2018 年,淮河生态经济带安徽段水资源可持续性整体呈现上升趋势,但仍处于较低水平。区域内部发展差异显著,2018 年阜阳、六安的水资源可持续性已经达到Ⅳ级的良好状态,其余城市均处于Ⅱ级及以下水平,淮河以南地区水资源状况优于淮河以北地区。从各准则层来看,2010 - 2018 年响应子系统发展速度较快,压力、状态子系统处于较低水平,且提升速度较慢,是制约区域水资源可持续性等级提升的重要因素。

(2)综合时间和指标维度,淮河生态经济带安徽段的水资源可持续性发展状态不佳,社会经济快速发展、城镇化不断推进以及人口大量聚集导致区域水资源需求量增加,同时水资源环境治理措施相对滞后,是当前影响研究区水资源可持续性状态发展的主要原因。为改善水资源可持续性发展现状,在今后发展中,研究区各城市首先应当建立水资源统一管理制度,对区域水资源进行科学有效的配置和开发,协调好水资源供需关系,实现水资源可持续利用;其次,积极进行水资源环境保护及环境治理,开展植树造林提升森林的水资源涵养作用,借助改进工艺和技术手段,提高水资源利用效率,加强污水源尤其是工业污水源的处理及循环使用;最后要充分意识到水资源健康发展的重要性,大力进行节水教育和宣传,提高全社会节水意识,鼓励每个公民投入到节水的具体实践中去。

参考文献:

[1] 国家统计局. 2019 年四季度和全年国内生产总值(GDP)初步核算结果[EB/OL]. (2020-01-18)[2021-6-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2020 - 01/18/content_5470411.htm.

[2] AIT - AOUDIA M N, BEREZOWSKA - AZZAG E. Water resources carrying capacity assessment: The case of Algerial's capital city[J]. Habitat International, 2016, 58: 51 - 58.

[3] REGHUNATHAN V M, JOSEPH S, WARRIER C U, et al. Factors affecting the environmental carrying capacity of a freshwater tropical lake system[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188(11): 615.

[4] KUSPILIC M, VUKOVIC Ž, HALKIJEVIC I. Assessment of water resources carrying capacity for the Island of Cres[J]. Gradevinar, 2018, 70(4): 305 - 313.

[5] WANG Yuting, CHENG Huangxin, HUANG Lei. Water resources carrying capacity evaluation of a dense city group: A comprehensive water resources carrying capacity evaluation model of Wuhan urban agglomeration[J]. Urban Water Journal, 2018, 15(7): 615 - 625.

[6] 朱光磊,赵春子,朱卫红,等. 基于生态足迹模型的吉林省水资源可持续利用评价[J]. 中国农业大学学报,2020,25(9):131 - 143.

[7] 王雅晴,冼超凡,欧阳志云. 基于灰水足迹的中国城市水资源可持续利用综合评价[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 2983 - 2995.

[8] 杨光明,时岩钧,杨 航,等. 基于系统动力学的水资源承载力可持续发展评估——以重庆市为例[J]. 人民长江,2019,50(8):6 - 13 + 51.

[9] 李冰瑶,陈 星,周志才,等. 缺水地区水资源可持续利用评价与对策探讨[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(6):104 - 108.

[10] 陈继光. 基于灰面积关联决策的水资源可持续利用潜力评价[J]. 节水灌溉, 2015(7): 69 - 71 + 75.

(下转第 117 页)

plied Remote Sensing, 2010,4(1):041873.
[9] HAN Songjun, TANG Qiuhong, ZHANG Xuezhen, et al. Surface wind observations affected by agricultural development over Northwest China[J]. Environmental Research Letters, 2016,11(5):054014.
[10] 田仁伟,赵翠薇,贺中华,等. 1995 - 2016 年三岔河上游土地利用变化对径流的影响[J]. 水土保持通报, 2019,39(3):12 - 18.
[11] 张一鸣,田 雨,雷晓辉,等. 三岔河上游近 50 年降水径流变化特征分析[J]. 水文, 2016,36(5):79 - 84.
[12] 焦树林,刘 丽,孙 婷,等. 三岔河流域水文特征与化学风化碳汇效应[J]. 地理研究, 2013, 32(6): 1025 - 1032.
[13] 陈志霞,喻阳华,吴银菇. 黔中石漠化区大理石矿山不同植被恢复对土壤养分及化学计量的影响[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2020,38(1):95 - 102.
[14] 吴清林,梁 虹,熊康宁,等. 喀斯特地区水土漏失监测方法评述[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2020,38(3):30 - 38.
[15] 郎登潇,师嘉祺,郑江坤,等. 近 52a 西南地区潜在蒸散发时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境,2017,26(6):945 - 954.
[16] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration — Guidelines for computing crop water requirements — FAO Irrigation and drainage paper 56[M]. Rome:FAO, 1998.
[17] CUNHA A C, FILHO L R A G,TANAKA A A, et al. Influence of the estimated global solar radiation on the reference evapotranspiration obtained through the Penman - Monteith FAO 56 method[J]. Agricultural Water Management, 2021,243:106491.
[18] 朱国锋,何元庆,蒲 焘,等. 1960 - 2009 年横断山区潜在蒸发量时空变化[J]. 地理学报,2011,66(7):905 - 916.
[19] 张 波,谷晓平,古书鸿,等. 近 55 年贵州省潜在蒸散量变化特征及影响因子分析[J]. 水资源与水工程学报, 2017,28(3):20 - 26.
[20] 黄 玥,黄志霖,肖文发,等. 基于 Mann - Kendall 法的三峡库区长江干流入出库断面水质变化趋势分析[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(4):950 - 961.
[21] 贾立斌,吴伟宏,袁国华. 基于 Mann - Kendall 的中国近岸海域海洋生态环境承载力评价与预警[J]. 生态经济,2019,35(2):208 - 213 + 224.
[22] 王 梅, 王建波, 那景坤. E - 601 型蒸发器水面蒸发实验分析[J]. 黑龙江水专学报, 2014,31(3):10 - 12.
[23] 鲍平勇. 半干旱区域日蒸散发估算的遥感研究[D]. 南京:河海大学,2015.
[24] 张 鑫,庄文化,李洪宇,等. 中国西南地区蒸发皿系数 K_p 研究[J]. 灌溉排水学报,2016,35(9):109 - 112.

(上接第 105 页)

[11] 张 杰,邓晓军,翟禄新,等. 基于熵权的广西水资源可持续利用模糊综合评价[J]. 水土保持研究,2018,25(5):385 - 389 + 396.
[12] 郑 乐,杨法暄,钱 会,等. 基于超效率 DEA 模型的宁夏工业水资源利用效率研究[J]. 水资源与水工程学报, 2020,31(2):81 - 86.
[13] 应卓晖,赵 衡,王富强,等. 基于 DEA 和 Tobit 模型的河南省水资源利用效率评价及影响因素[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(2): 255 - 262.
[14] 张国基,吴华清,刘业政,等. 中国水资源综合利用效率测度及其空间交互分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2020,37(8):123 - 139.
[15] 颜 俊,崔瑞鹏. 淮河生态经济带旅游经济时空分异与收敛性研究[J]. 地域研究与开发,2020,39(4):91 - 97.
[16] 国务院. 淮河生态经济带发展规划[EB/OL]. (2018-10-18)[2021-6-26]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018 - 10/18/content_5332105.htm,.
[17] 杨 丹,唐德善,周 祎. 基于正态云模型的人水和谐度评价[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(3):53 - 58.
[18] 李德毅,刘常昱,淦文燕. 正态云模型的重尾性质证明[J]. 中国工程科学,2011,13(4):20 - 23.
[19] WANG Xintong, LI Shucai, XU Zhenhao, et al. Risk assessment of water inrush in karst tunnels excavation based on normal cloud model[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2019, 78(5): 3783 - 3798.
[20] 侯代男,江 鸿,周慧秋. 基于熵权 - 正态云模型的政策性农业保险实施效果评价——以黑龙江省为例[J]. 干旱区资源与环境,2020,34(4):33 - 38.
[21] 薛黎明,刘保康,郑志学,等. 基于理想点 - 可拓云模型的煤炭资源可持续力评价[J]. 自然资源学报,2018,33(9):1657 - 1665.
[22] 叶 达,吴克宁,刘霈珈. 基于正态云模型与熵权法的景泰县耕地后备资源开发潜力评价[J]. 中国农业资源与区划,2016,37(6):22 - 28.
[23] 刘 莉,汪丽娜. 基于熵权 - 正态云模型的水资源可持续性评价[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020,52(1):77 - 84.
[24] 周云哲,粟晓玲,周正弘. 基于"量 - 质 - 域 - 流"四维指标体系的水资源荷载状况评价——以黑河流域三地市为例[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(3):215 - 223 + 231.
[25] 张丽洁,康 艳,粟晓玲. 基于正态云模型的黄河流域水资源承载力评价[J]. 节水灌溉,2019(1):76 - 83.
[26] 魏光辉,马 亮. 基于正态云模型的区域水资源承载力评价[J]. 节水灌溉,2015(1):68 - 71.
[27] 李玉平,朱 琛,张璐璇,等. 基于改进层次分析法的水环境生态安全评价与对策——以邢台市为例[J]. 北京大学学报(自然科学版),2019,55(2):310 - 316.