

基于熵权的广西水资源可持续利用模糊综合评价

张杰¹, 邓晓军², 翟禄新¹, 侯满福¹

(1. 广西师范大学 环境与资源学院, 广西 桂林 541004; 2. 浙江财经大学 经济学院, 杭州 310018)

摘要:科学合理地利用水资源是缓解我国水资源危机的有效途径,而水资源可持续利用评价是其基本前提,具有重要的研究价值和实际意义。为此,建立了基于熵权的水资源可持续利用模糊综合评价模型,对2003—2016年广西的水资源可持续利用状况进行了评价。结果表明:2007年以前,级别特征值维持在3.6~3.9,处于不可持续利用状态;2008—2011年,级别特征值在3.5上下波动,即波动于不可持续与基本可持续状态;2012年以来,级别特征值稳定在2.5~3.0,处于基本可持续水平状态。尽管如此,还需通过强化水资源管理、提高水资源利用效率、加大污水处理能力和推行节水技术等方式进一步提高广西的水资源可持续利用水平。

关键词:水资源可持续利用;模糊综合评价;熵权;广西

中图分类号:TV213.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)05-0385-05

Fuzzy Comprehensive Evaluation of Water Resources Sustainable Utilization Based on Entropy Weight in Guangxi

ZHANG Jie¹, DENG Xiaojun², ZHAI Luxin¹, HOU Manfu¹

(1. College of environment and resources, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. School of Economics, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Scientific and rational utilization of water resources is an efficient path to ease water resources crisis in China. However, water resources sustainable utilization is its fundamental premise, has important research value and practical significance. For this purpose, the fuzzy comprehensive evaluation of water resources sustainable utilization was established based on entropy weight, and the status of water resources sustainable utilization in Guangxi during 2003—2016 was evaluated. The results showed that the water resources were the unsustainable status before 2007 because the level characteristics values were between 3.6~3.9, and fluctuated between the unsustainable and low sustainable status during 2008—2011 because the level characteristics values wobbled around 3.5, but were the low sustainable status after 2012 because the level characteristics values ranged between 2.5~3.0. In order to further enhance the sustainable utilization level of water resources, many ways should be put into practices, such as strengthening water resource management, rising water resource utilization efficiency, improving wastewater treatment capacity and popularizing water saving technology.

Keywords: sustainable utilization of water resources; fuzzy comprehensive evaluation; entropy weight; Guangxi

水资源是人类发展不可或缺的重要自然资源,而水资源的可持续利用一直以来都是水科学领域关注的焦点问题^[1]。一方面,随着我国人口快速增长和经济迅速发展,水资源的需求不断增加;另一方面,尽管我国水资源的总量十分可观,但其时空分布不均,加上不合理的利用等造成了严重的水资源危机,制约着

社会经济的可持续发展^[2]。因此,如何科学合理地利用水资源已成为缓解我国水资源危机亟需解决的问题,而对水资源进行可持续利用评价是科学用水的前提,具有重要的研究价值和实际意义。

近年来,国内众多学者对水资源可持续利用进行研究并取得了积极的成果,主要集中于两个方面:一

收稿日期:2017-11-17

修回日期:2017-12-05

资助项目:国家自然科学基金(41601039,41261005);广西自然科学基金(2017GXNSFAA198012,2015GXNSFBA139186);广西高校科研项目(KY2015LX014);岩溶生态与环境变化研究广西高校重点实验室研究基金(YRHJ16Z001,YRHJ15Z007)

第一作者:张杰(1991—),男,四川巴中人,硕士研究生,研究方向为水资源管理。E-mail:zj4537@126.com

通信作者:邓晓军(1981—),男,江西吉安人,博士,副教授,主要从事生态文明与可持续发展等方面的研究。E-mail:mijun45@163.com

是水资源可持续利用评价指标体系研究。如王壬^[3]、杨柳^[4]等从水资源条件、开发利用状况、社会经济和生态环境等系统构建了水资源可持续利用评价指标体系,周玲玲等^[5]基于 DPSIR 模型建立了水资源可持续利用评价体系;二是水资源可持续利用的评价方法及其应用研究。如李云玲等^[6]构建水资源承载力评价指标体系对河北省的综合水资源承载状况进行评价,贾学秀等^[7]从水资源压力评价方法的计算原理、过程及应用方面概述了国内外水资源压力的评价方法,张新娇等^[8]运用 AHP—模糊综合评价法评价了苏州市和宿迁市的水资源管理水平,何国华等^[9]建立基于熵权的水资源配置和谐性模糊综合评价模型对西安市各县区的水资源配置状况进行评价。可以看出,水资源可持续利用的评价指标体系日趋完善,评价方法也由过去静态、单一向动态、综合的方向发展。

广西地处华南沿海,是我国降水量最为丰富的地区之一。但是,受到冬夏季风交替和岩溶地质环境的影响,广西水资源的时空分布不均、利用较为困难。作为我国与东盟贸易的窗口,广西经济社会发展的势头十分迅猛,对水资源的需求也越来越高。基于此,并考虑到熵权和模糊综合评价方法能有效弱化自然因素中的不确定性及人为判断的主观性,本文通过构建水资源可持续利用评价指标体系,建立基于熵权的水资源可持续利用模糊综合评价模型,对 2003—2016 年广西的水资源可持续利用状况进行评价,并提出相应的对策和建议。

1 数据与方法

1.1 指标体系

水资源与社会、人口、经济、生态环境息息相关,且具有动态性,因而在选取指标时应充分考虑水资源的特点及评价要求,并遵循如下原则^[3-4]:(1) 可行性,即充分考虑数据的来源,无法获取的数据及完整性欠缺的数据对研究的意义不大,对后续操作的有影响的数据的指标可取性也不强;(2) 科学性,选取的指标应客观反映水资源可持续利用的要素,指标名称不能模棱两可,测算过程要科学、规范;(3) 综合性,指标体系要综合考虑水资源与人口、社会、经济、生态环境等复杂的系统关系,且指标应体现系统的发展状态及过程,便于纵横方向的比较;(4) 目的性,根据评价目的合理的选取指标,并划分层次使思路清晰明了。

在综合考虑以上原则的基础上,借鉴国内外水资源供需分析的评价指标体系^[3-5],并根据广西水资源的基本特征,本文从水资源条件系统、社会系统、经济系统及生态环境系统 4 个方面设计评价体系,通过选

取 24 项具有代表性的指标,构建了广西水资源可持续利用评价指标体系。在此基础上,根据现行的国家相关标准和已有文献中相关指标的分级标准^[3-5,9],结合广西水资源利用的基本特征,确定了各评价指标的等级范围,具体如表 1 所示。

1.2 评价方法

常见的水资源可持续利用评价方法有综合评分法、多元统计法、协调度法、属性识别法、综合测度法和模糊综合评价法等多种^[10]。其中,模糊综合评价法能较全面地反映水资源可持续利用状况,能较好地对水资源可持续利用进行多因素综合评价。同时,指标权重的确定方法主要有主观赋权法和客观赋权法两种^[5]。主观法往往是依据专家经验打分赋予指标权重,其客观性较差。客观赋权法主要根据原始数据的特征提取信息赋予权重,熵权法即是其中一种。由于水资源评价过程中存在不确定性影响,所以熵权法与模糊评价法相结合可有效弱化这一不利因素。

1.2.1 定义熵权 设有 m 个评价对象、 n 个评价指标得到原始数据矩阵 $X = |x_{ij}|_{m \times n}$, x_{ij} 表示第 i 个指标第 j 年的实际数据,对该矩阵归一化处理,得到归一化矩阵 $R = |r_{ij}|_{m \times n}$, r_{ij} 表示第 i 个指标第 j 年的标准值^[9]。

第 i 个指标的熵的定义为:

$$H_i = -k \left(\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \right) \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式中: $k = \frac{1}{\ln m}$, $f_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{j=1}^m r_{ij}}$, 当 $f_{ij} = 0$ 时,令 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

相应的指标权重为:

$$w_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i} \quad (2)$$

式中: $0 \leq w_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$

1.2.2 模糊综合评价法 根据影响水资源可持续利用的因素选取 n 个评价指标,建立因素集 $U: U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_n\}$ 。

对每个指标采用 5 个等级(用 p 表示 $p=1, 2, 3, 4, 5$)对水资源可持续利用评价,确定评语集 $V: V = \{V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\} = \{\text{完全可持续, 中度可持续, 基本可持续, 不可持续, 极度不可持续}\}$ 。

评价因素集 U 与评语集 V 间的关系用隶属度矩阵表示,即模糊评价矩阵 $q = q_{[ijp]}$, q_{ijp} 表示 U_{ij} 对第 p 级评价语 V_p 的隶属度。

隶属度的计算公式如下^[8-11]:

正向指标:

$$\begin{cases} q_{ijp}=1,(p=1 \text{ 或 } p=5)x_{ij}>V_{ij1} \text{ 或 } x_{ij}<V_{ij5}; \\ q_{ij(p+1)}=\frac{V_{ijp}-x_{ij}}{V_{ijp}-V_{ij(p+1)}},V_{ijp}\leqslant x_{ij}\leqslant V_{ij(p+1)}(p=2,3,4); \\ q_{ijp}=1-q_{ij(p+1)} \\ q_{ijp}=0,\text{其他等级} \end{cases} \quad (3)$$

模糊综合评价矩阵为: $B=w\circ q$ (4)

式中: B 为水资源可持续利用评价结果隶属度向量; w 为各指标权重; q 为模糊关系矩阵; \circ 表示模糊合成算子。模糊合成算子类型多样,本文采用加权平均型 $M(\cdot,\oplus)$ 模糊算子: $a\cdot b=ab,a\oplus b=\min(1,a+b)$ 。

负向指标:

$$\begin{cases} q_{ijp}=1,(p=1 \text{ 或 } p=5);x_{ij}<V_{ij1} \text{ 或 } x_{ij}>V_{ij5}; \\ q_{ij(p+1)}=\frac{V_{ijp}-x_{ij}}{V_{ijp}-V_{ij(p+1)}},V_{ijp}\leqslant x_{ij}\leqslant V_{ij(p+1)}(p=2,3,4); \\ q_{ijp}=1-q_{ij(p+1)} \\ q_{ijp}=0,\text{其他等级} \end{cases}$$

1.2.3 水资源可持续利用级别评判 根据上式得出的结果向量,结合级别特征值对历年水资源可持续利用等级评判。方法如下^[11-12]: $D=(1,2,3\cdots p)\cdot B^T$ 。当 $1<D\leqslant 1.5$,将其评判为 1 级;当 $k-0.5<D\leqslant k+0.5,(k=2,3,4)$,将其评判为 k 级;当 $4.5<D<5$,将其评判为 5 级。具体评判标准见表 2。

表 1 水资源可持续利用评价指标体系及等级范围

指标		等级					类型	熵权
		1 级	2 级	3 级	4 级	5 级		
水资源条件系统	x_{11} 年降水量(mm)	>1800	1500~1800	1200~1500	800~1200	<800	正向	0.050
	x_{12} 人均水资源量(m ³ /人)	>4500	4000~4500	3500~4000	3000~3500	<3000	正向	0.047
	x_{13} 水资源开发利用率(%)	<10	10~15	15~20	20~25	>25	负向	0.044
	x_{14} 产水系数(%)	>60	50~60	20~50	10~20	<10	正向	0.030
	x_{15} 地下水资源模数(10 ⁴ m ³ /km ²)	>30	20~30	10~20	5~10	<5	正向	0.041
水资源与社会系统	x_{21} 人口密度(人/km ²)	<20	20~50	50~100	100~300	>300	负向	0.046
	x_{22} 人口自然增长率(%)	<0	0~2	2~15	15~20	>20	负向	0.032
	x_{23} 城镇化率(%)	>70	50~70	35~50	20~35	<20	正向	0.033
	x_{24} 自来水用水普及率(%)	>95	90~95	80~90	70~80	<70	正向	0.017
	x_{25} 供水模数(10 ⁴ m ³ /km ²)	>25	20~25	15~20	10~15	<10	正向	0.021
	x_{26} 人均用水量(m ³ /人)	<400	400~500	500~600	600~800	>800	负向	0.027
水资源与经济系统	x_{27} 生活用水比率(%)	>10	7~10	5~7	4~5	<4	正向	0.046
	x_{31} 人均 GDP(万元/人)	>5	3.5~5	2~3.5	1~2	<1	负向	0.055
	x_{32} 单位 GDP 用水量(m ³ /万元)	<100	100~200	200~600	600~1000	>1000	正向	0.073
	x_{33} 灌溉率(%)	>40	30~40	20~30	10~20	<10	负向	0.032
	x_{34} 工业用水率(%)	>45	35~45	20~35	5~20	<5	正向	0.031
	x_{35} 农业用水比率(%)	<40	40~55	55~73	73~90	>90	负向	0.050
水资源与生态环境系统	x_{41} 生态环境用水率(%)	>5	3~5	2~3	1~2	<1	正向	0.055
	x_{42} 污径比(%)	<1.0	1.0~1.5	1.5~2	2~2.5	>2.5	负向	0.064
	x_{43} 森林覆盖率(%)	>70	60~70	50~60	40~50	<40	正向	0.031
	x_{44} 节水灌溉率(%)	>55	50~55	45~50	40~45	<40	正向	0.054
	x_{45} 生活污水处理率(%)	>90	80~90	65~80	50~65	<50	正向	0.047
	x_{46} 水土流失率(%)	<10	10~20	20~30	30~50	>50	负向	0.031
	x_{47} 工业废污水排放率(%)	<40	40~50	50~60	60~70	>70	负向	0.042

表 2 水资源可持续利用综合评价等级

可持续等级	级别特征值	可持续状态	状态特征
1	$1<D\leqslant 1.5$	完全可持续	水资源与社会、经济、生态环境协调发展,水资源成为地区发展的优势资源
2	$1.5<D\leqslant 2.5$	中度可持续	水资源丰富,水利基础设施完善,废污水治理显著
3	$2.5<D\leqslant 3.5$	基本可持续	水资源较丰富,水利设施功能受限,水环境质量有所提高
4	$3.5<D\leqslant 4.5$	不可持续	水资源供需矛盾显现,水利设施功能不能有效发挥,废污水未得到有效治理
5	$4.5<D\leqslant 5$	极不可持续	水资源供需矛盾突出,水利设施结构不完整,水资源不能满足生产生活需要

1.3 数据来源

本文所涉及的水资源和社会经济等基础数据主要来源于《广西区水资源公报(2003—2016)》和《广西统计年鉴(2004—2017)》。

2 结果与分析

根据广西 2003—2016 年的水资源和社会经济数据,结合上述建立的基于熵权的模糊评价模型对广西近 14 a 以来的水资源可持续利用状况进行评价,结果如表 3 所示。可以看出,2003—2016 年广西水资源可持续利用的级别特征值介于 2.5~4.0 之间,可持续等级总体由 4 级降为 3 级,即总体上由不可持续利用状态转入基本可持续利用状态。

表 3 广西水资源可持续利用评价结果

年份	隶属度					综合得分 <i>D</i>	综合评价 结果
	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级		
2003	0.000	0.128	0.268	0.242	0.362	3.838	不可持续
2004	0.000	0.080	0.254	0.349	0.317	3.904	不可持续
2005	0.000	0.112	0.246	0.382	0.260	3.789	不可持续
2006	0.010	0.115	0.310	0.309	0.255	3.684	不可持续
2007	0.007	0.038	0.346	0.437	0.173	3.731	不可持续
2008	0.057	0.165	0.316	0.406	0.056	3.240	基本可持续
2009	0.015	0.046	0.360	0.529	0.050	3.552	不可持续
2010	0.016	0.133	0.471	0.350	0.030	3.243	基本可持续
2011	0.014	0.056	0.418	0.434	0.079	3.509	不可持续
2012	0.017	0.238	0.459	0.222	0.064	3.078	基本可持续
2013	0.017	0.235	0.527	0.157	0.063	3.014	基本可持续
2014	0.015	0.297	0.482	0.142	0.064	2.943	基本可持续
2015	0.236	0.185	0.396	0.117	0.066	2.592	基本可持续
2016	0.166	0.195	0.440	0.131	0.068	2.740	基本可持续

分别计算水资源条件系统、社会系统、经济系统和生态环境系统的级别特征值,结果如图 1 所示。可以看出,2007 年以前社会、经济和生态环境系统的级别特征值呈缓慢下降趋势,而水资源条件系统的级别特征值有小幅波动,水资源可持续利用综合得分维持在 3.6~3.9,处于不可持续利用状态;2008—2011 年,社会、经济和生态环境三大系统的级别特征值变化缓慢,而水资源条件系统的级别特征值变化剧烈,导致综合得分在 3.5 上下波动,水资源可持续利用等级呈现出 2 级与 3 级交替的现象,即波动于不可持续与基本可持续状态;2012 年至今,经济和生态环境系统的级别特征值有减少趋势,社会系统的级别特征值变化幅度不大,水资源条件系统的级别特征值波动变化但相对以前幅度较小,导致综合得分稳定在 2.5~3.0,即水资源可持续利用等级保持在 3 级,处于基本可持续状态。

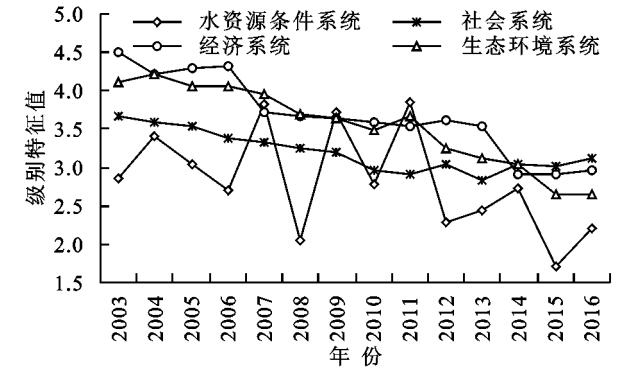


图 1 广西水资源可持续利用分类评价结果

水资源条件系统中各项指标均呈现出较大的波动。究其原因,广西是我国降水最丰富的省区之一,但降水的年份分布不均。自 2007 年以来,降水一直处于较大的波动状态中,与降水量相关的其他指标如表征地区水资源条件的人均水资源量变动也较大。2008—2011 年水资源系统各项指标起伏较大,导致水资源条件系统的级别特征值波动较大。水资源开发利用率表征地区水资源总的开发利用程度,而广西水资源开发利用率大都维持在 20% 以下,说明广西水资源开发利用潜力较大。然而,丰枯年年的变化使得水资源在年际上呈现波动。同时,根据广西水资源公报显示,5—9 月的降水量占全年的 70%~80%,致使区内旱涝灾害频发,使得桂西局部地区早期饮水困难。水资源时空分布不均,也从侧面反映了广西水资源利用能力的不稳定。因此,需要进一步加强水利工程建设,以合理调控广西的水资源。

社会系统中各项指标的变化与水资源条件系统有所不同。该系统中各项指标总体上有好转的趋势,其中负向指标人口密度、人口自然增长率、供水模数和人均用水率这 4 个指标的数值变化不大,但正向指标如城镇化率和自来水用水普及率提升较快。随着城镇化的快速发展,人民生活水平显著提高,其居民自来水用水率逐年攀升。虽然由于人口有一定增长,人均水资源量有一定程度的减少,但由于各行业总用水量较为稳定,其生活用水率变化不大,所以生活用水量变化平稳,说明区域用水模式逐渐趋向于节约型。要达到高度的水资源可持续利用水平,加强居民水资源保护意识、继续推行节约用水以及提高水资源利用效率是其必然的选择。

相比之下,经济系统中各项指标的值均有所提高。其中,人均 GDP 已由 2003 年的 0.6 万元增长至 2016 年的 3.7 万元,增长约 6 倍;万元 GDP 用水量由 1 000 m³ 以上降至 200 m³ 以内;工业用水率和农业灌溉率提高幅度不大,农业用水率虽有所降低,但仍然高居 60%。总体看来,经济系统中正向指标值

日益增长,负向指标值逐渐降低,表明用水效率正在逐渐增强。但要使广西水资源可持续利用水平进一步提高,除了降低万元 GDP 用水量外,还需大力发展节水灌溉,提高水资源利用效率特别是农业水资源利用效率。

从生态环境系统来看,指标总体向好的方向发展(图 2)。其中,生态环境用水率呈下降趋势;农业节水灌溉率由 2003 年的 43% 降到 2005 年的 41%,之后逐年提高,至 2016 年已经达到 57%;森林覆盖率由 2003 年的 41.33% 增长到 62.28%。尽管工业废污水排放率呈现减少趋势,但是废污水的总排放量却逐年增加,主要是生活污水比例不断上升,即生活污水将成为水环境污染的主要因素。同时,污径比常年达 1.5% 以上,可见废污水并没有得到有效治理,并严重影响了水资源的供给。虽然近年来生活污水处理率提高不少,但工业废污水的排放率仍然超过 50%,故其治理的力度还需要进一步加大。由此可见,在森林覆盖率上升和工业废污水排放率不断下降的情况下,提高废污水特别是工业废污水的处理能力,是达到水资源完全可持续利用水平的有效途径。

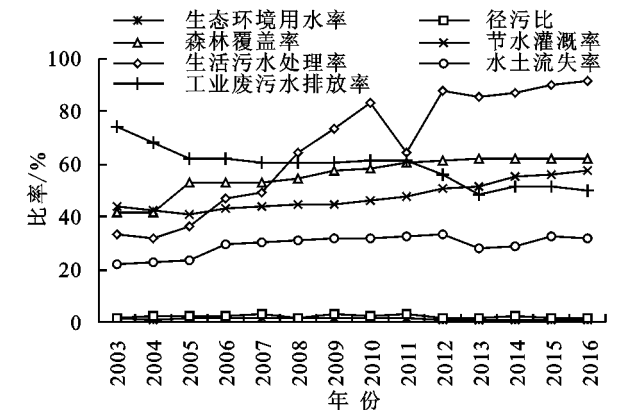


图 2 生态环境系统指标变化趋势

3 敏感性分析

指标权重影响着综合评价的结果,其权重的变化会导致模型的稳定性的变化,因此需要通过敏感性分析来检验模型的稳定性。将各项指标的权重分别进行上下 20% 的调整,其余指标的总权重作相应的改变,并重新计算级别特征值,以此来检验模型的敏感性^[13]。以 2016 年为例,重新计算指标权重调整后的综合得分,计算结果见表 4。结果表明,2016 年广西水资源可持续利用综合得分始终处于基本可持续利用状态,因而系统总权重的某些微小幅度的调整对评估结果不会造成很大的影响,即诊断结果对功能总权重的小幅度波动敏感性不高,说明广西水资源可持续利用的评价结果具有较高的稳定性和可靠性。

表 4 熵权浮动 20% 时的广西水资源可持续利用 D 值变化

0.8w	D	1.2w	D	0.8w	D	1.2w	D
0.8wx ₁₁	2.742	1.2wx ₁₁	2.738	0.8wx ₃₁	2.739	1.2wx ₃₁	2.741
0.8wx ₁₂	2.757	1.2wx ₁₂	2.723	0.8wx ₃₂	2.745	1.2wx ₃₂	2.735
0.8wx ₁₃	2.744	1.2wx ₁₃	2.736	0.8wx ₃₃	2.737	1.2wx ₃₃	2.744
0.8wx ₁₄	2.741	1.2wx ₁₄	2.740	0.8wx ₃₄	2.735	1.2wx ₃₄	2.745
0.8wx ₁₅	2.740	1.2wx ₁₅	2.740	0.8wx ₃₅	2.733	1.2wx ₃₅	2.747
0.8wx ₂₁	2.728	1.2wx ₂₁	2.753	0.8wx ₄₁	2.714	1.2wx ₄₁	2.767
0.8wx ₂₂	2.736	1.2wx ₂₂	2.745	0.8wx ₄₂	2.740	1.2wx ₄₂	2.740
0.8wx ₂₃	2.739	1.2wx ₂₃	2.741	0.8wx ₄₃	2.740	1.2wx ₄₃	2.740
0.8wx ₂₄	2.746	1.2wx ₂₄	2.734	0.8wx ₄₄	2.760	1.2wx ₄₄	2.720
0.8wx ₂₅	2.733	1.2wx ₂₅	2.748	0.8wx ₄₅	2.757	1.2wx ₄₅	2.723
0.8wx ₂₆	2.736	1.2wx ₂₆	2.744	0.8wx ₄₆	2.738	1.2wx ₄₆	2.742
0.8wx ₂₇	2.746	1.2wx ₂₇	2.734	0.8wx ₄₇	2.738	1.2wx ₄₇	2.742

4 结论

从水资源条件、社会、经济和生态环境 4 个方面构建了水资源可持续利用评价指标体系,并利用基于熵权的模糊综合评价法对 2003—2016 年广西水资源可持续利用状况进行评价。研究表明,在 2007 年以前,广西水资源可持续利用的级别特征值变化比较平稳,维持在 3.6~3.9,处于不可持续利用状态;2008—2011 年,级别特征值在 3.5 上下波动,即波动于不可持续与基本可持续状态;2012 年以来,级别特征值稳定在 2.5~3.0,处于基本可持续水平状态。水资源条件系统中指标受自然因素的影响一直呈现波动变化;社会系统的各项指标值变化有所不同,负向指标中人口密度、人口自然增长率和人均用水率这 3 个指标的数值变化不大,但正项指标中城镇化率和自来水用水普及率提升较快;经济系统中正向指标值日益增长,负向指标值逐渐降低;从生态环境方面来看,指标总体有好转的趋势,且农业用水效率提高明显。尽管如此,广西水资源可持续利用的水平仍然偏低,这与该区水资源总量丰富的实际情况不相符。因此,今后还须通过强化水资源管理、改善水资源开发利用条件、加大废污水处理能力和推行节水技术等有效措施,进一步提高广西水资源可持续利用的水平。

参考文献:

[1] 郑德凤,张雨,魏秋蕊,等. 基于可持续能力和协调状态的水资源系统评价方法探讨[J]. 水资源保护,2016,32(3):24-32.

[2] 陈午,许新宜,王红瑞,等. 基于序关系法的北京市水资源可持续利用模糊综合评价[J]. 水利经济,2014,32(2):19-24.

[3] 王壬,陈莹,陈兴伟. 区域水资源可持续利用评价指标体系构建[J]. 自然资源学报,2014,29(8):1441-1452.

[4] 杨柳. 水资源可持续利用评价指标体系探讨与研究[J]. 环境科学与管理,2014,29(12):178-180.

- ogy, 2017, 218(9):1117-1133.
- [9] 张懿铨, 祁威, 周才平, 等. 青藏高原高寒草地净初级生产力 (NPP) 时空分异[J]. 地理学报, 2013, 68(9):1197-1211.
- [10] 赵国帅. 基于光能利用率模型的青海植被净初级生产力模拟研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2011.
- [11] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 基于 NPP 的黄南州自然植被对气候变化的响应[J]. 生态学杂志, 2010, 29(6):1094-1102.
- [12] 史晓亮, 杨志勇, 王馨爽, 等. 基于光能利用率模型的松嫩平原玉米单产估算[J]. 水土保持研究, 2017, 24(5): 385-390.
- [13] 周才平, 欧阳华, 王勤学, 等. 青藏高原主要生态系统净初级生产力的估算[J]. 地理学报, 2004, 59(1):74-79.
- [14] 郭晓寅, 何勇, 沈永平, 等. 基于 MODIS 资料的 2000—2004 年江河源区陆地植被净初级生产力分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(4):512-518.
- [15] 李登科, 范建忠, 王娟. 基于 MOD17 A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(12):2776-2782.
- [16] Turner D P, Ritts W D, Cohen W B, et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 102(3/4):282-292.
- [17] 韦振锋, 王德光, 张翀, 等. 1999—2010 年中国西北地区植被覆盖对气候变化和人类活动的响应[J]. 中国沙漠, 2014, 34(6):1665-1670.
- [18] 焦伟, 陈亚宁, 李稚. 西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1):181-189.
- [19] 郭灵辉, 郝成元, 吴绍洪, 等. 内蒙古草地 NPP 变化特征及其对气候变化敏感性的 CENTURY 模拟研究[J]. 地理研究, 2016, 35(2):271-284.
- [20] 刘芳, 张红旗, 董光龙. 伊犁河谷草地植被 NDVI 变化及其降水敏感性特征[J]. 资源科学, 2014, 36(8):1724-1731.
- [21] 张军民. 伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究[J]. 干旱气象, 2006, 24(2):1-4.
- [22] 赵丽, 杨青, 韩雪云. 1961—2009 年伊犁地区降水指数的时空分布及变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(10):82-89.
- [23] 郭彦玮. 新疆草原生态保护补助奖励政策实施效果及其对策研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.
- [24] Jiang W, Yuan L, Wang W, et al. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin[J]. Ecological Indicators, 2015, 51:117-126.

~~~~~

(上接第 389 页)

- [5] 周玲玲, 王琳, 余静. 基于水足迹理论的水资源可持续利用评价体系: 以即墨市为例[J]. 资源科学, 2014, 36(5): 913-921.
- [6] 李云玲, 郭旭宁, 郭东阳, 等. 水资源承载力评价方法研究及应用[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3):342-349.
- [7] 贾学秀, 严岩, 朱春雁, 等. 区域水资源压力分析评价方法综述[J]. 自然资源学报, 2016, 31(10):1783-1791.
- [8] 张新娇, 唐德善, 孙学颖. 基于 AHP 与模糊综合评价法的水资源高效管理评价[J]. 水电能源科学, 2014, 32(5):133-136.
- [9] 何国华, 汪妮, 解建仓, 等. 基于熵权的水资源配置和谐性模糊综合评价模型的建立及应用[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(2):214-220.
- [10] 崔莹, 谢世友, 柳芬, 等. 重庆市水资源可持续利用能力的模糊评价[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2017, 39(4):115-123.
- [11] 秦鹏, 王英华, 王维汉, 等. 河流健康评价的模糊层次与可变模糊集耦合模型[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(12):2169-2175.
- [12] 袁艳梅, 沙晓军, 刘煜晴, 等. 改进的模糊综合评价法在水资源承载力评价中的应用[J]. 水资源保护, 2017, 33(1):52-56.
- [13] 高晓薇, 刘元元, 戴纪翠, 等. 深圳河健康状况诊断及分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2010, 46(4):636-642.