

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2021.0047

于磊,郭佳航,王慧丽.区域水资源-能源-粮食耦合系统和谐评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(3):437-445. YU L, GUO J H, WANG H L. Harmony evaluation of regional water-energy-food coupling system[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021, 19(3): 437-445. (in Chinese)

区域水资源-能源-粮食耦合系统和谐评价

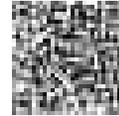
于磊^{1,2,3}, 郭佳航², 王慧丽²

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所/中国农科院农业水资源高效安全利用重点开放实验室, 河南 新乡 453003;
2. 郑州大学水利科学与工程学院, 郑州 450001; 3. 郑州市水资源与水环境重点实验室, 郑州 450001)

摘要:针对水资源-能源-粮食耦合系统和谐可持续发展问题, 筛选水资源、能源、粮食系统相关指标, 并将模糊多属性决策方法与和谐量化方法相结合, 提出基于和谐量化模型的水资源-能源-粮食耦合系统评价指标体系。以河南省 2011—2018 年水资源-能源-粮食耦合系统发展水平及其和谐程度为依据, 分析各子系统与三者耦合系统的时空变化特征。结果表明: 8 年间全省水资源-能源-粮食耦合系统和谐程度逐年提高; 各子系统发展特征不同, 但均呈现上升趋势, 水资源子系统和和谐度提升幅度最大, 粮食子系统次之, 能源子系统最小; 水资源子系统和和谐度波动上升, 粮食子系统发展水平较高且表现稳定, 能源子系统发展存在波动且稳定性较差。基于模糊多属性决策的和谐量化方法不仅能够解决指标量化中的不确定性问题, 而且通过耦合系统和谐评价结果, 为水资源、能源、粮食综合管理提供依据。

关键词:水资源-能源-粮食耦合系统; 和谐量化; 时空演变; 河南省

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



水资源、能源和粮食是支撑人类生存和发展的重要资源, 三者相互影响、不可分割^[1]。随着人口和经济的迅速增长, 水资源、能源、粮食供求压力日益凸显。我国水资源、能源、粮食消费量排名位居世界前列, 但人均水资源量仅有约 2 000 m³, 不足世界平均水平的 1/3; 耕地面积占世界总耕地面积的 7%, 但粮食消费量占比却达到了 27%; 与此同时, 我国能源消费总量和进口量也不断提升, 2018 年能源消费总量达到了 46.4 亿 t、净进口量达到 9.7 亿 t^[2-3]。我国粮食生产和能源开发对水资源有较高的依赖性, 但由于气候变化和人口增长, 水资源短缺问题日益严重, 进而威胁到能源和粮食安全。开展水资源-能源-粮食耦合系统评价, 对于促进水资源、能源和粮食协调发展及保障国家资源战略安全具有重要意义。

国内外学者针对水资源、能源、粮食的耦合系统研究主要集中在水资源-能源-粮食关联关系^[4-6]、水资源-能源-粮食安全评价^[7-8]及水资源-能源-粮食协同优化^[9-10]研究。其中: 李良等^[7]通过构建水资源-能源-粮食系统耦合模型定性分析了三者产生的污染情况; 王慧敏等^[8]基于压力-状态-响应模型, 分析了山东省水资源-能源-粮食耦合系统的安全等级; 孙才志等^[9]采用耦合协调度、空间数据分析等方法, 对中国各省份水资源-能源-粮食耦合系统安全进行了评价; 彭少明等^[10]引入协同原理, 采用多要素均衡智能算法对黄河流域的水资源-能源-粮食耦合系统的协同关系进行了模拟优化。

然而, 当前研究多集中在对水资源-能源-粮食关联关系分析、安全风险测度以及协同发展优化, 针对水资源-能源-粮食耦合系统各要素之间互馈关系

收稿日期: 2020-12-22 修回日期: 2021-03-09 网络出版时间: 2021-03-15

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20210315.1407.002.html>

基金项目: 中国农业科学院农业水资源高效安全利用重点开放实验室资助项目(2019AA01); 国家自然科学基金(51909239); 河南省重大公益性科技专项(201300311500)

作者简介: 于磊(1990—), 男, 山东临沂人, 副教授, 博士, 主要从事水资源-能源-粮食耦合系统分析研究。E-mail: yulei2018@zzu.edu.cn

的研究甚少,缺少系统全面地定量描述和谐发展状况和识别和谐发展的主要影响因子的研究,且研究方法主要依靠数据包络分析、耦合协调模型和系统动力学模型^[8,10-11],而这些模型大多侧重于单目标优化与水资源-能源-粮食总体协调、安全测度,无法表征单指标、单个子系统和谐发展程度,尤其是在水资源-能源-粮食耦合系统整体与个体之间的复杂性表征方面尚显不足。左其亭教授于 2009 年提出了定量研究和谐行为的和谐论理论方法,用以分析不同系统之间的和谐发展问题,如史树洁^[12]、罗增良^[13]等分别采用和谐量化方法分析了水资源、河湖水系与经济社会和谐关系,探究了主要影响因子。因此本文选用和谐理论方法研究水资源-能源-粮食耦合系统和谐发展问题。

河南省是中国古代中原农业文明的发祥地,有“中原粮仓”之称,并且地质构造复杂,能源储量丰富,然而水资源禀赋较弱,水资源总量处于全国较低水平。分析河南省水资源、能源、粮食之间的和谐关系,评估河南省水资源-能源-粮食耦合系统和谐发展水平,对于保障河南省水资源、能源和粮食安全及促进黄河流域生态保护和高质量发展重大国家战略实施具有重要意义。本文以河南省为研究区域,将和谐量化方法^[14-15]和模糊多属性决策方法^[16-17]相结合,选取 2011—2018 年水资源、能源、粮食等基础数据,研究能源开采、粮食生产与水资源利用之间的和谐关系,以期改善区域用水现状及促进可持续发展提供参考。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

河南省地处华北平原南部,具有良好的耕地条件,农田面积列全国第 2 名。截至 2018 年,河南省农业总产值达到 4 974 亿元,约占国内生产总值(GDP)的 10.4%,全年粮食产量 6 649 万 t,比上年增长 1.9%。与此同时,随着化肥、农药、农膜的大规模使用,不仅土地变薄,而且面源污染和白色污染更加严重^[18-19]。河南省相应的水资源储量先天不足,人均水资源量仅占全国平均水平的 1/5,而农业用水量占用水总量的半数以上,同时由于人类活动强烈,废污水排放量大,水环境污染严重。河南省也是我国重要的能源富集区,能源资源种类齐全、储量大、质量好,但开采过程中排放的废水、固体废物会对地下水水质造成影响。

1.2 数据来源

河南省水资源、能源和粮食产量数据来源于

2011—2018 年《中国统计年鉴》、《河南统计年鉴》、《中国环境统计年鉴》及河南省水资源公报。对于部分缺失数据采用相邻年份多年平均值法对缺失数据进行补充。

2 研究方法

文章主要通过指标体系构建、模糊语言确权、和谐程度量化等 3 部分确定水资源-能源-粮食耦合系统和谐度,大致流程见图 1。

2.1 构建指标体系

河南省水资源条件相对较差,且水资源空间分布差异显著,部分地市存在水资源短缺问题;目前河南省是粮食主产区,但能源开采和农业节水水平较低。分析河南省水资源状况、能源开采情况和粮食生产情况并参考相关文献^[9,10,20],筛选出 28 个指标,构建涵盖水资源、能源、粮食 3 个准则层的水资源-能源-粮食耦合系统评价指标体系,见表 1。其中,指标特征为逆向代表该指标值越大对耦合系统和谐程度越不利。

2.2 权重确定

2.2.1 模糊语言集

数据的不完整性和指标选择的主观性导致各个指标的重要程度具有不确定性和模糊性,而隶属函数可以对模糊概念进行定量描述。采用问卷调查的形式对相关学者和居民进行调查,引入模糊语言集和三角模糊数,将这些临界状态分为低、中和高 3 个级别,以避免隶属度确定的主观性。其中,表 2 展示了 6 种常见的 α -水平截集,并将三角模糊数转化为相应的区间数。

2.2.2 模糊多属性决策

基于模糊多属性决策方法,将各指标赋予权重,得到水资源、能源、粮食 3 个子系统的和谐度。假设有 $i(i=1,2,\dots,m)$ 个水资源-能源-粮食耦合系统和谐度评价备选指标,这些指标可以被定义为以下模糊集

$$\varphi = \{(x_i, \mu(x_i)) | i=1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

式中: $\mu(x_i)$ 代表与第 i 个指标相关联的决策层的隶属度。通过将各个指标赋予权重而得到水资源、能源和粮食子系统隶属度,它们的定义为

$$\mu(x_i) = \text{Agg}\langle f[\mu(x_i), \omega_1], f[\mu(x_i), \omega_2], \dots, f[\mu(x_i), \omega_j] \rangle \quad (2)$$

式中: ω_j 表示某决策层第 j 个指标的权重。定义

函数

$$f(a, \omega) = a^{1/\omega} \quad (3)$$

满足当 $\omega \rightarrow 0$ 时, $f(a, \omega) \rightarrow +\infty$ 。准则层隶属度可以根据以下公式确定:

$$\mu_j(x_i) = 1/j[\mu_1(x_i)^{1/\omega_1} + \mu_2(x_i)^{1/\omega_2} + \dots + \mu_j(x_i)^{1/\omega_j}] \quad (4)$$

因此,可以获得对应每一个水平截集 α 下的上界和下界结果。

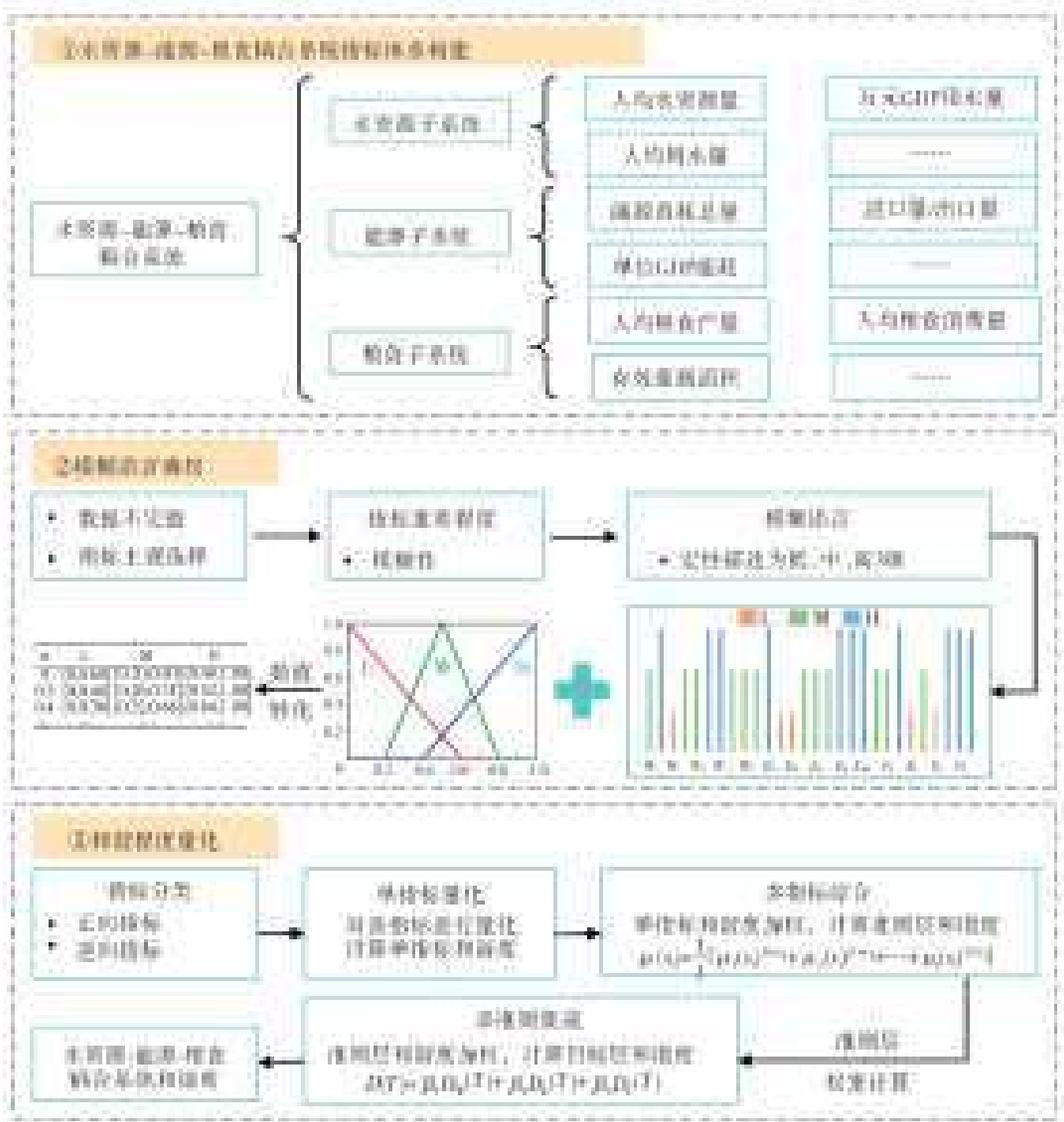


图1 计算流程

Fig. 1 Computational flow chart

2.3 和谐量化方法

和谐评价方法最初是用来计算人水和谐关系的定量化评价方法^[14],之后在水安全、社会发展评价、水质评价等方面均有应用。该方法通过建立一套指标体系,并按照一定的计算规则,得到反映区域和谐程度的综合指数,以表征待评价对象的和谐程度。通过评估,可以反映出总体和谐程度及其所处的状态和水平,以及时空变化规律,为和谐问题评价、寻找和谐策略提供依据。将和谐评价方法应用至水资源-能源-粮食耦合系统中,分析水资源、能源和粮食三者关系,定量评价其和谐程度。该方法主要步骤如下。

2.3.1 单指标量化

各个指标均有一个和谐度(记作 D),为了便于计算和对比分析,单指标和谐度定量描述可分别对正向指标、逆向指标采用分段线性隶属函数量化方法进行量化,把各指标统一映射到 $[0, 1]$ 上。不同特征指标的和谐度可分别用相应公式计算得到^[21],对于第 K 个指标,正向指标的和谐度计算公式见式(5),逆向指标的和谐度计算公式见式(6),参考已有相关文献^[12,20-21]、国家规范,并考虑地区特性和实际状况,确定各指标和谐度节点值 $a \sim e$,具体取值见表1。

表 1 水资源-能源-粮食耦合系统评价指标

Tab.1 Evaluation index of water-energy-food coupling system

准则层	指标层	指标特征	最差值(a)	较差值(b)	及格值(c)	较优值(d)	最优值(e)
水资源子系统	人均用水量 W_1/m^3	逆向	500	400	250	200	150
	人均水资源量 W_2/m^3	正向	100	250	500	750	1 000
	生态用水比例 $W_3/\%$	正向	1	2	3	4	5
	万元 GDP 用水量 W_4/m^3	逆向	1 000	400	200	70	30
	污水处理率 $W_5/\%$	正向	40	60	80	90	100
	废水排放量 $W_6/亿 t$	逆向	100	60	40	20	10
	万元工业增加值用水量 W_7/m^3	逆向	200	100	60	40	10
	COD 排放量 $W_8/万 t$	逆向	500	200	100	50	10
	氨氮排放量 $W_9/万 t$	逆向	20.0	15.0	10.0	5.0	2.5
能源子系统	能源消耗标准煤总量 $E_1/亿 t$	逆向	4.0	3.0	2.0	1.5	1.0
	一次性能源生产标准煤总量 $E_2/亿 t$	正向	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0
	进口量/出口量 $E_3/\%$	逆向	5	4	3	2	1
	第三产业能耗占比 $E_4/\%$	正向	2.5	5	10	15	20
	能源加工转换效率 E_5	正向	25	35	50	70	90
	能源生产弹性系数 E_6	正向	0.2	0.5	0.7	1.0	2.0
	能源消费弹性系数 E_7	逆向	2.0	1.0	0.7	0.5	0.2
	万元单位 GDP 能耗标准煤 E_8/t	逆向	5.0	3.0	1.0	0.5	0.3
	农业机械总动力 $E_9/(万 kW \cdot h)$	正向	5 000	7 500	10 000	11 000	12 000
农村用电量 $E_{10}/(亿 kW \cdot h)$	逆向	450	400	350	300	250	
粮食子系统	人均粮食消费量 F_1/kg	逆向	200	150	120	100	90
	人均粮食产量 F_2/kg	正向	200	300	400	500	600
	单位面积产量 $F_3/(t \cdot hm^{-2})$	正向	4	5	6	7	8
	有效灌溉面积 $F_4/万 hm^2$	正向	400	450	500	550	600
	化肥农药使用量 $F_5/万 t$	逆向	15	12	10.5	9.0	8.0
	粮食消费价格指数 F_6	逆向	120	110	100	90	80
	亩均用水量 F_7/m^3	逆向	200	175	150	125	100
	农业碳排放 F_8/t	逆向	15.0	12.5	10.0	7.5	5.0
	亩均 GDP 产值 $F_9/元$	正向	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000

表 2 不同 α 水平截集下与模糊语言相关联的区间值

Tab.2 Interval values associated with fuzzy language under different α -cut levels

α	L	M	H
0	[0,0.60]	[0.20,0.80]	[0.40,1.00]
0.2	[0,0.48]	[0.26,0.74]	[0.52,1.00]
0.4	[0,0.36]	[0.32,0.68]	[0.64,1.00]
0.6	[0,0.24]	[0.38,0.62]	[0.76,1.00]
0.8	[0,0.12]	[0.44,0.56]	[0.88,1.00]
1.0	[0,0]	[0.50,0.50]	[1.00,1.00]

$$D_k = \begin{cases} 0 & x_k \leq a_k \\ 0.3 \frac{(x_k - a_k)}{(b_k - a_k)} & a_k < x_k \leq b_k \\ 0.3 + 0.3 \frac{(x_k - b_k)}{(c_k - b_k)} & b_k < x_k \leq c_k \\ 0.6 + 0.2 \frac{(x_k - c_k)}{(d_k - c_k)} & c_k < x_k \leq d_k \\ 0.8 + 0.2 \frac{(x_k - d_k)}{(e_k - d_k)} & d_k < x_k \leq e_k \\ 1 & e_k < x_k \end{cases} \quad (5)$$

$$D_k = \begin{cases} 1 & x_k < e_k \\ 0.8 + 0.2 \frac{(d_k - x_k)}{(d_k - e_k)} & e_k \leq x_k < d_k \\ 0.6 + 0.2 \frac{(c_k - x_k)}{(c_k - d_k)} & d_k \leq x_k < c_k \\ 0.3 + 0.3 \frac{(b_k - x_k)}{(b_k - c_k)} & c_k \leq x_k < b_k \\ 0.3 \frac{(a_k - x_k)}{(a_k - b_k)} & b_k \leq x_k < a_k \\ 0 & a_k \leq x_k \end{cases} \quad (6)$$

2.3.2 多指标综合

基于上述单指标和谐度及权重计算结果,可通过加权处理分别计算水资源、能源、粮食子系统的和谐度,采用公式(4)进行计算。

2.3.3 多准则集成

根据和谐量化的全面性准则,地区水资源-能源-粮食耦合系统整体和谐度需要综合考虑水资源、能源、粮食等多个方面,因此,进一步运用多准则集成方法计算耦合系统和谐度,公式为

$$D(T) = \beta_1 D_w(T) + \beta_2 D_E(T) + \beta_3 D_F(T) \quad (7)$$

式中: $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 分别为水资源、能源、粮食 3 个子系统和谐度的权重; $D_w(T), D_E(T), D_F(T)$ 分别为水资源、能源、粮食子系统和谐度; $D(T)$ 为水资源-能源-粮食耦合系统整体和谐度。由于水资源、能源、粮食 3 个子系统相互联系,不可分割,重要程度相当,故假定 3 个子系统重要程度一致,权重相同(均取 1/3)。基于上述量化步骤所得的指标、子系统、耦合系统和谐度,划分和谐等级标准判断其和谐程度^[21],和谐度 0 为完全不和谐,(0, 0.2) 为基本不和

谐,[0.2, 0.4) 为较不和谐,[0.4, 0.6) 为接近不和谐,[0.6, 0.8) 为较和谐,[0.8, 1.0) 为基本和谐,1.0 为完全和谐。

3 结果分析

各指标的重要程度评判结果如表 3 所示,以 2011—2018 年数据为基础($t=1$ 代表 2011 年,以此类推),以不同 α 水平截集代表不同决策者态度,对水资源、能源、粮食 3 个子系统和谐度及水资源-能源-粮食耦合系统和谐度进行分析。

表 3 各指标重要程度
Tab. 3 Importance degree of each index

指标	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	W_7	W_8	W_9	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
重要程度	M	H	L	M	M	H	H	M	M	M	H	L	L	M
指标	E_6	E_7	E_8	E_9	E_{10}	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	F_8	F_9
重要程度	M	M	H	H	H	M	M	H	L	M	L	H	H	H

注:表中 L、M、H 分别代表低等重要、中等重要、高等重要。

3.1 各子系统和谐分析

3.1.1 水资源子系统分析

图 2 表述了河南省 2011—2018 年在不同 α 水平截集情况下水资源子系统和谐度的区间解,结果显示,河南省水资源子系统和谐程度总体呈上升趋势,表明河南省水资源状态持续向好。其中,2012 年水资源子系统和谐程度最差,其原因可能是氨氮排放量较多、人均水资源量骤减(人均水资源量由

2011 年的 349.03 m^3 降为 282.58 m^3)。随着最严格水资源管理制度的实施,污水处理效率提高以及万元 GDP 用水量下降,水资源子系统和谐度在 2012—2018 年逐渐变好。研究期内,虽然人均用水量和污水排放量有所升高,但是生态用水比例提升,万元 GDP 用水量和万元工业 GDP 增加值用水量减少近一半,COD 排放量和氨氮排放量也大幅度减少,使得 2018 年水资源子系统和谐程度最高。

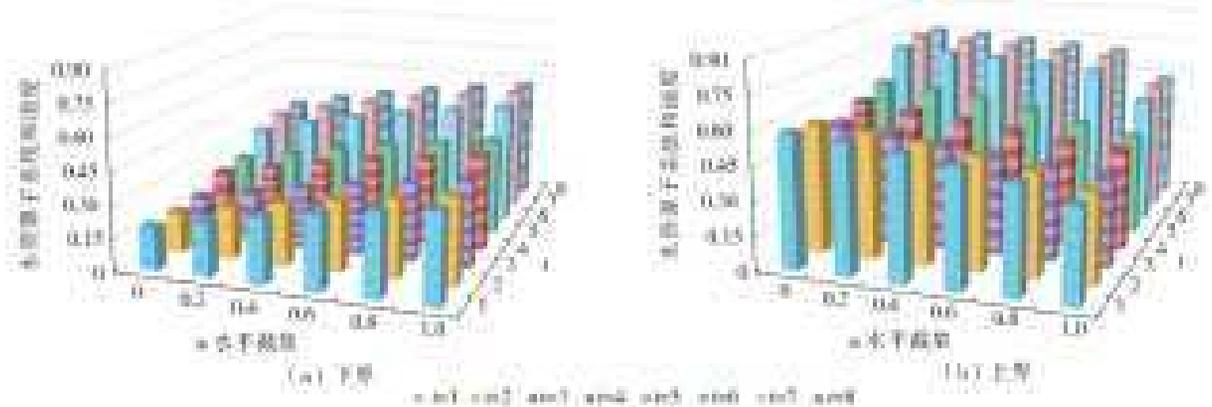


图 2 在不同 α 水平截集下水资源子系统和谐度的区间解

Fig. 2 Interval solutions of harmony degrees in water resource system under different α -cut levels

3.1.2 能源子系统分析

河南省 2011—2018 年在不同 α 水平截集情况下能源子系统和谐度的区间解,见图 3。结果表明,河南省能源子系统和谐程度在 2015 年达到最大值,和谐程度最好,随后几年和谐程度变差,并在 2018 年降低为最小值,其总体变化趋势为上升—波动—下降。2012 年能源子系统和谐程度较往年有所提

升,其主要原因是能源消费弹性系数和能源生产弹性系数有较大改善,并且农业机械总动力有微量提升。2012—2015 年能源子系统和谐程度只存在较小波动。2016 年之后,随着产业结构的变化,第一产业比重下降,农业机械总动力下降,并且随着生活水平的提高,用电量进一步增多,造成能源子系统和谐程度下降。

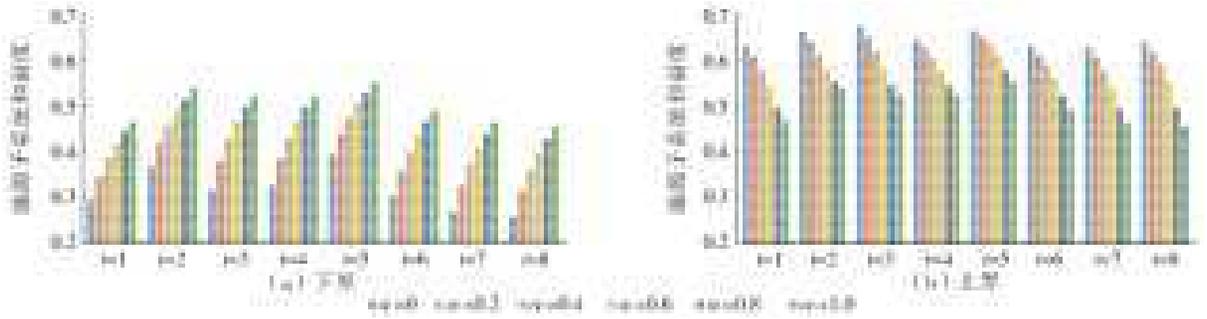


图 3 在不同 α 水平截集下能源子系统和谐度的区间解

Fig. 3 Interval solutions of harmony degrees in energy system under different α -cut levels

3.1.3 粮食子系统分析

由图 4 可知河南省 2011—2018 年在不同 α 水平截集情况下粮食子系统和谐度的区间解。河南省粮食子系统和谐程度总体呈阶段性上升趋势,2014 年和 2018 年有较大提升,在 2011—2014 年和 2014—2017 年粮食子系统和谐程度不断波动,并在 2018 年和谐度达到最大值。研究年份内,2012 年粮

食子系统和谐程度最差,其原因是亩均用水量增多,并且农用塑料薄膜使用量上升。在 2014 年,人均粮食产量、有效灌溉面积等均有提升,和谐度增加。2018 年河南省构建推进乡村振兴“1+1+N”政策体系,随着农业技术的升级,化肥及农药用量减小,农业节水技术初现成效,亩均用水量下降,粮食子系统和谐度再次得到提升。

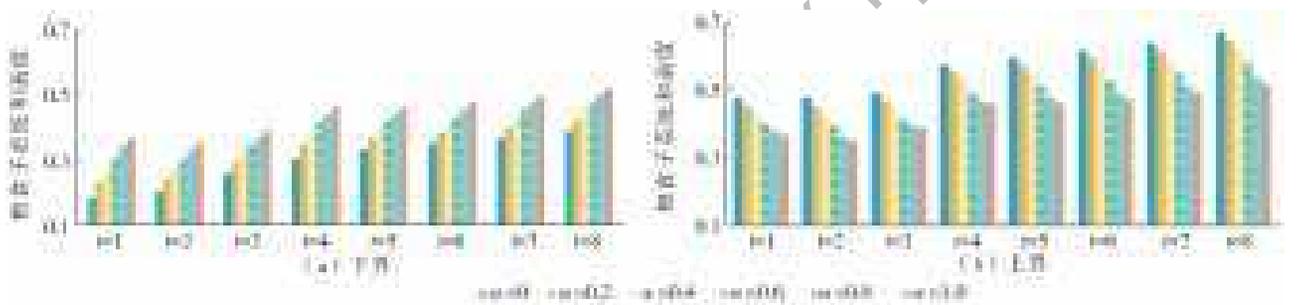


图 4 在不同 α 水平截集下粮食子系统和谐度的区间解

Fig. 4 Interval solutions of harmony degrees in food system under different α -cut levels

3.1.4 水资源-能源-粮食耦合系统分析

河南省 2011—2018 年在不同 α 水平截集下水资源-能源-粮食耦合系统和谐度的区间解见图 5。结果表明,河南省水资源-能源-粮食耦合系统和谐程度逐年上升,在 2018 年达到最大。其中:在

2011—2014 年,水资源子系统和谐度降低、粮食子系统和谐度波动,能源子系统和谐度上升,造成耦合系统和谐度总体呈现上升趋势;后期能源子系统和谐度下降,水资源-能源-粮食耦合系统和谐度上升与水资源子系统和粮食子系统关系密切。

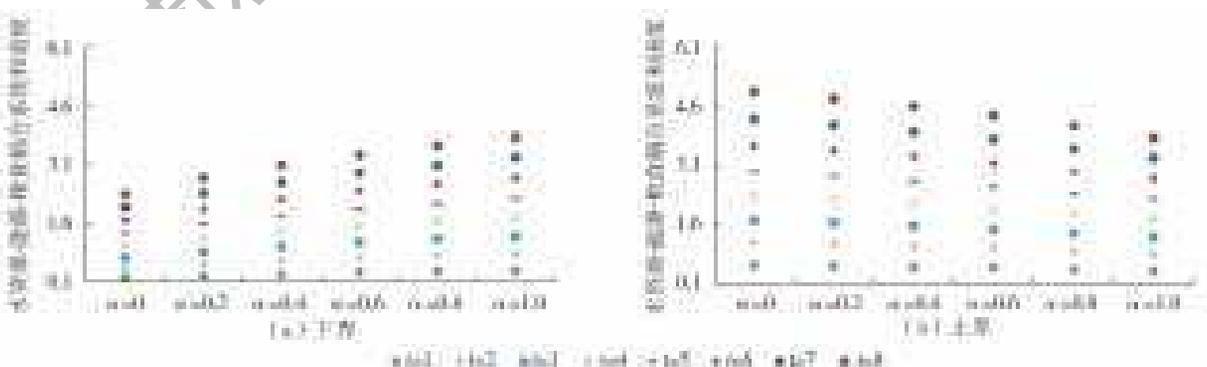


图 5 在不同 α 水平截集下水资源-能源-粮食耦合系统和谐度的区间解

Fig. 5 Interval solutions of harmony degrees in water-energy-food coupling system under different α -cut levels

3.2 建议

(1)河南省水资源-能源-粮食耦合系统和谐关系虽然持续向好,但整体水平仍需提高。水资源子

系统方面,人均水资源量年际波动较大,为保障水资源子系统持续向好,未来需要发展节水型社会,采取高效的节水措施,提高用水效率;粮食子系统方面,

要通过改善粮食生产方式向集约化现代化发展,减少农药化肥用量,采用喷、滴灌等节水措施,以减轻粮食生产对水资源的压力。

(2)2016年之后河南省能源子系统和谐度下降,因此,可以通过优化能源生产结构来改善水资源、能源、粮食和谐关系,通过技术创新来提升能源利用效率,减少煤炭等能源用量,取缔高污染企业,减少重化工业的能源消耗。未来需将三者考虑为一个整体,不可单独割裂进行治理,要确保水资源、能源、粮食3个子系统不以牺牲其他准则层效益来实现自身发展,使其为经济社会发展提供长远稳定的支撑。

4 结论

本文基于和谐量化法和模糊多属性决策法,利用河南省2011—2018年水资源、能源、粮食等基础数据,定量计算了水资源-能源-粮食耦合系统和谐程度,并进一步分析其时间差异性得出如下结论:

(1)河南省水资源-能源-粮食耦合系统和谐程度逐年上升,在2018年达到最大值,和谐程度最好,在研究年份内,前期和谐度提升主要受能源子系统影响,后期与粮食和水资源子系统有关;

(2)各子系统和谐程度最好的为粮食子系统,和谐度在研究期内逐步提升,相对而言,水资源及能源子系统和谐度均存在下降期,各子系统及耦合系统和谐程度在研究期内持续呈现向好态势;

(3)应用模糊多属性决策与和谐量化法相结合的方法,可以处理指标权重分配过程中重要程度模糊和决策者的主观感知所产生的不确定信息等问题,同时,以和谐量化法来衡量评价结果的方法,不仅能综合考虑复杂信息,而且能认识到指标之间的细微差异,使决策者更容易识别不利发展因素。

参考文献(References):

- [1] 王雨,王会肖,杨雅雪,等.黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟[J].水利水电科技进展,2020,40(4):8-15. (WANG Y, WANG H X, YANG Y X, et al. System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang Province[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(4): 8-15. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2020. 04. 002.
- [2] 李桂君,黄道涵,李玉龙.中国不同地区水-能源-粮食投入产出效率评价研究[J].经济社会体制比较,2017(3):138-148. (LI G J, HUANG D H, LI Y L. Evaluation on the efficiency of the input and output of water-energy-food in different regions of China[J]. Comparative Economic & Social Systems, 2017(3): 138-148. (in Chinese)) DOI: 1003-3947 (2017) 03-0138-11.
- [3] 国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2019. (National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019. (in Chinese))
- [4] HOFF H. Understanding the nexus. Background paper for the Bonn 2011 Conference: the water energy and food security nexus[C]. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011: 4-51.
- [5] BAZILIAN M, ROGNER H, HOWELLS M, et al. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach[J]. Energy Policy, 2011, 39(12): 7896-7906. DOI: 10. 1016/j. enpol. 2011. 09. 039.
- [6] 刘倩,张苑,汪永生,等.城市水-能源-粮食关联关系(WEF-Nexus)研究进展:基于文献计量的述评[J].城市发展研究,2018,25(10):4-17,25. (LIU Q, ZHANG Y, WANG Y S, et al. Urban WEF-nexus toward sustainable development: A bibliometric review[J]. Urban Development Studies, 2018, 25(10): 4-17, 25. (in Chinese)) DOI: 1006-3862 (2018) 10-0004-15.
- [7] 李良,毕军,周元春,等.基于粮食-能源-水关联关系的风险管控研究进展[J].中国人口·资源与环境,2018,28(7):85-92. (LI L, BI J, ZHOU Y C, et al. Research progress of regional environmental risk management: from the perspectives of food-energy-water nexus[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(7): 85-92. (in Chinese)) DOI: 10. 12062/cpre. 20180203.
- [8] 王慧敏,洪俊,刘钢.“水-能源-粮食”纽带关系下区域绿色发展政策仿真研究[J].中国人口·资源与环境,2019,29(6):74-84. (WANG H M, HONG J, LIU G. Simulation research on different policies of regional green development under the nexus of water-energy-food[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(6): 74-84. (in Chinese)) DOI: 10. 12062/cpre. 20190125.
- [9] 孙才志,阎晓东.中国水资源-能源-粮食耦合系统安全评价及空间关联分析[J].水资源保护,2018,34(5):1-8. (SUN C Z, YAN X D. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food nexus coupling system in China[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5): 1-8. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1004-6933. 2018. 05. 01.
- [10] 彭少明,郑小康,王煜,等.黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化[J].水科学进展,2017,28(5):681-690. (PENG S M, ZHENG X K, WANG Y. Study on water-energy-food collaborative optimization for

- Yellow River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(5): 681-690. (in Chinese) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2017. 05. 005.
- [11] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 等. 北京市水-能源-粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真[J]. *管理评论*, 2016, 28(10): 11-26. (LI G J, LI Y L, JIA X Q, et al. Establishment and simulation study of system dynamic model on sustainable development of water-energy-food nexus in Beijing[J]. *Management Review*, 2016, 28(10): 11-26. (in Chinese) DOI: 10. 14120/j. cnki. cn11-5057/f. 2016. 10. 002.
- [12] 史树洁, 左其亭, 王亚迪. 襄阳市河湖水系-经济社会发展和谐量化分析[J]. *水电能源科学*, 2017, 35(3): 35-39. (SHI S J, ZUO Q T, WANG Y D. Quantitative analysis of harmony between river-lake water system and socio-economic development in Xiangyang City [J]. *Water Resources and Power*, 2017, 35(3): 35-39. (in Chinese) DOI: 1000-7709(2017)03-0035-05.
- [13] LUO Z L, ZUO Q T. Evaluating the coordinated development of social economy, water, and ecology in a heavily disturbed basin based on the distributed hydrology model and the harmony theory[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574, 226-241. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2019. 04. 042.
- [14] 左其亭. 人水和谐论及其应用研究总结与展望[J]. *水利学报*, 2019, 50(1): 135-144. (ZUO Q T. Summary and prospect of human-water harmony theory and its application research[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2019, 50(1): 135-144. (in Chinese) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20180783.
- [15] 左其亭, 刘欢, 马军霞. 人水关系的和谐辨识方法及应用研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(11): 1363-1370, 1379. (ZUO Q T, LIU H, MA J X. Research on identification methods and applications for harmony of human-water relationship[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(11): 1363-1370, 1379. (in Chinese) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20151293.
- [16] XUE J, VAN G, RENIERS G, et al. Multi-attribute decision-making method for prioritizing maritime traffic safety influencing factors of autonomous ships' maneuvering decisions using grey and fuzzy theories [J]. *Safety Science*, 2019, 120: 323-340. DOI: 10. 1016/j. ssci. 2019. 07. 019.
- [17] 葛婷, 陈艳波, 汪颖翔. 基于三角模糊多属性决策的配电网投资效益评价[J]. *电网与清洁能源*, 2018, 34(10): 12-20. (GE T, CHEN Y B, WANG Y X. Investment benefit evaluation of the distribution network based on triangular fuzzy multiple attribute decision making[J]. *Power System and Clean Energy*, 2018, 34(10): 12-20. (in Chinese) DOI: 1674-3814 (2018) 10-0012-09.
- [18] 张海朋, 何仁伟, 李江苏. 脱钩视角下河南省城乡人口与建设用地的耦合协调研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2020, 36(2): 83-92. (ZHANG H P, HE R W, LI J S. Coupling coordination status of urban and rural population and construction land in Henan Province from the perspective of decoupling[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2020, 36(2): 83-92. (in Chinese) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-0504. 2020. 02. 013.
- [19] 王帅, 赵荣钦, 杨青林, 等. 碳排放约束下的农业生产效率及其空间格局: 基于河南省 65 个村庄的调查[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2092-2104. (WANG S, ZHAO R Q, YANG Q L, et al. Agricultural production efficiency and spatial pattern under carbon emission constraint: Based on 65 villages of Henan Province[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2092-2104. (in Chinese) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20200905.
- [20] 刘晶, 刘翠善, 李潇, 等. 中国水-能源-粮食关联系统协同安全评价[J]. *水利水运工程学报*, 2020(4): 24-32. (LIU J, LIU C S, LI X, et al. Security evaluation of water-energy-food nexus system in China [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(4): 24-32. (in Chinese) DOI: 10. 12170/20190603009.
- [21] 左其亭. 和谐论: 理论·方法·应用. [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2016. (ZUO Q T. *Harmony theory: Theory, method and application*[M]. 2th ed. Beijing: China Science Press, 2016. (in Chinese))

Harmony evaluation of regional water-energy-food coupling system

YU Lei^{1,2,3}, GUO Jiahang², WANG Huili²

(1. *Farmland Irrigation Research Institute, CAAS / Key Laboratory of High-Efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China;*

2. *School of Water Conservancy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;*

3. *Zhengzhou Key Laboratory of Water Resource and Environment, Zhengzhou 450001, China)*

Abstract: The rapid development of regional economy has brought great pressure on water resource, energy, and food system. Evaluation of water resource, energy, and food is the key to promoting harmonious and sustainable development among the three systems. Chinese consumption of water resource, energy, and food ranks among the top in the world. Still, there are some prob-

lems, such as small per capita water resource and large water consumption in food production and energy exploitation. However, the issue of water resource shortage is becoming more and more serious. To promote the sustainable development of resource, it is of practical significance to carry out the harmonious evaluation of water-energy-food coupling system and to study its changing relationship.

To evaluate the multi-dimensional coupling system harmoniously, and to reduce the uncertainty of each index from the incomplete data and the subjectivity of evaluation index selection, a comprehensive evaluation index system of water resource, energy, and food based on the harmonious quantification model is proposed. It couples the fuzzy multi-attribute decision-making method with the harmonious quantization method, and the harmonious degree of the water-energy-food coupling system is determined according to the weight of fuzzy language and the harmonious quantification. In addition, the data of Henan Province from 2011 to 2018 are selected to analyze the development level and harmony degree of water-energy-food coupling system, and explore the spatio-temporal variation characteristics of each subsystem and the coupling system.

During the study years, the harmony degree of water-energy-food coupling system in the whole province increases annually. In the study years, the improvement of harmony degree in the early stage is mainly affected by the energy system, while the later stage is related to the food system and water resource system. The development characteristics of each subsystem are different, but the whole system presents an upward trend. Due to the improvement of water use efficiency, and the remarkable effect of pollution control, the harmony degree of water resource system fluctuates, which indicates that the state of water resource in Henan Province continues to improve. The harmony degree of the energy system reached the maximum in 2015, and the harmony degree is the best. However, with the change of industrial structure, the total power of rural machinery decreased, and with the increase of urban electricity consumption, the harmony degree of the system become worse, and the overall trend of change is upward, fluctuating, and downward. Because of the upgrading of agricultural technology, the increase of effective irrigation area and other factors, the harmony degree of food system shows a gradual upward trend, and reach the maximum value in 2018.

In general, the harmony degree of water resource system in Henan Province is the highest, followed by the food system and the energy system. The food subsystem has a relatively high development level and stable performance, while the energy subsystem has a fluctuating development and poor stability. The harmonious quantization method based on fuzzy multi-attribute decision-making can solve the uncertainty problem in index quantization. Meanwhile, the results can account for complex information and recognize the subtle differences between the indicators, making it easier for decision makers to identify the adverse development factors. The harmonious evaluation of the comprehensive system can support the management of water resource, energy and food system.

Key words: water-energy-food coupling system; harmony quantization; spatio-temporal evolution; Henan Province

(上接第 436 页)

The precipitation in the fault-watershed region is converted into surface runoff (SR), porous subsurface runoff (PSSR) and karstic subsurface runoff (KSSR) runoff in a certain proportion. Therefore, when the fault-watershed is used as the boundary of the Baotu Spring basin, it is necessary to consider the close hydraulic relationship between surface water and groundwater as well as the transformation relationship between them. Reasonable conversion of the water volume of each part can improve the accuracy of water balance calculation results. Combining with the law of water exchange in the fault-watershed region, the water balance in the spring basin is calculated by the traditional water balance method and the numerical simulation method. The calculation results of the two methods show that the replenishment, discharge and balance difference of the fault boundary spring basin are greater than that of the fault-watershed boundary spring basin. There are some differences in spring water balance under different boundary conditions, but the difference is small.

Key words: karst springs basin; boundary condition; water balance; numerical method