

基于投影寻踪模型的水-能源-粮食-人口系统安全评价

何立新^{1,2}, 周帅宇¹, 张 峥^{1,2}, 李志会¹

(1.河北工程大学 水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2.河北工程大学 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038)

摘要:河北省作为京津冀城市圈中不可或缺的一部分,其水、能源、粮食、人口等资源安全稳定对于整个区域经济和社会的发展尤为重要。为了深入了解河北省水-能源-粮食-人口系统的安全状况,将人口因素纳入水-能源-粮食系统进行分析,构建水-能源-粮食-人口系统的安全评价指标体系,运用基于麻雀算法改进的投影寻踪模型对河北省2010—2019年水-能源-粮食-人口系统安全进行时空演变综合评价。结果表明:在研究期,河北省水-能源-粮食-人口系统安全等级逐渐升高,各市的水-能源-粮食-人口系统安全差异性降低;河北省各市水-能源-粮食-人口系统安全等级值在1.32~3.95之间,说明该系统安全处于不安全、亚安全、安全3个等级。建议河北省根据自身资源优势,合理分配资源,实现水、能源、粮食和人口的协调发展。

关键词:人口因素;安全评价;水-能源-粮食;投影寻踪模型;河北省

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1000-1379.2024.04.012

引用格式:何立新,周帅宇,张峥,等.基于投影寻踪模型的水-能源-粮食-人口系统安全评价[J].人民黄河,2024,46(4):73-78.

Water-Energy-Food-Population System Security Evaluation Based on Projection Pursuit Model

HE Lixin^{1,2}, ZHOU Shuaiyu¹, ZHANG Zheng^{1,2}, LI Zhihui¹

(1.School of Water Resources and Hydropower, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2.Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: As an indispensable part of the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan circle, the security and stability of water resources, energy, food, population and other resources in Hebei Province are particularly important for the economic and social development of the whole region. Therefore, in order to deeply understand the security situation among water, energy, food and population systems in Hebei Province, population factors were included in the water-energy-food system for analysis, and a security evaluation index system of water-energy-food-population system was built. The spatial-temporal evolution of water-energy-food-population system in Hebei Province during 2010-2019 was comprehensively evaluated by using the projection pursuit model improved by Sparrow algorithm. The results show that during the study period, the security level of water-energy-food-population system in Hebei Province is gradually increased, and the security difference of water-energy-food-population system is decreased. The security level values of water-energy-food-population system in all cities of the province range from 1.32 to 3.95, indicating that the system has three levels of insecurity, sub-security and security. By analyzing the stability of water-energy-grain-population system, it is found that Hebei Province should rationally allocate resources according to its own resources advantages to realize the coordinated development of water, energy, food and population.

Key words: demographic factors; safety evaluation; water-energy-food; projection pursuit model; Hebei Province

0 引言

水、能源、粮食是维持社会发展的基础战略资源,三者之间相互影响、彼此关联。2011年世界经济论坛上,水、粮食和能源首次被视为一个整体的纽带关系,同年的波恩会议上,水、能源和粮食三位一体安全被视为可持续发展的必要路径^[1-2]。面对我国严峻的人口、资源和环境的关系,必须时刻关注水、能源和粮食三大基础资源的安全稳定,这是确保未来经济、社会、环境可持续发展所必须的。

水、能源、粮食是人类社会生产生活不可或缺的基础资源,它们的消耗与人口数量紧密相关。随着人口增长,能源和粮食生产不断增加,从而消耗了大量水资源,这种情况导致处理水可利用的能源减少,进而影响

粮食生产中的虚拟水总量。可见,人口增长加剧了水、能源、粮食等基础资源的消耗,因此有必要将人口因素纳入水-能源-粮食系统进行分析,建立水-能源-粮食-人口(W-E-F-P)系统。人口对水、能源、粮食作用机制如图1所示。

对于水、能源和粮食的关联研究可以从3个角度进行:第一,通过水-能源-粮食(W-E-F)系统的安全

收稿日期:2023-05-11

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点支持项目(U20A20316);河北省创新研究群体项目(E2020402074)

作者简介:何立新(1966—),男,宁夏石嘴山人,教授,博士,主要从事智慧水务与水安全研究工作

通信作者:张峥(1981—),男,甘肃白银人,副教授,博士,研究方向为水利信息化

E-mail: zhangzheng@hebeu.edu.cn

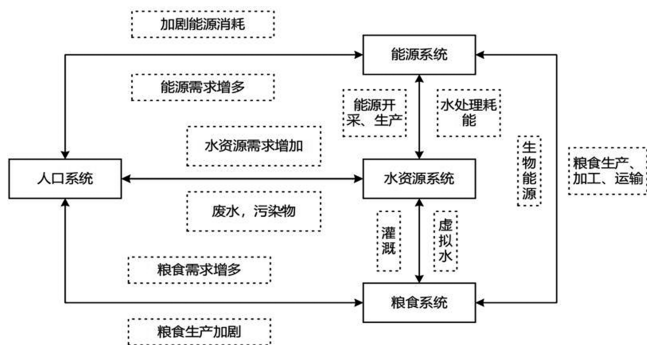


图1 人口对水、能源、粮食作用机制

水平以及耦合协调特征进行深入研究;第二,基于以往系统的变化规律对未来系统进行预测;第三,从经济、资源等外部因素来分析 W-E-F 耦合系统的影响因素,探究这些因素对系统的影响。王玉宝等^[3]对新疆地区的水、能源和粮食情况进行研究,运用投影寻踪模型对耦合系统进行评价。陈方红等^[4]以上海市为例,构建上海市 W-E-F 系统的综合评价指标体系,使用灰色预测模型对 2018—2025 年 W-E-F 耦合发展趋势进行预测。潘洪瑞等^[5]以山东省为例,采用耦合协调度模型分析 W-E-F 系统耦合协调变化特征。李成宇等^[6]使用空间计量模型,验证了社会、经济等外部因素会影响 W-E-F 系统的协调性。秦腾^[7]从 W-E-F 纽带关系视角,采用对数平均迪氏分解等方法,分析了全国用水量的影响因素。

在国内外的相关研究中,水、能源和粮食安全一直是学者关注的焦点,已经有许多研究取得了一定的成果,并且研究方法也在不断地拓展和完善。但是,在人口与水-能源-粮食之间的关系方面,仍然存在一定程度的模糊性,需要进一步深入分析人口与 W-E-F 系统之间的关系。因此,本文研究内容分为两个部分:首先探究人口与 W-E-F 之间的协同关系,构建 W-E-F-P 系统安全评价指标体系;其次以河北省为例,对 W-E-F-P 耦合系统进行协同安全评价。具体的,本文以河北省为研究对象,从单要素和双要素子系统安全两个角度对 W-E-F-P 系统安全进行研究,根据指标构建原则以及河北省资源情况,在构建 W-E-F-P 系统框架基础上,建立了河北 W-E-F-P 系统安全评价指标体系。而 W-E-F-P 系统是一个多指标高维的耦合系统,因此采用投影寻踪模型对 W-E-F-P 系统进行降维处理,但传统的投影寻踪模型在进行非线性优化时,操作复杂、运行缓慢,本文采用麻雀算法对投影寻踪模型进行优化,构建 SSA-PPE 模型,得到 2010—2019 年河北省各市 W-E-F-P 系统安全等级。

1 研究区域、研究方法与数据来源

1.1 研究区域概况

河北省具有优越的地理位置。一方面,河北省环抱首都北京,横跨华北、东北两大地区;另一方面,河北省水、能源、粮食、人口等资源错综复杂,具有显著的地区特色。河北省土地面积为 18.88 万 km²,2021 年常住人口为 7 448 万,生产总值为 4.04 万亿元(占全国比例为 3.53%)。2021 年河北省水资源总量和用水总量分别为 376.61 亿 m³和 181.87 亿 m³,占全国的比例分别为 6.36%和 3.06%;能源消耗总量为 32 590.1 万 tce,一次能源生产量为 6 949.5 万 tce,占全国能源消耗总量和一次能源生产总量的比例分别为 6.22%和 1.6%;河北省粮食生产总量为 3 825.1 万 t,占全国比例为 5.6%。河北省快速发展的同时,各种资源配置的不均衡日趋严重,严重制约了经济的均衡发展,因此评估 W-E-F-P 系统整体及其内部子系统的关系,有利于河北省的资源有效配置和社会经济秩序稳定。

1.2 W-E-F-P 系统安全评价指标体系

1.2.1 指标体系构建

水、能源、粮食、人口各子系统的安全决定 W-E-F-P 系统的安全程度,因此在构建 W-E-F-P 系统的安全评价指标体系时,应该综合考虑各子系统的特点选取对应指标。本文根据层次分析法原理,将 W-E-F-P 系统评价指标体系划分为目标层、准则层和指标层。按照综合性、科学性、真实性、可操作性的原则,把 W-E-F-P 系统的安全程度作为目标层,将水、粮食、能源、人口组成的 4 个单系统安全,以及由 4 个单系统相互组合的 6 个双系统安全作为准则层,在此基础上,参考已有的研究成果,根据河北省的资源特点,最终选取了 22 个指标作为指标层^[8-10],见表 1。

1.2.2 数据来源与处理

评价指标的原始数据来源于 2010—2019 年《河北省水资源公报》《中国水利统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国粮食统计年鉴》《河北省农村居民家庭人均粮食消费量情况》,其中部分缺失的数据用历史年份的拟合值进行代替。

1.3 基于麻雀算法的投影寻踪模型

投影寻踪^[11]是数据分析的一种方法,将高维数据降低为易于处理的低维数据。而麻雀算法^[12]是一种新型智能搜索算法,于 2020 年通过研究麻雀的觅食行为和反哺食行为提出的。本研究采用基于麻雀算法改进的投影寻踪模型(SSA-PPE),对河北省的 W-E-F-P

表1 水-能源-粮食-人口系统安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	指标类型
水-能源-粮食-人口系统的安全程度 A1	水资源安全 B1	产水系数 C1	正向
		万元 GDP 水耗 C2	逆向
		水资源开发利用程度 C3	逆向
	粮食安全 B2	口粮消费量 C4	正向
		生产面积成灾率 C5	逆向
	能源安全 B3	能源自给率 C6	正向
		可再生能源使用率 C7	正向
		万元 GDP 能耗 C8	逆向
	人口安全 B4	人口自然增长率 C9	逆向
		人口密度 C10	逆向
	水-粮食系统安全 B5	第一产业用水比例 C11	逆向
		灌溉水利用率 C12	正向
	能源-粮食系统安全 B6	第一产业能源利用率 C13	正向
		农业能源消耗量 C14	逆向
	水-能源系统安全 B7	单位能源用水量 C15	逆向
		能源耗水量 C16	逆向
	水-人口系统安全 B8	人均水资源量 C17	正向
		人均用水量 C18	逆向
	能源-人口系统安全 B9	人均能源生产量 C19	正向
		人均能源消费量 C20	逆向
粮食-人口系统安全 B10	人均粮食占有量 C21	正向	
	人均粮食消费量 C22	正向	

系统安全状况进行综合评价。该算法具有较快的收敛速度和较强的探索能力,可以使改进的模型更加精准地反映评价结果,具体建模步骤如下^[13-14]。

1)数据归一化处理。设定评价指标集:

$$\{x^*(i,j) | i=1 \sim n, j=1 \sim p\} \quad (1)$$

式中: $x^*(i,j)$ 为第*i*个样本的第*j*个评价指标的原值,*n*为样本数量,*p*为指标数量。

由于各项指标存在正负情况,所以需要对正向和逆向指标进行归一化处理。

正向性指标:

$$x(i,j) = [x^*(i,j) - x_{\min}(j)] / [x_{\max}(j) - x_{\min}(j)] \quad (2)$$

逆向性指标:

$$x(i,j) = [x_{\max}(j) - x^*(i,j)] / [x_{\max}(j) - x_{\min}(j)] \quad (3)$$

式中: $x_{\max}(j)$ 、 $x_{\min}(j)$ 分别为第*j*个评价指标中的最大、最小原值, $x(i,j)$ 为归一化后的第*i*个样本的第*j*个指标值。

2)投影目标函数的构建。投影值的表达式:

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(j)x(i,j) \quad (i=1 \sim n) \quad (4)$$

式中: $z(i)$ 为第*i*个评价区域的投影值, $a(j)$ 为投影方向。

投影指标函数为

$$Q(a) = S_z D_z \quad (5)$$

$$S_z = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n [z(i) - E(z)]^2}}{n-1} \quad (6)$$

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \{R - r(i,j)u[R - r(i,j)]\} \quad (7)$$

式中: S_z 为 $x^*(i,j)$ 的均方差; D_z 为 $x^*(i,j)$ 的区域密度; $E(z)$ 为 $\{z(i) | i=1,2,\dots,n\}$ 序列的期望值; R 为区域密度的窗口半径,取值为 $0.1S_z$; $r(i,j)$ 为两个不同样本之间相对距离; $u[R - r(i,j)]$ 为单位阶跃函数,当 $R \geq r(i,j)$ 时取值为1,否则为0。

3)投影指标函数完善。当设计方案明确时,因为投影方向决定投影指标函数 $Q(a)$,所以通过求解投影指标函数最大化来估计最佳投影方向。最大化目标函数:

$$\max Q(a) = S_z D_z \quad (8)$$

约束条件:

$$\sum_{j=1}^p a^2(j) = 1 \quad [0 \leq a(j) \leq 1] \quad (9)$$

传统方法较难处理最佳投影方向求解问题,本文采用麻雀算法求解非线性优化问题,该算法收敛速度快,拥有很强的寻优能力,计算结果符合所要求。

4)评价等级划分。把所得的最佳投影方向代入上述模型得出投影值,通过投影值和所设计各评价等级建立评价等级模型,即可求得相应的安全等级值。

2 河北省 W-E-F-P 系统安全综合评价

2.1 评价步骤及所得结果

以2010—2019年河北省11个市的22个指标数据作为样本,利用SSA-PPE模型得到最佳投影方向向量和投影值,代入等级评价模型得到各市W-E-F-P系统安全等级值。

2.1.1 评价步骤^[15-16]

1)构建W-E-F-P系统安全评价指标体系,利用式(2)和式(3)进行数据归一化处理。

2)确定目标函数。SSA算法将式(5)加负号作为目标函数,转换为求极小值问题,以下式作为适应度函数:

$$\begin{cases} \min Q'(a) = -S_z D_z \\ \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1 \quad [0 \leq a(j) \leq 1] \end{cases} \quad (10)$$

3)设置算法参数初始化。设置麻雀种群数量*G*、最大迭代次数*T*、预警值*S_T*、发现者比例*P_D*、加入者比例*F_D*、侦查者比例*S_D*。

4)计算发现者、加入者、侦察者的位置,并实时更新。

5)求得麻雀最优个体以及适应度最佳值,把麻雀最优个体所处位置设为最优位置,并进行保存。当达到所设置训练次数时,将适应度最优的麻雀个体输出,否则返回上一步,直到条件满足为止。

6)代入麻雀个体最优位置即最佳投影方向求出各市最佳投影值。

2.1.2 W-E-F-P 系统安全评价等级划分

在 W-E-F-P 系统的安全性指标划分中,存在不同的划分标准,本文将系统安全等级划分为非常不安全、不安全、亚安全、安全和非常安全 5 个等级。其中水资源开发利用程度、人口自然增长率、人口密度、人均水资源量、人均粮食占有量等指标参考了国际和国内标准;灌溉水利用率、生产面积成灾率等指标参考国家农业部、水利部发布的文件设定;万元 GDP 水耗、农业能源消耗量、人均能源消费量等指标由已有指标代入相关数据计算获取,其他指标参考已有指标进行划分^[17-18],具体的指标区间范围见表 2。

表 2 指标分级标准

指标	非常不安全	不安全	亚安全	安全	非常安全
C1	<0.01	0.01~0.1	0.1~0.3	0.3~0.6	>1
C2	280~340	180~280	80~180	40~80	0~40
C3	>0.6	0.5~0.6	0.4~0.5	0.3~0.4	<0.3
C4	<500	500~800	800~1 100	1 100~1 400	>1 400
C5	0.32~0.4	0.24~0.32	0.16~0.24	0.08~0.16	0~0.08
C6	<0.55	0.55~0.75	0.75~0.85	0.85~0.95	0.95~1
C7	<0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	>0.5
C8	>3.5	2~3.5	1~2	0.5~1	<0.5
C9	>0.25	0.25~0.2	0.2~0.15	0.15~0.1	0.1~0.05
C10	>1 000	1 000~500	500~100	100~50	50~25
C11	<0.8	0.8~1.1	1.1~1.4	1.4~1.7	>1.7
C12	<0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.8	>0.8
C13	>1	0.95~1	0.85~0.95	0.75~0.85	0.65~0.75
C14	>4 500	3 500~4 500	2 500~3 500	1 500~2 500	<1 500
C15	<2 500	2 500~6 000	6 000~9 000	9 000~12 000	>12 000
C16	>0.65	0.5~0.65	0.45~0.5	0.4~0.45	<0.4
C17	<500	500~1 000	1 000~2 000	2 000~3 000	>5 000
C18	700~800	550~700	400~550	250~400	150~250
C19	<0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	>2.0
C20	4.2~5	3.4~4.2	2.6~3.4	1.8~2.6	1~1.8
C21	<260	260~400	400~540	540~680	680~800
C22	<0.9	0.92~0.95	0.95~0.98	0.98~1	>1

评价样本选取各指标等级区间的右端点值,5 个等级取 5 个评价样本,在每个指标等级区间随机产生 95 个样本,以保证计算准确,代入 SSA-PPA 模型中,对已经归一化样本进行投影,求出最佳投影方向向量 $a = [0.065 4, 0.125 4, 0.286 2, 0.051 8, 0.078 6, 0.032 4, 0.257 1, 0.164 9, 0.354 3, 0.252 7, 0.324 1, 0.402 3, 0.048 5, 0.298 1, 0.315 6, 0.389 6, 0.265 2, 0.321 8, 0.336 2, 0.206 5, 0.367 6, 0.397 1]$, 相对应的投影值 $z(i) = [0.612 6, 1.256 4, 1.854 2, 2.364 8, 3.059 6]$, 将上

述 5 个状态分别对应 5 个等级,通过求出的投影值和相对应的等级值绘制出散点图,见图 2,求出河北 W-E-F-P 安全等级函数 $y = 1.662 9x - 0.042 31 (R^2 = 0.998 14)$ 。将标准等级值和拟合的计算等级值进行误差分析,所得的相对误差和绝对误差的平均值分别为 1.93%、0.053 4,表明线性拟合准确度较高,可以用于河北 W-E-F-P 系统安全评级等级划分。

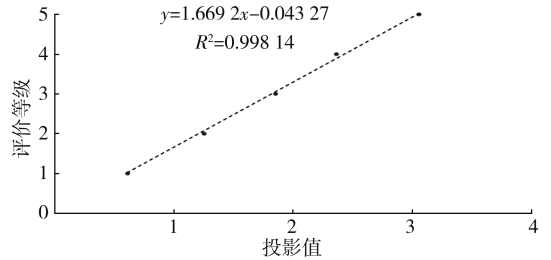


图 2 投影值与评价等级值的关系

2.2 W-E-F-P 系统安全评价结果

采用 SSA-PPE 模型,分别对河北省 11 个市 2010—2019 年的 W-E-F-P 系统安全评价指标进行综合投影后,对其结果进行筛选,最终得出逐年最佳投影方向向量,见表 3。

表 3 W-E-F-P 系统安全逐年最佳投影方向向量

指标	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
产水系数	0.46	0.43	0.44	0.15	0.17	0.33	0.38	0.24	0.16	0.17
万元 GDP 水耗	0.34	0.26	0.32	0.40	0.21	0.18	0.09	0.40	0.38	0.40
水资源开发利用程度	0.31	0.31	0.22	0.38	0.16	0.42	0.32	0.12	0.39	0.36
口粮消费量	0.46	0.43	0.44	0.15	0.17	0.33	0.38	0.24	0.16	0.17
生产面积成灾率	0.27	0.37	0.28	0.36	0.28	0.40	0.38	0.16	0.35	0.23
能源自给率	0.34	0.26	0.32	0.21	0.18	0.10	0.12	0.08	0.11	0.13
可再生能源使用率	0.12	0.10	0.38	0.35	0.23	0.36	0.45	0.47	0.52	0.58
万元 GDP 能耗	0.08	0.07	0.08	0.10	0.09	0.10	0.12	0.14	0.22	0.26
人口自然增长率	0.38	0.38	0.25	0.30	0.30	0.27	0.28	0.36	0.33	0.28
人口密度	0.31	0.31	0.22	0.38	0.16	0.42	0.32	0.12	0.39	0.36
第一产业用水比例	0.38	0.38	0.25	0.30	0.30	0.27	0.28	0.36	0.33	0.28
灌溉水利用率	0.17	0.14	0.26	0.20	0.17	0.11	0.08	0.10	0.07	0.12
第一产业能源利用率	0.16	0.24	0.14	0.11	0.17	0.12	0.07	0.09	0.10	0.09
农业能源消耗量	0.37	0.46	0.43	0.35	0.41	0.26	0.16	0.13	0.17	0.12
单位能源用水量	0.15	0.13	0.18	0.06	0.08	0.12	0.19	0.07	0.09	0.08
能源耗水量	0.05	0.08	0.06	0.11	0.15	0.14	0.13	0.07	0.06	0.07
人均水资源量	0.46	0.43	0.44	0.15	0.17	0.33	0.38	0.24	0.16	0.17
人均用水量	0.34	0.26	0.32	0.40	0.21	0.18	0.09	0.40	0.38	0.40
人均能源生产量	0.28	0.16	0.21	0.32	0.05	0.19	0.28	0.13	0.08	0.11
人均能源消费量	0.38	0.38	0.25	0.30	0.30	0.27	0.28	0.36	0.33	0.28
人均粮食占有量	0.31	0.31	0.22	0.38	0.16	0.42	0.32	0.12	0.39	0.36
人均粮食消费量	0.46	0.43	0.44	0.15	0.17	0.33	0.38	0.24	0.16	0.17

通过式(6),由最佳投影方向向量和各市不同指标的标准化值计算出 2010—2019 年河北各市的投影值,见表 4。

表4 河北各市水-能源-粮食-人口系统安全投影值

年份	秦皇岛市	张家口市	石家庄市	保定市	廊坊市	唐山市	邯郸市	衡水市	沧州市	邢台市	承德市
2010	1.5	1.13	1.52	1.28	0.70	1.25	1.37	1.1	1.45	0.77	2.02
2011	1.53	1.14	1.54	1.30	0.78	1.28	1.41	1.26	1.47	0.83	1.97
2012	1.51	0.90	1.55	1.38	0.86	1.30	1.43	1.31	1.55	0.88	2.05
2013	1.55	1.03	1.62	1.41	0.95	1.27	1.37	1.38	1.46	0.97	1.94
2014	1.57	1.00	1.64	1.45	1.03	1.32	1.46	1.41	1.55	1.02	1.99
2015	1.47	1.02	1.60	1.48	1.08	1.32	1.47	1.55	1.81	1.13	1.90
2016	1.49	1.11	1.66	1.55	1.18	1.37	1.50	1.70	1.97	1.30	1.86
2017	1.46	1.10	1.72	1.53	1.43	1.34	1.48	1.79	2.10	1.38	1.73
2018	1.44	1.04	1.75	1.57	1.50	1.40	1.55	1.86	2.18	1.41	1.69
2019	1.48	1.06	1.79	1.59	1.56	1.44	1.57	1.88	2.20	1.43	1.74

将投影值代入河北 W-E-F-P 系统安全等级函数 $y=1.6629x-0.04231$, 求出与之对应的安全等级值, 见表 5。2010—2019 年各市安全等级最小值和最大值分别为 1.13 和 3.62, 表明河北各市 W-E-F-P 系统安全性包括不安全、亚安全、安全 3 个等级。

表5 河北各市水-能源-粮食-人口系统安全等级值

年份	秦皇岛市	张家口市	石家庄市	保定市	廊坊市	唐山市	邯郸市	衡水市	沧州市	邢台市	承德市
2010	2.46	1.84	2.48	2.09	1.13	2.03	2.23	1.78	2.37	1.24	3.32
2011	2.51	1.86	2.52	2.12	1.25	2.08	2.31	2.05	2.41	1.34	3.24
2012	2.47	1.45	2.54	2.26	1.38	2.12	2.34	2.14	2.53	1.42	3.36
2013	2.54	1.67	2.65	2.31	1.54	2.07	2.24	2.26	2.38	1.57	3.18
2014	2.57	1.62	2.69	2.37	1.67	2.16	2.38	2.31	2.54	1.65	3.27
2015	2.41	1.65	2.62	2.42	1.75	2.15	2.41	2.54	2.96	1.83	3.12
2016	2.43	1.81	2.71	2.53	1.92	2.24	2.46	2.78	3.24	2.12	3.05
2017	2.39	1.79	2.82	2.51	2.34	2.19	2.42	2.94	3.45	2.25	2.84
2018	2.36	1.68	2.86	2.57	2.45	2.28	2.53	3.05	3.58	2.31	2.76
2019	2.42	1.72	2.94	2.61	2.56	2.36	2.57	3.08	3.62	2.34	2.85

3 结果分析

3.1 河北 W-E-F-P 系统安全时间变化情况

从总体变化来看, 大多数地级市的安全等级值在 2014 年后变化明显, 因此以 2014 年为界划分为 2 个阶段, 分别为 2010—2014 年、2015—2019 年, 各市在不同阶段安全等级变化见表 6。河北省 W-E-F-P 系统安全等级值的详细变化如图 3 所示。

表6 河北各市水-能源-粮食-人口系统安全等级变化

地级市	2010—2014 年	2015—2019 年	2010—2019 年
石家庄市	0.21	0.25	0.46
唐山市	0.13	0.20	0.33
秦皇岛市	0.11	-0.15	-0.04
邯郸市	0.15	0.19	0.34
邢台市	0.11	0.99	1.10
保定市	0.28	0.24	0.52
张家口市	-0.22	0.10	-0.12
承德市	-0.05	-0.42	-0.47
沧州市	0.17	1.08	1.25
廊坊市	0.54	0.81	1.43
衡水市	0.53	0.77	1.30

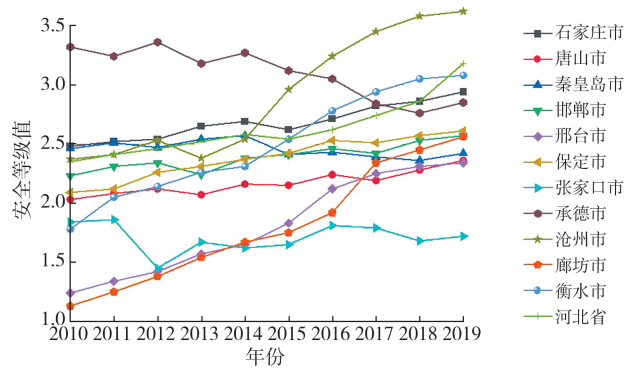


图3 河北各市水-能源-粮食-人口系统安全等级变化情况

由表 6 和图 3 可知, 2010—2019 年河北省 W-E-F-P 系统安全等级逐渐升高, 各市安全差异性降低。W-E-F-P 系统安全等级值下降的市有张家口市、承德市和秦皇岛市, 其中下降最明显的是承德市, 由 3.32 降到 2.85, 降幅为 14.1%; 其余地级市安全等级值均在上升, 衡水市和廊坊市上升趋势最为明显, 衡水市从 1.78 升至 3.08, 廊坊市从 1.13 升至 2.56。2010—2014 年, W-E-F-P 系统安全等级值上升的地级市有 9 个, 其中上升最快的是廊坊市, 由 1.13 升至 1.67, 升幅为 47.8%; 下降的地级市仅有张家口市和承德市两个, 其中下降最明显的是张家口市, 2014 年的安全等级值与 2010 年相比下降了 12%。2015—2019 年, 安全等级值上升的地级市有 8 个, 上升最快的是廊坊市, 下降幅度最大的是承德市。

3.2 河北 W-E-F-P 系统安全空间变化情况

以各市 W-E-F-P 系统安全空间分布情况为考虑标准, 选取 2010 年和 2019 年作为代表年, 使用 Arc-GIS10.6 对安全等级进行空间分布分析, 如图 4 所示。

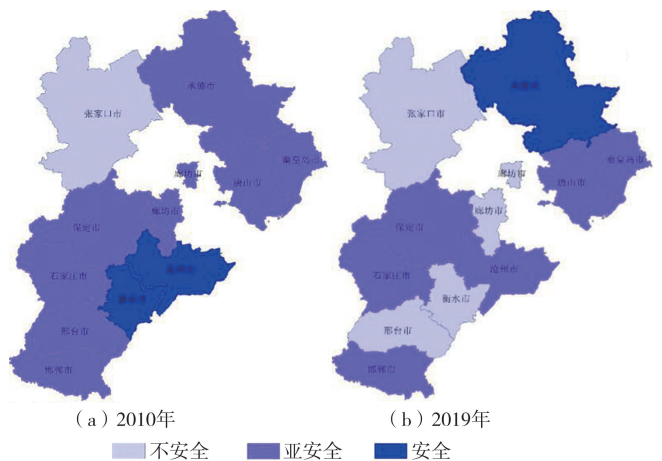


图4 河北各市 W-E-F-P 系统安全等级空间分布情况

2010 年, 处于安全等级的只有承德市, 邢台市、张家口市、廊坊市和衡水市为不安全等级, 剩下的市为亚安全等级, 不安全以及亚安全等级值在 1.13~2.48 之

间。2019年,处于安全等级的地级市有衡水市和沧州市,张家口市为不安全等级,其安全等级值为1.72,剩下的市为亚安全等级,安全等级值在2.34~2.94之间。

4 结论与建议

4.1 结论

以河北省为研究区域,通过分析水、能源、粮食和人口资源现状,构建W-E-F-P系统,运用SSA-PPE模型对2010—2019年河北W-E-F-P系统的安全等级状况进行综合评价,所得结论如下。

1)2010—2019年,河北省W-E-F-P系统安全等级逐渐升高,在2015年以后安全等级上升速度加快。各市W-E-F-P系统安全等级值在1.13~3.62之间,所以W-E-F-P系统处于不安全、亚安全、安全3个安全等级。

2)各市W-E-F-P系统安全时间演变特征:2010—2019年,除承德市、张家口市、秦皇岛市三市以外,河北省各市W-E-F-P系统安全等级呈上升趋势;2015—2019年,河北省大多地级市处于缓慢上升趋势。

3)各市W-E-F-P系统安全空间分布特征:2010—2014年,一直处于安全等级的是承德市,长期处于不安全等级状态的是张家口市和廊坊市,剩下的市基本处于亚安全等级;2015—2019年,仅有沧州市和张家口市分别长期处于安全等级和不安全等级,剩下的市大多维持在亚安全等级。

4.2 建议

1)优化能源结构,发展可再生能源。由于河北省大力发展第二产业,其碳排放总量和强度居高不下,因此需要加大清洁能源和新能源的发展力度,使能源利用效率得到显著提高。

2)促进水、人口、粮食和能源耦合系统的协调发展。根据河北省自身特点,加强水、粮食、人口、能源等各种资源的综合治理,确保各要素之间的平衡和稳定互动,推进河北省高质量发展。

3)提高水资源集约节约利用,推进节水农业的发展。随着人口增长和经济发展,水资源需求增长的挑战日益严峻,水资源短缺问题亟待解决。因此,要加强水资源保护,将用水总量控制在红线以下,优化用水结构并提高利用效率,降低农业用水比例,建设节水型社会,以实现水资源可持续利用。

参考文献:

[1] 孙才志,靳春玉,郝帅.黄河流域水资源-能源-粮食纽带

关系研究[J].人民黄河,2020,42(9):101-106.

[2] CHANG Y,LI G J,YAO Y,et al.Quantifying the Water-Energy-Food Nexus: Current Status and Trends[J].Energies,2016,9(2):1-17.

[3] 王玉宝,蒲傲婷,闫星,等.新疆水-能源-粮食系统安全综合评价[J].农业机械学报,2020,51(6):264-272.

[4] 陈方红,王丽川.基于水足迹理论的河北省粮食与能源生产对水资源的竞争关系研究[J].水电能源科学,2021,39(11):65-68,14.

[5] 潘洪瑞,姜欣,张保祥,等.山东省水-能源-粮食系统耦合协调关系变化研究[J].人民黄河,2023,45(6):64-68,72.

[6] 李成宇,张士强.中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2020,30(1):120-128.

[7] 秦腾.基于水-能源-粮食纽带关系的用水量分解与测度[J].人民黄河,2022,44(7):64-68,74.

[8] 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.

[9] 蒲傲婷.新疆水-能源-粮食系统安全评价及影响因素分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2020:22-24.

[10] 张洪芬,曾静静,曲建升,等.资源高强度流动区水、能源和粮食耦合协调发展研究:以京津冀地区为例[J].中国农村水利水电,2019(5):17-21,28.

[11] 付强,赵小勇.投影寻踪模型原理及其应用[M].北京:科学出版社,2006:3-10.

[12] 薛建凯.一种新型的群智能优化技术的研究与应用:麻雀搜索算法[D].上海:东华大学,2020:15-17.

[13] 王茜茜,周敬宜,李湘梅,等.基于投影寻踪法的武汉市“两型社会”评价模型与实证研究[J].生态学报,2011,31(20):6224-6230.

[14] 赵小勇,崔广柏,付强.投影寻踪分类模型在小流域治理效益评价中的应用[J].水利学报,2007,38(增刊1):436-439,448.

[15] 付华,刘昊.多策略融合的改进麻雀搜索算法及其应用[J].控制与决策,2022,37(1):87-96.

[16] 马晨佩,李明辉,巩强令,等.基于麻雀搜索算法优化支持向量机的滚动轴承故障诊断[J].科学技术与工程,2021,21(10):4025-4029.

[17] 汪嘉杨,刘韵,李祚泳,等.基于指标规范化概率神经网络的水安全评价模型[J].水力发电学报,2014,33(6):78-83,110.

[18] 徐丽璠.长江经济带水-能源-粮食关联系统协同安全研究[D].南京:南京林业大学,2021:27-30.

【责任编辑 张 帅】