

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.028

新疆水-能源-粮食系统安全综合评价

王玉宝^{1,2} 蒲傲婷^{1,2} 闫星³ 孙敬新^{1,2}

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100;
3. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 西安 710001)

摘要: 针对水-能源-粮食(WEF)系统纽带关系复杂,系统安全性的定量评价存在不足的问题,在分析 WEF 系统协同竞争机制的基础上,构建了系统安全评价指标体系和评价方法,以新疆各市域为例进行定量评价。结果表明:1997—2016 年,新疆 WEF 系统安全等级整体呈上升趋势;各市域 WEF 系统安全变化趋势呈现为 2 个阶段:1997—2009 年,除克拉玛依市和乌鲁木齐市外,其余市域系统安全等级均呈增加趋势,安全等级空间差异明显;2010—2016 年,一半市域系统安全等级呈下降趋势,安全等级空间差异减小。随着政策导向的变化和技术的不断进步,能碳强度始终是影响新疆 WEF 系统安全的重要因素,其他主要影响因素由农业用水和用能方面转变为可再生能源自给率和水资源安全,进而导致前后两阶段 WEF 系统安全空间格局差异明显。各市域子系统投影值排名反映出各市域驱动机制的差异,应结合各市域主要影响因素和区域特点,因地制宜采取有效措施,以提高各市域 WEF 系统的安全。

关键词: 水; 能源; 粮食; 安全; 新疆

中图分类号: TV213.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0264-09 OSID: 

Comprehensive Evaluation of Water – Energy – Food Nexus Safety in Xinjiang

WANG Yubao^{1,2} PU Aoting^{1,2} YAN Xing³ SUN Jingxin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China
3. Shaanxi Water and Power Design Institute, Xi'an 710001, China)

Abstract: Aiming at the complex relationship of water – energy – food (WEF) nexus and the lack of quantitative evaluation of system security, based on the analysis of the collaborative competition mechanism of WEF nexus, the system safety evaluation index system and evaluation method were constructed, and the quantitative evaluation was carried out by taking Xinjiang as examples. The results showed that the safety level value of WEF nexus in Xinjiang showed an increasing trend over time from 1997 to 2016. The trend of WEF nexus change in each prefecture presented two stages. Except for Karamay and Urumqi, the safety level values of WEF nexus were on the rise in other prefectures from 1997 to 2009, and the safety level values were significantly different. Half of the prefectures' safety level values showed a downward trend, and the spatial difference of safety level values were decreased from 2010 to 2016. With the change of policy orientation and the continuous improvement of technology, carbon intensity was always an important factor affecting the WEF nexus safety of Xinjiang. And the other major factors were shifted from water and energy use in agriculture to renewable energy self-sufficiency and water security. Changes in influencing factors led to the obvious difference in the spatial pattern of the WEF nexus security between the two stages. The projection value ranking of each sub-system reflected the difference of driving mechanism among different prefectures. Some effective measures combined with the main influencing factors and regional characteristics could be taken to improve the WEF nexus safety.

Key words: water; energy; food; safety; Xinjiang

0 引言

水资源、能源和粮食是人类生存、社会发展和文明进步的重要物质基础,任何一种要素的安全均直接关乎经济安全、社会稳定、生态安全乃至国家安全。三者之间相互作用、相互制约,各子系统安全紧密相关^[1-2]。

面对全球气候变暖、人口增长、可利用资源匮乏及资源需求量增加等多方面压力,通过构建水-能源-粮食(WEF)互动关联系统来应对相关问题的方法,引起了相关组织和学者的关注,并从不同角度对 WEF 系统开展研究,取得了初步成果^[3-7]。2011 年,WEF 系统“纽带关系”在德国波恩会议上正式提出,指出综合权衡 3 种资源的生产、消耗和管理,可避免因只基于单一资源战略而产生的严重后果^[8]。2013 年,联合国亚太经济社会理事会发布《亚太地区 WEF 纽带关系报告》,旨在考虑多方面因素,提出环境治理框架,综合优化 WEF 系统^[9]。2014 年,联合国粮农组织(FAO)出版了《WEF 报告:支持粮食安全和可持续农业的新途径》,从实现农业可持续发展和保障粮食安全的角度诠释“纽带关系”,并提出利用“纽带关系”进行分析决策的方法^[10]。国内外学者对 WEF 系统研究的成果大致可以分为 2 类^[11-12]:①定性阐释水资源、能源和粮食之间的关联关系,为跨部门有效管理提出相关建议^[13]。例如,文献[14-18]从环境可持续生计、资源可持续利用、粮食短缺和水资源管理的视角,通过构建 WEF 系统框架、跨领域研讨及问卷调查的方式,为维持研究区域 WEF 系统平衡提出一系列有效措施。②通过构建模型工具来描述水资源、能源和粮食等不同资源之间复杂的关联特征^[19-21]。其中,DAHER 等^[22]构建了一种 WEF 系统框架模型(WEF Nexus Tool 2.0),作为一个确定资源配置方案的平台;李桂君等^[23-24]通过分析 WEF 纽带关系的发展历程,从不同角度指出该领域的研究议题、分析工具和面临的挑战,并对北京市 WEF 系统进行了动力学仿真模拟及敏感性分析;彭少明等^[25]对黄河流域 WEF 系统的协同优化方案进行了分析;文献[26-28]分别针对全国和省域尺度进行了 WEF 系统的耦合协调发展水平定量评价。虽然大多数学者试图从不同的角度厘清 WEF 系统的纽带关系,但其最根本的目标均是保障 WEF 系统安全。目前,对于 WEF 系统安全研究的成果较少,由于 WEF 系统安全格局具有多元性和综合性的特点,如何科学客观地评价 WEF 系统安全,尚未有确定的理论和方法。

针对 WEF 纽带关系复杂、系统安全性需要考虑

各子系统安全及其之间的协同竞争关系等问题,本研究在探讨 WEF 系统耦合机制的基础上,基于层次分析法原理,建立系统安全性综合评价指标体系,并以我国 WEF 系统安全问题突出的新疆为例,采用实码加速遗传投影寻踪模型对 WEF 系统安全性进行评价,分析区域 WEF 系统安全的主要驱动因素,提出提高系统安全的策略,为区域资源、经济、社会可持续发展政策的制定提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区域概况

新疆位于我国西北边陲(图 1),现有 14 个地、州、市,全区国土面积约 $1.6 \times 10^6 \text{ km}^2$,耕地资源丰富,以种植小麦和玉米为主^[29]。作为中国最大的能源后备区,新疆拥有丰富的风能、太阳能等清洁能源,辽阔复杂的地貌下蕴藏着量大质优的矿产资源,其中煤、石油和天然气是新疆最具优势的矿产资源,煤炭预测资源总量为 2.19 万亿吨,占我国煤炭资源总量的 40.6%,已探明的石油储量达 56 亿吨,天然气预测资源总量超过 $1 \times 10^{13} \text{ m}^3$,均位居全国首位^[30]。但是,新疆也是我国典型的干旱地区,地处内陆,远离海洋,降水稀少,水资源时空分布不均,对工农业发展带来非常不利的影响^[31-32]。

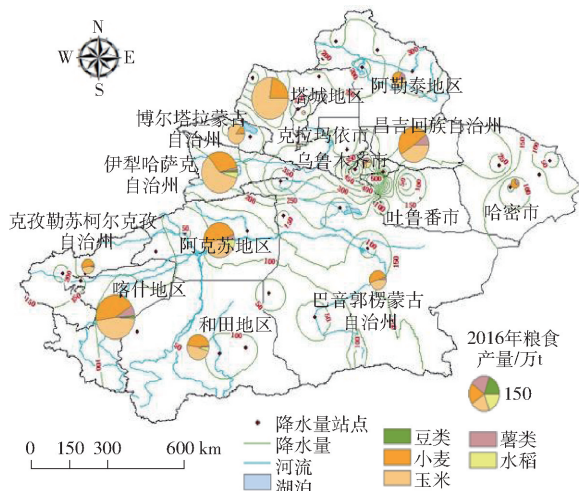


图1 新疆部分资源概况

Fig. 1 Overview of some resources in Xinjiang

1.2 区域 WEF 系统协同竞争机制与安全性综合评价指标的构建

1.2.1 WEF 系统协同竞争机制

水资源、能源和粮食三者不仅是资源的提供者,也是资源的消费者(图 2)。能源和粮食的生产加工过程离不开水资源消耗,同时能源为粮食生产及水资源的提取、运输、处理提供动力;粮食亦可作为虚拟水载体和生物质能源来缓解水资源和能源短缺的压力。由于 3 种资源之间的关系日益复杂,若在仅

考虑单一资源或割裂任何一种资源的情况下探讨资源安全问题,都只会得出片面的结果,甚至会带来错误的导向。为了更好地应对水、能源和粮食安全问题,维持三者平衡发展,综合考量 WEF 系统“纽带关系”是必然趋势。

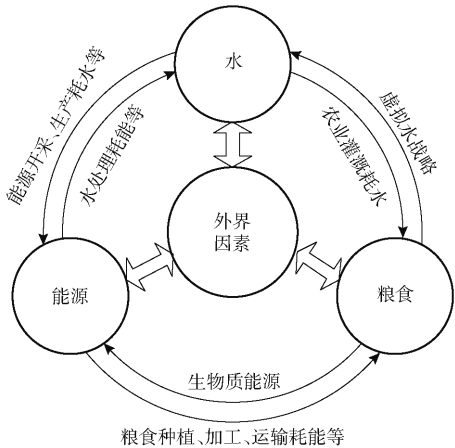


图2 水-能源-粮食系统“纽带关系”

Fig. 2 Water - energy - food nexus

1.2.2 WEF 系统安全性评价指标构建

(1) 层次体系

WEF 系统安全程度与其子系统安全密切相关，

因此, WEF 系统的安全从水资源安全、能源安全、粮食安全及两两组合构建的水-粮食系统、能源-粮食系统、水-能源系统的安全等多个方面来综合考察。其中, 两两组合构建的子系统指标可交叉反映 WEF 系统安全。遵循层次分析法原理, 将 WEF 系统安全评价指标体系分为 3 个层次: 第 1 层为目标层, 即 WEF 系统安全程度 (A1); 第 2 层为准则层, 包括水资源安全 (B1)、粮食安全 (B2)、能源安全 (B3)、水-粮食系统安全 (B4)、粮食-能源系统安全 (B5)、水-能源系统安全 (B6); 第 3 层为指标层 (C1 ~ C16)。

(2) 指标选择

选择指标时, 需要考虑区域实际情况, 尽可能列出可以描述对应准则层状态的所有指标, 保证考虑到各个方面的影响因素, 避免重要指标的遗漏。

(3) 指标体系确立

首先, 对所选的评价指标进行初步筛选, 借鉴已有的研究成果, 剔除明显不适当的指标, 并添加一些新的指标; 然后通过理论分析, 选择更符合理论的指标^[27,33-35]。最后根据实际情况和数据的可获取性, 确定科学合理的评价指标体系(表 1)。

表 1 EF 系统安全评价指标体系

Tab. 1 Water - energy - food nexus safety evaluation index system

目标层	准则层	指标层		指标类型
		指标	定义	
WEF 系统安全程度(A1)	水资源安全(B1)	人均水资源量(C1)/(m ³ ·人 ⁻¹)	水资源总量与总人数比值	正向
		水资源开发利用率(C2)/%	用水量占水资源总量百分比	逆向
		单位灌溉面积可利用水量(C3)/m ³	可利用水量与灌溉面积比值	正向
	粮食安全(B2)	口粮自给率(C4)/%	口粮产量占口粮使用量百分比	正向
		饲料粮自给率(C5)/%	饲料粮产量占饲料粮使用量百分比	正向
	能源安全(B3)	能源自给率(C6)/%	能源产量占能源使用量百分比	正向
		可再生能源使用率(C7)/%	可再生能源使用量占能源使用量百分比	正向
		能源生产力(C8)/(元·tce ⁻¹)	生产总值与能源消耗总量比值	正向
		能碳强度(C9)/(t·tce ⁻¹)	CO ₂ 排放量与能源消耗量比值	逆向
	水-粮食系统安全(B4)	农业用水比例(C10)/%	农业用水量占总用水量百分比	逆向
		灌溉水利用系数(C11)	一次灌水期间被农作物利用的净水量与水源渠首处总引进水量比值	正向
	能源-粮食系统安全(B5)	水分利用效率(C12)/(g·kg ⁻¹)	农田蒸散消耗单位质量水所制造的干物质量	正向
		农业能源利用率(C13)/%	农业总产值占农业总能耗百分比	正向
	水-能源系统安全(B6)	第一产业能源消耗比例(C14)/%	第一产业能耗占总能耗百分比	逆向
		单位能源耗水量(C15)/(m ³ ·kW ⁻¹)	单位能源所消耗的水量	逆向
		能源耗水量(C16)/m ³	单位能源耗水量与总能耗乘积	逆向

1.3 研究方法

1.3.1 评价模型概述

本研究选用实码加速遗传投影寻踪模型进行综合评价,该模型耦合了投影寻踪模型和实码加速遗传算法。投影寻踪模型的原理是将高维数据投影到低维子空间,然后利用低维空间上的投影向量分析

高维数据特征,在保证数据信息完整的情况下,以投影方向即不同权重组合的方式反映指标间的变化规律;同时利用实码加速遗传算法对全局寻优问题进行优化,不仅保证求得的指标权重可以更准确反映评价结果,并且解决了计算速度慢及易早熟收敛等缺点^[36-41]。

1.3.2 评价模型实现流程

(1) 样本评价指标集归一化处理

设定评价指标集

$$\{x^*(i,j) | i=1,2,\cdots,n; j=1,2,\cdots,p\} \quad (1)$$

式中 $x^*(i,j)$ ——第 i 个样本的第 j 个评价指标的原值

n ——样本个数 p ——指标个数

利用归一化处理消除评价指标的量纲并统一变化范围。

正向性指标

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

负向性指标

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

式中 $x(i,j)$ ——指标特征值归一化处理后的结果

$x_{\max}(j)$ ——样本中第 j 个指标原始值的最大值

$x_{\min}(j)$ ——样本中第 j 个指标原始值的最小值

(2) 投影目标函数构建

设 $a = (a(1), a(2), \cdots, a(p))$ 为投影方向单位长度向量, 样本 i 在该方向上的一维投影值为

$$z(i) = \sum_{j=1}^p a(i,j)x(i,j) \quad (i=1,2,\cdots,n) \quad (4)$$

评价要求投影值散布特征为小集中、大分散。因此投影目标函数为

$$Q(a) = S_Z D_Z \quad (5)$$

其中

$$S_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - E(z))^2}{n - 1}} \quad (6)$$
$$D_Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r(i,j)) u(R - r(i,j)) \quad (7)$$

$R = 0.1 S_Z$

式中 S_Z ——评价投影值的标准差

D_Z ——评价投影值的局部密度

$E(z)$ ——序列 $\{z(i) | i=1,2,\cdots,n\}$ 的平均值

R ——局部密度的窗口半径

$r(i,j)$ ——样本之间的距离

$u(R - r(i,j))$ ——单位阶跃函数, 当 $R - r(i,j) \geq 0$ 时, 其函数值为 1, 否则其值为 0

(3) 投影目标函数优化和最佳投影方向确定

当方案集给定时, 投影目标函数 $Q(a)$ 只随着投影方向的变化而变化, 可通过求解投影目标函数最大化来估计最佳投影方向, 即

$$\max(Q(a)) = S_Z D_Z \quad (8)$$

约束条件

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1 \quad (0 \leq a(j) \leq 1) \quad (9)$$

以 p 维变量 $a(j)$ 为优化变量的非线性优化问题, 传统的优化处理方法难以处理。本文采用的实码加速遗传算法 (RAGA) 利用模拟生物优胜劣汰规则与群体内部染色体信息交换的原理进行全局优化, 通过多元替代和叠加运算, 加强了计算结果的稳定性和精确性。

(4) 评价结果等级划分

把最佳投影方向 a 代入式 (4) 得到各样本的投影值 $z(i)$ 。目前关于 WEF 系统安全评价标准还没有统一, 本文依据评价指标本身和实际情况, 正向指标以能达到的极限值或目前的最高值作为非常安全的级别标准, 最低值作为非常不安全的限定值, 逆向指标以能达到的极限值或目前的最低值作为非常安全的级别标准, 最高值作为非常不安全的限定值, 在非常不安全和非常安全之间平均划分 5 个区间, 然后对各评价指标区间的右端点值运用模型进行上述处理, 得到标准样本投影值。绘制标准样本投影值散点图 (图 3), 建立等级评价模型, 评价等级最低为 1 等, 投影值越大等级越高, 等级越高系统越安全, 然后进行安全性评价及优劣排序, 系统安全程度划分为非常不安全 (I 级)、不安全 (II 级)、基本安全 (III 级)、比较安全 (IV 级) 和非常安全 (V 级) 5 个等级。

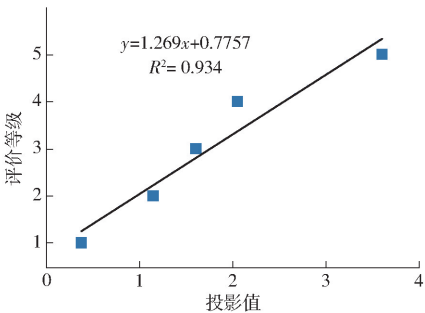


图 3 投影值与评价等级的关系

Fig. 3 Relationship of projection value and grade

1.4 数据来源

研究数据来自 1997—2016 年《新疆统计年鉴》、1997—2003 年《新疆水利统计资料汇编》、2004—2015 年《水资源公报》和 1997—2016 年《中国能源统计年鉴》。部分缺失的数据由所有历史年份的拟合值代替。

2 评价结果与分析

以 1997—2016 年新疆整体及 14 个市域指标数据为样本, 利用遗传投影寻踪模型, 对新疆 WEF 系统安全变化进行时空评价分析。在实码加速遗传计

算过程中,父代初始种群规模为 400,交叉概率 $p_c = 0.8$,变异概率 $p_m = 0.8$,优秀个数为 10 个,加速次数为 20 次。借助 Matlab 仿真计算,得到 1997—2016 年新疆整体和各市域 WEF 系统安全的投影值及对应的评价等级。

2.1 新疆 WEF 系统安全时间变化特征

1997—2016 年新疆 WEF 系统安全评价等级整体上处于稳步上升趋势(图 4),由最初的非常不安全状态逐渐改善到比较安全的状态。该评价结果与实际情况较为吻合,在研究时段初期,新疆的发展水平落后,水资源、能源和粮食的管理机制也还存在较多漏洞,导致 WEF 系统安全性较低;随着经济的发展,各部门的管理措施不断完善,对保持各资源可持续利用的关注度越来越高,WEF 系统安全程度也随之改善。

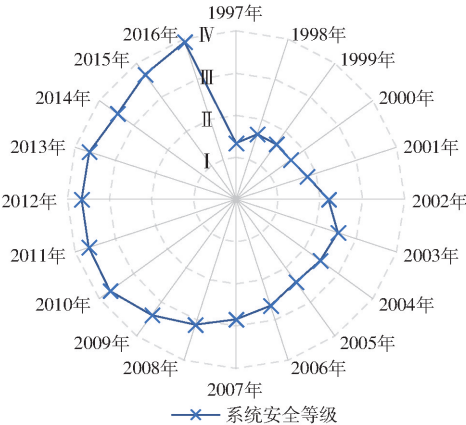


图 4 1997—2016 年新疆 WEF 系统安全等级

Fig. 4 WEF nexus security level of Xinjiang from 1997 to 2016

研究时段内,新疆市域 WEF 系统安全性主要包括不安全、基本安全及比较安全 3 种类型(图 5)。1997—2016 年,除克拉玛依市、乌鲁木齐市和吐鲁番市的 WEF 系统安全等级在降低外(克拉玛依市下降最快),其余地区均在上升,阿勒泰地区和克孜勒苏柯尔克孜自治州上升趋势最为明显。2009 年后多数市域系统安全等级发生明显变化,可划分为 1997—2009 年和 2010—2016 年前后两个阶段,变化率如图 6 所示。前一阶段,大多数市域的系统安全等级均呈上升趋势,吐鲁番市上升最快,克拉玛依市和乌鲁木齐市系统安全等级下降,克拉玛依市下降最明显。后一阶段,一半市域系统安全等级下降,克拉玛依市仍下降最快,在增长的市域中,阿勒泰地区的增长率最大。为具体分析各地区 WEF 系统年际变化情况,结合 2 个阶段安全等级的多年平均变化率,将不同市域的变化情况划分为 4 种模式:①增长加快模式,主要包括博尔塔拉蒙古自治州、伊犁哈萨克自治州、阿勒泰地区,这类市域 WEF 系统安全

性持续增加,且增长速率后期比前期更高。②增长减缓模式,主要包括哈密市、克孜勒苏柯尔克孜自治州、和田地区和塔城地区,这类市域 WEF 系统安全等级值前期增长比较明显,后期虽在增长但速率较慢。③先增后减模式,主要包括吐鲁番市、昌吉回族自治州、巴音郭楞蒙古自治州、喀什地区和阿阿克苏地区,这类市域 WEF 安全等级值前期增加后期减小。④降低加剧模式,主要包括克拉玛依市和乌鲁木齐市,这类市域 WEF 系统安全等级值在前后两个阶段均在降低,且后一阶段降低速率更高。总体而言,大部分市域前一阶段 WEF 系统安全发展态势良好,后一阶段增长速度放缓甚至呈下降趋势,表明近几年 WEF 系统安全受到一定的威胁,需要高度重视。

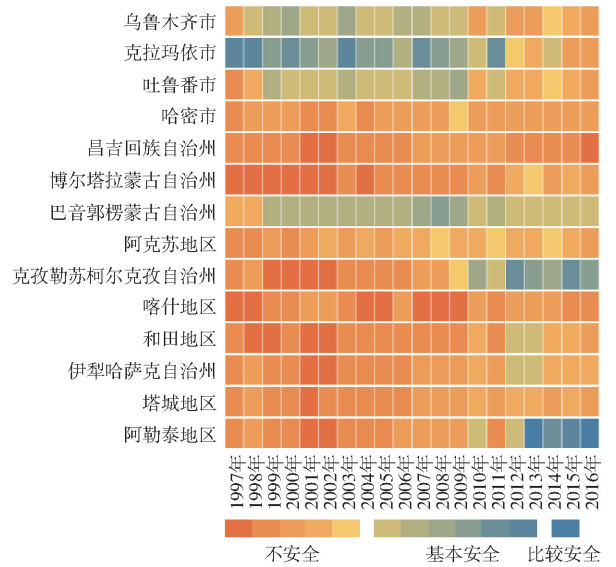


图 5 1997—2016 年新疆各地州市 WEF 系统安全等级

Fig. 5 WEF nexus security level of each region in Xinjiang from 1997 to 2016

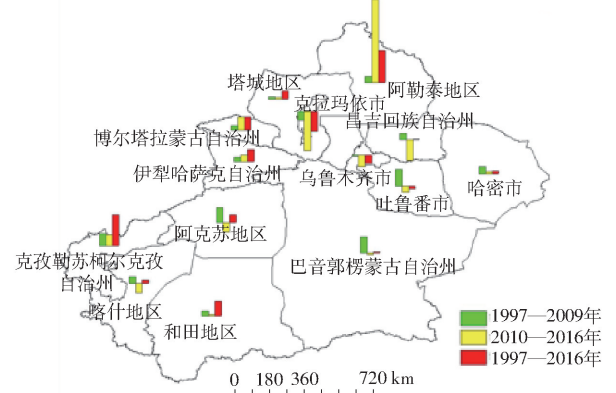


图 6 新疆各地州市 WEF 系统安全等级变化率

Fig. 6 Rate of WEF nexus security level's change of each region in Xinjiang

2.2 新疆 WEF 系统安全空间变化特征

为具体分析新疆市域 WEF 系统安全程度空间分异规律,选取两个阶段的首末端年份作为代表年(图 7)。1997 年,仅有克拉玛依市 WEF 系统处于

比较安全等级,其余地区均处于不安全状态,其中博尔塔拉蒙古自治州安全等级最低。2009 年,属于基本安全等级的市域增多,克拉玛依市安全等级仍最高,但安全等级较 1997 年下降了 11.9%,安全等级最低的是喀什地区,仅为 1.54,达到了研究时段中各市域等级的最小值。与 2009 年相比,2010 年大部分市域的 WEF 系统安全等级发生了显著变化,喀

什地区最为明显,安全等级是 2009 年的 1.35 倍,吐鲁番市下降最多,等级由 2009 年的 2.96 下降至 2.26,但同时市域间的等级差异减小。2016 年,阿勒泰地区 WEF 系统跃到比较安全状态,克孜勒苏柯尔克孜自治州和巴音郭楞蒙古自治州 WEF 系统达到基本安全状态,其余地区处于不安全范围内,但安全等级大于 2.00 的市域明显增多。

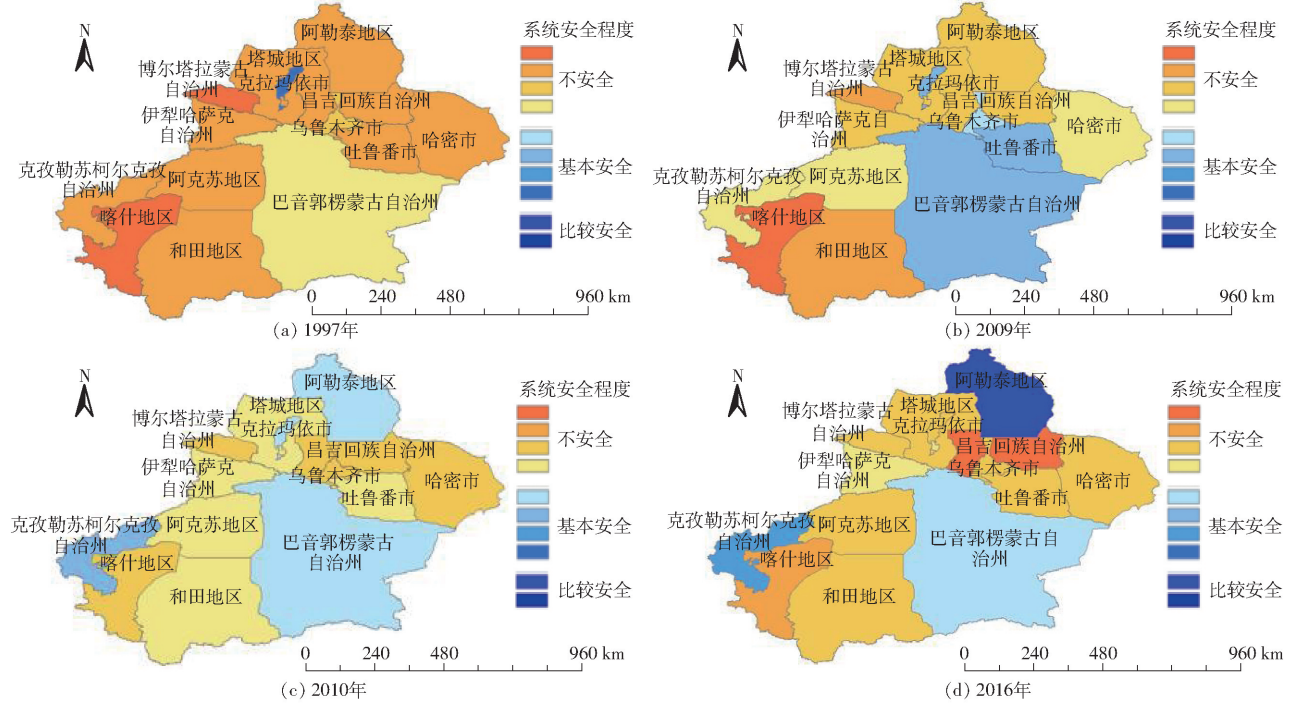


图 7 1997、2009、2010、2016 年新疆 WEF 系统安全水平空间格局

Fig. 7 Spatial patterns of water – energy – food nexus security in 1997, 2009, 2010 and 2016 of Xinjiang

2.3 影响因素分析

评价指标的最佳投影方向即指标权重,可以反映各指标对 WEF 系统安全性的影响程度,值越大则影响程度越大,同时意味着优先关注权重较大的指标因素,可以提高 WEF 系统综合安全。从最佳投影方向(图 8)可以看出,影响 WEF 系统安全性的因子以 2009 年为分界点发生了明显变化,故导致新疆各市域 WEF 系统安全性在前后两个阶段存在明显的差异。1997—2009 年,对 WEF 系统安全程度影响较大的指标依次是:能碳强度、第一产业能源消耗比例、农业用水比例、能源自给率、农业能源利用率、灌溉水利用系数。与前一阶段相比,2010—2016 年,影响因子的贡献程度发生了显著变化,由大到小依次为:能碳强度、可再生能源自给率、水资源开发利用率、人均水资源量、单位灌溉面积可利用水量。

对比前后两个阶段,可以发现,WEF 系统安全始终受能碳强度的较强影响,降低高碳能源的消费比例、提高低碳能源的消费比例和推广使用可再生能源是提高 WEF 系统安全的有效方法。其他处在前列影响因子均发生了变化,前一阶段主要影响集

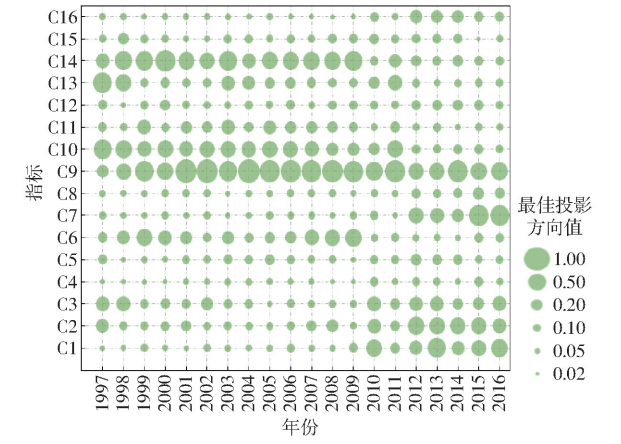


图 8 各指标最佳投影方向

Fig. 8 The best projection direction of each index

中在粮食产业的用水和用能方面,表明新疆在发展粮食产业的同时忽略了带给当地水资源和能源的严重压力,随着灌溉技术和农业机械水平的提高,情况有所好转。后一阶段影响因素发生转变,水资源安全问题逐渐暴露,究其原因主要与新疆经济发展有一定的关联。2010 年我国 19 个省市开展了新一轮对口援疆工作,以及之后“一带一路”倡议的提出,

这都为新疆跨越式发展提供了历史性机遇。国家针对新疆的资源优势,加大支持力度,吸引了众多国内外企业来新疆投资发展,但多以能源、化工等高污染产业为主,这势必会在推动经济发展的同时加剧新疆自身存在的水资源缺乏、环境脆弱等问题。因此近几年来,WEF 系统安全等级较高的地区,都是水资源相对富裕的地区;而水资源贫乏的地区,WEF 系统安全就会受到一定的威胁,这意味着在追求经济发展的同时,合理开发利用水资源应得到高度重视。

由于新疆各市域资源系统存在较大差异,以 2016 年为例,分别对各子系统市域投影值进行测算和排序(表 2),最终反映各市域 WEF 子系统的优劣并得到主要影响因子。WEF 系统安全达到基本安全级别以上(Ⅲ~Ⅳ级)的市域有阿勒泰地区、克孜勒苏柯尔克孜自治州和巴音郭楞蒙古自治州,该类市域丰富的水资源、矿产资源和可再生能源是保证系统安全的优势因素,但由于气候、地形等因素的影

响,该区耕地条件较差、种植环境恶劣,因此,合理地提高耕地质量,加大农业科技投入力度是提高系统安全性的有效手段。其余市域的 WEF 系统均呈不安全状态,其中,乌鲁木齐市、克拉玛依市、吐鲁番市和阿克苏地区的能源优势对当地 WEF 系统安全起积极作用,但能源的高耗水及水资源短缺是威胁 WEF 系统安全的主要因素,所以,通过提高能源用水效率,节约水资源可在一定程度上改善该类区域的 WEF 系统安全性。此外,阿克苏地区农业经济发展较快,需要加强节水灌溉技术的推广应用;塔城地区、博尔塔拉蒙古自治州、昌吉回族自治州和伊犁哈萨克自治州的粮食子系统具有优势,在发展粮食产业的同时,应尽可能提高水资源和能源等劣势资源的利用效率,减少农业耗水量和耗能量;哈密市、喀什地区和和田地区的各单一资源子系统安全水平均较差,两两资源子系统排名差异较大,因此,应结合当地特点,科学高效地利用各种资源,开源节流,同时保障各资源协调发展。

表 2 2016 年新疆 WEF 系统安全评价结果
Tab.2 WEF nexus safety evaluation results of Xinjiang in 2016

地区	水资源		能源		粮食		水-能源		水-粮食		能源-粮食		安全等级
	Y_1	排名	Y_2	排名	Y_3	排名	Y_4	排名	Y_5	排名	Y_6	排名	
乌鲁木齐市	0.42	11	0.57	6	0.02	13	0.80	10	1.27	1	0.92	3	Ⅱ
克拉玛依市	0.33	14	0.56	7	0.04	12	0.74	11	1.19	2	1.37	1	Ⅱ
吐鲁番市	0.41	12	0.58	5	0.00	14	0.87	9	0.90	4	0.87	5	Ⅱ
哈密市	0.55	8	0.37	13	0.13	11	0.72	12	0.88	5	0.92	2	Ⅱ
昌吉回族自治州	0.38	13	0.12	14	0.50	3	0.57	13	0.80	7	0.89	4	Ⅱ
博尔塔拉蒙古自治州	0.72	7	0.39	12	0.64	2	1.00	3	0.88	6	0.65	8	Ⅱ
巴音郭楞蒙古自治州	0.90	3	0.83	3	0.23	8	0.19	14	0.75	8	0.76	7	Ⅲ
阿克苏地区	0.42	10	0.66	4	0.37	5	0.90	8	0.54	11	0.65	9	Ⅱ
克孜勒苏柯尔克孜自治州	0.93	2	1.02	2	0.31	6	1.00	2	0.51	12	0.61	10	Ⅲ
喀什地区	0.42	9	0.41	9	0.28	7	1.00	1	0.44	14	0.41	14	Ⅱ
和田地区	0.74	5	0.40	11	0.22	9	1.00	5	0.51	13	0.59	11	Ⅱ
伊犁哈萨克自治州	0.89	4	0.42	8	0.37	4	0.93	6	0.56	10	0.76	6	Ⅱ
塔城地区	0.72	6	0.40	10	0.75	1	0.93	7	0.90	3	0.44	13	Ⅱ
阿勒泰地区	1.32	1	1.43	1	0.22	10	1.00	4	0.62	9	0.59	12	Ⅳ

注: $Y_1 \sim Y_6$ 分别为各子系统投影值。

3 讨论

WEF 系统安全综合评价是提高资源利用率和保证三者协调可持续发展的基础,同时也可对相关 部门采取改善措施提供指导。目前,我国在大力推进生态文明建设,以实现经济、社会和资源环境可持续发展,因此 WEF 系统安全评价可作为维持水资源、能源和粮食三者平衡关系的重要手段之一。

本文通过对新疆的实证分析,从各年份指标因子的权重变化可以看出,制约 WEF 系统安全性的主

导因素在不同时间存在差异,近年来,能碳强度和可再生能源是影响 WEF 系统安全较为突出的因素,不合理的能源消费结构以及化石能源的大量使用,不仅会造成环境的污染、资源的浪费,更会制约能源子系统的稳定和发展,进而威胁 WEF 系统安全;此外,水资源开发利用程度和可利用水资源量也对 WEF 系统安全影响显著,不合理地开发利用水资源不仅加剧水资源短缺问题,可能会导致开采过程中能源的浪费,灌溉用水紧缺,致使 WEF 系统安全形势更加严峻。各市域 WEF 系统安全的驱动因

素也存在差异,为加强新疆 WEF 系统安全性,提出 3 点措施:

(1) 加大节能减排资金投入,改进节能减排技术,提高能源和水资源的利用效率;调整产业结构,降低高碳能源使用,加大可再生能源生产,提高清洁能源使用比例。

(2) 各级政府应因地制宜,根据各市域资源情况及 WEF 系统安全水平的不同,有重点地开展 WEF 系统安全保护工作,以保障当地水资源、能源和粮食协调发展。

(3) 建立奖惩制度,减少食物浪费,增强公众节水节能意识;在不同平台开展活动大力宣传,使群众充分了解 WEF“纽带关系”,增强危机意识,调动全民保护 WEF 系统安全的积极性。

4 结论

(1) 在时间变化上,1997—2016 年新疆 WEF 系统安全整体呈逐渐好转的趋势,已达到比较安全等级。各市域 WEF 系统安全在 2009 年前后发生明显波动,前一阶段大部分地区 WEF 系统安全等级增

加,后一阶段增长速度放缓甚至呈下降趋势。

(2) 在空间变化上,1997—2016 年新疆 14 个市域 WEF 系统安全主要处于不安全、基本安全及比较安全 3 种级别。1997—2009 年克拉玛依市、乌鲁木齐市、吐鲁番市和巴音郭楞蒙古自治州长期处于基本安全等级,其余地区均为不安全等级;2010—2016 年阿勒泰地区达比较安全等级,克孜勒苏柯尔克孜自治州和巴音郭楞蒙古自治州处于基本安全等级,其余地区仍处于不安全等级,各市域 WEF 系统安全等级差异逐渐缩小。

(3) 1997—2009 年,能碳强度、第一产业能源消耗比例、农业用水比例、能源自给率、农业能源利用率和灌溉水利用系数是影响 WEF 系统安全性的主要因素;2010—2016 年,主要影响因素包括:能碳强度、人均水资源量、水资源开发利用率、可再生能源自给率和单位灌溉面积可利用水量,这些指标均可作为提升新疆 WEF 系统安全重点关注的因子。

(4) 2016 年各市域优劣势子系统和主要影响因子差异较大,应结合区域特点制定合理方案,以提高各市域 WEF 系统安全性。

参考文献

- [1] 曹连海,吴普特,赵西宁,等. 近 50 年河套灌区种植系统演化分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(7): 144 - 150. CAO Lianhai, WU Pute, ZHAO Xining, et al. Plantation system evolution analysis of Hetao irrigation district in recent 50 years [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7): 144 - 150. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140723&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.07.023. (in Chinese)
- [2] 刘丙军,陈晓宏,雷洪成,等. 流域水资源供需系统演化特征识别[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 331 - 336. LIU Bingjun, CHEN Xiaohong, LEI Hongcheng, et al. Distinguishing of water resources supply and demand system evolution features[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 331 - 336. (in Chinese)
- [3] DE AMORIM W S, VALDUGA I B, RIBEIRO J M P, et al. The nexus between water, energy, and food in the context of the global risks: an analysis of the interactions between food, water, and energy security[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2018, 72: 1 - 11.
- [4] DECLAN C, EMMA A G, DELPHINE D, et al. Climate and southern Africa's water - energy - food nexus[J]. Nature Climate Change, 2015, 5(9): 837 - 846.
- [5] GARCIA D J, YOU F. The water - energy - food nexus and process systems engineering: a new focus[J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 91: 49 - 67.
- [6] SMAJGL A, WARD J, PLUSCHKE L. The water - food - energy nexus-realising a new paradigm[J]. Journal of Hydrology, 2016, 533: 533 - 540.
- [7] LEESE M, MEISCH S. Securitising sustainability? questioning the 'water, energy and food-security nexus' [J]. Water Alternatives, 2015, 8(1): 695 - 709.
- [8] HOFF H. Understanding the nexus[C]//Background Paper for the Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.
- [9] Water - food - energy nexus in Asia and the Pacific Region[R]. UNESCAP, 2013.
- [10] Food and Agriculture Organization of United Nations. The water - energy - food nexus: a new approach in support of food security and sustainable agriculture[R]. Rome, 2014.
- [11] ZHANG C, CHEN X, LI Y, et al. Water - energy - food nexus: concepts, questions and methodologies[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 625 - 639.
- [12] ENDO A, BURNETT K, ORENCIO P, et al. Methods of the water - energy - food nexus[J]. Water, 2015, 7(10): 5806 - 5830.
- [13] CAI X, WALLINGTON K, SHAFIEE-JOOD M, et al. Understanding and managing the food - energy - water nexus e opportunities for water resources research [J]. Advances in Water Resources, 2018, 111: 259 - 273
- [14] BIGGS E M, BRUCE E, BORUFF B, et al. Sustainable development and the water - energy - food nexus: a perspective on livelihoods[J]. Environmental Science & Policy, 2015, 54: 389 - 397.
- [15] ALLOISIO I. The water - energy - food nexus[J]. Review of Environment, Energy and Economics, 2015, 19(2): 299 - 310.
- [16] RASUL G. Food, water, and energy security in South Asia: a nexus perspective from the Hindu Kush Himalayan region [J]. Environmental Science & Policy, 2014, 39(5): 35 - 48.
- [17] HOWARTH C, MONASTEROLO I. Understanding barriers to decision making in the UK energy - food - water nexus: the added value of interdisciplinary approaches[J]. Environmental Science & Policy, 2016, 61: 53 - 60.
- [18] LAWFORD R, BOGARDI J, MARX S, et al. Basin perspectives on the water - energy - food security nexus[J]. Current

- Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(6): 607–616.
- [19] WEITZ N, STRAMBO C, KEMP-BENEDICT E, et al. Closing the governance gaps in the water – energy – food nexus: insights from integrative governance[J]. Global Environmental Change, 2017, 45: 165–173.
- [20] VAKILIFARD N, ANDA M, A. BAHRI P, et al. The role of water – energy nexus in optimising water supply systems—review of techniques and approaches[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 82: 1424–1432.
- [21] 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.
- [22] DAHER B T, MOHTAR R H. Water – energy – food (WEF) nexus tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making[J]. Water International, 2015, 40(5–6): 748–771.
- [23] 李桂君, 黄道涵, 李玉龙. WEF 关联关系: 区域可持续发展研究的新视角[J]. 中央财经大学学报, 2016(12): 76–90.
- LI Guijun, HUANG Daohan, LI Yulong. Water – energy – food nexus (WEF-nexus): new perspective on regional sustainable development[J]. Journal of Central University of Finance & Economics, 2016(12): 76–90. (in Chinese)
- [24] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 等. 北京市 WEF 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 Guijun, LI Yulong, JIA Xiaojing, 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)
- [25] 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 Shaoming, ZHENG Xiaokang, WANG Yu, et al. Study on water – energy – food collaborative optimization for Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 681–690. (in Chinese)
- [26] 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 Caizhi, YAN Xiaodong. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources – energy – food nexus coupling system in China[J]. Water Conservation, 2018, 34(5): 1–8. (in Chinese)
- [27] 邓鹏, 陈菁, 陈丹, 等. 区域 WEF 耦合协调演化特征研究——以江苏省为例[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(6): 232–238.
- DENG Peng, CHEN Jing, CHEN Dan, et al. The evolutionary characteristics analysis of the coupling and coordination among water, energy and food: take Jiangsu Province as an example[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2017, 28(6): 232–238. (in Chinese)
- [28] 毕博, 陈丹, 邓鹏, 等. 区域水资源–能源–粮食系统耦合协调演化特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(2): 72–77.
- BI Bo, CHEN Dan, DENG Peng, et al. The evolutionary characteristics analysis of coupling and coordination of regional water – energy – food[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(2): 72–77. (in Chinese)
- [29] 程维明, 柴慧霞, 方月, 等. 基于水资源分区和地貌特征的新疆耕地资源变化分析[J]. 自然资源学报, 2012, 27(11): 1809–1822.
- CHENG Weiming, CHAI Huixia, FANG Yue, et al. Analysis of cultivated land based on water resources regionalization and geomorphologic characteristics in Xinjiang, China[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(11): 1809–1822. (in Chinese)
- [30] 胡见义, 彭苏萍, 李建忠, 等. 新疆能源产业发展战略与思考[J]. 中国能源, 2012, 34(1): 8–13.
- HU Jianyi, PENG Suping, LI Jianzhong, et al. Energy industry development strategy in Xinjiang and its considerations[J]. Chinese Energy, 2012, 34(1): 8–13. (in Chinese)
- [31] 宫兴龙, 付强, 邢贞相, 等. 土地利用方式对平原–丘陵–湿地交融区水资源的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 254–262.
- GONG Xinglong, FU Qiang, XING Zhenxiang, et al. Influence of land use on water resources in plain – hill – wetland blend area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 254–262. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180630&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.030. (in Chinese)
- [32] 陈亚宁, 徐长春, 杨余辉, 等. 新疆水文水资源变化及对区域气候变化的响应[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1331–1341.
- CHEN Yaning, XU Changchun, YANG Yuhui, et al. Hydrology and water resources variation and its responses to regional climate change in Xinjiang[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 64(11): 1331–1341. (in Chinese)
- [33] SCOTT C A, ALBRECHT T R, DE GRENADE R, et al. Water security and the pursuit of food, energy, and earth systems resilience[J]. Water International, 2018, 43(8): 1055–1074.
- [34] WANG Q, LI S, HE G, et al. Evaluating sustainability of water – energy – food (WEF) nexus using an improved matter-element extension model: a case study of China[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 202: 1097–1106.
- [35] LI G, HUANG D, SUN C, et al. Developing interpretive structural modeling based on factor analysis for the water – energy – food nexus conundrum[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 309–322.
- [36] 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.
- [37] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 基于实数编码的加速遗传算法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 32(4): 20–24.
- JIN Juliang, YANG Xiaohua, DING Jing. Real coding based acceleration genetic algorithm[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000, 32(4): 20–24. (in Chinese)
- [38] 魏新光, 王铁良, 刘春成, 等. 基于组合模型的辽宁省玉米水分盈亏量时空分布特征研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 193–202.
- WEI Xinguang, WANG Tieliang, LIU Chuncheng, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water budget based on combined model in Liaoning Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 193–202. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170625&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.025. (in Chinese)
- [39] MICHAEL D S. Statistical modeling of high-dimensional nonlinear systems: a projection solution[M]. Atlanta: Georgia Institute of Technology Press, 2005: 13–88.
- [40] 曹玖璞, 董淑福, 罗赞骞, 等. 遗传投影寻踪确定权重的网络仿真评价方法[J]. 计算机仿真, 2010, 27(10): 103–106, 262.
- CAO Jingpu, DONG Shufu, LUO Yunqian, et al. Evaluation of network performance using genetic projection pursuit model weighted method[J]. Computer Simulation, 2010, 27(10): 103–106, 262. (in Chinese)
- [41] 王茜茜, 周敬宣, 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.
- WANG Qianqian, ZHOU Jingxuan, LI Xiangmei, et al. A projection-pursuit based model for evaluating the resource-saving and environment-friendly society and its application to a case in Wuhan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(20): 6224–6230. (in Chinese)